

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SÀI GÒN

KHOA CÔNG NGHỆ THÔNG TIN



BÁO CÁO ĐỒ ÁN

*Học phần: Mạng truyền thông đa phương tiện*

## ĐỀ TÀI: COGNATIVE RADIO IN 4G

*Giảng viên hướng dẫn: TS.Huỳnh Minh Thiện*

*Sinh viên thực hiện: Trương Gia Thành – 3121410456*

Trương Công Tiên – 3121410503

TP. Hồ Chí Minh, tháng 11 năm 2025

## LỜI MỞ ĐẦU

Trước hết, nhóm chúng em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến, giảng viên **Ts.Huỳnh Minh Thiện** bộ môn **Mạng Truyền Thông Đa Phương Tiện** tại **Khoa Công nghệ Thông tin** tại **Trường Đại học Sài Gòn**. Thầy không chỉ là người truyền đạt kiến thức mà còn là nguồn động lực lớn để nhóm chúng em vượt qua những thử thách trong quá trình thực hiện đồ án. Sự tận tâm, kiên nhẫn và những ý kiến đóng góp mang tính định hướng của thầy đã giúp nhóm em hiểu rõ hơn về vấn đề, đồng thời hoàn thiện đồ án một cách tốt nhất trong khả năng. Chúng em rất biết ơn vì sự hỗ trợ của thầy trong từng giai đoạn, từ việc xác định vấn đề, định hướng nghiên cứu, đến việc kiểm tra, chỉnh sửa nội dung và hình thức báo cáo.

Chúng em cũng xin gửi lời cảm ơn chân thành đến các thầy cô tại **Trường Đại học Sài Gòn**, đặc biệt là các thầy cô trong Khoa Công nghệ Thông tin. Chính những bài giảng tận tâm của thầy cô, từ các môn đại cương giúp xây dựng nền tảng kiến thức cơ bản, đến các môn chuyên ngành trang bị kỹ năng chuyên sâu, đã mang đến cho chúng em một hành trang vững chắc. Kiến thức mà chúng em tích lũy được không chỉ dừng lại ở lý thuyết mà còn là nguồn cảm hứng để chúng em áp dụng vào thực tiễn, đặc biệt là trong đồ án này. Chúng em luôn trân trọng những nỗ lực không ngừng nghỉ của các thầy cô trong việc truyền đạt kiến thức, chia sẻ kinh nghiệm thực tế và khơi gợi niềm đam mê nghiên cứu trong lòng sinh viên.

Đồng thời, nhóm em cũng xin chân thành cảm ơn các bạn đồng hành, những người đã cùng nhóm chia sẻ những ý tưởng, hỗ trợ trong việc thu thập, xử lý dữ liệu và hoàn thiện báo cáo. Sự đoàn kết, tinh thần hợp tác và những ý kiến đóng góp từ các bạn đã giúp chúng em không ngừng tiến bộ.

Trong quá trình thực hiện đồ án, nhóm chúng em đã đối mặt với không ít khó khăn, từ việc lên kế hoạch, phân chia công việc, thu thập và xử lý dữ liệu, đến phân tích, trình bày và hoàn thiện báo cáo. Những khó khăn này không chỉ đến từ thời gian hạn hẹp hay lượng kiến thức cần áp dụng mà còn từ những kinh nghiệm thực tế chưa đủ chín chắn của nhóm. Tuy nhiên, nhờ sự hướng dẫn tận tình của thầy cô và sự hỗ trợ lẫn nhau trong nhóm, chúng em đã nỗ lực vượt qua và hoàn thành đồ án này.

Dù vậy, chúng em ý thức rằng đồ án của mình vẫn còn nhiều hạn chế và chưa thể đạt đến mức hoàn hảo. Do đó, chúng em rất mong nhận được những ý kiến đóng góp, nhận xét quý báu từ thầy cô và bạn bè để không ngừng học hỏi, hoàn thiện hơn trong tương lai. Những góp ý này không chỉ giúp cải thiện chất lượng đồ án mà còn là cơ hội để chúng em rèn luyện và phát triển bản thân, chuẩn bị tốt hơn cho những thử thách trong sự nghiệp sau này.

Một lần nữa, chúng em xin gửi lời cảm ơn chân thành nhất đến tất cả những ai đã đóng góp vào quá trình thực hiện đồ án này. Nhờ vào sự hướng dẫn, động viên và đồng hành của mọi người, chúng em đã có thể đi đến ngày hôm nay với một sản phẩm thể hiện sự cố gắng và tâm huyết của cả nhóm.

Xin kính chúc thầy cô luôn dồi dào sức khỏe, tràn đầy năng lượng và đạt được nhiều thành công hơn nữa trong sự nghiệp.

# DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1: Chu trình nhận thức .....	28
Hình 2: Kiến trúc cơ bản về phần mềm SDR .....	36
Hình 3: Mối quan hệ giữa CR và SDR .....	39
Hình 4: Kiến trúc CR phân tán trong LTE.....	43
Hình 5: Luồng xử lý dữ liệu phô.....	44
Hình 6: Khuôn khổ chức năng của DSA miêu tả luồng hoạt động bằng vòng tròn nhận thức thực tế .....	50
Hình 7: Mô hình Interweave/OSA .....	53
Hình 8: Mô hình Truy cập Lớp phủ dưới (Underlay).....	55
Hình 9: Các Mô hình Truy cập Lai (Hybrid) tối ưu kênh truyền .....	58
Hình 10: Mô hình Truy cập Phổ tần Động (DSA).....	71
Hình 11: Phân bổ Phổ: Tập trung so với Phân tán.....	73
Hình 12: Vai trò của Machine/Deep/Reinforcement Learning trong môi trường mạng vô tuyến .....	75
Hình 13: Các Giai đoạn của Quy trình Chuyển giao .....	81
Hình 14: Mô hình dựa trên Logic Mờ (Fuzzy Logic).....	90
Hình 15: Ứng dụng ML/DL trong Cognative Radio .....	93
Hình 16: Phổ quát hóa Chu kỳ Nhận thức sang các Lớp LTE .....	100
Hình 17: Các Sửa đổi Lớp Vật lý (PHY) cho Hoạt động Nhận thức .....	102
Hình 18: Truyền dẫn Linh hoạt và Quản lý Giao thoa .....	104
Hình 19: Femtocell Nhận thức (Cognitive Femtocell - CF).....	131
Hình 20: Mô Hình Trò chơi Stackelberg (Cho Nhiều Xuyên tầng) .....	144
Hình 21: Mô hình Trò chơi Không hợp tác (Non-cooperative Games) (Cho Nhiều Đồng tầng).....	145
Hình 22: Kỹ thuật Q-Learning trong Reinforcement Learning ứng dụng cho Cognative Radio.....	147
Hình 23: : Học tăng cường sâu (Deep Reinforcement Learning - DRL) .....	148
Hình 24: Ứng dụng Không gian Trắng Truyền hình (TV White Space - TVWS) cho Cognative Radio .....	155
Hình 25: Giải pháp 4G-LTE cho PSBN .....	175
Hình 26: Mô hình Distributed SELF-ORGANIZE-NETWORK .....	201
Hình 27: Centralize SELF-ORGANIZE-NETWORK .....	202
Hình 28: Mô hình kết hợp giữa C và D .....	203
Hình 29: Phổ tần Động (DSS): Cầu nối Nhận thức giữa 4G và 5G-NR .....	220
Hình 30: NR-Unlicensed (NR-U) - (LBT) .....	222

## DANH MỤC VIẾT TẮT

Tùi viết tắt	Ý nghĩa
3GPP	3rd Generation Partnership Project (Dự án Đối tác Thế hệ thứ 3)
5GC	5G Core (Lõi 5G)
ABS	Almost-Blank Subframes (Subframe Gần như Trống)
AI	Artificial Intelligence (Trí tuệ Nhân tạo)
CA	Carrier Aggregation (Tổng hợp Sóng mang)
CBRS	Citizens Broadband Radio Service (Dịch vụ Vô tuyến Băng thông rộng của Công dân)
CE	Cognitive Engine (Bộ máy Nhận thức)
CR	Cognitive Radio (Vô tuyến Nhận thức)
CRN	Cognitive Radio Network (Mạng Vô tuyến Nhận thức)
CSS	Cooperative Spectrum Sensing (Dò Phổ Hợp tác)
D2D	Device-to-Device (Giao tiếp Thiết bị-đến-Thiết bị)
DRL	Deep Reinforcement Learning (Học Tăng cường Sâu)

DSA	Dynamic Spectrum Access (Truy cập Phổ tần Động)
DSS	Dynamic Spectrum Sharing (Chia sẻ Phổ tần Động)
DQN	Deep Q-Network (Mạng Q-Learning Sâu)
eICIC	enhanced ICIC (ICIC Tăng cường)
eNB/eNode B	Evolved NodeB (Trạm gốc LTE)
EPC	Evolved Packet Core (Mạng lõi Gói Phát triển)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (Viện Tiêu chuẩn Viễn thông Châu Âu)
E-UTRAN	Evolved-UTRAN (Mạng truy cập vô tuyến Evolved-UTRAN)
FC	Fusion Center (Trung tâm Tổng hợp)
FeNB	Femto eNodeB (eNodeB Femto)
FLC	Fuzzy Logic Controller (Bộ điều khiển Logic Mờ)
FUE	Femto-UE (Thiết bị người dùng Femto)
GLSD	Geo-Location Spectrum Database (Cơ sở dữ liệu Định vị Địa lý)
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request (Yêu cầu Lặp lại Tự động Lai)

HeNB	Home eNodeB (eNodeB tại nhà)
HetNet	Heterogeneous Networks (Mạng Không đồng nhất)
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination (Điều phối Nhiều liên Tê bào)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Viện Kỹ sư Điện và Điện tử)
ISAC	Integrated Sensing and Communication (Cảm biến và Truyền thông Tích hợp)
KPI	Key Performance Indicators (Các Số liệu Hiệu suất Chính)
LAA	Licensed-Assisted Access (Truy cập được Hỗ trợ bằng Giấy phép)
LBT	Listen-Before-Talk (Nghe-trước-khi-nói)
LSA	Licensed Shared Access (Truy cập Chia sẻ được Cấp phép)
LTE	Long Term Evolution (Tiến hóa Dài hạn - 4G)
MAC	Media Access Control (Lớp Điều khiển Truy cập Phương tiện)
MARL	Multi-Agent Reinforcement Learning (Học Tăng cường Đa Tác nhân)
MeNB	Macro eNodeB (eNodeB Macro)
ML	Machine Learning (Học máy)

MME	Mobility Management Entity (Thực thể Quản lý Di động)
MUE	Macro-UE (Thiết bị người dùng Macro)
MUs	Malicious Users (Người dùng Độc hại)
NE	Nash Equilibrium (Cân bằng Nash)
NR-U	New Radio in Unlicensed (5G New Radio trong băng tần không phép)
NTN	Non-Terrestrial Networks (Mạng Phi Mặt đất)
NWDAF	Network Data Analytics Function (Chức năng Phân tích Dữ liệu Mạng)
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (Đa truy cập Phân chia theo Tần số Trục giao)
OSA	Opportunistic Spectrum Access (Truy cập Phổ tần Cơ hội)
PAWS	Protocol to Access White Space (Giao thức Truy cập Không gian Trắng)
PCC	Primary Component Carrier (Sóng mang Thành phần Chính)
PDCP	Packet Data Convergence Protocol (Giao thức Hội tụ Dữ liệu Gói)
PeNB	Pico eNodeB (eNodeB Pico)
P-GW	Packet Data Network Gateway (Cổng Mạng Dữ liệu Gói)

PHY	Physical Layer (Lớp Vật lý)
ProSe	Proximity Services (Dịch vụ Dựa trên Vùng lân cận)
PU	Primary User (Người dùng Chính/Sơ cấp)
PUEA	Primary User Emulation Attack (Tấn công Giả mạo Người dùng Chính)
QPs	Quiet Periods (Chu kỳ Im lặng)
RBs	Resource Blocks (Các Khối Tài nguyên)
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces (Bề mặt Thông minh Tái cấu hình)
RL	Reinforcement Learning (Học Tăng cường)
RLC	Radio Link Control (Điều khiển Liên kết Vô tuyến)
RRC	Radio Resource Control (Điều khiển Tài nguyên Vô tuyến)
SAS	Spectrum Access System (Hệ thống Truy cập Phổ tần)
SC-FDMA	Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (Đa truy cập Phân chia theo Tần số Đơn sóng mang)
SCC	Secondary Component Carrier (Sóng mang Thành phần Thứ cấp)
SDR	Software-Defined Radio (Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm)

SE	Stackelberg Equilibrium (Cân bằng Stackelberg)
S-GW	Serving Gateway (Cổng Phục vụ)
SHO	Spectrum Handoff (Chuyển giao Phô tần)
SSDF	Spectrum Sensing Data Falsification (Giả mạo Dữ liệu Dò Phô)
SU	Secondary User (Người dùng Thứ cấp)
SVM	Support Vector Machines (Máy Vector Hỗ trợ)
TTI	Transmission Time Interval (Khe con Truyền tải)
TVWS	TV White Space (Không gian Trắng Truyền hình)
UE	User Equipment (Thiết bị Người dùng)
WRAN	Wireless Regional Area Network (Mạng Khu vực Không dây)
PSBN	Public Safety Broadband Network

## BẢNG PHÂN CHIA CÔNG VIỆC

	MSSV	Tên thành viên	Công việc	Tiến độ
1	3121410456	Trương Gia Thành	Nghiên cứu + viết báo cáo	100%
2	31214100503	Trương Công Tiên	Viết báo cáo	100%

# MỤC LỤC

Chương 1: Yêu cầu cấp thiết về sự khan hiếm phổ tần và Giải pháp Nhận thức ....	22
1.1 Sự Khan hiếm và Mô hình Quản lý Phổ tần Tĩnh .....	22
1.2 Hiện tượng Lãng phí Phổ tần (Spectrum Underutilization) .....	22
1.3 Áp lực từ Nhu cầu Dữ liệu Băng thông rộng.....	23
1.4. Cognitive Radio là Giải pháp Cốt lõi.....	24
Chương 2: Tổng quan về Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) .....	24
2.1. Định nghĩa Chính thức của CR .....	24
2.2. Phân biệt CR và Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (SDR) .....	25
2.3. Khả năng cốt lõi của CR .....	26
2.4. Chu trình nhận thức (The Cognitive Cycle) .....	27
2.5. Phân loại và Kiến trúc Mạng CR Cơ bản .....	28
Chương 3: Mạng 4G: Giới thiệu về Kiến trúc LTE/LTE - Advanced .....	30
3.1. Tổng quan về Mạng 4G (LTE/LTE-Advanced) .....	30
3.2. Sự cần thiết của CR trong Mạng 4G/LTE .....	31
3.3. Các Kịch bản và Mô hình Ứng dụng CR trong LTE .....	32
3.4. Thách thức Kỹ thuật khi Tích hợp CR vào LTE .....	33
Chương 4: Sóng Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (SDR): Yếu tố Hỗ trợ Vật lý cho CR.....	34
4.1. Định nghĩa và Bối cảnh Lịch sử .....	34
4.2. Kiến trúc Khối chức năng của SDR.....	35
4.3. Khả năng Tái cấu hình (Reconfigurability) của SDR.....	36
4.4. SDR là Nền tảng Hỗ trợ Vật lý cho CR.....	37
Chương 5: Khung Kiến trúc để Tích hợp CR vào 4G .....	40
5.1. Mô hình Kiến trúc Phân lớp CR-LTE.....	40

5.2. Kiến trúc CR Tập trung (Centralized) trong LTE .....	41
<b>5.2.1. Cấu trúc Mạng .....</b>	<b>41</b>
5.3. Kiến trúc CR Phân tán (Distributed) trong LTE.....	42
5.4. Mô hình Tích hợp Lai (Hybrid Architecture) .....	45
Chương 6: Các truy cập phổ tần động .....	45
6.1 Giới thiệu: DSA là cho phép của Sóng vô tuyến Nhận thức .....	45
6.2 Khung chức năng của DSA: Chu trình Nhận thức trong Thực tế .....	47
<b>6.2.1 Nhận biết Phổ tần (Spectrum Sensing) .....</b>	<b>47</b>
<b>6.2.2 Quản lý Phổ tần (Spectrum Management).....</b>	<b>47</b>
<b>6.2.3 Chia sẻ Phổ tần (Spectrum Sharing).....</b>	<b>48</b>
<b>6.2.4 Di chuyển Phổ tần (Spectrum Mobility).....</b>	<b>48</b>
6.3 Phân loại các Mô hình Truy cập DSA .....	50
6.4 Phân tích sâu về Mô hình Interweave/OSA.....	52
6.5 Mô hình Truy cập Lớp phủ dưới (Underlay) .....	53
<b>6.5.1 Ưu điểm và Thách thức Cốt lõi.....</b>	<b>55</b>
<b>6.5.2 Phân tích sâu về Mô hình Underlay .....</b>	<b>56</b>
6.6 Các Mô hình Truy cập Lai (Hybrid): Tối ưu hóa Hiệu suất .....	57
<b>6.6.1 Cơ chế Hoạt động.....</b>	<b>57</b>
<b>6.6.2 Ưu điểm và Phân tích .....</b>	<b>58</b>
6.7 Các Kiến trúc cho việc Triển khai DSA .....	59
6.8 Kiến trúc DSA Tập trung và dựa trên Cơ sở dữ liệu .....	62
<b>6.8.1 Các Thành phần Cốt lõi và Quy trình Hoạt động .....</b>	<b>62</b>
<b>6.8.2 Phân tích sâu về Kiến trúc Tập trung.....</b>	<b>63</b>
6.9 Kiến trúc DSA Phân tán và Hợp tác .....	64
<b>6.9.1 Ưu điểm, Nhược điểm, và Mô hình Hợp tác .....</b>	<b>64</b>
<b>6.9.2 Áp dụng cho 4G và Phân tích .....</b>	<b>65</b>
6.10 Nghiên cứu Chuyên sâu Mạng 4G: Khung Truy cập Chia sẻ được Cấp phép (LSA).....	67
<b>6.10.1 Định nghĩa và Bối cảnh .....</b>	<b>67</b>

<b>6.10.2 Tiêu chuẩn hóa và Kiến trúc (ETSI và 3GPP).....</b>	67
<b>6.10.3 Phân biệt Cốt lõi: LSA so với DSA Cơ hội (OSA) .....</b>	68
Chương 7: Các Mô hình Truy cập Phổ tần Động (DSA) .....	69
7.1: Quyết định và Phân tích Phổ .....	69
7.2: Phân bổ Phổ: Tập trung so với Phân tán.....	71
7.3 Vai trò của AI, Học máy và Lý thuyết Trò chơi.....	73
Chương 8: Các Thuật toán Quản lý và Chia sẻ Phổ .....	75
<b>8.1 Giới thiệu: Vấn đề Căn bản của Tính Di động trong Mạng CRN .....</b>	75
<b>8.2 Phân định Khái niệm: Di động Phổ (Spectrum Mobility) và Chuyển giao Phổ (Spectrum Handoff) .....</b>	77
<b>8.3 Phân tích Chi tiết Quy trình Chuyển giao Phổ .....</b>	79
<b>8.4 Phân loại và So sánh các Chiến lược Chuyển giao Cốt lõi.....</b>	81
<b>8.5 Thảo luận Nâng cao: Chuyển giao Cứng (Hard) và Mềm (Soft) trong Bối cảnh CR .....</b>	85
<b>8.6 Tích hợp Quản lý Di động Phổ vào Kiến trúc 4G LTE.....</b>	87
<b>8.7 Các Thuật toán Ra quyết định Chuyển giao Thông minh và Tối ưu hóa.....</b>	89
<b>8.8 Phân tích Hiệu suất: Các Số liệu Đánh giá Chuyển giao Phổ.....</b>	93
<b>8.8.1 Các Số liệu Hiệu quả Hệ thống .....</b>	93
<b>8.8.2 Các Số liệu Chất lượng Dịch vụ (QoS) Người dùng .....</b>	94
Chương 9: Di động Phổ và Chuyển giao: Một Thách thức Quan trọng .....	96
9.1 Giới thiệu: Thách thức Tích hợp Tính "Cơ hội" vào Kiến trúc "Xác định" của 4G .....	96
<b>9.1.1 Bối cảnh: Nghịch lý triết học của CR-LTE .....</b>	96
<b>9.1.2 Nền tảng: Ngăn xếp Giao thức 4G LTE Tiêu chuẩn .....</b>	97
<b>9.1.3 Phổ quát hóa Chu kỳ Nhận thức sang các Lớp LTE .....</b>	98
9.2 Các Sửa đổi Lớp Vật lý (PHY) cho Hoạt động Nhận thức .....	100
<b>9.2.1 Tích hợp Dò Phổ (Spectrum Sensing) Nâng cao .....</b>	100
<b>9.2.2 Truyền dẫn Linh hoạt và Quản lý Giao thoa .....</b>	102
9.3 Điều chỉnh Sâu rộng Lớp Điều khiển Truy cập Phương tiện (MAC) .....	104

<b>9.3.1 Trung tâm của Thách thức: Lập lịch Nhận thức.....</b>	104
<b>9.3.2 Thiết kế và Tích hợp "Chu kỳ Im lặng" (Quiet Periods - QPs).....</b>	105
<b>9.3.3 Phân tích các Giao thức MAC Nhận thức (ví dụ: C-MAC) .....</b>	108
9.4 Tác động Gián tiếp đến Lớp RLC và PDCP .....	109
<b>9.4.1 Thách thức đối với Lớp Điều khiển Liên kết Vô tuyến (RLC).....</b>	109
<b>9.4.2 Tác động Tối thiểu đến Lớp PDCP .....</b>	111
9.5 Lớp RRC (Radio Resource Control): Bộ não Quản lý Chính sách Nhận thức .....	111
<b>9.5.1 Quảng bá Thông tin Hệ thống Nhận thức (Sensing) .....</b>	111
<b>9.5.2 Quản lý Tính di động của Phổ (Spectrum Mobility) .....</b>	114
<b>9.5.3 Thích ứng các Thủ tục RRC Hiện có (Tái sử dụng thay vì Phát minh lại) .....</b>	115
9.6 Khung Thiết kế Xuyên lớp (Cross-Layer): Yêu cầu Bắt buộc .....	117
<b>9.6.1 Phá vỡ các Rào cản Phân lớp Truyền thông .....</b>	117
<b>9.6.2 Vị trí của "Bộ máy Nhận thức" (Cognitive Engine - CE): RRC so với MAC .....</b>	118
9.7 Phân tích Kiến trúc Tích hợp và các Thách thức Triển khai .....	121
<b>9.7.1 Các Mô hình Kiến trúc: Overlay, Underlay, và Tích hợp .....</b>	121
<b>9.7.2 Những hiểu biết từ các Nền tảng Thực tế (srsRAN và 3GPP).....</b>	122
<b>9.7.3 Các Thách thức Triển khai Cốt lõi.....</b>	123
Chương 10: Điều chỉnh Ngăn xếp Giao thức 4G cho các Khả năng Nhận thức ...	124
10.1 Bối cảnh Thách thức Nhiều trong Mạng 4G HetNet .....	124
<b>10.1.1 Định nghĩa Kiến trúc 4G HetNet.....</b>	124
<b>10.1.2 Phân loại và Đặc điểm của Nhiều HetNet.....</b>	126
<b>10.1.3 Các Giải pháp Thông thường và Hạn chế của chúng .....</b>	127
10.2 Sóng Vô tuyến Nhận thức: Một Mô hình cho Mạng Femtocell Tự tổ chức .....	129
<b>10.2.1 Giới thiệu về Femtocell Nhận thức (Cognitive Femtocell - CF) ...</b>	129
<b>10.2.2 Các Mô hình Hoạt động của CR-HetNet .....</b>	131
<b>10.2.3 Lợi ích của CR trong Giảm thiểu Nhiều.....</b>	132

10.3 Áp dụng Chu trình Nhận thức để Giảm thiểu Nhiễu Xuyên tầng .....	133
<b>10.3.1 Cảm nhận (Sense) .....</b>	<b>133</b>
<b>10.3.2 Phân tích (Analyze).....</b>	<b>135</b>
<b>10.3.3 Quyết định (Decide) .....</b>	<b>135</b>
<b>10.3.4 Hành động (Act).....</b>	<b>136</b>
10.4 Các Kỹ thuật Quản lý Tài nguyên Vô tuyến (RRM) động dựa trên CR ...	137
<b>10.4.1 Kiểm soát Công suất Thích ứng (Adaptive Power Control - APC)</b>	<b>137</b>
<b>10.4.2 Lựa chọn Kênh và Phổ Động (Dynamic Channel Selection - DCS)</b>	<b>138</b>
<b>10.4.3 Các Kỹ thuật Kết hợp (Hybrid Techniques).....</b>	<b>139</b>
10.5 Các Mô hình Ra quyết định Nâng cao cho Quản lý Nhiễu .....	142
<b>10.5.1 Cách tiếp cận dựa trên Lý thuyết Trò chơi (Game Theory) .....</b>	<b>142</b>
<b>10.5.2 Cách tiếp cận dựa trên Học máy (ML) và Học tăng cường (RL)</b>	<b>145</b>
10.6 Phân tích Hiệu suất và các Thách thức Triển khai .....	150
<b>10.6.1 Đánh giá Hiệu suất và Cải thiện QoS (Mô phỏng) .....</b>	<b>150</b>
<b>10.6.2 Những thách thức và đánh đổi trong thực tế .....</b>	<b>151</b>
<b>10.6.3 Triển khai và Thủ nghiệm trên Testbed.....</b>	<b>152</b>
Chương 11: Trường hợp Sử dụng: Giảm thiểu Nhiễu trong Mạng Không đồng nhất (HetNets) 4G .....	153
11.1 Giới thiệu về TVWS: Một Nguồn tài nguyên Phổ tần Chiến lược cho Vô tuyến Nhận thức .....	153
<b>11.1.1 Định nghĩa TVWS và Bối cảnh Pháp lý.....</b>	<b>153</b>
<b>11.1.2 Tầm quan trọng Chiến lược: Đặc tính Truyền sóng và Ứng dụng .....</b>	<b>155</b>
11.2 Cơ chế Điều tiết và Kiến trúc Truy cập: Cơ sở dữ liệu Định vị Địa lý (GLSD).....	157
<b>11.2.1 Vai trò Trung tâm của GLSD .....</b>	<b>157</b>
<b>11.2.2 Giao thức IETF PAWS (RFC 7545).....</b>	<b>158</b>

<b>11.2.3 Cuộc tranh luận về Kiến trúc: Dò phô (Sensing) so với Cơ sở dữ liệu (Database) .....</b>	158
11.3 Các Tiêu chuẩn Hiện có cho Hoạt động TVWS: Phân tích so sánh.....	160
<b>11.3.1 IEEE 802.22 (WRAN): Mạng Vô tuyến Nhận thức "Thuần túy"</b>	160
<b>11.3.2 IEEE 802.11af (White-Fi): Phương pháp Tiếp cận "Thích ứng"</b>	160
<b>11.3.3 Phân tích So sánh và Bảng .....</b>	161
11.4 Thách thức và Giải pháp Tích hợp 4G/LTE vào TVWS .....	162
<b>11.4.1 Sự không tương thích về Triết lý Thiết kế.....</b>	163
<b>11.4.2 Nghiên cứu điển hình Kỹ thuật: Phân tích "Project Belgrade" (Microsoft) .....</b>	163
11.5 Thích ứng 3GPP cho Phổ tần Không cấp phép và Di động Phổ tần .....	165
<b>11.5.1 Các khái niệm 3GPP liên quan (LAA, MulteFire) .....</b>	165
<b>11.5.2 Quản lý Di động Phổ tần (Spectrum Mobility) và VHO .....</b>	166
11.6 Nghiên cứu Đển hình Triển khai Toàn cầu: Bằng chứng về Tính khả thi .....	167
<b>11.6.1 Nam Phi (Hội đồng Nghiên cứu Khoa học và Công nghiệp - CSIR) .....</b>	167
<b>11.6.2 Việt Nam (Bộ TT&amp;TT / Cục Tần số Vô tuyến điện - ARFM).....</b>	169
11.7 Kết luận: Đánh giá TVWS như một Trường hợp Sử dụng 4G-CR .....	170
<b>11.7.1 Tổng hợp những phát hiện chính .....</b>	170
<b>11.7.2 Thách thức Tích hợp 4G Cốt lõi.....</b>	170
<b>11.7.3 Triển vọng Tương lai: Di sản của 4G-TVWS .....</b>	171
Chương 12: Trường hợp Sử dụng: Khai thác Không gian Trắng Truyền hình (TVWS).....	171
12.1. Yêu cầu Bắt buộc về Truyền thông Trọng yếu: Từ Thất bại Tương tác đến Mạng Băng thông rộng .....	171
<b>12.1.1. Phân tích Thất bại Hệ thống của Vô tuyến Di động Mặt đất (LMR).....</b>	172
<b>12.1.2. Giải pháp 4G-LTE: Mô hình Mạng Băng thông rộng An toàn Công cộng (PSBN).....</b>	174

12.2. Xác định Lỗ hổng Phục hồi: Giới hạn của Mạng 4G Chuyên dụng trong Các Kịch bản Thảm họa.....	177
12.3. Vô tuyến Nhận thức: Tăng cường Khả năng Phục hồi và Dung lượng Mạng .....	180
<b>12.3.1. Trường hợp Sử dụng CR 1: Truy cập Phổ tần Động (DSA) để Tăng cường Dung lượng Khẩn cấp .....</b>	<b>181</b>
<b>12.3.2. Trường hợp Sử dụng CR 2: Mạng Ad-Hoc Không cần Cơ sở hạ tầng để Đảm bảo Tính liên tục.....</b>	<b>182</b>
<b>12.3.3. Trường hợp Sử dụng CR 3: Khả năng Tương tác Thích ứng Động .....</b>	<b>183</b>
12.4. Phân tích Kỹ thuật: Đảm bảo QoS Trọng yếu trong Môi trường Phổ tần Động.....	184
<b>12.4.1. Xung đột Trung tâm: QoS Tĩnh của 4G và Tính di động Động của CR.....</b>	<b>184</b>
<b>12.4.2. Các chiến lược Giảm thiểu: Khung nhận biết QoS (QoS-aware Frameworks).....</b>	<b>186</b>
12.5. Các Thách thức về Triển khai: An ninh, Quy định và R&D .....	187
<b>12.5.1. Thách thức An ninh: Tấn công Giả mạo Người dùng Chính (PUEA) .....</b>	<b>188</b>
<b>12.5.2. Khung pháp lý Hỗ trợ: Từ "Hỗn loạn" đến Phối hợp .....</b>	<b>189</b>
<b>12.5.3. Các nỗ lực Nghiên cứu &amp; Phát triển (R&amp;D) và Nền tảng Thủ nghiêm .....</b>	<b>190</b>
12.6. Tổng kết Chương: Vai trò của Vô tuyến Nhận thức là Lớp Phục hồi Thông minh.....	191
Chương 13: Trường hợp Sử dụng: An toàn Công cộng và Truyền thông Khẩn cấp .....	192
13.1 Giới thiệu: Hai Triết lý về Kết nối Không dây .....	192
13.2 Cách tiếp cận Tiêu chuẩn hóa Trực tiếp của IEEE đối với Sóng Vô tuyến Nhận thức .....	196
<b>13.2.1 IEEE 1900 (DySPAN): Khung lý thuyết cho DSA.....</b>	<b>196</b>
<b>13.2.2 IEEE 802.22: CR cho Mạng Khu vực Rộng (WRAN) .....</b>	<b>197</b>
<b>13.2.3 IEEE 802.11af: CR cho Mạng Cục bộ (WLAN) .....</b>	<b>198</b>

<b>13.2.4 Phân tích Động lực Thị trường của CR IEEE .....</b>	199
13.3 Các Cơ chế "Tương tự Nhận thức" Thực dụng của 3GPP trong Kỷ nguyên 4G/LTE .....	200
<b>    13.3.1 Mạng Tự tổ chức (SON) .....</b>	201
<b>    13.3.2 Điều phối Nhiều liên ô (ICIC / eICIC) .....</b>	204
13.4 Nghiên cứu Tình huống Phân đôi: Cuộc đụng độ trên Băng tần 5GHz ....	205
<b>    13.4.1 Bối cảnh: Động lực của 3GPP và Sự ra đời của LAA .....</b>	205
<b>    13.4.2 Vấn đề Cùng tồn tại: LBT của 3GPP so với CSMA/CA của IEEE .....</b>	206
13.5 Sự hội tụ trong 5G và Tương lai: Từ Cảnh tranh đến Tích hợp .....	210
13.6 Kết luận: Tổng hợp Sự phân đôi và Sự phát triển của nó.....	212
Chương 14: Sự phân đôi Tiêu chuẩn hóa: IEEE so với 3GPP .....	213
14.1. Tóm tắt Di sản 4G-CR: Nền tảng cho Mạng Lưới Linh hoạt.....	213
14.2. Sự Chuyển đổi Mô hình 5G: Từ "Nhận thức Phổ biến" sang "Quản lý Mạng lưới Nhận thức" .....	215
14.3. Các Công nghệ 5G THEN CHỐT Hiện thực hóa Nguyên tắc Nhận thức .....	218
<b>        14.3.1. Chia sẻ Phổ biến Động (DSS): Cầu nối Nhận thức giữa 4G và 5G-NR .....</b>	218
<b>        14.3.2. NR-Unlicensed (NR-U): Sự tiến hóa của "Lắng nghe trước khi nói" (LBT) .....</b>	220
<b>        14.3.3. Cắt lát Mạng (Network Slicing): Quản lý Tài nguyên Đa dịch vụ Nhận thức .....</b>	222
<b>        14.3.4. O-RAN và Bộ Điều khiển RAN Thông minh (RIC): Dân chủ hóa Trí tuệ Mạng .....</b>	224
14.4. Tầm nhìn 6G: Hướng tới Mạng Lưới Hoàn toàn Tự trị và Tích hợp AI Nguyên bản (AI-Native) .....	226
<b>        14.4.1. Mạng Lưới Tự động Hoàn toàn (Fully Autonomous Networks) .....</b>	226
<b>        14.4.2. Bề mặt Thông minh Tái cấu hình (RIS): Biến Môi trường Truyền sóng thành Tác nhân Nhận thức .....</b>	227

<b>14.4.3. Truyền thông Terahertz (THz): Yêu cầu Cấp thiết về Quản lý Phổ tần Nhận thức .....</b>	228
<b>14.4.4. Cảm biến và Truyền thông Tích hợp (ISAC): Biên giới Nhận thức Mới.....</b>	229
14.5. Thách thức An ninh và Tin cậy trong Kỷ nguyên Mạng Tự trị .....	230
<b>14.5.1. Bề mặt Tấn công Mới: Các Mối đe dọa đối với Mô hình AI/ML</b> .....	230
<b>14.5.2. Kiến trúc Không Tin cậy (Zero Trust Architecture - ZTA)</b> .....	233
<b>14.5.3. Thách thức về Quyền riêng tư trong Kỷ nguyên Cảm biến Mạng (ISAC) .....</b>	234
14.6. Lộ trình Tiêu chuẩn hóa và Thách thức Pháp lý: Từ 3GPP Rel-18 đến Tầm nhìn ITU-R IMT-2030 .....	235
<b>14.6.1. Tiêu chuẩn hóa AI/ML trong 3GPP (5G-Advanced) .....</b>	235
<b>14.6.2. Lộ trình hướng tới 6G (IMT-2030) .....</b>	236
<b>14.6.3. Những cân nhắc về Quy định và Chính sách Mới .....</b>	238
Chương 15: Sự phát triển của các Nguyên tắc 4G-CR thành 5G và xa hơn nữa ..	239
15.1. Giới thiệu: Sự Biến đổi từ Nhận thức Vô tuyến (CR) sang Trí tuệ AI-Native .....	239
15.2. Tái định nghĩa Chu trình Nhận thức trong 5G-Advanced và 6G .....	241
<b>15.2.1. "Sense" (Cảm nhận): Dò Phổ Động lực học dựa trên AI/ML.....</b>	241
<b>15.2.2. "Decide" (Quyết định): Quản lý Tài nguyên Vô tuyến (RRM) Thông minh và Chức năng Nhận thức Lõi .....</b>	243
<b>15.2.3. "Act" (Hành động): Từ Phân bổ Phổ tần đến Kiểm soát Môi trường Truyền sóng .....</b>	245
15.3. Các Cơ chế Chia sẻ Phổ tần Tiên tiến: Sự hội tụ của 3GPP và IEEE .....	246
<b>15.3.1. Phân tích Kỹ thuật: Dynamic Spectrum Sharing (DSS) trong 3GPP (Rel 15-17).....</b>	247
<b>15.3.2. NR-Unlicensed (NR-U): Cuộc chiến Cùng tồn tại trên Băng tần Không phép.....</b>	248
<b>15.3.3. Tiêu chuẩn Kế thừa và Vai trò Hiện tại: IEEE 802.22 (WRAN) và 802.19 .....</b>	250
15.4. Các Miền ứng dụng Mới cho Nguyên tắc Nhận thức trong 6G .....	252

<b>15.4.1. Mạng Phi Mặt đất ( NTN): Quản lý Phổ tần Động trong Không gian .....</b>	252
<b>15.4.2. Truyền thông Terahertz (THz): Thách thức Dò và Truy cập trong Băng tần Mới .....</b>	253
<b>15.4.3. Bề mặt Thông minh có thể Cấu hình lại (RIS): Môi trường như một Tác nhân Nhận thức.....</b>	254
<b>15.4.4. Vô tuyến Cộng sinh (Symbiotic Radio - SR): Tái định nghĩa Người dùng Sơ cấp và Thứ cấp .....</b>	255
<b>15.5. Ứng dụng Quản lý Tài nguyên Dựa trên Nhận thức (AI/ML) .....</b>	256
<b>15.5.1. Phân bổ Cắt lát Mạng (Network Slicing) Động .....</b>	256
<b>15.5.2. Đảm bảo Giao tiếp Độ trễ Cực thấp (URLLC).....</b>	257
<b>15.6. Thách thức An ninh Nâng cao: Tấn công và Phòng thủ trong Mạng Nhận thức 6G .....</b>	258
<b>15.6.1. Phân tích Tấn công Giả mạo Dữ liệu Dò Phổ (SSDF) .....</b>	259
<b>15.6.2. Phòng thủ dựa trên AI: Phát hiện Người dùng Độc hại .....</b>	260
<b>15.7. Kết luận: Tầm nhìn 6G là sự Hoàn thiện của Vô tuyến Nhận thức .....</b>	262
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	264

# Chương 1: Yêu cầu cấp thiết về sự khan hiếm phổ tần và Giải pháp Nhận thức

## 1.1 Sự Khan hiếm và Mô hình Quản lý Phổ tần Tĩnh

Mục tiêu cốt lõi của truyền thông vô tuyến là sử dụng phổ tần số điện tử, một nguồn tài nguyên vật lý có giới hạn, để truyền tải thông tin. Tuy nhiên, phổ tần, đặc biệt là các dải tần số dưới 6 GHz có khả năng lan truyền tốt, đang đối mặt với sự **khan hiếm** (scarcity) nghiêm trọng.

Sự khan hiếm này không hoàn toàn do thiếu phổ, mà chủ yếu do phương pháp quản lý truyền thống:

- **Mô hình cấp phép Tĩnh (Fixed Spectrum Allocation):** Theo quy định của các cơ quan quốc tế (như ITU) và quốc gia (như FCC ở Mỹ), phổ tần được phân bổ độc quyền cho một dịch vụ cụ thể (Primary User - PU) tại một khu vực địa lý trong một khoảng thời gian vô hạn. Ví dụ, một dải tần được dành riêng cho phát sóng truyền hình, một dải khác cho dịch vụ di động 3G/4G, v.v.
- **Hạn chế của mô hình tĩnh:** Mô hình này tạo ra các "tường ngăn cách" giữa các dịch vụ, dẫn đến việc thiếu sự linh hoạt và tái sử dụng phổ, đồng thời không phản ánh được nhu cầu sử dụng thực tế theo thời gian và không gian.

## 1.2 Hiện tượng Lãng phí Phổ tần (Spectrum Underutilization)

Trái ngược với nhận định về sự khan hiếm, các nghiên cứu đo lường phổ tần trên thực tế đã chỉ ra rằng, trong khi một số dải tần luôn bị quá tải, thì nhiều dải tần số khác được cấp phép lại bị sử dụng rất kém hiệu quả (underutilized).

- **Khái niệm Lỗ hổng Phổ (Spectrum Hole/Spectrum White Space):**
  - Lỗ hổng Phổ là một dải tần số cụ thể đã được cấp phép cho PU, nhưng tại một thời điểm và một vị trí địa lý nhất định, dải tần đó **không được PU sử dụng.**
  - Sự lãng phí này xảy ra do nhiều nguyên nhân:
    - **Tính chu kỳ:** Các PU (ví dụ: đài phát thanh, truyền hình) chỉ hoạt động vào những khung giờ nhất định.
    - **Tính cục bộ:** Cường độ sử dụng phổ rất khác nhau giữa các khu vực đô thị đông đúc và vùng nông thôn thưa thớt dân cư.
- **Kết quả đo lường:** Các dự án quan sát phổ (Spectrum Observatory) đã chứng minh rằng tỷ lệ phổ tần bị lãng phí có thể lên tới **70-85%** ở một số dải tần quan trọng, đặc biệt là phổ tần UHF (thường được dùng cho TV).

Sự mâu thuẫn giữa "khan hiếm quy định" và "lãng phí thực tế" đã tạo ra động lực mạnh mẽ nhất cho việc tìm kiếm một mô hình quản lý phổ tần mới.

### 1.3 Áp lực từ Nhu cầu Dữ liệu Băng thông rộng

Động lực kỹ thuật và thương mại chính thúc đẩy sự phát triển của CR là **sự bùng nổ lưu lượng dữ liệu di động** trên toàn cầu, đặc biệt kể từ khi mạng 4G (LTE) được triển khai.

- **Sự gia tăng Lưu lượng:** Sự phổ biến của điện thoại thông minh, máy tính bảng và các dịch vụ băng thông cao (như video độ nét cao, game online) đã làm tăng nhu cầu truyền dẫn dữ liệu lên gấp hàng chục, thậm chí hàng trăm lần.
- **Thách thức của 4G/LTE:** Mạng 4G/LTE, dù hiệu quả hơn các thế hệ trước, vẫn chủ yếu hoạt động trên các băng tần được cấp phép tĩnh. Sự tắc nghẽn

(congestion) tại các băng tần này là một thách thức lớn đối với việc duy trì Chất lượng Dịch vụ (QoS).

## 1.4. Cognitive Radio là Giải pháp Cốt lõi.

Trước bối cảnh khan hiếm phổ tần quy định, lãng phí phổ tần thực tế, và nhu cầu dữ liệu bùng nổ, **Vô tuyến Nhận thức (CR)** được coi là công nghệ đột phá để chuyển đổi mô hình quản lý phổ từ tĩnh sang **động**.

- **Truy cập Phổ Động (Dynamic Spectrum Access - DSA):** CR cho phép các thiết bị **Người dùng Thứ cấp (Secondary User - SU)** có khả năng:
  1. **Phát hiện** các lỗ hổng phổ (Spectrum Sensing).
  2. **Lựa chọn** kênh trống tối ưu (Spectrum Management).
  3. **Sử dụng** kênh đó một cách cơ hội.
  4. **Di chuyển** sang kênh khác khi PU quay lại (Spectrum Mobility).
- **Mục tiêu Cuối cùng:** Tối đa hóa hiệu quả sử dụng phổ tần mà vẫn đảm bảo rằng các SU **không bao giờ gây nhiễu có hại** (harmful interference) cho các PU có giấy phép.

# Chương 2: Tổng quan về Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR)

## 2.1. Định nghĩa Chính thức của CR

Vô tuyến Nhận thức (CR) được giới thiệu lần đầu tiên bởi Joseph Mitola III vào cuối thập niên 1990. CR được hình dung là một hệ thống truyền thông vô tuyến tự động có khả năng:

- **Quan sát môi trường (Awareness):** Nhận biết về các thông số hoạt động nội tại, môi trường vô tuyến xung quanh (phổ tần, nhiễu), các quy định pháp lý và nhu cầu của người dùng.
- **Học hỏi và Tự cấu hình (Learning and Self-Configuration):** Sử dụng các kỹ thuật trí tuệ nhân tạo (AI) để rút ra kiến thức từ các quan sát và tự động điều chỉnh các tham số hoạt động của mình theo thời gian thực để đạt được mục tiêu hiệu suất đã định.

CR không chỉ là một đài phát/thu (transceiver) mà là một hệ thống **thông minh** có khả năng ra quyết định dựa trên bối cảnh.

## 2.2. Phân biệt CR và Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (SDR)

Mặc dù thường được nhắc đến cùng nhau, CR và SDR là hai khái niệm khác nhau nhưng bổ sung cho nhau:

Tiêu chí	Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (SDR)	Vô tuyến Nhận thức (CR)
Vai trò	Công cụ nền tảng (Hardware-based flexibility)	Khả năng thông minh (Software-based intelligence)

<b>Mục tiêu</b>	Cho phép thay đổi các tham số vô tuyến thông qua phần mềm.	Tự động hóa quá trình thay đổi tham số đó một cách tối ưu.
<b>Khả năng</b>	<b>Tái cấu hình (Reconfigurability):</b> Có thể thay đổi tần số, công suất, điều chế.	<b>Nhận thức (Cognition):</b> Biết khi nào và cách thức thực hiện sự thay đổi đó.
<b>Tóm tắt</b>	SDR là công nghệ cho phép CR hoạt động. <b>CR = SDR + Trí tuệ (Intelligence).</b>	

### 2.3. Khả năng cốt lõi của CR

CR cần sở hữu hai khả năng kỹ thuật nền tảng để thực hiện chức năng DSA:

- Khả năng Nhận thức (Cognitive Capability):** Bao gồm tất cả các chức năng thu thập thông tin và xử lý dữ liệu để hiểu môi trường. Chức năng quan trọng nhất là **Cảm nhận Phổ (Spectrum Sensing)**.
- Khả năng Tái cấu hình (Reconfigurable Capability):** Là khả năng thay đổi các tham số vật lý của đài vô tuyến. Điều này bao gồm thay đổi tần số sóng mang, băng thông, kiểu điều chế, công suất phát, hoặc thậm chí là giao thức truyền thông. Khả năng này được cung cấp bởi nền tảng SDR.

## 2.4. Chu trình nhận thức (The Cognitive Cycle)

Chu trình Nhận thức là mô hình logic mô tả cách CR hoạt động. Đây là một vòng lặp kín, liên tục được thực hiện trong thời gian thực, cho phép hệ thống tự thích ứng.

### Giai đoạn 1: Cảm nhận (Sense)

- **Mục tiêu:** Thu thập thông tin từ môi trường vô tuyến, đặc biệt là phát hiện các Lỗ hổng Phổ (Spectrum Holes).
- **Hoạt động:** Thiết bị CR (SU) quét các dải tần số để tìm kiếm sự hiện diện của tín hiệu Người dùng Chính (PU).

### Giai đoạn 2: Phân tích (Analyze)

- **Mục tiêu:** Xử lý dữ liệu thu thập được thành kiến thức hữu ích.
- **Hoạt động:**
  - **Phân tích Phổ:** Xác định độ rộng, vị trí, và thời gian tồn tại của các lỗ hổng phổ.
  - **Phân tích Bối cảnh:** Đánh giá các yếu tố khác như chất lượng kênh (Channel Quality), yêu cầu QoS của người dùng, và quy định pháp lý liên quan đến dải tần đó.
  - **Học hỏi (Learning):** Sử dụng thuật toán học máy để dự đoán hành vi tương lai của PU.

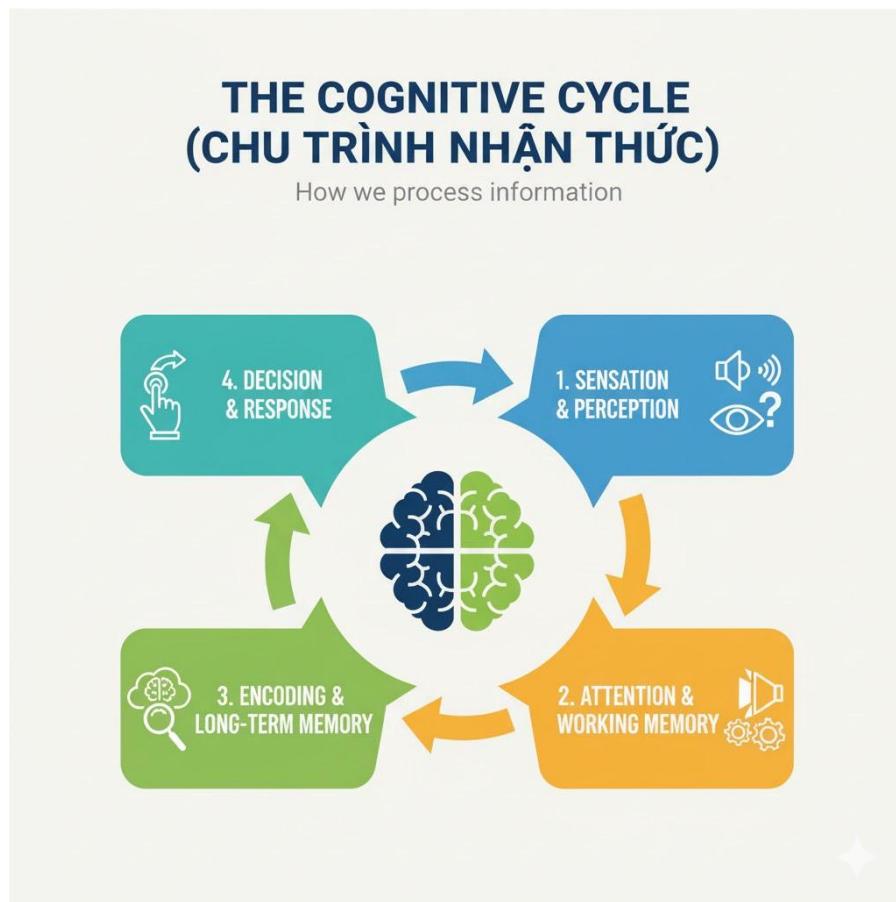
### Giai đoạn 3: Ra quyết định (Decide)

- **Mục tiêu:** Lựa chọn chiến lược truyền dẫn tối ưu.
- **Hoạt động:** Hệ thống CR thực hiện **Quản lý Phổ (Spectrum Management)**, đưa ra quyết định dựa trên mục tiêu tối ưu hóa (ví dụ: tối đa hóa thông lượng của SU nhưng đảm bảo nhiễu gây ra cho PU là tối thiểu). Quyết định bao gồm:

- Chọn kênh tần số nào.
- Sử dụng công suất phát bao nhiêu.
- Chọn kiểu điều chế và mã hóa nào.

#### Giai đoạn 4: Hành động (Act/Configure)

- **Mục tiêu:** Thực thi quyết định đã đưa ra bằng cách thay đổi cấu hình dài vô tuyến.
- **Hoạt động:** Sử dụng nền tảng SDR, CR điều chỉnh các tham số phần mềm/phần cứng để chuyển sang kênh đã chọn và bắt đầu truyền dữ liệu.



Hình 1: Chu trình nhận thức

## 2.5. Phân loại và Kiến trúc Mạng CR Cơ bản

Mục này giới thiệu các cách thức tổ chức hệ thống CR trong một mạng lưới lớn hơn.

### a. Phân loại dựa trên Quyền truy cập Phổ

Dựa trên cách SU tương tác với PU, CR được chia thành ba mô hình truy cập phổ động chính:

#### 1. Truy cập Cơ hội (Interweave):

- **Nguyên tắc:** SU chỉ được phép hoạt động khi và chỉ khi PU vắng mặt (trong lỗ hổng phổ).
- **Yêu cầu:** Đòi hỏi khả năng Cảm nhận Phổ rất chính xác.

#### 2. Truyền dưới Nền (Underlay):

- **Nguyên tắc:** SU có thể truyền đồng thời với PU, nhưng phải giới hạn công suất phát của mình ở mức rất thấp để đảm bảo tín hiệu của SU được coi là nhiễu nền và không gây hại cho PU.
- **Yêu cầu:** Đòi hỏi kiểm soát công suất phát rất chặt chẽ.

#### 3. Phủ lên (Overlay):

- **Nguyên tắc:** SU truyền đồng thời với PU, nhưng **hợp tác** bằng cách sử dụng các kỹ thuật mã hóa hoặc xử lý tín hiệu tiên tiến để hỗ trợ hoặc chủ động giảm nhiễu cho PU.

### b. Kiến trúc Mạng CR (CR Network Architectures)

Các mạng CR được tổ chức theo hai cấu trúc chính:

#### 1. Mạng CR Tập trung (Centralized CR Network):

- **Đặc điểm:** Một thực thể điều khiển tập trung (ví dụ: một trạm gốc hoặc trung tâm quản lý phổ) thu thập thông tin cảm nhận từ tất cả các SU, sau đó đưa ra quyết định và phân bổ phổ tàn cho từng SU.
- **Ưu điểm:** Tối ưu hóa toàn mạng tốt hơn.

- **Nhược điểm:** Dễ bị lỗi tại điểm tập trung (single point of failure), độ trễ cao.

## 2. Mạng CR Phân tán (Distributed CR Network):

- **Đặc điểm:** Các SU hoạt động độc lập, tự mình cảm nhận phô, đưa ra quyết định và tự cấu hình. Các SU có thể trao đổi thông tin cục bộ với nhau (Cooperative Sensing).
- **Ưu điểm:** Khả năng mở rộng cao, hoạt động linh hoạt, ít bị lỗi tập trung.
- **Nhược điểm:** Khó đảm bảo tối ưu hóa toàn bộ hệ thống và có nguy cơ xung đột (interference collision) cao hơn.

# Chương 3: Mạng 4G: Giới thiệu về Kiến trúc LTE/LTE

## - Advanced

### 3.1. Tổng quan về Mạng 4G (LTE/LTE-Advanced)

#### a. Kiến trúc và Công nghệ Cốt lõi của LTE

Kiến trúc Mạng: Giới thiệu kiến trúc Evolved Packet System (EPS), bao gồm mạng truy cập vô tuyến Evolved-UTRAN (E-UTRAN) (với các trạm gốc eNodeB) và mạng lõi Evolved Packet Core (EPC).

Kỹ thuật Truyền dẫn: Nhấn mạnh công nghệ OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) ở đường xuống (downlink) và SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) ở đường lên (uplink). OFDMA, với tính linh hoạt trong phân bổ tài nguyên tần số (Resource Block), là nền tảng kỹ thuật lý tưởng cho việc áp dụng CR.

#### b. Thách thức của Mạng 4G trong Quản lý Phổ tần

Mặc dù 4G có hiệu suất phổ cao, nó vẫn bị giới hạn bởi mô hình cấp phép tĩnh, dẫn đến các thách thức sau:

- **Khan hiếm Phổ**: Sự gia tăng lưu lượng dữ liệu khiến các băng tần được cấp phép bị quá tải, làm tắc nghẽn mạng ở các khu vực đô thị.
- **Vấn đề Mạng Heterogeneous (HetNet)**: Sự chồng chéo và nhiễu giữa các cell có kích thước khác nhau (Macro cell, Pico cell, Femto cell) gây khó khăn trong quản lý nhiễu.

### **3.2. Sự cần thiết của CR trong Mạng 4G/LTE**

Mạng 4G/LTE, dù là một bước tiến lớn, vẫn đối mặt với ba thách thức chính đòi hỏi phải có giải pháp linh hoạt từ CR:

- **Tăng Lưu lượng và Tắc nghẽn Phổ (Traffic Growth and Spectrum Congestion):**
  - Trình bày dữ liệu về tốc độ tăng trưởng lưu lượng di động (Mobile Data Traffic) hàng năm (ước tính tăng gấp 1000 lần trong 10 năm).
  - Phân tích rằng các băng tần được cấp phép cho LTE (từ 700 MHz đến 2.6 GHz) đã đạt đến giới hạn dung lượng ở các khu vực đô thị, dẫn đến tắc nghẽn nghiêm trọng và suy giảm tốc độ.
- **Thách thức của Kiến trúc Mạng Dị thể (HetNet Management):**
  - Giới thiệu kiến trúc HetNet (sử dụng Macro cell, Pico cell, và Femto cell).
  - Phân tích vấn đề **Nhiễu xuyên Cell (Inter-Cell Interference)** giữa các loại cell này. Quản lý tĩnh tần số không còn hiệu quả; cần có cơ chế động để các cell tự điều chỉnh tài nguyên tần số để tránh gây nhiễu cho nhau.
- **Chi phí mua Phổ (Spectrum Acquisition Cost):**

- Đề cập đến chi phí không lồ mà các nhà mạng phải chi ra để mua các băng tần mới trong các cuộc đấu giá. Điều này tạo ra động lực kinh tế để nhà mạng tìm kiếm các phương án sử dụng phổ tần không cấp phép rẻ hơn.

### **3.3. Các Kịch bản và Mô hình Ứng dụng CR trong LTE**

#### **Kịch bản 1: Mở rộng Băng thông (Carrier Aggregation - CA) Dựa trên CR**

Cơ chế: LTE-Advanced sử dụng Carrier Aggregation để kết hợp nhiều dải tần khác nhau thành một kênh truyền lớn hơn.

Tích hợp CR: CR được sử dụng để tìm kiếm thành phần sóng mang thứ cấp (Secondary Component Carrier - SCC) trong các băng tần không cấp phép (như TVWS).

- Thiết bị CR: Thiết bị người dùng (UE) và eNodeB được trang bị khả năng CR để cảm nhận kênh TVWS và báo cáo về tình trạng phổ tần.
- Hoạt động: Khi một kênh TVWS trống được phát hiện, eNodeB sẽ sử dụng nó như một SCC tạm thời. Khi PU quay lại, CR sẽ ngay lập tức dừng truyền trên SCC đó và UE chuyển về chỉ sử dụng sóng mang chính (PCC) được cấp phép.

#### **Kịch bản 2: Truyền Dưới nền (Underlay) cho Tín hiệu Băng thông rộng**

Mô hình Underlay: Áp dụng cho các dịch vụ băng thông rộng như LTE, nơi SU có thể truyền đồng thời với PU, miễn là công suất nhiễu tại máy thu của PU được giữ dưới một ngưỡng cực thấp.

Vai trò của CR: Hệ thống CR thực hiện Điều khiển Công suất Động (Dynamic Power Control).

- CR liên tục ước lượng khoảng cách và kênh truyền tới máy thu của PU.
- Dựa trên ước lượng, CR tính toán công suất phát tối đa mà SU có thể sử dụng mà vẫn đảm bảo giới hạn nhiễu (Interference Constraint) cho PU.
- Điều này đòi hỏi các thuật toán điều khiển rất phức tạp và tốc độ cao.

### Kịch bản 3: Tích hợp vào Mạng Mật độ cao (Dense/Heterogeneous Networks)

Vấn đề: Trong các HetNet, sự chồng chéo giữa vùng phủ sóng của các loại cell khác nhau gây ra nhiều xuyên cell nghiêm trọng.

Giải pháp CR:

- Phối hợp Nhiều Tự động (Self-Interference Coordination): CR cho phép các eNodeB (đặc biệt là các Small Cells) nhận thức về hoạt động của nhau.
- Ra quyết định Phân bổ Tài nguyên: Dựa trên cảm nhận môi trường, CR quyết định phân bổ các Khối Tài nguyên (Resource Blocks - RBs) tần số/thời gian cho người dùng một cách động, ưu tiên sử dụng các RBs đang bị trống hoặc ít nhiễu nhất.

### 3.4. Thách thức Kỹ thuật khi Tích hợp CR vào LTE

Thách thức	Mô tả và Liên kết với CR

<b>Độ chính xác Cảm nhận Phổ</b>	Nếu <b>Cảnh báo Nhầm (False Alarm)</b> cao, mạng LTE sẽ bỏ lỡ các kênh trống. Nếu <b>Bỏ sót Phát hiện (Missed Detection)</b> cao, mạng sẽ gây nhiễu cho PU, vi phạm quy định.
<b>Tốc độ Xử lý (Latency)</b>	Các quyết định CR phải được đưa ra và thực thi trong <b>mili giây</b> để phù hợp với tốc độ của LTE và kịp thời chuyển đổi khi PU xuất hiện.
<b>Độ phức tạp Thiết bị</b>	Việc tích hợp các bộ lọc linh hoạt và bộ xử lý tín hiệu tốc độ cao để thực hiện SDR/CR làm tăng <b>chi phí</b> và <b>tiêu thụ năng lượng</b> của UE.
<b>Giao thức Quản lý</b>	Cần có các giao thức mới tại <b>Lớp MAC</b> của LTE để hỗ trợ việc truyền thông tin cảm nhận và điều phối quyết định giữa eNodeB và UE.

## Chương 4: Sóng Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (SDR): Yêu tố Hỗ trợ Vật lý cho CR

### 4.1. Định nghĩa và Bối cảnh Lịch sử

- SDR là một hệ thống truyền thông vô tuyến trong đó các thành phần thường được hiện thực bằng phần cứng (như bộ điều chế, bộ giải điều chế, bộ trộn tần số, bộ lọc) được thay thế bằng phần mềm.

- Nguyên tắc cốt lõi: Việc chuyển đổi tín hiệu tương tự (Analog) thành tín hiệu số (Digital) được thực hiện càng gần ăng-ten càng tốt (Near-to-Antenna Digital Conversion). Sau đó, tất cả các chức năng xử lý tín hiệu và định tuyến được thực hiện trên các bộ xử lý linh hoạt (DSP, FPGA, CPU) thông qua phần mềm.
- Lịch sử: SDR ban đầu được phát triển để đáp ứng nhu cầu quân sự về các thiết bị vô tuyến có khả năng tương thích với nhiều chuẩn truyền thông khác nhau.

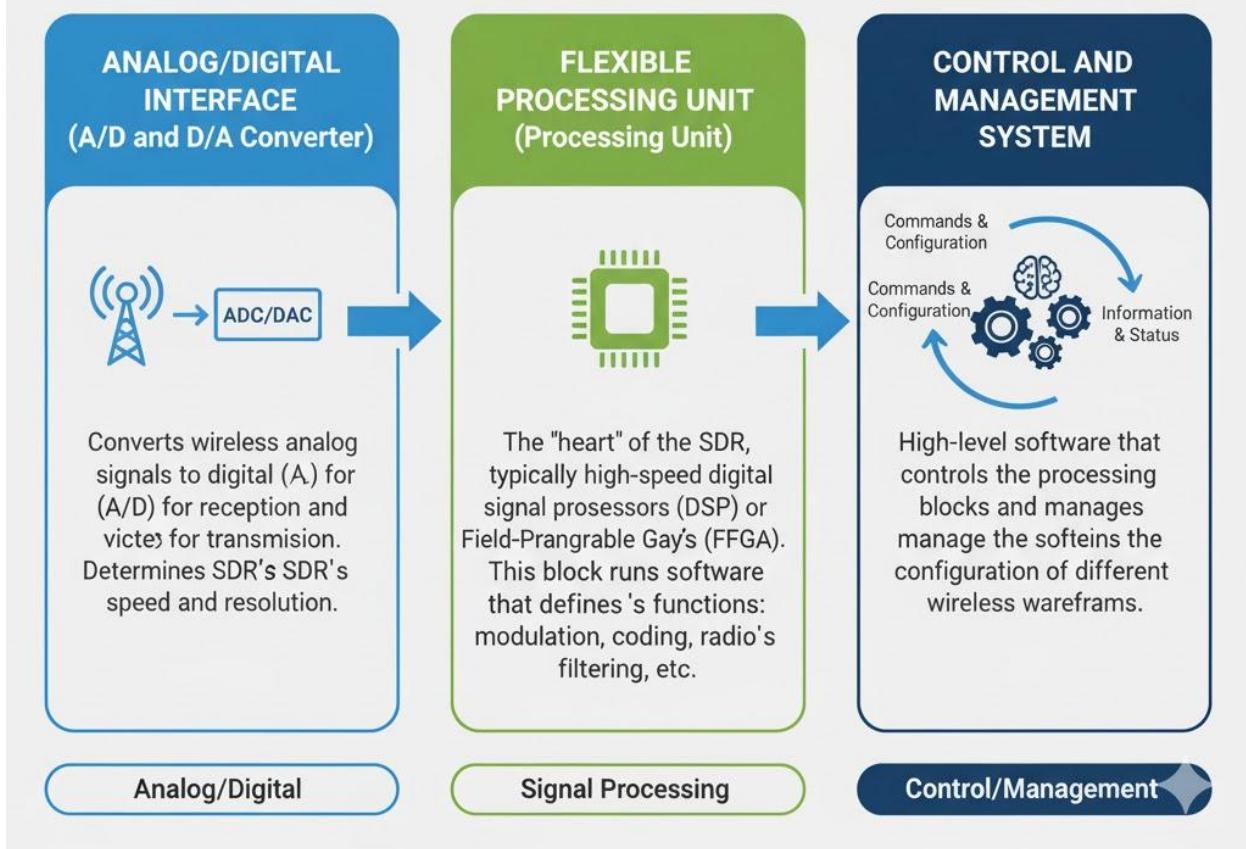
## 4.2. Kiến trúc Khối chức năng của SDR

Kiến trúc cơ bản của SDR bao gồm các khối chính sau:

- **Giao diện Tương tự/Số (A/D and D/A Converter):** Thiết bị chuyển đổi tín hiệu vô tuyến từ dạng tương tự sang số ở phía thu (A/D) và ngược lại ở phía phát (D/A). Độ linh hoạt của SDR phụ thuộc vào tốc độ và độ phân giải của khối này.
- **Bộ Xử lý Tín hiệu Linh hoạt (Flexible Processing Unit):** Là "trái tim" của SDR, thường là các bộ xử lý tín hiệu số tốc độ cao (DSP - Digital Signal Processor) hoặc Mảng cổng lập trình trường (FPGA - Field-Programmable Gate Array). Khối này chạy các phần mềm định nghĩa các chức năng điều chế, mã hóa, lọc, v.v.
- **Hệ thống Quản lý và Điều khiển (Control and Management System):** Đây là phần mềm cấp cao điều khiển các khối xử lý và quản lý việc tải/chạy các cấu hình vô tuyến khác nhau.

# SDR FUNCTIONAL BLOCK ARCHITECTURE

The Basic Architecture of SDR)



Hình 2: Kiến trúc cơ bản về phần mềm SDR

## 4.3. Khả năng Tái cấu hình (Reconfigurability) của SDR

### a. Các Tham số Tái cấu hình

SDR cho phép thay đổi các tham số sau mà không cần thay đổi phần cứng:

- **Tần số Sóng mang:** Thay đổi tần số trung tâm của kênh truyền. Điều này cho phép CR nhảy sang một kênh tần số hoàn toàn khác khi phát hiện ra lỗ hổng phổi.
- **Băng thông:** Thay đổi độ rộng băng thông được sử dụng, cho phép thiết bị thích nghi với các chuẩn khác nhau hoặc tối ưu hóa cho kênh truyền hiện tại.
- **Sơ đồ Điều chế và Mã hóa:** Thay đổi từ QPSK sang 16-QAM hoặc 64-QAM để tối ưu hóa tốc độ bit tùy theo Chất lượng Kênh (Channel Quality).
- **Giao thức Truyền thông:** Thiết bị có thể chuyển đổi linh hoạt giữa các chuẩn khác nhau (ví dụ: chuyển đổi từ chuẩn LTE sang Wi-Fi nếu đó là quyết định tối ưu của CR).

### b. Các Thách thức Kỹ thuật của SDR

Mặc dù SDR mang lại sự linh hoạt, nó cũng đối mặt với các thách thức kỹ thuật:

- **Hiệu suất:** Việc thực hiện các chức năng bằng phần mềm thường tiêu thụ nhiều năng lượng và tài nguyên tính toán hơn so với mạch tích hợp chuyên dụng (ASIC).
- **Độ trễ (Latency):** Việc xử lý và chuyển đổi cấu hình bằng phần mềm có thể gây ra độ trễ, điều này đặc biệt quan trọng trong các mạng tốc độ cao như 4G/LTE.
- **Chi phí A/D:** Để có độ linh hoạt cao, cần phải sử dụng các bộ chuyển đổi A/D có tốc độ lấy mẫu và độ phân giải rất cao, làm tăng chi phí và độ phức tạp của phần cứng.

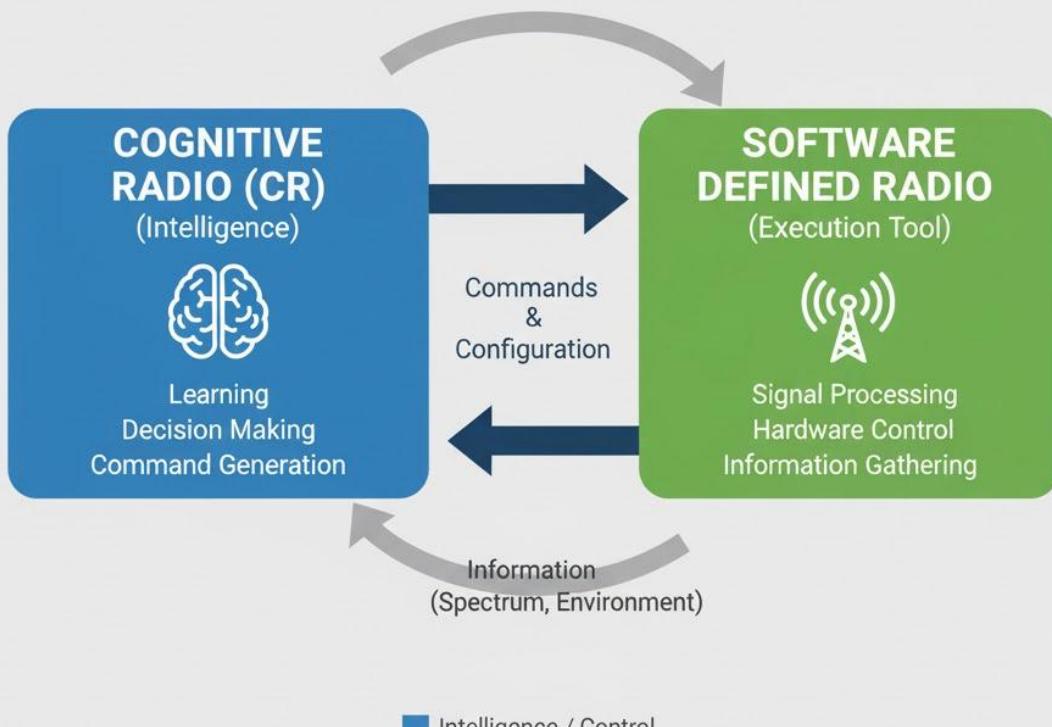
## 4.4. SDR là Nền tảng Hỗ trợ Vật lý cho CR

Mối quan hệ Cộng sinh (Symbiotic Relationship) :

- CR cung cấp Trí tuệ (Cognition): CR sử dụng thuật toán thông minh để ra quyết định dựa trên môi trường (Sense → Analyze → Decide).
- SDR cung cấp Sức mạnh (Action): SDR cung cấp khả năng vật lý (Configure/Act) để thực thi quyết định đó. Ví dụ:
  - Quyết định của CR: "Kênh 1 đang trống, hãy chuyển sang tần số f1 với điều chế 16-QAM."
  - Hành động của SDR: Tải phần mềm điều chế 16-QAM và cấu hình lại bộ dao động tần số để phát tại f1.

# THE SYMBIOTIC RELATIONSHIP BETWEEN CR & SDR

The Role of SDR in Cognitive Radio Systems



Hình 3: Mối quan hệ giữa CR và SDR

## Vai trò của SDR trong Mạng 4G

- **Phát triển và Triển khai Nhanh chóng:** SDR cho phép nhà mạng cập nhật và triển khai các tiêu chuẩn mới (ví dụ: từ LTE lên LTE-Advanced) chỉ bằng cách nâng cấp phần mềm cho các trạm gốc (eNodeB) mà không cần thay thế phần cứng.

- **Hỗ trợ Tích hợp CR:** Khả năng tái cấu hình của SDR là điều kiện tiên quyết cho việc tích hợp CR vào LTE để tận dụng các băng tần không cấp phép (TV White Space) hoặc các chức năng quản lý phổ động trong mạng HetNet.

## Chương 5: Khung Kiến trúc để Tích hợp CR vào 4G

### 5.1. Mô hình Kiến trúc Phân lớp CR-LTE

Để tích hợp CR vào LTE, các chức năng nhận thức phải được phân bổ xuyên suốt các lớp của giao thức LTE (Lớp vật lý, Lớp MAC, Lớp Mạng).

#### a. Lớp Vật lý (Physical Layer - L1)

Lớp này là nơi các chức năng cảm nhận và tái cấu hình vật lý diễn ra, được hỗ trợ bởi SDR

- **Chức năng CR: Cảm nhận Phổ (Spectrum Sensing).**
  - Thực hiện các thuật toán như Cảm nhận Năng lượng (Energy Detection) hoặc Cảm nhận Đặc trưng Chu kỳ Dừng (Cyclostationary Feature Detection) để phát hiện sự hiện diện của Người dùng Chính (PU).
- **Chức năng SDR: Tái cấu hình Tham số Truyền dẫn.**
  - Điều chỉnh động tần số sóng mang (carrier frequency) và băng thông (bandwidth).
  - Thay đổi sơ đồ điều chế (ví dụ: chuyển đổi QPSK ↔ 16-QAM) để tối ưu hóa tốc độ dữ liệu trên kênh mới.

#### b. Lớp Kiểm soát Truy cập Môi trường (MAC Layer - L2)

Lớp MAC chịu trách nhiệm quản lý việc truy cập kênh và phân bổ tài nguyên, đóng vai trò **ra quyết định** trung tâm của CR.

- **Chức năng CR: Quản lý Phổ (Spectrum Management) và Di chuyển Phổ (Spectrum Mobility).**
  - **Phân bổ Tài nguyên Động:** MAC sử dụng thông tin từ Lớp Vật lý để đưa ra quyết định tối ưu về việc sử dụng các khối tài nguyên (Resource Blocks - RBs) nào trong thời gian nào.
  - **Quản lý Nhiều:** Thiết lập các quy tắc để đảm bảo Người dùng Thứ cấp (SU) ngừng truyền ngay lập tức khi PU xuất hiện (Spectrum Mobility) và chuyển sang kênh khác.

### c. Lớp Mạng và Ứng dụng (Network & Application Layers)

Các lớp cao hơn xử lý các quyết định phức tạp hơn liên quan đến định tuyến, chất lượng dịch vụ (QoS) và tính toàn vẹn của mạng.

- **Chức năng CR: Ra quyết định Cấp độ Cao.**
  - Quyết định về việc sử dụng kênh phổ động cho loại lưu lượng dữ liệu nào (ví dụ: ưu tiên cho lưu lượng Video có yêu cầu QoS cao).
  - Định tuyến lưu lượng qua các kênh phổ động và kênh LTE cố định.

---

## 5.2. Kiến trúc CR Tập trung (Centralized) trong LTE

Trong mô hình tập trung, một thực thể trung tâm (thường là Trạm gốc LTE - eNodeB) chịu trách nhiệm quản lý phổ cho tất cả các thiết bị trong vùng phủ sóng.

### 5.2.1. Cấu trúc Mạng

- **Bộ điều khiển Phổ Tập trung (Spectrum Broker/Central Controller):** Được tích hợp vào hoặc đặt tại eNodeB. Đây là "bộ não" chính của CR, thu thập tất cả thông tin cảm nhận từ các Thiết bị Người dùng (UE).

- **Thiết bị Người dùng (UE):** Chỉ đóng vai trò là "cảm biến" (sensor), thực hiện chức năng cảm nhận phổ và gửi kết quả về eNodeB qua kênh điều khiển.

### 5.2.2. Luồng Xử lý Dữ liệu Phổ

1. **Cảm nhận (Sensing):** UE thực hiện cảm nhận phổ tại địa điểm của mình.
  2. **Báo cáo (Reporting):** UE gửi báo cáo về tình trạng phổ tần (ví dụ: phát hiện tín hiệu PU tại fx) tới eNodeB.
  3. **Quyết định (Decision):** eNodeB (Central Controller) tổng hợp báo cáo từ nhiều UE, đưa ra quyết định toàn cục về **Lỗ hổng Phổ** nào đang mở và kênh nào nên được sử dụng.
  4. **Phân bổ (Allocation):** eNodeB ra lệnh cho UE sử dụng kênh fy trong khoảng thời gian.
- **Ưu điểm:** Độ chính xác cao do có sự hợp tác cảm nhận tập trung. Dễ dàng điều phối và kiểm soát nhiều.
  - **Nhược điểm:** Tốn tài nguyên điều khiển (overhead) trên đường lên, độ trễ cao trong quá trình ra quyết định.

---

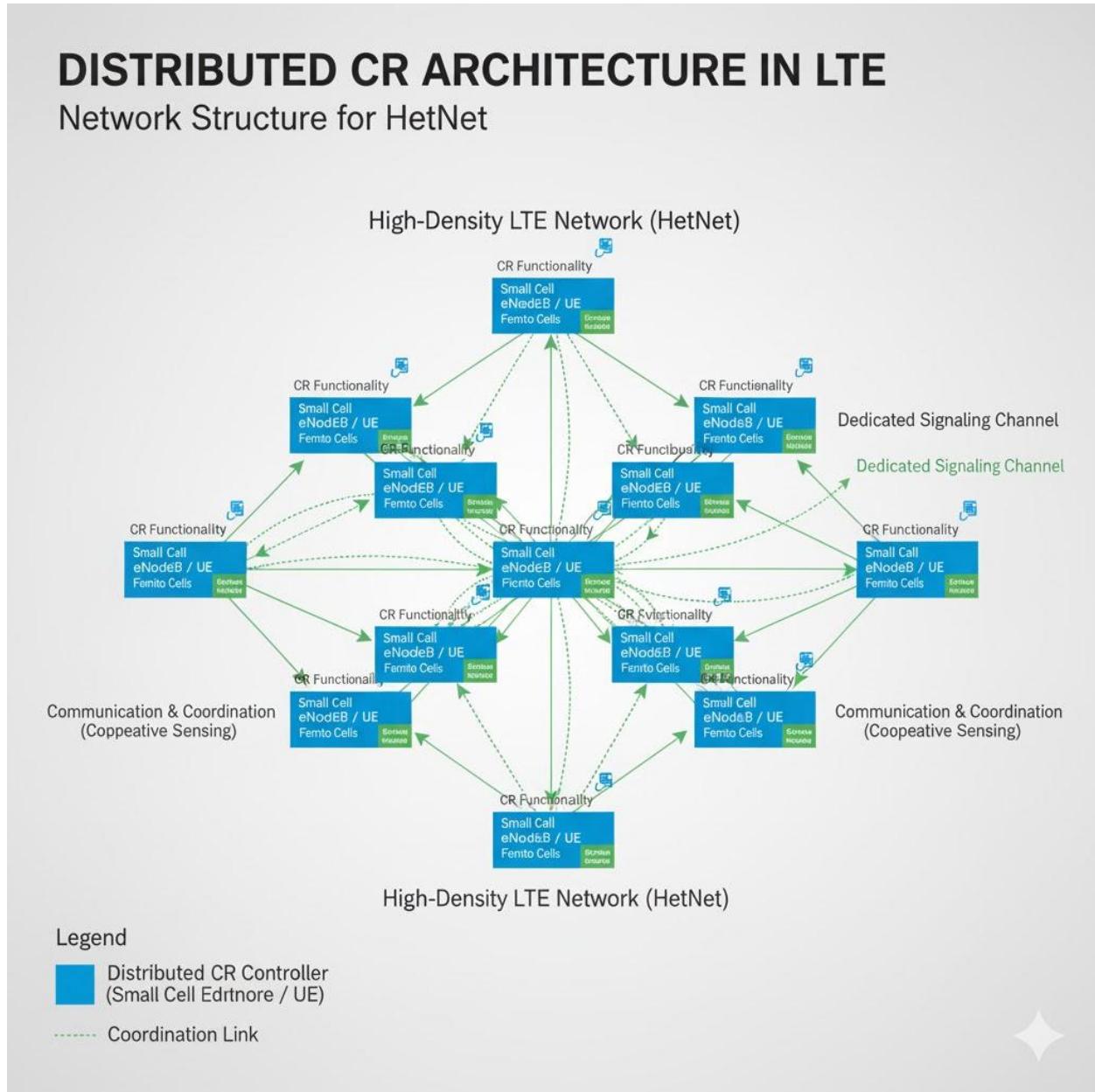
### 5.3. Kiến trúc CR Phân tán (Distributed) trong LTE

Trong mô hình phân tán, mỗi thiết bị (UE hoặc Small Cell eNodeB) tự đưa ra quyết định độc lập, phù hợp với các mạng LTE mật độ cao (HetNet).

#### 5.3.1. Cấu trúc Mạng

- **Bộ điều khiển Phân tán:** Chức năng CR được tích hợp vào chính UE hoặc các eNodeB công suất thấp (Pico/Femto Cells).

- **Giao tiếp (Coordination):** Các thiết bị trao đổi thông tin cục bộ với nhau (thường qua các kênh báo hiệu riêng) để phối hợp quyết định (Cooperative Sensing).



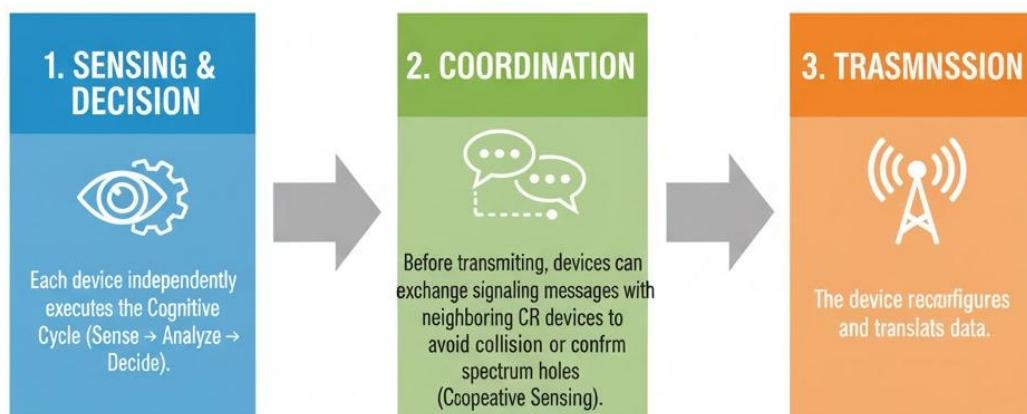
Hình 4: Kiến trúc CR phân tán trong LTE

### 5.3.2. Luồng Xử lý Dữ liệu Phố

1. **Cảm nhận và Quyết định:** Mỗi thiết bị tự thực hiện Chu trình Nhận thức (Sense → Analyze → Decide) một cách độc lập.

## SPECTRUM DATA PROCESSING FLOW

### In Distributed CR Architecture



Hình 5: Luồng xử lý dữ liệu phổ

2. **Phối hợp (Coordination):** Trước khi truyền, thiết bị có thể gửi tín hiệu báo hiệu tới các thiết bị CR lân cận để tránh xung đột (collision) hoặc xác nhận lỗ hổng phổ.
3. **Truyền dẫn:** Thiết bị tự cấu hình lại và truyền dữ liệu.
  - **Ưu điểm:** Độ linh hoạt và khả năng mở rộng cao. Độ trễ thấp trong quá trình ra quyết định.
  - **Nhược điểm:** Khó đảm bảo không gây nhiễu cho PU (Missed Detection). Nguy cơ xung đột giữa các SU cao hơn.

## 5.4. Mô hình Tích hợp Lai (Hybrid Architecture)

Thực tế, kiến trúc tối ưu cho 4G là mô hình lai (Hybrid), kết hợp ưu điểm của cả tập trung và phân tán:

- **Điều khiển Tập trung:** Được sử dụng để quản lý phổ tần không cấp phép (TVWS) trên quy mô lớn và đảm bảo tuân thủ quy định pháp luật.
- **Điều khiển Phân tán:** Được sử dụng cục bộ giữa các Small Cell để quản lý nhiều xuyêん cell (trong băng tần cấp phép) với độ trễ thấp.

Mô hình lai này là hướng nghiên cứu chính để tích hợp CR vào các mạng di động tiên tiến (LTE-A và xa hơn nữa).

## Chương 6: Các truy cập phổ tần động

### 6.1 Giới thiệu: DSA là cho phép của Sóng vô tuyến Nhận thức

Các mạng viễn thông di động, đặc biệt là 4G và các thế hệ kế tiếp, đang đối mặt với một thách thức cơ bản: sự gia tăng bùng nổ về nhu cầu dữ liệu không dây đi ngược lại với chính sách quản lý tài nguyên hữu hạn. "Sự khan hiếm phổ tần" (spectrum scarcity) được trích dẫn rộng rãi là rào cản chính. Tuy nhiên, sự khan hiếm này phần lớn là một cấu trúc nhân tạo, bắt nguồn từ các chính sách "phân bổ tần số tĩnh" (static frequency allocations). Các phép đo thực tế liên tục chỉ ra rằng phần lớn phổ tần được cấp phép, đặc biệt là bên ngoài các khu vực đô thị đông đúc, bị "sử dụng thưa thớt" (sparsely occupied) hoặc sử dụng không hiệu quả. Nghịch lý về một nguồn tài nguyên "khan hiếm" nhưng lại bị "lãng phí" này đã tạo ra một "tình trạng tắc nghẽn phổ tần" (spectrum gridlock) nghiêm trọng.

Để phá vỡ tình trạng tắc nghẽn này, một mô hình (paradigm) mới là Truy cập Phổ tần Động (Dynamic Spectrum Access - DSA) đã nổi lên như một công nghệ hứa hẹn nhất. Về cốt lõi, DSA là một phương pháp luận kỹ thuật và chính sách cho phép một hệ thống vô tuyến thích ứng động với môi trường phổ tần của nó. Thay vì bị khóa cứng vào một băng tần cố định, các thiết bị hỗ trợ DSA có thể "tái sử dụng" (reusing) một cách cơ hội các băng tần được cấp phép, miễn là chúng không "gây nhiễu"

(interfere) cho các chủ sở hữu giấy phép, còn được gọi là Người dùng Chính (Primary Users - PUs).

Tuy nhiên, DSA không tồn tại trong chân không; nó là cơ chế thực thi, hay "hành động", của một hệ thống thông minh hơn: Sóng vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR). CR được định nghĩa là một "đài phát thanh thông minh" (smart radio) có khả năng nhận biết môi trường xung quanh, học hỏi từ môi trường đó, và tự động thay đổi các tham số hoạt động của nó (như tần số, công suất, kiểu điều chế) để tối ưu hóa hiệu suất.

Mối quan hệ giữa CR và DSA là một mối quan hệ cộng sinh và không thể tách rời, thường được ví như mối quan hệ "não-thân".

1. **Sóng vô tuyến Nhận thức (CR) là "Bộ não":** CR cung cấp "trí thông minh" (intelligence), "xử lý nhận thức" (cognitive processing), và các chức năng "ra quyết định" (decision making). Nó trả lời các câu hỏi: Tần số nào đang rảnh? Tần số nào là tốt nhất cho ứng dụng của tôi? PU có khả năng xuất hiện khi nào?
2. **Truy cập Phổ tần Động (DSA) là "Cơ thể":** DSA là cơ chế vật lý và giao thức mà qua đó CR "thực thi" các quyết định của mình. Nó là tập hợp các hành động cho phép đài phát thanh thực sự truy cập và sử dụng các cơ hội phổ tần mà CR đã xác định.

Nếu không có "nhận thức" (cognition) của CR, DSA chỉ đơn thuần là một hệ thống chuyển mạch kênh (channel switching) được lập trình sẵn, không thể thích ứng với một môi trường không dây động và không thể đoán trước. Ngược lại, một CR không có DSA chỉ là một cảm biến (sensor) thụ động; nó có thể nhận biết một cách thông minh các cơ hội phổ tần nhưng không có cơ chế để hành động và khai thác chúng. Do đó, sự đổi mới thực sự nằm ở sự kết hợp của trí thông minh (CR) và hành động (DSA).

Quan trọng hơn, sự ra đời của DSA không chỉ là một tiến bộ kỹ thuật; nó là một thách thức trực tiếp đối với mô hình kinh tế và pháp lý hàng thế kỷ về quản lý phổ tần. Nó thách thức mô hình "quyền sở hữu phổ tần" (spectrum property rights) truyền thống, nơi một thực thể duy nhất sở hữu độc quyền một băng tần, bất kể họ có sử dụng nó hay không. Bằng cách cho phép tái sử dụng một tài nguyên đã được cấp

phép mà không cần sở hữu, DSA về cơ bản tạo ra một thị trường thứ cấp (secondary market) cho phổ tần. Điều này có ý nghĩa sâu sắc đối với các cơ quan quản lý (như FCC ở Mỹ, ETSI ở Châu Âu) và các mô hình kinh doanh của nhà mạng, báo hiệu một sự chuyển dịch từ sở hữu độc quyền tĩnh sang chia sẻ động và hiệu quả.

## 6.2 Khung chức năng của DSA: Chu trình Nhận thức trong Thực tế

Để thực hiện DSA một cách hiệu quả, một hệ thống Sóng vô tuyến Nhận thức (CR) phải liên tục thực thi một quy trình lặp đi lặp lại được gọi là "chu trình nhận thức" (cognitive cycle). Chu trình này là khung chức năng (functional framework) định nghĩa cách "trí thông minh" xử lý thông tin và phản ứng với môi trường. Nó bao gồm bốn chức năng chính liên quan mật thiết với nhau.

### 6.2.1 Nhận biết Phổ tần (Spectrum Sensing)

Đây là chức năng cơ bản và quan trọng nhất trong chu trình nhận thức. Mục tiêu chính của nó là "thu thập thông tin" (input) về môi trường vô tuyến. Chức năng này thực hiện hai nhiệm vụ quan trọng:

- Phát hiện Người dùng Chính (PU):** Xác định sự hiện diện của các tín hiệu từ người dùng được cấp phép (licensed user). Đây là nhiệm vụ quan trọng nhất để đảm bảo rằng Người dùng Thứ cấp (Secondary User - SU) không gây nhiễu có hại.
- Xác định Lỗ hổng Phổ tần (Spectrum Holes):** Phát hiện các băng tần không được sử dụng, còn được gọi là "không gian trắng" (white spaces). Đây là những cơ hội mà SU có thể khai thác.

Các kỹ thuật nhận biết phổ tần rất đa dạng, từ các phương pháp đơn giản như "Phát hiện Năng lượng" (Energy Detection) đến các phương pháp phức tạp hơn như "Phát hiện Đặc trưng Cyclostationary" (Cyclostationary Feature Detection).

### 6.2.2 Quản lý Phổ tần (Spectrum Management)

Sau khi dữ liệu cảm biến được thu thập, chức năng Quản lý Phổ tần sẽ thực hiện "xử lý nhận thức" (cognitive processing) để đưa ra quyết định. Đây là "bộ não" thực sự của chu trình, biến dữ liệu thô thành một kế hoạch hành động. Nó thường bao gồm hai bước :

- Phân tích Phổ tần (Spectrum Analysis):** Không chỉ xác định các lỗ hổng, mà còn đặc điểm hóa (characterize) chúng. Các đặc điểm này có thể bao gồm băng thông, Tỷ số Tín hiệu trên Nhiễu (SNR) dự kiến, và quan trọng nhất là thời gian tồn tại dự kiến của lỗ hổng.
- Quyết định Phổ tần (Spectrum Decision):** "Lựa chọn kênh tốt nhất" (select the best available channels)<sup>14</sup> từ các cơ hội đã được phân tích. Quyết định này phải cân bằng giữa các đặc điểm của lỗ hổng với các yêu cầu Chất lượng Dịch vụ (QoS) cụ thể của ứng dụng SU (ví dụ: một cuộc gọi VoIP cần độ trễ thấp, trong khi một bản cập nhật phần mềm nền có thể ưu tiên băng thông).

### 6.2.3 Chia sẻ Phổ tần (Spectrum Sharing)

Chức năng này giải quyết một vấn đề khác biệt nhưng cũng quan trọng không kém: làm thế nào để "cùng tồn tại" (coexisting) với các Người dùng Thú cáp (SU) khác đang cạnh tranh cho cùng một lỗ hổng phổ tần. Nếu Quản lý Phổ tần giải quyết mối quan hệ SU-PU, thì Chia sẻ Phổ tần giải quyết mối quan hệ SU-SU. Đây là một thách thức điều phối (coordination challenge) đòi hỏi các giao thức Truy cập Môi trường (MAC) tinh vi để đảm bảo nhiều SU có thể truy cập nhóm tài nguyên chung một cách hiệu quả mà không gây nhiễu lẫn nhau.

### 6.2.4 Di chuyển Phổ tần (Spectrum Mobility)

Di chuyển Phổ tần là chức năng "phản ứng" (reaction) của hệ thống. Nó được định nghĩa là khả năng của một SU duy trì "giao tiếp liền mạch" (seamless communication) khi phải "di tản" (vacate) khỏi kênh đang sử dụng. Việc di tản này là bắt buộc và có thể xảy ra vì hai lý do chính:

- Sự xuất hiện trở lại của PU:** Nếu Nhận biết Phổ tần phát hiện PU quay trở lại băng tần, SU phải ngay lập tức ngừng truyền và chuyển đi.<sup>18</sup>
- Suy giảm Chất lượng Kênh:** Nếu chất lượng (QoS) của kênh hiện tại suy giảm (ví dụ: do nhiễu từ các SU khác).

Quá trình này, được gọi là "phổ tần chuyển giao" (spectrum handoff), đòi hỏi CR phải nhanh chóng quay lại bước Quản lý Phổ tần để chọn một kênh thay thế tốt và chuyển đổi giao tiếp sang kênh đó mà không làm gián đoạn dịch vụ.

Bốn chức năng này không phải là các bước rời rạc, tách rời. Thay vào đó, chúng tạo thành một vòng lặp phản hồi (feedback loop) liên tục, tốc độ cao và phụ thuộc lẫn nhau. Hiệu suất của toàn bộ hệ thống DSA bị giới hạn bởi thành phần chức năng yếu nhất trong chu trình. Ví dụ, một lỗi trong bước "Nhận biết" (ví dụ: một "báo động sai" - false alarm, nghĩ rằng kênh bận trong khi nó rảnh) sẽ dẫn đến một quyết định tồi trong bước "Quản lý" (bỏ qua một cơ hội tốt), làm cho việc "Chia sẻ" không còn ý nghĩa và có thể kích hoạt một cuộc "Di chuyển" không cần thiết, làm lãng phí năng lượng và thời gian tính toán.

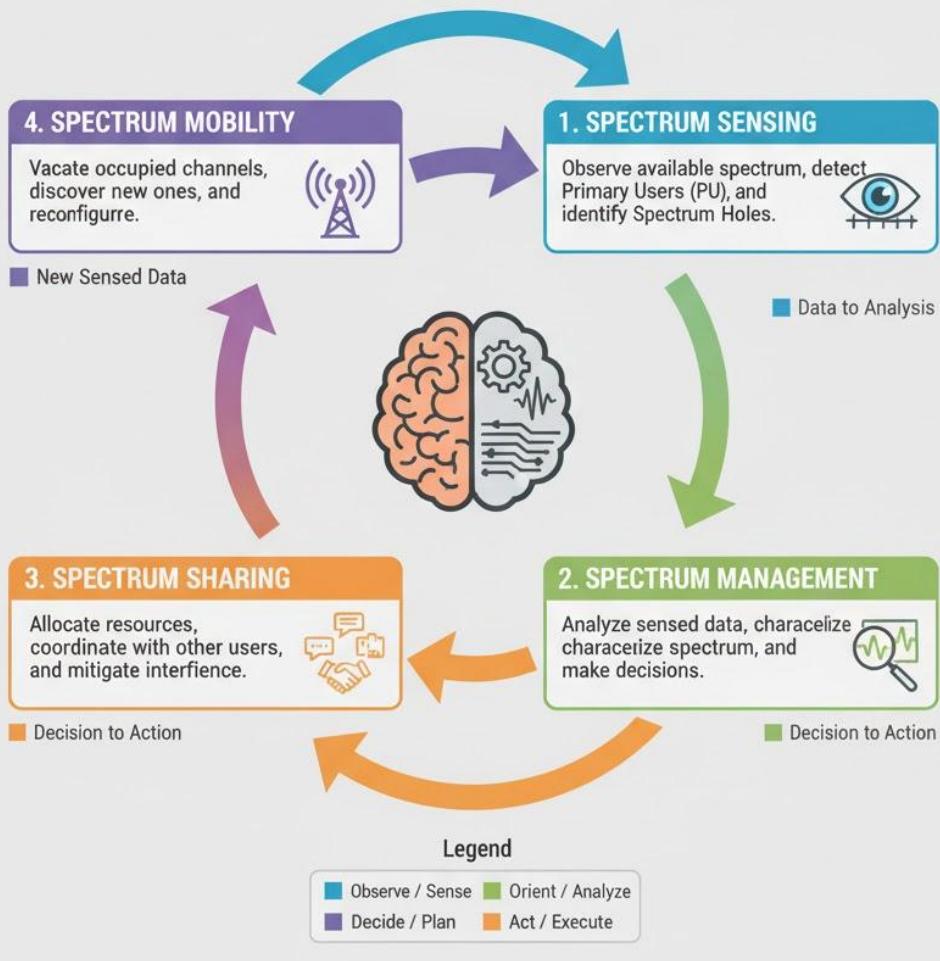
Khung chức năng này cũng ngầm phân chia vấn đề DSA thành hai miền xung đột (collision domains) riêng biệt và đòi hỏi các giải pháp khác nhau.

- **Miền 1 (SU-PU):** Xung đột giữa SU và PU. Vấn đề này chủ yếu được giải quyết bởi các chức năng "Nhận biết Phổ biến" (làm thế nào để phát hiện PU) và "Di chuyển Phổ biến" (làm thế nào để tránh PU khi nó xuất hiện).
- **Miền 2 (SU-SU):** Xung đột giữa SU này và SU khác. Vấn đề này được giải quyết bởi chức năng "Chia sẻ Phổ biến" (làm thế nào để phối hợp với các SU khác)

Một thiết kế hệ thống DSA mạnh mẽ phải giải quyết hiệu quả *cả hai* miền xung đột này. Một hệ thống có thể hoàn hảo trong Miền 1 (ví dụ: cảm biến PU tuyệt vời) nhưng vẫn hoàn toàn thất bại nếu nó không có cơ chế "Chia sẻ" (ví dụ: giao thức MAC) hiệu quả cho Miền 2, dẫn đến tình trạng hỗn loạn và "bi kịch của tài nguyên chung" (tragedy of the commons) trong nội bộ mạng SU.

# FUNCTIONAL FRAMEWORK OF DSA: The Cognitive Cycle in Practice

## Key Functions



Hình 6: Khuôn khổ chức năng của DSA miêu tả luồng hoạt động bằng vòng tròn nhận thức thực tế

## 6.3 Phân loại các Mô hình Truy cập DSA

Để tổ chức và phân tích lĩnh vực nghiên cứu rộng lớn của DSA, điều cần thiết là phải thiết lập một hệ thống phân loại (taxonomy) rõ ràng. Có hai trực phân loại chính, trực giao (orthogonal) với nhau, xác định cách thức một hệ thống DSA được thiết kế và triển khai:

- Mô hình Truy cập (Access Model):** Trục này xác định cách thức SU tương tác với PU và phổ tần được cấp phép. Nó trả lời câu hỏi: "SU có được phép truyền đồng thời với PU không, và nếu có, thì theo quy tắc nào?"
- Mô hình Kiến trúc (Architecture Model):** Trục này xác định nơi các quyết định DSA (đặc biệt là chức năng "Quản lý Phổ tần") được đưa ra. Nó trả lời câu hỏi: "Quyết định được đưa ra ở trung tâm (ví dụ: máy chủ) hay phân tán (tại thiết bị)?".

Trục đầu tiên, Mô hình Truy cập, thường được phân loại thành ba nhóm chính:

- Mô hình Sử dụng Độc quyền Động (Dynamic Exclusive Use):** Nơi các giấy phép độc quyền được cấp cho các khoảng thời gian hoặc khu vực địa lý nhỏ, linh hoạt.
- Mô hình Chia sẻ Mở (Open Sharing Model / Commons):** Nơi tất cả người dùng có quyền truy cập bình đẳng vào một băng tần (ví dụ: băng tần ISM cho Wi-Fi), thường không có sự phân biệt PU/SU.
- Mô hình Truy cập Phân cấp (Hierarchical Access Model):** Đây là mô hình trung tâm của Sóng vô tuyến Nhận thức. Nó thừa nhận sự tồn tại của hai cấp người dùng: PU (có quyền ưu tiên) và SU (có quyền cơ hội). Mục tiêu của SU là truy cập phổ tần mà không ảnh hưởng đến PU.

Mô hình Truy cập Phân cấp là trọng tâm của chương này và được chia thành ba kỹ thuật chính: **Interweave (Xen kẽ)**, **Underlay (Lớp phủ dưới)**, và **Overlay (Lớp phủ trên)**. Bảng 6.1 dưới đây cung cấp một bản tóm tắt so sánh các mô hình truy cập phân cấp cốt lõi này, sẽ được thảo luận chi tiết trong các phần 6.4, 6.5 và 6.6.

**Bảng 6.1: So sánh các Mô hình Truy cập Phân cấp (Interweave vs. Underlay vs. Overlay) với hai loại lỗi nghiêm trọng :**

<b>Phát hiện nhầm (Missed Detection):</b>	Đây là lỗi thảm khốc nhất. SU không phát hiện được tín hiệu của PU (đang hoạt động) và bắt đầu truyền, gây ra "nhiều có hại" (harmful interference). Điều này vi phạm nguyên tắc cơ bản của DSA và là mối quan tâm lớn nhất của các cơ quan quản lý và các PU đương nhiệm.
---	--

<b>Báo động sai (False Alarm):</b>	SU phát hiện nhầm là có PU (trong khi kênh thực sự rảnh) và quyết định không truyền. Lỗi này không gây hại cho PU, nhưng nó làm cho SU "mất cơ hội truyền" (transmission opportunity is lost). Nếu tỷ lệ báo động sai cao, hiệu suất (thông lượng) của mạng SU sẽ giảm xuống gần bằng không, làm cho toàn bộ hệ thống trở nên vô dụng.
--	--

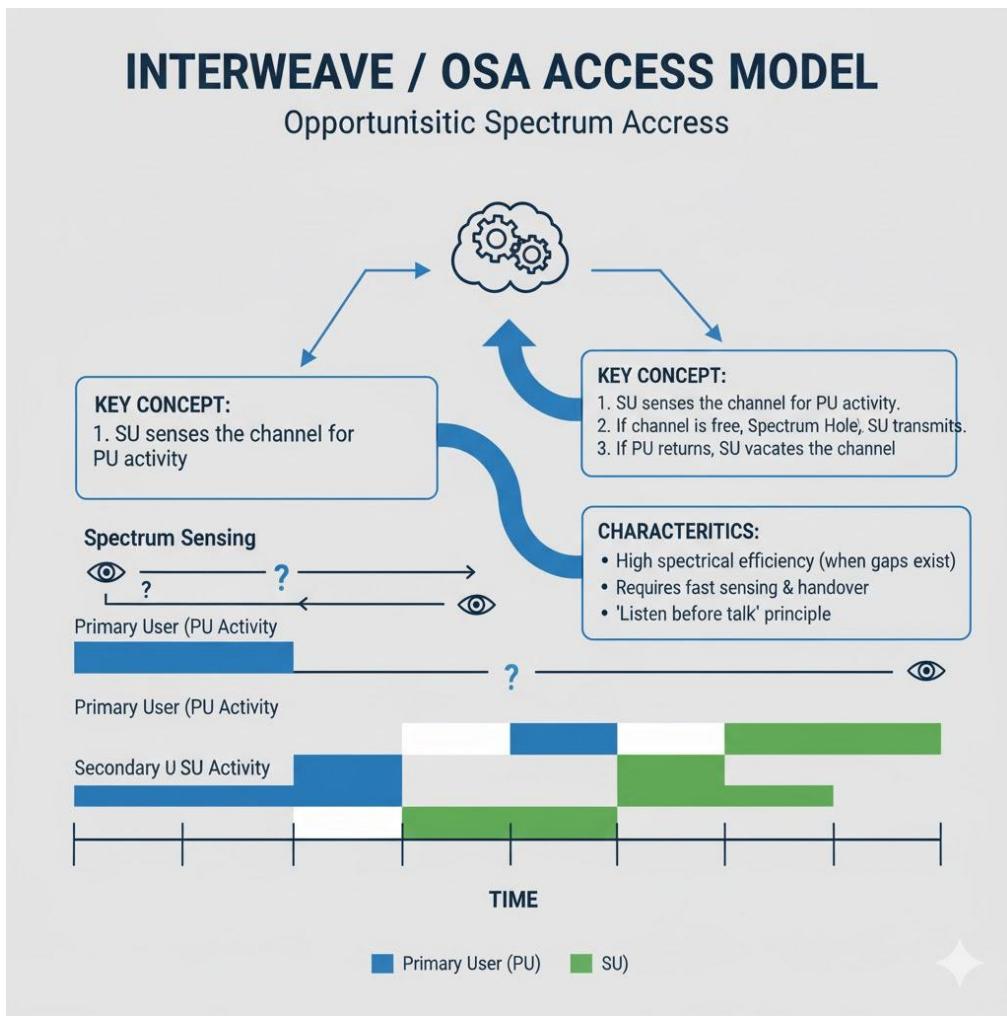
## 6.4 Phân tích sâu về Mô hình Interweave/OSA

Hiệu suất của mô hình Interweave có mối quan hệ tỷ lệ nghịch với hiệu suất sử dụng phổ tần của chính mạng PU. Mô hình Interweave cần sự im lặng của PU để hoạt động. Hãy xem xét việc áp dụng mô hình này cho một băng tần 4G LTE (PU) được sử dụng nhiều. Trong một mạng 4G được sử dụng hiệu quả với lưu lượng truy cập cao, số lượng và thời lượng của các "lỗ hổng phổ tần" sẽ giảm xuống gần bằng không. Trong kịch bản này, một SU Interweave sẽ dành 100% thời gian và năng lượng của mình để cảm biến nhưng không bao giờ tìm thấy cơ hội để truyền. Do đó, mô hình Interweave/OSA về cơ bản chỉ có thể thành công trong các băng tần mà PU *không hiệu quả* hoặc được sử dụng rất thưa thớt (ví dụ: các băng tần TV White Space (TVWS) ở khu vực nông thôn).

Hơn nữa, thách thức "Cảm biến" còn phức tạp hơn vẻ bề ngoài, vì khái niệm "lỗ hổng" không phải là một trạng thái nhị phân (có/không). Một lỗ hổng phổ tần là một khái niệm đa chiều, được định nghĩa là một không gian "thời gian-không gian-tần số" (space-time-frequency). Điều này có nghĩa là một kênh có thể "rảnh" *tại vị trí của SU* nhưng "bận" *tại vị trí của máy thu PU* (vẫn đè nút ẩn - hidden node). Nó có thể "rảnh" *bây giờ* nhưng "bận" *sau 10 mili giây nữa*.

Do đó, chức năng "Nhận biết Phổ tần" không chỉ phải trả lời câu hỏi "kênh có rảnh không?" mà là một câu hỏi phức tạp hơn nhiều: "kênh có rảnh, ở tần số này, tại vị

trí này, và *trong bao lâu không?*". Việc không thể trả lời câu hỏi "trong bao lâu" một cách chính xác là nguyên nhân cốt lõi khiến mô hình Interweave/OSA thất bại trong việc hỗ trợ các ứng dụng thời gian thực hoặc cung cấp Chất lượng Dịch vụ (QoS) có thể dự đoán được.



Hình 7: Mô hình Interweave/OSA

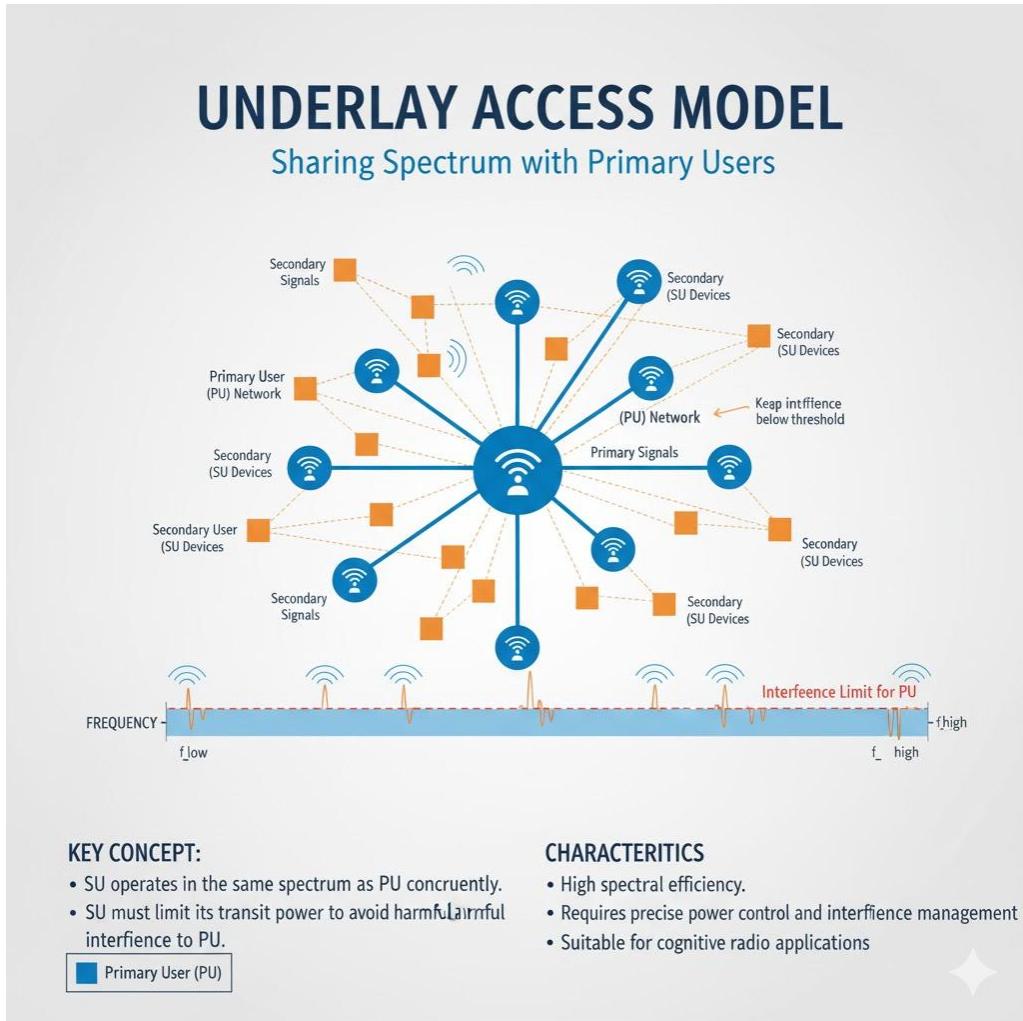
## 6.5 Mô hình Truy cập Lớp phủ dưới (Underlay)

Mô hình Underlay đưa ra một cách tiếp cận hoàn toàn khác để cùng tồn tại. Thay vì cố gắng tránh PU bằng mọi giá, mô hình Underlay cho phép SU "truyền trong băng tần được cấp phép bất kể" (transmit in the licensed band regardless) PU có đang hoạt

động hay không. Trong mô hình này, SU và PU truyền *đồng thời* trên cùng một băng tần.

Sự cùng tồn tại đồng thời này chỉ được phép với một điều kiện cực kỳ nghiêm ngặt: nhiều do SU gây ra tại *máy thu PU* phải luôn nằm dưới một "ngưỡng nhiễu" (interference threshold) hoặc "nhiệt độ nhiễu" (interference temperature) được xác định trước.

Để đạt được điều này, các SU phải kiểm soát công suất phát của mình một cách chặt chẽ Kỹ thuật phổ biến nhất để thực hiện Underlay là sử dụng các kỹ thuật trai phổ (spread spectrum), chẳng hạn như Ultra-Wideband (UWB). Bằng cách trai tín hiệu của mình trên một băng thông rất rộng, SU làm giảm mật độ công suất phổ (power spectral density) ở bất kỳ tần số cụ thể nào xuống mức cực thấp, giống như một tầng nhiễu nền (noise floor)



Hình 8: Mô hình Truy cập Lớp phủ dưới (Underlay)

### 6.5.1 Ưu điểm và Thách thức Cốt lõi

Ưu điểm chính của Underlay là nó cho phép SU "truy cập liên tục" (continuous access)<sup>24</sup>, không phụ thuộc vào trạng thái im lặng hay hoạt động của PU. Điều này loại bỏ sự phụ thuộc vào việc phát hiện lỗ hổng và lý thuyết có thể cung cấp một Chất lượng Dịch vụ (QoS) dễ dự đoán hơn so với Interweave.

Tuy nhiên, mô hình Underlay phải đối mặt với một thách thức kỹ thuật còn khó khăn hơn, đó là "khoảng cách thông tin" (information gap)<sup>21</sup>:

1. **Ước tính Nhiêu tại PU:** Thách thức cốt lõi là: Làm thế nào SU (bộ phát) biết được nó đang gây ra bao nhiêu nhiễu tại máy thu PU (một thực thể ở xa), đặc

biết là khi "không có trao đổi thông tin" (no exchange of information)<sup>21</sup> giữa mạng SU và mạng PU? SU có thể ước tính kênh đến máy thu *của chính nó*, nhưng việc ước tính kênh đến một máy thu PU *ẩn* (hidden) là cực kỳ khó khăn.

2. **Kiểm soát Công suất Chính xác:** Mô hình này đòi hỏi khả năng "kiểm soát công suất phát" (transmit power control)<sup>21</sup> cực kỳ chính xác và tự trị. Một sai lầm nhỏ trong việc ước tính kênh hoặc một sự tăng vọt công suất tạm thời có thể vi phạm ngưỡng nhiều và phá vỡ giao tiếp của PU.
3. **Nhiều Tích lũy (Aggregate Interference):** Nhiều từ *một* SU có thể nằm dưới ngưỡng. Nhưng "nhiều tổng hợp" (aggregate interference) từ *hàng trăm* SU hoạt động theo mô hình Underlay trong cùng một khu vực có thể dễ dàng tích tụ lại, vượt qua ngưỡng và làm tê liệt mạng PU.<sup>25</sup>

### 6.5.2 Phân tích sâu về Mô hình Underlay

Mô hình Underlay về cơ bản đã *chuyển dịch* (shifted) thách thức kỹ thuật cốt lõi của DSA.

- Mô hình Interweave (Phần 6.4) là một vấn đề về cảm biến/nhận thức (sensing/perception problem): "Làm sao tôi biết PU có ở đó không?".<sup>1</sup>
- Mô hình Underlay là một vấn đề lý thuyết điều khiển/ước tính (control/estimation theory problem): "Tôi biết PU ở đó. Làm sao tôi kiểm soát công suất của mình một cách chính xác<sup>21</sup> để không làm hại nó, mà không cần nói chuyện trực tiếp với nó?".<sup>21</sup>

Đây được cho là một vấn đề khó hơn về mặt kỹ thuật. Tuy nhiên, các nghiên cứu gần đây đã đề xuất một biến thể cấp tiến của Underlay, có thể gọi là "Underlay Hợp tác". Thay vì chỉ cố gắng "không làm hại" PU, một số kỹ thuật đề xuất SU *chủ động giúp đỡ* PU. Ví dụ,<sup>22</sup> mô tả một kỹ thuật mà SU "tăng SNR" của PU, hoặc cung cấp "động lực về công suất" (power incentives) cho hệ thống PU.

Điều này thay đổi hoàn toàn mô hình. SU không còn là một ký sinh trùng (như Interweave) hay một người cùng tồn tại lịch sự (như Underlay tiêu chuẩn). Trong mô hình hợp tác này, SU trở thành một *cộng sinh* (symbiote), có thể hoạt động như

một trạm chuyển tiếp (relay) hoặc một nguồn năng lượng, cải thiện hiệu suất của PU để đổi lấy quyền truy cập. Điều này mở ra một mô hình kinh tế "QoS-đổi-QoS", nơi SU trả tiền cho việc truy cập bằng dịch vụ chuyển tiếp thay vì tiền mặt.

## 6.6 Các Mô hình Truy cập Lai (Hybrid): Tối ưu hóa Hiệu suất

Cả hai mô hình Interweave và Underlay đều có những hạn chế có hưu và mang tính loại trừ.

- **Interweave:** Có thể truyền với công suất cao (tối đa hóa thông lượng), nhưng chỉ trong các khoảng thời gian rảnh rỗi không thể đoán trước của PU. Điều này làm cho việc đảm bảo QoS (đặc biệt là độ trễ) trở nên rất khó khăn.
- **Underlay:** Có thể truyền liên tục (tốt cho QoS), nhưng bị giới hạn vĩnh viễn ở mức công suất rất thấp (hạn chế thông lượng).<sup>24</sup>

Một giải pháp tự nhiên và hiệu quả hơn là **Mô hình Lai (Hybrid Model)**, một chiến lược thích ứng kết hợp những ưu điểm của cả hai. Trong mô hình này, SU đủ thông minh để "chuyển đổi" (switch) giữa hai chế độ hoạt động dựa trên tình hình thực tế của kênh.

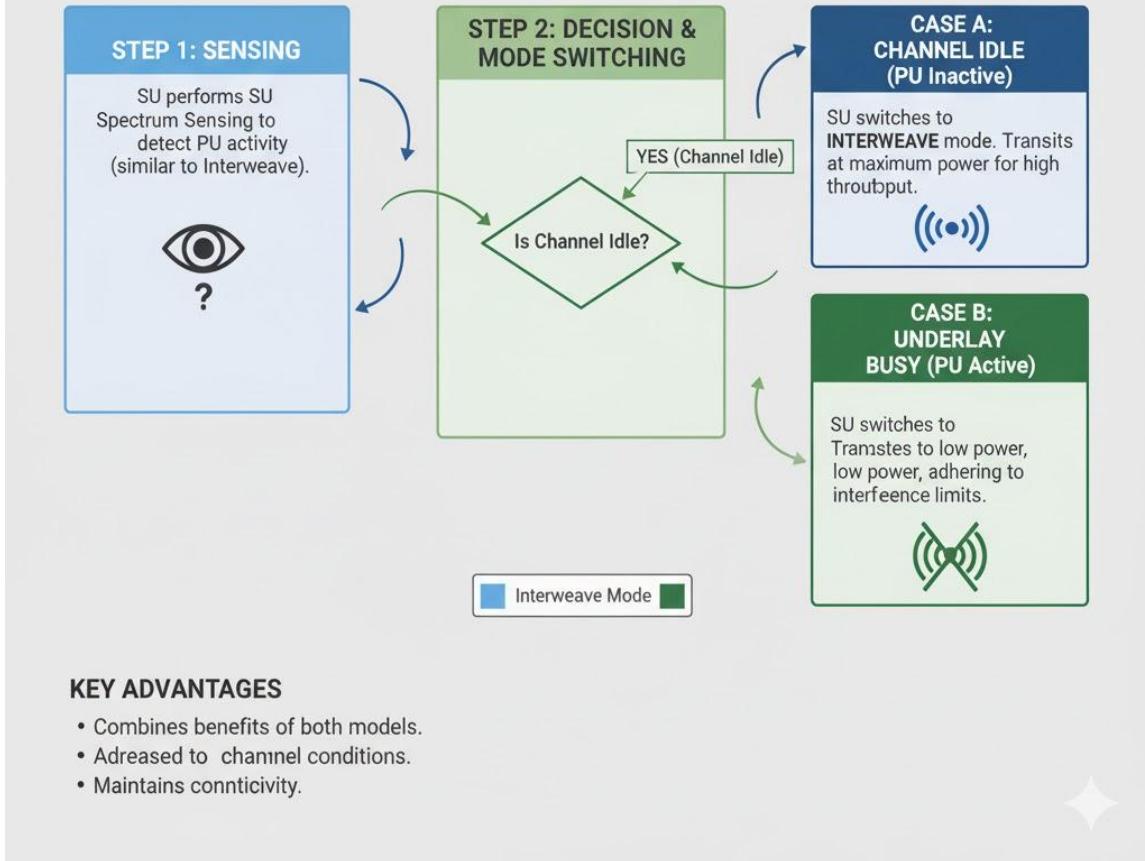
### 6.6.1 Cơ chế Hoạt động

Logic hoạt động của mô hình lai rất rõ ràng và thanh lịch:

1. **Bước 1 (Cảm biến):** SU thực hiện Nhận biết Phổ tần, giống như trong mô hình Interweave.
2. **Bước 2 (Quyết định):**
  - **Trường hợp A (Kênh Rảnh):** Nếu kênh được phát hiện là rảnh (PU im lặng), SU sẽ chuyển sang chế độ **Interweave** và truyền với *công suất cao* để tối đa hóa thông lượng và hiệu quả.
  - **Trường hợp B (Kênh Bận):** Nếu kênh được phát hiện là bận (PU đang hoạt động), thay vì im lặng hoàn toàn, SU sẽ chuyển sang chế độ **Underlay**. Nó tiếp tục truyền với *công suất thấp*, tuân thủ nghiêm ngặt ngưỡng nhiễu, để duy trì kết nối và truyền dữ liệu tốc độ thấp.

# HYBRID ACCESS MODEL

Combining Interweave and Underlay Strategies



Hình 9: Các Mô hình Truy cập Lai (Hybrid) tối ưu kênh truyền

## 6.6.2 Ưu điểm và Phân tích

Ưu điểm của cách tiếp cận này là rất lớn. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng mô hình lai mang lại "cải thiện đáng kể" (substantial improvement)<sup>32</sup> và "lợi ích hiệu suất bổ sung" (additional performance improvement)<sup>34</sup> về thông lượng tổng thể, hiệu quả phổ biến, và độ trễ so với việc chỉ sử dụng một trong hai mô hình tĩnh.<sup>24</sup>

Quan trọng hơn, mô hình hybrid là giải pháp thực tế duy nhất trong ba mô hình này có khả năng cung cấp *QoS khác biệt* (differentiated QoS) và hỗ trợ "lưu lượng SU đa lớp" (multi-class SUs).<sup>32</sup>

- Một hệ thống Interweave-only không thể đoán trước được, vì việc truy cập phụ thuộc hoàn toàn vào hành vi ngẫu nhiên của PU.<sup>32</sup>
- Một hệ thống Underlay-only bị hạn chế có hưu, vì thông lượng luôn luôn thấp.

Tuy nhiên, một hệ thống *hybrid* có thể đưa ra *quyết định thông minh*:

- Nếu ứng dụng của SU là một tác vụ nền, chịu được trễ (ví dụ: đồng bộ hóa email, sao lưu dữ liệu), nó có thể sử dụng chế độ **Underlay** một cách hiệu quả.
- Nếu ứng dụng của SU là nhạy cảm với độ trễ (ví dụ: một cuộc gọi VoIP, chơi game trực tuyến), nó có thể *chờ* (hoặc ưu tiên) cơ hội **Interweave** (công suất cao) để gửi các gói dữ liệu quan trọng một cách nhanh chóng.

Khả năng *lựa chọn* mô hình truy cập dựa trên *cả hai* yếu tố (hoạt động của PU và nhu cầu ứng dụng tức thời của SU) là lợi thế cốt lõi của nó.

Mô hình Hybrid giới thiệu một *lớp phức tạp thứ ba*. Nó không chỉ cần một *cảm biến* (cho Interweave) hay một *bộ kiểm soát công suất* (cho Underlay). Nó cần một *công cụ ra quyết định* (decision engine) phức tạp.<sup>34</sup> Hệ thống bây giờ phải liên tục trả lời một câu hỏi tối ưu hóa: "Khi nào nên chuyển đổi?".<sup>33</sup> Quyết định này không đơn giản. Nó phụ thuộc vào việc dự đoán thông kê hành vi của PU, yêu cầu QoS tức thời của SU, mức tiêu thụ năng lượng, và tình trạng tắc nghẽn của mạng SU. Các tài liệu<sup>32</sup> đề cập đến việc sử dụng "Mô hình Markov" (Markov model) để phân tích việc chuyển đổi này. Điều này có nghĩa là mô hình Hybrid là mô hình *đòi hỏi nhận thức cao nhất* trong ba mô hình, đòi hỏi khả năng "học hỏi" và "dự đoán"<sup>36</sup>, biến nó thành một ứng dụng hoàn hảo cho các kỹ thuật Học máy (Machine Learning - ML) và Học sâu (Deep Learning - DL) trong tương lai.

## 6.7 Các Kiến trúc cho việc Triển khai DSA

Như đã giới thiệu trong Phần 6.3, trục phân loại thứ hai, trục giao với các Mô hình Truy cập (Interweave/Underlay), là **Mô hình Kiến trúc**. Trục này xác định *nơi* và *bởi ai* các quyết định DSA (đặc biệt là chức năng "Quản lý Phổ tần"<sup>13</sup>) được thực hiện. Việc lựa chọn kiến trúc có tác động sâu sắc đến khả năng mở rộng, độ trễ, và hiệu suất tổng thể của mạng.

Các kiến trúc này chủ yếu được chia thành ba loại:

1. **DSA Tập trung (Centralized DSA - CDSA)**: Một thực thể trung tâm duy nhất (ví dụ: một máy chủ, một bộ điều khiển cơ sở dữ liệu) đưa ra tất cả các quyết định phân bổ phổ tần. Các nút (node) trong mạng là các thiết bị đầu cuối "thụ động" (dumb) tuân theo lệnh.<sup>20</sup>
2. **DSA Phân tán (Distributed DSA - DDSS)**: Không có thực thể trung tâm. Mỗi nút trong mạng là một tác nhân "tự trị" (autonomous)<sup>39</sup>, tự đưa ra quyết định truy cập dựa trên thông tin cục bộ mà nó cảm biến được.<sup>20</sup>
3. **DSA Lai (Hybrid)**: Một mô hình kết hợp, trong đó một bộ điều khiển trung tâm quản lý *chính sách* (policy) tổng thể hoặc các quyết định ở quy mô lớn, trong khi các thiết bị xử lý việc thực thi *cục bộ* (local) và ra quyết định tức thời.<sup>42</sup>

Điều quan trọng là phải hiểu rằng các lựa chọn kiến trúc này (Tập trung/Phân tán) và các lựa chọn mô hình truy cập (Interweave/Underlay) là *trực giao* với nhau. Chúng có thể được kết hợp theo nhiều cách:

- *Ví dụ 1*: Hệ thống TV White Space ở Hoa Kỳ là một hệ thống *Interweave* (truy cập lỗ hổng) được triển khai bằng kiến trúc *Tập trung* (dựa trên cơ sở dữ liệu địa lý).
- *Ví dụ 2*: Một mạng cảm biến ad-hoc quân sự có thể là một hệ thống *Interweave* (cảm biến cục bộ) được triển khai bằng kiến trúc *Phân tán* (mỗi cảm biến tự quyết định).
- *Ví dụ 3*: Một mạng femtocell 4G có thể là một hệ thống *Underlay* (kiểm soát công suất) được triển khai bằng kiến trúc *Phân tán* (mỗi femtocell tự điều chỉnh công suất để không gây nhiễu cho các femtocell lân cận).<sup>44</sup>

Bảng 6.2 dưới đây cung cấp một sự so sánh chi tiết về hai mô hình kiến trúc chính, sẽ được phân tích sâu trong các phần 6.8 và 6.9.

**Bảng 6.2: So sánh các (Paradigm) Kiến trúc DSA (Tập trung vs. Phân tán)**

Đặc điểm	Kiến trúc Tập trung (Centralized)	Kiến trúc Phân tán (Distributed)
Nơi ra Quyết định	Một máy chủ/bộ điều khiển trung tâm (ví dụ: SAS, LSA Controller).[38, 45]	Mỗi nút/thiết bị cá nhân (SU). <sup>39</sup>
Công nghệ Hỗ trợ	Cơ sở dữ liệu Địa-Không gian (Geospatial Database), GPS, Kết nối Backhaul Internet. <sup>45</sup>	Cảm biến cục bộ (Local Sensing), Giao thức MAC Hợp tác, Học máy Đa tác nhân (MARL).[1, 13, 46]
Ưu điểm	Tối ưu hóa toàn cục; Quản lý đơn giản; Dễ dàng thực thi chính sách; Kiểm soát nhiều chật chẽ.[20, 47]	Khả năng mở rộng cao; Mạnh mẽ (Robust), không có điểm lỗi đơn lẻ; Độ trễ quyết định thấp (quyết định cục bộ). <sup>20</sup>
Nhược điểm	Điểm lỗi đơn lẻ (Single Point of Failure) <sup>38</sup> ; Chi phí báo hiệu/Độ trễ Backhaul cao <sup>20</sup> ; Nút cổ chai về tính toán.	Quyết định cục bộ có thể "dưới mức tối ưu" (sub-optimal) ở cấp độ toàn cục; Phức tạp trong việc phối hợp và hội tụ; Nguy cơ xung đột SU-SU cao. <sup>20</sup>

<b>Ví dụ</b>	Mạng Macro-cell (eNodeB) truy cập phổ tần chia sẻ (ví dụ: LSA, CBRS).[48, 49]	Femtocell 4G tự trị, tự tổ chức [44, 50]; Giao tiếp Thiết bị-đến-Thiết bị (D2D). <sup>51</sup>
--------------	---	--

## 6.8 Kiến trúc DSA Tập trung và dựa trên Cơ sở dữ liệu

Trong kiến trúc DSA tập trung, một máy chủ trung tâm duy nhất "xử lý tất cả các chức năng quản lý và xử lý dữ liệu chính".<sup>38</sup> Tất cả các nút SU trong mạng (ví dụ: các trạm gốc, thiết bị người dùng) phải truy vấn máy chủ này để được phép truy cập phổ tần.<sup>20</sup>

Cách triển khai thực tế và thành công nhất của DSA tập trung là **Mô hình dựa trên Cơ sở dữ liệu (Database-Driven Model)**. Các ví dụ nổi bật nhất là khung CBRS (Citizens Broadband Radio Service) ở Mỹ, sử dụng một **Hệ thống Truy cập Phổ tần (Spectrum Access System - SAS)**, và khung LSA (Licensed Shared Access) ở Châu Âu (sẽ được thảo luận trong Phần 6.10).<sup>45</sup>

### 6.8.1 Các Thành phần Cốt lõi và Quy trình Hoạt động

Kiến trúc dựa trên cơ sở dữ liệu SAS bao gồm các thành phần cốt lõi sau<sup>45</sup>:

1. **SAS (Spectrum Access System):** Máy chủ trung tâm, hoạt động như một "cơ sở dữ liệu nội bộ" (internal database).<sup>45</sup> Nó chứa thông tin chi tiết về tất cả các PU (vị trí, kênh hoạt động, vùng bảo vệ) và đăng ký của tất cả các SU.
2. **Máy khách DSA (DSA Client):** Đây là thiết bị vô tuyến cần truy cập phổ tần (ví dụ: một trạm gốc 4G/LTE<sup>53</sup> hoặc một small cell). Nó phải có một "tác nhân DSA" (DSA client agent)<sup>45</sup> và một máy thu GPS.
3. **Kết nối Backhaul:** Một kết nối Internet (thường là có dây) ổn định để máy khách có thể liên lạc với SAS.<sup>45</sup>
4. **GPS/GNSS:** Máy khách phải có khả năng xác định và "báo cáo vị trí của nó" (reports its location)<sup>45</sup> một cách chính xác cho SAS.

Quy trình hoạt động điển hình của một mạng 4G/LTE sử dụng kiến trúc SAS (ví dụ: CBRS) diễn ra như sau<sup>45</sup>:

1. **Khởi động:** Một trạm gốc 4G (eNodeB) được bật nguồn. Nó khởi động ở trạng thái "tắt phát" (transmit mute).<sup>45</sup>
2. **Kết nối:** eNodeB sử dụng kết nối backhaul Internet của mình để liên lạc và xác thực với một SAS trung tâm.
3. **Báo cáo Vị trí:** eNodeB "báo cáo vị trí (GPS/GNSS) của nó"<sup>45</sup> cho SAS.
4. **Truy vấn:** eNodeB yêu cầu SAS cấp phép truy cập phổ tần.
5. **Tính toán của SAS:** SAS "kiểm tra cơ sở dữ liệu nội bộ"<sup>45</sup> về tất cả các PU đương nhiệm (ví dụ: radar quân sự) và các SU khác đã đăng ký trong khu vực. Nó "tính toán rủi ro nhiều" (calculates the risk of interference)<sup>45</sup> dựa trên vị trí của eNodeB và các mô hình truyền sóng.
6. **Cấp phép:** Nếu SAS xác định có phổ tần khả dụng, nó sẽ "cấp" (issues) cho eNodeB một tập hợp các tham số hoạt động cụ thể: "tần số hoạt động, băng thông phổ, và mức công suất phát".<sup>45</sup>
7. **Hoạt động:** eNodeB chỉ được phép phát trên các kênh và mức công suất đã được SAS phê duyệt. Nó phải liên tục "giữ liên lạc" (keep in contact) với SAS để gia hạn "thuê" (lease) và sẵn sàng ngừng phát nếu SAS ra lệnh (ví dụ: nếu một PU cấp cao hơn bắt đầu hoạt động).

Trong kiến trúc 4G LTE, một eNodeB hỗ trợ DSA được gọi là "Trạm gốc Nhận thức" (cognitive Base Station - cBS).<sup>48</sup> Nó yêu cầu một "thuê phổ tần" (spectrum lease)<sup>48</sup> từ SAS.

### 6.8.2 Phân tích sâu về Kiến trúc Tập trung

Ưu điểm lớn nhất và là sự đổi mới thực sự của mô hình tập trung, dựa trên cơ sở dữ liệu là nó hoàn toàn vượt qua (bypasses) thách thức khó khăn nhất của DSA: "Nhận biết Phổ tần" (Spectrum Sensing) theo thời gian thực.

Hãy nhớ lại từ Phần 6.4, mô hình Interweave thất bại vì sự không chắc chắn của cảm biến (báo động sai, phát hiện nhầm). Kiến trúc dựa trên SAS đã giải quyết vấn đề

này một cách xuất sắc. Thiết bị khách (eNodeB) không cần phải cảm biến (sense) môi trường vô tuyến. Nó chỉ cần biết hai điều: vị trí của nó ( thông qua GPS) và cách hỏi ( thông qua kết nối Internet).

Toàn bộ trí thông minh và gánh nặng cảm biến được chuyển từ thiết bị đầu cuối (dumb edge device) lên đám mây (intelligent cloud - SAS). SAS có một cơ sở dữ liệu được tính toán trước, gần như toàn tri, về tất cả các vùng bảo vệ PU. Thay vì thực hiện một phép "cảm biến" không đáng tin cậy, máy khách chỉ cần thực hiện một truy vấn cơ sở dữ liệu (database query) dựa trên vị trí. Điều này làm cho việc triển khai phía máy khách đơn giản hơn và đáng tin cậy hơn rất nhiều, điều mà các cơ quan quản lý (vốn lo lắng về việc bảo vệ PU) rất ưa chuộng.

Mô hình SAS/cơ sở dữ liệu đã biến đổi DSA từ một vấn đề xử lý tín hiệu (signal processing) (ví dụ: phát hiện năng lượng, phát hiện cyclostationary) thành một vấn đề quản lý dữ liệu lớn và thông tin địa không gian (geospatial informatics). Mô tả về một hệ thống SAS "tinh vi" sử dụng "AI" để phân bổ tần số dựa trên "luồng lưu lượng dự đoán" (predicted traffic flows) và "quét phổ" (spectrum scans) cho thấy rằng SAS không chỉ là một cơ sở dữ liệu tĩnh. Nó là một hệ thống phân tích dữ liệu lớn, thời gian thực. Thành công của các mô hình như CBRS chứng minh rằng việc quản lý dữ liệu đáng tin cậy về vị trí và quyền ưu tiên đã thành công ở nơi mà *xử lý tín hiệu* phân tán (cảm biến cục bộ) đã thất bại trong việc cung cấp sự đảm bảo cần thiết cho các PU.

## 6.9 Kiến trúc DSA Phân tán và Hợp tác

Trái ngược hoàn toàn với mô hình tập trung, kiến trúc DSA phân tán (DDSS) hoạt động mà "không có điều khiển trung tâm" (without centralized control). Trong kiến trúc này, quyền kiểm soát được phân bổ đều, và mỗi nút (node) SU hoạt động "độc lập" (independently) như một tác nhân "tự trị" (autonomous). Mỗi nút tự "đưa ra quyết định dựa trên thông tin cục bộ" (make decisions based on local information) mà nó thu thập được từ môi trường thông qua chức năng Nhận biết Phổ tần của riêng mình.

### 6.9.1 Ưu điểm, Nhược điểm, và Mô hình Hợp tác

Kiến trúc phân tán có những lợi thế đáng kể:

- **Mạnh mẽ (Robust) / Khả năng chịu lỗi (Fault Tolerance):** Không có "điểm lỗi đơn lẻ" (single point of failure). Nếu một nút bị hỏng, phần còn lại của mạng vẫn tiếp tục hoạt động. Ngược lại, nếu máy chủ SAS trung tâm bị sập, toàn bộ mạng tập trung sẽ ngừng hoạt động.
- **Khả năng mở rộng (Scalability):** Dễ dàng thêm các nút mới vào mạng mà không làm quá tải máy chủ trung tâm
- **Độ trễ thấp:** Các quyết định cục bộ được đưa ra gần như tức thời, không phải chịu độ trễ của một vòng lặp truy vấn máy chủ qua backhaul Internet

Tuy nhiên, nó cũng có những nhược điểm có hưu:

- **Tính tối ưu:** Các quyết định được đưa ra chỉ dựa trên thông tin cục bộ có thể là "dưới mức tối ưu" (sub-optimal) ở cấp độ toàn cục. Các nút có thể không nhận thức được bức tranh toàn cảnh của mạng.
- **Phối hợp:** Nguy cơ xung đột SU-SU (Miền 2) là rất cao. Nếu không có cơ chế phối hợp tốt, các nút tự trị có thể chọn cùng một kênh rảnh, dẫn đến xung đột và làm giảm hiệu suất của tất cả mọi người.

Để giải quyết nhược điểm này, một biến thể tinh vi hơn đã được đề xuất: **DSA Phân tán Hợp tác (Cooperative Distributed DSA)**. Trong mô hình này, các nút vẫn tự trị, nhưng chúng không hành động hoàn toàn ích kỷ. Thay vào đó, các nút "trao đổi thông tin cảm biến" (exchange their sensing information)<sup>59</sup> với các nút lân cận. Bằng cách kết hợp các quan sát từ nhiều vị trí khác nhau, mạng có thể khai thác "đa dạng không gian" (spatial diversity)<sup>58</sup> để cải thiện đáng kể độ chính xác của cảm biến (ví dụ: vượt qua vấn đề nút ẩn) và đạt được quyết định "Chia sẻ Phổ tàn"<sup>14</sup> tốt hơn nhiều.<sup>46</sup>

### 6.9.2 Áp dụng cho 4G và Phân tích

Kiến trúc Phân tán và Tập trung không phải là đối thủ cạnh tranh; chúng là các giải pháp bổ sung (complementary) cho các trường hợp sử dụng (use cases) và địa hình mạng (topologies) hoàn toàn khác nhau.

Kiến trúc Tập trung (Phần 6.8) hoạt động hoàn hảo cho mạng *macro* 4G: các trạm gốc (eNodeB) đặt tiền, được lắp đặt cố định, số lượng tương đối ít, và có kết nối backhaul băng thông rộng.<sup>48</sup>

Tuy nhiên, mô hình tập trung *hoàn toàn thất bại* khi áp dụng cho các kịch bản "siêu cục bộ" (hyper-local)<sup>51</sup> và động. Kiến trúc phân tán là lựa chọn *duy nhất* khả thi cho các kịch bản 4G sau:

- **Femtocells 4G:** Mạng 4G được dự đoán sẽ bao gồm "số lượng lớn các cell do người dùng triển khai" (large number of user-deployed cells).<sup>44</sup> Việc "lập kế hoạch mạng tập trung" (centralized network planning) cho hàng triệu femtocell được người dùng tự cắm vào và rút ra một cách ngẫu nhiên là "không khả thi" (less viable).<sup>44</sup> Do đó, các femtocell này *phải* hoạt động như các "người ra quyết định tự trị" (autonomous decision makers)<sup>44</sup>, sử dụng DSA phân tán để tự động chọn kênh (Component Carrier selection) và điều chỉnh công suất để tránh nhiễu lẫn nhau.
- **Giao tiếp D2D (Device-to-Device):** Các tiêu chuẩn 4G (ví dụ: 3GPP Proximity Services - ProSe)<sup>51</sup> cho phép Giao tiếp Thiết bị-đến-Thiết bị. Đây là một kiến trúc ad-hoc, cơ hội, về bản chất là phân tán, cho phép hai điện thoại di động nói chuyện trực tiếp với nhau mà không cần đi qua eNodeB. Một kiến trúc DSA phân tán là bắt buộc để các thiết bị này tự tìm và đàm phán một kênh rảnh để sử dụng.<sup>51</sup>

Thách thức cốt lõi của DSA phân tán *hợp tác* không chỉ là kỹ thuật, mà còn là *lý thuyết trò chơi* (game theory) và *sự tin cậy*.<sup>57</sup> nghiên cứu "sự lan truyền của hành vi hợp tác" trong một mạng lưới gồm các "người dùng ích kỷ" (selfish... users).<sup>46</sup> và<sup>59</sup> mô tả vấn đề này bằng cách sử dụng "học tăng cường đa tác nhân" (multi-agent reinforcement learning - MARL).

Điều này tiết lộ vấn đề thực sự: Làm thế nào để bạn *khuyến khích* một nút "ích kỷ"<sup>57</sup> *hợp tác* (một hành động tồn năng lượng và tài nguyên tính toán để cảm biến và

chia sẻ thông tin) khi nó có thể *gian lận*, giữ kênh tốt nhất cho riêng mình và "hưởng lợi miễn phí" (free-ride) từ nỗ lực của các nút khác? Điều này dẫn đến nhu cầu phức tạp về các cơ chế khuyến khích (incentive mechanisms) và các mô hình kinh tế học vi mô, chẳng hạn như tìm kiếm "Cân bằng Bayesian" (Bayesian Nash Equilibria)<sup>57</sup>, để làm cho việc hợp tác trở thành chiến lược hợp lý cho các tác nhân tự trị.

## 6.10 Nghiên cứu Chuyên sâu Mạng 4G: Khung Truy cập Chia sẻ được Cấp phép (LSA)

Phần này trình bày một nghiên cứu điển hình (case study) về một hệ thống DSA thực tế, được tiêu chuẩn hóa và triển khai, áp dụng trực tiếp cho các mạng 4G LTE: **Truy cập Chia sẻ được Cấp phép (Licensed Shared Access - LSA)**.

### 6.10.1 Định nghĩa và Bối cảnh

LSA là một "khung pháp lý" (regulatory framework) được phát triển chủ yếu ở Châu Âu, được thiết kế để tạo điều kiện cho việc chia sẻ phổ tần một cách có kiểm soát. Không giống như các mô hình DSA cơ hội hoàn toàn (như Interweave/OSA), LSA hoạt động dựa trên một **Mô hình Hai cấp (Two-Tier Model)** rõ ràng:

1. **Người dùng Đương nhiệm (Incumbent):** Người dùng có giấy phép chính, cấp cao nhất (ví dụ: quân đội, dịch vụ vệ tinh, đài phát thanh). Họ có quyền ưu tiên tuyệt đối.
2. **Người được cấp phép LSA (LSA Licensee):** Một hoặc nhiều người dùng thứ cấp, thường là các Nhà khai thác Mạng Di động (MNO) 4G, những người được cấp giấy phép *thứ cấp* để sử dụng băng tần khi và ở nơi Người dùng Đương nhiệm không sử dụng.<sup>49</sup>

Mục tiêu chính của LSA là cho phép các MNO triển khai dịch vụ băng thông rộng di động 4G LTE trong các băng tần (ví dụ: băng tần 2.3-2.4 GHz, tương ứng với **3GPP LTE Band 40**)<sup>49</sup> mà trước đây bị hạn chế hoặc không thể tiếp cận được do sự hiện diện của các Người dùng Đương nhiệm.

### 6.10.2 Tiêu chuẩn hóa và Kiến trúc (ETSI và 3GPP)

Việc tiêu chuẩn hóa LSA là một nỗ lực chung:

- **ETSI (Viện Tiêu chuẩn Viễn thông Châu Âu):** ETSI (cụ thể là ủy ban RRS - Reconfigurable Radio Systems) đã định nghĩa *kiến trúc* và *khung pháp lý* tổng thể cho LSA<sup>49</sup>, đáng chú ý là trong các đặc tả như ETSI TS 103 154 (Yêu cầu hệ thống) và TS 103 235 (Kiến trúc).<sup>64</sup>
- **3GPP (Dự án Đối tác Thế hệ thứ 3):** Sau khi khung ETSI được thiết lập, 3GPP đã tiếp nhận và *tích hợp* các chức năng hỗ trợ LSA vào các tiêu chuẩn 4G LTE (bắt đầu từ Release 13).<sup>49</sup> Điều này liên quan đến việc định nghĩa các giao diện và thủ tục cần thiết để Trạm gốc 4G (eNodeB)<sup>67</sup> và Mạng lõi (EPC) có thể tương tác với hệ thống LSA.

Kiến trúc LSA do ETSI định nghĩa về mặt khái niệm *giống hệt* với kiến trúc SAS dựa trên cơ sở dữ liệu đã được thảo luận trong Phần 6.8. Nó bao gồm hai thành phần chính:

1. **Kho lưu trữ LSA (LSA Repository - LR):** Tương đương với cơ sở dữ liệu SAS. Nó chứa thông tin về tình trạng, lịch trình và các vùng bảo vệ của Người dùng Dương nhiệm.
2. **Bộ điều khiển LSA (LSA Controller - LC):** Tương đương với máy khách DSA. Đây là thành phần do MNO (nhà mạng 4G) vận hành, nó *truy vấn* LR để biết tần số nào có sẵn để sử dụng tại một địa điểm và thời gian cụ thể.

### 6.10.3 Phân biệt Cốt lõi: LSA so với DSA Cơ hội (OSA)

Sự khác biệt giữa LSA và DSA cơ hội (như OSA/Interweave trong băng tần TVWS) là rất quan trọng và thường bị hiểu lầm. Sự khác biệt này không nằm ở công nghệ cảm biến, mà nằm ở *mô hình pháp lý và kinh doanh* :

- **DSA/OSA Cơ hội:** Hoạt động trong phô tần *không phép* (unlicensed) (hoặc được miễn phép). Quyền truy cập là *cơ hội* (opportunistic) và dựa trên cơ sở "nỗ lực tốt nhất" (best-effort). SU *không có bảo đảm QoS* và *không có bảo vệ khỏi nhiễu* (từ cả PU và các SU khác).
- **LSA (Truy cập Chia sẻ được Cấp phép):** Hoạt động trong phô tần *có phép* (licensed). Mỗi quan hệ giữa PU và SU được quản lý bởi một "hợp đồng chia sẻ" (sharing contract) pháp lý, dài hạn. Đổi lại, Người được cấp phép LSA

(MNO) nhận được sự bảo vệ khỏi nhiễu (từ các SU khác) và có được "QoS có thể dự đoán" (predictable QoS).

LSA không phải là một mô hình truy cập (Access Model) kỹ thuật mới (như Interweave hay Underlay). Thay vào đó, nó là một *hệ thống hoàn chỉnh* kết hợp:

1. Một mô hình truy cập *pháp lý* ("Sử dụng Độc quyền Động" hoặc "DSA Hợp tác").
2. Một mô hình kiến trúc *kỹ thuật* ("Tập trung, dựa trên Cơ sở dữ liệu").

LSA đại diện cho một *sự thỏa hiệp thực dụng* (pragmatic compromise) giữa hiệu quả phổ biến (mục tiêu của DSA) và sự chắc chắn về đầu tư (yêu cầu của các nhà mạng 4G). Một MNO không thể xây dựng một mạng 4G trị giá hàng tỷ đô la dựa trên phổ biến *best-effort*. Họ cần "sự chắc chắn lâu dài" (long-term certainty) và "QoS có thể dự đoán" để biện minh cho khoản đầu tư không lò của mình.

- Phân bổ tần số truyền thống cung cấp *Sự chắc chắn nhưng Không hiệu quả*.
- DSA/OSA cơ hội cung cấp *Hiệu quả nhưng Không chắc chắn*.
- LSA là giải pháp trung gian hoàn hảo: nó cung cấp quyền truy cập *động* (hiệu quả), nhưng được hỗ trợ bởi một *hợp đồng pháp lý ràng buộc, dài hạn* (sự chắc chắn). Đó chính là DSA đã được "thuần hóa" để đáp ứng nhu cầu cấp độ nhà mạng (carrier-grade) của mạng 4G.

## Chương 7: Các Mô hình Truy cập Phổ tần Động (DSA)

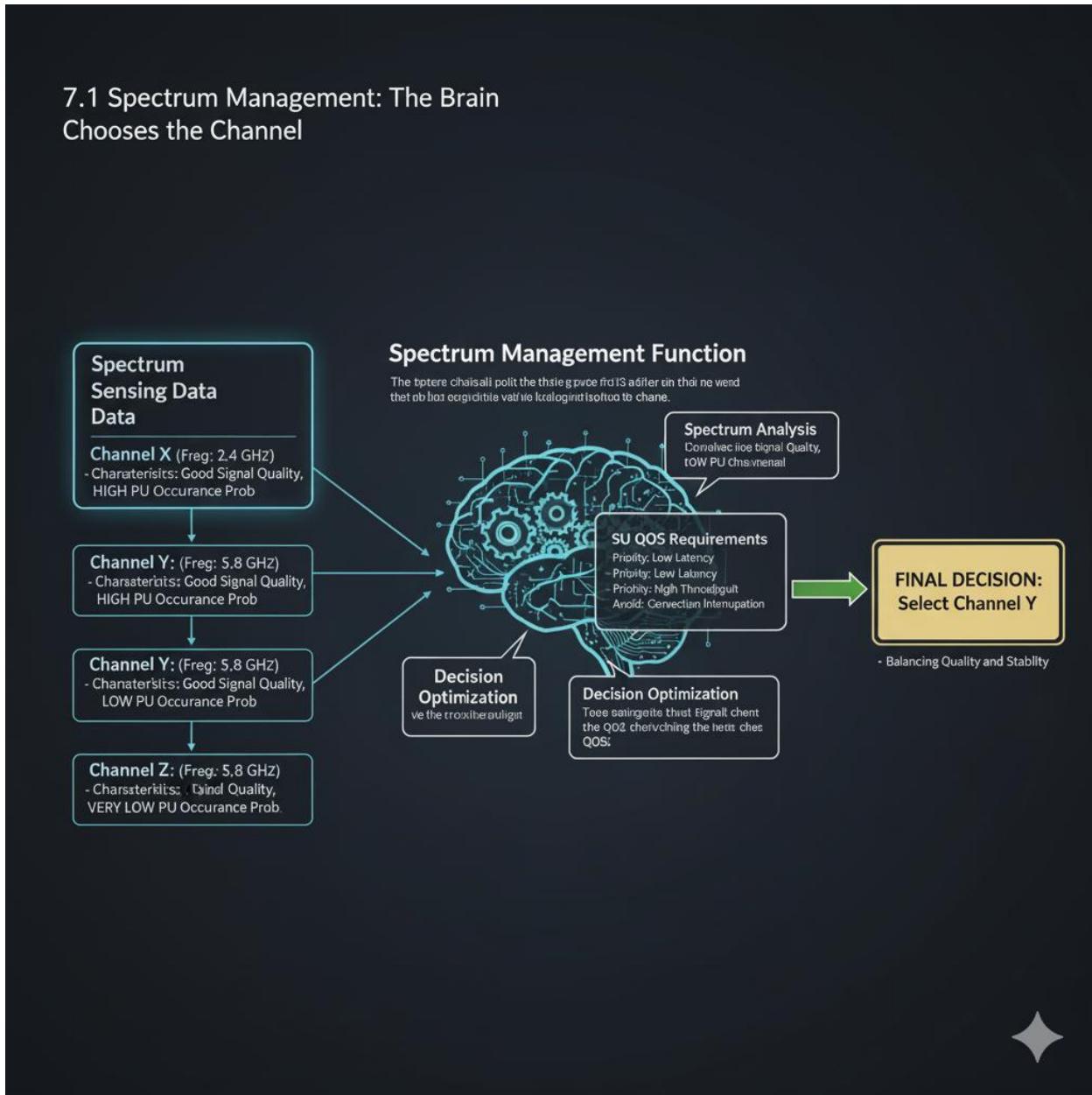
Quản lý phổ (Spectrum Management) được coi là "bộ não" của Sóng Vô tuyến Nhận thức (CR). Đây là chức năng xử lý và ra quyết định, chịu trách nhiệm phân tích dữ liệu được thu thập từ chức năng dò phổ và sau đó đưa ra quyết định tối ưu về việc nên sử dụng phổ tần nào.

### 7.1: Quyết định và Phân tích Phổ

Quá trình này về cơ bản là một quy trình hai bước:

- Phân tích Phổ (Spectrum Analysis): Sau khi chức năng dò phổ xác định được các "lỗ hổng" (white spaces), chức năng phân tích sẽ đặc điểm hóa chúng. Điều này bao gồm việc hiểu rõ các đặc tính của các kênh có sẵn.
- Quyết định Phổ (Spectrum Decision): Đây là bước lựa chọn kênh. Sóng vô tuyến nhận thức (CR) phải chọn băng tần có sẵn tốt nhất. Quyết định này là một bài toán tối ưu hóa phức tạp. CR phải cân bằng các yêu cầu về Chất lượng Dịch vụ (QoS) của chính nó (như tốc độ dữ liệu mong muốn, tỷ lệ lỗi chấp nhận được, độ trễ) với các đặc điểm của phổ tần (như chất lượng kênh, xác suất xuất hiện của Người dùng Chính - PU) để tối đa hóa các chỉ số như thông lượng mạng và giảm thiểu độ trễ.

## 7.1 Spectrum Management: The Brain Chooses the Channel



Hình 10: Mô hình Truy cập Phổ tần Động (DSA)

## 7.2: Phân bổ Phổ: Tập trung so với Phân tán

Chủ đề này khám phá cách phổ tần có sẵn được phân chia hiệu quả giữa nhiều Người dùng Phụ (SU) đang cạnh tranh với nhau.

**Phân bổ Tập trung** (Centralized Allocation): Trong mô hình này, một bộ điều khiển trung tâm (như Trình quản lý Phổ tần Động - DSM, hoặc N-RRM) đã thảo luận ở

Chương 4) thu thập thông tin dò tìm từ tất cả các SU. Sau đó, nó đưa ra một quyết định phân bổ tối ưu trên toàn mạng.

- **Ưu điểm:** Có thể đạt được hiệu quả và tối ưu hóa toàn cục.
- **Nhược điểm:** Phụ thuộc vào một điểm lỗi duy nhất (single point of failure) và tạo ra chi phí báo hiệu (signaling overhead) đáng kể.

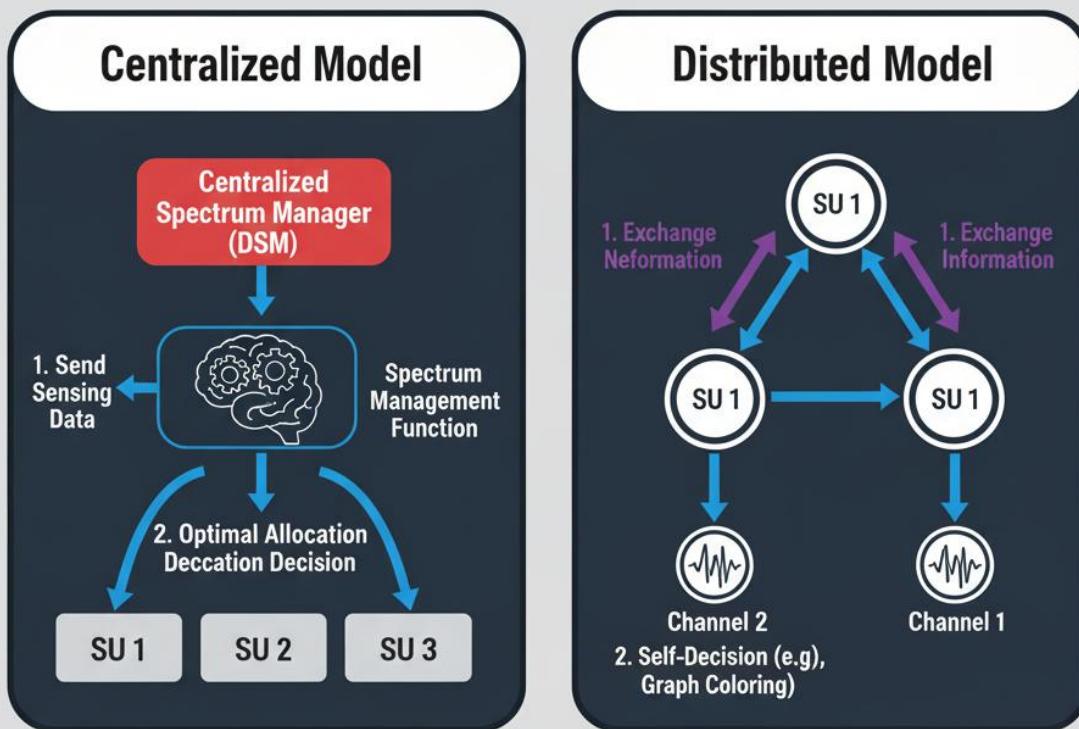
**Phân bổ Phân tán** (Distributed Allocation): Trong mô hình này, các SU tự đưa ra quyết định một cách độc lập, thường thông qua hợp tác cục bộ với các SU lân cận.

- **Ưu điểm:** Mạnh mẽ và linh hoạt hơn, không bị phụ thuộc vào bộ điều khiển trung tâm.
- **Nhược điểm:** Có nguy cơ va chạm cao hơn nếu không được phối hợp tốt.

Các kỹ thuật chính: Các nhà nghiên cứu thường sử dụng hai phương pháp thuật toán chính cho phân bổ phân tán:

- Thuật toán Đồng thuận (Consensus Algorithms): Các SU lặp lại quá trình chia sẻ thông tin với các hàng xóm cho đến khi chúng "đồng ý" (converge) về một kế hoạch phân bổ.
- Lý thuyết Đồ thị (Graph Theory): Vấn đề phân bổ phổ được mô hình hóa như một bài toán tô màu đồ thị (graph-coloring problem). Các SU là các "nút" (nodes) và khả năng gây nhiễu lẫn nhau là một "cạnh" (edge). Mục tiêu là "tô màu" (gán kênh) cho các nút sao cho không có hai nút liền kề nào có cùng màu. Đây là một bài toán tối ưu hóa NP-hard (cực kỳ phức tạp).

## 7.2: Spectrum Allocation (Centralized vs. Distributed)



Hình 11: Phân bổ Phổ: Tập trung so với Phân tán

## 7.3 Vai trò của AI, Học máy và Lý thuyết Trò chơi

Bản chất cạnh tranh và cực kỳ năng động của môi trường phổ tần khiến nó trở nên quá phức tạp đối với các thuật toán phản ứng (reactive) đơn giản. Do đó, các mô hình AI, Học máy (ML) và lý thuyết trò chơi đã trở thành các công cụ thiết yếu,

chuyển đổi mô hình từ quản lý phản ứng sang tối ưu hóa chủ động (proactive) và tự trị.

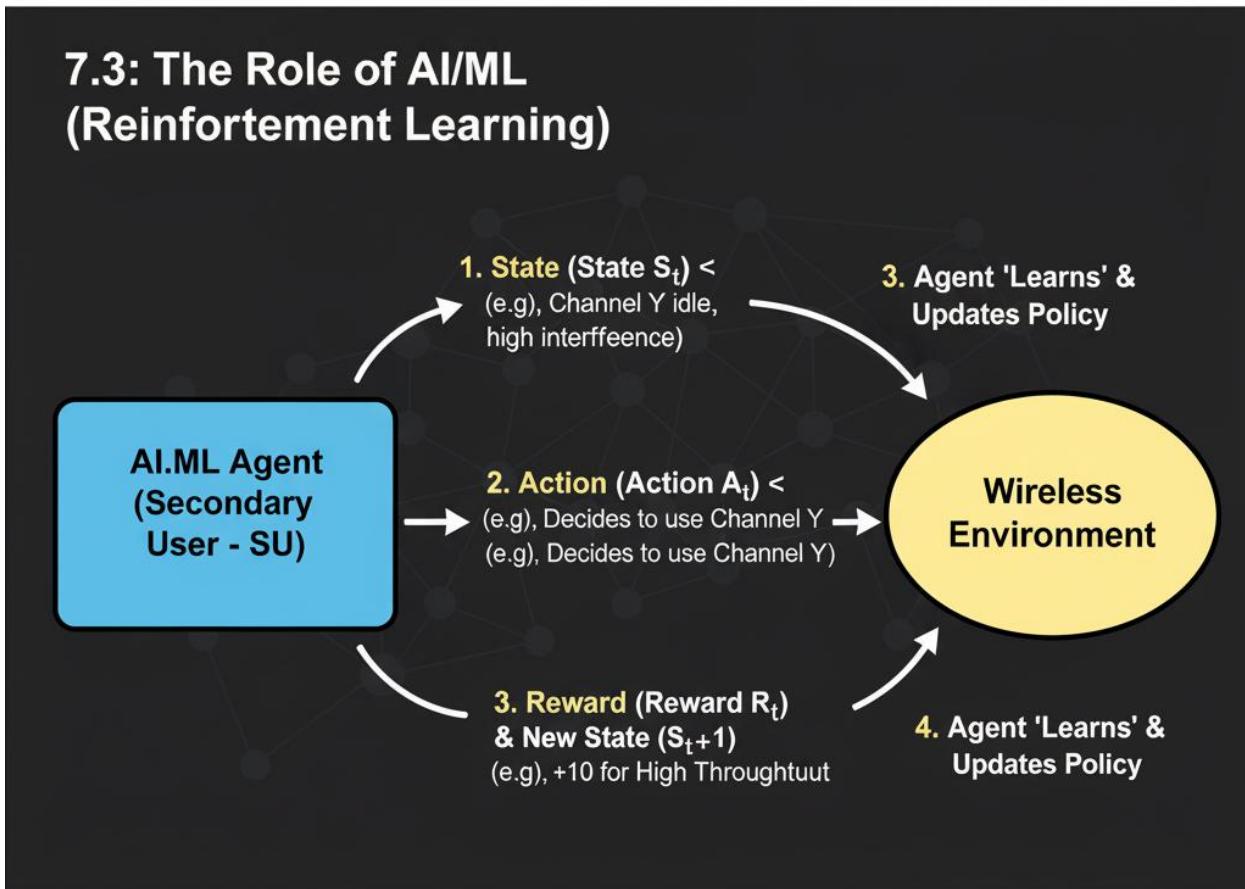
Logic Mờ (Fuzzy Logic): Được sử dụng để mô hình hóa bản chất không chính xác, không chắc chắn của môi trường vô tuyến (ví dụ: "chất lượng kênh ở mức tốt" thay vì một con số chính xác) để đưa ra các quyết định quản lý tối ưu.

Học Tăng cường (Reinforcement Learning - RL): Đây được coi là một "mô hình phù hợp" cho quản lý phô. SU hoạt động như một "tác nhân" (agent) tự học một chính sách tối ưu (ví dụ: nên chọn kênh nào) theo thời gian bằng cách thử và sai. Mục tiêu của nó là tối đa hóa một "phần thưởng" (reward) tích lũy (ví dụ: thông lượng cao nhất). Học Tăng cường Đa Tác nhân (MARL) được sử dụng cho các mạng phân tán, nơi nhiều SU học cách hợp tác hoặc cạnh tranh hiệu quả để chia sẻ tài nguyên.

Lý thuyết Trò chơi (Game Theory): Rất phù hợp tự nhiên để mô hình hóa các SU cạnh tranh. Các SU được xem như những "người chơi" trong một trò chơi. Các mô hình này có thể là:

- Phi hợp tác (Non-Cooperative): Mỗi SU cố gắng tối đa hóa lợi ích của riêng mình (ví dụ: trong các bài toán kiểm soát công suất).
- Kết hợp với RL: Học Tăng cường Sâu (DRL) có thể được kết hợp với lý thuyết trò chơi tiến hóa để tìm ra các chiến lược truy cập kênh tối ưu.

### 7.3: The Role of AI/ML (Reinforcement Learning)



Hình 12: Vai trò của Machine/Deep/Reinforcement Learning trong môi trường mạng vô tuyến

## Chương 8: Các Thuật toán Quản lý và Chia sẻ Phổ

### 8.1 Giới thiệu: Vấn đề Căn bản của Tính Di động trong Mạng CRN

Bối cảnh của truyền thông không dây hiện đại được định nghĩa bởi một mâu thuẫn cơ bản: sự bùng nổ nhu cầu về dịch vụ dữ liệu không dây đi kèm với chính sách cấp phép phổ biến cố định, dẫn đến tình trạng "khan hiếm phổ biến" nghiêm trọng. Trong các chương trước, Sóng Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) đã được giới thiệu như một công nghệ then chốt để giải quyết tình trạng kém hiệu quả này. Bằng cách cho phép truy cập phổ động (Dynamic Spectrum Access - DSA), CR cho phép các "Người dùng Thứ cấp" (Secondary Users - SU) không có giấy phép có thể truy cập cơ hội vào các dải tần được cấp phép khi chúng không được "Người dùng Sơ cấp" (Primary Users - PU) sử dụng.

Kiến trúc CR hoạt động dựa trên một chu trình nhận thức liên tục, bao gồm bốn chức năng cốt lõi: dò tìm phổ (phát hiện các "lỗ hổng" hay "không gian trắng"), quyết định phổ (chọn lỗ hổng tốt nhất), chia sẻ phổ (điều phối truy cập giữa các SU), và di động phổ (spectrum mobility). Trong khi ba chức năng đầu tiên tập trung vào việc *tìm kiếm* và *khởi tạo* truy cập, chức năng thứ tư—di động phổ—giải quyết thách thức phức tạp nhất: *duy trì* truy cập đó trong một môi trường mà quyền ưu tiên của SU là tạm thời và có thể bị thu hồi bất cứ lúc nào.

Thách thức cốt lõi của tính di động trong Mạng Vô tuyến Nhận thức (CRN) khác biệt cơ bản so với tính di động (chuyển giao) trong các mạng di động truyền thống như 4G LTE. Trong mạng 4G tiêu chuẩn, việc chuyển giao chủ yếu được kích hoạt bởi sự suy giảm chất lượng tín hiệu kênh khi người dùng di chuyển ra khỏi vùng phủ sóng của một trạm gốc. Đó là một quá trình được tối ưu hóa dựa trên hiệu suất vật lý. Ngược lại, trong CRN, yếu tố kích hoạt chính không phải là chất lượng tín hiệu mà là *chính sách ưu tiên*. Sự xuất hiện trở lại của một PU trên kênh được cấp phép của họ sẽ ngay lập tức vô hiệu hóa quyền truy cập của SU. SU bắt buộc phải giải phóng kênh ngay lập tức, ngay cả khi kênh đó đang cung cấp chất lượng tín hiệu hoàn hảo.

Sự gián đoạn bắt buộc này, được gọi là "chuyển giao phô" (spectrum handoff), gây ra một "tổn thất gián đoạn dịch vụ" (service interruption loss) nghiêm trọng. Sự gián đoạn đột ngột này không chỉ ảnh hưởng đến Chất lượng Dịch vụ (QoS) cảm nhận được của người dùng, mà còn gây ra sự suy giảm nghiêm trọng hiệu suất của các giao thức lớp vận tải. Ví dụ, Giao thức Điều khiển Truyền vận (TCP) được thiết kế để giải thích việc mất gói tin là do tắc nghẽn mạng, không phải do liên kết vật lý đột ngột biến mất và xuất hiện trở lại ở một tần số khác. Kết quả là, TCP có thể phản ứng sai bằng cách giảm đáng kể cửa sổ tắc nghẽn, dẫn đến thông lượng thấp ngay cả sau khi SU đã chuyển sang một kênh mới hoàn toàn.

Do đó, chương này phân tích "Di động Phô" và "Chuyển giao Phô" không phải như một tính năng bổ sung, mà là một yêu cầu cơ bản và là một thách thức thiết kế trung tâm. Việc quản lý hiệu quả các sự kiện chuyển giao này là yếu tố quyết định tính khả thi của việc tích hợp CRN vào các mạng 4G và xa hơn nữa, đảm bảo tính liên tục của dịch vụ cho SU trong khi vẫn tuân thủ nghiêm ngặt quyền ưu tiên tuyệt đối của PU.

## **8.2 Phân định Khái niệm: Di động Phô (Spectrum Mobility) và Chuyển giao Phô (Spectrum Handoff)**

Trong lĩnh vực CRN, các thuật ngữ "Di động Phô" và "Chuyển giao Phô" thường được sử dụng, nhưng chúng mô tả các khái niệm ở các cấp độ khác nhau của kiến trúc hệ thống. Việc phân biệt rõ ràng giữa chúng là điều cần thiết để hiểu được các thách thức đa lớp liên quan.

Di động Phô (Spectrum Mobility):

- Di động Phô là một chức năng hoặc khả năng cấp cao, là một trong bốn trụ cột của khung quản lý CR. Nó định nghĩa khả năng của một thiết bị SU thay

đổi linh hoạt kênh hoạt động (tần số, băng thông) để duy trì một phiên truyền thông đang diễn ra khi môi trường phô tần thay đổi. Đây là một khái niệm chiến lược nhằm đảm bảo tính liên tục của dịch vụ và sự linh hoạt (agility) của mạng CR.

### Chuyển giao Phổ (Spectrum Handoff - SHO):

- Chuyển giao Phổ là quy trình kỹ thuật hoặc cơ chế cụ thể được sử dụng để thực thi Di động Phổ. Nó là hành động vật lý mà SU "chuyển giao việc truyền dữ liệu đang diễn ra từ kênh hiện tại sang một kênh trống khác". Mục tiêu chính của quy trình SHO là giúp SU tìm và chuyển sang kênh mục tiêu phù hợp nhất để tiếp tục truyền thông với sự gián đoạn tối thiểu.

### Mối quan hệ Phân cấp và Quản lý Kết nối:

Mối quan hệ giữa hai thuật ngữ này không đơn giản là 1:1. Một phân tích sâu sắc hơn cho thấy Di động Phổ là một khái niệm bao hàm rộng hơn. Như đã nêu Di động Phổ được chia thành hai quy trình riêng biệt:

- 1. Chuyển giao Phổ (Spectrum Handoff):** Quy trình chuyển đổi kênh vật lý (Lớp 1/2) như đã định nghĩa ở trên.
- 2. Quản lý Kết nối (Connection Management):** Các hành động cần thiết ở các lớp giao thức cao hơn (Lớp 3/4) để bù đắp cho sự gián đoạn do chuyển giao gây ra.

Điều này làm nổi bật một khía cạnh quan trọng: Di động Phổ không chỉ là việc chuyển đổi tần số. Đó là một vấn đề xuyên lớp (cross-layer). Một cơ chế chuyển giao phổ thành công không chỉ là tìm một kênh mới nhanh chóng (vấn đề của Lớp 1/2), mà còn phải quản lý các tác động lên Lớp 3 (ví dụ: định tuyến) và Lớp 4 (ví dụ: điều chỉnh bộ đệm, quản lý cửa sổ TCP) để duy trì QoS tổng thể của ứng dụng. Do đó,

Chuyển giao Phổ là thành phần *điều kiện cần* (cơ chế vật lý), trong khi Quản lý Kết nối là thành phần *điều kiện đủ* (logic giao thức) để đạt được "Di động Phổ" liền mạch thực sự.

### 8.3 Phân tích Chi tiết Quy trình Chuyển giao Phổ

Quy trình Chuyển giao Phổ (SHO) là một chuỗi các sự kiện được xác định rõ ràng, bắt đầu bằng một yếu tố kích hoạt và kết thúc bằng việc tiếp tục dịch vụ trên một kênh mới.

#### 8.3.1 Các Yếu tố Kích hoạt (Triggers)

Việc chuyển giao phổ có thể được khởi xướng bởi một số yếu tố, cả bắt buộc và tự nguyện:

- Sự xuất hiện của PU (PU Arrival):** Đây là yếu tố kích hoạt phổ biến và cấp bách nhất. Khi một PU (người dùng được cấp phép) bắt đầu truyền trên kênh của họ, SU đang chiếm dụng kênh đó phải ngay lập tức giải phóng kênh để tránh gây nhiễu. Đây là một sự kiện chuyển giao bắt buộc.
- Sự di chuyển của SU (SU Mobility):** Khi một SU di chuyển về mặt vật lý, nó có thể đi vào vùng phủ sóng của một PU đang hoạt động trên cùng một kênh, ngay cả khi PU đó không được phát hiện ở vị trí ban đầu. Sự di chuyển này kích hoạt một chuyển giao bắt buộc giống như sự xuất hiện của PU.
- Suy giảm Chất lượng Kênh (Channel Quality Degradation):** Một SU có thể tự nguyện khởi xướng chuyển giao nếu chất lượng của kênh hiện tại (ví dụ: do nhiễu từ các SU khác, fading đa đường, hoặc nhiễu không phải PU) giảm xuống dưới ngưỡng QoS yêu cầu. Trong trường hợp này, SU chủ động tìm kiếm một "lỗ hổng" phổ tần tốt hơn.

#### 8.3.2 Các Giai đoạn của Quy trình Chuyển giao

Bất kể yếu tố kích hoạt là gì, quy trình SHO có thể được mô hình hóa như một chu trình gồm hai giai đoạn chính :

### 1. Giai đoạn 1: Đánh giá (Evaluation Phase)

Trong giai đoạn này, SU đang tích cực truyền dữ liệu trên kênh hiện tại. Đồng thời, nó liên tục thực hiện các nhiệm vụ giám sát:

- **Giám sát PU:** SU (hoặc mạng) liên tục dò tìm kênh đang sử dụng để phát hiện sự xuất hiện của tín hiệu PU. Tốc độ và độ chính xác của việc phát hiện này là rất quan trọng.
- **Phân tích Môi trường:** SU phân tích môi trường để xem liệu các sự kiện kích hoạt chuyển giao (ví dụ: PU xuất hiện, QoS giảm) có xảy ra hay không.
- **Ra Quyết định:** Khi một sự kiện kích hoạt được xác nhận, SU ra quyết định "thực hiện chuyển giao phỏ".

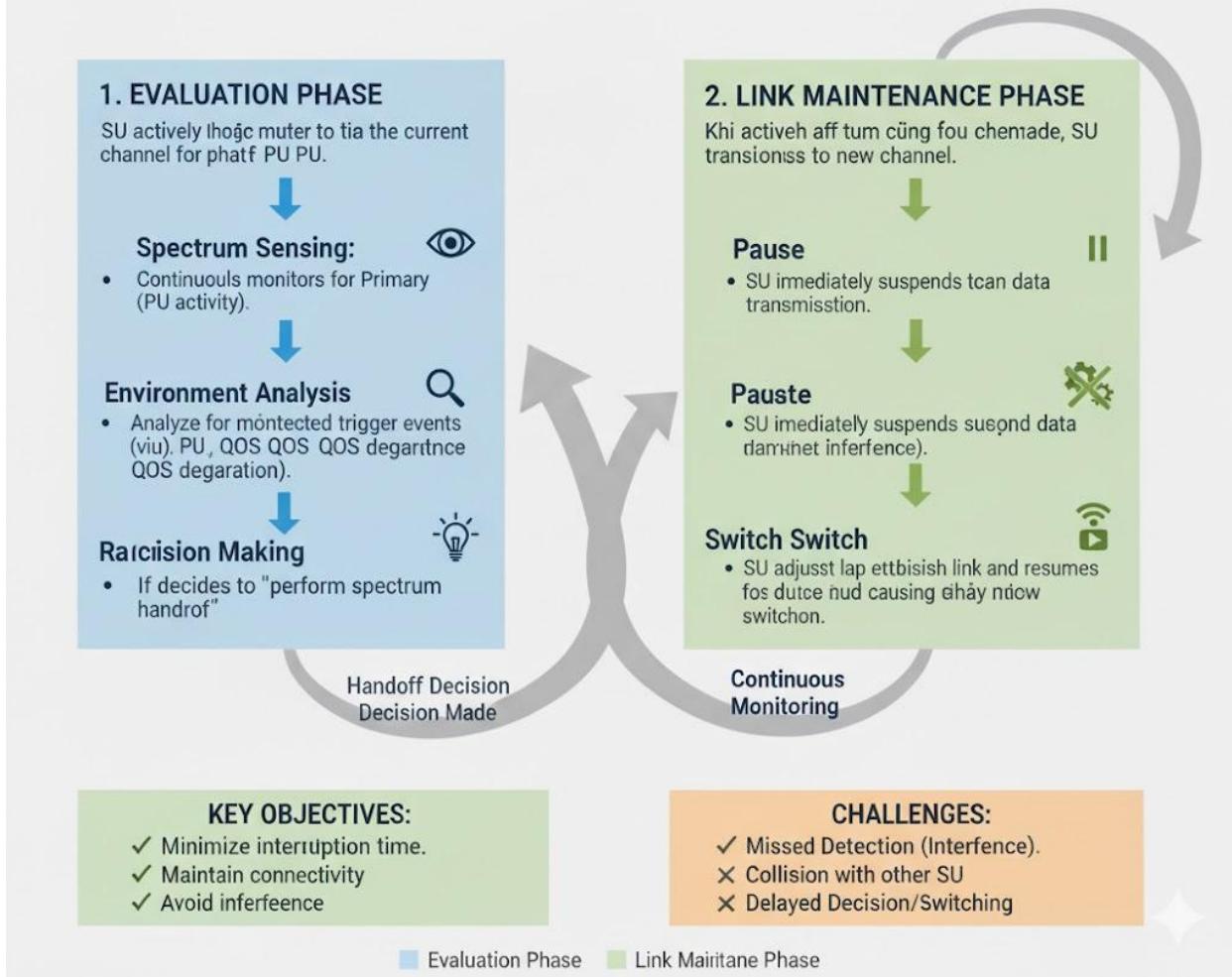
### 2. Giai đoạn 2: Duy trì Liên kết (Link Maintenance Phase)

Khi quyết định chuyển giao được đưa ra, SU chuyển sang giai đoạn thực thi :

- **Tạm dừng (Pause):** SU ngay lập tức tạm dừng mọi quá trình truyền dữ liệu đang diễn ra trên kênh hiện tại.
- **Giải phóng (Vacate):** SU giải phóng kênh, trả lại cho PU. Đây là bước quan trọng để tuân thủ quy tắc không gây nhiễu.
- **Chuyển đổi (Switch):** SU điều chỉnh bộ thu/phát của mình sang tần số của kênh mục tiêu mới đã được chọn.
- **Tiếp tục (Resume):** SU thiết lập lại liên kết trên kênh mới và tiếp tục phiên truyền dữ liệu bị gián đoạn.

# PHASES OF SPECTRUM HANDHOFF PROCESS

Detailed Steps for Seamless Transition



Hình 13: Các Giai đoạn của Quy trình Chuyển giao

Một quan sát quan trọng, được nêu trong, là thời điểm của "việc tìm kiếm kênh mục tiêu dự phòng". Việc này có thể được thực hiện trong **Giai đoạn Đánh giá** (trước khi cần thiết) hoặc trong **Giai đoạn Duy trì Liên kết** (sau khi bị gián đoạn). Thời điểm của bước lựa chọn kênh quan trọng này là yếu tố cơ bản phân chia tất cả các chiến lược chuyển giao, dẫn chúng ta đến sự phân loại tiếp theo.

## 8.4 Phân loại và So sánh các Chiến lược Chuyển giao Cốt lõi

Các kiến trúc Chuyển giao Phổ (SHO) chủ yếu được phân loại dựa trên thời điểm chúng thực hiện việc dò tìm và lựa chọn kênh mục tiêu: Bị động (Reactive) hoặc Chủ động (Proactive).

#### 8.4.1 Chiến lược Bị động (Reactive Spectrum Handoff)

Trong chiến lược bị động, SU không thực hiện hành động nào cho đến *sau khi* một sự kiện kích hoạt (ví dụ: PU xuất hiện) xảy ra. Khi bị gián đoạn, SU mới bắt đầu quy trình:

1. Tạm dừng truyền.
2. Dò tìm phổ trên diện rộng để tìm một kênh trống mới.
3. Chọn một kênh.
4. Chuyển đổi và tiếp tục.

- **Ưu điểm:**

- **Độ chính xác Kênh:** Kênh mục tiêu được chọn có độ chính xác cao, vì nó được xác nhận là trống ngay tại thời điểm lựa chọn. Điều này giải quyết vấn đề thông tin kênh bị lỗi thời.

- **Nhược điểm:**

- **Độ trễ Rất cao:** Đây là nhược điểm chí mạng. SU phải chịu "chi phí thời gian dò tìm" (sensing time cost)<sup>5</sup> trong khi dịch vụ của nó đã bị tạm dừng. Điều này dẫn đến "độ trễ chuyển giao rất cao" và gián đoạn dịch vụ nghiêm trọng.

#### 8.4.2 Chiến lược Chủ động (Proactive Spectrum Handoff)

Trong chiến lược chủ động, SU dự đoán khả năng xảy ra chuyển giao và chuẩn bị trước. Trong Giai đoạn Đánh giá (khi vẫn đang truyền thông bình thường), SU liên

tục dò tìm các kênh khác và duy trì một "danh sách kênh dự phòng" (backup channel list) gồm các kênh mục tiêu tiềm năng.

Khi PU xuất hiện:

1. Tạm dừng truyền.
2. Ngay lập tức chọn kênh tốt nhất từ danh sách dự phòng đã có.
3. Chuyển đổi và tiếp tục.

- **Ưu điểm:**

- **Độ trễ Rất thấp:** Chiến lược này tránh được "chi phí thời gian dò tìm" tại thời điểm chuyển giao. Do đó, độ trễ chuyển giao là "rất ngắn".
- **Hiệu suất cao:** Các mô phỏng đã chứng minh rằng các lược đồ chủ động cho thấy độ trễ thấp hơn, ít va chạm hơn, và thông lượng trung bình cao hơn đáng kể (ví dụ: tăng 40.5% so với bị động trong một nghiên cứu).

- **Nhược điểm:**

- **Thông tin Lỗi thời:** Kênh mục tiêu được xác định trước có thể không còn khả dụng vào thời điểm chuyển giao thực sự (ví dụ: một SU khác hoặc một PU khác đã chiếm nó).

### 8.4.3 Các Chiến lược Lai (Hybrid) và Cơ hội (Opportunistic)

Các chiến lược lai (Hybrid) có gắng kết hợp những ưu điểm của cả hai. Ví dụ, một SU có thể duy trì một danh sách chủ động (proactive list), nhưng thực hiện một bước "dò tìm nhanh" (quick sensing) bị động trên kênh mục tiêu hàng đầu ngay trước khi chuyển đổi để xác minh tính khả dụng của nó. ghi nhận đây là loại thứ ba.

Ngoài ra, các phương pháp tiếp cận tiên tiến như PUTPOSH (Primary User Traffic Pattern-based Opportunistic Spectrum Handoff) cho phép SU quyết định *có nên*

*chuyển giao hay không*. Nếu mô hình lưu lượng PU cho thấy PU chỉ xuất hiện trong thời gian rất ngắn, SU có thể quyết định tạm dừng và chờ đợi (pause and wait) thay vì thực hiện một chuyển giao tốn kém, nhằm giảm thiểu tổng số lần chuyển giao không cần thiết.

#### 8.4.4 Phân tích So sánh và Tổng hợp

Phân tích dữ liệu mô phỏng cho thấy một điểm quan trọng. Mặc dù chiến lược chủ động có *rủi ro lý thuyết* là gây nhiều do thông tin lỗi thời, kết quả thực tế lại cho thấy nó dẫn đến *ít va chạm hơn* so với chiến lược bị động.

Sự mâu thuẫn rõ ràng này có thể được giải thích như sau: Trong thực tế, số lượng và mức độ nghiêm trọng của các va chạm gây ra bởi *sự chậm trễ* của chiến lược bị động (tức là, SU không giải phóng kênh PU đủ nhanh do phải dò tìm) là *lớn hơn* so với số lượng va chạm gây ra bởi *dự đoán sai* của chiến lược chủ động. Điều này tạo ra một lập luận mạnh mẽ rằng chiến lược chủ động là phương pháp vượt trội, *với điều kiện* các mô hình dự đoán và danh sách kênh dự phòng của nó đủ chính xác. Điều này đã thúc đẩy nghiên cứu chuyển sang các thuật toán thông minh để cải thiện độ chính xác của dự đoán chủ động.

**Bảng 8.1: So sánh Chiến lược Chuyển giao Chủ động và Bị động**

Đặc điểm	Chiến lược Bị động (Reactive)	Chiến lược Chủ động (Proactive)

<b>Thời điểm Dò tìm Kênh Mục tiêu</b>	Sau khi PU xuất hiện (trong Giai đoạn Duy trì Liên kết).	Trước khi PU xuất hiện (trong Giai đoạn Đánh giá).
<b>Tổng Độ trễ Chuyển giao</b>	Rất cao (bao gồm toàn bộ thời gian dò tìm).	Rất thấp (thời gian dò tìm được loại bỏ khỏi đường dẫn critique).
<b>Thông lượng Trung bình</b>	Thấp hơn (do thời gian gián đoạn dịch vụ kéo dài).	Cao hơn (đạt được mức tăng 40.5% trong mô phỏng).
<b>Tỷ lệ Va chạm</b>	Cao hơn (do chậm trễ trong việc giải phóng kênh PU).	Thấp hơn (chuyển đổi gần như tức thời).
<b>Rủi ro/Chi phí Chính</b>	"Chi phí thời gian dò tìm" gây gián đoạn dịch vụ lớn.	Kênh mục tiêu được xác định trước có thể bị lỗi thời/không khả dụng.

## 8.5 Thảo luận Nâng cao: Chuyển giao Cứng (Hard) và Mềm (Soft) trong Bối cảnh CR

Trong các mạng di động truyền thống, sự phân biệt giữa chuyển giao "cứng" và "mềm" là rất quan trọng đối với QoS.

- **Chuyển giao Cứng (Hard Handoff):** Còn gọi là "break-before-make". Thiết bị ngắt kết nối với trạm gốc cũ (A) *trước khi* thiết lập kết nối với trạm gốc mới (B). Điều này gây ra một thời gian gián đoạn ngắn.
- **Chuyển giao Mềm (Soft Handoff):** Còn gọi là "make-before-break". Thiết bị thiết lập kết nối với trạm mới (B) *trong khi* vẫn duy trì kết nối với trạm cũ (A), sau đó mới ngắt kết nối với A. Điều này đảm bảo tính liên tục liên mạch.

Tuy nhiên, khi áp dụng các khái niệm này vào Chuyển giao Phổ CR, một sự khác biệt cơ bản xuất hiện. Các tài liệu nghiên cứu được phân tích (ví dụ: ) không định nghĩa rõ ràng chuyển giao phổ cứng hay mềm, và xác nhận rằng thông tin này không có trong các khảo sát được cung cấp.

Tuy nhiên, chúng ta có thể suy luận bản chất của chuyển giao CR từ các nguyên tắc cơ bản. Nguồn phân biệt rõ ràng chuyển giao truyền thống (dựa trên chất lượng tín hiệu, cùng ưu tiên) với chuyển giao phổ (dựa trên *ưu tiên*, với PU > SU).

Khi một PU xuất hiện, SU *mất quyền* truy cập vào kênh đó ngay lập tức. SU không có lựa chọn "duy trì" kết nối cũ (kênh A) trong khi thiết lập kết nối mới (kênh B). Nó *bắt buộc* phải "break" (ngắt) kết nối với kênh A *trước khi* nó có thể "make" (thiết lập) kết nối trên kênh B.

Do đó, theo định nghĩa, **mọi chuyển giao phổ do PU kích hoạt về cơ bản đều là Chuyển giao Cứng (Hard Handoff).**

Khái niệm "chuyển giao mềm" chỉ có thể áp dụng trong một kịch bản CR rất cụ thể: một chuyển giao *tự nguyện* do SU khởi xướng (ví dụ: do suy giảm QoS ). Trong trường hợp đó, nếu SU có phần cứng SDR đủ khả năng (ví dụ: hai bộ thu/phát song song), nó có thể dò tìm và thiết lập liên kết trên kênh B trước khi ngắt liên kết trên

kênh A. Tuy nhiên, đối với trường hợp phổ biến và cấp bách nhất là sự xuất hiện của PU, "break-before-make" là kịch bản duy nhất.

Toàn bộ mục tiêu của các chiến lược CR tiên tiến (như chiến lược chủ động) không phải là để đạt được "chuyển giao mềm" (điều này là không thể về mặt chính sách), mà là để giảm thiểu thời gian "break" (độ trễ chuyển giao) trong cơ chế chuyển giao cứng xuống gần bằng không.

## 8.6 Tích hợp Quản lý Di động Phổ vào Kiến trúc 4G LTE

Việc tích hợp các khả năng CR vào một mạng 4G LTE/LTE-Advanced tiêu chuẩn đặt ra những thách thức đáng kể về giao thức, vì kiến trúc 3GPP ban đầu không được thiết kế cho truy cập động dựa trên ưu tiên.

Kiến trúc 4G bao gồm E-UTRAN (Mạng Truy cập Vô tuyến Mặt đất Phổ quát Phát triển), là mạng truy cập vô tuyến bao gồm các trạm gốc eNodeB, và EPC (Lõi Gói Phát triển), là mạng lõi. Trong LTE tiêu chuẩn, việc quản lý di động (chuyển giao) là một chức năng cốt lõi của E-UTRAN và được điều phối cụ thể bởi giao thức Điều khiển Tài nguyên Vô tuyến (Radio Resource Control - RRC) ở Lớp 3.

Các chuyển giao LTE tiêu chuẩn được kích hoạt bởi các sự kiện đo lường do 3GPP định nghĩa, chẳng hạn như:

- **Sự kiện A3:** Một trạm gốc lân cận trở nên mạnh hơn trạm gốc đang phục vụ một khoảng chênh lệch nhất định (kích hoạt chuyển giao).
- **Sự kiện B2:** Trạm gốc đang phục vụ trở nên yếu hơn một ngưỡng nhất định, và một lân cận trở nên mạnh hơn một ngưỡng khác. Tất cả các sự kiện này đều dựa trên *chất lượng tín hiệu*.

Thách thức của việc tích hợp CR là nó giới thiệu một *sự kiện kích hoạt mới, phi tiêu chuẩn*: "Phát hiện PU" (PU Detected). Sự kiện này không bắt nguồn từ các phép đo RRC (Lớp 3), mà từ các quy trình dò tìm phô ở Lớp 1 (PHY) hoặc Lớp 2 (MAC).

Để việc tích hợp hoạt động, một **thiết kế giao thức xuyên lớp (cross-layer)** là bắt buộc. Sự kiện "Phát hiện PU" ở lớp dưới phải có khả năng ngay lập tức kích hoạt một thủ tục Chuyển giao RRC ở Lớp 3. Điều này đòi hỏi phải sửa đổi ngăn xếp giao thức RRC để nhận các kích hoạt nội bộ này, ngoài các kích hoạt đo lường tiêu chuẩn.

Điều này tạo ra một kịch bản xung đột tiềm ẩn phức tạp. Hãy xem xét một SU 4G-CR:

1. **Logic RRC (LTE):** Dựa trên Sự kiện A3, logic RRC tiêu chuẩn (dựa trên tín hiệu) có thể quyết định rằng SU nên chuyển giao sang Té bào 2, vì nó cung cấp tín hiệu mạnh nhất.
2. **Logic CR (Nhận thức):** Đồng thời, mô-đun dò tìm phô CR (L1/L2) phát hiện ra rằng kênh tốt nhất trên Té bào 2 hiện đang bị một PU chiếm dụng.

Hệ thống hiện phải đối mặt với hai chỉ thị xung đột. Logic RRC tiêu chuẩn không nhận thức được các ràng buộc của CR. Do đó, một thực thể "Quản lý Tài nguyên Vô tuyến Nhận thức" (Cognitive RRM) hoặc "C-RRC" mới là cần thiết. Thực thể này, được đặt bên cạnh quản lý chuyển giao Lớp 3 truyền thống 19, phải có khả năng:

- a. Thu thập đầu vào từ cả báo cáo đo lường RRC tiêu chuẩn và kết quả dò tìm phô CR.
- b. Sử dụng logic ra quyết định (ví dụ: logic mờ hoặc ML) để arbitrate (phân xử) các xung đột này.

c. Đưa ra một quyết định chuyển giao tối ưu duy nhất (ví dụ: "Bỏ qua Té bào 2, chuyển sang Té bào 3 yêu hơn nhưng không có PU").

d. Kích hoạt các thủ tục RRC tiêu chuẩn (ví dụ: \$RRCConnectionReconfiguration\$) để thực thi quyết định, che giấu sự phức tạp của CR khỏi mạng lõi EPC.<sup>17</sup>

Những sửa đổi sâu sắc này đối với ngăn xếp giao thức E-UTRAN là trọng tâm của Chương 9.

## **8.7 Các Thuật toán Ra quyết định Chuyển giao Thông minh và Tối ưu hóa**

Như đã thiết lập, chiến lược chủ động là vượt trội về hiệu suất, nhưng thành công của nó phụ thuộc hoàn toàn vào khả năng dự đoán chính xác hành vi của PU và chọn kênh mục tiêu *tốt nhất*.<sup>3</sup> Điều này đã dẫn đến việc áp dụng rộng rãi các thuật toán ra quyết định thông minh.

### **8.7.1 Mô hình dựa trên Logic Mờ (Fuzzy Logic)**

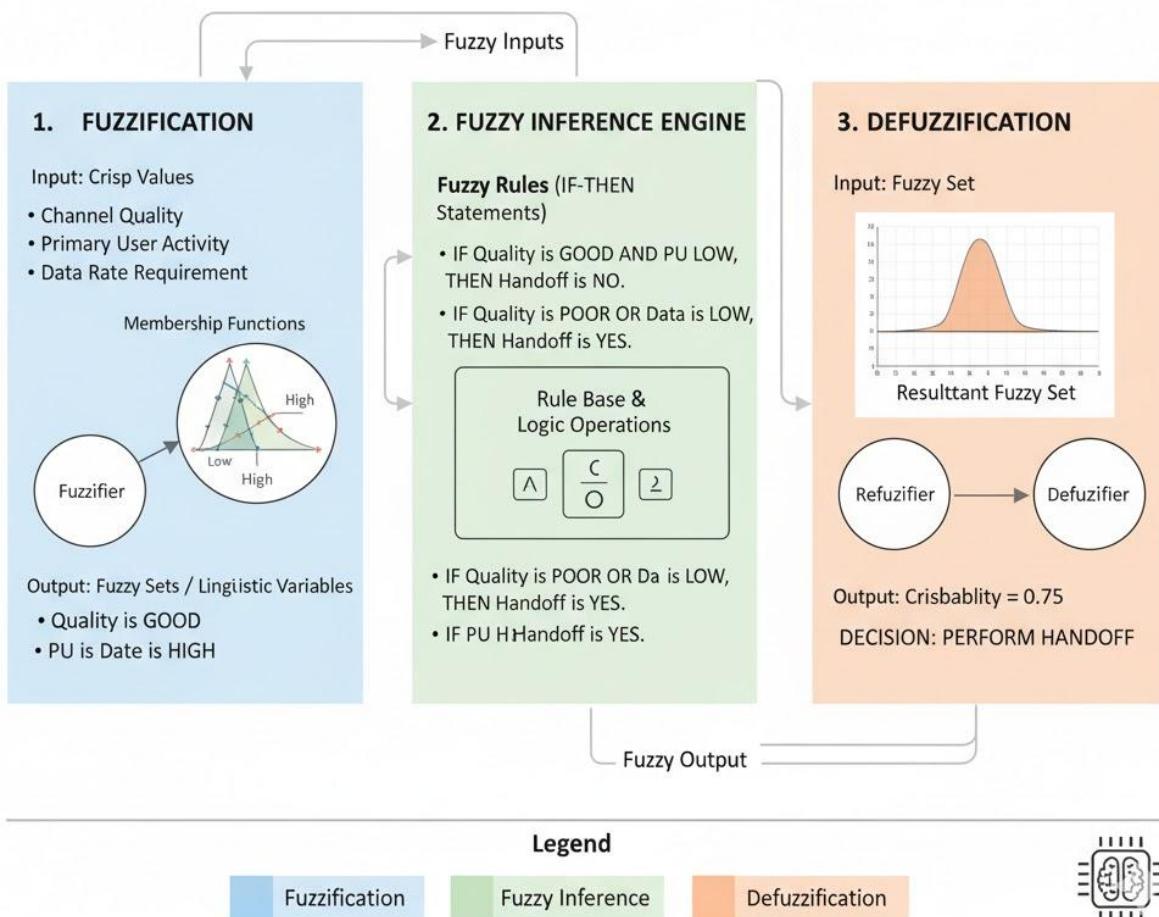
Môi trường CRN vốn dĩ không chắc chắn và mơ hồ. Các biến đầu vào cho quyết định chuyển giao không phải lúc nào cũng là nhị phân (0/1). Ví dụ: "Xác suất xuất hiện PU" là một giá trị xác suất, "Chất lượng kênh" là một thang đo liên tục. Logic Mờ là một công cụ toán học lý tưởng để xử lý loại thông tin không chính xác này.<sup>2</sup>

Một Bộ điều khiển Logic Mờ (FLC) có thể được thiết kế để đưa ra quyết định chuyển giao. Nó nhận nhiều đầu vào (ví dụ: Chất lượng tín hiệu, Xác suất PU, Băng thông kênh) và sử dụng các biến ngôn ngữ (ví dụ: Chất lượng "CAO", "TRUNG BÌNH", "THẤP") và một bộ quy tắc (ví dụ: "NẾU Xác suất PU là CAO VÀ Băng thông là THẤP, THÌ Mức độ ưu tiên Chuyển giao là RẤT CAO") để đưa ra quyết định cuối cùng.

Một cải tiến quan trọng là sử dụng **Hàm thành viên Thích ứng (Fuzzy-Adaptive Membership Functions - F-AMF)**. Thay vì sử dụng các định nghĩa tĩnh (ví dụ: "CAO" luôn là  $> 0.8$ ), các hàm thành viên tự điều chỉnh dựa trên điều kiện mạng thời gian thực. Điều này làm cho FLC linh hoạt hơn và đặc biệt hiệu quả trong việc giảm các chuyển giao "ping-pong" (chuyển giao qua lại không cần thiết).

## FUZZY LOGIC-BASED DECISION MAKING FOR COGNITIVE RADIO

Illustrating the Fuzzy Logic Model for Spectrum Handoff



Hình 14: Mô hình dựa trên Logic Mờ (Fuzzy Logic)

## 8.7.2 Mô hình dựa trên Học máy (ML) và Học sâu (DL)

Các kỹ thuật Học máy (ML) và Học sâu (DL) cung cấp một bộ công cụ mạnh mẽ hơn để giải quyết hai nhiệm vụ: *dự đoán* và *tối ưu hóa*.

### 1. Dự đoán (Prediction):

Để chiến lược chủ động hoạt động, SU cần dự đoán khi nào PU sẽ xuất hiện. Các mô hình DL như Mạng Nơ-ron Hồi quy (RNN) và đặc biệt là Bộ nhớ Dài-Ngắn hạn (LSTM) rất phù hợp để phân tích chuỗi thời gian của việc sử dụng kênh và dự đoán các mẫu hành vi của PU theo thời gian.

### 2. Tối ưu hóa Quyết định (Học Tăng cường):

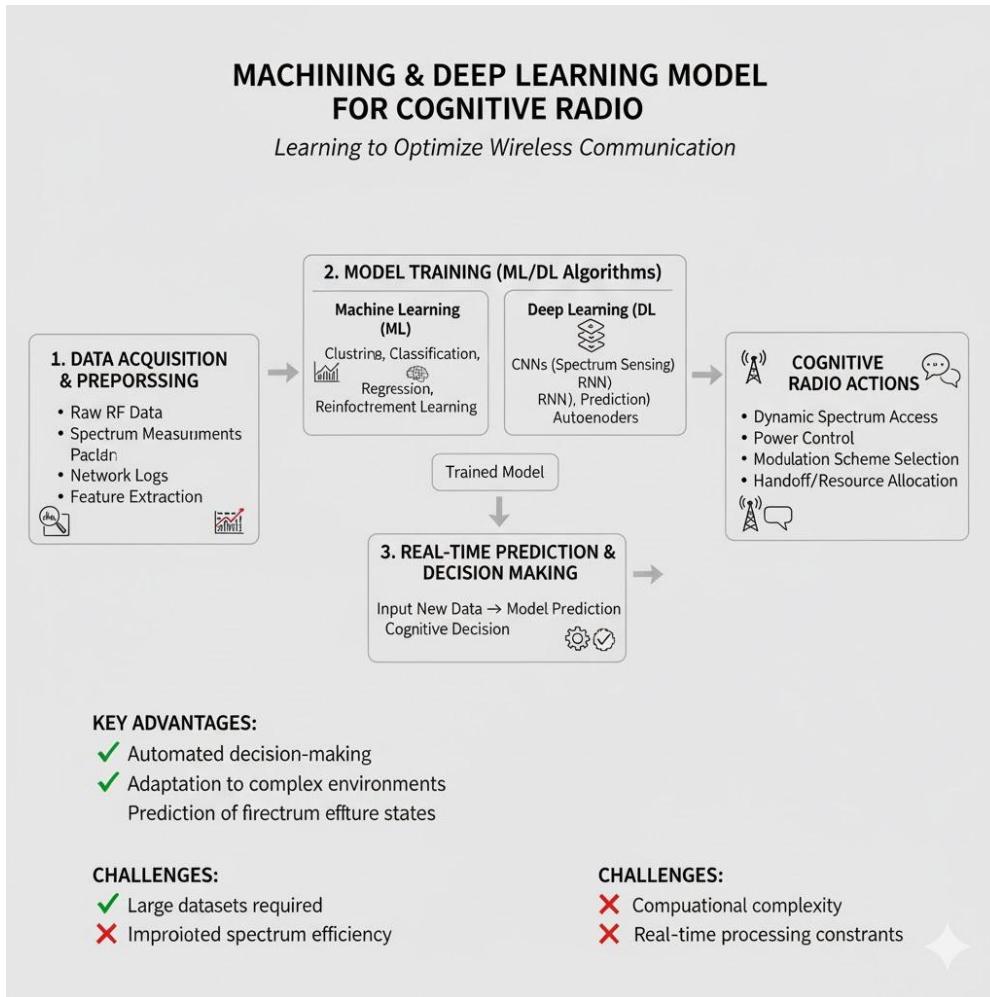
Học Tăng cường (Reinforcement Learning - RL) là một mô hình lý tưởng để tối ưu hóa quyết định chuyển giao. Để xuất sử dụng Mạng Q-Learning Sâu (Deep Q-Network - DQN).

Khung DQN cho SHO được định nghĩa như sau :

- **Tác nhân (Agent):** Người dùng Thứ cấp (SU).
- **Trạng thái (State):** Một tập hợp các quan sát về môi trường, bao gồm các ràng buộc hệ thống (ví dụ: mức nhiễu hiện tại lên PU, tỷ lệ thành công SHO lịch sử, trạng thái kênh).
- **Hành động (Action):** Quyết định chọn một kênh mục tiêu cụ thể từ danh sách các kênh khả dụng.
- **Phản thưởng (Reward):** Một tín hiệu phản hồi định lượng. Thay vì chỉ là một hình phạt khi va chạm PU, phản thưởng được định nghĩa là một giá trị tích cực, chẳng hạn như *tốc độ truyền dữ liệu cá nhân (\$R\_i\$)* mà SU đạt được trên kênh đó.

Bằng cách sử dụng DQN, SU (tác nhân) học một "chính sách" (policy)—một hàm ánh xạ trạng thái sang hành động—để tối đa hóa phần thưởng tích lũy theo thời gian. Điều này đại diện cho một sự thay đổi mô hình cơ bản. Chuyển giao phổ không còn là một cơ chế fail-safe (an toàn khi hỏng) chỉ nhằm tránh PU. Nó trở thành một công cụ tối ưu hóa hiệu suất liên tục. Với mô hình DQN, một SU có thể quyết định thực hiện chuyển giao phổ một cách tự nguyện không phải vì PU sắp xuất hiện, mà đơn giản là vì mô hình RL của nó đã xác định rằng một kênh khả dụng khác (ví dụ: kênh có băng thông rộng hơn hoặc ít nhiễu SU hơn) sẽ mang lại phần thưởng (thông lượng) cao hơn.

Để giải quyết vấn đề hội tụ chậm của DQN, các kỹ thuật như **Học Chuyển giao (Transfer Learning)** được sử dụng. Điều này cho phép một SU mới tham gia mạng có thể nhanh chóng học hỏi từ các "SU chuyên gia" hiện có, thay vì phải học lại chính sách tối ưu từ đầu. Các mô hình khác, chẳng hạn như Máy Vector Hỗ trợ (SVM) kết hợp với các thuật toán metaheuristic (ví dụ: thuật toán Red Deer), cũng đã được đề xuất để dự đoán và giảm thiểu độ trễ và số lần chuyển giao.



Hình 15: Ứng dụng ML/DL trong Cognitive Radio

## 8.8 Phân tích Hiệu suất: Các Số liệu Đánh giá Chuyển giao Phổ

Để đánh giá và so sánh một cách khách quan các chiến lược chuyển giao (ví dụ: chủ động so với bị động) và các thuật toán (ví dụ: DQN so với Logic Mờ), một bộ Số liệu Hiệu suất Chính (KPI) chuẩn hóa là cần thiết.<sup>5</sup> Các số liệu này có thể được chia thành hai loại: các chỉ số hiệu quả hệ thống và các chỉ số QoS tập trung vào người dùng.

### 8.8.1 Các Số liệu Hiệu quả Hệ thống

Những số liệu này đo lường hiệu quả tổng thể của cơ chế chuyển giao:

- **Tổng Độ trễ Chuyển giao (Total Handoff Delay):** Thường được coi là số liệu quan trọng nhất. Đây là tổng thời gian từ khi SU tạm dừng truyền trên kênh cũ đến khi nó tiếp tục truyền thành công trên kênh mới. Giảm thiểu số liệu này là mục tiêu chính.
- **Thông lượng SU (SU Throughput):** Tổng lượng dữ liệu mà SU truyền thành công trong một khoảng thời gian, bao gồm các gián đoạn do chuyển giao. Đây là số liệu thường được tối ưu hóa trong các mô hình tối ưu hóa.
- **Số lượng Chuyển giao (Number of Handoffs):** Số lần SU phải chuyển kênh trong một phiên. Mặc dù di động là cần thiết, nhưng quá nhiều chuyển giao (hiệu ứng "ping-pong") sẽ làm tăng chi phí báo hiệu và suy giảm QoS. Mục tiêu là giảm thiểu các chuyển giao không cần thiết.<sup>3</sup>
- **Tỷ lệ Va chạm (Collision Rate):** Tần suất SU gây nhiễu cho PU (nghịêm trọng nhất) hoặc các SU khác. Số liệu này phải được giữ ở mức tối thiểu tuyệt đối.

### 8.8.2 Các Số liệu Chất lượng Dịch vụ (QoS) Người dùng

Những số liệu này, thường được phân tích bằng cách sử dụng các mô hình chuỗi Markov và lý thuyết hàng đợi, đo lường trải nghiệm của người dùng cuối :

- **Xác suất Chặn (Blocking Probability):** Đây là xác suất mà một yêu cầu kết nối SU mới bị từ chối (bị chặn) do không có kênh phổ tần nào khả dụng tại thời điểm yêu cầu.
- **Xác suất Ngắt Buộc (Forced Termination Probability):** Đây là xác suất mà một kết nối SU đang diễn ra bị ngắt giữa chừng (dropped) do một chuyển giao phổ thất bại. Chuyển giao thất bại xảy ra khi PU xuất hiện và SU không thể tìm thấy một kênh mục tiêu trong kịp thời.

Trong trải nghiệm người dùng,  $P(pt)$  (bị ngắt cuộc gọi đang diễn ra) thường được coi là tồi tệ hơn nhiều so với  $P(bl)$  (không thể bắt đầu cuộc gọi mới).

Các mô hình phân tích giới thiệu một cơ chế chính sách để quản lý sự cân bằng này: **kênh bảo vệ (guard channels)**. Một nhà khai thác mạng có thể quyết định dành riêng một số lượng  $\$h\$$  kênh *chỉ* cho các SU đang thực hiện chuyển giao. Các kênh này không được sử dụng cho các kết nối SU mới.

Điều này tạo ra một sự đánh đổi QoS cơ bản:

1. Bằng cách tăng số lượng kênh bảo vệ ( $\$h > 0\$$ ), một SU đang thực hiện chuyển giao có nhiều khả năng tìm thấy kênh trống hơn. Điều này *làm giảm*  $\$P_{ft}\$$  (cải thiện trải nghiệm người dùng hiện tại).
2. Tuy nhiên,  $\$h\$$  kênh này hiện không khả dụng cho các kết nối mới. Điều này *làm tăng*  $\$P_{bl}\$$  (làm giảm khả năng tiếp cận của người dùng mới).

Do đó, không có câu trả lời kỹ thuật đúng duy nhất. Nhà khai thác mạng 4G-CR phải đổi mới với một quyết định chính sách quan trọng: ưu tiên các kết nối hiện tại (chấp nhận  $\$P_{bl}\$$  cao hơn) hay ưu tiên các kết nối mới (chấp nhận  $\$P_{ft}\$$  cao hơn)?

## Bảng 8.2: Các Số liệu Đánh giá Hiệu suất QoS cho Chuyển giao Phổ

Số liệu	Định nghĩa (Toán học/Logic)	Mô tả / Ý nghĩa (Nó do lường điều gì?)
Độ trễ Chuyển giao (Handoff Delay)	$T_{resume} - T_{pause}$	Thời gian gián đoạn dịch vụ mà SU phải chịu trong mỗi lần chuyển giao.[25]
Thông lượng SU (SU Throughput)	$\frac{\text{Tổng dữ liệu SU truyền thành công}}{\text{Tổng thời gian phiên}}$	Hiệu quả tổng thể của SU trong việc sử dụng các cơ hội phổ biến, bất chấp các chuyển giao.
Xác suất Chặn ( $P_{bl}$ )	$P(\text{Kết nối SU mới bị từ chối})$	Xác suất một người dùng mới không thể truy cập vào mạng do thiếu tài nguyên.
Xác suất Ngắt Buộc ( $P_{ft}$ )	$\$P(\text{text(Chuyển giao SU thất bại})\$$	$\backslash\text{text( PU xuất hiện)})\$$
Tỷ lệ Chuyển giao (Handoff Rate)	$\frac{\text{Tổng số lần chuyển giao}}{\text{Tổng thời gian phiên}}$	Đo lường mức độ ổn định của kênh SU. Tỷ lệ quá cao (ping-pong) làm suy giảm QoS.[25]

# **Chương 9: Di động Phổ và Chuyển giao: Một Thách thức Quan trọng**

## **9.1 Giới thiệu: Thách thức Tích hợp Tính "Cơ hội" vào Kiến trúc "Xác định" của 4G**

### **9.1.1 Bối cảnh: Nghịch lý triết học của CR-LTE**

Kiến trúc 4G Long Term Evolution (LTE) tiêu chuẩn, được định nghĩa bởi 3GPP, là đỉnh cao của các hệ thống viễn thông di động "xác định" (deterministic) và "cấp phép" (licensed-centric). Trong mô hình Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), trạm gốc (eNodeB hay eNB) đóng vai trò là thực thể điều khiển trung tâm, sở hữu toàn quyền đối với một dải phổ được cấp phép cụ thể. Các tài nguyên được lượng tử hóa thành các Khối Tài nguyên (Resource Blocks - RBs) và được cấp phát cho Thiết bị Người dùng (User Equipment - UE) thông qua một lịch trình nghiêm ngặt, được kiểm soát chặt chẽ, với giả định cơ bản rằng các tài nguyên này luôn có sẵn và được bảo vệ khỏi sự can thiệp từ bên ngoài.

Ngược lại, Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) hoạt động dựa trên một triết lý hoàn toàn đối lập: đó là một mô hình "cơ hội" (opportunistic) và "linh hoạt" (agile). CR được thiết kế để giải quyết vấn đề khan hiếm phổ tàn bbang cách tự động phát hiện và sử dụng các kênh "trống" (còn gọi là "lỗ hổng phổ" hay "khoảng trống") trong các băng tần được cấp phép mà không gây nhiễu cho Người dùng Chính (Primary User - PU). Bản chất của CR là sự thích ứng động với một môi trường vô tuyến không thể đoán trước và không đáng tin cậy.

Do đó, thách thức cốt lõi khi tích hợp CR vào 4G không chỉ đơn thuần là kỹ thuật, mà còn mang tính triết học: làm thế nào để tích hợp một hệ thống truy cập động, không ổn định (CR) vào một ngăn xếp giao thức (protocol stack) được xây dựng dựa

trên giả định về sự sẵn có liên tục và độc quyền của tài nguyên. Việc điều chỉnh ngăn xếp giao thức 4G đòi hỏi phải đưa sự linh hoạt vào các lớp vốn được thiết kế cho sự cứng nhắc, và đưa khả năng xử lý sự không chắc chắn vào một hệ thống được xây dựng trên sự chắc chắn.

### **9.1.2 Nền tảng: Ngăn xếp Giao thức 4G LTE Tiêu chuẩn**

Để hiểu rõ những điều chỉnh cần thiết, trước tiên cần tóm tắt các chức năng cơ sở của các lớp giao thức 4G LTE mà quá trình tích hợp CR sẽ tác động đến. Ngăn xếp giao thức LTE được chia thành Mặt phẳng Người dùng (User Plane) để truyền dữ liệu và Mặt phẳng Điều khiển (Control Plane) để báo hiệu.

- **PHY (Lớp Vật lý - Lớp 1):** Chịu trách nhiệm truyền và nhận tín hiệu vô tuyến qua giao diện không khí. Các chức năng chính bao gồm mã hóa/giải mã kênh, điều chế/giải điều chế (OFDMA cho đường xuống, SC-FDMA cho đường lên), và các quy trình Phản hồi Yêu cầu Lặp lại Tự động Lai (Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ) ở mức vật lý.
- **MAC (Điều khiển Truy cập Phương tiện - Lớp 2):** Thực hiện lập lịch (scheduling) tài nguyên vô tuyến trong thời gian thực, quản lý các khối tài nguyên (RBs), xử lý ưu tiên giữa các luồng dữ liệu và giữa các UE, và quản lý phần còn lại của quy trình HARQ. Đây là lớp thực thi các quyết định cấp phát tài nguyên tức thời.
- **RLC (Điều khiển Liên kết Vô tuyến - Lớp 2):** Đảm bảo độ tin cậy của liên kết vô tuyến. Nó cung cấp ba chế độ hoạt động: Trong suốt (Transparent Mode - TM), Không được xác nhận (Unacknowledged Mode - UM), và Được xác nhận (Acknowledged Mode - AM). Chức năng của nó bao gồm phân đoạn và tái lắp ráp các gói tin, cũng như Yêu cầu Lặp lại Tự động (ARQ) trong chế độ AM.

- **PDCP (Hội tụ Dữ liệu Gói - Lớp 2):** Chịu trách nhiệm nén tiêu đề (ví dụ: ROHC), mã hóa và bảo vệ toàn vẹn cho cả dữ liệu mặt phẳng người dùng và mặt phẳng điều khiển, và xử lý việc đánh số thứ tự cũng như chuyển tiếp dữ liệu (data forwarding) trong quá trình chuyển giao (handover).
- **RRC (Điều khiển Tài nguyên Vô tuyến - Lớp 3):** Chỉ tồn tại trong Mặt phẳng Điều khiển, RRC là "bộ não" quản lý của giao diện vô tuyến. Nó xử lý việc thiết lập, duy trì và giải phóng kết nối; phát tán Thông tin Hệ thống (System Information - SI) qua các SIBs; cấu hình tất cả các lớp dưới (PHY, MAC, RLC, PDCP); và quản lý tính di động, bao gồm cả các phép đo và thủ tục chuyển giao.

Từ phân tích này, rõ ràng là bất kỳ sự thay đổi nào liên quan đến "phổ" (tức là tài nguyên vật lý) sẽ tác động trực tiếp và mạnh mẽ nhất đến PHY (thực hiện phép đo), MAC (thực thi lập lịch thời gian thực) và RRC (quản lý chính sách và cấu hình). Các lớp RLC và PDCP sẽ bị ảnh hưởng *gián tiếp*, chủ yếu liên quan đến khả năng phục hồi của chúng sau các gián đoạn do tính cơ hội của phổ gây ra.

### **9.1.3 Phổ quát hóa Chu kỳ Nhận thức sang các Lớp LTE**

Chu kỳ nhận thức (cognitive cycle) cốt điểm là một vòng lặp liên tục xác định hành vi của một đài vô tuyến CR. Chúng ta có thể ánh xạ các chức năng của chu kỳ này lên ngăn xếp giao thức 4G để xác định các điểm cần điều chỉnh:

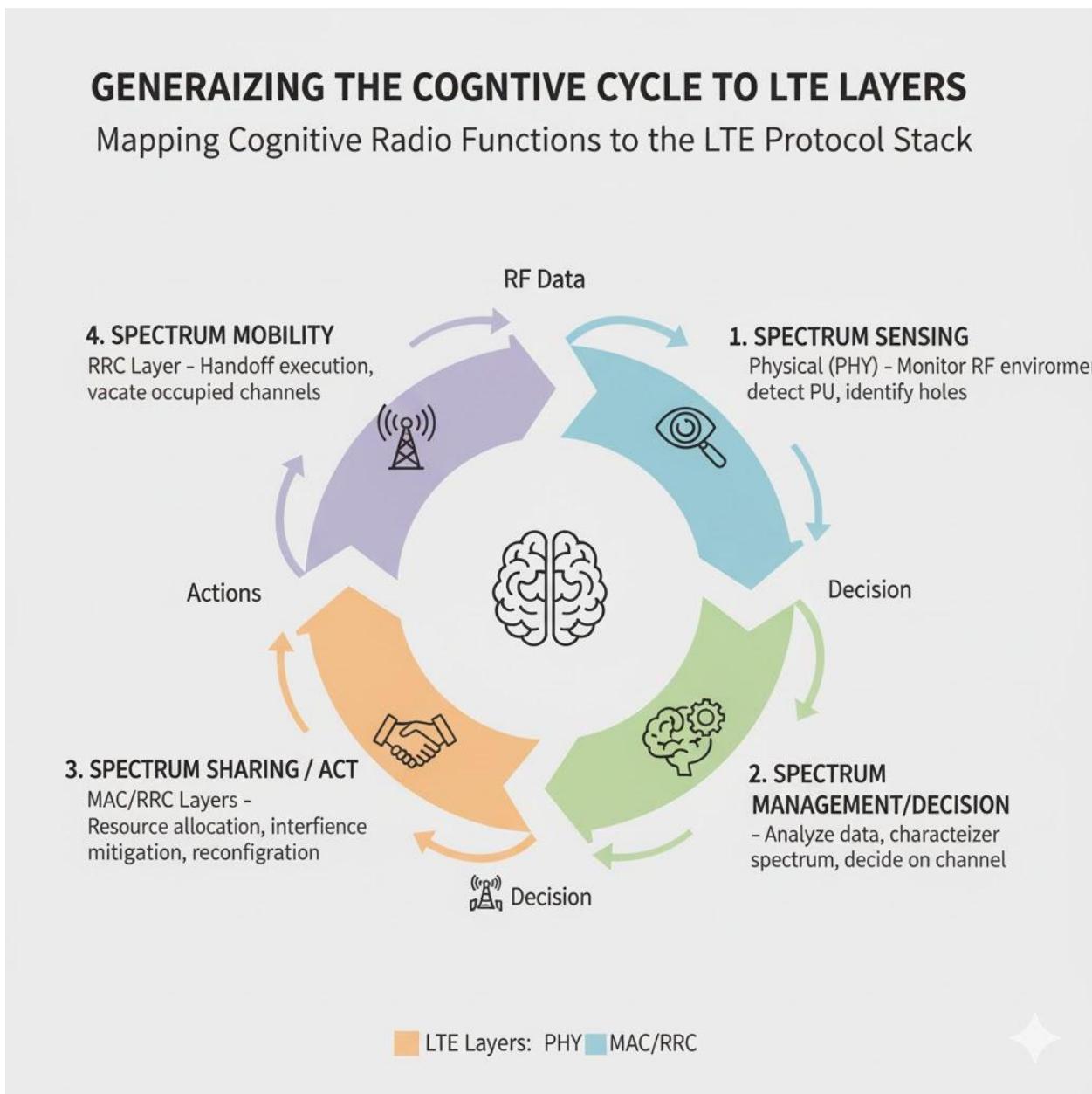
1. **Dò phổ (Spectrum Sensing):** Đây là quá trình phát hiện các "lỗ hổng phổ" và sự hiện diện của PU. Đây là một chức năng xuyên lớp. Nó đòi hỏi Lớp Vật lý (PHY) phải thực hiện các phép đo năng lượng hoặc tín hiệu. Tuy nhiên, việc *khi nào và ở đâu* thực hiện các phép đo này phải được Lớp MAC lên lịch để tránh xung đột với việc truyền dữ liệu.

2. **Quản lý/Quyết định Phổ (Spectrum Management/Decision):** Sau khi dữ liệu dò phô được thu thập, hệ thống phải phân tích và quyết định kênh nào là tốt nhất để sử dụng. Quyết định này đặt ra một câu hỏi kiến trúc cơ bản: "Bộ máy Nhận thức" (Cognitive Engine) nên được đặt ở đâu? Nó nên ở Lớp MAC để có các quyết định phản ứng nhanh (ví dụ: "thoát kênh ngay lập tức") , hay ở Lớp RRC để có các quyết định chính sách dài hạn (ví dụ: "lên kế hoạch chuyển sang kênh B")?
3. **Chia sẻ Phổ (Spectrum Sharing) / Hành động (Act):** Đây là việc thực thi quyết định, tức là bắt đầu truyền và nhận trên kênh đã chọn. Chức năng này thuộc về cốt lõi của Lớp MAC, vốn đã chịu trách nhiệm lập lịch và chia sẻ tài nguyên (mặc dù trong LTE tiêu chuẩn, nó chia sẻ giữa các Người dùng Phụ (Secondary User - SU) chứ không phải giữa SU và PU).
4. **Di động Phổ (Spectrum Mobility):** Nếu kênh đang sử dụng bị PU chiếm lại, hoặc nếu một kênh tốt hơn được tìm thấy, SU phải thực hiện "chuyển giao phô" (spectrum handover). Quá trình chuyển giao có điều khiển này là một chức năng RRC cấp cao, tương tự như chuyển giao (handover) dựa trên di động truyền thống.

Sự phân bổ này cho thấy Lớp RLC và PDCP tương đối được che chắn khỏi các hoạt động nhận thức trực tiếp, trong khi PHY, MAC và RRC phải trải qua các sửa đổi sâu rộng.

## GENERALIZING THE COGNITIVE CYCLE TO LTE LAYERS

Mapping Cognitive Radio Functions to the LTE Protocol Stack



Hình 16: Phổ quát hóa Chu kỳ Nhận thức sang các Lớp LTE

## 9.2 Các Sửa đổi Lớp Vật lý (PHY) cho Hoạt động Nhận thức

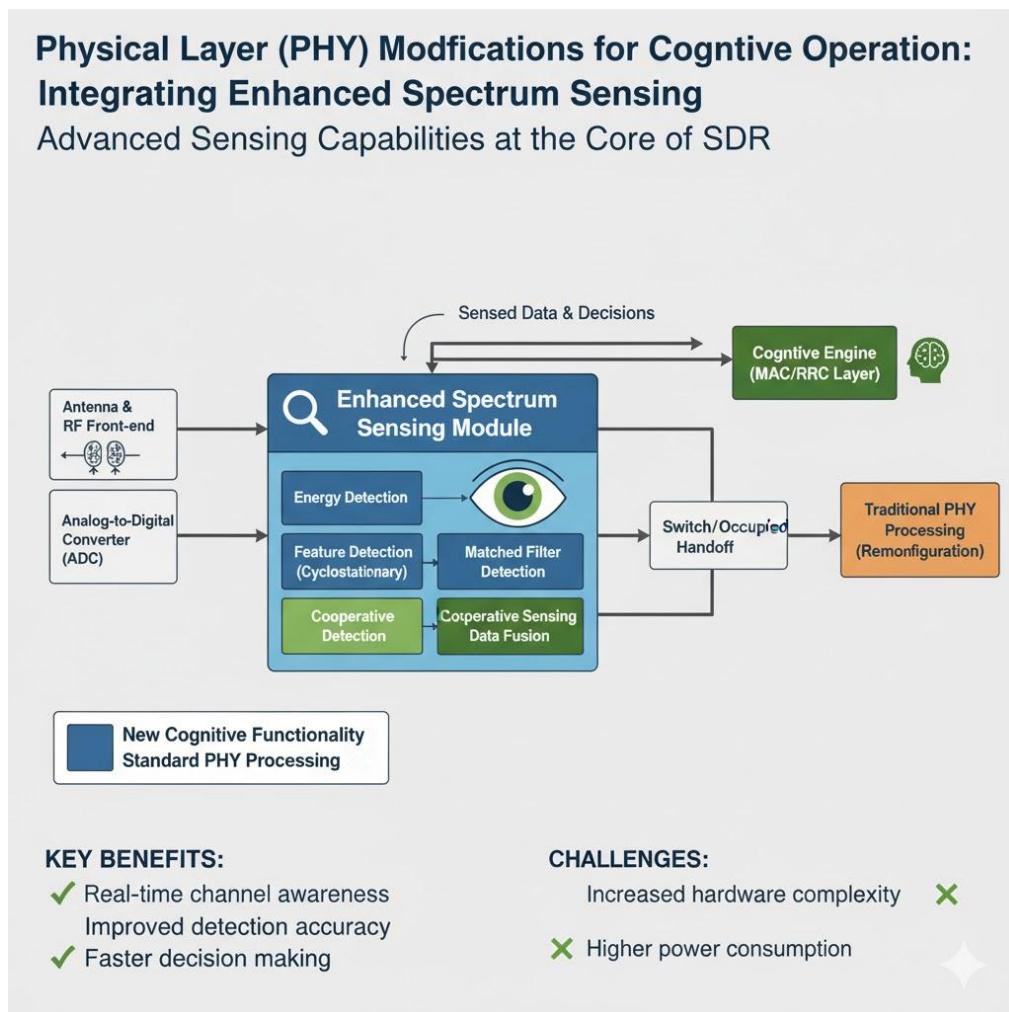
### 9.2.1 Tích hợp Dò Phổ (Spectrum Sensing) Nâng cao

Chức năng cơ bản nhất của CR là khả năng dò phổ. Mặc dù logic quyết định nằm ở các lớp cao hơn, việc thực hiện các phép đo vật lý là trách nhiệm của lớp PHY.

- **Yêu cầu Kỹ thuật Dò:** Lớp PHY của 4G-CR phải được tăng cường để hỗ trợ các kỹ thuật dò phỏ khac nhau. Các phương pháp cơ bản nhất bao gồm:
  - **Phát hiện Năng lượng (Energy Detection):** Phương pháp đơn giản nhất, đo lường năng lượng RF trong một băng tần cụ thể để xem nó có vượt qua một ngưỡng nhất định hay không. Mặc dù đơn giản, nó dễ bị lỗi ở mức nhiễu không chắc chắn (noise uncertainty) và không thể phân biệt tín hiệu PU với các nguồn nhiễu khác.
  - **Phát hiện Đặc điểm Tín hiệu (Feature Detection):** Các phương pháp phức tạp hơn như phát hiện đặc điểm chu kỳ (cyclostationary feature detection) có thể xác định các mẫu tín hiệu cụ thể (ví dụ: tiền tố tuần hoàn của tín hiệu OFDM). Phương pháp này mạnh mẽ hơn nhiều trong việc phân biệt tín hiệu PU khỏi nhiễu, nhưng đòi hỏi sức mạnh xử lý tín hiệu (DSP) lớn hơn đáng kể.
  - **Lọc Khớp (Matched Filtering):** Phương pháp tối ưu nếu dạng sóng của PU được biết trước, nhưng kém linh hoạt nhất.
- **Thay đổi về Phần cứng và Xử lý:** Lớp PHY của 4G LTE tiêu chuẩn được tối ưu hóa cao độ để hoạt động trong một băng thông kênh đã biết, cố định (ví dụ: 1.4, 3, 5, 10, 15, hoặc 20 MHz). Ngược lại, một hệ thống CR có thể cần dò phỏ trên các băng thông rất rộng (wideband spectrum sensing), có thể lên tới hàng trăm MHz hoặc thậm chí vài GHz, để tìm kiếm các lỗ hổng cơ hội. Điều này đòi hỏi một sự thay đổi cơ bản về kiến trúc phần cứng của bộ thu phát (transceiver), vượt xa một bản cập nhật phần mềm đơn giản. Nó yêu cầu các bộ lọc RF có thể tái cấu hình (reconfigurable RF filters) và các bộ ADC (Analog-to-Digital Converter) tốc độ cao có khả năng số hóa các dải tần rộng, cùng với phần cứng DSP chuyên dụng để thực hiện phân tích FFT và các thuật toán dò khác trong thời gian thực.

## Physical Layer (PHY) Modifications for Cognitive Operation: Integrating Enhanced Spectrum Sensing

Advanced Sensing Capabilities at the Core of SDR



Hình 17: Các Sửa đổi Lớp Vật lý (PHY) cho Hoạt động Nhận thức

### 9.2.2 Truyền dẫn Linh hoạt và Quản lý Giao thoa

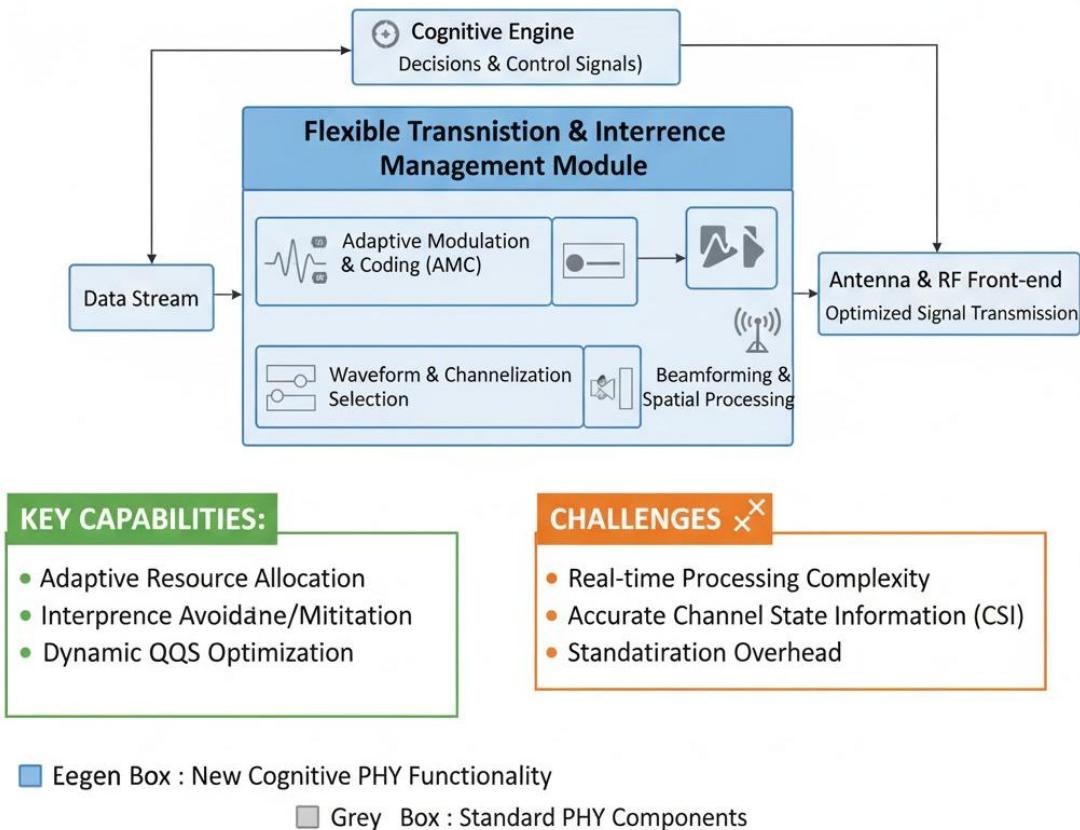
Một khi một lỗ hổng phổ được xác định, lớp PHY phải có khả năng truyền tải trong đó một cách hiệu quả và an toàn.

- **Thích ứng OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access):**

May mắn thay, dạng sóng đường xuống của LTE, OFDMA, vốn đã rất phù hợp cho hoạt động nhận thức. OFDMA chia băng thông kênh thành hàng ngàn sóng mang con (subcarriers) hẹp, trực giao. Tính linh hoạt này cho phép một eNB-CR "tắt" (nulling) một cách linh hoạt các nhóm sóng mang con cụ thể

đang bị chiếm dụng bởi các tín hiệu PU hẹp. Điều này tạo ra các "lỗ hổng" (notches) trong phô truyền, cho phép SU và PU cùng tồn tại trong cùng một băng tần mà không gây nhiễu lẫn nhau.

- **Kiểm soát Công suất (Power Control) cho Mô hình Underlay:** Ngoài mô hình "overlay" (chỉ sử dụng kênh trống), CR cũng có thể hoạt động theo mô hình "underlay" (đệm). Trong mô hình underlay, SU truyền đồng thời với PU trong cùng một băng tần. Để làm được điều này một cách hợp pháp, lớp PHY của SU phải thực thi kiểm soát công suất cực kỳ chính xác và nghiêm ngặt, đảm bảo rằng tín hiệu của nó nằm dưới "ngưỡng nhiễu" (interference temperature) của bộ thu PU. Điều này đòi hỏi các vòng lặp kiểm soát công suất nhanh hơn và đáng tin cậy hơn so với những gì được yêu cầu trong LTE tiêu chuẩn. Mục tiêu là tối đa hóa dung lượng của SU trong khi vẫn tuân thủ các ràng buộc về công suất nhiễu để bảo vệ PU.



Hình 18: Truyền dẫn Linh hoạt và Quản lý Giao thoa

## 9.3 Điều chỉnh Sâu rộng Lớp Điều khiển Truy cập Phương tiện (MAC)

### 9.3.1 Trung tâm của Thách thức: Lập lịch Nhận thức

Lớp MAC là "trái tim" thời gian thực của ngăn xếp giao thức 4G. Nó đưa ra các quyết định lập lịch trong mỗi Khe con Truyền tải (Transmission Time Interval - TTI), tức là mỗi mili giây. Đây chính là nơi mà xung đột triết học giữa mô hình xác định và mô hình cơ hội biểu hiện rõ ràng nhất.

Bộ lập lịch MAC của LTE tiêu chuẩn hoạt động dựa trên giả định rằng nhóm tài nguyên (RBs) mà nó quản lý là *định* và *luôn có sẵn* trong suốt thời gian tồn tại

của kết nối. Nhiệm vụ của nó là phân phối các RBs này cho các UE dựa trên các yếu tố như chất lượng kênh (CQI), yêu cầu QoS, và tính công bằng (fairness).

Ngược lại, một bộ lập lịch MAC nhận thức phải hoạt động dựa trên giả định rằng các tài nguyên là *không ổn định* (volatile) và *tạm thời*. Sự xuất hiện của PU có thể thu hồi toàn bộ tài nguyên bất cứ lúc nào. Do đó, bộ lập lịch MAC-CR phải được thiết kế lại hoàn toàn. Nó không chỉ đơn thuần là một bộ phân bổ tài nguyên (resource allocator) mà còn phải là một bộ quản lý phổ cơ hội (opportunistic spectrum manager). Các nhiệm vụ mới của nó bao gồm:

- Lập lịch Dò phô:** Bộ lập lịch phải quyết định *UE nào sẽ dò kênh nào và khi nào*, đồng thời phân bổ các "Chu kỳ Im lặng" (Quiet Periods) cần thiết cho việc đó.
- Lập lịch Dữ liệu Cơ hội:** Chỉ lập lịch truyền dữ liệu cho UE trong các lỗ hổng phô đã được xác nhận là trống.
- Phản ứng Tức thời:** Phản ứng *ngay lập tức* (trong vòng chưa đầy một mili giây) với thông báo từ lớp PHY rằng một PU đã xuất hiện. Điều này liên quan đến việc *hủy bỏ* (preempting) mọi lịch trình truyền dữ liệu trên kênh đó để tuân thủ yêu cầu bảo vệ PU.

### 9.3.2 Thiết kế và Tích hợp "Chu kỳ Im lặng" (Quiet Periods - QPs)

Để thực hiện dò phô trong băng (in-band sensing) một cách đáng tin cậy, các SU phải định kỳ ngừng mọi hoạt động truyền tải. Những khoảng thời gian này được gọi là Chu kỳ Im lặng (Quiet Periods - QPs). QPs là bắt buộc vì hai lý do chính: (1) để tránh nhiễu tự thân (self-interference), nơi bộ phát của SU làm "mù" bộ thu của chính nó, và (2) để tránh việc phát hiện nhầm truyền tải của một SU khác là tín hiệu của PU.

Thách thức lớn nhất là làm thế nào để chèn các QPs này vào cấu trúc khung LTE (LTE frame structure) một cách hiệu quả. Việc chèn các chu kỳ im lặng sẽ phá vỡ luồng dữ liệu liên tục và có thể gây tổn hại nghiêm trọng cho các quy trình phụ thuộc vào thời gian (time-dependent) của LTE.

Một bài báo<sup>32</sup> lưu ý rằng việc sử dụng toàn bộ một khe con (subframe) làm QP "giới thiệu quá nhiều thay đổi đối với cấu trúc khung LTE/LTE-A hiện tại", đặc biệt là đối với các quy trình quan trọng như định thời HARQ và báo hiệu điều khiển. Điều này đặt ra một thách thức lớn về tính tương thích ngược.

Có hai phương pháp chính để tích hợp QPs, với những ưu và nhược điểm rõ rệt:

- 1. Phương pháp 1: Tận dụng "Measurement Gaps" của FDD:** Cấu trúc khung FDD (Loại 1) của LTE<sup>33</sup> được thiết kế để truyền và nhận đồng thời trên các tần số riêng biệt. Tiêu chuẩn LTE đã định nghĩa một cơ chế gọi là "Measurement Gaps" (Khe hở Đo lường). Đây là các khoảng thời gian ngắn (vài mili giây) mà eNB ra lệnh cho UE ngừng truyền/nhận trên tần số hiện tại để điều chỉnh bộ thu của nó sang tần số khác và đo lường các cell lân cận (ví dụ: cho mục đích chuyển giao). Về lý thuyết, các khe hở này có thể được tái sử dụng (re-purposed) cho việc dò phô CR. Tuy nhiên, như đã chỉ ra, việc này gây gián đoạn và có thể không đủ linh hoạt hoặc đủ thường xuyên cho các yêu cầu dò phô CR nghiêm ngặt.
- 2. Phương pháp 2: Tận dụng "Special Subframe" của TDD:** Đây là một cách tiếp cận thanh lịch và ít gây gián đoạn hơn nhiều. Cấu trúc khung TDD (Loại 2) của LTE được thiết kế cho các hệ thống mà đường lên và đường xuống chia sẻ cùng một tần số, phân tách bằng thời gian. Khung TDD chứa các khe con đường xuống (DL), khe con đường lên (UL), và các "Khe con Đặc biệt"

(Special Subframes - SpSF). SpSF này tồn tại để cung cấp thời gian chuyển đổi từ DL sang UL và chứa một "Chu kỳ Bảo vệ" (Guard Period - GP). GP này là một khoảng thời gian *im lặng* có chủ đích, nơi không có gì được truyền đi. Một báo cáo kỹ thuật của ETSI đề xuất chính xác điều này: "Quiet period in the special sub-frame." Bằng cách cấu hình (mở rộng) độ dài của GP trong SpSF, một QP hiệu quả có thể được tạo ra cho mục đích dò phỏ. Vì cấu trúc TDD và các quy trình HARQ của nó đã được thiết kế để xử lý các khoảng im lặng (GP) này, nên việc tích hợp QP theo cách này sẽ ít gây gián đoạn hơn nhiều so với việc chèn các khe hở nhân tạo vào khung FDD.

**Bảng 9.1: So sánh các Phương pháp Triển khai Chu kỳ Im lặng (QP) trong LTE**

Đặc điểm	Phương pháp 1: Tái sử dụng Measurement Gaps (FDD)	Phương pháp 2: Tận dụng Special Subframe (TDD)
Cơ chế	Cấu hình các "Measurement Gaps" tiêu chuẩn, nhưng sử dụng chúng để dò phỏ CR thay vì đo lường di động.	Tùy chỉnh (mở rộng) độ dài của "Guard Period" (GP) trong "Special Subframe" của cấu hình TDD.
Tác động HARQ	<i>Cao.</i> Gây gián đoạn nghiêm trọng các vòng lặp HARQ 8ms, yêu cầu các cơ chế đóng băng (freezing) bộ đệm HARQ phức tạp.	<i>Thấp.</i> Các vòng lặp HARQ của TDD đã được thiết kế để xử lý sự không liên tục về thời gian và các GP.

<b>Tính tương thích</b>	Tháp. Yêu cầu sửa đổi đáng kể logic bộ lập lịch MAC và PHY.	Cao. Về cơ bản, đây là một cấu hình TDD mới, là một phần của tiêu chuẩn.
<b>Hiệu quả</b>	Linh hoạt nhưng gây tốn kém hiệu năng (overhead) lớn.	Hiệu quả và ít gây gián đoạn hơn, nhưng chỉ giới hạn trong các khe con đặc biệt tại các điểm chuyển mạch DL-UL.

### 9.3.3 Phân tích các Giao thức MAC Nhận thức (ví dụ: C-MAC)

Để điều phối việc truy cập cơ hội giữa nhiều SU, các giao thức MAC nhận thức chuyên dụng đã được đề xuất trong các tài liệu học thuật. Một ví dụ nổi bật là C-MAC (Cognitive MAC).

- Hoạt động của C-MAC:** C-MAC được thiết kế cho các mạng đa kênh, phân tán.<sup>31</sup> Nó giải quyết các vấn đề động của CR bằng cách tổ chức mỗi kênh thành các "siêu khung" (superframes) lặp lại.
- Cấu trúc Siêu khung:** Mỗi siêu khung được chia thành hai phần :
  - Chu kỳ Báo hiệu (Beaconing Period - BP):** Một khoảng thời gian có khe (slotted) ở đầu siêu khung, nơi các nút trao đổi các gói tin "beacon" (báo hiệu). Các beacon này chứa thông tin quan trọng như lịch trình QPs, kết quả đo lường phô, và yêu cầu đặt chỗ kênh.
  - Chu kỳ Truyền Dữ liệu (Data Transfer Period - DTP):** Phần còn lại của siêu khung, được sử dụng để truyền dữ liệu thực tế.

- **Kênh Điều khiển:** C-MAC cũng sử dụng một "Kênh Hẹn gặp" (Rendezvous Channel - RC) được quyết định động, mà tất cả các nút đều lắng nghe, để điều phối các hoạt động trên toàn mạng.

Tuy nhiên, cần phải hiểu rằng các giao thức như C-MAC chủ yếu được thiết kế cho các mạng ad-hoc phân tán. Trong kiến trúc LTE, vốn có bản chất *tập trung* (centralized), vai trò của bộ điều phối phân tán này sẽ được đảm nhận bởi eNB. eNB trở thành bộ điều khiển C-MAC trung tâm. Không cần một BP phân tán, bởi vì eNB có thể truyền một "beacon" tập trung (dưới dạng một SIB, như sẽ thảo luận trong mục 9.5) cho tất cả các UE. Tương tự, không cần một RC để đàm phán, bởi vì eNB quản lý tất cả việc lập lịch (DTPs) thông qua các kênh điều khiển PDSCH/PUSCH hiện có. Do đó, mặc dù LTE-CR có thể không triển khai C-MAC *nguyên bản*, nó sẽ *tích hợp* các *khái niệm* cốt lõi của C-MAC (như siêu khung, QPs, và báo hiệu) vào logic lập lịch MAC tập trung của eNB.

## 9.4 Tác động Gián tiếp đến Lớp RLC và PDCP

### 9.4.1 Thách thức đối với Lớp Điều khiển Liên kết Vô tuyến (RLC)

Vai trò chính của Lớp RLC là đảm bảo độ tin cậy của liên kết vô tuyến, đặc biệt là ở Chế độ Được xác nhận (AM). RLC-AM sử dụng một cơ chế ARQ dựa trên cửa sổ trượt để đảm bảo rằng mọi Đơn vị Dữ liệu Gói (PDU) đều được nhận đúng thứ tự và không bị mất.

Trong mạng CR, kênh vô tuyến có thể *biến mất* đột ngột và hoàn toàn khi một PU xuất hiện. Đối với RLC-AM, sự kiện này trông giống như một đợt suy hao (fading) nghiêm trọng và kéo dài. Nó sẽ không nhận được ACK cho các PDU đã gửi, cửa sổ truyền của nó sẽ bị lấp đầy, và nó sẽ bắt đầu một loạt các nỗ lực truyền lại (retransmissions). Điều này không chỉ vô ích (vì kênh đã biến mất) mà còn có khả

Hàng gây nhiễu cho PU nếu các nỗ lực truyền lại không được lớp MAC dừng lại kịp thời.

Giải pháp cho vấn đề này không phải là thiết kế lại RLC. Thay vào đó, giải pháp nằm ở thiết kế xuyên lớp (cross-layer). Khi lớp MAC (qua PHY) phát hiện sự xuất hiện của PU, nó phải ngay lập tức báo hiệu cho các lớp cao hơn (qua một cơ chế xuyên lớp) rằng việc mất kênh không phải do nhiễu, mà là do một *sự kiện thu hồi phổ* (*spectrum preemption*).

Khi nhận được tín hiệu này, logic điều khiển (tức là RRC) sẽ kích hoạt một thủ tục "chuyển giao" (handover). Đối với lớp RLC, một "chuyển giao phổ" (spectrum handover) được kích hoạt bởi PU trong *giống hệt* như một "chuyển giao di động" (mobility handover) được kích hoạt bởi sự di chuyển của UE. Trong cả hai trường hợp, RLC thực hiện quy trình chuyển giao tiêu chuẩn:

1. **Tạm dừng (Pause):** Ngừng tất cả các bộ đếm thời gian ARQ và đóng băng các cửa sổ truyền/nhận.
2. **Lưu đệm (Buffer):** Giữ lại tất cả các PDU đang chờ xử lý và các PDU chưa được xác nhận.
3. **Chờ đợi (Wait):** Chờ lớp RRC hoàn tất thủ tục chuyển giao sang một kênh mới (tức là một tần số CR mới).
4. **Tiếp tục (Resume):** Khi kênh mới được thiết lập, RRC ra lệnh cho RLC *thiết lập lại* (re-establish). RLC tiếp tục hoạt động, truyền lại các PDU đã lưu trên kênh mới.

Do đó, vì RLC đã được thiết kế để xử lý các gián đoạn do chuyển giao, nên không cần sửa đổi logic cốt lõi của RLC, miễn là hệ thống kích hoạt đúng quy trình chuyển giao hiện có.

### **9.4.2 Tác động Tối thiểu đến Lớp PDCP**

Lập luận tương tự cũng áp dụng cho Lớp PDCP. Các chức năng chính của PDCP bao gồm đánh số thứ tự, mã hóa, bảo vệ toàn vẹn và nén tiêu đề. Quan trọng nhất, PDCP chịu trách nhiệm xử lý *chuyển giao* liền mạch.

Trong một cuộc chuyển giao LTE tiêu chuẩn, PDCP tại eNB nguồn sẽ chuyển tiếp (forward) các SDU chưa được xác nhận (unacknowledged) đến eNB đích. Cả PDCP của UE và eNB đích sau đó sẽ *thiết lập lại* (re-establish) các thực thể PDCP, mã hóa lại (re-key) (để bảo mật), và tiếp tục truyền tải mà không làm mất dữ liệu của người dùng.

Vì sự kiện "chuyển giao phô" được hệ thống (RRC và MAC) xử lý như một cuộc chuyển giao tiêu chuẩn (handover), lớp PDCP sẽ đơn giản thực hiện các quy trình chuyển giao đã được định nghĩa rõ ràng của nó. Nó không cần biết *tại sao* cuộc chuyển giao xảy ra (dù là do di chuyển hay do PU).

**Kết luận:** Cả RLC và PDCP đều được bảo vệ khỏi sự phức tạp của CR. Tính không ổn định của phô CR được trùu tượng hóa và trình bày cho các lớp này dưới dạng một sự kiện mà chúng đã biết cách xử lý: một cuộc chuyển giao (handover).

## **9.5 Lớp RRC (Radio Resource Control): Bộ não Quản lý Chính sách Nhận thức**

Nếu MAC là "trái tim" thời gian thực, thì RRC là "bộ não" phi thời gian thực, chịu trách nhiệm quản lý chính sách và cấu hình của hệ thống CR-LTE. Gánh nặng điều chỉnh lớn nhất, ngoài MAC, thuộc về RRC.

### **9.5.1 Quảng bá Thông tin Hệ thống Nhận thức (Sensing)**

Trước khi một UE (SU) có thể truy cập mạng, ngay cả ở trạng thái RRC\_IDLE, nó phải biết *kênh nào* là các ứng cử viên hợp lệ cho truy cập CR. Thông tin này, giống như tất cả thông tin truy cập cell cơ bản khác, phải được quảng bá (broadcast) cho tất cả các UE trong vùng phủ sóng.

Cơ chế tiêu chuẩn của LTE cho việc này là Thông tin Hệ thống (System Information - SI), được truyền trong các Khối Thông tin Hệ thống (System Information Blocks - SIBs).

- **MIB (Master Information Block):** Được truyền trên Kênh Quảng bá Vật lý (PBCH), MIB là khái thông tin đầu tiên mà UE đọc. Nó chứa các thông tin tối quan trọng. Để hỗ trợ CR, MIB có thể được sửa đổi để bao gồm một cờ 1-bit đơn giản (ví dụ: `cr-SupportIndicator`). Cờ này ngay lập tức cho UE biết rằng cell này có hỗ trợ truy cập CR (ví dụ: truy cập TV White Space - TVWS).
- **SIB1:** Được truyền trên Kênh Chia sẻ Đường xuống (DL-SCH), SIB1 chứa thông tin truy cập cell cơ bản và, quan trọng nhất, là `sib-MappingInfo`, một bản đồ chỉ dẫn lịch trình và vị trí của tất cả các SIB khác. Bản đồ này sẽ được sửa đổi để trỏ đến một SIB mới dành riêng cho CR.
- **SIB-CR (SIB Nhận thức Mới):** Vì LTE có tới 24 SIB (tính đến Release 15)<sup>47</sup>, một SIB mới (ví dụ: SIB19 hoặc tương tự) có thể được định nghĩa. SIB-CR này sẽ là thành phần cốt lõi, chứa tất cả các chính sách CR cấp cao.<sup>15</sup> Nội dung của nó sẽ bao gồm:
  - `cr-ChannelList`: Một danh sách các kênh CR được phép truy cập trong khu vực địa lý đó (ví dụ: danh sách các kênh TVWS khả dụng được lấy từ cơ sở dữ liệu địa lý ).

- **cr-SensingParameters**: Các tham số bắt buộc cho việc dò phô, chặng hạn như ngưỡng phát hiện năng lượng (energy detection threshold), thời gian dò tối thiểu, v.v.
  - **cr-AccessParameters**: Các quy tắc truy cập, chặng hạn như công suất phát tối đa được phép cho SU trên các kênh này (để tuân thủ các quy định của mô hình overlay/underlay).
- **SIB2**: SIB2 chứa các tham số truy cập ngẫu nhiên (RACH) chung.<sup>45</sup> Một cấu hình **cr-RACH-Config** tùy chọn có thể được thêm vào để cho phép UE thực hiện truy cập ngẫu nhiên trên các kênh CR, thay vì chỉ trên sóng mang (carrier) chính.

**Bảng 9.2: Đề xuất Sửa đổi các Yếu tố Thông tin (IEs) trong SIB của LTE để Hỗ trợ Vô tuyến Nhận thức**

SIB	Yếu tố Thông tin (IE) Tiêu chuẩn (Ví dụ)	IE Nhận thức Mới/Mở rộng được Đề xuất	Mục đích trong Mạng Nhận thức
<b>MIB</b>	systemFrameNumber, dl-Bandwidth	<b>cr-SupportIndicator</b> (1 bit)	Cho UE biết ngay lập tức rằng cell này hỗ trợ truy cập CR.
<b>SIB1</b>	<b>plmn-IdentityList</b> , <b>cellAccessRelatedInfo</b> , <b>sib-MappingInfo</b> [45]	Sửa đổi <b>sib-MappingInfo</b>	Chỉ dẫn lịch trình cho SIB-CR mới.

<b>SIB-MỚI (ví dụ: SIB19)</b>	(Không áp dụng)	<b>cr-ChannelList-TVWS</b>	Danh sách các kênh TVWS được phép truy cập trong khu vực này.
<b>SIB-MỚI (ví dụ: SIB19)</b>	(Không áp dụng)	<b>cr-SensingParameters</b>	Ngưỡng phát hiện năng lượng, thời gian dò tối thiểu, v.v.
<b>SIB-MỚI (ví dụ: SIB19)</b>	(Không áp dụng)	<b>cr-AccessParameters</b>	Công suất phát tối đa cho SU (theo mô hình underlay/overlay).
<b>SIB2</b>	rach-ConfigCommon, ue-TimersAndConstants 45	<b>cr-RACH-Config</b> (Tùy chọn)	Các tham số RACH riêng biệt để truy cập vào kênh CR.

### 9.5.2 Quản lý Tính di động của Phổ (Spectrum Mobility)

Ở trạng thái RRC\_CONNECTED, RRC chịu trách nhiệm quản lý "Tính di động của Phổ" (Spectrum Mobility). Đây là một khái niệm cốt lõi của CR, được định nghĩa là khả năng của một SU thay đổi kênh hoạt động của nó một cách linh hoạt. Một "chuyển giao phổ" (spectrum handover) có thể được kích hoạt bởi hai lý do:

- Phản ứng (Reactive):** Kênh hiện tại không còn khả dụng, thường là do sự xuất hiện (hoặc quay trở lại) của một PU.
- Chủ động (Proactive):** Hệ thống (eNB) hoặc UE phát hiện ra một kênh trống khác có chất lượng tốt hơn (ví dụ: ít nhiễu hơn, băng thông rộng hơn) và quyết định chuyển sang đó để tối ưu hóa hiệu suất.

Điều quan trọng là phải phân biệt "chuyển giao phổ" (spectrum handover) với "chuyển giao dọc" (Vertical Handover - VHO). VHO thường dùng để chỉ việc di chuyển *giữa các Công nghệ Truy cập Vô tuyến (RAT) khác nhau*, ví dụ: từ LTE sang WiFi hoặc từ LTE sang một mạng CR chuyên dụng như IEEE 802.22. Ngược lại, chuyển giao phổ có thể xảy ra *bên trong cùng một RAT* (ví dụ: từ một kênh TVWS mà LTE-CR đang sử dụng sang một kênh TVWS khác).

Một khung quản lý di động nhận thức (spectrum-aware mobility management framework) đòi hỏi eNB (qua RRC) phải duy trì một danh sách các kênh dự phòng (backup channels) cho mỗi SU đang hoạt động. Các kênh dự phòng này được dò phỏng một cách chủ động. Khi kênh chính bị thu hồi, eNB có thể ngay lập tức ra lệnh cho SU chuyển sang một kênh dự phòng đã được xác nhận là trống, do đó giảm thiểu thời gian gián đoạn.

### **9.5.3 Thích ứng các Thủ tục RRC Hiện có (Tái sử dụng thay vì Phát minh lại)**

Việc thêm các thông điệp RRC hoặc các thủ tục trạng thái (state procedures) hoàn toàn mới vào một tiêu chuẩn phức tạp như 3GPP là một nỗ lực rất lớn.<sup>55</sup> Một cách tiếp cận thực tế và hiệu quả hơn nhiều là *tái sử dụng* hoặc *mở rộng* các thủ tục RRC hiện có.

Thông điệp **RRCConnectionReconfiguration** là ứng cử viên hoàn hảo. Đây là thông điệp "con dao Thụy Sĩ" (Swiss Army knife) của RRC trong LTE, được sử dụng để sửa đổi gần như mọi khía cạnh của một kết nối RRC đang hoạt động. Trong bối cảnh CR, thông điệp đa năng này có thể được sử dụng để quản lý toàn bộ vòng đời nhận thức:

- 1. Cấu hình Đo lường Nhận thức:** Thông điệp **RRCConnectionReconfiguration** chứa một Yếu tố Thông tin (IE) là **measConfig**. IE này được sử dụng để cấu hình các "Measurement Gaps" cho việc đo lường giữa các tần số (inter-frequency) và giữa các RAT (inter-RAT). IE này có thể được mở rộng để cấu hình các Chu kỳ Im lặng (QPs) (như trong mục 9.3.2) cho mục đích *dò phô nhận thức*. Nó sẽ chỉ định *kênh nào cần dò, khi nào* (lịch trình QP), và *các tham số báo cáo* (ví dụ: báo cáo nếu năng lượng phát hiện được  $< X \text{ dBm}$ ).
- 2. Thực hiện Chuyển giao Phổ:** Đây là phần quan trọng nhất. Cách thức LTE thực hiện một cuộc chuyển giao (handover) tiêu chuẩn là bằng cách gửi một thông điệp **RRCConnectionReconfiguration** chứa IE **mobilityControlInfo**. IE này về cơ bản ra lệnh cho UE "Ngừng nghe cell hiện tại và ngay lập tức chuyển sang cell mới ở tần số X". Bằng cách gửi thông điệp này với tần số đích (target frequency) là một kênh CR đã được xác nhận là trống, eNB có thể ra lệnh cho UE thực hiện một "chuyển giao phổ" gần như tức thời.

Ngoài ra, thông điệp **RRCConnectionRelease**, được sử dụng để ngắt kết nối với UE, cũng có thể được tận dụng. Nó chứa một IE tùy chọn là **redirectedCarrierInfo**, có thể được sử dụng để chỉ dẫn một UE đang giải phóng kết nối chuyển sang "cắm trại" (camp on) trên một tần số CR ở trạng thái IDLE.

Các nỗ lực chuẩn hóa của 3GPP cho các công nghệ liên quan như LTE-Unlicensed (LTE-U) / Licensed-Assisted Access (LAA) và Dynamic Spectrum Sharing (DSS) đã mở đường cho điều này. Các Bản phát hành (Releases) của 3GPP đã định nghĩa các IE mới trong RRC để quản lý việc chia sẻ phổ, đồng tồn tại (coexistence) và truy cập động. Một hệ thống CR-LTE có thể tận dụng các IE này, vốn đã được các nhà cung cấp chipset và cơ sở hạ tầng hỗ trợ.

## **9.6 Khung Thiết kế Xuyên lớp (Cross-Layer): Yêu cầu Bắt buộc**

### **9.6.1 Phá vỡ các Rào cản Phân lớp Truyền thông**

Mô hình OSI/ISO truyền thông, và ở mức độ thấp hơn là ngăn xếp 4G, được xây dựng trên nguyên tắc phân lớp nghiêm ngặt và trừu tượng hóa (abstraction). Mỗi lớp chỉ giao tiếp với các lớp liền kề ngay trên và dưới nó thông qua các Điểm Truy cập Dịch vụ (Service Access Points - SAPs) được định nghĩa rõ ràng.

Vô tuyến Nhận thức *phá vỡ* mô hình này một cách cơ bản. Các quyết định nhận thức tối ưu không thể được đưa ra trong các "hộp đen" (silos) bị cô lập của từng lớp. CR đòi hỏi sự tương tác phong phú và thời gian thực giữa các lớp không liền kề.<sup>65</sup>

- **PHY → RRC:** Lớp PHY thu thập dữ liệu dò phỏ thô (ví dụ: cường độ tín hiệu PU trên các kênh khác nhau). Dữ liệu này (hoặc dữ liệu đã được PHY/MAC xử lý sơ bộ) là cực kỳ quan trọng đối với "Bộ máy Nhận thức" cấp cao (RRC) để đưa ra các quyết định chính sách về việc nên chuyển sang kênh nào. Trong mô hình OSI truyền thông, RRC sẽ không bao giờ có quyền truy cập trực tiếp vào thông tin của PHY.
- **MAC → RRC:** Lớp MAC có thông tin về tải (load) kênh hiện tại, số lần truyền lại HARQ/RLC (cho thấy chất lượng kênh), và trạng thái của các bộ

đêm. Thông tin thời gian thực này rất quan trọng đối với quyết định "di động phô" của RRC.

- **RRC → PHY/MAC:** Ngược lại, lớp RRC (quản lý chính sách)<sup>7</sup> cần có khả năng ra lệnh cấu hình chi tiết cho các lớp dưới (ví dụ: "Bắt đầu dò kênh X với ngưỡng -110dBm trong QP tiếp theo").

Do đó, một thiết kế xuyên lớp (cross-layer design) là *cần thiết và không thể tránh khỏi* để đạt được hiệu suất tối ưu trong mạng CR-LTE.<sup>65</sup> Các chức năng cốt lõi của CR (dò, phân bổ, chia sẻ, di động) vốn dĩ là các chức năng xuyên lớp.<sup>51</sup>

### 9.6.2 Vị trí của "Bộ máy Nhận thức" (Cognitive Engine - CE): RRC so với MAC

Một câu hỏi kiến trúc trung tâm trong thiết kế xuyên lớp là: "Bộ máy Nhận thức" (Cognitive Engine - CE), tức là logic ra quyết định, nên được đặt ở đâu?.<sup>15</sup> Các tài liệu<sup>15</sup> đặt câu hỏi liệu MAC có phải là vị trí lý tưởng hay không, hay RRC là một khả năng khác.

Câu trả lời không phải là "hoặc/hoặc", mà là một kiến trúc "cả hai" (hybrid), được phân chia theo quy mô thời gian (timescale). Một "bộ não" CR-LTE hiệu quả sẽ được phân tách thành hai phần: một bộ máy vi mô phản ứng nhanh và một bộ máy vĩ mô hoạch định chính sách.

#### 1. CE-MAC (Bộ máy vi mô - Micro-Engine):

- **Vị trí:** Tích hợp chặt chẽ với bộ lập lịch MAC thời gian thực.<sup>10</sup>
- **Vai trò:** Phản ứng tức thời, trong từng khe con (sub-millisecond).

- **Chức năng: Bảo vệ PU (PU Protection).** Đây là nhiệm vụ duy nhất và quan trọng nhất của nó. Khi nhận được tín hiệu từ PHY (ví dụ: một ngắt - interrupt) rằng một PU đã được phát hiện, CE-MAC *ngay lập tức* hủy bỏ tất cả các lịch trình truyền tải (TX grants) trên kênh đó.<sup>30</sup> Nó không cần biết *tại sao* hoặc *tiếp theo làm gì*; nó chỉ *dùng lại*.

## 2. CE-RRC (Bộ máy vĩ mô - Macro-Engine):

- **Vị trí:** Như một phần của logic RRC trên eNB.<sup>7</sup>
- **Vai trò:** Quyết định chính sách, ngoài thời gian thực (non-real-time) (ví dụ: hàng chục hoặc hàng trăm mili giây).
- **Chức năng: Quản lý Tài nguyên (Resource Management).** Nó nhận thông báo từ CE-MAC (ví dụ: "Kênh X đã bị mất"). Sau đó, nó thực hiện các chức năng phức tạp: phân tích các báo cáo dò phỏ từ các kênh ứng cử viên khác (do các UE báo cáo), xem xét các yêu cầu QoS của SU<sup>27</sup>, và quyết định kênh *tiếp theo* tốt nhất.<sup>30</sup> Khi đã quyết định, nó sẽ kích hoạt thủ tục **RRCConnectionReconfiguration** (như trong mục 9.5.3) để di chuyển UE sang kênh mới.

Kiến trúc "bộ não phân tách" (split-brain) này tận dụng tốt nhất cả hai thế giới: tốc độ phản ứng tức thời của MAC để đảm bảo tuân thủ quy định (bảo vệ PU), và khả năng xử lý thông tin phức tạp, dựa trên chính sách của RRC để đảm bảo hiệu quả mạng.

**Bảng 9.3: Phân chia Chức năng của Bộ máy Nhận thức (Cognitive Engine) trong Ngăn xếp 4G**

<b>Chức năng Nhận thức</b>	<b>Vị trí: CE-MAC (Thời gian thực)</b>	<b>Vị trí: CE-RRC (Chính sách)</b>	<b>Cơ chế Giao thức</b>
<b>Dò phỗ</b>	Kích hoạt PHY để dò trong các QP đã lên lịch. <sup>31</sup>	Cấu hình <i>cái gì</i> (kênh nào) và <i>khi nào</i> (lịch trình QP) cần dò. <sup>59</sup>	RRCConnectionReconfiguration
<b>Phát hiện PU</b>	<i>Hành động:</i> Ngừng truyền ngay lập tức (STOP TX). <sup>30</sup>	<i>Nhận thức:</i> Nhận báo cáo "Kênh bị mất" từ MAC/PHY.	(Tín hiệu nội bộ MAC/PHY) / (Tín hiệu xuyên lớp)
<b>Quyết định Phỗ</b>	Không (Chỉ phản ứng).	<i>Hành động:</i> Chọn kênh mới tốt nhất từ danh sách ứng viên. <sup>30</sup>	(Logic nội bộ RRC)

<b>Di động Phổ</b>	Kích hoạt cơ chế chuyển mạch nhanh (nếu được RRC cấu hình trước).	<i>Hành động:</i> Gửi lệnh chuyển giao phổ (spectrum handover).[19]	<b>RRConnectionReconfiguration</b>
<b>Chia sẻ Phổ</b>	<i>Hành động:</i> Lập lịch cho các SU trên các RB khả dụng trong kênh trống.[28]	Cấu hình các quy tắc chia sẻ (ví dụ: ưu tiên người dùng, QoS). <sup>27</sup>	(Logic lập lịch MAC) / (Cấu hình RRC)

## 9.7 Phân tích Kiến trúc Tích hợp và các Thách thức Triển khai

### 9.7.1 Các Mô hình Kiến trúc: Overlay, Underlay, và Tích hợp

Có ba mô hình kiến trúc chính để triển khai CR-LTE, mỗi mô hình có những yêu cầu riêng đối với ngăn xếp giao thức:

- Overlay (Phủ):** Trong mô hình này, các SU (UEs và eNB) chỉ được phép truy cập vào các "lỗ hổng" phổ (white spaces) khi PU *hoàn toàn vắng mặt*.<sup>25</sup> Mô hình này là an toàn nhất và ít gây tranh cãi nhất về mặt quy định. Nó đòi hỏi các cơ chế dò phổ (sensing) cực kỳ chính xác và nhanh chóng để phát hiện sự trở lại của PU. Hầu hết các sửa đổi được thảo luận trong chương này (QPs, SIB-CR, chuyển giao phổ) đều chủ yếu tập trung vào việc kích hoạt mô hình overlay.

2. **Underlay (Đệm):** Trong mô hình này, các SU được phép truyền *đồng thời* với PU trong cùng một băng tần, với điều kiện công suất phát của SU phải được giữ *dưới* một ngưỡng nhiễu xác định (interference temperature).<sup>25</sup> Mô hình này không nhất thiết cần các QPs hoặc chuyển giao phỏ, nhưng nó đòi hỏi lớp PHY phải có khả năng kiểm soát công suất cực kỳ chính xác và nhanh chóng<sup>4</sup>, cũng như khả năng ước tính kênh tinh vi để xác định mức nhiễu mà nó đang gây ra cho PU.
3. **Tích hợp sâu (Deep Integration):** Đây là mô hình mà các chức năng CR không phải là một "lớp phủ" (add-on) mà là một phần cốt lõi của tiêu chuẩn. Các ví dụ trong thế giới thực bao gồm Dynamic Spectrum Sharing (DSS) của 3GPP<sup>62</sup>, nơi LTE và 5G NR cùng tồn tại trong cùng một sóng mang, và LAA/LTE-U<sup>61</sup>, nơi LTE được sửa đổi để sử dụng cơ chế Listen-Before-Talk (LBT) (về cơ bản là một hình thức dò phỏ) để hoạt động trong băng tần 5GHz không phép.

Các điều chỉnh được thảo luận trong chương này chủ yếu tập trung vào mô hình Overlay, vì nó phù hợp nhất với triết lý "bật/tắt" của việc lập lịch LTE.

### 9.7.2 Những hiểu biết từ các Nền tảng Thực tế (srsRAN và 3GPP)

Việc điều chỉnh ngăn xếp giao thức 4G không chỉ là một bài tập lý thuyết. Sự trỗi dậy của các nền tảng Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (Software Defined Radio - SDR) đã biến điều này thành hiện thực trong phòng thí nghiệm.

Nền tảng srsRAN (trước đây gọi là srlte) là một ví dụ điển hình. srsRAN cung cấp một bộ phần mềm 4G (UE, eNodeB, và Core Network - EPC) đầy đủ, mã nguồn mở, được viết bằng C++.<sup>69</sup> Sự tồn tại của srsRAN đã dân chủ hóa việc nghiên cứu ngăn

xếp giao thức. Nó biến ngăn xếp 4G, vốn là một "hộp đen" độc quyền, thành một dự án phần mềm *linh hoạt* (malleable).

Điều này có ý nghĩa sâu sắc đối với CR-LTE. Các nhà nghiên cứu<sup>73</sup> không còn phải giả định các thay đổi; họ có thể *thực hiện* chúng. Họ có thể tải mã nguồn srsRAN eNB, mở tệp C++ chịu trách nhiệm cho bộ lập lịch MAC, và chèn trực tiếp logic dò phô và lập lịch cơ hội.<sup>75</sup> srsRAN chứng minh rằng toàn bộ các sửa đổi được thảo luận trong chương này—from việc thêm logic vào MAC đến việc tạo các thông điệp RRC tùy chỉnh—là hoàn toàn khả thi về mặt kỹ thuật.

Đồng thời, các nỗ lực của chính 3GPP (như LTE-U/LAA<sup>61</sup> và DSS<sup>56</sup>) cho thấy ngành công nghiệp đã chấp nhận các phiên bản "an toàn" của CR. Các cơ chế này (ví dụ: Listen-Before-Talk trong LAA) chính là các cơ chế CR (dò-trước-khi-nói) được chuẩn hóa và tích hợp vào ngăn xếp 4G.

### 9.7.3 Các Thách thức Triển khai Cốt lõi

Mặc dù khả thi về mặt kỹ thuật, việc triển khai CR-LTE trên thực tế vẫn phải đối mặt với nhiều thách thức nghiêm trọng<sup>6</sup>:

- Bảo vệ PU Tuyệt đối:** Đây là yêu cầu số một và không thể nhẫn nhượng. Bất kỳ lỗi phát hiện nào (missed detection) từ SU đều có thể gây ra nhiều có hại cho PU (ví dụ: một đài truyền hình, radar quân sự), dẫn đến các hậu quả pháp lý nghiêm trọng.
- Độ chính xác của Dò phô:** Thách thức của "lỗi hỏng ẩn" (hidden node problem) rất lớn trong CR. SU có thể không phát hiện được PU do bị che khuất (shadowing) hoặc suy hao đường truyền, trong khi bộ thu của PU vẫn có thể nghe thấy SU. Dò phô hợp tác (Cooperative sensing), nơi nhiều SU

chia sẻ kết quả đo, có thể giúp giảm thiểu vấn đề này nhưng lại làm tăng độ phức tạp của giao thức.<sup>20</sup>

3. **Chuyển giao Phổ Liền mạch:** Đối với các ứng dụng thời gian thực như Thoại qua LTE (VoIP), bất kỳ sự gián đoạn nào (thời gian im lặng) trong quá trình chuyển giao phổ đều có thể dẫn đến rót cuộc gọi hoặc giảm chất lượng trải nghiệm (QoE).<sup>20</sup> Đảm bảo chuyển giao "liền mạch" là một thách thức lớn.<sup>20</sup>
4. **Bảo mật (Security):** CR mở ra một vectơ tấn công hoàn toàn mới: **Tấn công Giả mạo Người dùng Chính (Primary User Emulation Attack - PUEA).**<sup>20</sup>

Một SU độc hại có thể *giả mạo* tín hiệu của PU. Bằng cách này, nó đánh lừa tất cả các SU hợp pháp khác rằng kênh đang bị chiếm dụng, khiến họ phải rời đi, và do đó, SU độc hại chiếm được toàn bộ kênh cho riêng mình.<sup>20</sup>

## Chương 10: Điều chỉnh Ngăn xếp Giao thức 4G cho các Khả năng Nhận thức

### 10.1 Bối cảnh Thách thức Nhiều trong Mạng 4G HetNet

#### 10.1.1 Định nghĩa Kiến trúc 4G HetNet

Mạng Không đồng nhất (Heterogeneous Networks - HetNet) 4G LTE-Advanced đại diện cho một sự thay đổi mô hình kiến trúc cơ bản, được thiết kế để giải quyết nhu cầu bùng nổ về dung lượng dữ liệu và vùng phủ sóng di động, đặc biệt là ở các khu vực đô thị dày đặc và các môi trường trong nhà. Thay vì chỉ dựa vào một lớp trạm gốc macrocell truyền thống, kiến trúc HetNet là một mạng đa tầng (multi-tier).

Kiến trúc này bao gồm một lớp phủ (overlay) gồm các Nút Công suất Cao (High-Power Nodes - HPNs), điển hình là các trạm macro eNodeB (MeNB), bên dưới là một lớp lót (underlay) dày đặc của các Nút Công suất Thấp (Low-Power Nodes - LPNs). Các LPN này bao gồm:

- **Picocells (PeNB):** Các trạm gốc công suất thấp được nhà mạng triển khai, thường ở các điểm nóng (hotspots) công cộng như trung tâm mua sắm hoặc sân vận động, để tăng cường dung lượng cục bộ.
- **Femtocells (FeNB):** Còn được gọi là Home eNodeB (HeNB), đây là các trạm gốc công suất rất thấp, thường do người dùng tự triển khai trong nhà hoặc văn phòng nhỏ để giải quyết các vấn đề về vùng phủ sóng yếu trong nhà (indoor).

Mục tiêu chính của việc triển khai HetNet là tăng cường hiệu quả sử dụng phổ thông qua việc *tái sử dụng không gian* (spatial reuse). Bằng cách giảm đáng kể kích thước ô (cell), các LPN có thể tái sử dụng cùng một tài nguyên tần số nhiều lần trong một khu vực địa lý nhỏ, từ đó tăng đáng kể dung lượng tổng thể của mạng.

Tuy nhiên, sự chồng chéo kiến trúc này lại tạo ra những thách thức đáng kể về kết nối và điều phối. Các Picocell (PeNB) thường được tích hợp chặt chẽ vào mạng của nhà vận hành, kết nối qua các giao diện S1 (đến Lõi Gói Phát triển - EPC) và X2 (để điều phối trực tiếp giữa các eNB). Ngược lại, các Femtocell (HeNB), đặc biệt trong các triển khai dân dụng, thường kết nối với mạng lõi thông qua các kết nối Internet băng thông rộng công cộng (như DSL hoặc cáp) và một Công Femto (Femto Gateway - F-GW). F-GW này hoạt động như một bộ tập trung, làm proxy cho một số lượng lớn HeNB và giao tiếp với MME (Mobility Management Entity) qua giao diện S1, khiến cho cụm femtocell trông giống như một eNB duy nhất đối với mạng lõi.

Sự khác biệt về kiến trúc kết nối này, đặc biệt là việc thiếu giao diện X2 tiêu chuẩn giữa macrocell và femtocell, là một yếu tố then chốt. Giao diện X2 là cơ chế chính cho phép điều phối nhiều *động* (dynamic) trong thời gian thực giữa các eNB. Việc thiếu nó trong các triển khai femtocell buộc các nhà khai thác phải dựa vào các cơ chế điều phối *bán tĩnh* (semi-static) hoặc tìm kiếm các giải pháp tự trị (autonomous). Chính thách thức kiến trúc cơ bản này đã mở đường cho việc áp dụng các kỹ thuật Sóng Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) như một giải pháp tất yếu.

### 10.1.2 Phân loại và Đặc điểm của Nhiều HetNet

Việc triển khai đồng kênh (co-channel deployment) dày đặc các LPN trong phạm vi phủ sóng của HPN, trong khi cần thiết để tối đa hóa hiệu quả phô, lại là nguồn gốc của các kịch bản Nhiều Liên Tế bào (Inter-Cell Interference - ICI) phức tạp. Trong HetNet, ICI được phân thành hai loại chính:

- Nhiều đồng tầng (Co-tier Interference):** Xảy ra giữa các nút thuộc cùng một tầng. Ví dụ, một Femto-BS (F1) gây nhiễu cho một thiết bị người dùng (UE) đang được phục vụ bởi một Femto-BS lân cận (F2).
- Nhiều xuyên tầng (Cross-tier Interference):** Xảy ra giữa các nút thuộc các tầng khác nhau (HPN và LPN). Đây là thách thức đặc trưng và nghiêm trọng nhất của HetNet do sự chênh lệch công suất phát rất lớn giữa MeNB (ví dụ: \$46 \text{ dBm}\$) và FeNB (ví dụ: \$20 \text{ dBm}\$).

Kịch bản nhiều xuyên tầng chủ đạo (Dominant Interference Scenarios - DIS) xảy ra khi một Macro-UE (MUE) nằm ở rìa vùng phủ của macrocell (cell-edge) đi vào vùng phủ của một femtocell; MUE này sẽ nhận nhiễu mạnh từ FeNB. Ngược lại, và thường nghiêm trọng hơn, một Femto-UE (FUE) được phục vụ bởi FeNB công suất thấp của nó có thể bị "át" (overwhelmed) hoàn toàn bởi tín hiệu đường xuống

(downlink) công suất cao từ MeNB ở trên, tạo ra các "vùng chết" (coverage holes) hoặc "vùng câm" (dead zones) cho femtocell.

Vấn đề nhiễu này không chỉ làm giảm thông lượng kênh dữ liệu (ví dụ: Kênh Chia sẻ Đường xuống Vật lý - PDSCH), mà còn đe dọa tính toàn vẹn của các Kênh Điều khiển Vật lý (Physical Control Channels). Các kênh điều khiển như Kênh Điều khiển Đường xuống Vật lý (PDCCH) có tầm quan trọng sống còn đối với hoạt động của ô, vì chúng mang thông tin lập lịch (scheduling information). Không giống như PDSCH có thể được quản lý bằng các giải pháp miền tần số (như FFR, xem 10.1.3), PDCCH trong LTE được thiết kế để chiếm toàn bộ băng thông kênh. Điều này khiến cho việc giảm thiểu nhiễu trên PDCCH đặc biệt khó khăn và đòi hỏi các giải pháp trong miền thời gian.

### 10.1.3 Các Giải pháp Thông thường và Hạn chế của chúng

Để giải quyết các vấn đề ICI này, Nhóm Dự án Đối tác Thé hệ thứ 3 (3GPP) đã tiêu chuẩn hóa các kỹ thuật Điều phối Nhiều liên tế bào (Inter-Cell Interference Coordination - ICIC) và ICIC Tăng cường (enhanced ICIC - eICIC).

- **ICIC (Phát hành 8/9):** Các kỹ thuật ICIC ban đầu chủ yếu nhắm vào nhiễu đồng tầng trong mạng macrocell đồng nhất. Chúng thường dựa trên các giải pháp miền tần số, chẳng hạn như Tái sử dụng Tần số Phân đoạn (Fractional Frequency Reuse - FFR). Trong FFR, băng thông kênh được chia thành một vùng "trung tâm ô" (cell-center) (ví dụ: tái sử dụng tần số \$f=1\$) và một vùng "rìa ô" (cell-edge) (ví dụ: tái sử dụng \$f=3\$), qua đó giảm nhiễu cho các người dùng ở rìa ô.
- **eICIC (Phát hành 10/11):** Được phát triển đặc biệt để giải quyết nhiễu xuyên tầng trong HetNet. Kỹ thuật cốt lõi của eICIC là một giải pháp miền thời gian được gọi là **Subframe Gần như Trống (Almost-Blank Subframes - ABS)**.

- **Cơ chế ABS:** Trạm gốc "gây hấn" (aggressor), thường là MeNB, sẽ cấu hình một số subframe nhất định là "gần như trống". Trong các subframe này, MeNB sẽ giảm thiểu việc truyền tải (ví dụ: không lập lịch dữ liệu PDSCH và giảm công suất phát trên các tín hiệu tham chiếu).
- Trạm gốc "nạn nhân" (victim), thường là PeNB hoặc FeNB, sẽ được thông báo về "mẫu ABS" (ABS pattern) này. Sau đó, nó có thể lập lịch cho các UE dễ bị tổn thương nhất (ví dụ: FUE ở rìa ô) trong các subframe "an toàn" (được bảo vệ) này, nơi nhiều từ MeNB được giảm thiểu đáng kể.

Tuy nhiên, hiệu quả của ABS phụ thuộc hoàn toàn vào cách thức truyền thông mẫu ABS, và đây chính là điểm yếu chí mạng của nó đối với femtocell:

- 1. HetNet Macro-Pico:** Trong kịch bản macro-pico, mẫu ABS được trao đổi *một cách động* (dynamically) giữa MeNB và PeNB thông qua giao diện X2. Điều này cho phép mạng thích ứng nhanh chóng với các điều kiện tải và nhiều thay đổi.
- 2. HetNet Macro-Femto:** Như đã đề cập trong 10.1.1, giao diện X2 thường *không* được hỗ trợ giữa MeNB và FeNB. Do đó, mẫu ABS không thể được điều phối động. Thay vào đó, nó phải được cấu hình *một cách bán tĩnh* (semi-statically) thông qua một Trung tâm Vận hành và Bảo trì (Operation and Maintenance - O&M).

Hạn chế "bán tĩnh" này là một thất bại cơ bản. Môi trường không dây và mô hình lưu lượng (traffic load) có tính động cao, thay đổi theo từng mili-giây. Ngược lại, cấu hình O&M là một quá trình chậm, có thể mất hàng giờ hoặc hàng ngày để cập nhật. Sự *không tương thích về thang thời gian* (timescale mismatch) nghiêm trọng này khiến cho giải pháp eICIC tiêu chuẩn không thể thích ứng hiệu quả với các

femtocell được triển khai đột xuất (ad-hoc) và các điều kiện nhiễu thay đổi nhanh chóng.

Chính "khoảng trống" (gap) về khả năng thích ứng này — nhu cầu về một giải pháp tự trị, phi tập trung và thích ứng trong thời gian thực khi thiếu cơ chế điều phối động (X2) — đã thúc đẩy cộng đồng nghiên cứu hướng tới Sóng Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio) như một mô hình bắt buộc để quản lý nhiễu femtocell một cách thông minh.

## **10.2 Sóng Vô tuyến Nhận thức: Một Mô hình cho Mạng Femtocell Tự tổ chức**

### **10.2.1 Giới thiệu về Femtocell Nhận thức (Cognitive Femtocell - CF)**

Sóng Vô tuyến Nhận thức (CR) là một mô hình vô tuyến thông minh (intelligent radio) có khả năng tự nhận thức (awareness) về môi trường hoạt động của nó, và dựa trên sự nhận thức đó, nó có thể tự động cấu hình lại (reconfigure) các tham số truyền dẫn của mình để đạt được các mục tiêu xác định trước. Các khả năng chính bao gồm cảm biến phổ động (dynamic spectrum sensing), học máy (machine learning) và ra quyết định tự trị (autonomous decision-making).

Khi áp dụng mô hình này cho các LPN trong HetNet, chúng ta có khái niệm **Femtocell Nhận thức (Cognitive Femtocell - CF)**. Một CF là một FeNB được tăng cường với trí thông minh nhận thức. Thay vì dựa vào sự điều phối tập trung (như O&M) hoặc các giao diện tiêu chuẩn (như X2) không tồn tại, một CF sẽ:

- 1. Cảm nhận (Sense)** môi trường vô tuyến của nó, bao gồm tín hiệu từ MeNB (PU) và các FeNB lân cận (các SU khác).
- 2. Phân tích (Analyze)** thông tin này để ước tính các kênh nhiễu và xác định các cơ hội truyền dẫn.

**3. Quyết định (Decide)** hành động tối ưu (ví dụ: chọn mức công suất, chọn kênh tần số).

**4. Hành động (Act)** bằng cách tự điều chỉnh các tham số của mình.

Về cơ bản, CR biến femtocell từ một "nạn nhân" thụ động của nhiều (phải tuân theo một mẫu ABS tĩnh) thành một "tác nhân" (agent) thông minh, chủ động. Thay vì được *bảo* khi nào là an toàn để truyền, CF tự *học* khi nào và làm thế nào để truyền một cách an toàn. Cách tiếp cận phi tập trung, tự tổ chức (self-organizing) này là rất quan trọng đối với khả năng mở rộng của các Mạng Siêu Dày đặc (Ultra-Dense Networks - UDNs) trong tương lai, nơi mà việc điều phối tập trung cho hàng ngàn LPN trở nên không khả thi về mặt tính toán và báo hiệu.

## COGNITIVE FEMTOCELL (CF): Real-World Application

Smart, Self-Optimizing Indoor Coverage

### How it Works:

- Enhanced Indoor Signal  
Comtsmens unor  
Dansding bf scathe sin, and  
Canectrumd Sipung

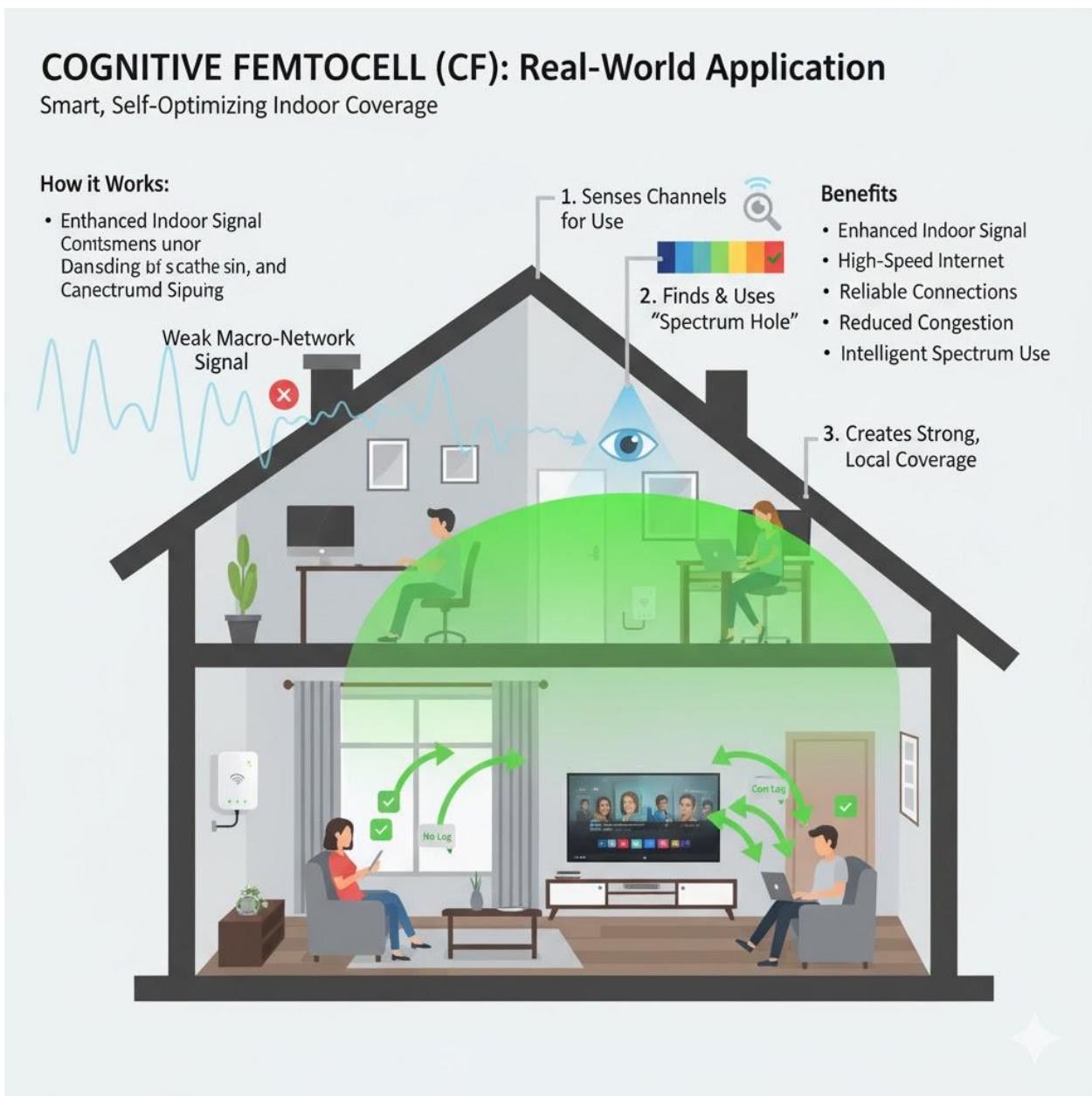
Weak Macro-Network  
Signal

1. Senses Channels for Use
2. Finds & Uses "Spectrum Hole"

### Benefits

- Enhanced Indoor Signal
- High-Speed Internet
- Reliable Connections
- Reduced Congestion
- Intelligent Spectrum Use

3. Creates Strong, Local Coverage



Hình 19: Femtocell Nhận thức (Cognitive Femtocell - CF)

### 10.2.2 Các Mô hình Hoạt động của CR-HetNet

Trong bối cảnh CR, các nhà khai thác được cấp phép (ví dụ: nhà mạng macrocell) được gọi là **Người dùng Chính (Primary Users - PUs)**, và các nút cơ hội (ví dụ: femtocell) được gọi là **Người dùng Thứ cấp (Secondary Users - SUs)**. Có ba mô

hình chính cho sự cùng tồn tại của PU-SU, trong đó hai mô hình sau là phù hợp nhất với HetNet:

1. **Interweave (Đan xen / Overlay):** SU (Femto) liên tục cảm biến phổ. Nó chỉ được phép truyền khi phát hiện thấy một "lỗ hổng phổ" (spectrum hole) hay "không gian trắng" (white space) — tức là, một băng tần *không* được PU (Macro) sử dụng tại thời điểm đó. Mục tiêu là *tránh hoàn toàn* (avoid) nhiễu.
2. **Underlay (Lót nền):** SU (Femto) được phép truyền *đồng thời* (concurrently) và *trên cùng một kênh* (co-channel) với PU (Macro). Điều kiện tiên quyết là công suất phát của SU phải được kiểm soát chặt chẽ sao cho nhiễu mà nó gây ra cho PU luôn *dưới một ngưỡng nhiễu* (*interference threshold*) *chấp nhận được*.
3. **Overlay (Xếp chồng):** SU sử dụng kiến thức về tín hiệu của PU để loại bỏ nhiễu PU khỏi tín hiệu của mình, nhưng mô hình này ít phổ biến hơn.

Mặc dù mô hình 'interweave' (overlay) có vẻ an toàn, nó mâu thuẫn với mục tiêu cơ bản của HetNet 4G. HetNet được thiết kế đặc biệt để *tái sử dụng* cùng một phổ tần được cấp phép (co-channel deployment) nhằm tối đa hóa hiệu quả phổ. Do đó, mô hình 'underlay' là phù hợp hơn về mặt lý thuyết và thực tế cho kịch bản CR-HetNet. Trong mô hình này, vấn đề giảm thiểu nhiễu không còn là "tìm khe hở" mà trở thành một bài toán tối ưu hóa phức tạp: "làm thế nào để kiểm soát công suất phát một cách thông minh".

### 10.2.3 Lợi ích của CR trong Giảm thiểu Nhiễu

Việc áp dụng các nguyên tắc CR cho HetNet mang lại những lợi ích rõ ràng, giải quyết trực tiếp các hạn chế của eICIC bán tĩnh:

- **Hiệu quả Phổ Tăng cường:** Lợi ích cơ bản nhất là tăng hiệu quả sử dụng phổ tổng thể. Bằng cách cho phép các femtocell tái sử dụng phổ tàn của macrocell một cách thông minh (mô hình 'underlay') hoặc cơ hội (mô hình 'overlay'), CR khai thác các tài nguyên vô tuyến mà trước đây bị lãng phí do các quy tắc phân bổ tĩnh.
- **Cải thiện Chất lượng Dịch vụ (QoS):** Các kỹ thuật CR được thiết kế để cải thiện đáng kể Chất lượng Dịch vụ (QoS) và Trải nghiệm Người dùng (QoE). Điều này đặc biệt quan trọng đối với các *người dùng ở rìa ô* (cell-edge users), những người vốn bị ảnh hưởng nặng nề nhất bởi ICI. Các thuật toán CR có thể được thiết kế để ưu tiên bảo vệ QoS của PU (Macro) đồng thời tối đa hóa thông lượng của SU (Femto).
- **Tự tổ chức và Thích ứng Động:** Lợi ích kiến trúc lớn nhất là khả năng tự tổ chức (self-organization). Các CF có thể được triển khai một cách "plug-and-play" mà không cần cấu hình O&M thủ công phức tạp. Chúng có thể tự động thích ứng với môi trường vô tuyến luôn thay đổi — chẳng hạn như một MUE di động đi qua, một femtocell mới được bật lên, hoặc các mâu lưu lượng thay đổi.

### **10.3 Áp dụng Chu trình Nhận thức để Giảm thiểu Nhiễu Xuyên tầng**

Hoạt động của một Femtocell Nhận thức (CF) để giảm thiểu nhiễu xuyên tầng (ví dụ, nhiễu từ MeNB đến FUE và từ FeNB đến MUE) có thể được mô tả bằng chu trình nhận thức cỗ điển: Cảm nhận (Sense), Phân tích (Analyze), Quyết định (Decide), và Hành động (Act).

#### **10.3.1 Cảm nhận (Sense)**

Đây là giai đoạn thu thập thông tin. CF liên tục quét môi trường vô tuyến.

- **Mục tiêu:** Trong kịch bản HetNet 'underlay', mục tiêu không chỉ đơn thuần là *phát hiện* sự hiện diện của PU (Macrocell), vì PU gần như luôn luôn hiện diện. Thay vào đó, mục tiêu là:
  - **Ước tính Kênh (Channel Estimation):** Đo lường cường độ tín hiệu nhận được (RSSI) từ MeNB và các FeNB lân cận.
  - **Đo lường Nhiễu (Interference Measurement):** Ước tính mức nhiễu mà CF đang nhận được trên các kênh khác nhau.
  - **Xác định PU:** Xác định các đặc điểm của tín hiệu PU để phân biệt nó với nhiễu và các tín hiệu SU khác.
  - **Phát hiện MUE lân cận:** Cảm nhận sự hiện diện của các MUE ở gần (các nạn nhân tiềm tàng của nhiễu do CF gây ra).
- **Kỹ thuật:** Nhiều kỹ thuật cảm biến khác nhau được sử dụng, từ đơn giản đến phức tạp:
  - **Cảm biến Năng lượng (Energy Detection):** Kỹ thuật đơn giản nhất, đo tổng năng lượng trong một băng tần. Tuy nhiên, nó không thể phân biệt tín hiệu PU công suất cao với nhiễu nền cộng dồn từ nhiều SU, và đặc biệt kém trong việc phát hiện các tín hiệu trai phỏ công suất thấp.
  - **Cảm biến dựa trên Đặc điểm (Feature-based Sensing):** Các kỹ thuật tiên tiến hơn tìm kiếm các "chữ ký" cụ thể của tín hiệu LTE, chẳng hạn như các đặc điểm cyclostationary (phát sinh từ tiền tố tuần hoàn - CP - của OFDMA).
  - **Cảm biến Hợp tác (Cooperative Sensing):** Nhiều CF trong một khu vực chia sẻ kết quả cảm biến của chúng để cải thiện độ chính xác và vượt qua các vắng đè như fading hoặc che khuất (shadowing). Tuy nhiên, điều này làm tăng chi phí báo hiệu.

Thách thức lớn nhất trong giai đoạn này là cảm biến không hoàn hảo (imperfect sensing). Thông tin không chính xác hoặc không đầy đủ từ giai đoạn Cảm nhận sẽ dẫn đến các quyết định sai lầm ở các giai đoạn sau, có khả năng gây ra nhiều có hại cho PU.

### 10.3.2 Phân tích (Analyze)

Dữ liệu thô từ giai đoạn Cảm nhận được đưa vào "Bộ não Nhận thức" (Cognitive Engine) để xử lý.

- **Mục tiêu:** Chuyển đổi dữ liệu cảm biến thành thông tin có thể hành động được. Điều này bao gồm:
  1. **Xây dựng Bản đồ Nhận thức (Cognitive Map):** Tạo ra một bức tranh về môi trường, bao gồm vị trí ước tính của các nguồn nhiễu (ví dụ: MeNB, các FeNB khác).
  2. **Phân loại Nhiễu:** Phân biệt giữa nhiễu xuyên tầng (từ MeNB) và nhiễu đồng tầng (từ FeNB khác).
  3. **Dự đoán (Prediction):** Sử dụng các mô hình học máy để phân tích các mẫu hình (patterns) theo thời gian và dự đoán các trạng thái phổ trong tương lai gần. Ví dụ, dự đoán khi nào một kênh có khả năng trở nên bận rộn dựa trên các mẫu lưu lượng lịch sử.

### 10.3.3 Quyết định (Decide)

Đây là giai đoạn ra quyết định chiến lược, nơi CF quyết định *phải làm gì*.

- **Mục tiêu:** Chọn một hành động (từ 10.3.4) để tối ưu hóa một *hàm mục tiêu* (utility function) hoặc *hàm phần thưởng* (reward function).
- **Ví dụ về Hàm mục tiêu:** Một hàm mục tiêu phổ biến cho CF trong mô hình 'underlay' là:

- **Tối đa hóa (Maximize):** *Thông lượng của Femto-UE (FUE)*
- **Với điều kiện (Subject to):** *Nhiều gây ra cho Macro-UE (MUE)  $\leq$  Nguồn Nhiều Tối đa ( $I_{th}$ ).*

Trong một môi trường có nhiều tác nhân (nhiều CF và một MeNB), giai đoạn "Quyết định" này trở thành một bài toán tối ưu hóa đa tác nhân (multi-agent optimization) phức tạp, thường được giải quyết bằng các công cụ toán học tiên tiến như Lý thuyết Trò chơi (Game Theory) hoặc Học tăng cường (Reinforcement Learning), sẽ được thảo luận chi tiết trong Phần 10.5.

#### 10.3.4 Hành động (Act)

Sau khi quyết định được đưa ra, CF thực thi nó bằng cách tự động cấu hình lại các tham số lớp vật lý (PHY) và lớp điều khiển truy cập phương tiện (MAC) của nó.

- **Các hành động (Levers):** Các "đòn bẩy" chính mà CF có thể kéo là các kỹ thuật Quản lý Tài nguyên Vô tuyến (RRM). Những hành động này bao gồm:
  - Kiểm soát Công suất (Power Control):** Tăng hoặc giảm công suất phát của FeNB. Đây là hành động chính trong mô hình 'underlay'.
  - Lựa chọn Kênh/Phổ (Channel/Spectrum Selection):** Chuyển sang một băng tần hoặc kênh khác (còn gọi là di động phổ - spectrum mobility). Đây là hành động chính trong mô hình 'interweave'/'overlay'.
  - Điều chỉnh Kỹ thuật:** Thay đổi các tham số khác như sơ đồ điều chế và mã hóa (Modulation and Coding Scheme - MCS), dạng sóng, hoặc thậm chí là búp sóng (beamforming) nếu FeNB có nhiều ăng-ten.

Một nghiên cứu điển hình trong tóm tắt hoàn hảo chu trình này trong thực tế: Các Small-BS (CF) cảm nhận và phân tích kênh điều khiển của Macro-BS. Sau đó, chúng

*tính toán* và *quyết định* chiếm các phô tần nhàn rỗi, và cuối cùng *hành động* bằng cách "sử dụng một số kỹ thuật phân bổ công suất".

## 10.4 Các Kỹ thuật Quản lý Tài nguyên Vô tuyến (RRM) động dựa trên CR

Phần này đi sâu vào các kỹ thuật "Hành động" (10.3.4) phổ biến nhất mà một Femtocell Nhận thức sử dụng để quản lý nhiễu.

### 10.4.1 Kiểm soát Công suất Thích ứng (Adaptive Power Control - APC)

Kiểm soát Công suất Thích ứng (APC) là kỹ thuật quan trọng nhất cho mô hình 'underlay'. Thay vì sử dụng một mức công suất phát tĩnh, hoặc một mức được O&M cấu hình bán tĩnh, CF sẽ tự động điều chỉnh công suất phát của nó dựa trên các điều kiện thời gian thực.

- **Nguyên tắc:** Mục tiêu là truyền ở mức công suất *ít nhất có thể* (least possible transmit power) để duy trì QoS mục tiêu cho các FUE của chính nó, đồng thời đảm bảo rằng nhiễu gây ra cho các PU (MUE) ở gần luôn dưới ngưỡng cho phép.
- **Bản chất Phi tập trung:** Hầu hết các thuật toán APC dựa trên CR được thiết kế để hoạt động một cách phi tập trung (distributed). Mỗi CF chỉ cần thông tin cục bộ (ví dụ: SINR đo được của FUE và ước tính nhiễu gây ra cho MUE lân cận) để điều chỉnh công suất của mình. Điều này làm cho giải pháp có khả năng mở rộng cao.
- **Nghiên cứu điển hình:** Thuật toán Kiểm soát Công suất Thông minh Thích ứng (ASPCA)

- Một nghiên cứu trong đã đề xuất Thuật toán Kiểm soát Công suất Thông minh Thích ứng (Adaptive Smart Power Control Algorithm - ASPCA) để giải quyết nhiễu xuyên tầng trong các femtocell chế độ Nhóm Thuê bao Kín (Closed Subscriber Group - CSG).
- **Kết quả Mô phỏng:** Phân tích hiệu suất của ASPCA cho thấy một sự đánh đổi vô cùng có lợi. So với cách tiếp cận thông thường (công suất cố định), ASPCA đã "cải thiện đáng kể hiệu suất của macrocell khoảng 51.32% về thông lượng người dùng trung bình" trong khi "ít ảnh hưởng đến hiệu suất femtocell (chỉ giảm khoảng 8.63% thông lượng người dùng trung bình)".
- Kết quả này chứng minh rằng quản lý nhiễu thông minh không phải là một trò chơi có tổng bằng không (zero-sum game). Bằng cách chấp nhận một sự sụt giảm hiệu suất nhỏ và có kiểm soát ở tầng femtocell, hiệu suất tổng thể của mạng (đặc biệt là bảo vệ tầng macrocell quan trọng) có thể được cải thiện đáng kể. CR cho phép hệ thống tìm thấy điểm cân bằng tối ưu Pareto này.

#### **10.4.2 Lựa chọn Kênh và Phổ Động (Dynamic Channel Selection - DCS)**

Lựa chọn Kênh Động (DCS) là kỹ thuật chính cho mô hình 'interweave'/'overlay'. Nó hoạt động dựa trên nguyên tắc *tránh nhiễu* (interference avoidance) thay vì *quản lý nhiễu* (interference management).

- **Nguyên tắc:** CF cảm nhận một tập hợp các kênh có sẵn. Nó ước tính mức nhiễu hoặc xác suất chiếm dụng của PU (Macro) trên mỗi kênh. Sau đó, nó "quyết định" (10.3.3) chọn kênh có ít nhiễu nhất hoặc ít có khả năng bị PU chiếm dụng nhất để hoạt động.

- **Truy cập Phổ Cơ hội (Opportunistic Spectrum Access - OSA):** Đây là một dạng DCS động, trong đó CF có khả năng "nhảy" (hop) vào các lỗ hổng phổ ngay khi chúng xuất hiện và "rời đi" (vacate) ngay khi PU quay trở lại.
- **Nghiên cứu điển hình: GSOIA (Chia sẻ Phổ Gale-Shapley)**
  - Một lược đồ tinh vi được đề xuất trong là "Chia sẻ phổ Gale-Shapley với Tránh nhiễu Cơ hội Chung" (Gale-Shapley spectrum sharing with joint opportunistic interference avoidance - GSOIA).
  - **Cơ chế:** Lược đồ này giải quyết *cả hai* loại nhiễu một cách thông minh:
    - Giảm Nhiễu Xuyên tầng:** Nó sử dụng mô hình 'interweave' (overlay). Các CF cơ hội "giao tiếp trên phổ tầng có sẵn với nhiễu tối thiểu đến các macrocell".
    - Giảm Nhiễu Đồng tầng:** Để tránh các CF lân cận gây nhiễu lẫn nhau, lược đồ "gán các tài nguyên phổ trực giao (orthogonal) cho các femtocell khác nhau với chính sách đối sánh một-một (one-to-one matching policy)" (có thể dựa trên thuật toán Gale-Shapley).
  - Giải pháp kết hợp này hiệu quả hơn nhiều so với việc chỉ áp dụng một kỹ thuật duy nhất, cho thấy sự phức tạp của các bộ quyết định CR.

#### 10.4.3 Các Kỹ thuật Kết hợp (Hybrid Techniques)

Các giải pháp thực tế và mạnh mẽ nhất thường kết hợp cả hai phương pháp: lựa chọn kênh động (DCS) và kiểm soát công suất thích ứng (APC). CF trước tiên chọn kênh "tốt nhất" (DCS), và sau đó, trên kênh đó, nó điều chỉnh công suất của mình một cách tinh vi (APC).

- **Nghiên cứu điển hình: Lược đồ "SA được đề xuất" (Proposed SA)**

- Một nghiên cứu trong đã đề xuất một "lược đồ phân bổ tài nguyên không xung đột và thừa nhận dựa trên ngưỡng công suất chung".
- **Cơ chế:** Lược đồ này hoạt động theo hai bước:
  1. **Giảm Nhiễu Xuyên tầng:** CF đặt một *ngưỡng* (threshold) về nhiễu lẫn nhau (mutual interference) giữa nó và một MUE ở gần. Nếu nhiễu vượt quá ngưỡng này, MUE được phân loại là "MUE không mong muốn (UMUE)" và các hành động giảm thiểu (ví dụ: "thừa nhận" MUE) được thực hiện.
  2. **Giảm Nhiễu Đồng tầng:** CF sử dụng một "công cụ lập lịch (scheduling engine)" áp dụng "chính sách đối sánh (matching policy)" để gán các Khối Tài nguyên (RB) một cách *trực giao* (orthogonally) cho các CF đồng vị trí, nhằm "tránh mọi vấn đề xung đột".
- **Kết quả Mô phỏng:** Lược đồ này cho thấy hiệu quả đo lường được. Trước khi áp dụng, nhiễu xuyên tầng trung bình (MUE-FAP) là khoảng -28 dBm. Sau khi áp dụng thuật toán, mức nhiễu này đã "giảm đáng kể xuống khoảng -34 dBm". Tương tự, nhiễu đồng tầng khi có xung đột (ví dụ: -40 dBm) cũng được giải quyết bằng chính sách đối sánh.

Các nghiên cứu điển hình (ASPCA, GSOIA, Proposed SA) này cung cấp bằng chứng mô phỏng cụ thể, cho thấy các thuật toán RRM dựa trên CR có thể mang lại những lợi ích định lượng, đo lường được về mặt giảm dBm nhiều và tăng phần trăm (%) thông lượng.

Để tóm tắt, bảng sau đây so sánh các phương pháp giảm thiểu khác nhau trong HetNet 4G.

**Bảng 10.1: So sánh các Phương pháp Giảm thiểu Nhiễu trong 4G HetNet**

<b>Phương pháp</b>	<b>Cơ chế Điều phối</b>	<b>Miền (Domain)</b>	<b>Mục tiêu Nhiều chính</b>	<b>Khả năng Thích ứng (Adaptability)</b>
<b>ICIC truyền thông</b>	ICIC (ví dụ: FFR)	Tần số (Frequency)	Đồng tầng (Co-tier)	Tĩnh (Static)
<b>eICIC (cho Pico)</b>	Giao diện X2	Thời gian (Time) (ABS)	Xuyên tầng (Cross-tier)	Động (Dynamic)
<b>eICIC (cho Femto)</b>	O&M (Không có X2)	Thời gian (Time) (ABS)	Xuyên tầng (Cross-tier)	Bán tĩnh (Semi-Static)
<b>Femtocell Nhận thức (CR) - Underlay</b>	Tự trị (Autonomous) / Phân tán	Công suất (Power) (APC)	Xuyên tầng (Cross-tier)	Động (Real-time)

<b>Femtocell</b>	Tự trị	Tần số / Thời gian	Xuyên tầng	Động (Real-time)
<b>Nhận thức (CR)</b>	(Autonomous)	(DCS/OSA)	+ Đồng tầng	
<b>Overlay</b>	-			

Bảng này tóm tắt một cách hiệu quả vấn đề cốt lõi: sự thất bại của cơ chế điều phối O&M bán tĩnh cho femtocell và cách các phương pháp CR tự trị, động (cả 'underlay' và 'overlay') lắp đầy khoảng trống đó.

## 10.5 Các Mô hình Ra quyết định Nâng cao cho Quản lý Nhiêu

Giai đoạn "Quyết định" (10.3.3) là trung tâm của Femtocell Nhận thức. Trong một môi trường HetNet phức tạp với nhiều tác nhân (MeNB, nhiều FeNB, nhiều UE), quyết định "tối ưu" là không tầm thường. Các nhà nghiên cứu đã áp dụng các mô hình toán học tiên tiến từ kinh tế học và trí tuệ nhân tạo để giải quyết bài toán ra quyết định phi tập trung này.

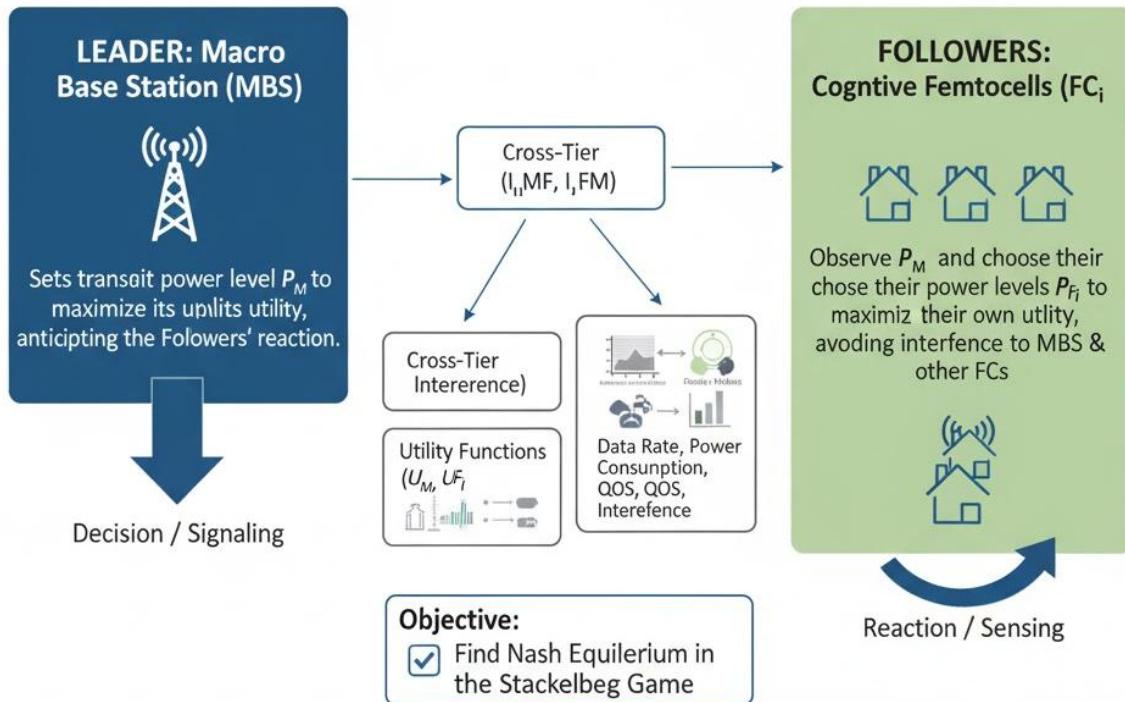
### 10.5.1 Cách tiếp cận dựa trên Lý thuyết Trò chơi (Game Theory)

Lý thuyết Trò chơi (Game Theory) là một bộ công cụ toán học được thiết kế để mô hình hóa các tương tác chiến lược giữa các *tác nhân hợp lý* (rational agents) có các *mục tiêu xung đột* (conflicting interests). Điều này mô tả hoàn hảo kịch bản HetNet: mỗi femtocell là một "người chơi" (player) "ích kỷ" (selfish), muốn tối đa hóa thông lượng của riêng mình, nhưng hành động của nó (tức là tăng công suất) lại gây nhiều (anh hưởng tiêu cực) đến những người chơi khác.

#### Mô hình 1: Trò chơi Stackelberg (Cho Nhiều Xuyên tầng)

Trò chơi Stackelberg là một mô hình trò chơi *phân cấp* (hierarchical). Nó bao gồm một "Người lãnh đạo" (Leader) hành động trước và nhiều "Người theo sau" (Followers) quan sát hành động của Leader và sau đó phản ứng.

- **Ứng dụng HetNet:** Mô hình này phản ánh một cách thanh lịch kiến trúc vật lý phân cấp của HetNet.
  - **Leader:** Macro-BS (MeNB), với tư cách là PU, hoạt động như Người lãnh đạo. Nó có ưu tiên. Thay vì trực tiếp ra lệnh cho các femtocell, MeNB "thiết lập một mức giá" (price) cho nhiều. Mức giá này (một tín hiệu báo hiệu) cho biết MUE của nó đang bị ảnh hưởng như thế nào.
  - **Followers:** Các Femto-BS (FeNB), với tư cách là SU, hoạt động như những Người theo sau. Chúng quan sát "giá" nhiều do MeNB đưa ra và sau đó *quyết định* mức công suất phát tối ưu của riêng mình để tối đa hóa lợi ích (ví dụ: thông lượng trù đi "chi phí/tiền phạt" do gây nhiễu).
- **Kết quả:** Mô hình này được chứng minh là hội tụ đến một điểm Cân bằng Stackelberg (Stackelberg Equilibrium - SE) duy nhất. Một nghiên cứu cho thấy rằng thuật toán dựa trên Stackelberg của họ "giảm nhiễu tổng cộng mà macrocell phải chịu gần 20dBm" so với Cân bằng Nash (NE) đạt được trong các trò chơi không hợp tác thông thường. Điều này cho thấy mô hình phân cấp này cực kỳ hiệu quả trong việc bảo vệ PU.



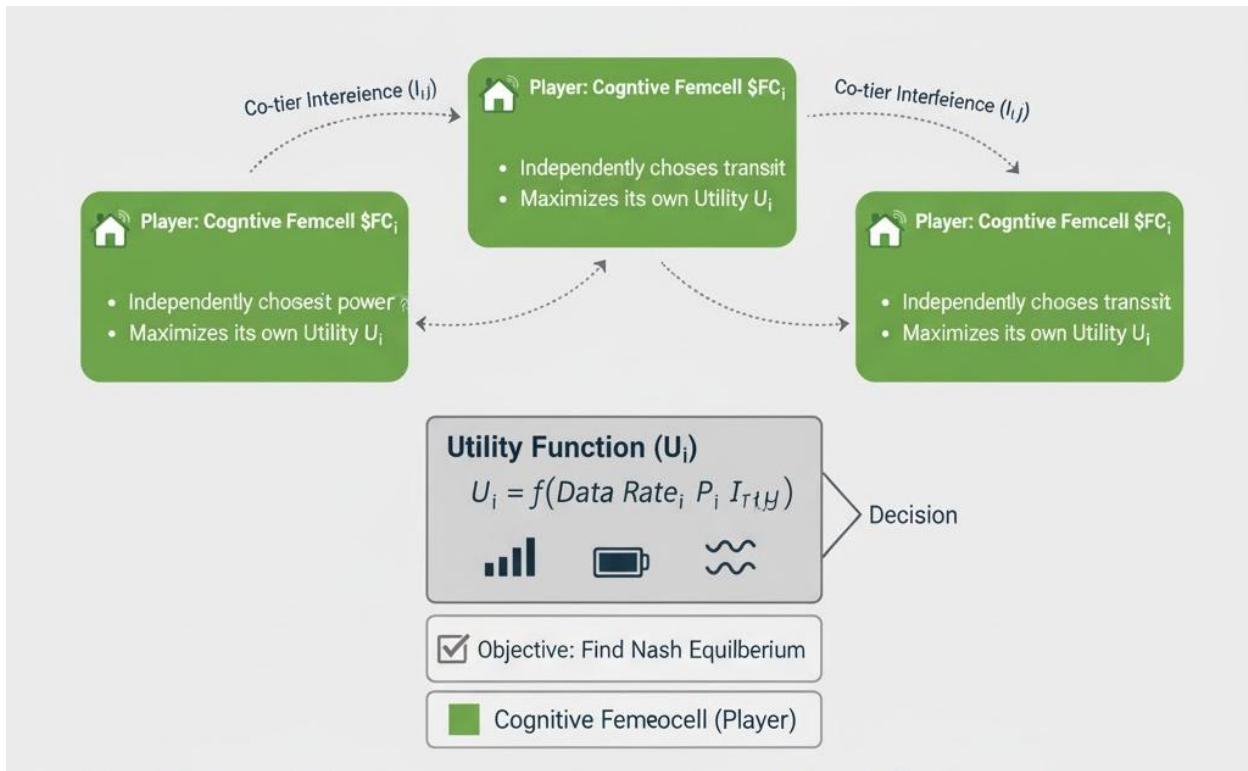
Hình 20: Mô Hình Trò chơi Stackelberg (Cho Nhiều Xuyên tầng)

## Mô hình 2: Trò chơi Không hợp tác (Non-cooperative Games) (Cho Nhiều Đồng tầng)

Trong trò chơi không hợp tác, tất cả các người chơi đều bình đẳng và đưa ra quyết định đồng thời (hoặc lặp đi lặp lại) để tối ưu hóa lợi ích của riêng mình, coi hành động của người khác là cho trước. Giải pháp của trò chơi này là **Cân bằng Nash (Nash Equilibrium - NE)** — một trạng thái mà không người chơi nào có thể đơn phương cải thiện lợi ích của mình bằng cách thay đổi chiến lược.

- **Ứng dụng HetNet:** Mô hình này rất phù hợp để mô hình hóa nhiều đồng tầng (co-tier) giữa các femtocell ngang hàng. Mỗi FeNB là một người chơi, có gắng chọn mức công suất/kênh để tối đa hóa SINR của mình, coi các FeNB khác là nguồn nhiễu.

- **Hạn chế:** Một hạn chế đã biết của NE là nó thường *không hiệu quả* (inefficient) về mặt toàn cục. Nghĩa là, có thể tồn tại một giải pháp khác (đạt được qua hợp tác) mà tất cả các femtocell đều được lợi hơn, nhưng không ai tự mình đạt được nó.



Hình 21: Mô hình Trò chơi Không hợp tác (Non-cooperative Games) (Cho Nhiều Đồng tầng)

### 10.5.2 Cách tiếp cận dựa trên Học máy (ML) và Học tăng cường (RL)

Lý thuyết Trò chơi yêu cầu các nhà thiết kế phải xây dựng các mô hình toán học chính xác (ví dụ: các hàm lợi ích) về môi trường. Trong các mạng không dây phức tạp, động, và với thông tin không đầy đủ, việc xây dựng các mô hình này là không thể. Học tăng cường (Reinforcement Learning - RL) nổi lên như một giải pháp thay thế mạnh mẽ vì nó *không cần mô hình* (model-free).

Trong RL, một "tác nhân" (agent) (ví dụ: một CF) học chính sách (policy) tối ưu thông qua *thử-và-sai* (trial-and-error). Tác nhân tương tác với môi trường, thực hiện

một *hành động* (ví dụ: "tăng công suất lên mức 5"), quan sát *trạng thái* (state) mới và nhận được một *phần thưởng* (reward) (ví dụ: "SINR tăng 2dB") hoặc *phạt* (ví dụ: "nhận tín hiệu báo động nhiễu"). Theo thời gian, nó học được hành động nào mang lại phần thưởng tích lũy cao nhất trong bất kỳ trạng thái nào.

Cách tiếp cận này giải quyết trực tiếp vấn đề kiến trúc cơ bản của femtocell: *thông tin không hoàn hảo* (imperfect information) do *thiếu giao diện X2*. Một CF không cần biết trạng thái toàn bộ của mạng. Nó chỉ cần quan sát *trạng thái cục bộ* và *phần thưởng* của mình để học được một chính sách ra quyết định hiệu quả.

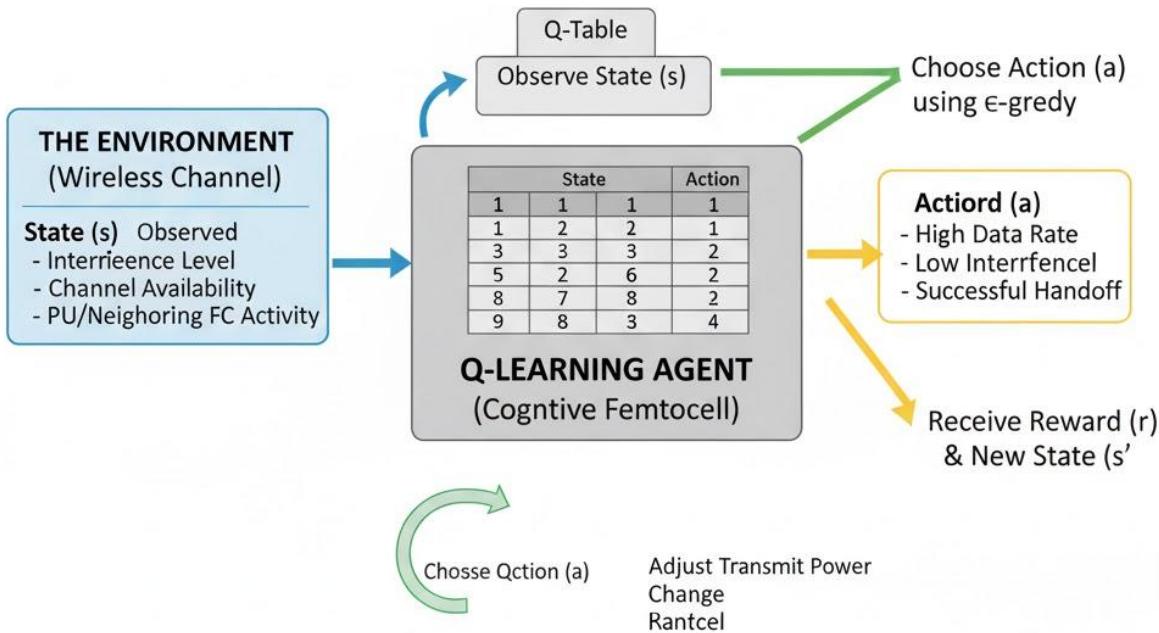
## Mô hình 1: Q-Learning (QL)

Q-Learning là một thuật toán RL không cần mô hình cổ điển và đã được áp dụng rộng rãi cho RRM và quản lý nhiễu trong HetNet.

- **Khái niệm:** Tác nhân (CF) duy trì một "Q-table" (Bảng Q), lưu trữ giá trị (Q-value) kỳ vọng của việc thực hiện *hành động* \$a\$ trong *trạng thái* \$s\$ (\$Q(s, a)\$). Bảng này được cập nhật lặp đi lặp lại sau mỗi hành động dựa trên phần thưởng nhận được.
- **Nghiên cứu điển hình (QL cho QoS):** Một nghiên cứu đã đề xuất một lược đồ phân bổ tài nguyên dựa trên QL cho HetNet siêu dày đặc. Kết quả rất ấn tượng: "Trong kịch bản nhiễu đồng tầng và xuyên tầng cao, nơi các lược đồ tiên tiến nhất không thể duy trì dung lượng MUE tối thiểu... lược đồ được đề xuất cung cấp dung lượng MUE tối thiểu là 2 b/s/Hz, gấp đôi ngưỡng QoS tối thiểu cần thiết".
- **Nghiên cứu điển hình (QL cho SINR):** Một nghiên cứu khác đã sử dụng QL để tự động điều chỉnh các tham số ICIC/FFR trong một kịch bản hotspot. Kết quả cho thấy "SINR từ người dùng hotspot tăng 11.2% trong trường hợp xấu nhất và 180% trong trường hợp tốt nhất" so với kịch bản không có QL.

## Q-LEARNING MODEL FOR INTERFERENCE MANAGEMENT

### A Reinforcement Learning Approach for Cognitive Radio



Hình 22: Kỹ thuật Q-Learning trong Reinforcement Learning ứng dụng cho Cognitive Radio

### Mô hình 2: Học tăng cường sâu (Deep Reinforcement Learning - DRL)

Q-Learning có một hạn chế nghiêm trọng: nó dựa vào một Q-table. Khi không gian trạng thái-hành động (state-action space) trở nên quá lớn, Q-table sẽ "bùng nổ" về kích thước (được gọi là "lời nguyễn của chiều không gian" - curse of dimensionality). Trong một HetNet dày đặc (dense) với nhiều kênh, nhiều mức công suất và nhiều người dùng, số lượng trạng thái là khổng lồ, khiến QL không thể mở rộng (scalable).

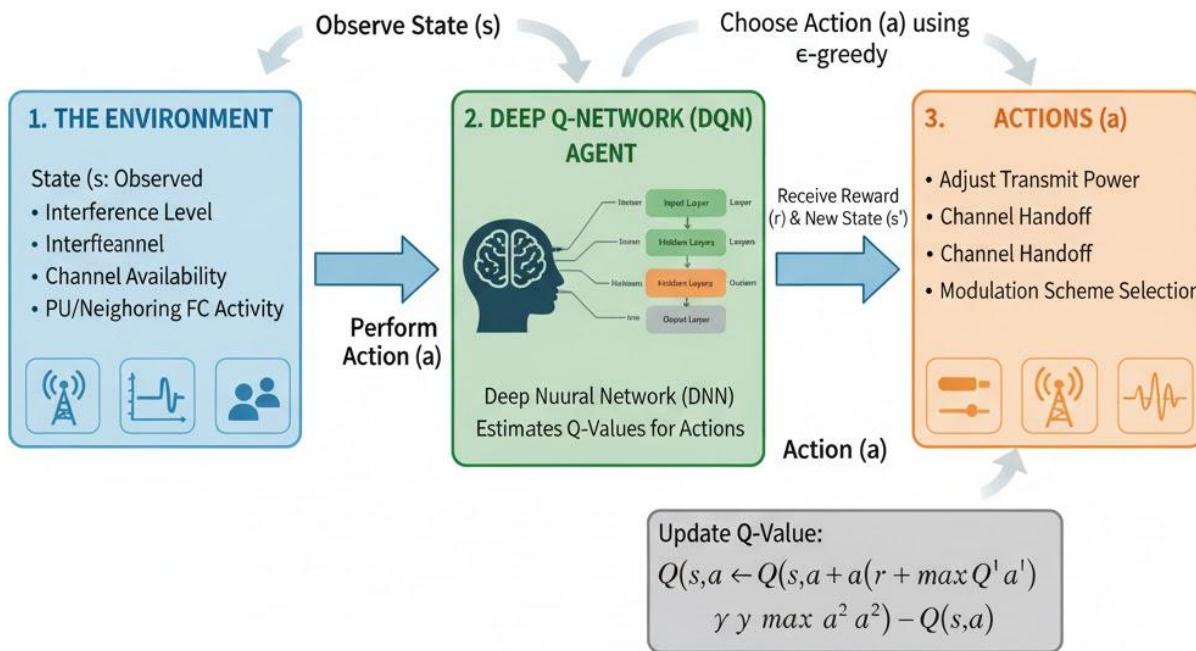
- Khái niệm (DRL):** Học tăng cường sâu (DRL) giải quyết vấn đề này bằng cách kết hợp RL với Mạng Nơ-ron Sâu (Deep Neural Networks - DNN). Thay vì lưu trữ một Q-table khổng lồ, DRL sử dụng một DNN (gọi là Deep Q-Network - DQN) để ước tính (approximate) Q-value ( $Q(s, a)$ ).
- Lợi ích:** DRL có khả năng mở rộng để xử lý các bài toán tối ưu hóa mạng quy mô lớn, phức tạp. Nó có thể hoạt động ở dạng phân tán (mỗi tác nhân có DNN riêng).

riêng) và được chứng minh là có khả năng xử lý độ trễ trong Thông tin Trạng thái Kênh (CSI), một vấn đề thực tế lớn trong các mạng nhanh.

- **Ứng dụng:** DRL được đề xuất để tối ưu hóa đồng thời nhiều vấn đề trong HetNet, bao gồm phân bổ tài nguyên, lựa chọn chế độ, và kiểm soát công suất.

## DEEP REINFORCEMENT LEARNING (DRL) MODEL FOR INTERFERENCE MANAGEMENT

Leveraging Neural Networks for Cognitive Radio



Hình 23: : Học tăng cường sâu (Deep Reinforcement Learning - DRL)

Bảng sau đây tóm tắt việc áp dụng các mô hình ra quyết định tiên tiến này cho CR-HetNet.

**Bảng 10.2: So sánh các Mô hình Ra quyết định Nâng cao (CR-HetNet)**

Mô hình (Model)	Vấn đề HetNet chính	Nguyên lý (Principle)	Lợi ích (Pro)	Hạn chế (Con)
<b>Trò chơi Stackelberg</b>	Nhiều Xuyên tầng (Cross-tier)	Phân cấp (Leader-Follower)	Mô hình hóa chính xác kiến trúc Macro-Femto. Hội tụ tốt (SE).	Yêu cầu mô hình hóa hàm lợi ích. Yêu cầu bảo hiệu ("giá").
<b>Trò chơi Không Hợp tác</b>	Nhiều Đồng tầng (Co-tier)	Cân bằng Nash (Nash Eq.)	Phi tập trung (Distributed). Đơn giản để mô hình hóa các tác nhân ngang hàng.	NE thường không hiệu quả (sub-optimal).
<b>Q-Learning (QL)</b>	RRM / Quản lý Nhiều	Học giá trị (Value-based) (Q-Table)	Không cần mô hình (Model-free). Đã chứng minh hiệu quả. Tự thích ứng.	Không thể mở rộng (Poor scalability) với không gian trạng thái lớn.

<b>Học Tăng cường Sâu (DRL)</b>	RRM / Quản lý Nhiều (Phức tạp/Dày đặc)	Học giá trị (Value-based) (DQN)	Có khả năng mở rộng (Scalable). Xử lý trạng thái lớn. Chống chịu được độ trễ CSI.	Độ phức tạp tính toán cao. Cần huấn luyện (training).
---------------------------------	--	---------------------------------	---	---

## 10.6 Phân tích Hiệu suất và các Thách thức Triển khai

### 10.6.1 Đánh giá Hiệu suất và Cải thiện QoS (Mô phỏng)

Các nghiên cứu điển hình được phân tích trong Phần 10.4 và 10.5 cung cấp bằng chứng định lượng mạnh mẽ về hiệu quả của các kỹ thuật CR-HetNet. Các kết quả mô phỏng chính có thể được tổng hợp như sau:

- **Bảo vệ PU (Macrocell) hiệu quả:**
  - **Trò chơi Stackelberg:** Đạt được mức giảm nhiễu tổng cộng cho macrocell *gần 20dBm* so với các phương pháp không hợp tác.
  - **ASPCA (APC):** Đạt được mức *tăng 51.32%* thông lượng người dùng trung bình của macrocell.
- **Đảm bảo QoS cho SU (Femtocell) trong môi trường khắc nghiệt:**
  - **Q-Learning:** Trong kịch bản nhiễu cao nơi các lược đồ khác thất bại, QL vẫn *đảm bảo* dung lượng MUE tối thiểu là 2 b/s/Hz (gấp 2 lần ngưỡng QoS) và SUE là 1.5 b/s/Hz.
  - **Q-Learning:** Trong kịch bản hotspot, SINR của người dùng hotspot *tăng 180%* trong trường hợp tốt nhất.
- **Giảm nhiễu đo lường được:**

- **Hybrid "Proposed SA":** Nhiều xuyên tầng trung bình giảm từ -28dBm xuống -34dBm.

Mục tiêu cuối cùng của việc triển khai LPN (như femtocell) là cải thiện vùng phủ sóng và dung lượng, đặc biệt là cho các người dùng ở rìa ô (cell-edge). Các kết quả mô phỏng này nhất quán cho thấy rằng bằng cách áp dụng trí thông minh CR, các femtocell có thể được tích hợp vào mạng macrocell một cách an toàn, đạt được mục tiêu cải thiện hiệu suất ở rìa ô mà không gây ra nhiều xuyên tầng có hại.

### **10.6.2 Những thách thức và đánh đổi trong thực tế**

Việc áp dụng Sóng Vô tuyến Nhận thức không phải là không có chi phí. Nó về cơ bản là một sự đánh đổi: nó thay thế *sự phức tạp của việc điều phối tập trung* (yêu cầu giao diện X2 hoặc O&M) bằng *sự phức tạp của tính toán phi tập trung* tại chính LPN. Sự đánh đổi này biểu hiện qua ba thách thức triển khai chính.

#### 1. Độ phức tạp tính toán (Computational Complexity):

Các thuật toán CR tiên tiến, đặc biệt là các thuật toán dựa trên ML/DL, đòi hỏi tài nguyên tính toán đáng kể. Các thuật toán DRL (S144) hoặc các thuật toán cảm biến dựa trên đặc điểm phức tạp (S99) có thể là một gánh nặng lớn đối với một Femto-BS (LPN), vốn được thiết kế là các thiết bị chi phí thấp, công suất thấp. Có một sự đánh đổi trực tiếp giữa độ chính xác (accuracy) của thuật toán và độ phức tạp tính toán của nó.

#### 2. Độ trễ (Latency) / Trì hoãn (Delay):

Chu trình nhận thức (Cảm nhận → Phân tích → Quyết định → Hành động) mất thời gian. Môi trường vô tuyến (ví dụ: fading đa đường, di chuyển của người dùng) thay đổi rất nhanh, có thể theo thứ tự mili-giây. Nếu tổng độ trễ của chu trình nhận thức lớn hơn thời gian kết hợp (coherence time) của kênh, thì quyết định được đưa ra (ví dụ: "kênh X đang trống") có thể đã lỗi thời vào thời điểm

nó được thực thi (hành động). Quản lý độ trễ của chu trình nhận thức là một thách thức thiết kế quan trọng.

### 3. Chi phí Báo hiệu (Signaling Overhead):

Mặc dù các hệ thống CR-HetNet thường được mô tả là "tự trị" hoặc "phi tập trung", chúng hiếm khi hoạt động mà không có bất kỳ báo hiệu nào. Có một phô điêu phổi:

- **Tập trung (Centralized):** Tất cả thông tin được gửi đến một bộ điều khiển trung tâm. Cho kết quả tối ưu toàn cục, nhưng chi phí báo hiệu *rất cao* và không thể mở rộng.
- **Phi tập trung (Distributed):** Mỗi nút tự quyết định. Chi phí báo hiệu *rất thấp*, nhưng kết quả thường *dưới mức tối ưu* (sub-optimal).
- **Phân tán-Hợp tác (Coordinated-distributed):** Một mô hình cân bằng thực tế, trong đó các BS lân cận trao đổi một lượng nhỏ thông tin cục bộ.

Ngay cả các kỹ thuật tiên tiến cũng có chi phí ẩn: Cảm biến hợp tác (S164) yêu cầu các SU trao đổi kết quả cảm biến. Lý thuyết Trò chơi (S134) yêu cầu "Leader" (MeNB) phát đi "giá" nhiều. Việc thiết kế một hệ thống CR hiệu quả đòi hỏi phải cân bằng giữa lợi ích của việc chia sẻ thông tin (phối hợp) và chi phí báo hiệu, độ trễ và độ phức tạp mà nó tạo ra.

#### 10.6.3 Triển khai và Thủ nghiệm trên Testbed

Nghiên cứu về CR-HetNet không chỉ giới hạn trong mô phỏng. Việc triển khai trong thế giới thực là khả thi, phần lớn là nhờ vào sự phát triển của Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (Software Defined Radio - SDR), nền tảng phần cứng cho phép CR. Các nhà nghiên cứu đã xây dựng các nền tảng thử nghiệm (testbed) để xác thực các thuật toán này:

- **Testbed VT-CORNET:** Một ví dụ điển hình là Testbed Mạng Vô tuyến Nhận thức của Virginia Tech, sử dụng 48 nút SDR USRP2 (Nền tảng Vô tuyến Đa năng Phần mềm) được phân bổ trong một tòa nhà để mô phỏng các kịch bản triển khai CR trong nhà (indoor).
- **Testbed dựa trên Tiêu chuẩn:** Các testbed khác được xây dựng để tích hợp các tiêu chuẩn IEEE và hướng dẫn của FCC, cho phép mô phỏng CRN trong thời gian thực.
- **Triển khai Phần cứng:** Các nghiên cứu đã khám phá việc triển khai các thuật toán CR trên các nền tảng Bộ xử lý Tín hiệu Số (DSP) và các nền tảng phần cứng cụ thể khác, chứng minh tính khả thi của việc chạy các thuật toán này trên các thiết bị nhúng.

Sự tồn tại của các testbed này xác nhận rằng con đường từ SDR (phần cứng linh hoạt) đến CR (SDR + trí thông minh) là một lộ trình triển khai thực tế, cho phép xác thực các thuật toán được mô phỏng trong các điều kiện thế giới thực.

## **Chương 11: Trường hợp Sử dụng: Giảm thiểu Nhiễu trong Mạng Không đồng nhất (HetNets) 4G**

### **11.1 Giới thiệu về TVWS: Một Nguồn tài nguyên Phổ biến Chiến lược cho Vô tuyến Nhận thức**

#### **11.1.1 Định nghĩa TVWS và Bối cảnh Pháp lý**

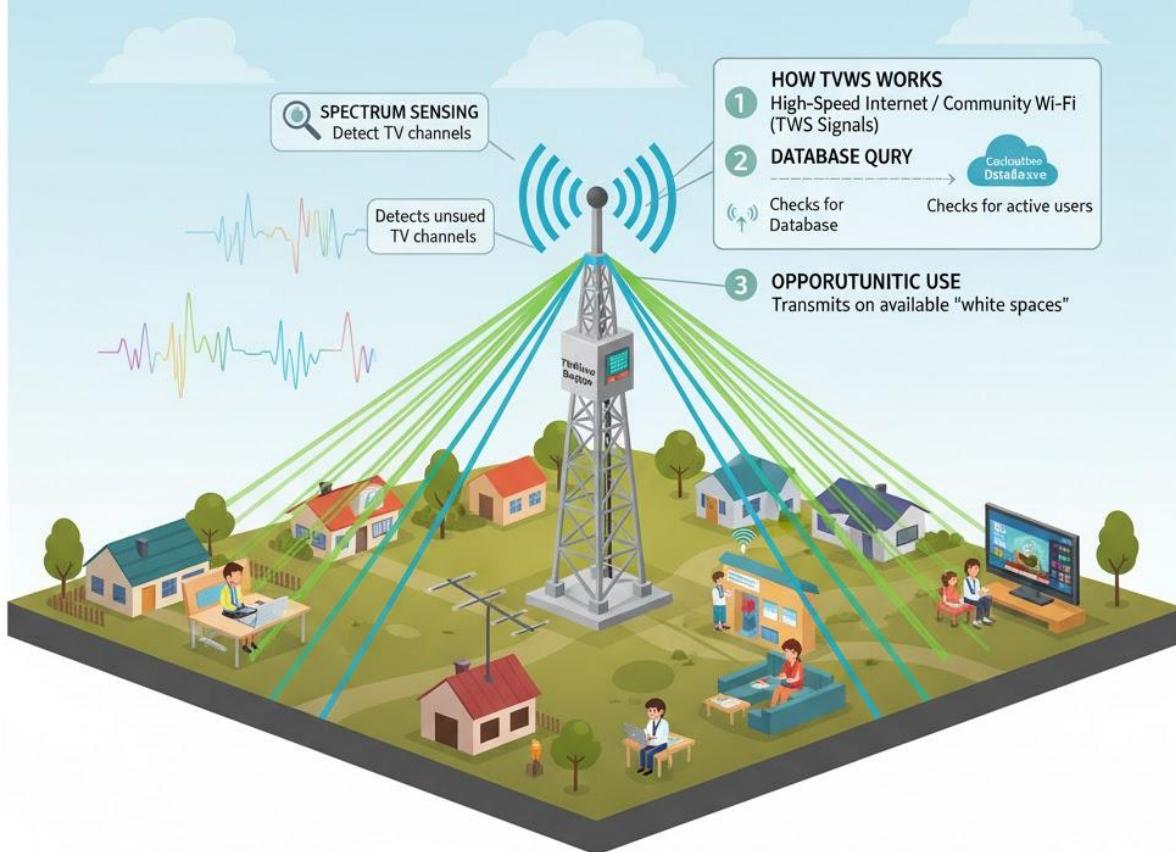
Không gian Trống Truyền hình (TV White Space - TVWS) được định nghĩa là các khói phổ biến trong các băng tần phát sóng truyền hình (chủ yếu là VHF và UHF, từ 54 MHz đến 862 MHz) không được sử dụng bởi các đài truyền hình được cấp phép

tại một vị trí địa lý cụ thể [1, 2]. Về mặt lịch sử, các dải tần này được cố ý để trống, đóng vai trò là các "vùng đệm" (guard bands) để ngăn chặn nhiễu kênh liền kề giữa các đài phát thanh truyền hình analog [1]. Tuy nhiên, với quá trình chuyển đổi toàn cầu sang truyền hình kỹ thuật số (digital switchover), hiệu quả sử dụng phổ tần của tín hiệu truyền hình đã tăng lên đáng kể, giải phóng một lượng lớn các kênh không sử dụng này [3].

Nhận thức được cơ hội này như một giải pháp trực tiếp cho cuộc khủng hoảng "khan hiếm phổ tần" do nhu cầu dữ liệu di động 4G bùng nổ [4, 5], các cơ quan quản lý đã đi tiên phong trong việc thay đổi mô hình. Ủy ban Truyền thông Liên bang (FCC) của Hoa Kỳ và Ofcom của Vương quốc Anh là những cơ quan đầu tiên soạn thảo các quy tắc cho phép *truy cập không cần giấy phép* (unlicensed access) hoặc truy cập thứ cấp (secondary access) vào phổ tần TVWS [1, 6]. Các cơ quan quản lý khác, bao gồm Canada và Singapore, cũng đã có những động thái tương tự [6].

Sự thay đổi chính sách này không chỉ đơn thuần là việc mở ra một băng tần mới. Nó đại diện cho một sự thay đổi triết lý cơ bản trong quản lý phổ tần. Các mạng 4G LTE truyền thống được xây dựng dựa trên mô hình *cáp phép độc quyền* (exclusive-use), nơi một nhà mạng trả tiền cho quyền truy cập độc quyền vào một khối phổ, đảm bảo Chất lượng Dịch vụ (QoS) có thể dự đoán được [7, 8]. Việc cho phép truy cập thứ cấp vào TVWS là sự thừa nhận chính thức đầu tiên ở quy mô lớn rằng mô hình chia sẻ động (dynamic sharing) là cần thiết. Công nghệ Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) được xác định là cơ chế kỹ thuật nền tảng cho phép các "người dùng thứ cấp" (Secondary Users - SUs) này hoạt động trong các kênh trống, trong khi vẫn đảm bảo bảo vệ tuyệt đối cho các "người dùng chính" (Primary Users - PUs) là các đài truyền hình và micro không dây [4]. Do đó, TVWS đã trở thành "phòng thí nghiệm" thực tế quy mô lớn đầu tiên cho Vô tuyến Nhận thức, tạo tiền đề cho các mô hình chia sẻ phổ tần phức tạp hơn sau này.

## TV WHITE SPACES (TVWS): A Strategic Spectrum Resource for Cognitive Radio



### KEY BENEFITS:

- ✓ Bridging the Digital Divide
- ✓ Affordable Rural Broadband
- ✓ Smart Community Applications

### REAL-WORLD APPLICATION:

- |                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| Home & Community Internet Access | Community Internet Access |
| E-Learning                       | Telemedicine              |
| Telemedicine                     | Smart Agriculture / IoT   |

Hình 24: Ứng dụng Không gian Trắng Truyền hình (TV White Space - TVWS) cho Cognative Radio

### 11.1.2 Tầm quan trọng Chiến lược: Đặc tính Truyền sóng và Ứng dụng

Giá trị chiến lược của TVWS đối với các nhà mạng 4G và các ứng dụng mới không chỉ nằm ở số lượng phổ tần khả dụng, mà còn ở các đặc tính vật lý vượt trội của các băng tần VHF/UHF. Không giống như các băng tần vi sóng (2.4 GHz, 5 GHz) được

sử dụng bởi Wi-Fi hoặc các băng tần di động 4G cao hơn, các tín hiệu ở tần số thấp (sub-GHz) có đặc tính truyền sóng ưu việt:

1. **Phạm vi Phủ sóng Tầm xa:** Tín hiệu UHF/VHF suy giảm chậm hơn nhiều theo khoảng cách, cho phép phạm vi phủ sóng cực xa. Ví dụ, tiêu chuẩn IEEE 802.22 được thiết kế cho phạm vi lên đến 100 km [9].
2. **Khả năng Xuyên thấu Tốt:** Các tín hiệu này có khả năng xuyên qua các vật cản như tòa nhà, tường và tán lá tốt hơn đáng kể so với các tín hiệu tần số cao [3, 9].

Những đặc tính này làm cho TVWS trở thành một nguồn tài nguyên lý tưởng cho các ứng dụng đòi hỏi băng thông cao (hàng chục Mbps) và tầm xa (vài trăm mét trở lên) [3]. Các trường hợp sử dụng mục tiêu chính bao gồm:

- **Băng thông rộng Nông thôn:** Đây là ứng dụng quan trọng nhất. TVWS có thể cung cấp kết nối băng thông rộng đáng tin cậy cho các cộng đồng ở vùng sâu vùng xa, mật độ dân số thấp, nơi việc triển khai cáp quang hoặc DSL là quá tốn kém [2, 10].
- **Giảm tải Dữ liệu Di động (Mobile Data Offloading):** Đối với các nhà mạng 4G, TVWS cung cấp một cơ hội để giảm tải lưu lượng dữ liệu không quan trọng từ mạng LTE được cấp phép (đang quá tải) sang băng tần không phép, đặc biệt là ở các khu vực ngoại ô hoặc trong nhà [8, 11].
- **Internet of Things (IoT) Nâng cao:** Trong khi các công nghệ như LoRa và Sigfox cung cấp IoT tầm xa, chúng bị giới hạn ở băng thông rất thấp. TVWS cho phép các mạng IoT/M2M có băng thông cao, ví dụ như giám sát video hoặc các ứng dụng lưới điện thông minh (Smart Grid) [3].

## 11.2 Cơ chế Điều tiết và Kiến trúc Truy cập: Cơ sở dữ liệu Định vị Địa lý (GLSD)

Việc cho phép các thiết bị không phép hoạt động trong một băng tần quan trọng (của truyền hình) đòi hỏi một cơ chế bảo vệ nghiêm ngặt. Ban đầu, cộng đồng Vô tuyến Nhận thức tập trung vào *dò phô* (spectrum sensing) tự trị. Tuy nhiên, các cơ quan quản lý đã nhanh chóng nhận ra những hạn chế nghiêm trọng của phương pháp này và đã bắt buộc một kiến trúc tập trung, đáng tin cậy hơn.

### 11.2.1 Vai trò Trung tâm của GLSD

Cơ chế được lựa chọn là Cơ sở dữ liệu Định vị Địa lý (Geo-Location Spectrum Database - GLSD) [6]. Thay vì để các thiết bị tự quyết định, GLSD hoạt động như một "kiểm soát viên không lưu" tập trung cho phô tần.

Kiến trúc hoạt động của GLSD là một mô hình máy khách-máy chủ [10]:

- Yêu cầu:** Mọi thiết bị muốn hoạt động trong TVWS (được gọi là Thiết bị Không gian Trắng - WSD, hoặc Thiết bị Băng tần TV - TVBD [12]) phải được trang bị khả năng nhận biết vị trí, điển hình là GPS [9].
- Truy vấn:** WSD phải kết nối Internet và gửi vị trí địa lý của nó đến một GLSD được cơ quan quản lý ủy quyền (ví dụ: Google, Nominet [6, 13]).
- Phản hồi:** GLSD, với kiến thức *tiên nghiêm* về vị trí của tất cả các đài phát thanh truyền hình và các dịch vụ được bảo vệ khác, sẽ tính toán và trả về một danh sách các kênh TVWS khả dụng tại chính xác vị trí đó, cùng với các tham số hoạt động bắt buộc (ví dụ: mức công suất phát tối đa cho phép) [10].
- Tuân thủ:** WSD sau đó chỉ được phép phát sóng trên các kênh được chỉ định và ở mức công suất không vượt quá giới hạn cho phép.

Cơ chế này giúp giảm thiểu đáng kể nguy cơ nhiều có hại và cho phép chất lượng dịch vụ (QoS) tốt hơn cho người dùng thứ cấp, vì nó ngăn chặn xung đột trước khi chúng xảy ra [10].

### 11.2.2 Giao thức IETF PAWS (RFC 7545)

Để đảm bảo kiến trúc GLSD có thể mở rộng và tương tác, Lực lượng Đặc nhiệm Kỹ thuật Internet (IETF) đã tiêu chuẩn hóa Giao thức Truy cập Không gian Trắng (Protocol to Access White Space - PAWS), được định nghĩa trong RFC 7545 [10].

PAWS *không phải* là một tiêu chuẩn vô tuyến (như Wi-Fi hay LTE). Nó là một giao thức lớp ứng dụng, hoạt động như một "ngôn ngữ chung" cho WSD và GLSD. PAWS định nghĩa các định dạng tin nhắn chuẩn hóa, thường dựa trên JSON qua HTTP/HTTPS [10], cho các chức năng thiết yếu sau:

- Đăng ký thiết bị (Device registration).
- Truy vấn tính khả dụng của kênh (Channel availability query).
- Tuân thủ các quy định phổ tần quốc gia [10].

Tầm quan trọng của PAWS là nó tách biệt lớp vật lý (công nghệ vô tuyến) khỏi lớp điều tiết. Bất kỳ công nghệ nào (802.11af, 802.22, hoặc LTE đã điều chỉnh) đều có thể hoạt động trong TVWS, miễn là nó triển khai một máy khách (client) PAWS tuân thủ để giao tiếp với GLSD [10, 13].

### 11.2.3 Cuộc tranh luận về Kiến trúc: Dò phô (Sensing) so với Cơ sở dữ liệu (Database)

Quyết định bắt buộc sử dụng GLSD là kết quả trực tiếp của những thách thức kỹ thuật gần như không thể vượt qua của việc chỉ dựa vào dò phô:

- **Vấn đề Nút ẩn (Hidden Node Problem):** Đây là một lỗ hổng nghiêm trọng. Một WSD có thể nằm trong vùng "bóng" tín hiệu (ví dụ: sau một ngọn đồi hoặc tòa nhà) và không thể "nghe" thấy tín hiệu TV của người dùng chính, do đó WSD kết luận kênh đó trống. Tuy nhiên, đường truyền của WSD (có thể ở công suất cao) lại "nhìn thấy" (và gây nhiều nghiêm trọng) cho một ăng-ten TV không bị che khuất ở gần đó [14, 15].
- **Yêu cầu Độ nhạy Cực thấp:** Để bảo vệ các dịch vụ dễ bị tổn thương nhất—micro không dây—FCC yêu cầu các thiết bị phải có khả năng phát hiện tín hiệu yếu tới -114 dBm [2, 12]. Việc đạt được độ nhạy này trong một thiết bị tiêu dùng giá rẻ là cực kỳ khó khăn về mặt kỹ thuật và chi phí [16].

Do những thách thức này, các cơ quan quản lý như FCC và Ofcom đã coi dò phô là "quá thách thức" và chỉ là một tính năng "tùy chọn" [16, 17]. Thay vào đó, GLSD là *bắt buộc*. GLSD đáng tin cậy hơn nhiều trong việc bảo vệ các dịch vụ *cố định*, *đã biết* như các đài phát sóng TV [16]. Tuy nhiên, bản thân GLSD cũng có hạn chế: nó dựa trên kiến thức *tiên nghiệm* [17]. Nó không thể theo dõi các dịch vụ *động*, *công suất thấp*, *không đăng ký* như micro không dây đang được sử dụng tạm thời tại một sự kiện [17].

Quyết định pháp lý ưu tiên GLSD (một vấn đề về cơ sở dữ liệu/CNTT) hơn dò phô (một vấn đề về xử lý tín hiệu/RF) đã định hình lại toàn bộ ngành công nghiệp. Nó đã hạ thấp đáng kể rào cản kỹ thuật để gia nhập thị trường. Các nhà sản xuất thiết bị 4G và Wi-Fi nhận thấy rằng việc bổ sung một mô-đun GPS và một máy khách phần mềm PAWS [3, 10] vào thiết bị hiện có của họ dễ dàng hơn nhiều so với việc thiết kế lại hoàn toàn lớp vật lý để dò tìm ở mức -114 dBm. Do đó, sự đổi mới trong TVWS đã chuyển dịch từ lớp vật lý (PHY) sang lớp ứng dụng (PAWS) và kiến trúc mạng (tích hợp GLSD).

## **11.3 Các Tiêu chuẩn Hiện có cho Hoạt động TVWS: Phân tích so sánh**

Sự linh hoạt của kiến trúc GLSD/PAWS đã cho phép nhiều công nghệ vô tuyến khác nhau được điều chỉnh để hoạt động trong TVWS. Hai tiêu chuẩn chính từ IEEE đã xuất hiện, đại diện cho hai triết lý thiết kế khác nhau.

### **11.3.1 IEEE 802.22 (WRAN): Mạng Vô tuyến Nhận thức "Thuần túy"**

Tiêu chuẩn IEEE 802.22, hay Mạng Khu vực Không dây (Wireless Regional Area Network - WRAN), là tiêu chuẩn *đầu tiên và hoàn chỉnh nhất* trên thế giới được thiết kế từ đầu dựa trên công nghệ Vô tuyến Nhận thức cho TVWS [2, 18, 19].

- **Mục đích:** Mục tiêu chính của 802.22 là cung cấp "truy cập băng thông rộng không dây ở khu vực nông thôn" [2].
- **Kiến trúc:** Nó sử dụng cấu trúc liên kết điểm-đa-điểm (Point-to-Multipoint - PMP) [2], trong đó một Trạm gốc (Base Station - BS) phục vụ nhiều Thiết bị đầu cuối khách hàng (CPE).
- **Phạm vi:** Do hoạt động ở băng tần VHF/UHF (54-862 MHz) [2], nó đạt được phạm vi phủ sóng ánh tượng, với bán kính cell điển hình từ 17-33 km và có thể lên đến 100 km [2, 9].
- **Khả năng CR:** Đây là một tiêu chuẩn CR "thuần túy", tích hợp đầy đủ ba trụ cột của Vô tuyến Nhận thức: (1) Dò phỏ cộng tác (collaborative sensing), (2) Định vị địa lý (cả dựa trên GPS và tam giác hóa mặt đất), và (3) Giao diện bắt buộc với cơ sở dữ liệu người dùng chính [2].

### **11.3.2 IEEE 802.11af (White-Fi): Phương pháp Tiếp cận "Thích ứng"**

Trái ngược với 802.22, tiêu chuẩn IEEE 802.11af (còn gọi là "White-Fi") áp dụng một phương pháp tiếp cận thực dụng hơn, dựa trên "thích ứng" thay vì "tối ưu hóa" [9].

- **Mục đích:** Đây là một tiêu chuẩn Mạng LAN Không dây (WLAN), được thiết kế cho phạm vi ngắn hơn, giống như Wi-Fi, lên đến 1 km [9].
- **Kiến trúc:** 802.11af về cơ bản lấy lớp vật lý (PHY) OFDM rất thành công từ tiêu chuẩn IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5 GHz) và điều chỉnh nó để hoạt động trong các kênh TVWS 6-8 MHz [9]. Nó giữ lại phần lớn ngăn xếp giao thức Wi-Fi quen thuộc [3].
- **Khả năng CR:** Giống như 802.22, nó sử dụng công nghệ CR để tránh nhiễu, nhưng chủ yếu dựa vào cơ chế GLSD bắt buộc [9].

### 11.3.3 Phân tích So sánh và Bảng

Sự tồn tại song song của hai tiêu chuẩn này làm nổi bật sự phân đôi cơ bản trong chiến lược triển khai TVWS. 802.22 là một giải pháp được *tối ưu hóa* kỹ thuật, được xây dựng tùy chỉnh cho môi trường TVWS, trong khi 802.11af là một giải pháp *thích ứng* thực dụng, tận dụng hệ sinh thái Wi-Fi không lò để giảm chi phí và thời gian đưa ra thị trường [3].

Đối với một nhà mạng 4G, 802.22 (WRAN) có thể được xem như một công nghệ *backhaul không dây* (wireless backhaul) hoặc một mạng truy cập nông thôn cạnh tranh. Ngược lại, 802.11af (White-Fi) có thể được xem như một cơ chế *giảm tải dữ liệu* (data offload) giống như Wi-Fi, nhưng có phạm vi vượt trội.

**Bảng 11.1: Phân tích so sánh IEEE 802.22 (WRAN) và IEEE 802.11af (White-Fi)**

Tiêu chí	<b>IEEE 802.22 (WRAN)</b>	<b>IEEE 802.11af (White-Fi)</b>	Nguồn
<b>Tên Tiêu chuẩn</b>	Mạng Khu vực Không dây (WRAN)	Mạng LAN Không dây (White-Fi)	[9]
<b>Phạm vi Tối đa</b>	Lên đến 100 km (Điểm hình 17-33 km)	Lên đến 1 km	[2, 9]
<b>Mục đích Chính</b>	Truy cập băng thông rộng nông thôn	Mạng LAN không dây (mở rộng Wi-Fi)	[2, 9]
<b>Công nghệ CR Cốt lõi</b>	Dò phố + GLSD + Định vị địa lý	GLSD + Định vị địa lý	[2, 9]
<b>Lớp Vật lý (PHY) Gốc</b>	Thiết kế tùy chỉnh cho TVWS (OFDMA)	Dựa trên IEEE 802.11ac (OFDM)	[2, 9]

#### 11.4 Thách thức và Giải pháp Tích hợp 4G/LTE vào TVWS

Trong khi các tiêu chuẩn IEEE cung cấp các giải pháp chuyên dụng, một số nhà nghiên cứu và nhà mạng đã khám phá một lựa chọn hấp dẫn hơn: chạy chính công nghệ 4G/LTE trong phố tàn TVWS. Điều này hứa hẹn sự hội tụ liền mạch, nhưng lại vấp phải những rào cản kiến trúc cơ bản.

### **11.4.1 Sự không tương thích về Triết lý Thiết kế**

Thách thức cốt lõi là sự không tương thích về triết lý. Công nghệ 4G/LTE được thiết kế cho các *triển khai được lên kế hoạch của nhà mạng* trong một môi trường phổ biến *được cấp phép độc quyền* và có thể dự đoán được [3]. Toàn bộ kiến trúc của nó, từ eNodeB đến Mạng lõi Gói Phát triển (Evolved Packet Core - EPC) [20], đều dựa trên sự ổn định và kiểm soát hoàn toàn.

Khi đưa vào môi trường TVWS hỗn loạn, không được cấp phép, LTE thiếu hai cơ chế cơ bản:

- 1. Quản lý Nhiều không có kế hoạch:** LTE không được thiết kế để xử lý nhiều từ các mạng không đồng nhất, không lường trước được, vốn là đặc điểm cố hữu của phổ tần không phép [3, 21].
- 2. Khả năng tương tác với Cơ sở dữ liệu:** Không có gì trong tiêu chuẩn 3GPP LTE cơ bản có khái niệm "trạm gốc phải truy vấn một cơ sở dữ liệu bên ngoài (GLSD) để xin phép phát sóng" [3].

### **11.4.2 Nghiên cứu điển hình Kỹ thuật: Phân tích "Project Belgrade" (Microsoft)**

Một trong những nỗ lực đáng chú ý nhất để giải quyết những thách thức này là "Project Belgrade" của Microsoft Research [3]. Dự án này đã chứng minh tính khả thi của việc sử dụng công nghệ LTE trong TVWS, nhưng cách thức họ thực hiện đã bộc lộ những hạn chế của kiến trúc LTE truyền thống.

Do không thể truy cập vào phần mềm cơ sở (firmware) độc quyền của trạm gốc (small cell), nhóm dự án đã phải "hack" kiến trúc LTE một cách sáng tạo:

- **Tách rời Mạng lõi:** Thay vì một EPC vật lý, đắt tiền, họ đã điều chỉnh một *EPC đơn giản hóa* để chạy hoàn toàn trên *đám mây công cộng (Microsoft Azure)* [3].
- **Sửa đổi Giao thức:** Họ đã sửa đổi kết nối S1AP (giao diện giữa trạm gốc và lõi) để hoạt động qua TCP, cho phép nó truyền qua Internet công cộng một cách đáng tin cậy, thay vì các liên kết backhaul chuyên dụng [3].
- **Thêm "Bộ não" Nhận thức bên ngoài:** Đây là bước quan trọng nhất. Họ đã xây dựng một *máy khách (client) PAWS nguồn mở*. Máy khách này chạy như một quy trình phần mềm riêng biệt, giao tiếp với cơ sở dữ liệu Nominet TVWS để lấy danh sách các kênh khả dụng. Sau đó, nó *ra lệnh* cho small cell LTE (coi nó như một "radio câm") điều chỉnh đến kênh được phép [3].
- **Phần cứng:** Họ đã sử dụng các small cell LTE thương mại (IP Access E40) hoạt động trong các băng tần LTE tình cờ chồng lấn với TVWS (ví dụ: Band 13 ở Mỹ, 600/700 MHz) [3, 10]. Một nghiên cứu do dự án ủy quyền đã xác nhận rằng phần cứng LTE hiện tại về cơ bản đáp ứng các yêu cầu RF của ETSI cho các thiết bị TVWS [3].

Những phát hiện của Project Belgrade là rất sâu sắc. Họ đã chứng minh rằng rào cản chính để tích hợp 4G-CR không phải là phần cứng RF—radio LTE hiện tại đã "đủ tốt"—mà là *kiến trúc phần mềm nguyên khói, khép kín* của 3GPP. Giải pháp của Microsoft là *tách rời* (disaggregate) kiến trúc: (a) Phần cứng Radio (small cell), (b) Mạng lõi (EPC trên Azure), và (c) Logic Nhận thức (máy khách PAWS). Kiến trúc này—nơi mạng lõi được ảo hóa trên đám mây và giao tiếp với các đơn vị radio qua các giao diện mở/được điều chỉnh—là một bản xem trước trực tiếp của các kiến trúc 5G Core (5GC) và Open RAN (O-RAN) trong tương lai. Nhu cầu thực tế của việc đưa LTE vào TVWS đã vô tình buộc các kỹ sư phải minh ra một kiến trúc mạng linh hoạt, ảo hóa, mà sau này trở thành nền tảng cho thế hệ mạng di động tiếp theo.

## 11.5 Thích ứng 3GPP cho Phổ tần Không cấp phép và Di động Phổ tần

Bản thân 3GPP cuối cùng cũng đã nhận ra sự cần thiết phải hoạt động trong phổ tần không phép, mặc dù trọng tâm ban đầu của họ là băng tần 5 GHz, không phải TVWS.

### 11.5.1 Các khái niệm 3GPP liên quan (LAA, MulteFire)

Để đáp ứng nhu cầu giảm tải dữ liệu, 3GPP đã phát triển các tiêu chuẩn sau:

- **LAA (Licensed Assisted Access):** Được chuẩn hóa trong 3GPP Release 13 [22, 23, 24]. LAA cho phép các nhà mạng sử dụng Tổng hợp Sóng mang (Carrier Aggregation) để kết hợp một "mỏ neo" (anchor) ở băng tần *được cấp phép* (để kiểm soát và đảm bảo QoS) với một sóng mang thứ cấp ở băng tần *không phép* (ví dụ: 5 GHz) để tăng thông lượng dữ liệu [25, 26].
- **Cơ chế Cùng tồn tại:** Không giống như TVWS (dựa trên GLSD), cơ chế cùng tồn tại chính của LAA là *Listen-Before-Talk (LBT)* [22, 23]. Đây là một cơ chế "cảm nhận" tinh vi, đảm bảo trạm gốc LTE "lắng nghe" và chỉ phát sóng khi kênh không phép trống, nhằm cùng tồn tại một cách công bằng với Wi-Fi.
- **MulteFire:** Một liên minh công nghiệp đã phát triển MulteFire, cho phép LTE hoạt động *độc lập* (standalone) hoàn toàn trong băng tần không phép mà không cần mỏ neo được cấp phép [26, 27, 28].

Mặc dù các công nghệ này chủ yếu nhắm vào băng tần 5 GHz [22, 29], chúng đại diện cho sự chấp nhận chính thức của 3GPP đối với hoạt động không phép. Nhóm Project Belgrade cũng đã chỉ ra MulteFire như một giải pháp tiềm năng trong tương lai để giải quyết vấn đề cùng tồn tại (coexistence) mà họ không thể giải quyết bằng phần cứng LTE tiêu chuẩn [3].

## 11.5.2 Quản lý Di động Phổ tần (Spectrum Mobility) và VHO

Một thách thức cơ bản của bất kỳ mạng Vô tuyến Nhận thức nào là tính *tạm thời* của phổ tần. Nếu một người dùng chính (Primary User) quay trở lại, người dùng thứ cấp (Secondary User - SU) phải ngay lập tức rời khỏi kênh. Quá trình này được gọi là *di động phổ tần* (spectrum mobility) hoặc *chuyển giao phổ tần* (spectrum handoff) [30].

Trong bối cảnh tích hợp 4G-CR, điều này tạo ra một kịch bản phức tạp: *Chuyển giao Dọc* (Vertical Handoff - VHO), nơi một thiết bị người dùng (UE) cần di chuyển giữa mạng 4G LTE (được cấp phép) và một mạng TVWS (không phép, ví dụ: IEEE 802.22 WRAN) [11].

Phân tích một mô hình quy trình VHO từ 3GPP LTE sang 802.22 WRAN cho thấy một rào cản hiệu suất nghiêm trọng [11]:

- Khám phá (Discovery):** UE sử dụng chức năng *ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function)* của 3GPP để nhận biết sự tồn tại của mạng 802.22 WRAN.
- Giải phóng Bearer LTE (Break):** Khi quyết định chuyển giao, UE gửi tin nhắn *Detach* (Tách mạng) đến MME. Điều này kích hoạt một chuỗi thông điệp (messages 19-25 trong mô hình) giữa MME, S-GW và P-GW để *hủy kích hoạt* các bearer EPS. Về cơ bản, UE phải *chấm dứt hoàn toàn* phiên IP của mình trên mạng 4G.
- Đồng bộ hóa WRAN (Make):** Sau khi tắt radio 3GPP, UE bật radio 802.22 và bắt đầu một quy trình đồng bộ hóa (quét kênh, nhận SCH, bắn đồ downstream/upstream) với BS 802.22, quá trình này có thể mất vài giây (sử dụng các bộ đếm thời gian T58, T56, T12).

**4. Thiết lập Dịch vụ WRAN:** Sau khi đồng bộ, UE phải thực hiện quy trình *Tạo Dịch vụ Đóng (DSA)* (messages 31-39) để yêu cầu và thiết lập một *luồng dịch vụ mới* và một *phiên IP mới* trên mạng WRAN.

Phân tích này cho thấy quy trình VHO không *liền mạch*. Nó là một quy trình "*phá vỡ trước khi thực hiện*" (*break-before-make*) cứng nhắc. Không giống như chuyển giao liền mạch trong nội bộ LTE (nơi phiên IP được duy trì), mô hình này đảm bảo rằng mọi ứng dụng thời gian thực (như gọi VoIP hoặc video) sẽ bị *rót*. Do sự thiếu liền mạch về giao thức này, việc tích hợp 4G-TVWS (theo mô hình này) chỉ hữu ích cho các ứng dụng *không nhạy cảm với độ trễ và chịu được gián đoạn* (ví dụ: giảm tải nền, cập nhật phần mềm, đồng bộ email). Nó không thể được sử dụng để mở rộng liền mạch trải nghiệm 4G cốt lõi.

## **11.6 Nghiên cứu Điện hình Triển khai Toàn cầu: Bằng chứng về Tính khả thi**

Bất chấp những thách thức kỹ thuật, nhiều quốc gia đã tiến hành các thử nghiệm thực tế quy mô lớn, chứng minh giá trị thực tiễn của TVWS.

### **11.6.1 Nam Phi (Hội đồng Nghiên cứu Khoa học và Công nghiệp - CSIR)**

Nam Phi đã trở thành một trong những quốc gia đi đầu thế giới trong việc triển khai thử nghiệm TVWS thực tế [10]. Mục tiêu chính là giải quyết "sự chia rẽ kỹ thuật số" nghiêm trọng bằng cách cung cấp kết nối băng thông rộng giá cả phải chăng cho các cộng đồng nông thôn và bán đô thị, đặc biệt là các trường học và phòng khám y tế [10, 31, 32].

- **Thử nghiệm Cape Town (2013):** Một thử nghiệm lớn, hợp tác với TENET, Google và các đối tác khác, đã kết nối 10 trường học trong khu vực Western

Cape. Thử nghiệm đã thành công cung cấp tốc độ lên đến 12 Mbps qua bán kính 6.5 km, và quan trọng nhất là chứng minh rằng nó có thể hoạt động mà không gây nhiều hại cho các dịch vụ truyền hình hiện có [33, 34].

- **Thử nghiệm Limpopo (Mankweng):** Một thử nghiệm quan trọng khác đã được triển khai tại thị trấn Mankweng, kết nối 5 trường trung học nông thôn. Thử nghiệm này đạt được thông lượng ổn định từ 4-8 Mbps và độ trễ thấp (<10 ms), chứng minh TVWS là một giải pháp thay thế khả thi và hiệu quả về chi phí so với cơ sở hạ tầng cố định (cáp) [35, 36].

Đáng chú ý nhất, một nghiên cứu so sánh gần đây (2022) của CSIR đã đánh giá hiệu suất của thiết bị TVWS từ ba nhà sản xuất khác nhau, dựa trên cả hai tiêu chuẩn *IEEE 802.11af* và *3GPP LTE-A* [10]. Kết quả mang lại một phát hiện phản trực quan: trong cả hai kịch bản thử nghiệm (tầm ngắn và tầm xa), các thiết bị dựa trên *IEEE 802.11af* đã "chứng minh hiệu suất tốt hơn" so với các thiết bị dựa trên *3GPP LTE-A* về Hiệu suất Sử dụng Phổ tần (SUE), thông lượng đường xuống (downlink throughput), và cường độ tín hiệu nhận được (RSS).

Phát hiện này là vô cùng quan trọng. Người ta thường giả định rằng LTE, với công nghệ OFDMA tiên tiến và quản lý tài nguyên tinh vi, sẽ vượt trội hơn Wi-Fi. Tuy nhiên, thử nghiệm của CSIR cho thấy điều ngược lại trong môi trường TVWS thực tế. Lý do có thể là: LTE được *tối ưu hóa* cho một môi trường phổ tần *có kiểm soát*, *được cấp phép*, nơi eNodeB lập lịch cho mọi truyền dẫn. Ngược lại, 802.11 (cơ sở của 802.11af) được *sinh ra* trong môi trường *hỗn loạn, chung* của băng tần ISM 2.4 GHz. Lớp MAC của nó (CSMA/CA - Cảm nhận Sóng mang Đa Truy cập/Tránh Xung đột) được thiết kế chính xác để *cùng tồn tại* một cách linh hoạt. Điều này cho thấy rằng việc *điều chỉnh* một công nghệ (LTE) cho một môi trường mới không phải lúc nào cũng tốt bằng việc *thích ứng* một công nghệ (Wi-Fi) vốn đã phù hợp tự nhiên với môi trường đó.

## 11.6.2 Việt Nam (Bộ TT&TT / Cục Tân số Vô tuyến điện - ARFM)

Bối cảnh tại Việt Nam mang tính chất thăm dò và chiến lược. Điều kiện tiên quyết để khai thác TVWS là hoàn thành quá trình chuyển đổi sang truyền hình số mặt đất. Thông tư 37/2020/TT-BTTT [37] quy hoạch băng tần 470-694 MHz cho truyền hình số mặt đất, chính thức đặt nền móng pháp lý cho việc giải phóng các "không gian trắng" trong tương lai.

Trước đó, vào năm 2016, Cục Tân số Vô tuyến điện (ARFM), thuộc Bộ Thông tin và Truyền thông, đã tổ chức một hội thảo quan trọng về "Công nghệ và ứng dụng TV white space (TVWS) tại Việt Nam" [38]. Sự kiện này cho thấy một chiến lược "chờ xem và học hỏi" thận trọng.

- **Các bên tham gia:** Hội thảo có sự tham gia của tất cả các bên liên quan quan trọng trên toàn cầu trong lĩnh vực TVWS, bao gồm USAID và Microsoft (những người ủng hộ mạnh mẽ nhất mô hình GLSD), Nokia (nhà cung cấp 4G lớn), và NICT (cơ quan kỹ thuật của Nhật Bản) [38].
- **Chủ đề Thảo luận:** Chương trình nghị sự [38] cho thấy Việt Nam đang đánh giá chính xác các vấn đề cốt lõi: "Tổng quan về công nghệ và ứng dụng TVWS" (USAID), "Giải pháp cho dịch vụ băng thông rộng di động ở khu vực nông thôn" (Nokia), và "Giải pháp cho vấn đề nhiễu TVWS (công nghệ dò so với công nghệ cơ sở dữ liệu)" (Microsoft).

Bằng cách tổ chức hội thảo này, các nhà hoạch định chính sách Việt Nam đã có thể tiếp thu kinh nghiệm và bài học từ các thử nghiệm và sai lầm của các quốc gia khác (như Mỹ, Anh, và Nam Phi) trước khi cam kết một khung pháp lý chính thức, đặc biệt là trong cuộc tranh luận kiến trúc cốt lõi giữa dò phô và cơ sở dữ liệu.

## **11.7 Kết luận: Đánh giá TVWS như một Trường hợp Sử dụng 4G-CR**

Phân tích toàn diện về việc khai thác Không gian Trắng Truyền hình (TVWS) cho thấy đây là một trong những trường hợp sử dụng Vô tuyến Nhận thức (CR) thành công và có ảnh hưởng nhất trong kỷ nguyên 4G, chuyển đổi CR từ lý thuyết học thuật sang thực tế thương mại.

### **11.7.1 Tổng hợp những phát hiện chính**

TVWS đã được chứng minh là một giải pháp khả thi và đã được triển khai để giải quyết tình trạng khan hiếm phổ tàn 4G, đặc biệt là cho các ứng dụng băng thông rộng nông thôn [4, 39]. Tuy nhiên, sự thành công của nó không được kích hoạt bởi các thuật toán dò phỏng (sensing) tiên tiến, vốn vẫn còn nhiều thách thức kỹ thuật (như vấn đề nút ẩn và độ nhạy) [14, 16]. Thay vào đó, nó được kích hoạt bởi một kiến trúc thực dụng: sự kết hợp bắt buộc của Cơ sở dữ liệu Định vị Địa lý (GLSD) và giao thức PAWS tiêu chuẩn hóa [10]. Các thử nghiệm thực tế quy mô lớn, đặc biệt là ở Nam Phi, đã chứng minh không chỉ tính khả thi về kỹ thuật mà còn cả lợi ích xã hội sâu sắc của TVWS trong việc thu hẹp khoảng cách số [33, 35].

### **11.7.2 Thách thức Tích hợp 4G Cốt lõi**

Những nỗ lực tích hợp trực tiếp 4G/LTE vào TVWS đã vấp phải những rào cản đáng kể, không phải ở lớp vật lý (RF) mà là ở *kiến trúc* và *giao thức*:

- 1. Rào cản Kiến trúc:** Kiến trúc 3GPP nguyên khôi, được cấp phép, tỏ ra không linh hoạt. Các giải pháp sáng tạo như Project Belgrade đã phải "hack" hệ thống bằng cách tách rời mạng lõi (EPC trên đám mây) khỏi logic nhận thức (máy khách PAWS bên ngoài) để đạt được chức năng [3].

2. **Rào cản Giao thức:** Sự thiếu hỗ trợ cho *chuyển giao đọc liền mạch* (seamless vertical handoff) là một hạn chế nghiêm trọng. Quy trình "phá vỡ trước khi thực hiện" được phân tích [11] đã giới hạn các ứng dụng chủ yếu vào việc giảm tải dữ liệu không theo thời gian thực, ngăn cản sự hội tụ thực sự của trải nghiệm người dùng 4G.
3. **Rào cản Hiệu suất:** Các thử nghiệm thực địa [10] cho thấy một kết quả đáng ngạc nhiên: một công nghệ MAC dựa trên Wi-Fi (802.11af), vốn được thiết kế cho môi trường hỗn loạn, có thể vượt trội hơn một công nghệ MAC dựa trên LTE (LTE-A), vốn được tối ưu hóa cho môi trường có kiểm soát, trong bối cảnh TVWS.

### 11.7.3 Triển vọng Tương lai: Di sản của 4G-TVWS

Bất chấp những thách thức tích hợp này, những nỗ lực tiên phong trong 4G-TVWS là vô giá. Chúng đã đóng vai trò là "bằng chứng khái niệm" cho các mô hình chia sẻ phổ tần động quy mô lớn. Các bài học kinh nghiệm—sự cs1af), và nhu cầu cấp thiết về một kiénsdasdrong Project Belgrade)—đã trực tiếp định hình và tạo nền tảng cho các khái niệm 5G và xa hơn nữa, chẳng hạn như 5G NR-U (NR trong phổ tần không phép), kiến trúc Open RAN (O-RAN), và các khung chia sẻ phổ tần động phức tạp hơn như CBRS.

## Chương 12: Trường hợp Sử dụng: Khai thác Không gian Trắng Truyền hình (TVWS)

### 12.1. Yêu cầu Bắt buộc về Truyền thông Trọng yếu: Từ Thất bại Tương tác đến Mạng Băng thông rộng

Truyền thông trong các hoạt động an toàn công cộng và ứng phó khẩn cấp (Public Safety and Emergency Communications - PSC) đại diện cho một trong những trường hợp sử dụng quan trọng và đòi hỏi khắt khe nhất đối với công nghệ không dây. Trong các tình huống nguy hiểm đến tính mạng, khả năng phối hợp liền mạch, đáng tin cậy giữa các lực lượng phản ứng đầu tiên không chỉ là một tiện ích kỹ thuật mà còn là một yêu cầu vận hành cơ bản. Phần này phân tích các thất bại mang tính hệ thống của các hệ thống cũ và sự trỗi dậy của các mạng băng thông rộng 4G-LTE như một giải pháp nền tảng, từ đó tạo tiền đề cho vai trò nâng cao của vô tuyến nhận thức.

### **12.1.1. Phân tích Thất bại Hệ thống của Vô tuyến Di động Mặt đất (LMR)**

Trong nhiều thập kỷ, các hệ thống Vô tuyến Di động Mặt đất (Land Mobile Radio - LMR) là công nghệ truyền thông thoại chủ chốt cho các cơ quan an toàn công cộng.<sup>1</sup>

Tuy nhiên, các sự kiện thảm họa quy mô lớn, đặc biệt là vụ tấn công khủng bố ngày 11 tháng 9 năm 2001<sup>3</sup>, đã bộc lộ những điểm yếu nghiêm trọng và mang tính hệ thống. Những thất bại này có thể được phân loại thành ba lĩnh vực chính: khả năng tương tác, dung lượng và khả năng phục hồi vật lý.

#### **1. Thất bại về Khả năng Tương tác (Interoperability Failure):**

Rào cản lớn nhất và được ghi nhận nhiều nhất của LMR là sự thất bại thảm hại về khả năng tương tác. Trong các cuộc khủng hoảng, các cơ quan khác nhau—cảnh sát, cứu hỏa và dịch vụ y tế khẩn cấp (EMS)—thường xuyên không thể liên lạc trực tiếp với nhau.<sup>5</sup> Nguyên nhân của sự thất bại này rất đa dạng và ăn sâu vào kiến trúc của LMR:

- **Hệ thống Độc quyền và Phân mảnh:** Các cơ quan an toàn công cộng thường mua sắm các hệ thống LMR một cách độc lập. Các nhà cung cấp đã cung cấp các hệ thống tùy chỉnh, được thiết kế riêng cho từng nhiệm vụ, thường dựa trên các tiêu chuẩn độc quyền của nhà cung cấp.<sup>5</sup> Kết quả là một môi trường phân mảnh, nơi hệ thống của một cơ quan không tương thích với hệ thống của cơ quan lân cận.
- **Phân mảnh Phổ tần:** Các hệ thống LMR hoạt động trên nhiều dải tần số khác nhau, bao gồm VHF (Very High Frequency), UHF (Ultra High Frequency), 700 MHz và 800 MHz.<sup>5</sup> Các thiết bị vô tuyến được thiết kế cho một dải tần không thể hoạt động trên dải tần khác, khiến việc liên lạc trực tiếp giữa các cơ quan sử dụng các dải tần khác nhau là không thể nếu không có các thiết bị bắc cầu (bridging devices) cồng kềnh.
- **Mã hóa không Tương thích:** Việc sử dụng các phương pháp mã hóa độc quyền, không theo tiêu chuẩn cũng là một rào cản đáng kể, ngăn chặn khả năng liên lạc ngay cả khi các hệ thống có thể tương thích về mặt vật lý.<sup>7</sup>

## 2. Thất bại về Dung lượng (Capacity Failure - Nghẽn Phổ tần):

Các kênh LMR là một tài nguyên băng thông hẹp và hữu hạn.

- **Nghẽn trong Vận hành Hàng ngày:** Ngay cả trong các hoạt động hàng ngày, nhiều khu vực đô thị lớn đã báo cáo tình trạng nghẽn đáng kể trong các băng tần LMR công cộng, với các giá trị Sử dụng Phổ tần (SUF) vượt quá 0.8, cho thấy phổ tần bị tắc nghẽn.<sup>1</sup>
- **Sụp đổ trong Thảm họa:** Trong các thảm họa quy mô lớn (ví dụ: bão, động đất), các hệ thống LMR ngay lập tức bị quá tải bởi số lượng lớn các lực lượng

phản ứng cố gắng truy cập đồng thời.<sup>9</sup> Chiến lược dự phòng dựa vào các mạng di động thương mại cũng là một thất bại, vì các mạng này cũng bị quá tải do dân chúng sử dụng, dẫn đến tắc nghẽn nghiêm trọng và mất khả năng liên lạc khi cần thiết nhất.<sup>5</sup>

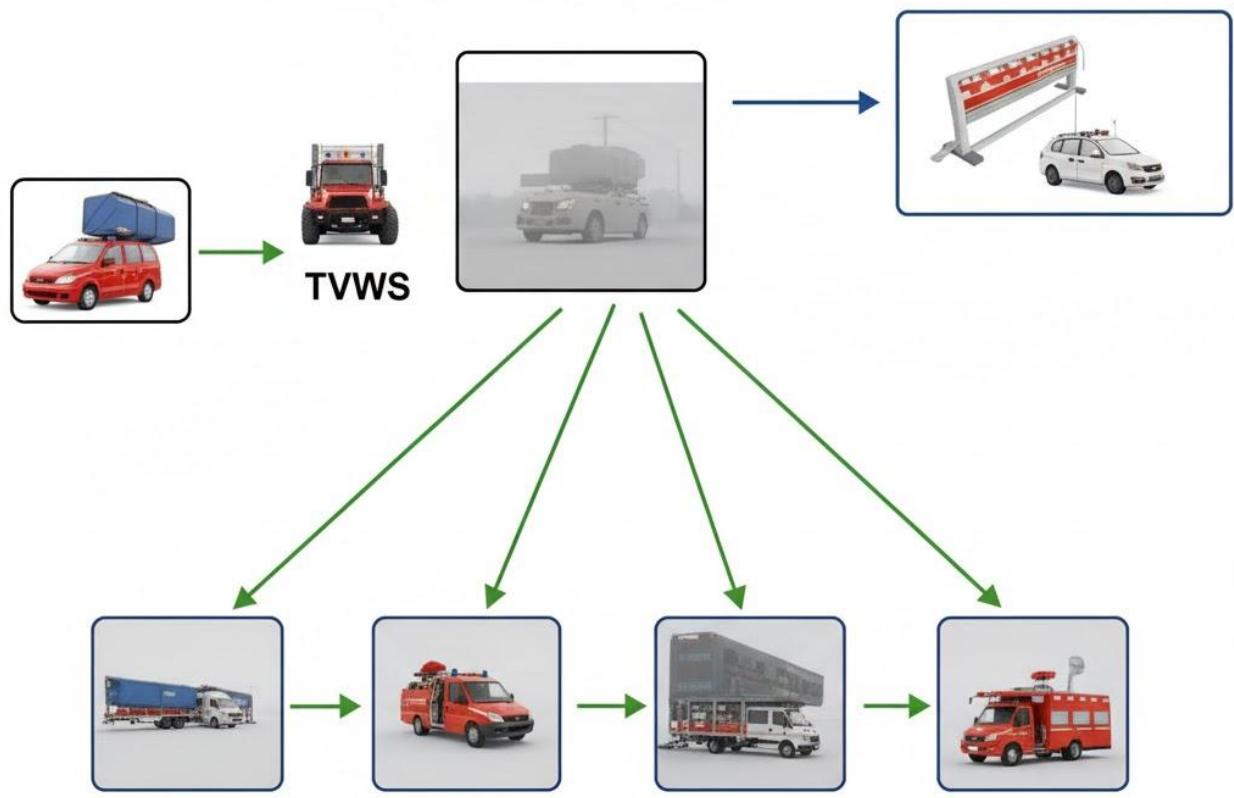
### 3. Thất bại về Vật lý và Chi phí:

Các hệ thống LMR dễ bị tổn thương về mặt vật lý và tổn kém về mặt tài chính. Cơ sở hạ tầng, bao gồm cả thiết bị backhaul, có thể bị hư hỏng vật lý, dẫn đến mất dịch vụ.<sup>11</sup> Vùng phủ sóng trong các tòa nhà thường kém do các vật liệu xây dựng hiện đại (như khói bê tông) làm suy giảm tín hiệu RF.<sup>12</sup> Hơn nữa, việc nâng cấp hoặc thay thế các hệ thống LMR phân mảnh này là cực kỳ tốn kém, phần lớn là do thiếu việc mua sắm chung và không tận dụng được lợi thế kinh tế về quy mô.<sup>13</sup>

Những thất bại của LMR không phải là ngẫu nhiên; chúng mang tính hệ thống, bắt nguồn từ một mô hình dựa trên sự phân mảnh phần cứng độc quyền và phân bổ phổたら tĩnh, băng thông hẹp. Sự thất bại này đã tạo ra yêu cầu cấp thiết về một mô hình mới.

#### **12.1.2. Giải pháp 4G-LTE: Mô hình Mạng Băng thông rộng An toàn Công cộng (PSBN)**

Để giải quyết các thất bại mang tính hệ thống của LMR, mô hình Mạng Băng thông rộng An toàn Công cộng (Public Safety Broadband Network - PSBN) dựa trên công nghệ 4G Long-Term Evolution (LTE) đã ra đời. Nỗ lực tiên phong và toàn diện nhất trong lĩnh vực này là FirstNet (Mạng lưới Phản ứng Đầu tiên) tại Hoa Kỳ. Mô hình PSBN 4G giải quyết các vấn đề cốt lõi của LMR một cách trực tiếp.



Hình 25: Giải pháp 4G-LTE cho PSBN

### 1. Giải quyết Khả năng Tương tác thông qua Tiêu chuẩn hóa:

Lợi ích quan trọng nhất của 4G-LTE là nó dựa trên một bộ tiêu chuẩn toàn cầu duy nhất: Dự án Đối tác Thế hệ thứ 3 (3GPP).<sup>15</sup> Sự thay đổi này đã chuyển khả năng tương tác từ một vấn đề phần cứng độc quyền, không thể giải quyết được sang một vấn đề dịch vụ dựa trên Giao thức Internet (IP) có thể quản lý được. Tổ chức 3GPP đã tiêu chuẩn hóa một bộ đầy đủ các dịch vụ trọng yếu (Mission Critical - MCX) chạy trên nền tảng LTE, đảm bảo khả năng tương tác ở cấp độ dịch vụ:

- **MCPTT (Mission Critical Push to Talk):** Cung cấp dịch vụ thoại PTT cấp nhà mạng, đáng tin cậy, thay thế chức năng cốt lõi của LMR.<sup>17</sup>

- **MCData (Mission Critical Data):** Cho phép truyền dữ liệu an toàn, bao gồm tin nhắn, hình ảnh và truy cập cơ sở dữ liệu.<sup>17</sup>
- **MCVideo (Mission Critical Video):** Cho phép truyền video theo thời gian thực từ hiện trường, mang lại nhận thức tình huống chưa từng có.<sup>17</sup>

Sự chuyển dịch từ LMR sang 4G-PSBN không chỉ là một nâng cấp công nghệ (từ băng hẹp analog/digital sang băng thông rộng) mà là một sự thay đổi mô hình triết học. Nó thay thế một mô hình thất bại về khả năng tương tác dựa trên phản ứng bằng một mô hình thành công về khả năng tương tác dựa trên dịch vụ IP.

## 2. Giải quyết Nghẽn và Băng thông:

Mô hình PSBN giải quyết tình trạng nghẽn của LMR thông qua hai cơ chế chính:

- **Phổ tần Chuyên dụng:** Phân bổ một khối phổ tần băng thông rộng chuyên dụng (ví dụ: Band 14 ở Hoa Kỳ) dành riêng cho các lực lượng phản ứng đầu tiên.<sup>20</sup> Điều này tạo ra một "đường cao tốc" riêng biệt, tách biệt khỏi lưu lượng thương mại tắc nghẽn.
- **Ưu tiên và Giành quyền (Priority and Preemption):** Cơ chế quan trọng nhất là ưu tiên *luôn bật* (always-on priority). Khi mạng bị nghẽn, người dùng an toàn công cộng được ưu tiên truy cập. Trong các tình huống cực đoan, họ có khả năng *giành quyền* (preemption), tức là tự động loại bỏ người dùng thương mại khỏi mạng để đảm bảo kết nối cho các hoạt động trọng yếu.<sup>14</sup> FirstNet đảm bảo không bao giờ *điều tiết* (throttling) tốc độ dữ liệu của người dùng an toàn công cộng.<sup>20</sup>

Hơn nữa, bản chất băng thông rộng của LTE cung cấp dung lượng dữ liệu cần thiết cho các ứng dụng hiện đại (truyền video, bản đồ GIS thời gian thực, phân tích) mà các hệ thống LMR băng hẹp không thể hỗ trợ.<sup>23</sup>

### 3. Giai đoạn Chuyển tiếp (Tích hợp LMR/LTE):

Quá trình chuyển đổi từ LMR sang LTE diễn ra trong nhiều năm. Trong giai đoạn này, các cổng (gateways) và Chức năng Tương tác (Interworking Functions - IWF) là rất quan trọng để kết nối các mạng LMR cũ với mạng 4G-PSBN mới.<sup>27</sup> Điều này cho phép các cơ quan nâng cấp theo tốc độ của riêng họ trong khi vẫn duy trì khả năng tương tác giữa các nhóm sử dụng cả hai công nghệ.<sup>2</sup>

## **12.2. Xác định Lỗ hổng Phục hồi: Giới hạn của Mạng 4G Chuyên dụng trong Các Kịch bản Thảm họa**

Mặc dù mô hình PSBN 4G-LTE giải quyết một cách xuất sắc các vấn đề cốt lõi về khả năng tương tác và nghẽn băng thông của LMR, nó lại tạo ra một tập hợp các điểm yếu mới, tinh vi hơn, đặc biệt là trong các kịch bản thảm họa quy mô lớn, cực đoan. Sự thật trớ trêu là mô hình PSBN giải quyết *khủng hoảng tương tác* của LMR nhưng lại tạo ra một *lỗ hổng phục hồi* (*resilience gap*) mới. Chúng ta đã thay thế một tập hợp các hệ thống phân tán, có thể hỏng hóc riêng lẻ (LMR) bằng một hệ thống thống nhất, phức tạp, có thể hỏng hóc hoàn toàn. Lỗ hổng này có hai mặt: phục hồi phô tần và phục hồi vật lý.

### 1. Lỗ hổng Phục hồi Phô tần (Spectrum Resilience Gap):

Giả định rằng một khối phô tần chuyên dụng là đủ đã bị thách thức.

- Một phân tích kỹ thuật quan trọng của Ủy ban Truyền thông Liên bang Hoa Kỳ (FCC)<sup>30</sup> đã kết luận rõ ràng rằng mặc dù 10 MHz của phô tần PSBN

chuyên dụng là đủ cho hoạt động hàng ngày và "các tình huống khẩn cấp nghiêm trọng", nhưng đối với "các trường hợp khẩn cấp tồi tệ nhất mà an toàn công cộng phải chuẩn bị", "ngay cả việc truy cập thêm 10 MHz phổ tàn nữa cũng không đủ".

- Các phân tích khác cũng xác nhận rằng ngay cả 20 MHz của Band 14 cũng sẽ "không đủ" để đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về dữ liệu băng thông rộng trong 20 năm tới.<sup>31</sup>
- Luận điểm cốt lõi, được nêu trong<sup>31</sup>, là do tính chất không thể đoán trước về thời gian, địa điểm và quy mô của các trường hợp khẩn cấp, "không có phổ tàn nào là đủ cả". Mô hình phổ tàn tĩnh, cố định, về cơ bản là không đủ linh hoạt để xử lý các sự kiện "thiên nga đen".

## 2. Lỗ hổng Phục hồi Vật lý (Physical Resilience Gap):

Lỗ hổng nghiêm trọng hơn là sự phụ thuộc của 4G-LTE vào cơ sở hạ tầng vật lý.

- Kiến trúc 4G-LTE vốn dĩ là tập trung. Để một thiết bị người dùng (UE) giao tiếp, nó phải kết nối với một trạm eNodeB (trạm phát sóng). Trạm eNodeB này phải được kết nối, thường là qua cáp quang hoặc vi sóng (backhaul), với Mạng lõi Gói Phát triển (EPC).<sup>32</sup>
- Trong một thảm họa vật lý quy mô lớn—chẳng hạn như động đất, bão Katrina, hoặc một cuộc tấn công khủng bố phối hợp—chuỗi cơ sở hạ tầng này sẽ bị phá hủy. Các trạm eNodeB bị mất điện, các đường cáp quang backhaul bị cắt đứt, và các trung tâm EPC bị ngập lụt.
- Trong kịch bản này, mạng 4G-PSBN chuyên dụng, tiên tiến, trị giá hàng tỷ đô la sẽ "biến mất" hoàn toàn, khiến các lực lượng phản ứng đầu tiên tại hiện

trường không có bất kỳ khả năng liên lạc nào, bất kể họ có bao nhiêu phô tần hay mức độ ưu tiên.

Do đó, các mạng 4G-PSBN chuyên dụng giải quyết thành công các vấn đề *tương tác* của LMR nhưng lại tạo ra một *lỗ hổng phục hồi* hai mặt. Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) và Truy cập Phô tần Động (Dynamic Spectrum Access - DSA) được định vị là mô hình công nghệ duy nhất có khả năng giải quyết đồng thời cả hai khía cạnh của lỗ hổng phục hồi mới này.

**Bảng 12.1: Phân tích So sánh các Mô hình Truyền thông An toàn Công cộng**

Tính năng	Vô tuyến Di động Mặt đất (LMR)	4G-PSBN (ví dụ: FirstNet)	4G-PSBN + Vô tuyến Nhận thức (CR)
<b>Dịch vụ Chính</b>	Chỉ thoại (Narrowband) [2]	Thoại (MCPTT), Dữ liệu & Video (MCData/Video) [17, 25]	Thoại, Dữ liệu & Video (nâng cao)
<b>Khả năng Tương tác</b>	Rất thấp (Hệ thống độc quyền, phân mảnh tần số) <sup>5</sup>	Cao (Dựa trên tiêu chuẩn 3GPP, IP-based) [15, 17]	Rất cao (Cầu nối giao thức/tần số thích ứng động) 33

<b>Mô hình Phổ biến</b>	Tĩnh, Cấp phép, Phân mảnh	Tĩnh, Cấp phép, Chuyên dụng (ví dụ: Band 14) <sup>20</sup>	Động, Đa băng tầng (Chuyên dụng + Chia sẻ + Cơ hội) <sup>31</sup>
<b>Khả năng Phục hồi (Lỗi Cơ sở hạ tầng)</b>	Trung bình-Thấp (Phụ thuộc vào tháp/backhaul) <sup>11</sup>	Thấp (Phụ thuộc vào eNodeB/EPC/Backhaul) <sup>32</sup>	Cao (Mạng Ad-Hoc/D2D không cần cơ sở hạ tầng) [31, 34]
<b>Khả năng Phục hồi (Nghẽn Phổ biến)</b>	Rất thấp (Sụp đổ trong thảm họa) <sup>9</sup>	Trung bình (Được bảo vệ nhưng có thể bị quá tải) <sup>30</sup>	Cao (Tăng cường dung lượng động qua DSA) <sup>35</sup>
<b>Véc-tơ Đề dọa Chính</b>	Nghẽn & Thiếu tương tác	Phá hủy vật lý cơ sở hạ tầng	Độ trễ Chuyển giao QoS & Tần công PUEA [37, 38]

### 12.3. Vô tuyến Nhận thức: Tăng cường Khả năng Phục hồi và Dung lượng Mạng

Vô tuyến Nhận thức không phải là một sự thay thế cho 4G-PSBN; nó là một lớp phủ thông minh (intelligent overlay) cung cấp khả năng thích ứng và phục hồi cần thiết

để giải quyết "lỗ hổng phục hồi" đã được xác định. CR cung cấp trí thông minh—khả năng quan sát, học hỏi và thích ứng với môi trường RF<sup>39</sup>—để thực hiện các trường hợp sử dụng trọng yếu sau đây.

### 12.3.1. Trường hợp Sử dụng CR 1: Truy cập Phổ tần Động (DSA) để Tăng cường Dung lượng Khẩn cấp

**Kịch bản Vấn đề:** Một sự kiện thảm họa quy mô lớn (ví dụ: một cuộc tấn công phối hợp vào nhiều địa điểm trong thành phố) gây ra tình trạng quá tải nghiêm trọng, bão hòa ngay cả băng tần Band 14 chuyên dụng. Điều này phù hợp với dự đoán của FCC rằng phổ tần chuyên dụng sẽ không đủ trong các kịch bản tồi tệ nhất.<sup>30</sup>

**Giải pháp Vô tuyến Nhận thức:** Thay vì thất bại, các thiết bị PSBN có khả năng nhận thức (hoạt động như Người dùng Thứ cấp Ưu tiên - Priority Secondary Users) sẽ kích hoạt các giao thức Truy cập Phổ tần Động (DSA).

1. **Dò tìm:** Các thiết bị CR liên tục thực hiện *dò phổ* (spectrum sensing)<sup>40</sup> trên một loạt các băng tần.
2. **Xác định:** Chúng xác định các "lỗ hổng phổ tần" (spectrum holes)—các kênh được cấp phép nhưng không được sử dụng tại thời điểm và địa điểm cụ thể đó.<sup>40</sup> Các mục tiêu chính là các băng tần LTE thương mại, Không gian Trắng Truyền hình (TVWS), hoặc các băng tần chia sẻ như CBRS.
3. **Truy cập:** Mạng PSBN giảm tải lưu lượng một cách thông minh và tự động. Các thiết bị PSBN có thể "tràn" (overflow) sang các mạng thương mại. Các nghiên cứu đã chứng minh rằng công nghệ LTE cho phép người dùng an toàn công cộng có quyền truy cập ưu tiên vào các mạng thương mại dùng chung, tự động ngăn chặn người dùng thương mại chặn người dùng an toàn công

cộng.<sup>35</sup> Các mô hình kỹ thuật tồn tại cho phép một eNodeB duy nhất phân bổ tài nguyên động cho cả hai nhóm người dùng (công cộng và thương mại) trong khi vẫn duy trì sự ưu tiên nghiêm ngặt cho lưu lượng an toàn công cộng.<sup>36</sup>

Trong kịch bản này, CR cung cấp trí thông minh để làm cho quá trình "tràn" này trở nên tự động, nhanh chóng và dựa trên các điều kiện RF thời gian thực, thay vì dựa vào các thỏa thuận chuyển vùng tĩnh hoặc chuyển đổi thủ công.

### **12.3.2. Trường hợp Sử dụng CR 2: Mạng Ad-Hoc Không cần Cơ sở hạ tầng để Đảm bảo Tính liên tục**

**Kịch bản Vấn đề:** Một trận động đất phá hủy vật lý các trạm eNodeB và cắt đứt các đường cáp quang backhaul.<sup>32</sup> Mạng 4G-PSBN tập trung, chuyên dụng đã "biến mất" hoàn toàn. Các lực lượng phản ứng tại hiện trường bị cô lập.

**Giải pháp Vô tuyến Nhận thức:** Các thiết bị đầu cuối của lực lượng phản ứng, được trang bị khả năng CR, tự động phát hiện sự mất mát của mạng cơ sở hạ tầng và chuyển sang chế độ hoạt động ad-hoc, không cần cơ sở hạ tầng.

- 1. Hình thành Mạng:** Các thiết bị tự động hình thành một mạng lưới (mesh network) đa bước, tự tổ chức.<sup>31</sup> Thiết bị này cho phép các lực lượng phản ứng giao tiếp trực tiếp với nhau trong một "bong bóng" cục bộ.<sup>31</sup>
- 2. Liên kết với 4G (D2D/ProSe):** Khái niệm này không chỉ là lý thuyết của CR. Nó được hỗ trợ trực tiếp bởi các tiêu chuẩn 3GPP cho Dịch vụ Dựa trên Vùng lân cận (Proximity-based Services - ProSe), còn được gọi là Giao tiếp Trực tiếp Thiết bị-đến-Thiết bị (Device-to-Device - D2D).<sup>17</sup> ProSe được thiết kế

đặc biệt cho an toàn công cộng để cho phép giao tiếp trực tiếp khi không có vùng phủ sóng của mạng.

**3. Vai trò của CR:** Đây là một sự phân biệt quan trọng. 3GPP ProSe cung cấp *giao thức* cho giao tiếp D2D. Vô tuyến Nhận thức cung cấp *trí thông minh quản lý tài nguyên*. Như đã nêu trong<sup>34</sup>, một khuôn khổ D2D phi tập trung (cần thiết khi cơ sở hạ tầng lỗi) sẽ "cần hoạt động trên một mô hình DSA cơ hội". CR thực hiện dò phỏng để tìm kênh tốt nhất, ít nhiễu nhất cho "bong bóng" mạng D2D/ProSe cục bộ đó hoạt động, đảm bảo rằng ngay cả mạng ad-hoc cũng không gây nhiễu hoặc bị nhiễu.

Điều này cho phép các đội cứu hỏa phối hợp bên trong một tòa nhà đã sụp đổ hoặc các đội tìm kiếm và cứu nạn giao tiếp trong một hẻm núi xa xôi, nơi không có cơ sở hạ tầng mạng nào tồn tại.<sup>44</sup>

### 12.3.3. Trường hợp Sử dụng CR 3: Khả năng Tương tác Thích ứng Động

**Kịch bản Vấn đề:** Một sự cố phức tạp đòi hỏi phản ứng từ nhiều cơ quan, bao gồm Vệ binh Quốc gia (hoạt động trên băng tần quân sự X), đội cứu hỏa địa phương (sử dụng hệ thống LMR 800MHz cũ) và đội EMS (sử dụng 4G-PSBN Band 14). Không có cổng (gateway) tĩnh nào được cấu hình sẵn cho sự kết hợp cụ thể này.<sup>27</sup>

**Giải pháp Vô tuyến Nhận thức/SDR:** Một thiết bị chỉ huy di động được trang bị Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (SDR) và Vô tuyến Nhận thức (CR) hoạt động như một "cầu nối tương tác động".<sup>33</sup>

- 1. Tính linh hoạt của SDR:** Nền tảng SDR, yếu tố hỗ trợ vật lý cho CR, có thể được cấu hình lại trong thời gian thực để hoạt động trên bất kỳ tần số và dạng sóng nào.<sup>44</sup>
- 2. Vai trò của CR:** CR tự động hóa quy trình này. Nó sẽ *dò tìm* và xác định các truyền dẫn khác nhau trên các băng tần<sup>33</sup>, *điều chỉnh* đồng thời đến nhiều băng tần<sup>33</sup>, và *dịch thuật* các giao thức và dạng sóng giữa các mạng không tương thích.

Các trường hợp sử dụng này chứng minh rằng CR không thay thế 4G-PSBN. Thay vào đó, nó hoạt động như một lớp thông minh để tăng cường khả năng phục hồi của 4G. DSA (Trường hợp 1) là động cơ thông minh cho tính năng "chuyển vùng ưu tiên" mà FCC yêu cầu.<sup>30</sup> Mạng Ad-hoc (Trường hợp 2) là bộ quản lý tài nguyên thông minh cho tính năng D2D/ProSe của 3GPP khi hoạt động ngoài mạng.<sup>34</sup>

## **12.4. Phân tích Kỹ thuật: Đảm bảo QoS Trọng yếu trong Môi trường Phổ tần Động**

Việc giới thiệu DSA cho các ứng dụng trọng yếu tạo ra một thách thức kỹ thuật cơ bản: làm thế nào để dung hòa nhu cầu về Chất lượng Dịch vụ (QoS) nghiêm ngặt, có thể dự đoán được của an toàn công cộng với tính chất cơ hội, không thể đoán trước của phổ tần động.

### **12.4.1. Xung đột Trung tâm: QoS Tĩnh của 4G và Tính di động Động của CR**

1. Yêu cầu QoS của An toàn Công cộng:

Truyền thông trọng yếu (Mission-critical) có các yêu cầu QoS nghiêm ngặt nhất.<sup>44</sup> Các dịch vụ như thoại MCPTT và video thời gian thực yêu cầu độ trễ cực thấp (ultra-low latency), jitter thấp và độ tin cậy cao (high reliability).<sup>46</sup>

## 2. Cơ chế QoS Tĩnh của 4G-LTE:

LTE quản lý các yêu cầu này thông qua một kiến trúc QoS phức tạp dựa trên các Be-rơ (Bearers) và Bộ nhận dạng Lớp QoS (QCI - QoS Class Identifier). Mỗi QCI xác định một tập hợp các đặc điểm hiệu suất 49:

- **QCI 1 (ví dụ: Thoại MCPTT):** Được gán cho lớp Chuyển tiếp Nhanh (Expedited Forwarding - EF). Lớp này được thiết kế cho lưu lượng có độ trễ, mất mát và jitter thấp, về cơ bản là đảm bảo một đường truyền ưu tiên, gần như thời gian thực.
- **QCI 2, 3 (ví dụ: Video MCVideo):** Được gán cho các lớp Chuyển tiếp Đảm bảo (Assured Forwarding - AF). Các lớp này đảm bảo một tốc độ bit tối thiểu nhưng có thể chấp nhận độ trễ và jitter cao hơn một chút.

## 3. Thách thức của CR (Chuyển giao Phổ tần):

Vấn đề cốt lõi của CR là "Di động Phổ tần" (Spectrum Mobility).<sup>40</sup> Khi một Người dùng Chính (PU - Primary User), người sở hữu bản quyền của băng tần, xuất hiện, người dùng CR (SU - Secondary User) bắt buộc phải ngừng truyền và bỏ trống kênh ngay lập tức.<sup>50</sup> Quá trình này được gọi là "Chuyển giao Phổ tần" (Spectrum Handoff).<sup>37</sup> Quá trình chuyển giao này—bao gồm việc phát hiện PU, tạm dừng truyền, dò tìm kênh trống mới, và thiết lập lại liên kết—gây ra độ trễ và mất gói tin không thể tránh khỏi.<sup>37</sup>

**Xung đột:** Sự gián đoạn dịch vụ này, ngay cả khi chỉ kéo dài vài trăm mili giây, cũng vi phạm trực tiếp các đảm bảo của lớp EF (QCI 1). Đối với một lực lượng phản

ứng đầu tiên, độ trễ này có thể đồng nghĩa với việc mất một cuộc gọi thoại MCPTT quan trọng giữa chừng.

### **12.4.2. Các chiến lược Giảm thiểu: Khung nhận biết QoS (QoS-aware Frameworks)**

Để CR khả thi cho PSC, mạng phải trở nên *nhận biết QoS* (QoS-aware).<sup>54</sup> Điều này có nghĩa là trình quản lý tài nguyên CR phải hiểu các yêu cầu QoS của các luồng dữ liệu khác nhau và quản lý phô tần một cách tương ứng. "Khả năng nhận biết QoS" trong mạng CR-PSC không chỉ là một thuật toán định tuyến; nó phải là một *trình quản lý di động phân biệt* (*differentiated mobility manager*).

Chiến lược 1: Phân biệt Lưu lượng (Traffic Differentiation):

Giải pháp hợp lý nhất là không đối xử bình đẳng với tất cả lưu lượng.<sup>55</sup> Trình quản lý CR phải phân loại lưu lượng dựa trên QCI của nó 49:

- **Lưu lượng Uy tiên Cao (QCI 1 - Thoại):** Lưu lượng này phải được gán cho các tài nguyên phô tần ổn định nhất và có thể dự đoán được. Lý tưởng nhất, nó sẽ luôn nằm trên băng tần Band 14 chuyên dụng. Chỉ khi băng tần đó bị lỗi hoàn toàn, nó mới được chuyển sang một kênh dự phòng chất lượng cao, đã được xác minh trước trong một băng tần chia sẻ (như LSA).
- **Lưu lượng Uy tiên Thấp (QCI 6-9 - Dữ liệu nền):** Lưu lượng không nhạy cảm với thời gian (ví dụ: tải xuống bản đồ, cập nhật tệp, email) có thể được gán cho các tài nguyên cơ hội, biến động hơn (ví dụ: TVWS, băng tần thương mại). Một sự gián đoạn do chuyển giao phô tần<sup>53</sup> đối với một tệp đang tải xuống là chấp nhận được và không ảnh hưởng đến nhiệm vụ.

Chiến lược 2: Chuyển giao Phô tần Chủ động (Proactive Handoff):

Chờ đợi PU xuất hiện và sau đó phản ứng (reactive handoff) là quá chậm và gây gián đoạn cho lưu lượng QoS cao.<sup>37</sup> Một chiến lược vượt trội là chuyển giao chủ động (proactive handoff).<sup>37</sup>

Trong mô hình này, mạng CR liên tục dò tìm và duy trì một "danh sách nóng" các kênh dự phòng sạch, đã được xác minh.<sup>59</sup> Nó cũng có thể sử dụng các mô hình dự đoán để ước tính khi nào PU có khả năng quay lại. Trước khi kênh hiện tại bị gián đoạn, CR thực hiện một quá trình chuyển giao có kiểm soát sang một kênh dự phòng đã biết. Bằng cách này, quá trình chuyển giao có thể được thực hiện với độ trễ và mất gói tin gần như bằng không, duy trì tính toàn vẹn của phiên QCI 1. Chiến lược chủ động này không chỉ là một tối ưu hóa; nó là một yêu cầu kiến trúc bắt buộc để hỗ trợ lưu lượng thời gian thực trong môi trường CR.

**Chiến lược 3: Dò Phổ Hợp tác (Cooperative Spectrum Sensing - CSS):**

Độ chính xác của việc dò tìm là rất quan trọng; một quyết định sai (bỏ trống kênh một cách không cần thiết hoặc không phát hiện được PU) sẽ phá vỡ QoS. Do các vấn đề như fading và che khuất (shadowing), một thiết bị CR duy nhất có thể có một cái nhìn không chính xác về phổ tần. CSS cho phép nhiều thiết bị CR trong một khu vực chia sẻ dữ liệu dò tìm của chúng.<sup>52</sup> Dữ liệu tổng hợp này cung cấp một bức tranh chính xác và đáng tin cậy hơn nhiều về môi trường RF, dẫn đến các quyết định chuyển giao tốt hơn.

## **12.5. Các Thách thức về Triển khai: An ninh, Quy định và R&D**

Việc triển khai các mạng CR-PSC trong thế giới thực phải đối mặt với các rào cản đáng kể ngoài thách thức QoS, chủ yếu trong các lĩnh vực an ninh và chính sách quản lý.

## 12.5.1. Thách thức An ninh: Tấn công Giả mạo Người dùng Chính (PUEA)

Điểm yếu lớn nhất của hệ thống CR chỉ dựa trên dò tìm là nó được thiết kế để *tin tưởng* vào môi trường RF của nó. Một kẻ tấn công có thể khai thác sự tin tưởng này để gây ra một cuộc tấn công từ chối dịch vụ (DoS) thảm khốc.

- **Véc-tơ Tấn công:** Cuộc tấn công này được gọi là Tấn công Giả mạo Người dùng Chính (Primary User Emulation Attack - PUEA).<sup>38</sup> Kẻ tấn công phát một tín hiệu vô tuyến được thiết kế để *trông giống* như tín hiệu của Người dùng Chính (ví dụ: một tín hiệu truyền hình kỹ thuật số giả mạo hoặc đơn giản là một tín hiệu nhiễu năng lượng cao).<sup>66</sup>
- **Hậu quả:** Các thiết bị CR của an toàn công cộng, khi phát hiện tín hiệu giả mạo này, sẽ tuân thủ các quy tắc DSA của chúng và tin rằng kênh đó đang bị chiếm dụng. Chúng sẽ ngay lập tức bỏ trống kênh đó. Bằng cách phát tín hiệu PUEA trên nhiều kênh khả dụng, một kẻ tấn công duy nhất có thể ngăn chặn hiệu quả các lực lượng phản ứng đầu tiên truy cập vào *tất cả* phổ tần cơ hội, vô hiệu hóa hoàn toàn lợi ích tăng cường dung lượng của CR.<sup>38</sup>
- **Biện pháp đối phó:** Các biện pháp đối phó tiên tiến là bắt buộc. Chúng bao gồm các kỹ thuật dựa trên vị trí, chẳng hạn như sử dụng Thời gian đến khác nhau (TDOA) để xác minh rằng tín hiệu đang thực sự đến từ vị trí địa lý đã biết của máy phát PU thực sự (và không phải từ một kẻ tấn công gần đó)<sup>65</sup>, hoặc các kỹ thuật "vân tay" (fingerprinting) tín hiệu tiên tiến để phân biệt các đặc điểm vật lý tinh vi của máy phát PU hợp pháp so với máy phát của kẻ giả mạo.<sup>66</sup>

## **12.5.2. Khung pháp lý Hỗ trợ: Từ "Hỗn loạn" đến Phối hợp**

Mỗi đe dọa PUEA và các vấn đề về QoS làm cho mô hình DSA "hỗn loạn" (chỉ dựa trên dò tìm) trở nên quá rủi ro cho các ứng dụng trọng yếu.<sup>67</sup> Do đó, các cơ quan quản lý toàn cầu đã phát triển các khung DSA *được phối hợp* (coordinated), dựa trên cơ sở dữ liệu. Các khung này là một biện pháp giảm thiểu rủi ro an ninh và QoS thiết yếu.

- **Khung 1: Licensed Shared Access (LSA):**  
Phổ biến ở châu Âu, LSA là một mô hình chia sẻ "hai tầng".<sup>68</sup> Một người dùng đương nhiệm (ví dụ: quân đội) đồng ý chia sẻ phổ tần của mình với một (hoặc một số ít) người được cấp phép LSA (ví dụ: nhà điều hành PSBN). Thay vì dò tìm, người dùng LSA dựa vào một Cơ sở dữ liệu/Bộ điều khiển LSA (LSA Controller) trung tâm.<sup>70</sup> Cơ sở dữ liệu này thông báo cho người dùng LSA chính xác kênh nào khả dụng và trong bao lâu. Lợi ích cho PSC là rất lớn: nó cung cấp khả năng truy cập phổ tần có thể dự đoán được và đảm bảo QoS, loại bỏ sự không chắc chắn của việc dò tìm và giảm thiểu mối đe dọa PUEA.<sup>68</sup>
- **Khung 2: Citizens Broadband Radio Service (CBRS):**  
Một mô hình "ba tầng" của Hoa Kỳ cho băng tần 3.5GHz.<sup>69</sup> Các tầng bao gồm: (1) Người dùng Đương nhiệm (ví dụ: radar Hải quân), (2) Truy cập Uu tiên (PAL - Priority Access Licenses), và (3) Truy cập Chung (GAA - General Authorized Access). Toàn bộ hệ thống được quản lý bởi một Hệ thống Truy cập Phổ tần (SAS - Spectrum Access System) tự động, đóng vai trò là bộ điều phối trung tâm. Khung này cung cấp một mô hình mạnh mẽ để an toàn công cộng có được quyền truy cập PAL hoặc GAA ưu tiên cao vào phổ tần băng thông rộng có giá trị.

Các khung pháp lý dựa trên cơ sở dữ liệu này giải quyết các lỗ hổng của CR "thuần túy". Bằng cách chuyển "nguồn chân lý" (source of truth) từ môi trường RF cục bộ, dễ bị giả mạo sang một cơ sở dữ liệu trung tâm, được xác thực (SAS/LSA Controller), các khung này cung cấp khả năng dự đoán và bảo mật cần thiết để DSA khả thi cho an toàn công cộng.

### **12.5.3. Các nỗ lực Nghiên cứu & Phát triển (R&D) và Nền tảng Thủ nghiệm**

Việc hiện thực hóa các khái niệm này đòi hỏi nghiên cứu và phát triển liên tục, phần lớn trong số đó đang được thực hiện trên các nền tảng SDR linh hoạt.<sup>44</sup>

- **Các Dự án của Hoa Kỳ:** Cơ quan Chỉ đạo các Dự án Nghiên cứu Quốc phòng Tiên tiến (DARPA) đã tài trợ cho nghiên cứu cơ bản về DSA, đặt nền móng cho phần lớn lĩnh vực này.<sup>32</sup> Hiện tại, chương trình Nghiên cứu Truyền thông An toàn Công cộng (PSCR) của Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia (NIST) đang dẫn đầu, phát triển các mô hình mô phỏng<sup>73</sup> và tài trợ cho một loạt các dự án R&D (PSIAP)<sup>75</sup> để thúc đẩy các công nghệ này, bao gồm cả việc tích hợp LMR/LTE tiên tiến.<sup>77</sup>
- **Các Dự án của EU (FP7):** Các dự án như *CREW (Cognitive Radio Experimentation World)* đã tạo ra các nền tảng thử nghiệm liên kết mở để nghiên cứu thực nghiệm về dò tìm và mạng CR.<sup>44</sup> Dự án *EULER* tập trung cụ thể vào việc sử dụng SDR để cải thiện khả năng tương tác cho các lực lượng dân sự trong các tình huống khẩn hoảng.<sup>44</sup>

- **Nghiên cứu Học thuật:** Nhiều nỗ lực học thuật tập trung vào các thành phần cụ thể, chẳng hạn như các thuật toán để dò tìm tín hiệu LTE<sup>78</sup>, các mô hình cho giao tiếp D2D<sup>34</sup>, và việc sử dụng các phương tiện bay không người lái (UAV) làm các trạm cơ sở CR tạm thời, có thể triển khai nhanh chóng trong các khu vực thảm họa.<sup>79</sup>

## **12.6. Tổng kết Chương: Vai trò của Vô tuyến Nhận thức là Lớp Phục hồi Thông minh**

Chương này đã thực hiện một phân tích toàn diện về vai trò của vô tuyến nhận thức trong bối cảnh truyền thông an toàn công cộng và khẩn cấp.

Phân tích bắt đầu bằng cách xác định các thất bại mang tính hệ thống của các hệ thống LMR cũ, chủ yếu là sự thiếu hụt khả năng tương tác và tình trạng nghẽn phổi tần thảy khốc trong các cuộc khủng hoảng.<sup>5</sup> Sau đó, nó đã phân tích cách mô hình 4G-PSBN hiện đại (ví dụ: FirstNet) giải quyết thành công những vấn đề này thông qua tiêu chuẩn hóa toàn cầu (3GPP MCX) và phân bổ phổi tần băng thông rộng chuyên dụng (Band 14).<sup>17</sup>

Tuy nhiên, luận điểm trung tâm của chương này là mô hình 4G-PSBN, mặc dù vượt trội, nhưng vẫn có một "lỗ hổng phục hồi" cố hữu. Lỗ hổng này có hai mặt: (1) **Lỗ hổng Phục hồi Phổ tần**, nơi phổi tần chuyên dụng tĩnh được đảm bảo sẽ bị quá tải trong các sự kiện thảm họa cực đoan nhất<sup>30</sup>, và (2) **Lỗ hổng Phục hồi Vật lý**, nơi sự phụ thuộc của 4G-LTE vào cơ sở hạ tầng mạng cố định tạo ra một điểm lỗi trung tâm (single point of failure) khi cơ sở hạ tầng đó bị phá hủy.<sup>32</sup>

Vô tuyến Nhận thức được định vị không phải là một sự thay thế, mà là một *lớp phục hồi thông minh* (intelligent resilience layer) thiết yếu được thiết kế đặc biệt để giải quyết lỗ hổng kép này. Nó thực hiện điều này thông qua hai cơ chế chính:

1. **Tăng cường Dung lượng:** Sử dụng Truy cập Phổ tần Động (DSA) để tự động "tràn" lưu lượng, cho phép truy cập ưu tiên vào các băng tần thương mại và chia sẻ khi băng tần chuyên dụng bị nghẽn.<sup>35</sup>
2. **Đảm bảo Tính liên tục:** Kích hoạt các mạng ad-hoc, tự tổ chức (dựa trên các tiêu chuẩn 3GPP D2D/ProSe) khi cơ sở hạ tầng vật lý bị lỗi, sử dụng trí thông minh CR để quản lý phổ tần cho "bong bóng" mạng cục bộ.<sup>34</sup>

Việc hiện thực hóa tầm nhìn này không phải là không có thách thức. Nó đòi hỏi phải vượt qua các rào cản kỹ thuật đáng kể, chủ yếu là xung đột giữa các yêu cầu QoS nghiêm ngặt (QCI 1) của PSC và độ trễ do chuyển giao vốn có của CR.<sup>37</sup> Giải pháp nằm ở các *khung nhận biết QoS* (QoS-aware frameworks) tinh vi, phân biệt lưu lượng và sử dụng các chiến lược chuyển giao chủ động.<sup>59</sup> Hơn nữa, nó đòi hỏi phải giải quyết các lỗ hổng an ninh nghiêm trọng như PUEA<sup>38</sup> thông qua sự kết hợp giữa công nghệ dò tìm tiên tiến và các khung pháp lý được phối hợp, dựa trên cơ sở dữ liệu như LSA và CBRS.

## **Chương 13: Trường hợp Sử dụng: An toàn Công cộng và Truyền thông Khẩn cấp**

### **13.1 Giới thiệu: Hai Triết lý về Kết nối Không dây**

Sự phát triển của truyền thông không dây đã được định hình bởi hai trụ cột tiêu chuẩn hóa chính: Viện Kỹ sư Điện và Điện tử (IEEE) và Dự án Hợp tác Thế hệ thứ 3 (3GPP). Khi nhu cầu về các hệ thống vô tuyến thông minh hơn, hay "nhận thức" (cognitive) hơn, xuất hiện để giải quyết các thách thức của mạng 4G, sự khác biệt cơ bản trong triết lý, mô hình kinh doanh và lịch sử thị trường của hai tổ chức này đã dẫn đến hai con đường rất khác biệt. Sự phân đôi này không chỉ là một chi tiết kỹ thuật; nó là trung tâm để hiểu tại sao Sóng Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) được diễn giải và triển khai theo những cách khác nhau trong các hệ sinh thái 4G.

Triết lý của IEEE, đặc biệt là trong ủy ban Tiêu chuẩn IEEE 802 LAN/MAN, có nguồn gốc từ cách tiếp cận "từ dưới lên" (bottom-up), được thúc đẩy bởi các học giả và nhà sản xuất thiết bị. Mục tiêu chính, được minh họa rõ nhất bởi sự thành công toàn cầu của IEEE 802.11 (Wi-Fi), là *khả năng tương tác* (interoperability).<sup>1</sup> IEEE nỗ lực tạo ra các tiêu chuẩn cho phép một thị trường *ngang* (horizontal) sôi động, nơi "hàng tỷ thiết bị từ hàng nghìn nhà sản xuất" có thể giao tiếp một cách đáng tin cậy.<sup>2</sup> Các tiêu chuẩn này thường tập trung vào các miền không cần cấp phép (ví dụ: băng tần ISM hoặc U-NII), nơi không ai sở hữu phổ tần.

Ngược lại, 3GPP có nguồn gốc từ cách tiếp cận "từ trên xuống" (top-down), là một "mối quan tâm của ngành" (industry concern) hoặc một liên minh của các tổ chức phát triển tiêu chuẩn khu vực, được thúc đẩy chủ yếu bởi các nhà khai thác mạng di động (MNOs) và các nhà cung cấp cơ sở hạ tầng viễn thông lớn.<sup>2</sup> Mục tiêu của 3GPP là tạo ra một hệ sinh thái *dọc* (vertical), toàn diện, toàn cầu cho các dịch vụ di động trong *phổ tần được cấp phép*.<sup>4</sup> Trong lịch sử, 3GPP đã tạo ra các tiêu chuẩn cho các

hệ thống khép kín, do nhà mạng kiểm soát, nơi hiệu suất và khả năng quản lý đầu-cuối là tối quan trọng.<sup>2</sup>

Những khác biệt triết lý này đã định hình trực tiếp cách mỗi tổ chức tiếp cận các khái niệm "nhận thức":

- **Đối với IEEE (Hoạt động trong Băng tần Chung/Không phép):** "Nhận thức" đồng nghĩa với *truy cập cơ hội* (opportunistic access) và *cùng tồn tại một cách lịch sự* (polite coexistence). Trong một băng tần chung, trí thông minh là cần thiết để tìm các "lỗ hổng" hoặc "không gian trắng" (white space) và sử dụng chúng mà không gây hại cho các bên đương nhiệm hoặc các hệ thống ngang hàng khác. Các cơ chế như CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) trong Wi-Fi là một dạng nhận thức phân tán đơn giản, cần thiết để quản lý một hệ sinh thái không được điều phối.
- **Đối với 3GPP (Hoạt động trong Băng tần Được cấp phép):** "Nhận thức" đồng nghĩa với *tối ưu hóa* (optimization) và *kiểm soát* (control). Vì MNO sở hữu độc quyền phổ tần của mình, nên không cần "truy cập cơ hội". Thay vào đó, trí thông minh được áp dụng để tối đa hóa hiệu suất và lợi tức đầu tư (ROI) của tài sản đất đai. Hơn nữa, nó được sử dụng để giảm Chi phí Vận hành (OPEX) bằng cách tự động hóa các nhiệm vụ quản lý mạng ngày càng phức tạp.<sup>5</sup>

Bảng 13.1 dưới đây tóm tắt sự phân đôi cơ bản này, tạo nền tảng cho các phân tích kỹ thuật chi tiết trong các phần sau. Sự khác biệt về động lực kinh tế—IEEE tạo điều kiện cho một *thị trường sản phẩm* (ví dụ: bán router Wi-Fi), trong khi 3GPP tạo điều kiện cho một *thị trường dịch vụ* (ví dụ: bán gói cước 4G)—là nguyên nhân gốc rễ của sự phân kỳ kỹ thuật trong việc theo đuổi các mạng thông minh hơn.

**Bảng 13.1: So sánh Triết lý Tiêu chuẩn hóa (IEEE so với 3GPP)**

Đặc điểm	IEEE (ví dụ: 802.11)	3GPP (ví dụ: LTE)
<b>Mô hình Tổ chức</b>	Từ dưới lên, dựa trên sự đồng thuận của các kỹ sư/học giả <sup>2</sup>	Từ trên xuống, do nhà khai thác/nhà cung cấp điều hành, "liên minh" SDO <sup>2</sup>
<b>Động lực Thị trường Chính</b>	Thị trường thiết bị ngang, khả năng tương tác đa nhà cung cấp <sup>1</sup>	Thị trường dịch vụ dọc, hiệu suất mạng đầu-cuối <sup>4</sup>
<b>Miền Phổ biến Lịch sử</b>	Không phép (ISM, U-NII)	Được cấp phép
<b>Triết lý Tiếp cận Kỹ thuật</b>	"Cùng tồn tại lịch sự", dựa trên tranh chấp (Contention-based)	"Kiểm soát tập trung", dựa trên lịch trình (Schedule-based)
<b>Mục tiêu Trí thông minh/Nhận thức</b>	Truy cập cơ hội và Cùng tồn tại công bằng	Tối ưu hóa hệ thống và Giảm OPEX

<b>Ví dụ Tiêu biểu (Trước CR)</b>	802.11 (Wi-Fi), 802.3 (Ethernet)	GSM, UMTS, LTE
---------------------------------------	----------------------------------	----------------

## 13.2 Cách tiếp cận Tiêu chuẩn hóa Trực tiếp của IEEE đối với Sóng Vô tuyến Nhận thức

Phản ứng của IEEE đối với sự khan hiếm phổ tàn là một nỗ lực trực tiếp, "theo sách giáo khoa" để định nghĩa và triển khai Sóng Vô tuyến Nhận thức. Thay vì điều chỉnh các tiêu chuẩn hiện có, IEEE đã tạo ra các nhóm làm việc hoàn toàn mới để xây dựng một kiến trúc CR toàn diện từ đầu, tập trung vào việc truy cập cơ hội vào các băng tần được cấp phép nhưng ít được sử dụng, đặc biệt là Không gian Trắng Truyền hình (TV White Space - TVWS).

### 13.2.1 IEEE 1900 (DySPAN): Khung lý thuyết cho DSA

Nỗ lực có phương pháp nhất của IEEE đến từ Ủy ban Tiêu chuẩn Mạng Truy cập Phổ tàn Động (DySPAN).<sup>7</sup> Thay vì xây dựng một sản phẩm duy nhất, nhóm DySPAN đã tìm cách xây dựng *nền tảng lý thuyết và kiến trúc* cho tất cả các công nghệ CR trong tương lai. Cách tiếp cận có hệ thống này được thể hiện qua một bộ tiêu chuẩn bổ sung cho nhau:

1. **IEEE 1900.1 (Thuật ngữ):** Tiêu chuẩn này cung cấp "Định nghĩa và Khái niệm" cho lĩnh vực này.<sup>8</sup> Bằng cách tiêu chuẩn hóa từ vựng (ví dụ: CR, DSA, SDR, quản lý phổ tàn), 1900.1 đã tạo ra một ngôn ngữ chung để các nhà nghiên cứu, nhà quản lý và kỹ sư có thể thảo luận và xây dựng các hệ thống phức tạp này một cách nhất quán.

- 2. IEEE 1900.5 (Chính sách - "Bộ não"):** Tiêu chuẩn này định nghĩa một "Ngôn ngữ Chính sách" độc lập với nhà cung cấp.<sup>9</sup> Đây là một khái niệm CR cốt lõi, cho phép các cơ quan quản lý và nhà khai thác lập trình các quy tắc hành vi cho các thiết bị nhận thức (ví dụ: "Trong khu vực địa lý này, bạn được phép sử dụng các kênh 5, 12 và 14, nhưng không bao giờ được truyền quá \$100 \text{ mW}").<sup>10</sup> Về cơ bản, nó tiêu chuẩn hóa *cách* một CR "suy nghĩ" và tuân thủ các quy tắc.
- 3. IEEE 1900.6 (Dò tìm - "Các giác quan"):** Tiêu chuẩn này định nghĩa "Giao diện và Cấu trúc Dữ liệu Dò tìm Phổ biến".<sup>11</sup> Nó tiêu chuẩn hóa cách các cảm biến phổ biến thu thập dữ liệu và, quan trọng hơn, cách chúng báo cáo dữ liệu đó cho các thực thể khác (như cơ sở dữ liệu hoặc bộ não chính sách). Điều này cho phép một hệ sinh thái các cảm biến chuyên dụng, có thể tương tác.

Cách tiếp cận nhiều lớp, mang tính học thuật này cho thấy IEEE đã coi CR là một *vấn đề kiến trúc hệ thống* cần được giải quyết một cách toàn diện, nhằm xây dựng một bộ khung có thể tái sử dụng cho nhiều ứng dụng.

### 13.2.2 IEEE 802.22: CR cho Mạng Khu vực Rộng (WRAN)

IEEE 802.22 là ứng dụng thực tế quan trọng đầu tiên của khung lý thuyết DySPAN, nhắm vào một trường hợp sử dụng chính trị-xã hội cụ thể: giải quyết "khoảng cách số".<sup>12</sup> Mục tiêu rõ ràng là sử dụng các kênh TV UHF/VHF không được sử dụng (TVWS) để cung cấp dịch vụ băng thông rộng ở các vùng nông thôn và vùng sâu vùng xa—những "thị trấn ít được phục vụ" mà các nhà cung cấp băng thông rộng truyền thống đã bỏ qua.<sup>13</sup>

Để đạt được mục tiêu này, 802.22 đã được thiết kế như một tiêu chuẩn CR "hoàn chỉnh", tích hợp tất cả các chức năng CR cổ điển:

- **Loại Mạng:** Nó được định nghĩa là một Mạng Khu vực Rộng Không dây (WRAN), không phải là LAN. Nó được thiết kế cho các phạm vi phủ sóng cực lớn lên đến 100 km, điều này đưa ra các thách thức kỹ thuật đáng kể.<sup>15</sup>
- **Thiết kế PHY/MAC:** Lớp vật lý (PHY) và lớp điều khiển truy cập môi trường (MAC) đã được tối ưu hóa đặc biệt cho các kênh truyền hình nông thôn, vốn phải chịu độ trễ truyền sóng dài và fading lựa chọn tần số nghiêm trọng, không giống như môi trường WLAN trong nhà.<sup>16</sup>
- **Chức năng CR kép:** 802.22 thực hiện một cơ chế bảo vệ kép bắt buộc:
  1. **Dò tìm Phổ tần:** Các thiết bị 802.22 phải liên tục dò tìm phổ tần để phát hiện sự hiện diện của các bên đương nhiệm (incumbents), đặc biệt là các tín hiệu truyền hình kỹ thuật số (DTV) công suất thấp và micro không dây.<sup>15</sup>
  2. **Truy cập Cơ sở dữ liệu Địa lý:** Dò tìm đơn thuần là không đủ. Các thiết bị cố định 802.22 cũng được yêu cầu phải có khả năng định vị địa lý (ví dụ: GPS) và truy vấn cơ sở dữ liệu trung tâm qua Internet để xác định chính xác các kênh TVWS nào có sẵn (và ở mức công suất nào) tại vị trí cụ thể của chúng.<sup>15</sup>

IEEE 802.22 là một thành tựu kỹ thuật, đại diện cho tiêu chuẩn CR đầy đủ tính năng đầu tiên trên thế giới.

### 13.2.3 IEEE 802.11af: CR cho Mạng Cục bộ (WLAN)

Nhận thấy tiềm năng của TVWS không chỉ cho vùng nông thôn mà còn cho việc cải thiện phạm vi phủ sóng WLAN, IEEE cũng đã tiêu chuẩn hóa 802.11af, còn được gọi là "Wi-Fi trong TVWS" (White-Fi).<sup>19</sup>

Tiêu chuẩn này tương phản rõ rệt với 802.22:

- **Mục tiêu:** Thay vì tạo ra một mạng WRAN mới, 802.11af đã điều chỉnh tiêu chuẩn 802.11 (cụ thể là PHY của 802.11ac) để hoạt động trong các băng tần TVWS.<sup>15</sup>
- **Phạm vi:** Nó vẫn là một tiêu chuẩn WLAN, được thiết kế cho phạm vi ngắn hơn nhiều (lên đến 1 km) so với 802.22.<sup>15</sup>
- **Cơ chế CR:** Nó sử dụng các cơ chế CR tương tự như 802.22, chủ yếu dựa vào truy cập cơ sở dữ liệu địa lý để xác định các kênh có sẵn.

Sự tồn tại đồng thời của IEEE 802.22 (WRAN), IEEE 802.11af (WLAN) và các tiêu chuẩn khác như IEEE 802.15.4m (M2M/IoT)<sup>20</sup>, tất cả đều dự định hoạt động trong cùng băng tần TVWS, đã tạo ra một vấn đề "nhận thức bậc hai": làm thế nào để các *mạng CR không đồng nhất* này cùng tồn tại với nhau?

Điều này đã dẫn đến sự cần thiết của một tiêu chuẩn khác, **IEEE 802.19.1**, "Tiêu chuẩn Cùng tồn tại trong Không gian Trắng TV".<sup>21</sup> Tiêu chuẩn này xác định các phương pháp độc lập với công nghệ vô tuyến để các mạng TVWS khác nhau (TVBDs) có thể phối hợp và tránh can thiệp lẫn nhau.<sup>21</sup> Điều này minh họa cho cách tiếp cận phân lớp, "giải quyết từng vấn đề" đặc trưng của IEEE.

### 13.2.4 Phân tích Động lực Thị trường của CR IEEE

Mặc dù có sự xuất sắc và toàn diện về mặt kỹ thuật, các tiêu chuẩn CR "thuần túy" của IEEE, đặc biệt là 802.22, đã không đạt được thành công thương mại rộng rãi như Wi-Fi. Lý do nằm ở sự phân đôi triết lý ban đầu:

Các tiêu chuẩn này đã xây dựng một giải pháp kỹ thuật tối ưu cho một vấn đề thị trường không rõ ràng. Động lực kinh doanh cho băng thông rộng nông thôn (mục tiêu của 802.22) là rất khó khăn.<sup>13</sup> Các tài liệu phân tích đã nêu ra những câu hỏi cốt lõi như "ai trả tiền cho chuỗi kết nối này?" và "liệu các vấn đề cạnh tranh có phát sinh không?".<sup>12</sup> Thị trường cho công nghệ này bao gồm các "doanh nhân nhỏ"<sup>14</sup> và các "dự án thí điểm" (ví dụ: do Microsoft tài trợ ở Châu Phi)<sup>23</sup>, chứ không phải là các MNO toàn cầu với ngân sách CAPEX hàng tỷ đô la.

Nói cách khác, IEEE đã thành công trong việc tạo ra một giải pháp *tối ưu về kỹ thuật* cho một thị trường *lợi nhuận thấp và phân mảnh*. Trong khi đó, 3GPP đã bỏ qua cách tiếp cận học thuật này và thay vào đó tập trung vào các giải pháp "đủ tốt", có thể không hoàn hảo về mặt lý thuyết CR, nhưng lại giải quyết các vấn đề trị giá hàng tỷ đô la cho các khách hàng (MNOs) có nhiều tiền.

### **13.3 Các Cơ chế "Tương tự Nhận thức" Thực dụng của 3GPP trong Kỷ nguyên 4G/LTE**

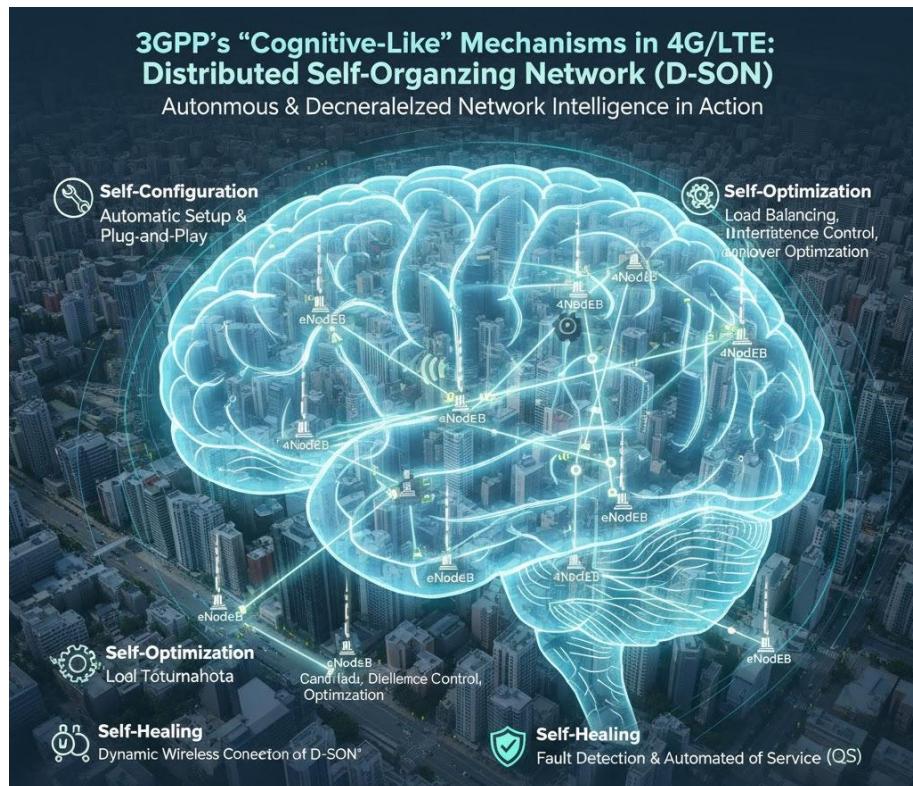
Trong khi IEEE theo đuổi định nghĩa CR "theo sách giáo khoa", 3GPP đã đi theo một con đường hoàn toàn khác. Không bị thúc đẩy bởi nhu cầu truy cập cơ hội, mà bởi nhu cầu quản lý các mạng lưới ngày càng phức tạp, 3GPP đã triển khai các tính năng giống như nhận thức (cognitive-like) một cách thực dụng. Các tính năng này tuân theo vòng lặp Nhận biết-Quyết định-Hành động (Observe-Decide-Act) cổ điển, nhưng trong một miền được cấp phép, do nhà mạng kiểm soát.

### 13.3.1 Mạng Tự tổ chức (SON)

Động lực chính đằng sau Mạng Tự tổ chức (SON) không phải là sự khan hiếm phổ biến, mà là sự *phức tạp của mạng* và *Chi phí Vận hành (OPEX)*. Khi mạng 4G LTE phát triển với các HetNets (Mạng Không đồng nhất) dày đặc gồm các macro, pico và femto cell, việc cấu hình, tối ưu hóa và sửa chữa thủ công trở nên không thể thực hiện được. SON, được giới thiệu bắt đầu từ Rel-8 và Rel-9, là câu trả lời của 3GPP cho tự động hóa.

Kiến trúc SON là một tập hợp các quy trình vòng lặp khép kín, có thể được triển khai theo ba cách:

- 1. SON Phân tán (D-SON):** Các thuật toán chạy trực tiếp trên các phần tử mạng (ví dụ: eNodeB) để đưa ra quyết định nhanh, cục bộ.

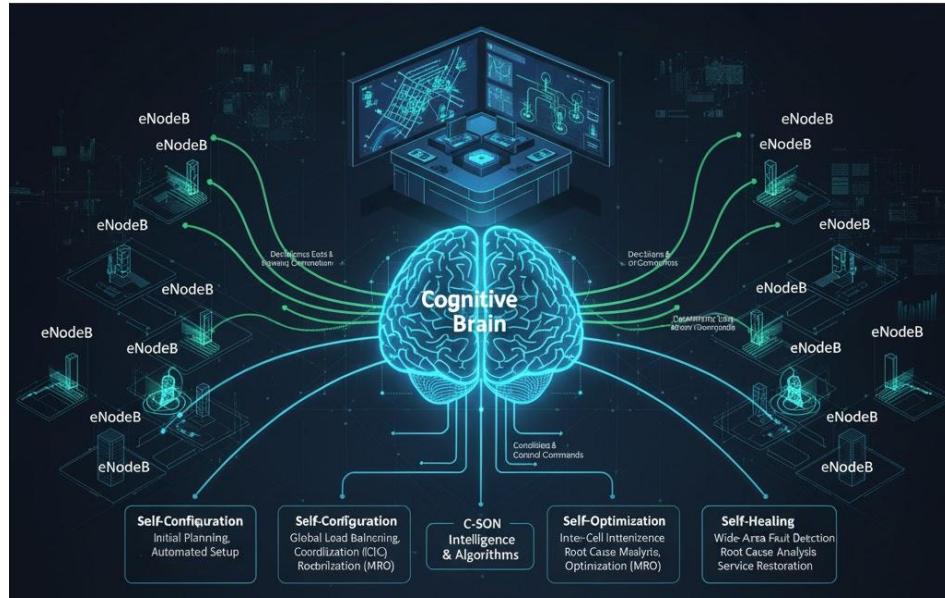


Hình 26: Mô hình Distributed SELF-ORGANIZE-NETWORK

**2. SON Tập trung (C-SON):** Các thuật toán chạy ở cấp Quản lý và Vận hành (OAM), nơi chúng có cái nhìn toàn cục về mạng.

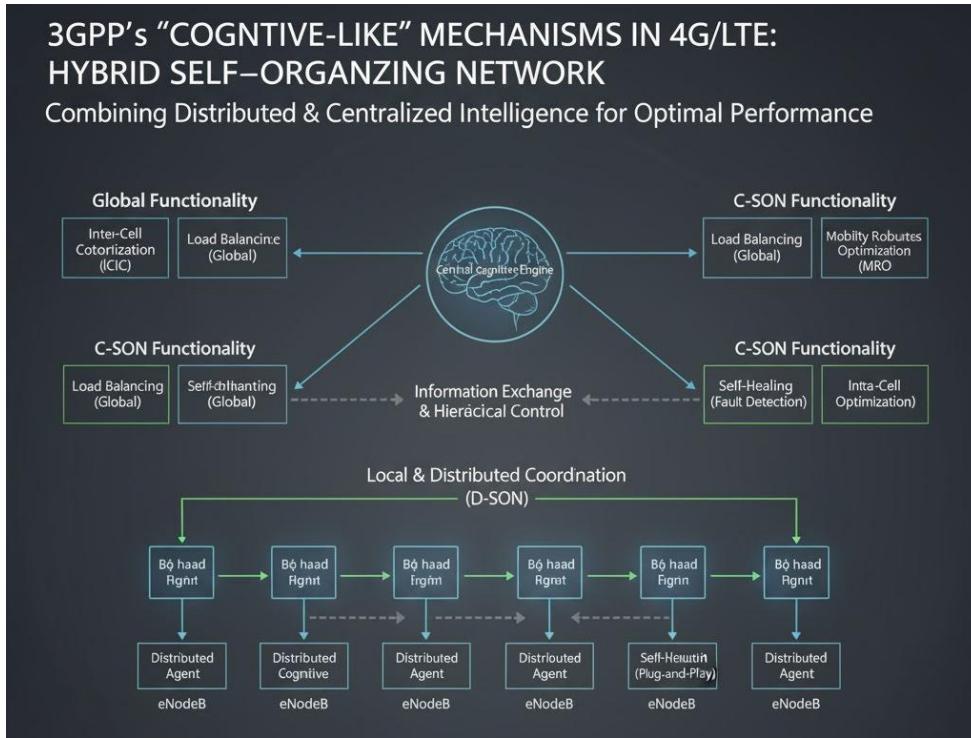
### 3GPP'S "COGNITIVE-LIKE" MECHANISMS IN 4G/LTE: CENTRALIZED SELF-ORGANIZING NETWORK (C-SON)

Centralized Network Intelligence & Orcherisation



Hình 27: Centralize SELF-ORGANIZE-NETWORK

**3. SON Lai (Hybrid):** Kết hợp cả hai cách tiếp cận.



Hình 28: Mô hình kết hợp giữa C và D

Các chức năng của SON được nhóm thành các trụ cột "nhận thức" cốt lõi:

- **Tự cấu hình (Self-Configuration):** Đây là trí thông minh ban đầu của mạng. Một ví dụ điển hình là Quản lý Quan hệ Lân cận Tự động (ANR). Khi một eNodeB mới được bật nguồn, nó sẽ tự động *nhận biết* các lân cận của mình, *quyết định* các liên kết chuyển giao cần thiết và tự động *hành động* bằng cách cấu hình chúng, loại bỏ nhu cầu can thiệp thủ công tối kín.
- **Tự tối ưu hóa (Self-Optimization):** Đây là chức năng CR cốt lõi. Nó bao gồm Cân bằng tải (Load Balancing), Tối ưu hóa Độ bền Di động (Mobility Robustness Optimization) và Tiết kiệm Năng lượng (Energy Saving). Ví dụ: mạng liên tục *dò tìm* (sensing) tải trên các ô thông qua các báo cáo của Thiết bị Người dùng (UE). Khi *quyết định* rằng ô A bị quá tải và ô B ít được sử dụng, nó sẽ *hành động* bằng cách điều chỉnh các tham số chuyển giao để di chuyển người dùng từ A sang B.

- **Tự phục hồi (Self-Healing):** Mạng có thể tự sửa chữa. Ví dụ, thông qua Phát hiện và Bù đắp Sự cố Ô (COD/COC). Mạng *nhận biết* một ô đã bị lỗi (through qua báo động hoặc thiếu báo cáo UE). Nó *quyết định* rằng có một lỗ hổng phủ sóng và *hành động* bằng cách tăng công suất của các ô lân cận để tạm thời lấp đầy khoảng trống đó.

Những chức năng SON này là một ví dụ hoàn hảo về *CR nội tại* (introspective CR). Trí thông minh không được hướng ra ngoài để tìm phổi tần "trắng", mà được hướng vào *bên trong* để tối ưu hóa chính mạng lưới. Mô hình này là *độc tài* (theo nghĩa kỹ thuật)—trí thông minh OAM/eNodeB trung tâm đưa ra các quyết định tối ưu cho toàn bộ hệ thống và ra lệnh cho các UE—trái ngược hoàn toàn với mô hình *dân chủ* (democratic) của IEEE, nơi các thiết bị ngang hàng đàm phán để truy cập.

### 13.3.2 Điều phối Nhiều liên ô (ICIC / eICIC)

Một ví dụ vi mô, cụ thể về một tính năng "nhận thức" của 3GPP là Điều phối Nhiều liên ô Nâng cao (eICIC), được giới thiệu trong Rel-10. Tính năng này được thiết kế đặc biệt để giải quyết một vấn đề quan trọng của 4G HetNets (được thảo luận trong Chương 10): nhiều nghiêm trọng giữa các macro cell công suất cao và các pico/femto cell công suất thấp.

Giải pháp eICIC là một cơ chế *nhận thức về nhiễu* (interference-aware). Nó hoạt động như sau:

1. **Nhận biết:** Macro cell *nhận biết* được sự hiện diện của các pico cell lân cận và tình huống nhiễu nghiêm trọng mà chúng đang gây ra (thường thông qua báo cáo của UE).
2. **Quyết định:** Một quyết định phối hợp được đưa ra (thường thông qua giao diện X2) để giảm thiểu nhiễu này trong miền thời gian.

**3. Hành động:** Macro cell đồng ý "im lặng" trong một số khung con thời gian nhất định. Những khung con này được gọi là *Almost Blank Subframes (ABS)*. Trong các ABS này, macro cell không truyền dữ liệu, cho phép các pico cell (có công suất thấp hơn nhiều) phục vụ người dùng của chúng mà không bị nhiễu áp đảo.

eICIC về cơ bản là một hình thức *đàm phán phổ tần động* (dynamic spectrum negotiation) giống như CR. Tuy nhiên, có một sự khác biệt quan trọng: thay vì các mạng không đồng nhất đàm phán (như trong IEEE 802.19.1), đây là một cuộc đàm phán *nội bộ* (intra-system), được điều phối cao độ giữa các phần tử của *cùng một* mạng lưới nhà khai thác. Nó sử dụng các nguyên tắc CR (dò tìm, phối hợp, phân chia tài nguyên động) để đạt được mục tiêu của 3GPP (tối ưu hóa hệ thống) chứ không phải mục tiêu của IEEE (truy cập cơ hội).

### **13.4 Nghiên cứu Tình huống Phân đôi: Cuộc đụng độ trên Băng tần 5GHz**

Trong phần lớn lịch sử của 4G, các triết lý của IEEE và 3GPP tồn tại song song trong các miền riêng biệt (không phép và được cấp phép). Tuy nhiên, nhu cầu về dung lượng của 4G đã trở nên vô độ, và các MNO bắt đầu thèm muốn nguồn tài nguyên phổ tần rộng lớn, miễn phí và có sẵn trong băng tần 5GHz—lĩnh địa truyền thống của IEEE Wi-Fi. Điều này đã dẫn đến sự ra đời của LAA và một cuộc đụng độ trực tiếp giữa hai triết lý.

#### **13.4.1 Bối cảnh: Động lực của 3GPP và Sự ra đời của LAA**

Để giải quyết tình trạng cạn kiệt phổ tần được cấp phép, 3GPP đã giới thiệu Truy cập được Hỗ trợ băng Giấy phép (Licensed-Assisted Access - LAA) trong Rel-13.

Động lực rất đơn giản: sử dụng băng tần 5GHz không phép rộng lớn để tăng cường dung lượng cho các dịch vụ LTE trả phí.<sup>34</sup>

Kiến trúc của LAA là một động thái chiến lược kinh doanh thể hiện rõ triết lý của 3GPP.<sup>36</sup> LAA *không* phải là một hệ thống LTE độc lập trong băng tần không phép. Thay vào đó, nó là một phần mở rộng của tính năng *Tổng hợp Sóng mang* (Carrier Aggregation) của LTE-Advanced<sup>37</sup>:

1. **Sóng mang Chính (Primary Cell - PCell):** Luôn hoạt động trên băng tần *được cấp phép* của MNO. Sóng mang này là "mỏ neo", xử lý tất cả thông tin điều khiển quan trọng, tín hiệu và dữ liệu người dùng cơ bản.<sup>37</sup>
2. **Sóng mang Phụ (Secondary Cell - SCell):** Hoạt động trên băng tần *không phép* (5GHz). Sóng mang này chỉ được sử dụng để tăng cường dữ liệu, chủ yếu là downlink, nhằm tăng tốc độ tải về.<sup>37</sup>

Kiến trúc này là một giải pháp thiên tài từ góc độ kinh doanh của 3GPP. Nó cho phép MNO *mở rộng* dịch vụ trả phí, được cấp phép của họ bằng cách sử dụng một tai nguyên "miễn phí".<sup>34</sup> Quan trọng nhất, bằng cách giữ PCell trong băng tần được cấp phép, MNO duy trì *toàn quyền kiểm soát* trải nghiệm người dùng, chất lượng dịch vụ (QoS) và độ tin cậy của kết nối. Băng tần 5GHz không phép, hỗn loạn chỉ được coi như một đường ống dữ liệu "ngu ngốc" để tăng tốc độ, không bao giờ gây nguy hiểm cho dịch vụ cốt lõi. Điều này cho thấy sự miễn cưỡng sâu sắc của 3GPP trong việc từ bỏ mô hình "kiểm soát" của mình.

### 13.4.2 Vấn đề Cùng tồn tại: LBT của 3GPP so với CSMA/CA của IEEE

Việc 3GPP đưa LTE vào băng tần 5GHz đã tạo ra một vấn đề kỹ thuật nghiêm trọng.

- **LTE (công nghệ 3GPP)** là một hệ thống *dựa trên lịch trình* (scheduled). eNodeB là một bộ điều khiển trung tâm, ra lệnh chính xác cho từng UE khi nào và ở tần số nào để truyền. Nó hoạt động với giả định rằng nó sở hữu phổ tần và sẽ không bị gián đoạn.
- **Wi-Fi (công nghệ IEEE 802.11)** là một hệ thống *dựa trên tranh chấp* (contention-based). Nó sử dụng CSMA/CA, một giao thức "lịch sự" nơi các thiết bị "lắng nghe" xem kênh có rảnh không trước khi truyền và sử dụng các cơ chế backoff ngẫu nhiên để tránh xung đột.<sup>38</sup>

Nếu một hệ thống LTE "dựa trên lịch trình" (một "kẻ bắt nạt" không biết nhường nhịn) được thả vào một băng tần Wi-Fi "dựa trên tranh chấp", thảm họa sẽ xảy ra. Hệ thống LTE sẽ truyền liên tục, không bao giờ nhường quyền, và về cơ bản sẽ "giết chết" tất cả các mạng Wi-Fi lân cận bằng cách chiếm dụng kênh vĩnh viễn.<sup>38</sup>

Để được chấp nhận về mặt pháp lý (đặc biệt là ở châu Âu, nơi yêu cầu các cơ chế "lắng nghe") và để xoa dịu ngành công nghiệp Wi-Fi hùng mạnh (IEEE, Wi-Fi Alliance), 3GPP đã buộc phải áp dụng một cơ chế "cùng tồn tại công bằng" (fair coexistence).<sup>32</sup>

Giải pháp là **Nghe-trước-khi-nói (Listen-Before-Talk - LBT)**.<sup>34</sup> Về cơ bản, LBT là phiên bản LAA của CSMA/CA. Trước khi truyền trên kênh 5GHz, eNodeB LAA phải thực hiện Đánh giá Kênh Rõ ràng (Clear Channel Assessment - CCA) để *lắng nghe*.<sup>41</sup> Chỉ khi kênh được phát hiện là rảnh, eNodeB mới được phép truyền.

Cuộc chiến thực sự không phải là *có* LBT hay không, mà là *các thông số* của LBT. Các cuộc tranh luận này lùa đã diễn ra trong các cuộc họp của 3GPP RAN1, với sự tham gia tích cực của các bên liên quan Wi-Fi.<sup>40</sup> Các điểm tranh chấp chính bao gồm:

- **Nguồn Phát hiện Năng lượng (ED Threshold):** Mức độ "yên tĩnh" nào là đủ yên tĩnh? Ngành công nghiệp Wi-Fi muốn một ngưỡng *nhạy cảm* (ví dụ:  $-82 \text{ dBm}$ ) để LAA có thể phát hiện các tín hiệu Wi-Fi yếu và im lặng. 3GPP muốn một ngưỡng *ít nhạy cảm hơn* (ví dụ:  $-72 \text{ dBm}$ ) để LAA có thể truyền thường xuyên hơn, cho rằng tín hiệu Wi-Fi yếu ở xa không liên quan.<sup>34</sup>
- **Thời gian Chiếm dụng Kênh Tối đa (MCOT):** Sau khi LAA giành được kênh, nó có thể chiếm kênh trong bao lâu? LTE là một hệ thống dựa trên lịch trình hiệu quả, vì vậy 3GPP muốn MCOT *dài* để truyền các khối dữ liệu lớn. Wi-Fi là một hệ thống dựa trên các gói ngắn, bùng nổ, vì vậy họ muốn MCOT *ngắn* để các thiết bị Wi-Fi có cơ hội công bằng để xen kẽ.<sup>40</sup>

Cuối cùng, một thỏa hiệp phức tạp đã được đạt

ra, định nghĩa các "Lớp Uu tiên LBT" (ví dụ: LBT Loại 4) với các cửa sổ tranh chấp và MCOT khác nhau, cố gắng mô phỏng các cơ chế QoS của Wi-Fi (như EDCA) để đảm bảo chia sẻ công bằng.<sup>43</sup> Cuộc đụng độ LAA đã buộc 3GPP, lần đầu tiên, phải học cách "chơi đẹp" trong một sân chơi chung không được kiểm soát.

**Bảng 13.2: Phân tích Kỹ thuật các Tiêu chuẩn Liên quan đến Nhận thức (IEEE 802.22 vs. 3GPP LAA)**

<b>Thông số</b>	<b>IEEE 802.22 (CR "Thuần túy")</b>	<b>3GPP LAA (CR "Thực dụng")</b>
<b>Mục tiêu Chính</b>	Băng thông rộng nông thôn, giải quyết khoảng cách số <sup>13</sup>	Tăng dung lượng cho MNO trong đô thị/điểm nóng [35]
<b>Băng tần Hoạt động</b>	TVWS (VHF/UHF, thường < 1 GHz) <sup>15</sup>	Băng tần 5GHz (U-NII) <sup>38</sup>
<b>Miền Phổ tần</b>	Ít được sử dụng ("Không gian trắng")	Không phép (Đã sử dụng nhiều bởi Wi-Fi)
<b>Cơ chế Truy cập Kênh</b>	Lịch trình OFDMA (trong một kênh được phân bổ)	LBT (Nghe-trước-khi-nói) - Dựa trên tranh chấp <sup>34</sup>
<b>Chức năng CR Cốt lõi</b>	Dò tìm phô, Truy cập cơ sở dữ liệu địa lý [15, 18]	Đánh giá Kênh Rõ ràng (CCA) [42]
<b>Mục tiêu Cùng tồn tại</b>	Bảo vệ các bên đương nhiệm (DTV, Micro) [18]	Cùng tồn tại công bằng với các đối thủ cạnh tranh (Wi-Fi) <sup>32</sup>

<b>Kịch bản Triển khai</b>	Độc lập, Mạng Khu vực Rộng (WRAN) <sup>15</sup>	Được hỗ trợ bằng giấy phép (Tổng hợp Sóng mang) <sup>37</sup>
--------------------------------	--	--

Bảng này trực quan hóa sự phân đôi. IEEE 802.22 là một *hệ thống CR đầy đủ*, tự thân vận động trong một băng tần *ít được sử dụng* với mục tiêu *xã hội*, nơi "cùng tồn tại" có nghĩa là *không làm hại* các bên đương nhiệm thụ động. 3GPP LAA là một *tính năng bổ sung*, phụ thuộc vào giấy phép trong một băng tần *đồng đúc* với mục tiêu *thương mại*, nơi "cùng tồn tại" có nghĩa là *chia sẻ công bằng* với các đối thủ cạnh tranh tích cực.

### 13.5 Sự hội tụ trong 5G và Tương lai: Từ Cạnh tranh đến Tích hợp

Cuộc "chiến tranh" LAA trong kỷ nguyên 4G, tuy gây tranh cãi, nhưng lại là chất xúc tác cho một sự hội tụ sâu sắc hơn trong 5G. Sự phân đôi không biến mất, nhưng nó đã được giải quyết thông qua một sự thay đổi mô hình: từ cạnh tranh gay gắt sang hội tụ và tích hợp có thứ bậc.

Những bài học kỹ thuật đắt giá về LBT được học hỏi trong LAA (cho 4G) đã không bị lãng phí. Chúng đã trở thành nền tảng trực tiếp cho **NR-U (5G New Radio in Unlicensed)**.<sup>34</sup> NR-U là một công nghệ 5G *bản địa*, được thiết kế từ đầu để hoạt động trong phổ tần không phép (cả 5GHz và 6GHz mới). Quan trọng là, NR-U hỗ trợ cả chế độ "được hỗ trợ" (giống như LAA) và chế độ "độc lập" (standalone), nơi 5G có thể hoạt động hoàn toàn trong băng tần không phép mà không cần mỏ neo được cấp phép.<sup>34</sup> 3GPP đã hoàn toàn nội hóa các nguyên tắc "cùng tồn tại lịch sự" của IEEE vào bộ công cụ của mình.

Tuy nhiên, sự thay đổi mô hình thực sự nằm ở kiến trúc lõi. Thay vì chỉ học cách *cùng tồn tại* với Wi-Fi, kiến trúc Lõi 5G (5GC) của 3GPP đã được thiết kế để *tích hợp và hấp thụ* Wi-Fi.

Kiến trúc 5GC được thiết kế để "Trung lập về Truy cập" (Access Neutral).<sup>45</sup> Điều này có nghĩa là Lõi 5G không quan tâm liệu người dùng đang kết nối qua công nghệ truy cập vô tuyến (RAT) của 3GPP (ví dụ: 5G NR) hay RAT không phải của 3GPP (ví dụ: IEEE 802.11/WLAN).

Để đạt được điều này, 3GPP đã định nghĩa các công kiến trúc mới:

- **N3IWF (Non-3GPP InterWorking Function):** Dành cho các mạng WLAN *không đáng tin cậy* (ví dụ: Wi-Fi công cộng). N3IWF cho phép một thiết bị (như điện thoại thông minh) kết nối qua Wi-Fi, sau đó thiết lập một đường hầm IPsec an toàn qua Internet *trực tiếp* đến Lõi 5G của nhà mạng, cho phép truy cập liền mạch các dịch vụ 5G.<sup>45</sup>
- **TWIF (Trusted WLAN Interworking Function):** Dành cho các mạng WLAN *đáng tin cậy* (ví dụ: mạng Wi-Fi do chính nhà mạng triển khai).<sup>45</sup>

Hơn nữa, các tiêu chuẩn 5G của 3GPP hiện *sử dụng rõ ràng* các tiêu chuẩn của IEEE, chẳng hạn như IEEE 802.1, làm thành phần cơ bản cho các mạng công nghiệp và thời gian nhạy cảm (TSN).<sup>47</sup>

Đây là động thái chiến lược cuối cùng. 3GPP đã giải quyết sự phân đôi bằng cách tái định vị chính mình. Họ không còn *chỉ* là một tổ chức tiêu chuẩn vô tuyến di động; họ đã trở thành tổ chức tiêu chuẩn *hệ thống dịch vụ lõi* (core service system). Trong mô hình mới này, Wi-Fi (IEEE) không còn là đối thủ cạnh tranh cần phải chiến đấu

(như trong những ngày LAA), mà chỉ là một Công nghệ Truy cập Vô tuyến (RAT) khác mà Lõi 3GPP có thể quản lý, kiểm soát và tận dụng. Sự phân đôi đã được giải quyết thông qua *sự hấp thụ có thứ bậc*.

### **13.6 Kết luận: Tổng hợp Sự phân đôi và Sự phát triển của nó**

Lịch sử giao thoa giữa 4G, Sóng Vô tuyến Nhận thức và hai gã khổng lồ tiêu chuẩn hóa, IEEE và 3GPP, là một câu chuyện về các triết lý hội tụ một cách miến cưỡng. Hành trình này có thể được tóm tắt trong ba giai đoạn:

- 1. Giai đoạn 1: Sự phân đôi Rõ ràng (Trước/Đầu 4G).** Hai thế giới tồn tại song song. IEEE theo đuổi CR "học thuật", thuận túy (IEEE 1900, 802.22) để giải quyết các vấn đề truy cập cơ hội trong các thị trường ngách, ít được sử dụng (TVWS).<sup>8</sup> 3GPP theo đuổi tự động hóa "thực dụng" (SON, eICIC) để tối ưu hóa OPEX và hiệu suất trong các mạng được cấp phép, do nhà mạng kiểm soát.<sup>5</sup>
- 2. Giai đoạn 2: Cuộc đụng độ (Giữa 4G).** Nhu cầu thương mại về dung lượng của 3GPP đã thúc đẩy họ vào lãnh địa không phép 5GHz của IEEE với LAA.<sup>32</sup> Cuộc "xâm lược" này đã buộc 3GPP phải áp dụng các nguyên tắc "nhận thức" của IEEE (cụ thể là LBT) để đảm bảo "cùng tồn tại công bằng" với Wi-Fi, sau một loạt các cuộc đàm phán kỹ thuật căng thẳng.<sup>34</sup>
- 3. Giai đoạn 3: Sự hội tụ (Hấp thụ) (5G).** Xung đột được giải quyết bằng một sự thay đổi kiến trúc. Lõi 5G của 3GPP phát triển để trở thành một nền tảng dịch vụ "trung lập về truy cập", có khả năng tích hợp và quản lý cả truy cập 3GPP (NR) và truy cập IEEE (WLAN) thông qua các cổng được tiêu chuẩn hóa như N3IWF.<sup>45</sup>

Sự phân đôi ban đầu không bao giờ thực sự biến mất; nó đã được chuyển hóa. 3GPP vẫn tập trung vào dịch vụ do nhà mạng kiểm soát và IEEE vẫn tập trung vào khả năng tương tác của thiết bị. Nhưng cuộc đụng độ trong kỷ nguyên 4G đã buộc cả hai phải học hỏi lẫn nhau. IEEE đã chứng minh tính khả thi kỹ thuật của CR, trong khi 3GPP đã chứng minh làm thế nào để tích hợp các nguyên tắc của nó một cách thực dụng để giải quyết các vấn đề kinh doanh cấp bách.

Sự hội tụ này tạo thành bệ phóng cho các chủ đề sẽ được thảo luận trong Chương 14. Sự phân đôi cũ đã được thay thế bằng một *hệ sinh thái lai* (hybrid ecosystem). Các nguyên tắc CR được tiên phong trong 4G—cả tối ưu hóa của 3GPP và truy cập cơ hội của IEEE—đã hợp nhất để tạo thành nền tảng cho các mạng 5G và 6G hội tụ, linh hoạt hơn, nơi sự phân biệt rạch ròi giữa phổ tần "được cấp phép" và "không phép" ngày càng trở nên mờ nhạt.

## **Chương 14: Sự phân đôi Tiêu chuẩn hóa: IEEE so với 3GPP**

### **14.1. Tóm tắt Di sản 4G-CR: Nền tảng cho Mạng Lưới Linh hoạt**

Sự phát triển của mạng di động từ thế hệ thứ tư (4G) trở đi là một hành trình không ngừng nhằm giải quyết một thách thức cơ bản: sự khan hiếm tài nguyên phổ tần vô tuyến. Các chương trước của hướng dẫn nghiên cứu này đã phân tích chi tiết cách thức Sóng Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) trong kỷ nguyên 4G, đặc biệt là thông qua các ứng dụng như Khai thác Không gian Trắng Truyền hình (TVWS), nổi lên như một giải pháp tiên phong.

Nguyên tắc cốt lõi của 4G-CR được xây dựng dựa trên chu trình nhận thức cổ điển (ví dụ: Quan sát - Định hướng - Quyết định - Hành động), trong đó "Quan sát" (Observe) chủ yếu đồng nghĩa với "Dò Phổ tần" (Spectrum Sensing). Mục tiêu là cho phép người dùng thứ cấp (Secondary Users - SUs) phát hiện một cách cơ hội các "lỗ hổng phổ tần" (spectrum holes) — các băng tần được cấp phép nhưng không được Người dùng Chính (Primary Users - PUs) sử dụng tại một thời điểm hoặc địa điểm cụ thể.

Các trường hợp sử dụng điển hình, như các dự án thí điểm TVWS ở Nam Phi và Botswana, đã chứng minh tính khả thi của việc sử dụng các kỹ thuật CR để cung cấp kết nối băng rộng tại các khu vực nông thôn.<sup>1</sup> Các tiêu chuẩn như IEEE 802.22 (cho Mạng Vô tuyến Khu vực Rộng - WRAN) và IEEE 802.11af (cho Wi-Fi trong băng tần TVWS) đã được phát triển đặc biệt, dựa trên các nguyên tắc CR để đảm bảo bảo vệ nghiêm ngặt cho các đài truyền hình hiện hữu.<sup>3</sup>

Tuy nhiên, trong quá trình triển khai thực tế, mô hình CR "thuần túy" — trong đó mọi thiết bị đầu cuối phải tự thực hiện việc dò phổ tần thời gian thực — đã vấp phải những rào cản đáng kể về chi phí, tiêu thụ năng lượng và độ tin cậy.<sup>4</sup> Việc đảm bảo rằng một thiết bị tiêu dùng giá rẻ có thể phát hiện một cách hoàn hảo tín hiệu truyền hình công suất thấp ở xa là một thách thức kỹ thuật cực kỳ lớn.

Kết quả là, một mô hình thực dụng hơn đã chiếm ưu thế: **Cơ sở dữ liệu Địa lý (Geo-location Database)**.<sup>2</sup> Trong kiến trúc này, thay vì "cảm nhận" (sense), thiết bị CR (SU) "hỏi" (query) một cơ sở dữ liệu trung tâm.<sup>3</sup> Thiết bị báo cáo vị trí của mình (thường qua GPS), và cơ sở dữ liệu — nơi chứa thông tin về tất cả các PUs đã đăng

ký và các mô hình truyền sóng — sẽ trả về một danh sách các kênh an toàn, khả dụng.

Sự chuyển dịch này, từ cảm biến phi tập trung, thời gian thực sang vấn đề tập trung, dựa trên cơ sở dữ liệu, là một bước ngoặt quan trọng. Nó vô hình trung đã *trung tâm hóa* chức năng nhận thức. Các bước "Quan sát" và "Định hướng" đã được chuyển từ thiết bị (edge) lên mạng lưới (network). Điểm thực sự của 4G-CR, do đó, không phải là việc triển khai hàng loạt các bộ cảm biến phổ tần, mà là việc thiết lập nguyên tắc *quản lý phổ tần động* (Dynamic Spectrum Management) và sự chấp nhận về mặt pháp lý của nó. Quan trọng hơn, sự trỗi dậy của mô hình cơ sở dữ liệu là hạt giống đầu tiên cho một xu hướng kiến trúc sẽ định hình hoàn toàn thế hệ mạng tiếp theo: sự chuyển dịch trí tuệ ra quyết định từ thiết bị đầu cuối vào bộ điều khiển mạng lưới.

## 14.2. Sự Chuyển đổi Mô hình 5G: Từ "Nhận thức Phổ tần" sang "Quản lý Mạng lưới Nhận thức"

Sự xuất hiện của 5G đã thay đổi hoàn toàn mục tiêu và bản chất của "nhận thức" trong mạng không dây. Vấn đề không còn chỉ là tìm kiếm phổ tần trống; nó là việc quản lý một hệ sinh thái dịch vụ cực kỳ phức tạp và đa dạng trên cùng một cơ sở hạ tầng vật lý.

Kiến trúc 4G LTE, về cơ bản, là một kiến trúc "một kích cỡ cho tất cả" (one-size-fits-all)<sup>5</sup>, được tối ưu hóa cho băng thông rộng di động. Ngược lại, 5G được thiết kế để hỗ trợ đồng thời ba loại hình dịch vụ hoàn toàn khác biệt và thường mâu thuẫn về yêu cầu tài nguyên<sup>7</sup>:

1. **Băng thông rộng Di động Tăng cường (eMBB):** Yêu cầu tốc độ dữ liệu cực cao (ví dụ: video 4K/8K, Thực tế ảo).<sup>8</sup>

2. **Liên lạc Độ trễ Thấp Siêu Tin cậy (URLLC):** Yêu cầu độ trễ gần như bằng không và độ tin cậy ở mức "sáu số 9" (ví dụ: phẫu thuật từ xa, xe tự hành, tự động hóa nhà máy).<sup>8</sup>
3. **Truyền thông Kiểu Máy Siêu Mật độ (mMTC):** Yêu cầu hỗ trợ hàng triệu thiết bị năng lượng thấp trên mỗi kilômét vuông (ví dụ: IoT, cảm biến thành phố thông minh).<sup>7</sup>

Việc quản lý sự cùng tồn tại của một lát mạng (slice) URLLC (ưu tiên độ trễ) và một lát eMBB (ưu tiên băng thông) trên cùng một phô tàn là một bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu (multi-objective optimization) phức tạp.<sup>7</sup> Một thuật toán tinh hoặc một bộ quy tắc đơn giản không thể giải quyết được bài toán này.

Do đó, "nhận thức" (cognition) trong 5G đã phải tiến hóa. Nó phát triển từ *nhận thức về phô tàn* (spectrum-aware) đơn thuần sang *nhận thức về dịch vụ* (service-aware), *nhận thức về Chất lượng Dịch vụ* (QoS-aware), và *nhận thức về bối cảnh* (context-aware).<sup>10</sup> Mạng 5G phải "biết" không chỉ kênh nào đang rảnh, mà còn "biết" lát mạng nào đang cần tài nguyên, yêu cầu SLA của nó là gì, và dự đoán nhu cầu của nó trong vài mili giây tới.

Chính sự phức tạp này đã *bắt buộc* việc tích hợp Trí tuệ Nhân tạo (AI) và Học máy (Machine Learning - ML) vào trung tâm của việc quản lý mạng 5G.<sup>11</sup> Các công nghệ CR và Chu trình Nhận thức (Cognition Cycle - CC) vẫn được coi là công nghệ hỗ trợ then chốt, nhưng công cụ để thực thi chu trình đó ở quy mô và tốc độ 5G đòi hỏi chính là AI/ML.<sup>10</sup> Nhu cầu đa dạng về QoS của 5G đã buộc khái niệm "nhận thức" phải phát triển từ một bài toán tối ưu hai chiều (thời gian, tàn số) trong 4G-CR thành một bài toán tối ưu đa chiều (độ trễ, độ tin cậy, băng thông, năng lượng, chi

phi). AI/ML không phải là một lựa chọn, mà là yêu cầu bắt buộc để giải quyết bài toán đa chiều này.

**Bảng 14.1: So sánh Sự phát triển của Nguyên tắc Nhận thức (4G, 5G, 6G)**

Đặc điểm	Kỹ nguyên 4G-CR	Kỹ nguyên 5G	Tầm nhìn 6G
<b>Mục tiêu chính</b>	Giải quyết khan hiếm phổ tần	Tối ưu hóa Dịch vụ & QoS đa dạng	Tự trị hoàn toàn, Hiệu quả toàn diện
<b>Khái niệm "Nhận thức"</b>	Dò Phổ tần (Spectrum Sensing)	Quản lý Nhận thức (Cognitive Management) dựa trên AI/ML	Trí tuệ Nguyên bản (AI-Native) & Nhận thức Môi trường
<b>Công nghệ Then chốt</b>	TVWS, DSA, Cơ sở dữ liệu Địa lý	Cắt lát Mạng, DSS, NR-U (LBT), O-RAN/RIC, AI/ML	AI-Native, RIS, ISAC, Truyền thông THz
<b>Cấp độ Triển khai</b>	Chủ yếu ở Thiết bị (Device-level) (ý tưởng) / Mạng lưới (database) (thực tế)	Mạng lưới (Network-level) & Bộ điều khiển (Controller-level)	Toàn hệ thống (End-to-end) & Nguyên bản trong Kiến trúc

<b>Thách thức chính</b>	Độ tin cậy của cảm biến, Chi phí	Quản lý độ phức tạp, Cùng tồn tại QoS	An ninh AI (Adversarial), Quyền riêng tư (ISAC), Quản lý tự trị
---------------------------------	-------------------------------------	--	--

### 14.3. Các Công nghệ 5G THEN CHỐT Hiện thực hóa Nguyên tắc Nhập nhầm

Sự chuyển đổi sang quản lý nhập nhầm dựa trên AI của 5G không chỉ là lý thuyết; nó được hiện thực hóa thông qua một loạt các công nghệ và kiến trúc tiêu chuẩn hóa, mỗi công nghệ thể hiện một khía cạnh của sự tiến hóa nhập nhầm.

#### 14.3.1. Chia sẻ Phổ tần Động (DSS): Cầu nối Nhập nhầm giữa 4G và 5G-NR

Chia sẻ Phổ tần Động (Dynamic Spectrum Sharing - DSS) là một công nghệ quan trọng được giới thiệu trong 3GPP Release 15.<sup>13</sup> Nó cho phép các nhà khai thác mạng triển khai đồng thời cả 4G LTE và 5G New Radio (NR) trên *cùng một băng tần* được cấp phép.<sup>13</sup> Thay vì phải "tái phân bổ" (re-farm) toàn bộ băng tần cho 5G (một quá trình tốn kém và gây gián đoạn), DSS cho phép phân bổ tài nguyên một cách linh hoạt trên cơ sở chia sẻ thời gian, thường là ở mức mili giây hoặc subframe.<sup>15</sup>

Cơ chế này thể hiện một sự *đảo ngược* và *tập trung hóa* hoàn toàn của nguyên tắc 4G-CR. Trong DSS, thiết bị đầu cuối (UE) *không cần* thực hiện "bất kỳ cảm biến đặc biệt nào".<sup>15</sup> Thay vào đó, **Mạng lưới (Network) đưa ra quyết định**.<sup>15</sup> Trạm gốc (gNB) "nhập nhầm" được sự hiện diện của cả thiết bị 4G và 5G trong vùng phủ sóng của nó. Nó biết rằng các thiết bị 4G cũ (legacy LTE) mong đợi các tín hiệu

tham chiếu cụ thể (Cell-specific Reference Signals - CRS) tại các vị trí cố định trong khung tài nguyên. Do đó, bộ lập lịch 5G-NR được thiết kế "nhận thức" được điều này và sẽ không lập lịch cho Kênh Điều khiển Đường xuống 5G (NR PDCCH) chồng lấn lên các tài nguyên CRS của LTE<sup>15</sup> (ít nhất là trong các phiên bản đầu của 3GPP, với các tối ưu hóa tiếp theo trong Rel-18<sup>15</sup>).

Đây là một hình thức nhận thức "từ trên xuống" (top-down) và *được quản lý* (managed). Thay vì mô hình 4G-CR (một "khách" thứ cấp có găng cảm nhận khi "chủ nhà" chính vắng mặt), DSS là một mô hình "gia đình" (cả 4G và 5G đều là "người nhà" của nhà mạng). Không cần cảm biến, bởi vì "cha mẹ" (mạng lưới) đang chủ động lập lịch và phân bổ tài nguyên cho cả hai. Sự nhận thức đã di chuyển hoàn toàn từ thiết bị vào bộ điều khiển mạng.

## DYNAMIC SPECTRUM SHARING (DSS): The Cognitive Between 4G 5G-NR

### Enabling Seamless Coexistence on the Same Frequency Band



Hình 29: Phổ tần Động (DSS): Cầu nối Nhận thức giữa 4G và 5G-NR

### 14.3.2. NR-Unlicensed (NR-U): Sự tiến hóa của "Lắng nghe trước khi nói" (LBT)

Nếu DSS thể hiện nhận thức *được quản lý* trong phổ tần có phép, thì 5G New Radio in Unlicensed spectrum (NR-U) thể hiện sự tiến hóa của nhận thức *cơ hội* trong phổ tần *không phép*. Để hoạt động trong các băng tần chia sẻ (như băng 5 GHz hoặc 6

GHz) và cùng tồn tại một cách công bằng với các công nghệ đương nhiệm như Wi-Fi, NR-U bắt buộc phải tuân thủ các quy tắc truy cập kênh.

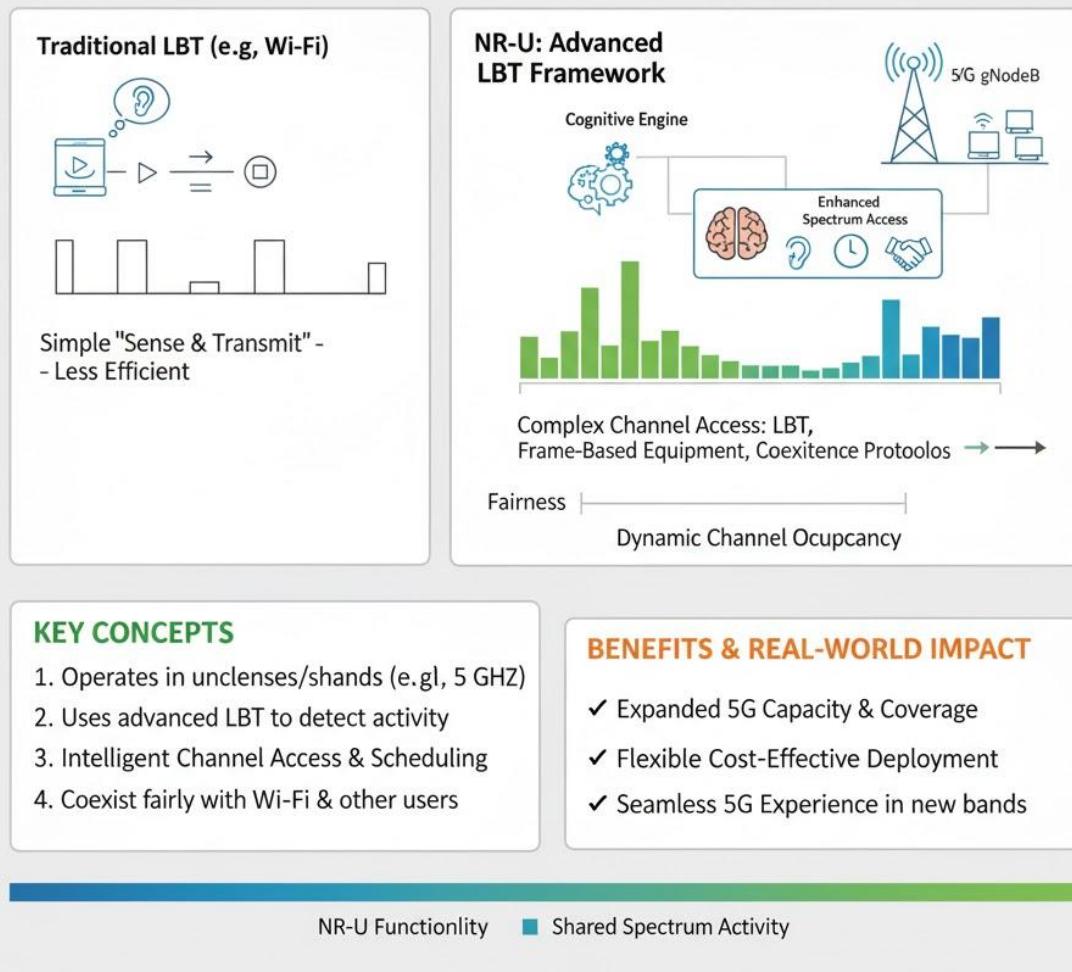
Cơ chế cốt lõi là **Lắng nghe trước khi nói (Listen-Before-Talk - LBT)**. Đây thực chất là một hình thức *cảm biến phổ tần* (spectrum sensing) bắt buộc, được tiêu chuẩn hóa. Nhưng nó phức tạp hơn nhiều so với việc phát hiện năng lượng đơn giản của 4G-CR. 3GPP đã định nghĩa các loại LBT tinh vi:

- **CAT2-LBT:** Thiết bị cảm biến kênh trong một khoảng thời gian cố định ngắn (ví dụ: 16 hoặc 25 micro giây). Nếu kênh rảnh, nó được phép truyền ngay lập tức.
- **CAT3/CAT4-LBT:** Nếu kênh bị chiếm, thiết bị phải thực hiện một thuật toán *lùi ngẫu nhiên* (random back-off) và chọn một bộ đếm ngẫu nhiên trong một "cửa sổ cạnh tranh" (contention window) trước khi thử cảm biến lại.<sup>20</sup>

Đây là sự *chính thức hóa* và *tiêu chuẩn hóa* của nguyên tắc cảm biến 4G-CR. Mục tiêu đã phát triển. Cảm biến 4G-CR chủ yếu mang tính *cạnh tranh* (tìm một lỗ hổng và chiếm lấy nó). Ngược lại, LBT của NR-U được thiết kế cho *sự cùng tồn tại công bằng* (fair coexistence) giữa nhiều tác nhân ngang hàng. Các thuật toán back-off ngẫu nhiên được thiết kế rõ ràng để đảm bảo *sự công bằng* (fairness), một khái niệm nhận thức phức tạp hơn nhiều so với việc "phát hiện" (detection) PU đơn thuần. Đây là sự tiến hóa từ nhận thức *nhi phân* (có/không có PU) sang nhận thức *xã hội* (làm thế nào để chia sẻ tài nguyên chung một cách lịch sự).

## NR-UNLICENSED (NR-U): THE EVOLUTION OF LISTEN-BEFORE-TALK (LBT)

Cognitive Coexistence on Shared & Unlicensed Spectrum



Hình 30: NR-Unlicensed (NR-U) - (LBT)

### 14.3.3. Cắt lát Mạng (Network Slicing): Quản lý Tài nguyên Đa dịch vụ Nhận thức

Cắt lát mạng là một trong những công nghệ trụ cột của 5G, cho phép các nhà khai thác tạo ra nhiều mạng logic ảo, độc lập trên một cơ sở hạ tầng vật lý chung. Mỗi lát

mạng (slice) được tùy chỉnh hoàn toàn để đáp ứng các yêu cầu QoS/SLA cụ thể của một dịch vụ (ví dụ: một lát eMBB, một lát URLLC).

Thách thức nhận thức ở đây là: làm thế nào để phân bổ tài nguyên (phổ tán, tính toán, lưu trữ) cho các lát này một cách động? Việc cấp phép tài nguyên tĩnh dựa trên nhu cầu cao điểm (peak traffic) sẽ cực kỳ lãng phí. Điều này đòi hỏi một hệ thống quản lý "nhận thức" được nhu cầu hiện tại và dự đoán được nhu cầu tương lai của từng lát.

Đây là lúc AI/ML trở thành trung tâm. Các kỹ thuật học tăng cường sâu (Deep Reinforcement Learning - DRL) đã được đề xuất rộng rãi để quản lý tài nguyên tự trị cho các lát mạng và tối ưu hóa sự cùng tồn tại phức tạp giữa eMBB và URLLC.

Một nghiên cứu điển hình tiêu biểu là khung **DeepCog**. DeepCog là một công cụ phân tích dữ liệu được thiết kế rõ ràng cho *quản lý nhận thức* (cognitive management) tài nguyên trong các mạng 5G đã cắt lát. Nó sử dụng kiến trúc học sâu (deep learning), cụ thể là Mạng Nơ-ron Tích chập 3D (3D-CNN), để *dự báo* (forecast) nhu cầu dung lượng trong tương lai của từng lát mạng.

Mục tiêu nhận thức của DeepCog là một bước nhảy vọt so với 4G-CR. Nó không chỉ tìm kênh rảnh; nó chủ động *cân bằng* (balance) giữa hai mục tiêu kinh tế xung đột: chi phí của việc *cấp phép tài nguyên thừa* (overprovisioning) và rủi ro (cũng là chi phí) của việc *vi phạm yêu cầu dịch vụ* (service request violations). Bằng cách học hỏi từ dữ liệu lưu lượng thực tế, DeepCog được chứng minh là có thể giảm đáng kể Chi phí Vận hành (OPEX) cho các nhà mạng so với các phương pháp dự đoán lưu lượng truyền thông.

DeepCog minh họa hoàn hảo sự trưởng thành của chu trình nhận thức: "Quan sát" đã chuyển từ *cảm biến RF* sang *phân tích dữ liệu lưu lượng lịch sử*. "Quyết định" đã

chuyển từ *phản ứng* (reactive) sang *tiên đoán* (predictive) và *tối ưu hóa dựa trên chi phí*. Nhận thức đã di chuyển từ lớp vật lý (PHY) lên lớp quản lý và vận hành (OSS/BSS) của mạng.

#### 14.3.4. O-RAN và Bộ Điều khiển RAN Thông minh (RIC): Dân chủ hóa Trí tuệ Mạng

Kiến trúc O-RAN (Open Radio Access Network) là bước tiến logic tiếp theo: nếu AI/ML là bộ não của mạng 5G nhận thức, thì O-RAN cung cấp một "hộp sọ" mở và tiêu chuẩn hóa cho bộ não đó. O-RAN phá vỡ kiến trúc RAN (Mạng Truy cập Vô tuyến) nguyên khôi, độc quyền truyền thông thành các thành phần có thể tương tác (interoperable) thông qua các giao diện mở.<sup>31</sup>

Trung tâm của kiến trúc này là **Bộ Điều khiển RAN Thông minh (RAN Intelligent Controller - RIC)**, thực chất là một "hệ điều hành" cho mạng RAN. RIC được chia thành hai thực thể logic:

1. **Non-Real-Time (Non-RT) RIC:** Hoạt động ở vòng lặp thời gian chậm (> 1 giây), chịu trách nhiệm tối ưu hóa toàn mạng, quản lý chính sách, và quan trọng nhất là *huấn luyện mô hình AI/ML* (model training) dựa trên dữ liệu thu thập được.
2. **Near-Real-Time (Near-RT) RIC:** Hoạt động ở vòng lặp thời gian nhanh hơn (10 mili giây đến 1 giây), chịu trách nhiệm điều khiển và tối ưu hóa RAN gần thời gian thực. Nó thực thi các chính sách từ Non-RT RIC và chạy các ứng dụng được gọi là **xApps**.<sup>31</sup>

**xApps** là các ứng dụng phần mềm chuyên dụng (có thể từ bên thứ ba) chạy trên Near-RT RIC để thực hiện các chức năng nhận thức cụ thể. Ví dụ, "Nokia Advanced

"Traffic Steering xApp" là một ứng dụng dựa trên thuật toán AI/ML, chạy trên Near-RT RIC, để tự động và động tối ưu hóa việc phân phối lưu lượng, dẫn đến *sử dụng phổ biến tốt hơn* và cải thiện trải nghiệm người dùng.<sup>33</sup> Các xApp khác có thể thực hiện phát hiện bất thường dựa trên ML, tùy chỉnh RAN cho doanh nghiệp, hoặc tối ưu hóa năng lượng.

Kiến trúc O-RAN/RIC đại diện cho sự *kiến trúc hóa* và *dân chủ hóa* của chu trình nhận thức. Nó phân tách "bộ não" mạng: Non-RT RIC là trung tâm "học tập" (Learning) và "định hướng" (Orient) chiến lược; Near-RT RIC + xApps là trung tâm "quyết định" (Decide) và "hành động" (Act) chiến thuật. Điều này có nghĩa là "trí thông minh" của mạng giờ đây có thể lập trình được, có thể nâng cấp (chỉ cần cài đặt một xApp mới) và đến từ nhiều nhà cung cấp khác nhau.<sup>32</sup> Đây là sự hoàn thành giấc mơ về tính linh hoạt của Sóng Vô tuyến Định nghĩa bằng Phần mềm (SDR) (đã thảo luận trong Chương 3) ở quy mô toàn mạng.

**Bảng 14.2: Phân tích các Kỹ thuật Coi trọng Nhận thức trong 5G qua lăng kính 4G-CR**

Công nghệ 5G	Nguyên tắc CR Tương ứng: "Quan sát" (Observe)	Nguyên tắc CR Tương ứng: "Quyết định" (Decide)	Nguyên tắc CR Tương ứng: "Hành động" (Act)	Tác nhân Quyết định

DSS	Cảm biến trạng thái (4G/5G) của thiết bị	Lập lịch cấp Subframe	Phân bổ OFDM Symbol cho 4G hoặc 5G	Mạng lưới (gNB)
NR-U (LBT)	Cảm biến Kênh (LBT)	Thuật toán Back-off Ngẫu nhiên	Truyền (Transmit) / Giữ lại (Defer)	Thiết bị (UE/gNB)
Cắt lát Mạng (DeepCog)	Phân tích Dữ liệu Lưu lượng Lịch sử	Dự báo Nhu cầu & Cân bằng Chi phí/SLA	Cáp phát/Thu hồi Tài nguyên Lát mạng	Bộ điều phối (Orchestrator)
O-RAN RIC	Thu thập Dữ liệu RAN (qua giao diện E2)	Suy luận AI/ML (trong xApp)	Gửi lệnh Điều khiển (qua giao diện E2)	Near-RT RIC (xApp)

#### 14.4. Tầm nhìn 6G: Hướng tới Mạng Lưới Hoàn toàn Tự trị và Tích hợp AI Nguyên bản (AI-Native)

Nếu 5G tích hợp AI/ML như một công cụ *bổ trợ* (add-on) để quản lý sự phức tạp, thì tầm nhìn 6G là xây dựng một kiến trúc *nguyên bản* cho AI (AI-Native). Quá trình tiến hóa của nhận thức tiếp tục theo bốn vectơ chính:

##### 14.4.1. Mạng Lưới Tự động Hoàn toàn (Fully Autonomous Networks)

6G đặt mục tiêu vượt xa việc tối ưu hóa do AI điều khiển (như trong O-RAN) để đạt đến **Mạng Lưới Tự động Hoàn toàn (Fully Autonomous Networks)**. Đây là sự hiện thực hóa của Quản lý Không chạm (Zero-Touch Management - ZTM), nơi mạng lưới có thể tự lập kế hoạch (self-planning), tự cấu hình (self-configuration) và tự tối ưu hóa (self-optimization) mà không cần sự can thiệp của con người.

Một bước nhảy vọt về nhận thức trong 6G là sự trỗi dậy của **Quản lý dựa trên Ý định (Intent-Based Management)**. Trong mô hình này, nhà khai thác mạng không còn lập trình các quy tắc kỹ thuật cấp thấp. Thay vào đó, họ chỉ cần nêu "ý định" (intent) cấp cao, mang tính kinh doanh (ví dụ: "đảm bảo trải nghiệm metaverse đắm chìm cho 5.000 người dùng tại Sân vận động X").

Mạng lưới, được hỗ trợ bởi các mô hình AI tiên tiến như AI Tạo sinh (Generative AI) hoặc các Mô hình Ngôn ngữ Lớn (LLM), sẽ tự động *phân rã ý định* (intent decomposition). Nó sẽ "hiểu" yêu cầu ngữ nghĩa ("metaverse đắm chìm" có nghĩa là độ trễ  $< \$x\$$  ms, băng thông  $> \$y\$$  Gbps) và tự động biên dịch nó thành hàng ngàn cấu hình kỹ thuật cấp thấp (cấu hình lát mạng, định tuyến chùm tia, chính sách QoS).<sup>41</sup>

Đây là sự trừu tượng hóa cuối cùng của chu trình nhận thức. Mạng lưới 4G-CR "suy nghĩ" ở cấp độ vật lý (dBm). Mạng lưới 5G "suy nghĩ" ở cấp độ thống kê (dự báo lưu lượng). Mạng lưới 6G sẽ "suy nghĩ" ở *cấp độ ngữ nghĩa* (semantic level) — nó không chỉ dự đoán, mà còn *hiểu* (understand) và *suy luận* (reason).

#### **14.4.2. Bề mặt Thông minh Tái cấu hình (RIS): Biến Môi trường Truyền sóng thành Tác nhân Nhận thức**

Các nguyên tắc CR từ 4G đến 5G đều dựa trên một tiền đề cơ bản: môi trường truyền sóng (kênh) là một thực thể thụ động, không thể kiểm soát, và mạng lưới phải *thích*

ứng với nó. 6G, với **Bề mặt Thông minh Tái cấu hình (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS)** (còn gọi là Intelligent Reflecting Surfaces - IRS), đã đảo ngược hoàn toàn tiền đề này.

RIS là các bề mặt (metasurfaces) phẳng, có thể lập trình, bao gồm hàng ngàn phần tử nhỏ có thể điều chỉnh pha (và đôi khi là biên độ) của sóng vô tuyến đập vào nó.<sup>44</sup>

Thay vì chỉ thích ứng với suy hao và đa đường, RIS cho phép mạng lưới *chủ động kiểm soát* chúng.

Các nghiên cứu đang tích cực khám phá việc tích hợp RIS với các mạng CR (RIS-assisted CR).<sup>45</sup> Trong một kịch bản 6G-CR, một người dùng thứ cấp (SU) có thể tối ưu hóa *đồng thời* cả công suất phát của mình và các hệ số phản xạ (pha dịch chuyển) của một RIS gần đó.<sup>45</sup> Mục tiêu là tối đa hóa tốc độ dữ liệu của SU trong khi định hình chùm tia phản xạ để tạo ra một "vùng triệt" (null-space) tại vị trí của PU, do đó kiểm soát nhiễu.

Bước "Hành động" (Act) trong chu trình nhận thức 4G-CR là: "Thay đổi tần số hoặc công suất của *tôi*." Bước "Hành động" trong 6G-CR + RIS là: "Thay đổi công suất của *tôi* VÀ thay đổi cấu hình của *bức tường đồng kia* (RIS)." Thay vì *tìm kiếm* một kênh tốt, mạng lưới nhận thức 6G *tạo ra* một kênh tốt.

#### **14.4.3. Truyền thông Terahertz (THz): Yêu cầu Cấp thiết về Quản lý Phổ tần Nhận thức**

Để đạt được tốc độ dữ liệu hàng Terabit mỗi giây (Tbps), 6G đang hướng tới các băng tần phổ mới, đặc biệt là băng tần **Terahertz (THz)** (0.1–10 THz).<sup>48</sup> Tuy nhiên, phổ tần này đi kèm với những thách thức vật lý cực kỳ khắc nghiệt: suy hao đường truyền nghiêm trọng (severe path loss), hấp thụ phân tử cao (ví dụ: bởi hơi nước

trong khí quyển), và tính nhạy cảm cực cao với tắc nghẽn (blockage susceptibility).<sup>39</sup>

Trong môi trường "mong manh" này, các liên kết THz có tính định hướng cực cao (giống như tia laser) và có thể bị "phá vỡ" ngay lập tức bởi một bàn tay vẫy qua. Do đó, các khái niệm 4G-CR (tìm kiếm "lỗ hổng" phô tần) trở nên vô nghĩa. Thay vào đó, AI/ML trở thành một yêu cầu *bắt buộc* (mandatory) để vận hành.<sup>49</sup>

"Nhận thức" trong băng tần THz phải hoạt động ở tốc độ cực cao, với các mô hình AI/ML được nhúng sâu vào lớp vật lý (PHY) để thực hiện:

- Tạo chùm (beamforming) và ước tính kênh tức thời, thích ứng.<sup>43</sup>
- Dự đoán tắc nghẽn (blockage prediction) và chuyển giao chùm tia (beam handover) tiên đoán.
- Chia sẻ phô tần động do AI điều khiển (AI-driven dynamic spectrum sharing) để tối ưu hóa việc sử dụng và giảm nhiễu giữa các chùm tia hẹp.<sup>49</sup>

Thách thức nhận thức chính ở đây là *tốc độ* (velocity). Chu trình nhận thức "chậm" của O-RAN Near-RT (10ms) là quá chậm. Chu trình Quan sát-Quyết định-Hành động cho THz phải diễn ra ở thang thời gian *micro giây*, đòi hỏi các mô hình AI chuyên dụng được nhúng trực tiếp vào phần cứng transceiver.

#### **14.4.4. Cảm biến và Truyền thông Tích hợp (ISAC): Biên giới Nhận thức Mới**

Sự tiến hóa cuối cùng của khái niệm "nhận thức" nằm ở **Cảm biến và Truyền thông Tích hợp (Integrated Sensing and Communication - ISAC)** (còn gọi là Joint Communication and Sensing - JCAS). ISAC là một công nghệ 6G then chốt nhằm

hợp nhất chức năng *cảm biến* (sensing) và *truyền thông* (communication) vào cùng một dạng sóng, cùng một phô tần, và cùng một phần cứng.

Điều này tạo ra một sự thay đổi cơ bản trong ý nghĩa của từ "cảm biến".

- Trong **4G-CR**, "cảm biến" (sensing) có nghĩa là *cảm biến phô tần* (spectrum sensing) — phát hiện năng lượng RF từ các máy phát khác.
- Trong **6G-ISAC**, "cảm biến" (sensing) có nghĩa là *cảm biến môi trường vật lý* (physical environment sensing) — sử dụng sóng vô tuyến như một hệ thống radar để phát hiện vật thể, theo dõi UAV, lập bản đồ môi trường, và thậm chí là cảm biến sinh lý (physiological sensing).

ISAC đại diện cho sự *hoàn thành theo nghĩa đen* (literal fulfillment) của thuật ngữ "Sóng Vô tuyến Nhận thức". Lần đầu tiên, sóng vô tuyến không chỉ "nhận thức" về các sóng vô tuyến khác (môi trường RF); nó thực sự "nhận thức" về thế giới vật lý xung quanh nó. Bước "Quan sát" (Observe) trong chu trình nhận thức đã phát triển từ "đo lường năng lượng RF" thành "radar môi trường". Toàn bộ mạng lưới 6G trở thành một hệ thống cảm biến phân tán không lồ.

## 14.5. Thách thức An ninh và Tin cậy trong Kỷ nguyên Mạng Tự trị

Sự tiến hóa hướng tới một mạng lưới hoàn toàn tự trị, dựa trên AI và có khả năng cảm biến thế giới vật lý cũng tạo ra một loạt các thách thức mới và nghiêm trọng về an ninh, tin cậy và quyền riêng tư. Khi "bộ não" của mạng lưới trở nên thông minh hơn, chính "bộ não" đó trở thành bề mặt tấn công chính.

### 14.5.1. Bề mặt Tấn công Mới: Các Mối đe dọa đối với Mô hình AI/ML

Việc 6G phụ thuộc vào AI/ML cho các chức năng cốt lõi (từ O-RAN RIC đến quản lý ZTM) sẽ mở ra một lĩnh vực tấn công mới nhằm vào chính các mô hình AI. Mỗi

đe dọa không còn là *nhiễu* (interference) mà là *sự lừa dối* (deception).<sup>54</sup> Ba loại tấn công chính bao gồm:

1. **Tấn công Đối kháng (Adversarial Attacks):** Kẻ tấn công tạo ra các đầu vào (ví dụ: tín hiệu RF) được chế tạo đặc biệt, có vẻ bình thường với con người (hoặc các hệ thống dựa trên quy tắc) nhưng được thiết kế để *đánh lừa* một mô hình AI đã huấn luyện đưa ra quyết định sai lầm.<sup>55</sup> Ví dụ: một kẻ tấn công có thể tạo ra một tín hiệu RF khiến xApp phân loại tín hiệu của RIC (14.3.4) nhận nhầm một tín hiệu độc hại thành tín hiệu lành tính.
2. **Tấn công Nhiễm độc Dữ liệu (Data Poisoning):** Thay vì tấn công giai đoạn *suy luận* (inference), kẻ tấn công nhắm vào giai đoạn *huấn luyện* (training). Bằng cách tiêm một lượng nhỏ dữ liệu độc hại, được chế tạo cẩn thận vào tập dữ liệu huấn luyện (ví dụ: gửi các báo cáo đo lường giả mạo lên Non-RT RIC), kẻ tấn công có thể làm hỏng mô hình ngay từ gốc, tạo ra các "cửa hậu" (backdoors) hoặc làm giảm hiệu suất của mô hình.<sup>55</sup>
3. **Tấn công Trích xuất/Đảo ngược Mô hình (Model Extraction/Inversion):** Kẻ tấn công truy vấn một mô hình AI đang hoạt động (ví dụ: một xApp) và phân tích các đầu ra của nó để *sao chép* (đánh cắp) chính mô hình độc quyền đó, hoặc tệ hơn, *suy ngược* (invert) để tái tạo lại dữ liệu huấn luyện nhạy cảm ban đầu, gây ra rò rỉ quyền riêng tư.<sup>54</sup>

Trong 4G-CR, mối đe dọa lớn nhất là một vấn đề kỹ thuật (ví dụ: vấn đề PU ẩn). Trong 6G, mối đe dọa lớn nhất là một vấn đề *nhận thức*: một đối thủ thông minh *đánh lừa* hệ thống nhận thức của mạng. Do đó, an ninh mạng 6G phải phát triển từ "An ninh Mạng" (Network Security) thành "An ninh Nhận thức" (Cognitive Security) hay "AI Đáng tin cậy" (Trustworthy AI). Các chiến lược giảm thiểu bao

gồm huấn luyện đối kháng (adversarial training)<sup>60</sup>, các kỹ thuật lọc gradient (như Krum) để chống nhiễm độc<sup>61</sup>, và quyền riêng tư vi phân.<sup>62</sup>

**Bảng 14.3: Các Mối đe dọa An ninh Mới và Chiến lược Giảm thiểu trong Mạng 6G Tự trị**

Mối đe dọa AI	Giai đoạn Bị tấn công (Vòng đời AI)	Mô tả Tấn công trong Mạng 6G	Chiến lược Giảm thiểu
Nhiễm độc Dữ liệu (Data Poisoning)	Huấn luyện (Training)	Kẻ tấn công gửi dữ liệu đo lường giả mạo (ví dụ: chất lượng kênh) đến Non-RT RIC để làm hỏng mô hình tối ưu hóa.[59]	Lọc Gradient (Krum, Trimmed Mean) <sup>61</sup> , Phát hiện Dữ liệu Bất thường, Xác minh Nguồn dữ liệu.
Tấn công Đối kháng (Adversarial Attacks)	Suy luận (Inference)	Kẻ tấn công tạo tín hiệu RF đặc biệt để lừa xApp phân loại tín hiệu, gây ra quyết định sai lầm về quản lý phổ tần. <sup>54</sup>	Huấn luyện Đối kháng <sup>60</sup> , Phát hiện Đầu vào Bất thường, Chung cát Mô hình.[63]

<b>Đảo ngược Mô hình (Model Inversion)</b>	Suy luận (Inference)	Kẻ tấn công truy vấn xApp quản lý di động để suy ra các mẫu di chuyển nhạy cảm của người dùng (dữ liệu huấn luyện). <sup>54</sup>	Quyền riêng tư vi phân (Differential Privacy) <sup>62</sup> , Hạn chế Tốc độ Truy vấn.[57]
--	----------------------	---	--

#### 14.5.2. Kiến trúc Không Tin cậy (Zero Trust Architecture - ZTA)

Hệ quả kiến trúc an ninh bắt buộc của một mạng lưới tự trị, phân tán và dựa trên AI là **Kiến trúc Không Tin cậy (Zero Trust Architecture - ZTA)**.<sup>64</sup> Mô hình an ninh "lâu đài và hào nước" truyền thống (tin tưởng mọi thứ *bên trong* vành đai) hoàn toàn sụp đổ trong 6G. Một mạng lưới 6G được *phân tán* (như O-RAN với các xApps của bên thứ ba), *ảo hóa* (các chức năng mạng chạy như phần mềm trên các đám mây), và *đa nhà cung cấp* (multi-vendor).<sup>65</sup> Không còn khái niệm "bên trong" đáng tin cậy.

ZTA hoạt động theo nguyên tắc "không bao giờ tin cậy, luôn xác minh" (never trust, always verify).<sup>66</sup> Mọi yêu cầu truy cập, ngay cả từ một chức năng mạng (NF) "bên trong" khác, đều phải được xác thực, ủy quyền và giám sát liên tục.<sup>67</sup>

3GPP đã và đang tích hợp các *công cụ hỗ trợ* (enablers) cho ZTA trong nhiều năm, chẳng hạn như bảo vệ giao diện nội bộ bằng IPsec và TLS, và xác thực lẫn nhau.<sup>68</sup>

Các nghiên cứu 5G gần đây (ví dụ: TR 33.894, TR 33.794) đã tập trung vào việc ánh xạ các nguyên lý ZTA vào Kiến trúc Dựa trên Dịch vụ (SBA) của 5G và điều này

dự kiến sẽ tiếp tục là nền tảng cho 6G.<sup>68</sup> Sự tự trị và phân tán của 6G *chỉ có thể tồn tại* một cách an toàn bên trong một khuôn khổ ZTA.

### **14.5.3. Thách thức về Quyền riêng tư trong Kỹ nguyên Cảm biến Mạng (ISAC)**

Như đã thảo luận trong 14.4.4, khả năng ISAC của 6G biến mạng lưới thành một hệ thống cảm biến môi trường không lồ. Điều này tạo ra các rủi ro *chưa từng có* về quyền riêng tư.<sup>53</sup> Mạng lưới không chỉ biết bạn đang *giao tiếp* gì; nó có thể "biết" bạn đang *ở đâu* (theo dõi vị trí), bạn đang *làm gì* (lập hồ sơ hành vi), và thậm chí cả *trạng thái sinh lý* của bạn.<sup>51</sup>

Đây là một thách thức xã hội-kỹ thuật. Các nhà quản lý chắc chắn sẽ đặt ra các quy tắc nghiêm ngặt về việc thu thập và sử dụng dữ liệu cảm biến này.<sup>53</sup> Giải pháp kỹ thuật nằm ở **Các Công nghệ Tăng cường Quyền riêng tư (Privacy Enhancing Technologies - PETs)**.<sup>51</sup> Các công nghệ này nhằm mục đích phá vỡ mối liên kết giữa lợi ích kỹ thuật (tối ưu hóa mạng) và rủi ro riêng tư (giám sát). Các ví dụ bao gồm:

- **Ẩn danh hóa (Anonymization):** Xuất dữ liệu cảm biến sau khi đã loại bỏ thông tin nhận dạng cá nhân.
- **Học tập Liên kết (Federated Learning):** Giữ dữ liệu thô nhạy cảm trên thiết bị của người dùng và chỉ chia sẻ các cập nhật mô hình (model updates) đã được ẩn danh với mạng lưới.

- **Quyền riêng tư vi phân (Differential Privacy):** Thêm nhiều toán học vào dữ liệu hoặc mô hình để bảo vệ thông tin cá nhân trong khi vẫn cho phép phân tích thống kê tổng hợp.<sup>71</sup>
- **Mã hóa Đồng cấu (Homomorphic Encryption - HE):** Một công nghệ mang tính cách mạng cho phép thực hiện các phép toán (ví dụ: chạy một mô hình AI) trực tiếp trên dữ liệu *đã được mã hóa* mà không cần giải mã nó.<sup>53</sup> Về mặt lý thuyết, HE cho phép bộ não nhận thức của 6G (ví dụ: RIC) tối ưu hóa một liên kết dựa trên dữ liệu cảm biến mà nó không bao giờ "nhìn thấy" ở dạng rõ, qua đó tách rời hành động nhận thức khỏi dữ liệu nhận thức nhạy cảm.<sup>77</sup>

## **14.6. Lộ trình Tiêu chuẩn hóa và Thách thức Pháp lý: Từ 3GPP Rel-18 đến Tầm nhìn ITU-R IMT-2030**

Tầm nhìn về một mạng lưới tự trị, nhận thức 6G phải được hiện thực hóa thông qua các nỗ lực tiêu chuẩn hóa toàn cầu và điều hướng các khung pháp lý phức tạp.

### **14.6.1. Tiêu chuẩn hóa AI/ML trong 3GPP (5G-Advanced)**

3GPP, cơ quan tiêu chuẩn hóa di động hàng đầu, đã bắt đầu công việc tích hợp AI/ML vào các thông số kỹ thuật 5G-Advanced, chủ yếu trong các nhóm SA5 (Quản lý) và RAN3 (Kiến trúc RAN).<sup>78</sup>

**Release 18** (hoàn thành 2023-2024) là một cột mốc quan trọng, giới thiệu một khuôn khổ cho Quản lý Vòng đời (Lifecycle Management - LCM) của các mô hình AI/ML.<sup>78</sup> 3GPP định nghĩa các chức năng logic tiêu chuẩn như "ML training function" (chịu trách nhiệm huấn luyện) và "inference function" (chịu trách nhiệm thực thi) và cách chúng được quản lý, giám sát và triển khai trong mạng 5G.<sup>78</sup>

Một điểm triết lý quan trọng là 3GPP (hiện tại) **không tiêu chuẩn hóa chính các mô hình AI/ML** (ví dụ: kiến trúc nơ-ron cụ thể).<sup>80</sup> Làm như vậy sẽ kìm hãm sự đổi mới. Thay vào đó, 3GPP đang tiêu chuẩn hóa *hệ tầng, giao diện, và quy trình* xung quanh các mô hình AI/ML:

- Các cơ chế *thu thập dữ liệu* (data collection) tiêu chuẩn.<sup>80</sup>
- Các quy trình để *kích hoạt/hủy kích hoạt* (activation/deactivation) một mô hình.<sup>80</sup>
- Các giao diện để *giám sát hiệu suất* (performance monitoring) của mô hình.<sup>81</sup>
- Định nghĩa các *đầu vào* (inputs), *đầu ra* (outputs), và *phản hồi* (feedback) tiêu chuẩn cho một "hộp đen" AI.<sup>79</sup>

Cách tiếp cận "hộp đen có thể quản lý được" này nhằm mục đích cân bằng giữa *sự đổi mới* (cho phép các nhà cung cấp cạnh tranh về mô hình AI tốt nhất) và *khả năng tương tác* (đảm bảo rằng bất kỳ mô hình tuân thủ API nào cũng có thể được quản lý bởi hệ thống của nhà mạng).

#### **14.6.2. Lộ trình hướng tới 6G (IMT-2030)**

Quá trình 6G đang được tiến hành song song tại ITU-R (cơ quan toàn cầu đặt ra tầm nhìn) và 3GPP (cơ quan viết thông số kỹ thuật).

- **Vai trò của ITU-R:** ITU-R (Liên minh Viễn thông Quốc tế - Ban Vô tuyến) đã đặt tên cho 6G là "IMT-2030".<sup>82</sup> Họ đã hoàn thành các báo cáo Tầm nhìn và Xu hướng Công nghệ.<sup>82</sup> Giai đoạn quan trọng hiện tại (2024-2026) là xác định các yêu cầu kỹ thuật và phương pháp đánh giá.<sup>83</sup> Các tổ chức (như

3GPP) sẽ nộp các công nghệ 6G của họ để đánh giá trong giai đoạn 2027-2029, với quyết định cuối cùng về thông số kỹ thuật IMT-2030 dự kiến vào năm 2030.<sup>83</sup>

- **Vai trò của 3GPP:** 3GPP được dự đoán sẽ là cơ quan kỹ thuật chính nộp công nghệ cho ITU-R.<sup>84</sup> Lộ trình của 3GPP bao gồm:

- **Release 19 và 20 (2024-2026):** Sẽ là các *Hạng mục Nghiên cứu* (Study Items) về các yêu cầu và công nghệ 6G, bao gồm cả AI/ML nguyên bản.<sup>83</sup>
- **Release 21 (dự kiến ~2028-2029):** Sẽ là *Hạng mục Công việc* (Work Item) đầu tiên, chứa các thông số kỹ thuật 6G có thể triển khai được, kịp thời cho các đợt triển khai thương mại đầu tiên vào năm 2030.<sup>80</sup>

**Bảng 14.4: Lộ trình Tiêu chuẩn hóa 6G (ITU-R và 3GPP) (Dự kiến)**

Giai đoạn/Năm	Hoạt động của ITU-R (cho IMT-2030)	Hoạt động của 3GPP
2023-2024	Hoàn thành Tầm nhìn & Khung IMT-2030 <sup>82</sup>	Bắt đầu Nghiên cứu 6G (Release 19) <sup>83</sup>
2024-2026	Xác định Yêu cầu Kỹ thuật & Phương pháp Đánh giá <sup>83</sup>	Nghiên cứu Kỹ thuật 6G chuyên sâu (Release 19/20) <sup>83</sup>

<b>2027-2029</b>	Nhận & Đánh giá các Hồ sơ Công nghệ 6G <sup>83</sup>	Hạng mục Công việc 6G đầu tiên (Release 21) <sup>80</sup>
<b>~2030</b>	Phê duyệt Thông số kỹ thuật IMT-2030 cuối cùng <sup>83</sup>	Hoàn thành Release 21, bắt đầu triển khai thương mại

#### **14.6.3. Những cân nhắc về Quy định và Chính sách Mới**

Sự tiến hóa của nhận thức từ 4G-CR sang 6G-ISAC không chỉ là một thách thức kỹ thuật mà còn là một thách thức *pháp lý* (regulatory).

- **Thách thức về Phổ tần:** Việc sử dụng các băng tần THz và các mô hình chia sẻ phổ tần động phức tạp (do AI điều khiển) đòi hỏi các *khuôn khổ cấp phép mới*. Bài học từ 4G-CR (TVWS) cho thấy sự chậm trễ trong việc thông qua quy định là một rào cản lớn hơn cả công nghệ. Hơn nữa, một số nhà khai thác mạng vẫn còn "bảo thủ" về việc chia sẻ phổ tần được cấp phép quý giá của họ, trừ khi có một mô hình kinh doanh rõ ràng.
- **Thách thức về Quyền riêng tư:** Như đã phân tích, khả năng "cảm biến" môi trường của ISAC đặt ra các vấn đề nghiêm trọng về quyền riêng tư.<sup>53</sup> Các nhà quản lý trên toàn thế giới sẽ phải vật lộn với việc làm thế nào để cho phép các lợi ích kỹ thuật của ISAC (ví dụ: an toàn giao thông) mà không cho phép giám sát toàn diện.<sup>53</sup>

Rào cản lớn nhất đối với một mạng lưới nhận thức 6G hoàn toàn có thể không phải là kỹ thuật, mà là pháp lý và kinh tế. Công nghệ, chính sách và mô hình kinh doanh tạo thành một vòng lặp phản hồi. Sự thành công của tầm nhìn 6G-CR cuối cùng phụ

thuộc vào khả năng của các kỹ sư, nhà hoạch định chính sách và các nhà lãnh đạo doanh nghiệp trong việc cùng nhau thiết kế một hệ thống vừa thông minh, vừa đáng tin cậy, và vừa tôn trọng quyền riêng tư.

## **Chương 15: Sự phát triển của các Nguyên tắc 4G-CR thành 5G và xa hơn nữa**

### **15.1. Giới thiệu: Sự Biến đổi từ Nhận thức Vô tuyến (CR) sang Trí tuệ AI-Native**

Các chương trước của hướng dẫn này đã thiết lập một cách có hệ thống Vô tuyến Nhận thức (Cognitive Radio - CR) như một công nghệ nền tảng, ban đầu được hình thành như một giải pháp thiết yếu cho vấn đề khan hiếm phổ tần ngày càng tăng trong kỷ nguyên 4G.<sup>1</sup> Bằng cách cho phép người dùng thứ cấp (SU) truy cập một cách cơ hội vào các băng tần được cấp phép khi chúng không được người dùng sơ cấp (PU) sử dụng, CR đã đưa ra một mô hình linh hoạt để tối đa hóa hiệu quả sử dụng tài nguyên vô tuyến. Tuy nhiên, khi ngành công nghiệp di động phát triển vượt xa 4G, các thách thức đã leo thang theo cấp số nhân. Mạng 5G và các hệ thống 6G trong tương lai phải đổi mới với một bối cảnh phức tạp hơn nhiều, đặc trưng bởi sự dày đặc hóa mạng lưới cực độ, nhu cầu về tốc độ dữ liệu terabit/giây, và sự tinh nghẽn nghiêm trọng của phổ tần dưới 6 GHz.<sup>2</sup>

Để đáp ứng những yêu cầu này, tầm nhìn cho 6G không còn là một bản nâng cấp lặp lại; đó là một sự chuyển đổi mô hình hoàn toàn sang một mạng lưới "AI-native" (trí tuệ nhân tạo nguyên bản).<sup>3</sup> Đây là một "mạng lưới tinh gọn" (lean network) được thiết kế ngay từ đầu để sử dụng trí tuệ nhằm thích ứng với môi trường của nó.<sup>6</sup> Tầm

nhìn này bao gồm các khái niệm như Hệ thống Giao tiếp Nhận thức Cộng tác (Collaborative Cognitive Communication - 3C), nơi AI, mạng lưới và thậm chí cả hành vi của con người được tích hợp một cách liền mạch.<sup>7</sup> Động lực chính thúc đẩy kiến trúc này là nhu cầu về "tính linh hoạt" (flexibility)<sup>8</sup>, và điều này chỉ có thể đạt được thông qua tự động hóa dựa trên AI, hứa hẹn mang lại những bước nhảy vọt về hiệu suất, chẳng hạn như tăng hiệu quả năng lượng lên 100 lần.<sup>9</sup>

Trong bối cảnh biến đổi này, bản thân thuật ngữ "Vô tuyến Nhận thức" đang trải qua một sự thay đổi về ngữ nghĩa. Thay vì là một công nghệ bổ trợ (add-on) riêng biệt như trong 4G, các nguyên tắc cốt lõi của CR—cảm nhận, quyết định, và hành động—đang trở nên phổ biến. Chúng đang được hấp thụ và trở thành cơ chế vận hành cơ bản của toàn bộ hệ thống 6G, được tự động hóa hoàn toàn bởi Trí tuệ Nhân tạo (AI) và Học máy (ML). Vòng lặp CR không còn là một chức năng đặc biệt của một thiết bị cụ thể; thay vào đó, *toàn bộ mạng lưới* đang trở thành một thực thể nhận thức duy nhất.

Sự phát triển này cũng báo hiệu một sự thay đổi cơ bản trong trọng tâm. CR của 4G chủ yếu tập trung vào mạng lưới, giải quyết một vấn đề vật lý: "Làm thế nào để tìm ra các lỗ hỏng phổi tàn?". Ngược lại, mạng lưới nhận thức 6G tập trung vào dịch vụ và con người.<sup>6</sup> Thành phần "cảm nhận" của vòng lặp đang mở rộng từ việc chỉ cảm nhận các tín hiệu RF sang cảm nhận bối cảnh cấp cao hơn, chẳng hạn như ý định của người dùng, yêu cầu ứng dụng, và môi trường vật lý. Tương ứng, thành phần "hành động" không còn chỉ là "thay đổi tàn số", mà là "chủ động tái cấu hình các lát mạng (network slices) và tài nguyên tính toán để đáp ứng một nhu cầu *được dự đoán*." Chương này sẽ phân tích sự biến đổi sâu sắc này, khám phá cách chu trình CR cổ điển đang được tái định nghĩa bởi AI/ML, cách các tiêu chuẩn công nghiệp đang

hiện thực hóa các khái niệm này, và cách các nguyên tắc nhận thức đang được áp dụng cho các miền hoàn toàn mới, từ không gian đến chính môi trường truyền sóng.

## 15.2. Tái định nghĩa Chu trình Nhận thức trong 5G-Advanced và 6G

Sự tích hợp của AI/ML không chỉ tối ưu hóa chu trình nhận thức cổ điển (cảm nhận, quyết định, hành động); nó đang định nghĩa lại hoàn toàn từng giai đoạn. Các phương pháp dựa trên quy tắc đơn giản của 4G đang được thay thế bằng các mô hình dự đoán, phân tán và thích ứng cao, cho phép mạng lưới hoạt động với mức độ tự chủ chưa từng có.

### 15.2.1. "Sense" (Cảm nhận): Dò Phổ Động lực học dựa trên AI/ML

Giai đoạn "cảm nhận" là nền tảng của bất kỳ mạng lưới nhận thức nào, vì nó cung cấp nhận thức về môi trường.<sup>11</sup> Tuy nhiên, trong các mạng 5G/6G dày đặc và động, các phương pháp truyền thống như dò năng lượng là không đủ. Chúng dễ bị ảnh hưởng bởi nhiều và không thể xử lý hiệu quả sự phức tạp của dữ liệu chuỗi thời gian, dẫn đến tỷ lệ phân loại sai cao.<sup>12</sup> Do đó, AI/ML, đặc biệt là Học Sâu (Deep Learning - DL), đã trở thành công cụ thiết yếu để kích hoạt khả năng dò phô mạnh mẽ và chính xác.<sup>12</sup>

Sự thay đổi này được minh họa rõ nhất bằng sự phát triển của các framework dò phô dựa trên DL. **DeepSense**, một framework tiên phong, áp dụng Mạng Nơ-ron Tích chập (Convolutional Neural Networks - CNNs)—một công nghệ chủ lực trong thị giác máy tính—cho nhiệm vụ dò phô.<sup>15</sup> Thay vì xử lý các tín hiệu RF thô, DeepSense biến đổi chúng thành *phô đồ* (spectrograms), là các biểu diễn trực quan của năng lượng phô tán theo thời gian. CNN sau đó có thể "nhìn" và *nhận dạng* các mẫu tín hiệu trong các hình ảnh này.<sup>15</sup> Điều này đại diện cho một bước nhảy vọt về

khái niệm: giai đoạn "cảm nhận" đã phát triển từ một câu hỏi nhị phân ("có/không có sự hiện diện của PU?")<sup>11</sup> sang một nhiệm vụ *phân loại* ("tín hiệu này là gì?").

Sự tiến hóa này tiếp tục với các kỹ thuật tiên tiến hơn như **Phân đoạn Ngữ nghĩa Phổ tần (Semantic Spectrum Segmentation)**.<sup>15</sup> Sử dụng các kiến trúc như U-Net, kỹ thuật này vượt qua việc phân loại (gán một nhãn cho toàn bộ tín hiệu) để thực hiện phân đoạn (xác định ranh giới thời gian-tần số chính xác của nhiều tín hiệu *đồng thời và không chéo*). Mạng lưới giờ đây không chỉ *phát hiện* tín hiệu; nó *hiểu* cấu trúc chi tiết của môi trường RF.<sup>15</sup> Để giải quyết các yêu cầu về độ trễ trong thời gian thực, các kiến trúc song song như **DeepSweep** đã được phát triển, sử dụng các CNN nhẹ để giảm đáng kể độ trễ suy luận.<sup>15</sup>

Thách thức cuối cùng là khả năng mở rộng. Làm thế nào một mạng lưới với hàng tỷ thiết bị 6G<sup>5</sup> có thể tổng hợp thông tin cảm nhận một cách hiệu quả? Một máy chủ trung tâm là không khả thi và gây ra những lo ngại nghiêm trọng về quyền riêng tư. Câu trả lời nằm ở các kiến trúc AI phân tán. **Học Liên kết (Federated Learning - FL)**<sup>17</sup> cung cấp một cơ chế trong đó các mô hình cảm nhận được huấn luyện *tại biên* (trên chính các thiết bị). Chỉ các cập nhật mô hình (trọng số nơ-ron), chứ không phải dữ liệu RF thô, được gửi đến một máy chủ trung tâm để tổng hợp. Điều này bảo vệ quyền riêng tư của người dùng. Hơn nữa, **Học Tăng cường Đa Tác nhân (Multi-Agent Reinforcement Learning - MARL)**<sup>18</sup> cho phép các tác nhân (thiết bị) này hợp tác và đàm phán các chiến lược cảm nhận và truy cập một cách tự trị. Sự kết hợp của các công nghệ này biến hàng tỷ thiết bị 6G thành một "mảng cảm biến nhận thức" không lồ, phân tán và bảo vệ quyền riêng tư, tạo thành "bộ não cảm nhận" toàn cầu cho mạng 6G.

## **15.2.2. "Decide" (Quyết định): Quản lý Tài nguyên Vô tuyến (RRM)**

### **Thông minh và Chức năng Nhận thức Lõi**

Trong CR 4G, logic "quyết định" thường là đơn giản và cục bộ. Trong 5G, logic này đã được trừu tượng hóa, ảo hóa và tập trung hóa thành một bộ não mạng lưới mạnh mẽ, được kích hoạt bởi kiến trúc lõi mới. Lõi 5G (5GC) loại bỏ kiến trúc dựa trên nút, cung nhǎc của 4G để chuyển sang **Kiến trúc Dựa trên Dịch vụ (Service-Based Architecture - SBA)**.<sup>19</sup>

Trong SBA, mạng lưới được phân tách thành một tập hợp các **Chức năng Mạng (Network Functions - NFs)** được ảo hóa, hoạt động như các microservice.<sup>23</sup> Mỗi NF (ví dụ: Chức năng Quản lý Truy cập và Di động - AMF, Chức năng Quản lý Phiên - SMF) đăng ký các khả năng của nó với **Chức năng Kho lưu trữ Mạng (Network Repository Function - NRF)**.<sup>20</sup> Bất kỳ NF nào khác sau đó cũng có thể khám phá và tiêu thụ các dịch vụ đó thông qua các Giao diện Lập trình Ứng dụng (APIs) được tiêu chuẩn hóa.<sup>22</sup> Kiến trúc mô-đun, "plug-and-play" này tạo ra sự linh hoạt và nhanh nhẹn<sup>25</sup> mà nghiên cứu CR luôn khao khát; các "chức năng nhận thức" mới có thể được thêm vào mạng lưới động như bất kỳ microservice nào khác.

Trung tâm của khả năng nhận thức này là một NF chuyên dụng: **Chức năng Phân tích Dữ liệu Mạng (Network Data Analytics Function - NWDAF)**.<sup>27</sup> NWDAF về cơ bản hoạt động như "bộ não" phân tích trung tâm của 5GC.

- **Đầu vào (Inputs):** Nó thu thập dữ liệu trạng thái và đo lường từ tất cả các NF khác trong lõi, từ RAN, và thậm chí từ các UE riêng lẻ.<sup>27</sup>

- **Đầu ra (Outputs):** Nó cung cấp *các dịch vụ phân tích*—cả thống kê lịch sử và *dự đoán* tương lai—trở lại mạng lưới.<sup>27</sup> Các phân tích này bao gồm dự đoán về mức tải của lát mạng, tải NF, kiểu di động của UE, và trải nghiệm dịch vụ (QoE) của người dùng.<sup>27</sup>

Các NF khác sau đó *tiêu thụ* các phân tích này để đưa ra các quyết định thông minh. Ví dụ, Chức năng Chính sách (PCF) có thể tiêu thụ dự đoán "tải lát" của NWDAF để chủ động điều chỉnh các quy tắc QoS, tránh tắc nghẽn trước khi nó xảy ra.<sup>31</sup> Điều này cho phép **tự động hóa vòng lặp kín** (closed-loop automation).<sup>32</sup> NWDAF được thiết kế rõ ràng để hỗ trợ các mô hình AI/ML và thậm chí cả Học Liên kết để huấn luyện phân tán.<sup>29</sup>

Tuy nhiên, "bộ não" này không phải là một khối đơn lẻ. Nó là một *hệ thống nhận thức phân cấp*. NWDAF tạo thành **vòng lặp vĩ mô** (macro-loop), đưa ra các quyết định chiến lược, không theo thời gian thực (ví dụ: "dự đoán tải slice trong giờ tới"). Song song đó, 3GPP đang chuẩn hóa AI/ML trực tiếp *bên trong Mạng Truy cập Vô tuyến Thé hệ Mới (NG-RAN)*.<sup>33</sup> 3GPP Release 18 tập trung vào AI/ML cho tối ưu hóa di động, chẳng hạn như dự đoán quỹ đạo của UE để chuyển giao tốt hơn.<sup>3</sup> Release 19 mở rộng điều này sang quản lý Cắt lát Mạng và Tối ưu hóa Vùng phủ sóng & Dung lượng (CCO).<sup>5</sup> Đây là **vòng lặp vi mô** (micro-loop), đưa ra các quyết định chiến thuật, theo thời gian thực (ví dụ: "dự đoán chùm tia tốt nhất cho UE này trong 100ms tới"). Vòng lặp vi mô (NWDAF) đặt chính sách cho vòng lặp vi mô (RAN), và vòng lặp vi mô cung cấp dữ liệu huấn luyện trở lại vòng lặp vi mô. Kiến

trúc phân cấp này là cách duy nhất để quản lý sự khác biệt lớn về quy mô thời gian cần thiết cho một mạng lưới nhận thức hoàn toàn.

### **15.2.3. "Act" (Hành động): Từ Phân bổ Phổ biến đến Kiểm soát Môi trường Truyền sóng**

Giai đoạn "hành động" của CR 4G về cơ bản là thụ động: "kênh đang bận, tôi sẽ tránh nó." Ngay cả DSA của 5G cũng chủ yếu là *hợp tác*: "Tôi sẽ truyền trong *khe thời gian đã đàm phán*." 6G giới thiệu một sự thay đổi mô hình triệt để sang *kiểm soát chủ động*, được kích hoạt bởi **Bề mặt Thông minh có thể Cấu hình lại (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RISs)**.<sup>34</sup>

RIS, còn được gọi là Bề mặt Phản xạ Thông minh (IRS), là một bề mặt phản xạ, siêu vật liệu bao gồm một mảng lớn các phần tử thụ động, chi phí thấp.<sup>34</sup> Mỗi phần tử có thể được điều khiển bằng kỹ thuật số để tạo ra một sự dịch chuyển pha cụ thể cho tín hiệu RF tới. Bằng cách lập trình tập thể các dịch chuyển pha này, RIS có thể điều khiển môi trường truyền sóng, ví dụ, phản xạ một tín hiệu xung quanh một vật cản để tạo ra một *đường tầm nhìn thẳng (LoS) ảo*.<sup>36</sup> Về cơ bản, điều này biến môi trường không dây từ một yếu tố ngẫu nhiên, bất lợi thành một tài nguyên có thể lập trình được. Giai đoạn "hành động" đã phát triển từ "thay đổi tần số" thành "tái lập trình chính kênh truyền."

Việc tích hợp RIS với các mạng CR là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng.<sup>37</sup> Các kiến trúc tiên tiến như **STAR-RIS** (RIS Truyền và Phản xạ Đồng thời) đã được đề xuất, có thể điều khiển tín hiệu trong toàn bộ không gian 360 độ, không chỉ 180 độ như RIS truyền thống.<sup>37</sup>

Sự kết hợp này tạo ra một mô hình *có tổng dương* (positive-sum) cho việc chia sẻ phổ tần. CR truyền thông là một trò chơi *có tổng bằng không* (zero-sum): SU "đánh cắp" tài nguyên từ PU, và mục tiêu duy nhất là giữ cho tác động tiêu cực ở mức tối thiểu.<sup>1</sup> Ngược lại, hãy xem xét một kịch bản CR-STAR-RIS<sup>37</sup>:

1. SU muốn truyền tín hiệu mà không gây nhiễu cho PU.
2. SU lập trình STAR-RIS.
3. RIS *đồng thời* (a) **phản xạ** tín hiệu của SU về phía máy thu của nó, tạo ra một chùm tia tập trung mạnh mẽ, và (b) **truyền** một phần tín hiệu của SU *xuyên qua* bề mặt về phía PU, nhưng với một sự dịch chuyển pha được tính toán cẩn thận để tạo ra *sự giao thoa phá hủy*, chủ động *triệt tiêu* nhiễu của SU tại máy thu của PU.<sup>37</sup>

Trong kịch bản này, SU đạt được tốc độ dữ liệu cao trong khi PU không thấy nhiễu, hoặc thậm chí có thể được RIS hỗ trợ. Mô hình này chuyển từ "cùng tồn tại" (không gây hại) sang "cộng sinh" (chủ động quản lý), thể hiện sự trưởng thành cuối cùng của hành động nhận thức.

### 15.3. Các Cơ chế Chia sẻ Phổ tần Tiên tiến: Sự hội tụ của 3GPP và IEEE

Trong khi nghiên cứu học thuật tập trung vào các khái niệm 6G tương lai, các cơ quan tiêu chuẩn hóa như 3GPP đã và đang triển khai các phiên bản thực dụng, do ngành công nghiệp thúc đẩy của việc chia sẻ phổ tần. Các tiêu chuẩn này cho thấy sự hội tụ từng bước giữa các triết lý cạnh tranh của thế giới viễn thông (3GPP) và thế giới CNTT (IEEE).

### **15.3.1. Phân tích Kỹ thuật: Dynamic Spectrum Sharing (DSS) trong 3GPP (Rel 15-17)**

Dynamic Spectrum Sharing (DSS) là một công nghệ được 3GPP tiêu chuẩn hóa cho phép các nhà khai thác mạng di động (MNOs) triển khai cả 4G LTE và 5G New Radio (NR) trong *cùng một băng tần*.<sup>39</sup> Thay vì phân chia vĩnh viễn (refarming) phổ tần, DSS phân bổ động các tài nguyên vô tuyến giữa hai công nghệ dựa trên nhu cầu của người dùng theo thời gian thực.<sup>39</sup>

Tuy nhiên, điều quan trọng là phải hiểu DSS là gì và không phải là gì. Đây *không phải* là Vô tuyến Nhận thức "truy cập cơ hội" (opportunistic) theo nghĩa học thuật. Thay vào đó, nó là một hình thức *ghép kênh theo thời gian* tinh vi. "Động" trong DSS hoạt động ở mức *khung con 1ms* (subframe) của LTE.<sup>41</sup> Trong mỗi mili giây, bộ lập lịch của trạm gốc quyết định liệu tài nguyên đó sẽ được phân bổ cho người dùng LTE hay người dùng NR. Đây là một hệ thống *đồng nhất*, khép kín—MNO sở hữu và kiểm soát cả hai công nghệ.

Mục đích chính của DSS là một mục đích thực dụng: nó là một *công cụ di chuyển chiến lược*.<sup>42</sup> Nó cho phép các MNO triển khai vùng phủ sóng 5G trên toàn quốc một cách nhanh chóng bằng cách sử dụng các băng tần 4G (ví dụ: băng tần thấp và trung) và cơ sở hạ tầng vô tuyến hiện có, tiết kiệm hàng triệu đô la chi phí nâng cấp.<sup>39</sup> Nó hỗ trợ cả triển khai Không Độc lập (NSA), yêu cầu một neo LTE, và Độc lập (SA).<sup>40</sup> Đây là một sự đánh đổi: DSS cung cấp *vùng phủ sóng 5G rộng rãi* nhưng không cung cấp *hiệu suất 5G đỉnh* (substantial performance) mà phổ tần 5G chuyên dụng mang lại.<sup>39</sup>

Sự phát triển của DSS trong 3GPP cũng cho thấy bản chất tạm thời của nó. DSS ban đầu (Rel-15/16) được thiết kế với giả định rằng lưu lượng LTE sẽ chiếm ưu thế. Tuy nhiên, khi các thiết bị 5G trở nên phổ biến hơn, *dung lượng lập lịch* cho NR trên sóng mang chia sẻ này đã trở thành một điểm nghẽn. Để giải quyết vấn đề này, Release 17 đã giới thiệu mục công việc **NR\_DSS**.<sup>42</sup> Cải tiến này bổ sung một cơ chế phức tạp cho *lập lịch chéo sóng mang* (cross-carrier scheduling)—cho phép một sóng mang thứ cấp (SCell) xử lý việc lập lịch cho sóng mang chính (PCell)—để giảm tải cho các kênh điều khiển quá tải.<sup>42</sup> Sự phát triển này cho thấy DSS là một cây cầu quan trọng và thành công, nhưng là một cây cầu được thiết kế để cuối cùng sẽ được thay thế bằng phổ tần 5G/6G chuyên dụng.

### **15.3.2. NR-Unlicensed (NR-U): Cuộc chiến Cùng tồn tại trên Băng tần Không phép**

Nếu DSS là một hệ thống nhận thức *nội bộ*, thì NR-Unlicensed (NR-U) là hệ thống nhận thức *đối ngoại* thực sự đầu tiên của 3GPP. Được giới thiệu trong Release 16, NR-U cho phép 5G NR hoạt động trong các băng tần không phép (ví dụ: 5 GHz và 6 GHz)<sup>45</sup>, đây là một sự phát triển từ 4G Licensed Assisted Access (LAA).<sup>47</sup>

NR-U hỗ trợ các chế độ giống LAA (nơi băng tần không phép được neo vào một sóng mang có phép) nhưng quan trọng nhất là, nó giới thiệu chế độ **Độc lập (Standalone)** lần đầu tiên.<sup>45</sup> Standalone NR-U cắt đứt dây neo với phổ tần có phép; nó có thể hoạt động hoàn toàn trong băng tần không phép, bao gồm cả mặt phẳng điều khiển và mặt phẳng người dùng. Điều này rất quan trọng đối với các mạng 5G tư nhân, cho phép các doanh nghiệp triển khai mạng 5G của riêng họ mà không cần phải cấp phép phổ tần.<sup>45</sup>

Điều này đặt NR-U vào một cuộc cạnh tranh trực tiếp với Wi-Fi. Để cùng tồn tại một cách công bằng, NR-U bắt buộc phải tuân thủ các quy tắc "nhận thức" của băng tần không phép: **Listen-Before-Talk (LBT)**.<sup>50</sup> Cơ chế LBT của NR-U phần lớn được kế thừa từ LAA.<sup>46</sup> Tuy nhiên, một sự phức tạp lớn nảy sinh: NR-U được thiết kế cho hoạt động *dựa trên chùm tia* (beam-based), trong khi LBT của Wi-Fi và LAA là *đa hướng* (omnidirectional).<sup>51</sup>

Sự không phù hợp này làm trầm trọng thêm các vấn đề kinh điển của mạng tranh chấp<sup>51</sup>:

- **Vấn đề Nút Phơi bày (Exposed Node):** Nếu gNB 5G sử dụng LBT đa hướng (**omniLBT**), nó có thể nghe thấy một AP Wi-Fi ở xa, không gây nhiễu và *chờ đợi một cách không cần thiết*, làm giảm đáng kể hiệu suất và khả năng tái sử dụng không gian.<sup>51</sup>
- **Vấn đề Nút Ẩn (Hidden Node):** Nếu gNB sử dụng LBT định hướng (**dirLBT**) (chỉ nghe trong chùm tia hẹp mà nó muốn sử dụng), nó có thể không nghe thấy một thiết bị Wi-Fi đang hoạt động ngay bên cạnh chùm tia. gNB sau đó sẽ truyền tín hiệu, gây ra va chạm thảm khốc.<sup>51</sup>

Vật lý của hoạt động dựa trên chùm tia đã *buộc* 3GPP phải áp dụng các kỹ thuật nhận thức tiên tiến hơn. Các giải pháp đang được nghiên cứu bao gồm **pairLBT** (cảm nhận theo hướng truyền và hướng ngược lại) và thậm chí là *cảm nhận hợp tác* (điều chỉnh Cửa sổ Tranh chấp (CWS) có sự hỗ trợ của UE).<sup>51</sup> NR-U đại diện cho việc 3GPP lần đầu tiên tham gia thực sự vào cuộc chiến nhận thức, không đồng nhất, nơi các quy tắc chia sẻ công bằng là bắt buộc để tồn tại.

### **15.3.3. Tiêu chuẩn Kế thừa và Vai trò Hiện tại: IEEE 802.22 (WRAN) và 802.19**

Trước khi 3GPP tham gia vào việc chia sẻ phổ tần, IEEE đã là người tiên phong trong lĩnh vực này. **IEEE 802.22** là tiêu chuẩn đầu tiên trên thế giới chính thức hóa Vô tuyến Nhận thức cho Mạng Vô tuyến Khu vực (WRAN), được thiết kế để cung cấp băng thông rộng ở nông thôn bằng cách sử dụng các Không gian Trắng Truyền hình (TVWS).<sup>55</sup> Tiêu chuẩn này đã thiết lập mô hình "cảm nhận + cơ sở dữ liệu" mà hiện nay là nền tảng của nhiều mô hình chia sẻ. Song song đó, **IEEE 802.19** tập trung vào các quy tắc kỹ thuật và quy định phức tạp cho sự *cùng tồn tại* của các mạng không dây không đồng nhất.<sup>55</sup>

Trong lịch sử, hai tổ chức này hoạt động trong các lĩnh vực song song. IEEE tập trung vào các tiêu chuẩn mở, có khả năng tương tác cho các thiết bị công cộng (như Wi-Fi), trong khi 3GPP xây dựng các hệ thống độc quyền, khép kín, đầu cuối cho các nhà khai thác viễn thông.<sup>56</sup> Điều này dẫn đến một sự phân kỳ: IEEE 802.22 có *tầm nhìn về mặt khái niệm* (một hệ thống CR "lớp phủ" thực sự) nhưng lại *bị hạn chế về mặt thương mại* (chỉ dành cho thị trường TVWS ngách). Ngược lại, các tiêu chuẩn "giống CR" của 3GPP (DSS, NR-U) thì *thực dụng về mặt thương mại* nhưng *bị hạn chế về mặt khái niệm* (DSS là một công cụ di chuyển nội bộ, và NR-U là một hệ thống LBT "lớp dưới" cạnh tranh, không phải là một hệ thống lớp phủ).

Tuy nhiên, tương lai của 6G dường như là sự *lai ghép bắt buộc* của cả hai triết lý này, được thúc đẩy bởi các nhà quản lý. Ví dụ điển hình nhất là khuôn khổ **Citizens Broadband Radio Service (CBRS)** ở Hoa Kỳ.<sup>57</sup> CBRS tạo ra một mô hình chia sẻ ba tầng (đương nhiệm, ưu tiên, truy cập chung) *bắt buộc* các công nghệ không đồng nhất (bao gồm 5G tư nhân và Wi-Fi) phải cùng tồn tại. Nó làm điều này bằng cách

kết hợp một cơ sở dữ liệu điều phối trung tâm (ý tưởng của IEEE 802.22) với truy cập dựa trên tranh chấp LBT (ý tưởng của 3GPP NR-U / IEEE 802.11). Mô hình lai—quản lý bằng cơ sở dữ liệu, truy cập bằng tranh chấp—này là con đường hội tụ hợp lý cho tất cả các hoạt động chia sẻ phổ tần trong tương lai.

**Bảng 15.1: So sánh các Mô hình Chia sẻ Phổ tần**

Tính năng	4G-CR (ví dụ: IEEE 802.22)	3GPP DSS (Rel 15-17)	3GPP NR-U (Rel 16)
Mục tiêu chính	Truy cập cơ hội vào không gian trống <sup>55</sup>	Di chuyển 4G/5G mượt mà, tiết kiệm chi phí [39, 42]	Cùng tồn tại và mở rộng dung lượng trên băng tần không phép [45, 51]
Mô hình người dùng	Không đồng nhất (Heterogeneous) (PU vs. SU)	Đồng nhất (Homogeneous) (MNO kiểm soát cả 4G & 5G) <sup>39</sup>	Không đồng nhất (Heterogeneous) (3GPP vs. Wi-Fi) [50]
Cơ chế truy cập	Dò phỏ + Cơ sở dữ liệu <sup>55</sup>	Lập lịch ghép kênh thời gian 1ms <sup>41</sup>	Nghe-Trước-Khi-Nói (LBT) [50, 51]

<b>Băng tần</b>	TVWS / Được cấp phép	Được cấp phép (Băng tần 4G) <sup>39</sup>	Không phép (5 GHz, 6 GHz) <sup>45</sup>
<b>"Mức độ Nhận thúc"</b>	Lớp phủ cao (High- Overlay)	Nội bộ thấp (Low- Internal)	Tranh chấp cao (High- Contention)

#### **15.4. Các Miền ứng dụng Mới cho Nguyên tắc Nhận thức trong 6G**

Khi các nguyên tắc nhận thức trở nên trưởng thành và được hỗ trợ bởi AI, chúng đang được áp dụng cho các miền vật lý và khái niệm mới vượt xa việc chia sẻ phổ tần mặt đất truyền thống.

##### **15.4.1. Mạng Phi Mặt đất (NTN): Quản lý Phổ tần Động trong Không gian**

Một trong những trụ cột của 6G là sự tích hợp liền mạch của Mạng Phi Mặt đất (Non-Terrestrial Networks - NTN), bao gồm các vệ tinh Quỹ đạo Trái đất Thấp (LEO), Trung bình (MEO), Địa tĩnh (GEO) và các Nền tảng Độ cao Lớn (HAPS).<sup>58</sup>

3GPP Release 17 đã bắt đầu công việc tiêu chuẩn hóa này, với mục tiêu cung cấp vùng phủ sóng toàn cầu thực sự và tính liên tục của dịch vụ, kết nối các khu vực không được phục vụ.<sup>60</sup>

Sự tích hợp này tạo ra một thách thức nhiều 3D phức tạp: làm thế nào để các mạng mặt đất (TN) và NTN cùng tồn tại, đặc biệt khi chúng có thể chia sẻ các băng tần

tương tự?<sup>62</sup> Câu trả lời một lần nữa nằm ở các nguyên tắc CR. Các phương pháp CR và DSA đang được nghiên cứu tích cực cho sự cùng tồn tại giữa vệ tinh và mặt đất.<sup>62</sup>

Ứng dụng này thực sự *hồi sinh* khái niệm "lỗ hổng phổ tần" (spectrum hole) ban đầu của 4G-CR, nhưng ở quy mô lớn hơn nhiều. Khái niệm 4G-CR về việc tìm kiếm "lỗ hổng thời gian" (temporal holes) trong các mạng mặt đất bận rộn đã gặp nhiều thách thức. Tuy nhiên, trường hợp sử dụng NTN tập trung vào các "lỗ hổng không gian" (spatial holes) không lồ, có thể dự đoán được. Phổ tần được cấp phép của một nhà khai thác mặt đất được sử dụng rất nhiều ở các khu vực đô thị, nhưng hoàn toàn *rảnh rỗi* trên các đại dương, sa mạc và các vùng nông thôn xa xôi.<sup>62</sup> Một vệ tinh LEO, sử dụng các nguyên tắc CR, có thể *cảm nhận* (hoặc được thông báo qua cơ sở dữ liệu) rằng nó đang ở trên một khu vực như vậy và *truy cập cơ hội* vào băng tần được cấp phép đó. Đây là một ứng dụng quy mô lớn, hoàn hảo cho lý thuyết CR ban đầu.

Tuy nhiên, thách thức nhận thức ở đây không chỉ là RF; đó là *cấu trúc liên kết mạng*. Một trạm gốc 4G là tĩnh. Một vệ tinh LEO<sup>65</sup> di chuyển với tốc độ hàng chục ngàn km/h, có nghĩa là cấu trúc liên kết mạng—các hàng xóm, mô hình nhiễu, đường truyền backhaul—là *cực kỳ động*.<sup>66</sup> Do đó, "bộ não" nhận thức phải sử dụng AI/ML (như Học Tăng cường - RL, hoặc HRL Phân cấp - HDRL) không chỉ để phân bổ *phổ tần* mà còn để *nhận thức* về *cấu trúc liên kết* cho việc định tuyến động và cân bằng tải.<sup>66</sup>

#### **15.4.2. Truyền thông Terahertz (THz): Thách thức Dò và Truy cập trong Băng tần Mới**

Tầm nhìn 6G phụ thuộc vào việc mở khóa các dải tần số mới, đặc biệt là các băng tần sub-Terahertz (sub-THz) (ví dụ: 90-300 GHz) để đạt được tốc độ dữ liệu cực cao.<sup>73</sup> Miền này đi kèm với một tập hợp các thách thức vật lý độc đáo. Tín hiệu THz bị suy hao đường truyền cực lớn và quan trọng nhất là bị *hấp thụ phân tử* bởi các khí trong khí quyển như hơi nước.<sup>74</sup>

Sự hấp thụ này không đồng đều; nó tạo ra các "cửa sổ" tần số nơi việc truyền dẫn là khả thi, xen kẽ với các "bức tường" tần số nơi tín hiệu bị hấp thụ hoàn toàn. Những cửa sổ này thay đổi động dựa trên các điều kiện môi trường như độ ẩm, thời tiết và khoảng cách.<sup>74</sup> Trong bối cảnh này, "người dùng sơ cấp" chính là *vật lý* của khí quyển.

Do đó, một hệ thống nhận thức là bắt buộc. Một vô tuyến THz 6G phải sử dụng các kỹ thuật CR và DSA dựa trên AI.<sup>74</sup> Vòng lặp nhận thức của nó phải:

1. **Cảm nhận:** Liên tục cảm nhận môi trường vật lý để phát hiện các "cửa sổ" khả dụng. Việc cảm nhận này phải là băng thông siêu rộng (>100 GHz) và ở tốc độ nano giây.<sup>76</sup>
2. **Quyết định:** Một bộ não AI sẽ xác định cửa sổ nào cung cấp kênh tốt nhất.
3. **Hành động:** Thực hiện "phân bổ phổ tần động"<sup>74</sup> để nhảy giữa các cửa sổ này trong thời gian thực, đồng thời quản lý nhiều với các dịch vụ vệ tinh và radar hiện có trong các băng tần này.<sup>74</sup>

### **15.4.3. Bề mặt Thông minh có thể Cấu hình lại (RIS): Môi trường như một Tác nhân Nhận thức**

Như đã thảo luận trong phần 15.2.3, RIS đại diện cho một miền ứng dụng mới cho hành động nhận thức. Thay vì mạng lưới chỉ thích ứng với môi trường, mạng lưới giờ đây *thích ứng môi trường* với nhu cầu của nó.<sup>34</sup> Việc tích hợp CR-RIS<sup>37</sup> biến chính môi trường truyền sóng thành một tác nhân có thể lập trình trong vòng lặp nhận thức. Mô hình **STAR-RIS**<sup>37</sup> đặc biệt mạnh mẽ, cho phép hệ thống thứ cấp không chỉ tối đa hóa tín hiệu của chính nó mà còn chủ động triệt tiêu nhiễu tại máy thu của hệ thống sơ cấp. Điều này biến môi trường từ một rào cản thụ động thành một đồng minh nhận thức tích cực.

#### **15.4.4. Vô tuyến Cộng sinh (Symbiotic Radio - SR): Tái định nghĩa Người dùng Sơ cấp và Thứ cấp**

Khái niệm CR truyền thông được xây dựng dựa trên một tiền đề cơ bản: tín hiệu của SU là *nhiều* đối với PU. **Vô tuyến Cộng sinh (Symbiotic Radio - SR)**, còn được gọi là *tán xạ ngược nhận thức* (cognitive backscattering), đảo ngược hoàn toàn tiền đề này.<sup>77</sup>

SR là một mô hình mới kết hợp CR và Tán xạ ngược Môi trường (AmBC), được thiết kế chủ yếu cho Internet vạn vật (IoT) thụ động.<sup>77</sup> Cơ chế hoạt động như sau:

1. Một hệ thống sơ cấp (ví dụ: trạm gốc 6G) truyền tín hiệu của nó.
2. Một thiết bị SU thụ động (ví dụ: cảm biến IoT) nhận tín hiệu này.
3. SU truyền dữ liệu *của chính nó* bằng cách *điều biến và phản xạ* tín hiệu của PU.<sup>77</sup>

Trong CR 4G, sự phản xạ này sẽ bị coi là nhiễu. Nhưng trong mô hình SR, sự phản xạ được điều biến này được thiết kế để hoạt động như một *đường truyền đa đường*

*mang tính xây dựng* cho tín hiệu sơ cấp.<sup>77</sup> Bằng cách cung cấp một đường tín hiệu bổ sung, có thể giải mã được, SU thực sự *giúp* PU, cải thiện độ tin cậy của liên kết sơ cấp thông qua phân tập đa đường. Đây là một mối quan hệ *cùng có lợi* (mutualistic).<sup>78</sup> Một máy thu tiên tiến (SRx) thậm chí có thể thực hiện giải mã chung để khôi phục *cả* thông điệp của PU và thông điệp của SU từ cùng một tín hiệu.<sup>77</sup>

SR đại diện cho sự thay đổi mô hình cuối cùng: từ *tránh nhiễu* (4G-CR) sang *hợp tác cùng có lợi* (6G-SR). SU nhận được một đường truyền "miễn phí" bằng cách sử dụng năng lượng của PU, và PU nhận được một liên kết mạnh mẽ hơn nhờ sự hỗ trợ của SU. RIS có thể được sử dụng thêm để tăng cường các liên kết cộng sinh này.<sup>38</sup>

## 15.5. Ứng dụng Quản lý Tài nguyên Dựa trên Nhận thức (AI/ML)

Các nguyên tắc nhận thức dựa trên AI mới này không chỉ là lý thuyết; chúng đang được áp dụng để giải quyết các thách thức quản lý tài nguyên cấp dịch vụ phức tạp nhất trong 5G và 6G.

### 15.5.1. Phân bổ Cắt lát Mạng (Network Slicing) Động

Cắt lát mạng (Network Slicing) là một khả năng nền tảng của 5G, cho phép các MNO "cắt" cơ sở hạ tầng vật lý chung của họ thành nhiều mạng logic, ảo hóa, đầu cuối.<sup>79</sup> Mỗi lát được tùy chỉnh để đáp ứng các yêu cầu QoS nghiêm ngặt của một dịch vụ cụ thể—ví dụ, một lát Băng thông rộng Di động Nâng cao (eMBB) cho video, một lát Giao tiếp Độ trễ Cực thấp (URLLC) cho robot nhà máy, và một lát Giao tiếp Máy Loại Lớn (mMTC) cho các cảm biến.<sup>79</sup>

Quản lý tài nguyên cho các lát đồng thời này là một nhiệm vụ cực kỳ phức tạp.<sup>80</sup>

Đây chính xác là một vấn đề *quản lý tài nguyên nhận thức*.<sup>83</sup> Về cơ bản, Cắt lát Mạng 5G là sự *trìu tượng hóa ở cấp độ dịch vụ* của các nguyên tắc *cấp độ vô tuyến* của 4G-CR. Vòng lặp nhận thức được nâng lên:

- **Cảm nhận:** Giám sát liên tục nhu cầu lưu lượng thời gian thực và hiệu suất QoS trên *mỗi lát*.<sup>82</sup> (Đây chính là chức năng mà NWDAF cung cấp thông qua phân tích "tải lát"<sup>30</sup>).
- **Quyết định:** Sử dụng các thuật toán AI/ML, đặc biệt là **Học Tăng cường Sâu (Deep Reinforcement Learning - DRL)**, để tính toán *tự trị* việc phân bổ tài nguyên tối ưu giữa các lát.<sup>82</sup>
- **Hành động:** Phân bổ lại tài nguyên RAN (ví dụ: các khối tài nguyên vật lý) và tài nguyên lõi (ví dụ: các phiên bản NF) cho các lát một cách động.<sup>87</sup>

Công việc của 3GPP trong Release 19 đang nghiên cứu rõ ràng việc sử dụng AI/ML cho quản lý lát mạng<sup>33</sup>, xác nhận rằng tương lai của việc cắt lát mạng là một tương lai nhận thức và tự trị.

### 15.5.2. Đảm bảo Giao tiếp Độ trễ Cực thấp (URLLC)

URLLC đặt ra một trong những thách thức khó khăn nhất: đảm bảo độ tin cậy gần như hoàn hảo (ví dụ: 99.9999%) với độ trễ cực thấp.<sup>5</sup> Một kỹ thuật 3GPP tiêu chuẩn để đạt được độ tin cậy này là *đa kết nối* (multi-connectivity) hoặc *nhân đôi gói tin* (packet duplication - PD), trong đó cùng một gói tin được gửi qua hai đường truyền

khác nhau (ví dụ: hai trạm gốc) để đảm bảo ít nhất một bản sao đến được.<sup>90</sup> Vấn đề là: PD "luôn bật" (always-on) cực kỳ lãng phí tài nguyên vô tuyến.

Để giải quyết vấn đề này, các cơ chế **Nhân đôi Gói tin Nhận thức (Cognitive Packet Duplication)** đã được đề xuất.<sup>91</sup> Kỹ thuật này thể hiện sự trưởng thành của CR từ *tập trung vào phổi tần* sang *tập trung vào QoS*. Vòng lặp nhận thức hoạt động như sau<sup>91</sup>:

1. **Cảm nhận:** Một lớp nhận thức (sử dụng ML) thu thập các thông số đầu vào: trạng thái di động của UE, các chỉ số chất lượng kênh (CQI), môi trường vô tuyến, và loại dịch vụ URLLC.
2. **Quyết định (Dự đoán):** Mô hình ML *dự đoán* nếu liên kết vô tuyến *sắp* không đáp ứng được yêu cầu về độ tin cậy của URLLC *trước khi* lỗi xảy ra.
3. **Hành động:** *Chỉ khi* một lỗi được dự đoán, hệ thống *chủ động* kích hoạt nhân đôi gói tin. Khi điều kiện kênh cải thiện và dự đoán cho thấy liên kết ổn định, nó sẽ tắt PD.

Phương pháp nhận thức này đạt được điều tốt nhất của cả hai thế giới: độ tin cậy cực cao của PD mà không lãng phí tài nguyên của chế độ "luôn bật".<sup>91</sup> Điều này cho thấy vòng lặp CR đã phát triển thành một khuôn khổ linh hoạt để tối ưu hóa *bất kỳ* KPI mạng nào, không chỉ là truy cập phổi tần.

## 15.6. Thách thức An ninh Nâng cao: Tấn công và Phòng thủ trong Mạng Nhận thức 6G

Bằng cách làm cho mạng lưới trở nên thông minh và phụ thuộc vào dữ liệu cảm nhận, CR cũng mở ra các vectơ tấn công mới và tinh vi. Tính bảo mật của chính vòng lặp nhận thức trở nên tối quan trọng.

### 15.6.1. Phân tích Tấn công Giả mạo Dữ liệu Dò Phổ (SSDF)

Một trong những lỗ hổng nghiêm trọng nhất trong CRN là **Tấn công Giả mạo Dữ liệu Dò Phổ (Spectrum Sensing Data Falsification - SSDF)**.<sup>92</sup> Cuộc tấn công này nhắm vào Dò Phổ Hợp tác (Cooperative Spectrum Sensing - CSS). CSS được thiết kế để cải thiện độ tin cậy bằng cách tổng hợp các báo cáo từ nhiều SU.<sup>97</sup> SSDF vữ khí hóa chính cơ chế hợp tác này: một hoặc nhiều người dùng độc hại (MUs) cố tình gửi các báo cáo cảm nhận sai đến Trung tâm Tổng hợp (FC) để đầu độc quyết định cuối cùng.<sup>100</sup>

Hai biến thể cơ bản và nguy hiểm nhất là:

- **Tấn công "Luôn Có" (Always Yes):** MU luôn báo cáo '1', khẳng định rằng PU luôn có mặt ngay cả khi kênh rảnh.<sup>96</sup> Điều này đánh lừa FC đưa ra quyết định *báo động sai* (false alarm). Hậu quả là các SU trung thực bị từ chối truy cập vào phổ tần hoàn toàn có sẵn, dẫn đến lãng phí tài nguyên và Tấn công Từ chối Dịch vụ (Denial of Service).
- **Tấn công "Luôn Không" (Always No):** MU luôn báo cáo '0', khẳng định rằng PU luôn vắng mặt ngay cả khi kênh đang bận.<sup>96</sup> Điều này đánh lừa FC đưa ra quyết định *phát hiện nhầm* (missed detection). Đây là kịch bản nguy hiểm nhất. FC tuyên bố kênh rảnh và hướng dẫn các SU trung thực truyền tín hiệu, gây ra *nhiều có hại* và thảm khốc cho PU<sup>100</sup>, vi phạm quy tắc cơ bản nhất của CR.

Cuộc tấn công này khai thác lòng tin của hệ thống hợp tác. Các quy tắc tổng hợp đơn giản như "AND-rule" (yêu cầu tất cả các báo cáo là '0' để truy cập) cực kỳ dễ bị

tấn công bởi một MU "Always No" duy nhất, trong khi "OR-rule" (chỉ cần một báo cáo '0' để truy cập) dễ bị tấn công bởi các MU "Always Yes".<sup>103</sup>

### 15.6.2. Phòng thủ dựa trên AI: Phát hiện Người dùng Độc hại

Các cơ chế phòng thủ thông kê truyền thống (ví dụ: loại bỏ các giá trị ngoại lệ) tỏ ra yếu kém trước các cuộc tấn công SSDF tinh vi.<sup>97</sup> Một lần nữa, AI/ML đang được tích hợp như một cơ chế phòng thủ mạnh mẽ.<sup>14</sup> Các mô hình học máy như K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machines (SVM)<sup>100</sup>, và Multilayer Perceptrons (MLP)<sup>97</sup> đã được đề xuất để phân loại các báo cáo cảm nhận là trung thực hay giả mạo.

Một phương pháp học sâu tiên tiến hơn là sử dụng các mô hình **ensemble LSTM-GRU** (Long Short-Term Memory và Gated Recurrent Unit).<sup>104</sup> Cách tiếp cận này thay đổi mô hình tin cậy từ *tập trung vào báo cáo* sang *tập trung vào hành vi*. Nó hoạt động như sau:

1. FC không xem xét từng báo cáo một cách riêng lẻ; nó xem xét *chuỗi* báo cáo từ mỗi SU theo thời gian như một *dữ liệu tuần tự* (sequential data).
2. LSTM và GRU là các loại Mạng Nơ-ron Tái phát (RNNs) được thiết kế đặc biệt để tìm các mẫu trong dữ liệu tuần tự.<sup>104</sup>
3. Mô hình AI học "chữ ký hành vi" của một SU trung thực so với một MU. Một SU trung thực, ngay cả khi bị lỗi, sẽ có một chuỗi báo cáo phản ánh các đặc tính thống kê của một kênh vô tuyến thực (ví dụ: các mẫu mờ dần, chu kỳ nhiệm vụ của PU). Ngược lại, một MU "Always Yes" có một chữ ký hành vi cực kỳ phi vật lý (một chuỗi '1' không đổi).

Bằng cách học các mẫu hành vi theo thời gian này, mô hình LSTM-GRU có thể phát hiện các MU với độ chính xác rất cao (lên đến 98%).<sup>104</sup> Kẻ tấn công có thể dễ dàng giả mạo một báo cáo, nhưng việc giả mạo một *lịch sử hành vi* có tính thuyết phục về mặt thống kê thì khó hơn rất nhiều.

**Bảng 15.2: Phân tích Tác động và Cơ chế Phòng thủ cho các Tấn công SSDF**

Loại Tấn công	Cơ chế	Tác động Lên Mạng (Hậu quả)	Chiến lược Phòng thủ
<b>Always Yes</b> (Luôn Có)	MU luôn gửi '1' (PU có mặt) [101]	Từ chối Dịch vụ (DoS) (lãng phí phô tần có sẵn)	Phân tích hành vi (LSTM/GRU) <sup>104</sup> , Thuật toán dựa trên danh tiếng [94]
<b>Always No</b> (Luôn Không)	MU luôn gửi '0' (PU vắng mặt) [101]	Nhiều có hại cho PU 100	Phân tích hành vi (LSTM/GRU) <sup>104</sup> , ML (SVM/KNN) [97, 100]
<b>Always Opposite</b> (Luôn Đối nghịch)	MU gửi giá trị <i>ngược lại</i> với cảm nhận của nó [96]	Gây nhiễu ngẫu nhiên hoặc lãng phí phô tần	Phân tích hành vi (LSTM/GRU) <sup>104</sup>

PUEA (Giả mạo PU)	MU truyền một tín hiệu giả mạo tín hiệu của PU [94]	Tương tự như 'Always Yes' (lừa các SU trung thực rằng kênh đang bận)	Phát hiện dựa trên đặc trưng tín hiệu, ML
-------------------	---	--	---

## 15.7. Kết luận: Tâm nhìn 6G là sự Hoàn thiện của Vô tuyến Nhận thức

Hành trình của Vô tuyến Nhận thức, từ một khái niệm học thuật cho 4G đến một thành phần cốt lõi của 6G, là một trong những sự tiến hóa đáng chú ý nhất trong truyền thông không dây. Bắt đầu như một cơ chế hỗ trợ để giải quyết vấn đề khan hiếm phổ tần của 4G, các nguyên tắc của nó đã được hiện thực hóa một cách thực dụng trong các tiêu chuẩn 5G như DSS và NR-U. Với 5G-Advanced (Release 18 và 19), CR bắt đầu hợp nhất với AI/ML, trở thành một phần không thể thiếu của RAN và lõi.<sup>5</sup>

Tâm nhìn 6G đại diện cho sự hoàn thiện của quá trình tiến hóa này. Trong 6G, Vô tuyến Nhận thức không còn là một tính năng riêng biệt; thay vào đó, *6G chính là một mạng lưới nhận thức*. Các chức năng "cảm nhận" (through AI dò phỏ)<sup>15</sup>, "quyết định" (through qua kiến trúc AI phân cấp của NWDAF và RAN)<sup>27</sup>, và "hành động" (through qua việc lập trình môi trường với RIS và chia sẻ cộng sinh)<sup>34</sup> được tích hợp nguyên bản vào cấu trúc của mạng lưới.<sup>3</sup>

Sự thay đổi mô hình cuối cùng không chỉ là về công nghệ, mà còn là về *triết lý*. Sự tiến hóa của CR có thể được tóm tắt là sự thay đổi trong mô hình tương tác:

1. **4G-CR** là *Cạnh tranh*: SU cạnh tranh với PU để giành tài nguyên, với mục tiêu là *tránh nhiễu*.
2. **5G-CR (DSS/NR-U)** là *Hợp tác*: Các công nghệ tuân theo các quy tắc đã định (lập lịch hoặc LBT) để *cùng tồn tại* một cách công bằng.
3. **6G-CR** là *Cộng sinh*: Thông qua các công nghệ như RIS<sup>37</sup> và Vô tuyến Cộng sinh<sup>77</sup>, mạng lưới chuyển sang một mô hình *có tổng dương*, nơi các tác nhân thứ cấp có thể *chủ động mang lại lợi ích* cho các tác nhân sơ cấp.

Đây là sự hoàn thiện thực sự của lời hứa về nhận thức: một mạng lưới thông minh đến mức nó không chỉ tự tối ưu hóa mà còn thúc đẩy một hệ sinh thái cùng có lợi, biến sự khan hiếm tài nguyên thành cơ hội cộng tác.

**Bảng 15.3: Tóm tắt Sự tiến hóa của Chu trình Nhận thức từ 4G đến 6G**

Chu trình Nhận thức	4G (CRN / IEEE 802.22)	5G / 5G-Advanced (DSS / NR-U / NWDAF)	6G (AI-Native)
Sense (Cảm nhận)	Phát hiện Năng lượng, Cơ sở dữ liệu tinh <sup>55</sup>	Lập lịch 1ms (DSS) <sup>41</sup> , LBT (NR-U) <sup>51</sup>	Cảm nhận Ngữ nghĩa AI <sup>15</sup> , Cảm nhận Môi trường (THz) <sup>74</sup>

<b>Decide (Quyết định)</b>	Logic trên thiết bị, FC đơn giản <sup>97</sup>	Lập lịch gNB (DSS), Phân tích dự đoán NWDAF <sup>27</sup>	AI Phân cấp (NWDAF+RAN) <sup>33</sup> , DRL [84]
<b>Act (Hành động)</b>	Tránh né (Avoidance) <sup>1</sup>	Chia sẻ Hợp tác (LBT/Scheduling) [39, 51]	Lập trình Môi trường (RIS) <sup>37</sup> , Cộng sinh (SR) <sup>77</sup>
<b>Mục tiêu chính</b>	Truy cập Phổ biến Cơ hội	Di chuyển & Cùng tồn tại Hiệu quả	Đảm bảo Dịch vụ Chủ động, Cùng có lợi
<b>Mô hình Tương tác</b>	Cạnh tranh (Gây nhiễu)	Hợp tác (Tuân thủ quy tắc)	Cộng sinh (Cùng có lợi) <sup>77</sup>

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Giới thiệu về Sóng Vô tuyến Nhận thức (CR) trong hệ thống di động 4G LTE.  
(Nguồn: [https://www.vodafone-chair.org/pbls/legacy/martin-danneberg/Experimental\\_Testbed\\_for\\_5G\\_Cognitive\\_Radio\\_Access\\_in\\_4G\\_LTE\\_Cellular\\_Systems.pdf](https://www.vodafone-chair.org/pbls/legacy/martin-danneberg/Experimental_Testbed_for_5G_Cognitive_Radio_Access_in_4G_LTE_Cellular_Systems.pdf))
- [2] Những thách thức về phổ tần 5G và sự tắc nghẽn của băng tần dưới 6GHz.  
(Nguồn: [https://saudijournals.com/media/articles/SJEAT\\_412\\_473-785\\_FT.pdf](https://saudijournals.com/media/articles/SJEAT_412_473-785_FT.pdf))

- [3] AI/ML trong 5G-Advanced (Release 18) và con đường hướng tới 6G AI-Native. (Nguồn: <https://www.nokia.com/blog/aiml-enhanced-mobility-in-5g-advanced-paving-the-way-for-an-ai-native-6g/>)
- [4] Quản lý mạng dựa trên AI và ML trong 3GPP Release 18 (5G-Advanced). (Nguồn: <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>)
- [5] Khung AI/ML cho giao diện vô tuyến trong 3GPP Release 18 và 19. (Nguồn: <https://www.nokia.com/blog/aiml-enhanced-mobility-in-5g-advanced-paving-the-way-for-an-ai-native-6g/>)
- [6] Tầm nhìn 6G: Mạng lưới tinh gọn (lean network) và cơ sở hạ tầng thông minh. (Nguồn: <https://vtsociety.org/files/ieeevt2025-04/IEEE%20Future%20Networks%20Special%20Issue%20on%206G.pdf>)
- [7] Tầm nhìn 6G: Hướng tới Hệ thống Giao tiếp Nhận thức Công tác (3C). (Nguồn: <https://openresearch.lsbu.ac.uk/item/8wq28>)
- [8] Các yếu tố hỗ trợ 6G và vai trò của tính linh hoạt. (Nguồn: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-s/opb/itujnl/S-ITUJNL-JFETF.V1I1-2020-P09-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-s/opb/itujnl/S-ITUJNL-JFETF.V1I1-2020-P09-PDF-E.pdf))
- [9] Mạng Vô tuyến Nhận thức (CRN) 6G và các yêu cầu về hiệu suất (ví dụ: hiệu quả năng lượng). (Nguồn: [https://www.researchgate.net/publication/355201065\\_Sixth\\_Generation\\_6G\\_Cognitive\\_Radio\\_Network\\_CRN\\_Application\\_Requirements\\_Security\\_Issues\\_and\\_Key\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/355201065_Sixth_Generation_6G_Cognitive_Radio_Network_CRN_Application_Requirements_Security_Issues_and_Key_Challenges))
- [10] Tầm nhìn 6G: AI là một phần không thể thiếu của hệ thống không dây. (Nguồn: [https://researchoutput.csu.edu.au/files/403390548/403345919\\_published\\_article.pdf](https://researchoutput.csu.edu.au/files/403390548/403345919_published_article.pdf))
- [11] Nguyên tắc cơ bản của Mạng Vô tuyến Nhận thức (CRN) và Quá trình Nhận thức. (Nguồn: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:834777/FULLTEXT01.pdf>)
- [12] Những thách thức trong dò phỏ 5G và tỷ lệ phân loại sai. (Nguồn: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2023.1113832/full>)
- [13] Tích hợp AI và ML trong các hệ thống truyền thông không dây thế hệ tiếp theo. (Nguồn: <https://arxiv.org/abs/2502.02889>)

- [14] Tích hợp Học máy (ML) và AI để tăng cường dò, truy cập và quản lý phổ tần. (Nguồn: <https://PMC11859128/>)
- [15] Các phương pháp AI/ML cho Dò phổ Động: DeepSense, DeepSweep và Phân đoạn Ngữ nghĩa Phổ tần. (Nguồn: <https://arxiv.org/abs/2502.02889>)
- [16] Tổng quan về DeepSense, DeepSweep và các tiến bộ AI/ML trong Dò phổ Động. (Nguồn: <https://arxiv.org/pdf/2502.02889>)
- [17] Học Liên kết (Federated Learning) để chia sẻ phổ tần trong truyền thông không dây 6G. (Nguồn: <https://arxiv.org/abs/2406.12330>)
- [18] Học Tăng cường Đa Tác nhân (Multi-Agent Reinforcement Learning) cho Dò phổ Hợp tác. (Nguồn: <https://arxiv.org/html/2507.14856v1>)
- [19] Kiến trúc Lõi 5G (5GC) và Kiến trúc Dựa trên Dịch vụ (SBA). (Nguồn: <https://falive.net/blog/glossary/5g-core-network-architecture-9-key-network-functions/>)
- [20] Các Chức năng Mạng (NFs) của 5GC và Chức năng Kho lưu trữ Mạng (NRF). (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/2/your-quick-guide-to-network-functions-in-5g-core>)
- [21] Các tiêu chuẩn kiến trúc hệ thống 3GPP cho Hệ thống 5G (5GS). (Nguồn: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>)
- [22] Các thuộc tính của Lõi 5G: Linh hoạt, Nhanh nhẹn, và Có thể mở rộng. (Nguồn: [https://www.tec.gov.in/public/pdf/Studypaper/5G%20Core%20Network\\_Study%20Paper\\_v8.pdf](https://www.tec.gov.in/public/pdf/Studypaper/5G%20Core%20Network_Study%20Paper_v8.pdf))
- [23] Lõi 5G (5GC) là thành phần trung tâm của kiến trúc mạng thế hệ thứ năm. (Nguồn: <https://falive.net/blog/glossary/5g-core-network-architecture-9-key-network-functions/>)
- [24] Tổng quan về Lõi 5G và Mạng Truy cập Vô tuyến (RAN). (Nguồn: <https://www.redhat.com/en/resources/5g-core-and-ran-overview>)
- [25] DSS trong 3GPP Release 16 và các bổ sung cho tính linh hoạt. (Nguồn: <https://nybsys.com/dynamic-spectrum-sharing/>)
- [26] Triển khai 5G Ché độ Không Độc lập (NSA) và Lõi Gói Phát triển (EPC). (Nguồn: [https://www.rohde-schwarz.com/sg/solutions/critical-infrastructure/mobile-network-testing/stories-insights/article-dss-5g-nr-lte-coexistence-through-dynamic-spectrum-sharing-part-1\\_254002.html](https://www.rohde-schwarz.com/sg/solutions/critical-infrastructure/mobile-network-testing/stories-insights/article-dss-5g-nr-lte-coexistence-through-dynamic-spectrum-sharing-part-1_254002.html))

- [27] Chức năng Phân tích Dữ liệu Mạng (NWDAF) trong 3GPP Release 18. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-advanced-evolution-towards-6g>)
- [28] Tích hợp Lõi Bao trùm (Inclusive Core) với Chức năng Nhận thức (Cognitive Function). (Nguồn: [https://www.rd.ntt/e/ns/inclusivecore/whitepaper\\_ver1.html](https://www.rd.ntt/e/ns/inclusivecore/whitepaper_ver1.html))
- [29] NWDAF và các phân tích khác nhau từ các nguồn dữ liệu. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/10/boosting-5g-new-radio-reliability-the-power-of-cognitive-packet-duplication>)
- [30] Phân tích tải lát (slice load analytics) do NWDAF hỗ trợ. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-advanced-evolution-towards-6g>)
- [31] Chức năng Chính sách (PCF) được hỗ trợ bởi phân tích tải lát của NWDAF. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-advanced-evolution-towards-6g>)
- [32] Tối ưu hóa AI-native và tự động hóa không chạm (zero-touch automation). (Nguồn: <https://www.5gamerica.org/wp-content/uploads/2025/07/5G-Advanced-Overview.pdf>)
- [33] Tích hợp AI/ML trong các Lớp Giao thức Mạng Truy cập Vô tuyến (RAN). (Nguồn: <https://www.3gpp.org/technologies/ai-ml-nran>)
- [34] Bề mặt Thông minh có thẻ Cấu hình lại (RIS) cho Hệ thống 6G. (Nguồn: <https://arxiv.org/pdf/2011.04300>)
- [35] RIS trong 5G-Advanced và 6G. (Nguồn: <https://arxiv.org/abs/2312.16874>)
- [36] Tăng cường Vùng phủ sóng bằng RIS và đường tầm nhìn thẳng (LoS) ảo. (Nguồn: <https://arxiv.org/html/2506.19526v1>)
- [37] STAR-RIS (Bề mặt Thông minh Tái cấu hình Phản xạ và Truyền Tin hiệu Đồng thời) hỗ trợ CR. (Nguồn: <https://arxiv.org/abs/2412.00509>)
- [38] Hệ thống CR có sự hỗ trợ của RIS. (Nguồn: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/15/4869>)
- [39] Chia sẻ Phổ tần Động (DSS) cho phép 4G LTE và 5G NR cùng tồn tại. (Nguồn: <https://5ghub.us/dynamic-spectrum-sharing-dss-in-3gpp-release-17-bridging-4g-lte-and-5g-for-iot-continuity/>)

- [40] Công nghệ Anten DSS cho phép 4G và 5G được sử dụng trong cùng một băng tần. (Nguồn: <https://www.celona.io/5g-lan/dynamic-spectrum-sharing-how-it-works-why-it-matters>)
- [41] Phân tích kỹ thuật DSS: "Động" ở mức khung con 1ms của LTE. (Nguồn: [https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G\\_DSS.html](https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_DSS.html))
- [42] Các cải tiến DSS trong 3GPP Release 17. (Nguồn: <https://www.3gpp.org/technologies/nr-dynamic-spectrum-sharing-in-rel-17>)
- [43] Hạn chế về hiệu suất của DSS so với phổ tần 5G chuyên dụng. (Nguồn: <https://www.celona.io/5g-lan/dynamic-spectrum-sharing-how-it-works-why-it-matters>)
- [44] Triển khai DSS trong các mạng 5G Không Độc lập (NSA) và Độc lập (SA). (Nguồn: <https://nybsys.com/dynamic-spectrum-sharing/>)
- [45] 3GPP Release 16: Hỗ trợ 5G NR hoạt động trong phổ tần không phép (NR-U). (Nguồn: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/06/how-does-support-unlicensed-spectrum-nr-u-transform-what-5g-can-do-you>)
- [46] Giải thích kỹ thuật về Listen-Before-Talk (LBT) trong NR-U. (Nguồn: [https://wireless.ece.arizona.edu/sites/default/files/2023-03/Mohammed\\_TCCN\\_2020.pdf](https://wireless.ece.arizona.edu/sites/default/files/2023-03/Mohammed_TCCN_2020.pdf))
- [47] 5G NR-U là một sự phát triển của tiêu chuẩn 4G LTE LAA. (Nguồn: <https://www.techplayon.com/5g-new-radio-unlicensed-nr-u/>)
- [48] NR-U neo (Anchored) hoặc Độc lập (Standalone). (Nguồn: <https://www.qualcomm.com/research/5g/5g-unlicensed-shared-spectrum>)
- [49] Chế độ Độc lập (Standalone) NR-U cho các mạng 5G tư nhân. (Nguồn: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-5g-nr-u-or-new-radio-unlicensed>)
- [50] NR-U và sự cùng tồn tại công bằng với Wi-Fi. (Nguồn: [https://wireless.ece.arizona.edu/sites/default/files/2023-03/Mohammed\\_TCCN\\_2020.pdf](https://wireless.ece.arizona.edu/sites/default/files/2023-03/Mohammed_TCCN_2020.pdf))
- [51] Những thách thức trong thiết kế NR-U: LBT dựa trên chùm tia và các vấn đề về nút ẩn/phơi bày. (Nguồn: [https://5glena.cttc.es/static/archive/NRU\\_COMST.pdf](https://5glena.cttc.es/static/archive/NRU_COMST.pdf))
- [52] Nguyên tắc Listen-Before-Talk (LBT) trong NR-U. (Nguồn: <https://www.fcc.gov/sites/default/files/Charter-1-Frameworks-and-Architectures.pdf>)

- [53] So sánh LBT trong NR-U và LTE-LAA. (Nguồn: [https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/STI/STI/Sort\\_132546.pdf](https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/STI/STI/Sort_132546.pdf))
- [54] Cơ chế truy cập kênh LBT cho sự cùng tồn tại của NR-U và Wi-Fi. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/9/3gpp-technologies-unlicensed-spectrum>)
- [55] Các nhóm làm việc của IEEE: 802.18 (Quy định), 802.19 (Cùng tồn tại), và 802.22 (WRAN/CR). (Nguồn: <https://coconote.app/notes/265cc967-1393-4f13-9888-2708df98b74a>)
- [56] Lịch sử so sánh 3GPP (hệ thống đóng) và IEEE (tương tác mở). (Nguồn: [https://www.reddit.com/r/IEEE/comments/f68m18/3gpp\\_vs\\_ieee/](https://www.reddit.com/r/IEEE/comments/f68m18/3gpp_vs_ieee/))
- [57] Chia sẻ phổ tần trong Dịch vụ Vô tuyến Băng thông rộng của Công dân (CBRS). (Nguồn: [https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/PBTE079E\\_ch17?doi=10.1049/PBTE079E\\_ch17](https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/PBTE079E_ch17?doi=10.1049/PBTE079E_ch17))
- [58] Tầm nhìn 6G-NTN (Mạng Phi Mặt đất). (Nguồn: <https://6g-ntn.eu/about-6g-ntn/>)
- [59] NTN tích hợp các nền tảng LEO, UAV và HAPS. (Nguồn: <https://arxiv.org/html/2412.16611v1>)
- [60] Tích hợp NTN trong 3GPP Release 17. (Nguồn: <https://www.annales.org/enjeux-numeriques/2024/en-2024-03/2024-03-24.pdf>)
- [61] Tiêu chuẩn 3GPP NTN (Rel-17) và các cải tiến (Rel-18/19). (Nguồn: <https://www.annales.org/enjeux-numeriques/2024/en-2024-03/2024-03-24.pdf>)
- [62] Các mô hình sử dụng phổ tần nâng cao (CR, DSA) cho tích hợp NTN. (Nguồn: [https://sussex.figshare.com/articles/journal\\_contribution/Non-terrestrial\\_networks\\_for\\_6G\\_integrated\\_intelligent\\_and\\_ubiquitous\\_connectivity/26179801/1/files/47431642.pdf](https://sussex.figshare.com/articles/journal_contribution/Non-terrestrial_networks_for_6G_integrated_intelligent_and_ubiquitous_connectivity/26179801/1/files/47431642.pdf))
- [63] Chia sẻ phổ tần giữa mạng không gian và mạng mặt đất. (Nguồn: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/1/342>)
- [64] Cạnh tranh phổ tần giữa các thực thể công và tư (5G, quân sự, vệ tinh). (Nguồn: <https://www.executivebiz.com/articles/spectrum-sharing-5g-connectivity>)

- [65] Nhữngh thách thức trong tích hợp TN và NTN: trễ, dịch chuyển Doppler, quản lý nhiễu. (Nguồn: [https://sussex.figshare.com/articles/journal\\_contribution/Non-terrestrial\\_networks\\_for\\_6G\\_integrated\\_intelligent\\_and\\_ubiquitous\\_connectivity/26179801/1/files/47431642.pdf](https://sussex.figshare.com/articles/journal_contribution/Non-terrestrial_networks_for_6G_integrated_intelligent_and_ubiquitous_connectivity/26179801/1/files/47431642.pdf))
- [66] AI và Học Tăng cường Sâu (DRL) cho các vệ tinh LEO và nền tảng trên không. (Nguồn: <https://arxiv.org/html/2412.16611v1>)
- [67] Khái niệm Chia sẻ Phổ tần Động (DSS). (Nguồn: <https://www.5gamericas.org/spectrum-sharing-challenges-opportunities-briefing-paper/>)
- [68] Chia sẻ phổ tần động trong các hệ thống vệ tinh-mặt đất lai. (Nguồn: [https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/PBTE079E\\_ch17?doi=10.1049/PBTE079E\\_ch17](https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/PBTE079E_ch17?doi=10.1049/PBTE079E_ch17))
- [69] Nhữngh thách thức của NTN, bao gồm trễ, dịch chuyển Doppler và quản lý nhiễu. (Nguồn: [https://sussex.figshare.com/articles/journal\\_contribution/Non-terrestrial\\_networks\\_for\\_6G\\_integrated\\_intelligent\\_and\\_ubiquitous\\_connectivity/26179801/1/files/47431642.pdf](https://sussex.figshare.com/articles/journal_contribution/Non-terrestrial_networks_for_6G_integrated_intelligent_and_ubiquitous_connectivity/26179801/1/files/47431642.pdf))
- [70] AI và ML trong tối ưu hóa tạo chùm tia dựa trên RIS cho NTN. (Nguồn: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/21/6958>)
- [71] Quản lý tài nguyên vô tuyến dựa trên AI và học liên kết. (Nguồn: <https://6gmobile.fel.cvut.cz/portfolio/intelligent-radio-resource-and-mobility-management-based-on-federated-learning/>)
- [72] Vai trò của AI trong việc chuyển đổi cách thiết kế và triển khai hệ thống không dây (O-RAN). (Nguồn: <https://news.vt.edu/articles/2025/10/learning-at-the-speed-of-wireless--lingjia-liu-to-present-ai-nat.html>)
- [73] Truyền thông Sub-Terahertz (Sub-THz) (90-300 GHz) cho 6G. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/6g/spectrum/sub-thz>)
- [74] Nhữngh thách thức của phổ tần THz: Hấp thụ phân tử và nhu cầu chia sẻ phổ tần động (CR). (Nguồn: [https://journalwjarr.com/sites/default/files/fulltext\\_pdf/WJARR-2025-0570.pdf](https://journalwjarr.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJARR-2025-0570.pdf))
- [75] Kỹ thuật quản lý nhiễu trong THz: DSA và các phương pháp CR. (Nguồn: <https://www.mdpi.com/2224-2708/14/2/30>)

- [76] Dò phô thời gian thực (RT-SS) băng thông siêu rộng (>100 GHz) cho THz. (Nguồn: <https://arxiv.org/html/2509.03874v1>)
- [77] Định nghĩa Vô tuyến Cộng sinh (Symbiotic Radio - SR): Giao tiếp Tán xạ ngược Nhận thức. (Nguồn: <https://arxiv.org/pdf/2007.01506>)
- [78] Vô tuyến Cộng sinh (SR) và chia sẻ phô tần tương hỗ. (Nguồn: <https://arxiv.org/pdf/2007.01506>)
- [79] Khung CR cho 5G và vai trò của Cắt lát Mạng (Network Slicing). (Nguồn: [https://www.researchgate.net/figure/Cognitive-RadioCR-framework-for-5G\\_fig3\\_339780561](https://www.researchgate.net/figure/Cognitive-RadioCR-framework-for-5G_fig3_339780561))
- [80] Dò phô để truy cập phô tần động trong CRN. (Nguồn: <https://journal.esrgroups.org/jes/article/download/1433/1146/2445>)
- [81] CR như một chiến lược để khai thác các lỗ hổng phô tần. (Nguồn: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9168607/>)
- [82] Học Tăng cường Sâu (DRL) cho phân bổ tài nguyên thông minh trong mạng CR. (Nguồn: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4698>)
- [83] Phân bổ tài nguyên vô tuyến dựa trên AI cho mạng 6G. (Nguồn: [https://www.researchgate.net/publication/356394568\\_AI-Based\\_Radio\\_Resource\\_Allocation\\_in\\_Support\\_of\\_the\\_Massive\\_Heterogeneity\\_of\\_6G\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/356394568_AI-Based_Radio_Resource_Allocation_in_Support_of_the_Massive_Heterogeneity_of_6G_Networks))
- [84] AI trao quyền cho Đa truy cập (MA): Dò phô, Thiết kế Giao thức và Quản lý tài nguyên động. (Nguồn: <https://arxiv.org/abs/2406.13335>)
- [85] Dò phô băng rộng (Wideband spectrum sensing) cho phân bổ phô tần động. (Nguồn: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2023.1113832/full>)
- [86] AI-RAN: Phân bổ động các tác vụ 5G và AI. (Nguồn: <https://www.nvidia.com/en-us/industries/telecommunications/ai-ran/>)
- [87] Giải pháp Cắt lát Mạng Truy cập Vô tuyến (RAN Slicing) 5G. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2/2022/3/ericsson-demonstrates-worlds-first-5g-dynamic-radio-resource>)
- [88] Tiêu chuẩn hóa AI/ML trong 3GPP Release 18 và 19. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/blog/2025/5/solving-standardization-challenges-in-ai-driven-networks>)

- [89] Yêu cầu kỹ thuật cho Giao tiếp Độ trễ Cực thấp Siêu Tin cậy (URLLC). (Nguồn: <https://www.nowpublishers.com/article/DownloadSummary/CIT-129>)
- [90] Đa kết nối (Dual connectivity) cho các dịch vụ URLLC trong 5G NR. (Nguồn: <https://arxiv.org/html/2508.20205v1>)
- [91] Giải pháp Nhân bản Gói tin Nhận thức (Cognitive Packet Duplication) dựa trên ML cho URLLC. (Nguồn: <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/10/boosting-5g-new-radio-reliability-the-power-of-cognitive-packet-duplication>)
- [92] Các cuộc tấn công vào mạng 5G CR, bao gồm Giả mạo Dữ liệu Dò Phổ (SSDF). (Nguồn: [https://www.researchgate.net/publication/325493137\\_The\\_detection\\_of\\_the\\_spectrum\\_sensing\\_data\\_falsification\\_attack\\_in\\_cognitive\\_radio\\_ad\\_hoc\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/325493137_The_detection_of_the_spectrum_sensing_data_falsification_attack_in_cognitive_radio_ad_hoc_networks))
- [93] Tấn công Giả mạo Dữ liệu Dò Phổ (SSDF) trong Môi trường Mạng Không dây 5G. (Nguồn: <https://ir.unimas.my/id/eprint/21881/>)
- [94] Các kỹ thuật AI/ML (SVM, KNN) và các cơ chế dựa trên danh tiếng để giảm thiểu SSDF. (Nguồn: <https://www.mdpi.com/1999-4893/18/10/596>)
- [95] Các lỗ hổng bảo mật của CR do chia sẻ tần số. (Nguồn: [https://www.researchgate.net/publication/348222075\\_Cognitive\\_Radio\\_Network-Based\\_Design\\_and\\_Security\\_Challenges\\_in\\_5G\\_Communication](https://www.researchgate.net/publication/348222075_Cognitive_Radio_Network-Based_Design_and_Security_Challenges_in_5G_Communication))
- [96] Chiến lược giảm thiểu chống lại tấn công SSDF. (Nguồn: [https://www.researchgate.net/publication/335655207\\_Mitigation\\_strategy\\_against\\_spectrum-sensing\\_data\\_falsification\\_attack\\_in\\_cognitive\\_radio\\_sensor\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/335655207_Mitigation_strategy_against_spectrum-sensing_data_falsification_attack_in_cognitive_radio_sensor_networks))
- [97] Phát hiện SSDF trong Dò Phổ Hợp tác (CSS) bằng bộ phân loại Multilayer Perceptron (MLP). (Nguồn: <https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/article/view/IMEKO-ACTA-11%20%282022%29-01-21>)
- [98] Những thách thức về thiết kế và an ninh của Mạng Vô tuyến Nhận thức trong 5G. (Nguồn: <https://www.irma-international.org/viewtitle/270190/?isbn=9781799877080>)
- [99] Các thiết bị đầu cuối 5G được kích hoạt CR có thể cấu hình lại. (Nguồn: <https://www.igi-global.com/chapter/cognitive-radio-network-based-design-and-security-challenges-in-5g-communication/270190>)

- [100] Các loại tấn công SSDF: "Always Yes", "Always No", "Always Opposite". (Nguồn: <https://www.mdpi.com/1999-4893/18/10/596>)
- [101] Phân tích các loại tấn công SSDF. (Nguồn: <https://www.mdpi.com/1999-4893/18/10/596>)
- [102] Phát hiện các cuộc tấn công SSDF trong mạng CR ad hoc. (Nguồn: [https://www.researchgate.net/publication/325493137\\_The\\_detection\\_of\\_the\\_spectrum\\_sensing\\_data\\_falsification\\_attack\\_in\\_cognitive\\_radio\\_ad\\_hoc\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/325493137_The_detection_of_the_spectrum_sensing_data_falsification_attack_in_cognitive_radio_ad_hoc_networks))
- [103] Tác động của các cuộc tấn công SSDF. (Nguồn: <https://www.mdpi.com/1999-4893/18/10/596>)
- [104] Mô hình ensemble LSTM-GRU để phát hiện người dùng độc hại với độ chính xác 98%. (Nguồn: <https://ieta.org/journals/ijssse/paper/10.18280/ijssse.150119>)
- [105] Lợi ích của các nguyên tắc Vô tuyến Nhận thức (CR) đối với 5G. (Nguồn: <https://eai.eu/blog/how-can-5g-wireless-benefit-from-cognitive-radio-principles/>)