



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA NUMERO	102000900870083
Data Deposito	18/08/2000
Data Pubblicazione	18/02/2002

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	02	B		

Titolo

SISTEMA DI TRASMISSIONE OTTICO.

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Sistema di trasmissione ottico"

Di: MARCONI COMMUNICATIONS S.p.A., nazionalità italiana, Via A. Negrone 1/A, 16153 Genova

Inventori designati: Fabio CAVALIERE, Edoardo MONGIARDINI

Depositata il: 18 agosto 2000

TO 2000A 000808

* * *

DESCRIZIONE

La presente invenzione concerne un sistema di trasmissione ottico nel quale segnali di comunicazione sono inviati su un comune percorso in fibra ottica a differenti lunghezze d'onda o colori. Tale sistema è basato sulla tecnica di multiplazione a divisione di lunghezza d'onda (WDM), e permette un utilizzo efficiente di un percorso in fibra ottica.

La dispersione della velocità di gruppo in fibra è stata il problema più importante quando furono introdotti alcuni anni fa i sistemi a singolo canale funzionanti in corrispondenza del minimo di attenuazione della fibra (circa 1550 nm). Per superare questo problema furono progettate fibre del tipo "dispersion-shifted" aventi il minimo di dispersione della velocità di gruppo in corrispondenza di 1550 nm. Fibre di questo tipo sono state lar-

JACOBACCI & PERANI S.p.A.

gamente utilizzate per reti di trasporto ottiche. L'introduzione dell'amplificatore ottico ed i progressi nella fabbricazione di laser rendono ora possibile portare numerosi canali ad elevata velocità di trasmissione su distanze assai lunghe a differenti lunghezze d'onda (WDM). Purtroppo il comportamento non lineare della fibra diventa importante alle elevate potenze lanciate nella fibra dagli amplificatori ottici ed ha un grande impatto sulle prestazioni in termini di tasso di errore di bit (BER), originando diafonia tra i canali.

Si è dimostrato difficile elevare sostanzialmente la potenza dei segnali ottici che sono inviati in un sistema WDM senza originare un tasso di errore di bit inaccettabile.

Scopo della presente invenzione è di fornire un procedimento per far funzionare un sistema di trasmissione ottico in modo più efficiente.

Secondo un primo aspetto dell'invenzione, un procedimento per determinare la potenza di alimentazione di un sistema di trasmissione ottico WDM comprendente una pluralità di tratte amplificate in sequenza, formanti insieme un collegamento, include il passo di impostazione della potenza di amplificazione di ciascun amplificatore vicino od allo

stesso valore massimo per cui sia il rapporto segnale/rumore ottico dovuto all'emissione spontanea amplificata ($OSNR_{ase}$), sia il rapporto segnale/rumore ottico dovuto all'effetto di "four wave mixing" ($OSNR_{fwm}$) sono superiori a rispettivi valori di soglia predeterminati al termine del collegamento.

Per una data potenza di alimentazione all'inizio di ciascuna tratta del collegamento, i valori reali di $OSNR_{ase}$ e $OSNR_{fwm}$ sono correlati ed è utilizzato preferibilmente un processo iterativo per determinare la potenza di alimentazione massima ottimale che non dia origine ad un tasso di errore di bit elevato in misura inaccettabile.

Secondo un ulteriore aspetto dell'invenzione, un procedimento per determinare la potenza di alimentazione di un sistema di trasmissione ottico WDM comprendente un collegamento amplificato include i passi di:

- (a) impostazione della potenza di amplificazione all'inizio del collegamento;
- (b) determinazione del rapporto segnale/rumore dovuto all'emissione spontanea amplificata ($OSNR_{ase}$) e del rapporto segnale/rumore ottico dovuto a four wave mixing ($OSNR_{fwm}$) al termine del collegamento;

- (c) confronto di $OSNR_{ase}$ e $OSNR_{fwm}$ con rispettivi valori di soglia predeterminati;
- (d) modifica della potenza di amplificazione; e
- (e) ripetizione dei passi (b), (c) e (d) fino a che la potenza di amplificatore non è vicino o ad un valore massimo quando sia $OSNR_{ase}$, sia $OSNR_{fwm}$ superano i rispettivi valori di soglia.

Il collegamento include preferibilmente una pluralità di tratte amplificate in sequenza, nel qual caso ciascuna potenza di amplificazione presenta preferibilmente lo stesso valore.

L'invenzione è descritta nel seguito a titolo di esempio con riferimento alle figure allegate, in cui:

la figura 1 mostra un sistema di trasmissione ottico di tipo WDM;

la figura 2 mostra tale sistema in una configurazione atta ad attuare l'invenzione;

le figure 3 e 4 sono diagrammi esplicativi;

le figure 5 e 6 sono diagrammi relativi al calcolo di $OSNR_{fwm}$; e

la figura 7 è un diagramma relativo al calcolo di $OSNR_{ase}$.

Con riferimento alla figura 1, un sistema di trasmissione ottico WDM comprende una porzione di

trasmissione ottica 1 che trasmette un segnale ottico WDM su un collegamento comprendente tre tratte 2, 3, 4 verso una porzione di ricezione ottica 5. La porzione di trasmissione presenta una molteplicità di singoli trasmettitori 6 di segnale ottico, ciascuno atto a generare un segnale di canale ottico ad una differente lunghezza d'onda. Questi segnali di canale sono inviati su fibre 7 di un multiplexer 8 dove sono combinati mantenendo la lunghezza d'onda della portante di ciascun canale, e sono inviati da un amplificatore ad alta potenza 9 sulla fibra ottica comprendente la prima tratta 2. Amplificatori ottici 10 ed 11 amplificano i segnali ottici per la trasmissione in avanti sulle tratte 3 e 4 rispettivamente, per la ricezione alla porzione di ricezione 5.

Un amplificatore di ingresso 12 amplifica i canali ottici ricevuti prima della loro demultiplazione, ossia separazione, per mezzo di un demultiplexer 13 e del loro invio su fibre distinte 14, ciascuna delle quali porta un singolo canale ottico verso rispettivi ricevitori 15.

E' spesso richiesto che le tratte 2, 3, 4 siano di lunghezza considerevole, anche diverse centinaia di chilometri, e pertanto è necessario inviare

i segnali ottici a potenza elevata su ciascuna tratta per tenere conto dell'attenuazione di segnale che interviene inevitabilmente in una fibra lunga. I segnali ottici subiscono distorsione e dispersione nella trasmissione su una fibra ottica.

Con riferimento alla figura 2, alla porzione di ricezione ottica 5 il segnale ottico ricevuto è controllato da un dispositivo di controllo di OSNR 20 che calcola i valori di $OSNR_{ase}$ e $OSNR_{fwm}$. Questi valori sono confrontati ai comparatori 21 e 22 con rispettivi valori di soglia di $OSNR_{ase}$ e $OSNR_{fwm}$ che rappresentano i valori minimi accettabili per il collegamento. I risultati dei confronti sono trasmessi ad una unità di controllo degli amplificatori 23 che agisce per regolare la potenza di amplificazione degli amplificatori 9, 10 ed 11.

L'effetto di four wave mixing (FWM) è l'effetto non lineare dominante nei sistemi WDM operanti su fibre di tipo a dispersion-shifted. E' un processo non lineare in cui tre onde a frequenze f_i , f_j , f_k ($k \neq i, j$) interagiscono nella fibra ottica per generare una nuova onda alla frequenza:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$$

La figura 3 mostra le nuove frequenze che sono generate dall'effetto di four wave mixing (FWM).

generate dall'effetto di four wave mixing (FWM).

Due fenomeni possono influire sulla rivelazione del segnale digitale:

- 1) l'esaurimento di potenza: la potenza di canale è trasferita parzialmente alla frequenza di FWM.
- 2) la diafonia: la frequenza di FWM coincide con uno o più canali trasmessi.

La diafonia è un deterioramento significativo nei sistemi WDM e si può dimostrare che essa insorge quando la dispersione di fibra è ridotta, come succede in fibre del tipo dispersion-shifted ed è proporzionale alla terza potenza della potenza dei canali.

Una soluzione attualmente impiegata per evitare diafonia FWM è di predisporre le frequenze di canale in modo tale che nessun prodotto della miscelazione ricada entro ciascuno dei canali. Questa condizione può essere soddisfatta soltanto se i canali sono spazati in modo diseguale. L'impiego di una diseguale spaziatura tra canali richiede una larghezza di banda maggiore che nel caso di canali egualmente spazati, per un dato numero di canali.

L'invenzione consente di avere un numero di canali maggiore di quanto possa apparire da una considerazione dell'effetto FWM, impiegando gli

stessi amplificatori in sistemi standard, senza necessità di cambiare le specifiche di trasmissione e di filtro ottico.

La regola proposta per decidere quale sia la quantità di diafonia che è possibile tollerare in sistemi WDM operanti con fibre del tipo dispersion-shifted è basata sull'equazione seguente:

$$\text{OSNR} = (\text{OSNR}_{\text{ase}}^{-1} + \text{OSNR}_{\text{fwm}}^{-1})^{-1}$$

in cui:

OSNR_{ase} è il rapporto tra la potenza di canale e la potenza dovuta all'emissione spontanea amplificata (ASE). Esso cresce linearmente con la potenza dei canali; e

OSNR_{fwm} è il rapporto tra una potenza di canale e la somma delle potenze di tutti i prodotti FWM che ricadono nel canale. Su fibre standard il suo valore è zero. Esso decresce con la seconda potenza della potenza dei canali.

Questa equazione considera ASE e FWM come contributi di rumore aggiuntivi indipendenti. E' necessario un compromesso per determinare la potenza dei canali che minimizza entrambi.

Per determinare la potenza massima permessa all'inizio di ciascuna tratta, i passi sono i seguenti:

1. Scegliere un valore di OSNR cosicché il sistema possa lavorare con un margine sufficiente per operare con un valore di BER prescelto. Ciò viene fatto scegliendo lo stesso punto di lavoro di una fibra standard. La figura 3 mostra una curva di lavoro per un valore fissato di OSNR, mostrando i contributi di $OSNR_{ase}$ e di $OSNR_{fwm}$. Un sistema accettabile opera nella regione in alto a destra della curva. Per ragioni di stabilità si preferisce operare in prossimità dell'estremità superiore della curva.

2. Impostare la potenza di uscita degli amplificatori 9, 10, 11 a livelli arbitrari. Preferibilmente ciascuna potenza di uscita sia la stessa per tutti gli amplificatori e vicino od in corrispondenza del suo valore massimo.

3. Calcolare il $OSNR_{ase}$ al ricevitore 5.

4. Verificare che il valore di $OSNR_{ase}$ sia maggiore del valore di OSNR di obiettivo prescelto al passo 1. Se così è, passare al passo 5, altrimenti aumentare le potenze di uscita degli amplificatori e ritornare al passo 3.

5. Calcolare il $OSNR_{fwm}$.

6. Verificare che esso sia maggiore del valore di OSNR di obiettivo prescelto al passo 1. Se così è,

passare al passo 8, altrimenti passare al passo 7.

7. Sostituire un amplificatore con un rigeneratore suddividendo pertanto il collegamento in due sezioni e riprendere la procedura dal passo 1. Se ciò è impossibile, il collegamento non è realizzabile.

8. Calcolare il OSNR a partire dai valori di $OSNR_{ase}$ e $OSNR_{fwm}$.

9. Se esso è uguale o maggiore del valore di OSNR di obiettivo, il collegamento è realizzabile, altrimenti, se $OSNR_{ase}$ è maggiore del valore di OSNR di obiettivo, diminuire le potenze di uscita degli amplificatori e ritornare al passo 3, o, se $OSNR_{ase}$ è minore del valore di OSNR di obiettivo, passare al passo 7.

Con riferimento alle figure 5 e 6 per il calcolo di $OSNR_{fwm}$, la linea di trasmissione complessiva comprende M sezioni e (M-1) amplificatori in linea. La tratta ripetitrice è uguale per tutta la trasmissione: questa è una buona approssimazione poiché la FWM è efficiente solo nei primi chilometri di ciascuna tratta, quando la potenza di canale è più elevata. Pertanto non dipende dalla lunghezza della tratta. Il guadagno di ciascun amplificatore è regolato per compensare la perdita di trasmissione della sezione immediatamente a monte dell'ampli-

ti gli amplificatori lavorano in regime di saturazione. Pertanto, la potenza di segnale emessa da un amplificatore in linea, ossia la potenza di ingresso in fibra, è uguale per ciascuna sezione. Una sezione comprende N tratti di fibra con diverse lunghezze d'onda a dispersione nulla, che si assumono essere uniformi lungo un tratto. La lunghezza di ciascuna fibra è uguale. Per questa configurazione di sistema, è calcolato il segnale luminoso per FWM a $f_F = f_1 + f_2 - f_3$, in cui f_1 , f_2 ed f_3 sono le frequenze luminose dei segnali trasmessi. Si assume che gli stati di polarizzazione di ciascun segnale luminoso siano uguali per tutta la trasmissione.

Sono date le seguenti notazioni per la configurazione del sistema di cui sopra:

M	Numero di sezioni
N	Numero di fibre in una sezione
L_0	Lunghezza di una fibra
$L = NL_0$	Lunghezza di una sezione
α	Coefficiente di perdita di una fibra
κ	Costante che rappresenta l'efficienza di FWM nella condizione di coincidenza di fase
$E_1^{(in)}$	Campo luminoso ad f_1 all'inizio della fi-

$E_1^{(mn)}$ Campo luminoso ad f_1 all'inizio della fibra n nella sezione m

$E_2^{(mn)}$ Campo luminoso ad f_2 all'inizio della fibra n nella sezione m

$E_3^{(mn)}$ Campo luminoso ad f_3 all'inizio della fibra n nella sezione m

$E_F^{(mn)}$ Campo luminoso di FWM all'inizio delle fibre n nella sezione m

$\beta_1^{(mn)}$ Costante di propagazione per f_1 nella fibra n nella sezione m

$\beta_2^{(mn)}$ Costante di propagazione per f_2 nella fibra n nella sezione m

$\beta_3^{(mn)}$ Costante di propagazione per f_3 nella fibra n nella sezione m

$\beta_F^{(mn)}$ Costante di propagazione per la FWM nella fibra n nella sezione m

$$\Delta\beta^{(mn)} = \beta_1^{(mn)} - \beta_2^{(mn)} - \beta_3^{(mn)} - \beta_F^{(mn)} =$$

$$= -\frac{\pi^4}{c^2} S \cdot \left\{ (f_1 - f_0^{(mn)}) + (f_2 - f_0^{(mn)}) \right\} \times (f_1 - f_3) \cdot (f_2 - f_3)$$

S Pendenza della dispersione

$f_0^{(nm)}$ Frequenza di dispersione nulla della fibra n nella sezione m.

$$\phi_1^{(m)} = \sum_{n=1}^N \beta_1^{(mn)} L_0$$

$$\phi_3^{(m)} = \sum_{n=1}^N \beta_3^{(mn)} L_0$$

$$\phi_F^{(m)} = \sum_{n=1}^N \beta_F^{(mn)} L_0$$

$$\Delta\phi^{(m)} = \Delta\phi_1^{(m)} + \Delta\phi_2^{(m)} + \Delta\phi_3^{(m)} - \Delta\phi_F^{(m)}$$

La potenza di FWM complessiva è:

$$P_{FWM} = \frac{1024\pi^6}{n_0^4 \lambda^2 c^2} (D_\lambda)^2 \frac{P_1 P_2 P_3}{A_{Eff}^2} e^{-\alpha L} \left[\sum_{m=1}^M \exp \left[i \sum_{k=1}^{m-1} \Delta\phi^{(k)} \right] \times \sum_{n=1}^N \exp \left[\sum_{j=1}^{n-1} (-\alpha + i\Delta\beta^{(mj)}) L_0 \right] \times \frac{1 - \exp[(-\alpha + i\Delta\beta^{(mn)}) L_0]}{-\alpha + i\Delta\beta^{(mn)}} \right]^2$$

Normalmente $f_0^{(mn)}$ sono descritte in modello come variabili casuali a distribuzione gaussiana. Pertanto, anche P_{FWM} sarà una variabile casuale la cui distribuzione può essere determinata utilizzando una procedura Montecarlo.

In sistemi DWDM con Nch canali, il $OSNR_{fwm}$ relativo all'm-esimo canale sarà:

$$OSNR_{FWM}^{(m)} = \frac{P^{(m)}}{\sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i+j-k=m \\ i,j \neq k}}^{Nch} P_{fwm}^{(i,j,k)}} \quad m = 1, \dots, Nch$$

in cui:

- $P^{(m)}$ è la potenza dell'm-esimo canale;
- $P_{fwm}^{(i,j,k)}$ è la potenza di FWM generata dall'i-esimo, j-esimo e k-esimo canale, calcolata secondo la formula

$$P_{FWM} = \frac{1024\pi^6}{n_0^4 \lambda^2 c^2} (D_\lambda)^2 \frac{P_1 P_2 P_3}{A_{Eff}^2} e^{-\alpha L} \left[\sum_{m=1}^M \exp \left[i \sum_{k=1}^{m-1} \Delta\phi^{(k)} \right] \right] \times \sum_{n=1}^N \exp \left[\sum_{j=1}^{n-1} (-\alpha + i\Delta\beta^{(mj)}) L_0 \right] \times \frac{1 - \exp [(-\alpha + i\Delta\beta^{(mn)}) L_0]}{-\alpha + i\Delta\beta^{(mn)}} \Big|^2$$

Con riferimento alla figura 7 per il calcolo di $OSNR_{ase}$, ciascun amplificatore ottico genera un rumore ASE secondo la formula:

$$ASE = \frac{1}{2} h f_0 \cdot NF(G-1) M_t B_0$$

in cui:

- ASE è la potenza (W) del rumore per emissione spontanea amplificata;
- h è la costante di Planck (J·s);
- f_0 è la frequenza di lavoro (Hz);
- NF è la cifra di rumore dell'amplificatore ottico;
- G è il guadagno dell'amplificatore ottico;
- M_t è il numero di stati di polarizzazione ($M_t = 1$ o 2);
- B_0 è la larghezza di banda ottica (Hz).

NF e G dipendono dalla lunghezza d'onda e dalla potenza complessiva di ingresso.

La propagazione del segnale e del rumore in un collegamento ottico con amplificatori in linea può essere calcolata secondo le seguenti equazioni:

Propagazione di segnale: $S_i = G_i \{ S_{i-1} - L_i \} - L_i + S_{i-1}$ dBm;

Propagazione di rumore: $N_i = G_i\{S_{i-1}-L_i\}-L_i+N_{i-1}+ASE_i$
dBm; ($i=1, \dots, n$)

in cui:

- S_i è la potenza di canale in dBm a valle dell'amplificatore di linea ottico i -esimo ($i=1, \dots, n-1$);
- S_0 è la potenza di canale in dBm a valle del circuito amplificatore di potenza di alimentazione;
- S_n è la potenza di canale in dBm a valle del preamplificatore finale;
- N_i è la potenza di rumore in dBm a valle dell'amplificatore di linea ottico i -esimo su una larghezza di banda B_0 nell'intorno di un canale ($i=1, \dots, n-1$);
- N_0 è la potenza del segnale di rumore in dBm per canale, generata dal circuito amplificatore di potenza;
- N_n è la potenza di rumore in dBm per canale, a valle del preamplificatore finale;
- ASE_i è il rumore generato dall' i -esimo amplificatore;
- L_i è la perdita dell' i -esima tratta (in dB);
- $G_i\{.\}$ è il guadagno dell' i -esimo amplificatore ottico in dB, in funzione della potenza complessiva di ingresso;

▪ n è il numero di tratte.

Infine:

$$\text{ONSR(dB)} = S_n - N_n.$$

RIVENDICAZIONI

1. Procedimento per determinare la potenza di alimentazione di un sistema di trasmissione ottico WDM comprendente una pluralità di tratte (2, 3, 4) amplificate in sequenza, formanti insieme un collegamento, includente un passo di impostazione della potenza di amplificazione di ciascun amplificatore (9, 10, 11) vicino od allo stesso valore massimo per cui sia il rapporto segnale/rumore ottico dovuto all'emissione spontanea amplificata ($OSNR_{ase}$), sia il rapporto segnale/rumore ottico dovuto all'effetto di four wave mixing ($OSNR_{fwm}$) sono superiori a rispettivi valori di soglia predeterminati al termine del collegamento.

2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, in cui è impiegato un processo iterativo per determinare la potenza di alimentazione massima ottimale che non dà origine ad un tasso di errore di bit elevato in misura inaccettabile.

3. Procedimento per determinare la potenza di alimentazione di un sistema di trasmissione ottico WDM comprendente un collegamento amplificato, includente i passi di:

(a) impostazione della potenza di amplificazione all'inizio del collegamento;

(b) determinazione del rapporto segnale/rumore dovuto all'emissione spontanea amplificata ($OSNR_{ase}$) e del rapporto segnale/rumore ottico dovuto a four wave mixing ($OSNR_{fwm}$) al termine del collegamento;

(c) confronto di $OSNR_{ase}$ ed $OSNR_{fwm}$ con rispettivi valori di soglia predeterminati;

(d) modifica della potenza di amplificazione; e

(e) ripetizione dei passi (b), (c) e (d) fino a che la potenza di amplificazione non è vicino o ad un valore massimo quando sia $OSNR_{ase}$, sia $OSNR_{fwm}$ superano i rispettivi valori di soglia.

4. Procedimento secondo la rivendicazione 3, in cui il collegamento include una pluralità di tratte (2, 3, 4) amplificate in sequenza, ed il passo (d) è effettuato su ciascun amplificatore (9, 10, 11) all'inizio di un collegamento.

5. Procedimento secondo la rivendicazione 4, in cui la potenza amplificata inviata in ciascuna tratta (2, 3, 4) presenta lo stesso valore.

JACOBACCI & PERANI S.p.A.

PER INCARICO



Dott. Francesco SERRA
N. licenz. ALBO 90
(in proprio e per gli altri)

Fig.1

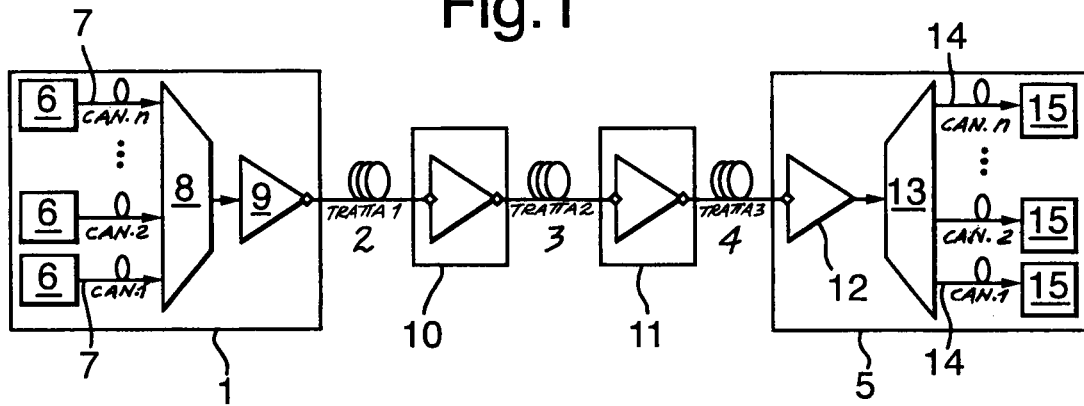


Fig.2

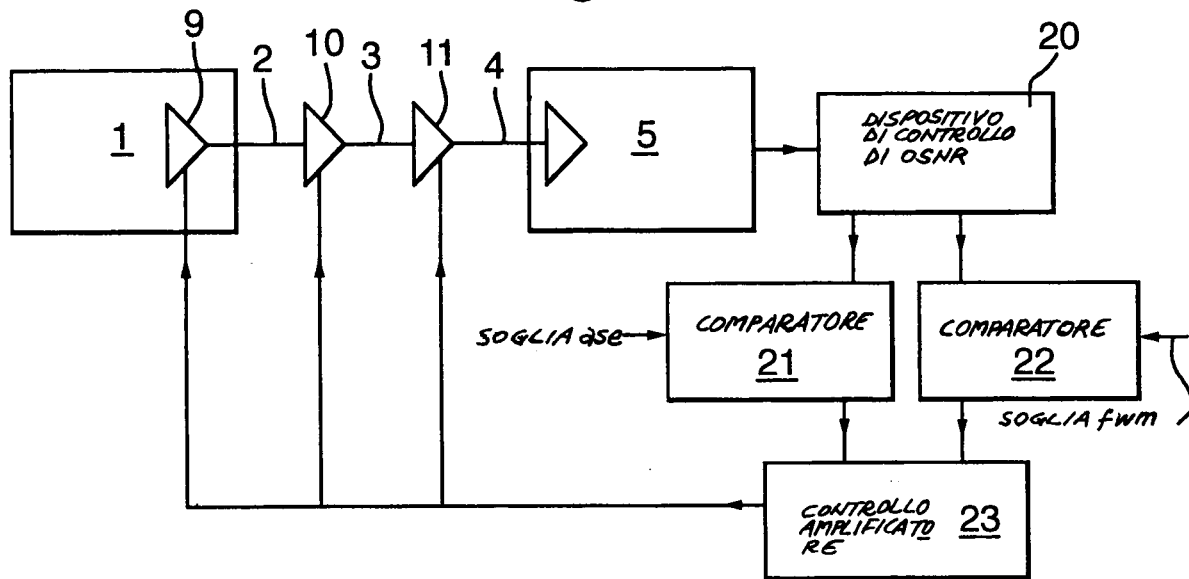


Fig.3

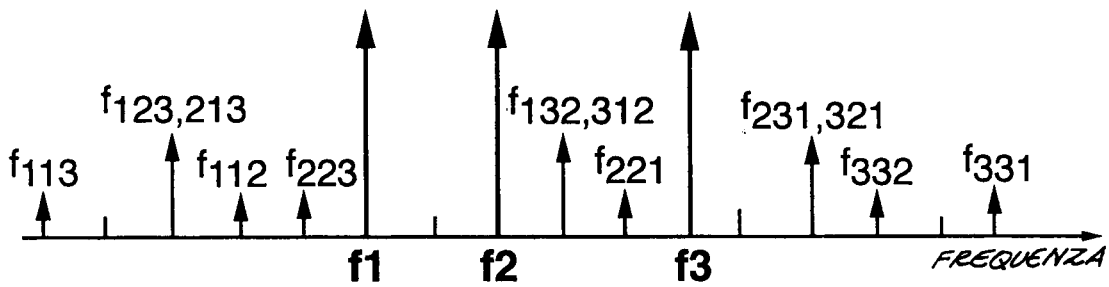
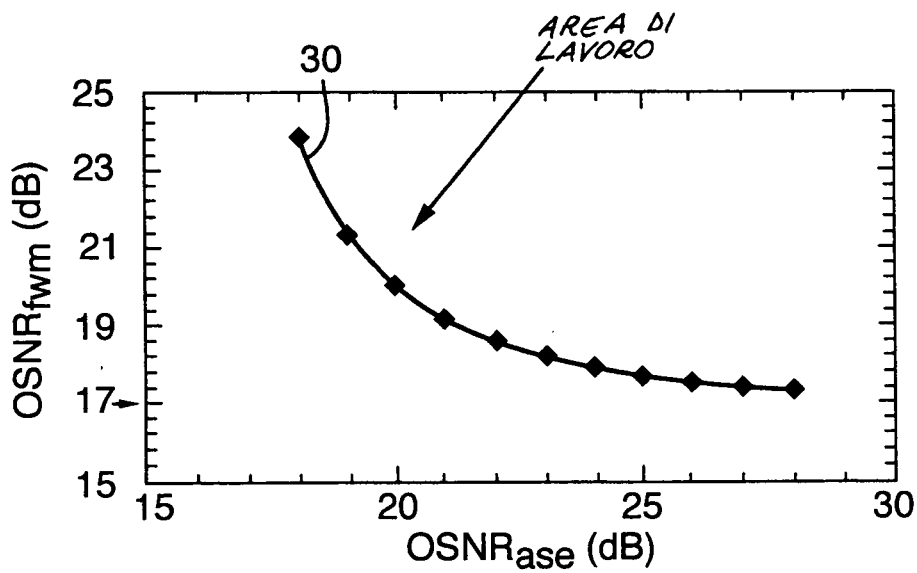


Fig.4
OSNR=17 dB




C.C.I.A.A.
Torino



Fig.5

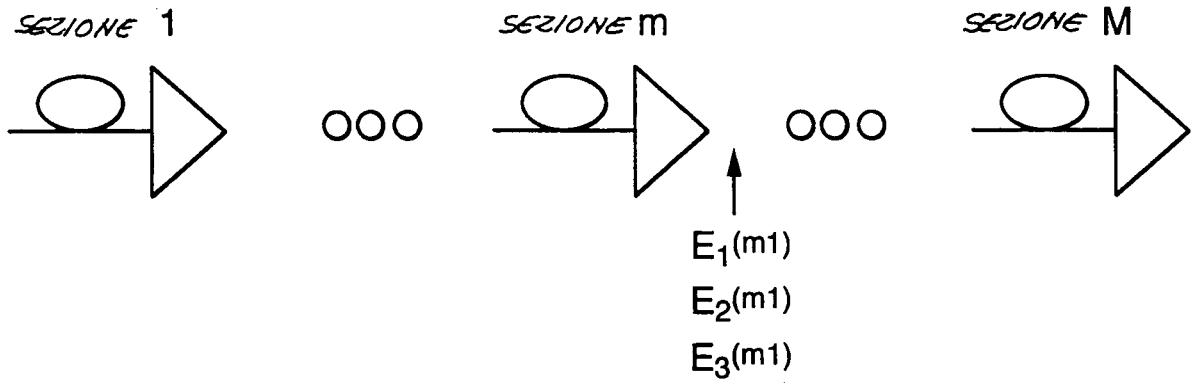


Fig.6

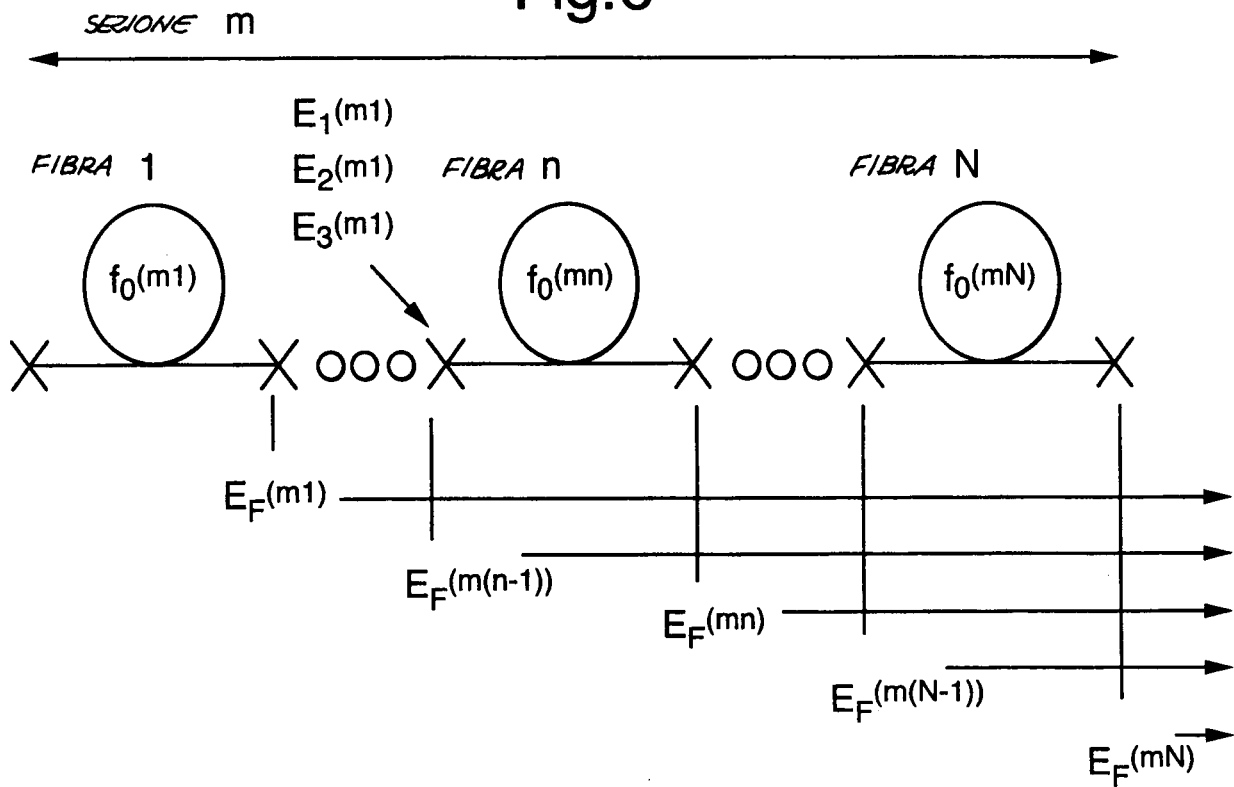
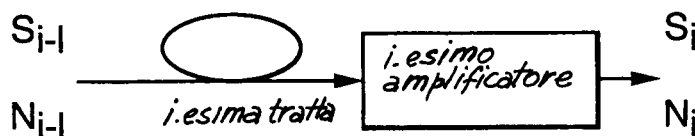


Fig.7



[Handwritten signature]
 C.C.I.A.A.
 Torino

[Handwritten signature]