

# Codifica e Modulazione

Obiettivo di codifica e modulazione è ottenere segnali modulati di "buone proprietà", con particolare riferimento ai seguenti fattori di merito:

1. Efficienza spettrale, auspicabilmente più alta possibile;
2. Densità spettrale di potenza, più compatta possibile per limitare interferenza su altri canali;
3. Bit Error Rate (BER) garantita, auspicabilmente più piccola possibile (compatibilmente con le condizioni di propagazione, ovviamente)
4. Proprietà dell'involuppo complesso, tanto migliori quanto più la fase è continua e l'ampiezza costante (in modo da limitare effetti indesiderati dovuti alle non linearità degli amplificatori)

# Analogico vs. Digitale (1/2)

I sistemi digitali presentano alcuni vantaggi rispetto ai sistemi analogici a modulazione "tradizionale", ed in particolare:

❖ codifica di sorgente: elimina l'informazione ridondante, riducendo quindi l'occupazione di banda (spettro più compatto);

❖ codifica multilivello: associa al segnale binario un segnale a più valori, a ciascuno dei quali corrisponde una precisa sequenza di  $n$  bits  $\Rightarrow$  il segnale ottenuto ha una variazione temporale più lenta rispetto al segnale binario originario  $\Rightarrow$  spettro più compatto e migliore efficienza spettrale;

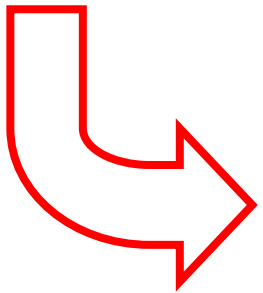
❖ codifica di canale: consente la rilevazione e/o la correzione di errori, con conseguente beneficio in termini di BER.

# Analogico vs. Digitale (2/2)

Occorre tuttavia osservare che la qualità di un collegamento digitale risulta estremamente sensibile alle caratteristiche della propagazione:

❖ sistemi analogici: il passaggio del rapporto segnale/disturbo al di sotto della soglia di qualità richiesta determina un lento degrado della qualità del servizio (*soft degradation*)

❖ sistema digitale: valori del rapporto segnale/disturbo inferiori alla soglia richiesta anche per pochi dB determinano la brusca interruzione del servizio (*hard degradation*).



Particolare criticità per i sistemi digitali a banda larga (banda del segnale > Banda di Coerenza del canale) e mobili (almeno uno dei due corrispondenti è libero di muoversi all'interno dell'area di servizio) poiché in tal caso la selettività del canale radio (in tempo e in frequenza) può avere un impatto assai gravoso sul valore del rapporto segnale/disturbo e quindi sulla qualità del collegamento.

# Digital Video Broadcasting (DVB)

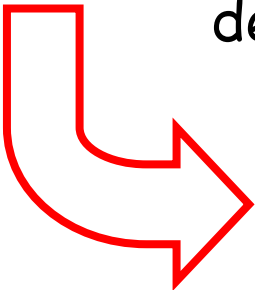
- ❖ Il termine **DVB** rappresenta un insieme di standard aperti ed ormai accettati a livello internazionale per lo sviluppo e la diffusione del servizio televisivo in modalità digitale;
- ❖ *European Telecommunications Standards Institute (ETSI), European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) ed European Broadcasting Union (EBU)*
- ❖ Sono previsti standard (e quindi sistemi) leggermente differenti a seconda della modalità di collegamento (mezzo trasmissivo):
  - a. *DVB-C / Cable* (ETSI EN 300 429)
  - b. *DVB-S / Satellite* (ETSI ETS 300 421)
  - c. *DVB-T - Terrestrial* (ETSI ETS 300 744)
    - *DVB-H / Handheld* (ETSI EN 302 304): simile al DVB-T con alcuni adattamenti per ridurre il consumo delle batterie e migliorare la ricezione da **terminali portatili e in movimento**

# DVB e OFDM

- ❖ Il *broadcasting* per mezzo di reti terrestri (DVB-T e DVB-H) non può escludere a priori che il radio-collegamento sia degradato da interferenza dovuta al *multipath*.

Tale eventualità:

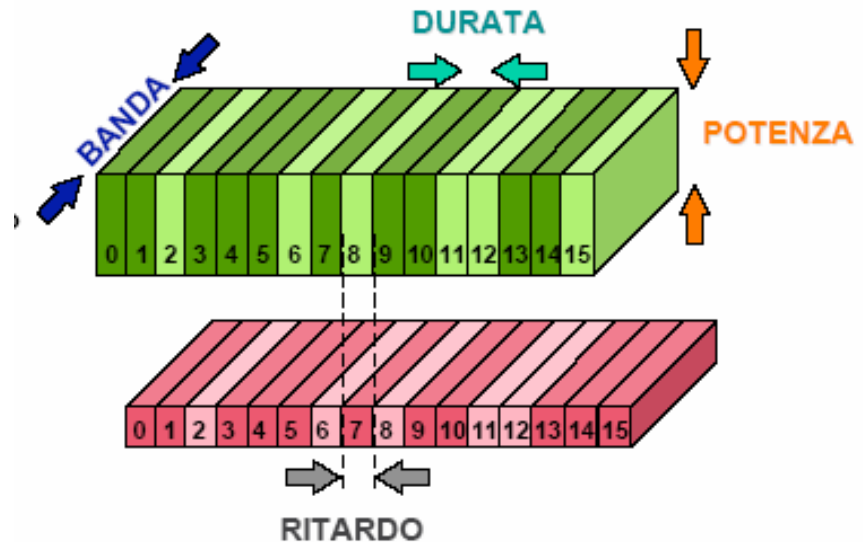
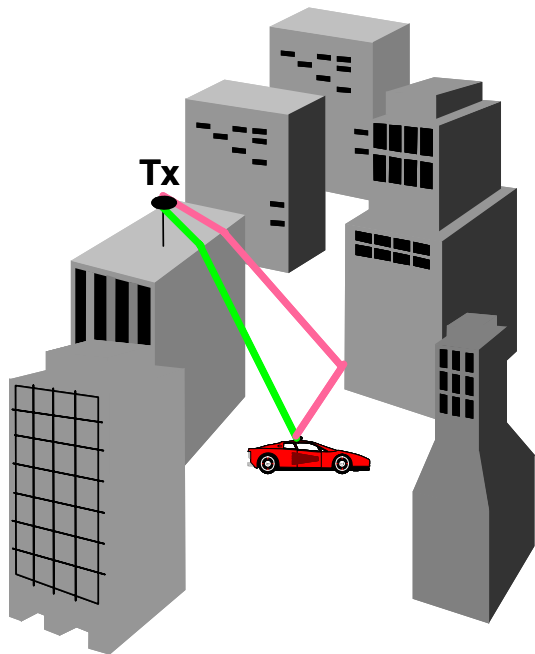
- è più probabile rispetto al *broadcasting* analogico se si considera che nel caso digitale viene espressamente prevista oltre alla ricezione "*rooftop*" tradizionale anche quella cosiddetta "*portable*" mediante dispositivi portatili che sono facilmente soggetti a condizioni NLoS e quindi a propagazione per cammini multipli (es. ricezione *portable indoor*);
- è più dannosa rispetto al *broadcasting* analogico in ragione della *hard degradation* delle prestazioni dei sistemi digitali



Per proteggere la comunicazione dalla possibile interferenza prodotta dai cammini multipli lo standard DVB (T/H) prevede l'adozione della modulazione OFDM

# OFDM - Cenni (1/3)

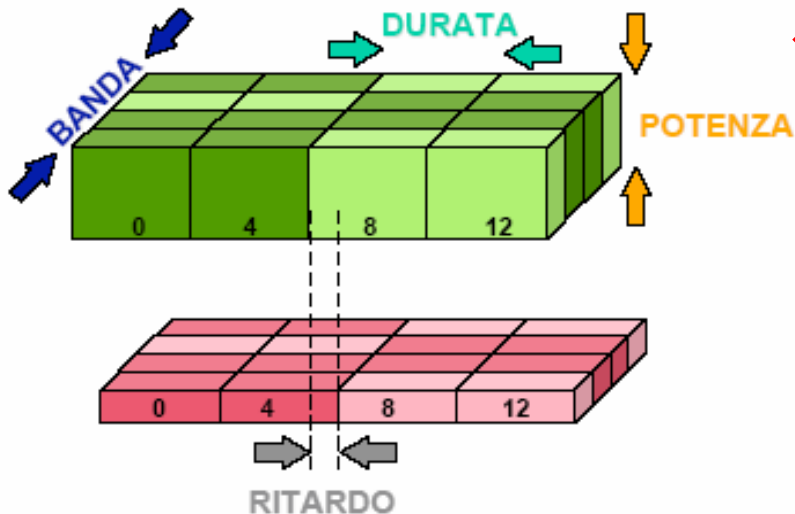
- ❖ Cammini multipli con diversi ritardi di propagazione  $\Rightarrow$  all'interno dello stesso tempo di simbolo  $T_s$  si ricevono dai differenti cammini simboli in generale diversi, la cui sovrapposizione genera interferenza (*interferenza inter-simbolo*);



- ❖ Considerando 2 soli cammini ed un ritardo relativo ( $\tau$ ) uguale al tempo di simbolo (per semplicità)  $\Rightarrow$  al simbolo "utile" si sovrappone un solo simbolo interferente

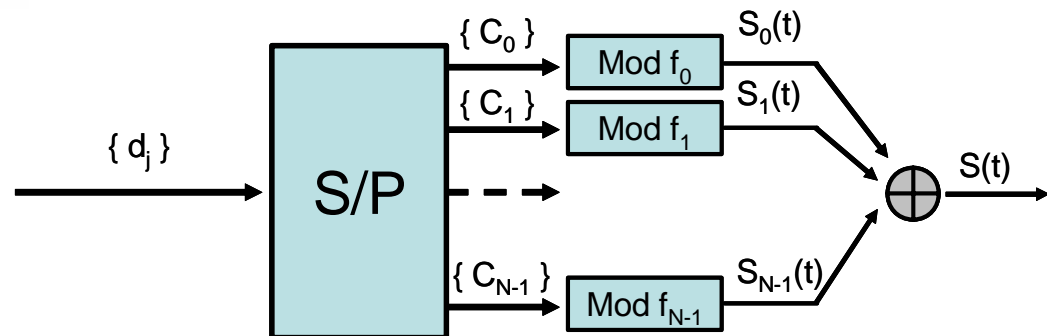
# OFDM - Cenni (2/3)

- ❖ Il problema viene fortemente mitigato se si "allarga" sensibilmente il tempo di simbolo fino a valori sensibilmente maggiori di  $\tau$ , in modo che la sovrapposizione fra i cammini coinvolga sempre lo stesso simbolo (salvo piccole discrepanze);



- ❖ Per aumentare il tempo di simbolo senza diminuire la quantità di informazione trasmessa nell'unità di tempo si può dividere il flusso dati ad alta frequenza in più flussi paralleli, ciascuno poi modulato da portanti diverse (sottoportanti)

- ❖ I segnali modulati alle diverse frequenze sottoportanti (equispaziate in banda con passo  $\Delta f$ ) vengono infine sommati ottenendo il **segnale modulato OFDM**



# OFDM - Cenni (3/3)

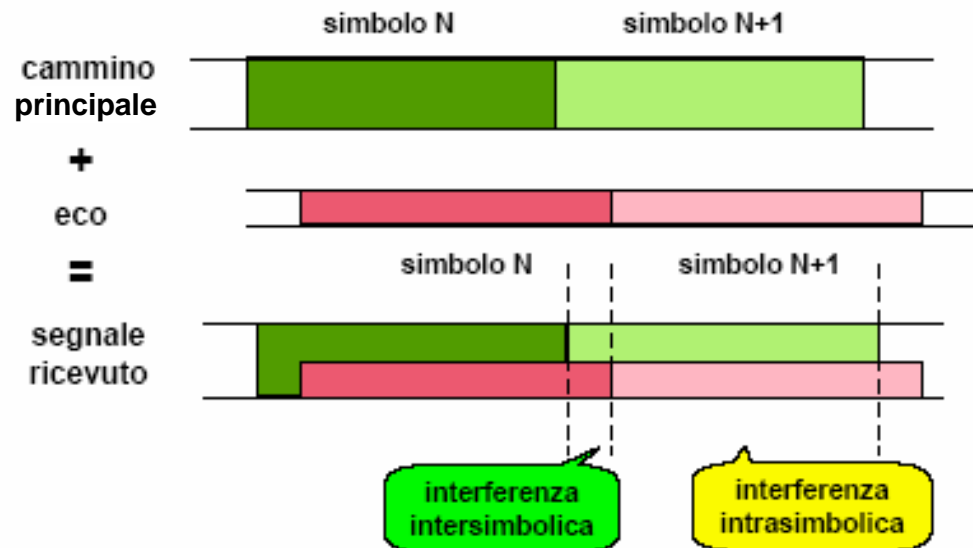
- ❖  $N$  = numero sottoportanti
- $R_b'$  = bit-rate sul singolo sottocanale
- $T_S'$  = tempo di simbolo del singolo sottocanale

$$R_b' = R_b / N$$

durata del simbolo OFDM;

$$T_S' = N T_S$$

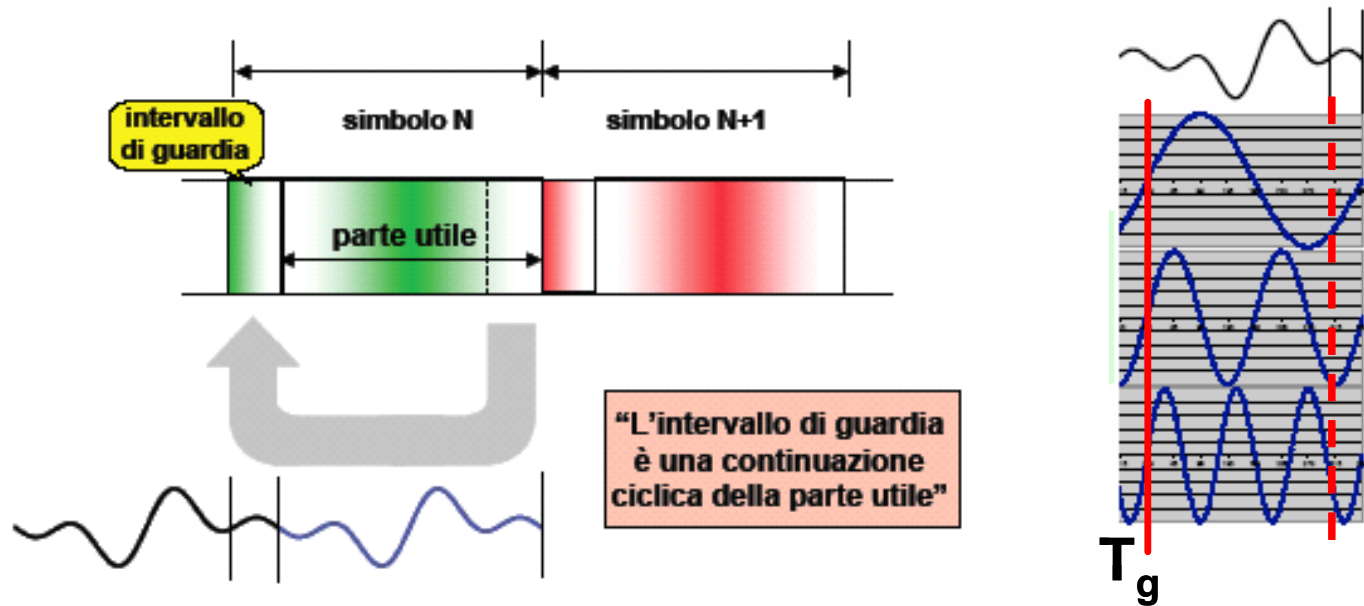
- ❖ Nonostante l'incremento del tempo di simbolo
  - *interferenza intersimbolica* viene limitata ma non eliminata;
  - la sovrapposizione fra simboli uguali non necessariamente porta ad una combinazione costruttiva dei segnali, poiché permane in ogni caso il ritardo relativo, e dunque uno sfasamento fra i segnali (*interferenza intra-simbolica*)





# OFDM - Guard Time (1/2)

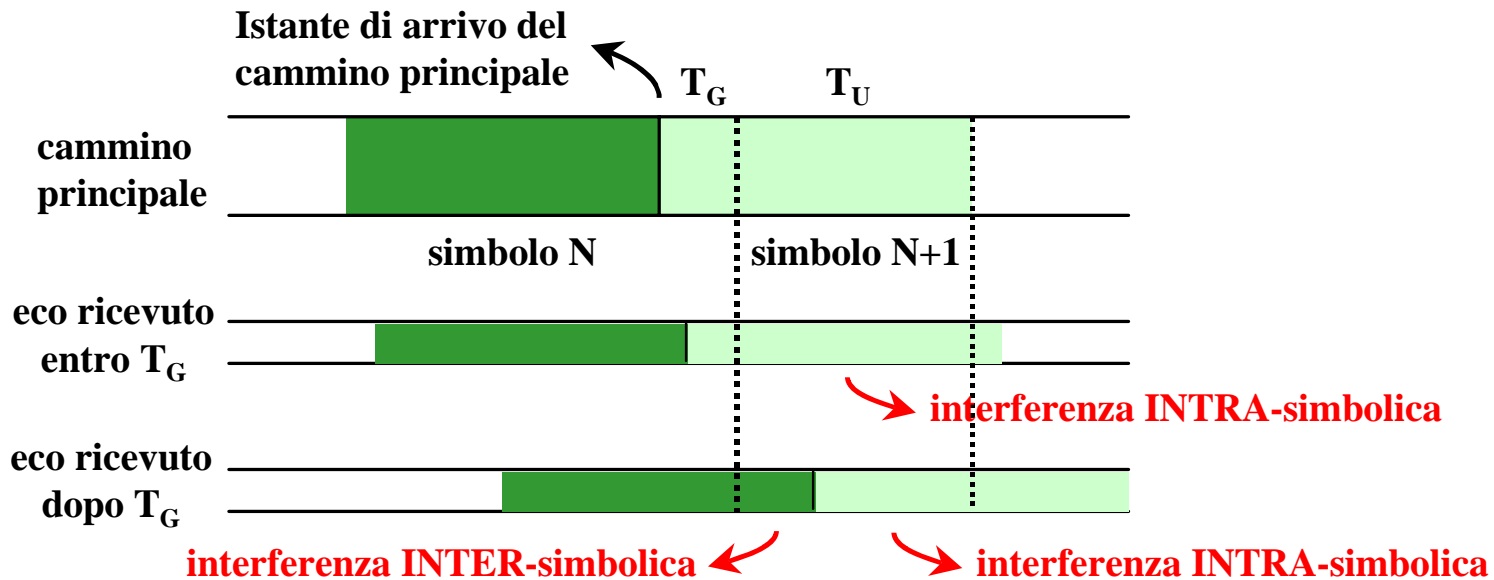
- ❖ Per ridurre ulteriormente l'interferenza inter-simbolica, si introduce prima di ogni simbolo un opportuno *intervallo di guardia*  $T_g$  ( $\Delta$ ), all'interno del quale si ripete la parte finale del simbolo stesso (è cioè una continuazione ciclica dell'informazione utile contenuta nel simbolo)



- ❖ Con l'introduzione del tempo di guardia, il tempo di simbolo viene diviso in due parti, l'intervallo di guardia e la cosiddetta "parte utile". Si pone pertanto:

$$T_s' = T_g + T_u$$

# OFDM - Guard Time (2/2)



- ❖ l'introduzione di  $T_g$  permette di annullare l'interferenza intersimbolo di tutti i cammini che hanno un ritardo relativo  $\tau$  inferiore a  $T_g$  (i quali producono quindi solo interferenza intrasimbolica)
- ❖ i cammini ricevuti dopo  $T_g$  (ma entro  $T_s$ ) portano nell'intervallo  $T_u$  sia il simbolo utile sia un simbolo differente, e pertanto contribuiscono sia all'interferenza intra-simbolica sia all'interferenza inter-simbolica.

# OFDM - modalità SFN

- ❖ Mediante un opportuna equalizzazione<sup>(\*)</sup> è possibile “recuperare utilmente” il contributo di alcuni degli echi ricevuti:
  - I cammini aventi  $\tau \leq T_g$  possono essere completamente equalizzati, e dunque contribuiscono al segnale utile ricevuto;
  - I cammini aventi  $\tau > T_g$  possono essere equalizzati solo parzialmente, ed il contributo che danno al segnale utile diminuisce all'aumentare del ritardo. Per valori di ritardi oltre un certo limite ( $T_F$ ), l'equalizzazione diviene totalmente inefficace e l'eco risulta completamente interferente.
- ❖ OFDM consente non solo di mitigare il disturbo prodotto dai cammini multipli, ma addirittura di giovare della loro presenza  $\Rightarrow$  reti OFDM possono essere realizzate in modalità *Single Frequency* : lo stesso contenuto informativo viene diffuso da trasmettitori diversi ma sempre alla stessa frequenza. Se le distanze fra i trasmettitori non sono eccessive, tutti gli echi “artificiali” cadono entro  $T_g$  e quindi concorrono utilmente alla ricezione

---

<sup>(\*)</sup> equalizzazione “adattativa”, che utilizza alcune sottoportanti (1 ogni 12 per ogni tempo di simbolo) per il sondaggio del canale

# OFDM - Ricezione (1/2)

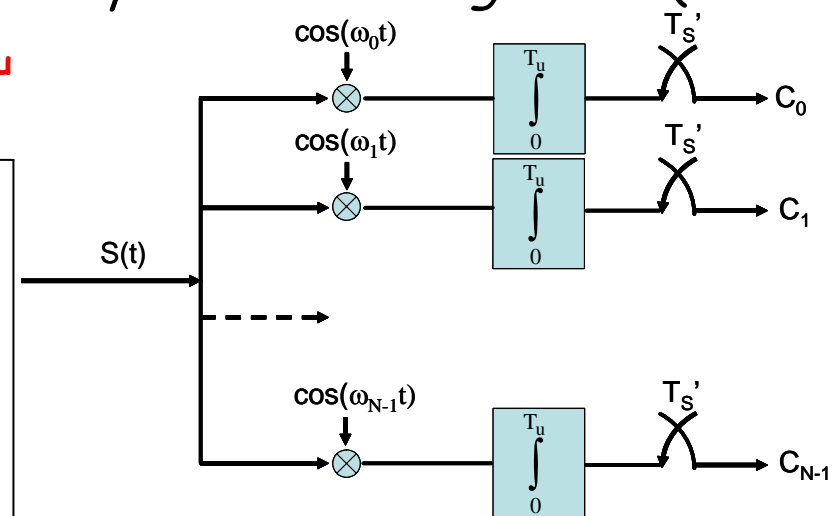
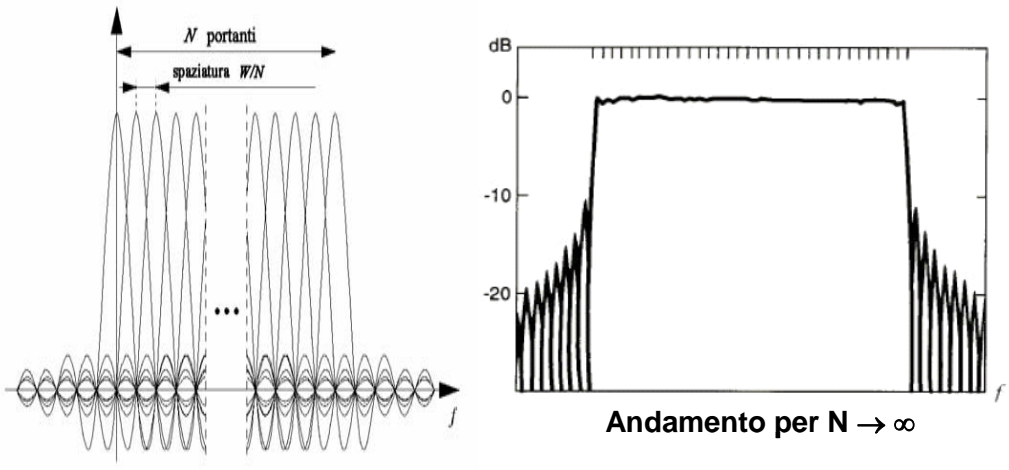
❖ Per recuperare gli  $N$  simboli ( $C_0, C_1, \dots, C_{N-1}$ ) contenuti in ogni simbolo OFDM occorre disporre di  $N$  demodulatori; ciascuno dei quali riceve tutto il simbolo OFDM e deve "estrarne" il simbolo  $C_i$  di interesse;

❖ condizione di ortogonalità in frequenza fra portanti sinusoidali ...

$$\int_0^T \cos(2\pi f_i t) \cdot \cos(2\pi f_j t) dt = 0 \quad \text{se } \Delta f = f_i - f_j = \frac{n}{T} \quad n \in \mathbb{N}$$

...  $\Rightarrow$  è conveniente scegliere *sottoportanti ortogonali* ( $\Rightarrow$  *Orthogonal FDM*), cioè con  $\Delta f = 1/T_u$

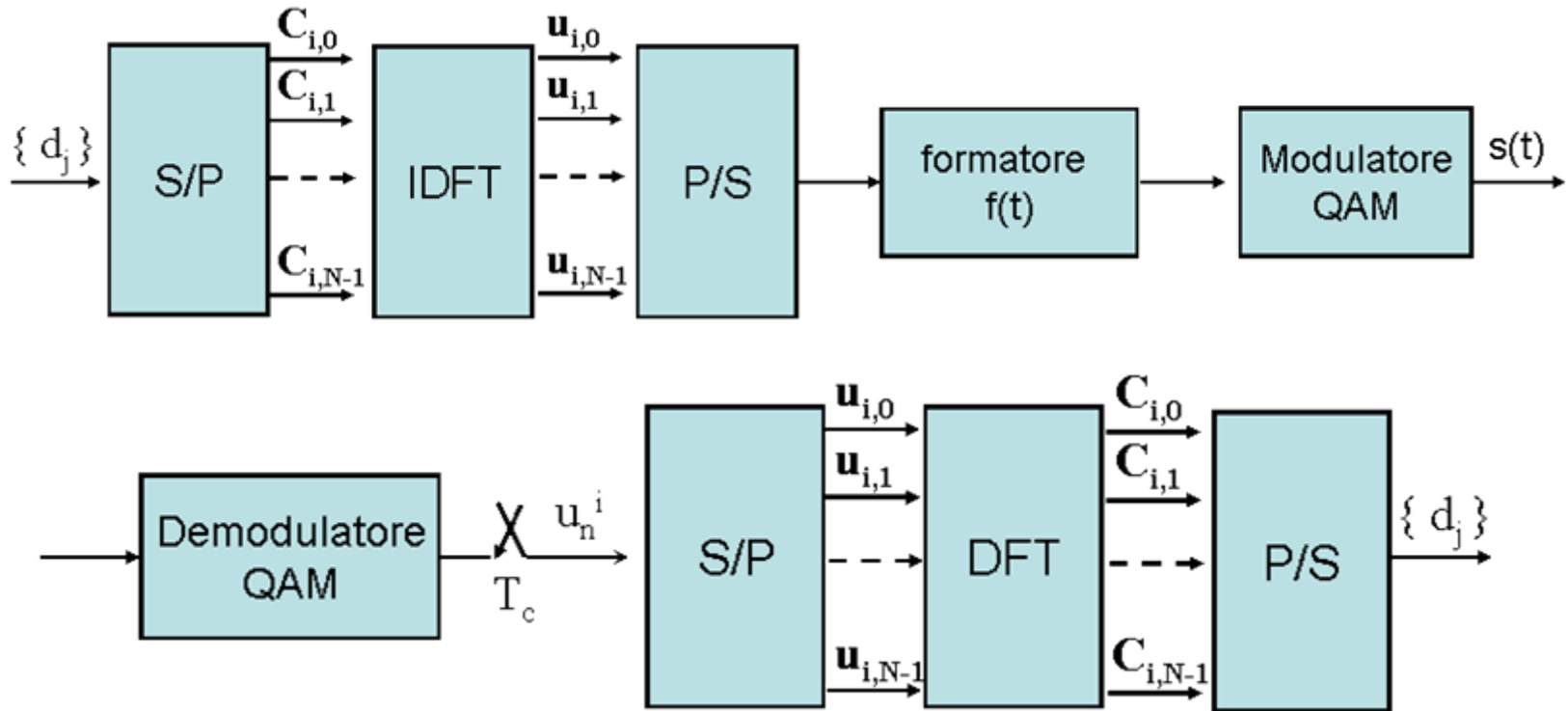
❖ Spettro del segnale



Se viene meno perfetta ortogonalità (Doppler)  $\Rightarrow$  *Inter-Carrier Interference (ICI)*

# OFDM e DFT

- ❖ Si può dimostrare (...) che il segnale OFDM può essere ottenuto e demodulato per mezzo di semplici operazioni di Trasformata di Fourier Discreta



- ❖ In questo modo si rende necessario un solo oscillatore alla frequenza  $f_0$ , sia in trasmissione che in ricezione

# Terrestrial DVB (1/3)

1. Stesse bande di trasmissione della TV analogica: VHF (nel *range* 170 ÷ 230 MHz) ed UHF (nel *range* 470 ÷ 860 MHz)
2. Codifica:
  - di sorgente: MPEG-2
  - di canale:
    - codifica "interna" di tipo concatenato (algoritmo di Viterbi) con 4 possibili valori di *code-rate* (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)
    - codifica "esterna" di tipo *Reed-Solomon* con *code-rate* 0.92
3. Modulazione: OFDM / M-QAM
  - parametri della modulazione M-QAM:  $M = 4, 16, 64$
  - parametri della modulazione OFDM
    - n° di sottoportanti: 1705 (modalità 2k) / 6817 (modalità 8k)
    - $\Delta f$  fra le sottoportanti ( $1/T_u$ ): = 1.116 kHz (2k), 4.464 kHz (8k)
    - Tempo di guardia  $T_g = T_u/4, T_u/8, T_u/16, T_u/32$ ;
    - Larghezza di banda del segnale OFDM  $\approx 7$  MHz

# *Terrestrial DVB (2/3)*

4. Tipologie di reti previste: MFN, SFN, k-SFN
5. Tipologie di ricezione previste:
  - Fixed ( $h_{RX} = 10$  m)
  - Portable ( $h_{RX} = 1.5$  m)
    - Outdoor
    - Indoor

# Terrestrial DVB (3/3)

Modulation	Code rate	Required C/N for BER = $2 \times 10^{-4}$ after Viterbi QEF after Reed-Solomon			Bitrate (Mbit/s)			
		Gaussian channel	Ricean channel ( $F_1$ )	Rayleigh channel ( $P_1$ )	$\Delta T_U = 1/4$	$\Delta T_U = 1/8$	$\Delta T_U = 1/16$	$\Delta T_U = 1/32$
QPSK	1/2	<i>3,1</i>	<i>3,6</i>	<i>5,4</i>	<i>4,98</i>	<i>5,53</i>	<i>5,85</i>	<i>6,03</i>
QPSK	2/3	<i>4,9</i>	<i>5,7</i>	<i>8,4</i>	<i>6,64</i>	<i>7,37</i>	<i>7,81</i>	<i>8,04</i>
QPSK	3/4	<i>5,9</i>	<i>6,8</i>	<i>10,7</i>	<i>7,46</i>	<i>8,29</i>	<i>8,78</i>	<i>9,05</i>
QPSK	5/6	<i>6,9</i>	<i>8,0</i>	<i>13,1</i>	<i>8,29</i>	<i>9,22</i>	<i>9,76</i>	<i>10,05</i>
QPSK	7/8	<i>7,7</i>	<i>8,7</i>	<i>16,3</i>	<i>8,71</i>	<i>9,68</i>	<i>10,25</i>	<i>10,56</i>
16-QAM	1/2	<i>8,8</i>	<i>9,6</i>	<i>11,2</i>	<i>9,95</i>	<i>11,06</i>	<i>11,71</i>	<i>12,06</i>
16-QAM	2/3	<i>11,1</i>	<i>11,6</i>	<i>14,2</i>	<i>13,27</i>	<i>14,75</i>	<i>15,61</i>	<i>16,09</i>
16-QAM	3/4	<i>12,5</i>	<i>13,0</i>	<i>16,7</i>	<i>14,93</i>	<i>16,59</i>	<i>17,56</i>	<i>18,10</i>
16-QAM	5/6	<i>13,5</i>	<i>14,4</i>	<i>19,3</i>	<i>16,59</i>	<i>18,43</i>	<i>19,52</i>	<i>20,11</i>
16-QAM	7/8	<i>13,9</i>	<i>15,0</i>	<i>22,8</i>	<i>17,42</i>	<i>19,35</i>	<i>20,49</i>	<i>21,11</i>
64-QAM	1/2	<i>14,4</i>	<i>14,7</i>	<i>16,0</i>	<i>14,93</i>	<i>16,59</i>	<i>17,56</i>	<i>18,10</i>
64-QAM	2/3	<i>16,5</i>	<i>17,1</i>	<i>19,3</i>	<i>19,91</i>	<i>22,12</i>	<i>23,42</i>	<i>24,13</i>
64-QAM	3/4	<i>18,0</i>	<i>18,6</i>	<i>21,7</i>	<i>22,39</i>	<i>24,88</i>	<i>26,35</i>	<i>27,14</i>
64-QAM	5/6	<i>19,3</i>	<i>20,0</i>	<i>25,3</i>	<i>24,88</i>	<i>27,65</i>	<i>29,27</i>	<i>30,16</i>
64-QAM	7/8	<i>20,1</i>	<i>21,0</i>	<i>27,9</i>	<i>26,13</i>	<i>29,03</i>	<i>30,74</i>	<i>31,67</i>

NOTE: Figures in italics are approximate values.

Ipotesi: ○ Cella isolata ○ Echi esclusivamente "utili"



# Bit-rate utile

$$B_r^u = S_r \cdot 2 \log_2 \sqrt{M} \cdot R_c^{\text{out}} \cdot R_c^{\text{inn}} \cdot \frac{N_u}{N}$$

*Symbol-Rate*

4, 16, 64


*code-rates*

n° portanti utili  
/ n° totale portanti

## Esempio

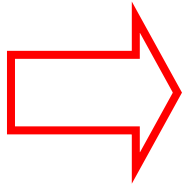
- 8k,  $T_g = T_u/4 \Rightarrow T_S = 1120 \mu\text{sec}$ .
- 16-QAM  $\Rightarrow M = 16$
- $R_c^{\text{inn}} = 0.5$

	2k	8k
$n_u$	1512	6048
$n_{\text{tot}}$	1705	6817


$$B_r^u = \frac{6817}{1120 \cdot 10^{-6}} \cdot 4 \cdot 0.92 \cdot 0.5 \cdot \frac{6048}{6817} \approx 9.95 \text{ Mbit/sec}$$

# Effective Protection Target

- ❖ In un sistema reale, la cella non è isolata ed occorre considerare la possibilità che ci sia interferenza



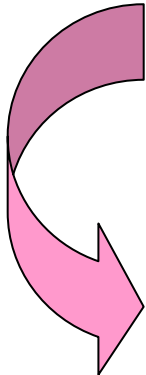
Interferenza da cammini multipli: echi "naturali" o "artificiali" che trasportano lo stesso contenuto informativo.

$C_j$  = potenza in ricezione del  $j^{\text{mo}}$  eco:

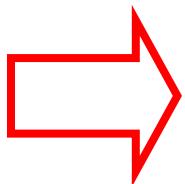
$$C = \sum_{j=1}^{N_E} w_j \cdot C_j$$

$$I = \sum_{j=1}^{N_E} (1 - w_j) \cdot C_j$$

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{se } \tau \leq T_g \\ \left( \frac{T_u + T_g - \tau}{T_u} \right) & \text{se } T_g < \tau \leq T_F \\ 0 & \text{se } \tau > T_F \end{cases}$$



$$\frac{C}{N_0 + I} \geq \text{EPT} \quad \text{Effective Protection Target}$$




Interferenza esterna (altri trasmettitori della rete DVB-MFN e/o trasmettitori NON DVB  $\Rightarrow$  opportuni *Rapporti di Protezione*)

# Handheld DVB (1/2)

❖ Lo standard DVB-H introduce alcuni utili accorgimenti per ridurre il consumo delle batterie e migliorare la ricezione da **terminali portatili e in movimento**:

1. Time-slicing: la trasmissione avviene solo in intervalli temporali prestabiliti, in cui vengono *burst* di dati; al di fuori di tali intervalli il terminale può passare in *stand-by*  $\Rightarrow$  risparmio di potenza;
2. MPE-FEC (*Forward Error Correction for Multiprotocol Encapsulated Data*): codifica di canale aggiuntiva
3. Modalità 4k - compromesso fra esigenza di garantire buona qualità in presenza di cammini multipli ed al contempo in condizioni di ricezione mobile

- 
- Quanto maggiore è il n° di sottoportanti, tanto maggiore è l'allargamento del tempo di simbolo  $\Rightarrow$  maggiore protezione dai cammini multipli
  - Quanto minore è il n° di sottoportanti, tanto maggiore cioè la spaziatura  $\Delta f \Rightarrow$  minore ICI a parità di spostamento Doppler

# Handheld DVB (2/2)

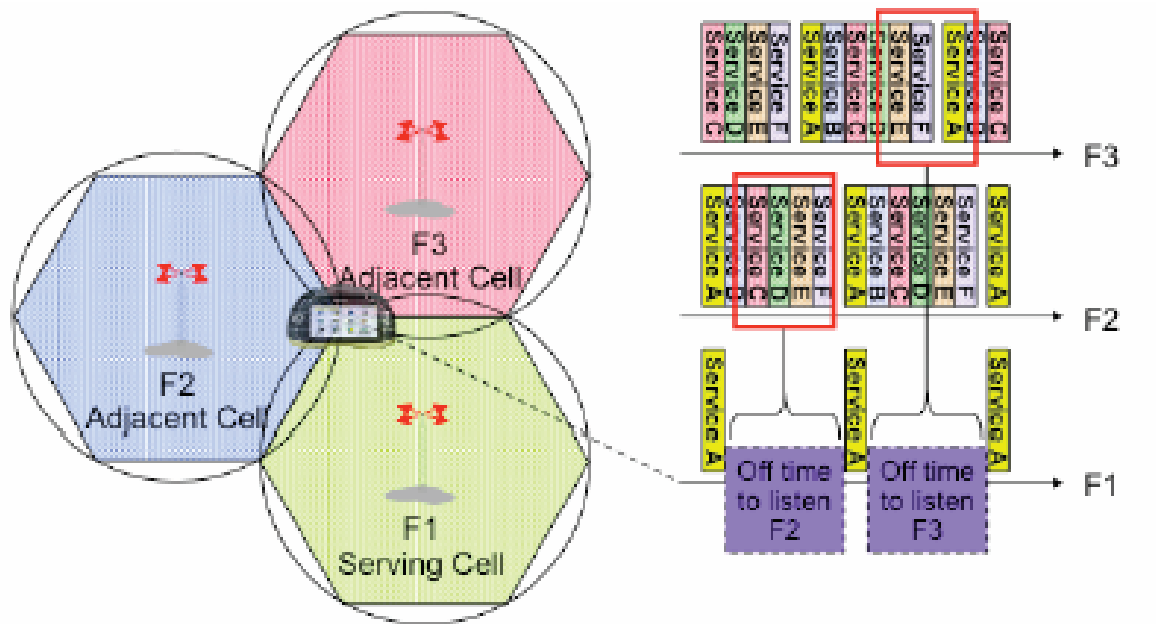
- ❖ Lo standard DVB-H introduce alcuni utili accorgimenti per ridurre il consumo delle batterie e migliorare la ricezione da **terminali portatili e in movimento**:
  1. Time-slicing: la trasmissione avviene solo in intervalli temporali prestabiliti, in cui vengono *burst* di dati; al di fuori di tali intervalli il terminale può passare in *stand-by* ⇒ risparmio di potenza;
  2. MPE-FEC (*Forward Error Correction for Multiprotocol Encapsulated Data*): codifica di canale aggiuntiva
  3. Modalità 4k - compromesso fra esigenza di garantire buona qualità in presenza di cammini multipli ed al contempo in condizioni di ricezione mobile

# Principi di pianificazione (1/2)

- ❖ La pianificazione tradizionale analogica risulta (relativamente) semplice rispetto al caso cellulare; il servizio televisivo infatti non presenta problemi di traffico, ma solo di copertura. Una volta ripartite le risorse fra le celle, si cerca usualmente di avere celle di dimensioni più grandi possibile; gli aspetti più delicati riguardano quindi l'assegnazione/ripartizione delle frequenze, vista anche la situazione di congestione a livello locale
- ❖ Nel caso DVB intervengono alcune differenze, soprattutto in modalità SFN  $\Rightarrow$  anche se valori di  $T_g$  consentono di "recuperare" contributi anche molto ritardati, i trasmettitori non possono essere troppo distanti. Inoltre, l'attivazione di trasmettitore ri-configura tutto il "panorama" dei ritardi, il che potrebbe comportare un aumento di interferenza e quindi un peggioramento della qualità;

# Principi di pianificazione (2/2)

- ❖ Lo standard DVB-H prevede la possibilità di monitorare le celle adiacenti durante il tempo intercorrente tra due *burst* successivi, consentendo quindi il passaggio da uno *stream* all'altro durante gli *off-period* (*seamless handover*)

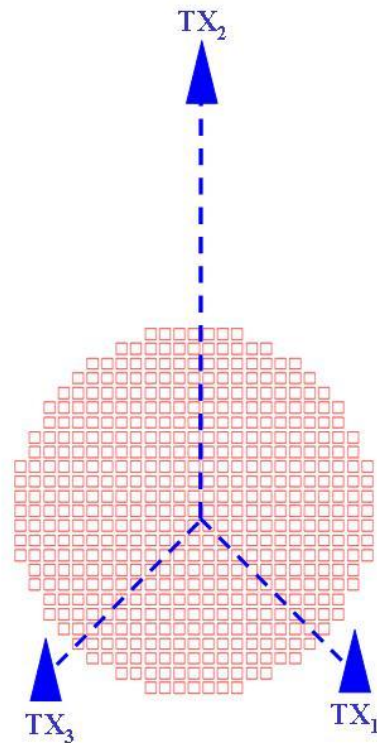


Ovviamente l'Handover è necessario solo quando si passa ad un servizio irradiato da una cella differente su di una frequenza differente

- ❖ Per le reti DVB-H si determinano necessita di pianificazione proprie dei sistemi televisivi tradizionali ed altre tipiche dei sistemi cellulari (accordo TIM - Mediaset)

# Esempio (1/n)

- ❖ rete di diffusione DVB operante nella città di Bologna;
- ❖ Obiettivo: copertura *indoor* (EPT = 11.2 dB)
- ❖ siti principali di diffusione: 3 trasmettitori extra-urbani, già in uso per la diffusione del servizio di televisione analogica;



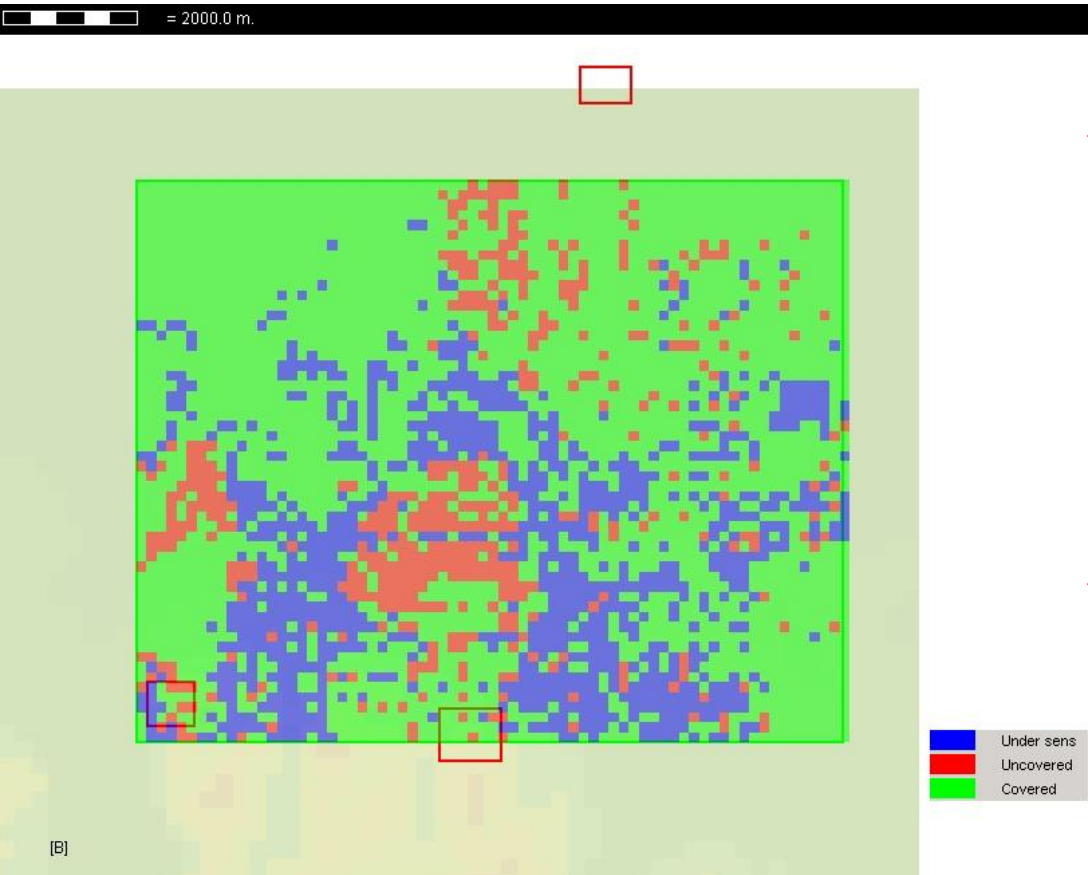
## Parametri di sistema

- ★ Banda UHF (800 MHz)
- ★ Potenza di rumore nella banda utile (8 MHz)  
 $N = -128.2$  dBW
- ★ Modalità 4k ( $T_u = 448$   $\mu$ sec)
- ★ 16-QAM, code-rate=1/2  
 $T_g/T_u = 1/32$  (Br utile = 12.06 Mbit/sec)  
 $T_g/T_u = 1/16$  (Br utile = 11.71 Mbit/sec)  
 $T_F = T_u/3$
- ★  $EPT_{INDOOR} = 11.2$  dB  
Margine di implementazione  $\Delta = 3$  dB
- ★  $P_c$  target = 95 %

TX<sub>1</sub>  $\approx$  Monte Donato  
TX<sub>2</sub>  $\approx$  Castel Maggiore  
TX<sub>3</sub>  $\approx$  Osservanza

# Esempio (2/n)

- ❖ Copertura simulata considerando data-base territoriale + modello di Epstein - Peterson

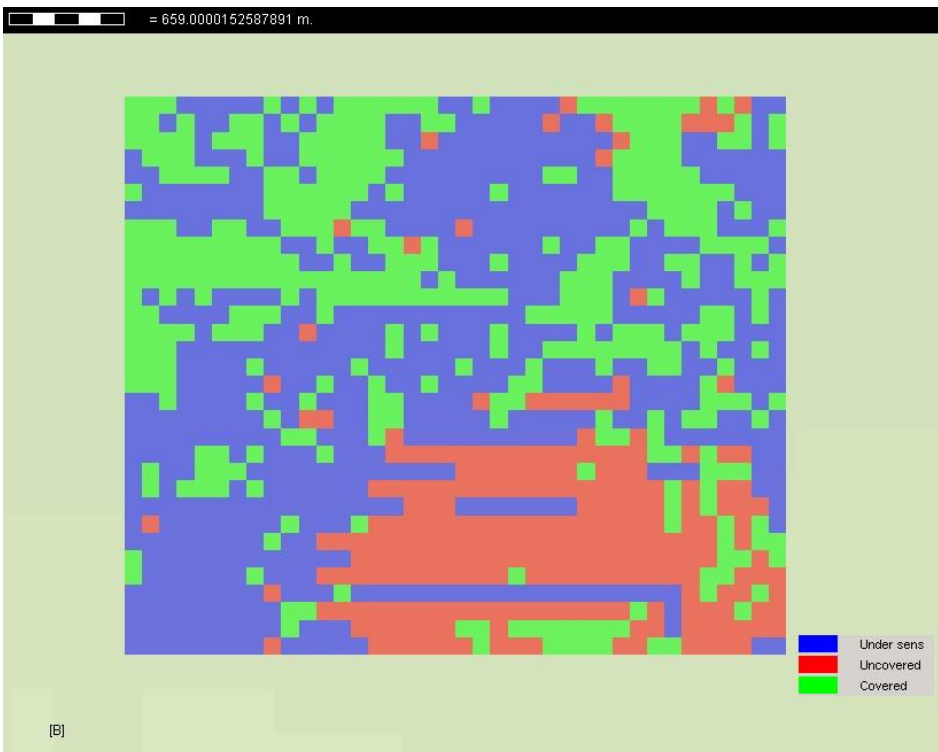


- ❖ il livello di copertura fornito dai tre trasmettitori non può essere considerato sufficiente a garantire il servizio per utenti *indoor* su tutta l'area urbana;
- ❖ È quindi necessario introdurre alcuni *gap filler* urbani, che sfruttando i vantaggi delle reti SFN migliorino la copertura



# Esempio (2/n)

- ❖ L'introduzione dei *gap-fillers* non è necessariamente ovvia ed automaticamente utile. Ad esempio, se il tempo di guardia cioè troppo piccolo (ad es. 1/32), allora i contributi ricevuti dai trasmettitori extra-urbani potrebbero risultare interferenti, e addirittura peggiorare la situazione
- ❖ Copertura ottenuta aggiungendo 7 *gap-fillers* ( $T_g/T_u = 1/16$ )



Senza gap-fillers



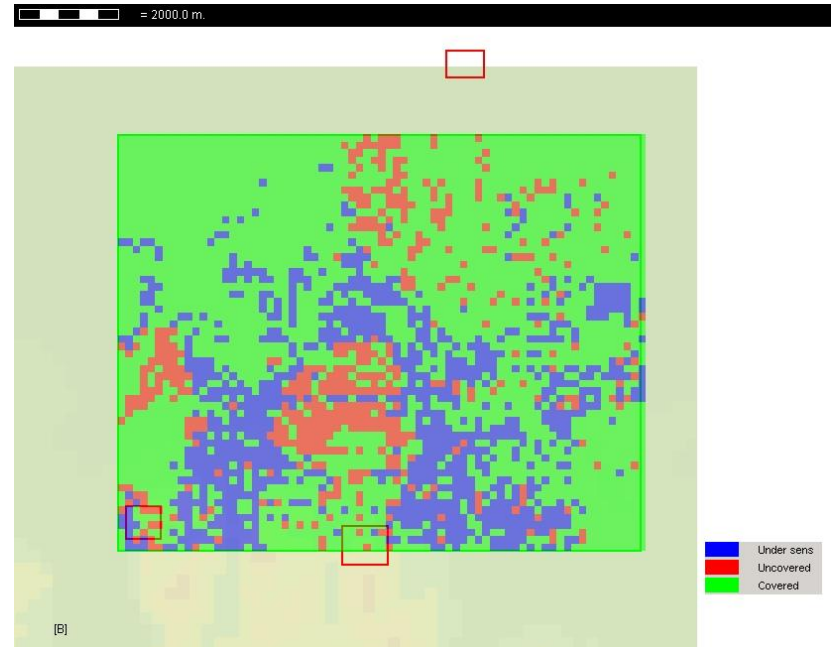
Con gap-fillers

# Modello di Propagazione

- ❖ La stima della copertura dipende ovviamente sensibilmente dal modello di propagazione considerato; ovviamente modelli in grado di descrivere fedelmente la propagazione consentono stime più affidabili, ma inevitabilmente risultano più costosi e complicati
- ❖ Esempio: Okumura-Hata vs. Epstein-Peterson



Okumura, no gap-fillers



EP, no gap-fillers