

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni  
Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria



## Tecniche di modulazione in reti di accesso WDM PON

Relatore:

Ch.mo Prof. Ing. **MARTINELLI Mario**

Correlatrice:

Dott. Ing. **MARAZZI Lucia**

Tesi di laurea di:

**QUAGELLI Chiara**

Matr.: 783287

Anno accademico 2013/2014

# INDICE

Introduzione	1
<b>1 LE RETI DI ACCESSO OTTICHE</b>	<b>5</b>
1.1 Reti di accesso ottiche passive	5
1.1.1 Le reti di accesso TDM PON	6
1.1.2 Le reti di accesso WDM PON	7
1.1.3 Le reti ibride TDM-WDM	9
1.2 Trasmettitori coloreless per le reti WDM PON	11
1.3 La compressione del guadagno	14
1.4 Modulation Averaging Reflector	16
1.5 Circuito di aiuto alla cancellazione	18
<b>2 ANALISI DEL CIRCUITO DI AIUTO ALLA CANCELLAZIONE</b>	<b>19</b>
2.1 La funzione di trasferimento dell'anello risonante	19
2.2 Il modello del circuito di aiuto alla cancellazione	23
2.2.1 Il modello del bit	23
2.2.2 Il modello della sequenza	24
2.2.3 Il metodo di calcolo del rapporto di estinzione	25
2.2.4 Ipotesi semplificative del modello	26
2.3 I risultati delle simulazioni	27
2.3.1 Il rapporto di accoppiamento dell'accoppiatore direzionale	27
2.3.2 La lunghezza dell'anello risonante	31
2.3.3 La lunghezza della fibra	33
2.3.4 Impatto del fattore di roll-off	34
<b>3 RISULTATI SPERIMENTALI</b>	<b>35</b>
3.1 I trasmettitori ottici	35
3.2 Il circuito di aiuto alla cancellazione	40
3.2.1 Sorgente laser DFB modulata esternamente	41

3.2.2 Sorgente laser DML	44
3.2.3 Sorgente ASE filtrata e modulata direttamente	46
3.2.4 Confronto	48
3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione	50
3.3.1 Il livello di rumore nel circuito utilizzando come sorgente il laser DFB	52
3.3.2 Il livello di rumore nel circuito utilizzando come sorgente il laser DML	55
3.3.3 Il livello di rumore nel circuito utilizzando come sorgente lo spettro ASE filtrato	58
3.4 Caratterizzazione sperimentale del RSOA	61
3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB	66
3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML	87
3.7 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente lo spettro ASE filtrato	103
3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio	109
Conclusioni	120
Bibliografia	127

# INDICE DELLE FIGURE

1.1	Topologia di una rete PON.	6
1.2	Struttura di una rete TDM-PON (GPON).	7
1.3	Topologia di una rete WDM PON.	8
1.4	Esempio di fronthaul ottico.	9
1.5	Architettura generica hybrid TDM-WDM PON.	10
1.6	Schema di funzionamento Hybrid TDM-WDM PON.	10
1.7	Schema dell'impiego del circuito di aiuto alla cancellazione in un sistema: a) di seeding esterno; b) di self-seeding.	13
1.8	Risposta in frequenza di un SOA, immagine tratta da [14].	15
1.9	Schema di un trasmettitore self-seeding che impiega il modulation averaging reflector [13].	17
1.10	Schema del circuito di aiuto alla cancellazione.	18
2.1	Modulo della funzione di trasferimento in frequenza del filtro ad anello risonante, al variare del rapporto di accoppiamento.	21
2.2	Fase della funzione di trasferimento in frequenza del filtro ad anello risonante, al variare del rapporto di accoppiamento.	22
2.3	Esempio di modulazione a coseno rialzato, roll-off = 0,3.	24
2.4	Esempio di sequenza modulata a 1 Gb/s.	25
2.5	ER in uscita dal circuito avendo in ingresso un segnale con un ER di 6 dB, al variare della lunghezza dell'anello normalizzata alla lunghezza del bit in fibra, valutato per diversi rapporti di accoppiamento: a) 1/99, 10/90, 20/80; b) 30/70, 50/50, 70/30; c) 80/20, 90/10, 99/1.	28
2.6	ER in uscita dal circuito avendo in ingresso un segnale con un ER di 10 dB, al variare della lunghezza dell'anello normalizzata alla lunghezza del bit in fibra, valutato per diversi rapporti di accoppiamento: a) 1/99, 10/90, 20/80; b) 30/70, 50/50, 70/30; c) 80/20, 90/10, 99/1.	29
2.7	ER in uscita dal circuito avendo in ingresso un segnale con un ER di 13 dB, al variare della lunghezza dell'anello normalizzata alla lunghezza del bit in fibra, valutato per diversi rapporti di accoppiamento: a) 1/99, 10/90, 20/80; b) 30/70, 50/50, 70/30; c) 80/20, 90/10, 99/1.	30
2.8	ER in uscita dal circuito al variare della lunghezza dell'anello normalizzata avendo in ingresso un segnale modulato a a) 1 Gb/s b) 2,5 Gb/s, con ER di 6 dB, 10 dB e 13 dB.	32

2.9	ER in uscita dal circuito al variare di quello in ingresso, modulando il segnale a 1 Gb/s e a 2,5 Gb/s, per un anello di lunghezza 50 cm e un accoppiatore con rapporto di accoppiamento 50/50.	33
2.10	ER in uscita dal circuito al variare di quello in ingresso per diversi valori della fibra impiegata per il collegamento tra anello risonante e specchio.	34
2.11	ER in uscita dal circuito al variare di quello in ingresso per diversi valori del fattore di roll-off.	34
3.1	Spettro ottico del laser DFB.	36
3.2	Spettro ottico del laser DML.	36
3.3	Spettro ottico del rumore ASE generato dal RSOA, a) prima del filtraggio, b) dopo il filtraggio.	37
3.4	Set up utilizzati per i diversi trasmettitori ottici usati nella sperimentazione: a) Laser DFB; b) Laser DML; c) ASE filtrata	39
3.5	Set up utilizzato per la misura dell'ER utilizzando come sorgente un laser DFB modulato esternamente: a) in ingresso al circuito, b) in uscita dal circuito.	42
3.6	ER out vs. ER in con modulazione a 1 Gb/s con segnale ottico ottenuto da modulazione esterna.	42
3.7	ER out vs. ER in con modulazione a 2,5 Gb/s con segnale ottico ottenuto da modulazione esterna.	43
3.8	Set up utilizzato per la misura dell'ER utilizzando come sorgente un laser DML: a) in ingresso al circuito, b) in uscita dal circuito.	44
3.9	ER out vs. ER in con modulazione a 1 Gb/s ottenuto con DML.	45
3.10	ER out vs. ER in con modulazione a 2,5 Gb/s ottenuto con DML.	45
3.11	Set up utilizzato per la misura dell'ER utilizzando come sorgente l'ASE filtrata: a) in ingresso al circuito, b) in uscita dal circuito.	46
3.12	ER out vs. ER in con modulazione a 1 Gb/s ottenuto con sorgente ASE filtrata e modulata direttamente.	47
3.13	ER out vs. ER in con modulazione a 2,5 Gb/s ottenuto con sorgente ASE filtrata e modulata direttamente.	47
3.14	Confronto dell'ER in uscita dal circuito con modulazione a 1 Gb/s.	49
3.15	Confronto dell'ER in uscita dal circuito con modulazione a 2,5 Gb/s.	49
3.16	Set up utilizzati per l'acquisizione degli spettri elettrici: a) all'ingresso del circuito; b) dopo un passaggio nel circuito; c) dopo due passaggi nel circuito.	51
3.17	Spettri del segnale modulato con ampiezza 0,5 V con un trasmettitore costituito da un laser DFB modulato esternamente visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).	53
3.18	Spettri del segnale modulato con ampiezza 1 V con un trasmettitore costituito da un laser DFB modulato esternamente visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).	54

3.19	Spettri del segnale modulato con ampiezza 1,4 V utilizzando come trasmettitore un laser DML visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).	56
3.20	Spettri del segnale modulato con ampiezza 1 V utilizzando come trasmettitore un laser DML visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).	57
3.21	Spettri del segnale modulato con ampiezza 2 Vpp e frequenza 1 Gb/s ottenuti utilizzando come sorgente l'ASE filtrata e modulata direttamente, visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).	59
3.22	Spettri del segnale modulato con ampiezza 1,7 Vpp e frequenza 1 Gb/s ottenuti utilizzando come sorgente l'ASE filtrata e modulata direttamente, visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).	60
3.23	Potenza in uscita dal RSOA in funzione di quella iniettata. Corrente di alimentazione 130 mA.	61
3.24	Set up utilizzato per misurare l'ER a) in un sistema di seeding esterno; b) in un sistema di seeding esterno con circuito di aiuto alla cancellazione.	62
3.25	Esempio di diagramma ad occhio dove è visibile la risposta al gradino del RSOA.	65
3.26	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 5 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA 130 mA.	67
3.27	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 8 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	69
3.28	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 8 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 110 mA b) 100 mA.	70
3.29	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 9 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	71
3.30	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 5 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	72
3.31	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	74
3.32	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 110 mA b) 100 mA.	75
3.33	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 7 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	76

3.34	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 8 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	78
3.35	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 8 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 110 mA b) 100 mA.	79
3.36	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 9 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	80
3.37	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 5 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	81
3.38	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	83
3.39	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 110 mA b) 100 mA.	84
3.40	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 7 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	85
3.41	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro) a parità di ER di ingresso nel RSOA di 5 dB. Sorgente modulata esternamente, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di 130 mA.	86
3.42	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 5 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	89
3.43	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 7 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	90
3.44	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 9 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	91
3.45	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	93

3.46	ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 8 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.	94
3.47	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 5 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	96
3.48	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 7 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	97
3.49	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 9 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	98
3.50	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	100
3.51	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 8 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.	101
3.52	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro) a parità di ER di ingresso nel RSOA di circa 7 dB. Sorgente modulata direttamente, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di 130 mA.	102
3.53	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). RSOA modulato direttamente e filtrato, rapporto di estinzione di 6 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 200 mA b) 180 mA c) 150 mA.	106
3.54	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). RSOA modulato direttamente e filtrato, rapporto di estinzione di 7 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 200 mA b) 180 mA c) 150 mA.	107
3.55	ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). RSOA modulato direttamente e filtrato, rapporto di estinzione di 5 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 200 mA b) 180 mA c) 150 mA.	108
3.56	Set up utilizzati per le misurazioni dei BER, a) senza e b) con il circuito di aiuto alla cancellazione.	110
3.57	Diagrammi ad occhio del segnale a) all'ingresso e all'uscita del RSOA alla potenza di iniezione di b) -16 dBm, c) -10 dBm e d) -2 dBm.	111
3.58	Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, in cui viene iniettato a) una continua di potenza -17 dBm, un segnale modulato esternamente con ER di 9 dB alla potenza b) -16 dBm, c) -10 dBm e d) -2 dBm.	112



- 3.59 Diagrammi ad occhio del segnale filtrato dal circuito e compresso dal RSOA, che ha in ingresso una potenza b) -16 dBm, c) -10 dBm e d) -2 dBm. 113
- 3.60 Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, che ha in ingresso un segnale modulato esternamente con ER di 9 dB, con circuito di aiuto alla cancellazione. Potenza iniettata nel RSOA: a) -16 dBm, b) -10 dBm e c) -2 dBm. 113
- 3.61 BER al variare della potenza iniettata nel RSOA e a potenza ricevuta costante di -17 dBm, con il circuito di aiuto alla cancellazione (in azzurro) e senza circuito (in verde). ER del segnale in ingresso di 9 dB. 115
- 3.62 Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, che ha in ingresso un segnale modulato esternamente con ER di 9 dB, con circuito di aiuto alla cancellazione. Potenza iniettata nel RSOA: a) -16 dBm, b) -10 dBm e c) -5 dBm. Utilizzato un filtro in ricezione. 116
- 3.63 BER al variare della potenza iniettata nel RSOA e a potenza ricevuta costante di -17 dBm, con circuito di aiuto alla cancellazione, con (in verde) e senza (in azzurro) filtro in ricezione. 117
- 3.64 Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, che ha in ingresso un segnale modulato esternamente con ER di 5 dB. Potenza iniettata nel RSOA: a) -22 dBm, b) -15 dBm e c) -8 dBm. Utilizzato un filtro in ricezione. 118
- 3.65 Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, che ha in ingresso un segnale modulato esternamente con ER di 5 dB, con circuito di aiuto alla cancellazione. Potenza iniettata nel RSOA: a) -22 dBm, b) -15 dBm e c) -8 dBm. Utilizzato un filtro in ricezione. 118
- 3.66 BER al variare della potenza iniettata nel RSOA e a potenza ricevuta costante di -12 dBm, con il circuito di aiuto alla cancellazione (in azzurro) e senza circuito (in verde) e con filtro in ricezione. ER del segnale in ingresso di 5 dB. 119

# INDICE DELLE TABELLE

3.1	Perdite del set up relativo alla misurazione dell'ER in uno schema di seeding esterno.	64
3.2	Perdite di inserzione misurate sperimentalmente del circolatore ottico a quattro porte.	64

# ABSTRACT

Questo lavoro si inserisce nel contesto di trasmettitori colorless a basso costo per reti di accesso ottiche passive a divisione di lunghezza d'onda, per i quali è necessario migliorare la cancellazione della modulazione iniettata in downstream in un amplificatore ottico a semiconduttore (RSOA), che opera la rimodulazione del segnale in upstream. Obiettivi di questo lavoro di tesi sono stati l'analisi, il progetto, la realizzazione e la caratterizzazione sperimentale di un circuito ottico di aiuto alla cancellazione, composto da un anello risonante e da uno specchio. Tale circuito riduce il rapporto di estinzione del segnale di downstream impiegato per il seeding del RSOA, migliorando la cancellazione della modulazione sul segnale di downstream operata dal RSOA e, di conseguenza, le prestazioni del segnale rimodulato in upstream. Il circuito può essere utilizzato in uno schema di seeding esterno o, utilizzando uno specchio rotatore di Faraday, in uno schema di self-seeding. È stato realizzato un modello del circuito, impiegato per la progettazione della lunghezza dell'anello risonante e il rapporto di accoppiamento dell'accoppiatore. L'efficacia del circuito è stata sperimentalmente provata in un sistema di seeding esterno, misurando la variazione della compressione del rapporto di estinzione del segnale operata da un RSOA prodotta dall'inserimento del circuito nel sistema. A questo scopo sono stati realizzati tre trasmettitori con caratteristiche spettrali differenti: un laser distributed feedback (DFB) modulato esternamente, un laser a modulazione diretta (DML) e una fetta di emissione spontanea amplificata (ASE) filtrata. I tre trasmettitori sono stati fatti operare in condizioni differenti in modo da ottenere rapporti di estinzione variabili da 5 dB a 9 dB e alimentando l'RSOA a correnti variabili tra 100 mA e 200 mA. Le misurazioni sono state effettuate sul segnale alle frequenze di cifra di 1 Gb/s e di 2,5 Gb/s ottenendo risultati soddisfacenti, confermati dalla misura del tasso di errore sul segnale in upstream rimodulato dal RSOA, in cui è stato iniettato il segnale in downstream.

# INTRODUZIONE

Le sfide per le reti di accesso di prossima generazione sono diverse da un lato offrire la capacità necessaria a sostenere l'incremento del traffico dati, dall'altro proporre una crescita di capacità modulare nel tempo. Attualmente, le reti di accesso ottiche installate in campo sono principalmente del tipo Gigabit Passive Optical Network (G-PON), una tipologia di rete gestita in modalità Time Division Multiplexing (TDM). Anche la standardizzazione per le reti di prossima generazione (Next Generation Passive Optical Network -NGPON2) si è mossa in questa direzione favorendo soluzioni ibride, realizzate a partire da soluzioni TDM unite a schemi a divisione di lunghezza d'onda. Queste soluzioni, dette Wavelength Division Multiplexing (WDM) PON, consentono una gestione efficiente della banda a disposizione grazie all'uso di più lunghezze d'onda che instaurano dei collegamenti punto-punto virtuali su cui è possibile, in principio, portare grandi flussi di dati gestiti a divisione di tempo. Per questo motivo l'interesse per la topologia WDM PON è molto alto e se ne valuta l'applicazione, ad esempio, in appoggio alle reti mobili per il fronthaul.

Rispetto alla soluzione TDM, la soluzione WDM PON appare più costosa perché l'elemento di moltiplicazione e demoltiplicazione è più costoso del semplice accoppiatore a stella, che svolge la stessa funzione nella GPON. Il tema dei costi è determinante nel definire la possibilità che la soluzione WDM PON trovi applicazione, è quindi necessario che questo tipo di rete sia il più semplice ed economica possibile. Questo risultato va ricercato, innanzitutto, utilizzando dispositivi di trasmissione colorless, che permettono di impiegare ONU identici per ogni utente. I trasmettitori impiegati non devono avere associata alcuna lunghezza d'onda, ma devono potersi colorare autonomamente secondo la necessità.

Le soluzioni possibili descritte in letteratura per raggiungere questo obiettivo sono riconducibili a tre tipologie di trasmettitori. Tra queste, vi sono i laser sintonizzabili in lunghezza d'onda, che però presentano ancora costi piuttosto elevati.

Una seconda soluzione consiste nell'utilizzare una sorgente ottica esterna destinata alla sintonizzazione delle sorgenti collocate all'ONU, tipicamente laser Fabry-Pérot

(FP) o Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOA). La radiazione di sintonia può essere in continua, collocata spettralmente in una banda differente dal segnale di downstream, che dal central office (CO) raggiunge le singole ONU. Tuttavia si realizza un maggiore sfruttamento della banda a disposizione se per la sintonia delle ONU viene utilizzato lo stesso segnale di downstream (DS), eliminando la sorgente ottica esterna. Questo schema è detto di seeding esterno. In questo caso il segnale in downstream viene rimodulato con i dati di upstream, dopo essere stato ripulito della modulazione precedente attraverso una cancellazione effettuata dal RSOA, che opera nella regione di saturazione del guadagno.

Recentemente è stata proposta anche una soluzione che consiste nel realizzare il trasmettitore ONU sfruttando una porzione della rete di accesso. In questa topologia, detta di self-seeding, si determina una cavità risonante tra l'ONU e il nodo remoto (RN): l'emissione del RSOA viene retro-riflessa da uno specchio collocato al RN e rinviata all'ONU, auto-sintonizzando il componente. In questo schema, come per il seeding esterno, l'RSOA gioca un ruolo chiave, funzionando da elemento di guadagno che sostiene la cavità risonante, da modulatore diretto attraverso la propria corrente e da cancellatore della modulazione ricircolante nella cavità, che deve essere rimossa prima di poter operare una efficace rimodulazione.

Sia nello schema di seeding esterno che nello schema self-seeding, le prestazioni sono fortemente influenzate dalla presenza di modulazione residua del canale di downstream, ovvero dell'efficacia della cancellazione operata dal RSOA. Tale efficacia dipende da molti fattori, tra cui la potenza iniettata nel RSOA, la frequenza di cifra del segnale da cancellare, e anche dal rapporto di estinzione del segnale in ingresso. Questo ha suggerito la possibilità di migliorare le prestazioni in US abbattendo il rapporto di estinzione del segnale, prima che questi giunga al RSOA.

Il problema della riduzione del rapporto di estinzione del segnale iniettato nel RSOA allo scopo di migliorare la qualità della successiva rimodulazione è stato recentemente affrontato in modo originale utilizzando quello che viene definito modulation averaging reflector. Lo scopo di questo componente è quello di espandere l'energia di un bit del segnale ottico incidente su quanti più bit possibili, riflettendo, contemporaneamente, la quasi totalità della potenza ottica. Per ottenere questa funzione di media, viene utilizzato un riflettore formato da una sequenza di specchi collocati su di una guida d'onda. È stato dimostrato che il modulation

averaging reflector media le oscillazioni di potenza ottica legata alla modulazione, riducendo la varianza del segnale e migliorando le prestazioni di cancellazione del RSOA e, di conseguenza, aumentando il rapporto di estinzione del segnale in upstream. Questa soluzione appare estremamente interessante, anche se all'interno della configurazione per la quale viene proposta, ovvero la soluzione a cavità risonante self-seeding, presenta un significativo problema legato alla presenza di riflettori multipli. Infatti è stato dimostrato che nello schema di self-seeding la gestione dell'evoluzione della polarizzazione nella cavità risonante passa attraverso l'uso di uno specchio rotatore di Faraday e delle sue proprietà rintracciati. Nel caso dell'inserimento del modulation averaging reflector non è però possibile utilizzare le proprietà dello specchio rotatore di Faraday.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è la proposta e l'analisi teorica e sperimentale di un circuito di aiuto alla cancellazione. Il circuito proposto e realizzato sperimentalmente è composto da un filtro ad anello risonante che, sommando continuamente in potenza al segnale una sua versione ritardata e attenuata, ne abbatta il rapporto di estinzione, e da uno specchio, che può essere uno specchio rotatore di Faraday. Il circuito proposto sarà sperimentato in uno schema di seeding esterno, ma può essere impiegato in uno schema di self-seeding con specchio rotatore di Faraday.

Nel primo capitolo sono brevemente descritte le principali architetture di reti ottiche d'accesso passive, che usano le tecniche a divisione di tempo e a divisione di lunghezza d'onda. È quindi proposta una breve presentazione della soluzione ibrida TDM-WDM PON. Per quanto riguarda le reti WDM PON, è riportata una breve descrizione delle diverse soluzioni di trasmettitori colorless presenti in letteratura. Viene quindi descritto il funzionamento del RSOA all'interno di un sistema di seeding esterno, dove svolge un duplice ruolo: cancella la modulazione del segnale ricevuto e modula il segnale nella direzione di trasmissione, attraverso la modulazione diretta della corrente di alimentazione. Viene infine presentata la soluzione proposta in letteratura per aiutare la cancellazione nel RSOA in una topologia di self-seeding basata sul modulation averaging reflector. Viene quindi illustrato il circuito di aiuto alla cancellazione analizzato in questo lavoro di tesi.

Nel secondo capitolo viene proposta l'analisi del circuito di aiuto alla cancellazione, ponendo particolare attenzione alla funzione di trasferimento in frequenza dell'anello risonante. Viene quindi illustrato il modello utilizzato per realizzare delle simulazione

del comportamento del circuito. In particolare, vengono descritti i modelli utilizzati per la realizzazione del singolo bit e della sequenza dati, il metodo usato per il calcolo del rapporto di estinzione del segnale e le semplificazioni adottate nel modello. Sono infine presentati i risultati delle simulazioni, che sono state effettuate per definire due parametri fondamentali del circuito: il rapporto di accoppiamento dell'accoppiatore direzionale e la lunghezza dell'anello risonante. Quest'ultimo parametro, in particolare, è stato scelto in modo da garantire buone prestazioni del circuito in risposta ad un segnale modulato alla frequenze di cifra sia di 1 Gb/s che di 2,5 Gb/s. Nel terzo capitolo viene presentata l'attività sperimentale svolta. Inizialmente, vengono descritte le tre sorgenti ottiche utilizzate: il laser distributed feedback (DFB) a modulazione esterna, il laser a modulazione diretta (DML) e lo spettro di emissione spontanea amplificata (ASE) filtrato. Queste sorgenti presentano proprietà di coerenza differenti e permettono quindi di analizzare l'effetto del circuito di aiuto alla cancellazione su segnali con lunghezza di coerenza sia minore che maggiore rispetto alla lunghezza dell'anello risonante. Viene quindi presentata la valutazione sperimentale della riduzione del rapporto di estinzione del segnale operata dal circuito proposto, per le tre diverse sorgenti e alle due frequenze di cifra considerate. Questi risultati sono poi confrontati con quelli ottenuti dalle simulazioni. Successivamente, viene valutato l'innalzamento del livello del rumore operato dal circuito, attraverso gli spettri elettrici del segnale all'uscita del circuito. In seguito, è presentata la caratterizzazione del guadagno del RSOA utilizzato per la sperimentazione. Vengono quindi analizzati la compressione del rapporto di estinzione operata dal RSOA in un sistema di seeding esterno su segnali generati utilizzando le tre diverse sorgenti ottiche e l'effetto del circuito su tale compressione. Sono infine presentati i risultati delle misure di BER del segnale rimodulato dal RSOA e i relativi diagrammi ad occhio. Da ultimo, sono tratte le conclusioni sul lavoro svolto e vengono brevemente presentati i possibili sviluppi dell'attività.

# CAPITOLO 1

## LE RETI DI ACCESSO

## OTTICHE

### 1.1 Reti ottiche di accesso passive

---

L'incremento del traffico internet, generato dalla diffusione massiva di applicazioni ad uso intensivo di banda, rende sempre più necessario l'aumento della capacità complessiva a disposizione di ogni utente. Ad esempio, nel rapporto Visual Networking Index Forecast, rilasciato recentemente da CISCO, si prevede che entro il 2015 il numero dei dispositivi connessi alla rete superi i 15 miliardi e che il traffico globale di internet sia quadruplicato rispetto al 2010 [1].

La soluzione ovvia per venire incontro a queste nuove esigenze degli utenti è un migliore sfruttamento della rete di accesso ottica. Attualmente, le reti di accesso ottiche installate in campo sono principalmente del tipo Gigabit Passive Optical Network (G-PON), una tipologia di rete gestita in modalità Time Division Multiplexing (TDM). L'interesse della ricerca si è però spostato verso soluzioni differenti, che consentono, attraverso lo sfruttamento di un ulteriore grado di libertà, rappresentato dalla lunghezza d'onda, una gestione più efficiente della banda a disposizione, ovvero le Wavelength Division Multiplexing (WDM) PON. Tuttavia, gli enti di standardizzazione [2] hanno recentemente stabilito che la soluzione per l'accesso



## 1.1 Reti ottiche di accesso passive

ottico residenziale di prossima generazione sarà piuttosto basata su di uno schema a divisione di tempo con soluzioni ibride, Hybrid PON, dove la multiplazione viene effettuata sia sul piano temporale che su quello delle lunghezze d'onda.

Con l'obiettivo di chiarire il contesto in cui si inserisce questo lavoro di tesi, nel seguito verranno brevemente descritte le topologie di rete TDM, WDM e Hybrid PON. Sarà anche illustrato un esempio di nuova applicazione delle reti WDM nella connettività mobile.

### 1.1.1 Le reti di accesso TDM PON

La figura 1.1 mostra la topologia classica di una rete PON a “doppia stella ottica”. La rete di distribuzione ottica è suddivisa in due tratti, uno primario e uno secondario, connessi da un Nodo Remoto (RN), dove è posto l'elemento di distribuzione. Quest'ultimo è passivo ed in particolare consiste in un accoppiatore di potenza a stella con diversi rapporti di accoppiamento [3]. Ogni unità di rete (Optical Network Unit - ONU) è connessa attraverso la fibra di drop, o di distribuzione, al nodo remoto, a sua volta connesso, mediante la fibra feeder, all'Optical Line Terminal (OLT).

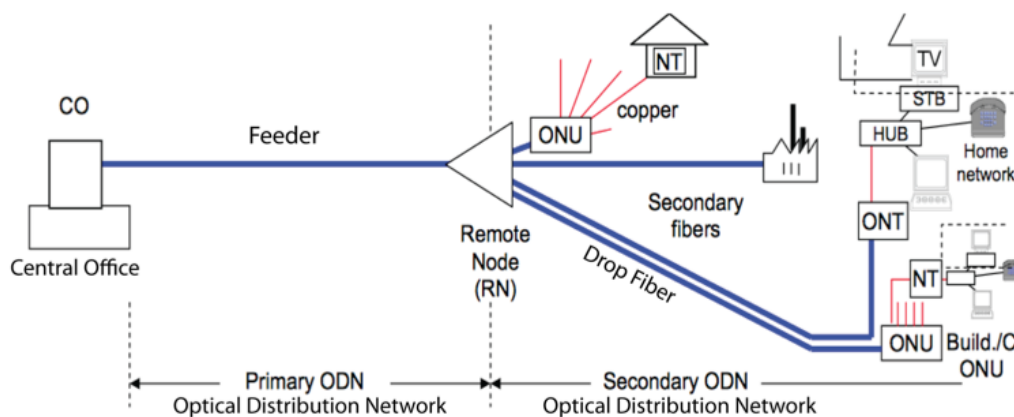


Figura 1.1 - Topologia di una rete PON.

In figura 1.2 è illustrata la struttura di una rete TDM PON. Il segnale di downstream (DS), generato dalla OLT, viene distribuito dal nodo remoto ad ognuna delle ONU della rete, le quali prelevano solo il segnale dello slot temporale loro assegnato. Il ricevitore ONU opera, quindi, in modalità burst. Nella stessa modalità opera il trasmettitore ONU. Per quanto riguarda la trasmissione in upstream (US), infatti, ogni

## 1.1 Reti ottiche di accesso passive

ONU può trasmettere solo nell'intervallo temporale che gli viene assegnato. I vantaggi delle soluzioni a divisione di tempo sono legati al basso costo dei componenti ed in particolare dei RN passivi, che non richiedono manutenzione e alimentazione. Non mancano, comunque, alcuni svantaggi legati al multiplexing temporale, come la necessità di sincronizzazione e di protocolli ad hoc per la gestione della temporizzazione. Il numero di utenti serviti, ovvero il numero di ONU, è limitato dal budget di potenza del collegamento, ovvero, in ultima analisi, dalla sua lunghezza. Il numero di utenti, infatti, determina il necessario rapporto di accoppiamento dello splitter, che distribuisce il segnale suddividendolo in potenza. Inoltre, la banda ottica assegnata al singolo utente è definita e limitata dal numero di utenti, dal momento che è costituita dalla banda ottica messa a disposizione dal singolo canale divisa per il numero di utenti serviti [4]. Anche se alcune bande ottiche sono occupate da servizi diversi, va osservato che questa soluzione non sfrutta completamente le possibilità offerte dalla banda ottica della fibra e non risulta, quindi, completamente efficiente.

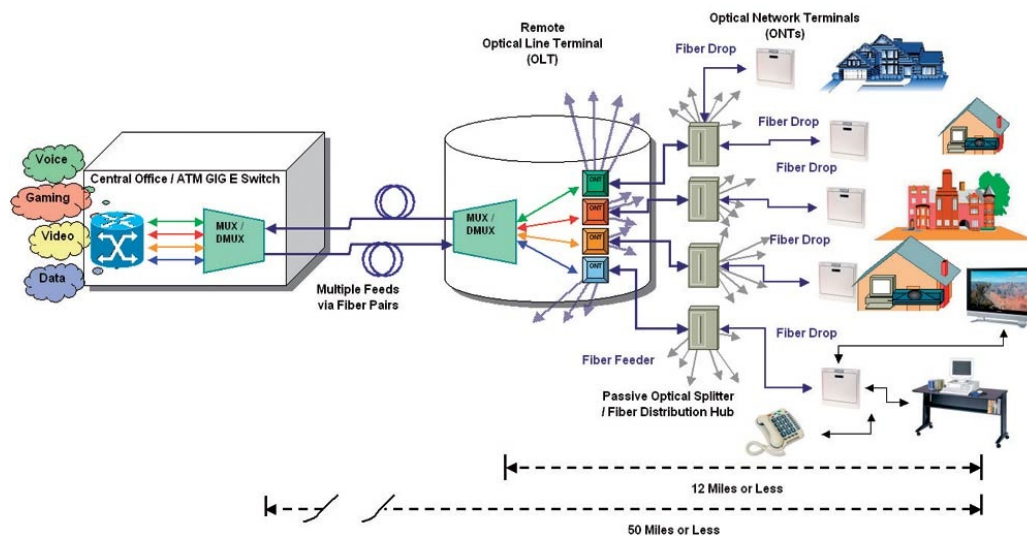


Figura 1.2 - Struttura di una rete TDM-PON (GPON).

### 1.1.2 Le reti di accesso WDM PON

Più efficiente appare la rete di tipo ottico passiva a divisione di lunghezza d'onda (WDM PON). In figura 1.3 è riportato l'esempio più semplice di una topologia PON basata su moltiplicazione e demoltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda. La

## 1.1 Reti ottiche di accesso passive

multiplazione e la demultiplazione avvengono al nodo remoto e al Central Office (CO). In direzione downstream, l'OLT utilizza un insieme di trasmettitori con diverse lunghezze d'onda multiplate su di un'unica fibra, fino al nodo remoto. Qui vi è l'elemento di demultiplazione sensibile alla lunghezza d'onda, ovvero l'Arrayed Waveguide Grating (AWG). In questa topologia, l'AWG sostituisce lo splitter passivo, offrendo diversi vantaggi. Sono, infatti, possibili distanze e rapporti di suddivisione maggiori, poiché non è necessario suddividere la banda e la potenza tra gli utenti. Nella direzione di upstream, il RN accoppia le varie lunghezze d'onda sulla fibra di feeder per inviarle all'OLT, dove sono demultiplate da un altro AWG che invia il segnale agli opportuni ricevitori. Nelle reti WDM PON s'instaura una connessione virtuale punto-punto (P2P) tra ogni ONU e il relativo ricevitore all'OLT e tra ogni trasmettitore all'OLT e il relativo ONU. Ogni ONU utilizza in esclusiva le risorse di banda di una sola lunghezza d'onda. In linea di principio, la capacità che può essere affidata alla singola lunghezza d'onda è molto elevata, anche superiore ai 10 Gb/s.

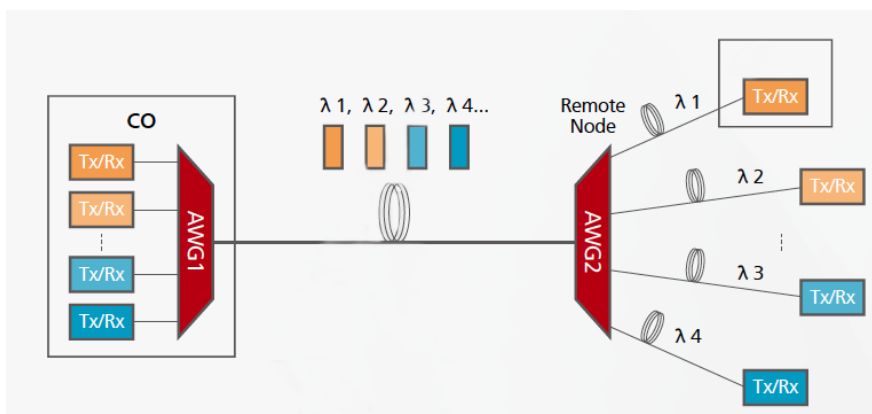


Figura 1.3 - Topologia di una rete WDM PON.

In generale, la soluzione WDM PON pone il problema di un elevato investimento iniziale, rispetto alla G-PON classica. In particolare, il demultiplexer è più costoso e complesso e i ricetrasmittitori ottici che operano con specifiche lunghezze d'onda, definiti "colored optical transceivers", ne aumentano la complessità e i costi, a causa della necessità di selezionare la corretta lunghezza d'onda. Il tema dei costi è determinante nel definire la possibilità che questa soluzione trovi applicazione, è quindi necessario rendere questo tipo di rete il più semplice ed economica possibile. Questo risultato può essere ottenuto innanzitutto utilizzando dispositivi di trasmissione "colorless", che permettono di impiegare ONU identici per ogni utente.

## 1.1 Reti ottiche di accesso passive

Benché la topologia WDM PON sia stata messa da parte dalle scelte compiute dagli enti di standardizzazione per soluzioni di tipo residenziale, a favore di soluzioni ibride, che verranno brevemente illustrate nel prossimo paragrafo e che sono però basate sullo schema a divisione di tempo, questa topologia può rappresentare una soluzione concreta per nuove applicazioni che vanno emergendo in relazione, ad esempio, all'accesso mobile. Si parla di fronthaul per la porzione di rete che conetterà le Remote Radio Head (RRH), poste vicino alle antenne, e le Base Band Unit (BBU), poste nelle Base Station (BS), come mostrato nell'esempio in figura 1.4. Questa porzione di rete potrà essere gestita, ad esempio, con lo standard Common Public Radio Interface (CPRI), che ha dei requisiti molto stringenti in termini di bassa latenza, sincronismo e simmetria nei bit rate in upstream e downstream (0,6-10 Gb/s). Queste caratteristiche si possono ottenere collegando in fibra ottica le RRH e le BBU, ad esempio con una topologia WDM PON.

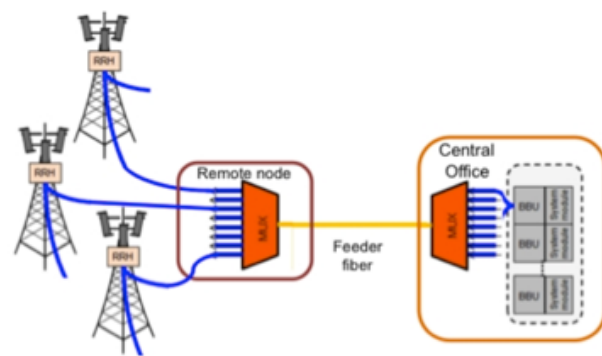


Figura 1.4 - Esempio di fronthaul ottico.

### 1.1.3 Le reti ibride TDM-WDM

Come già anticipato, le sfide per le reti di accesso di prossima generazione (NGAN) sono molteplici: da un lato offrire la capacità necessaria a sostenere l'incremento di traffico, dall'altro proporre una crescita di capacità modulare nel tempo. Un punto fondamentale è quello garantire la compatibilità con le architetture di reti già installate, che operano in modalità TDM. Per questo motivo, la standardizzazione delle NGAN si è mossa verso reti ibride, gestite in modalità TDM e WDM.

La Hybrid TDM-WDM è una soluzione ibrida che offre alta banda disponibile ed efficienza energetica, combinando i vantaggi di sistemi WDM e TDM e

## 1.1 Reti ottiche di accesso passive

incrementando le prestazioni della TDM-PON a livello di scalabilità. Lo sviluppo di questa architettura comporta nuovi sforzi, sia in termini di trasmettitori che di protocolli di controllo.

Nelle figure 1.5 e 1.6 sono mostrati, rispettivamente, l'architettura e lo schema di funzionamento di un sistema ibrido TDM-WDM PON. Questa architettura ibrida permette di destinare una singola lunghezza d'onda ad un gruppo di utenti connessi, mediante sistema TDM-PON, alla centrale. Ogni sistema TDM-PON sfrutta una differente lunghezza d'onda. Il risultato è un incremento del numero di utenti raggiungibili, ovvero un aumento della capacità totale della rete. Un punto critico da affrontare nella realizzazione di tale sistema riguarda la scelta del trasmettitore da porre nelle varie ONU, che necessita di un allineamento accurato con una specifica griglia DWDM per le lunghezze d'onda da utilizzare. Come per le WDM PON, la soluzione ottima risulta l'utilizzo di ONU colorless.

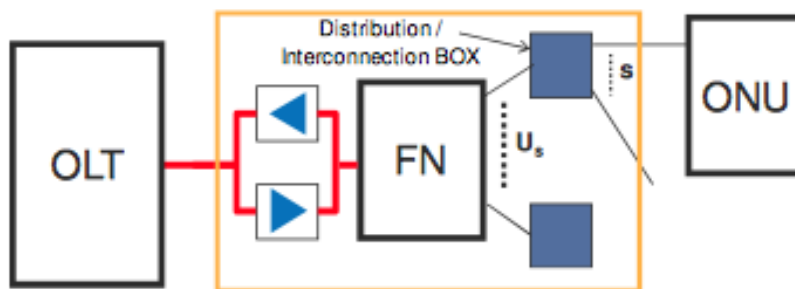


Figura 1.5 - Architettura generica hybrid TDM-WDM PON.

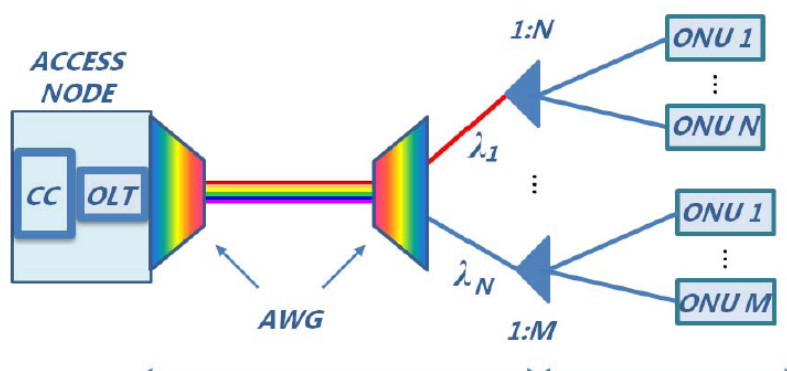


Figura 1.6 - Schema di funzionamento Hybrid TDM-WDM PON.

## 1.2 Trasmettitori colorless per le reti WDM PON

---

Uno dei punti cruciali per la riduzione dei costi di ognuna delle topologia illustrate nei paragrafi precedenti, ed in particolare delle WDM PON, è l'utilizzo di ONU uguali per ogni utente. Devono quindi essere utilizzati trasmettitori colorless, ovvero trasmettitori che non devono avere associata alcuna lunghezza d'onda, ma devono potersi colorare autonomamente secondo la necessità. Le soluzioni possibili per raggiungere questo obiettivo sono diverse.

La prima e più immediata soluzione è rappresentata da un laser sintonizzabile in lunghezza d'onda, che disponga cioè di un meccanismo di controllo della sintonia, che consenta, attraverso un segnale esterno, di colorare il trasmettitore. I costi di questo tipo di trasmettitore sono elevati. Tuttavia, la ricerca è molto attiva in questo campo con l'obiettivo di rendere economicamente vantaggiosa la loro applicazione all'accesso ottico [5].

La seconda soluzione consiste nell'utilizzare una sorgente ottica esterna destinata alla sintonizzazione delle sorgenti collocate all'ONU. Per la sintonia si possono impiegare sia sorgenti coerenti, come pettini di lunghezze d'onda correttamente spaziate [6], sia sorgenti a larga banda [7-8] filtrate al nodo remoto dal demultiplexer in lunghezza d'onda. La sorgente di sintonizzazione remota è posta nell'OLT, da dove viene trasmessa. All'OLT, l'AWG instrada le singole lunghezze d'onda all'ONU opportuna, nel caso di pettine di canali, oppure affetta la sorgente a banda larga, inviando all'ONU una sezione con larghezza a metà altezza (FWHM) corrispondente al FWHM dell'AWG. Il segnale di sintonia raggiunge l'ONU, dove è collocato il dispositivo da sintonizzare. Ad esempio, un laser Fabry-Pérot (FP) multimodo che, in seguito all'iniezione, si sintonizzi per injection locking [9]. Al posto del Fabry-Pérot, è anche possibile usare dei Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOA), che riflettono e amplificano il segnale di sintonia [10]. Queste soluzioni presentano, tuttavia, alcuni problemi legati alla presenza della radiazione di sintonia alla stessa lunghezza d'onda del segnale di upstream sulla fibra feeder, ovvero il tratto di fibra tra la OLT e il nodo remoto, dove si verificano delle retroriflessioni distribuite [11]. Inoltre, si richiede che i canali di downstream siano collocati ad una diversa lunghezza d'onda rispetto ai canali in upstream.

## 1.2 Trasmettitori colorless per le reti WDM PON

Un'altra soluzione, che sfrutta meglio la banda a disposizione, è quella di realizzare uno schema di riuso della lunghezza d'onda, in modo da eliminare la sorgente ottica esterna. In questo caso, viene rimodulato il segnale in DS con i dati di US, dopo essere stato ripulito della modulazione precedente. La lunghezza d'onda del segnale in DS viene impiegata per effettuare un seeding in lunghezza d'onda del RSOA posto ad ogni ONU. L'RSOA opera nella regione di saturazione del guadagno, in modo tale che l'effetto di compressione dell'ampiezza possa essere sfruttato al fine di cancellare la modulazione di DS. Il segnale ottico amplificato in uscita dal RSOA ha una lunghezza d'onda identica a quello giunto dal canale di DS e può essere quindi direttamente modulato con i dati di upstream.

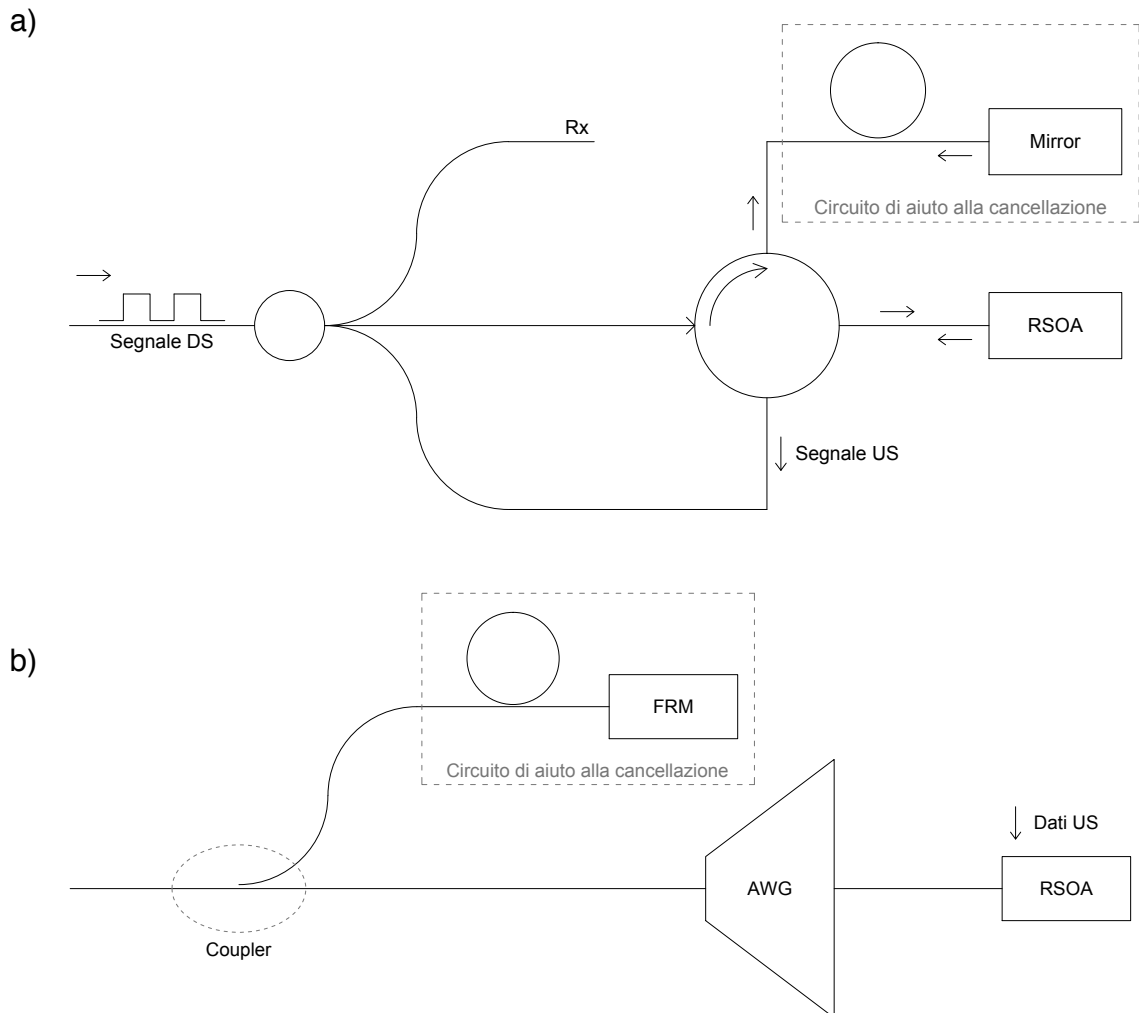
Recentemente è stata proposta anche una soluzione che consiste nel realizzare il trasmettitore ONU sfruttando una porzione della rete di accesso, costituita dal RN, dalla drop fiber e dall'ONU. In questa soluzione, detta di self-seeding, si determina una cavità risonante tra l'ONU e il RN: l'emissione del RSOA viene retro-riflessa da uno specchio collocato al RN e rinviata all'ONU, sintonizzando il componente con la sua stessa radiazione retro-riflessa. L'RSOA in questo schema ha la funzione di sostenere come elemento di guadagno la cavità, di modulare il segnale attraverso la modulazione diretta della corrente e di cancellare la modulazione che ricircola nella cavità prima di imprimerne una nuova.

Sia in uno schema a seeding esterno, che in uno self-seeding, le prestazioni del canale di US possono essere notevolmente compromesse dalla presenza di una modulazione residua d'intensità: nel caso di uno schema di seeding esterno è necessario infatti ripulire la modulazione del segnale di sintonia iniettato, nel caso di uno schema di self-seeding è necessario cancellare la modulazione ricircolante nella cavità. Allo scopo di garantire una più soddisfacente rimozione di questa modulazione sono state proposte in letteratura diverse soluzioni, tra cui l'uso di formati di modulazione ortogonali [12] e l'impiego di modulation averaging reflector [13].

Nel corso di questo lavoro di tesi verrà proposto l'impiego, all'interno di un sistema di seeding esterno, di un circuito di aiuto alla cancellazione per la riduzione del rapporto di estinzione (ER) del segnale da cancellare, in modo da favorire la cancellazione che viene poi operata dal RSOA, come si vede in figura 1.7a. Questo circuito, che verrà presentato nei prossimi paragrafi, può essere utilizzato anche in uno schema di

## 1.2 Trasmettitori colorless per le reti WDM PON

self-seeding come si vede in figura 1.7b. L'idea alla base del circuito proposto, come si vedrà, è mutuata dalle proposte presenti in letterature basate sul modulation averaging reflector, che pure verrà presentato brevemente.





## 1.3 La compressione del guadagno

---

Come accennato, il Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOA) svolge un duplice ruolo all'interno di un sistema di seeding esterno: cancella la modulazione del segnale ricevuto e modula il segnale nella direzione di trasmissione, attraverso la modulazione diretta della corrente di alimentazione. L'entità della cancellazione, ovvero la riduzione del rapporto di estinzione in ingresso, dipende da vari fattori, tra cui i principali sono: l'ER della modulazione in ingresso, la corrente di alimentazione del RSOA, la potenza del segnale in ingresso e la frequenza di cifra del segnale.

Un'analisi approfondita del funzionamento del SOA è stata proposta, tra gli altri, da Sato in [14]. La funzione di trasferimento del SOA è data dalla 1.1, dove  $\omega$  è la pulsazione,  $G_{CW}$  il guadagno dell'amplificatore in continua,  $G_0$  il guadagno non saturato e  $\tau_c$  il tempo di vita dei portatori.

$$X(\omega) = G_{CW} \frac{1 + \frac{\ln(G_0/G_{CW})}{G_{CW}-1} - i\omega\tau_c}{1 + G_{CW} \frac{\ln(G_0/G_{CW})}{G_{CW}-1} - i\omega\tau_c} \quad (1.1)$$

La risposta in frequenza del SOA è definita come  $|X(\omega)|^2$ , che dà la risposta in frequenza della potenza in uscita dal SOA alla modulazione della potenza in entrata. Un grafico schematico della risposta in frequenza è riportato in figura 1.8. A frequenze alte, la risposta è piatta e proporzionale al guadagno di potenza in continua. La profondità di modulazione del segnale in uscita è data da 1.2.

$$m_0 = m_{in} \frac{|X(\omega)|}{G_{CW}} \quad (1.2)$$

La profondità di modulazione, ovvero il rapporto di estinzione, è, quindi, conservata a frequenze alte, mentre viene ridotta a basse frequenze. La luce modulata modifica il guadagno perché influenza la densità dei portatori nel SOA. Questo effetto, chiamato self-gain modulation, non si verifica ad alte frequenze perché limitato dal tempo di vita dei portatori. La frequenza alla quale la profondità di modulazione diventa  $(1/\sqrt{2})m_{in}$ , corrispondente a -3 dB di potenza elettrica, è data da 1.3, dove  $b$  è definito dalla formula 1.4. Valori tipici di  $f_c$  sono compresi tra 1 GHz e 2 GHz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_c} \sqrt{G_{CW}^2 b^2 + 2G_{CW}b - 2b^2 - 4b - 1} \quad (1.3)$$

### 1.3 La compressione del guadagno

$$b = \frac{\ln(G_0/G_{CW})}{G_{CW} - 1} \quad (1.4)$$

Il rapporto  $m/m_{in}$  fornisce la misura dell'efficienza di riduzione, mentre la larghezza di banda è limitata da  $f_c$ . La profondità di modulazione quando la frequenza è vicina allo zero è data da 1.5.

$$m_0 = m_{in} \frac{1 + b}{1 + G_{CW}} \quad (1.5)$$

Nel caso di non saturazione del guadagno, ovvero quando  $G_0$  è uguale a  $G_{CW}$ ,  $m_0=m_{in}$ . Al decresce dal guadagno in continua, diminuisce anche il rapporto di profondità di modulazione  $m_0/m_{in}$ . Il SOA agisce da filtro passa alto.

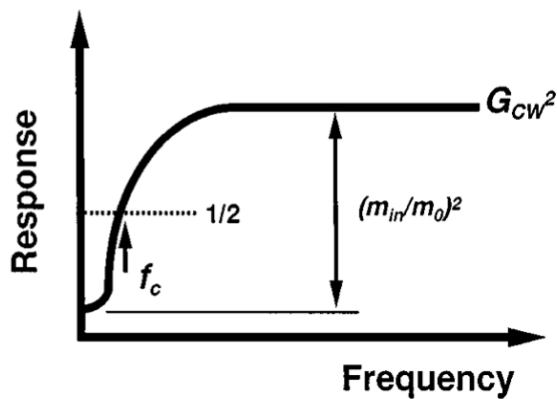


Figura 1.8 - Risposta in frequenza di un SOA, immagine tratta da [14].

## 1.4 Modulation Averaging Reflector

---

Come visto nel paragrafo 1.3, la riduzione della profondità di modulazione operata dal RSOA saturato dipende dal rapporto di estinzione del segnale in ingresso. Questo ha suggerito la possibilità di migliorare le prestazioni in US abbattendo il rapporto di estinzione del segnale, prima che questi giunga al RSOA.

Il problema della riduzione del rapporto di estinzione del segnale iniettato nel RSOA allo scopo di migliorare la qualità della successiva rimodulazione è stato recentemente affrontato in modo originale da Komljenović et al [13], utilizzando quello che viene definito modulation averaging reflector. Uno schema del trasmettitore WDM preso in esame è riportato in figura 1.9. Si tratta di una tipica topologia self-seeding, in cui lo specchio collocato vicino all'AWG è sostituito da un modulation averaging reflector, che abbatte il rapporto di estinzione del segnale che ricircola nella cavità.

Lo scopo di questo componente è quello di espandere l'energia di un bit del segnale ottico incidente su quanti più bit possibili, riflettendo, contemporaneamente, la quasi totalità della potenza ottica. Per ottenere questa funzione di media, viene proposto un riflettore formato da una sequenza di  $n$  specchi collocati su di una guida d'onda. Di questi, i primi  $n-1$  specchi sono semitrasparenti, mentre l'ultimo ha una riflettività idealmente unitaria.

È stato dimostrato che il modulation-averaging reflector media le oscillazioni di potenza ottica legata alla modulazione riducendo la varianza del segnale, e converte la funzione di densità di probabilità (PDF) delle ampiezze in una distribuzione quasi normale. Considerando un riflettore ideale senza perdite, con risposta all'impulso  $h(k)$ , e un flusso di bit incidente di ampiezza  $x(k)$ , composto da bit indipendenti che assumono i valori 0 e 1 con uguale probabilità, l'uscita  $s(k)$  dal riflettore è data dalla convoluzione tra  $h(k)$  e  $x(k)$ , come in 1.6, dove il passaggio è giustificato dall'indipendenza dei bit.

$$s(k) = \sum_{i=0}^{\infty} h(i)x(k-i) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(k) \quad (1.6)$$

Si può dimostrare che al crescere del numero di specchi si riduce la varianza di  $s(k)$  in uscita dal riflettore e la PDF del prodotto  $h(k)x(k)$  converge ad una distribuzione

## 1.4 Modulation Averaging Reflector

normale. In ultima analisi, il modulation averaging reflector, convertendo la PDF del segnale in DS in una distribuzione quasi normale, migliora le prestazioni di cancellazione del RSOA e di conseguenza l'ER del segnale in upstream.

Questa soluzione appare estremamente interessante anche se all'interno della configurazione per la quale viene proposta, ovvero la soluzione a cavità risonante self-seeding di cui si è detto nel paragrafo 1.2, presenta un significativo problema legato alla gestione dell'evoluzione della polarizzazione nella cavità risonante. Infatti, all'interno della cavità risonante self-seeding non è possibile controllare l'evoluzione dello stato di polarizzazione del segnale ricircolante: la cavità può arrivare ad avere lunghezza di qualche chilometro e la birifrangenza della fibra perturba in modo imprevedibile lo stato di polarizzazione del segnale che ricircola. Questo può comportare significative penalità per il trasmettitore a causa del fatto che gli RSOA, come pure i laser FP, presentano un guadagno fortemente dipendente dalla polarizzazione del segnale. A questo problema è stata data soluzione attraverso l'impiego delle proprietà rintraccianti dello specchio rotatore di Faraday (FRM) [15-16] che garantisce che, indipendentemente dalle perturbazioni subite dal segnale, esso si presenterà al RSOA (o al FP) con stato di polarizzazione ortogonale rispetto a quello di lancio. Attraverso l'inserimento di un opportuno rotatore di Faraday si ottiene la successiva rotazione dello stato di polarizzazione del segnale in modo da allinearlo al corretto asse del componente. Nel caso dell'inserimento del modulation averaging reflector non è però possibile utilizzare le proprietà dello specchio rotatore di Faraday, perché sono presenti numerosi riflettori che definiscono altrettanti cammini ottici che hanno evoluzione della polarizzazione indipendente l'uno dall'altro.

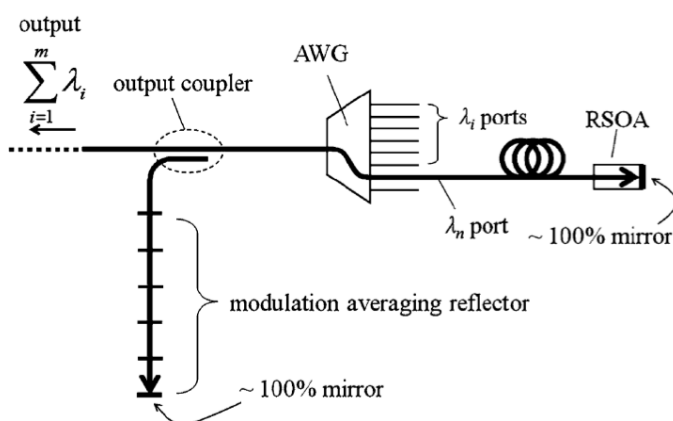


Figura 1.9 - Schema di un trasmettitore self-seeding che impiega il modulation averaging reflector [13].

## 1.5 Circuito di aiuto alla cancellazione

---

L'obiettivo della riduzione del rapporto di estinzione può essere perseguito consentendo nel contempo il controllo dello stato di polarizzazione del segnale. Questo può avvenire sfruttando l'idea delle retroriflessioni multiple ottenute però dai cammini multipli, virtualmente infiniti, all'interno di un circuito risonante ad anello. La presenza di uno specchio esterno, che può essere uno specchio rotatore di Faraday nel caso in cui il circuito sia inserito in una topologia di self-seeding, garantisce che ognuno dei cammini sia rintracciato in polarizzazione assicurando al bisogno il controllo dello stato di polarizzazione del segnale. Lo schema del circuito proposto, realizzato e sperimentato in questo lavoro di tesi, è illustrato in figura 1.10. Il circuito è composto da un filtro ad anello risonante che, sommando continuamente, in potenza, al segnale una sua versione ritardata e attenuata, ne abbatta il rapporto di estinzione, e da uno specchio.

Nel prossimo capitolo sarà proposta una modellizzazione e un'analisi effettuata attraverso simulazioni in Matlab del comportamento in frequenza del filtro ad anello risonante, grazie a cui si procederà alla progettazione del circuito studiato in questo lavoro di tesi.

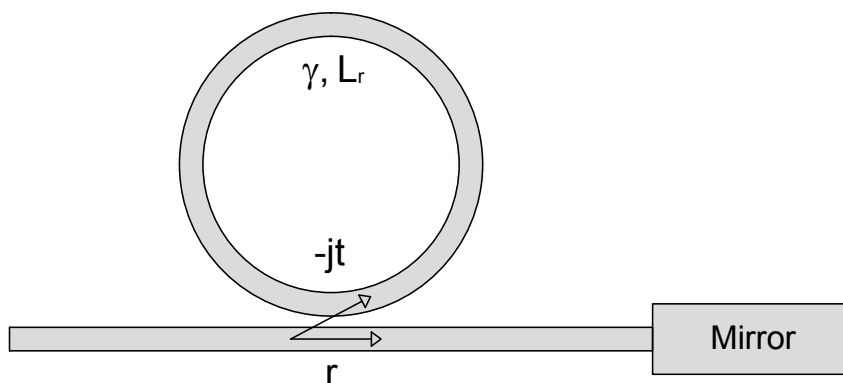


Figura 1.10 - Schema del circuito di aiuto alla cancellazione.

# CAPITOLO 2

## ANALISI DEL CIRCUITO DI AIUTO ALLA CANCELLAZIONE

### 2.1 La funzione di trasferimento dell'anello risonante

---

Inizialmente, si è proceduto ad analizzare la funzione di trasferimento in frequenza del filtro ad anello risonante al variare del rapporto di accoppiamento dell'accoppiatore. Come spiegato nel paragrafo 1.5, tale anello realizza i cammini multipli delle repliche del segnale che si sommano al segnale principale deteriorandone il rapporto di estinzione.

Come è noto, un anello risonante connesso ad un fibra con un solo accoppiatore è un filtro passa tutto, ovvero uno sfasatore. La sua funzione di trasferimento si calcola ponendo in cascata le matrici dei vari blocchi elementari, oppure, più semplicemente, si possono sommare tutti i contributi che concorrono all'uscita [17]. Nell'ipotesi di anello di lunghezza  $L_r$ , accoppiatore compreso, e perdite per giro pari a  $\gamma$ , la relazione tra ingresso e uscita è data dalla formula 2.1, dove  $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ .

$$H_t = r - \gamma t^2 e^{-j\beta L_r} \left( 1 + r\gamma e^{-j\beta L_r} + \dots \right) = \frac{r - \gamma e^{-j\beta L_r}}{1 - \gamma r e^{-j\beta L_r}} \quad (2.1)$$

## 2.1 La funzione di trasferimento del filtro ad anello risonante

Lo sfasamento  $\phi(\omega)$  indotto ha un andamento non lineare con la frequenza, dato dalla formula 2.2.

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{t^2 \sin(\beta L_r)}{2r - (1 + r^2) \cos(\beta L_r)} \right) \quad (2.2)$$

La condizione di risonanza si ha quando la luce compie un numero intero di lunghezze d'onda nell'anello, cioè quando:  $\beta L_r = 2m\pi$ , dove  $m$  è un numero intero detto ordine di risonanza. La funzione di trasferimento è quindi periodica in frequenza con un Free Spectral Range (FSR) dato dalla formula 2.3, dove  $n_g$  è l'indice di gruppo.

$$FSR = \frac{c}{n_g L_r} \quad (2.3)$$

Imponendo la condizione di risonanza nella 2.1, si ottiene un altro parametro utile, il ritardo di gruppo alla risonanza, dato dalla 2.4, dove  $T$  è il tempo di percorrenza dell'anello.

$$\tau_g = T \left( \frac{\gamma}{\gamma - r} + \frac{\gamma r}{1 - \gamma r} \right) \quad (2.4)$$

Utilizzando un codice Matlab, sono stati quindi analizzati il modulo e la fase della funzione di trasferimento dell'anello risonante applicando la 2.1 e usando i seguenti parametri:  $n_{\text{eff}} = 1,5$ ,  $L_r = 3$  cm,  $\gamma = 1$  dB/giro. Questo valore in realtà non è dovuto alla perdita attesa dalla sola fibra, ma riassume insertion losses dell'accoppiatore e perdite per giunzione. Sono stati presi in considerazione i principali rapporti di accoppiamento disponibili in laboratorio o realisticamente reperibili: 99/1, 90/10, 80/20, 70/30, 50/50 e viceversa. In figura 2.1 è illustrato il modulo della funzione di trasferimento per i diversi rapporti di accoppiamento presi in considerazione. Come si vede il modulo, idealmente unitario, presenta uno stretto *notch* alla risonanza causato dalle perdite. Inoltre si nota l'aumento della perdite di inserzione all'aumentare del rapporto di accoppiamento utilizzato. Dai grafici in figura 2.2, dove è riportata la fase della funzione di trasferimento, si nota l'andamento non lineare dello sfasamento indotto dall'anello risonante. Per rapporti di accoppiamento alti, alla risonanza si ha uno sfasamento pari a  $2\pi$ , e un andamento, all'interno di un periodo, che tende ad essere lineare aumentando il rapporto di accoppiamento. Per rapporti

## 2.1 La funzione di trasferimento del filtro ad anello risonante

di accoppiamento bassi, invece lo sfasamento indotto è inferiore, fino a diventare quasi nullo per il rapporto 1/99.

Inoltre, dal grafico del modulo della funzione di trasferimento, appare evidente che il punto di lavoro in lunghezza d'onda corrisponde al centro della banda passante del filtro, dove le perdite di inserzione sono minime. Le valutazioni che seguono nei prossimi paragrafi sono condotte sotto queste ipotesi.

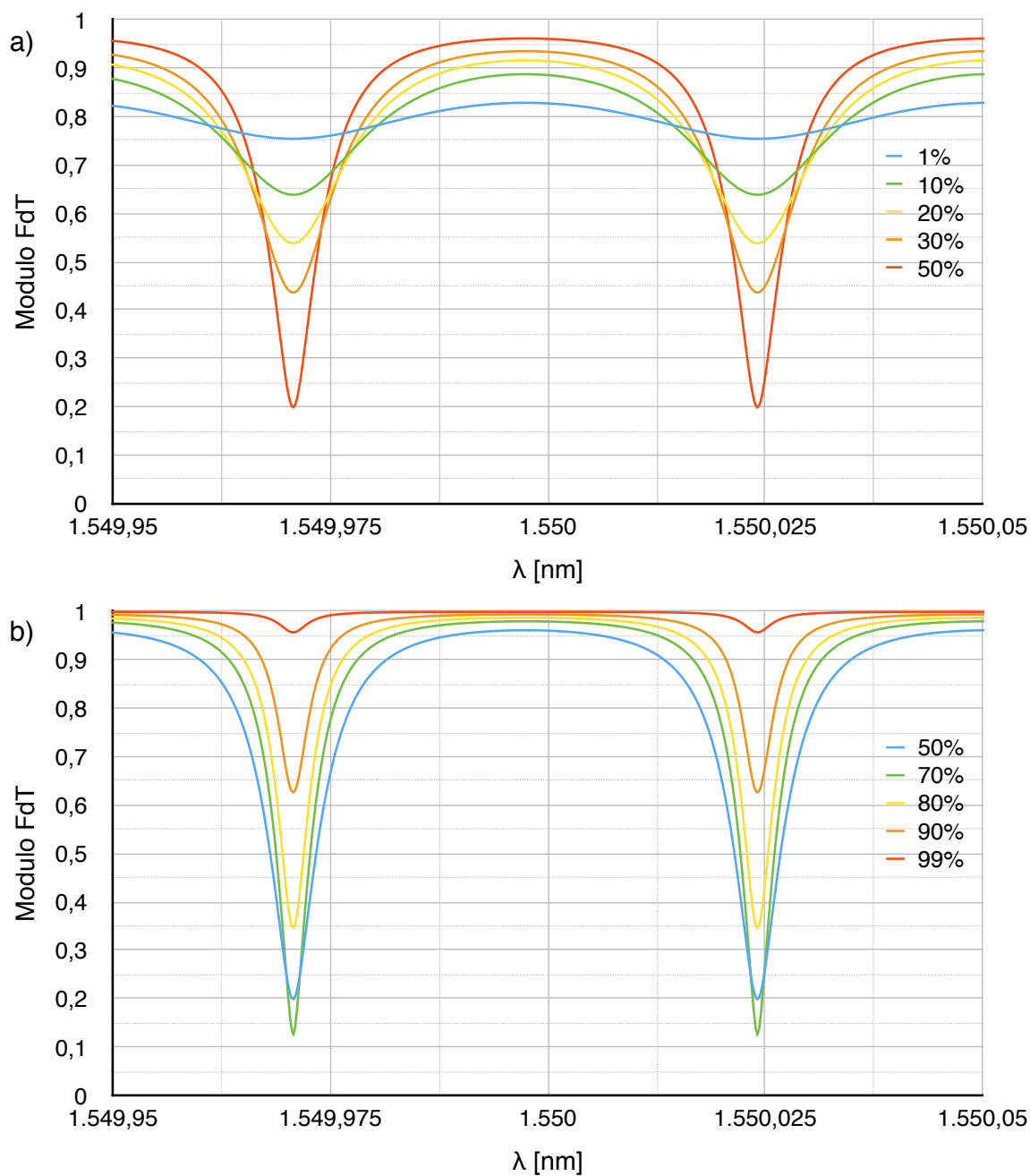


Figura 2.1 - Modulo della funzione di trasferimento in frequenza del filtro ad anello risonante, al variare del rapporto di accoppiamento.



## 2.1 Il modello del circuito di aiuto alla cancellazione

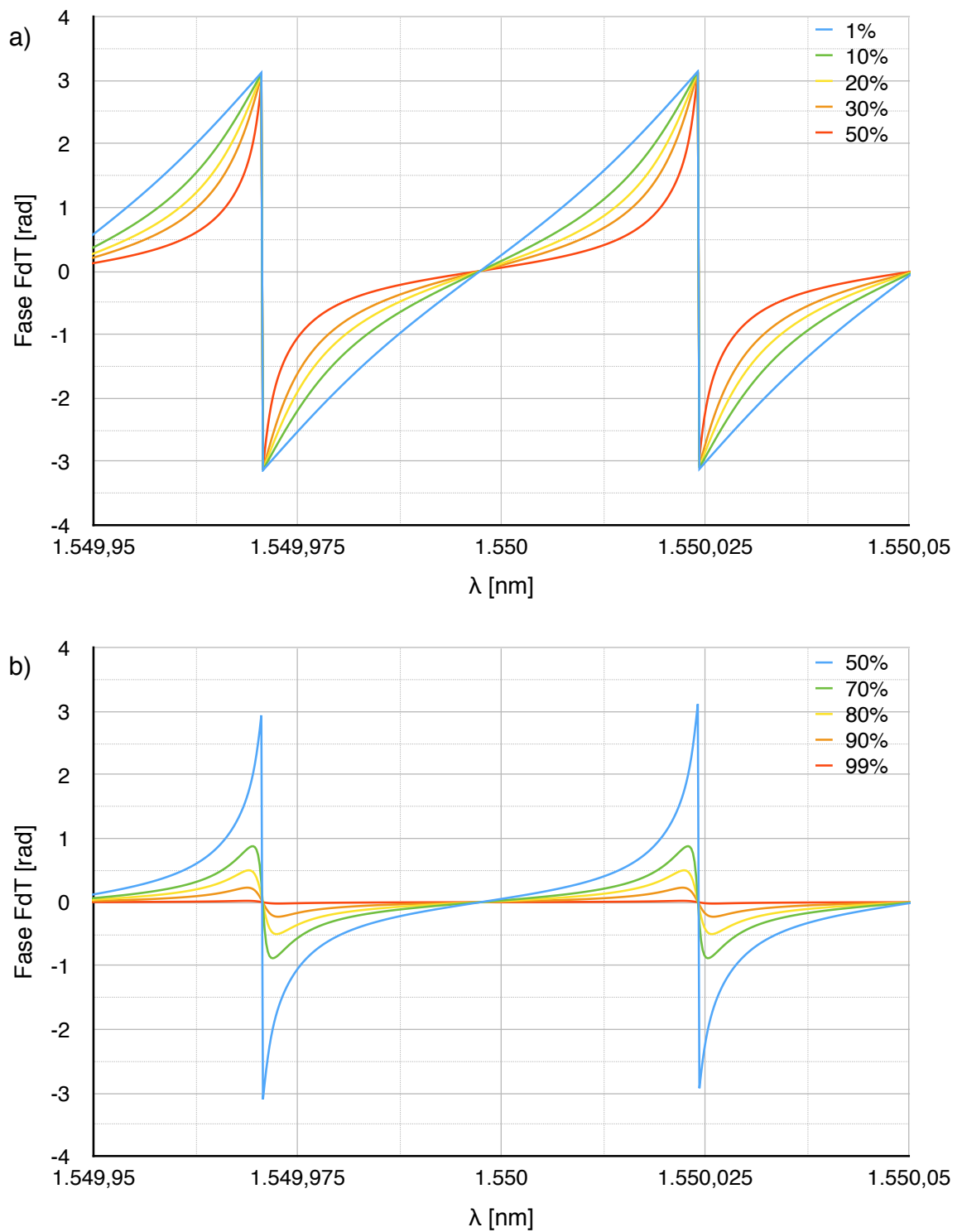


Figura 2.2 - Fase della funzione di trasferimento in frequenza del filtro ad anello risonante, al variare del rapporto di accoppiamento.

## 2.2 Il modello del circuito di aiuto alla cancellazione

---

Utilizzando Matlab, sono state effettuate diverse simulazioni, al fine di ottimizzare alcuni parametri del circuito, in particolare il rapporto di accoppiamento dell'accoppiatore e la lunghezza dell'anello risonante. I risultati delle simulazioni sono stati poi confrontati con quelli ottenuti durante l'attività sperimentale presentata nel capitolo 3.

Partendo dall'analisi in frequenza del filtro ad anello risonante, è stato calcolato il segnale  $y(k)$  in uscita dal filtro, come trasformata inversa (IDFT) del prodotto tra la trasformata discreta di Fourier (DFT) della sequenza  $x(k)$  e la funzione di trasferimento  $H_t$ , come riportato nella formula 2.5

$$y(k) = IDFT(DFT(x(k)) \cdot H_t) \quad (2.5)$$

Nel seguito verrà descritto il modello utilizzato per realizzare le simulazioni: la costruzione del bit e della sequenza, il metodo impiegato per calcolare il rapporto di estinzione e le non idealità di cui non si è tenuto conto nella modellizzazione effettuata.

### 2.2.1 Il modello del bit

Per la forma del singolo è stato utilizzata una modulazione a coseno rialzato, utilizzando la formula 2.6, dove  $T$  è il tempo di simbolo, pari all'inverso della frequenza di cifra, e  $\beta$  il fattore di roll-off. È stato usato un fattore di roll-off di 0,3 e un tempo di simbolo variabile a seconda della frequenza di cifra considerata. L'impatto del fattore di roll-off scelto sui risultati delle simulazioni verrà verificato successivamente, e sarà discusso nel paragrafo 2.3.4.

$$h(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi\beta t}{T}\right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}} \quad (2.6)$$

Il bit è stato successivamente filtrato con un filtro gaussiano, per rendere meno ripidi i margini della modulazione, utilizzando la funzione *gauss2mf*. Per modellare ogni bit sono stati impiegati 128 punti, facendo variare la distanza temporale tra i punti per

## 2.2 Il modello del circuito di aiuto alla cancellazione

ottenere modulazioni a frequenza di cifra diverse. La figura 2.3 riporta un esempio di modulazione a coseno rialzato.

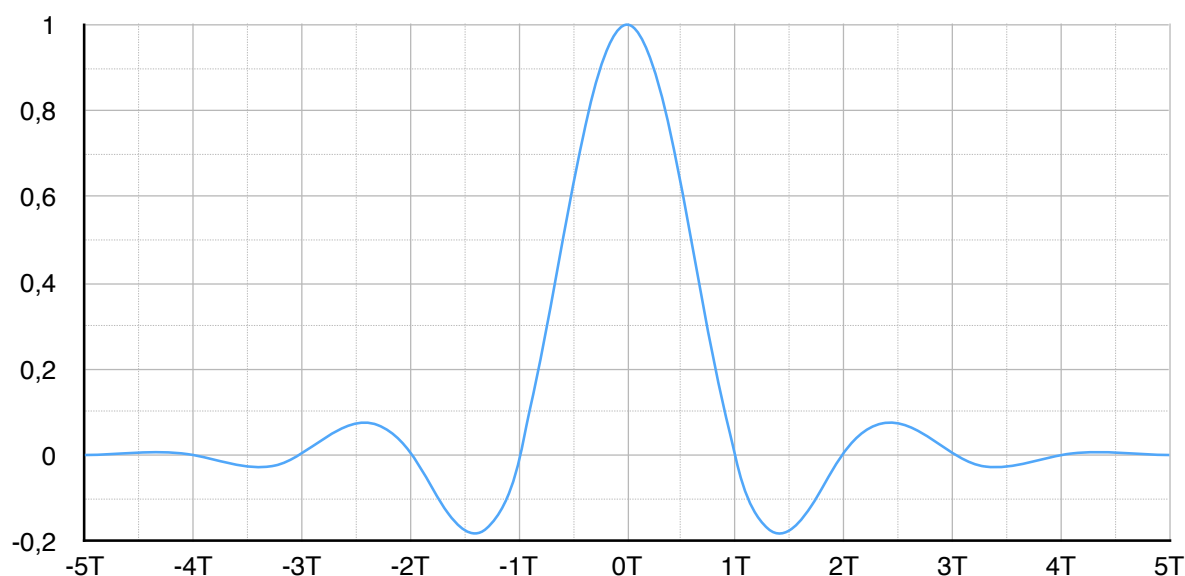


Figura 2.3 - Esempio di modulazione a coseno rialzato, roll-off = 0,3.

### 2.2.2 Il modello della sequenza

Al fine di realizzare la sequenza dati desiderata, è stata, per prima cosa, generata una sequenza Pseudo Random Bit Sequence (PRBS) di 128 bit, utilizzando la funzione *idinput* con i seguenti parametri: lunghezza 128, tipo PRBS, banda [0,1] e livelli [0,1]. In seguito, è stato modulato il singolo bit a coseno rialzato, utilizzando due ampiezze di modulazione differenti, rispettivamente per i bit 1 e per i bit 0. Le ampiezze sono state scelte in modo da avere una potenza media dei bit 1 corrispondente a 1 e una potenza media relativa ai bit 0 variabile a seconda del rapporto di estinzione in ingresso desiderato. Infine, la sequenza in ingresso è stata originata sommando i bit, traslati temporalmente nella posizione opportuna. Un esempio di sequenza modulata a 1 Gb/s è riportato in figura 2.4.

Si è posta la necessità di sincronizzare la sequenza in ingresso a quella in uscita dal circuito, al fine di calcolarne il rapporto di estinzione definendo un centro temporale del bit anche quando la struttura temporale del bit non è più riconoscibile. Il meccanismo di sincronizzazione è stato ottenuto utilizzando un impulso iniziale di ampiezza molto maggiore rispetto all'ampiezza massima del segnale e collocando

## 2.2 Il modello del circuito di aiuto alla cancellazione

una serie di zeri tra l'impulso e la sequenza e dopo la sequenza. La sincronizzazione viene quindi effettuata tramite il riconoscimento del punto di massimo. La serie di zeri serve affinché le repliche dell'impulso di sintonizzazione prodotte dal passaggio nell'anello risonante non si sovrappongano, se non in modo estremamente attenuato, alla sequenza modulata.

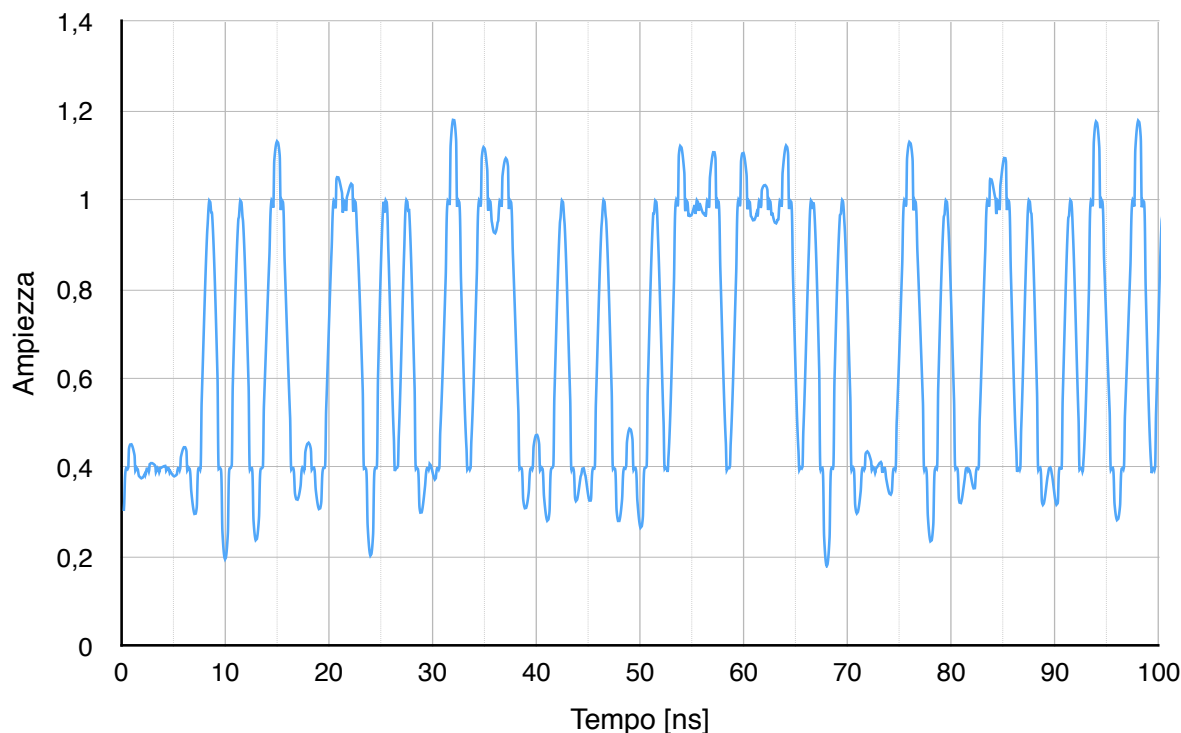


Figura 2.4 - Esempio di sequenza modulata a 1 Gb/s.

### 2.2.3 Il metodo di calcolo del rapporto di estinzione

Per calcolare il rapporto di estinzione del segnale è stata presa in considerazione solo la parte centrale del bit. Per quanto riguarda il segnale in ingresso, per ottenere l'ER medio è stata prima calcolata la potenza media  $P_i$  di ogni bit, applicando la 2.7, dove  $m$  è il numero di campioni del centro del bit e  $A$  è l'ampiezza del campione.

$$P_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |A_k|^2 \quad (2.7)$$

Successivamente è stata applicata la 2.8, dove  $P_1$  e  $P_0$  sono, rispettivamente, le potenze medie dei bit 1 e 0, al centro del bit, ottenute applicando la 2.7, e  $n_1$  e  $n_0$  il numero dei bit 1 e 0.

## 2.2 Il modello del circuito di aiuto alla cancellazione

$$ER_{medio} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{P_{1,i}}{n_1}}{\sum_{k=1}^{n_0} \frac{P_{0,i}}{n_0}} \right) \quad (2.8)$$

Un procedimento simile è stato applicato per l'ER in uscita dal circuito, in questo caso è stato però necessario, prima di applicare la 2.8, sincronizzare il segnale in uscita a quello in entrata.

### 2.2.4 Ipotesi semplificative del modello

Al fine di realizzare il modello del circuito di aiuto alla cancellazione sono state effettuate diverse ipotesi semplificative. Innanzitutto, si è supposto che lo specchio abbia riflettività unitaria e sia quindi privo di perdite. Tale ipotesi è realistica dal momento che sono in commercio specchi in fibra con perdite molto basse, come quello impiegato nella sperimentazione. Inoltre, sono stati considerati trascurabili gli effetti della propagazione nella fibra impiegata per il collegamento tra l'accoppiatore e lo specchio, come le perdite e la dispersione cromatica. Anche questa ipotesi appare realistica per il bit-rate di operazione e per la lunghezza ridotta della fibra. Inoltre, sono state considerate trascurabili le perdite relative alla curvatura della fibra che costituisce l'anello risonante. Si è supposto di operare ad una lunghezza d'onda tale da porsi al centro della banda passante del filtro ottico.

Infine, è stato ipotizzato di impiegare un anello di lunghezza inferiore alla lunghezza di coerenza della sorgente ottica e sono stati trascurati gli effetti dovuti a fluttuazioni ambientali, termiche e meccaniche, immaginando di controllare tali variazioni. Le sorgenti impiegate nella sperimentazione hanno lunghezza di coerenza differenti come si vedrà nel prossimo capitolo. Una di esse, il laser modulato esternamente, ha larghezza di riga tale da rispettare l'ipotesi fatta. In questo caso la sperimentazione mostrerà alcuni effetti interferometrici legati alla mancata stabilizzazione del circuito. Per le altre due sorgenti impiegate, un laser modulato direttamente e una fetta ASE pure modulata direttamente, la lunghezza di coerenza è inferiore alle dimensioni del circuito per cui i segnali ricircolanti nell'anello si sommeranno fuori coerenza.

## 2.3 I risultati delle simulazioni

---

Il modello descritto nel paragrafo precedente è stato impiegato per effettuare delle valutazioni del circuito di aiuto alla cancellazione in relazione alla riduzione del rapporto di estinzione prodotta dai due passaggi attraverso il filtro ad anello risonante, ottenuti dopo aver specchiato il segnale. In un primo momento, sono state effettuate delle simulazioni per definire il rapporto di accoppiamento più favorevole. In questo caso, i risultati sono presentati normalizzando la lunghezza dell'anello rispetto alla "lunghezza equivalente del bit", ovvero il rapporto tra la velocità di propagazione della luce nella fibra e la frequenza di cifra della modulazione, dato dalla formula 2.9, dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto e  $n_{eff}$  l'indice di rifrazione efficace della fibra ottica.

$$lunghezza_{bit} = \frac{c}{frequenza_{cifra} \cdot n_{eff}} \quad (2.9)$$

Successivamente, è stata valutata la lunghezza più adatta dell'anello. Si è considerata la frequenza di cifra di 1 Gb/s come riferimento per la valutazione dei parametri, ma, come si vedrà nei prossimi paragrafi, i risultati delle simulazioni hanno evidenziato la possibilità di ottenere interessanti prestazioni avendo in ingresso al circuito un segnale modulato in intensità a 2,5 Gb/s. Le simulazioni state effettuate per tre valori differenti del rapporto di estinzione del segnale in ingresso al circuito: 6 dB, 10 dB e 13 dB.

Sono infine state condotte delle valutazioni sulla lunghezza della fibra da impiegare per il collegamento tra anello risonante e specchio e sull'impatto del fattore di roll-off della modulazione a coseno rialzato.

### 2.3.1 Il rapporto di accoppiamento dell'accoppiatore

Attraverso le simulazioni è stato inizialmente valutato il rapporto di estinzione del segnale in uscita al variare della lunghezza dell'anello, per diversi rapporti di estinzione del segnale in ingresso e per diversi valori del rapporto di accoppiamento dell'accoppiatore inserito nell'anello risonante. I risultati sono riportati rispettivamente nelle figure 2.5, 2.6 e 2.7, per i tre diversi rapporti di estinzione del segnale in ingresso considerati: 6 dB, 10 dB e 13 dB. Sono stati presi in considerazioni diversi

## 2.3 I risultati delle simulazioni

rapporti di accoppiamento: 1/99 (figura a - linea azzurra), 10/90 (figura a - linea verde), 20/80 (figura a - linea gialla), 30/70 (figura b - linea azzurra), 50/50 (figura b - linea verde), 70/30 (figura b - linea gialla), 80/20 (figura c - linea azzurra), 90/10 (figura c - linea verde), 99/1 (figura c - linea gialla).

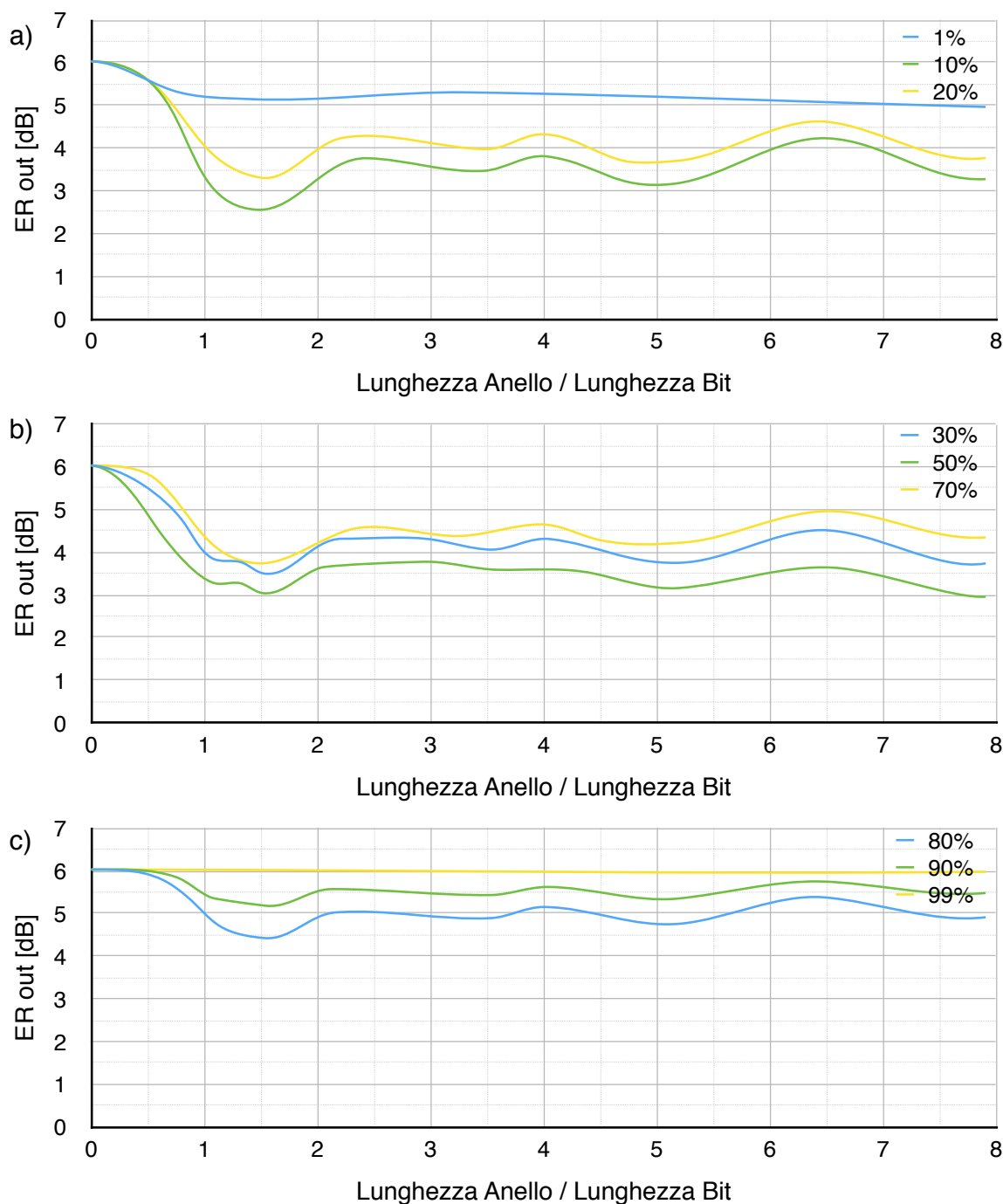


Figura 2.5 - ER in uscita dal circuito avendo in ingresso un segnale con un ER di 6 dB, al variare della lunghezza dell'anello normalizzata alla lunghezza del bit in fibra, valutato per diversi rapporti di accoppiamento: a) 1/99, 10/90, 20/80; b) 30/70, 50/50, 70/30; c) 80/20, 90/10, 99/1.

## 2.3 I risultati delle simulazioni

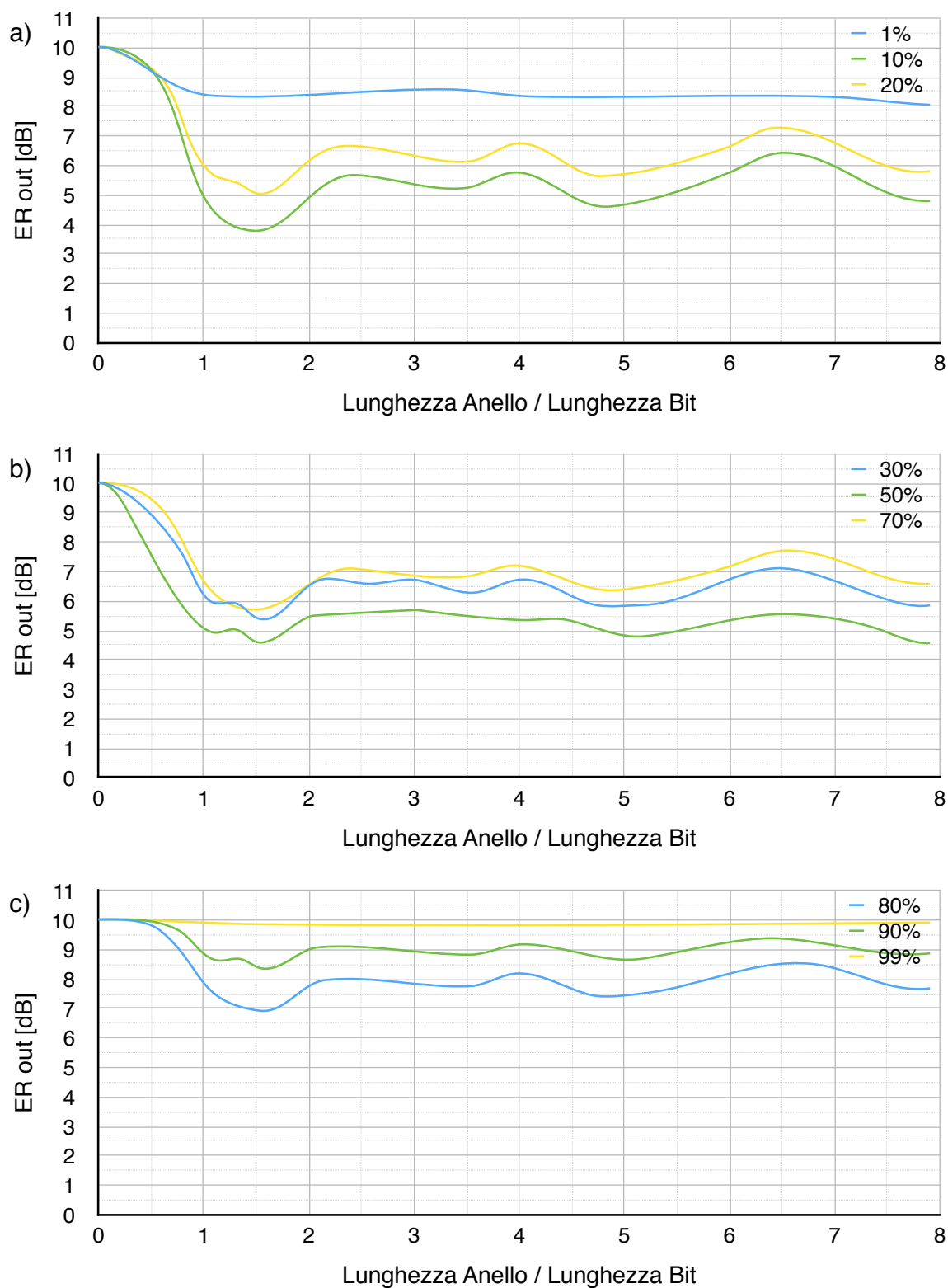


Figura 2.6 - ER in uscita dal circuito avendo in ingresso un segnale con un ER di 10 dB, al variare della lunghezza dell'anello normalizzata alla lunghezza del bit in fibra, valutato per diversi rapporti di accoppiamento: a) 1/99, 10/90, 20/80; b) 30/70, 50/50, 70/30; c) 80/20, 90/10, 99/1.



## 2.3 I risultati delle simulazioni

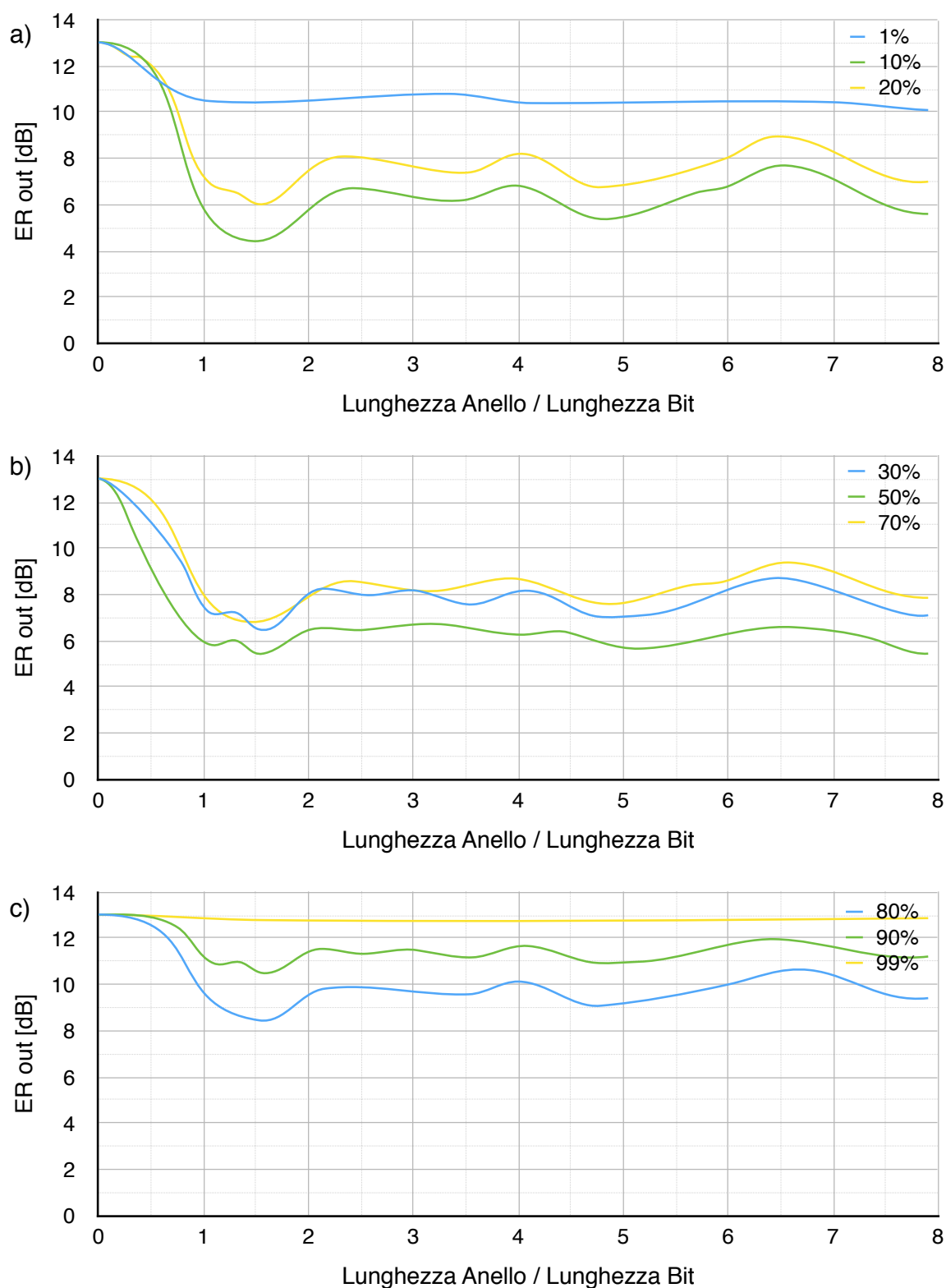


Figura 2.7 - ER in uscita dal circuito avendo in ingresso un segnale con un ER di 13 dB, al variare della lunghezza dell'anello normalizzata alla lunghezza del bit in fibra, valutato per diversi rapporti di accoppiamento: a) 1/99, 10/90, 20/80; b) 30/70, 50/50, 70/30; c) 80/20, 90/10, 99/1.

## 2.3 I risultati delle simulazioni

I rapporti 1/99, 80/20, 90/10 e 99/1 sono quelli che mostrano le prestazioni peggiori in termini di riduzione del rapporto di estinzioni. La curva relativa al rapporto 10/90, al contrario, evidenzia una buona riduzione dell'ER, ma l'utilizzo di questo tipo di accoppiatore introdurrebbe forti perdite. Il miglior compromesso tra perdite introdotte e cancellazione del segnale sembra essere dato dal rapporto 50/50. Inoltre, la curva riferita a tale rapporto è quella che presenta l'andamento più costante al variare della lunghezza dell'anello normalizzata, garantendo, oltre il punto di minimo, buone prestazioni su tutto l'intervallo di lunghezze considerato. Ovvero, a parità di lunghezza si può supporre di avere prestazioni simili avendo in ingresso segnali modulati a frequenze di cifra differenti.

### 2.3.2 La lunghezza dell'anello risonante

È stata successivamente valutata la lunghezza dell'anello. La figura 2.8 riporta il rapporto di estinzione del segnale in uscita per i tre diversi ER del segnale in ingresso: 6 dB (linea azzurra), 10 dB (linea verde) e 13 dB (linea gialla) e per due frequenze di cifra differenti: 1 Gb/s (figura a) e 2,5 Gb/s (figura b). Modulando il segnale a 1 Gb/s, il punto di minimo corrisponde a una lunghezza dell'anello di circa 30 cm, mentre, modulandolo a 2,5 Gb/s, il punto di minimo corrisponde a una lunghezza di circa 12 cm. Entrambe queste lunghezze, però, pongono delle difficoltà di realizzazione, legate alla lunghezza dei codini dei coupler. Inoltre, selezionando una lunghezza dell'anello pari a 12 cm, la riduzione del rapporto di estinzione del segnale modulato a 1 Gb/s sarebbe notevolmente ridotta. È stata quindi scelta una lunghezza pari a circa 50 cm, che, oltre ad essere di più facile realizzazione pratica, presenta altri vantaggi. Anzitutto, per questa lunghezza dell'anello le prestazioni a 1 Gb/s e a 2,5 Gb/s sono molto simili. In secondo luogo, per questo punto le curve, soprattutto quelle riferite al segnale modulato a 1 Gb/s, non presentano significative variazioni, in modo da garantire una bassa sensibilità ad errori tra la lunghezza scelta e quella effettivamente realizzata.

Vengono infine riportati, in figura 2.9, i valori del rapporto di estinzione in uscita dal circuito al variare di quello in ingresso, rispettivamente per la modulazione a 1 Gb/s (linea azzurra) e a 2,5 Gb/s (linea verde), utilizzando i parametri selezionati, ovvero lunghezza dell'anello pari a 50 cm e rapporto di accoppiamento 50/50. I risultati

### 2.3 I risultati delle simulazioni

evidenziano una riduzione del rapporto di estinzione fortemente lineare e, come anticipato, molto simile per le due frequenze considerate.

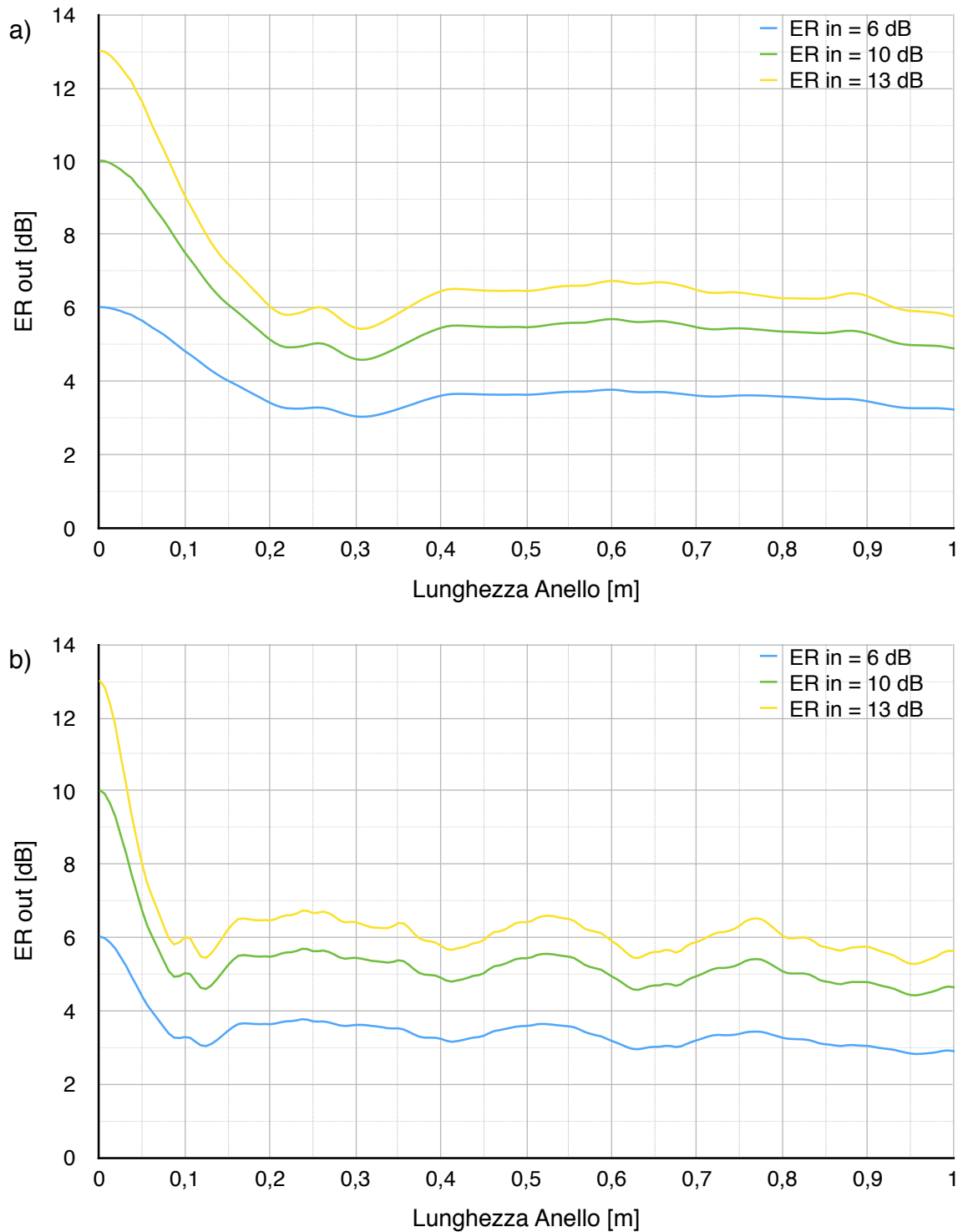


Figura 2.8 - ER in uscita dal circuito al variare della lunghezza dell'anello normalizzata avendo in ingresso un segnale modulato a a) 1 Gb/s b) 2,5 Gb/s, con ER di 6 dB, 10 dB e 13 dB.

## 2.3 I risultati delle simulazioni

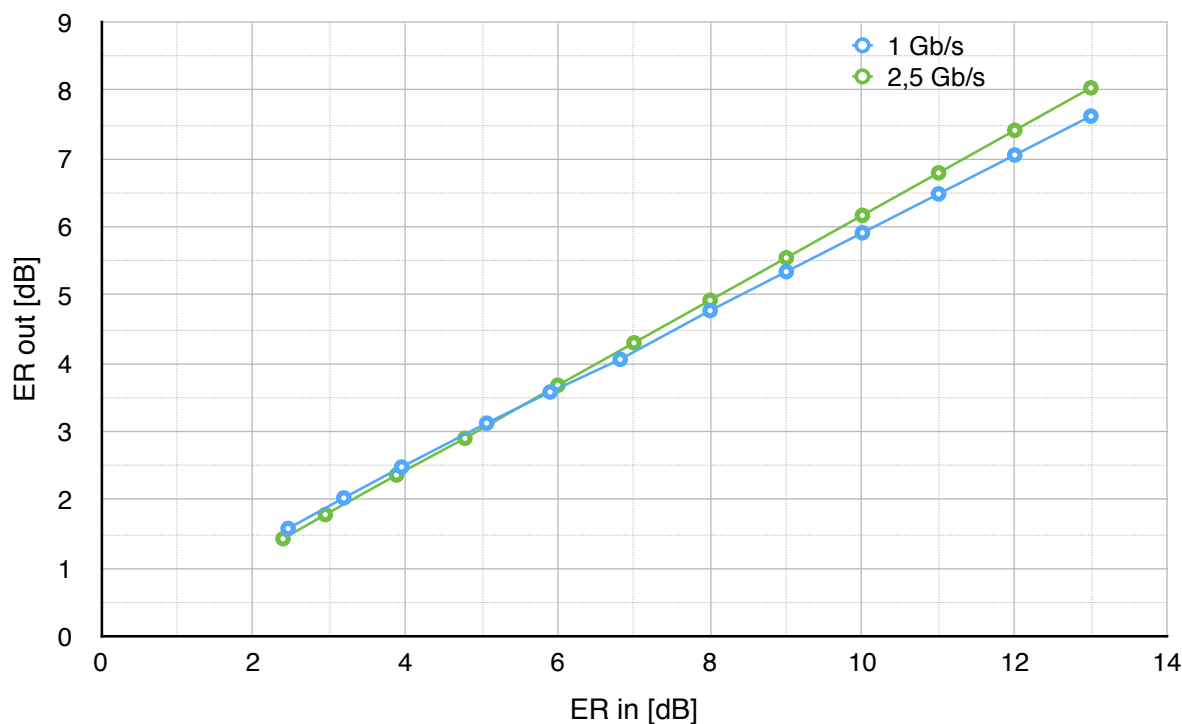


Figura 2.9 - ER in uscita dal circuito al variare di quello in ingresso, modulando il segnale a 1 Gb/s e a 2,5 Gb/s, per un anello di lunghezza 50 cm e un accoppiatore con rapporto di accoppiamento 50/50.

### 2.3.3 La lunghezza della fibra

È stata successivamente valutata la lunghezza della fibra impiegata per il collegamento tra l'anello risonante e lo specchio, che nelle simulazioni fino ad ora presentate è stata ipotizzata idealmente nulla. Come appare evidente dalla figura 2.10, dove è riportato il rapporto di estinzione in uscita dal circuito di aiuto alla cancellazione in funzione di quello di ingresso per diversi valori di lunghezza della fibra ( $L_f$ ), questo parametro non ha nessuna incidenza sui risultati delle simulazioni. Sono state prese in considerazione lunghezze della fibra da 0 a 10 m. I parametri della simulazione sono: frequenza di cifra 1 Gb/s, rapporto di accoppiamento 50/50 e lunghezza dell'anello 50 cm.

## 2.3 I risultati delle simulazioni

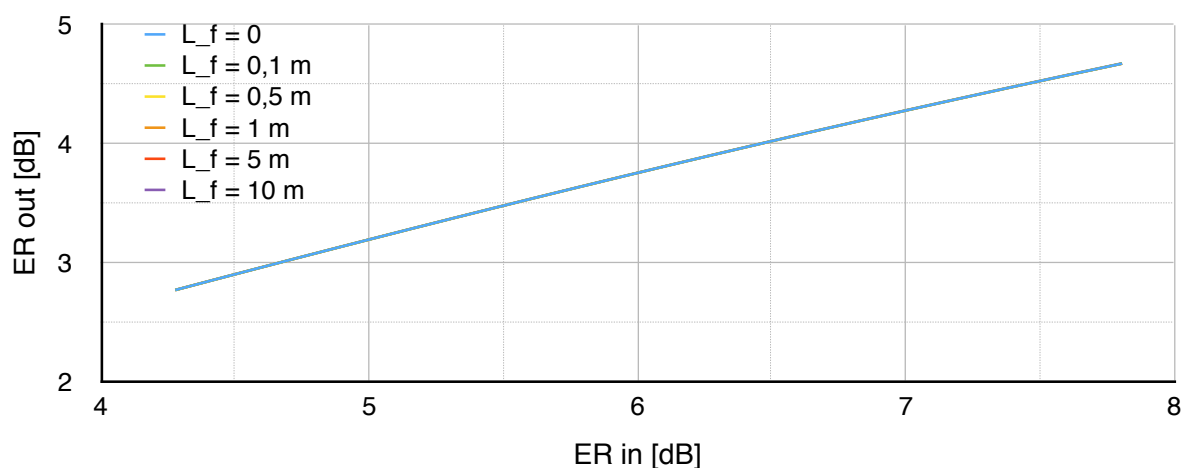


Figura 2.10 - ER in uscita dal circuito al variare di quello in ingresso per diversi valori della fibra impiegata per il collegamento tra anello risonante e specchio.

### 2.3.4 Impatto del fattore di roll-off

È stato infine verificato l'impatto della scelta del fattore di roll-off nella modellizzazione del bit a coseno rialzato sui risultati delle simulazioni. Nel grafico in figura 2.11 è riportato il rapporto di estinzione in uscita dal circuito di aiuto alla cancellazione in funzione di quello di ingresso per diversi valori del fattore di roll-off. Come si vede, la curva relativa al fattore di roll-off nullo (in azzurro in figura) si discosta leggermente da quelle relative agli altri fattori di roll-off considerati: 0,3, 0,5, 0,7 e 1, che sono quasi coincidenti. Si è quindi deciso di non ripetere le simulazioni precedenti per fattori di roll-off differenti da quello utilizzato, pari a 0,3.

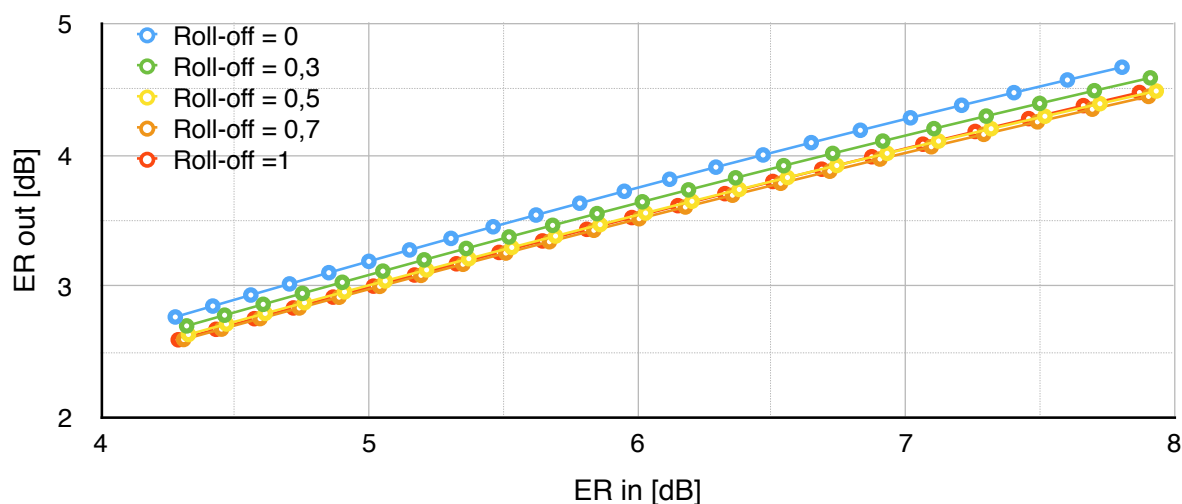


Figura 2.11 - ER in uscita dal circuito al variare di quello in ingresso per diversi valori del fattore di roll-off.

# CAPITOLO 3

## RISULTATI SPERIMENTALI

### 3.1 I trasmettitori ottici

---

Per l'attività sperimentale sono state prese in considerazione tre trasmettitori ottici differenti: un laser Distributed Feedback (DFB) a modulazione esterna, un Directly Modulated Laser (DML) e una sorgente di Amplified Spontaneous Emission (ASE) filtrata. Ognuna di queste sorgenti presenta differenti caratteristiche spettrali, ovvero rispettivamente larghezza di riga inferiore a 1 MHz, pari a qualche GHz e filtrata con un filtro con larghezza a metà altezza di circa 0,3 nm. Le diverse caratteristiche delle sorgenti emergono dal confronto degli spettri ottici, realizzata mediante l'utilizzo di un Optical Spectrum Analyzer (OSA). La figura 3.1 illustra lo spettro ottico del laser DFB. In figura 3.2 è riportato, invece, lo spettro ottico del laser DML in assenza (curva azzurra) e presenza (curva verde) di modulazione diretta. Le figure 3.3a e 3.3b illustrano lo spettro del rumore ASE generato dal RSOA e utilizzato per la terza sorgente, rispettivamente prima e dopo il filtraggio. In particolare, nella figura 3.3a è riportato un dettaglio dello spettro ottico di emissione del RSOA, che è di circa 40 nm, in assenza (curva azzurra) e presenza (curva verde) di modulazione diretta, le oscillazioni che sono visibili rappresentano un comportamento tipico dell'emissione RSOA dovuto ad un non perfetto accoppiamento della guida d'onda RSOA con la

### 3.1 I trasmettitori ottici

fibra d'uscita. Le oscillazioni con o senza modulazione si presentano traslate. In figura 3.3b invece è riportato lo spettro ASE filtrato, anche in questo caso in assenza (curva azzurra) e presenza (curva verde) di modulazione diretta.

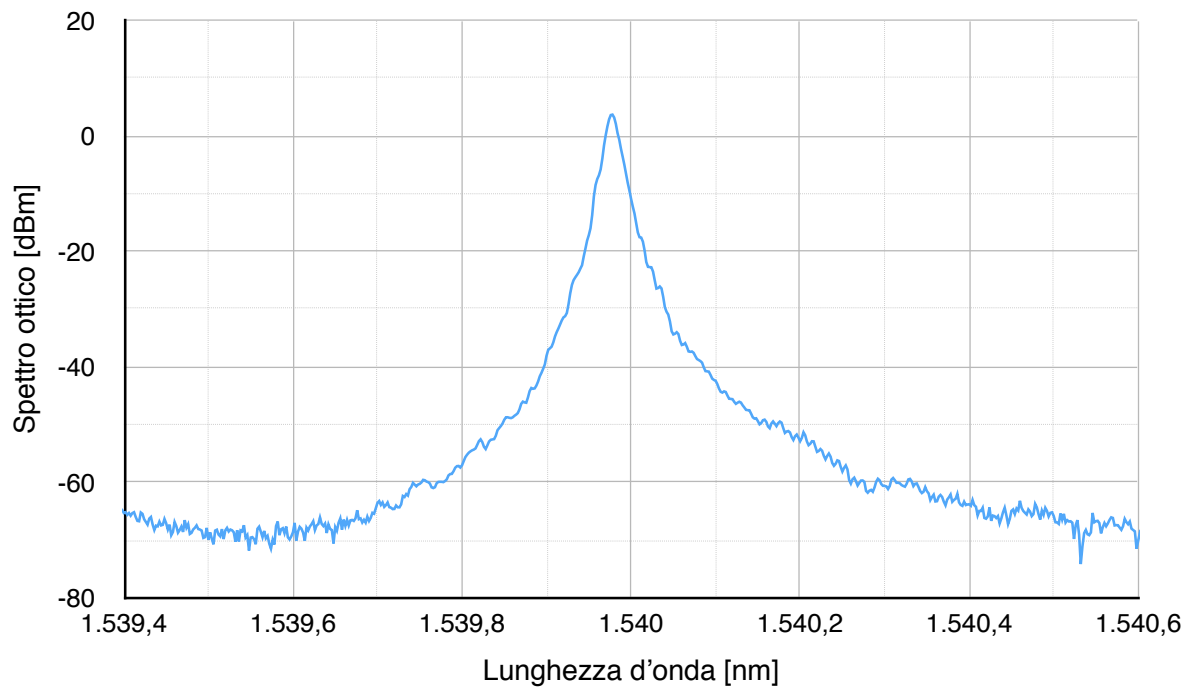


Figura 3.1 - Spettro ottico del laser DFB.

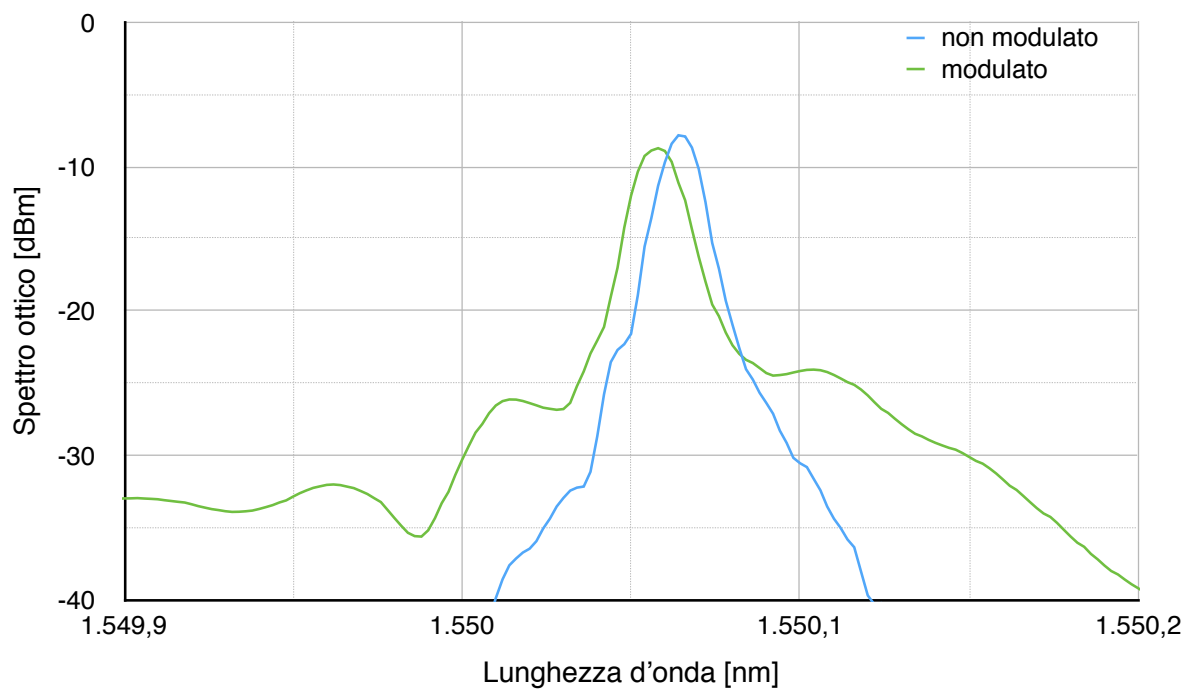


Figura 3.2 - Spettro ottico del laser DML.

### 3.1 I trasmettitori ottici

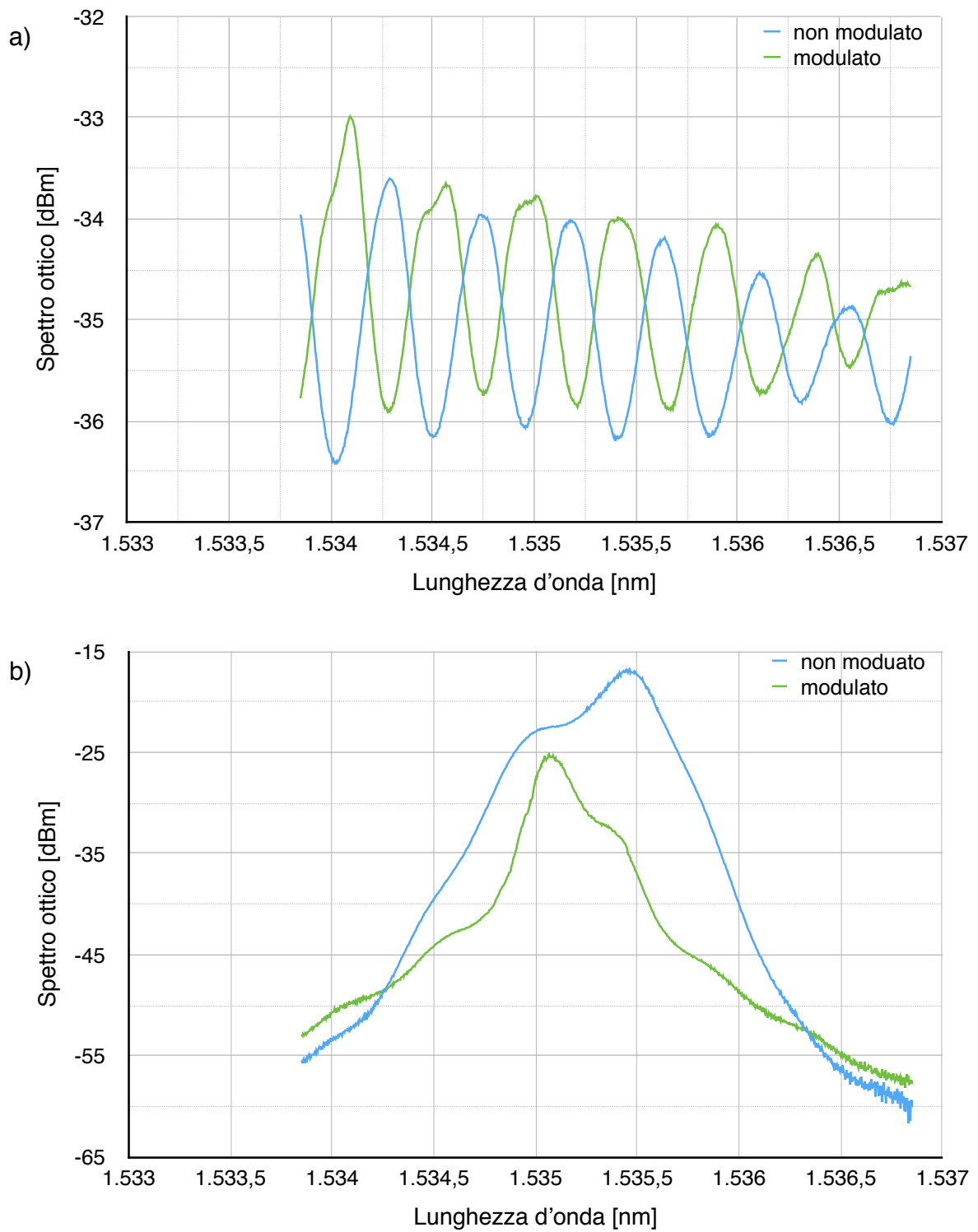


Figura 3.3 - Spettro ottico del rumore ASE generato dal RSOA, a) prima del filtraggio, b) dopo il filtraggio.



### 3.1 I trasmettitori ottici

Il laser DFB, come precisato ha uno spettro ottico con una riga molto stretta e rappresenta la sorgente più pregiata dal punto di vista delle telecomunicazioni ottiche, ma anche la più dispendiosa a livello economico. In figura 3.4a è mostrato il set up utilizzato per modulare la sorgente ottica. Il DFB è stato collegato, mediante una fibra Polarization Maintaining (PM) a delle laminette, dette Polarization Controllers (PC), per il controllo della polarizzazione del segnale ottico, in modo da allineare lo stato di polarizzazione del segnale allo stato preferenziale di operazione del modulatore elettro-ottico che lo segue. La modulazione d'intensità viene operata attraverso un modulatore interferometrico di intensità Mach-Zehnder in nimbato di litio, che riceve i dati elettrici generati da un pattern generator e opportunamente amplificati da un wideband amplifier a radio frequenza, che amplifica i dati fino a fare loro raggiungere il valore di tensione picco-picco corrispondente alla  $V_{\pi}$  del modulatore, pari in questo caso a circa 7 V. Un generatore di tensione è inoltre necessario per regolare il punto di lavoro del modulatore elettro-ottico tramite una tensione di bias.

Il laser DML è stato modulato direttamente dallo stesso pattern generator impiegato per il DFB. I dati in uscita dal pattern generator hanno ampiezza picco picco sufficiente a modulare la corrente di alimentazione del laser e non necessitano quindi di essere amplificati. In figura 3.4b è rappresentato il set up usato per il trasmettitore. La terza sorgente che è stata analizzata nel corso delle sperimentazioni è lo spettro ASE filtrato con un filtro sintonizzabile in lunghezza d'onda. Come si vede in figura 3.4c per generarlo è stato impiegato un RSOA alimentato da una corrente di 110 mA e controllato in temperatura a circa 25 °C. Per il filtraggio è stato impiegato un filtro passabanda tunabile (JDS FITEL TB1500B) con banda a -3 dB di circa 0,3 nm e sintonizzato alla lunghezza d'onda di 1535 nm. È stata usata la modulazione diretta della corrente del RSOA per ottenere la modulazione d'intensità dello spettro.

Per la modulazione dei trasmettitori è stata usata una sequenza di dati PRBS 2<sup>7</sup>-1. Come noto, tale sequenza ha caratteristiche che riproducono il traffico dati a 1,25 e 2,5 Gb/s [18]. L'ampiezza di modulazione d'intensità scelta, e quindi il rapporto di estinzione ottenuto, varia invece a seconda della sorgente ottica impiegata. Per quanto riguarda il laser DFB, sono stati presi in considerazione, a 1 Gb/s, dati con ampiezza tra 1  $V_{pp}$  e 2  $V_{pp}$  (non amplificati) e tra 300 mV<sub>pp</sub> e 1  $V_{pp}$  (amplificati), corrispondenti a ER variabili da 2,7 dB a 9,6 dB e, a 2,5 Gb/s, dati con ampiezza tra

### 3.1 I trasmettitori ottici

300 mV<sub>pp</sub> e 800 mV<sub>pp</sub> (amplificati), corrispondenti a ER variabili da 4,3 dB a 6,5 dB. Il DML ha richiesto ampiezze di modulazione tra 1 V<sub>pp</sub> e 2 V<sub>pp</sub>, corrispondenti, a 1 Gb/s, a ER variabili da 5,5 dB a 16 dB e, a 2,5 Gb/s, a ER variabili da 5 dB a 13,6 dB. Usando l'ASE filtrata sono invece stati impiegati, a 1 Gb/s, dati con ampiezza tra 800 mV<sub>pp</sub> e 2 V<sub>pp</sub>, corrispondenti a ER variabili da 2,4 dB a 7,2 dB e, a 2,5 Gb/s, dati con ampiezza tra 1 V<sub>pp</sub> e 2 V<sub>pp</sub>, corrispondenti a ER variabili da 2 dB a 4,8 dB.

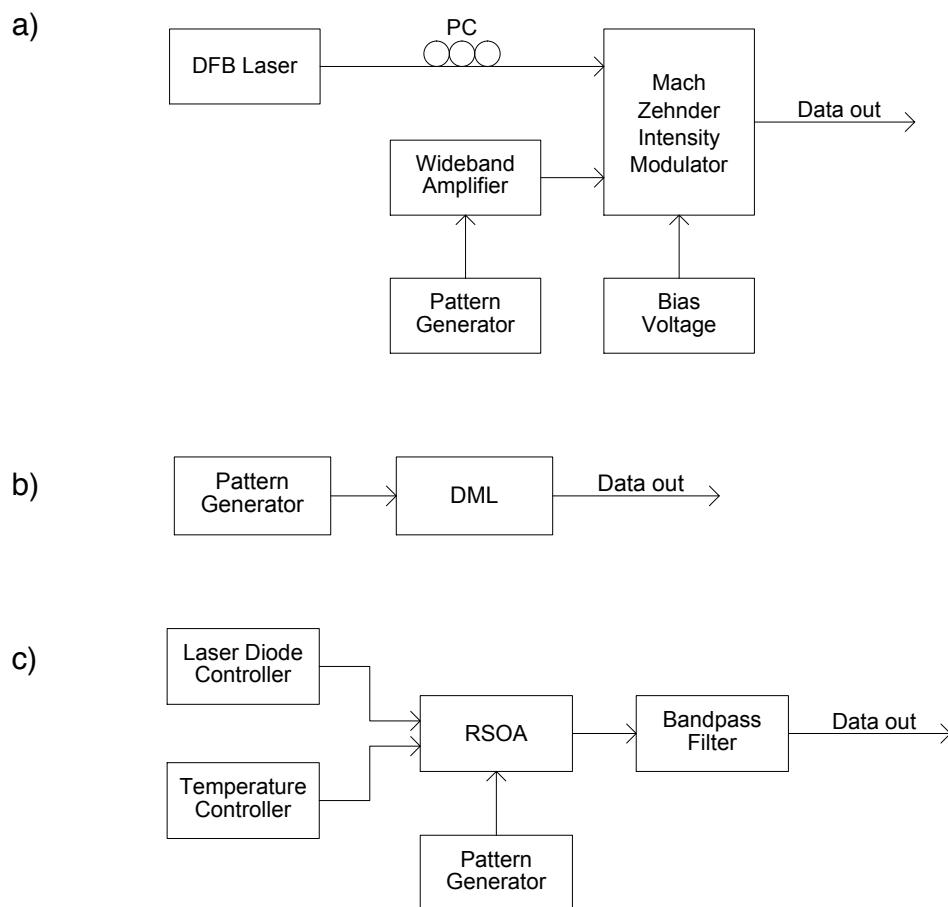


Figura 3.4 - Set up utilizzati per i diversi trasmettitori ottici usati nella sperimentazione: a) Laser DFB; b) Laser DML; c) ASE filtrata.

## 3.2 Il circuito di aiuto alla cancellazione

---

Una prima valutazione sperimentale del circuito di aiuto alla cancellazione descritto nel paragrafo 1.5 è stata effettuata attraverso la misura del rapporto di estinzione del segnale ottico in uscita dal circuito al variare di quello in ingresso, ottenuto modificando l'ampiezza di modulazione dei dati. Nel corso dell'esperimento, sono state utilizzate tutte e tre le sorgenti descritte nel paragrafo precedente.

Come spiegato nel paragrafo 2.3, i parametri del circuito sono stati selezionati in modo da ridurre il rapporto di estinzione di un segnale modulato alla frequenza di 1 Gb/s. I risultati delle simulazioni hanno però suggerito la possibilità di valutarne l'efficacia anche in risposta a segnali a frequenze maggiori. Le misure sperimentali, quindi, sono state realizzate anche a 2,5 Gb/s.

Per quanto riguarda il segnale in ingresso, il rapporto di estinzione è stato misurato ricavando, dal diagramma ad occhio del segnale, i valori di tensione  $V_0$  e  $V_1$ , relativi rispettivamente al bit 0 e al bit 1. L'ER in dB è stato quindi calcolato applicando la formula 3.1, dove  $\emptyset_{ph}$  indica lo zero del fotodiode, corrispondente alla corrente di buio.

$$ER_{in} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_1 - \emptyset_{ph}}{V_0 - \emptyset_{ph}} \right) \quad (3.1)$$

Il rapporto di estinzione del segnale all'uscita del circuito è stato invece calcolato applicando la formula 3.2, dove le tensioni  $V_0$  e  $V_1$  sono state sostituite dai rispettivi valori medi. Questo si è reso necessario dal momento che il circuito, sommando ripetutamente il segnale ritardato, distrugge la struttura di uni e zeri e rende difficile identificarne i corrispondenti valori.

$$ER_{out} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\bar{V}_1 - \emptyset_{ph}}{\bar{V}_0 - \emptyset_{ph}} \right) \quad (3.2)$$

Nei prossimi paragrafi saranno presentati i set up sperimentali realizzati, i dati sperimentali acquisiti, i metodi utilizzati per eseguire le misure e infine un confronto tra i risultati relativi alle diverse sorgenti e quelli ottenuti dalle simulazioni.

### 3.2.1 Sorgente laser DFB modulata esternamente

Le figure 3.5a e 3.5b mostrano i set up utilizzati per misurare il rapporto di estinzione, rispettivamente all'ingresso e all'uscita del circuito proposto.

Nel primo set up, di figura 3.5a, il segnale modulato esternamente passa attraverso un Variable Optical Attenuator (VOA) per poi arrivare al fotodiodo che, convertendo le potenze ottiche in tensioni elettriche, permette di valutare il segnale utilizzando un oscilloscopio. In questo modo è stato possibile caratterizzare il segnale in ingresso al circuito.

Nel secondo set up, di figura 3.5b, è stato aggiunto un circolatore all'uscita del VOA. Il segnale modulato esternamente e attenuato entra nella porta 1 del circolatore e esce dalla porta 2, dove sono posti il circuito e lo specchio. Il segnale quindi, dopo essere passato due volte attraverso il circuito, esce dalla porta 3 del circolatore, dove sono posti il fotodiodo e l'oscilloscopio. Il VOA, posto all'uscita del modulatore di intensità, ha una duplice funzione. Anzitutto, permette di eseguire le misure ponendosi nella zona di linearità del fotodiodo. In secondo luogo, consente di bilanciare le perdite introdotte dal circuito e quindi di effettuare le misurazioni a pari valor medio del segnale modulato. Come ricevitore è stato impiegato un fotodiodo New Focus, modello 1611-AC. I suoi parametri più importanti sono la banda elettrica di 1 GHz, la responsivity di 0,9 A/W e il guadagno di transimpedenza di 700 V/A.

Nelle figure 3.6 e 3.7 sono riportati i valori del rapporto di estinzione in uscita in funzione di quello in ingresso, rispettivamente modulando il segnale a 1 Gb/s e a 2,5 Gb/s. Nel primo caso il rapporto di estinzione in ingresso al circuito è stato fatto variare da 2,6 dB a 8,8 dB circa ottenendo in uscita una corrispondente variazione da 1,8 dB a 6,4 dB. Nel secondo caso invece il rapporto di estinzione in ingresso al circuito è stato fatto variare da 4,4 dB a 6,5 dB ottenendo una corrispondente variazione da 3,3 dB a 5,5 dB.

### 3.2 Il circuito di aiuto alla cancellazione

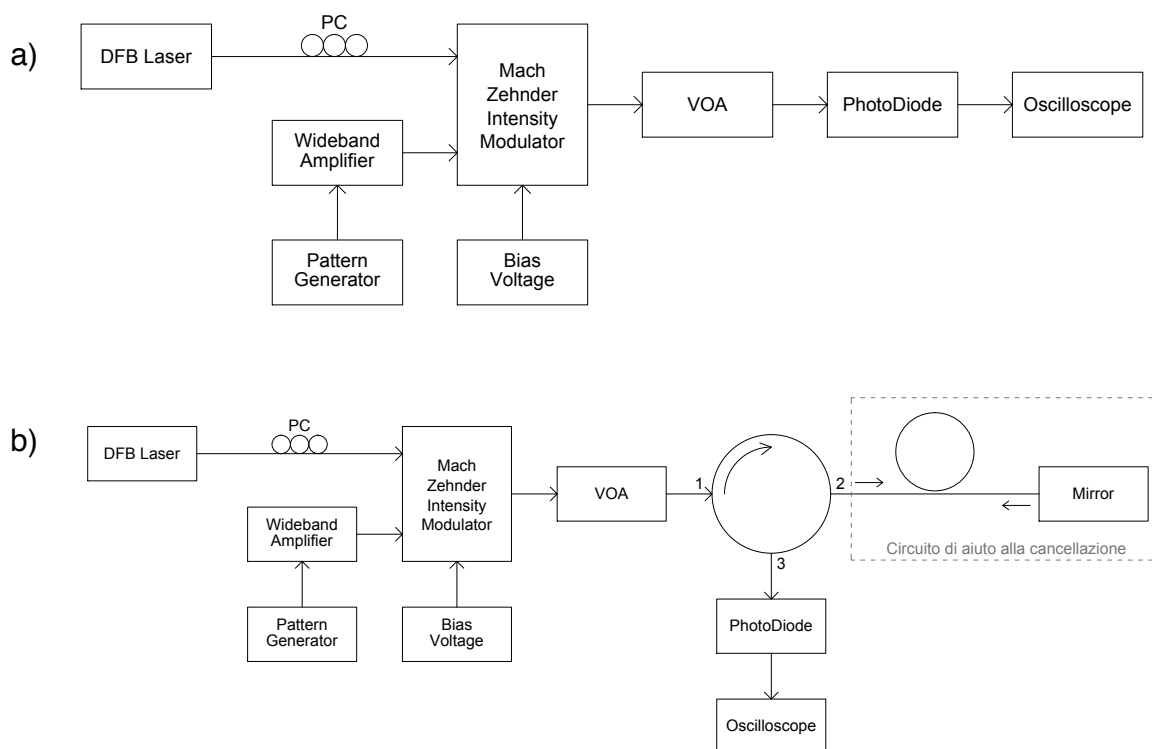


Figura 3.5 - Set up utilizzato per la misura dell'ER utilizzando come sorgente un laser DFB modulato esternamente: a) in ingresso al circuito, b) in uscita dal circuito.

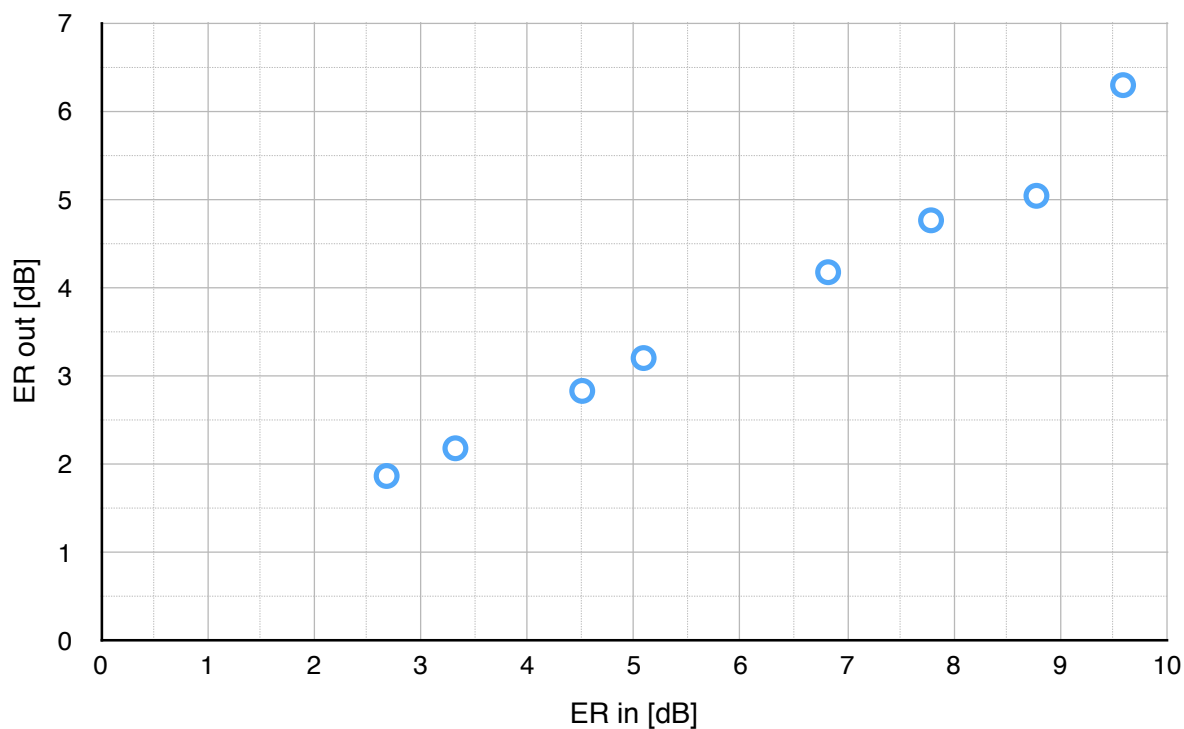


Figura 3.6 - ER out vs. ER in con modulazione a 1 Gb/s con segnale ottico ottenuto da modulazione esterna.

### 3.2 Il circuito di aiuto alla cancellazione

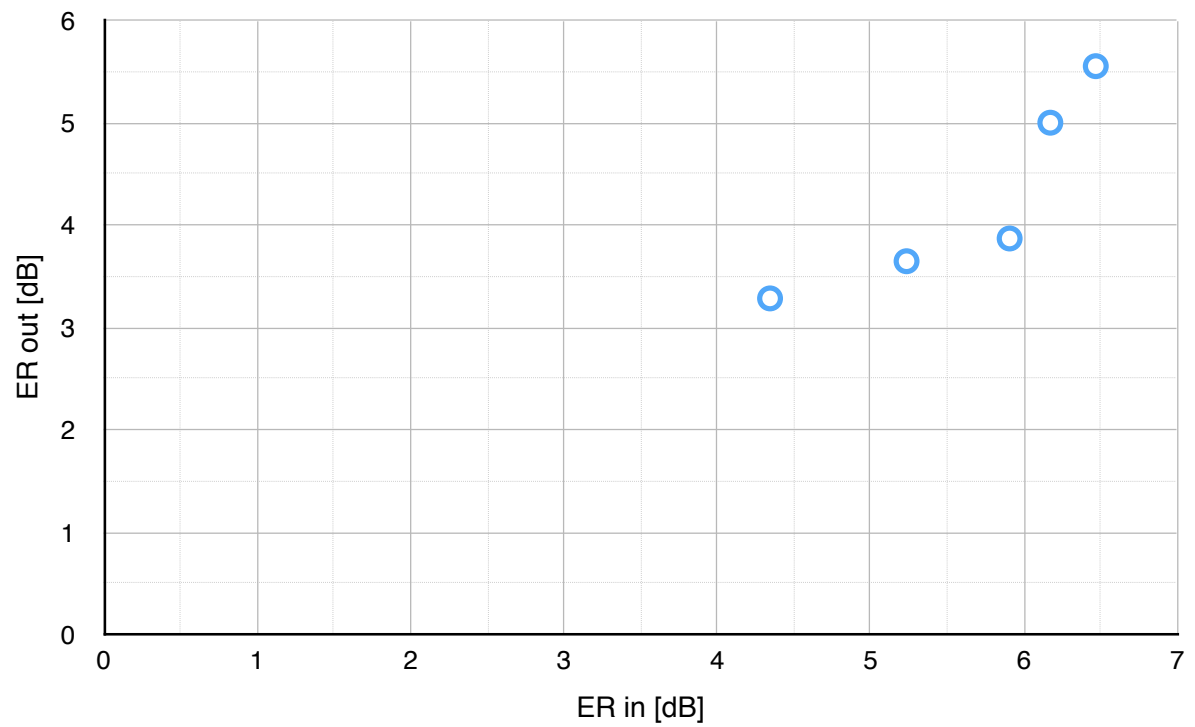


Figura 3.7 - ER out vs. ER in con modulazione a 2,5 Gb/s con segnale ottico ottenuto da modulazione esterna.

### 3.2.2 Sorgente laser DML

Le figure 3.8a e 3.8b illustrano i set up utilizzati per misurare il rapporto di estinzione del segnale, rispettivamente all'ingresso e all'uscita del circuito. Questi set up differiscono da quelli utilizzati per il laser DFB solamente nella sezione relativa al trasmettitore, mentre il metodo e la strumentazione impiegati per calcolare l'ER rimangono i medesimi. Anche in questo caso vengono presentati i dati nella forma rapporto di estinzione in uscita in funzione del rapporto di estinzione in ingresso. La figura 3.9 mostra le misure relative al segnale modulato alla frequenza di 1 Gb/s, mentre la figura 3.10 quelle ottenute con una modulazione a 2,5 Gb/s. Nel primo caso il rapporto di estinzione in ingresso al circuito è stato fatto variare da 5,6 dB a 16 dB ottenendo in uscita una corrispondente variazione da 5 dB a 11,7 dB. Nel secondo caso invece il rapporto di estinzione in ingresso al circuito è stato fatto variare da 5 dB a 13,7 dB ottenendo una corrispondente variazione da 3,3 dB a 5,8 dB.

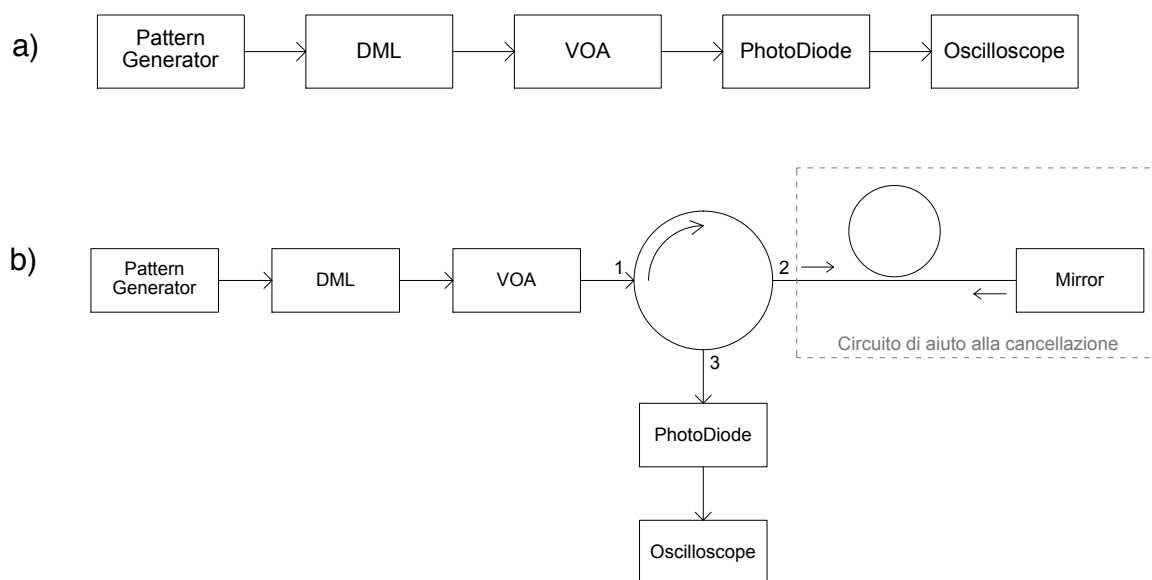


Figura 3.8 - Set up utilizzato per la misura dell'ER utilizzando come sorgente un laser DML: a) in ingresso al circuito, b) in uscita dal circuito.

### 3.2 Il circuito di aiuto alla cancellazione

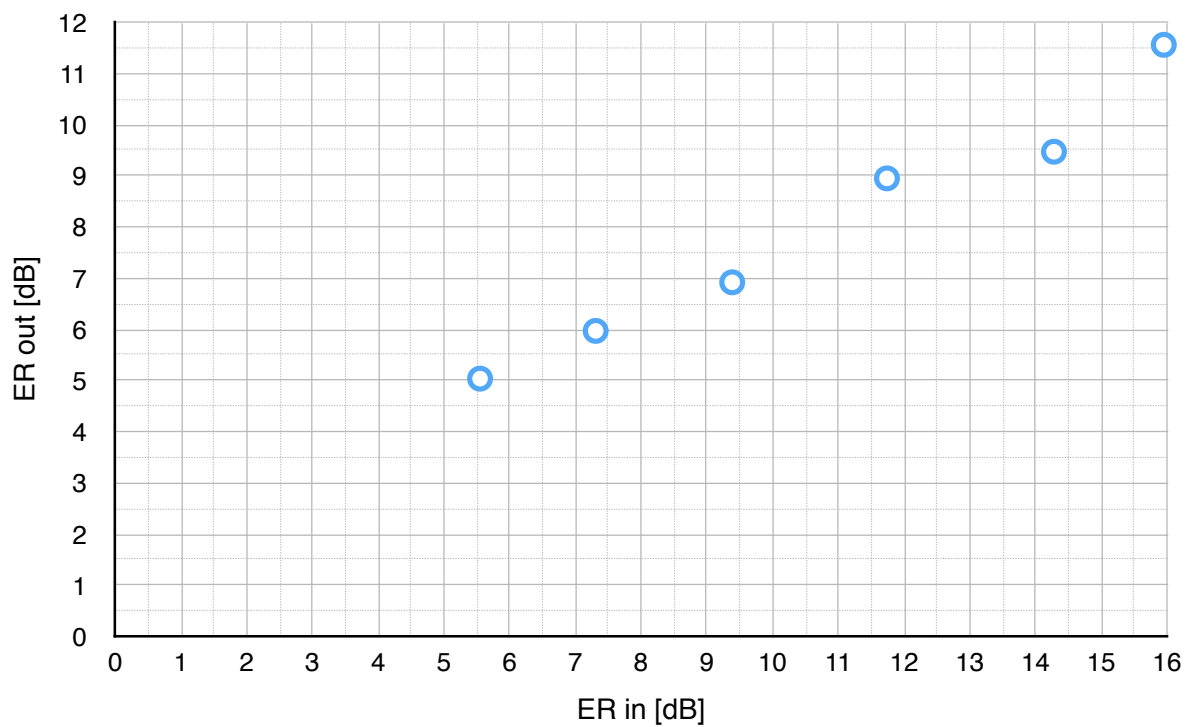


Figura 3.9 - ER out vs. ER in con modulazione a 1 Gb/s ottenuto con DML.

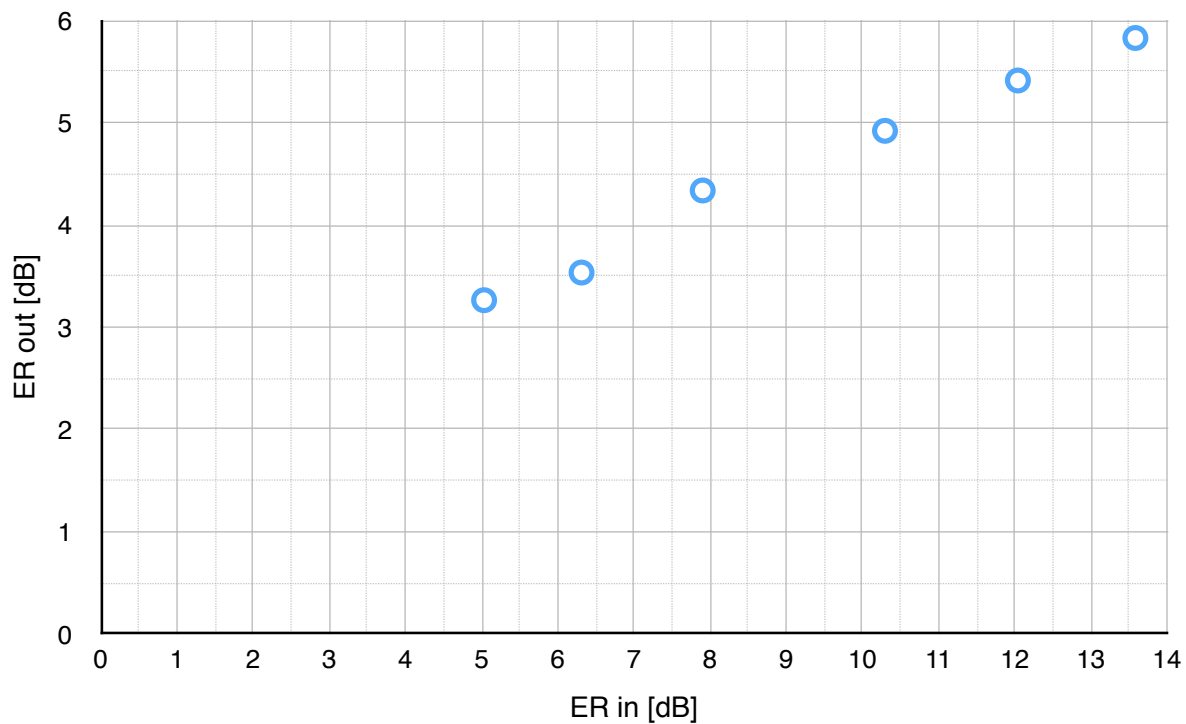


Figura 3.10 - ER out vs. ER in con modulazione a 2,5 Gb/s ottenuto con DML.



### 3.2.3 Sorgente ASE filtrata e modulata direttamente

Come si può vedere dalle figure 3.11a e 3.11b, che illustrano i set up dell'esperimento, anche nel caso in cui si fa ricorso all'ASE filtrata come sorgente, il metodo di misurazione del rapporto di estinzione non è stato modificato. I dati così acquisiti, insieme ai relativi valori del rapporto di estinzione all'uscita del circuito, sono tracciati nei grafici in figura 3.12, per la frequenza di cifra di 1 Gb/s, e in figura 3.13, per la frequenza di cifra di 2,5 Gb/s. Nel primo caso il rapporto di estinzione in ingresso al circuito è stato fatto variare da 2,4 dB a 6,9 dB ottenendo in uscita una corrispondente variazione da 1,4 dB a 3,9 dB. Nel secondo caso invece il rapporto di estinzione in ingresso al circuito è stato fatto variare da 2 dB a 4,8 dB ottenendo una corrispondente variazione da 1,1 dB a 2,1 dB.

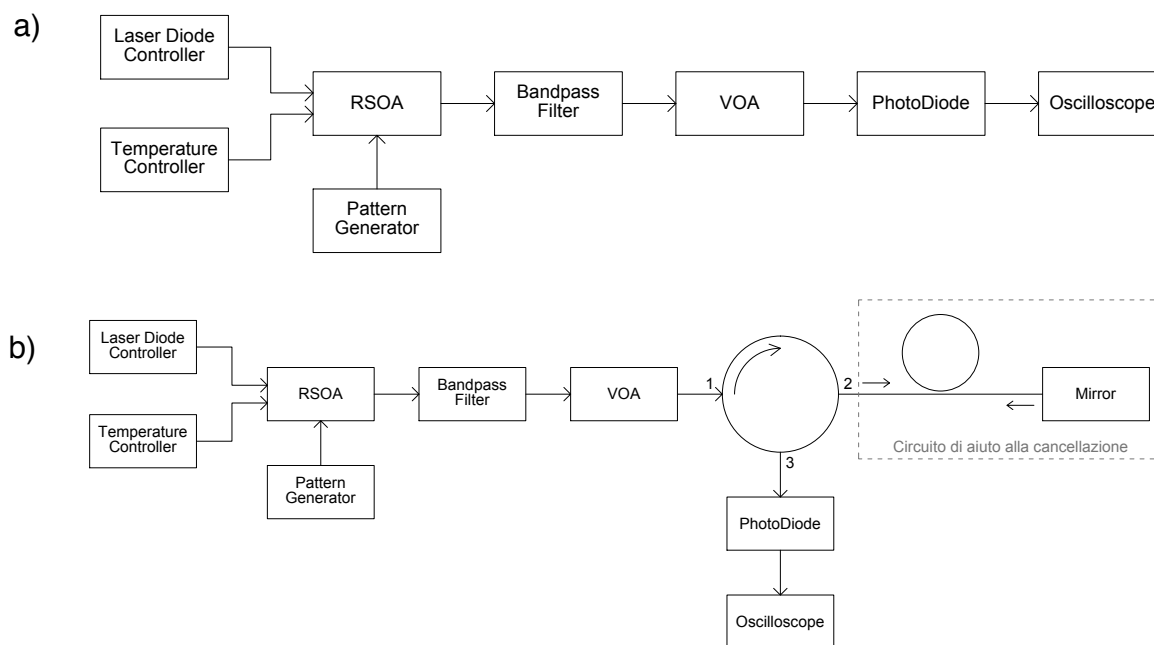


Figura 3.11 - Set up utilizzato per la misura dell'ER utilizzando come sorgente l'ASE filtrata: a) in ingresso al circuito, b) in uscita dal circuito.

### 3.2 Il circuito di aiuto alla cancellazione

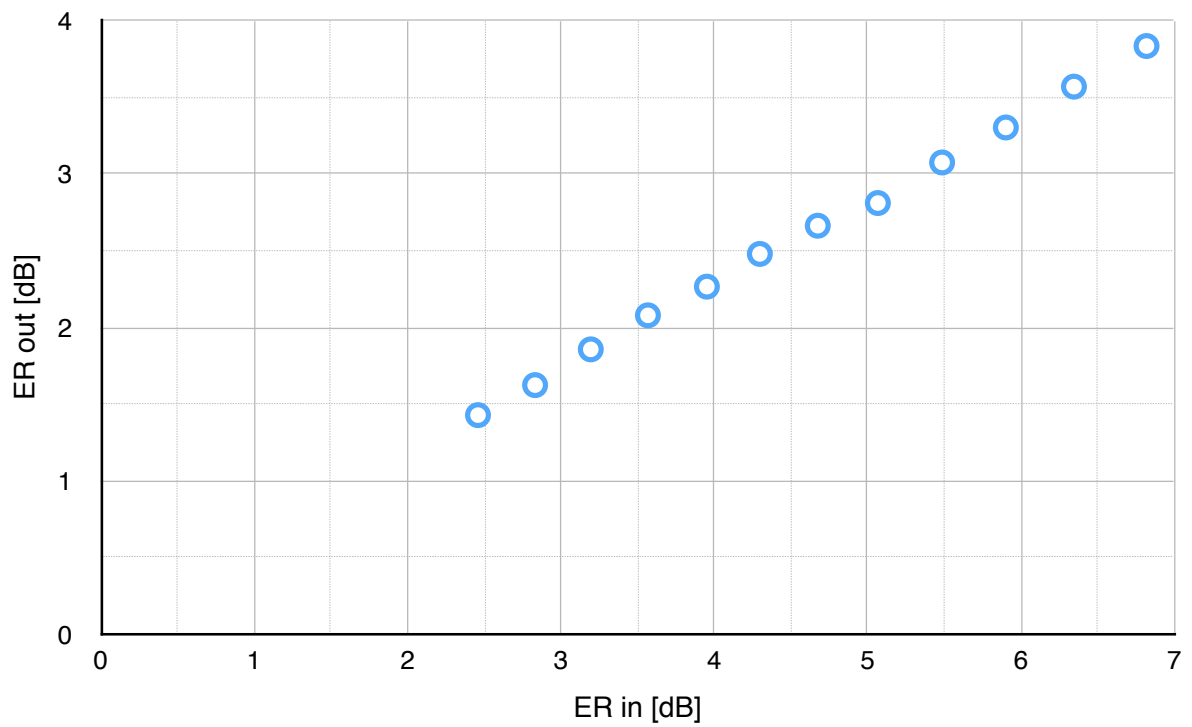


Figura 3.12 - ER out vs. ER in con modulazione a 1 Gb/s ottenuto con sorgente ASE filtrata e modulata direttamente.

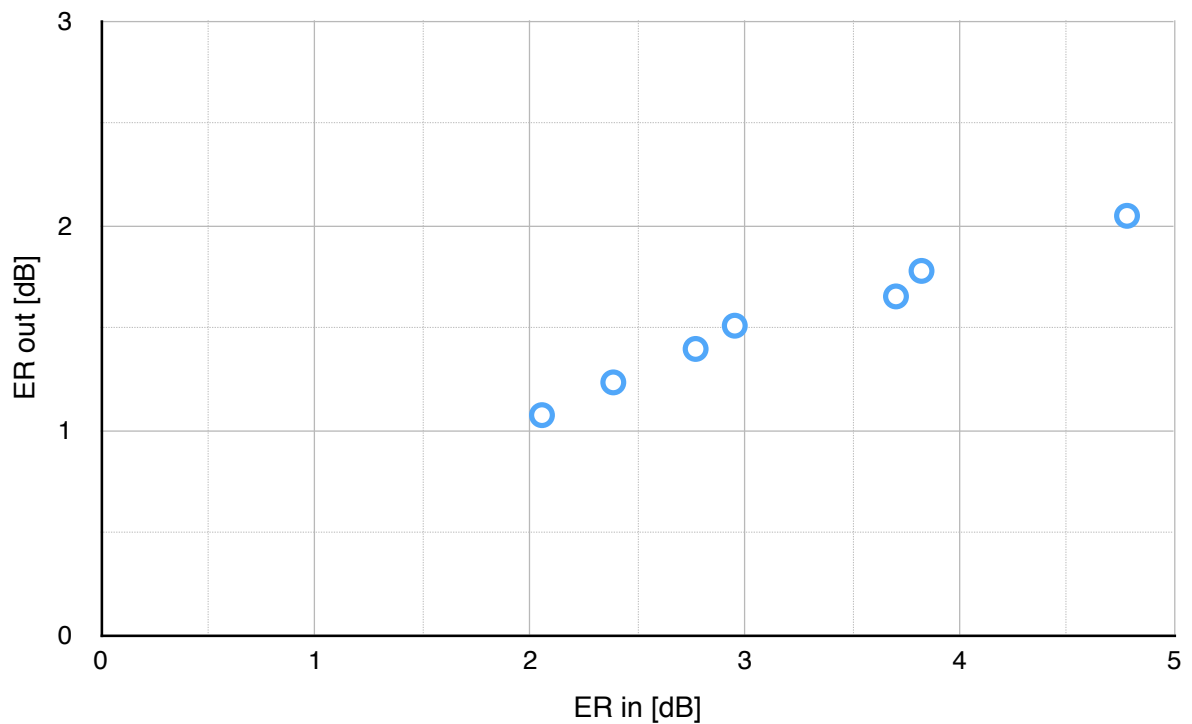


Figura 3.13 - ER out vs. ER in con modulazione a 2,5 Gb/s ottenuto con sorgente ASE filtrata e modulata direttamente.

### 3.2.4 Confronto

Le figure 3.14 e 3.15 mostrano un riassunto dei risultati sperimentali ottenuti alle due frequenze di cifra di 1 Gb/s e 2,5 Gb/s per le tre tipologie di sorgente impiegate. In entrambe è riportato anche un confronto con il valore atteso ricavato dalle simulazioni (riga grigia tratteggiata). Alla frequenza di 1 Gb/s, il comportamento del circuito di aiuto alla cancellazione, in termini di riduzione del rapporto di estinzione, per la sorgente ASE filtrata corrisponde alle attese per l'ER di ingresso da 2 dB a 7 dB. Lo stesso si può dire nel caso del laser DFB modulato esternamente nell'intervallo di ER d'ingresso da 2 dB a 10 dB. Nel caso di trasmettitore DML modulato direttamente si vede che viene rispettato l'andamento, anche se i valori di ER in uscita sono più alti di circa 1,5 dB. Questo può essere dovuto alla particolare forma del diagramma ad occhio, che in questo caso si discosta da quella simulata, con fronti di salita meno ripidi.

Per quanto riguarda la modulazione a 2,5 Gb/s, i dati sperimentali si discostano maggiormente dai risultati delle simulazioni e presentano un comportamento meno lineare. Va ricordato che, come evidenziato nei grafici in figura 2.8, a 2,5 Gb/s la risposta del circuito è più sensibile ad eventuali errori nella definizione della lunghezza di 50 cm ipotizzata nelle simulazioni e quella effettivamente realizzata rispetto al caso a 1 Gb/s, dove il punto di lavoro del circuito cade, in termini di lunghezza dell'anello, in un intervallo dove la riduzione del rapporto di estinzione è costante. Il fatto di usare per ricevere il segnale a 2,5 Gb/s un fotodiodo con banda di 1 GHz determina che, a parità di profondità di modulazione, il segnale possa avere un rapporto di estinzione misurato inferiore. L'accordo con le simulazioni è comunque buono e si registra una significativa riduzione del rapporto di estinzione del segnale ad opera del circuito di aiuto alla cancellazione.

### 3.2 Il circuito di aiuto alla cancellazione

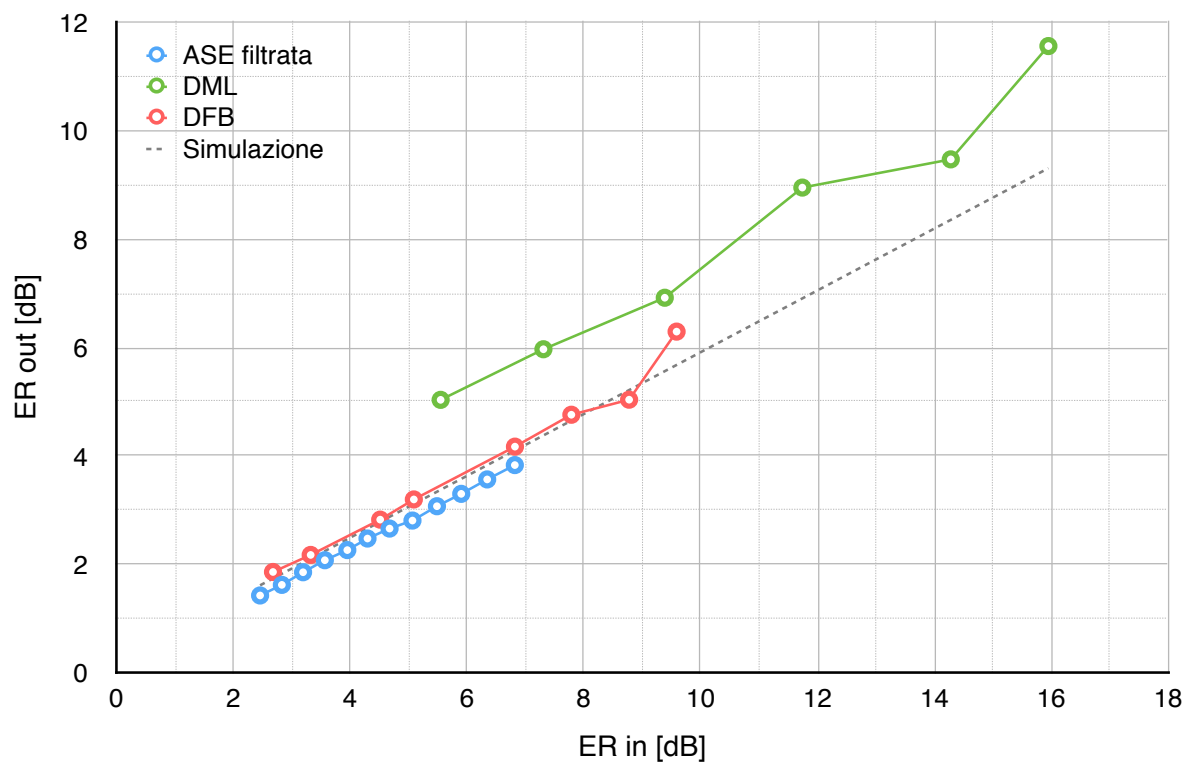


Figura 3.14 - Confronto dell'ER in uscita dal circuito con modulazione a 1 Gb/s.

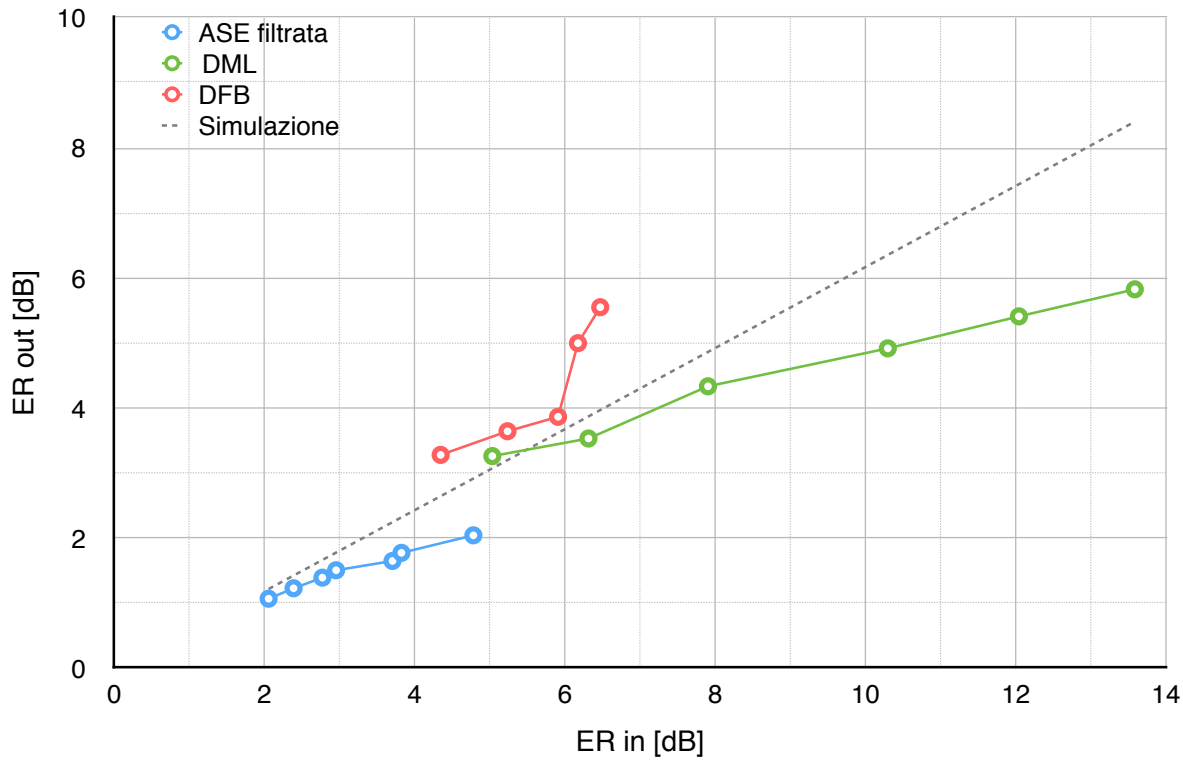


Figura 3.15 - Confronto dell'ER in uscita dal circuito con modulazione a 2,5 Gb/s.

## 3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione

---

L'analisi proposta nel secondo capitolo naturalmente tiene conto solo degli aspetti deterministici del segnale ottico e dell'effetto del circuito su di esso, tuttavia, il fatto che il segnale venga sommato a se stesso dopo aver percorso un certo tratto di fibra, implica che, a seconda delle caratteristiche spettrali del segnale, ovvero della sua larghezza di riga  $\Delta\nu$ , ci siano diversi effetti di cross-talk. Si ha un cross-talk di tipo coerente se la lunghezza dopo la quale il segnale viene sommato a se stesso è inferiore alla lunghezza di coerenza del segnale, che è proporzionale al rapporto tra la velocità di propagazione della luce nella fibra ( $c/n_{eff}$ ) e la larghezza di riga  $\Delta\nu$ , o di tipo incoerente, se invece è paragonabile o superiore ad essa. Per questo motivo l'analisi del funzionamento del circuito è stata estesa al dominio delle frequenze, con particolare attenzione alla valutazione del livello del rumore.

Al fine di acquisire gli spettri elettrici del segnale è stato impiegato un Electrical Spectrum Analyzer (ESA). Lo spettro elettrico è stato valutato in tre punti differenti: all'ingresso del circuito, all'uscita dopo il primo passaggio nel circuito e infine all'uscita dalla porta 3 del circolatore, vale a dire dopo che il segnale ha attraversato due volte il circuito.

I tre set up utilizzati sono illustrati in figura 3.16. Nel primo caso, riportato in figura 3.16a, i dati in ingresso vengono attenuati da un VOA, per poi arrivare al fotodiodo e all'ESA. Nel secondo set up, in figura 3.16b, è stato inserito il circuito, tra il VOA e il fotodiodo. Nel terzo, in figura 3.16c, si è resa necessaria l'aggiunta di un circolatore, per permettere il doppio passaggio attraverso il circuito. I dati in ingresso arrivano alla porta 1 del circolatore, sulla porta 2 sono posti il circuito e lo specchio, mentre sulla porta 3 sono posti il fotodiodo e l'ESA. In tutte e tre le situazioni è stato impiegato un VOA, utilizzato per eseguire le misurazioni a pari potenza ottica ricevuta (-10 dBm), in modo da poter operare correttamente un confronto.

Per ognuna delle sorgenti ottiche descritte nel paragrafo 3.1 sono state prese in esame due condizioni di operazione: un punto di lavoro con massima riduzione del rapporto di estinzione a 1 Gb/s e un punto di lavoro con minore riduzione del rapporto di estinzione a 1 Gb/s.

### 3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione

Tutti gli spettri sono stati acquisiti con una Resolution BandWidth (RBW) pari a 1 Hz e una Video BandWidth (VBW) pari a 200 Hz. Gli spettri elettrici misurati sono presentati sugli intervalli di frequenze di 0-100 MHz e 0-2 GHz. Per l'analisi a frequenze basse è stata impiegata un PRBS 2<sup>7</sup>-1, mentre, estendendo l'intervallo di analisi a 2 GHz, è stata impiegata una PRBS più lunga, in particolare di 2<sup>31</sup>-1. In questo modo, a parità di risoluzione, si ottiene l'involuppo dello spettro del segnale. Si è preliminarmente verificato che, con i trasmettitori impiegati, il rapporto di estinzione è indipendente dalla lunghezza della PRBS. Le misure evidenziano che l'attraversamento del circuito comporta un innalzamento del rumore sul segnale che sarà poi iniettato nel RSOA.

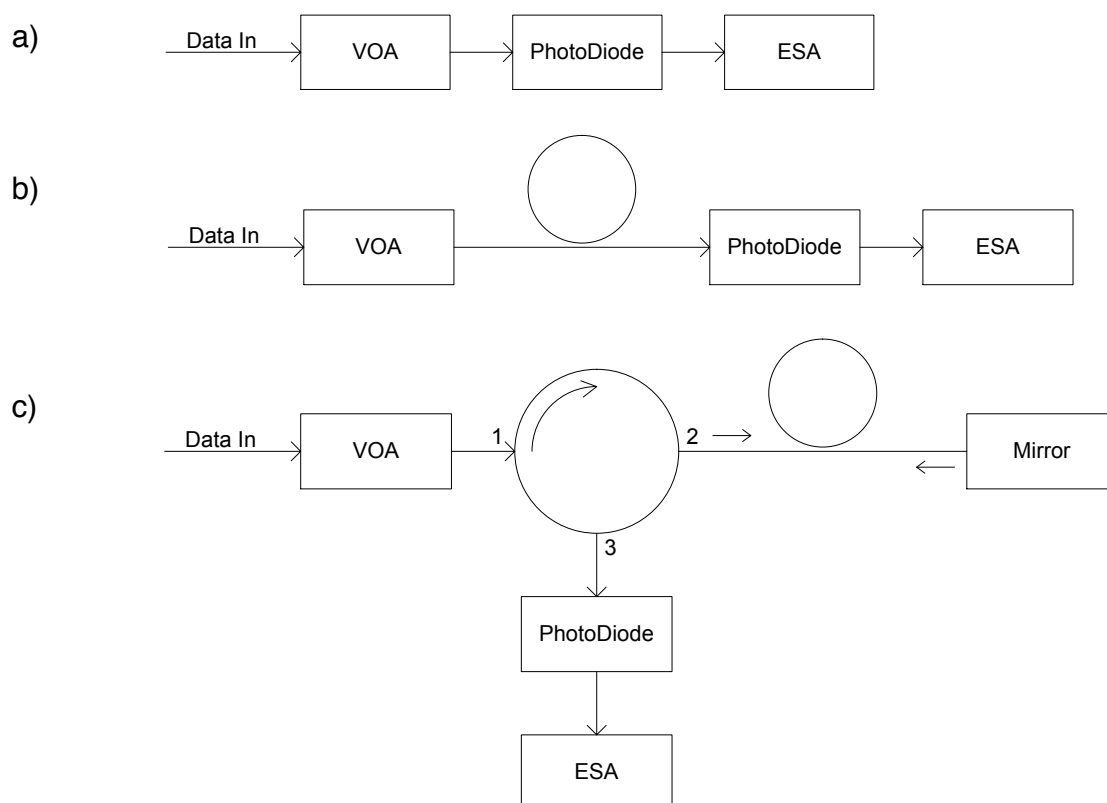


Figura 3.16- Set up utilizzati per l'acquisizione degli spettri elettrici:

- a) all'ingresso del circuito;
- b) dopo un passaggio nel circuito;
- c) dopo due passaggi nel circuito.

#### 3.3.1 Il livello di rumore nel circuito utilizzando come sorgente il laser DFB

Gli spettri elettrici acquisiti utilizzando come trasmettitore il laser DFB modulato esternamente sono riportati nelle figure 3.17 e 3.18, rispettivamente per le due condizioni di operazione illustrate.

In particolare, la prima delle due condizioni di lavoro analizzate, relativa alla massima variazione del rapporto di estinzione, si ha per un ER di ingresso di 8,8 dB, che si ottiene per un'ampiezza dei dati elettrici applicati all'amplificatore a radio frequenza pari a  $0,5 V_{pp}$ . In corrispondenza di questo valore di rapporto di estinzione in ingresso, si ottiene un rapporto di estinzione di uscita di 5 dB. Nella figura 3.17a è riportato un dettaglio degli spettri elettrici su di uno span di 100 MHz. Sono confrontati in particolare gli spettri acquisiti in ingresso, dopo un passaggio e dopo due passaggi nel circuito, rispettivamente riportati nella figura in azzurro, in verde e in giallo. Si possono notare i tipici picchi relativi alla sequenza di modulazione PRBS. La distanza tra i picchi è di circa 7,87 MHz, corrispondente a 1 Gb/s/127.

Il confronto tra le varie curve mostra che, al passaggio dal circuito, il livello di rumore evidenziato dal fondo dello spettro aumenta di circa 20 dB. Il secondo passaggio nel circuito, invece, non modifica il livello di rumore ulteriormente. Questo stesso comportamento sarà evidenziato anche per gli altri trasmettitori. Lo spettro registrato presenta livelli di rumore fluttuanti perché, a causa dell'alta coerenza della sorgente, il segnale ricircolante nel circuito fa interferenza con se stesso, risultato delle fluttuazioni termiche e ambientali. In figura 3.17b lo span è stato allargato a 2 GHz. Ciò ha permesso di analizzare le variazioni del picco relativo alla modulazione, posizionato alla frequenza di 1 GHz. Il rapporto di estinzione del segnale è definito dal rapporto tra la componente in continua e la componente alla frequenza di cifra. La componente in continua non è visualizzata negli spettri elettrici riportati dal momento che la banda dell'ESA usato in laboratorio è 9 kHz - 25 GHz. Tuttavia, dal momento che le misure sono state effettuate avendo cura di mantenere la stessa potenza ottica al ricevitore, la componente in continua può essere considerata costante in ognuna delle visualizzazioni. Il fatto che la componente alla frequenza di cifra cresca implica una diminuzione qualitativa del rapporto di estinzione.

### 3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione

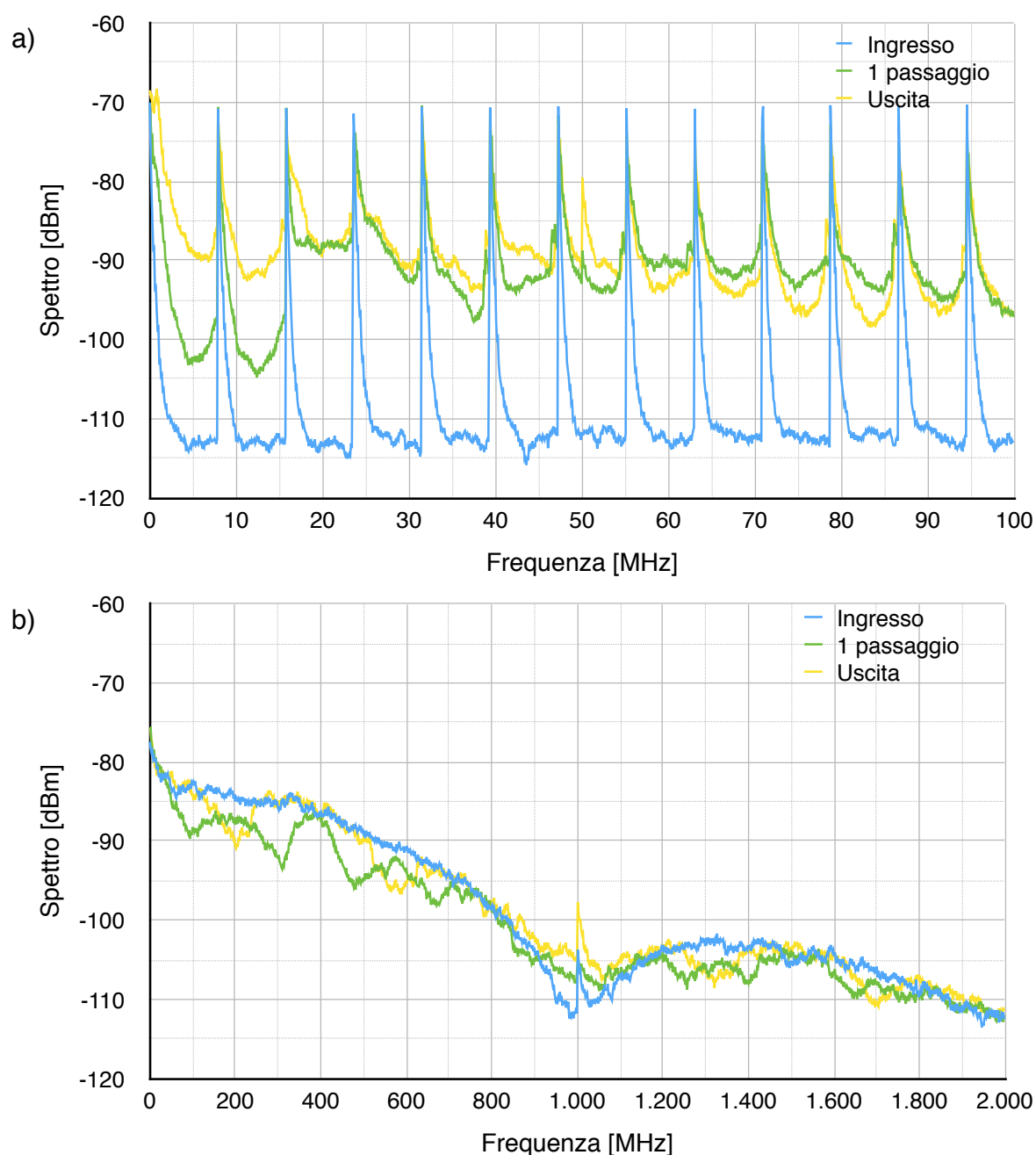


Figura 3.17- Spettri del segnale modulato con ampiezza  $0,5 V_{pp}$  e frequenza 1 Gb/s ottenuti con un trasmettitore costituito da un laser DFB modulato esternamente visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).

Per quanto riguarda il secondo caso, relativo ad una minore riduzione del rapporto di estinzione, l'ampiezza scelta è stata di  $1 V_{pp}$ , sempre alla frequenza di 1 Gb/s. Con questi parametri l'ER in ingresso è di 10,2 dB, mentre quello in uscita è di 8,2 dB. Nelle figure 3.18a e 3.18b sono riportati gli spettri relativi a questa configurazione, rispettivamente visualizzati con span di 100 MHz e 2 GHz. Nel primo caso è ancora



### 3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione

evidente la crescita del livello di rumore di circa 20 dB. Come atteso il contributo del rumore è analogo, trattandosi della stessa sorgente ottica. Nel secondo caso si vede invece che il picco della modulazione a 1 Gb/s diminuisce di una quantità inferiore. Questo evidenzia una minore riduzione del rapporto di estinzione del segnale.

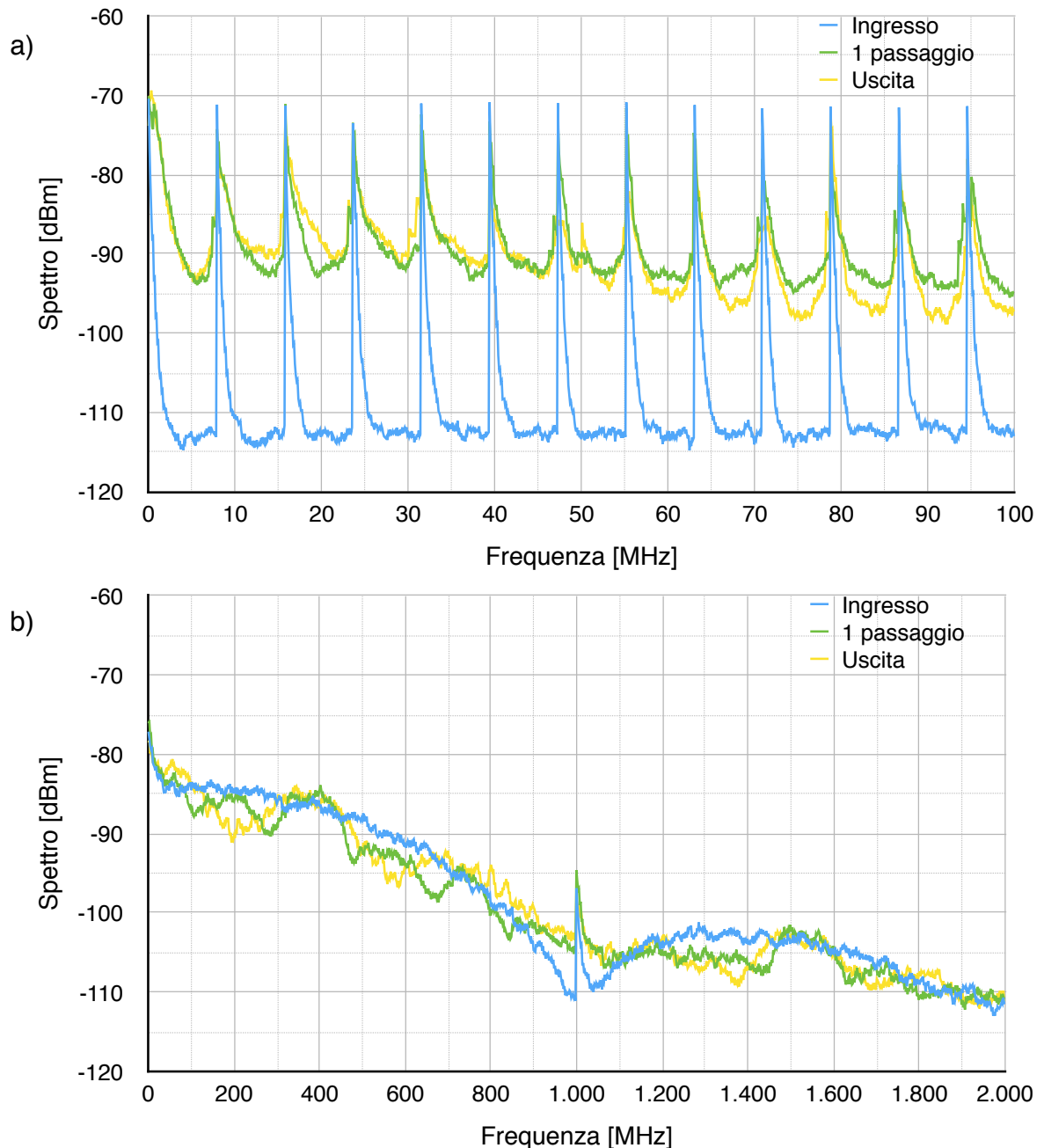


Figura 3.18- Spettri del segnale modulato con ampiezza  $1 V_{pp}$  e frequenza 1 Gb/s ottenuti con un trasmettitore costituito da un laser DFB modulato esternamente visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).

#### 3.3.2 Il livello di rumore nel circuito utilizzando come sorgente il laser DML

Le misure descritte nel paragrafo precedente sono state ripetute utilizzando come sorgente il laser modulato direttamente, ovvero una sorgente con una larghezza di riga più elevata e di conseguenza una lunghezza di coerenza ridotta e inferiore a 50 cm. In questo caso lo spettro elettrico è più stabile. Impiegando questa sorgente ottica, il caso relativo alla massima compressione del rapporto di estinzione, alla frequenza di 1 Gb/s, corrisponde a un ER in ingresso di 9,4 dB, ottenuto con dati elettrici applicati di 1,4 V<sub>pp</sub>. Il rapporto di estinzione in uscita è di 6,9 dB. In figura 3.19a è riportato lo spettro elettrico visualizzato su di uno span di 100 MHz in ingresso al circuito di aiuto alla cancellazione, dopo averlo attraversato una volta e dopo averlo attraversato due volte, rispettivamente in azzurro, in verde e in giallo. Anche in questo caso il circuito determina un innalzamento del livello di rumore tra i 15 dB e i 20 dB. Si possono notare anche in questo contesto i picchi relativi alla periodicità della sequenza PRBS, sempre distanziati di 7,87 MHz. In figura 3.19b è riportato lo spettro elettrico visualizzato su 2 GHz. Come si vede dopo il primo passaggio il picco di modulazione a 1 GHz scompare

Nel caso successivo preso in esame, il rapporto di estinzione in ingresso è di 5,6 dB, ottenuto con ampiezza dati di 1 V<sub>pp</sub>, e il rapporto di estinzione in uscita dal circuito di aiuto alla cancellazione è di 5 dB. Gli spettri elettrici sono riportati nei grafici in figura 3.20. Mentre la visualizzazione su 100 MHz, in figura 3.20a, mostra un aumento del rumore, su 2 GHz si nota che, già in ingresso, il picco di modulazione, a causa del basso rapporto di estinzione, è ridotto per poi scomparire dopo l'attraversamento del circuito.

### 3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione

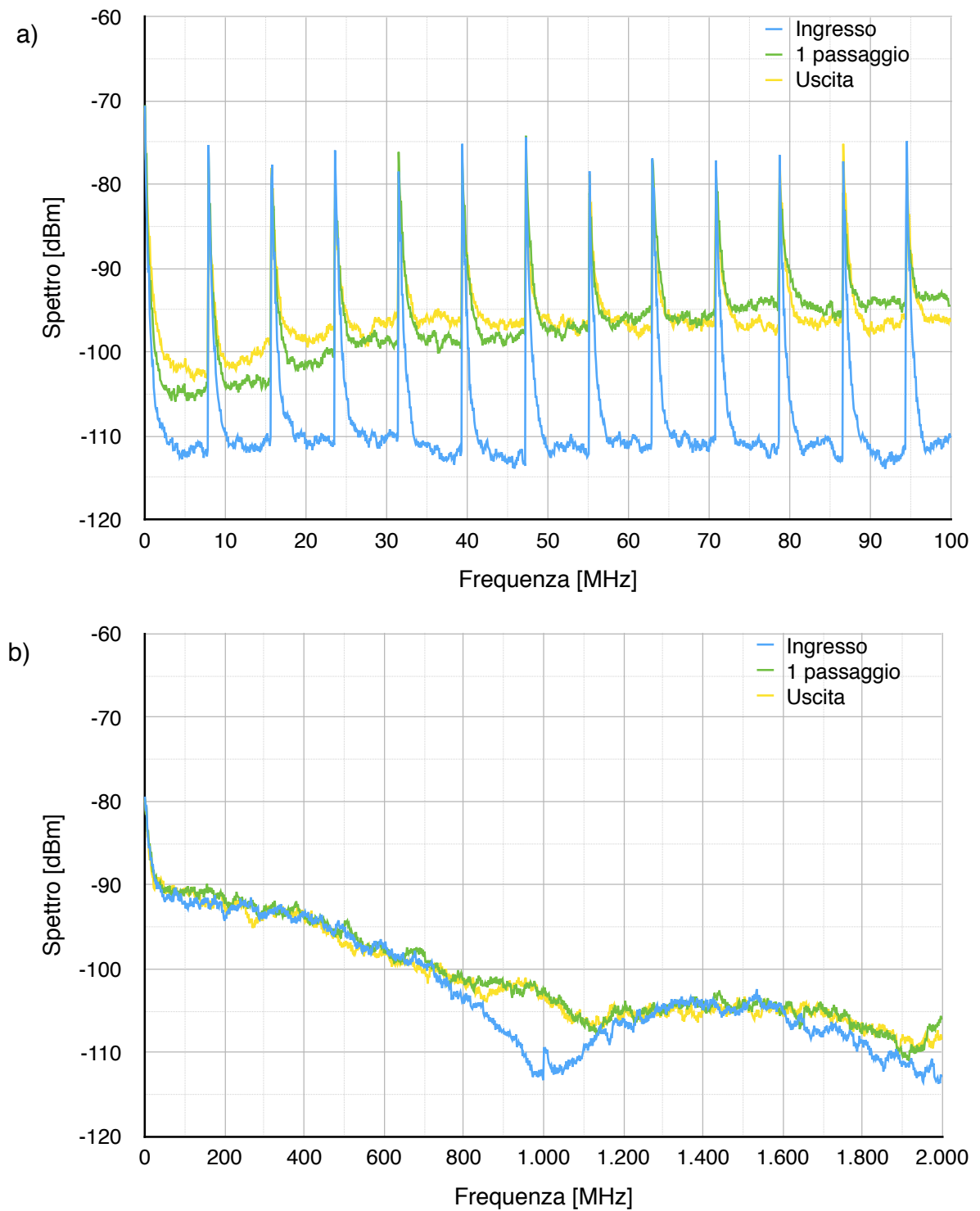


Figura 3.19- Spettri del segnale modulato con ampiezza  $1,4 V_{pp}$  e frequenza 1 Gb/s ottenuti utilizzando come trasmettitore un laser DML visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).

### 3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione

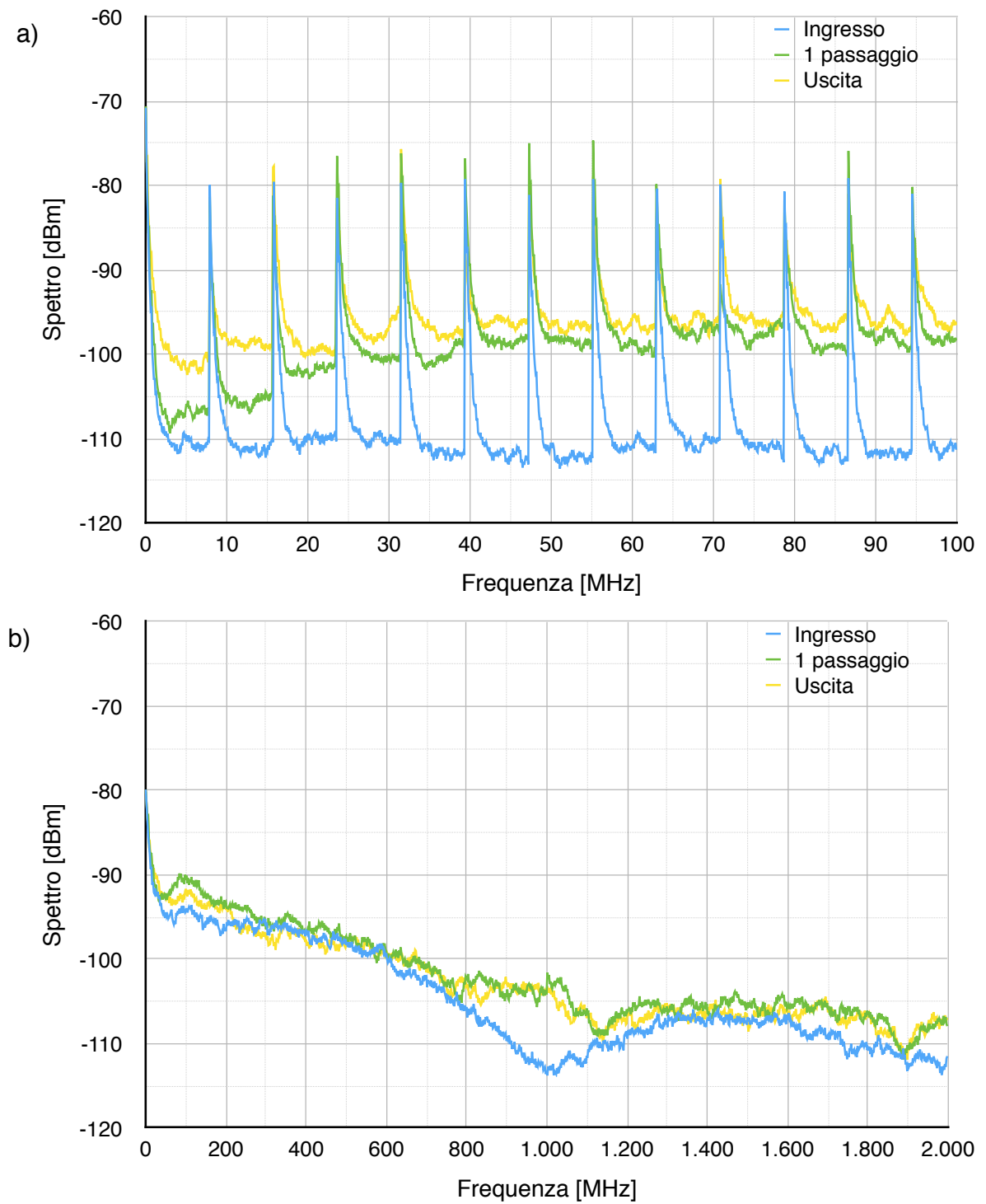


Figura 3.20- Spettri del segnale modulato con ampiezza  $1 V_{pp}$  e frequenza 1 Gb/s ottenuti utilizzando come trasmettitore un laser DML visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).

#### 3.3.3 Il livello di rumore nel circuito utilizzando come sorgente lo spettro ASE filtrato

Infine, le misure sono state effettuate utilizzando come sorgente l'ASE filtrata e modulata direttamente. Si è scelto di impiegare, per definire il caso di massima variazione del rapporto di estinzione, la massima ampiezza dei dati consentita dal pattern generator, ovvero  $2 V_{pp}$ . Adoperando questi parametri, l'ER varia da 7,2 dB in ingresso a 4,1 dB in uscita dal circuito di aiuto alla cancellazione. I relativi spettri elettrici sono riportati nelle figure 3.21a, visualizzati su di uno span di 100 MHz, e 3.21b, visualizzati su di uno span di 2 GHz.

Anche in questo caso sono visibili i picchi relativi alla PRBS, distanziati di 7,87 MHz. Con questa sorgente ottica non si riscontra un aumento del livello di rumore a seguito del passaggio nel circuito. Il rumore in una sorgente ASE filtrata, espresso in termini di relative intensity noise, è più elevato di quello di un DFB [19] e non viene peggiorato dall'attraversamento del circuito di aiuto alla cancellazione.

L'ampiezza di modulazione è stata diminuita a  $1,7 V_{pp}$  ottenendo l'ER del segnale di 5,9 dB. All'uscita del circuito di aiuto alla cancellazione il rapporto di estinzione è di 3,3 dB. Gli spettri elettrici relativi a questo caso sono riportati nei grafici in figura 3.22. Anche in questo caso il livello di rumore non aumenta e si mantiene su livelli paragonabili al caso precedente, mentre il rapporto di estinzione viene ridotto dall'attraversamento del circuito.

### 3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione

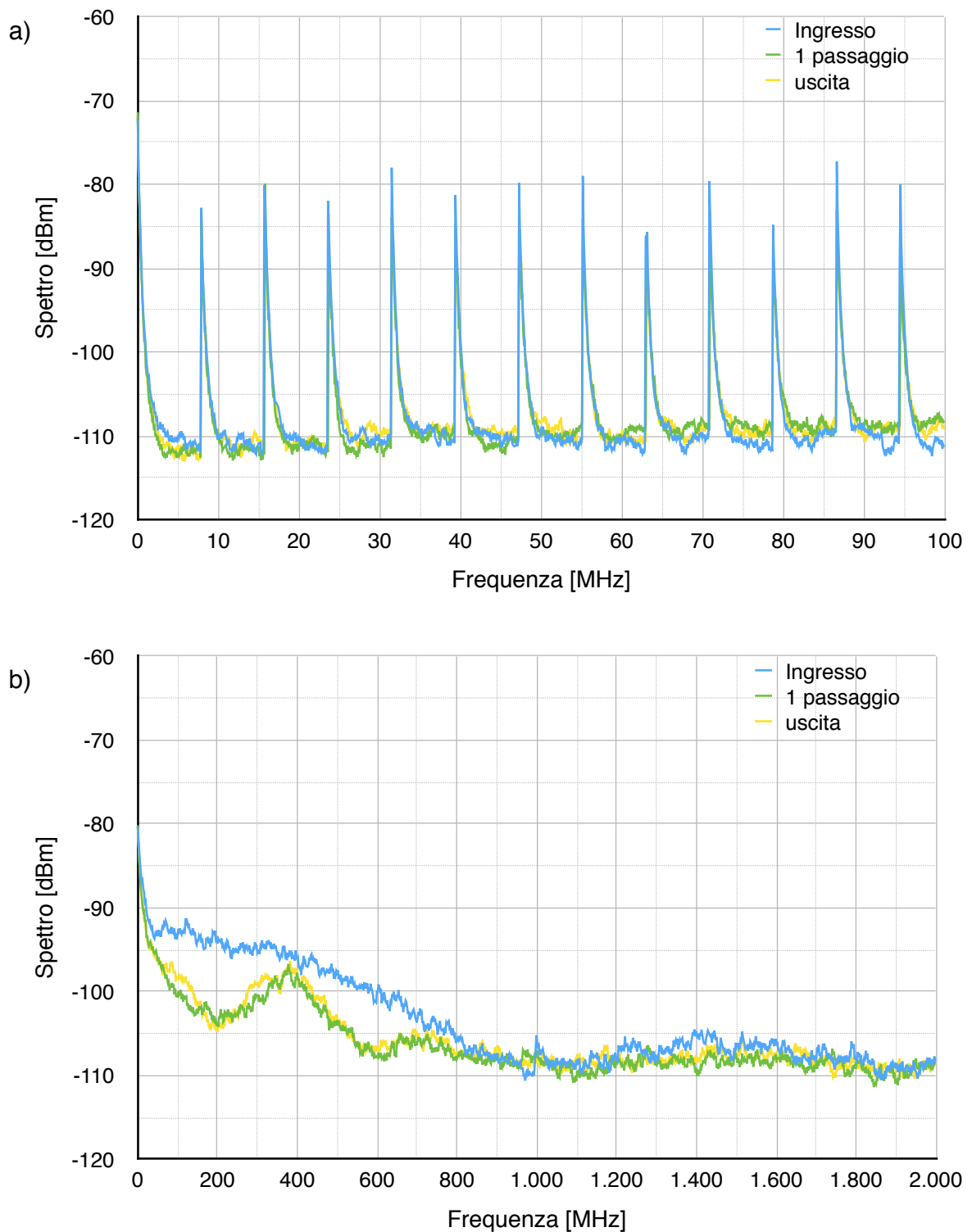


Figura 3.21- Spettri del segnale modulato con ampiezza  $2 V_{pp}$  e frequenza 1 Gb/s ottenuti utilizzando come sorgente l'ASE filtrata e modulata direttamente, visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).

### 3.3 Aspetti di rumore nel circuito di aiuto alla cancellazione

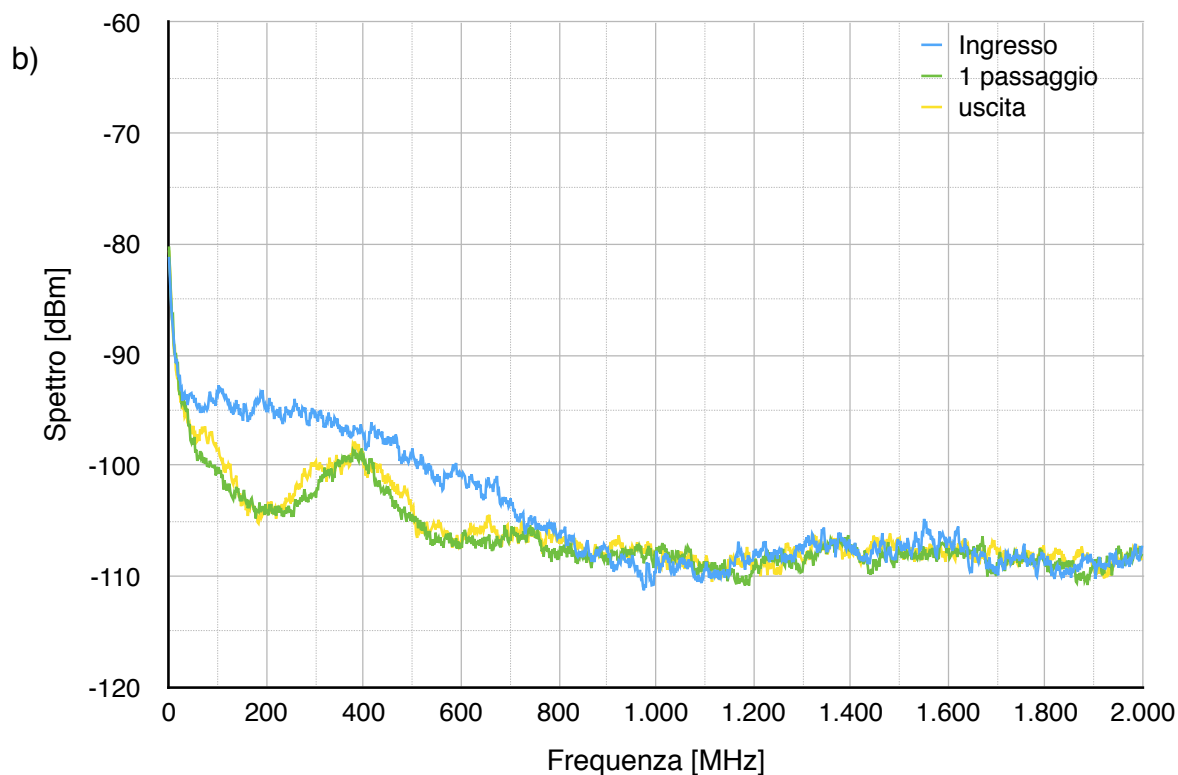
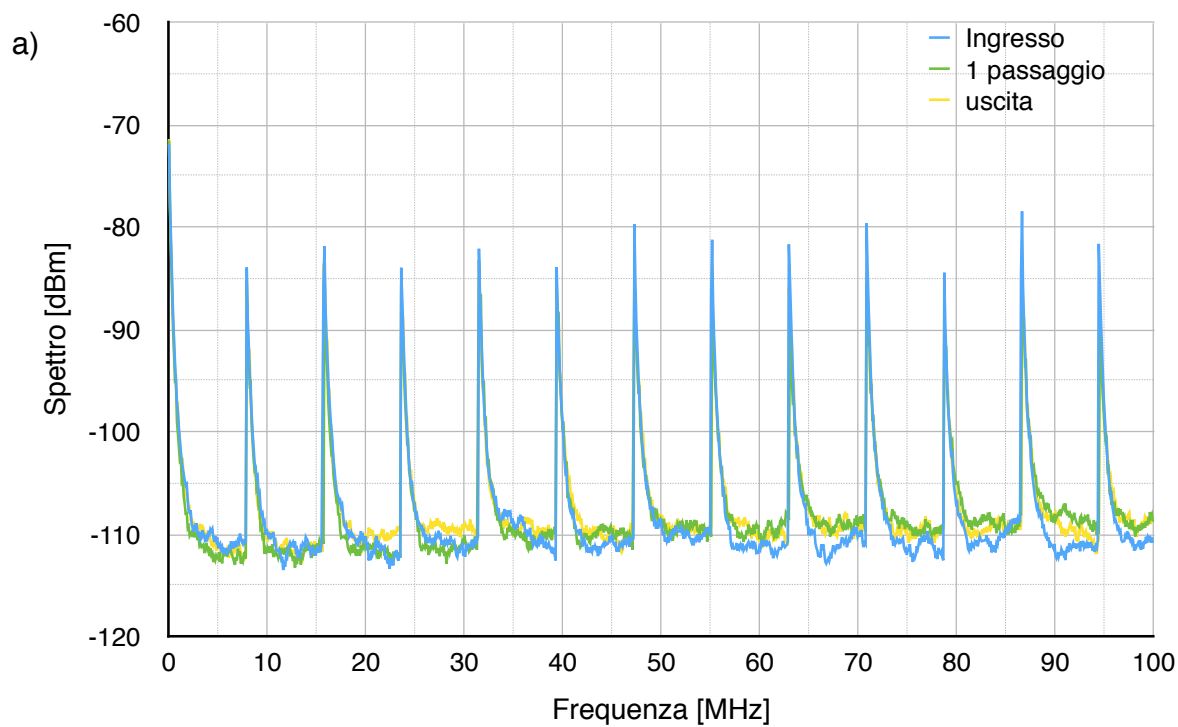


Figura 3.22- Spettri del segnale modulato con ampiezza  $1,7 V_{pp}$  e frequenza 1 Gb/s ottenuti utilizzando come sorgente l'ASE filtrata e modulata direttamente, visualizzato su uno span di 100 MHz (a) e di 2 GHz (b).

## 3.4 Caratterizzazione sperimentale del RSOA

---

Prima di valutare l'efficacia del circuito proposto in questo lavoro di tesi all'interno di un'architettura di seeding esterno, si è caratterizzato il comportamento in guadagno del componente RSOA utilizzato per la sperimentazione, che all'interno dello schema di seeding esterno opera la cancellazione della modulazione del segnale iniettato nel RSOA e la sua successiva rimodulazione, attraverso la modulazione diretta della propria corrente di alimentazione.

Inizialmente, sono stati misurati i guadagni del RSOA, in modo da definire l'intervallo di potenze per cui risulti massima la compressione del guadagno. Questa misura è stata effettuata utilizzando come sorgente il laser DFB a 1550 nm già precedentemente impiegato, in continua e impostando la corrente di alimentazione del RSOA a 130 mA. I risultati sono illustrati in figura 3.23, dove il grafico riporta la potenza in uscita dal RSOA in funzione di quella iniettata. Come si vede, la regione di massima compressione del guadagno, per la quale la potenza d'uscita del RSOA è costante, è intorno a -4 dBm, ma la saturazione della potenza d'uscita comincia già a valori più bassi. Si è scelto quindi di variare la potenza iniettata nel RSOA circa tra -20 dBm e 5 dBm e di misurare su questo intervallo di potenze l'efficacia del seeding

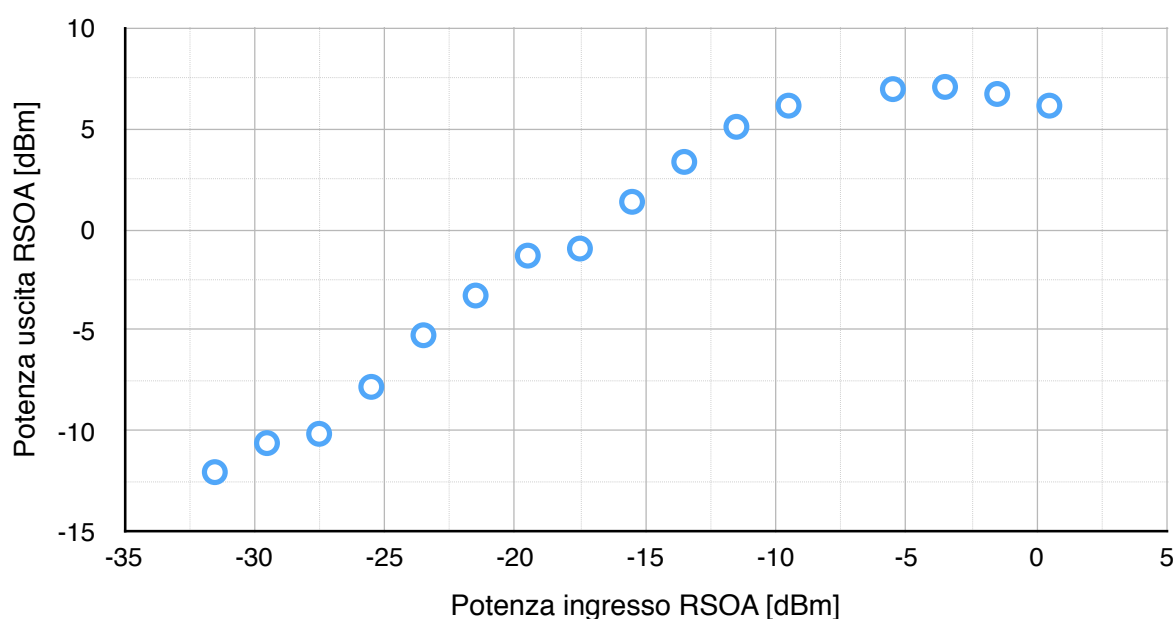


Figura 3.23 - Potenza in uscita dal RSOA in funzione di quella iniettata. Corrente di alimentazione 130 mA.



### 3.4 Caratterizzazione sperimentale del RSOA

e della cancellazione attraverso le misurazioni dell'ER del segnale in uscita dal RSOA. Sono stati quindi misurati i rapporti di estinzione del segnale modulato in uscita dal RSOA al variare della potenza iniettata nel RSOA, solo in un secondo momento è stato invece inserito il circuito di aiuto alla cancellazione e l'effetto del seeding sul rapporto di estinzione del segnale in uscita è stato nuovamente valutato. I set up utilizzati per le misurazioni del rapporto di estinzione in queste situazioni sono illustrati in figura 3.24.

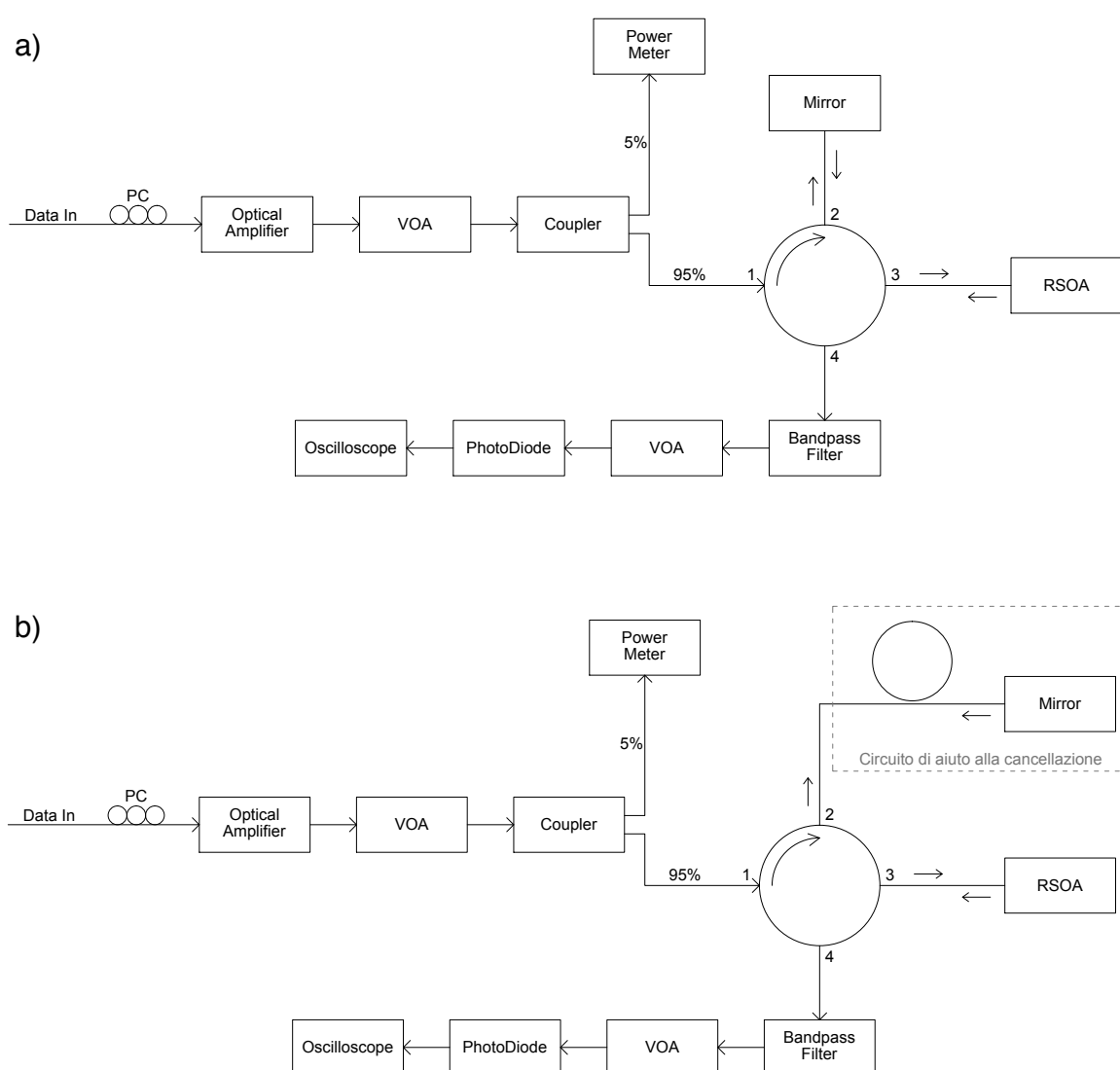


Figura 3.24 - Set up utilizzato per misurare l'ER a) in un sistema di seeding esterno; b) in un sistema di seeding esterno con circuito di aiuto alla cancellazione.

### 3.4 Caratterizzazione sperimentale del RSOA

Il segnale, prima di arrivare alla porta 1 del circolatore, va allineato in polarizzazione rispetto allo stato principale del RSOA utilizzando delle laminette PC per il controllo della polarizzazione. Il segnale viene quindi amplificato attraverso un amplificatore Erbium Doped Fibre Amplifier (EDFA), in modo da avere a disposizione una certa dinamica di variazione della potenza iniettata nel RSOA, arrivando ad avere potenza ottica sufficiente per saturare l'RSOA. Con un attenuatore ottico variabile la potenza del segnale di seeding viene fatta variare e controllata usando un accoppiatore ottico in fibra con rapporto di accoppiamento 95/5 e con un'uscita connessa ad un power meter. Inizialmente, come si vede in figura 3.24a, è stato misurato l'ER senza impiegare il circuito di aiuto alla cancellazione, sulla porta 2 del circolatore è stato quindi posto uno specchio. In un secondo momento, come da figura 3.24b, lo specchio è stato sostituito dal circuito. Sulla porta 3 del circolatore è stato posto l'RSOA che quindi, in un caso, riceve in ingresso il segnale di downstream modulato per il seeding e, nell'altro, il segnale di downstream modulato il cui rapporto di estinzione è stato ridotto dal circuito di aiuto alla cancellazione prima del seeding. L'amplificatore ottico a semiconduttore è stato controllato in temperatura a circa 25 °C, mentre la corrente di alimentazione, per misurazioni differenti, è stata fatta variare tra 100 mA e 200 mA. Infine, sulla porta 4 del circolatore, è stato posto il blocco di ricezione, composto da un filtro passabanda con banda ottica di circa 0,3 nm, un attenuatore ottico variabile (VOA) ed un fotodiodo connesso ad un oscilloscopio. Il filtro passabanda, sintonizzato alla lunghezza d'onda della sorgente ottica impiegata (1540 nm utilizzando il laser DFB, 1550 nm utilizzando il laser DML e 1560 nm utilizzando l'ASE filtrata), è stato impiegato al fine di eliminare l'emissione spontanea emessa dal RSOA e quindi di migliorare il rapporto segnale-rumore ottico (OSNR) del segnale ricevuto dal fotodiodo. L'attenuatore ottico è stato utilizzato per ridurre la potenza del segnale, in modo da non saturare il fotodiodo. Infine, il fotodiodo e l'oscilloscopio sono stati impiegati per poter misurare il rapporto di estinzione del segnale ottico. Nella tabella 3.1 sono riportate le perdite misurate nei diversi punti del set up di figura 3.24, mentre nella tabella 3.2 sono riportate le perdite di inserzione misurate sperimentalmente in laboratorio del circolatore ottico a quattro porte.

### 3.4 Caratterizzazione sperimentale del RSOA

Posizione	Perdite totali	Perdite rispetto al punto precedente del set up
Uscita PC	0,981 dB	0,981 dB
Uscita VOA	2,12 dB	1,139 dB
Uscita coupler (95%)	2,671 dB	0,551 dB
Uscita coupler (5%)	16,612 dB	13,945 dB
Ingresso porta 1	2,908 dB	0,237 dB
Uscita porta 2	3,897 dB	0,989 dB
Uscita porta 3 (senza circuito)	8,157 dB	4,26 dB
Uscita porta 3 (con circuito)	11,517 dB	7,62 dB

Tabella 3.1 - Perdite del set up relativo alla misurazione dell'ER in uno schema di seeding esterno.

Porta di ingresso	Porta di uscita	Perdite
1	2	0,989 dB
	3	17,889 dB
	4	34,009 dB
2	3	0,979 dB
	4	17,649 dB
	1	59,559 dB
3	4	0,719 dB
	1	-
	2	60,609 dB

Tabella 3.2 - Perdite di inserzione misurate sperimentalmente del circolatore ottico a quattro porte.

Le valutazioni di compressione del rapporto di estinzione sono state eseguite per tutte e tre le sorgenti ottiche precedentemente descritte: laser DFB, DML e ASE filtrata. Per ognuna di esse si è scelto di analizzare condizioni di operazione con rapporti di estinzione tipici delle reti di accesso ottiche. Sono stati quindi selezionati dei punti di lavoro dei trasmettitori impiegati tali per cui l'ER del segnale in ingresso fosse compreso tra 5 dB e 9 dB, alle frequenze di cifra di 1 Gb/s e 2,5 Gb/s.

### 3.4 Caratterizzazione sperimentale del RSOA

Per il segnale modulato in intensità, il rapporto di estinzione è stato calcolato ottenendo le tensioni relative ai bit 0 e 1 dal diagramma ad occhio del segnale. Per tener conto della risposta del guadagno del RSOA a variazioni veloci della potenza in ingresso [20] sono stati registrati due livelli per il bit 1, un livello alto ( $V_{1\_high}$ ) e un livello basso ( $V_{1\_low}$ ), come si vede in figura 3.25. Sono così stati calcolati tre diversi rapporti di estinzione: un ER minimo (usando la 3.3), un ER massimo (usando la 3.4) e un ER medio, ottenuto attraverso una media pesata del livello alto e del livello basso (usando la 3.5).

$$ER_{min} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{1_{low}} - \emptyset_{ph}}{V_0 - \emptyset_{ph}} \right) \quad (3.3)$$

$$ER_{max} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{1_{high}} - \emptyset_{ph}}{V_0 - \emptyset_{ph}} \right) \quad (3.4)$$

$$ER_{av} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{(0.25 \cdot V_{1_{high}} + 0.75 \cdot V_{1_{low}}) - \emptyset_{ph}}{V_0 - \emptyset_{ph}} \right) \quad (3.5)$$

Quando il segnale attraversa il circuito è più difficile identificarne i livelli, è stato quindi calcolato il rapporto di estinzione medio del segnale, utilizzando la formula 3.2, già usata in precedenza per calcolare l'ER del in uscita dal circuito di aiuto alla cancellazione e riportata nel paragrafo 3.2. Il confronto sarà quindi proposto tra i valori medi del rapporto di estinzione, con e senza circuito di aiuto alla cancellazione. Nei prossimi paragrafi verranno illustrati i risultati ottenuti impiegando le diverse sorgenti ottiche.

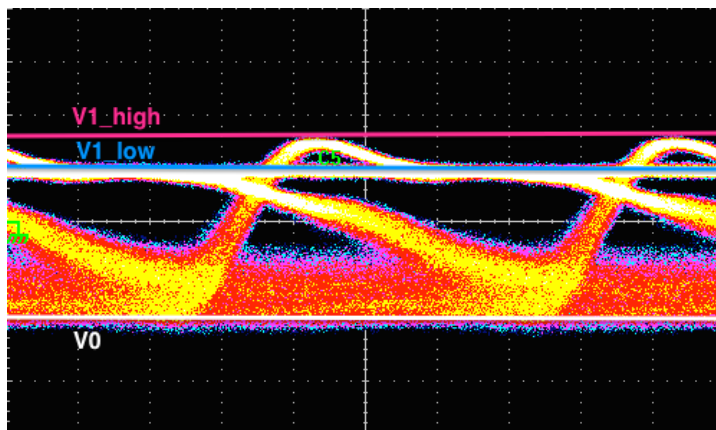


Figura 3.25 - Esempio di diagramma ad occhio dove è visibile la risposta al gradino del RSOA.

## 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

---

Utilizzando come sorgente il laser DFB, sono stati presi in considerazione le seguenti condizioni di segnale iniettato e di corrente di alimentazione del RSOA:

- 1) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 1 Gb/s, ER di circa 5 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $1,7 V_{pp}$  (non amplificati) applicata al modulatore esterno di intensità, RSOA alimentato a 130 mA;
- 2) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 1 Gb/s, ER di circa 8 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $0,4 V_{pp}$  applicata al modulatore esterno di intensità, RSOA alimentato a 100 mA, 110 mA, 120 mA e 130 mA;
- 3) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 1 Gb/s, ER di circa 9 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $0,5 V_{pp}$  applicata al modulatore esterno di intensità, RSOA alimentato a 120 mA e 130 mA;
- 4) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, ER di circa 5 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $0,4 V_{pp}$  applicata al modulatore esterno di intensità, RSOA alimentato a 120 mA e 130 mA;
- 5) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, ER di circa 6 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $0,6 V_{pp}$  applicata al modulatore esterno di intensità, RSOA alimentato a 100 mA, 110 mA, 120 mA e 130 mA;
- 6) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, ER di circa 7 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $0,8 V_{pp}$  applicata al modulatore esterno di intensità, RSOA alimentato a 120 mA e 130 mA.

Nelle figure 3.26-3.33 sono riportati i risultati delle valutazioni sperimentali della compressione del rapporto di estinzione del segnale operata dal RSOA in diverse condizioni: a 1 Gb/s, con 5 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, in figura 3.26; a 1 Gb/s, con 8 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, in figura 3.27a, 120 mA, in figura 3.27b, 110 mA, in figura 3.28a, e 100 mA, in figura 3.28b; a 1 Gb/s, con 9 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, in figura 3.29a, e 120 mA, in figura 3.29b; a 2.5 Gb/s, con 5 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, in figura 3.30a, e 120 mA, in figura 3.30b; a 2.5 Gb/s, con 6 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, in figura

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

3.31a, 120 mA, in figura 3.31b, 110 mA, in figura 3.32a, e 100 mA, in figura 3.32b; a 2.5 Gb/s, con 7 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, in figura 3.33a, e 120 mA, in figura 3.33b.

Le figure riportano il valore di ER minimo in azzurro, di ER massimo in verde e di ER medio in giallo. Mentre i rapporti di estinzione minimo e medio hanno valori simili, il rapporto di estinzione massimo è, come atteso, peggiore, dal momento che include anche la risposta del guadagno del RSOA, che non si può adeguare immediatamente a variazioni veloci della potenza in ingresso.

Nel caso in figura 3.26, dove il rapporto di estinzione del segnale di ingresso è pari a 5 dB e la corrente di alimentazione del RSOA è di 130 mA, l'effetto della compressione si comincia a vedere alla potenza ottica di iniezione nel RSOA di -16 dBm, punto in cui la riduzione dell'ER è di circa 3 dB. La massima cancellazione si ottiene a circa -6 dBm di potenza ottica iniettata, corrispondente a un ER in uscita quasi nullo.

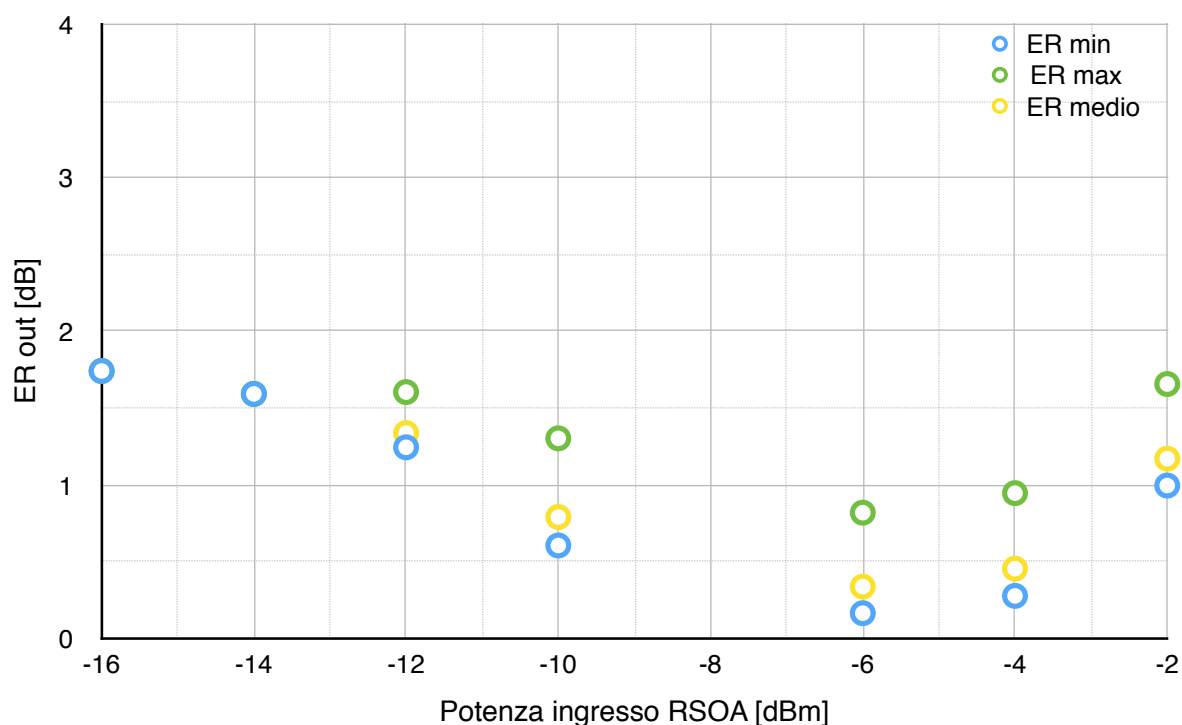


Figura 3.26 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 5 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA 130 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

Come si vede dalle figure 3.27 e 3.28, a 1 Gb/s il rapporto di estinzione di ingresso di 8 dB viene ridotto di oltre 7 dB per una potenza di ingresso al RSOA di circa -4 dBm alle varie correnti dove è stata effettuata la misura. Per potenze superiori a -4 dBm di potenza ottica del segnale iniettato nel RSOA, il rapporto di estinzione d'uscita riprende a crescere. Questo fenomeno, che non si verifica quando il mezzo non-lineare è un SOA e non un RSOA, è stato già descritto in letteratura [21] ed è dovuto al fatto che nel RSOA si realizzano condizioni di elevato svuotamento dovuto alla contemporanea propagazione del segnale in ingresso e di quello retroflesso. Le curve mostrano una variazione di potenza in ingresso da -16 dBm a -2 dBm. A -16 dBm l'RSOA ancora non sta comprimendo il rapporto di estinzione, che è molto elevato, anche se già lavora in regime non-lineare, come si vede dalla figura 3.31. Ad esempio, a -12 dBm di potenza iniettata la riduzione del rapporto di estinzione è di 3,5 dB, 3 dB, 2 dB e 2 dB, rispettivamente alle correnti di 130 mA, 120 mA, 110 mA e 100 mA. Alla potenza iniettata nel RSOA di -8 dBm, invece, la riduzione del rapporto di estinzione è di 5,6 dB, 5,5 dB, 4,9 dB e 4,9 dB, rispettivamente alle correnti di alimentazione di 130 mA, 120 mA, 110 mA e 100 mA.

Prestazioni simili sono evidenziate dalla figura 3.29, dove viene riportata la compressione del rapporto di estinzione operata dal RSOA su un segnale con ER in ingresso di 9 dB. Ad esempio, alla corrente di alimentazione di 130 mA, figura 3.29a, alla potenza ottica iniettata di -12 dBm l'ER viene compresso di circa 2,2 dB. Sempre a questa corrente di alimentazione, la massima compressione dell'ER, di circa 7,2 dB, è ottenuta per un valore di potenza ottica iniettata nel RSOA di -2 dBm. Non sono state riscontrate differenze significative variando la corrente a 120 mA, caso riportato in figura 3.29b.

Misure simili sono state effettuate modulando il segnale in intensità alla frequenza di cifra di 2,5 Gb/s. Nel caso in figura 3.30a, dove il rapporto di estinzione del segnale di ingresso è pari a 5 dB e la corrente di alimentazione del RSOA è di 130 mA, l'effetto della compressione si comincia a vedere alla potenza ottica di iniezione nel RSOA di -11 dBm, punto in cui la riduzione dell'ER è di circa 1 dB. Alla stessa potenza, diminuendo la corrente di alimentazione del RSOA a 120 mA, come si può vedere dalla figura 3.30b, la riduzione dell'ER è più significativa e pari a 2,3 dB. A correnti di alimentazione inferiori è infatti più bassa la densità dei portatori nel RSOA e quindi, a parità di potenza ottica iniettata è più significativo l'effetto dello

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

svuotamento che determina la compressione. Per entrambe le correnti di alimentazione utilizzate la riduzione massima dell'ER è di circa 4,4 dB, ottenuta iniettando nel RSOA un segnale con potenza ottica di -3 dBm.

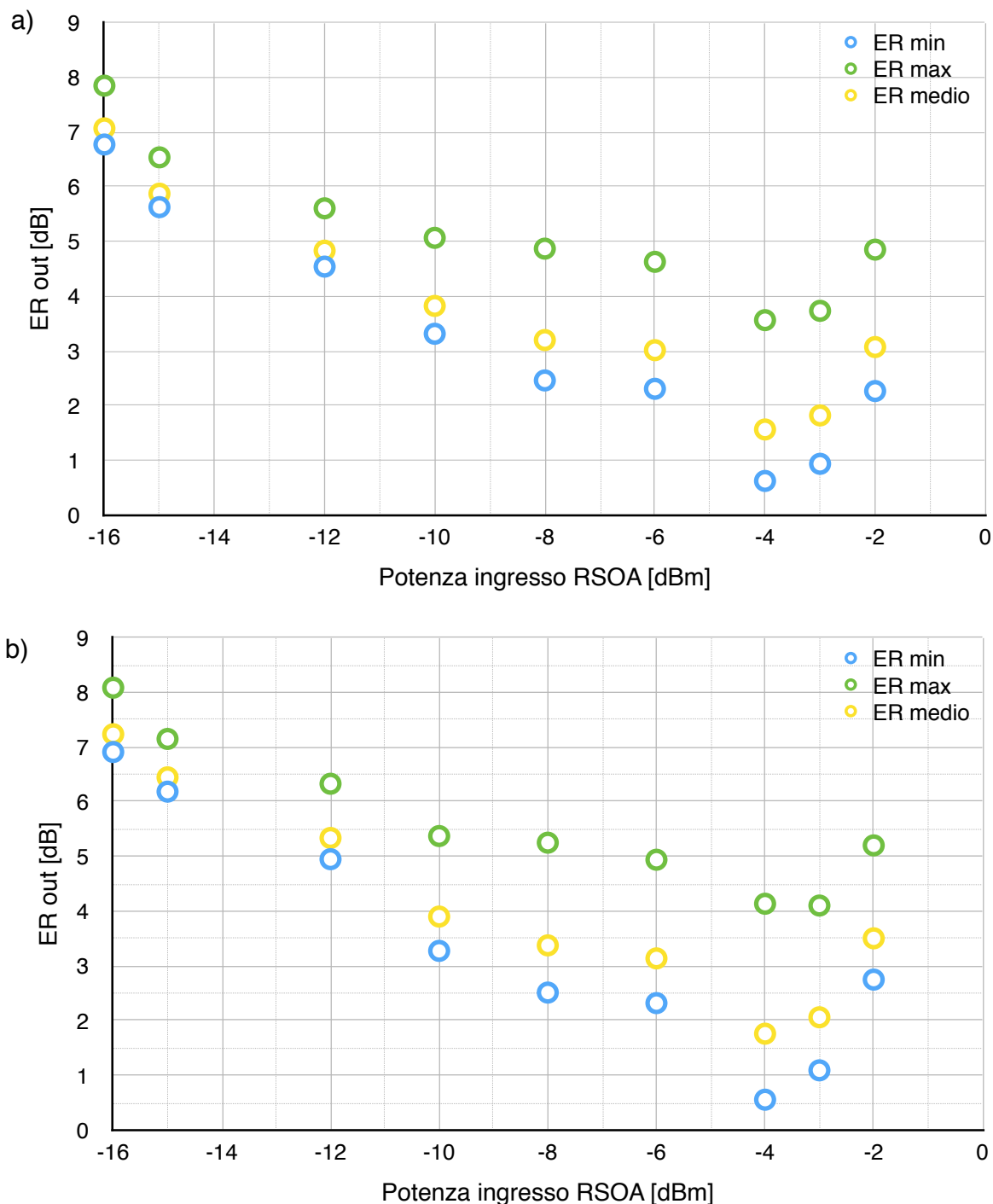


Figura 3.27 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 8 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.



### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

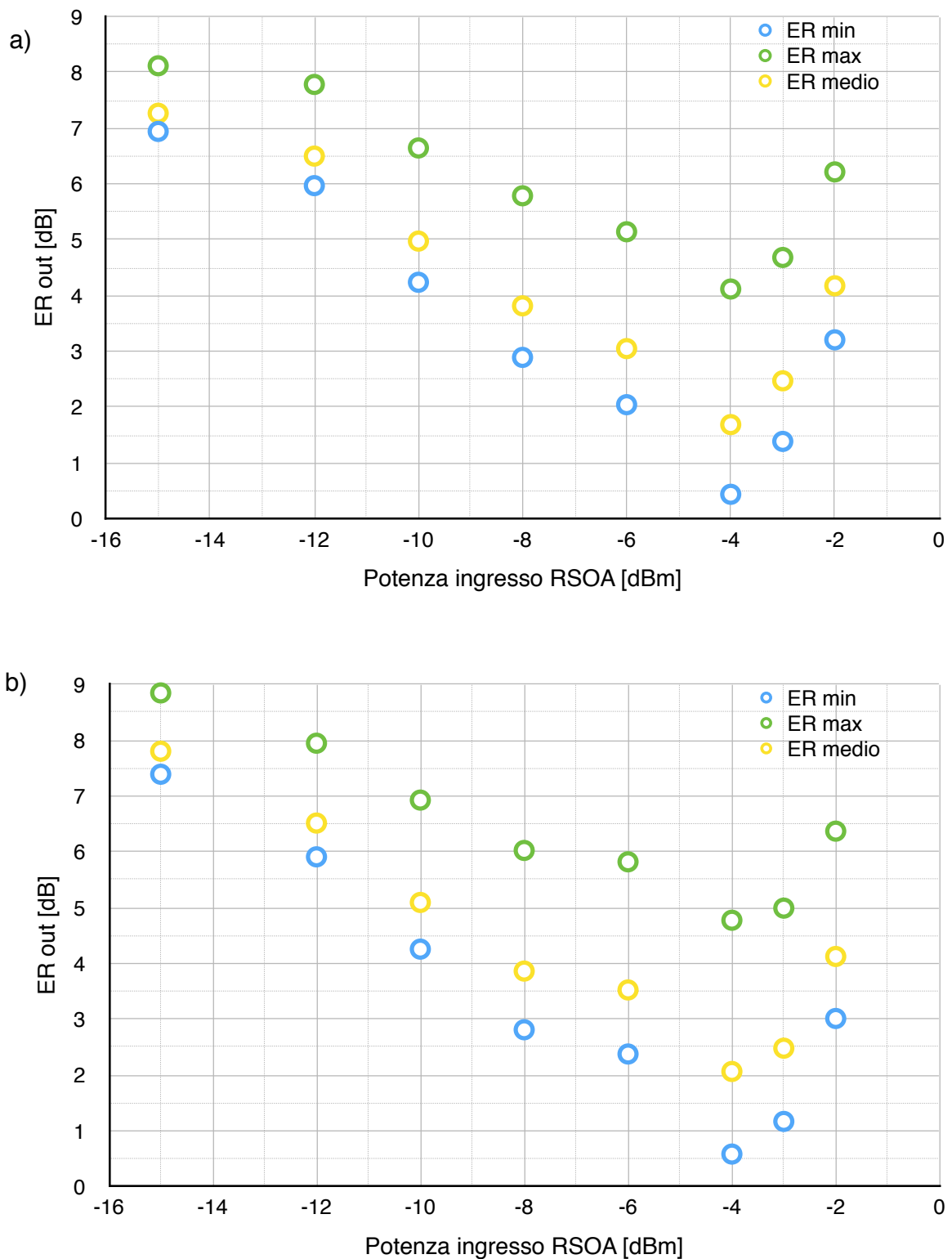


Figura 3.28 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 8 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 110 mA b) 100 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

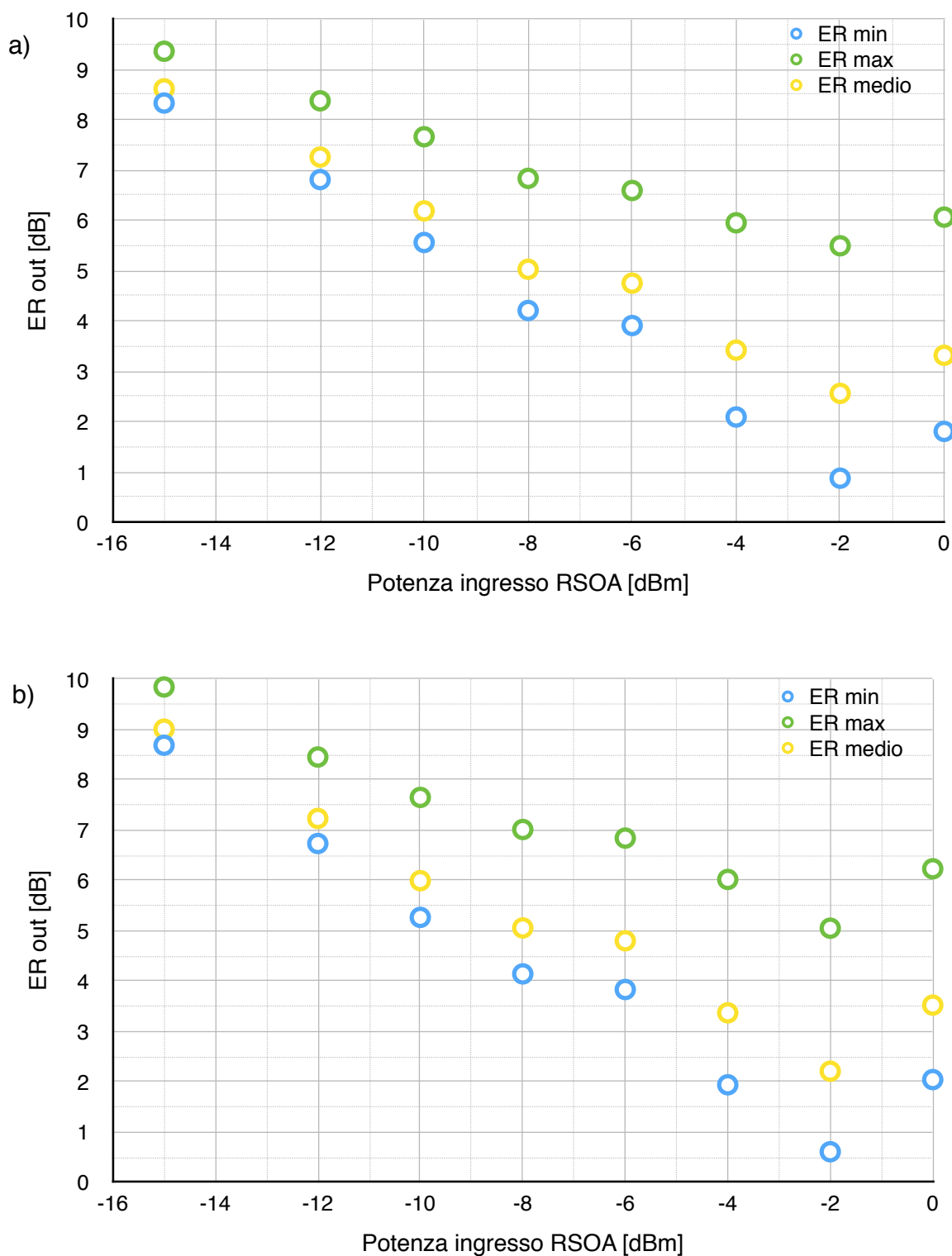


Figura 3.29 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 9 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

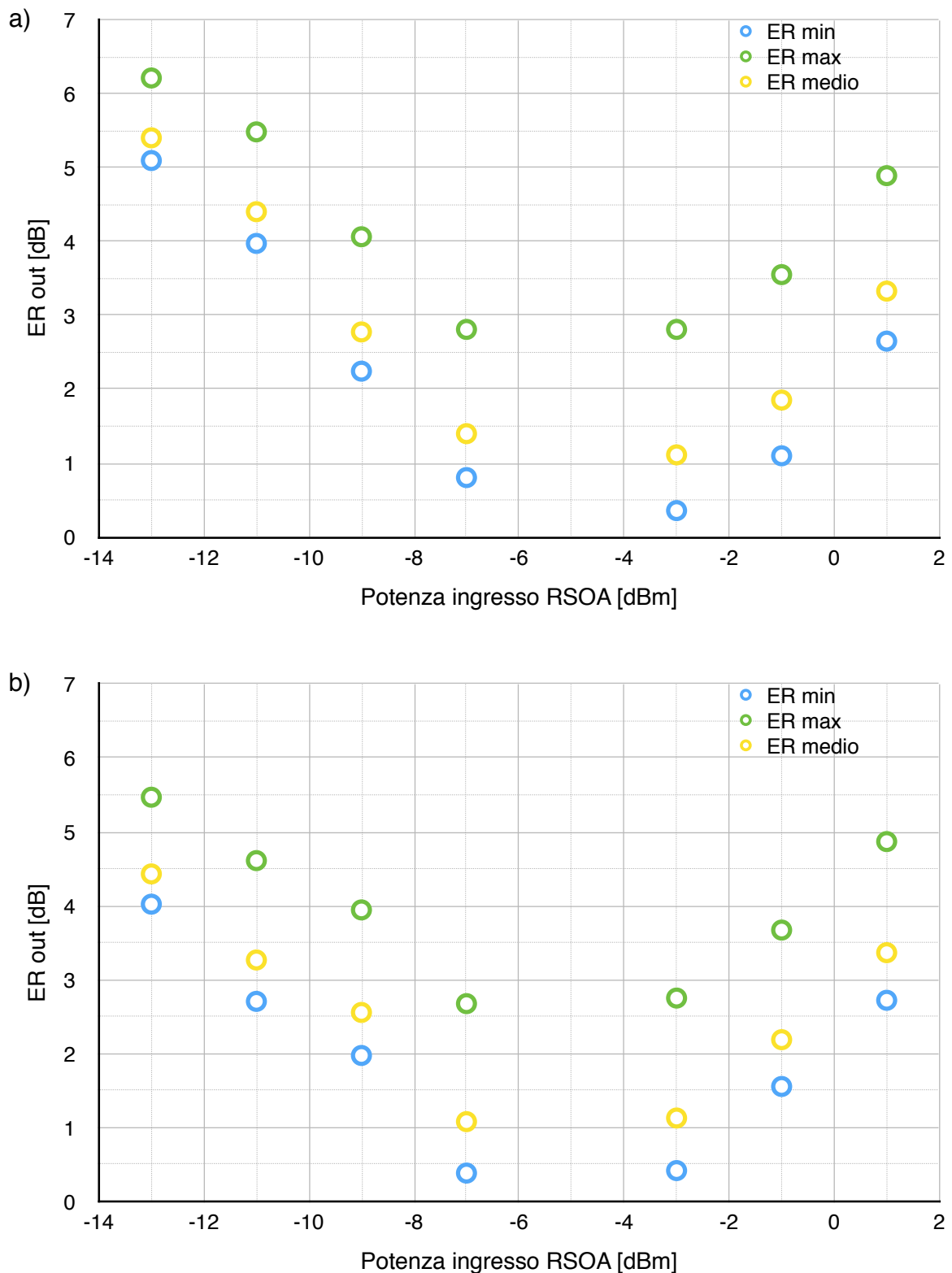


Figura 3.30 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 5 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

Aumentando il rapporto di estinzione del segnale in ingresso a 6 dB, una riduzione di circa 1 dB del rapporto di estinzione si ha alle potenze ottiche di iniezione del RSOA di -12 dBm, -12 dBm, -11 dBm e -11 dBm, rispettivamente alimentando l'RSOA con correnti di 130 mA (figura 3.31a), 120 mA (figura 3.31b), 110 mA (figura 3.32a) e 100mA (figura 3.32b). Alle stesse correnti, il comportamento nella regione di massima compressione dell'ER non varia molto, ed è rispettivamente di 4,8 dB alla potenza di -3 dBm, 4,5 dB alla potenza -2 dBm, 5,3 dB alla potenza di -3 dBm e 5,1 dB alla potenza di -3 dBm.

Aumentando ancora il rapporto di estinzione del segnale in ingresso e portandolo a 7 dB, si registra una riduzione di circa 1 dB del rapporto di estinzione alle potenze ottiche di iniezione del RSOA di -11 dBm, sia alimentando l'RSOA con una corrente di 130 mA (figura 3.33a), che alimentandolo con una corrente di 120 mA (figura 3.33b). Per entrambe le correnti utilizzate, la massima riduzione dell'ER è di circa 6 dB, ottenuta portando la potenza ottica del segnale iniettato nel RSOA a -1 dBm.

In generale, le situazioni analizzate hanno evidenziato che aumentando il rapporto di estinzione del segnale ottico in ingresso al sistema, aumenta la potenza ottica da iniettare nel RSOA necessaria a raggiungere il punto di massima riduzione. Ad esempio ad 1 Gb/s, alla corrente di 130 mA, la potenza per cui si raggiunge il minimo rapporto di estinzione di uscita è -4 dBm per 8 dB di ER in ingresso e -2 dBm per 9 dB di ER in ingresso. Allo stesso modo, a 2.5 Gb/s alla stessa corrente il minimo si ha per una potenza ottica di -3 dBm con 6 dB di rapporto di estinzione di ingresso e di -1 dBm con 7 dB di rapporto di estinzione di ingresso. Dai grafici si nota anche la maggiore difficoltà nell'abbassare il rapporto di estinzione di un segnale modulato alla frequenza di 2,5 Gb/s, rispetto alla modulazione a 1 Gb/s. Questa difficoltà si traduce in una maggiore potenza ottica di iniezione nel RSOA richiesta al fine di abbattere l'ER del segnale e in una minore riduzione a parità di potenza ottica iniettata.

Nelle figure 3.34-3.40 sono riportati i rapporti di estinzioni del segnale in uscita dal RSOA dopo che il segnale ha attraversato il circuito di aiuto alla cancellazione (in verde nelle figure) insieme a quelli relativi al segnale che non ha attraversato il circuito ottico (in azzurro nelle figure).

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

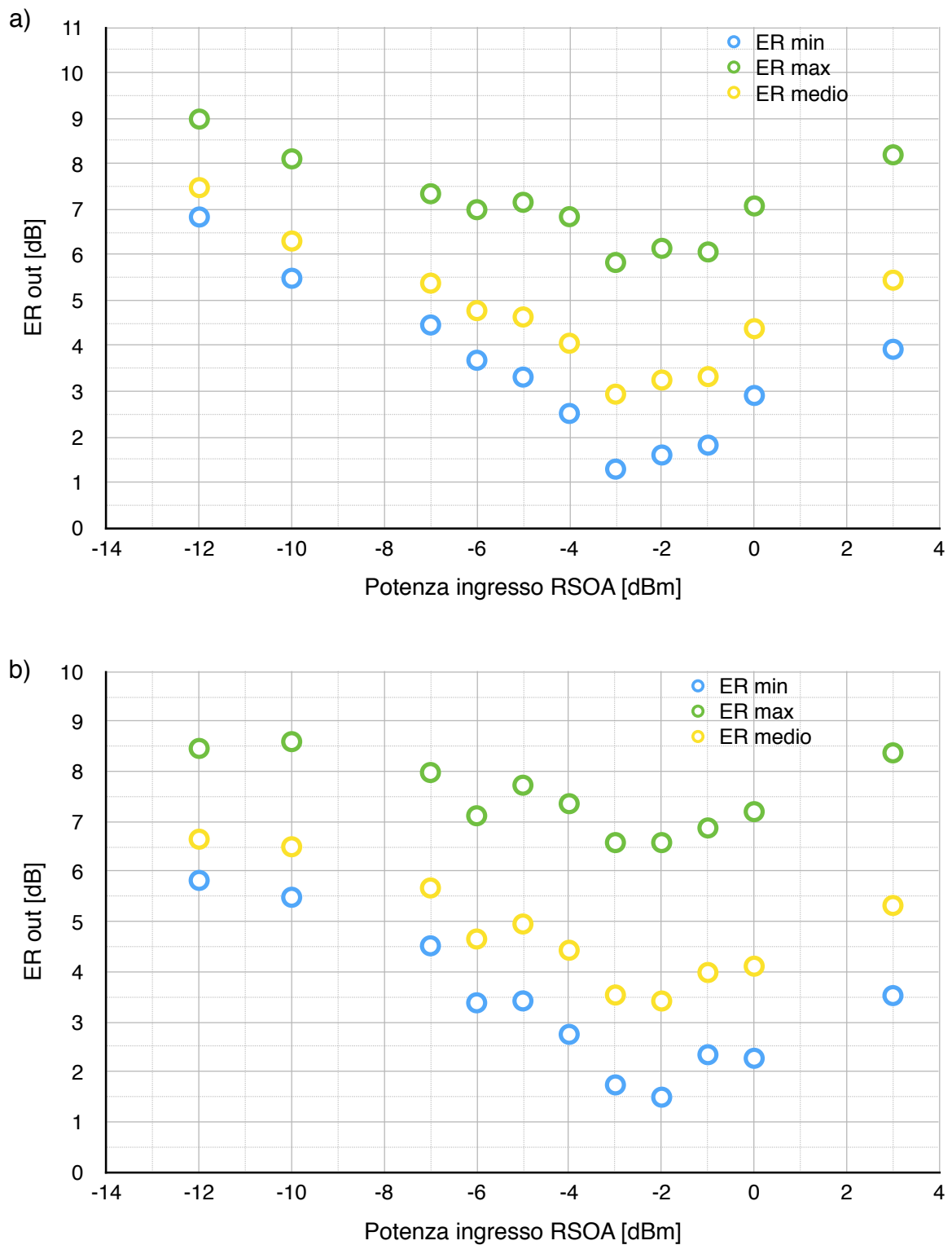


Figura 3.31 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

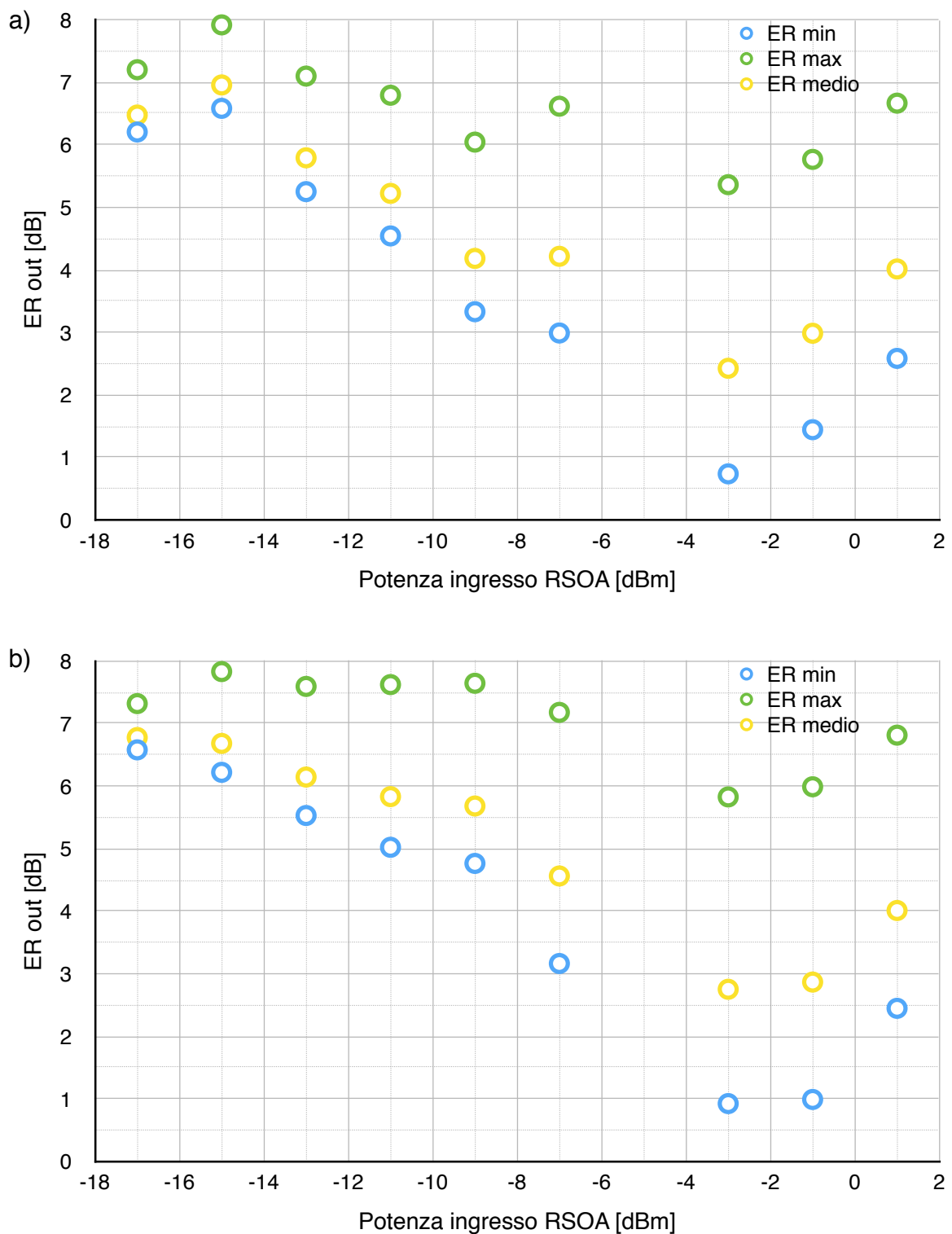


Figura 3.32 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 110 mA b) 100 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

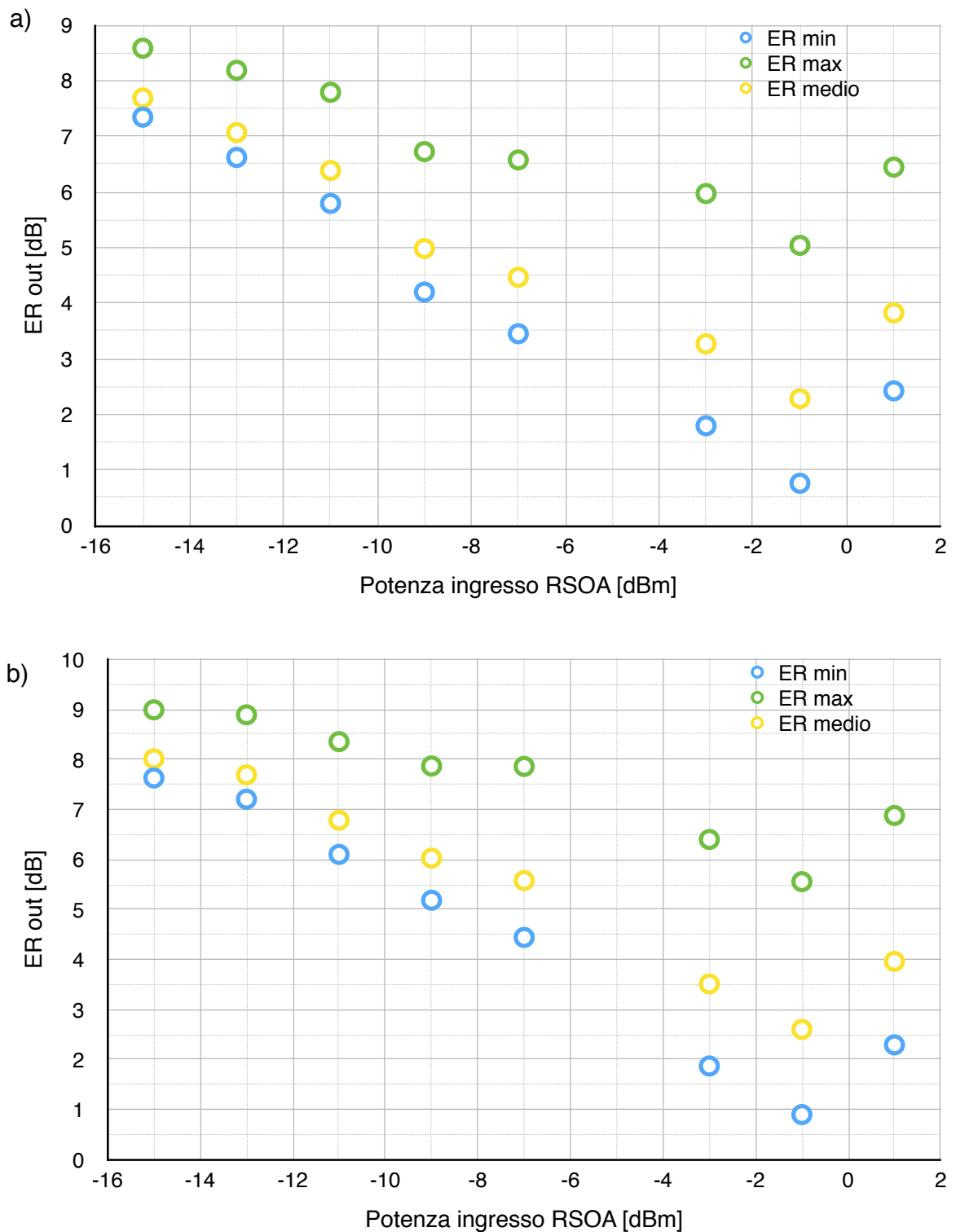


Figura 3.33 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale modulato in intensità esternamente Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 7 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

Dalla figura 3.34a è possibile evidenziare l'efficacia dell'inserimento del circuito per la riduzione del rapporto di estinzione di 8 dB in ingresso a 1 Gb/s. Difatti, già a -18 dBm di potenza iniettata nel RSOA pilotato con 130 mA, il rapporto di estinzione di uscita è ridotto a 3 dB, e si riduce ulteriormente a 2 dB per -14 dBm di potenza iniettata. Agli stessi valori di potenza ottica iniettata in assenza del circuito di aiuto alla cancellazione il rapporto di estinzione del segnale in uscita è di circa 8 dB e 6 dB rispettivamente. Lo stesso comportamento si osserva per differenti correnti di alimentazione del RSOA, ovvero 120 mA, in figura 3.34b, 110 mA, in figura 3.35a, e 100 mA, in figura 3.35b. Grazie al circuito di aiuto alla cancellazione si riduce la potenza ottica iniettata necessaria ad ottenere il minimo valore di rapporto di estinzione: da -4 dBm a -6 dBm per l'intervallo di correnti di alimentazione da 130 mA a 100 mA. Inoltre, ad ogni potenza iniettata il rapporto di estinzione di uscita è più basso in presenza del circuito di aiuto alla cancellazione.

La figura 3.36a dimostra l'efficacia del circuito per un rapporto di estinzione in ingresso più elevato, 9 dB, con una corrente di alimentazione del RSOA di 130 mA. Anche in questo caso si vede una riduzione del rapporto di estinzione in uscita già a -18 dBm, dove l'ER di uscita è di 2,5 dB e viene ulteriormente ridotto a 1,5 dB a -10 dBm. Per lo stesso valore di potenza iniettata in assenza di circuito il rapporto di estinzione è 7 dB. Lo stesso comportamento si vede a 120 mA, in figura 3.36b. Anche con questo rapporto di estinzione si osserva una riduzione del valore di potenza ottica iniettata necessaria ad ottenere il minimo valore di rapporto di estinzione in uscita da circa -2 dBm a circa -4 dB. In questo caso è più significativa la differenza tra il minimo valore raggiunto con e senza circuito, da 0,5 dB a 2,5 dB per entrambe le correnti prese in considerazione. Inoltre, di nuovo, si può rilevare che per ogni potenza iniettata il rapporto di estinzione in uscita è più basso in presenza del circuito di aiuto alla cancellazione.

La figura 3.37a evidenzia l'efficacia dell'inserimento del circuito per la riduzione del rapporto di estinzione in ingresso di 5 dB a 2,5 Gb/s. Già a -19 dBm di potenza iniettata nel RSOA pilotato con 130 mA, il rapporto di estinzione di uscita è ridotto a 3,5 dB, e si riduce ulteriormente a 2 dB a -15 dBm di potenza iniettata. Un comportamento simile si osserva alla corrente di alimentazione del RSOA di 120 mA, in figura 3.37b. Inoltre, si vede che grazie alla presenza del circuito il minimo valore di rapporto di estinzione viene raggiunto a potenze ottiche inferiori di iniezione nel



### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

RSOA. Precisamente, si riduce da -3 dBm a -5 dBm, per la corrente di alimentazione di 130 mA, e da -7 dBm a -9 dBm, per la corrente di alimentazione di 120 mA. Inoltre, per entrambe le correnti a cui sono state effettuate le misurazioni, la presenza del circuito riduce il minimo valore di ER registrato da 1 dB a 0,4 dB.

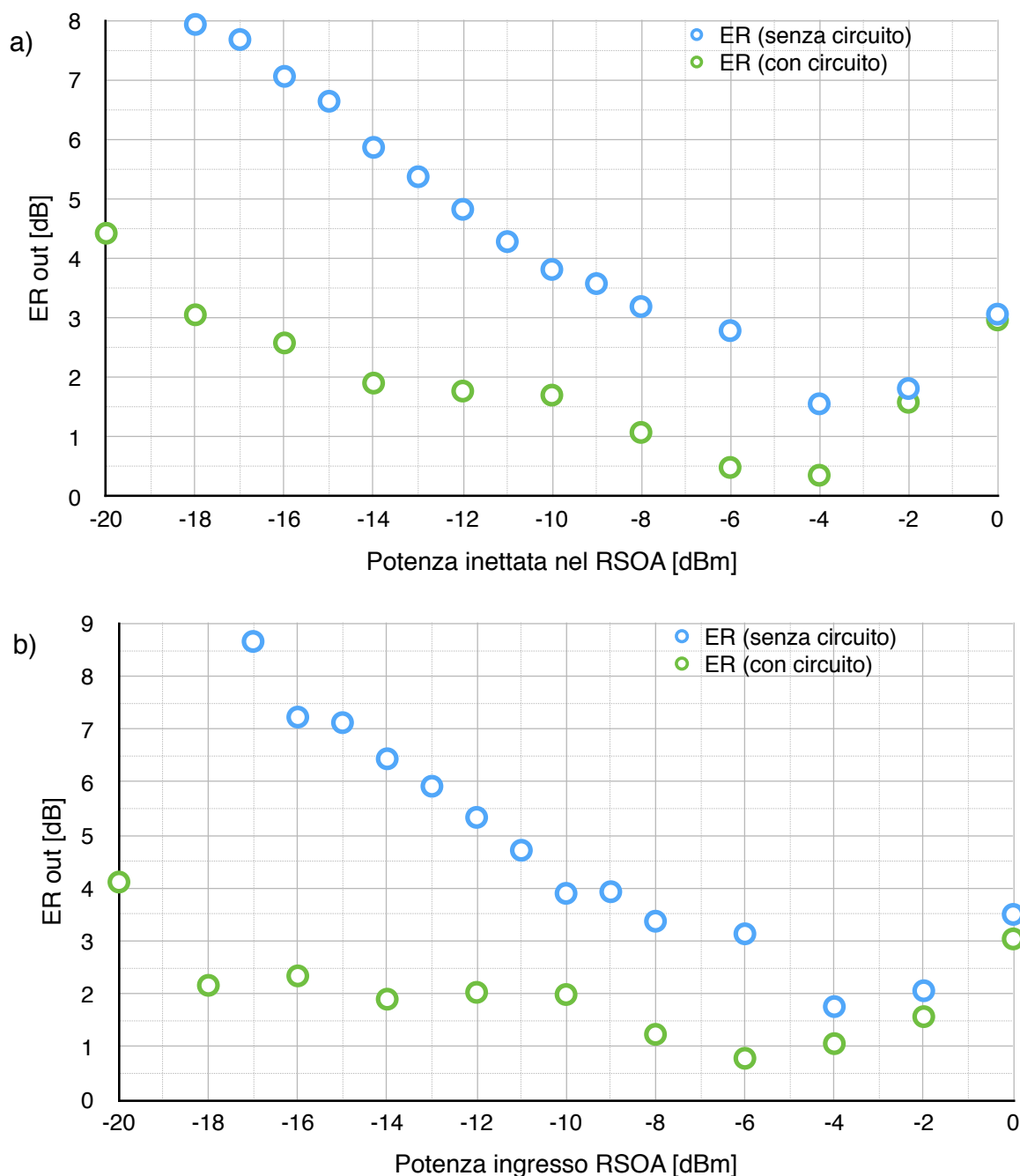


Figura 3.34 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 8 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

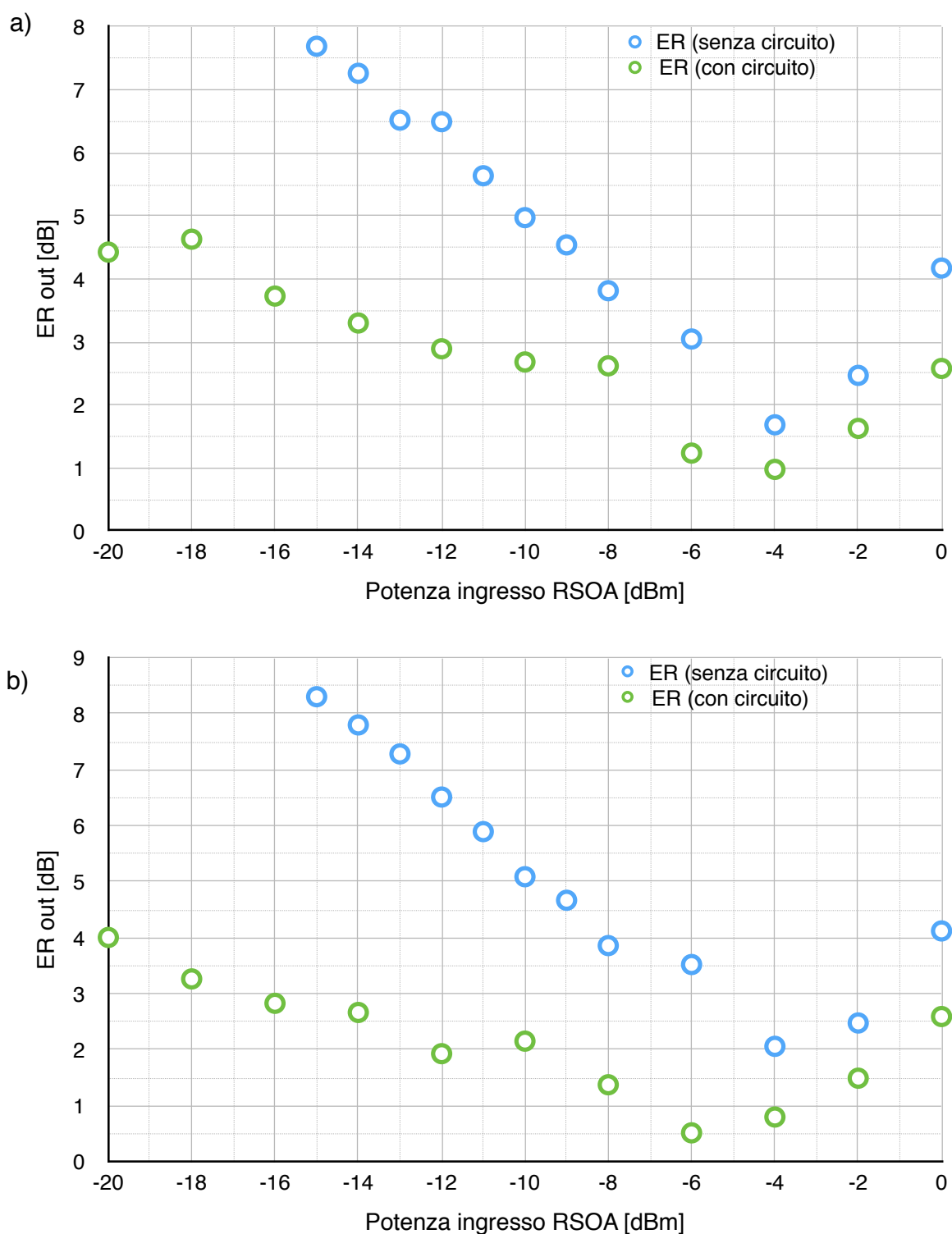


Figura 3.35 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 8 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 110 mA b) 100 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

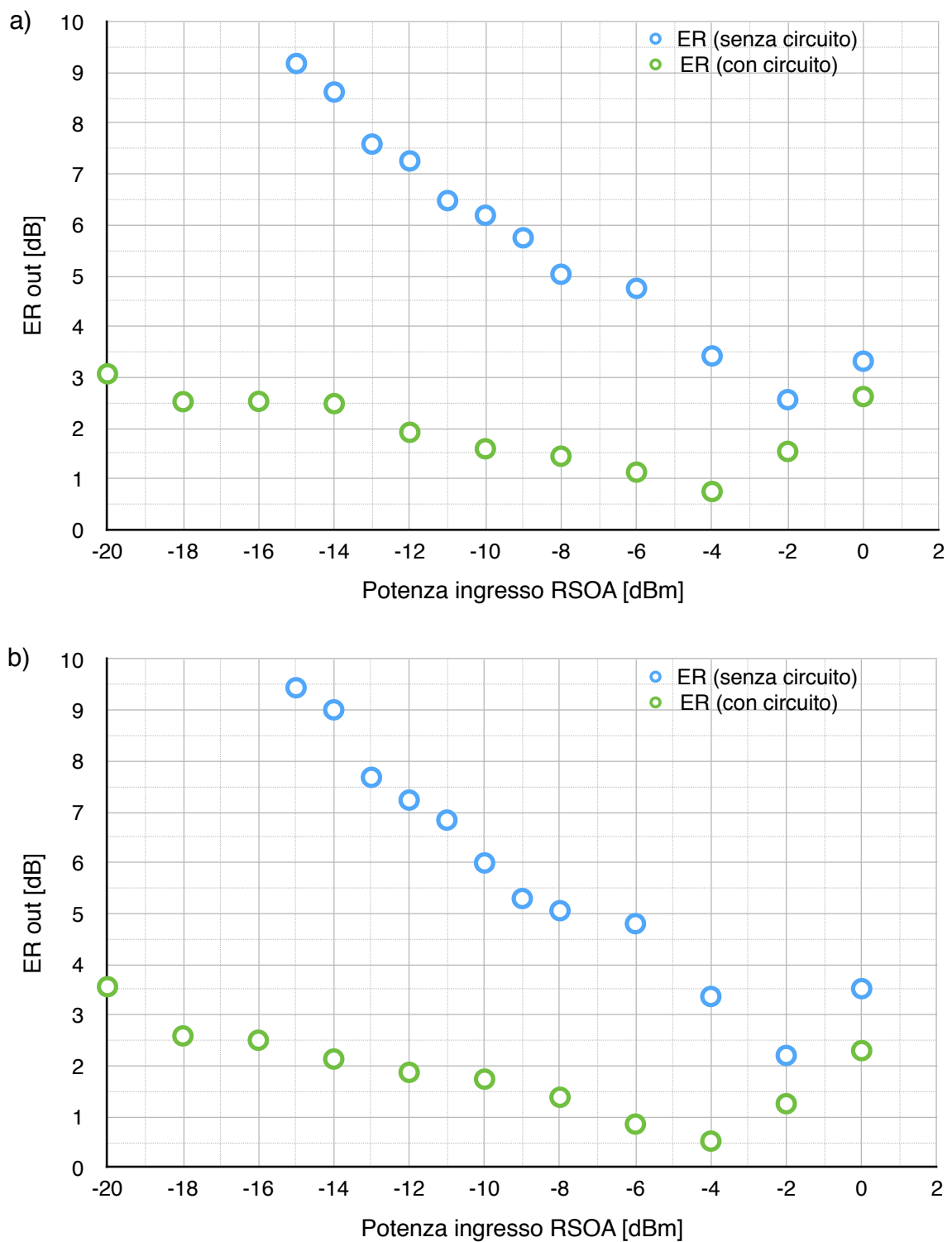


Figura 3.36 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 9 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

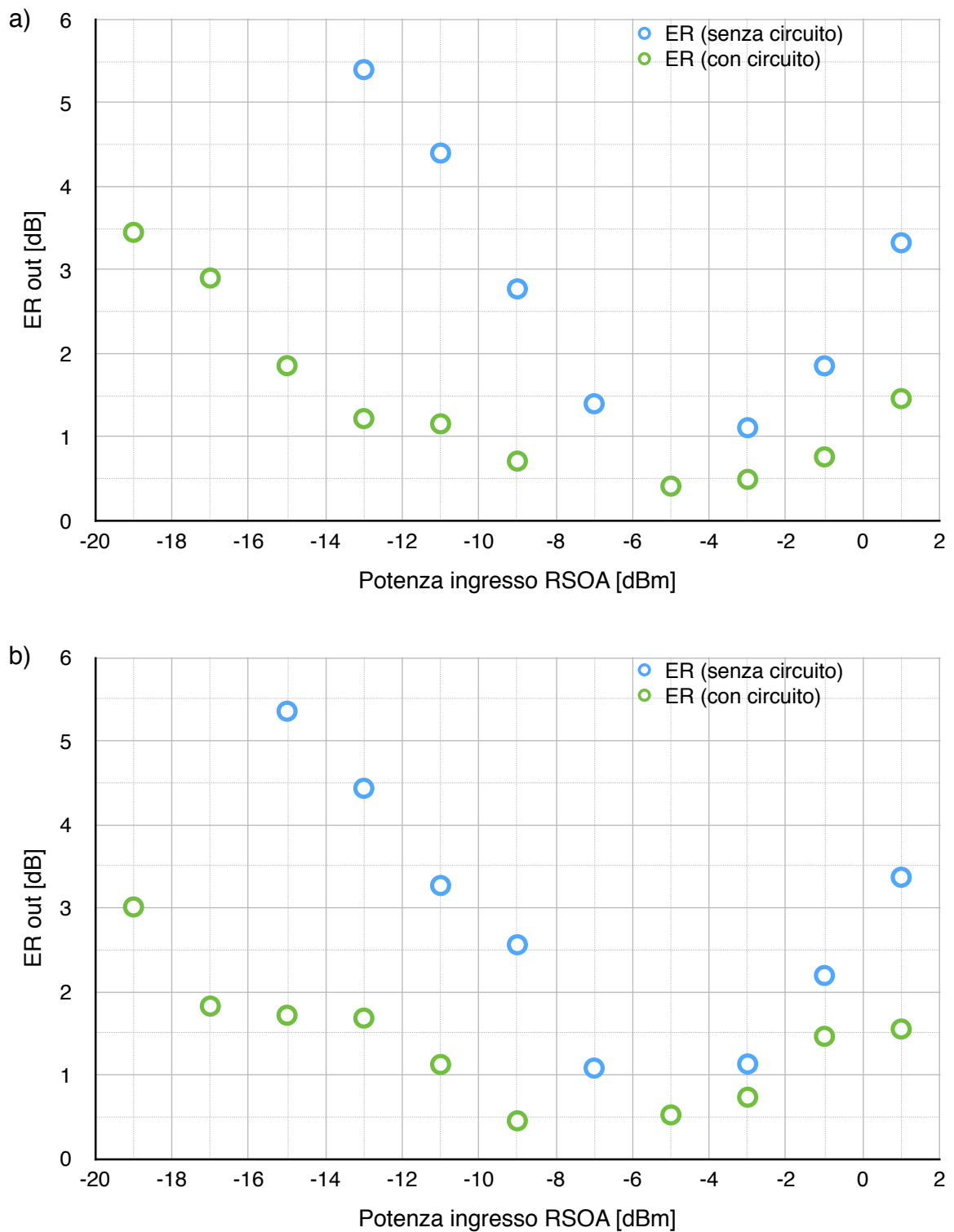


Figura 3.37 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 5 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

L'efficacia del circuito di aiuto alla cancellazione su di una modulazione a 2,5 Gb/s è evidenziata dalla figura 3.38a, dove il segnale in ingresso ha un ER di 6 dB. Alla potenza ottica iniettata nel RSOA di -19 dBm il rapporto di estinzione è ridotto a 3,7 dB e viene ulteriormente compresso a 2 dB alla potenza di circa -10 dBm. Si nota un comportamento simile del circuito a correnti diverse di alimentazione del RSOA, precisamente alla corrente di 120 mA, in figura 3.38b, 110 mA, in figura 3.39a, e 100 mA, in figura 3.39b. Per questo ER di ingresso, a 2,5 Gb/s, non si nota una particolare variazione della potenza ottica richiesta per raggiungere il punto di massima compressione grazie alla presenza del circuito, se non una diminuzione da -2 dBm a -3 dBm alla corrente di alimentazione di 120 mA. È invece più significativa la variazione del valore a cui il rapporto di estinzione viene compresso in seguito all'inserimento del circuito. Infatti, questo valore viene ridotto da 3 a 0,6 dB, da 3,4 a 0,8 dB, da 2,5 a 0,7 dB e da 2,8 a 0,5 dB, rispettivamente quando l'RSOA è alimentato a 130 mA, 120 mA, 110 mA e 100 mA.

È stata infine verificata l'efficacia del circuito nel ridurre il rapporto di estinzione di un segnale di ingresso di 7 dB, modulato alla frequenza di cifra di 2,5 Gb/s. Alla corrente di alimentazione di 130 mA, in figura 3.40a, si nota, già a -17 dBm una riduzione dell'ER in uscita dal RSOA a 2,7 dB, ulteriormente ridotto a 1 dB alla potenza di iniezione di -9 dBm. Allo stesso valore di potenza ottica iniettata in assenza del circuito di aiuto alla cancellazione il rapporto di estinzione del segnale in uscita è di 5 dB. Ancora più evidente è l'effetto prodotto dal circuito alla corrente di alimentazione di 120 mA, evidenziato dalla figura 3.40b. Difatti, sempre alla potenza inietta nel RSOA di -9 dBm, l'ER del segnale in uscita dal RSOA viene ridotto da 6 dB a 0,9 dB. Per entrambe le correnti di alimentazione considerate è inoltre visibile una riduzione della potenza ottica di iniezione nel RSOA necessaria al raggiungimento del punto di massima compressione prodotta dalla presenza del circuito, che varia da -1 dBm a -5 dBm, per entrambe le correnti di alimentazioni impiegate. Il valore minimo di ER in uscita ottenuto viene ridotto dalla presenza circuito da 2,3 dB a 0,5 dB e da 2,6 dB a 0,7 dB, rispettivamente alle correnti di alimentazione del RSOA di 130 mA e 120 mA. Complessivamente, è stata innanzitutto registrata una forte riduzione dell'ER a potenza basse di iniezione nel RSOA, dovuta alla compressione del rapporto di estinzione prodotta dal circuito. A parità di rapporto di estinzione in uscita, la potenza di iniezione nel RSOA richiesta per raggiungere tale compressione dell'ER è

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

notevolmente ridotta dall'inserimento del circuito. In secondo luogo, nella maggior parte delle situazioni prese in esame, il punto di massima riduzione del rapporto di estinzione si sposta, introducendo il circuito, a una potenza più bassa. Infine, la presenza del circuito di aiuto alla cancellazione diminuisce il valore minimo di ER del segnale in uscita dal RSOA.

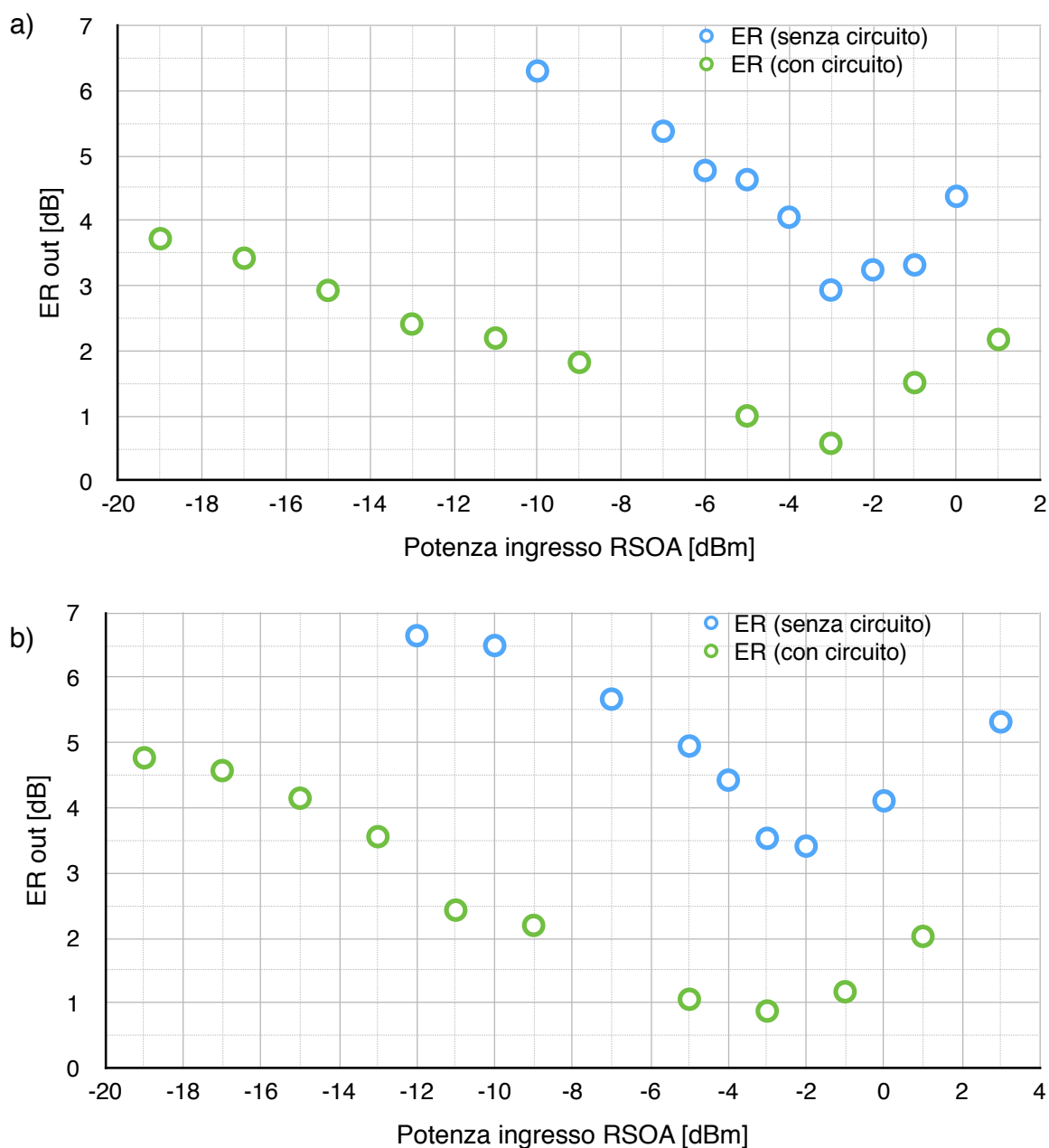


Figura 3.38 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

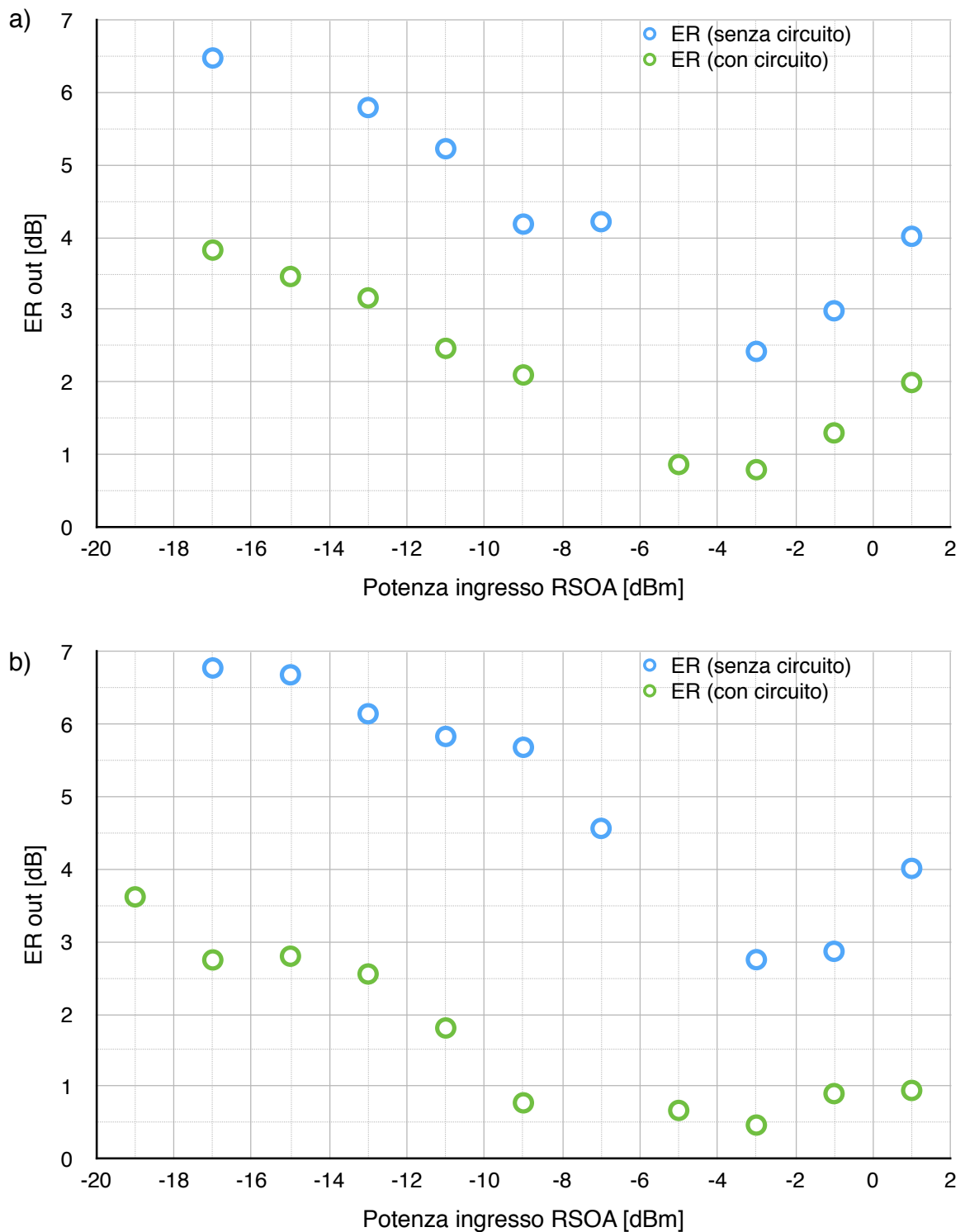


Figura 3.39 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 110 mA b) 100 mA.

### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

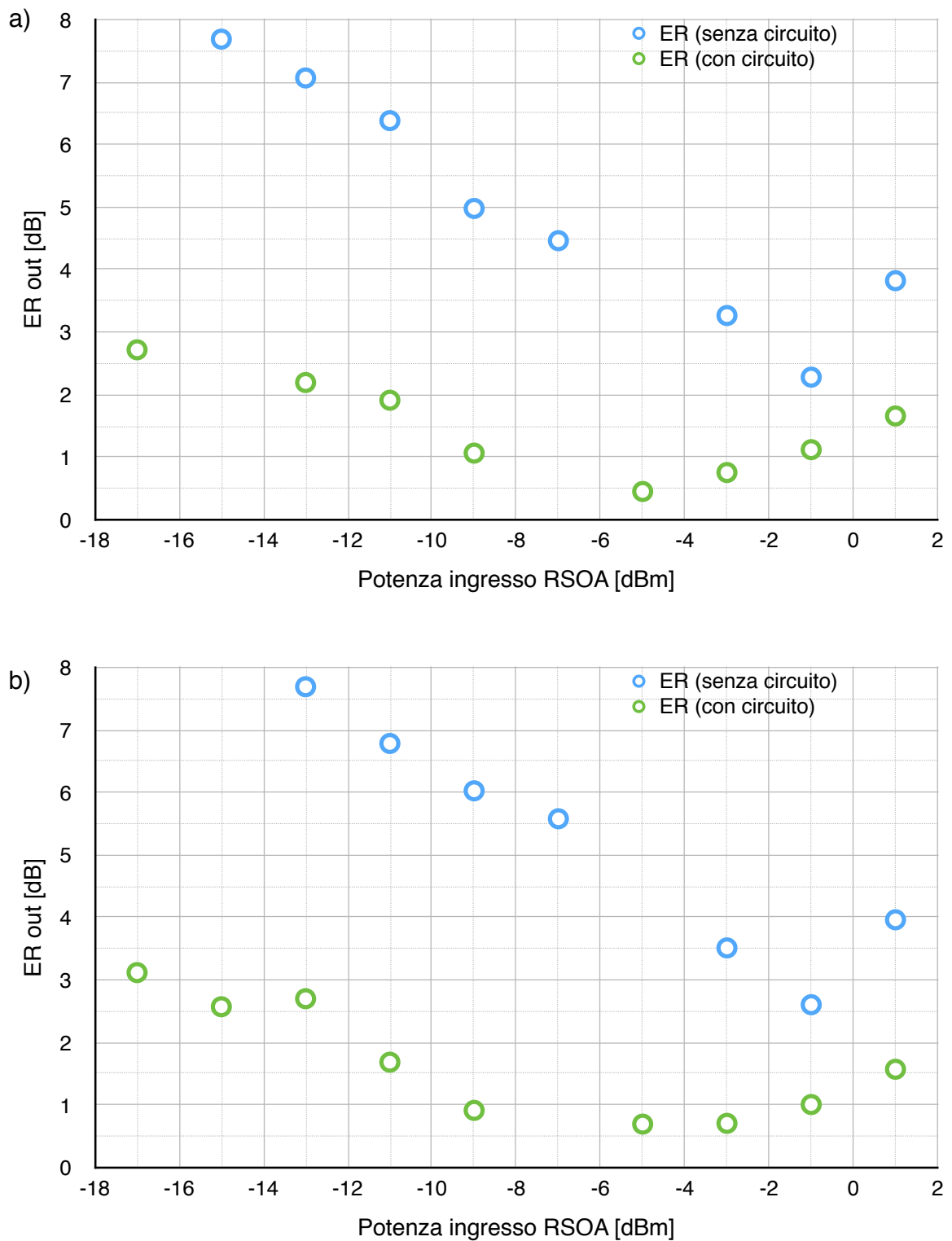


Figura 3.40 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata esternamente, rapporto di estinzione di 7 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.



### 3.5 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DFB

La figura 3.41 dimostra come l'efficacia del circuito consista proprio in una compressione del rapporto di estinzione. Sono riportate infatti due curve di ER in uscita dal RSOA ottenuta, l'una, iniettando un segnale con un basso rapporto di estinzione, pari a 5 dB e, l'altra, iniettando un segnale con un elevato rapporto di estinzione, pari 8 dB, ridotto a 5 dB dal passaggio attraverso il circuito di aiuto alla cancellazione. Il confronto è operato a 1 Gb/s e l'RSOA è alimentato a 130 mA. Nonostante i due segnali in ingresso al RSOA siano molto diversi, nel primo caso un segnale modulato normalmente in intensità, nel secondo una forma d'onda dove i bit singoli sono difficilmente riconoscibili, c'è una buona sovrapposizione tra le due curve. Ad esempio, alla potenza di iniezione nel RSOA di -14 dBm, i valori del rapporto di estinzione in uscita sono rispettivamente di 1,9 dB e 1,5 dB. Il punto di massima compressione è coincidente per entrambi i casi, sia in termini di potenza ottica di iniezione richiesta (-4 dBm) che in termini di ER di uscita (0,4 dB).

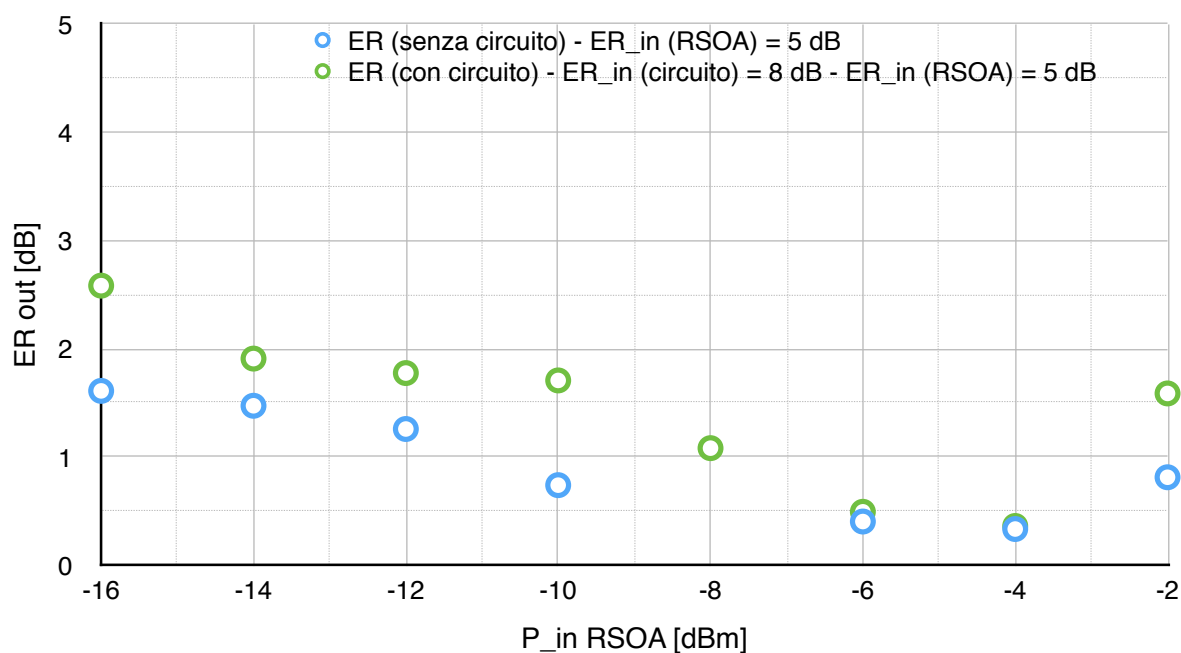


Figura 3.41 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro) a parità di ER di ingresso nel RSOA di 5 dB. Sorgente modulata esternamente, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di 130 mA.

## 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

---

Utilizzando come sorgente il laser DML, sono stati presi in considerazione i seguenti punti di lavoro:

- 1) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 1 Gb/s, ER di circa 5 dB, ottenuto con un ampiezza dati di  $1 V_{pp}$ , RSOA alimentato a 120 mA, 130 mA;
- 2) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 1 Gb/s, ER di circa 7 dB, ottenuto con un ampiezza dati di  $1,2 V_{pp}$ , RSOA alimentato a 120 mA, 130 mA;
- 3) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 1 Gb/s, ER di circa 9 dB, ottenuto con un ampiezza dati di  $1,4 V_{pp}$ , RSOA alimentato a 120 mA, 130 mA;
- 4) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, ER di circa 6 dB, ottenuto con un ampiezza dati di  $1,2 V_{pp}$ , RSOA alimentato a 120 mA, 130 mA;
- 5) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, ER di circa 8 dB, ottenuto con un ampiezza dati di  $1,4 V_{pp}$ , RSOA alimentato a 120 mA, 130 mA.

Nelle figure 3.42-3.46 sono riportati i risultati delle valutazioni sperimentali della compressione del rapporto di estinzione del segnale operata dal RSOA nelle diverse condizioni analizzate. A 1 Gb/s, con 5 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, figura 3.42a, 120 mA figura 3.42b; a 1 Gb/s, con 7 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, figura 3.43a, e di 120 mA, figura 3.43b; a 1 Gb/s, con 9 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, figura 3.44a, e di 120 mA figura 3.44b; a 2.5 Gb/s, con 6 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, figura 3.45a, e di 120 mA, figura 3.45b; a 2.5 Gb/s, con 8 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 130 mA, figura 3.46a, e di 120 mA, figura 3.46b. Le figure riportano i tre diversi valori del rapporto di estinzione misurati: ER minimo (in azzurro), ER massimo (in verde) e ER medio (in giallo).

Le curve sono prese con una variazione di potenza iniettata nel RSOA da -20 dBm a 4 dBm. A -20 dBm, l'RSOA non comprime il rapporto di estinzione del segnale. Aumentando la potenza e spostandosi di conseguenza in zona maggiormente non-lineare si vedono gli effetti della compressione. Anche per il DML, oltre il punto di massima compressione il rapporto di estinzione di uscita riprende a crescere, come già riscontrato impiegando il laser DFB [21].

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

La figura 3.42a mostra la compressione dell'ER operata dal RSOA alimentato da una corrente di 130 mA su di un segnale modulato alla frequenza di cifra di 1 Gb/s con ER di 5 dB. Alla potenza di -16 dBm, l'ER in uscita risulta ridotto di circa 2 dB. Una riduzione ulteriore di 1 dB dell'ER in uscita si ottiene aumentando la potenza inietta nel RSOA a -11 dBm. La massima compressione del rapporto di estinzione, pari a 4,6 dB, si ha invece con una potenza di iniezione pari a -4 dBm. La figura 3.42b, mostra che, con questi parametri del segnale in ingresso, la diminuzione di 10 mA della corrente di alimentazione del RSOA non comporta significativi cambiamenti nella compressione dell'ER del segnale.

In figura 3.43 è illustrata la compressione dell'ER operata dal RSOA su di un segnale modulato alla frequenza di cifra di 1 Gb/s con ER di 7 dB. Alla potenza di -16 dBm, l'ER in uscita risulta ridotto di circa 2 dB e 3 dB, rispettivamente per correnti di alimentazione del RSOA di 130 mA (figura 3.43a) e 120 mA (figura 3.43b). Una riduzione ulteriore dell'ER in uscita, pari a 5 dB, si ottiene aumentando la potenza inietta nel RSOA a -7 dBm, per entrambi i valori di corrente considerati. La massima compressione del rapporto di estinzione, pari a 6,3 dB, si ha invece con una potenza ottica di iniezione pari a -3 dBm, alimentando il RSOA con una corrente di 130 mA. Diminuendo la corrente di 10 mA, invece, l'ER minimo del segnale in uscita si ottiene con una potenza ottica iniettata nel RSOA di -4 dB, e la riduzione dell'ER è pari a 6,5 dB.

È stato quindi aumentato il rapporto di estinzione del segnale in ingresso a 9 dB. Come si vede in figura 3.44, alla potenza ottica iniettata di -16 dBm il rapporto di estinzione del segnale viene ridotto di circa 1,5 dB, sia con una corrente di alimentazione del RSOA di 130 mA (figura 3.44a), che di 120 mA (figura 3.44b). Aumentando la potenza iniettata, ad esempio, a -11 dBm, la compressione dell'ER è di circa 4 dB e, aumentandola ancora fino al valore di -5 dB la compressione dell'ER è di circa 7 dB, per entrambe le correnti considerate. Il massimo della compressione, pari a circa 8,5 dB, si ottiene con una potenza ottica di -3 dBm, sia pilotando l'RSOA a 130 mA sia pilotandolo a 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

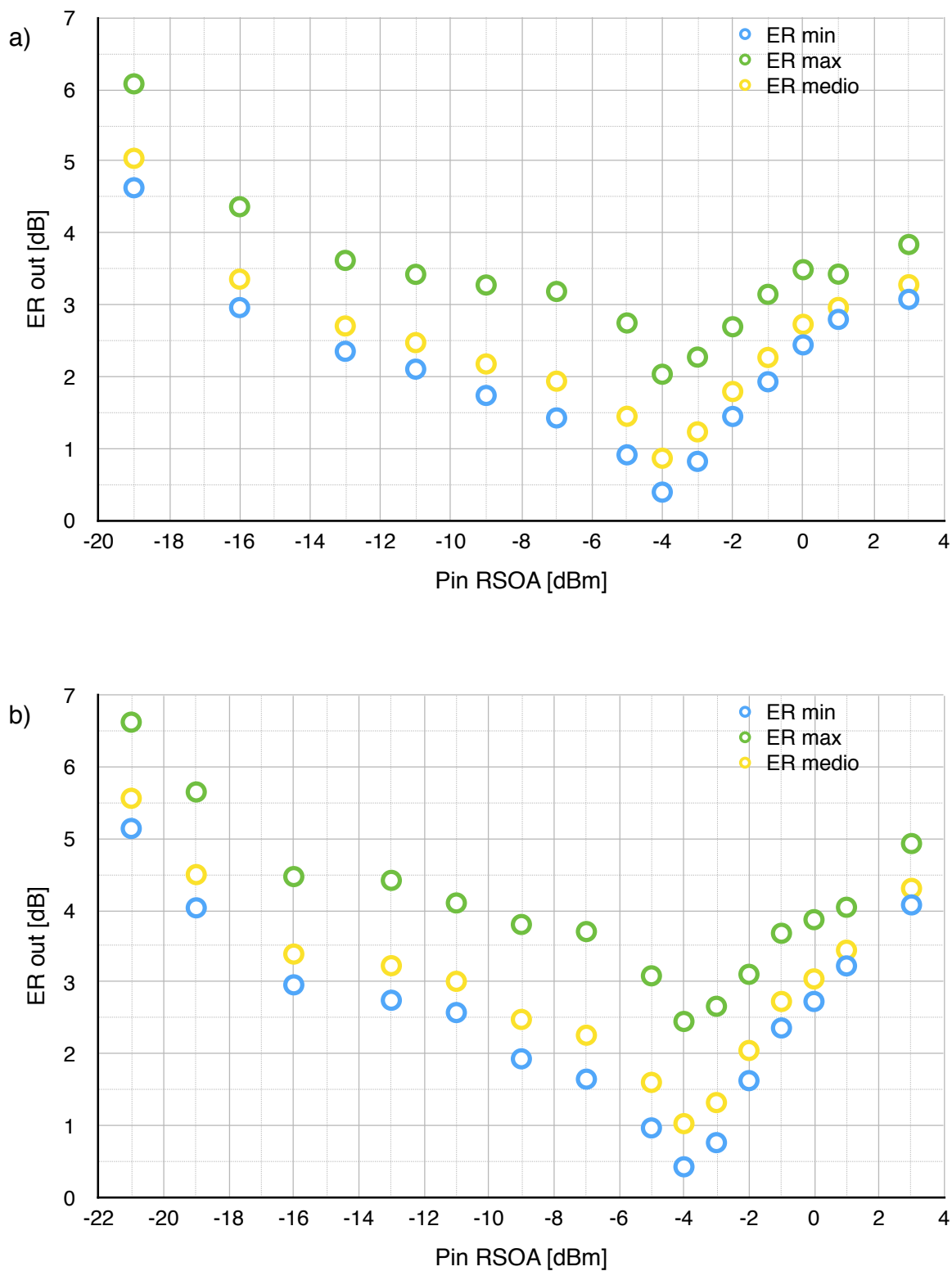


Figura 3.42 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 5 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

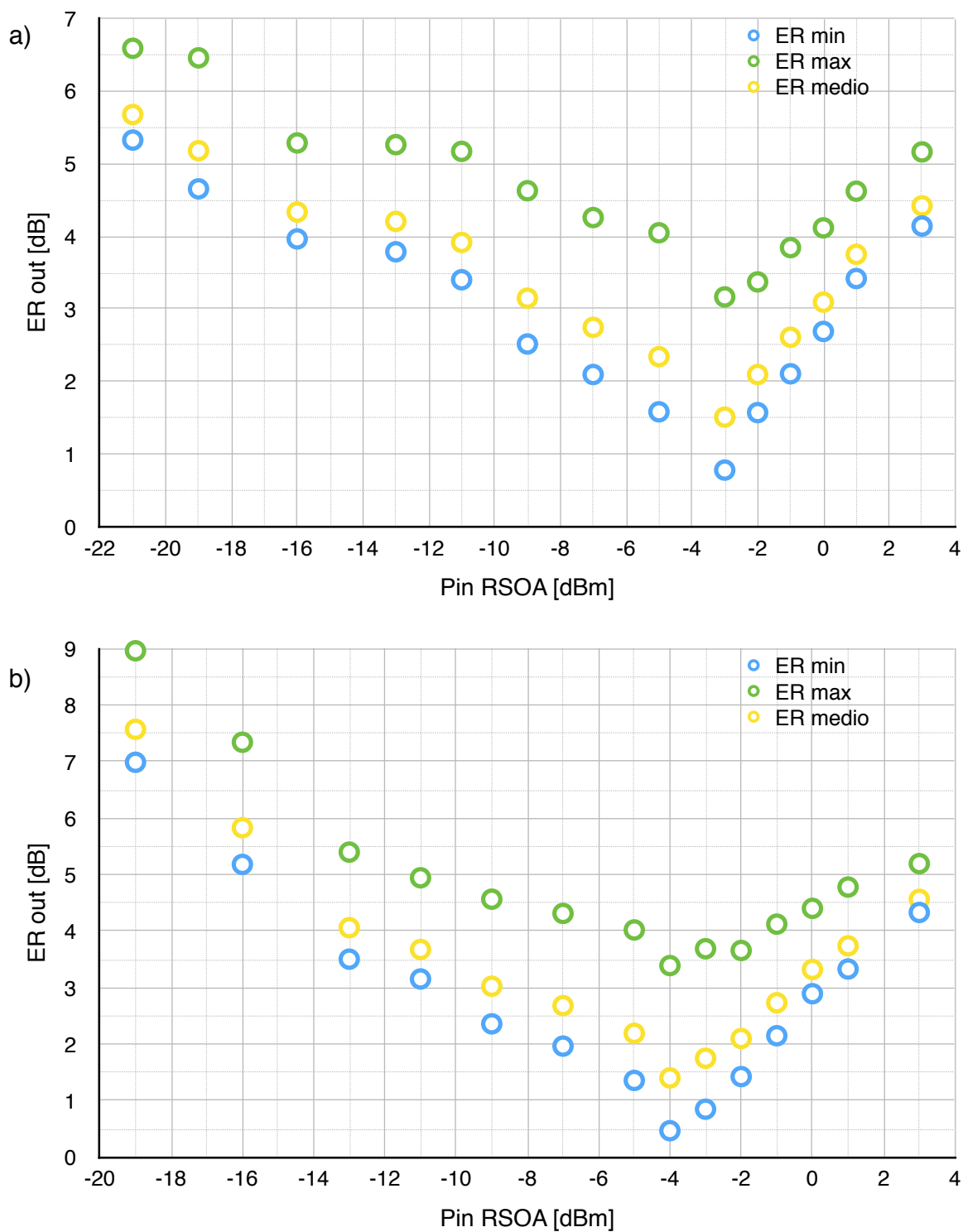


Figura 3.43 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 7 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

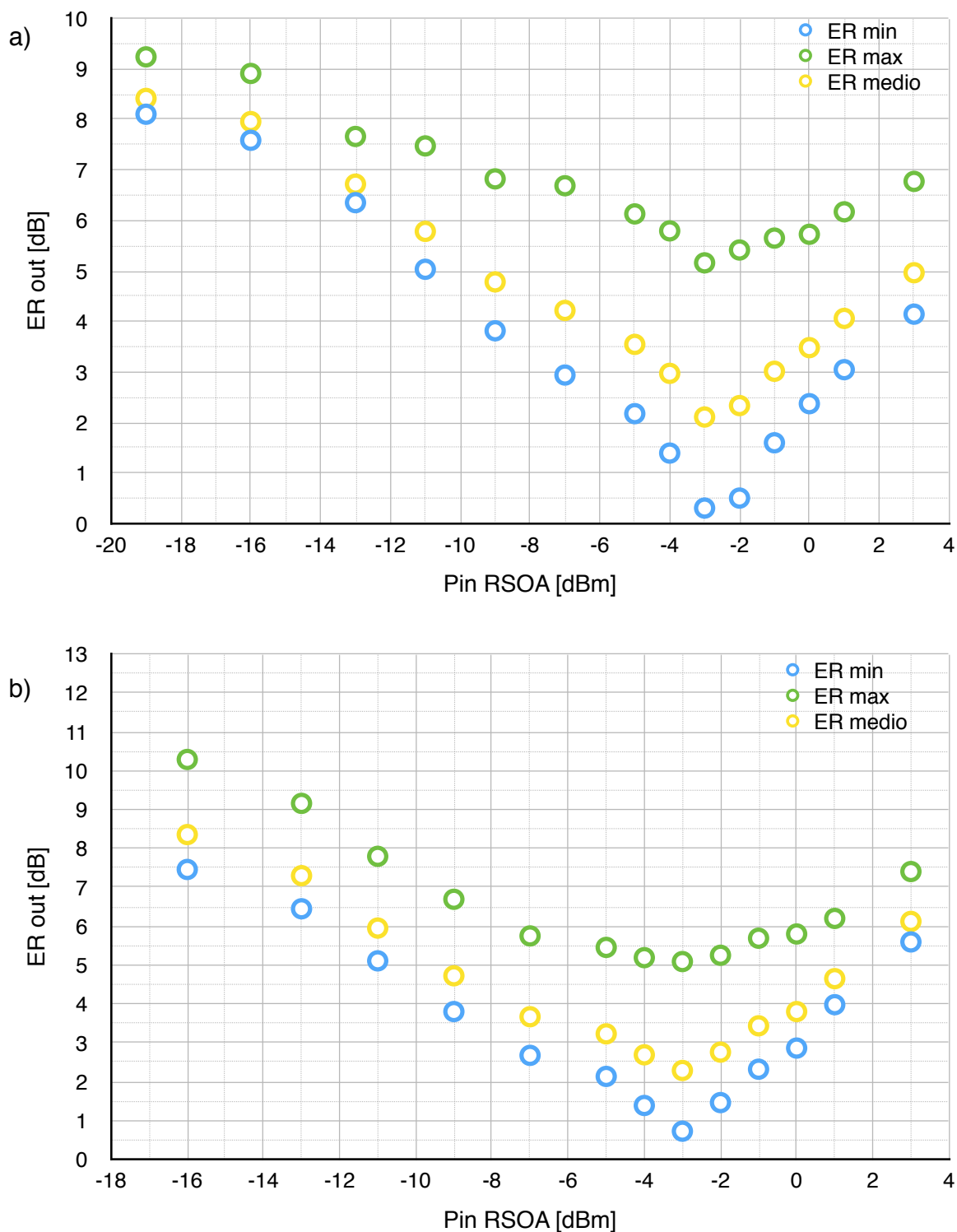


Figura 3.44 -ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 9 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

Successivamente, è stato analizzato l'effetto della compressione operata dal RSOA sulla modulazione di ampiezza alla frequenza di cifra di 2,5 Gb/s. La figura 3.45a mostra il risultato di tale compressione su di un segnale con ER di 6 dB, quando la corrente di alimentazione del RSOA è pari a 130 mA. Alla potenza ottica di -16 dBm l'effetto della compressione è quasi nullo, e, anche aumentando la potenza a -13 dB, la riduzione dell'ER è di poco più di 2 dB. Alla potenza ottica di -9 dBm, l'effetto di riduzione è più significativo e pari a 3,3 dB. La massima compressione dell'ER si ha alla potenza ottica iniettata nel RSOA di -3 dBm, dove la modulazione residua del segnale in uscita ha un ER di circa 1 dB. Pilotando l'RSOA a 120 mA, come si vede in figura 3.45b, i risultati sono simili.

È stato quindi aumentato il rapporto di estinzione del segnale in ingresso a 8 dB. Come si vede in figura 3.46a, pilotando l'RSOA a 130 mA, alla potenza ottica iniettata di -16 dBm l'effetto della compressione è quasi nullo. Aumentando la potenza iniettata, ad esempio, a -11 dBm, la compressione dell'ER è di 2,3 dB e, aumentandola ancora fino al valore di -2 dBm, si ottiene il massimo della compressione, pari a circa 7 dB, per entrambe le correnti considerate. La figura 3.46b evidenzia un leggero peggioramento della massima riduzione dell'ER ottenuta pilotando l'RSOA a 120 mA, in questo caso, infatti, la modulazione residua è di quasi 2 dB.

Nel complesso, i casi analizzati hanno evidenziato che aumentando il rapporto di estinzione del segnale ottico in ingresso al sistema, aumenta la potenza ottica da iniettare nel RSOA necessaria a raggiungere il punto di massima compressione. Ad esempio ad 1 Gb/s, alla corrente di 130 mA, la potenza per cui si raggiunge il minimo rapporto di estinzione di uscita è -4 dBm per 5 dB di ER in ingresso e -3 dBm per 7 dB di ER in ingresso. Allo stesso modo, a 2.5 Gb/s, alla stessa corrente, il minimo si ha per una potenza ottica di -3 dBm con 6 dB di rapporto di estinzione di ingresso e di -2 dBm con 8 dB di rapporto di estinzione di ingresso. Dai grafici si nota anche la maggiore difficoltà nell'abbassare il rapporto di estinzione di un segnale modulato alla frequenza di 2,5 GHz, rispetto alla modulazione a 1 Gb/s. Ad esempio, alla corrente di 120 mA, l'ER di ingresso di 9 dB del segnale modulato a 1 Gb/s viene ridotto di oltre 8 dB alla potenza di -3 dBm, mentre, alla stessa corrente, l'ER di ingresso di 8 dB del segnale modulato a 2,5 Gb/s viene ridotto, al massimo, di circa 6 dB alla potenza di -2 dBm, lasciando una modulazione residua di quasi 2 dB.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

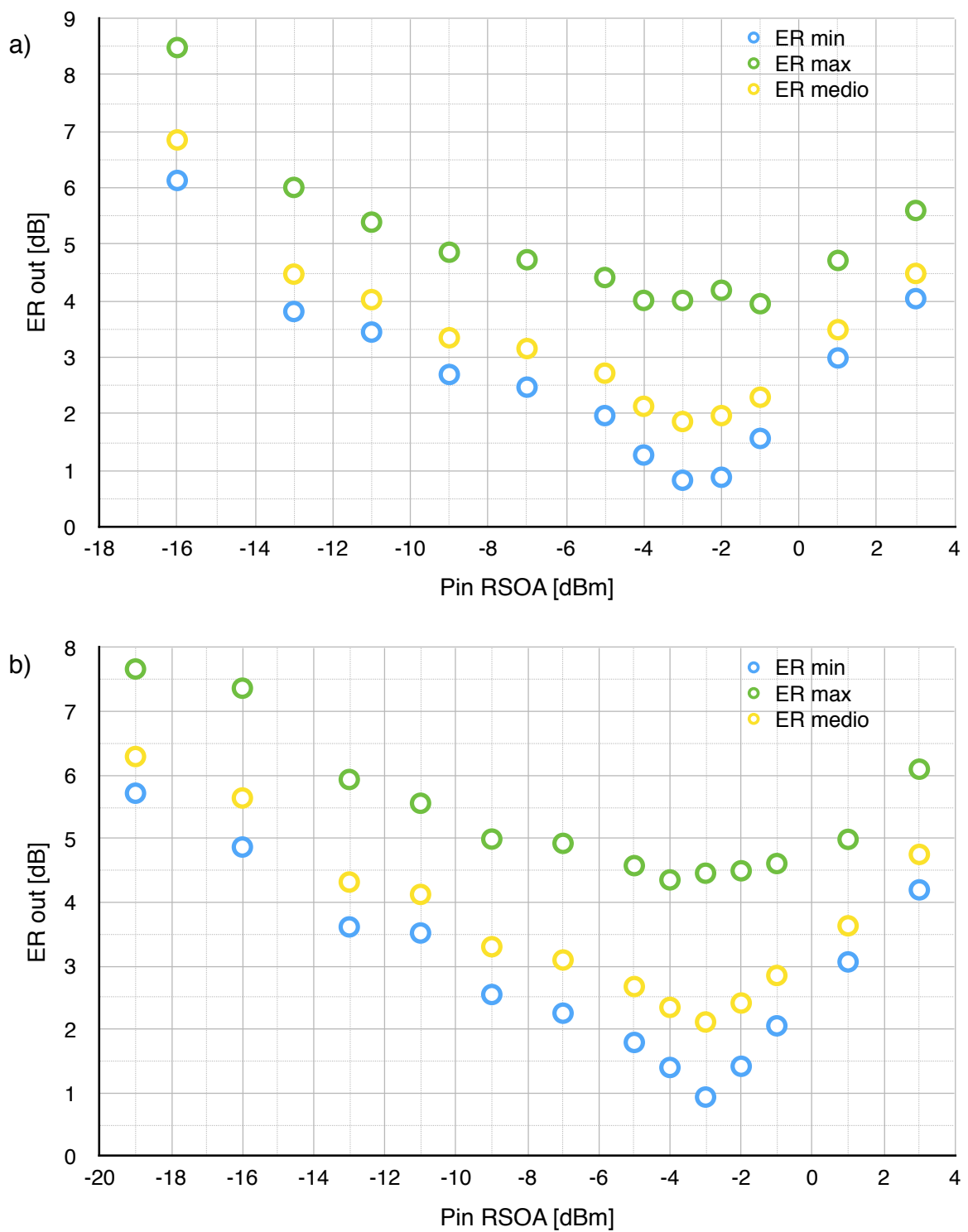


Figura 3.45 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.



### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

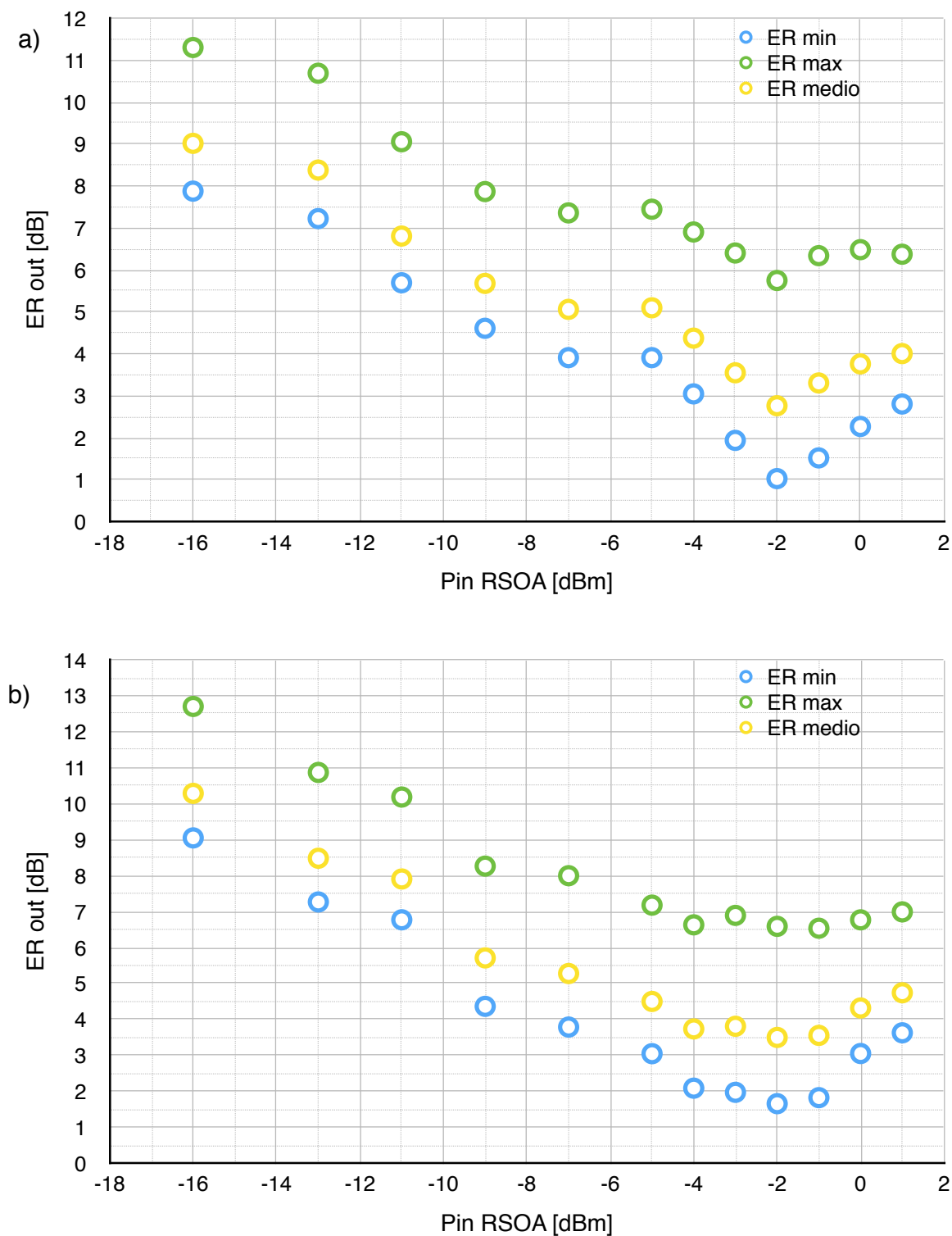


Figura 3.46 - ER compresso in uscita dal RSOA in cui è stato iniettato il segnale con modulazione d'intensità diretta. Rapporto di estinzione del segnale in ingresso 8 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente del RSOA a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

Nelle figure 3.47-3.51 sono riportati i rapporti di estinzioni del segnale in uscita dal RSOA dopo che nel RSOA è stato iniettato il segnale ha attraversato il circuito di aiuto alla cancellazione (in verde nelle figure) insieme a quelli ottenuti iniettando direttamente il segnale (in azzurro nelle figure).

La figura 3.47a mostra l'effetto del circuito su di un segnale con ER di 5 dB modulato alla frequenza di cifra di 1 Gb/s con una corrente di alimentazione del RSOA di 130 mA. L'inserimento del circuito di aiuto alla cancellazione causa una riduzione del rapporto di estinzione in uscita già a -18 dBm, dove l'ER di uscita è di 2,5 dB e diviene di 1,5 dB a -9 dBm di potenza iniettata. Per valori simili di potenza iniettata nel RSOA i rapporti di estinzione in uscita sono di 5 dB e 2,3 dB rispettivamente. Alla potenza di -3 dBm l'ER di uscita è di 1,3 dB, quando il segnale è direttamente iniettato nel RSOA, e di 0,4 dB, quando il segnale attraversa il circuito di aiuto alla cancellazione. Lo stesso comportamento si vede per la corrente di 120 mA in Figura 3.47b.

Come mostrato dalla Figura 3.48, l'efficacia del circuito su di un segnale con ER maggiore (7 dB), sempre alla frequenza di cifra di 1 Gb/s è maggiore. Alla corrente di alimentazione di 130 mA (figura 3.48a), la riduzione del rapporto di estinzione in uscita è già significativa a -18 dBm, dove l'ER di uscita è di 2,7 dB e viene ulteriormente ridotto a circa 1 dB a -7 dBm. Per valori simili di potenza iniettata in assenza di circuito i rapporti di estinzione sono di 5,2 dB e 2,8 dB rispettivamente. Alla potenza di -3 dBm, poi, l'ER di uscita è di 1,5 dB e di 0,5 dB, rispettivamente senza e con il circuito di aiuto alla cancellazione. Un comportamento simile, come si vede in figura 3.48b, si ottiene pilotando l'RSOA a 120 mA.

L'efficacia del circuito aumentando il rapporto di estinzione del segnale in ingresso è confermata dall'analisi della compressione dell'ER iniziale di 9 dB, mostrata in figura 3.49. Pilotando l'RSOA a 130 mA (figura 3.49a), si ottiene un ER di uscita di circa 2 dB alla potenza di -11 dBm, un ER inferiore a 1 dB richiede invece una potenza di -5 dBm. Alle stesse potenze, senza impiegare il circuito, l'ER del segnale in uscita è rispettivamente di 5,8 dB e 3,6 dB. La massima compressione, registrata alla potenza di -3 dBm, corrisponde a un ER in uscita di 2,1 dB e 0,6 dB, rispettivamente senza e con il circuito. Diminuendo la corrente di alimentazione del RSOA a 120 mA, come si vede in figura 3.49b il comportamento è analogo.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

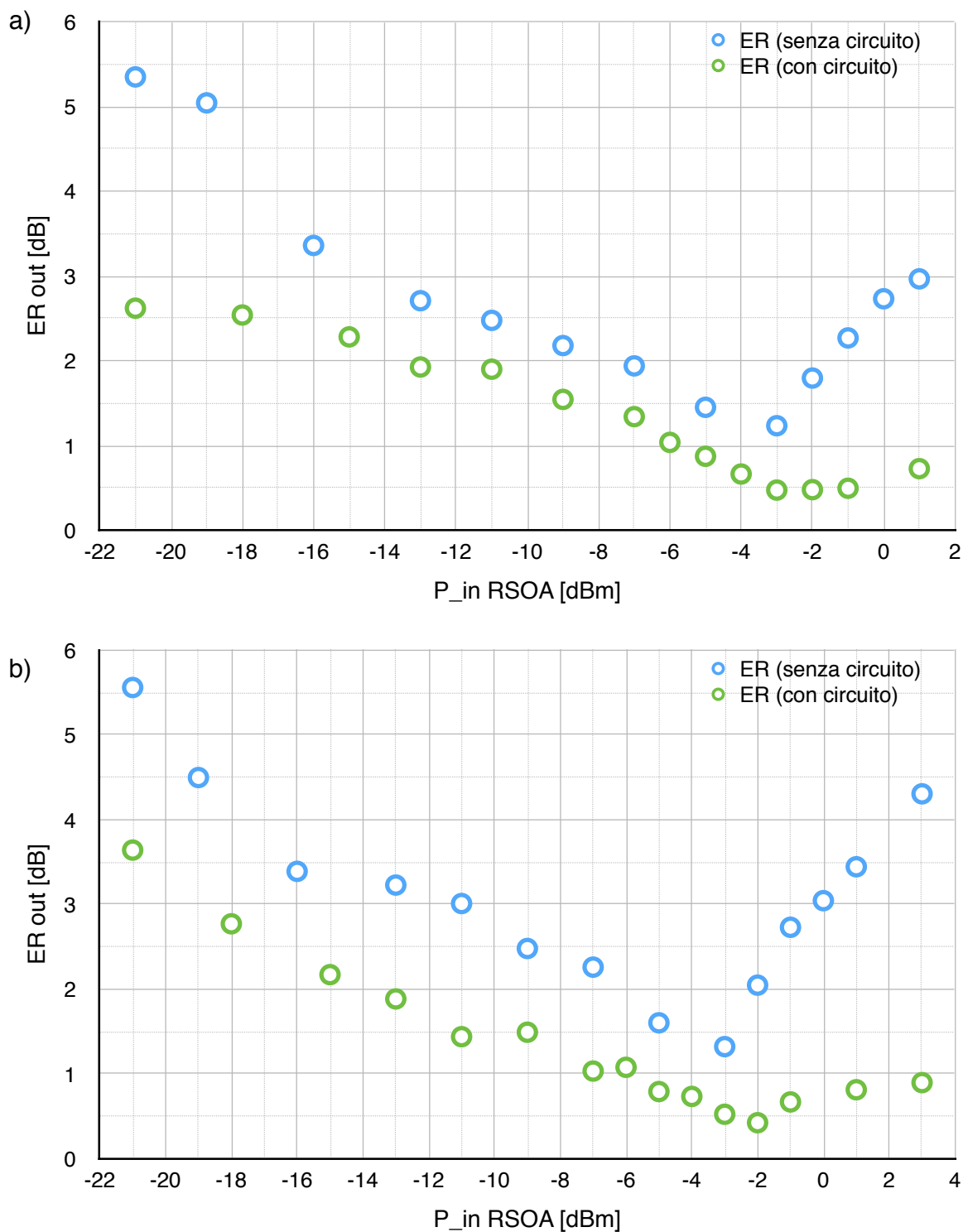


Figura 3.47 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 5 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

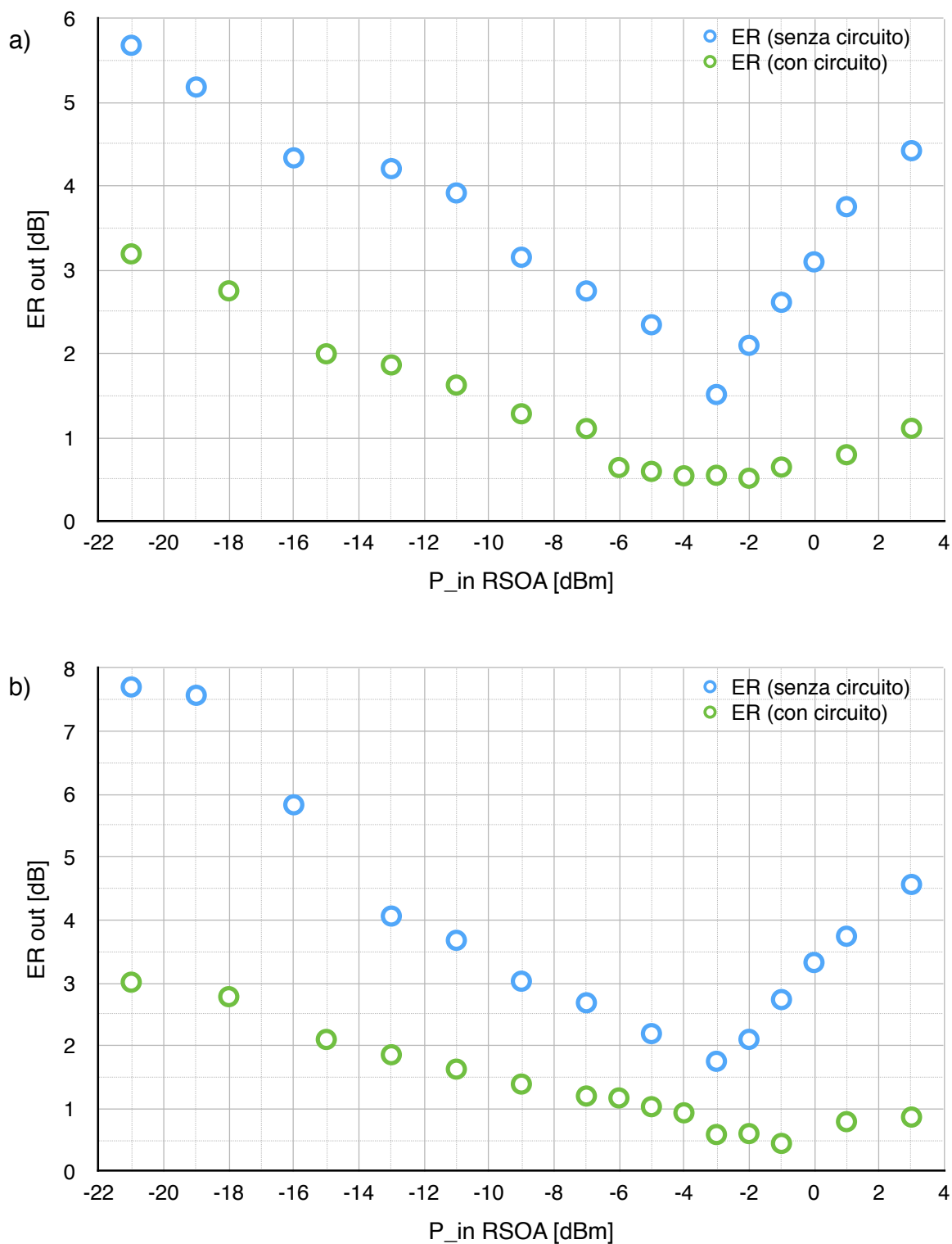


Figura 3.48 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 7 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

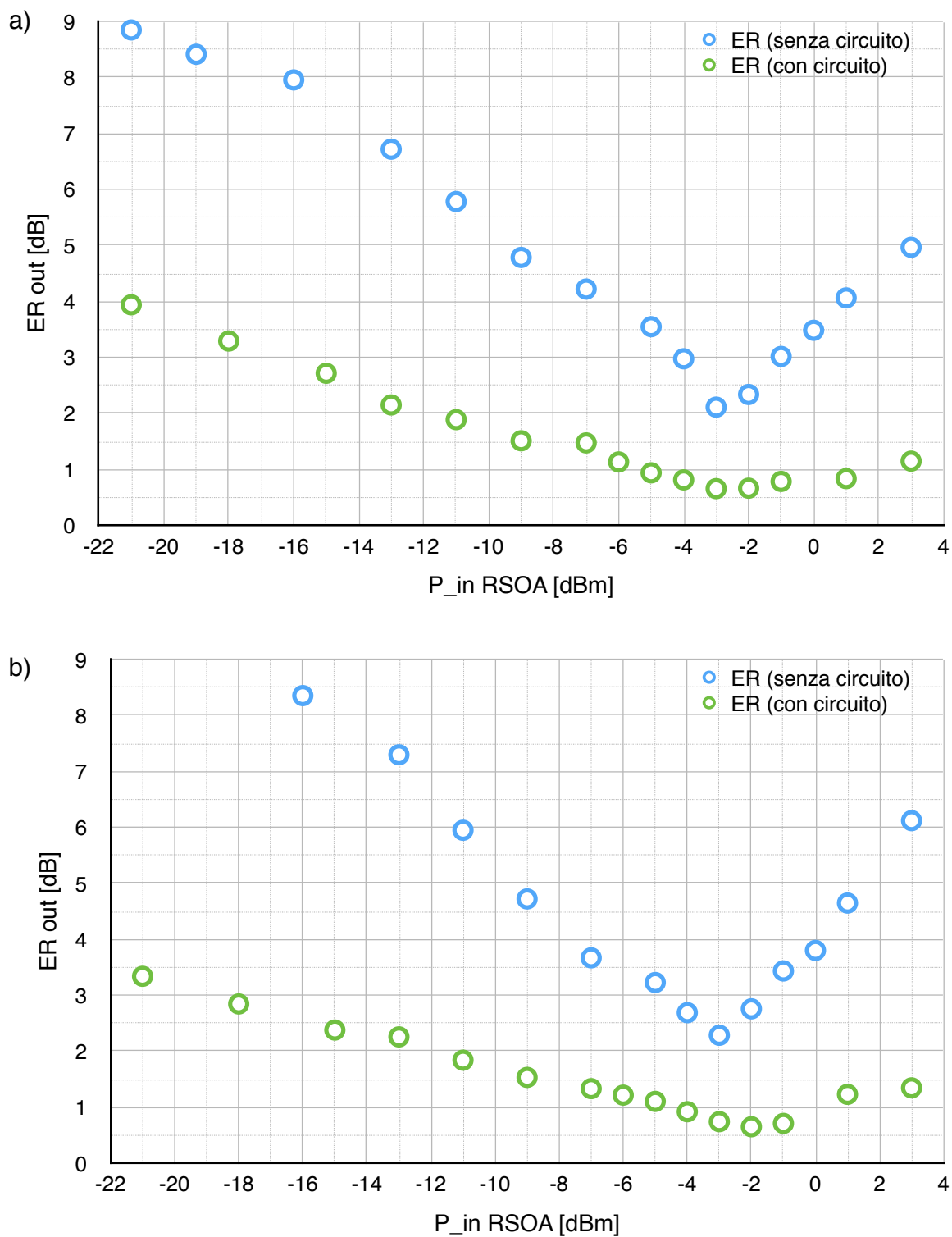


Figura 3.49 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 9 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

L'efficacia del circuito è successivamente stata provata anche per la modulazione alla frequenza di cifra di 2,5 Gb/s. Inizialmente, è stato utilizzato un segnale con ER di ingresso di 6 dB. Come riportato in figura 3.50a, pilotando l'RSOA a 130 mA, l'ER in uscita viene già ridotto a 2,2 dB alla potenza di iniezione di -18 dBm. Un ER di circa 1 dB si ottiene invece con una potenza di -9 dBm, di circa 2 dB inferiore rispetto a quello ottenuto a parità di potenza iniettata. La massima compressione, corrisponde a un ER in uscita di 1,9 dB a -3 dBm e di 0,6 dB a -4 dBm, rispettivamente senza e con il circuito. Portando la corrente di alimentazione del RSOA a 120 mA non sono stata registrate variazioni significative, come mostrato in figura 3.50b.

Anche con la modulazione a 2,5 Gb/s, l'efficacia del circuito è più evidente su ER di ingresso maggiori, come evidenziato dalla figura 3.51, dove viene impiegato un segnale con ER di ingresso di 8 dB. Per entrambe le correnti di alimentazione considerate, 130 mA, in figura 3.51a, e 120 mA, in figura 3.51b, la compressione è già significativa a -18 dBm, dove l'ER in uscita è di circa 2,5 dB. Un ER pari a circa 1,5 dB si ottiene invece con una potenza ottica di iniezione di -7 dBm, diminuendo di 3,5 dB l'ER in uscita ottenuto, alla stessa potenza, senza circuito. A 130 mA la massima compressione corrisponde a un ER in uscita di 2,7 dB a -2 dBm e di 0,5 dB a -3 dBm, rispettivamente senza e con il circuito. Mentre a 120 mA la massima compressione corrisponde a un ER in uscita di 3,5 dB a -2 dBm di potenza iniettata e di 0,7 dB a -4 dBm di potenza iniettata, rispettivamente iniettando direttamente il segnale modulato e avvalendosi invece del circuito di aiuto alla cancellazione.

Come già riscontrato usando come sorgente il laser DFB, l'utilizzo del circuito porta diversi vantaggi. Innanzitutto, una significativa riduzione dell'ER del segnale in uscita dal RSOA già a basse potenze di iniezione. In secondo luogo, una diminuzione significativa della potenza richiesta per ottenere un dato ER di uscita. Ad esempio, a 2,5 Gb/s con un ER di ingresso di 6 dB e corrente di 130 mA, per ottenere una riduzione dell'ER di 4 dB, nel RSOA deve essere iniettata una potenza ottica di -14 dBm e -3 dBm, rispettivamente con e senza circuito. Infine, in tutti i casi analizzati, è stata registrata nel punto di massima compressione una cancellazione quasi completa della modulazione iniziale, portando l'ER del segnale in uscita dal RSOA a circa 0,5 dB.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

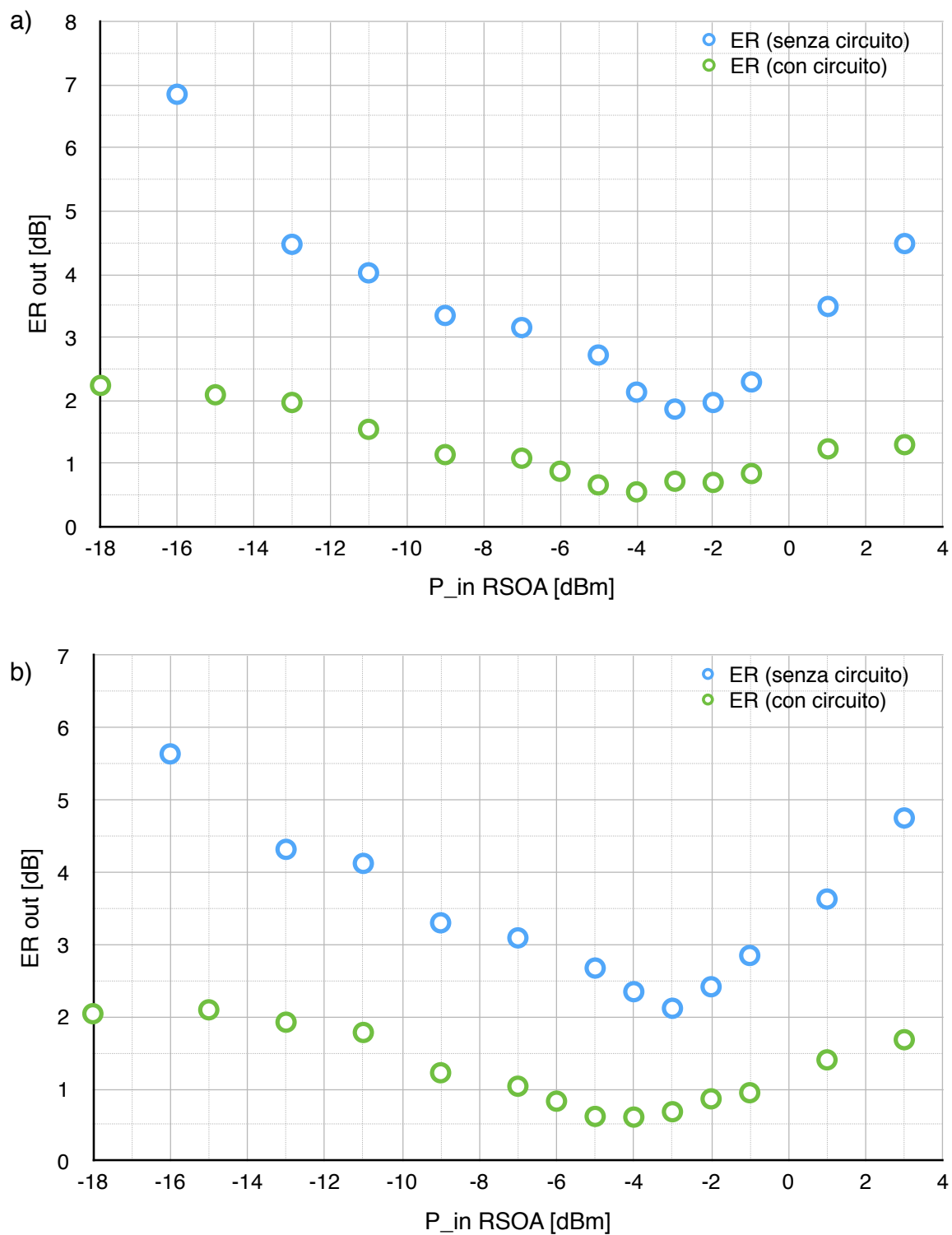


Figura 3.50 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 6 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.

### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

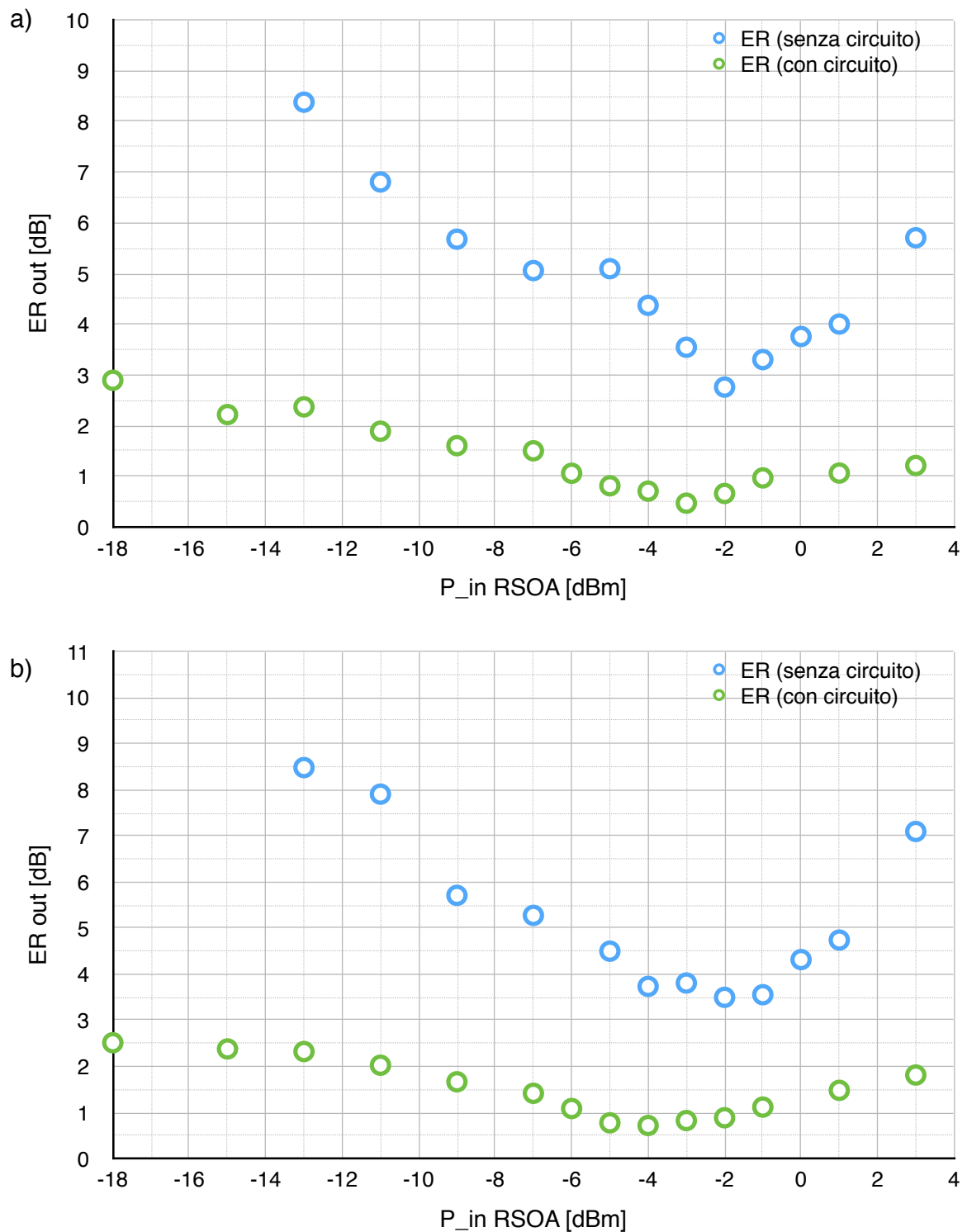


Figura 3.51 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). Sorgente modulata direttamente, rapporto di estinzione di 8 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 130 mA b) 120 mA.



### 3.6 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente il laser DML

Anche per il DML è stato operato un confronto sui rapporti di estinzione in uscita al variare della potenza iniettata nel RSOA nel caso in cui il segnale modulato da cancellare abbia un basso rapporto di estinzione (7,3 dB) e nel caso in cui il rapporto di estinzione del segnale da cancellare sia alto (9,4 dB) ma parzialmente ridotto dal passaggio attraverso il circuito di aiuto alla cancellazione a 6,9 dB. I dati sono riportati in figura 3.55. Come si vede, l'ER in uscita dal RSOA nel secondo caso (in verde) è inferiore su tutto l'intervallo di potenze considerato, rispetto al caso senza circuito (in azzurro), con un accordo meno buono di quello visto per il laser a modulazione esterna. Ad esempio, alla potenza di -9 dBm i valori dell'ER in uscita sono di 3,1 dB e 1,5 dB e alla potenza di -5 dBm sono di 2,3 dB e 1 dB, rispettivamente senza e con circuito. Parte di questa diversità può essere dovuta al fatto che in realtà i due rapporti di estinzione differiscono di mezzo dB e, data la non linearità del comportamento di compressione del RSOA determina differenze maggiori di quelle attese.

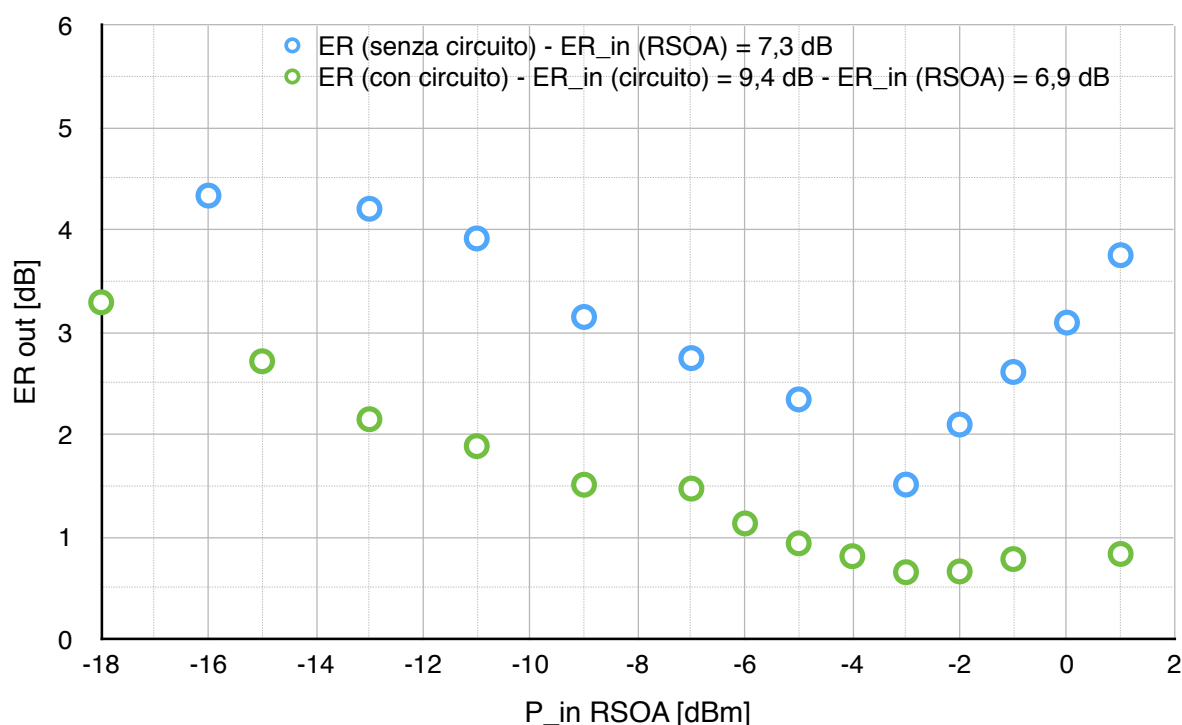


Figura 3.52 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro) a parità di ER di ingresso nel RSOA di circa 7 dB. Sorgente modulata direttamente, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di 130 mA.

## 3.7 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente l'ASE filtrata

---

Al fine di utilizzare come sorgente l'ASE filtrata è stato necessario utilizzare due RSOA distinti, il primo impiegato come sorgente e il secondo usato per operare la cancellazione del segnale. Utilizzando un OSA, sono stati valutati gli spettri di emissione di entrambi gli amplificatori ottici a disposizione nel laboratorio e si è quindi scelto, per ottenere un punto di lavoro comune ad entrambi, di sintonizzare il filtro in trasmissione a circa 1560 nm e di impiegare come sorgente da filtrare l'RSOA che nella sperimentazione precedente è stato usato per cancellare. Essendo gli amplificatori ottici utilizzati nella sperimentazione elementi a bassa Polarization Dependent Gain (PDG), non è stato necessario il controllo dello stato di polarizzazione del segnale ottico, e quindi l'utilizzo nel set up di laminette PC, come era invece avvenuto per i laser.

Un'altra differenza, rispetto all'impiego dei laser, ha riguardato il metodo di misura del rapporto di estinzione. Infatti, essendo il segnale ricevuto più rumoroso, si è scelto di non misurare i livelli direttamente dall'occhio, ma di ottenerli dalle medie temporali del segnale. Per il calcolo dell'ER è stata quindi applicata la formula 3.2, anche prima dell'inserimento del circuito nel set up.

I punti di lavoro presi in esame sono i seguenti:

- 1) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 1 Gb/s, ER di circa 6 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $1,7 V_{pp}$ , RSOA alimentato a 150 mA, 180 mA e 200 mA;
- 2) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 1 Gb/s, ER di circa 7 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $2 V_{pp}$ , RSOA alimentato a 150 mA, 180 mA e 200 mA;
- 3) segnale iniettato nel RSOA con frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, ER di circa 5 dB, ottenuto con un'ampiezza dati di  $2 V_{pp}$ , RSOA alimentato a 150 mA, 180 mA e 200 mA.

Nelle figure 3.53-3.55 sono riportati i risultati delle valutazioni sperimentali della compressione del rapporto di estinzione del segnale operata dal RSOA in diverse condizioni. A 1 Gb/s, con 6 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 200 mA, figura 3.53a, 180 mA figura 3.53b e 150 mA, figura 3.53c; a 1 Gb/

### 3.7 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente l'ASE filtrata

s, con 7 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 200 mA, figura 3.54a, 180 mA figura 3.54b, e 150 mA, figura 3.54c; a 2,5 Gb/s, con 5 dB di rapporto di estinzione del segnale in ingresso alle correnti di 200 mA, figura 3.55a, 180 mA figura 3.55b, e 150 mA, figura 3.55c. Vengono confrontati, al variare della potenza, i valori medi ottenuti dalla sola iniezione del segnale modulato nel RSOA (in azzurro) e dall'iniezione del segnale modulato che ha attraversato il circuito di aiuto alla cancellazione nel RSOA (in verde). Le curve sono mostrate su una variazione di potenza in ingresso da -22 dBm a 6 dBm.

La figura 3.53a mostra la compressione dell'ER operata dal RSOA alimentato da una corrente di 200 mA su di un segnale modulato alla frequenza di cifra di 1 Gb/s con ER di 6 dB. In assenza del circuito, alla potenza di circa -20 dBm, l'ER in uscita risulta ridotto di circa 2 dB. A circa -13 dBm, l'ER in uscita risulta di 2,2 dB. Un ER di 1 dB si ottiene poi con una potenza di iniezione nel RSOA di -4 dBm. L'ER tende a continuare a diminuire all'aumentare della potenza, fino a un minimo di 0,3 dB registrato alla potenza di 5 dBm. Va ricordato che l'RSOA usato per la cancellazione è differente rispetto a quello impiegato nella sperimentazione precedente. Alle stesse potenze iniettate, avvalendosi del circuito di aiuto alla cancellazione, l'ER in uscita è rispettivamente di 2 dB, 1,3 dB, 0,5 dB e 0,2 dB. La compressione a circa 1 dB del rapporto di estinzione si ottiene, invece, alla potenza di -10 dBm. Le due figure successive, 3.53b e 3.53c, mostrano che, con questi parametri del segnale in ingresso, la diminuzione rispettivamente a 180 mA e a 150 mA della corrente di alimentazione del RSOA comporta leggere variazioni nella compressione dell'ER del segnale.

È quindi stato aumentato il rapporto di estinzione del segnale in ingresso a 7 dB. Pilotando l'RSOA a 200 mA e in assenza del circuito, come mostra figura 3.54a, alla potenza di circa -20 dBm, l'ER in uscita risulta diminuito di 2,5 dB. A circa -15 dBm, l'ER in uscita risulta poi di 3,3 dB. Un ER di circa 1 dB si ottiene invece con una potenza di iniezione nel RSOA di -3 dBm. Come nel caso precedente l'ER tende a continuare a diminuire all'aumentare della potenza, fino a un minimo di 0,4 dB registrato alla potenza di 5 dBm. Alle stesse potenze, impiegando il circuito, l'ER in uscita è rispettivamente di 2 dB, 1,5 dB, 0,5 dB e 0,1 dB. La compressione a circa 1 dB del rapporto di estinzione si ottiene, invece, alla potenza di -9 dBm. Le figure

### 3.7 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente l'ASE filtrata

3.54b e 3.54c mostrano leggeri peggioramenti dell'ER in uscita impiegando correnti di alimentazione del RSOA rispettivamente di 180 mA e 150 mA.

Infine, è stato sperimentato in ingresso un segnale alla frequenza di cifra di 2,5 Gb/s e con rapporto di estinzione di circa 5 dB. La figura 3.55a mostra come, quando il segnale sia iniettato direttamente nel RSOA con una potenza di circa -20 dBm, l'ER in uscita risulti ridotto di circa 1,5 dB. Questo valore cresce a 2 dB, quando la potenza iniettata nel RSOA è -13 dBm. Aumentando la potenza di iniezione nel RSOA a -3 dBm l'ER in uscita è di 1 dB. Come già riscontrato per la modulazione a 1 Gb/s, l'ER tende a continuare a diminuire all'aumentare della potenza, fino a un minimo di 0,4 dB registrato alla potenza di 5 dBm. Non si registra la crescita del rapporto di estinzione in uscita dal momento che il set up impiegato non consente di esplorare potenze superiori a 5 dBm. A parità di potenza iniettata nel RSOA, utilizzando il circuito di aiuto alla cancellazione, l'ER in uscita è rispettivamente di 1,6 dB, 0,9 dB, 0,4 dB e 0,2 dB. Invece, la compressione a circa 1 dB del rapporto di estinzione si ottiene, con una potenza di iniezione di -13 dBm. Le figure 3.55b e 3.55c, evidenziano leggere variazioni nel rapporto di estinzione in uscita pilotando l'RSOA rispettivamente a 180 mA e 150 mA.

### 3.7 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente l'ASE filtrata

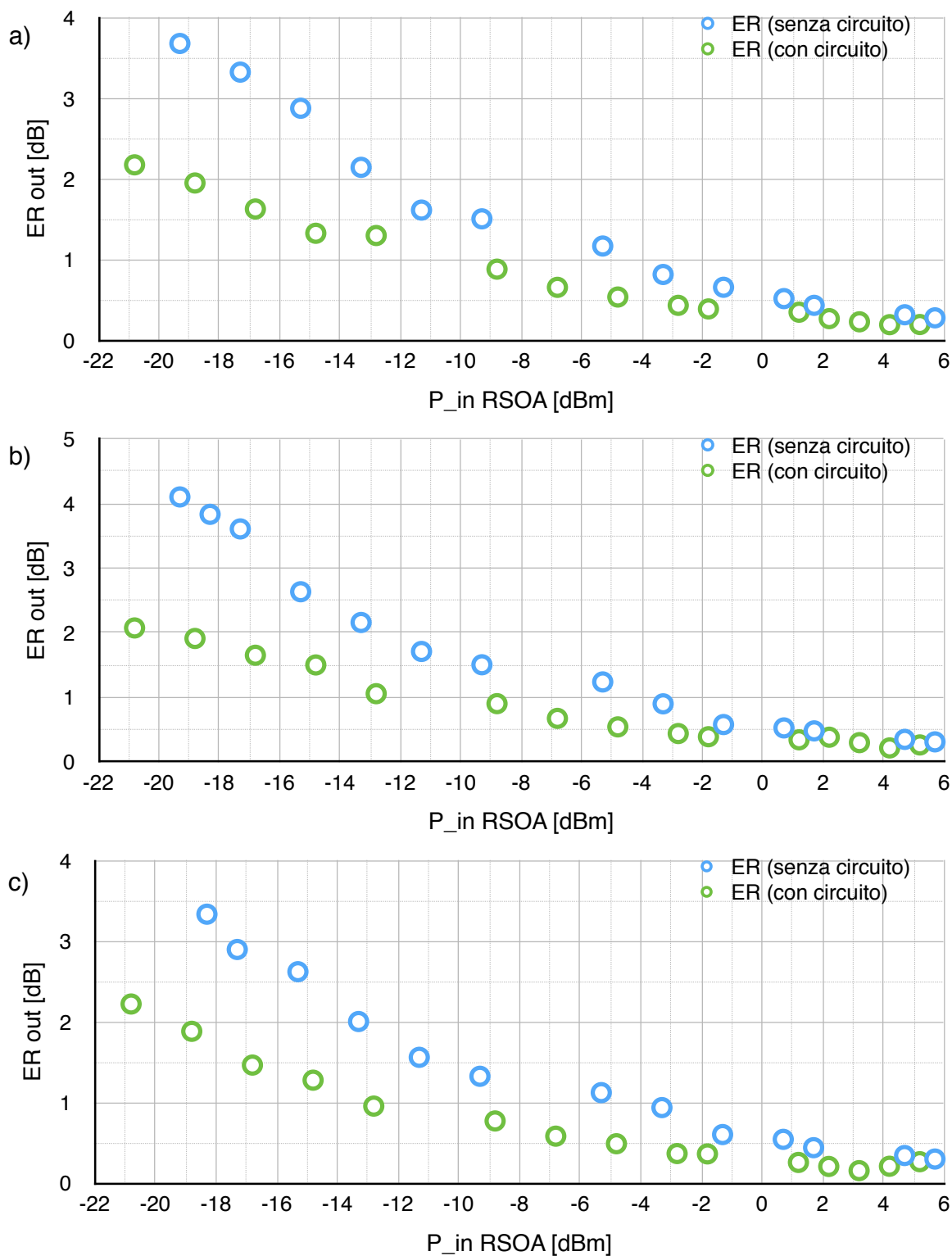


Figura 3.53 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). RSOA modulato direttamente e filtrato, rapporto di estinzione di 6 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 200 mA b) 180 mA c) 150 mA.

### 3.7 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente l'ASE filtrata

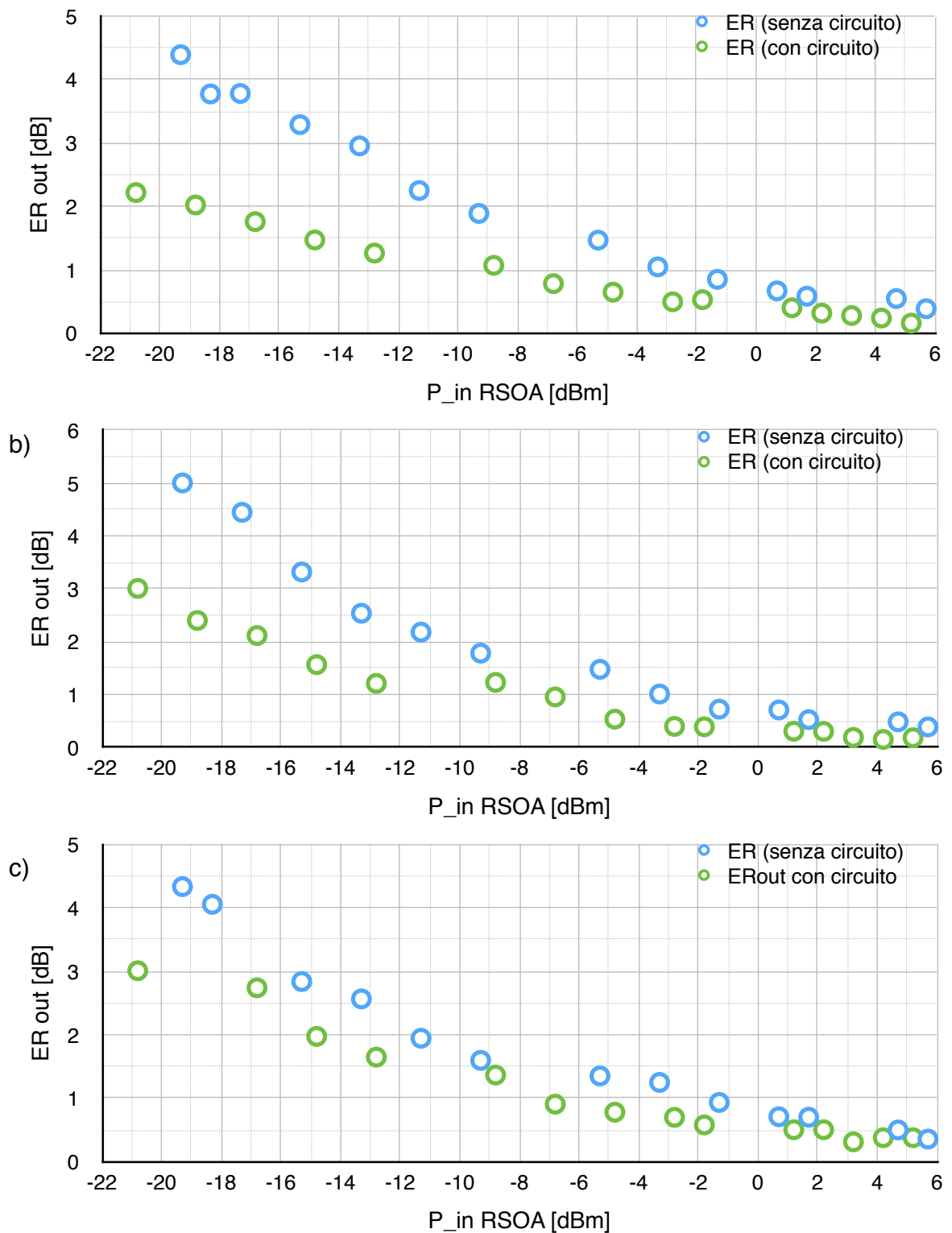


Figura 3.54 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). RSOA modulato direttamente e filtrato, rapporto di estinzione di 7 dB, frequenza di cifra di 1 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 200 mA b) 180 mA c) 150 mA.

### 3.7 Compressione dei guadagni nel RSOA utilizzando come sorgente l'ASE filtrata

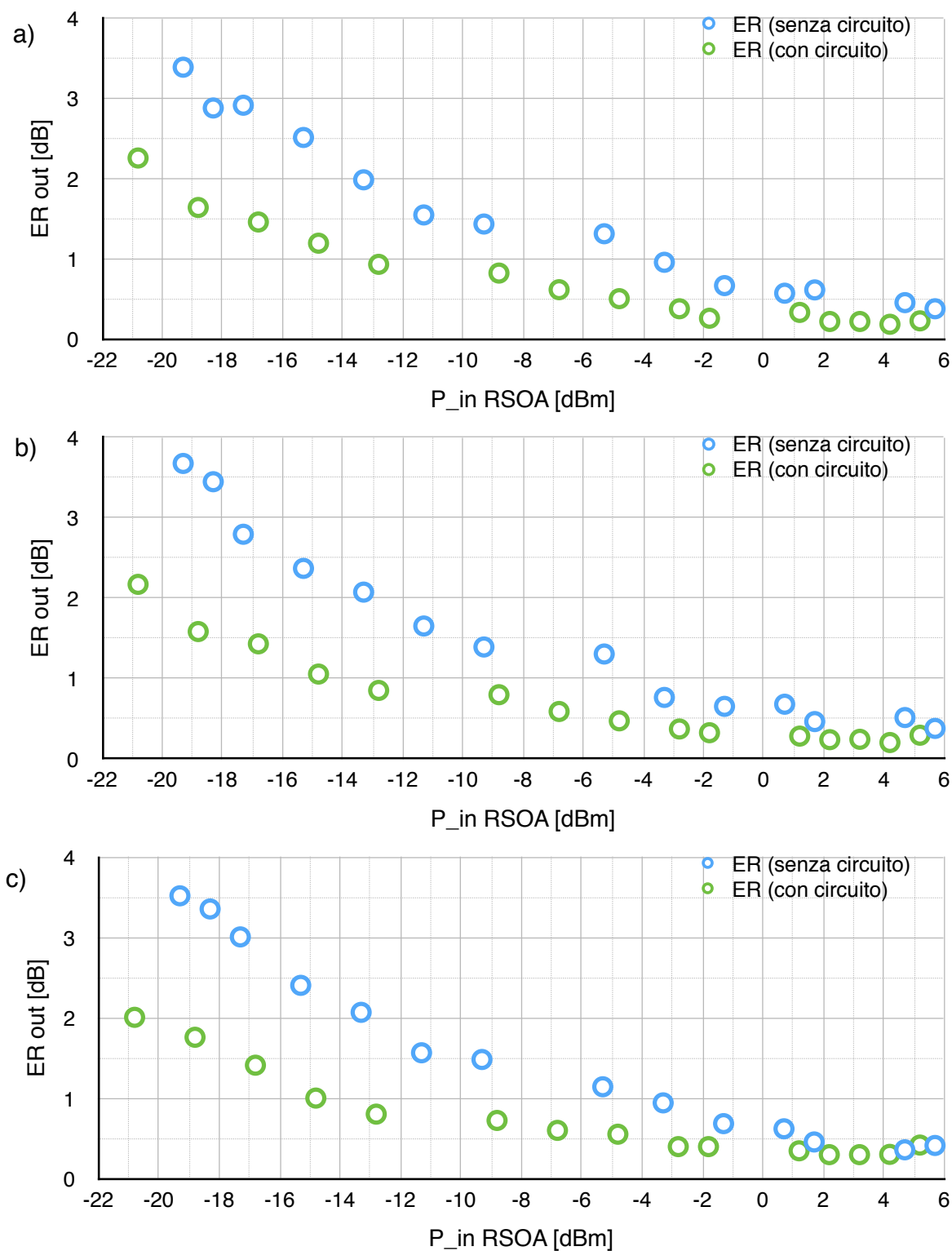


Figura 3.55 - ER compresso in uscita dal RSOA con circuito di aiuto alla cancellazione (in verde) e senza tale circuito (in azzurro). RSOA modulato direttamente e filtrato, rapporto di estinzione di 5 dB, frequenza di cifra di 2,5 Gb/s, corrente di alimentazione del RSOA di a) 200 mA b) 180 mA c) 150 mA.

## 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

---

Un'analisi finale di tipo quantitativo delle prestazioni del circuito di aiuto alla cancellazione è stata eseguita attraverso la misurazione del tasso di errore sul bit (Bit Error Rate - BER) del segnale rimodulato dal RSOA, dopo la cancellazione della modulazione del segnale in ingresso. Il BER è uno dei parametri più importanti per valutare le prestazioni di un sistema trasmissivo e si calcola come rapporto tra il numero di errori e il numero totale di bit trasmessi. Come il rapporto di estinzione, il BER è relazionato al diagramma ad occhio del segnale e precisamente al parametro Q, fattore di qualità che si esprime come differenza tra i livelli medi di uni e zeri del segnale elettrico ricevuto rapportata alla somma delle deviazioni standard di uni e zeri del segnale ricevuto. BER e diagrammi ad occhio del segnale sono stati analizzati congiuntamente durante l'attività sperimentale illustrata in questo paragrafo.

Il BER è stato misurato utilizzando il set up illustrato in figura 3.56a. Rispetto al set up utilizzato per misurare la compressione del rapporto di estinzione, è stata inserita la modulazione del segnale cancellato, quindi al RSOA giungono, insieme al segnale, i dati elettrici generati da un pattern generator, di ampiezza  $2 V_{pp}$ . Il segnale modulato in uscita dal RSOA e ricevuto da un fotodiodo, è analizzato da un BER tester, nel quale è possibile variare istante di campionamento e soglia di decisione. Il BER tester, infatti, consiste in un campionatore temporizzato da un clock sincronizzato con il segnale elettrico ricevuto, seguito da un circuito a soglia che permette di discriminare i bit 1 dai bit 0. La sequenza di bit determinata dal BER tester è poi confrontata con la sequenza di bit trasmessi, in questo caso una PRBS 27-1, in modo da contare in tempo reale il numero di errori. Data la dipendenza del BER dalla potenza ottica ricevuta, è stato inserito, tra il VOA posto all'uscita della porta 4 del circolatore e il fotodiodo, un accoppiatore con rapporto di accoppiamento 99/1. Al ramo con minore potenza dell'accoppiatore è stato connesso un OSA, usato in questo caso come power meter, in modo da poter regolare la potenza del segnale ricevuto. L'RSOA è stato controllato in temperatura a circa 25 °C e alimentato da una corrente di 130 mA.



### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

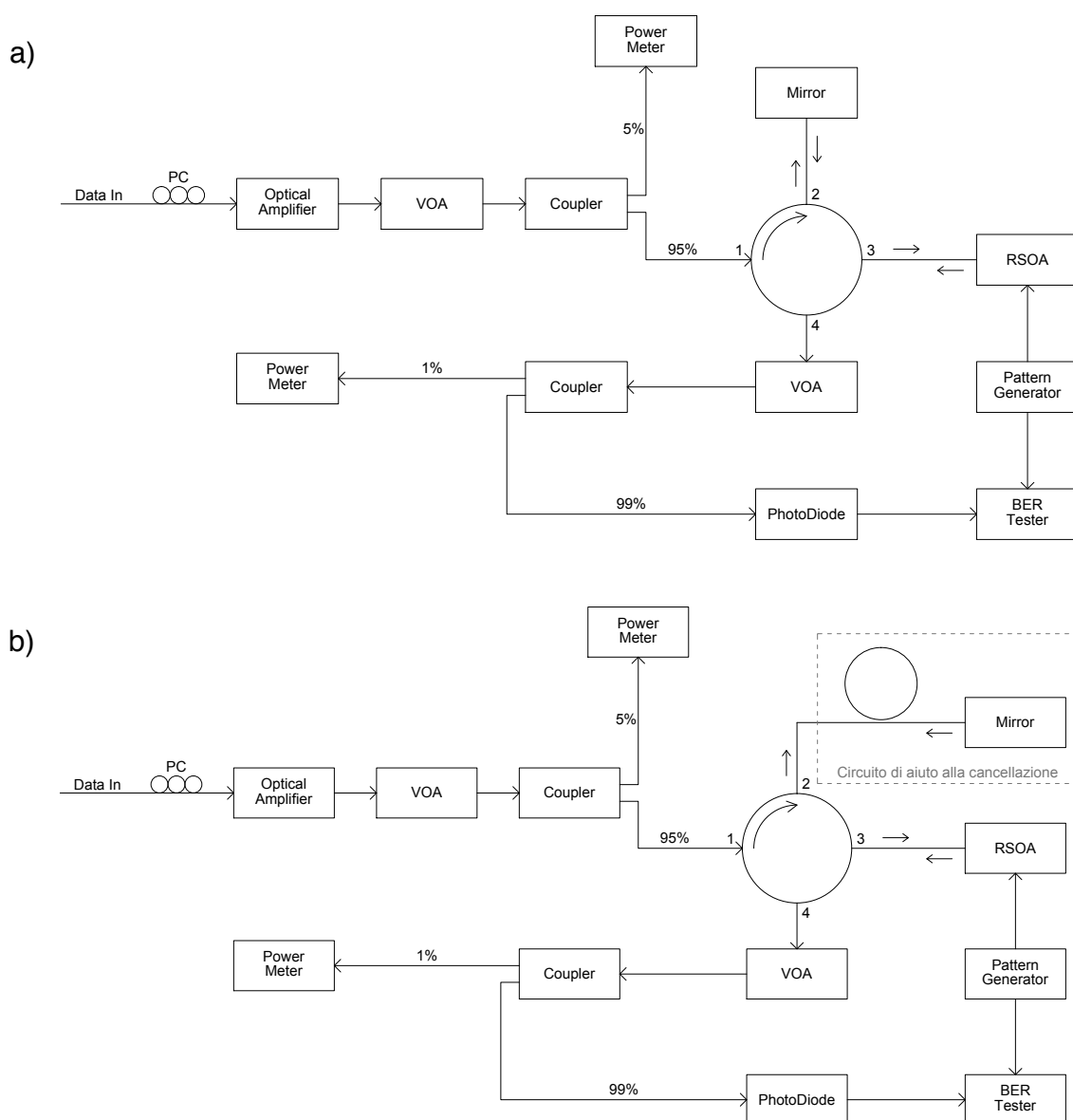


Figura 3.56 - Set up utilizzati per le misurazioni dei BER, a) senza e b) con il circuito di aiuto alla cancellazione.

Come per le valutazioni presentate nei paragrafi precedenti il BER è stato misurato sia nel caso di segnale iniettato direttamente nel RSOA sia con l'inserimento del circuito di aiuto alla cancellazione, per stimarne quantitativamente l'efficacia. Nonostante le misure precedenti abbiano dimostrato la riduzione della modulazione residua, altri fattori possono concorrere a peggiorare le prestazioni del segnale rimodulato in upstream. Tra questi, ad esempio, la rumorosità del segnale iniettato che, come si è visto nel paragrafo 3.3, è accresciuta dall'attraversamento del circuito specialmente nel caso del trasmettitore modulato esternamente. Come riportato nel

### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

set up illustrato in figura 3.56b, il circuito è stato posto sulla porta 2 del circolatore, sostituendo lo specchio precedentemente utilizzato. In ricezione è stato inoltre impiegato un filtro con 0,3 nm di banda, per ridurre il rumore fuori banda.

Inizialmente, sono stati misurati i diagrammi ad occhio del segnale in ingresso e in uscita dal RSOA, in assenza di rimodulazione del segnale, utilizzando come sorgente il laser DFB a modulazione esterna e inviando al modulatore di intensità dati elettrici di ampiezza originaria 0,5 V<sub>pp</sub> e opportunamente amplificati, ottenendo un rapporto di estinzione del segnale iniettato nel RSOA molto alto, pari a circa 9 dB. La figura 3.57a mostra il diagramma ad occhio del segnale così generato all'ingresso del RSOA. Le figura 3.57b, 3.57c e 3.57d mostrano invece il segnale in uscita dal RSOA per tre potenze di iniezione differenti, rispettivamente -16 dBm, -10 dBm e circa -2 dBm, potenza a cui corrisponde il punto di massima cancellazione. È evidente l'effetto progressivo della compressione operata dal RSOA all'aumentare della potenza di iniezione. In particolare, in figura 3.57d, è mostrata una cancellazione quasi totale della modulazione del segnale in ingresso, si vede, infatti, solo la risposta del guadagno del RSOA alla rapida variazione della potenza in ingresso.

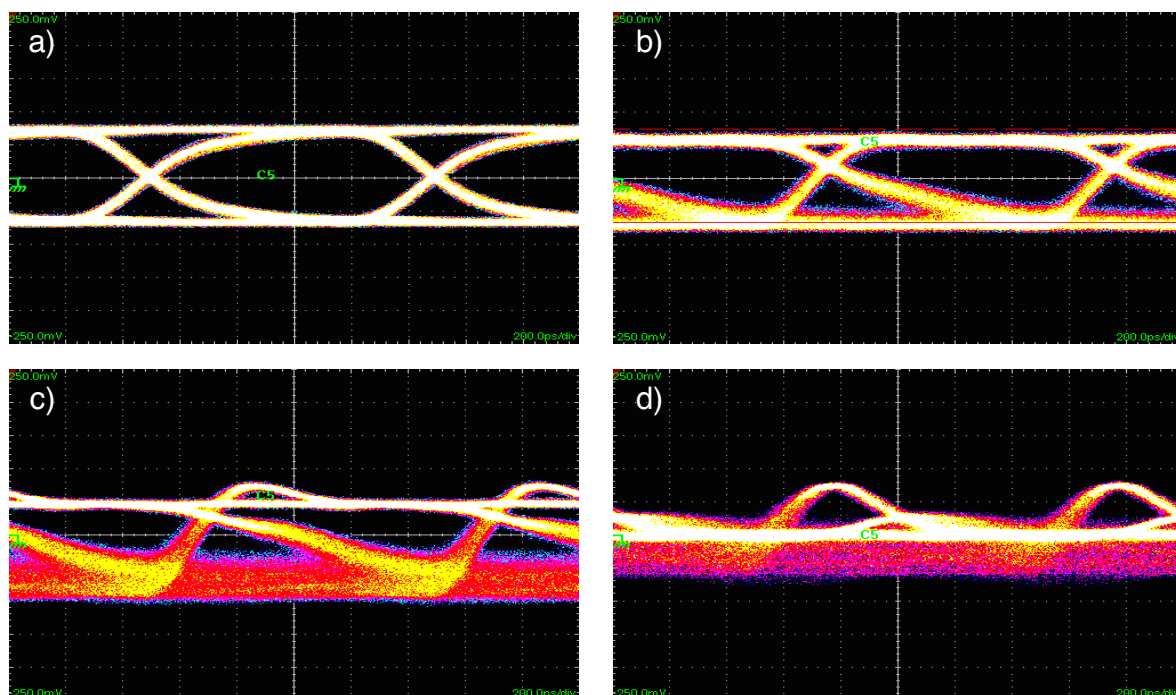


Figura 3.57 - Diagrammi ad occhio del segnale a) all'ingresso e all'uscita del RSOA alla potenza di iniezione di b) -16 dBm, c) -10 dBm e d) -2 dBm.

### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

Sono stati quindi valutati i diagrammi ad occhio del segnale in uscita dal RSOA quando al RSOA è applicata la rimodulazione. La figura 3.58a mostra il segnale modulato dal RSOA che ha in ingresso una continua di potenza ottica pari a -17 dBm. Le figure 3.58b 3.58c 3.58d illustrano invece i diagrammi ad occhio del segnale ottenuto rimodulando un segnale con ER di 9 dB a diverse potenze di iniezione nel RSOA, rispettivamente -16 dBm, -10 dBm e circa -2 dBm. Alla potenza di -16 dBm, dove l'effetto di cancellazione del RSOA è quasi nullo, si può vedere distintamente la doppia modulazione. Alla potenza di -10 dBm, sono ancora visibili le due modulazioni, ma meno distinte rispetto al caso precedente. Infine, alla potenza di -2 dBm, dove è massima la cancellazione del segnale operata dal RSOA, si vedono due livelli, poco distinti, solo relativi al bit.

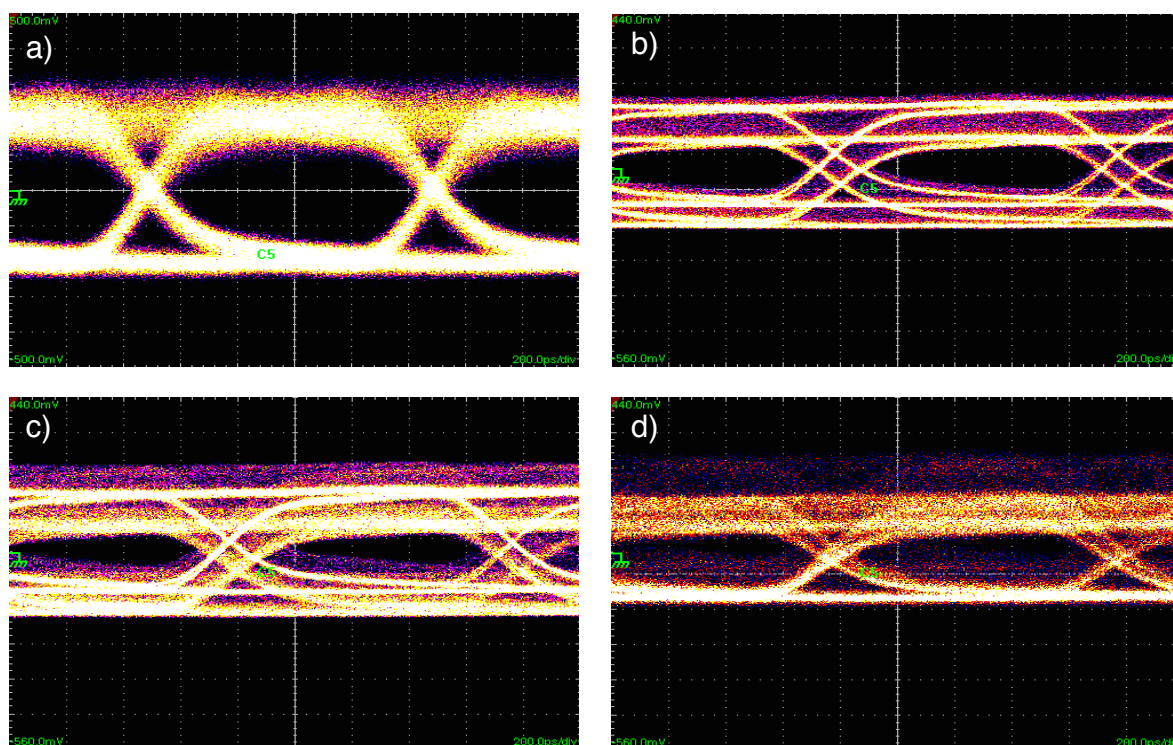


Figura 3.58 - Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, in cui viene iniettato a) una continua di potenza -17 dBm, un segnale modulato esternamente con ER di 9 dB alla potenza b) -16 dBm, c) -10 dBm e d) -2 dBm.

Valutazioni simili sono state effettuate inserendo il circuito di aiuto alla cancellazione nello schema di seeding esterno. In figura 3.59 sono mostrati i diagrammi ad occhio del segnale in uscita dal RSOA in assenza di rimodulazione, alle stesse potenze valutate in precedenza, -16 dBm (figura 3.59a), -10 dBm (figura 3.59b) e -2 dBm (figura 3.59c). In tutte e tre le situazioni è evidente la distruzione della struttura dei bit

### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

del segnale operata dal circuito, non è infatti più riconoscibile la tipica forma ad occhio associata alla modulazione binaria. È pure evidente una certa rumorosità del segnale iniettato già evidenziata dalle misure di spettro elettrico del paragrafo 3.3.

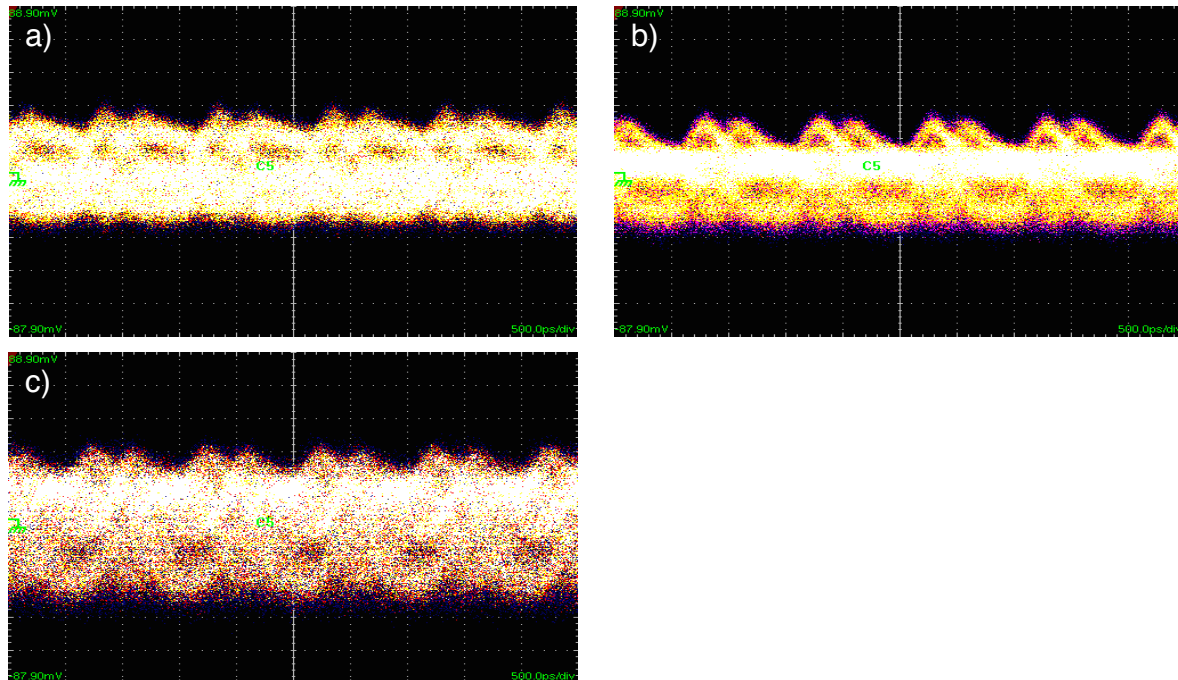


Figura 3.59 - Diagrammi ad occhio del segnale filtrato dal circuito e compresso dal RSOA, che ha in ingresso una potenza b) -16 dBm, c) -10 dBm e d) -2 dBm.

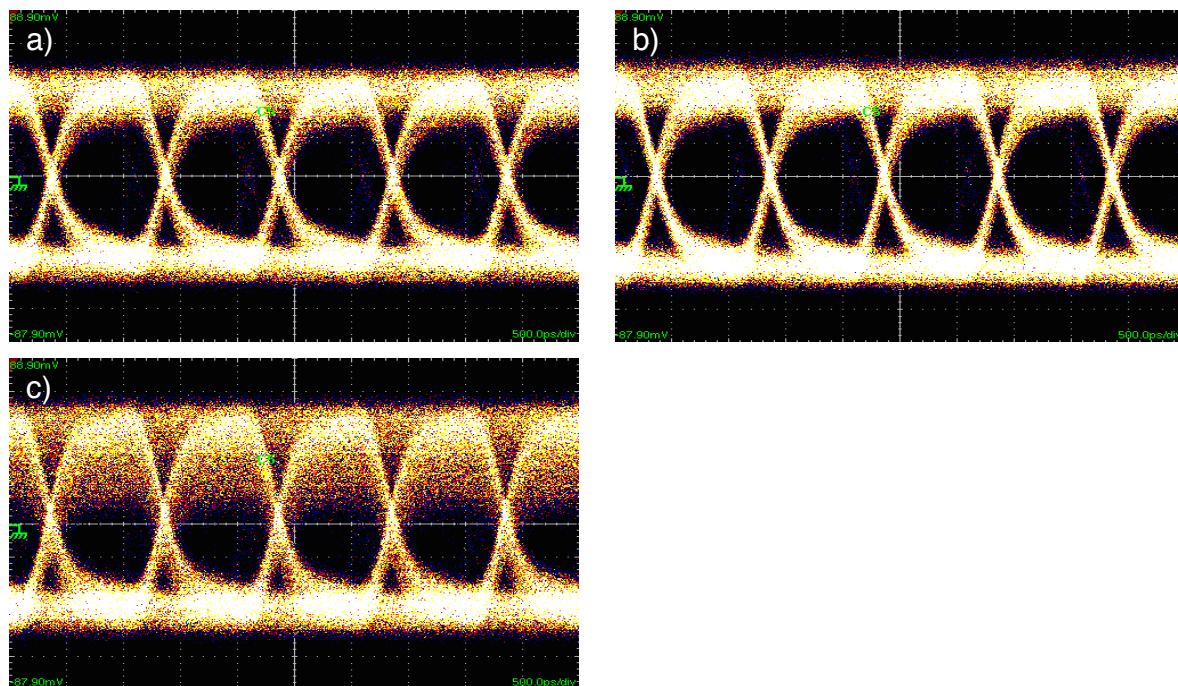


Figura 3.60 - Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, che ha in ingresso un segnale modulato esternamente con ER di 9 dB, con circuito di aiuto alla cancellazione. Potenza iniettata nel RSOA: a) -16 dBm, b) -10 dBm e c) -2 dBm.

### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

Nelle figura 3.60a 3.60b e 3.60c sono mostrati, invece, i diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, alle potenze di iniezione rispettivamente di -16 dBm, -10 dBm e -2 dBm. Si nota che l'azione del circuito elimina la presenza della doppia modulazione, evidente invece in figura 3.58. I diagrammi relativi alle potenze di iniezione di -16 dBm e -10 dBm sono quasi equivalenti, mentre quello relativo alla potenza di -2 dBm evidenzia la presenza di maggiore rumore associato al livello alto del segnale.

È stata quindi effettuata la valutazione del BER, mantenendo gli stessi parametri utilizzati per la valutazione dei diagrammi ad occhio, ovvero segnale di seeding con 9 dB di rapporto di estinzione generato da un laser DFB a modulazione esterna. Le misurazioni in figura 3.61 sono state effettuate mantenendo costante la potenza al ricevitore di -17 dBm e variando, invece, la potenza ottica iniettata nel RSOA. La curva associata al BER misurato senza impiegare il circuito (in verde in figura) mostra un andamento pressoché lineare e un aumento del tasso di errore al cresce della potenza di iniezione. Infatti il BER varia, nell'intervallo di misurazione, da un minimo di  $4E-6$  alla potenza di -17 dBm ad un massimo di circa  $E-4$  alla potenza di -4 dBm. In queste prime misure non è stato inserito il filtro ottico in ricezione, per cui si è verificato il fatto che per potenze di iniezione basse, quando la cancellazione non è molto efficace, il segnale riamplicato dal RSOA sia pure molto basso e paragonabile in potenza all'ASE emessa dal RSOA che pure viene modulata dalla corrente di bias. A basse potenze di iniezione è questo il segnale che viene misurato e le prestazioni non subiscono significative variazioni. La curva relativa al BER misurato inserendo il circuito (in azzurro in figura) presenta lo stesso problema e mostra un andamento crescente tra -14 dBm e -10 dBm di potenza iniettata, dove il BER varia da  $E-6$  a  $E-5$ . Ciononostante, oltre la potenza di -10 dBm il BER diminuisce, fino a raggiungere il minimo locale della curva, associato alla potenza di -7 dBm, dove il BER torna a essere circa  $E-6$ , evidenziando un vantaggio nell'inserzione del circuito. Oltre tale potenza, invece, il tasso di errore torna ad aumentare. L'introduzione del circuito porta quindi ad un miglioramento delle prestazioni del segnale rimodulato.

### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

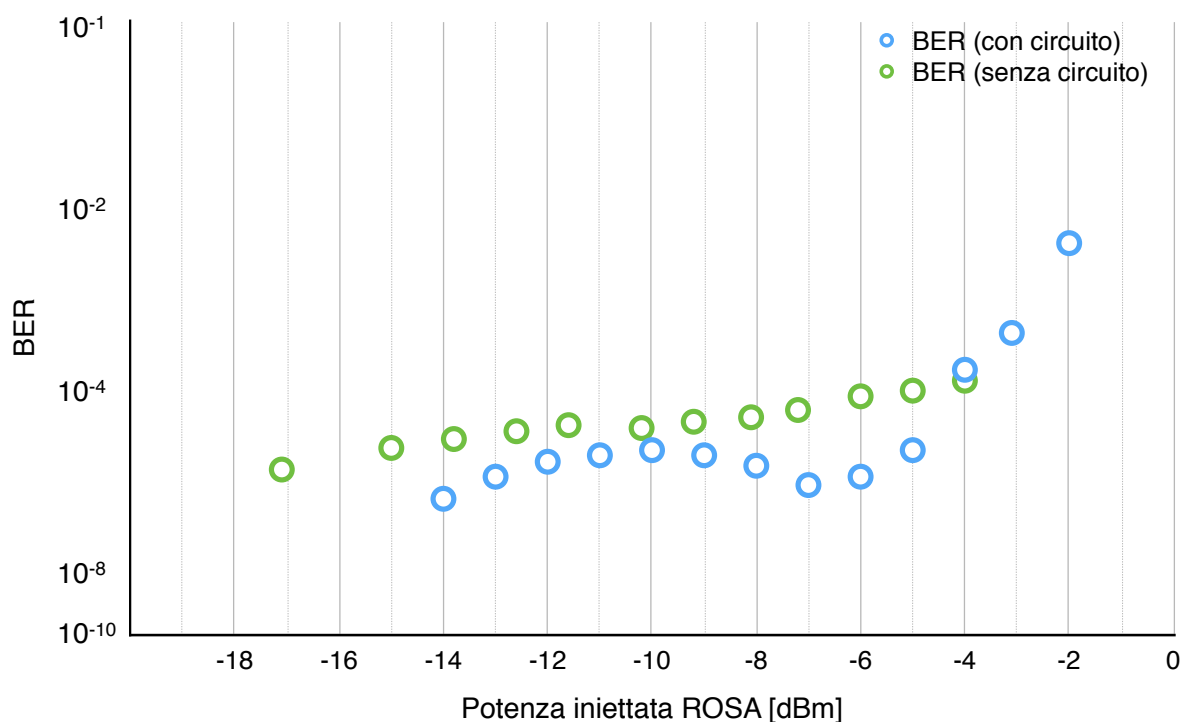


Figura 3.61 - BER al variare della potenza iniettata nel RSOA e a potenza ricevuta costante di -17 dBm, con il circuito di aiuto alla cancellazione (in azzurro) e senza circuito (in verde). ER del segnale in ingresso di 9 dB.

È stato successivamente inserito un filtro ottico di banda 0,3 nm, tra l'accoppiatore e il fotodiodo. È quindi stato analizzato l'effetto del filtro sulle prestazioni del sistema in cui è inserito il circuito, valutando sia i diagrammi ad occhio del segnale che il BER. In figura 3.62 sono mostrati i diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, acquisiti rispettivamente alle potenze ottiche di iniezione nel RSOA di -16 dBm (figura 3.62a), -10 dBm (figura 3.62b) e -5 dBm (figura 3.62c). Si nota una notevole diminuzione del rumore, segno di una cancellazione migliore della modulazione in ingresso, aumentando la potenza ottica da -16 dBm a -10 dBm. Un lieve peggioramento si riscontra invece aumentando la potenza ottica a -5 dBm dove il contributo di rumore introdotto dal circuito di aiuto alla cancellazione è superiore al beneficio ottenuto da una migliore cancellazione.

### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

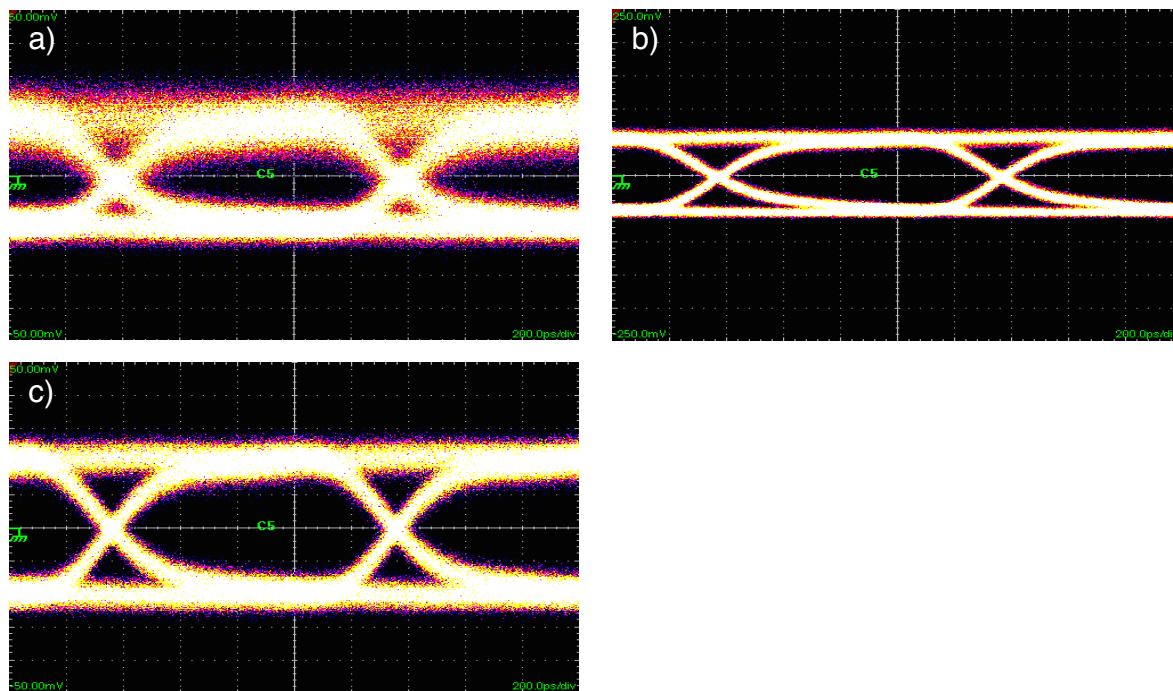


Figura 3.62 - Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, che ha in ingresso un segnale modulato esternamente con ER di 9 dB, con circuito di aiuto alla cancellazione. Potenza iniettata nel RSOA: a) -16 dBm. b) -10 dBm e c) -5 dBm. Utilizzato un filtro in ricezione.

Per evidenziare la necessità di un filtro in ricezione in figura 3.63 sono riportati i valori di BER ottenuti, rispettivamente in azzurro senza filtrare e in verde filtrando il segnale ricevuto, la potenza al ricevitore è stata mantenuta a -17 dBm. Quando l'ASE emessa dal RSOA viene filtrata al ricevitore si trova, come ci si aspetta, che per potenze di iniezione basse il BER è più alto e migliora man mano che la potenza iniettata cresce, ovvero man mano che la cancellazione della modulazione residua è più significativa, nell'intervallo di potenze compreso tra -17,5 dBm e -7,5 dBm, dove il BER varia da  $E^{-1}$  a  $E^{-8}$ . Il punto di minimo della curva di BER è alla potenza di -6,5 dBm, dove il BER corrispondente è di  $5E^{-9}$ . Oltre tale punto, il BER torna a crescere in modo quasi lineare. Rispetto alle misure di compressione del rapporto di estinzione presentate nel paragrafo 3.5 il punto di minimo è spostato a -6,5 dBm invece che a -4 dBm, come risultato del compromesso tra rumore introdotto dal circuito di aiuto alla cancellazione e riduzione della modulazione residua.

Misurazioni simili sono state ripetute utilizzando per il seeding del RSOA un segnale con rapporto di estinzione più basso, pari a circa 5 dB, sempre impiegando come sorgente ottica il laser DFB e utilizzando il set up con filtro in ricezione.

### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

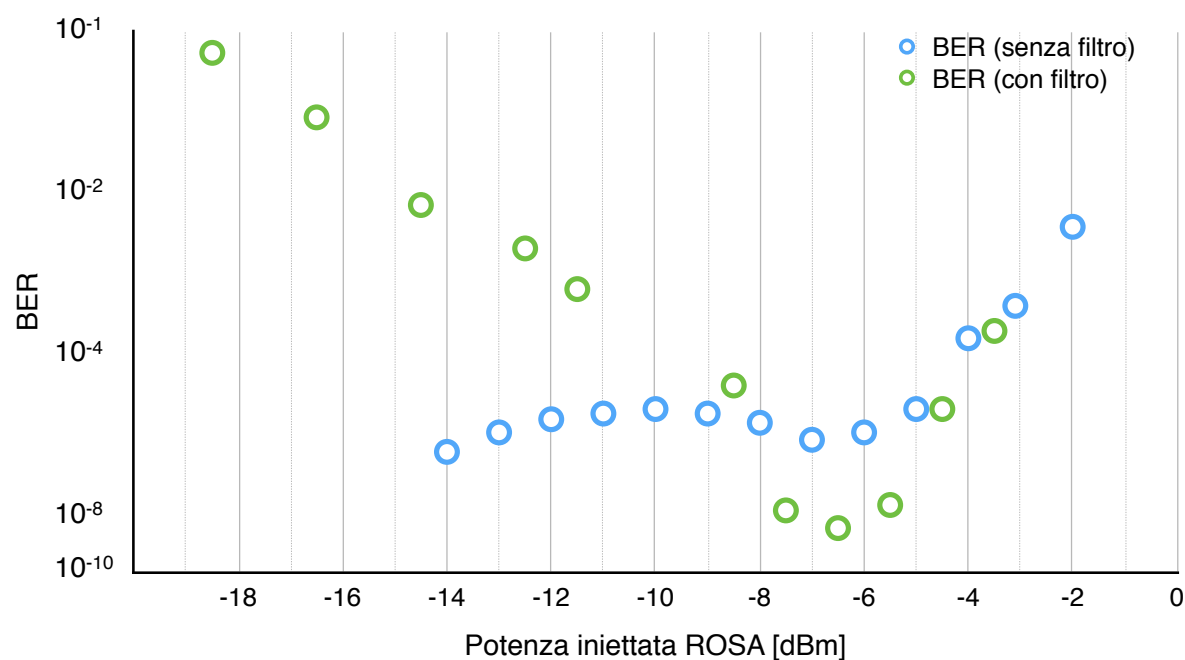


Figura 3.63 - BER al variare della potenza iniettata nel RSOA e a potenza ricevuta costante di -17 dBm, con circuito di aiuto alla cancellazione, con (in verde) e senza (in azzurro) filtro in ricezione.

In figura 3.64 sono mostrati i diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, acquisiti rispettivamente alle potenze ottiche di iniezione nel RSOA di -22 dBm (figura 3.64a) -15 dBm (figura 3.64b) e -8 dBm (figura 3.64c), senza utilizzare il circuito di aiuto alla cancellazione. A -22 dBm l'apertura dell'occhio è molto ridotta, a causa della presenza di rumore dovuta al fatto che questa potenza è troppo bassa per avere una buona cancellazione. Aumentando la potenza a -15 dBm il rumore diminuisce, ma si notano ancora due livelli distinti relativi al bit 1. Infine, a -8 dBm, la cancellazione del segnale è buona e l'apertura dell'occhio risulta aumentata.

Sono quindi stati valutati, alle stesse potenze, i diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA inserendo il circuito di aiuto alla cancellazione. Come in precedenza, a -22 dBm si nota, in figura 3.65a la forte presenza di rumore. Un netto miglioramento è evidenziato in figura 3.65b, dove la potenza ottica di iniezione è stata aumentata a -15 dBm, si nota anche confrontando con la figura 3.64b, un'apertura maggiore dell'occhio impiegando il circuito. Aumentando ancora la potenza fino a -8 dBm si ottiene una cancellazione quasi perfetta del segnale in ingresso, evidenziata dal diagramma ad occhio in figura 3.65c.



### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

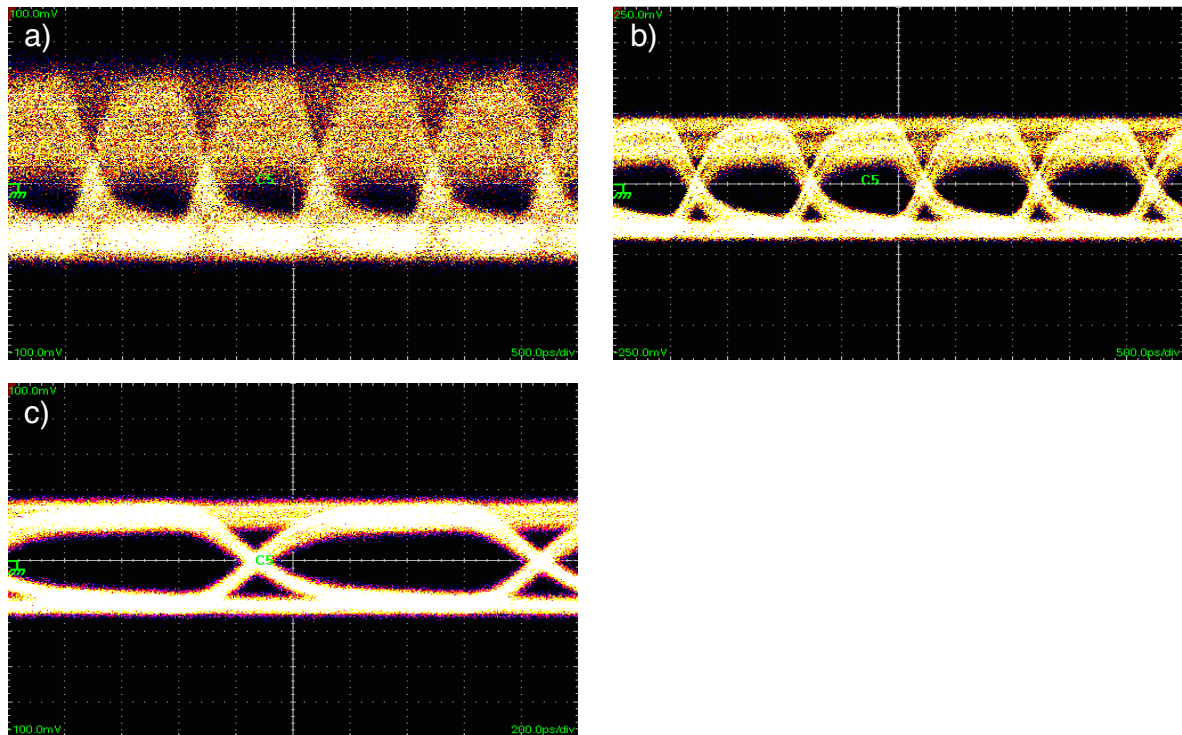


Figura 3.64 - Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, che ha in ingresso un segnale modulato esternamente con ER di 5 dB. Potenza iniettata nel RSOA: a) -22 dBm, b) -15 dBm e c) -8 dBm. Utilizzato un filtro in ricezione.

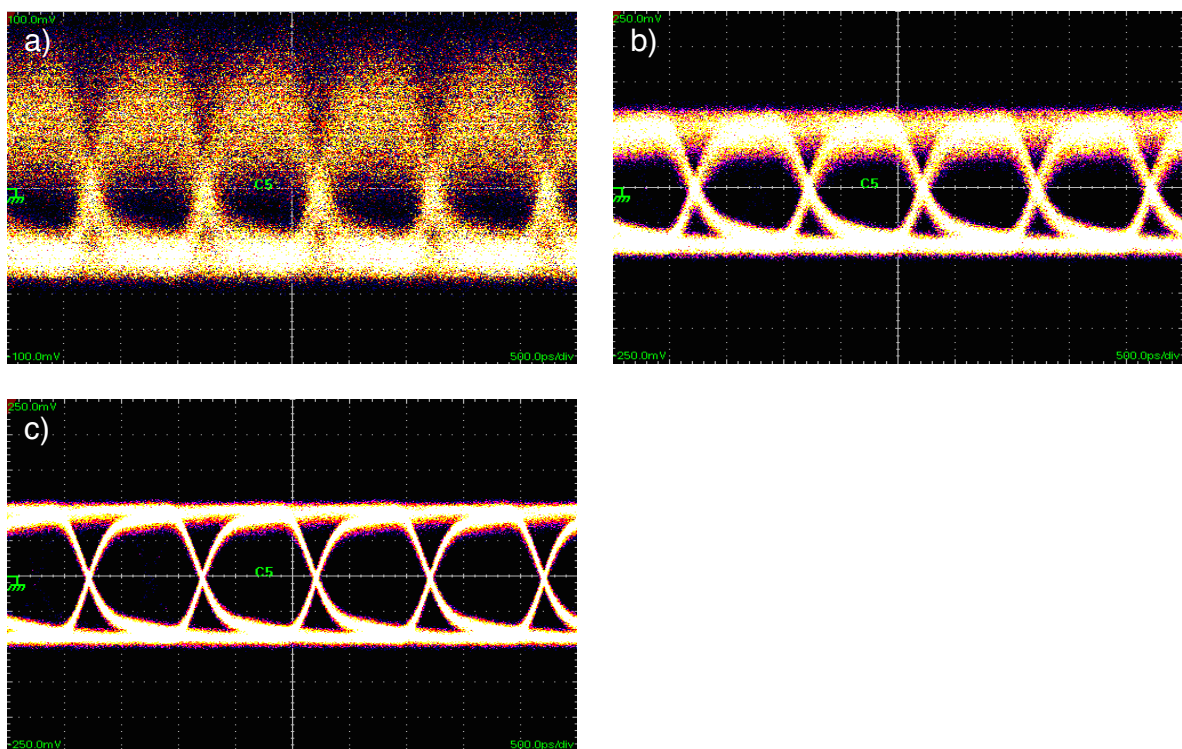


Figura 3.65 - Diagrammi ad occhio del segnale rimodulato dal RSOA, che ha in ingresso un segnale modulato esternamente con ER di 5 dB, con circuito di aiuto alla cancellazione. Potenza iniettata nel RSOA: a) -22 dBm, b) -15 dBm e c) -8 dBm. Utilizzato un filtro in ricezione.

### 3.8 Le misure di BER e i diagrammi ad occhio

Il BER, come in precedenza, è stato valutato a potenza costante al ricevitore e pari in questo caso a -12 dBm, utilizzando il filtro in ricezione. I risultati delle misurazioni sono mostrati, in scala logaritmica, in figura 3.66, dove la linea tratteggiata indica la zona priva di errori. Il BER del sistema in cui non è impiegato il circuito, in azzurro in figura, diminuisce progressivamente dal valore di circa  $E-2$  rilevato alla potenza di iniezione di circa -17 dBm fino ad arrivare al valore di  $E-10$  alla potenza di circa -12 dBm. Tra -11 dBm e 0 dBm vi è una zona priva di errori, mentre alla potenza di 1 dBm il BER torna a crescere. Il BER del sistema dove è stato inserito il circuito di aiuto alla cancellazione, in verde in figura, è stato misurato tra -21 dBm e 6 dBm di potenza iniettata nel RSOA. A -21 dBm il BER è di  $2E-5$ , e, da questo punto, decresce quasi linearmente fino alla potenza di -16 dBm, dove il BER è di  $E-10$ . Aumentando la potenza di iniezione oltre questo valore non sono più stati rilevati errori, per tutto l'intervallo di potenza considerato. Il confronto tra le due curve evidenzia, quindi, che l'impiego del circuito di aiuto alla cancellazione diminuisce la potenza di iniezione nel RSOA necessaria a garantire una trasmissione virtualmente priva di errori e accresce la regione di funzionamento in relazione al fatto che nel RSOA oltre una certa potenza iniettata la modulazione residua torna a crescere.

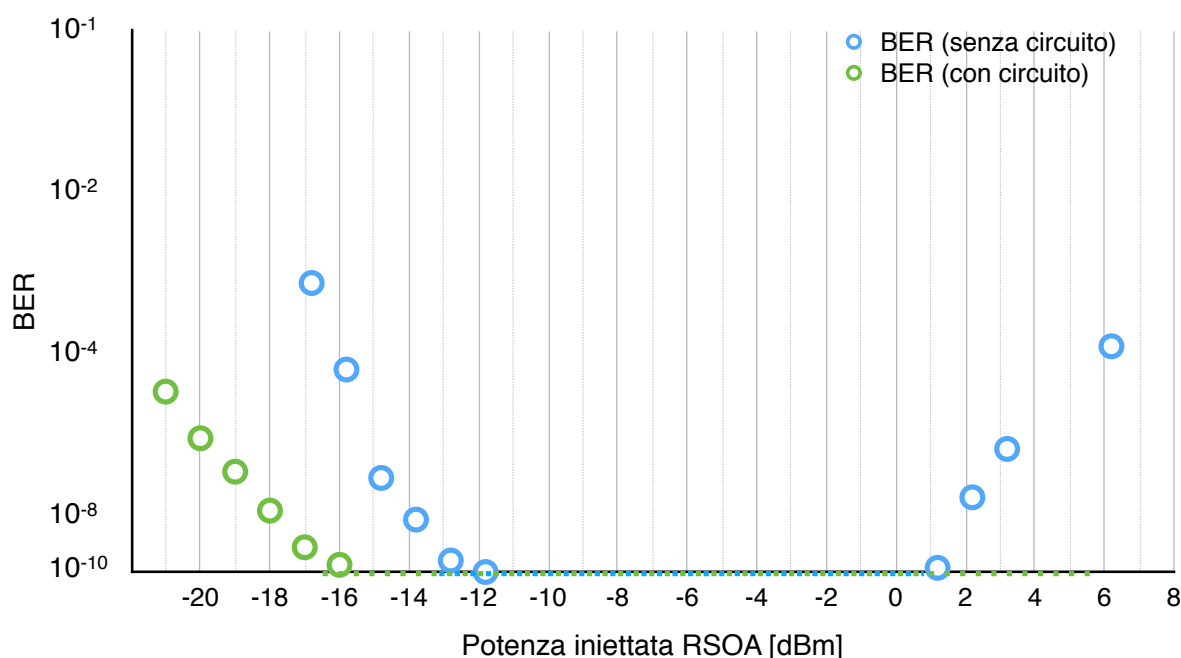


Figura 3.66 - BER al variare della potenza iniettata nel RSOA e a potenza ricevuta costante di -12 dBm, con il circuito di aiuto alla cancellazione (in azzurro) e senza circuito (in verde) e con filtro in ricezione. ER del segnale in ingresso di 5 dB.

# CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi si inserisce nel contesto delle reti ottiche di accesso a divisione di lunghezza d'onda ed in particolare dei trasmettitori impiegati all'interno di queste reti. Perché questa topologia di rete, che instaura collegamenti punto a punto virtuali tra l'unità di rete (ONU) e l'ufficio centrale, assegnando al collegamento una specifica lunghezza d'onda, abbia successo, il tema dei costi è fondamentale. Per abbattere i costi di selezione e di immagazzinamento dei componenti, i trasmettitori, almeno dal lato unità di rete, devono essere colorless, ovvero non caratterizzati in lunghezza d'onda, ma in grado di assumere al bisogno la necessaria colorazione.

In letteratura sono presenti diverse proposte. Accanto alle soluzioni sintonizzabili in lunghezza d'onda, che richiedono meccanismi di controllo esterno della sintonia e per il momento appaiono ancora molto costose, sono state proposte soluzioni con un meccanismo di sintonizzazione interamente ottico e automatico, basate cioè su meccanismi di seeding esterno o di self-seeding. Nel primo caso, il flusso di dati in downstream dall'ufficio centrale verso l'unità di rete sintonizza un Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOA), piuttosto che un laser Fabry-Pérot multimodale, collocato all'ONU. In questo schema l'RSOA, o il FP, collocato all'ONU, dopo aver cancellato i dati, rimodula il segnale attraverso la propria corrente di bias per la trasmissione in upstream. Nel secondo caso, invece, si crea una cavità risonante tra l'ONU e uno specchio collocato al nodo remoto. La radiazione emessa dal RSOA viene retroriflessa e auto sintonizza l'emissione di questa cavità. L'RSOA modula la radiazione per la trasmissione in upstream, ma prima di imprimere i dati deve cancellare la modulazione ricircolante. In entrambi questi schemi le prestazioni della trasmissione in upstream sono fortemente influenzate dalla presenza di modulazione residua, ovvero dall'efficacia della cancellazione operata dal RSOA. Tale efficacia dipende da molti fattori, in parte dipendenti dalle caratteristiche del RSOA, come la potenza di saturazione e la frequenza di taglio del componente, ed in parte dipendenti dalle caratteristiche del segnale da cancellare, come la frequenza di cifra e il rapporto di estinzione. Tanto più è elevato il rapporto di estinzione del segnale in ingresso, più difficile è la sua cancellazione. Di qui, l'esigenza di facilitare

il compito dell'elemento che opera la cancellazione, ad esempio attraverso la scelta di opportuni formati di modulazione ortogonali tra loro per il downstream e l'upstream. Un'altra proposta consiste invece nell'uso di un cosiddetto modulation averaging reflector, ovvero un componente costituito da una sequenza di riflettori che ridistribuisce la potenza ottica dei bit, operando così una funzione di media. Questa soluzione interessante presenta tuttavia delle limitazioni in relazione all'inserimento nello schema di self-seeding, perché incompatibile con l'uso di un Faraday Mirror, che invece si rende necessario per gestire all'interno di questa topologia l'evoluzione della polarizzazione del segnale.

In questo lavoro di tesi viene proposto un circuito ottico di aiuto alla cancellazione che sfrutta lo stesso principio del modulation averaging reflector, ovvero l'abbattimento del rapporto di estinzione del segnale attraverso somme multiple, ma grazie alla presenza di un singolo riflettore può utilizzare le proprietà del FRM. Obiettivi di questo lavoro di tesi sono stati l'analisi, il progetto, la realizzazione e la caratterizzazione sperimentale di questo circuito ottico. Tale circuito, basato su un anello risonante e uno specchio, riduce il rapporto di estinzione del segnale da cancellare prima del suo ingresso nel RSOA, di fatto aiutando il processo di cancellazione.

Nel corso del lavoro, è stato realizzato un modello teorico per la definizione dei parametri del circuito di aiuto alla cancellazione, presentato nel secondo capitolo. Le condizioni della modellizzazione sono: perdite della anello risonante di 1 dB/giro, frequenza di cifra target di 1 Gb/s e sequenza dati PRBS  $2^7-1$ . Per quanto riguarda l'accoppiatore, è stato scelto il rapporto di accoppiamento 50/50 che offre il miglior compromesso tra perdite introdotte e capacità di cancellazione del segnale. Attraverso differenti simulazioni, la lunghezza dell'anello risonante è stata scelta di circa 50 cm. Questo valore consente di avere buoni risultati con bassa sensibilità all'errore nella definizione della lunghezza alla frequenza di cifra di 1 Gb/s, ma anche alla frequenza di cifra di 2,5 Gb/s. Sempre attraverso simulazioni, è stato valutato l'impatto della distanza dello specchio dall'anello risonante, che è risultata ininfluente. Il circuito progettato è stato quindi caratterizzato all'interno di uno schema di seeding esterno con un RSOA. È stata condotta innanzitutto una caratterizzazione del comportamento in guadagno del RSOA da impiegare nella sperimentazione. È stata così individuata la regione di massima compressione del guadagno del RSOA.

## Conclusioni

Sono stati realizzati tre trasmettitori con caratteristiche spettrali differenti con cui effettuare le valutazioni di cancellazione: un laser distributed feedback (DFB) modulato esternamente, un laser a modulazione diretta (DML) e una fetta di emissione spontanea amplificata (ASE) filtrata. Queste sorgenti presentano proprietà di coerenza differenti e hanno permesso di analizzare il comportamento del circuito di aiuto alla cancellazione in risposta ad un fascio ottico con lunghezza di coerenza sia minore che maggiore rispetto alla lunghezza dell'anello risonante.

Per tutti e tre i trasmettitori è stata inizialmente valutata la riduzione del rapporto di estinzione operata dal circuito di aiuto alla cancellazione alle frequenze di cifra 1 Gb/s e 2,5 Gb/s. I risultati sperimentali così ottenuti ed espressi in termini di rapporto di estinzione in uscita dal circuito sono stati confrontati con quelli attesi delle simulazioni ottenendo un accordo molto buono alla frequenza di 1 Gb/s, in particolare per la sorgente modulata esternamente e per la sorgente ASE filtrata. Anche per il DML l'accordo è buono, anche se il rapporto di estinzione misurato è di circa 1.5 dB più alto di quanto atteso. A 2,5 Gb/s l'accordo trovato tra misure e simulazioni è pure buono anche se presenta qualche scostamento dovuto al fatto che a 2,5 Gb/s la risposta del circuito è più sensibile ad eventuali errori nella definizione della lunghezza di 50 cm ipotizzata nelle simulazioni e quella effettiva, mentre, per la modulazione a 1 Gb/s, il punto di lavoro del circuito cade, in termini di lunghezza dell'anello, in un intervallo dove la riduzione del rapporto di estinzione è costante.

Si è trovato che il circuito di aiuto alla cancellazione fa sì che un rapporto di estinzione di 5 dB di un segnale a 1 Gb/s generato utilizzando il laser DFB o l'ASE filtrata venga ridotto di 2 dB. Con le stesse sorgenti e alla stessa frequenza di cifra, un ER di 7 dB viene invece ridotto di circa 3 dB. A 2,5 Gb/s, invece, un ER di 5 dB viene ridotto dal circuito di 3 dB, nel caso di sorgente ASE filtrata, e di 2 dB, quando il trasmettitore considerato è un laser DFB modulato esternamente o un DML. Sempre a 2,5 Gb/s un ER di 6 dB di un segnale generato utilizzando questi due trasmettitori viene compresso di oltre 2 dB.

Le valutazioni di efficacia del circuito di aiuto alla cancellazione all'interno dello schema di seeding esterno per le sorgenti ottiche laser DFB, DML e ASE filtrata sono state effettuate utilizzando i tre trasmettitori in condizioni differenti in modo da

## Conclusioni

ottenere rapporti di estinzione da 5 a 9 dB circa e facendo operare l'RSOA a correnti variabili tra 100 mA e 200 mA.

Utilizzando come sorgente il laser DFB modulato esternamente, a 1 Gb/s si ottiene, valutando il rapporto di estinzione medio del segnale, una compressione massima, operata dal RSOA di 6 dB con un ER in ingresso di 8 dB, alla potenza ottica di -4 dBm, e di quasi 7 dB con un ER in ingresso di 9 dB, alla potenza ottica di -2 dBm. Alla stessa frequenza di cifra, l'impiego del circuito di aiuto alla cancellazione produce una maggiore compressione, ovvero la modulazione residua in uscita dal RSOA ha ER inferiore a 1 dB a una potenza iniettata variabile da -6 dBm a -4 dBm, a seconda del valore di corrente di alimentazione del RSOA, con ER in ingresso di 8 dB, se l'ER in ingresso è di 9 dB la potenza iniettata necessaria è di -4 dBm. A 2,5 Gb/s si ottiene una compressione massima operata dal RSOA di 3,5 dB di un ER in ingresso di 6 dB, alla potenza ottica di -3 dBm, e di 4,5 dB di un ER in ingresso di 7 dB, alla potenza ottica di -1 dBm. Alla stessa frequenza di cifra, l'impiego del circuito produce una maggiore compressione, ovvero una modulazione residua con ER inferiore a 1 dB a una potenza iniettata di -5 dBm, per l'ER in ingresso di 6 dB, mentre per l'ER in ingresso di 7 dB la potenza iniettata necessaria è di -4 dBm. Le misurazioni sono state eseguite per correnti di alimentazione del RSOA comprese tra 100 mA e 130 mA, senza riscontrare significative variazioni modificando il valore di corrente e sempre registrando migliori compressioni a potenze iniettate più basse in presenza del circuito di aiuto alla cancellazione.

Utilizzando come sorgente il DML, a 1Gb/s, la compressione massima operata dal RSOA è di quasi 4 dB per un ER in ingresso di 5 dB, alla potenza ottica di -3 dBm, la compressione massima diviene di 5,5 dB per un ER in ingresso di 7 dB, alla potenza ottica di -3 dBm e cresce ulteriormente a 7 dB per un ER in ingresso di 9 dB, alla potenza ottica di -3 dBm. Alla stessa frequenza di cifra, utilizzando il circuito di aiuto alla cancellazione, si ottiene un ER in uscita di circa 1 dB alla potenza ottica iniettata di -6 dBm, per i rapporti di estinzione in ingresso di 5 dB e di 7 dB, per un segnale in ingresso con ER di 9 dB la potenza ottica iniettata necessaria cresce leggermente a -5 dBm. Il punto di massima compressione, invece, corrisponde a un ER in uscita di circa 0,5 dB per tutti e tre gli ER in ingresso considerati. A 2,5 Gb/s, si ottiene una compressione massima di 4 dB per un ER in ingresso di 6 dB e alla potenza ottica iniettata di -3 dBm, questa compressione massima cresce a circa 5 dB per un ER in

## Conclusioni

ingresso di 8 dB, alla potenza ottica iniettata di -2 dBm. Alla stessa frequenza di cifra, utilizzando il circuito di aiuto alla cancellazione, si ottiene un ER in uscita di circa 1 dB alla potenza ottica di -7 dBm, per un ER in ingresso di 6 dB, se l'ER in ingresso è di 8 dB la potenza ottica iniettata cresce a -6 dBm. Il punto di massima compressione, invece, corrisponde a un ER in uscita di circa 0,5 dB per entrambi gli ER in ingresso considerati, e si ottiene con una potenza ottica iniettata nel RSOA di circa -4 dBm. Le misurazioni sono state eseguite per correnti di alimentazione del RSOA di 120 mA e 130 mA, senza riscontrare significative variazioni al variare del valore di corrente. Anche in questo caso la presenza del circuito di aiuto alla cancellazione ha determinato migliori compressioni a potenze iniettate più basse.

Utilizzando come sorgente l'ASE filtrata è stato necessario usare un secondo RSOA per effettuare la cancellazione. A 1 Gb/s si ottiene un ER in uscita di circa 1 dB alla potenza ottica di -4 dBm e -3 dBm, rispettivamente avendo in ingresso un segnale con ER di 6 dB e di 7 dB. Utilizzando il circuito di aiuto alla cancellazione, alla stessa frequenza di cifra, la potenza ottica necessaria ad ottenere un ER in uscita di 1 dB viene ridotta a -10 dBm e -8 dBm, rispettivamente avendo in ingresso un segnale con ER di 6 dB e di 7 dB. A 2,5 Gb/s, invece, l'RSOA comprime di 4 dB un ER in ingresso di 5 dB alla potenza ottica iniettata di -3 dBm, mentre utilizzando il circuito di aiuto alla cancellazione, per avere lo stesso ER in uscita è richiesta una potenza molto inferiore, pari a circa -13 dBm. Le misurazioni sono state effettuate pilotando l'RSOA a 150 mA, 180 mA e 200 mA, senza riscontrare significative variazioni al variare del valore di corrente. Anche quando l'RSOA per la cancellazione è stato cambiato la presenza del circuito di aiuto alla cancellazione ha determinato migliori compressioni a potenze iniettate più basse.

In particolare, in tutti i casi considerati e per tutti i trasmettitori impiegati, l'utilizzo del circuito di aiuto alla cancellazione provoca una significativa riduzione della modulazione residua già a basse potenze ottiche di iniezione, circa -20 dBm, dove invece l'azione di compressione della modulazione del solo RSOA è piuttosto debole. Questo fatto è particolarmente rilevante dal momento che la potenza ottica iniettata necessaria alla cancellazione determina il budget di potenza del collegamento ONU-OLT.

Nel complesso, l'efficacia del circuito si traduce sia in una diminuzione della potenza ottica iniettata nel RSOA necessaria ad ottenere un dato ER in uscita, che in un

miglioramento della cancellazione complessiva del segnale. Infatti, in tutti i casi analizzati, è stata registrata, nel punto di massima compressione, una cancellazione quasi completa della modulazione iniziale, ovvero un ER in uscita dal RSOA di circa 0,5 dB. L'efficacia del circuito è particolarmente significativa nelle situazioni in cui il solo RSOA non è sufficiente per ottenere una cancellazione ottima della modulazione, ovvero quando il rapporto di estinzione in ingresso è alto e quando la frequenza di cifra del segnale è di 2,5 Gb/s.

Attraverso la valutazione degli spettri elettrici del segnale, è stato evidenziato un contributo di rumore sul segnale iniettato nel RSOA e legato all'attraversamento di un circuito risonante. Il peggioramento riscontrato è più elevato nel caso di sorgente ottica con basso rumore di base, come il laser DFB modulato esternamente, rispetto alla sorgente ASE. Tale contributo è determinante nel definire la regione di operazione dello schema di seeding esterno che nasce appunto dal compromesso tra la riduzione della modulazione residua che migliora le prestazioni del segnale rimodulato in upstream e l'accresciuto rumore iniettato nel RSOA che ne peggiora le prestazioni.

L'analisi sperimentale è stata completata da una valutazione quantitativa delle prestazioni dello schema attraverso la misura del tasso di errore del segnale rimodulato dal RSOA. La presenza di modulazione residua non cancellata causa infatti un peggioramento delle prestazioni in upstream. La misura è stata effettuata utilizzando come trasmettitore il laser DFB modulato esternamente con rapporto di estinzione di 5 dB modulato alla frequenza di cifra di 1 Gb/s. Il confronto con la situazione in cui il segnale non attraversa il circuito ottico ha evidenziato che l'impiego del circuito di aiuto alla cancellazione porta a una diminuzione della potenza ottica di iniezione nel RSOA necessaria a garantire una trasmissione virtualmente priva di errori ed un ampliamento della regione priva di errori a potenze di iniezione più elevate rispetto a quelle individuate in assenza del circuito di aiuto alla cancellazione. Mentre il valore di potenza minima necessario a ottenere la condizione priva di errori determina la possibilità di un collegamento più lungo grazie ad un aumento del power budget, il valore di potenza massimo oltre il quale le prestazioni ricominciano a peggiorare influenza le condizioni di operazione in uno schema self-seeding in cui pure il circuito proposto potrebbe trovare applicazione come già accennato.



## Conclusioni

Il lavoro di questa tesi proseguirà con la valutazione dell'impatto di questo circuito in una topologia di self-seeding. È inoltre importante osservare che l'attività condotta può essere scalata a frequenze di cifra più elevate dove l'RSOA opera la cancellazione con ancora maggiore difficoltà. Anche la possibilità di operare a frequenze di cifra più elevate sarà oggetto di approfondimenti futuri.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] Cisco Visual Networking Index (VNI) Forecast (2010-2015), 2011.
- [2] Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks: Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks ITU-T Standards, G.989.1 March 2013.
- [3] Fondazione Ugo Bordoni. *Le Reti Passive Optical Networks (PON)*, 2007.
- [4] G. Maier. *Introduzione alle Reti Ottiche Passive*. Politecnico di Milano, 2010.
- [5] S. Kartalopoulos. *Next Generation Intelligente Optical Networks From Access to Backbone*, chapter 3, page 89. Springer, 2008.
- [6] Quoc-Thai Nguyen, P. Besnard, L. Bramerie, A. Shen, C. Kazmierski, P. Chan-lou, Guang-Hua Duan, and J.-C Simon. *Bidirectional 2.5-Gb/s WDM-PON using FP-LDs wavelength-locked by a multiple-wavelength seeding source based on a mode-locked laser*. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 22(11):733–735, June 2010.
- [7] Jung-Hyung Moon, Ki-Man Choi, Sil-Gu Mun, and Chang-Hee Lee. *Effects of back-reflection in WDM-PONs based on seed light injection*. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 19(24):2045–2047, Dec 2007.
- [8] Han-Hyub Lee, Seung-Hyun Cho, and Sang-Soo Lee. *Efficient excess intensity noise suppression of 100-GHz spectrum-sliced WDM-PON with a narrow-bandwidth seed light source*. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 22(20):1542–1544, Oct 2010.
- [9] C. Tsai M. Cheng and G. Lin. *Master-to-slave injection-locked WRC-FPLD pair with 16 DWDM-PON channels for 16-QAM OFDM transmission*. *Optical Fiber Communication Conference*, 2014.
- [10] Hyeokgyu Choi Keun Yeong Cho, Ui Hyun Hong and Yun C. Chung. *Maximum operable speed of WDM PON employing bandwidth-limited RSOAs*. *Optics Communications*, 312:159–162, Feb 2014.
- [11] F. Payoux, P. Chanclou, and N. Genay. *WDM-PON with colorless ONUs*. In *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers*

- Conference, 2007. OFC/NFOEC 2007. Conference on, pages 1–3, March 2007.
- [12] I. Graces et al. *Analysis of narrow-FSK downstream modulation in colorless WDM PONs*. *Electron. Lett.*, vol 43, pp. 471-472, 2007.
- [13] T. Komljenović, D. Babić, Z. Šipuš. *Modulation-averaging reflectors for extended-cavity optical sources*. *Journal of lightwave technology*, Vol. 29, No. 15, 1 August 1 2011, pp. 2249-2258.
- [14] K. Sato and H. Toba. *Reduction of mode partition noise by using semiconductor optical amplifiers*. In *Semiconductor Laser Conference, 2000. Conference Digest. 2000 IEEE 17th International*, pages 73–74, Sept 2000.
- [15] M. Martinelli. *Time Reversal for the Polarization State in Optical Systems*. *J. Mod. Opt.*, vol. 39, pp. 451-455, Mar. 1992.
- [16] M. Martinelli, L. Marazzi, P. Parolari, M. Brunero, and G. Gavioli. *Polarization in Retracing Circuits for WDM-PON*. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 24, 1191-1193, (2012).
- [17] A. Melloni. *Ottica integrata e dispositivi per le comunicazioni ottiche*. Cusl, 2006.
- [18] P. Healey, et.al, “Spectral slicing WDM-PON using wavelength-seeded reflective SOAs,” *Electron. Lett.*, 37, 1181–1182, Sept 2001.
- [19] L. Marazzi, A. Boletti, P. Parolari, A. Gatto, R. Brenot, M. Martinelli. *Relative intensity noise suppression in reflective SOAs*. *Optics Communications*, Volume 318, 1 May 2014, Pages 186-188, ISSN 0030-4018.
- [20] M. J. Connelly. *Wide-band steady-state numerical model and parameter extraction of a tensile-strained bulk semiconductor optical amplifier*. *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 43, pp. 47–56, 2007
- [21] S. Ó Dúill, L. Marazzi, P. Parolari, R. Brenot, C. Koos, W. Freude, and J. Leuthold. *Efficient modulation cancellation using reflective SOAs*. *Opt. Express* Vol. 20 Issue 26, pp. B587-B594, 2012.