

Che cosa è, come funziona: La modulazione COFDM

ing. Vittoria **Mignone Rai**
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica

La modulazione COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)^{Nota 1} è una tecnica di trasmissione caratterizzata dalla suddivisione del segnale di informazione ad alta velocità trasmissiva in molti flussi paralleli trasmessi a bassa velocità, multiplati a divisione di frequenza (FDM, *Frequency Division Multiplexing*) su portanti ortogonali e quindi non interferenti fra loro.

Seppure la prima pubblicazione relativa alla modulazione multiportante risalgia agli anni '60, solo a partire dagli anni '80, con l'evoluzione delle tecnologie digitali, l'OFDM si è rivelato interessante per le trasmissioni su canali caratterizzati da selettività in frequenza, fino all'adozione per gli standard di diffusione radio DAB, TV DVB-T, su rame (ADSL) e per reti wireless (WiFi e WiMAX) (vedere riquadro).

Nota 1 - Talvolta è chiamata DMT (*Discrete Multi-Tone*).

ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) per la trasmissione dati su doppino in rame è basato sugli standard ITU G.991 e G.992, noti anche come G.DMT e G.lite.

DAB (*Digital Audio Broadcasting*), tecnologia per la diffusione digitale dei programmi audio, sviluppata dal progetto europeo Eureka 147, iniziato nel 1987 e concluso nel 2000. (www.worlddab.org e www.dab.it).

DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), è lo standard per la diffusione digitale terrestre (www.dvb.org).

WiFi (*Wireless Fidelity*) e **WiMAX** è un marchio della *WiFi Alliance* e si riferisce ad una famiglia di specifiche IEEE 802.11 per i metodi e le tecniche per operare senza fili (wireless) in reti locali. Le specifiche di IEEE 802.11b sono del 1999.

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) è un marchio che certifica i prodotti conformi allo standard IEEE 802.16, per l'accesso wireless punto-multipunto a larga banda. (www.wimaxforum.org)

Nota 2 - Le reti a singola frequenza sono reti in cui il segnale irradiato dai trasmettitori che compongono la rete è sulla stessa portante radio: i ricevitori possono perciò ricevere i segnali provenienti da più trasmettitori, echi artificiali di uno stesso segnale.

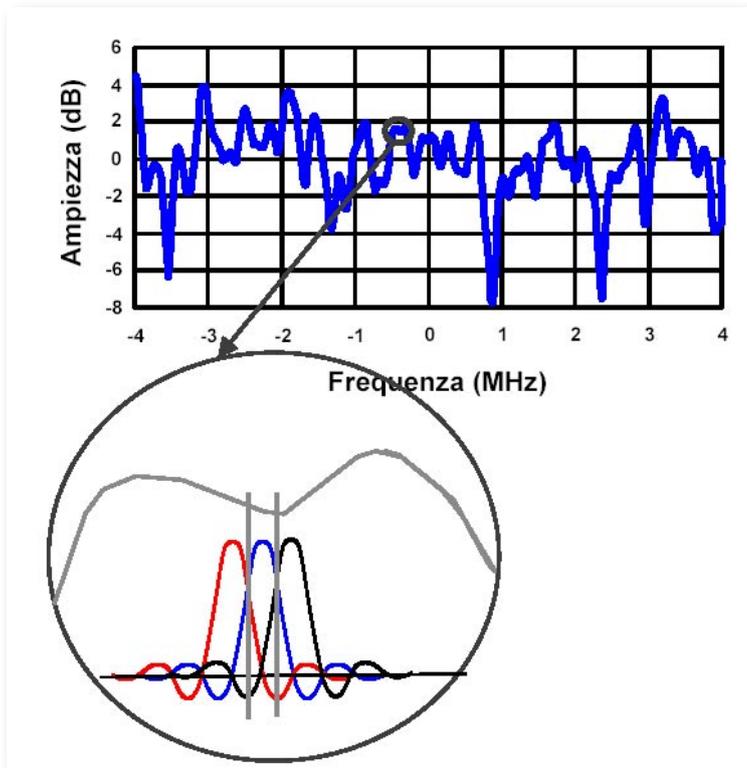
L'ambiente terrestre è caratterizzato dalla cosiddetta propagazione *multipath*, ossia multi-cammino, dovuta alle riflessioni del segnale da parte degli ostacoli che incontra nel viaggio dal trasmettitore al ricevitore: al ricevitore arrivano perciò più repliche del segnale trasmesso, attenuate, sfasate e ritardate in modo diverso a seconda del tragitto percorso. I ritardi rispetto al segnale principale possono essere di alcuni microsecondi, nel caso di echi naturali, legati all'ambiente di propagazione, ma possono anche arrivare a centinaia di microsecondi per echi artificiali dovuti ai segnali provenienti dai trasmettitori isofrequenziali presenti nelle reti a singola frequenza^{Nota 2}.

Il risultato è un pesante degradamento del segnale trasmesso: in figura 1 è rappresentata la funzione di trasferimento di un tipico esempio di canale di propagazione in ambiente urbano nella banda UHF in presenza di soli echi naturali con ritardi fino a $5,5 \mu\text{s}$: come si può vedere un segnale convenzionale a singola portante con una velocità di simbolo R_s di 7,5 MHz occupante l'intera porzione di spettro risulta fortemente deteriorato dalla presenza degli echi del segnale principale, che hanno ritardi con durata molto maggiore di quella del simbolo in trasmissione $T_s = 1/R_s$, pari a $0,13 \mu\text{s}$.

Le tecniche di correzione del *multipath* per la modulazione a portante singola convenzionali si basano sull'equalizzazione del segnale al ricevitore. Diverse sono le strutture secondo cui gli equalizzatori possono essere realizzati, ma le più adottate si basano su linee a prese di ritardo di tipo FIR (*Finite Impulse Response*, a risposta finita) a coefficienti adattabili, con spaziatura tra le prese di ritardo pari al periodo di simbolo del segnale in trasmissione. Per un corretto funzionamento la lunghezza dell'equalizzatore deve essere maggiore del massimo ritardo d'eco da equalizzare (più volte il ritardo massimo, tanto più quanto maggiore è la potenza dello stesso, riferita al segnale principale). Ne risulta che ritardi molto lunghi rispetto al periodo di simbolo del segnale non possono essere trattati con le tecniche di equalizzazione convenzionali, perché richiederebbero l'impiego di equalizzatori molto complessi.

Sulla base di tali considerazioni e dei risultati di accurate valutazioni tecniche

Fig. 1 - Canale *multipath* e modulazione multiportante.



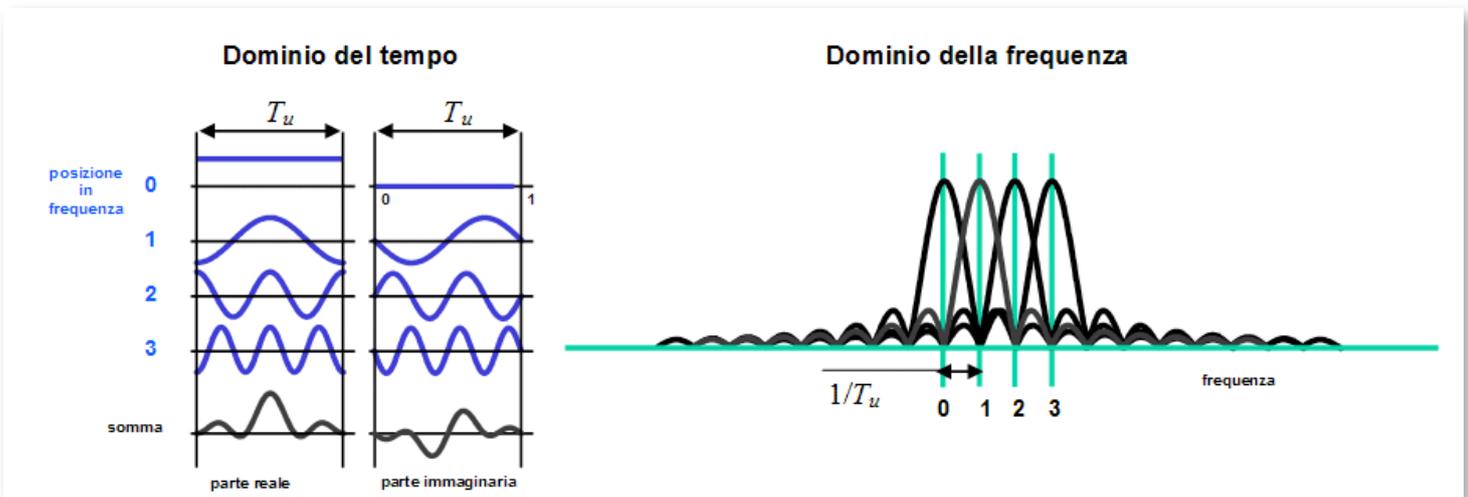


Fig. 2 - Il segnale OFDM nel dominio del tempo e della frequenza.

comparative, nel caso di sistemi di trasmissione per canali affetti da *multipath* elevati, si è scelta la modulazione multiportante OFDM. Il principio su cui si basa questa tecnica di modulazione consiste nel distribuire il flusso dati totale tra moltissime portanti (a banda stretta e quindi a bassa velocità di trasmissione) equispaziate in frequenza, all'interno della banda del canale di diffusione.

La figura 2 mostra il segnale OFDM nel dominio del tempo e della frequenza: se f_0 è la spaziatura in frequenza delle portanti, il segnale OFDM è la somma risultante dalla moltiplicazione a divisione di frequenza di N segnali con portanti $0, f_0, 2f_0, \dots, (N-1)f_0$. A ciascuna delle portanti è poi applicata la modulazione digitale (QPSK, M-QAM, ecc.); la mutua ortogonalità è garantita per una spaziatura in frequenza tra le portanti pari alla velocità di simbolo, $1/T_u$.

Il processo OFDM è attuato per mezzo di una trasformata di Fourier Inversa (I-FFT, *Inverse Fast Fourier Transform*).

L'effetto di un eco sul segnale OFDM è schematicamente rappresentato in figura 3, paragonato con il caso di un segnale a singola portante: un eco con ritardo confrontabile con la durata del simbolo di trasmissione della modulazione a singola portante (SP) ha effetto sull'intero simbolo del segnale SP, ma solo su una piccola porzione del simbolo del segnale multiportante (MP).

Nel dominio della frequenza ciò si traduce nel fatto che ogni portante occupa una piccola porzione dello spettro, dove la risposta in frequenza del canale è tanto più "localmente piatta" e non distortore quanto più è elevato il numero di portanti in cui è suddiviso il segnale da trasmettere (si veda l'ingrandimento in figura 1): idealmente suddividendo il segnale in un numero infinito di portanti, ogni singola portante accede ad un canale non distortore.

Nella realtà una porzione del segnale OFDM è comunque affetta da interferenza intersimbolica, ossia interferenza sul

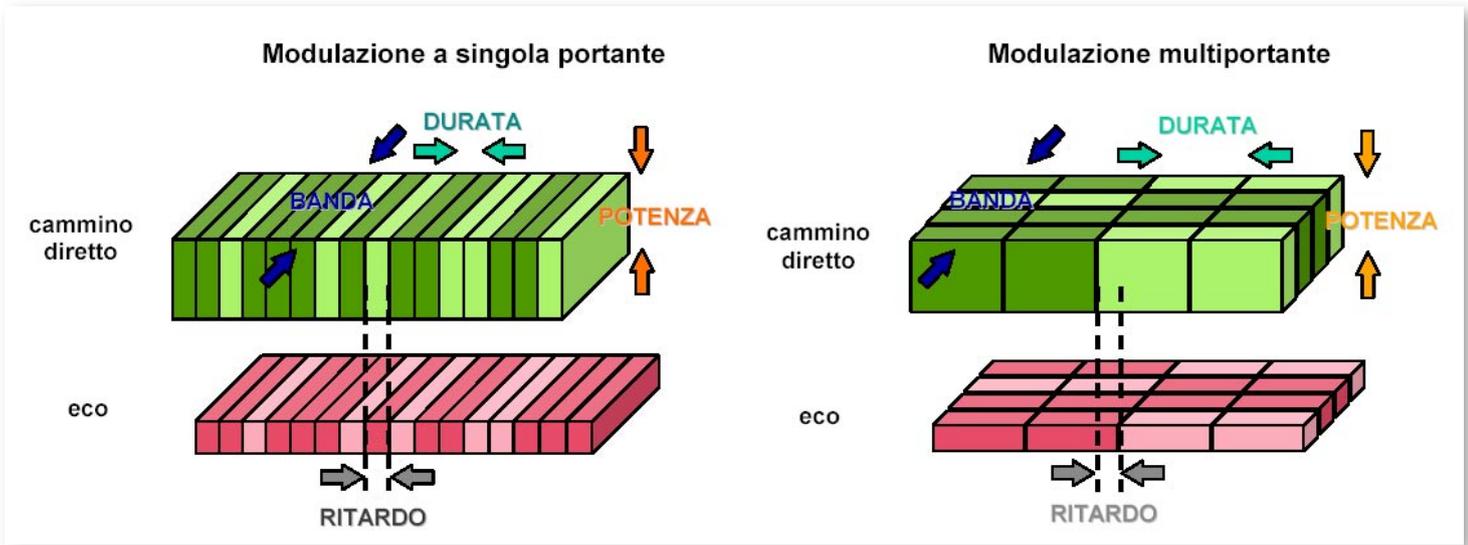


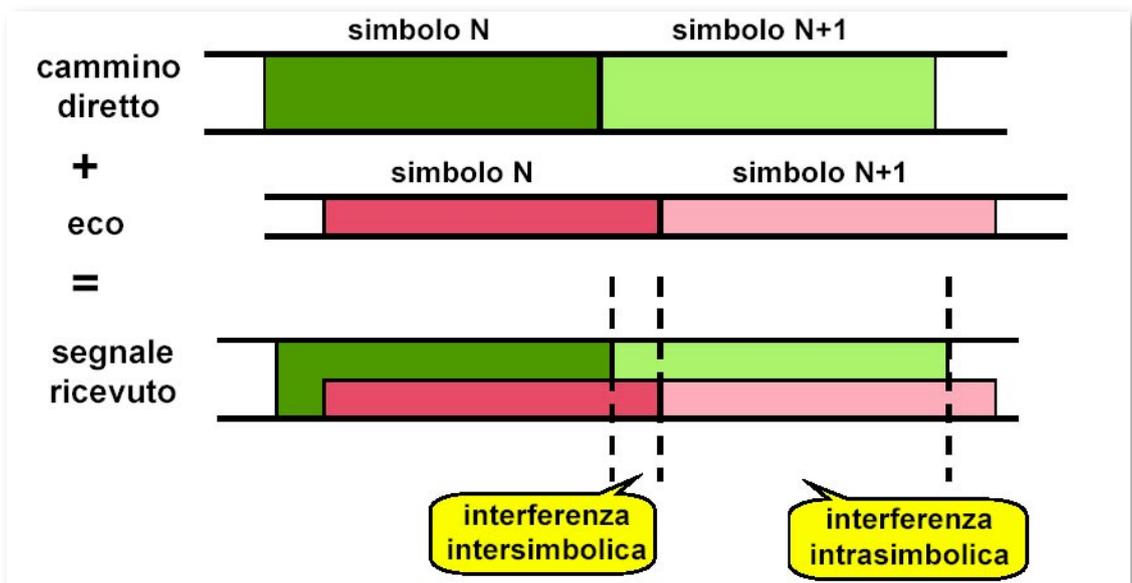
Fig. 3 - Confronto fra la modulazione a singola portante e quella multiportante.

simbolo utile dovuta ai simboli che lo precedono (figura 4): per eliminarla, a ciascun simbolo OFDM è anteposto un intervallo di guardia temporale (con durata T_g pari ad una frazione della durata di simbolo utile T_u) che separa simboli OFDM adiacenti. L'intervallo di guardia è la continuazione ciclica della parte utile T_u del simbolo (figura 5) e viene scartato dal ricevitore, cosicché

gli echi che raggiungono il ricevitore con un ritardo τ inferiore a T_g non generano interferenza intersimbolica (*Inter Symbol Interference*: ISI). Ovviamente l'intervallo di guardia riduce l'efficienza del sistema in termini di capacità trasmissiva.

Oltre che dall'interferenza intersimbolica, il segnale OFDM è anche affetto da inter-

Fig. 4 - Interferenza intersimbolica ed intrasimbolica.



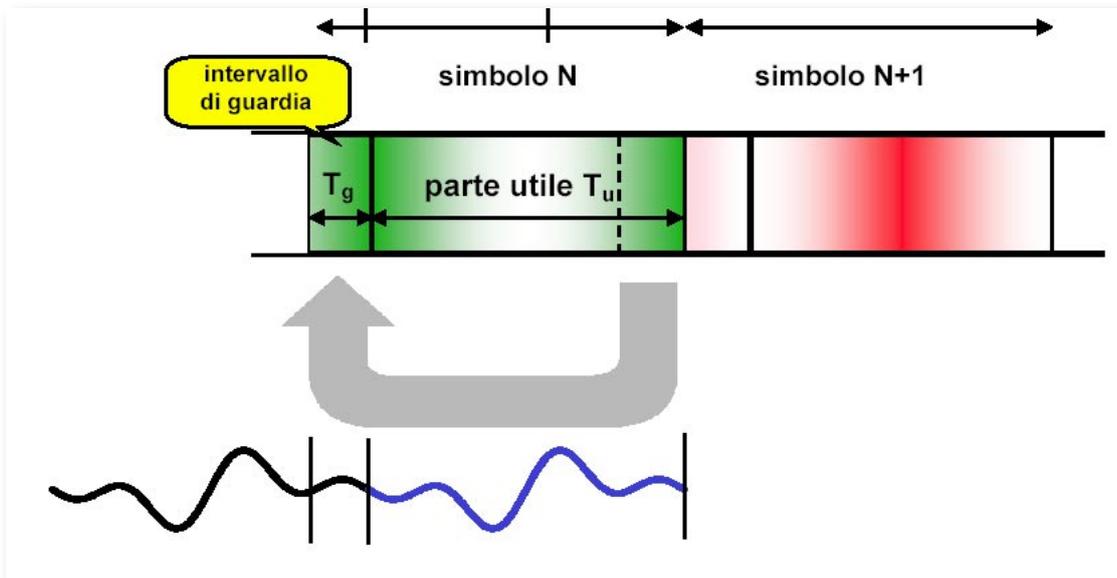


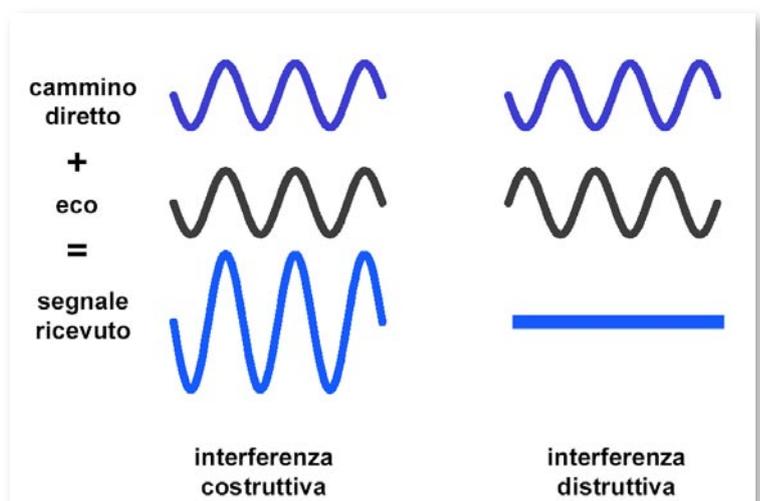
Fig. 5 - Il simbolo OFDM e l'intervallo di guardia.

ferenza intrasimbolica, ossia l'interferenza sul simbolo utile dovuta al simbolo stesso (figura 4). Essa può essere costruttiva, ossia aumentare la potenza di segnale al ricevitore, o distruttiva, ossia diminuire la potenza ricevuta, a seconda del ritardo tra segnale principale ed eco. La figura 6 illustra l'effetto dell'interferenza intrasimbolica su una portante del segnale OFDM.

Per mitigare gli effetti dell'interferenza intrasimbolica, che causa un'alterazione del livello e della fase delle singole costellazioni, viene utilizzato un equalizzatore adattativo che portante per portante, mediante una stima della funzione di trasferimento del canale, corregge modulo e fase del segnale ricevuto (figura 7); inoltre è prevista l'introduzione di uno schema di correzione degli errori esternamente alla modulazione OFDM, per permettere il recupero dell'informazione trasportata da quelle portanti che sono state attenuate dal canale di trasmissione. Per questo motivo normalmente si parla di COFDM (*Coded OFDM*), ossia OFDM

codificato. Inoltre, per evitare che l'informazione trasportata dalle portanti degradate entri nel decodificatore sequenzialmente, normalmente al codificatore è associato un interallacciatore con il compito di sparpagliare il flusso di informazione codificata, prima che venga associato alle portanti della modulazione OFDM. Come illustrato in figura 8, in trasmissione dopo la codifica di canale l'interallacciatore

Fig. 6 - Effetto dell'interferenza intrasimbolica su una portante del segnale OFDM: casi limite.



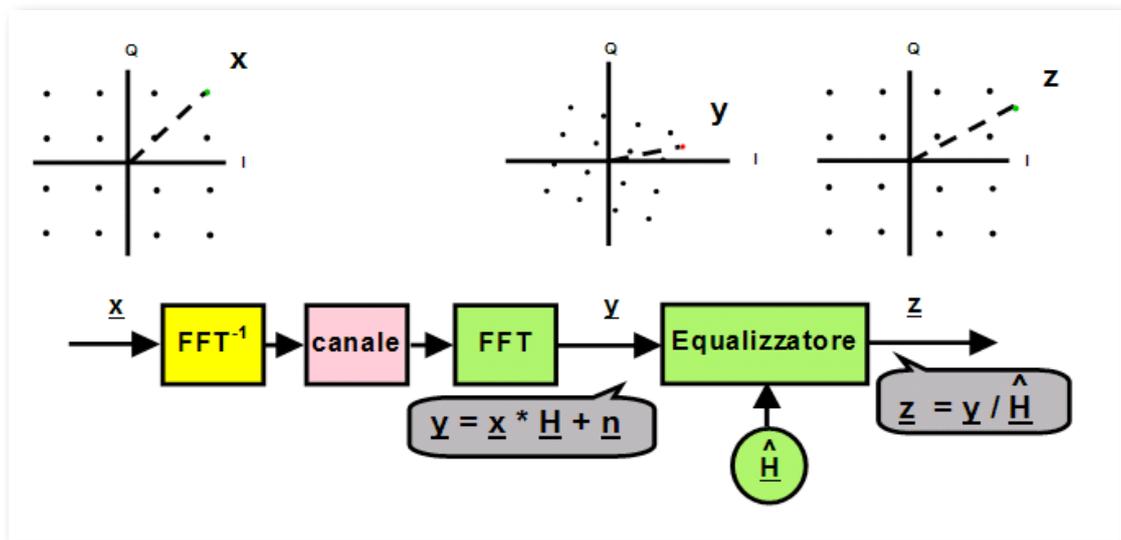


Fig. 7 - Equalizzazione del segnale OFDM.

cambia l'ordine della sequenza di dati in trasmissione; il ricevitore poi prima della decodifica di canale attua l'operazione inversa, allontanando fra loro dati associati a portanti vicine attenuate dal fading. Tutto ciò per sfruttare al meglio le potenzialità del decodificatore. L'interallacciatore può essere di frequenza, se opera sui dati

trasportati da un singolo simbolo OFDM, ed è quindi atto a contrastare l'effetto del solo fading selettivo in frequenza, tipico dei canali statici o tempo invariati, oppure di tempo, se opera sui dati trasportati da più simboli OFDM, ed è quindi atto a contrastare anche l'effetto del fading tempo variante, tipico del canale mobile.

Fig. 8 - Effetto d'interlacciamento in frequenza delle portanti dati di in sistema COFDM.

