



Politecnico di Milano

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

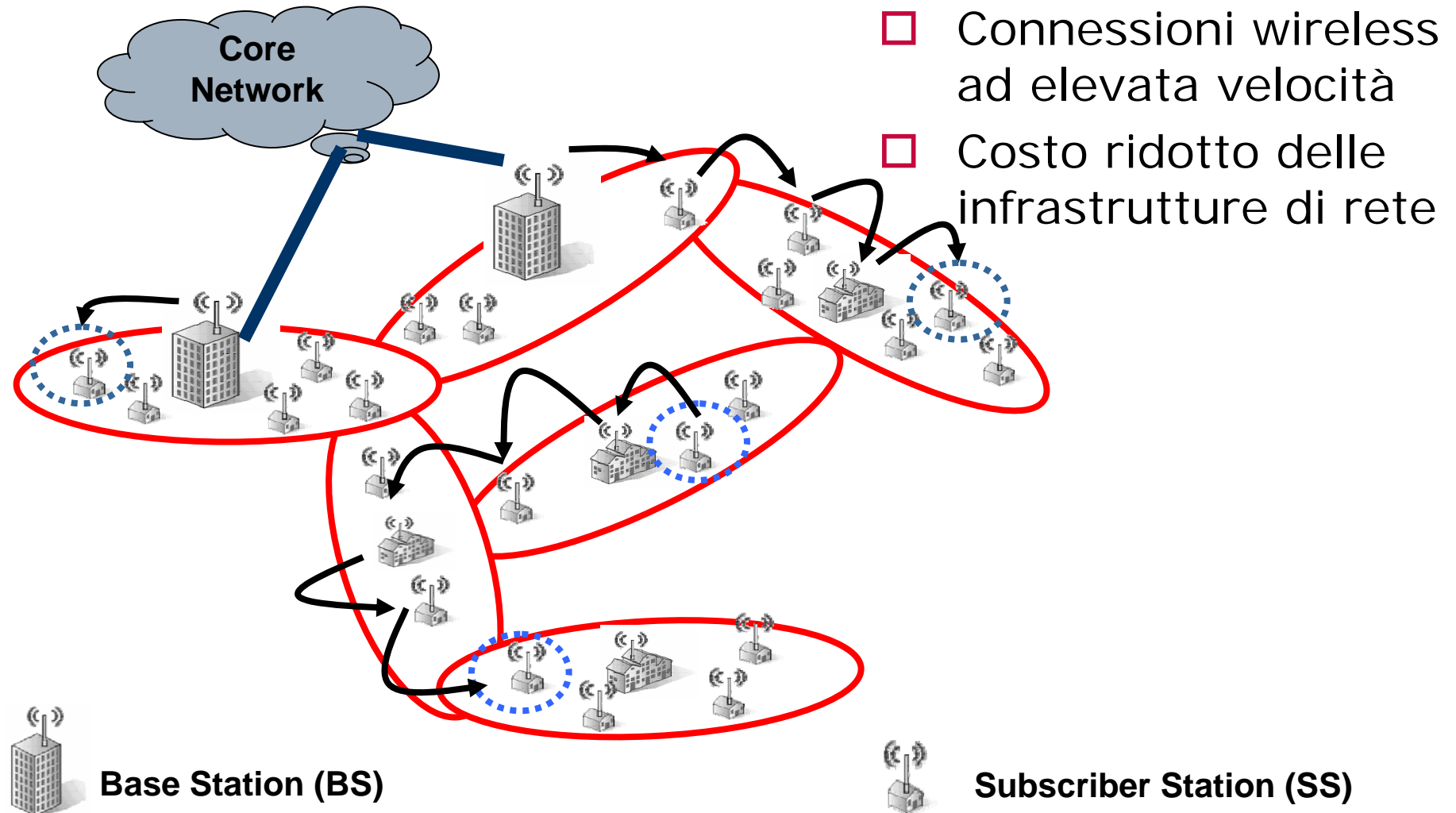
4 – Reti radio metropolitane (WMAN)

Reti Mobili Distribuite

Prof. Antonio Capone



Broadband Wireless Access (BWA)





WiMAX

- Architettura congruente con IP
 - IP mette WiMAX in posizione ottimale in termini di prestazione/costo
- Al contrario dei sistemi 3G WiMAX è stato progettato per realizzare sistemi fissi. La mobilità è stata aggiunta successivamente.
- WiMAX si pone in posizione intermedia tra WiFi e sistemi 3G in termini di
 - velocità
 - copertura
 - QoS
 - mobilità
- In futuro sono attesi lo standard IEEE 802.20 per l'altissima velocità (250 kmph) e lo standard IEEE 802.22 per sfruttare "the unused channels" presenti in aree rurali e remote



Broadband Wireless Access (BWA)

- Il “working group” IEEE 802.16 è stato costituito nel 1998 per definire un accesso BWA con le seguenti caratteristiche iniziali:
 - stazioni in visibilità (LOS)
 - topologia: point-to-multipoint
 - banda: 10 GHz - 66 GHz
- Lo standard IEEE 802.16 pubblicato nel dicembre 2001 utilizza a livello fisico una sola portante con un MAC layer di tipo burst TDM
- Successivamente è stato aggiunto un emendamento, detto 802.16a:
 - applicazioni NLOS nella banda 2 GHz - 11GHz con livello fisico basato su OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
 - livello MAC per supportare l'accesso OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)



IEEE 802.16 BWA Standards

- Infine sono state pubblicate due varianti standard
 - lo standard IEEE 802.16-2004 (giugno 2004) che definisce un accesso BWA fisso
 - lo standard IEEE 802.16e-2005 (dicembre 2005), emendamento dello standard IEEE 802.16-2004, che comprende la mobilità ed il fast handover
- WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) è il nome normalmente usato per apparati basati sugli standard 802.16



BWA Working Groups

IEEE Standard	Bande di frequenza	Approvato	Descrizione
IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004)	2-66 GHz	2004	Interfaccia radio per Fixed Broadband Wireless Access System
IEEE 802.16.2-2004	2-66 GHz	2004	Coesistenza tra Fixed Broadband Wireless Access Systems
IEEE 802.16e (IEEE 802.16e-2005)	2-66 GHz	2005	Estensione dello standard IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004) al fine di supportare sia terminali fissi che mobili
IEEE 802.16f-2005	2-66 GHz	2005	Estensione dello standard IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004) per il management base
IEEE 802.16i	2-66 GHz	no	Estensione dello standard IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004) per il mobile management base
IEEE 802.16h	2-66 GHz	no	Meccanismi per facilitare la coesistenza in frequenze senza licenza
IEEE 802.16j	2-66 GHz	no	Estensione dello standard IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004) con specifiche per relay multi-hop
IEEE 802.16k	2-66 GHz	no	Estensione dello standard IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004) con specifiche di bridging
IEEE 802.20	< 3.5 GHz	no	Interfaccia radio per Mobile Wireless Access Systems



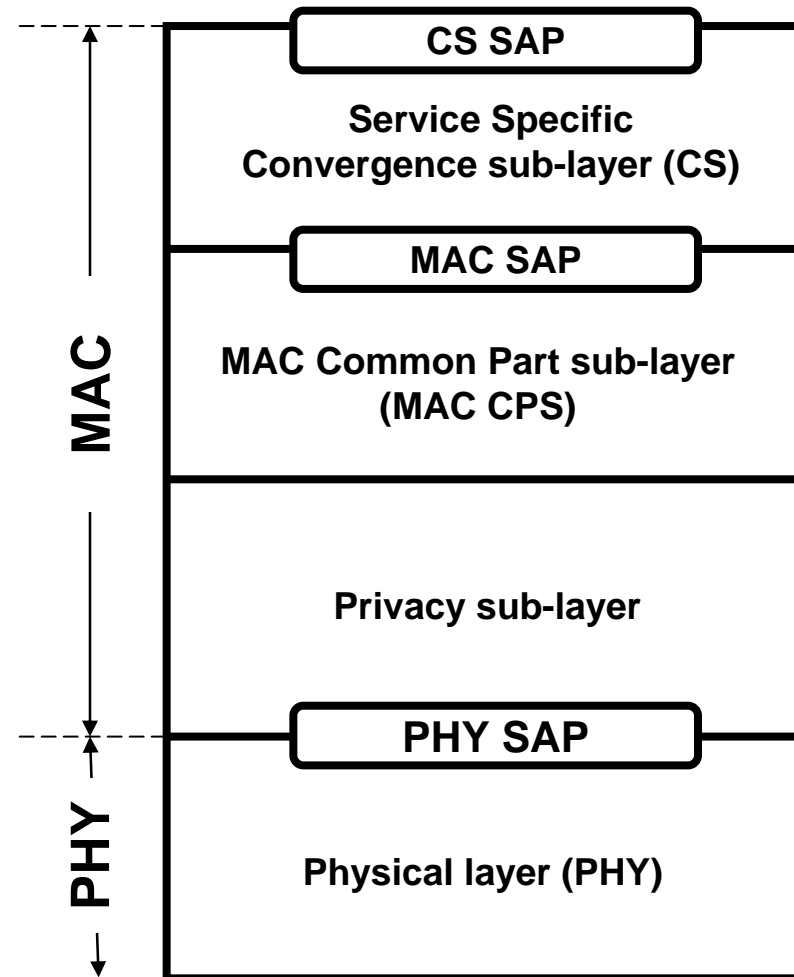
WiMAX versus 3G and WiFi

- ❑ Flessibilità nella scelta della banda del canale (da 1,25 a 20 MHz)
- ❑ In WiFi e WiMAX la modulazione OFDM permette di offrire velocità di picco molto più elevate rispetto ai sistemi CDMA che richiedono lo spreading
- ❑ In WiMAX efficienza spettrale superiore a quella dei sistemi 3G
- ❑ L'uso di antenne multiple è connesso solo in WiMAX
- ❑ L'implementazione di tecnologia MIMO è più complessa nei sistemi 3G rispetto ai sistemi WiMAX
- ❑ WiMAX è più efficiente nel fornire link simmetrici (per sistemi E1) e più flessibile nel cambiare il rapporto di banda tra uplink e downlink
- ❑ I sistemi 3G presentano una asimmetria fissa nella velocità dei dati tra downlink e uplink
- ❑ WiMAX è progettato per lavorare con IP e per supportare a livello MAC differenti tipi di traffico



Protocolli IEEE 802.16

- ❑ Il **Physical layer** è definito mediante diverse specifiche in base alle frequenze utilizzate
- ❑ Il **Privacy sub-layer** fornisce autenticazione e meccanismi di scambio delle chiavi
- ❑ Il **Common Part sub-layer** fornisce le funzionalità base del livello MAC
- ❑ Il **Service Specific Convergence sub-layer** è un'interfaccia logica con i livelli superiori
 - ATM, IP, ecc.





Bande di frequenza

- 10-66 GHz con licenza
 - fenomeno attenuativo dovuto a strutture, pioggia, ecc.
 - Line-Of-Sight (LOS)
- 2-11 GHz con licenza
 - Non-Line-Of-Sight (NLOS)
 - fenomeno multi-path
- 2-11 GHz senza licenza
 - Non-Line-Of-Sight (NLOS)
 - fenomeno multi-path
 - interferenza dovuta ad altri utenti

Area urbana





Livello fisico (PHY)

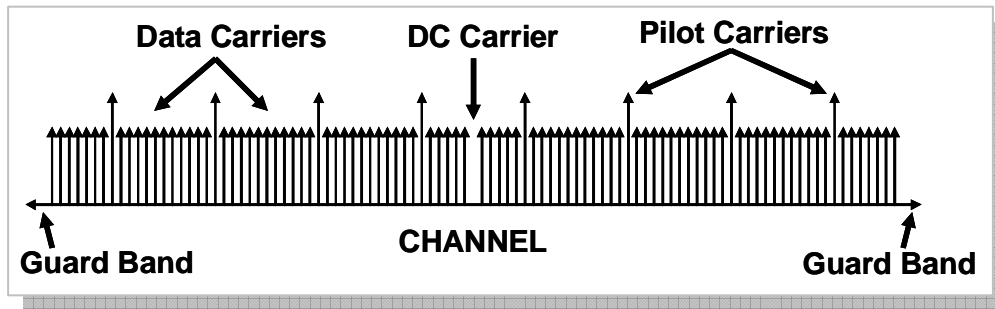
Identificativo	Applicabilità
WirelessMAN-SC	10-66 GHz
WirelessMAN-SCa	2-11 GHz Bande con licenza
WirelessMAN-OFDM	2-11 GHz Bande con licenza
WirelessMAN-OFDMA	2-11 GHz Bande con licenza
WirelessHUMAN	2-11 GHz Bande senza licenza

- Modulazione
 - Single Carrier (SC)
 - Multi Carrier
 - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

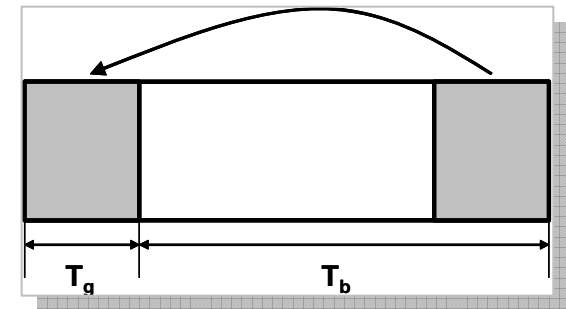


Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

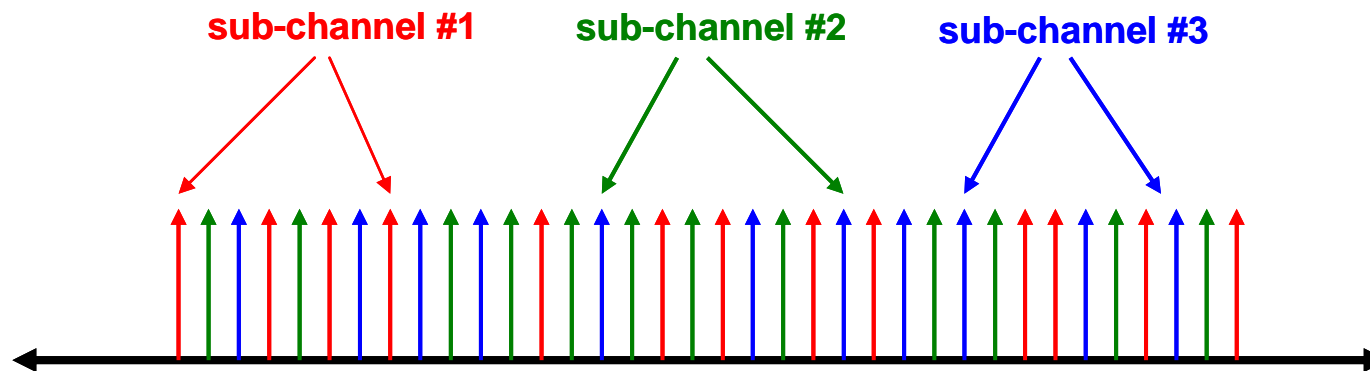
Dominio delle frequenze



Dominio del tempo



OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access



□ Sub-channel: gruppo di sub-carrier dati





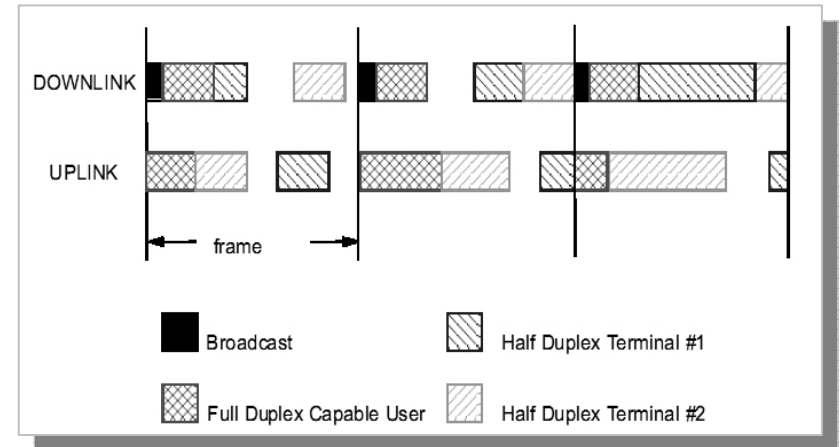
Livello fisico (PHY)

- PHY basato su trame (frame)
- Accesso multiplo Time Division Multiple Access (TDMA)
- Duplexing può essere
 - Frequency Division Duplexing (FDD)
 - Time Division Duplexing (TDD)

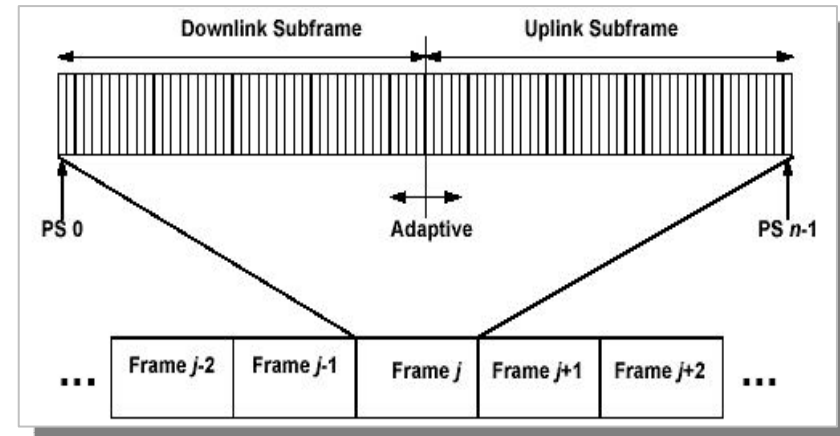


Duplexing

Frequency Division Duplexing (FDD)



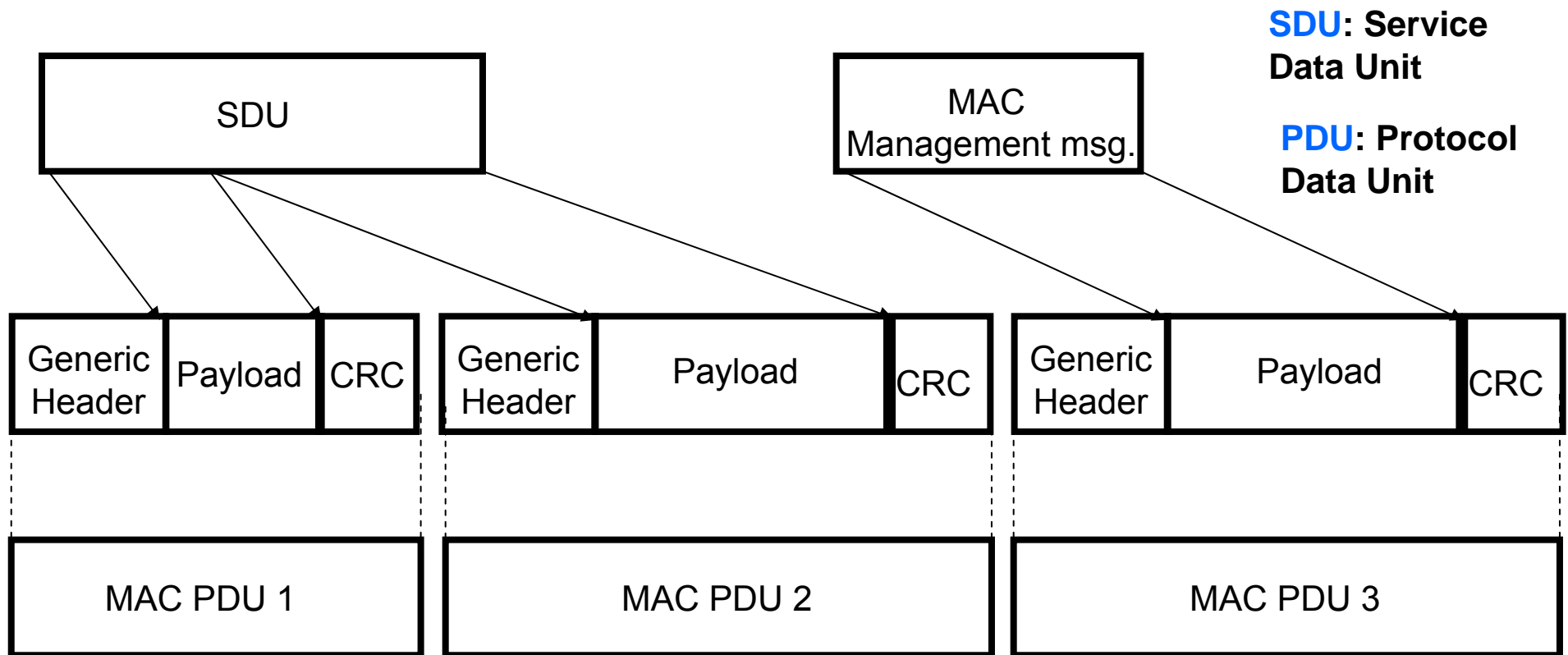
Time Division Duplexing (TDD)





MAC Common Part sub-layer

□ Protocollo orientato alla connessione

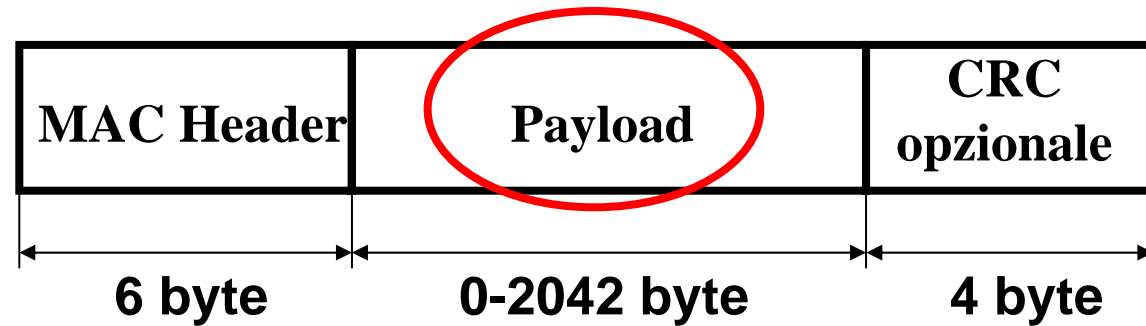




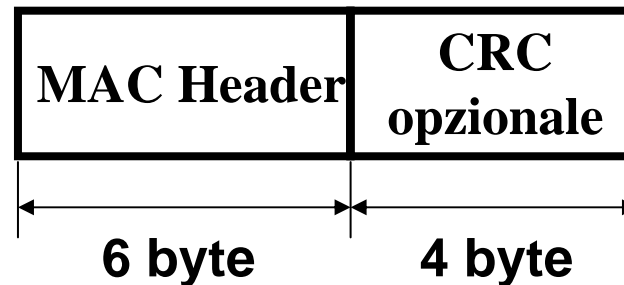
MAC PDU

- ✓ Messaggio di MAC management
- ✓ Dati (SDU)

Generic MAC PDU



Bandwidth Request





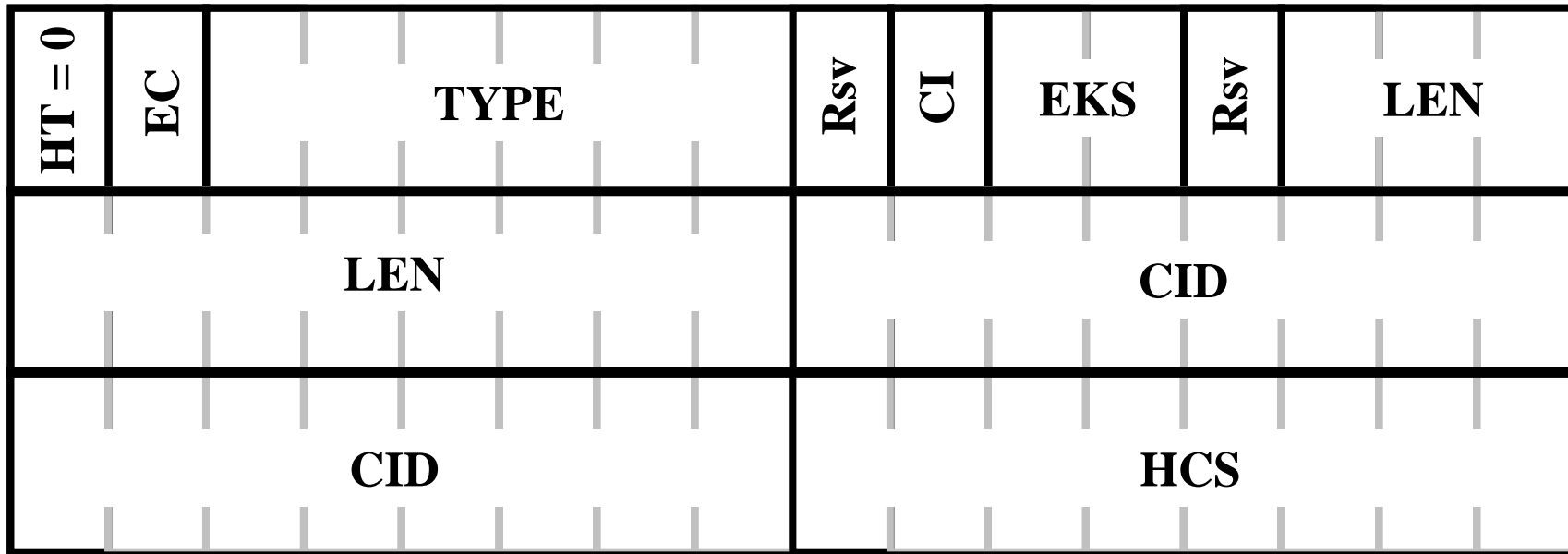
Messaggi di MAC Management

- ☐ Messaggi trasportati nel Payload delle MAC PDU
- ☐ sono utilizzati per
 - accesso alla rete
 - scheduling
 - ecc.

Management Message Type	Management Message Payload
------------------------------------	---------------------------------------



Generic MAC Header



HT: Header Type

EC: Encryption Control

TYPE: Payload Type

CI: CRC indicator

EKS: Encrypted Key Sequence

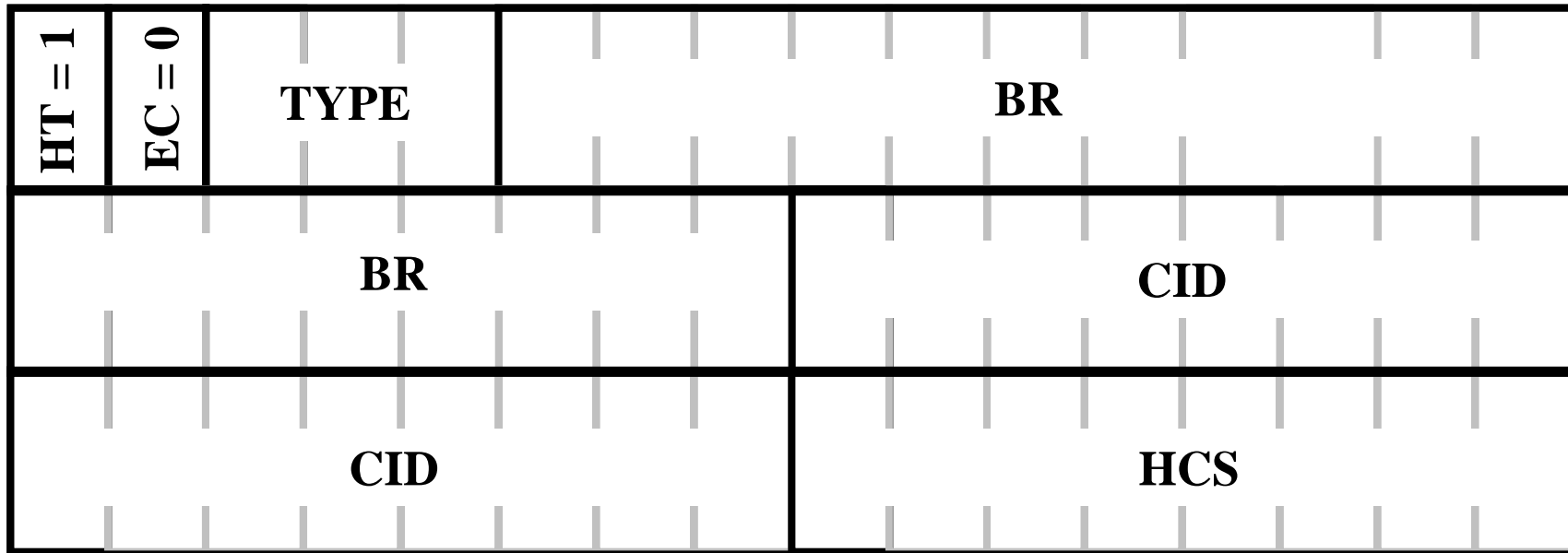
LEN: Length

CID: Connection Identifier

HCS: Header Check Sequence



Bandwidth Request MAC Header



BR: Bandwidth Request
CID: Connection Identifier
EC: Encryption Control
HCS: Header Check Sequence
HT: Header Type
TYPE: Bandwidth Request Type



MAC sub-header

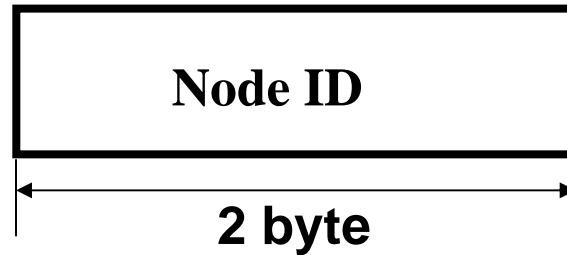
- Esistono 5 tipi
 - Mesh
 - Fragmentation
 - Packing
 - Fast Feedback Allocation
 - Grant Management

Generic MAC Header	Mesh	Grant Management	Fast Feedback Allocation	Packing/ Fragmentation	Payload	CRC opzionale
--------------------	------	------------------	--------------------------	------------------------	---------	---------------

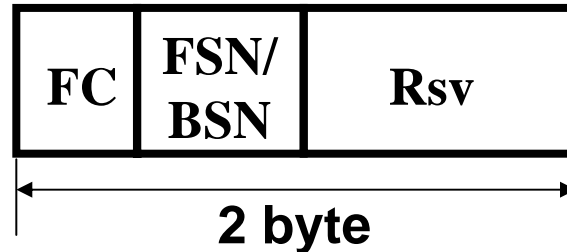


Sub-header

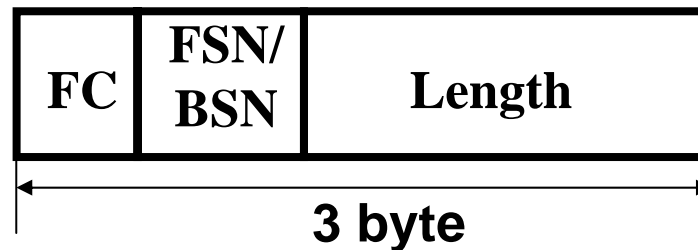
MESH



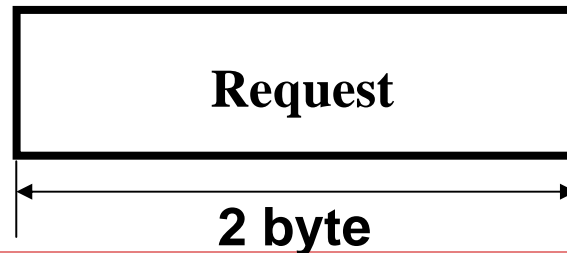
FRAGMENTATION



PACKING



PIGGYBACK



FC: Fragment state
FSN: Fragment Sequence Number (se disabled-ARQ)
BSN: Block Sequence Number (se enabled-ARQ)



MAC Common Part sub-layer

- II MAC Common sub-layer gestisce:
 - accesso alla rete
 - meccanismo di accesso multiplo
 - scheduling
 - qualità del servizio (QoS)
 - gestione della potenza



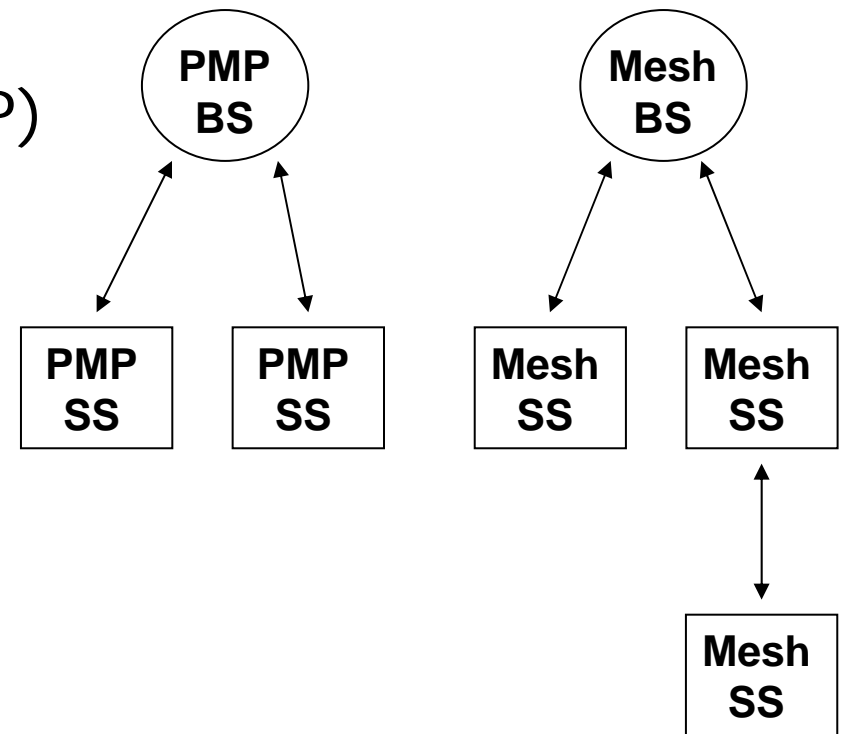
Service Convergence Specific sub-layer

- I dati ricevuti dai livelli superiori vengono classificati
 - applicando una lista di regole per ottenere
 - Service Flow ID
 - Connection ID (CID)
 - assegnando i parametri di QoS



Topologie di rete

- Lo standard IEEE 802.16 specifica due topologie di rete:
 - Point-to-MultiPoint (PMP)
 - MultiPoint-to-MultiPoint (Mesh)
- Nella topologia Mesh le connessioni multi-hop sono possibili attraverso connessioni dirette tra SSs, dette Mesh SSs



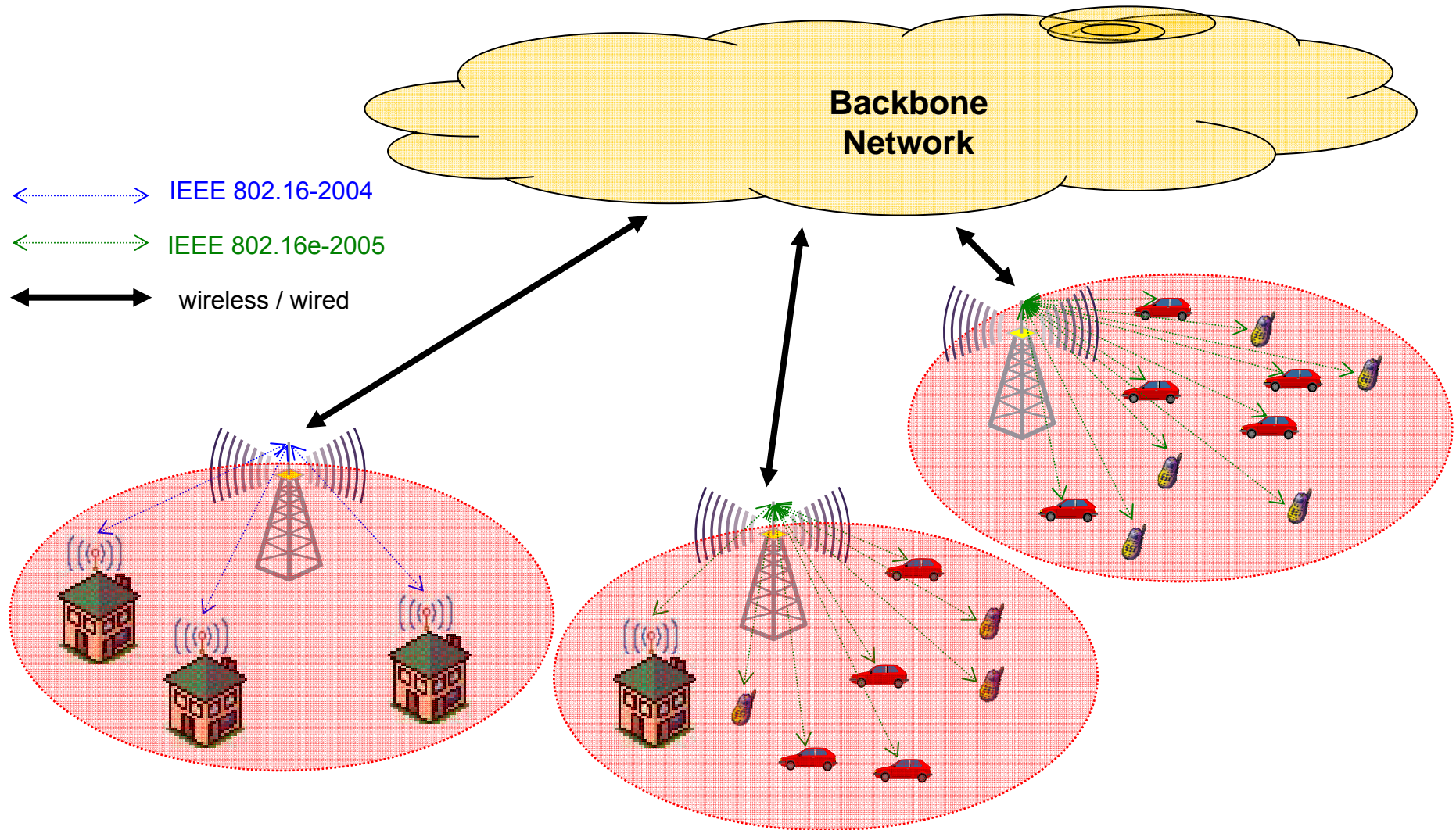


Sistemi BWA IEEE 802.16

	IEEE 802.16-2004 10-66 GHz	IEEE 802.16-2004 2-11 GHz PMP	IEEE 802.16e-2005 2-11 GHz PMP	IEEE 802.16-2004 2-11 GHz Mesh
Modulazione	Single Carrier	Single Carrier Multi Carrier (OFDM)	Single Carrier Multi Carrier (OFDMA)	Multi Carrier (OFDM)
Duplexing	FDD TDD	FDD TDD	FDD TDD	TDD
Banda del canale	25-28 MHz	1.75-3-3.5-5.5- 7-10 MHz	1.25-3.5-7-10-14-20- 28 MHz	1.75-3-3.5-5.5- 7-10 MHz
Mobilità			√	
Advanced Antenna Systems (AAS)		√	√	√
Multi-hop				√



Point-to-MultiPoint (PMP)





IEEE 802.16-2004 OFDM



Parametri OFDM PHY

Parametro	Descrizione	Valore
N_{FFT}	numero dei punti della FFT	256
N_{SD}	numero portanti dati	192
N_{SP}	numero portanti pilota	8
N_{SN}	numero portanti nulle	56
BW	banda nominale del canale	variabile
n	fattore di campionamento	dipende da BW
G	rapporto tra prefisso ciclico ed il tempo di simbolo utile (T_g/T_b)	1/4; 1/8; 1/16; 1/32
$T_{simbolo}$	durata del simbolo OFDM	dipende da N_{FFT} , BW, n, G
T_{FRAME}	durata del frame	variabile
$N_{simboli}$	numero di simboli OFDM per frame	$T_{FRAME}/T_{simbolo}$





Diagramma del trasmettitore



- ❑ La codifica di canale è realizzata in tre fasi
 - Randomizer
 - Forward Error Correction (FEC)
 - Interleaving
- ❑ al lato ricevitore vengono applicate in ordine inverso



Codifica e modulazione

Modulazione	Blocco non codificato [byte]	Blocco codificato [byte]	Rate del codice R_c	Codice Reed Solomon RS	Codice Convolutionale Compatibile CC
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32, 24, 4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40, 36, 2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64, 48, 8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80, 72, 4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108, 96, 6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120, 108, 6)	5/6



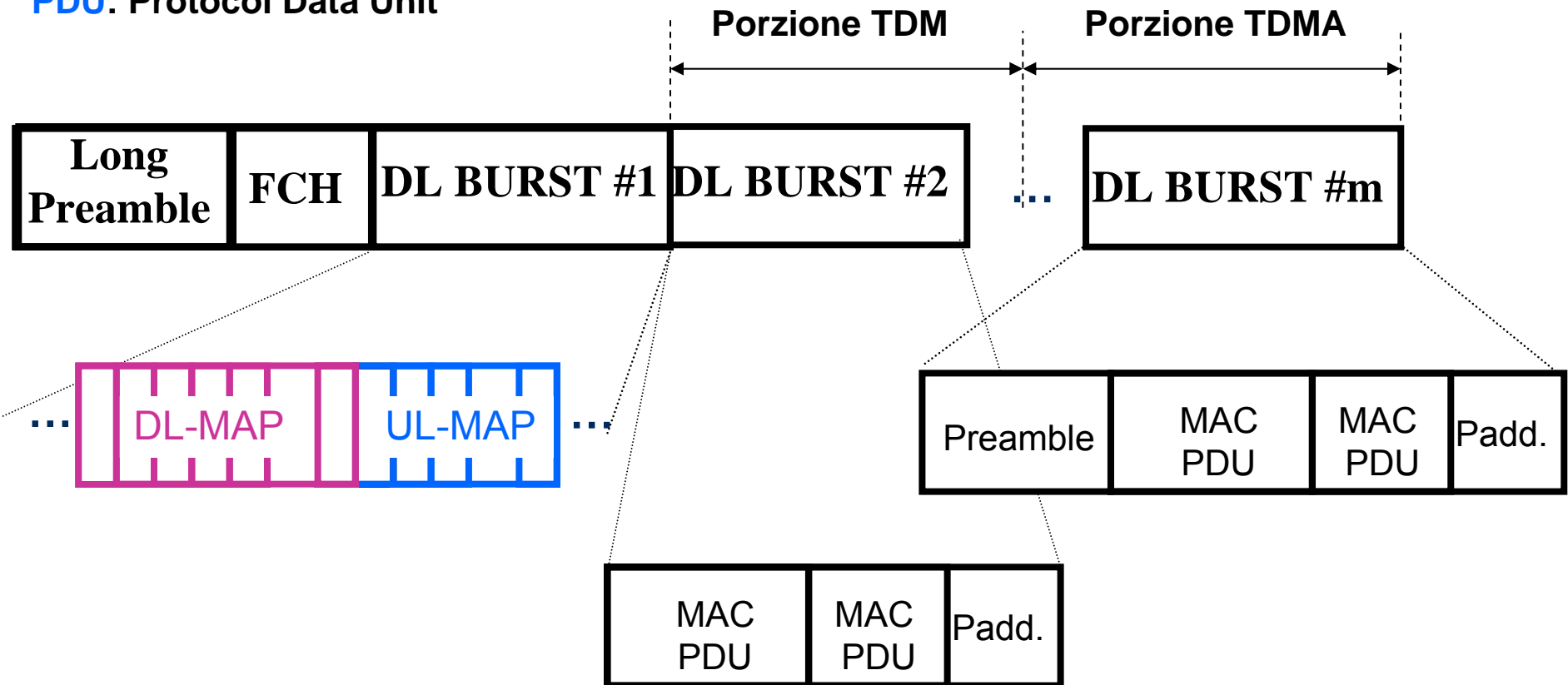
Downlink sub-frame (FDD)

FCH: Frame Control Header

DL-MAP: Downlink MAP

UL-MAP: Uplink MAP

PDU: Protocol Data Unit





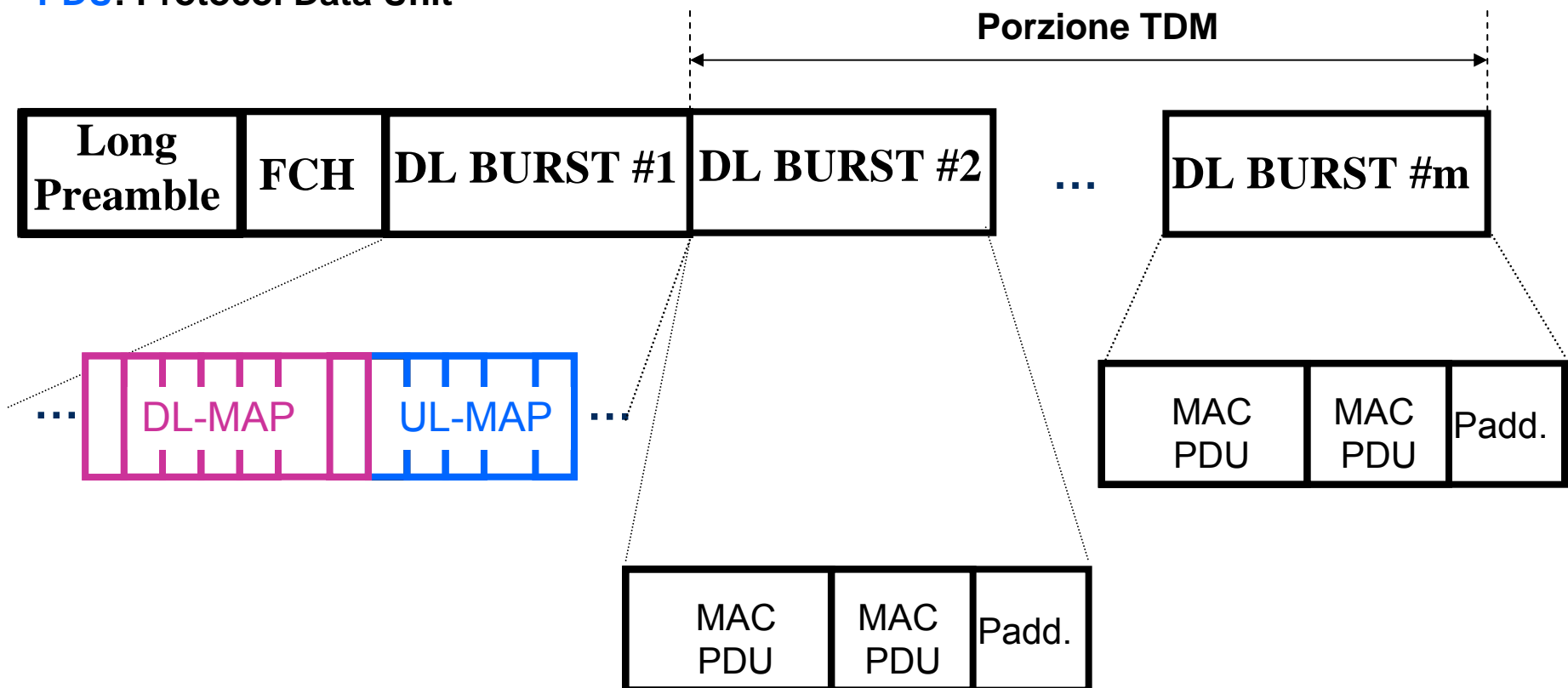
Downlink sub-frame (TDD)

FCH: Frame Control Header

DL-MAP: Downlink MAP

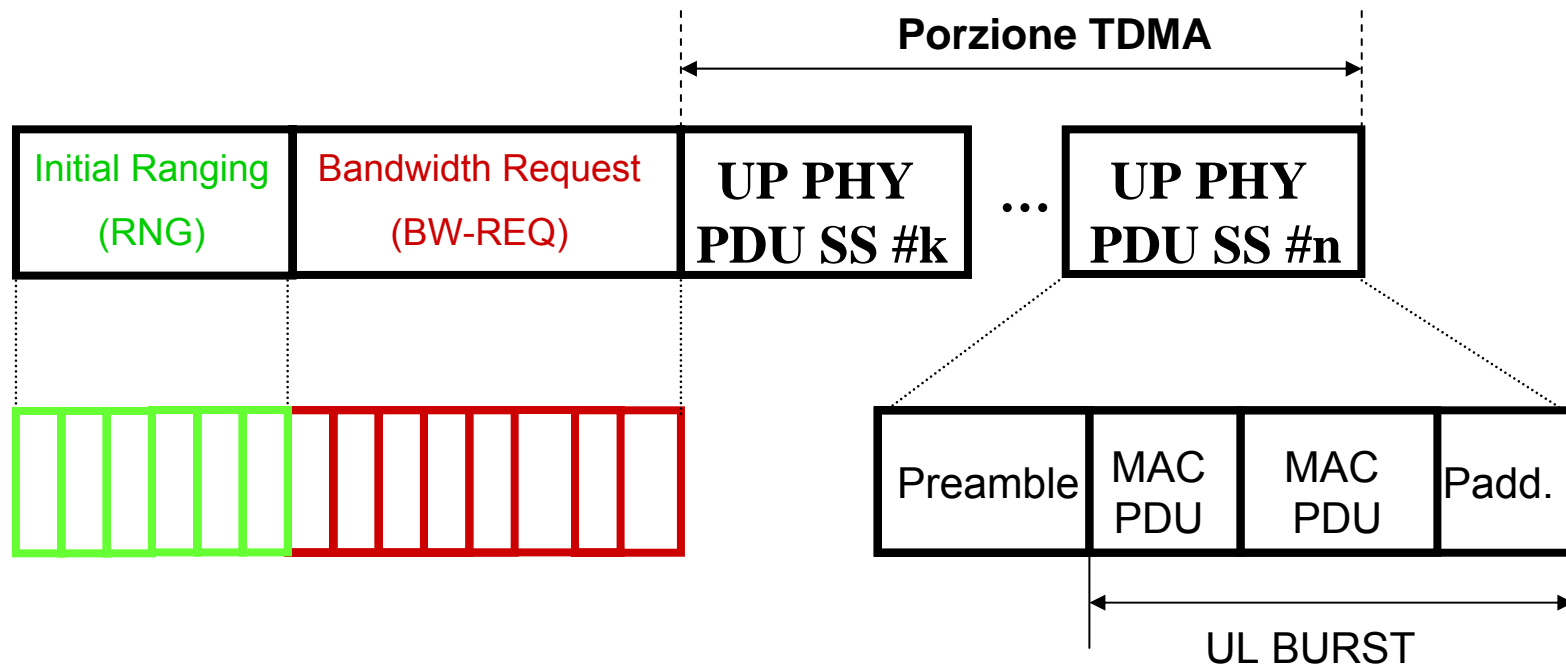
UL-MAP: Uplink MAP

PDU: Protocol Data Unit





Uplink sub-frame (FDD+TDD)



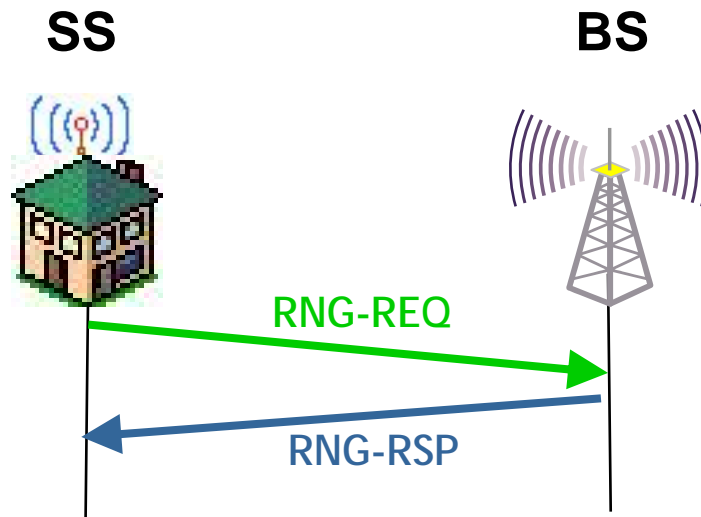


Accesso alla rete

- Il processo di accesso alla rete e di inizializzazione di una SS richiede:
 1. *ricerca del canale downlink e sincronizzazione con la BS*
 2. *acquisizione dei parametri dei canali downlink e uplink*
 3. ranging iniziale
 4. negoziazione della banda
 5. autenticazione e registrazione
 6. acquisizione della connettività IP
 7. acquisizione della data e del tempo corrente
 8. set up delle connessioni definite nel profilo d'utente

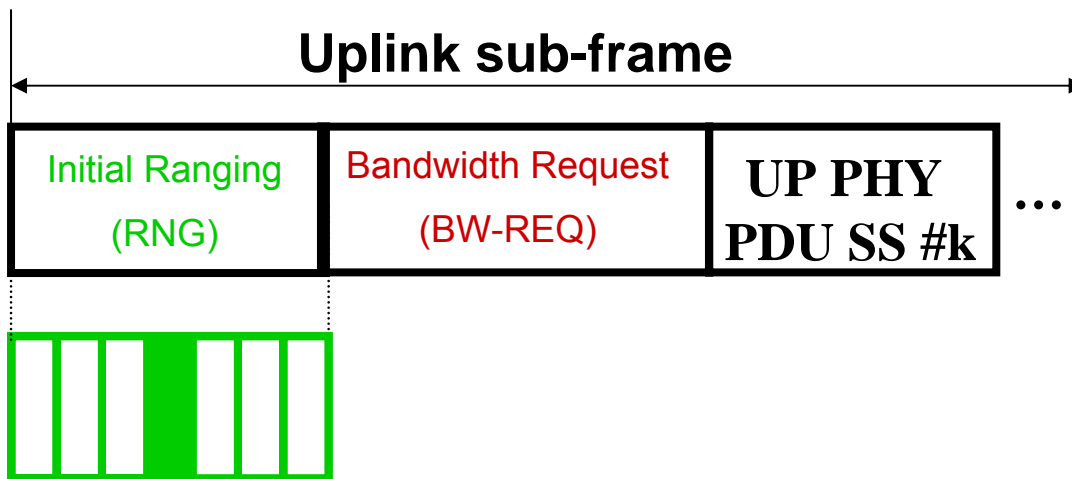


Ranging iniziale



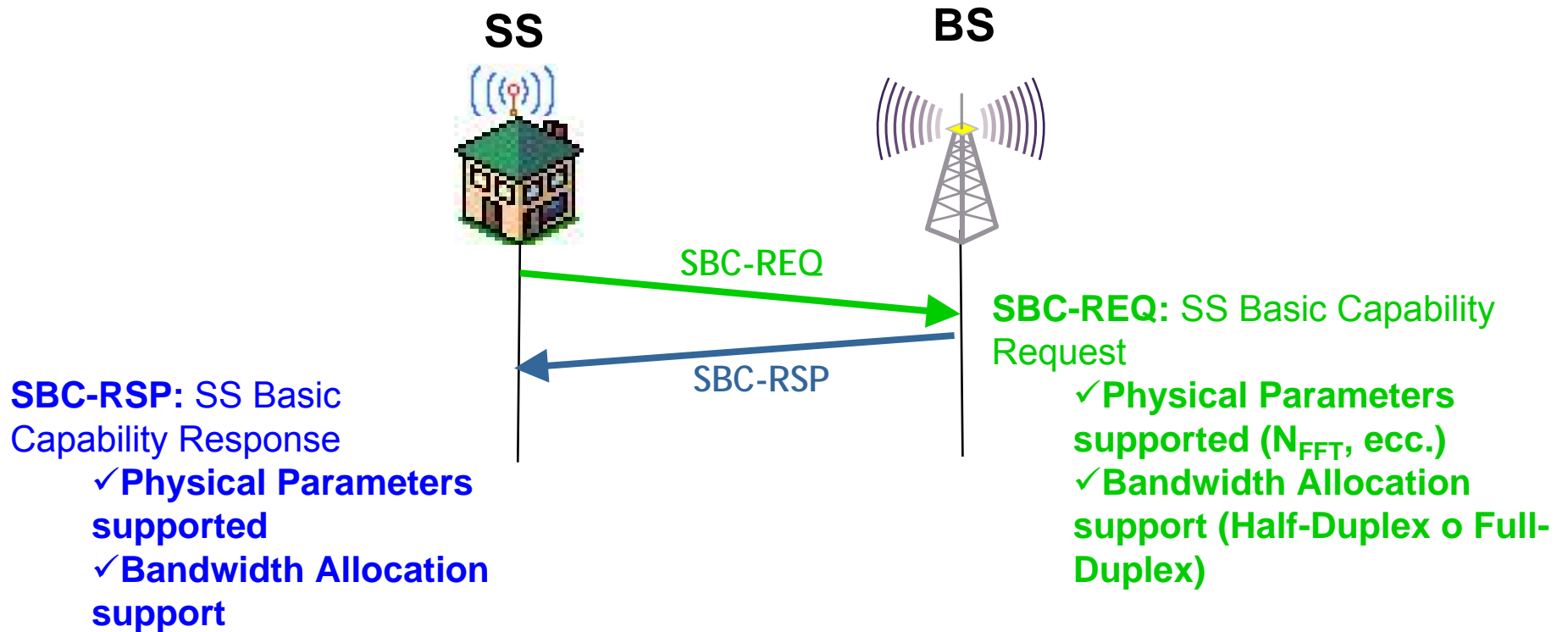
RNG-REQ: Ranging Request
✓DIUC (Burst Profile)

RNG-RSP: Ranging Response
✓Timing advance
✓Power adjustment
✓Frequency adjustment
✓UIUC (Burst Profile)
✓DIUC confirm/reject
✓Basic e Primary CID



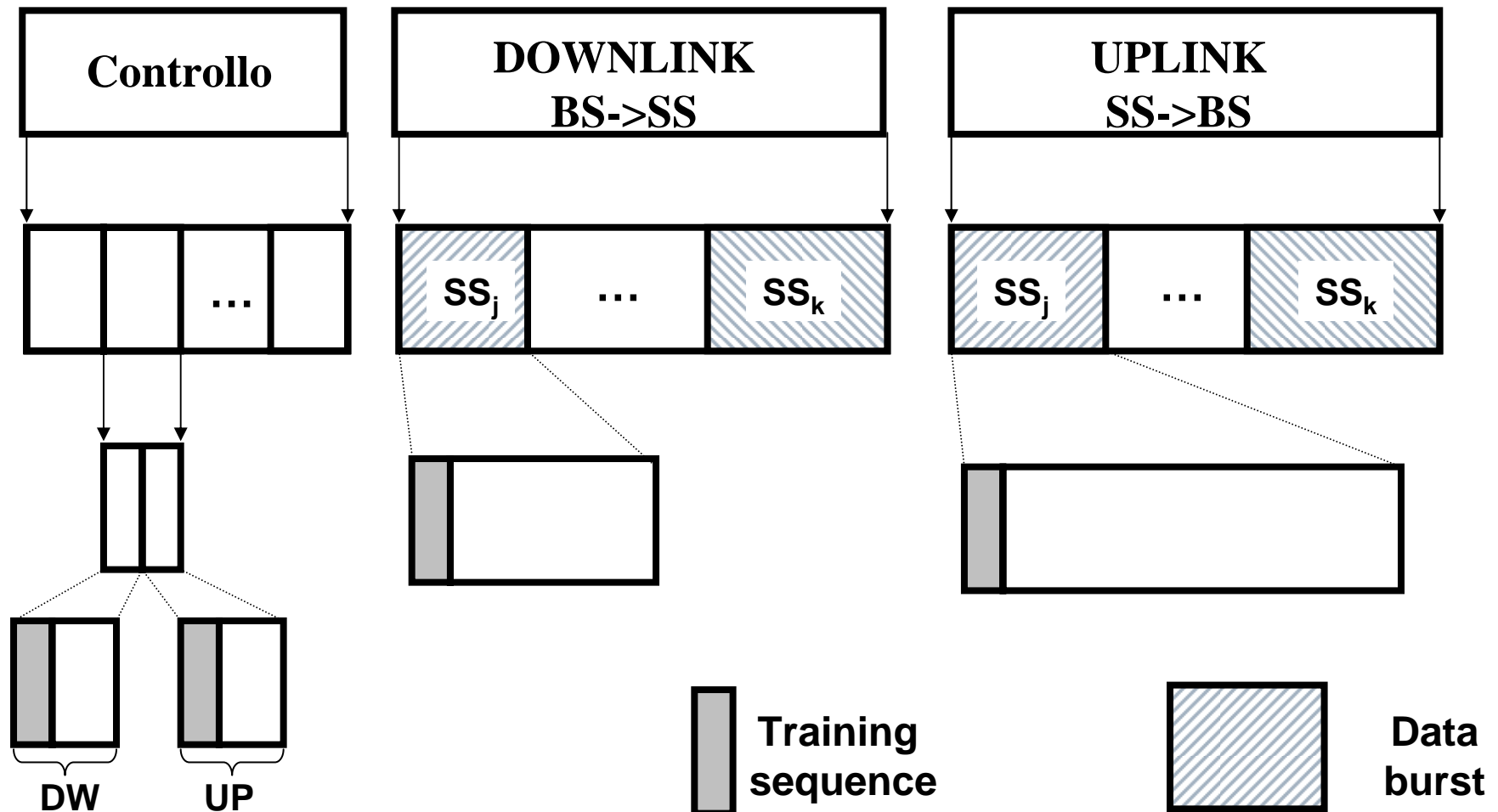


Negoziazione della banda



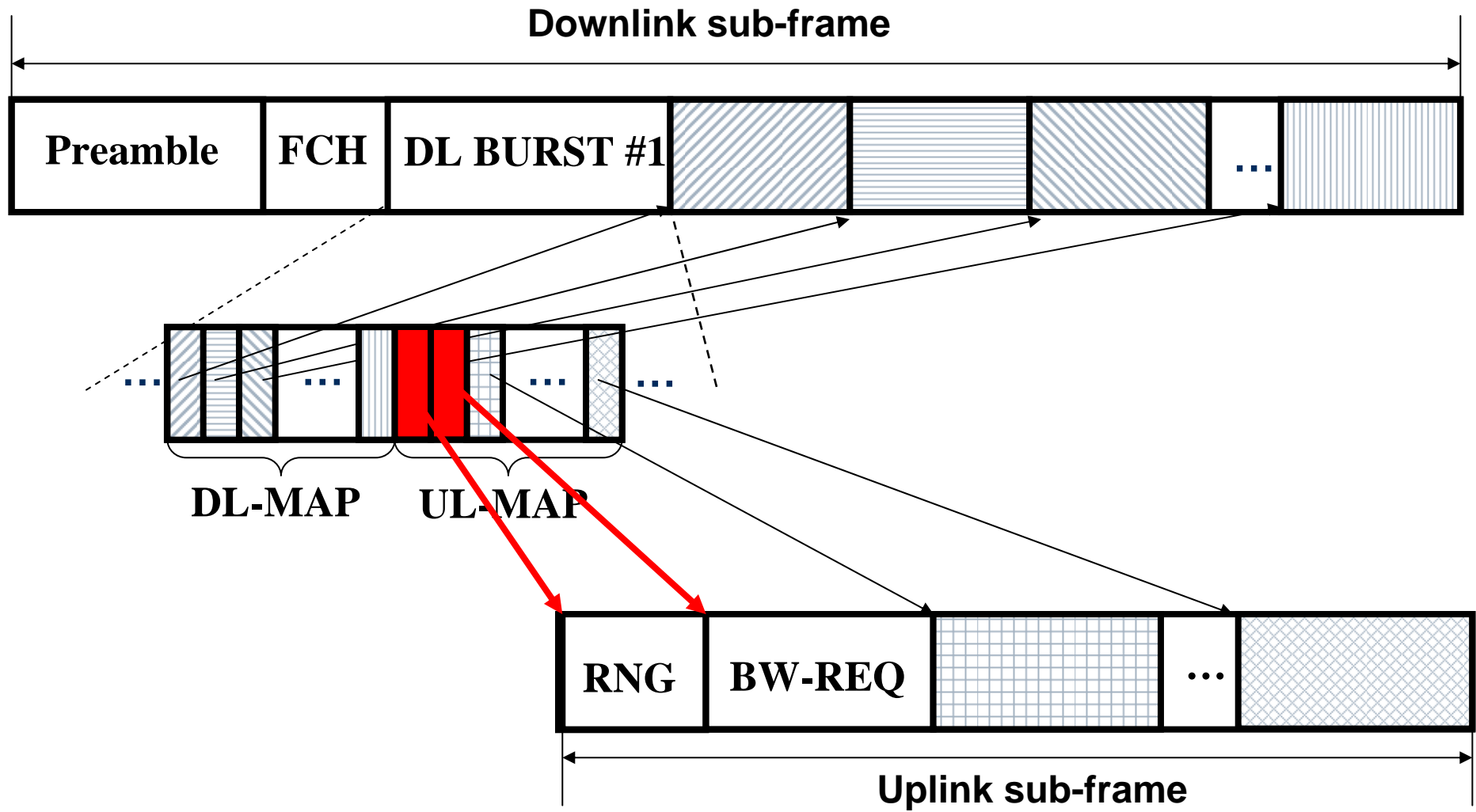


Meccanismo di accesso multiplo





Meccanismo di accesso multiplo





Meccanismo di accesso multiplo

- ☐ Tre principi base
 - banda garantita
 - ☐ Voice over IP (VoIP)
 - polling
 - ☐ Video streaming
 - contesa
 - ☐ Web browsing
- ☐ applicati in base ai requisiti del servizio richiesto dalla SS
 - banda
 - ritardo



Service flow

- La qualità del servizio (QoS) è ottenuta associando ad un flusso dati un **Service Flow**
- La **QoS** è descritta da un set di parametri
 - throughput
 - ritardo
 - jitter
 - probabilità di perdere un pacchettoed associata ad un Service Flow
- Il Service Flow è un flusso unidirezionale di pacchetti a cui è associata una QoS



Service Flow Identifier (SFID)

- ❑ Service flow è identificato da un **Service Flow Identifier (SFID)** di 32 bit
- ❑ Il Convergence sub-layer associa un Service Flow ad un **Connection Identifier (CID)** di 16 bit
- ❑ Service Flow attivi e ammesso sono identificati da un CID



Gestione dei service flow

- ❑ I Service Flow possono essere configurati a priori o dinamicamente
- ❑ possono essere creati, modificati ed eliminati
- ❑ a tale scopo sono definiti dei messaggi di MAC management



Esempio: scheduling predefiniti in uplink

- Esistono quattro meccanismi di scheduling predefiniti per la tratta uplink
- sono basati sui concetti di
 - banda garantita
 - polling
 - procedure a contesa
- sono definiti dal protocollo al fine di permettere ai costruttori di ottimizzare le prestazioni del sistema combinando queste tecniche in modo opportuno



Unsolicited Grant Service (UGS)

- ❑ Disegnato per supportare Service Flow real-time che generano pacchetti di dimensione costante su una base periodica (p.e. Voice over IP)
- ❑ una banda costante viene assegnata periodicamente per la trasmissione uplink della SS
- ❑ Questo meccanismo consente di
 - eliminare overhead ed i ritardi introdotti dal meccanismo di richiesta di banda
 - garantire una banda costante che soddisfa i requisiti real-time dell'applicazione



Unsolicited Grant Service (UGS)

- La banda assegnata è composta da
 - una componente costante che non varia
 - una componente variabile in base alle condizioni di traffico

- La SS non deve utilizzare i meccanismi di richiesta a contesa



Real-time polling service (rtPS)

- ❑ Disegnato per supportare traffico real-time che genera pacchetti di lunghezza variabile su una base periodica (p. e. MPEG video)
- ❑ offre periodicamente opportunità di trasmettere richieste di banda
- ❑ Questo meccanismo consente
 - soddisfare i requisiti real-time
 - la SS richiede la banda di cui ha bisogno



Real-time polling service (rtPS)

- Questo meccanismo
 - introduce maggiore overhead dovuto alle richieste
 - la banda è quella necessaria e questo incrementa l'efficienza
- La BS deve fornire banda per la trasmissione periodica delle richieste
- La SS non deve utilizzare il meccanismo a contesa



Non-real-time polling service (nrtPS)

- ❑ Disegnato per supportare traffico non real-time che genera burst di dimensione variabile su una base periodica (p.e. FTP)
- ❑ offre periodicamente opportunità di trasmettere richieste di banda
- ❑ La SS può utilizzare la procedura a contesa



Best effort (BE)

- ☐ L'obiettivo è fornire ad un traffico best effort un servizio più efficiente possibile
- ☐ La SS può utilizzare il meccanismo a contesa



Richiesta delle risorse a contesa

- La SS può richiedere banda in uplink adottando il meccanismo a contesa
 - un messaggio di PiggyBack per richieste incrementali
 - un messaggio di richiesta Bandwidth Request (BR) per richieste aggregate ed a intervalli di tempo regolari
- Le richieste sono espresse in byte poiché l'allocazione temporale può variare in base alla modulazione e codifica adottata (adattamento al link)
- Le richieste da parte delle SS si riferiscono ad una connessione
- I grant generati dalla BS non differenziano le connessioni ma si riferiscono ad una SS



Finestra di backoff

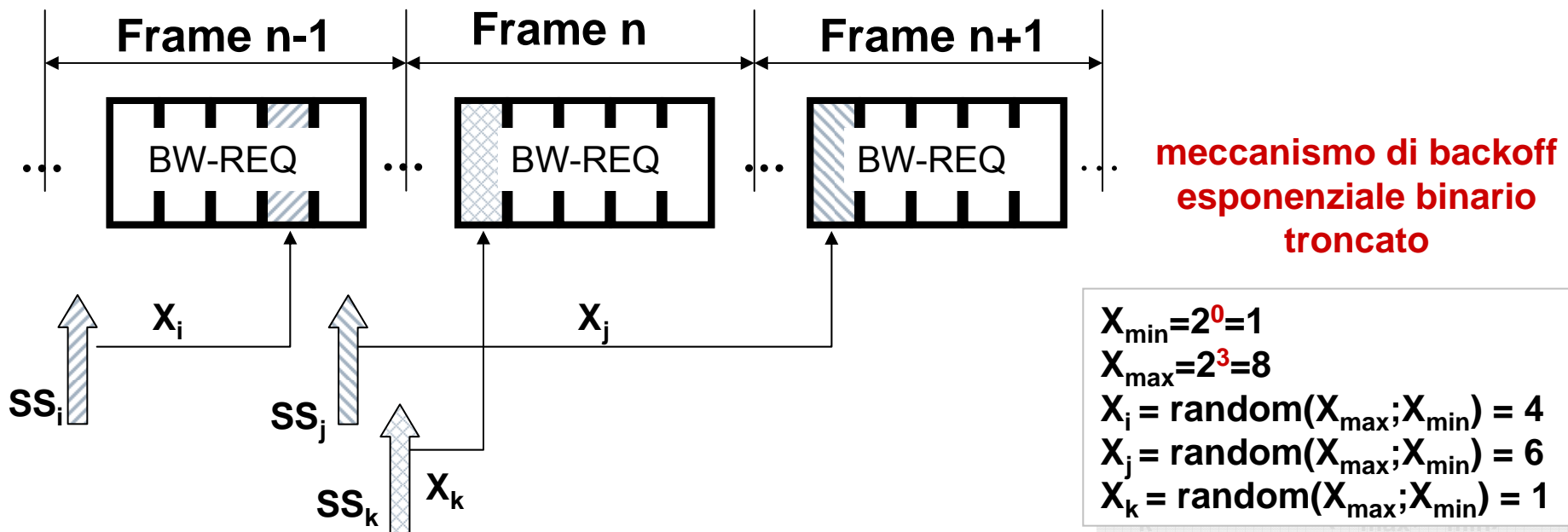
- ❑ La scelta dello slot in cui trasmettere il Bandwidth Request (BR) avviene adottando il meccanismo di ***backoff esponenziale binario troncato***
- ❑ la base della finestra di backoff è 2
- ❑ la dimensione iniziale viene decisa dalla BS
- ❑ La SS estrae un numero casuale all'interno della finestra di backoff
- ❑ la trasmissione della richiesta viene ritardata di un numero di slot pari al numero estratto

- ❑ Il Bandwidth Request (BR) viene trasmesso in un intervallo a contesa quindi si può verificare una collisione



Meccanismo di backoff

- Se durante la richiesta non si verificano collisioni



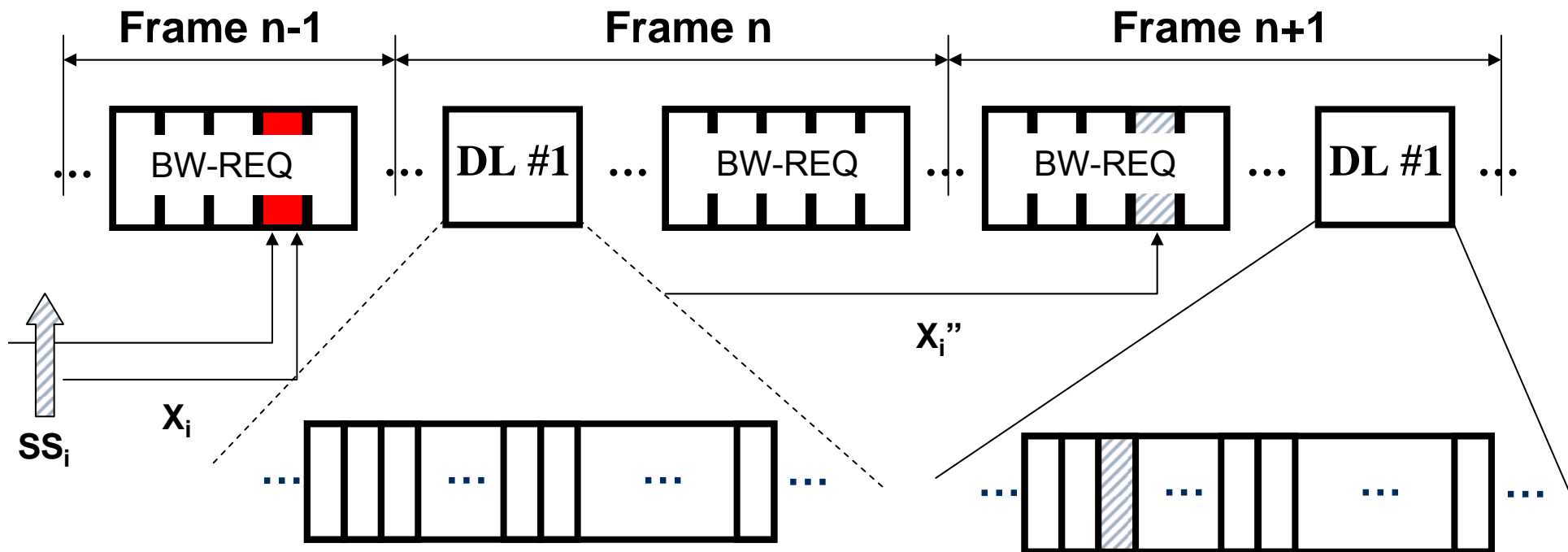


Risoluzione delle collisioni

- Invece, se si verifica una collisione
 - la dimensione della finestra di backoff viene incrementata di un fattore 2
 - la dimensione della finestra di backoff non può superare un massimo deciso dalla BS
 - il numero di tentativi è limitato dalla BS



Risoluzione delle collisioni



meccanismo di backoff esponenziale binario troncato

$$\begin{aligned} X_{\min} &= 2^0 = 1 \\ X_{\max} &= 2^3 = 8 \\ X_i &= \text{random}(X_{\max}; X_{\min}) = 4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{\min} &= 2^0 = 1 \\ X_{\max} &= 2^4 = 16 \\ X_i'' &= \text{random}(X_{\max}; X_{\min}) = 9 \end{aligned}$$



Meccanismo di richiesta a polling

- ❑ La BS allocata nel UL-MAP una banda che la SS può utilizzare per trasmettere Bandwidth Request
- ❑ può essere per connessione o per SS
- ❑ Se la banda non è sufficiente per attivare un unicast polling verso tutte le SS inattive allora è possibile adottare un ***multicast polling***
- ❑ anche in questo caso il polling non è un messaggio esplicito ma una banda allocata nel messaggio UL-MAP
- ❑ SS con delle connessioni UGS attive devono porre ad 1 il bit poll-me nel Grant management sub-header per richiedere banda per il polling



Profilo PHY

Certificazione: fase 1

Banda di frequenza [MHz]	Duplexing	Banda del canale [MHz]
3400 – 3600 (con licenza)	TDD	3.5
		7
	FDD	3.5
		7.0
5725 – 5850 (senza licenza)	TDD	10

Certificazione: fase 2

Banda di frequenza [MHz]	Duplexing	Banda del canale [MHz]
2500 – 2690 (con licenza)	TDD	5
		5.5
	FDD	5
		5.5



Esempio: Profilo 3.5 GHz

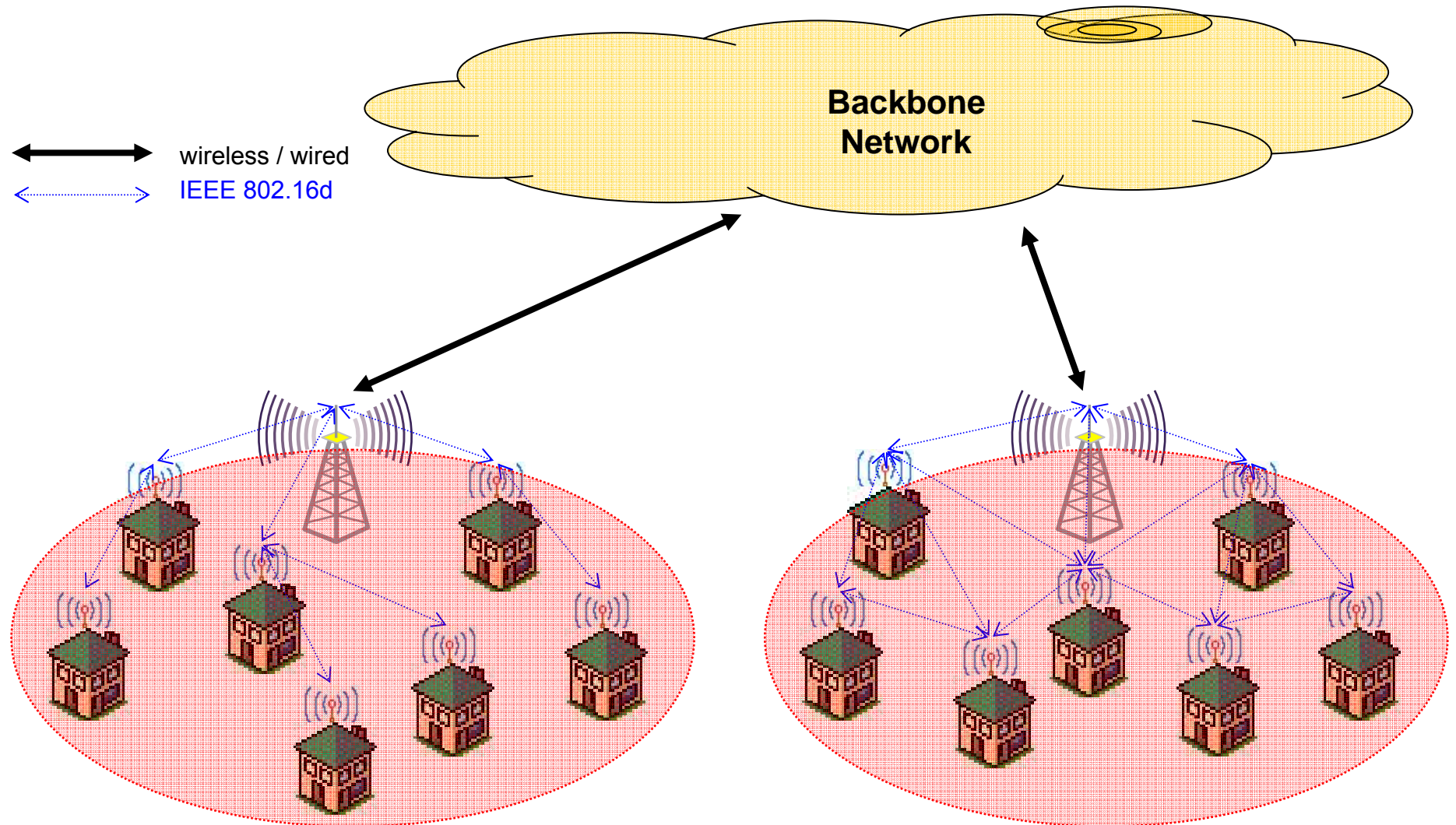
Parametro	Valore
Banda di frequenza	3.5 GHz
Banda del canale (BW)	3.5 MHz
Banda totale	14 MHz
T_{FRAME}	2, 4, 5 ms
FFT size (N_{FFT})	256
Data sub-carriers (N_{SD})	192

Modulazione	Rate del codice R_c	Massimo throughput per simbolo OFDM [Mbps]
BPSK	1/2	4.8
QPSK	1/2	9.6
QPSK	3/4	14.4
16-QAM	1/2	19.2
16-QAM	3/4	28.8
64-QAM	2/3	38.4
64-QAM	3/4	43.2

$$\Theta = \frac{N_{SD} \cdot \log M \cdot R_c}{T_{symbol}}$$



MultiPoint-to-MultiPoint (Mesh)

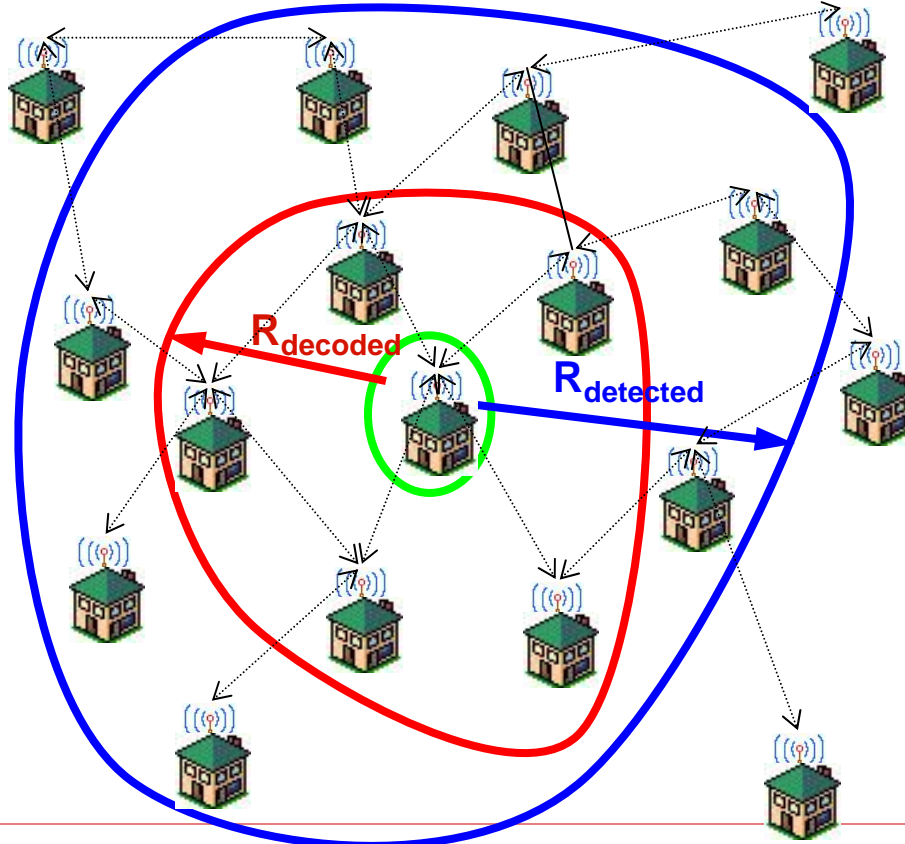




Topologie Mesh

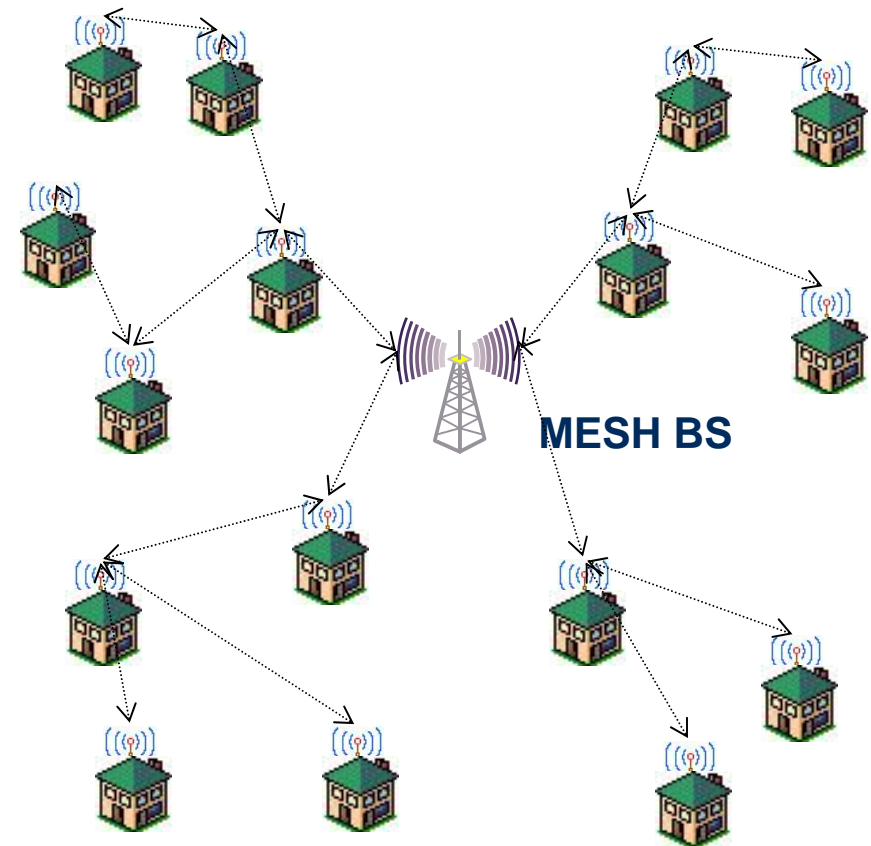
TOPOLOGIA DISTRIBUITA

$$R_{detected} = 2 \text{ hop}$$



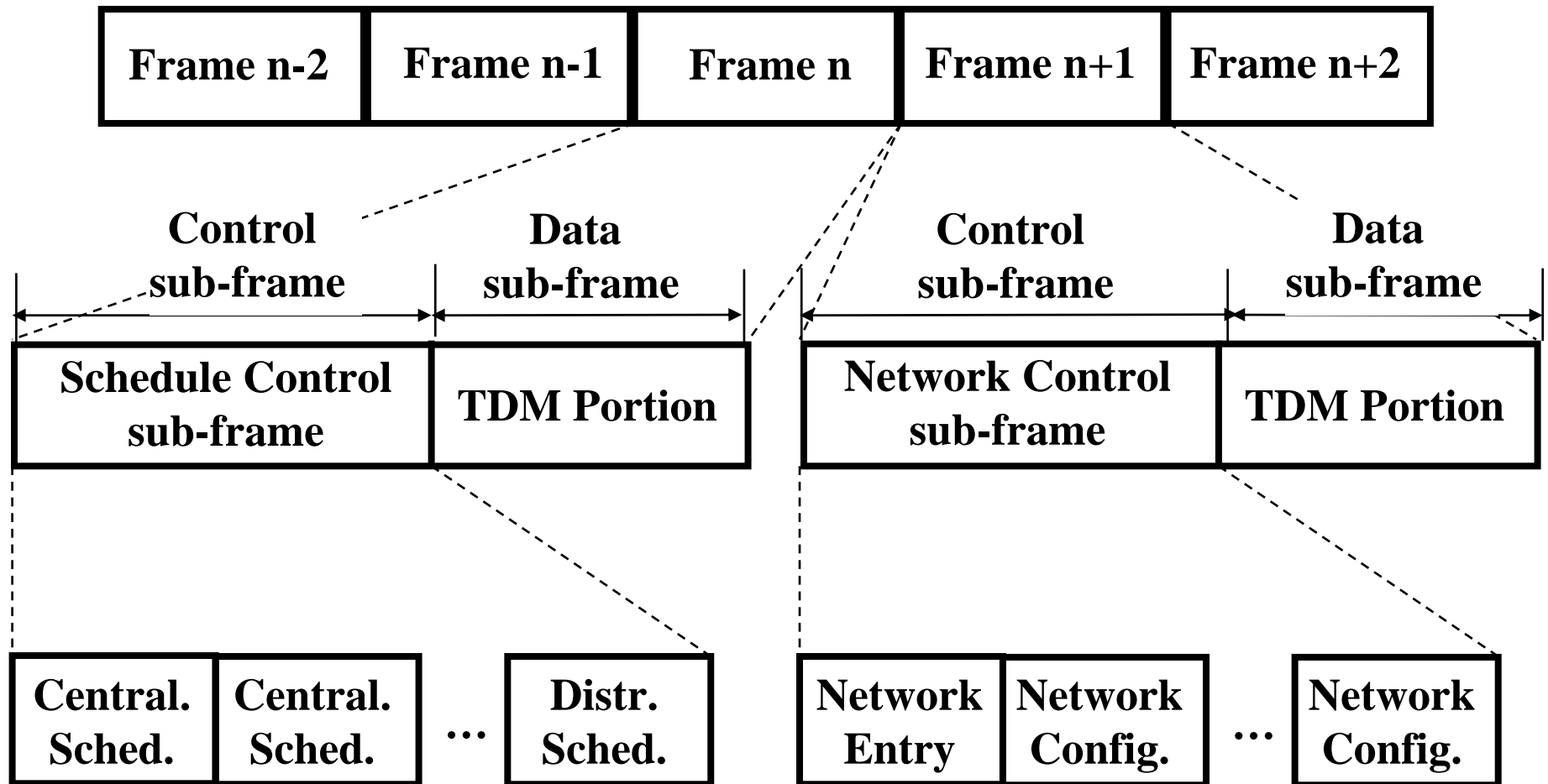
TOPOLOGIA CENTRALIZZATA

$$R_{detected} = HR_{threshold} \text{ hop}$$



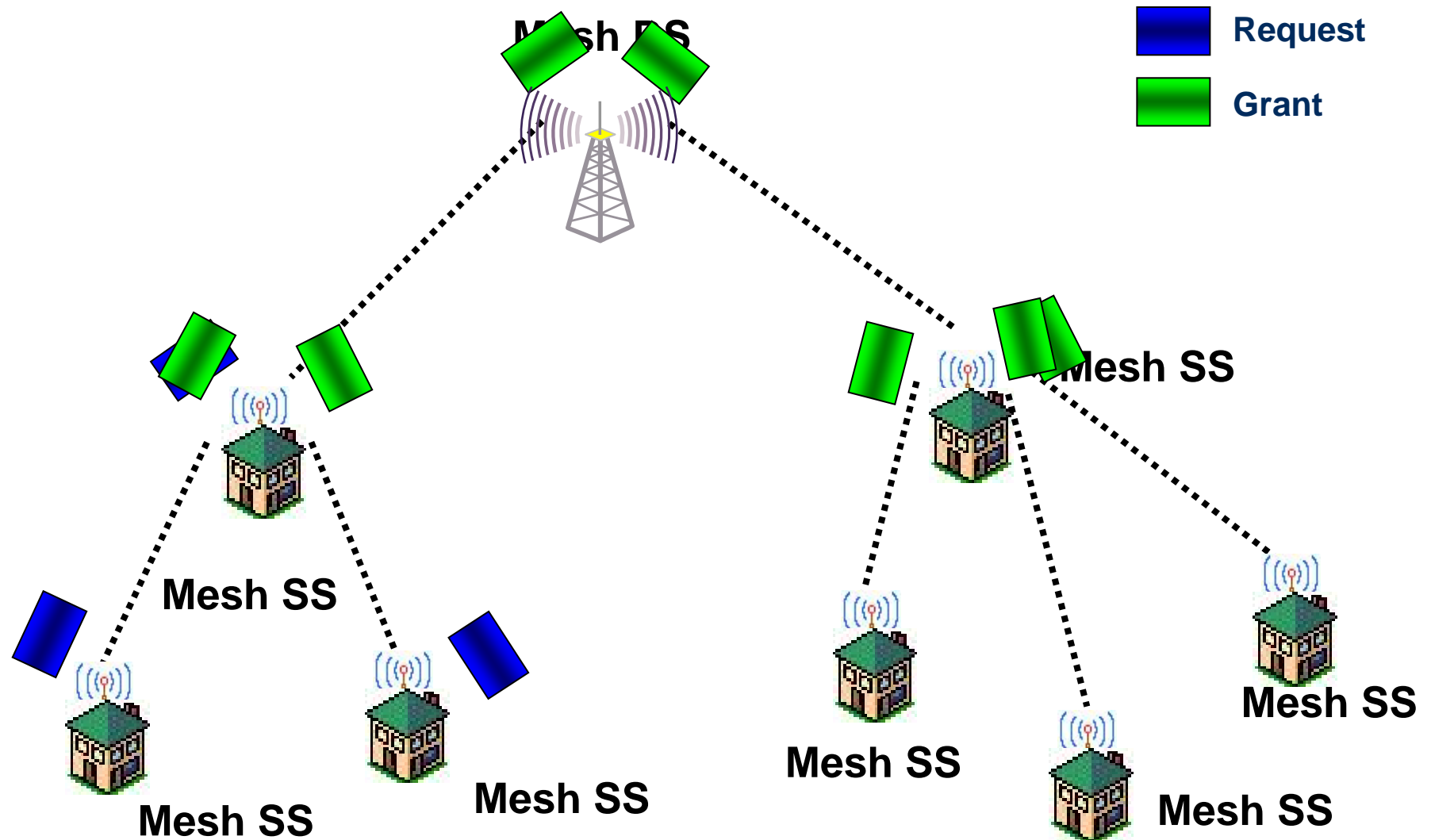


Frame Mesh (TDD)





Modalità Mesh centralizzata





Modalità Mesh distribuita



Availabilities



Requests



Grant/Ack

Mesh SS



Mesh SS



Mesh SS



Mesh BS



three way
handshake



Mesh SS



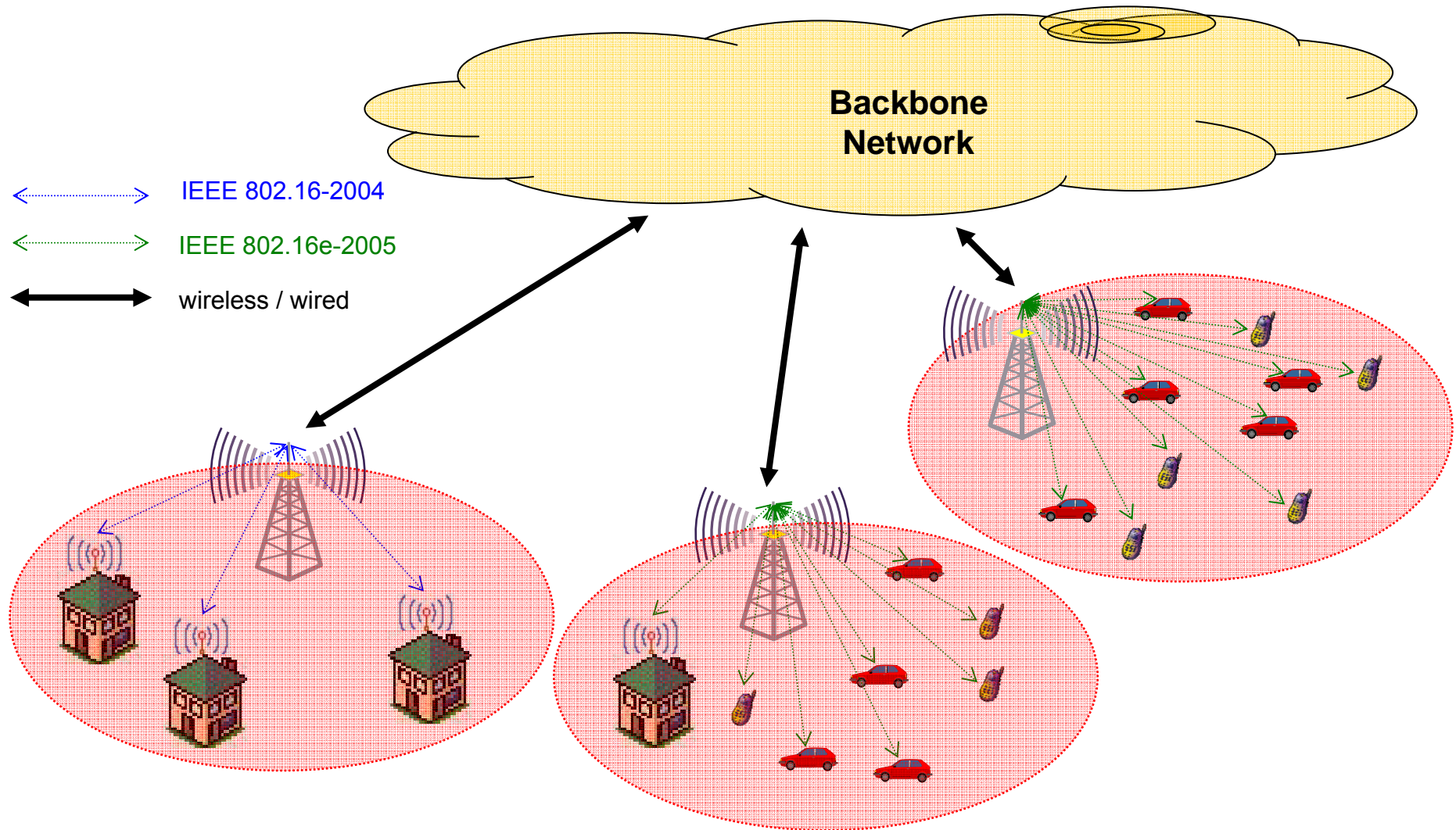
Mesh SS 61



IEEE 802.16e OFDMA



Point-to-MultiPoint (PMP)





Concetti base

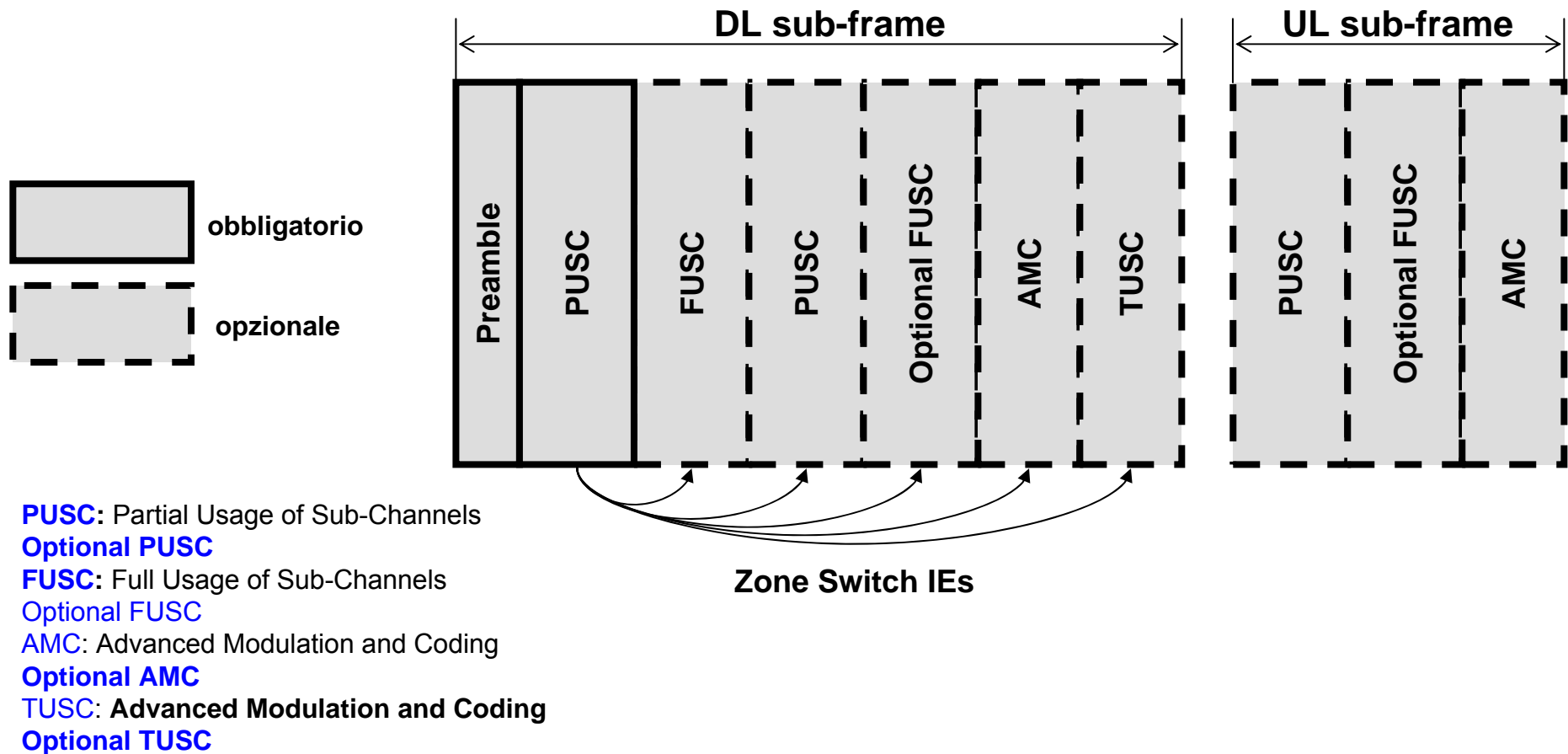
- ❑ **Segment**: gruppo di sub-channel OFDMA, ad un segment corrisponde un'istanza del MAC
- ❑ **Permutation Zone**: simboli OFDMA contigui che utilizzano la stessa formula di permutazione
 - Partial Usage of Sub-Channels (PUSC): solo una parte dei sottocanali sono allocati al trasmettitore
 - Full Usage of Sub-Channels (FUSC): tutti i sottocanali sono allocati al trasmettitore
- ❑ **Slot**: struttura tempo-frequenza che dipende dalla permutazione adottata e varia tra downlink e uplink
- ❑ **Data Region**: allocazione tempo-frequenza di gruppi contigui di simboli OFDMA e sub-channel.





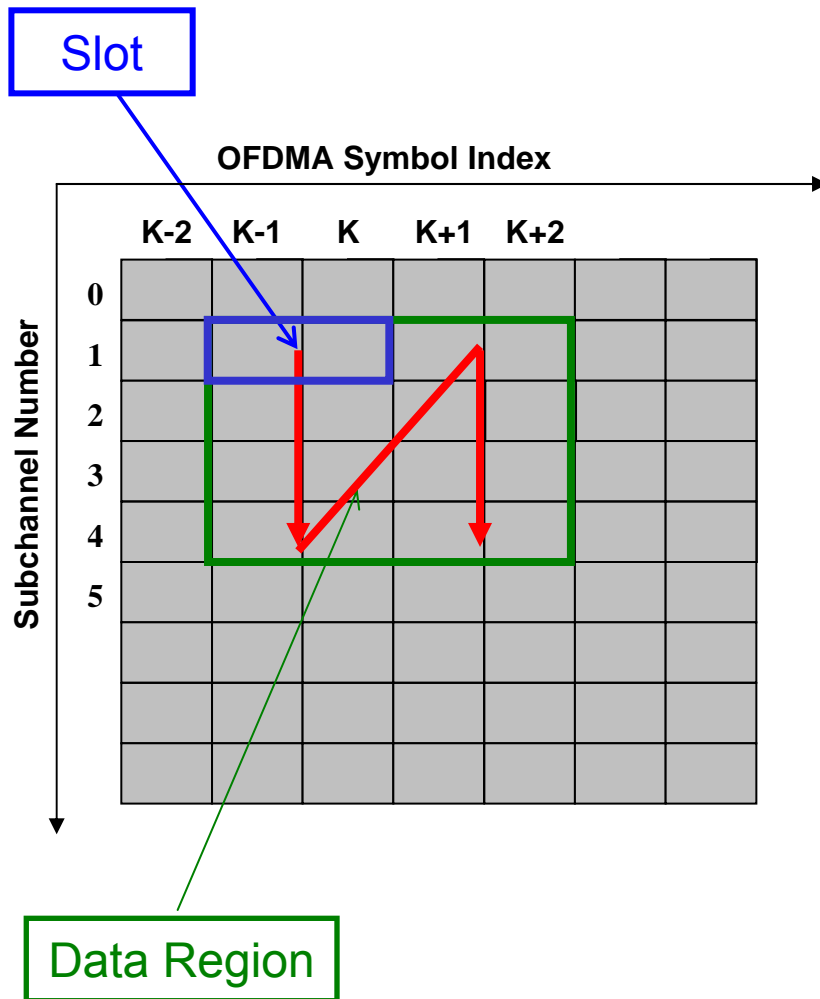
Struttura del frame (TDD+FDD)

- Dopo il preambolo è sempre presente almeno la modalità PUSC





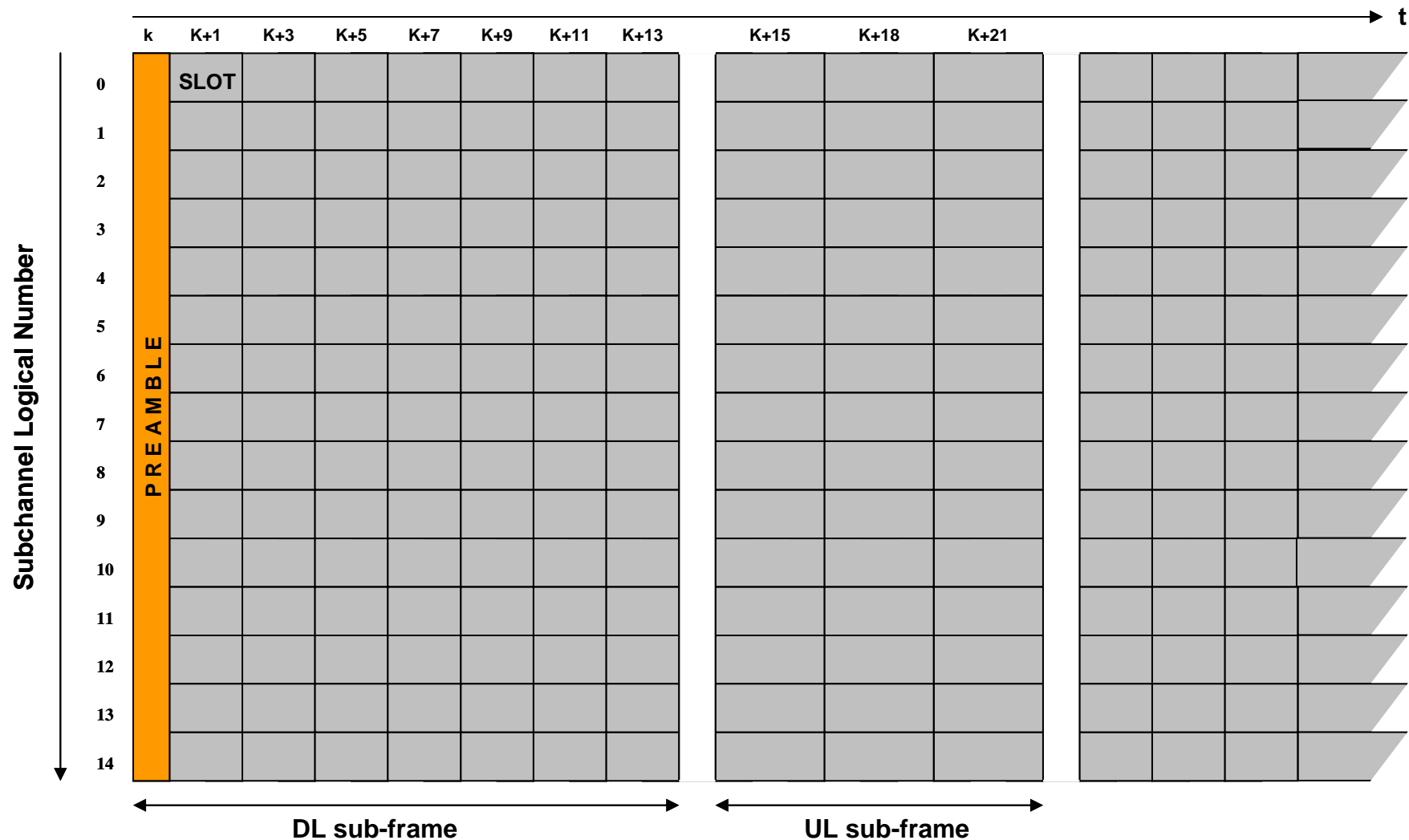
Data Region



- ❑ La modalità PUSH prevede che uno slot sia costituito da due simboli OFDMA ed un sub-channel
- ❑ La modulazione e codifica è costante all'interno della Data Region
- ❑ La BS può trasmettere in downlink verso una SS/MSS oppure un gruppo di SS/MSS



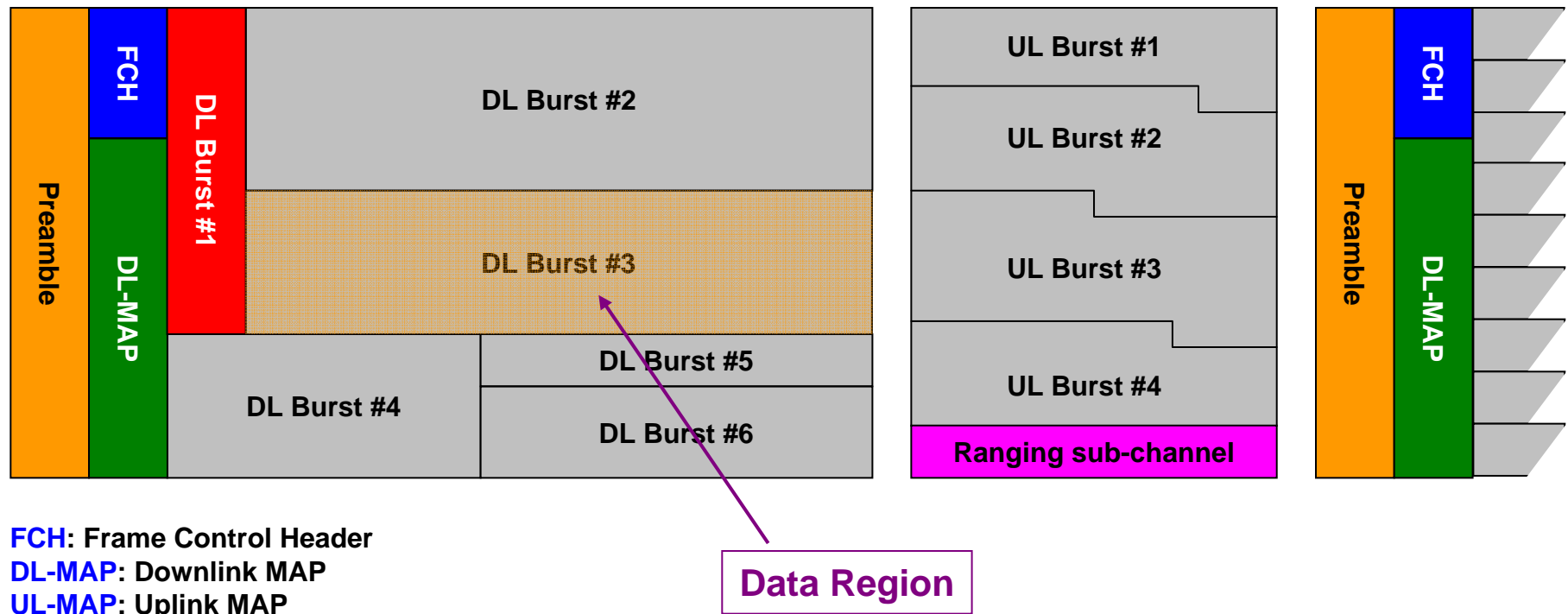
Esempio: FFT 512 DL PUSC





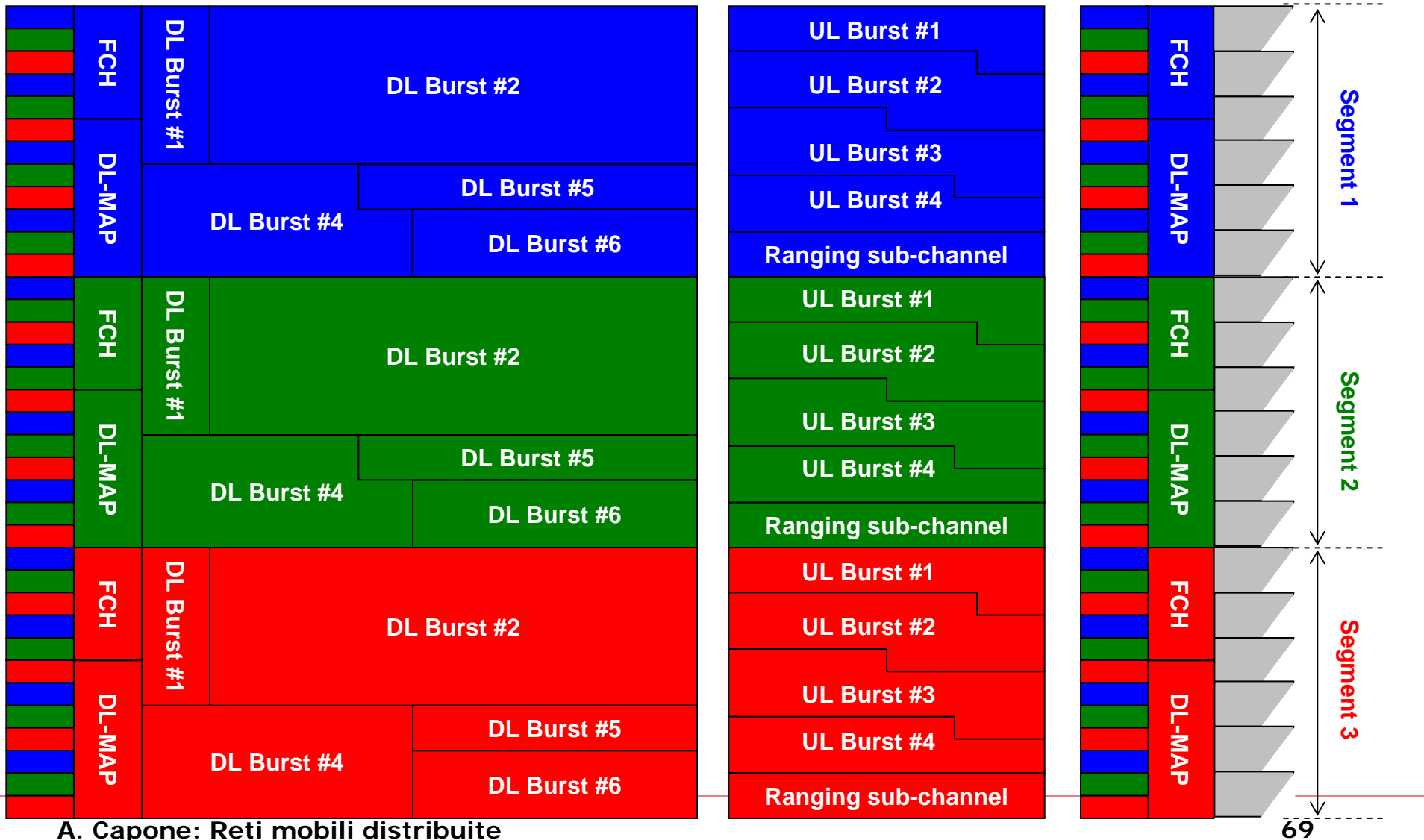
Struttura del frame

- ❑ I campi FCH e DL-MAP devono essere trasmessi in ogni frame
- ❑ Il campo FCH
 - trasmesso con modulazione QPSK $\frac{1}{2}$
 - specifica la lunghezza del successivo messaggio DL-MAP





Struttura del frame





Architettura di rete

