

VIETTEL DIGITAL TALENT

Mini Project

ƯỚC LƯỢNG VÀ CÂN BẰNG KÊNH TRUYỀN

Nguyễn Huy Minh



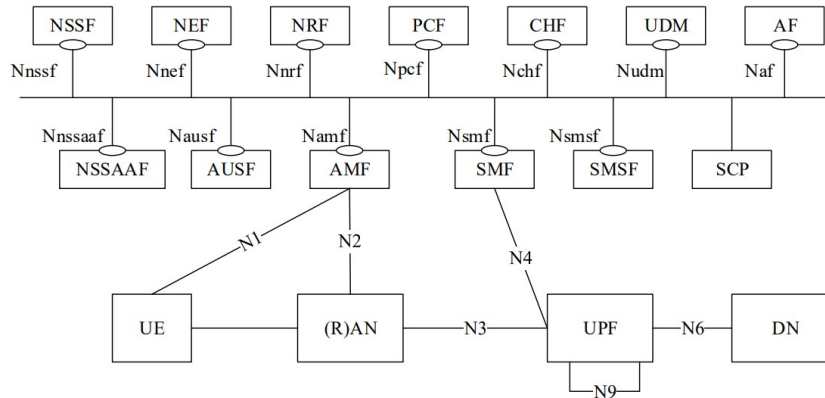
Mentor

Đặng Hoài Sơn

Ngày 2 tháng 7 năm 2025

Describes 5GC architecture

5G interface - As 4G reference point

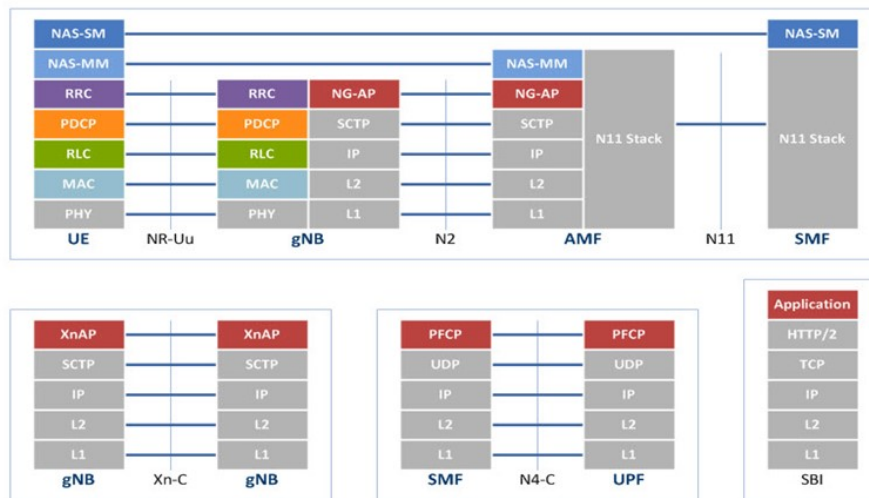


Hình 3: Sơ đồ 5G interface

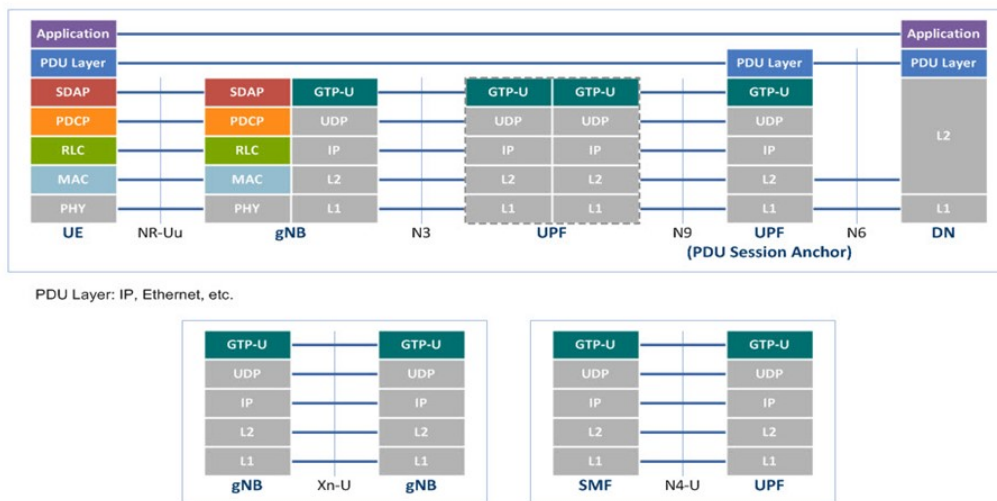
NF	Chức năng
AMF	Quản lý việc đăng ký, kết nối, khả năng tiếp cận và di động của thiết bị người dùng (UE).
SMF	Quản lý các phiên dữ liệu (PDU Session) của người dùng, bao gồm cấp phát IP và điều khiển UPF.
UPF	Định tuyến và chuyển tiếp gói tin dữ liệu người dùng, thực thi chính sách và đóng vai trò điểm neo di động.
AUSF	Thực hiện các thuật toán và quy trình xác thực danh tính của thiết bị người dùng (UE).
UDM	Lưu trữ và quản lý dữ liệu thuê bao, hồ sơ đăng ký và thông tin xác thực của người dùng.
PCF	Cung cấp các quy tắc chính sách (ví dụ: QoS, tính cước) để điều khiển hành vi mạng.
NRF, NEF, NSSF	Các chức năng mới so với 4G

Bảng 1: Một số chức năng mạng trong 5G Core

1.2 Các giao thức cơ bản trong gNodeB

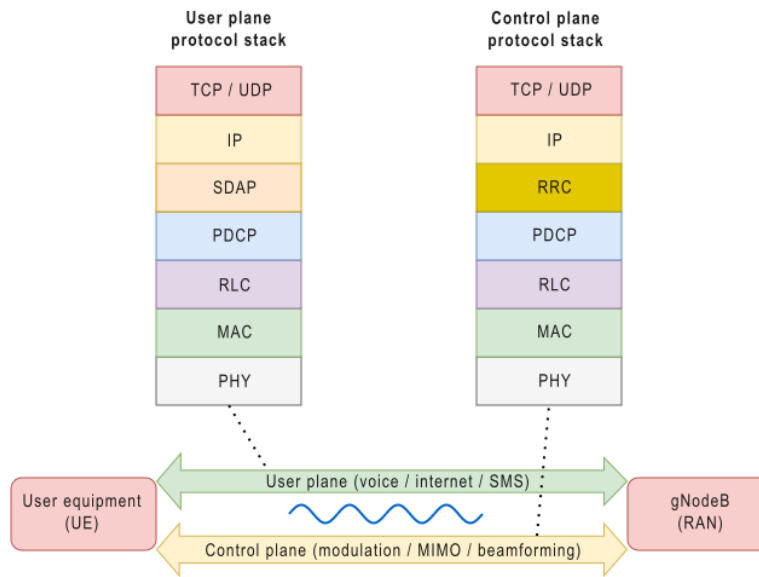


Hình 4: Control Plane Protocol



Hình 5: User Plane Protocol Stacks

Kiến trúc của gNodeB gồm 2 giao thức chính là mặt Control Plane (Mặt phẳng Điều khiển) và User Plane (Mặt phẳng Người dùng). Control Plane thiết lập, duy trì, và giải phóng các kết nối và tài nguyên vô tuyến còn User Plane truyền tải dữ liệu thực tế của người dùng.

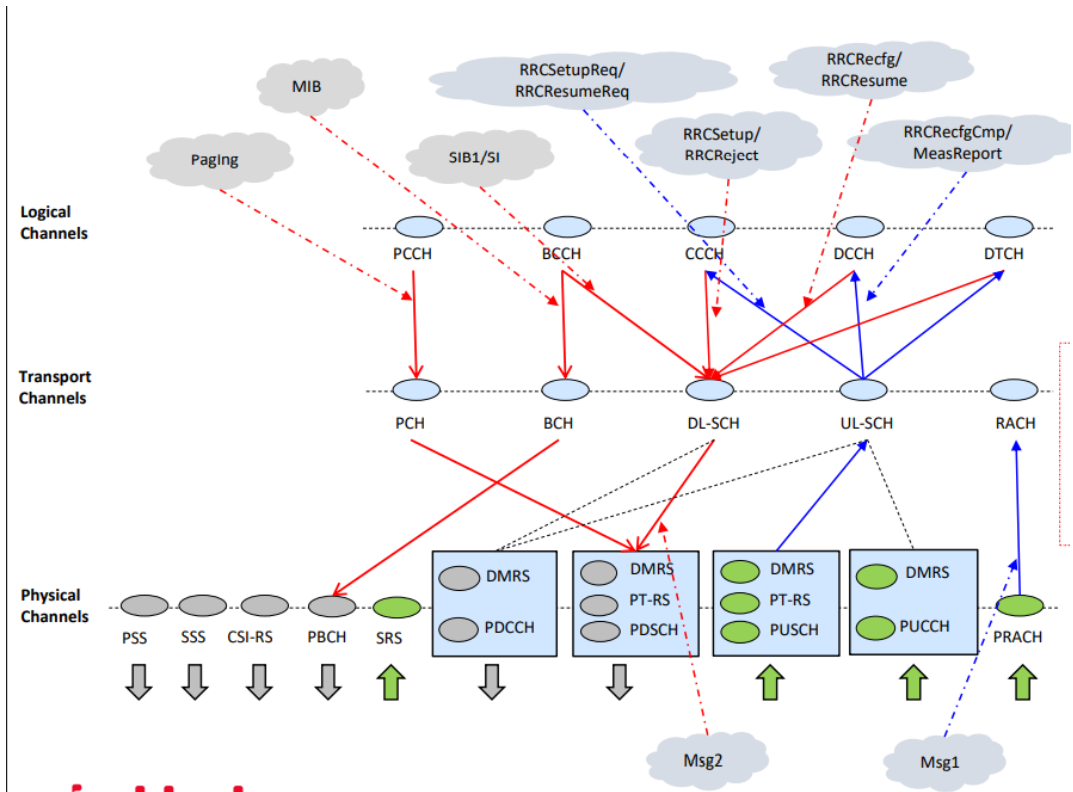


Hình 6: GNodeB protocol

Bảng 2: Các Lớp Giao thức Chính trong Giao diện Vô tuyến 5G

Tầng	Chức năng
PHY	Chịu trách nhiệm truyền các bit qua môi trường sóng vô tuyến. Nó xử lý việc điều chế, mã hóa kênh, và các khía cạnh vật lý của việc gửi và nhận tín hiệu.
MAC	Quyết định UE nào được phép truyền dữ liệu và vào thời điểm nào để tránh xung đột. Tầng này cũng chịu trách nhiệm ghép nối dữ liệu từ nhiều luồng logic khác nhau vào một luồng truyền tải.
RLC	Đảm bảo dữ liệu được truyền đi một cách đáng tin cậy. Nó có thể chia các gói tin lớn thành các đoạn nhỏ hơn và ghép chúng lại ở phía nhận. Nếu một đoạn bị mất, RLC có thể yêu cầu truyền lại.
PDCP	Có vai trò nén, mã hóa và đảm bảo dữ liệu được chuyển giao đúng thứ tự qua giao diện vô tuyến một cách hiệu quả và an toàn
SDAP	Nhiệm vụ của nó là ánh xạ Chất lượng Dịch vụ QoS . Nó nhận biết các loại dữ liệu khác nhau từ lớp trên) và ánh xạ chúng vào đúng luồng vô tuyến đã được cấu hình với các mức ưu tiên tương ứng.
RRC	Quản lý thông tin hệ thống (Cell ID, đồng bộ thời gian,...), thiết lập bearer, gửi bản tin paging, điều phối đo lường mạng.

1.3 Tổng quan nghiệp vụ các kênh Downlink, Uplink xử lý tín hiệu lớp vật lý



Hình 7: Sơ đồ ánh xạ kênh trong 5G NR

Bảng 3: Các kênh và tín hiệu vật lý Downlink (từ gNodeB đến UE)

Kênh vật lý Downlink	
Kênh	Chức năng chính
PBCH (Physical Broadcast Channel)	Mang thông tin hệ thống cốt lõi (MIB) để UE có thể kết nối với cell.
PDCCH (Physical Downlink Control Channel)	Truyền lệnh điều khiển để thông báo cho UE về việc cấp phát tài nguyên dữ liệu.
PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)	Kênh chính để truyền dữ liệu người dùng, thông tin hệ thống (SIB) và tin nhắn paging.
Tín hiệu vật lý Downlink	
Tín hiệu	Chức năng chính

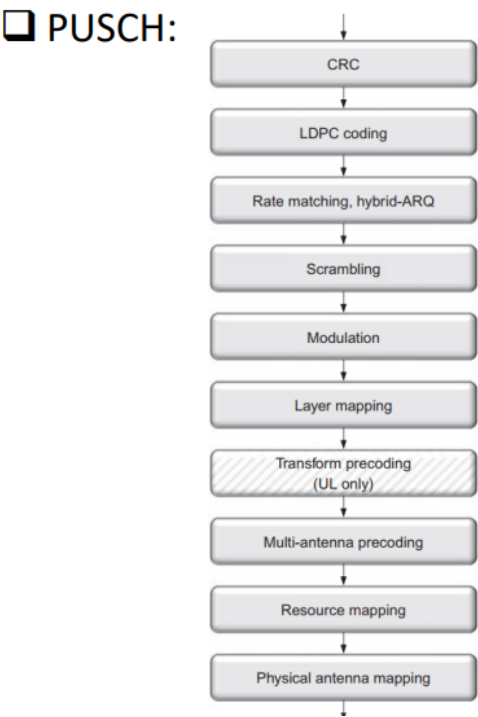
PSS/SSS (Primary / Secondary Synchronization Signal)	Giúp UE đồng bộ thời gian/tần số và xác định định danh của cell.
CSI-RS (Channel State Information Reference Signal)	Cho phép UE đo chất lượng kênh đường xuống để báo cáo lại cho trạm gốc.
DMRS (Demodulation Reference Signal)	Tín hiệu tham chiếu giúp UE giải điều chế dữ liệu nhận được một cách chính xác.
PT-RS (Phase Tracking Reference Signal)	Giúp UE bù trừ nhiễu pha để cải thiện việc nhận dữ liệu ở tần số cao.

Bảng 4: Các kênh và tín hiệu vật lý Uplink (từ UE đến gNodeB)

Kênh vật lý Uplink	
Kênh	Chức năng chính
PRACH (Physical Random Access Channel)	Được UE sử dụng để gửi yêu cầu kết nối ban đầu đến mạng.
PUCCH (Physical Uplink Control Channel)	Mang thông tin điều khiển từ UE như ACK/NACK, báo cáo chất lượng kênh, và yêu cầu dữ liệu.
PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)	Kênh chính để UE gửi dữ liệu người dùng và các thông điệp báo hiệu lên trạm gốc.
Tín hiệu vật lý Uplink	
Tín hiệu	Chức năng chính
SRS (Sounding Reference Signal)	Cho phép trạm gốc đo chất lượng kênh đường lên để lập lịch tài nguyên hiệu quả.
DMRS (Demodulation Reference Signal)	Tín hiệu tham chiếu giúp trạm gốc giải điều chế dữ liệu do UE gửi lên.
PT-RS (Phase Tracking Reference Signal)	Giúp trạm gốc bù trừ nhiễu pha từ tín hiệu của UE ở tần số cao.

Vai trò chính của lớp Vật lý trong 5G là chuyển đổi và truyền tải tín hiệu thông qua các phương pháp mã hóa và điều chế; quản lý tài nguyên vô tuyến; xử lý kênh vô tuyến như xử lý lỗi. Lớp vật lý cũng hỗ trợ các công nghệ tiên tiến cho 5G như Beamforming, Massive MIMO, quản lý băng tần rộng (mmWave, sub-6 GHz).

1.4 Tổng quan kênh Uplink PUSCH



Hình 8: Các luồng xử lý kênh Uplink PUSCH

Bảng 5: Các Khối xử lý Uplink và Chức năng/Mục đích

Khối xử lý	Chức năng và mục đích
CRC	Thêm mã kiểm tra lỗi chuỗi (Cyclic Redundancy Check) để phát hiện lỗi trong dữ liệu đầu vào, đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu.
LDPC Coding	Sử dụng mã sửa lỗi LDPC (Low-Density Parity-Check) để mã hóa dữ liệu, tăng khả năng sửa lỗi và cải thiện hiệu suất truyền dẫn.
Rate Matching, hybrid-ARQ	Điều chỉnh tỷ lệ mã hóa (rate matching) để phù hợp với tài nguyên kênh và tích hợp hybrid-ARQ (Automatic Repeat reQuest) để hỗ trợ truyền lại dữ liệu khi cần.
Scrambling	Xáo trộn bit dữ liệu để tăng tính bảo mật và giảm nhiễu giữa các người dùng.
Modulation	Chuyển đổi dữ liệu nhị phân thành tín hiệu tương tự (ví dụ: QPSK, 16-QAM, 64-QAM) để truyền qua kênh.

Bảng 5: Các Khối xử lý Uplink và Chức năng/Mục đích

Khối xử lý	Chức năng và mục đích
Layer Mapping	Phân bổ dữ liệu đã điều chế vào các lớp truyền (layers) để hỗ trợ truyền đa tầng (MIMO).
Transform Precoding (UL only)	Áp dụng precoding biến đổi (chỉ cho uplink) để tối ưu hóa tín hiệu trước khi truyền, đặc biệt trong trường hợp SC-FDMA.
Multi-antenna precoding	Tối ưu hóa tín hiệu cho truyền đa anten, cải thiện hiệu suất thông qua điều chỉnh hướng và cường độ tín hiệu.
Resource Mapping	Ánh xạ dữ liệu đã xử lý vào các tài nguyên thời gian và tần số (resource elements) trên lưới tài nguyên.
Physical Antenna Mapping	Phân bổ tín hiệu cuối cùng vào các anten vật lý để truyền qua không gian.

2 Thiết kế bộ ước lượng và cân bằng kênh truyền cho PUSCH

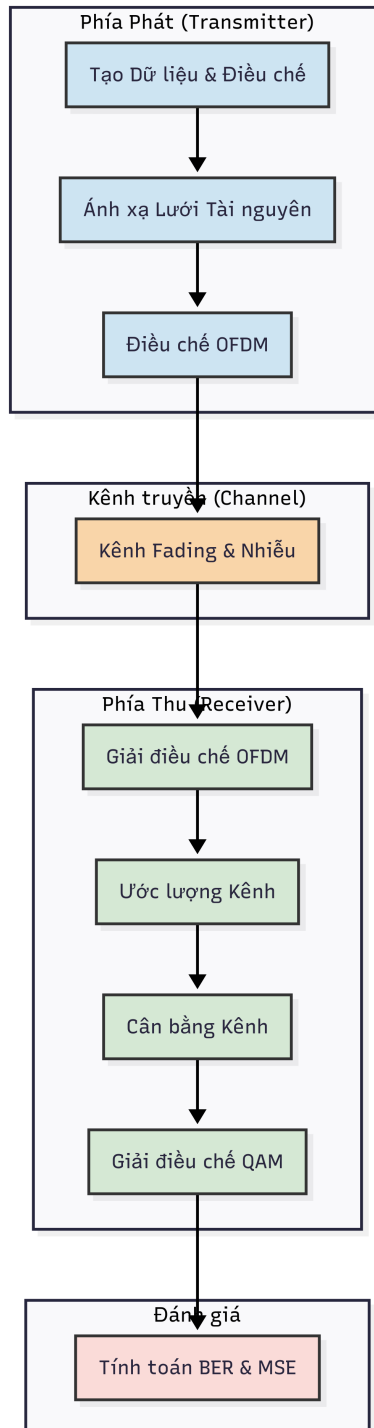
2.1 Xây dựng bài toán dưới dạng lưu đồ

Bảng 6: Mô tả các khối chức năng của hệ thống

Tên khối	Mục đích và phương pháp
Tạo dữ liệu và điều chế	<p>Mục đích: Tạo ra nguồn dữ liệu gốc để truyền đi.</p> <p>Phương pháp:</p> <ul style="list-style-type: none"> Một chuỗi bit ngẫu nhiên (0 và 1) được tạo ra với độ dài phù hợp với một lưới tài nguyên. Chuỗi bit này được điều chế thành các ký hiệu phức theo các chòm sao QPSK, 16QAM, hoặc 64QAM. Chuỗi bit và các ký hiệu phức gốc được lưu lại để so sánh ở phía thu nhằm tính toán BER và MSE.

Tên khối	Mục đích và phương pháp
Ánh xạ lưới tài nguyên	<p>Mục đích: Sắp xếp các ký hiệu vào cấu trúc khung OFDM trong miền tần số.</p> <p>Phương pháp:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Khởi tạo một ma trận phức có kích thước 3276x14. • Các ký hiệu dữ liệu (D) từ khối Tạo dữ liệu và điều chế được điền vào 13 cột dành cho dữ liệu. • Các ký hiệu tham chiếu (R - DMRS) được đọc từ file đính kèm và điền vào cột thứ 3.
Điều chế OFDM	<p>Mục đích: Chuyển đổi tín hiệu từ miền tần số sang miền thời gian.</p> <p>Phương pháp:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thực hiện biến đổi Fourier ngược (IFFT) trên từng cột (từng ký hiệu OFDM) của lưới tài nguyên. • Thêm một bản sao của phần cuối mỗi ký hiệu OFDM lên đầu (gọi là Tiền tố tuần hoàn - Cyclic Prefix - CP) để chống lại nhiễu đa đường. • Nối tất cả các ký hiệu OFDM lại thành một chuỗi tín hiệu liên tục trong miền thời gian, sẵn sàng để phát đi.
Kênh truyền	<p>Mục đích: Mô phỏng các tác động của môi trường truyền dẫn không dây thực tế.</p> <p>Phương pháp:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Kênh Fading</i>: Tín hiệu đi qua một mô hình kênh đa đường (multipath fading), làm cho tín hiệu bị méo về biên độ và pha. • <i>Nhiều Gauss (AWGN)</i>: Nhiễu nhiệt ngẫu nhiên được cộng vào tín hiệu. Công suất của nhiễu được xác định bởi giá trị SNR (Signal-to-Noise Ratio) đang được khảo sát.
Giải điều chế OFDM	<p>Mục đích: Chuyển tín hiệu nhận được về lại miền tần số.</p> <p>Phương pháp:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Loại bỏ phần tiền tố tuần hoàn (CP) khỏi mỗi ký hiệu OFDM. • Thực hiện biến đổi Fourier (FFT) trên từng ký hiệu để thu lại lưới tài nguyên (phiên bản bị méo và nhiễu của lưới ban đầu).

Tên khối	Mục đích và phương pháp
Ước lượng Kênh	<p>Mục đích: Ước tính tác động của kênh Fading (đáp ứng kênh H) dựa trên các tín hiệu tham chiếu đã biết.</p> <p>Phương pháp:</p> <ul style="list-style-type: none"> Trích xuất các ký hiệu DMRS nhận được (Y_{dmrs}) và so sánh chúng với các ký hiệu DMRS gốc (R). <i>Thuật toán LS:</i> Tính H bằng phép chia Y_{dmrs}/R. <i>Thuật toán MMSE:</i> Sử dụng bộ lọc Wiener để cải thiện ước lượng LS, có xét đến thống kê của kênh và nhiễu. <i>Nội suy:</i> Từ các ước lượng tại vị trí DMRS, nội suy ra đáp ứng kênh cho toàn bộ các vị trí dữ liệu.
Cân bằng Kênh	<p>Mục đích: Loại bỏ hoặc giảm thiểu ảnh hưởng của kênh truyền khỏi các ký hiệu dữ liệu.</p> <p>Phương pháp: Sử dụng đáp ứng kênh H ước lượng được từ khối Ước lượng kênh.</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>Thuật toán ZF:</i> Đảo ngược đáp ứng kênh bằng phép chia Y_{data}/H. <i>Thuật toán MMSE:</i> Áp dụng một bộ lọc tối ưu hơn, cân bằng giữa việc đảo ngược kênh và khuếch đại nhiễu.
Giải điều chế QAM	<p>Mục đích: Chuyển các ký hiệu phức (đã được cân bằng) về lại chuỗi bit.</p> <p>Phương pháp:</p> <ul style="list-style-type: none"> Với mỗi ký hiệu nhận được, tìm điểm gần nhất trong chòm sao gốc (QPSK, 16QAM, 64QAM). Đây gọi là quyết định cứng (hard-decision). Ánh xạ ngược điểm đã quyết định về lại chuỗi bit tương ứng.
Đánh giá Hiệu năng	<p>Mục đích: Đo lường chất lượng của toàn bộ hệ thống.</p> <p>Phương pháp:</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>BER (Bit Error Rate):</i> So sánh chuỗi bit nhận được (từ Khối 8) với chuỗi bit gốc (từ khối Tạo dữ liệu và điều chế) và đếm tỉ lệ bit bị lỗi. <i>MSE (Mean Squared Error):</i> Tính toán sai số bình phương trung bình giữa các ký hiệu QAM gốc (từ khối Tạo dữ liệu và điều chế) và các ký hiệu QAM đã được cân bằng (từ khối Cân bằng kênh).



Hình 9: Lưu đồ cho thiết kế

2.2 Mô tả các thuật toán

1. Giải mã Hard-bit 16QAM

- *Mục tiêu:* Từ một ký hiệu phức nhận được y (sau khi cân bằng kênh), quyết định xem nó tương ứng với ký hiệu nào trong 16 ký hiệu gốc của chòm sao 16QAM.
- *Nguyên lý:* Dựa trên quy tắc "khoảng cách tối thiểu" (Minimum Distance). Ký hiệu gốc được cho là ký hiệu có khoảng cách Euclidean nhỏ nhất đến ký hiệu nhận được.
- *Công thức:* Gọi $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{16}\}$ là tập hợp 16 điểm phức trong chòm sao 16QAM lý tưởng. Ký hiệu được giải mã x_{demod} được xác định bởi:

$$x_{demod} = \arg \min_{c_i \in C} |y - c_i|^2$$

- *Phương pháp:* Sau khi tìm được c_i gần nhất, chuỗi 4 bit tương ứng với c_i trong bảng mã Gray được xác định là chuỗi bit đã giải mã.

2. Ước lượng Kênh LS (Least Squares)

- *Mô hình tín hiệu:* Tại các vị trí pilot (DMRS), mối quan hệ giữa tín hiệu phát X_p , tín hiệu nhận Y_p , đáp ứng kênh H_p và nhiễu N_p là:

$$Y_p = H_p \cdot X_p + N_p$$

- *Mục tiêu:* Tìm một ước lượng H_{LS} sao cho sai số bình phương $|Y_p - H_{LS} \cdot X_p|^2$ là nhỏ nhất.
- *Nguyên lý:* Thuật toán LS đơn giản hóa bài toán bằng cách bỏ qua thành phần nhiễu N_p , giả định $Y_p \approx H_p \cdot X_p$.
- *Công thức:* Lời giải cho bài toán tối ưu trên là một phép chia theo từng phần tử:

$$H_{LS} = Y_p / X_p$$

- *Ưu/Nhược điểm:*
 - *Ưu điểm:* Rất đơn giản, chi phí tính toán thấp.
 - *Nhược điểm:* Rất nhạy cảm với nhiễu. Nó không phân biệt được đâu là tác động của kênh và đâu là nhiễu, do đó nó khuếch đại nhiễu cùng với tín hiệu.

3. Cân bằng Kênh ZF (Zero-Forcing)

- *Mục tiêu:* Hoàn toàn đảo ngược tác động của kênh truyền để khôi phục lại tín hiệu gốc.
- *Nguyên lý:* Thiết kế một bộ lọc W_{ZF} sao cho $H_{est} \cdot W_{ZF} = 1$, trong đó H_{est} là đáp ứng kênh đã được ước lượng (ví dụ, bằng LS).
- *Công thức:* Bộ lọc là $W_{ZF} = 1/H_{est}$. Tín hiệu được khôi phục là:

$$X_{ZF} = Y_d \cdot W_{ZF} = Y_d / H_{est}$$

(với Y_d là ký hiệu dữ liệu nhận được).

- *Ưu/Nhược điểm:*

- *Ưu điểm:* Đơn giản.

- *Nhược điểm:* Khuếch đại nhiễu nghiêm trọng. Khi kênh bị suy hao sâu (H_{est} có giá trị rất nhỏ), bộ lọc $1/H_{est}$ sẽ có giá trị rất lớn, làm khuếch đại nhiễu (N_d/H_{est}) và làm giảm đáng kể hiệu năng hệ thống, đặc biệt ở SNR thấp.

4. Ước lượng Kênh MMSE (Minimum Mean Square Error)

- *Mục tiêu:* Tìm một ước lượng H_{MMSE} sao cho sai số bình phương trung bình giữa nó và đáp ứng kênh thực tế H_p là nhỏ nhất: $\min E\{|H_p - H_{MMSE}|^2\}$.

- *Nguyên lý:* Đây là một bộ lọc Wiener, sử dụng thông tin thống kê bậc hai của kênh (ma trận tự tương quan $R_{HH} = E\{H_p \cdot H_p'\}$) và của nhiễu (phương sai nhiễu σ_n^2 , liên quan đến $1/\text{SNR}$) để lọc nhiễu ra khỏi ước lượng LS ban đầu.

- *Công thức:*

$$H_{MMSE} = R_{HH} \cdot \text{inv}(R_{HH} + \sigma_n^2 \cdot I) \cdot H_{LS}$$

(Trong mô phỏng của chúng ta, σ_n^2 được thay bằng $1/\text{SNR}$ vì công suất tín hiệu được chuẩn hóa).

- *Ưu/Nhược điểm:*

- *Ưu điểm:* Cho kết quả ước lượng chính xác hơn nhiều so với LS, đặc biệt ở SNR thấp.

- *Nhược điểm:* Phức tạp hơn về mặt tính toán, đòi hỏi phải biết hoặc ước lượng được ma trận tự tương quan của kênh và SNR.

5. Cân bằng Kênh MMSE

- *Mục tiêu:* Tìm một ký hiệu X_{MMSE} để tối thiểu hóa sai số bình phương trung bình giữa nó và ký hiệu gốc X_d : $\min E\{|X_d - X_{MMSE}|^2\}$.

- *Nguyên lý:* Thay vì cố gắng đảo ngược kênh một cách hoàn hảo như ZF, MMSE tìm một sự cân bằng tối ưu giữa việc đảo ngược kênh và việc khuếch đại nhiễu.

- *Công thức:* Bộ lọc MMSE là $W_{MMSE} = \text{conj}(H_{est}) / (|H_{est}|^2 + 1/\text{SNR})$. Tín hiệu được khôi phục là:

$$X_{MMSE} = Y_d \cdot W_{MMSE}$$

- *Ưu/Nhược điểm:*

- *Ưu điểm:* Hiệu năng vượt trội so với ZF, đặc biệt ở SNR thấp và trung bình. Thành phần $1/\text{SNR}$ trong mẫu số giúp tránh việc chia cho một số quá nhỏ, do đó hạn chế được vấn đề khuếch đại nhiễu.

- *Nhược điểm:* Phức tạp hơn ZF, yêu cầu phải có ước lượng về SNR.

2.3 Kết quả chạy code

SNR: 0 dB	BER (LS/ZF): 1.971650e-01	BER (MMSE): 1.971681e-01
SNR: 2 dB	BER (LS/ZF): 1.579652e-01	BER (MMSE): 1.579684e-01
SNR: 4 dB	BER (LS/ZF): 9.490796e-02	BER (MMSE): 9.490596e-02
SNR: 6 dB	BER (LS/ZF): 9.185510e-02	BER (MMSE): 9.185804e-02
SNR: 8 dB	BER (LS/ZF): 4.123309e-02	BER (MMSE): 4.123403e-02
SNR: 10 dB	BER (LS/ZF): 3.300378e-02	BER (MMSE): 3.300413e-02
SNR: 12 dB	BER (LS/ZF): 1.986182e-02	BER (MMSE): 1.985994e-02
SNR: 14 dB	BER (LS/ZF): 1.026510e-02	BER (MMSE): 1.026428e-02
SNR: 16 dB	BER (LS/ZF): 5.896379e-03	BER (MMSE): 5.896731e-03
SNR: 18 dB	BER (LS/ZF): 1.747793e-03	BER (MMSE): 1.747793e-03
SNR: 20 dB	BER (LS/ZF): 4.634991e-03	BER (MMSE): 4.634756e-03
SNR: 22 dB	BER (LS/ZF): 1.570513e-03	BER (MMSE): 1.570513e-03
SNR: 24 dB	BER (LS/ZF): 1.055462e-04	BER (MMSE): 1.055462e-04
SNR: 26 dB	BER (LS/ZF): 6.222410e-06	BER (MMSE): 6.222410e-06
SNR: 28 dB	BER (LS/ZF): 1.253874e-04	BER (MMSE): 1.253874e-04
SNR: 30 dB	BER (LS/ZF): 2.636893e-04	BER (MMSE): 2.636893e-04

Hình 10: Kết quả điều chế QPSK

--- Đang chạy cho điều chế: 16QAM ---

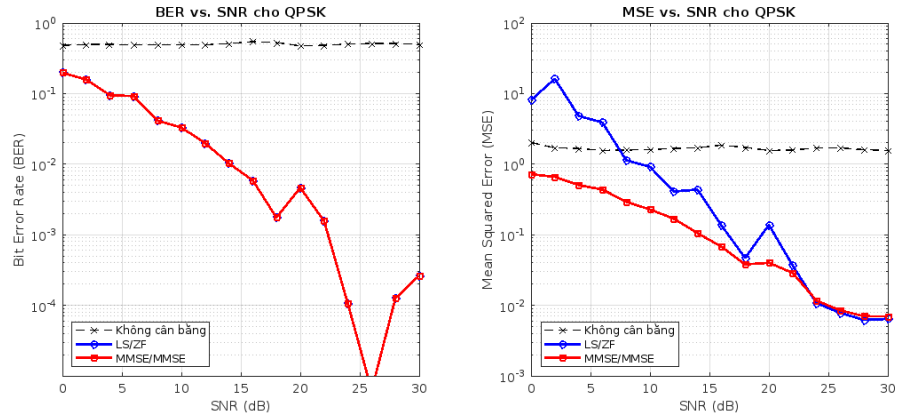
SNR: 0 dB	BER (LS/ZF): 2.773839e-01	BER (MMSE): 3.413279e-01
SNR: 2 dB	BER (LS/ZF): 2.500942e-01	BER (MMSE): 3.111648e-01
SNR: 4 dB	BER (LS/ZF): 1.818211e-01	BER (MMSE): 2.555664e-01
SNR: 6 dB	BER (LS/ZF): 1.550983e-01	BER (MMSE): 2.250297e-01
SNR: 8 dB	BER (LS/ZF): 1.414805e-01	BER (MMSE): 1.965771e-01
SNR: 10 dB	BER (LS/ZF): 7.164084e-02	BER (MMSE): 1.180743e-01
SNR: 12 dB	BER (LS/ZF): 7.340618e-02	BER (MMSE): 1.131444e-01
SNR: 14 dB	BER (LS/ZF): 4.210130e-02	BER (MMSE): 6.425677e-02
SNR: 16 dB	BER (LS/ZF): 3.278899e-02	BER (MMSE): 5.408730e-02
SNR: 18 dB	BER (LS/ZF): 1.769196e-02	BER (MMSE): 3.215513e-02
SNR: 20 dB	BER (LS/ZF): 1.185510e-02	BER (MMSE): 1.804147e-02
SNR: 22 dB	BER (LS/ZF): 5.958897e-03	BER (MMSE): 9.097046e-03
SNR: 24 dB	BER (LS/ZF): 6.576500e-03	BER (MMSE): 9.676552e-03
SNR: 26 dB	BER (LS/ZF): 3.078332e-04	BER (MMSE): 1.244776e-03
SNR: 28 dB	BER (LS/ZF): 2.023927e-03	BER (MMSE): 2.601965e-03
SNR: 30 dB	BER (LS/ZF): 5.580797e-04	BER (MMSE): 6.923312e-04

Hình 11: Kết quả điều chế 16QAM

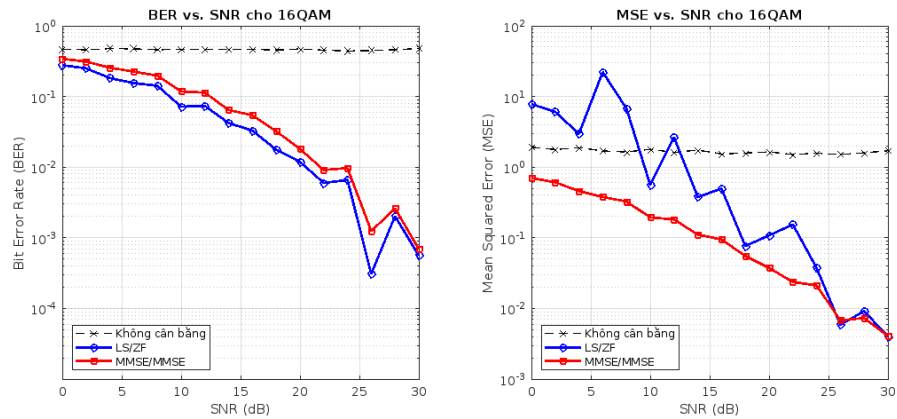
--- Đang chạy cho điều chế: 64QAM ---

SNR: 0 dB	BER (LS/ZF): 3.517383e-01	BER (MMSE): 4.024058e-01
SNR: 2 dB	BER (LS/ZF): 3.282751e-01	BER (MMSE): 3.808321e-01
SNR: 4 dB	BER (LS/ZF): 2.933821e-01	BER (MMSE): 3.524290e-01
SNR: 6 dB	BER (LS/ZF): 2.157753e-01	BER (MMSE): 2.743289e-01
SNR: 8 dB	BER (LS/ZF): 2.047137e-01	BER (MMSE): 2.575641e-01
SNR: 10 dB	BER (LS/ZF): 1.648549e-01	BER (MMSE): 2.202637e-01
SNR: 12 dB	BER (LS/ZF): 1.295107e-01	BER (MMSE): 1.697905e-01
SNR: 14 dB	BER (LS/ZF): 1.061782e-01	BER (MMSE): 1.352799e-01
SNR: 16 dB	BER (LS/ZF): 7.426795e-02	BER (MMSE): 1.008012e-01
SNR: 18 dB	BER (LS/ZF): 6.539013e-02	BER (MMSE): 8.549631e-02
SNR: 20 dB	BER (LS/ZF): 5.019642e-02	BER (MMSE): 6.890450e-02
SNR: 22 dB	BER (LS/ZF): 3.251792e-02	BER (MMSE): 3.973005e-02
SNR: 24 dB	BER (LS/ZF): 1.320028e-02	BER (MMSE): 1.937443e-02
SNR: 26 dB	BER (LS/ZF): 6.974696e-03	BER (MMSE): 1.003334e-02
SNR: 28 dB	BER (LS/ZF): 2.328277e-03	BER (MMSE): 3.586848e-03
SNR: 30 dB	BER (LS/ZF): 6.336018e-03	BER (MMSE): 7.691642e-03

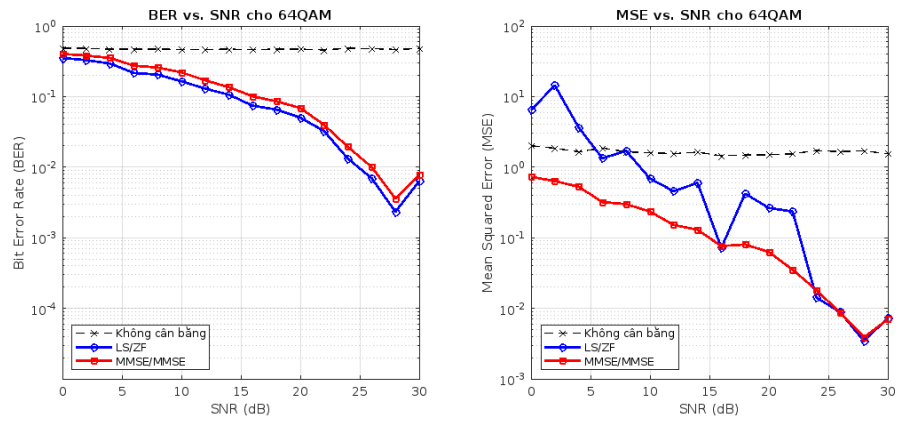
Hình 12: Kết quả điều chế 64QAM



Hình 13: Biểu đồ MSE và BER điều chế QPSK



Hình 14: Biểu đồ MSE và BER điều chế 16QAM



Hình 15: Biểu đồ MSE và BER điều chế 64QAM