

# **Reti Wireless e Mobili**

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b>	<b>52</b>
16.1. Operazioni	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b>	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE]	55
17.1.1. Moduli	55
17.1.2. E-UTRAN	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b>	<b>57</b>
18.1. Control plane	57
18.2. User plane	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b>	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b>	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b>	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b>	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b>	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b>	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare	72
24.2. NTN	73

# 1. Lezione 01 [25/02]

## 1.1. Principi di Teoria della Trasmissione

Tipicamente è uno schema del tipo

$$d(t) \rightarrow \text{trasmettitore} \rightarrow s(t) \rightarrow \text{channel} \rightarrow s(t) \rightarrow \text{receiver} \rightarrow d(t)$$

con dati analogici/digitali che vengono passati al trasmettitore (ho una sequenza di bit).  $s$  è segnale,  $d$  è dato.

Questo schema però è utopico, non è mai così: infatti, il canale è soggetto a

- rumore
- attenuazione (certa potenza che piano piano si perde, si affievolisce)
- interferenze

Ci esce un  $s'(t)$  che esce dal canale. Ci saranno casi di  $s'$  impossibile da riconoscere oppure casi di  $s'$  che partono da un  $s$  così robusto da poterlo sistemare.

Segnale analogico:

- ha una variazione continua e non ci sono interruzioni/discontinuità

Segnale digitale:

- mantiene un livello di segnale costante per un determinato intervallo, con un rapido (quasi istantaneo) cambio di livello

I grafici sono nel dominio del tempo, ovvero come varia la misurazione nel tempo

Il segnale analogico, se periodico, è una sinusoidale

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

con 3 parametri sui quali giochiamo:

- $A$  ampiezza, massimo livello o forza del segnale nel tempo (volt)
- $f$  frequenza quanti cicli fa al secondo (Hertz)
- $\phi$  fase posizione relativa all'interno del periodo, dove parte

Abbiamo anche il periodo  $T$  inverso della frequenza, tempo impiegato per un ciclo. Infine anche la lunghezza d'onda  $\lambda$  che è la distanza occupata da un singolo ciclo, ed è tale che  $\lambda = \frac{c}{f} = Tc$  con  $c$  velocità della luce, lunghezza spaziale.

Metti 4 esempi

Nel dominio delle frequenze, ogni segnale ragionevolmente periodico può essere scomposto in una serie di segnali periodici (onde seno e coseno) con ampiezza, frequenza e fase differenti. Idea di Fourier ad inizio 1800. Una serie di Fourier è tale che

$$s(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

dove  $f = \frac{1}{T}$  è la frequenza fondamentale ( $n=1$ ),  $a_n$  e  $b_n$  sono le ampiezze delle singole componenti dette armoniche e  $c$  è una costante che è il valore medio del segnale. Partendo dalla  $f$  fondamentale, ogni armonica avrà un multiplo di questa frequenza fondamentale.

Dato un grafico, come facciamo a determinare le ampiezze di ciascuna componente? Con quale frequenza dobbiamo campionare il nostro segnale?

**Teorema 1.1.1** (Teorema del campionamento di Shannon): La frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio della frequenza massima del segnale in ingresso.

Per passare dal dominio del tempo al dominio delle frequenze usiamo la FFT (Fast Fourier Transform), ovvero passiamo il campionamento fatto alla FFT e mi genera le frequenze. La Inverse FFT passa dalle frequenze al tempo.

Quando tutte le frequenze sono multipli interi di una frequenza base  $f$  (frequenza fondamentale, le altre sono  $kf$  armoniche), il periodo del segnale  $s(t)$  è il periodo della frequenza fondamentale. Lo **spettro** (spectrum) del segnale è il range di frequenze che lo contiene. La absolute bandwidth è l'ampiezza dello spettro (max - min)

ESEMPIO

Trasmettiamo due bit per ogni due bit, quindi il data rate è di  $2f$  bits. Maggior parte energia concentrata nelle prime frequenze ( $kf \rightarrow$  ampiezza  $1/k$ ), effective bandwidth

La capacità del canale è il massimo bit rate alla quale è possibile trasmettere dati su un canale di comunicazione in determinate condizioni. Il noise è un segnale NON VOLUTO che si combina al segnale trasmesso che lo altera o distorce. L'error rate, o tasso di errore, a questo livello si intende bit error rate.

Esempio che non capisco

Considerazioni: impulso rettangolare ha banda infinita, noi vogliamo usare una banda finita. Banda minore ha maggiore distorsione

Scelgo la banda finita più ampia? Ho costi economici e limitazioni del dispositivo

Nyquist bandwidth

Dato un canale noise-free (ideale) la bandwidth limita il data rate

Ovvero, la Nyquist capacity ha un binary signals (2 livelli di voltaggio) quindi  $C=2B$  o ha un multilevel signaling  $C=2B \log_2(M)$  (con  $M$  numero di segnali discreti o livelli di voltaggio)

Il rumore è un segnale non voluto che si combina al segnale trasmesso che lo altera e distorce. Può essere:

- thermal noise
- intermodulation noise
- cross talk
- impulse noise

## 2. Lezione 02 [26/02]

### 2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione

Rumore termico: agitazione delle molecole. Intermodulation noise problemi tra le diverse modulazioni, ci si accavalla per trasmettere. Cross talk è più nel parlato. Impulse noise, impulso elettromagnetico specifico, distrugge il segnale che è attraversato.

Il decibel (dB) è una misura che rapporto tra due potenze (scala logaritmica), ovvero

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2}\right).$$

Fare un +3 fa doppio/metà.

Il decibel-milliWatt (dBm) è l'unità di misura del rapporto tra una potenza arbitraria e una potenza di 1mW (milliWatt), ovvero

$$P_{dBm} = \frac{P}{1mW}.$$

Il rumore c'è sempre: il rapporto segnale rumore (signal to noise ratio SNR) è il rapporto tra la potenza del segnale trasmesso e la potenza del rumore, ovvero

$$(SNR)_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} \right).$$

Più è alto più il segnale è forte rispetto al rumore

La Shannon Capacity Formula rappresenta la massima capacità teorica di un canale in bit al secondo in funzione del SNR, ovvero

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

dove  $B$  è la banda. Risultato puramente teorico e considera solo il thermal noise, tuttavia fornisce un limite superiore alla quantità di informazione (data rate) che può essere trasmessa senza errori.

In una determinata condizione di rumore (SNR) possiamo aumentare il data rate:

- aumentando la banda  $B$  ma il rumore termico è rumore bianco e maggiore è la banda e maggiore sarà il rumore che entrerà nel sistema
- aumentando la potenza del segnale, allora  $SNR++$  ma sarà maggiore l'intermodulation e il cross talk noise

**Esempio 2.1.1:** Supponiamo di avere uno spettro tra  $3MHz$  e  $4MHz$  e  $SNR = 24dB$ . La banda vale quindi  $1MHz$  e  $SNR$  è 251

La capacità di Shannon è  $C = 8Mbps$

Ora facciamo inverso di Nyquist

Se  $C = 2B \log_2(M)$  andiamo a ricavare  $M = 16$

### Esempio 2.1.2: Altro esempio

## 2.2. Multiplexing

In quasi tutti i casi la capacità del mezzo di trasmissione è superiore alla capacità richiesta da una trasmissione. Vogliamo combinare sullo stesso link più trasmissioni. Abbiamo un maggior data rate con un minore costo kbps. Le singole comunicazioni richiedono un data rate inferiore rispetto alla capacità del link.

FDM frequency division multiplexing, sfrutta il fatto che la banda disponibile sul mezzo di trasmissione eccede la banda richiesta da un singolo segnale. Divido la banda totale in sotto-bande, ognuna delle quali è canale parallelo.

TDM time division multiplexing sfrutta il fatto che il data rate del mezzo di trasmissione eccede il data rate richiesto da un singolo segnale. Sono robe pseudo-parallele

## 2.3. Comunicazione wireless

Trasmissione in banda base (baseband), ovvero ho dato digitale, che diventa analogico, canale, riconvertito, eccetera.

Per gestire sto segnale ho la banda  $B$ , dove parte? Dove arriva? Usiamo per semplicità 0 a  $B$ . Problemi:

- se tutti i dispositivi usano questo le comunicazioni interferiscono
- più è bassa la frequenza e più l'antenna deve essere grande
- ogni range di radio frequenze (RF) possiede diverse proprietà di propagazione e attenuazione

Soluzione è la banda traslata (o passa banda), ovvero ho sempre  $B$  ma ho una frequenza portante (frequency carrier) e il mio range di trasmissione è

$$f_c - \frac{B}{2} \rightsquigarrow f_c + \frac{B}{2}$$

Ora il trasmettitore, che prende il dato, lo codifica, lo modula con la portante  $f_c$ , fa il power control (amplificatore) e poi lo manda. Il bro invece fa de-modulazione e il decoding.

Ci chiediamo:

- quale spettro utilizzare ( $f_c$ )?
- come codifico i dati?
- come modulo il mio segnale in banda base sulla portante?

L'encoding symbol e symbol rate

Un simbolo è una forma d'onda, uno stato o una condizione significativa del canale di comunicazione che persiste per un intervallo di tempo fissato

Il symbol rate è il numero di simboli trasmessi al secondo, misurato in baud

In generale un simbolo può contenere più bit (codifica e modulazione), quindi symbol rate diverso da bit rate

Una data banda può supportare diversi data rate, a seconda dell'abilità del ricevente di distinguere 0 e 1 in presenza di rumore. Un simbolo può codificare più bit alla stessa frequenza.

La trasmissione che faremo noi è la radio Line of sight (LOS), ovvero sono in linea. Soffre di:

- free space loss & path loss (attenuazione del segnale dovuta alla distanza e all'ambiente in cui il segnale si propaga)
- rumore (disturbo che distorce il segnale)
- multipath (il segnale tra TX e RX può subire riflessioni, diffrazioni e scattering, causando la ricezione di più onde elettromagnetiche dello stesso segnale in tempi diversi)
- effetto Doppler (il segnale cambia a causa del movimento di TX, RX e ostacoli)

Il path loss è l'attenuazione del segnale radio in funzione della distanza tra TX e RX, ovvero

$$\frac{P_t}{P_r} = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 d^n = \left( \frac{4\pi f}{c} \right)^2 d^n$$

misurato in decibel. Questo è direttamente proporzionale alla frequenza (al quadrato), ad una potenza della distanza e  $n$  dipende dall'ambiente. Se free space ho praticamente una sfera, più sono lontano e meno ho segnale. Perdiamo sempre potenza, anche se non abbiamo rumore, e dipende tutto da quella formula.



### 3. Lezione 03 [04/03]

Se  $n = 2$  nel free space loss allora

$$L_{dB} = 10 \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = 20 \log \left( \frac{4\pi f}{c} \right)$$

A parità di distanza, maggiore è la frequenza e maggiore è il path loss. La potenza di trasmissione è regolamentata. A parità di potenza, maggiore è la frequenza e minore è il raggio di copertura (segnali sufficientemente forte da essere utilizzabile).

Antenne sono isotropiche (ideali), ovvero sono sfere. Un'altra ideale è quella direzionale, tipo ellisse. Il gain (guadagno) dell'antenna è definito come il rapporto tra l'intensità della radiazione elettromagnetica in una data direzione e l'intensità che si avrebbe se si usasse un'antenna isotropica. Il gain è misurato in dBi (isotropic)

Il path loss, con antenna gain, è

$$\frac{P_t}{P_r} = \left( \frac{4\pi f}{c} \right)^2 d^n = \frac{(4\pi f)^2}{G_{t_x} G_{r_x} c^2} d^n$$

e quindi

$$L_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = 20 \left( \log_{10} \left( \frac{4\pi f}{c} \right) - \log_{10}(G_{t_x}) - \log_{10}(G_{r_x}) \right)$$

Vediamo il multipath: io sto mandando in LOS, ma ho interazioni con l'ambiente, tipo:

- riflessione
- scattering (se  $\lambda \sim$  oggetto)
- diffrazione (se  $\lambda \ll$  oggetto, effetto sui bordi)

Uno degli effetti è il **fading** (evanescenza), dovuto a interferenze distruttive tra più onde elettromagnetiche; le interferenze sono variabili nel tempo, perché siamo in un ambiente dinamico, e dipende anche dalla mobilità del dispositivo (entrambi ciao). Un altro è l'**interferenza Inter-Simbolo** (ISI Inter-symbol interference) ovvero la ricezione sovrapposta di simboli adiacenti a causa del ritardo di ricezione delle onde dei diversi percorsi. La durata del simbolo è  $\sim$  o  $<$  la max differenza dei tempi di arrivo.

Nel fading, il coherence time è la scala temporale in cui si possono considerare le caratteristiche del segnali costanti. Si calcola con

$$T_c = \frac{1}{f_D}$$

La frequenza doppler dipende dalla velocità di movimento e dalla frequenza (oltre che da  $c$ ) ed è

$$f_D = \frac{v}{c} f_c$$

Usiamo il MIMO (Multiple Input Multiple Output), che può essere di diversi tipi

#### 3.1. Codifica e trasmissione dei dati

Dati utente  $\rightarrow$  forward error correction (FEC) ovvero encoder  $\rightarrow$  modulation e coding con la frequenza portante  $\rightarrow$  power amplifier (amplificatore) e lo mandiamo. Quando riceviamo

abbiamo de-modulazione (demodulation) e decoding  $\rightarrow$  forward error correction (FEC) e decoder

Schema di modulazione e codifica. Sappiamo che

$$s(t) = A \sin(2\pi f_c t + \phi)$$

ed esistono diverse tecniche per codificare dati digitali in segnali analogici.

Diversi livelli di ampiezza per diversi bit (o gruppi) parliamo di Amplitude-shift keying (ASK)

Diverse frequenze per diversi bit (o gruppi) parliamo di Frequency-shift keying (FSK)

Diverse fasi per diversi bit (o gruppi) parliamo di Phase-shift keying (PSK)

Il simbolo è una forma d'onda, uno stato o una condizione significativa del canale di comunicazione che persiste in un intervallo di tempo fissato. Il symbol rate è il numero di simboli trasmessi al secondo [baud]

In generale, un simbolo può contenere più bit, quindi symbol rate diverso da bit rate

Metti esempi vari

Tecniche che permettono più di un bit per simbolo:

- MFSK multilevel frequency-shift keying ( $L = \log_2(M)$ )
- QPSK quadrature phase-shift keying (2)
- X-QAM quadrature Amplitude modulation ( $L = \log_2(X)$ )

Vediamo ora QPSK. Usa la fase per determinare ...

Siamo nello spazio complesso (viva Edu) ma usiamo le coordinate polari. Il segnale è

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \dots$$

Ogni punto codifica una coppia di bit. Sono 4 fasi differenti, distanziate di 90 gradi. Usiamo 2 bit per simbolo, usando una codifica Gray per punti adiacenti.

Vediamo QAM. Cambia un po', ma combina variazioni di ampiezza e fase, ad esempio 16-QAM usa 4 bit per simbolo e la costellazione è più densa.

Bit error rate curve: le curve di BER rappresentano la probabilità di errore di un bit in funzione del rapporto tra la densità di energia del segnale per bit ed il livello del rumore, ovvero

$$BER = \text{func} \left( \frac{E_b}{N_0} \right)$$

La formula analitica (verificata poi sperimentalmente) è una stima ottimistica rispetto al caso reale, ovvero

$$BER = \frac{4}{n} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3nE_B}{(M-1)N_0}} \right)$$

con  $n$  bit per simbolo,  $M$  numero di simboli diversi (costellazione) e erfc funzione degli errori di Gauss complementare, ovvero

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$$

AMC è adaptive modulation and coding

Il forward error correction aggiunge bit ai dati, così il ricevente li può usare per vedere se ci sono stati errori. Se la error detection vede un errore il blocco di dati viene ritrasmesso usando lo schema ARQ. Nelle trasmissioni wireless la probabilità di errore di un bit è elevata. Definiamo code redundancy come

$$\frac{n - k}{k}$$

mentre la coding rate come

$$\frac{k}{n}$$

A seconda delle condizioni del canale wireless il trasmettitore sceglie lo schema di modulazione e codifica opportuno

## 4. Lezione 04 [05/03]

### 4.1. Esercizi

Abbiamo  $\text{SNR} = 8 \text{ dB}$  e un obiettivo che il canale deve garantire di  $\text{BER} = 10^{-2}$  (sbagliare un bit ogni 100)

Abbiamo anche una tabella dei coding rate ( $k/n$  vedi Shannon)

SNR	BPSK	QPSK	16-QAM
$< 6\text{dB}$	0.6	0.4	0.2
$6 - 10\text{dB}$	0.8	0.6	0.5
$> 10\text{dB}$	0.9	0.8	0.7

Poi abbiamo un grafico con SNR sulle  $x$  e BER sulle  $y$ , di solito in scala

I simboli al secondo sono 1000 syb/s

Noi siamo a 8 dB quindi siamo sulla linea centrale. Noi vorremmo un BER uguale a  $10^{-2}$ , quindi scegliamo BPSK. La QPSK invece non va bene, faccio troppi errori. Guardando la tabella, selezioniamo 0.8 vista la zona e la codifica.

Facciamo quindi  $\text{syb/s} \cdot \text{bit/syb} \cdot \text{CR} [\text{ad}]$ , ovvero

$$1000 \cdot 1 \cdot 0.8 = 800 \text{ bit/s}$$

Se avessi chiesto  $10^{-1}$  prendevo anche QPSK, facevo conti e prendevo il migliore. Basta prendere tutto quello che è meglio di quello richiesto.

### 4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]

Abbiamo già visto TDM e FDM con divisione in frequenza e tempo in base al segnale.

La tecnica OFDM permette di inviare uno stream di bit usando frequenze differenti per inviare porzioni dello stream. Offriamo canali differenti usando una divisione in frequenza. Vogliamo garantire stesso data rate in TDD. Qua manteniamo fissa la banda ma garantendo lo stesso data rate. Qui ho  $N$  stream paralleli, uno per ogni frequenza, e ho  $R/N$  bps di durata  $N/R$ . Stesso data rate in entrambi, ma qui abbiamo tanti sotto stream su tutte le frequenze disponibili

Come lo si implementa:

- dobbiamo fare una conversione seriale  $\rightarrow$  parallelo
- mandiamo  $R/N$  bit ad ogni frequenza diversa detta subcarrier (sotto-portanti)
- ogni stream viene modulato indipendentemente usando lo stesso schema di modulazione codifica MCS
- l'onda trasmessa è la combinazione di tutti i subcarrier modulati

Partiamo da una frequenza base e poi la spostiamo

Come troviamo la  $f_b$ ? Nel caso di FDM classico viene lasciato uno spazio di guardia per evitare interferenze. In questo caso, i subcarrier sono ortogonali tra di loro e non interferiscono. La distanza tra i subcarrier è studiata in modo da evitare interferenze

Ortogonalità non ha interferenze.

Come garantiamo l'ortogonalità?

La scelta dipende dalla durata del simbolo  $T$ , ovvero

$$f_b = \frac{1}{T}$$

ovvero più il simbolo è breve e più devo distanziare, più il simbolo è lungo meno devo distanziare.

Considerazioni:

- più robusto riguardo ad interferenze che riguardano solo alcuni subcarrier; nel caso di sx rompe le palle a tutto, nel caso di dx solo un bit (o R/N) sarebbe interessato
- più robusto rispetto ai problemi di multipath perché la distanza tra un simbolo e l'altro è maggiore (inter-symbol interference (ISI) ridotto)

Multiple access: condividere il canale di comunicazione tra più utenti. In generale MA diverso da multiplexing. Ora abbiamo:

- TDMA slot temporali diversi
- FDMA frequenze diverse per gli utenti
- CDMA codificare l'informazione [3g e satellite]
- CSMA controllare il canale
- FHSS frequenze diverse saltando random
- OFDMA subcarrier [4g e 5g]

### 4.3. Spread Spectrum

Spread Spectrum (spettro espanso) consiste nel trasmettere il segnale di informazione su uno spettro di frequenze più ampio di quella del segnale

Ho input, poi encoder, il modulator prende uno pseudonoise generator oppure uno spreading code (deciso), canale, de-modulatore e poi fine

Motivazioni:

- immunità a diversi tipi di rumore e distorsioni multipath
- utilizzato per nascondere e cifrare il segnale. Solo TX e RX sono a conoscenza del codice di spreading
- molti utenti possono usare indipendentemente la stessa banda più ampia con pochissima interferenza, usata da CDMA

#### 4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum

In FHSS il codice di spreading determina quale frequenza usare per trasmettere il segnale. Ad ogni intervallo di tempo prestabilito, la frequenza viene cambiata (Frequency Hopping). Sequenza nota a TX e RX

Ci si mette d'accordo su due parametri: ogni quanto fare hopping (anche pubblico) e pseudonoise bit source, il seed della sequenza da generare

Cosa possiamo dire:

- più resistente al rumore e al jamming
  - jamming su una frequenza compromette solo quella
  - jamming su tutta la banda spread ha meno efficacia
- un altro ricevitore che si sincronizza con il trasmettitore può solo leggere alcuni pezzi di messaggi perché non conosce la sequenza di frequency hopping

#### 4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum

Data una sequenza di bit D, ogni bit della sequenza viene rappresentato da un insieme di bit usando un codice di spread

1 bit di informazione diventa  $N$  ottenuti da una sequenza casuale

I bit della sequenza di spread sono più piccoli (durano  $1/N$  dei bit di informazione) e sono denominati chip

Vogliamo mantenere lo stesso data rate, quindi abbiamo bisogno di  $N$  volte la banda utilizzata per l'informazione

**Esempio 4.3.2.1:** Devo trasmettere  $D = 101$  e ho un fattore  $N = 3$ . Per ogni bit di  $D$  uso 3 bit casuali. Faccio XOR (bit per ogni bit della sequenza) e poi mando.

Un bit di informazione va in xor con i bit del chip

## 5. Lezione 05 [11/03]

Multiplexing a livello fisico: ho 1 canale e lo divido in  $n$  sotto-canali. A livello 2 invece ho il multiple access: permetto a più utenti di accedere contemporaneamente, è il livello MAC che, in base ai canali, vede cosa fare. Se voglio livello MAC devo avere il livello fisico

Finiamo spread spectrum: ci manca CDMA (Code division multiple access)

Data una sequenza di bit  $D$ , ogni bit della sequenza viene convertito in un insieme di  $k$  chip usando un pattern prefissato detto codice. Un chip è una sequenza di 1 e  $-1$ . Vogliamo lo stesso data rate, quindi ci serve  $k$  volte la banda. Ogni utente ha un codice diverso e produrrà chip diversi.

Abbiamo:

- sequenze Walsh: creano un insieme di codici ortogonali (sono in numero limitato, non interferiscono l'uno con l'altro)
- sequenze PN, Gold, Kasami: creano codici non ortogonali ma in un numero molto maggiore (permettono leggera interferenza)

Se trasmettiamo 1 il codice rimane identico, se voglio trasmettere uno 0 cambio ogni segno del codice.

Posso mandare tutto assieme, modulando comunque sulle varie portanti, ma posso tutto assieme e recuperare, con i codici, le varie cose. Come?

Noi sappiamo il codice e quanto è lungo. Calcoliamo

$$S_u(d) = \sum_{i=1}^k d_i \times c_i$$

dove  $d_i$  è quello ricevuto e  $c_i$  è il codice.

Perché funziona? Perché se ho mandato un 1 ho delle moltiplicazioni che sommano solo cose positive, e la somma vale  $k$ . Se invece ho mandato uno 0 ottengo una somma  $-k$ . Quindi il bro che riceve, quando calcola moltiplicazioni e somme, deve ottenere  $k$  per 1 e  $-k$  per 0. Questo in quelli ortogonali. Se usiamo il codice di un altro utente devo ottenere 0 in quelli ortogonali, quindi so che non mi ha mandato dati un certo utente.

Se non sono ortogonali i codici, ottengo una cosa diversa da 0 se altro utente ma non è abbastanza alto per essere considerato corretto.

Che succede se ho un segnale combinato? CDMA mi permette di mandare tutti assieme senza problemi. Ad esempio se mandiamo in 2 abbiamo 2 0  $-2$  come valori possibili. Prendiamo il codice del primo, moltiplicazione+somma. Il risultato, se è più alto (non ortogonali) allora il bro ha mandato un 1.

Più utenti vogliamo gestire, più il codice deve essere ampio

CDMA soffre del Near-Far problem, ovvero tutti trasmettono con la stessa potenza, gli utenti più lontani sono più difficili da interpretare. Quindi chi è lontano deve mandare più forte, ma consuma molta più batteria

### 5.1. WPAN

ISM band [industrial, scientific and medical] è una porzione di spettro riservato per usi industriali, scientifici e medici

Ad esempio, il forno a microonde lavora a 2.45GHz, l'ipertermia oncologica (con altre tecniche) su 434MHz e 915MHz

Spettro usato senza licenza, agire senza interferenze

Inoltre, abbiamo il Pulse Code Modulation (PCM) ed è una codifica del segnale audio con due aspetti:

- frequenza di campionamento (per unità di tempo)
- numero di livelli di quantizzazione (di bit)

#### **5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]**

Siamo nelle wireless personal area network

Lo standard IEEE 802.15 comprende un insieme di tecnologie per la comunicazione a corto raggio

Bluetooth è .1 come codice. Abbiamo delle reti piconet (molto piccole), e all'interno della rete non c'è uguaglianza. Ovvero, un dispositivo fa da master e una serie di slave che sono sotto il controllo del master, controlla la piconet

Il bluetooth è short range (10-50m nei casi d'uso tipici e a seconda della classe di potenza del dispositivo). Usa la banda ISM 2.4 GHz. Ha un data rate di 2.1-24 Mbps (non pensato per elevato data rate). Utilizzato per:

- punto di accesso per dati e voce (dati limitati)
- sostituzione di cavi (no tastiere mouse ecc, es. periferiche wireless)
- comunicazione ad hoc con altri dispositivi BT

BLU: core protocols, ci sono in tutti i dispositivi BT, la parte del core, se uno è BT compliant ci devono essere

ROSSI/BLU SCURO: ci sono solo se quel dispositivo offre quel servizio

Partiamo dal basso

Bluetooth radio: specifica l'interfaccia radio, ovvero radio frequenze, gestione del frequency hopping, schema di modulazione e utilizzo della potenza di trasmissione

Baseband: livello banda base, si occupa di stabilire la connessione con la piconet, gestire l'indirizzamento (no MAC, specifico dello stato), formattazione di pacchetti, sincronizzazione e tempistiche di comunicazione (TDD & TDMA) e gestisce la potenza di trasmissione (indicazioni passate poi al tempo radio)

Link Manager Protocol (LMP) configura dei collegamenti tra dispositivi, gestione di collegamenti attivi e funzionalità di sicurezza e cifratura. Svolge un compito di controllo

Punto di rottura: sotto ho dentro il chip bluetooth, sopra ho software o firmware

Logic link control and adaptation protocol (L2CAP) adatta i protocolli di livello superiore al livello baseband e offre ai livelli superiori servizi connectionless e connection-oriented. Fa da interfaccia

Service discovery protocol (SDP) gestisce le info del dispositivo, tipo servizi disponibili, caratteristiche disponibili. Possiamo interrogare per stabilire connessioni tra dispositivi.

Radio frequency communication (RFCOMM) è una porta seriale che mi astrae il bluetooth per permettere la comunicazione. Bla bla bla vedi slide



Sopra abbiamo un sacco di robe, intende riutilizzare il maggior numero di protocolli esistenti. Lo standard Bluetooth specifica dei profili che indicano un particolare modello di utilizzo dell'architettura

#### Piconet & scatternet

Una piconet ha un master, degli active slave (AS) (membri attivi della piconet) che hanno un active member address [AMA] di 3 bit (il master è 0). Quindi ho  $2^3$  dispositivi disponibili, tolto il master, quindi max 7 active slave

I parked slave (PS) sono membri che devono aspettare che uno degli AS cambi stato e hanno un parked member address [PMA] su 8 bit (0 master) e quindi ho  $2^8 - 1$  possibili

Ci sono poi i standby slave (SS), sono stati riconosciuti ma sono nel chill, senza indirizzo quindi numero infinito

La piconet è molto master-centrica: appartengo e mi coordino con il master, ma un dispositivo può stare in più piconet. Se un AS sta in più piconet otteniamo una scatternet. I due master sono entità separate, le due piconet sono totalmente indipendenti, ognuno per sé, ma una delle AS sta in entrambe le reti.

## 6. Lezione 06 [12/03]

Frequenze pari master parla, frequenze dispari slave parla. Non sono mai slot separati: parla master, subito dopo parla slave.

Gli slot per parlare consecutivi sono 1,3 o 5. Sempre dispari per la divisione in time division duplex. Se fossero pari andremmo a parlare anche negli slave. Da 7 in poi sono troppi. Questo vale sia per master che per slave. Il FH va in base agli slot: nell'esempio passiamo da  $f_2$  a  $f_5$  perché ho uno slot da 3, ho fatto 3 salti, non vado in  $f_3$ . Inoltre, nella stessa finestra di trasmissione ( $n$  dispari slot) uso sempre la stessa frequenza.

Tutti gli slave connessi alla piconet hanno questo clock ben sincronizzato con il master. Quindi scelgo FH uguale in tutta la rete, TDD per fare le parlate MS e SM e infine TDMA per far scegliere al master con chi parlare

La scatternet deve aggiungere altro

Ogni master ha la propria FH e si ha un disallineamento dei tempi, quindi ogni piconet è sfasata e non abbiamo vincoli che le leghino

FH decisa sempre dal master e condivisa nella piconet, ognuna con una sequenza diversa. Avendo 79 canali può capitare una sovrapposizione. Come si sistema:

- FH su un numero ridotto di canali (scegliamo robe diverse), riduce ma non risolve
- si usa CDMA per risolvere, ovvero evita interferenze tra piconet. Ogni master dà un codice ortogonale per tutti gli elementi della piconet (CDSMA scatter). Il MA sono le piconet

Non abbiamo veramente risolto, ma così riduciamo di molto perché i codici ortogonali sono molto pochi

Cosa offre la baseband come servizi (2 canali):

- synchronous connection-oriented link (SCO) point-to-point
  - ▶ canale audio/voce di 64 kbps bidirezionali
  - ▶ il master riserva una coppia di slot adiacenti ad intervalli regolari (MS e SM per arrivare a 64kbps)
  - ▶ previsti al massimo 3 canali SCO attivi contemporaneamente
  - ▶ traffico real time come la voce (delay non c'è)
- asynchronous connectionless link (ACL) point-to-multipoint
  - ▶ canali ACL occupano gli slot rimanenti, ciò che non è SCO
  - ▶ traffico dati con ciascuno degli slave (varie dimensioni)
  - ▶ un solo ACL contemporaneo tra master e uno slave
  - ▶ traffico best effort (non garanzie di delay)

Due canali logici offerti

Come sono formati i frame (pacchetti) a livello baseband?

Abbiamo:

- 68 (o 72) bit di access code, usato per ... che possono essere:
  - ▶ channel access code (CAC) identifica la piconet (48 bit dell'indirizzo HW del master)
  - ▶ device address code (DAC) derivato dall'HW dello slave ed è usato dal master per chiamare (paging) il dispositivo
  - ▶ inquiry address code (IAC) usato per trovare l'indirizzo di un dispositivo vicino (durante la fase di inquiry)
- 54 bit di packet header

- ▶ 3 bit di AMA
- ▶ 4 bit di tipo (tipo del pacchetto, formato di ACL)
- ▶ 1 bit flow (controllo di flusso), vale 1 se stop, altrimenti 0 resume (usiamo per gli ACL, gli SCO sono cadenzati)
- ▶ 1 bit di ARQN (automatic RQ number)
- ▶ 1 bit di SEQN (sequence number modulo 2)
- ▶ Ultimi due usati per il controllo degli errori
- 0-2744 bit di payload
  - ▶ SCO 30 byte (230 bit) perché abbiamo  $30 \cdot 8 \cdot 1600 / 6$  ovvero 64 kbps
  - ▶ ACL da 0 a 343 byte

Link Manager Protocol (LMP) è una macchina a stati

- si parte dalla standby mode, il dispositivo è acceso ma non è in nessuna piconet, quindi minimo consumo
- entro in ...

In standby non sono a conoscenza di niente. Come faccio a collegare? Non ho nessun coordinamento, ma c'è un concetto di «presentazione di qualcuno», ma non è lo slave che si annuncia al master (quello dal 4.0 in poi), qua è il master che si presenta allo slave. Il master fa discovery e manda pacchetti con IAC su 32 frequenze standard dove li mandiamo uno dopo l'altro. Gli slave sanno che devono ascoltare qua

I tempi di collegamento sono diversi: avendo un TDMA dobbiamo avere culo a prendere quando il master sta per mandare su quelle frequenze.

Quindi:

- mando su 32 canali wake-up un IAC packet (32 consecutivi) e i bro slave ascoltano per vedere se qualcuno ha mandato un IAC, tutto non coordinato però. Visto che spreco ad ascoltare, ascolto per 11.25 ms e aspetto. Tra una scansione e l'altra passano 1.28/2.56s
- quando si beccano dobbiamo dire chi siamo (48bit del MAC e la classe) con un random backoff per evitare le collisioni

Master passa da standard a inquiry, mentre slave da standby a inquiry-scan. Ci siamo allineati con il metronomo del master, manca solo una cosa: la FH. Non la sappiamo per ora, la dobbiamo sapere.

Uso 16 frequenze standard dei 32 di prima per mandare un DAC (access code) con il FH da usare e il suo active member address. Ora sappiamo come sincronizzarci, mando un DAC con un ACK

Passiamo poi negli stati PAGE e infine CONNECTED

## 7. Lezione 07 [18/03]

### 7.1. Ancora BT

Digressione sul near far: stessa potenza perché devo essere in grado di decodificare, se troppo debole il segnale si perde via

Due blocchi da 16 frequenze sulle 32 disponibili (divise in modo equo su tutto lo spettro). Lo slave seleziona UNO dei 32 canali di wake-up, perché non sa dove la sta mandando ora ma sa che la può mandare in 32 canali. Poi dopo random mando la risposta, il master ascolta le 16 frequenze

Un dispositivo accesso in standby mode non è membro di alcuna piconet, ho minimo consumo

Entro in inquiry mode per:

- creare una piconet
- periodicamente per vedere se sono stati mandati dei messaggi con IAC

Questa operazione di inquiry non è coordinata, ovvero non c'è sincronia dei clock

In page mode il master crea la piconet interrogando gli slave sui profili che possiedono. Transmit consuma, connected uguale ma meno

Master promuove e degrada gli slave in stati di power saving:

- sniff (consuma molto) ascolta ma non tutti gli slot (mantiene AMA)
- hold (consuma medio) con ACL sospesi e solo SCO (mantiene AMA)
- park (consuma meno) rimane membro della piconet ma lascia l'AMA per un PMA; periodicamente ascolta i messaggi del master in broadcast (non sulle 32/16 di prima, sanno dove sono, siamo nella piconet) a tutti i membri parked

Abbiamo visto la parte fisica, ora andiamo nel software

Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP) come se fosse il livello IP, non più firmware e hardware. Sempre presente da standard, siamo ad un livello superiore, funzionalità di alto livello

Non viene utilizzato per l'audio, è tutto nel livello dopo

Supporta solo canali ACL e offre 3 canali logici:

- connectionless: unidirezionale (broadcast tra master e slave)
- connection-oriented: bidirezionale con supporto QoS (qualità di servizio, tipo TCP)
- signaling: bidirezionale usato per messaggi di controllo master/slave

Come sono fatti i pacchetti [METTI FOTO]

Notiamo come i payload siano molto più grandi: infatti, sono >> baseband, mentre qua sono in byte. Viene fatta una segmentazione in messaggi baseband. In ricezione poi assembliamo.

Abbiamo lunghezza per sapere la lunghezza del messaggio, CID (connectionless 2 connection-oriented >= 64 signaling 1)

Ultimo pezzo è SDP: protocollo client-server dove si ha un server con le info e un client che fa

- ricerca di un servizio
- browser di servizi (listare i servizi di un dispositivo)

Client è il master, che chiede ai server (slave) i servizi o altro

FINE BT 2.1

Bluetooth Low Energy (BLE) balzo in avanti dal 2.1, siamo almeno nel 4.0 (credo)

Motivazioni:

- ridurre il consumo energetico sui dispositivi
- utilizzo nel mondo degli smart sensor
- necessità di un sistema più snello per la comunicazione
- compatibilità con disponibili Bluetooth
- richiesta di nuove funzionalità come positioning o presence

[IMMAGINE] a sx < 4.0 ho solo master + slave, banda e basta, 1MHz per ogni canale, a dx siamo nel mondo 4.0 e abbiamo, oltre alla stella, anche una struttura broadcast (senza una piconet rigida, chi è nel raggio GG sennò suca) e mesh, con anche servizi di device positioning (misura di presenza di dispositivi, distanza tra dispositivi e direzione). Stesso spettro ma i canali sono di meno 40 (non più 79) e quindi sono un pelo più larghi e resistenti all'interferenza

Perdiamo data rate, le versioni dopo cercano di aumentarlo

[IMMAGINE]

Livello BLE radio (PHY) ho sempre radio a 2.4 GHz ISM

Banda divisa in 40 canali, i primi 37 usati come data packets e i canali 37 38 39 usati come canali di advertising

Facciamo FHSS con hops determinati dalla formula

$$\text{channel} = (\text{current\_channel} + \text{hop}) \bmod 37$$

dove hop è stabilito all'atto della connessione

Usiamo la Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) bla bla bla

Advertising è lo slave che si annuncia al master per entrare nella piconet. Initiating lo fa il master, se si becca con advertising si crea la connection. Altri stati (iso e scanning) che sono messi lì nello standard per i nuovi casi d'uso:

- iso è un broadcast periodico, che mette info in giro
- scanning fa ascolto di quello che c'è in giro

Advertising si fa su 3 canali, VEDI IMMAGINE

Si entra in stato advertising, si mandano sui 3 canali con un ADVInterval, multiplo di 0.625ms ma nel range 20ms-10.24s (determina anche uso batteria, subito -> molto lento). Per evitare allineamento che causi collisione (non siamo coordinati) ho un advDelay, pseudo-random in 0ms e 10ms

Generic Attribute Profile non ho capito cosa sia ma va bene

General Access Protocol (GAP) è un modulo software che trasforma gli stati del dispositivo:

- broadcaster (spedisce advertising packets, trasmissione i dati connectionless come eventi di adv)
- observer (riceve adv packets, riceve dati in connectionless)
- peripheral (periferico), device slave che opera in advertiser mode a LL
- central è un device master (Initiator) mode a LL

Vediamo una unicast peer-peer: opposto di quello che avveniva prima, master ascolta e gli slave fanno richiesta per collegarsi ad una piconet. Quando il master ha ascoltato passa in initiator

e manda una connection request sullo stesso canale. Poi si passa all'effettiva comunicazione master-slave

Connessione broadcast: abbiamo un broadcaster che manda dati sui canali 37 38 39 agli observer (nel raggio di comunicazione, non mi frega chi c'è o chi no, io devo solo trasmettere)

Possiamo avere un passive scanning: uno sniffer, ascolto periodicamente su quei canali quello che arriva, sempre sui 37 38 39 (id)

Oppure un active scanning: è sempre e solo sui 37 38 39 ma facciamo richieste su questi canali con una request + response. Scanner fa richiesta, advertiser fa la response. Questo deve avvenire in un advertising scan interval. La richiesta sono tipo cosa sai fare, dammi le tue coordinate, dove sei. Possiamo vederlo come broadcast + unicast quando faccio le richieste, mi sincronizzo per parlare con quel bro

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b> .....	<b>52</b>
16.1. Operazioni .....	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b> .....	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE] .....	55
17.1.1. Moduli .....	55
17.1.2. E-UTRAN .....	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b> .....	<b>57</b>
18.1. Control plane .....	57
18.2. User plane .....	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b> .....	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b> .....	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b> .....	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b> .....	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b> .....	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b> .....	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare .....	72
24.2. NTN .....	73

## 8. Lezione 08 [19/03]

### 8.1. ZigBee + Matter & Thread

Siamo sempre nell'802.15 ovvero nel corto raggio con un dispendio energetico ridotto

#### 8.1.1. ZigBee

Standard 802.15.4 delle low-rate WPAN

Con BT e BLE volevamo una riduzione del consumo di batteria e una complessità che si abbassava. In ZigBee estremizziamo questi concetti con anche altri requisiti:

- affidabilità
- basso costo
- lunga durata della batteria (molto più del BT)
- bassa complessità (pensato per sensori)
- utilizzo delle bande ISM (sia 2.4GHz che 915MHz e 868MHz)
- scalabilità (alto numero di nodi ma con strutture anche particolari)
- interoperabilità tra vendors
- sicurezza

Utilizzi un botto, guardali da solo (automation, personal care, periferiche, sicurezza, smart, eccetera)

Le topologie di rete che abbiamo sono:

- stella (BT like)
- albero
- mesh

Possiamo anche inserire del routing con particolari nodi

Abbiamo due macro-classi:

- full function device [FFD] tutte le funzionalità



- reduced function device [RFD] una parte delle funzionalità

Tra i FFD ne abbiamo due particolari:

- un solo coordinatore, detto PAN coordinator, unico all'interno della rete, che la deve creare e mantenere le informazioni (tipo chiavi di sicurezza)
- router, nodi che hanno la capacità di inoltrare dati tra i vari dispositivi ZigBee

I RFD sono invece gli end device, hanno solo la capacità di parlare con un router/coordinatore, e hanno ridotta complessità ed elevato risparmio energetico. Sono proprio gli attuatori

Cerchiamo di mettere pochi FFD e tanti RFD per diminuire al minimo il dispendio energetico. Vogliamo cambiare le batterie il minimo possibile

I ZigBee li distinguiamo per tipologie di invio di dati:

- dati periodici (tipo sensori, intervallo di trasmissione fissato)
- dati intermittenti (asincroni, stimoli esterni o dell'applicazione, tipo interruttore, in base ad un evento)
- dati ripetitivi e a bassa latenza (tipo mouse, allocazione di time slot con un certo servizio, vogliamo in tempo reale)

IMMAGINE ARCHITETTURA azzurro solo quelli della ZigBee alliance (tolta da Thread & Matter), rossi sono dipendenti dai singoli sviluppatori

Partiamo dal lato fisico: lo standard specifica la tipologia di modulazione e di spread spectrum per le 3 bande (FDM), cifratura per interferenze

Andiamo al livello MAC: esso deve

- gestisce l'invio dei beacon (se siamo PAN coordinator)
- sincronizzazione con i beacon del coordinatore (router & end)
- associazione/dissociazione alla PAN ascoltando i beacon
- accesso al canale tramite CSMA/CD
- MAC address (16 o 64 bit)
- gestione del duty-cycle del dispositivo
- gestisce la trasmissione diretta tra dispositivo e coordinatore ambo i lati
- gestisce la trasmissione indiretta da coordinatore a dispositivi

Abbiamo due modalità di trasferimento:

- unslotted CSMA-CA senza beacon
- slotted CSMA-CA con beacon

Slotted CSMA-CA beacon mode

Si basa sull'invio di beacon, messaggi con informazioni su come è organizzata la piconet, inviati dal coordinatore ed eventualmente inoltrati dai router

Il coordinatore invia periodicamente i beacon per:

- sincronizzare gli altri dispositivi
- organizzare i periodi di trasmissione per le diverse tipologie di trasmissione (periodiche, asincrone e bassa latenza), deve capire come dividere i bro
- gestione della trasmissione indiretta:
  - ▶ il coordinatore mantiene in una lista le frame non ancora mandate ai dispositivi
  - ▶ nei beacon frame trasmette anche i dispositivi che hanno frame pendenti (i bro sapranno se hanno qualcosa per me)
  - ▶ i dispositivi che ascoltano i beacon sanno se c'è qualcosa per loro

Definiamo i superframe: è l'intervallo tra un beacon e l'altro, momento di attività e altri di inattività

Il duty cycle è l'alternarsi tra periodi di attività (radio accesa) e inattività. Se devo prendere qualcosa dal beacon ok, sennò mi spendo e mi riaccendo al prossimo superframe

Abbiamo il beacon interval BI e superframe duration SD. L'unità base è aBaseSuperframeDuration di 960 simboli. Avremo multipli di questo parametro

Ci serve poi

- BO (beacon order) che determina il beacon interval tra 0 e 14
- SO (superframe order) che determina la durata del superframe 0-14
- duty cycle =  $\frac{2^{SO}}{2^{BO}}$

Mentre il nostri BI si calcola come

$$BI = aBaseSuperframeDuration \cdot 2^{BO} \text{ sym}$$

960 simboli sono circa  $15.3ms$  con banda 2.4

Il beacon frame [IMMAGINE] GTS (guaranteed ...), nel primo blocco, tiene tutte le informazioni

Il superframe, dentro il beacon, mi da info sui tempi di attività:

- contention access period (CAP) accetto con CSMA-CA
- contention free period (CFP) (da 0 fino a 7 slot)m comunicazione con banda riservata tramite guardanteed time slot (GTS)

Come funziona la trasmissione? **IMMAGINE**

All'inizio faccio CCS (verifico che sia libero) per brevi periodi (8 simboli, poca batteria)

Non posso andare oltre il CAP, deve essere atomico l'operazione, per forza dentro li

Unslotted invece più semplice, siamo in non-beacon mode, quindi accediamo al canale con CSMA/CA senza i vincoli degli slot, no sincronizzazione (coordinatore e router RX sempre attivi), il tempo è continuo e non discreto come in beacon e il controller è più semplice

Andiamo al livello di rete, facciamo indirizzamento, gestione della rete join and leave, sincronizzazione e routing (star, tree, mesh AODV)

Ogni dispositivo è programmato per una specifica funzione (potrei avere più robe)

ZigBee Device Object definisce il ruolo del dispositivo, scoperta di nuovi dispositivi e delle loro funzionalità, interfaccia con le applicazioni definite dai manufacturer

### 8.1.2. Matter & Thread

Nuovo standard, sempre 802.15.4 ma viene montato Thread da parte a ZigBee e sopra Matter

Fisico e MAC siamo uguali a ZigBee, ma Thread abbiamo delle funzionalità più conosciute:

- 6LoWPAN
- IP routing
- UDP

Con anche robe di sicurezza, ...

Cambia le rete Thread

Abbiamo i routing full thread device:

- router: effettua routing e fornisce servizi di accesso e sicurezza (NoSleep, degradabile a router-eligible end device REED)
- leader: router con funzionalità aggiuntive che può eleggere/destituire REED

E abbiamo anche i non-routing full thread device:

- REED (prima) non lo sono ma possono esserlo
- full end device (FED) non possono essere router

Infine abbiamo i non-routing minimal thread device, hanno HW minori e:

- minimal end device: comunicazione solo con il router genitore e radio sempre attiva
- sleepy end device: comunica solo con il router genitore con duty-cycle
- synchronized sleepy end device: comunica solo con il router genitore e duty-cycle con intervalli schedulati

Ci sono anche i border router che fanno routing verso l'esterno, in ZigBee non ce l'avevamo

## 9. Lezione 09 [25/03]

### 9.1. WLAN

Siamo nell'802, livello fisico e MAC

In questo caso, siamo 802.11 per le WLAN

Obiettivi:

- throughput, uso efficiente del canale radio per elevato data rate
- elevato numero di nodi, non su singolo AP ma su più celle, centinaia di nodi gestiti da più celle
- connessione verso la dorsale (backbone) cablata
- raggio 100-300 metri
- uso efficiente della batteria (meno estremo di ZigBee e BT), ma da wifi6
- più WLAN possono coesistere
- operare nelle bande unlicensed
- configurazione dinamica

La più comune rete wifi (Wireless Fidelity) è [IMMAGINE], rete con uno o più access point e la rete viene coordinata con Point Coordination Function (punto di coordinamento, access point). In più, basic service set identifica la cella (tipo eduroam)

Un'altra versione sono reti ad-hoc e sono distributed coordination function, non si ha un vero punto di coordinamento, con un independent basic service set (ambito veicolare questo)

Livello fisico [metti IMMAGINE]

Cosa offre il servizio Logical Link Control (LLC):

- unacknowledged connectionless service
  - ▶ trasmetto ma consegna non garantita
  - ▶ datagram indipendenti
  - ▶ no controllo errori
  - ▶ no controllo di flusso
- connection-mode service (link affidabile, perché canale wireless è inaffidabile per definizione)
  - ▶ canale punto-punto
  - ▶ correzione degli errori
  - ▶ controllo di flusso
- acknowledged connectionless
  - ▶ datagram indipendenti
  - ▶ acknowledge datagram

Vediamo il sottolivello MAC

Il canale radio è sensibilmente più inaffidabile di un canale cablato, quindi la frame di MAC 802.11 è più complessa dell'Ethernet 802.3:

- in 802.3 il payload è di 1500-1518B
- in 802.11 al massimo è 2304B

Il livello MAC offre due servizi:

- servizio dati asincrono: best effort e con delay variabile
- servizio time-bounded: offre garanzie sul delay

Il time-bounded è disponibile solo in presenza di un coordinatore (AP)

Distributed coordination function: opera con CSMA/CA

L'accesso al canale radio deve essere regolato aspettando del tempo per poter trasmettere. 802.11 prevede diversi tempi di attesa a seconda della tipologia di dati da trasmettere

Ci sono standard sul numero di slot, ma ognuno parte quando vuole ad aspettare un certo tempo

Abbiamo 4 definizioni:

- slot time: tiene conto di ritardo di propagazione e del trasmettitore (un quanto di tempo che il dispositivo sa che deve attendere)
- short inter-frame spacing [SIFS]: intervallo più breve di attesa usato per messaggi ad alta priorità
- DCF inter-frame spacing [DIFS]: intervallo di tempo più lungo usato per messaggi a bassa priorità best-effort  $SIFS + 2 \cdot \text{slot-time}$
- PCF inter-frame spacing [PIFS]: intervallo di tempo intermedio per time-bounded SIFS + slot-time

Usati per gestione, che ogni dispositivo in modo arbitrario e privato, del proprio tempo

Come avviene accesso al canale? È sempre in contesa

#### CANALE LIBERO NO ACK

No tempo random, iniziamo ad ascoltare subito. Ascoltiamo un tempo uguale a DIFS (più lungo), e durante la durata radio accesa per ascolto del canale (tutto il tempo, non spengo come ZigBee)

No ACK se il frame è corrotto, non ho modo di saperlo

#### CANALE LIBERO CON ACK

Non faccio carrier sense per l'ack. Dopo che finiamo di trasmettere, uso un tempo SIFS dopo aver mandato in modo atomico il mio frame, perché il frame è di controllo (ack). Aspettando tempo minore, sono sicuro che chi sta aspettando di trasmettere non decide di farlo e non fa interferenza

#### CANALE LIBERO CON ACK MA NON RICEVUTO

Se il frame è corrotto, il trasmettitore sta aspettando il SIFS. Se non riceve automaticamente assume che trasmissione non è andata a buon fine, a prescindere dall'errore. Cosa fa? Rimanda subito, ho preso il canale in maniera esclusiva. Viene fissato un numero massimo di tentativi. Ack viene mandato subito, tempo di switchare l'antenna

#### CANALE OCCUPATO

Sento un altro segnale, il CCA mi dà rosso perché uno sta trasmettendo. Cosa faccio? Tengo radio accesa (ecco perché dispendio alto di batteria) fino a quando non sentiamo la fine della trasmissione. Non possiamo trasmettere immediatamente, potrebbe manca un ack. Inoltre, noi non siamo da soli, non siamo gli unici ad aver trasmesso. Facciamo un periodo di contesa con un random backoff:

- si attende il SIFS/PIFS/DIFS dopo il CCS (fine trasmissione dell'altro bro, è un evento che bene o male sincronizza tutti i dispositivi di rete) in base alla priorità del messaggio che si deve mandare

Numero di slot time da attendere, durante il periodo noi facciamo CS

Se ci va ancora male? Sincronizzazione, aspetto DIFS (non ho manco ack), random backoff ma uno va prima di me. Opzioni:

- riparto dalla contesa, come se non fosse mai avvenuto, ma questo è un problema di attesa infinita → interrompo il conteggio, e nel turno successivo riparto da quello

Problema del terminale nascosto

[IMMAGINE]

Se A fa CS, non sente nessuno che parla, quindi inizia a spedire. In modo analogo, D fa CS, non sente nessuno che parla, quindi inizia a spedire. Entrambi hanno ok dal livello fisico e iniziano a parlare

Cosa riceve B? Collisione non evitata, viola il CSMA/CD

Ho terminali nascosti, ovvero il raggio non mi permette la percezione delle trasmissioni degli altri.

## 10. Lezione 10 [26/03]

Perché aspetto DIFS dopo che mi sono sincronizzato? Devo vedere se arriva l'ack [IMMAGINE1]

### 10.1. Problema del terminale nascosto

Come funziona terminale nascosto

CSMA/CA funziona solo se tutti quelli che vogliono comunicare sono nel raggio

Soluzioni?

A chiede a B il permesso. Nel messaggio RTS (request to send) si mette il MAC del bro a cui voglio mandare e anche il mio. Network Allocation Vector (NAV) tempo trasmissione + «ack» viene messo dentro. Uno che riceve un frame non suo sa che deve aspettare tutto quel tempo, inutile che cerchiamo di accedere al canale.

Ora D e F non sanno quello. L'unico che fa la concessione è B: hanno richiesto me, se nessun altro ha richiesto di comunicare con me, mando il CTS (clear to send) con sorgente B destinazione A e ancora un tempo NAV (poco meno).

Il CTS viene sentito da A D F, così A inizia a trasmettere mentre D e F sanno che un altro nodo al di fuori del loro raggio di copertura vuole dialogare con B

Aspetto sempre SIFS per il CTS e per il primo frame da A a B

### 10.2. Frammentazione

Permettiamo di frammentare in pezzi più piccoli, canale radio molto più sensibile all'interferenza e al rumore

Considerando la dimensione bla bla bla

### 10.3. Infrastruttura

Vediamo la rete con infrastruttura: abbiamo qualcosa di più

Abbiamo:

- basic service set (BSS) insieme di stazioni controllate da un singolo coordinatore (AP) [una sola cella]
- extended service set (ESS) insieme di più BSS interconnessi tramite un sistema distribuito a livello LLC [eduroam]

Il portale è un router/bridge che collega il sistema distribuito alla LAN

ESS viene visto come un unico BSS a livello LLC per funzionalità di roaming tra AP diversi (overlapping per almeno 10% continuità)

In presenza di un AP tutti i frame passano per l'AP, non si fa ponte

Questa si chiama point coordination function, con servizi time-bounded possibili perché prima avevamo un backoff che non mi dava garanzie sul delay

Nella modalità PCF [AP] l'accesso point controlla l'accesso al canale radio:

- tutto il traffico passa da AP
- le stazioni associate ad AP usano DCF con tempistiche SIFS e DIFS per accedere al canale
- AP usa PIFS

Quindi AP si impossessa del canale prima delle stazioni in attesa

L'AP manda messaggi periodici (10-100s) detti beacon frame che sono frame di gestione:

- parametri operativi a livello fisico (bit rate e modulation coding scheme)
- sincronizzazione (usato nelle prime 802.11 che usavano FHSS)
- supporto a PCF con le relative informazioni
- invito per le nuove stazioni che non sono ancora associate

L'intervallo tra due beacon è detto superframe ed è diviso in 2:

- senza contesa (opzionale) ma necessario se vogliamo time-bounded, la gestisce tutta l'AP
- accesso a contesa (sempre presente), si usa CSMA/CA

Se canale radio è occupato oltre il limite del superframe questo tempo non verrà recuperato, si mangia tempo del pezzo dopo, molto più flessibili

Come funziona PCF

AP colleziona chi deve trasmettere cosa e a chi devono essere trasmettere cosa

Li raccolgo tutti e organizzo la trasmissione:

- devo allocare senza contesa
- inizio con canale occupato, smette, tutti iniziano con il CS, tutti aspettano DIFS mentre AP aspetta PIFS e prende il lock
- manda DDX con un NAV agli altri che non servono
- aspetto UDX se serve
- mando un CF end per dire fine del periodo contention-free

È un time division multiple access, con un tempo continuo



# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b> .....	<b>52</b>
16.1. Operazioni .....	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b> .....	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE] .....	55
17.1.1. Moduli .....	55
17.1.2. E-UTRAN .....	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b> .....	<b>57</b>
18.1. Control plane .....	57
18.2. User plane .....	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b> .....	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b> .....	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b> .....	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b> .....	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b> .....	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b> .....	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare .....	72
24.2. NTN .....	73

## 11. Lezione 11 [01/04]

Beacon usati per scoprire una cella. Frequenza si configura sull'AP. Specificati i parametri di questa cella. Stazioni non presenti usano il periodo «contention period»

Formato del frame MAC: info principali sono messe come header, all'inizio

- in rosso tutto quello sempre
- in blu ci sono solo in certi tipi/sotto-tipi

Prim pezzo sono 2 byte FC di frame control:

- protocol version (versione usata del protocollo)
- tipo
- sotto-tipo
- toDS / fromDS verso il distributed system o da (celle del sistema distribuito), combinazione danno informazioni sugli indirizzi che ci sono
- MF more fragment (usato per riassemblare)
- RT rifare trasmissione
- PM attivo o no
- resto per sicurezza

Nei primi due byte abbiamo quindi protocollo e tipo del frame, quindi sappiamo poi cosa fare

Il secondo gruppo di due byte si ha la duration o la connection ID, qua ha la durata del NAV

Poi abbiamo indirizzo destinazione (per chi è il frame, indirizzo MAC)

Quindi già in 10 byte sappiamo se questo è per noi o no

Vediamo frame control: ci sono tre tipi e sono per le tre macro funzionalità del sistema:

- 00 management (gestione cella)
- 01 controllo
- 10 dati

Per una roba più specifica basta guardare il sottotipo

Il frame può tenere sino a 4 indirizzi, il loro utilizzo e significato dipende dai valori dei campi TO DS e FROM DS

Se non 00 devo fare routing tra celle

Se from DS il frame arriva dal DS verso un AP all'interno della cella che contiene un indirizzo segnato nel secondo indirizzo

Se 10 sto mandando al DS

Ultimo comunicazioni dentro il DS, unico caso in cui si hanno 4 indirizzi attivi

In wifi6 si usa OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OFDM suddivide la bandwidth in canali usando frequenze differenti opportunamente distanziate, che erano tutte per un singolo utente

Con OFDMA diamo gruppi di canali di OFDM a utenti differenti. Nello stesso momento posso servire più utenti.

Ci serve qualcosa in più nell'AP: prima davo tutte le frequenze a tutti, ora devo fare uno scheduling delle frequenze più complicato, tempo e frequenza da assegnare. Inoltre, serve definire quanto e in quale modo io posso raggruppare le sotto-frequenze

Ogni sotto-portante è separata da 78.125 kHz

Abbiamo le resource unit (RU) gruppi di frequenze (solitamente adiacenti) che sono allocabili ad un utente

Dimensione RU variabile e dipende dalla banda disponibile e come AP vuole allocare le risorse agli utenti

Non tutta la banda viene usata: abbiamo intervalli di guardia. Inoltre, alcune sotto-portanti sono usate come pilot (bontà del canale). Segnale standard ben definito per correggere il canale e stimare quanto il canale è buono

Come comunico la suddivisione della banda?

AP utilizza frame di controllo, alcuni frame sono nuovi per supportare le nuove funzionalità, altri sono frame che erano già presente

Come associo le RU ai vari utenti?

Ad ogni trapezio si dà un indice di 7 bit, codice univoco

Assegnamento delle sotto-portanti di una RU sono esclusive per l'utente che le prende

Le informazioni di allocazione delle RU sono usate da PHY e MAC e vengono inviate

Come comunico quali sotto-portanti devono usare?

Come gestisco DL-OFDMA e UL-OFDMA (downlink da AP al disp e uplink viceversa)?

DL

Multi-user RTS che fa RTS e assegnazione delle RU per i dati che arriveranno. La RTS va alle stazioni che devono trasmettere, le altre allocano il NAV e non ascoltano. Ora che tutti hanno dei codici ortogonali, tutti rispondono con CTS paralleli, che essendo ortogonali non si sovrappongono mai

Dopo CTS possiamo trasmettere in parallelo, ogni stazione usa le frequenze dedicate e legge solo quello che interessa

Infine, si manca BAR (Block ACK request) con un block ACK da tutti in parallelo, sempre con un tempo SIFS per far finire l'AP di parlare (sta mandando in parallelo), non può ricevere se sta trasmettendo

UL

Un pelo più complicato, non è prevedibile se la rete è grande. Dobbiamo avere trasmissione sincronizzata e dire ad ogni utente quando trasmettere e dove

Più step:

- BSRP buffer status report poll, chiedo chi ha dati da trasmettere [primo trigger]
- BSR buffer status report, stazioni informano che hanno dei dati
- AP colleziona le richieste, assegna RU in base alle risposte e comunico con MU-RTS [secondo trigger]
- abbiamo il CTS da parte delle stazioni
- trigger per sincronizzare gli uplink e farli partire tutti assieme, così che AP riceva in blocco tutto (su risorse diverse) [terzo trigger]
- viene mandato UL-PPDU (con padding per arrivare alla durata massima)
- infine, se servono ACK si mandano Multi-STA Block ACK (multi-station)

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b> .....	<b>52</b>
16.1. Operazioni .....	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b> .....	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE] .....	55
17.1.1. Moduli .....	55
17.1.2. E-UTRAN .....	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b> .....	<b>57</b>
18.1. Control plane .....	57
18.2. User plane .....	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b> .....	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b> .....	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b> .....	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b> .....	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b> .....	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b> .....	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare .....	72
24.2. NTN .....	73

## 12. Lezione 12 [02/04]

La banda del WiFi viene divisa in canali (quelli che scegliamo sull'AP), e ogni canale viene diviso in sotto-portanti con quello che definisce lo standard

Possiamo scegliere 3 canali che non sono sovrapposti: ad esempio, 1 6 11, oppure 3 8 13. Identificato il canale troviamo la nostra banda e lo spettro che copriamo

### 12.1. Sicurezza in WiFi

Il canale radio è molto più esposto. Tutti ascoltano e inviano, quindi il canale è naturalmente broadcast. Inoltre, abbiamo la necessità di cifrare il canale a livello data-link

Prime versioni usavano WEP (Wired Equivalent Privacy):

- opzionale quindi lol
- algoritmo RC4 di cifratura
- assenza di un sistema di gestione delle chiavi
- unica chiave usata per cifrare tutto il traffico di tutti i dispositivi (chiave non password WiFi, ma ricavata da quello)
- tutto il traffico cifrato con la stessa chiave

Per sopperire alle lacune è stato introdotto un emendamento allo standard 802.11 detto 802.11i, che definisce la sicurezza del protocollo 802.11

[IMMAGINE]

Servizi offerti:

- access control: impone l'utilizzo dei protocolli di sicurezza e assiste lo scambio di chiavi
- authentication: definisce lo scambio tra utente e authentication server e genera le chiavi temporanee per la comunicazione
- privacy with message integrity: il payload MAC cifrati con aggiunta di un messaggio per il controllo dell'integrità

[IMMAGINE]

Abbiamo fasi:

- discovery: no cifratura, tramite beacon AP annuncia la sua presenza, STA ascolta e capisce quali servizi può usare leggendo dal beacon, associazione con accordo su che sicurezza utilizzare (anche negata se non si rispettano certi livelli);
- authentication e gestione chiavi: AS può essere anche nell'AP (ora sono collassate assieme, Eduroam no, gay), STA richiede ad AP l'autenticazione, che passa tramite un AS (esterno o meno), generazione delle chiavi in modo sicuro (master key, usata per generare tutte le altre che sono richieste in seguito). Come facciamo:
  - ▶ abbiamo la chiave di sessione e la chiave broadcast (usata per comunicare con tutti, non sto a cifrare ogni volta diverso, uso una chiave di gruppo)
  - ▶ generiamo nonce (number once, una sola volta)
  - ▶ cinque componenti (due numeri, mac address, master key che è psw wifi o generata da quella), generata dal client, che poi passa nonce all'AP
  - ▶ mando chiave di gruppo cifrando con quella di sessione, mando ack
- protezione dati: ho due alternative:
  - ▶ TKIP (WPA): integrità aggiunge un codice a 64 bit usando MAC dst e src, la confidenzialità si ha con RC4 e i cambiamenti sono solo software rispetto a WEP
  - ▶ CCMP (WPA-2): integrità fatta con cifratura cipher-block-chaining, confidenzialità con AES 128-bit per integrità e confidenzialità, nuova implementazione hardware

Il MIC è message integrity check

## 12.2. Eduroam

SSID eduroam, ha privacy con WPA2 enterprise, fase1 di autenticazione è PEAP mentre fase2 è MSCHAPv2, le credenziali sono pazze e si ha un certificato CA con la sua chiave pubblica

WPS al posto di mettere la password andiamo a usare un PIN (vedi slide nuove)

## 12.3. Ultimi WiFi

Con 802.11e si ha EDCA (Enhances Distributed Channel Access) parte con contesa, viene migliorata perché avevamo SIFS DIFS PIFS (e simili), ora per decidere le qualità di servizio si hanno dei parametri di accesso al canale:

- CWmin: congestion window minima, minima dimensione
- CWmax: congestion windows massima, massima dimensione
- AIFSN: numero di SIFS + N slot time (tempo di attesa, ma mai sotto il tempo di un AP)
- Max TXOP: massimo tempo nel quale una stazione può trasmettere più frame senza rilasciare il canale, per quanto tempo tengo il comando

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49



<b>16. Lezione 16 [16/04]</b>	<b>52</b>
16.1. Operazioni	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b>	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE]	55
17.1.1. Moduli	55
17.1.2. E-UTRAN	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b>	<b>57</b>
18.1. Control plane	57
18.2. User plane	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b>	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b>	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b>	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b>	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b>	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b>	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare	72
24.2. NTN	73

### 13. Lezione 13 [08/04]

802.11p è una soluzione ad-hoc per il wifi veicolare, usando banda unlicensed. Soluzione per:

- rete super dinamica
- supporto alla guida autonoma (sensori, alert scambiati tra veicoli)
- associazione veloce
- no access point
- supporto per servizi critici (collisione, pedaggi, servizi a bordo strada) a varie latenze
- supporto infotainment

DSRC dedicated short-range communications

Si ha uno standard apposta, WAVE [Wireless Access for Vehicular Environment], che hanno una serie di servizi che non usano indirizzamento IP e altro e hanno uno stack a parte, specifici per questo

Su MAC si usa 802.11e con le varie priorità, messaggi di controllo (veicolare) o messaggi di servizio che vanno ovunque

Inoltre, non abbiamo RTS e CTS pagando il terminale nascosto, di solito si ridonda lo stato più volte

#### 13.1. AODV

Ci muoviamo a livello di rete, vediamo Ad Hoc Distance Vector, protocollo di routing, deve creare e riempire le tabelle di instradamento

Pensato per una rete senza infrastruttura in cui ogni nodo è anche un router, ovvero può fare instradamento. Non abbiamo un concetto di porta ma si deve mandare pacchetto da src a dst. Cerchi sono raggi di copertura radio dei nodi, se non è ampio da arrivare alla destinazione si fa instradamento.

Qui abbiamo raggio di copertura variabile, nodi mobili (liberi) e possono essere attivi/spenti, come facciamo a gestirlo?

Prima domanda: approccio stateful o stateless? La tabella di routing non è statica, perché cambia in continuazione, quindi devo tenere qualcosa dentro da aggiornare

Se per un po' non ricevo faccio decadere le info, inoltre se non mi richiedono un certo percorso non sto a tenere, se si creo

Obiettivi:

- gestione della dinamica della rete ad hoc
- auto inizializzante (non servono rotte preconfigurate)
- loop-free (non si ha counting-to-infinity)
- ottenimento di una rotta per una nuova destinazione in tempi rapidi
- risposta rapida alla rottura dei link e al cambio di topologia

Funzionalità:

- scoprire e costruire i percorsi per le nuove destinazioni
- mantenere i percorsi in soft-state (tengo per un tot)
- riconoscimento di errori e cancellazione di percorsi

Protocollo per creare tabelle di routing a livello rete, si usa la porta 654 con UDP, ma che modifica informazioni a livello di rete

Nodo ORIG è originator (da RFC, come se fosse sorgente). I dati vengono inviati su percorsi simmetrici: se per fare ORIG  $\rightarrow$  DST passiamo per  $n_1, \dots, n_k$  lo facciamo anche al ritorno. Inoltre, ogni nodo tiene le tabelle di routing per quel percorso

Percorsi costruiti con il messaggio di Ruote REQuest (RREQ) inviato in broadcast controllato (no loop). I nodi inoltrano RREQ e tengono traccia da dove proviene la richiesta. La destinazione risponde unicast con una Rute REPLY (RREP)

Altro messaggio è RERR (Route ERROR) che viene mandato ai vicini che utilizzano lui per andare verso certi percorsi

Ogni nodo mantiene una tabella delle destinazioni conosciute e l'indicazione del prossimo hop lungo il percorso:

- IP destinazione
- sequence number della destinazione
- flag di validità del sequence number della destinazione
- stato del percorso (valido/invalido/altro)
- interfaccia di rete
- hop count (numero di hop per raggiungerlo)
- lista dei precursori (vicini che utilizzano questo nodo per raggiungere la destinazione)
- lifetime della entry (tempo di scadenza)

Sequence number: ogni entry della tabella di routing possiede un sequence number che codifica l'informazione circa la freschezza della entry, Incrementato in due casi:

- se nodo inizia una ricerca di percorso aumento di 1 per prevenire conflitti con i percorsi invernati stabiliti da RREQ prima
- se nodo risponde (DST) ad una richiesta RREP, aumento di 1 solo in alcuni casi

Il nodo corrente è l'unico che aumenta il sequence number, solo lui è responsabile della freschezza

Gli altri nodi possono solo aggiornare il sequence number di una entry se:

- è il nodo stesso e offre un nuovo percorso per se stesso
- il nodo riceve informazioni più aggiornate per una destinazione
- il percorso verso quella destinazione è scaduto/interrotto

Confronto i SN per capire chi è più aggiornato: metti regola

Formato delle RREQ

[IMMAGINE]

Campi:

- type = 1
- G = gratuitous RREP flag, dice ad un nodo intermedio di costruire un percorso reverse con l'origine, oltre a rispondere
- D = destination only flag, se 1 io accetto delle risposte solo dalla destinazione
- U = unknown sequence number flag, se 1 non conosco il SN della destinazione
- hop count: numero di hop attuali (inizio 0) che questa richiesta ha fatto
- RREQ ID: ID della richiesta, se già visto non inoltro, aumentato ad ogni nuova RREQ
- destination IP address + destination SN: per chi stiamo costruendo + cosa conosco per ora
- originator IP address + originator SN: SN più fresco per questa richiesta, ++ ad ogni RREQ

Quando faccio una RREQ: mandata se non conosco DST o la entry è scaduta:

- prima di inviare faccio RREQID++ e SN++
- se DST è sconosciuta faccio U=1
- tengo una copia di <origineIP,RREQID> per un tempo PATH\_DISCOVERY\_TIME per evitare il riprocessamento della richiesta che sta circolando

Usiamo expanding ring search

Possiamo dire di propagare la RREQ fino ad un certo punto: usiamo il campo TTL di IP per impostare il max hop che la RREQ può fare.

Impostiamo un timer all'invio con una TTL\_START, magari la DST è vicina. Se non mi torna allora a TTL\_START non ho niente (chi riceve a TTL 0 non inoltra)

Incrementiamo, quindi facciamo TTL\_INCREMENT fino a NET\_DIAMETER (massimo valore di TTL possibile)

Ecco perché expanding: parto normale, poi mano a mano aumento l'anello

Se invece ho già un percorso, ma scaduta o interrotta, faccio ripartire la ricerca con il vecchio numero di hop, magari sono ancora lì, altrimenti inizio ad aumentare

Abbiamo anche la retry policy: posso riprovare le RREQ se il primo tentativo non va, bla bla bla

Cosa succede se ricevo un RREQ:

- controllo il dizionario di prima, se uguale entro il PATH\_DISCOVERY\_TIME scarto
- aggiorno il percorso reverse (quello verso originator):
  - ▶ quando ricevo RREQ so che dal nodo che me l'ha mandato posso arrivare all'origine
  - ▶ confronto il SN dell'origin e il SN che ho in tabella, se è maggiore aggiorno (se non ho entry la butto dentro)
  - ▶ entry diventa valida

- ▶ aggiorno/aggiungo la entry impostando come next hop verso orig il nodo da cui mi è arrivata la RREQ
- ▶ io so che da dove ho ricevuto la richiesta ho un certo numero di HOP, messo nel pacchetto, quindi lo metto come hop count nella entry

## 14. Lezione 14 [09/04]

Se un nodo intermedio non può rispondere con RREP (flag destination only) allora deve inoltrare RREQ ai vicini:

- incrementa hop count di 1
- pongo il DST SN come il massimo tra quello che ho e quello che ho nella routing table
- mando broadcast 255.255.255.255

[ESEMPIO]

Se avessi link tra A e E cosa si salva  $D$ ? Si tiene la prima, visto che abbiamo anche la request ID

Ora  $H$  se vuole comunicare con  $A$  ha il percorso fatto

La route reply RREP ha:

- type = 2
- flag  $A$  di ack richiesto in risposta a RREP per prevenire link non affidabile / unidirezionale
- prefix size utilizzato per la subnet
- hop count
- destination IP address (chi fa la reply)
- destination sequence number
- originator IP address (chi ha fatto al RREQ)
- lifetime (determinato da chi ha fatto la RREP) in millisecondi di validità

Chi può generare una RREP?

Ovviamente la destinazione:

- incremento il SN
- hop a 0
- aggiorna la lista dei precursori (aggiorno le mie entry)
- metto lifetime MY\_ROUTE\_TIMEOUT (default 6 secondi)
- invio la RREP lungo il reverse unicast (non con indirizzo originator, ma di quello che uso per raggiungere originator)
- droppo la RREQ (se mi arriva una nuova RREQ ma che ha stesso ID e stessa persone bro non ti ascolto)

Ma anche un nodo intermedio. Sotto quali condizioni (and):

- entry con un percorso valido, ovvero non deve essere invalidato
- flag  $D$  a zero, posso rispondere
- DST SN della entry è  $\geq$  DST SN della RREQ, quello che ho io è più nuovo di quello che richiede il bro

Allora:

- hop count della entry
- aggiorno la lista dei precursori
- lifetime della entry
- invio RREP in reverse
- droppo la RREQ
- se flag  $G$  1 allora invio RREP anche alla destinazione

Se un nodo riceve la RREP:

- aggiorno la entry nella tabella se:
  - ▶ entry non valida
  - ▶ DST SN della RREP maggiore di quello che ho nella entry

- ▶ numero di hop minore rispetto a quello della entry
- aggiorna:
  - ▶ entry valida
  - ▶ next hop nodo da cui arriva la RREP
  - ▶ aggiornamento hop count nella RREP di uno
  - ▶ aggiornamento lifetime
  - ▶ aggiornamento precursori

[ESEMPIO]

Se avessi anche il flag gratuitous: è una scelta dell'originator, se si riceve una RREQ con questo flag a uno il nodo deve occuparsi di costruire il rimanente percorso verso la destinazione della RREQ

Vengono quindi inviate due RREP indipendenti:

- verso il nodo originator
- verso la destinazione della RREQ, come se lei mi avesse fatto una RREP:
  - ▶ hop count uguale alla entry verso origine RREQ
  - ▶ altro

[ESEMPIO]

Quelli sul percorso gratuitous scoprono come arrivare all'originator

Precursori sono quelli che mi usano per arrivare alla destinazione dell'entry

Ogni nodo può indicare informazioni circa la propria connettività inviando periodicamente in broadcast degli «hello message» ai propri vicini

Questo ha un TTL = 1 in broadcast per conoscere il vicinato:

- DST IP è IP del nodo stesso
- DST SN è SN del nodo stesso
- hop count 0
- lifetime è  $\text{ALLOWED\_HELLO\_LOSS} * \text{HELLO\_INTERVAL}$

I vicini che ricevono hello message estendono o creano la entry per il nodo

È compito dei singoli nodi di tenere traccia della connettività con i nodi che sono indicati come next hop nella entry della tabella di routing. Abbiamo diversi meccanismi:

- livello data-link si invia il pacchetto RTS/CTS/ACK, in caso di mancanza di CTS/ACK o fallimento di invio dopo max ritrasmissioni
- livello di rete, con ricezione di qualsiasi pacchetto dal next hop, RREQ con destinazione il next hop o ICMP echo unicast per il next hop

Che fare se il percorso è interrotto/scaduto e fa parte di un percorso attivo:

- invalida i percorsi esistenti
- identifica le destinazioni per le quali viene usato come next hop
- determinare quali vicini possono essere affetti da questo problema, e li troviamo nella lista dei precursori
- inviamo a questi vicini un Route ERRor (RERR)

Formato:

- tipo = 3
- flag N indica alla destinazione della RERR di non eliminare la entry perché il percorso è stato riparato localmente da chi ha mandato la RERR

- dest count quante coppie di IP + SN che non si riescono più a raggiungere
- posso aggiungere tante coppie IP + SN che sono extra e che non sono raggiungibili (32 bit quindi IPv4)

## 15. Lezione 15 [15/04]

### 15.1. Ultima parte AODV

Un nodo che vede un link rotto deve capire:

- che percorsi invalido
- che destinazione viene raggiunta con il link interrotto
- bla
- bla bla bla

Abbiamo visto il formato, riguarda lezione prima

I messaggi di controllo cerchiamo di mandarli il meno possibile. Quando inviamo/inoltriamo il messaggio di RERR:

- viene identificato un link interrotto quando il nodo deve inoltrare pacchetti DATA lungo quel link
- se riceviamo un pacchetto DATA per una destinazione per cui non si possiede una entry
- se riceviamo un pacchetto RERR da un vicino per una o più dei percorsi arrivi (li troviamo in RERR)

Possiamo inviare broadcast o unicast ai vicini (lista di predecessori)

Quando un nodo riceve un RERR processa e poi inoltriamo eventualmente. Cosa facciamo:

- invalidiamo le entry delle destinazioni indicate in RERR
- ogni entry che viene invalidata viene preservata per un tempo DELETE\_PERIOD per la local repair, che vediamo tra poco
- inoltra RERR ai predecessori (con TTL=1, come hello message, pensati per essere mandati ai vicini e basta)

**Local repair:** se un nodo riceve un pacchetto per una destinazione lungo un percorso interrotto e la destinazione non è troppo lontana (ovvero  $\text{MAX\_REPAIR\_TTL} = 0.3 \text{ NET\_DIAMETER}$ ) allora il nodo prova a riparare il percorso per quella destinazione. Se altre destinazioni non sono raggiungibili tramite lo stesso link, la riparazione avviene solo se arrivano pacchetti (riparazione reattiva non proattiva, riparo solo se serve, se vengo utilizzato come bro per passare a quella roba)

Il nodo invia un RREQ con un TTL impostato in modo da non raggiungere la sorgente (dei pacchetti DATI), e lo facciamo guardando l'hop count della entry verso la sorgente

Se la procedura fallisce allora mando RRER

Se trovo alternativo aggiorno la mia entry. Se più lungo del precedente il nodo invia un messaggio RERR con flag N a 1. La sorgente deciderà autonomamente se procedere con una nuova RREQ

Cosa succede se un nodo fa reboot (spegne e riaccende o si accende e basta)? Caso particolare, dopo un reboot posso avere info vecchie sullo stato della rete

Chi è stato riattivato rispetta tre regole:

- aspetta un tempo DELETE\_PERIOD prima di fare RREQ (ascolta e basta)
- durante questo period non inoltra alcun messaggio
- se riceve dei pacchetti data per altre destinazioni solleva RRER, perché non conosce niente

Fa solo hello message, altrimenti nessuno sa che esiste, però non inoltra niente e non manda niente



Condensato in zitto e ascolta

## 15.2. Rete cellulare

Cambiamo paradigma, architettura molto centralizzata

Pre-cellulare: prima degli anni “80 esisteva un servizio di telefonia mobile, con trasmettitori e ricevitori ad elevate potenza, su 25 canali (multiplex) con raggio di copertura di 80km. Quindi in 80km parlavano 25 persone al massimo lol

Capacità insufficiente per fornire un servizio voce comparabile con i servizi di telefonia fissi

Rete cellulare: utilizzo di molteplici trasmettitori con una potenza  $< 100W$  (ma anche molto meno ora, più celle mettiamo meno potenza serve)

Meno potenza, minore raggio di copertura: l'area geografica viene divisa in celle ognuna con una propria antenna (o più)

Ogni cella è servita da una base station (BS), fa da:

- trasmettitore
- ricevitore
- unità di controllo

Dittatura della BS, versione più estrema di MS in blueT

Garantire la continuità tra le celle

Può operare licensed (operatori possiedono delle BS che pagano licenze di utilizzo di alcune frequenze) o unlicensed spectrum (quello spettro senza pagare)

Obiettivi principali: gestione automatica della mobilità degli utenti e continuità

Anni:

- 1980 abbiamo 1G Advanced Mobile Phone Service (AMPS), voce analogica in mobilità
- 1990 abbiamo 2G Global System for Mobile Communications (GSM), voce digitale, prima versione globale, potevamo muoverci ovunque
- 2000 abbiamo 3G Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), servizi internet, certa qualità di servizio
- 2010 abbiamo 4G Long Term Evolution (LTE), convergenza IP e aumento delle prestazioni
- 2020 abbiamo 5G, Network softwarization and virtualization, slicing e bassa latenza
- 2030 release commerciare si ha network intelligence con AI nella rete

Non si ha retroconnettività tra major release

[IMMAGINE BS]

Abbiamo antenna e la testa della parte radio, poi abbiamo BTS (Base Transceiver Station), con connessione FTTT (fibra ottica)

La rete cellulare è divisa in celle, dobbiamo capire come organizzarle geometricamente. Dobbiamo coprire bene l'area e avere delle aree uniformi. La più uniforme è esagonale, rispetto ad una quadrata, simile ad un cerchio rispetto al quadrato (ideale)

Altro vincolo/problema: celle vicine con stessa banda di frequenza

Se tutte le celle usano la stessa frequenza, per chi è dentro ok, per chi è sui bordi sente multiple trasmissioni

Soluzioni:

- usiamo canali diversi, ovvero uso bande di frequenze diverse tra celle vicine, quindi devo avere più bande (licensed spectrum sium \$\$\$), usata da 2G questa soluzione
- usiamo CDMA, tutti stessa frequenza ma usiamo codifiche per evitare interferenze, 3G lo usa
- 4g e 5g hanno variante della prima, usiamo bande di frequenze diverse tra celle vicine solo sui bordi, interno uso molta più banda, ottima e precisa localizzazione della cella, se sbaglio trasmetto sovrapposto

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b> .....	<b>52</b>
16.1. Operazioni .....	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b> .....	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE] .....	55
17.1.1. Moduli .....	55
17.1.2. E-UTRAN .....	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b> .....	<b>57</b>
18.1. Control plane .....	57
18.2. User plane .....	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b> .....	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b> .....	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b> .....	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b> .....	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b> .....	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b> .....	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare .....	72
24.2. NTN .....	73

## 16. Lezione 16 [16/04]

Come aumentare la capacità per migliorare la scalabilità:

- aggiungere più canali e spettro
- prestito di frequenze dalle celle vicine, garantendo la gestione dinamica dell'assegnazione delle frequenze
- suddivisione in più celle densificando in aree con elevato traffico; un maggior traffico di controllo è richiesto per gestire gli utenti, con frequenti handoff (cambi di cella)

Il cell sectoring aumenta le antenne, passando da omnidirezionale a direzionale

Struttura è divisa in due:

- rete RAN
- rete core

Tutte le operazioni della rete cellulare sono automatiche e non richiedono interventi da parte dell'utente

Abbiamo due tipi di canali che trasportando due tipologie di traffico:

- canali di controllo, informazione per gestione delle operazioni, control plane
- canali di traffico, voce e dati, traffico dei servizio offerti all'utente, data plane

La divisione tra control e data plane è **esplicita**, divisione anche logica a livello della rete

### 16.1. Operazioni

Fase di inizializzazione e monitoraggio segnale

Il dispositivo utente monitora i segnali delle celle per identificare quella migliore. Periodicamente ogni BS invia dei pilot che permettono al dispositivo di determinare la qualità del segnale di quella cella

Un dispositivo utente può iniziare una comunicazione:

1. disponibilità di canali radio con la BS
2. traffico di controllo per iniziare la comunicazione con MTSO
3. creazione dei «collegamenti» su data plane

MTSO non conosce sempre la posizione del dispositivo, ovvero la cella a cui è associato, perché potrebbe essere in idle (risparmio batteria e rilascio delle risorse per altri utenti): MTSO quindi contatta le BS delle celle per trovare il dispositivo. Questo è detto **paging**

Il dispositivo destinatario accetta la chiamata e MTSO crea un circuito (fino a 3G, da 4G c'è VoIP). Le BS impostano i canali radio data plane. Durante una chiamata i due dispositivi si scambiano informazioni attraverso le BS a cui sono collegate e MTSO

I dispositivi però possono muoversi al di fuori del raggio della cella nella quale hanno iniziato la comunicazione. Qua avviene handoff:

- decisione di nuova associazione
- gestione della nuova associazione
- riconfigurazione dei percorsi di comunicazione

Questo è **automatico** e senza interruzione della comunicazione (stando nei limiti della tecnologia)

Abbiamo anche altre operazioni:

- blocco della chiamata in caso di BS sovraccarica
- terminazione della chiamata
- interruzione della chiamata a causa di qualità segnale bassa
- gestione di chiamate tra rete fissa e mobile
- chiamate di emergenza

La rete cellulare vive in un contesto molto più dinamico e imprevedibile degli altri scenari wireless

Dobbiamo avere potenza del segnale:

- sufficiente per offrire un buon segnale
- non troppo per non creare interferenza
- variabile per via degli ostacoli (fissi e mobili)

Abbiamo anche fading (attenuazione del segnale):

- frequenza
- tipo di ambiente

Abbiamo la trasmissione radio line of sight (LOS). Il path loss è l'attenuazione del segnale radio in funzione della distanza tra trasmettitore e ricevitore, ed è

$$\frac{P_t}{P_r} = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 d^n = \left( \frac{4\pi f}{c} \right)^2 d^n$$

Vediamo che è direttamente proporzionale alla frequenza (quadrato), direttamente proporzionale ad una potenza della distanza e  $n$  dipende dall'ambiente

Gli operatori di rete mobile pianificano l'installazione delle BS per ottimizzare la rete. Operazione chiamata network planning

Bla bla bla

La procedura di handoff/handover consente di cambiare la BS a cui è associato. La procedura può essere decisa

- solo dalla rete (misurazione del segnale ricevuto dal dispositivo uplink)
- anche dal dispositivo (dispositivo da un feedback del downlink che riceve)

Ci sono diverse metriche per prendere una decisione:

- call blocking probability
- call dropping probability
- ...

[IMMAGINE]

Come decidiamo a quale BS mi devo collegare? Parametro principale è la potenza del segnale ricevuta a livello di BS

Mi associo alla BS che ha il migliore segnale

Se sono in  $L_1$  devo decidere, posso avere effetti ping-pong

Allora cambio se sono sotto soglia (il segnale non mi va più bene, ma se mi va bene perché cambiarlo lol) e ho un segnale migliore di prima, ma le soglie vanno definite con cura e dipendono da diverse condizioni di contesto

Ho comunque limiti: usiamo potenza relativi + isteresi. Ci basiamo sulla curva del segnale con un margine  $H$ : se sono maggiore cambio e risolvo il ping pong (RIVEDI BENE)

Ma ho ancora problema: il segnale di A può essere ancora buono

Uso isteresi e soglie, quindi mi baso sulla curva  $H$  e con una soglia, quindi:

- A sotto soglia
- $B > A$  con  $H$

Abbiamo:

- hard handoff: solo una BS alla volta, cambio immediato, handoff veloci
- soft: entrambe le BS, rilascio quando un segnale è dominante, richiede più risorse

La gestione del duplex, con canali uplink e downlink, ha due modalità:

- FDD frequency division duplex che usa frequenze diverse per UL e DL, minore delay ma maggiori risorse per lo spettro
- TDD time division duplex, uso una sola frequenza per UL e DL, meno costi ma maggiore ritardo perché devo aspettare

## 17. Lezione 17 [22/04]

### 17.1. 4G [LTE]

Release 8, 4G LTE Long Term Evolution

In 4G un solo nodeB per volta perché collassano controllore e BS

La rete core viene divisa anche a livello architetturale

[DIFFERENZE]

Separazione anche di architettura di control e data plane

#### 17.1.1. Moduli

Core network MME

Nodo di controllo responsabile del traffico di segnalazione tra CN e UE attraverso i protocolli NAS (no dati utente, solo controllo)

Core network HSS

Contiene le informazioni dell'utente (profili QoS ammessi, restrizioni roaming, ...)

Core network PGW

Fa da border routing, nodo a bordo della rete dell'operatore mobile

Core network SGW

Unico vero modulo che fa solo user plane no data plane, gestisce traffico user-plane

Core network PCRF

Controlla autorizzazioni per singolo flusso

E-UTRAN E-NodeB

Nodo che fornisce connettività radio ad UE e lo collega alla rete core

#### 17.1.2. E-UTRAN

Modulazione e codifica di trasmissione con QPSK

Prima facciamo QPSK, poi moduliamo con una frequenza intermedia, che permette di variare la portante

BPSK anche se canale pessimo, segnali a basso livello

4 bit per la quantizzazione (0 a 15), riguarda solo data plane, il control ha la sua codifica fissa

La durata di un simbolo è

$$T_s = \frac{1}{2048 \cdot 15000} s = 32.6 \text{ ns}$$

dove 2048 sono i punti della FFT e 15000 è la distanza tra le sottobande

Questa è la minima unità temporale usata dal processore del livello fisico

I simboli sono organizzati in slot da 0.5 ms

Abbiamo un mini prefisso, in uno slot ho 7 simboli o 6 (se extended). Se raggio limitato si usa 7, se raggio alto potrei avere multipath allora uso un prefisso maggiore

Il duplex ha due modi scelti durante la configurazione e detti dalla BS:

- FDD frequenze diverse
- TDD stessa frequenza

Nel caso di FDD si usano frame di 10ms. Ogni 10ms ricalcola l'allocazione delle risorse. Ad ogni utente si danno sub-frame di 1ms. Quindi ho 20 slot

140 o 120 simboli per frame in base al prefisso

Se invece TDD abbiamo 7 configurazioni standard, comunicate in fase di annuncio della BS. Dicono come sono organizzati i frame

Un frame particolare è il special sub-frame, tra fase di DL e UP, perché abbiamo concetto di uplink time advance: riservata una parte per permettere di anticipare uplink

UE inizia a trasmettere in anticipo rispetto al tempo del frame della BS. Dobbiamo avere slot precisi perché la BS deve leggere tutto assieme

Partono tutti assieme, ma alla ricezione quello vicino si sfasa di un pelino e mangia parte del prefisso, mentre quello lontano va ben oltre

Ai dispositivi più lontani diamo un tempo di Uplink Timing Advance: quando BS autorizza a parlare dice anche di quanto anticipare il clock per non sfiorare il ritardo

Le sottobande sono organizzate in resource block, minima quantità di risorse allocabili ad un singolo dispositivo

Unità minima è 180kHz perché ho 12 sottobande da 15kHz



## 18. Lezione 18 [23/04]

La parte più complicata è la rete radio

In LTE abbiamo anche connessione diretta tra le BS, oltre a BS-MME, compiti locali tra le BS

Le BS vengono raggruppate in tracking area (location area), cluster, a ciascuno associamo gruppi di moduli di controllo

Interfaccia X2 aggiunta perché:

- gestisce localmente l'handover
- funzionalità di load balancing e gestione delle interferenze
- mantenimento dello storico delle ultime celle visitate per gestire l'effetto ping pong

### 18.1. Control plane

Tre moduli coinvolti (anche i due sopra a destra ma poco, non ci interessa)

BS è dual-stack:

- parla radio con UE
- parla TCP/IP con MME

Parte sinistra dello stack:

- RRC gestisce paging, mobilità (deciso handover) e garantisce QoS e raccoglie le misurazioni UE
- PDCP è convergenza tra IP e wireless e comprime gli header
- RLC gestisce i link radio (livello 2) che fa correzione errori, gestione ritrasmissione (rende livello 2 affidabile), segmentazione e riassemblaggio dei pacchetti dei livelli superiori
- infine MAC, gestione dello scheduler e dell'accesso al canale radio

Perché SCTP:

- TCP ha solo trasporto affidabile e in ordine (consegna solo affidabile?, ordine parziale?)
- head of line blocking problem
- TCP è stream oriented, marker messo dalle applicazioni per delimitare i messaggi
- supporto multi-homing mancante (percorsi alternativi)

HOL block problem

In TCP tra A e B tutto deve essere in ordine: non posso passare ai livelli applicazione se mi arrivano cose non in ordine

Il problema è questo: tutto il traffico da una BS verso MME viaggia su un solo flusso TCP (ci sono blocchi separati ma TCP lo vede come flusso unico)

[IMMAGINE]

Se perdo 3 pacchetti, perché TCP blocca lo stream di quelli dopo, anche se non c'entrano nulla con il primo dispositivo

Soluzione: SCTP. Si cambia protocollo, si usa uno stream ID di 16bit. Abbiamo ordine parziale perché posso mischiare i vari stream, però dentro lo stream ho ordine totale.

Abbiamo una quadrupla più complessa

### 18.2. User plane

GTP-U è GPRS Tunnelling Protocol in User Plane

EPS Bearer

Registrazione alla rete mi viene dato un default bearer

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b>	<b>52</b>
16.1. Operazioni	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b>	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE]	55
17.1.1. Moduli	55
17.1.2. E-UTRAN	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b>	<b>57</b>
18.1. Control plane	57
18.2. User plane	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b>	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b>	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b>	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b>	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b>	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b>	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare	72
24.2. NTN	73

## **19. Lezione 19 [29/04]**

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b>	<b>52</b>
16.1. Operazioni	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b>	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE]	55
17.1.1. Moduli	55
17.1.2. E-UTRAN	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b>	<b>57</b>
18.1. Control plane	57
18.2. User plane	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b>	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b>	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b>	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b>	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b>	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b>	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare	72
24.2. NTN	73

## 20. Lezione 20 [30/04]

SDN software defined networking

Prima avevamo una struttura di una rete distribuita che contiene control+data layer assieme e poi l'applicazione a livello di rete nell'app layer

SDN toglie dai dispositivi di rete la parte di controllo e la accentra in un controller chiamato SDN controller. Siamo a livello software, non hardware

Si ha conoscenza topologica globale della rete, cosa che prima gli switch non avevano (solo quella locale, se non per propagazione)

Ora si va verso la SDN con programmable data plane

Vantaggi delle SDN:

- flessibilità nella gestione della rete
- visione centralizzata: ottimizzazione del routing
- semplificazione della gestione a livello applicativo (OSS/BSS)
- testing e configurazione di nuovi protocolli di rete più semplici e veloci

Ci sono anche delle sfide da affrontare:

- controller sono single point of failure, sono il punto debole dell'architettura
- sicurezza: controllo il controller, controllo la rete
- reazione ai cambiamenti real-time
- ottimizzazione del numero di regole e delle risorse disponibili su un dispositivo di regole
  - ▶ ho tante regole, che continuano a crescere
  - ▶ gestione ottimizzata delle tabelle di forwarding
  - ▶ gestione e garanzia dell'isolamento di reti overlay
  - ▶ gestione della complessità

Per altra flessibilità ci serve NFV network function virtualization

Prima tutto era HW dedicato: si comprava la BBU, idem firewall, MME, bla bla bla

Prima potevo scalare solo verticalmente, quindi mettendo HW in più. Se si contrae il traffico rimango con il ferro in mano, che faccio?

Qui separiamo componente radio e software. Radio diventa standard, ha le caratteristiche di un rack datacenter e su questi ci installiamo istanze di servizi che vogliamo. Come se avessi una VM o un container su una macchina comune

Abbiamo dei template (tipo immagini Docker) che poi istanziamo dove serve

Architettura:

- infrastruttura sulla quale istanziamo le nostre cose, detta NFV infrastructure
  - ▶ abbiamo risorse HW
  - ▶ strato di virtualizzazione che mette a disposizione le risorse
  - ▶ risorse virtualizzate
- sopra mettiamo le nostre VNFs
- sopra ancora abbiamo element management systems (EMS) che fanno controlli di robe

Il virtual infrastructure manager conosce quante risorse abbiamo a disposizione. Poi c'è anche un gestore della rete, il VNF manager. Sopra tutto abbiamo l'orchestratore

Tutto questo ci permette:

- flessibilità e scalabilità, agilità della rete e dei servizi
- indipendenza tra HW e SW
- rapida prototipizzazione e introduzioni di nuovi servizi - operatore e utenti finali
- uso delle risorse ottimizzato e condiviso

Come prima, sfide:

- prestazioni devono essere comparabili con HW dedicato
  - ▶ accelerazioni HW
  - ▶ ingegnerizzazione delle VNF
  - ▶ tecniche di virtualizzazione con linux container
- gestione efficiente delle risorse
  - ▶ orchestratore
  - ▶ VNF manager
- sicurezza
- gestione della fase di transizione
  - ▶ HW network function a SW network function
  - ▶ coesistenza HW e SW network function
- gestione multi-tenant, ovvero più operatori di servizio usano e condividono risorse HW ma anche SW

[...]

Separiamo: dal livello MAC in su viene gestito da un virtual BBU POOL remoto (max 1km) che è staccato dall'eNodeB. Ma così abbiamo tutte le vBBU di tutte le tecnologie che vogliamo e lasciamo l'eNodeB staccato. Comodo perché possiamo duplicare se serve

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49



<b>16. Lezione 16 [16/04]</b>	<b>52</b>
16.1. Operazioni	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b>	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE]	55
17.1.1. Moduli	55
17.1.2. E-UTRAN	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b>	<b>57</b>
18.1. Control plane	57
18.2. User plane	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b>	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b>	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b>	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b>	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b>	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b>	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare	72
24.2. NTN	73

## **21. Lezione 21 [06/05]**

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b>	<b>52</b>
16.1. Operazioni	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b>	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE]	55
17.1.1. Moduli	55
17.1.2. E-UTRAN	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b>	<b>57</b>
18.1. Control plane	57
18.2. User plane	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b>	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b>	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b>	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b>	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b>	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b>	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare	72
24.2. NTN	73

## 22. Lezione 22 [07/05]

Due release prima della 16 siamo ancora in LTE ma abbiamo già una separazione tra controllo e user

Varie interfacce rimangono da user verso core e tra user. Quello che cambia è la comunicazione nella core network. Non abbiamo la punto-punto, ma abbiamo la service-based architecture: abbiamo delle API che vengono esposte, ognuna presente in tanti microservizi

Ogni modulo fa una cosa dando delle API, con un bus comune dove abbiamo produttori e consumatori di API

Ogni componente è una VNF che implementa un micro-servizio che espone delle API REST.

NRF (network repository function) permette di registrare servizi e renderli individuabili dalle altre network function

MME spezzato in tre;

- AMF (Access & Mobility Management Function) gestisce traffico di segnalazione per autenticazione, registrazione e mobilità (no controllo user plane, quindi no sessioni, no nuovi canali)
- SMF (Session Management Function) gestisce il traffico di controllo per la creazione di sessioni dati, dialoga con AMF per ricevere e inoltrare i messaggi di controllo. Comunica con UPF che è unico nodo core dello user-plane
- AUSF (Authentication Server Function) gestisce l'autenticazione e la generazione delle chiavi di cifratura

UDM (Unified Data Management Function) è il frontend dei database dei dati utenti

PCF (Policy Control Function) gestione e controllo delle politiche di accesso/mobilità in rete e di utilizzo dello user-plane

NSSF (Network Slice Selection Function) ci dice la slice migliore e consentita per un certo servizio richiesto, gestione della selezione della slice tra UE e quelle ammesse (UDM)

NEF (Network Exposure Function) e AF (Application Function) prima nella rete era ben visibile l'utente, in 5G per permettere di usare informazioni più fini possiamo esporre delle funzionalità e permette all'applicazione di rendersi visibile nella rete core

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b>	<b>52</b>
16.1. Operazioni	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b>	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE]	55
17.1.1. Moduli	55
17.1.2. E-UTRAN	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b>	<b>57</b>
18.1. Control plane	57
18.2. User plane	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b>	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b>	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b>	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b>	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b>	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b>	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare	72
24.2. NTN	73

## **23. Lezione 23**

Seminario

# Indice

<b>1. Lezione 01 [25/02]</b>	<b>4</b>
1.1. Principi di Teoria della Trasmissione	4
<b>2. Lezione 02 [26/02]</b>	<b>6</b>
2.1. Ancora basi di teoria della trasmissione	6
2.2. Multiplexing	7
2.3. Comunicazione wireless	7
<b>3. Lezione 03 [04/03]</b>	<b>9</b>
3.1. Codifica e trasmissione dei dati	9
<b>4. Lezione 04 [05/03]</b>	<b>12</b>
4.1. Esercizi	12
4.2. OFDM [Orthogonal Frequency Division Multiplexing]	12
4.3. Spread Spectrum	13
4.3.1. Frequency Hopping Spread Spectrum	13
4.3.2. Direct Sequence Spread Spectrum	13
<b>5. Lezione 05 [11/03]</b>	<b>15</b>
5.1. WPAN	15
5.1.1. Personal Area Network [bluetooth]	16
<b>6. Lezione 06 [12/03]</b>	<b>18</b>
<b>7. Lezione 07 [18/03]</b>	<b>20</b>
7.1. Ancora BT	20
<b>8. Lezione 08 [19/03]</b>	<b>24</b>
8.1. ZigBee + Matter & Thread	24
8.1.1. ZigBee	24
8.1.2. Matter & Thread	26
<b>9. Lezione 09 [25/03]</b>	<b>28</b>
9.1. WLAN	28
<b>10. Lezione 10 [26/03]</b>	<b>31</b>
10.1. Problema del terminale nascosto	31
10.2. Frammentazione	31
10.3. Infrastruttura	31
<b>11. Lezione 11 [01/04]</b>	<b>34</b>
<b>12. Lezione 12 [02/04]</b>	<b>38</b>
12.1. Sicurezza in WiFi	38
12.2. Eduroam	39
12.3. Ultimi WiFi	39
<b>13. Lezione 13 [08/04]</b>	<b>41</b>
13.1. AODV	41
<b>14. Lezione 14 [09/04]</b>	<b>45</b>
<b>15. Lezione 15 [15/04]</b>	<b>48</b>
15.1. Ultima parte AODV	48
15.2. Rete cellulare	49

<b>16. Lezione 16 [16/04]</b> .....	<b>52</b>
16.1. Operazioni .....	52
<b>17. Lezione 17 [22/04]</b> .....	<b>55</b>
17.1. 4G [LTE] .....	55
17.1.1. Moduli .....	55
17.1.2. E-UTRAN .....	55
<b>18. Lezione 18 [23/04]</b> .....	<b>57</b>
18.1. Control plane .....	57
18.2. User plane .....	57
<b>19. Lezione 19 [29/04]</b> .....	<b>60</b>
<b>20. Lezione 20 [30/04]</b> .....	<b>62</b>
<b>21. Lezione 21 [06/05]</b> .....	<b>65</b>
<b>22. Lezione 22 [07/05]</b> .....	<b>67</b>
<b>23. Lezione 23</b> .....	<b>70</b>
<b>24. Lezione 24 [14/05]</b> .....	<b>72</b>
24.1. Comunicazione satellitare .....	72
24.2. NTN .....	73

## **24. Lezione 24 [14/05]**

### **24.1. Comunicazione satellitare**

Piano orbitale è il cerchio sul quale si muove il satellite, ed è dato rispetto ad un angolo che dista dall'equatore

Geometrie di un link satellitare:

- angolo di azimuth  $\alpha$  orientamento rispetto al nord geografico, in senso orario mi dice dove devo orientare la stazione di terra per poter ricevere il segnale (dove mi devo girare)
- angolo di elevazione  $\varphi$  angolo rispetto all'orizzonte

Da questo deriviamo l'angolo di copertura, un angolo tridimensionale

Soprattutto nelle orbite Leo, il satellite va molto più veloce della terra. Se siamo sulla zenitale il satellite è sopra, distanza tra noi e il satellite minima, mentre massima quando abbiamo angolo di elevazione zero e il bro sta sparendo all'orizzonte

Questo implica che il mio delay di propagazione può variare moltissimo

Abbiamo elevato Jitter, ok predicibile, però varia molto durante la durata di connessione

Dobbiamo tenere conto anche di quanto perdiamo

- se sono praticamente raso ho effetto di assorbimento atmosferico, perché devo passarlo storto
- nebbia e pioggia assorbono, più lo attraversiamo più assorbiamo

Orbita GEO ha periodo 24h, visibilità permanente, angolo di elevazione fisso, elevata copertura, ma abbiamo qualità del segnale bassa per la distanza, ed elevato delay

Orbita LEO ha ridotto delay per orbita bassa, meno potenza di trasmissione e migliore utilizzo dello spettro, comunicazione ha handoff, garantisce la copertura 24/24h ma con tanti satelliti

Orbita MEO, ha minori handoff, ha tutti e due i pro e i contro



Non ci basta un solo satellite, le orbite LEO e MEO richiedono più satelliti per copertura continua e globale (o regionale)

Space segment ci sono i satelliti (e la costellazione), avendo anche comunicazione diretta tra satelliti (ottico anche, con laser)

Ground segment è la parte di controllo, con stazioni di terra e il gateway verso la rete

User segment sono sia fixed (parabole) oppure mobile, questi sono gli utilizzatori dei servizi

Come avviene la comunicazione satellitare: punto-punto passando dal satellite, copertura maggiore rispetto alla rete wireless terrestre, elevata banda, elevata potenza richiesta, delay elevato (i bro punto-punto non si vedono)

Molto comodo invece in broadcast[ing], perché copriamo area enorme e quindi possiamo mandare uno stesso messaggio a tantissimi ricevitori

Mesh tutti comunicano con tutti, ma ogni link passa tra satellite, non serve il gateway, non dobbiamo uscire dalla rete satellitare

Star non possiamo vedere il gateway quindi passiamo dal satellite

Mesh richiede un satellite che sappia fare routing

## **24.2. NTN**

Perché usare la rete satellitare con 5G e 6G?

Favorire il lancio di 5G e 6G in zone non densamente popolate, come aree rurali, aerei, navi; continuità di servizio; migliorare l'affidabilità della rete contro catastrofi naturali; aumentare la scalabilità della rete.