

# Politecnico di Milano

FACOLTA' DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni



## DEMODULAZIONE DI FASE TRAMITE EFFETTO BRILLOUIN IN FIBRE OTTICHE PER TELECOMUNICAZIONI

Relatore: Chiar.mo Prof. Mario MARTINELLI

Correlatori: Dott. Ing. Lucia MARAZZI

Dott. Ing. Paola PAROLARI

Tesi di Laurea di:

Michele MARTINI

Matricola 740425

Anno Accademico 2010-2011

*Ai miei genitori*

# Ringraziamenti

*Desidero ringraziare, innanzi tutto, i miei genitori, Adriana e Remo, che in tutti questi anni mi hanno aiutato a conseguire i miei obiettivi dimostrandomi sempre amore, supporto, apprezzamento e pazienza. Grazie anche a tutta la mia famiglia che mi ha sempre sostenuto e mi ha sempre voluto bene.*

*Ringrazio il Professor Martinelli che mi ha permesso di concludere la mia carriera accademica presso i laboratori del PoliCom, Lucia e Paola che mi hanno seguito ed aiutato nel mio lavoro di tesi in tutti questi mesi e tutti i ragazzi dell'Open Space con i quali ho condiviso il mio tempo quest'anno.*

*Un grazie particolare va a Julia, che mi ha sempre aiutato ad affrontare le difficoltà che ho incontrato e che mi ha dimostrato il suo affetto anche se la distanza che ci separava era tanta.*

*Ringrazio ancora tutti i miei amici dell'università, dell'oratorio e anche quelli che non rientrano in queste categorie. Non ha senso fare un elenco dei vostri nomi perché siete tanti e siete tutti nel mio cuore.*

*Grazie a tutti, ragazzi!*

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Scattering Brillouin Stimolato</b>	<b>4</b>
1.1 Lo Scattering Brillouin Stimolato nelle fibre ottiche per telecomunicazioni . . . . .	4
1.2 Amplificazione Brillouin . . . . .	10
1.3 Applicazioni dell'SBS come filtro . . . . .	14
1.4 Tecniche per l'allargamento della banda ottica dell'amplificazione Brillouin . . . . .	18
1.5 Pompa incoerente . . . . .	21
<b>2 Simulazioni</b>	<b>23</b>
2.1 Stato dell'arte ed interessi della modulazione di fase . . . . .	23
2.2 Tecniche per la rivelazione diretta della modulazione differenziale di fase . . . . .	26
2.3 Risultati delle simulazioni e commenti . . . . .	27
2.4 Conclusioni . . . . .	36
<b>3 Attività sperimentale</b>	<b>38</b>
3.1 Soglia Brillouin in continua . . . . .	38
3.2 Caratterizzazione del guadagno Brillouin con pompa incoerente .	49
3.3 Misure di guadagno Brillouin: risultati sperimentali e commenti .	53
3.4 Demodulazione di fase tramite effetto Brillouin . . . . .	67
3.5 Diagrammi ad occhio e curve di BER: risultati sperimentali e commenti . . . . .	69
3.6 Conclusioni . . . . .	78

<i>INDICE</i>	iv
<b>Conclusioni</b>	<b>79</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>83</b>

# Elenco delle figure

1.1	<i>Rappresentazione grafica dello scattering Brillouin stimolato: interazione delle due onde di Stokes e di pompa con l'onda di pressione (a), concetto di amplificazione Brillouin e frequenze interessate (b).</i> . . . .	6
1.2	<i>Spettro di guadagno Brillouin per tre fibre con <math>\lambda_p = 1.525 \mu\text{m}</math> [1]: Fibra con core in Silicio (a), Depressed-cladding (b), Fibra Dispersion-Shifted (c).</i> . . . . .	8
1.3	<i>Schema di riferimento per la descrizione dell'SBS in una fibra ottica di lunghezza <math>L</math>: interazione di un'onda di pompa (<math>I_p, v_p</math>) e di un segnale (<math>I_s, v_s</math>) contropropaganti.</i> . . . . .	11
1.4	<i>Andamento delle intensità dell'onda di pompa e dell'onda di Stokes lungo una fibra di lunghezza <math>L</math> (a), guadagno di saturazione al variare di <math>G_A</math> (b), [1].</i> . . . . .	12
1.5	<i>Spettro di un generico FBL in frequenza: è evidenziata la riga spettrale dell'onda di pompa e le componenti che si generano a frequenza inferiori (Stokes) e superiori (anti-Stokes) [1].</i> . . . . .	15
1.6	<i>Diagramma spettrale di un segnale modulato in fase (a). Diagramma spettrale che mostra la relazione fra la frequenza di pompa e la frequenza di amplificazione Brillouin (b), [14].</i> . . . . .	17
1.7	<i>Concetto di allargamento dello spettro di guadagno dell'SBS dovuto alla convoluzione di una pompa a banda larga con il guadagno intrinseco [12].</i>	19
1.8	<i>Allargamento della banda ottica dello spettro Brillouin ottenuta mediante l'affiancamento di due profili di guadagno dati da diverse fibre utilizzate come mezzo attivo [8].</i> . . . . .	21

2.1	<i>Costellazioni di segnali On-Off Keying e Differential Phase Shift Keying [24]: è mostrata la distanza fra simboli (espressa in termini di campo ottico <math>E</math>) a parità di potenza ottica media. . . . .</i>	25
2.2	<i>Confronto tra funzioni di trasferimento di un filtro Mach Zehnder ritardato di 100 ps per la ricezione di un segnale a 10 Gbit/s (a), e di un filtro gaussiano (b), [28]. . . . .</i>	27
2.3	<i>Schema a blocchi del sistema di trasmissione e ricezione implementato in Optsim ed usato per le simulazioni di conversione fase-ampiezza. . .</i>	28
2.4	<i>Spettro in frequenza di un segnale modulato in fase visto dall'OSA 1 del setup mostrato in Figura 2.4. . . . .</i>	30
2.5	<i>Spettro in frequenza di un segnale modulato in fase filtrato da un filtro passabanda (a) e da un filtro notch (b), entrambi con larghezza di banda pari a 7 GHz, ottenuti dai picchi BGS e BLS del profilo di guadagno Brillouin generato dalla fibra DS da 9.9 km visti dall'OSA 2 del setup di Figura 2.3. . . . .</i>	31
2.6	<i>Diagramma ad occhio per la demodulazione effettuata con filtro passabanda (a) e con filtro notch (b), entrambi con larghezza di banda pari a 7 GHz. . . . .</i>	31
2.7	<i>Studio del valore di rapporto di estinzione in funzione dell'altezza del filtro (a) e FWHM (b) nel caso di filtro passabanda per le tre fibre investigate. . . . .</i>	33
2.8	<i>Studio del valore di rapporto di estinzione in funzione della profondità del filtro (a) e FWHM (b) nel caso di filtro notch per le tre fibre investigate. . . . .</i>	33
2.9	<i>Diagrammi ad occhio in funzione dei valori di altezza e dei valori di FWHM dei filtri nel caso di filtri di tipo passabanda. . . . .</i>	34
2.10	<i>Diagrammi ad occhio in funzione dei valori di profondità e dei valori di FWHM dei filtri nel caso di filtri di tipo passabanda. . . . .</i>	34
2.11	<i>Andamento del valore del rapporto di estinzione in funzione dell'altezza del filtro (a) e in funzione della sua FWHM (b) nel caso di filtri di tipo passabanda. . . . .</i>	35
2.12	<i>Andamento del valore del rapporto di estinzione in funzione della profondità del filtro (a) e in funzione della sua FWHM (b) nel caso di filtri di tipo notch. . . . .</i>	35

3.1	<i>Setup sperimentale implementato per la misura della soglia SBS in continua. . . . .</i>	40
3.2	<i>Andamento di <math>P_{out}</math> (linea blu) , <math>P_b</math> totale (linea verde) e <math>P_b</math> Brillouin (linea rossa) al variare della potenza in ingresso (linea nera) alla fibra DS da 9.9 km in scala lineare (a) e in scala logaritmica (b). . . . .</i>	40
3.3	<i>Andamento di <math>P_{out}</math> (linea blu) , <math>P_b</math> totale (linea verde) e <math>P_b</math> Brillouin (linea rossa) e <math>P_{in}</math> diminuita di 20 dB (linea nera) al variare della potenza di ingresso alla fibra DS da 9.9 km in scala logaritmica. Applicazione della definizione dell'1% . . . . .</i>	41
3.4	<i>Incroccio ottenuto dalle misure sperimentali tra potenza in uscita (linea blu) e potenza totale retroriflessa (linea verde) dopo che la soglia Brillouin è stata superata. . . . .</i>	42
3.5	<i>Andamento della differenza tra la somma di potenze in uscita e potenza in ingresso al variare della potenza in ingresso alla fibra DS da 9.9 km. . . . .</i>	42
3.6	<i>Andamento di <math>P_{out}</math> (linea blu) , <math>P_b</math> totale (linea verde) e <math>P_b</math> Brillouin (linea rossa) e <math>P_{in}</math> diminuita di 20 dB (linea nera) al variare della potenza in ingresso per le varie fibre prese in considerazione: fibra FL da 12.8 km (a), fibra FL da 24.25 km (b), fibra SSMF da 8.8 km (c), fibra SSMF da 20 km (d), fibra TW-SMF da 19.3 km (e). . . . .</i>	44
3.7	<i>Setup per la misura dello spettro di guadagno Brillouin. . . . .</i>	45
3.8	<i>Spettro di guadagno Brillouin per la fibra DS da 9.9 km (linea rossa) e fitting Lorentziano (linea blu). . . . .</i>	45
3.9	<i>Spettro di guadagno Brillouin (linea rossa) e fitting Lorentziano (linea blu) per le fibre prese in esame: fibra FL da 12.8 km (a), fibra FL da 24.25 km (b), fibra SSMF da 8.8 km (c), fibra SSMF da 20 km (d), fibra TW-SMF da 19.3 km (e). . . . .</i>	46
3.10	<i>Soglia Brillouin in funzione della larghezza di banda del picco BGS nel caso in cui si utilizzi il coefficiente di guadagno ottenuto sperimentalmente per la fibra DS da 9.9 km (linea rossa) e nel caso in cui si utilizzi il valore di riferimento <math>5 * 10^{-11} m/W</math> [1] (linea blu) . . . . .</i>	48
3.11	<i>Setup sperimentale implementato per la misura del guadagno Brillouin. . . . .</i>	50
3.12	<i>Funzione di trasferimento in riflessione del Grating ottenuta sperimentalmente durante il lavoro di tesi (b) in funzione della lunghezza d'onda. . . . .</i>	50
3.13	<i>Potenze di pompa attraverso gli stadi che compongono la pompa riferiti al setup di Figura 3.11. . . . .</i>	51



3.14	<i>Spettro retroriflesso della pompa a 500 mW in presenza di filtro FP (a) e in assenza di filtro FP (b) in funzione della lunghezza d'onda. . . . .</i>	52
3.15	<i>Confronto Brillouin spontaneo con pompa in continua per diverse tipologie di fibre ottiche: DS da 9.9 km (a), FL da 24.25 km (b), TW-SMF da 19.3 km (c). . . . .</i>	54
3.16	<i>Misure spettrali di guadagno in assenza di filtro FP in pompa per varie potenze di segnale: 50 <math>\mu</math>W (a), 100 <math>\mu</math>W (b), 500 <math>\mu</math>W (c). . . . .</i>	56
3.17	<i>Misure spettrali di guadagno in presenza di filtro FP in pompa per varie potenze di segnale: 50 <math>\mu</math>W (a), 100 <math>\mu</math>W (b), 500 <math>\mu</math>W (c). . . . .</i>	57
3.18	<i>Valori massimi di guadagno Brillouin in assenza di filtro FP (linea rossa) e presenza di filtro FP (linea blu) in funzione della potenza di pompa per i valori di potenza di segnale in ingresso alla fibra DS da 9.9 km: 50 <math>\mu</math>W (a), 100 <math>\mu</math>W (b), 500 <math>\mu</math>W (c). . . . .</i>	58
3.19	<i>Andamento ottenuto sperimentalmente della FWHM del segnale di pompa al termine della fibra (linea blu) e del segnale retroriflesso (linea rossa) in funzione della potenza di pompa. . . . .</i>	59
3.20	<i>Confronto grafico tra onda di pompa retroriflessa (linea rossa) e onda di pompa alla fine della fibra (linea verde) per potenze di pompa di 500 mW. . . . .</i>	60
3.21	<i>Setup sperimentale implementato per l'ottimizzazione del guadagno Brillouin che vede l'introduzione di un Polarization Controller (PC). . . . .</i>	61
3.22	<i>Misure spettrali di guadagno in presenza di filtro FP in pompa e di Polarization Controller per varie potenze di segnale: 50 <math>\mu</math>W (a), 100 <math>\mu</math>W (b), 500 <math>\mu</math>W (c). . . . .</i>	61
3.23	<i>Valori massimi del picco di guadagno BGS (a), e valori minimi del picco di perdita BLS (b) in funzione della potenza di pompa. . . . .</i>	63
3.24	<i>Misure spettrali di guadagno per le fibre FL da 24.25 km per varie potenze di segnale: 50 <math>\mu</math>W (a), 100 <math>\mu</math>W (b), 500 <math>\mu</math>W (c). . . . .</i>	64
3.25	<i>Misure spettrali di guadagno per le fibre TW-SMF da 19.3 km per varie potenze di segnale: 50 <math>\mu</math>W (a), 100 <math>\mu</math>W (b), 500 <math>\mu</math>W (c). . . . .</i>	65
3.26	<i>Spettro di guadagno (BGS e BLS) Brillouin (a), fitting gaussiano (linea rossa) dei picchi (linea nera) BLS (b) e BGS (c). . . . .</i>	66
3.27	<i>Setup sperimentale implementato per la rivelazione diretta della conversione fase-ampiezza. . . . .</i>	68

3.28	<i>Segnale modulato in fase dal modulatore esterno Mach-Zehnder (a), fascio di pompa a 500 mW contropropagante in fibra (b), segnale in ingresso al fotodiode demodulato e filtrato con filtro sintonizzato sulla zona di perdita BLS (c), e sulla zona di guadagno BGS (d).</i> . . . . .	69
3.29	<i>Diagramma ad occhio del segnale non demodulato (a), diagramma ad occhio del segnale demodulato attraverso un filtro Fiber Bragg Grating (b).</i>	70
3.30	<i>Diagrammi ad occhio della demodulazione ottenuta utilizzando il picco BGS per vari valori di potenza di pompa: 70 mW (a), 160 mW (b), 200 mW (c), 250 mW (d), 300 mW (e), 400 mW (f), 500 mW (g).</i> . . . .	72
3.31	<i>Diagrammi ad occhio della demodulazione ottenuta utilizzando il picco BLS per vari valori di potenza di pompa: 70 mW (a), 160 mW (b), 200 mW (c), 250 mW (d), 300 mW (e), 400 mW (f), 500 mW (g).</i> . . . .	73
3.32	<i>Curve di BER per la demodulazione ottenuta utilizzando la zona BGS al variare della potenza di pompa.</i> . . . . .	74
3.33	<i>Diagrammi ad occhio per demodulazione ottenuta utilizzando il picco BGS in assenza del filtro FP in pompa per vari valori di potenza di pompa: 200 mW (a), 250 mW (b), 300 mW (c), 400 mW (d), 500 mW (e).</i> . . . . .	76
3.34	<i>Curve di BER per la demodulazione ottenuta utilizzando la zona BGS al variare della potenza di pompa ed in assenza del filtro FP.</i> . . . . .	77
3.35	<i>Diagramma ad occhio del segnale demodulato ottenuto utilizzando il picco BLS in assenza di filtro FP in pompa per potenza di pompa pari a 200 mW.</i> . . . . .	78

# Introduzione

La fibra ottica presenta una larghissima banda di trasmissione, rispetto ad esempio ai cavi coassiali sui quali si propaga il segnale elettrico. Tale banda può essere sfruttata sia incrementando la frequenza di cifra del singolo canale (Bit Rate), sia affiancando più canali in una stessa fibra discriminandoli tra loro in base ad una tra le loro proprietà fisiche, tipicamente la lunghezza d'onda (WDM).

Nei sistemi attualmente in uso, l'elaborazione del segnale ottico per telecomunicazioni avviene nel dominio elettrico in seguito ad una conversione opto-elettronica. Successivamente il segnale ottico viene nuovamente rigenerato e ritrasmesso in fibra. Tali conversioni comportano accumulo di ritardi e un incremento della complessità degli apparati di elaborazione per gestire flussi di dati paralleli, oltre ad inevitabili perdite di potenza. È, quindi, rimasto sempre vivo l'interesse per tecniche e tecnologie di elaborazione del segnale per telecomunicazioni in modo interamente ottico.

In questo ambito lo Scattering Brillouin Stimolato (SBS) in fibra ottica offre interessanti possibilità di applicazione in diversi ambiti dell'elaborazione del segnale, con particolare riguardo all'amplificazione ed al filtraggio.

Lo scattering Brillouin è un effetto non lineare anelastico che si verifica quando si fanno contropropagare in fibra, un segnale da amplificare ed una pompa ottica ad una frequenza maggiore, opportunamente selezionata. Se il livello di interazione è sufficientemente significativo, sia perché la fibra non lineare è lunga, sia perché è elevata la sua non linearità o la potenza ottica della pompa, si genera un processo stimolato e si assiste ad un trasferimento di potenza dalla pompa al segnale da amplificare che si trova ad una frequenza inferiore.

La banda intrinseca di questo effetto è tuttavia dell'ordine della decina di MHz, valore esiguo che non ne permette l'utilizzo con segnali per telecomunicazioni. Per questo sono presenti in letteratura varie tecniche basate sulla modulazione

esterna, in fase o in ampiezza, della sorgente di pompa finalizzate ad ottenere un aumento della larghezza spettrale del guadagno Brillouin, ma presentano alti costi ed elevata complessità.

In un recente lavoro di tesi, è stato proposto l'impiego di una sorgente incoerente come pompa per ottenere amplificazione, demodulazione e rallentamento della luce attraverso l'effetto Brillouin. Questa soluzione risulta particolarmente interessante poiché consente di lavorare con sorgenti relativamente a basso costo come gli amplificatori ottici e sfruttare dei filtri economici e versatili come i Fiber Bragg Grating (FBG) la cui funzione di trasferimento è facilmente sagomabile.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è ottenere la demodulazione di fase tramite effetto Brillouin stimolato in fibre ottiche per telecomunicazioni, in particolare utilizzando sia il profilo di guadagno (Brillouin Gain Spectrum, BGS), comparando i risultati con quelli già presenti in letteratura, sia il corrispettivo simmetrico profilo di perdita (Brillouin Loss Spectrum, BLS) come filtro per la demodulazione di fase. Si sono impiegate varie fibre ottiche per telecomunicazioni con diverse caratteristiche di dispersione cromatica, lunghezza ed area efficace. In particolare si è lavorato con una fibra ottica a dispersione nulla in terza finestra (Dispersion Shifted, DS da 9.9 km), tre fibre a bassa dispersione (due Free Light, FL da 12.8 km e da 24.25 km e una True-Wave Single Mode Fiber, TW-SMF da 19.3 km) e due fibre con profilo d'indice a gradino (Standard Single Mode Fiber, SSMF da 8.8 km e da 20 km). Sono state, inizialmente, caratterizzate in termini di soglia Brillouin e con esse si è, successivamente, caratterizzato il guadagno Brillouin con lo scopo di individuare la condizione migliore per dimostrare, infine, la demodulazione di fase.

Si è pertanto basata l'attività sperimentale sulla caratterizzazione ed il successivo utilizzo di una pompa a bassa coerenza con uno spettro originariamente molto largo (qualche THz) generato da un Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) funzionante senza ingresso ottico e opportunamente amplificato, filtrato e sagomato. In particolare si è sfruttato un Fiber Bragg Grating di forma gaussiana e larghezza di banda a metà altezza (Full Width Half Maximum, FWHM) di 6.7 GHz realizzato presso i laboratori del Dipartimento di Fisica del Politecnico di Milano per filtrare e sagomare l'emissione spontanea (Amplified Spontaneous Emission, ASE) dell'amplificatore ottico, successivamente impiegata come pompa Brillouin.

Nel primo capitolo di questo lavoro di tesi vengono riepilogati brevemente alcuni dei più importanti aspetti teorici legati all'impiego dell'effetto Brillouin stimolato

nell'elaborazione ottica, in particolare l'attenzione viene portata all'amplificazione Brillouin di segnali per le telecomunicazioni in regime di piccolo segnale. Vengono presentate le sue più comuni applicazioni focalizzando l'attenzione sull'utilizzo dell'effetto Brillouin come filtro. Sono illustrate le tecniche finora conosciute per l'allargamento della banda ottica dell'amplificazione Brillouin e si spiega la motivazione dell'utilizzo della sorgente incoerente come pompa Brillouin.

Nel secondo capitolo, dopo aver ricordato le tecniche impiegate per la rivelazione diretta della modulazione differenziale di fase, viene investigata, tramite simulazioni svolte con il software commerciale Optsim, la possibilità di ottenere demodulazione di fase utilizzando sia il profilo di guadagno Brillouin, sia quello di assorbimento come filtro per la demodulazione di fase. Vengono, quindi, presentati e commentati i risultati ottenuti impiegando filtri sintetizzati sperimentalmente dalle zone di guadagno e di assorbimento del profilo Brillouin confrontati con altri risultati ottenuti impiegando filtri gaussiani appositamente creati con l'ausilio di Matlab per meglio investigare la relazione tra il rapporto di estinzione e le caratteristiche, come larghezza di banda e altezza, proprie dei filtri.

Nel terzo capitolo viene riportata l'attività sperimentale che rappresenta la parte centrale di questo lavoro di tesi. Vengono presentati i setup con cui sono state caratterizzate le fibre in termini di soglia Brillouin e con cui si è caratterizzato lo spettro di guadagno Brillouin e vengono commentati i risultati ottenuti. Sono state impiegate, come detto, fibre con diverse caratteristiche di dispersione cromatica e di lunghezza. Particolare attenzione si è prestata alla fibra con dispersione nulla in terza finestra (DS). Successivamente viene presentato un diverso setup con cui si è andato a dimostrare la possibilità di rivelare direttamente un segnale modulato in fase (DPSK) a 10 GB/s mediante filtraggio Brillouin. Sono quindi presentati e commentati i diagrammi ad occhio e le relative curve di BER ottenute utilizzando una fibra a dispersione nulla in terza finestra.

Da ultimo sono presentate le conclusioni sul lavoro fatto, le misure ottenute e i possibili sviluppi futuri dell'attività svolta.

# Capitolo 1

## Scattering Brillouin Stimolato

La risposta di un qualsiasi mezzo dielettrico alla luce diventa non lineare per campi elettromagnetici sufficientemente intensi, e la fibra ottica non rappresenta un'eccezione. I principali effetti non lineari di tipo anelastico, cioè gli effetti in cui il campo ottico trasferisce parte della sua energia al mezzo non lineare poiché si ha un'interazione fotone-fonone, sono rappresentati dallo scattering Raman stimolato (SRS) e dallo scattering Brillouin stimolato (SBS). Una delle fondamentali differenze tra questi due effetti è che il fonone implicato nello scattering Raman stimolato è un fonone ottico mentre nello scattering Brillouin stimolato il fonone è acustico [1].

### 1.1 Lo Scattering Brillouin Stimolato nelle fibre ottiche per telecomunicazioni

Lo scattering Brillouin stimolato è un esempio di interazione non lineare anelastica della radiazione con la materia, in particolare la fibra ottica per quel che riguarda questo lavoro di tesi, che si può verificare anche per livelli di potenza in fibra ( $\sim 1$  mW) inferiori a quelli necessari per innescare altri effetti non lineari come SRS ( $\sim 100$  mW).

Un campo elettromagnetico interagisce con i modi vibrazionali propri del materiale di cui è composta la fibra ottica e dà luogo ad un nuovo campo a frequenza diversa. In termini classici si può descrivere quest'interazione utilizzando il concetto di elettrostrizione, definito come l'aumento di densità di un materiale quando questo è sottoposto ad un campo elettrico intenso [2] e conseguentemente anche

come una variazione delle sue proprietà ottiche, come la suscettibilità  $\chi$  cui è connesso il termine non lineare  $n_2$  dell'indice di rifrazione.

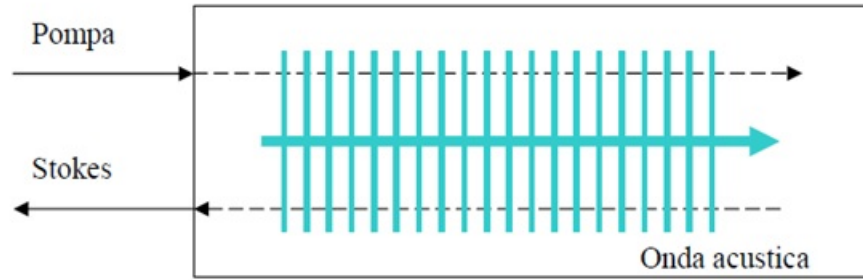
Considerando un modello classico, un segnale che propaga nel mezzo in condizioni di equilibrio termico attiva all'interno della fibra ottica delle onde acustiche, le quali, agendo come onde di pressione, producono una variazione periodica dell'indice di rifrazione del mezzo; ciò che si ha in definitiva è un debole reticolo di diffrazione che viaggia nella fibra alla velocità del suono. Se il reticolo ha la periodicità giusta, all'arrivo dell'onda di pompa si può avere una debole diffrazione di Bragg di questa, e l'onda riflessa, anche chiamata onda di Stokes e visibile in Figura 1.1(a), che viaggia nella direzione opposta rispetto all'onda di pompa, presenterà una frequenza leggermente inferiore a causa dell'effetto Doppler dovuto al movimento del reticolo di diffrazione stesso. Questo processo spontaneo diventa stimolato quando l'onda di Stokes arriva ad essere sufficientemente intensa da interagire con l'onda di pompa e l'accoppiamento delle due rinforza il reticolo di diffrazione per effetto elettrostrittivo appunto. Si innesca, pertanto, una retroazione positiva di rinforzo reciproco tra onda di Stokes e onda acustica, che può portare anche alla crescita esponenziale dell'ampiezza dell'onda di Stokes.

Dalla figura 1.1(a) si capisce perché, ad un livello quanto-meccanico, spesso SBS viene descritto come un'interazione a tre onde: il fascio luminoso in ingresso alla fibra, detta pompa, che subisce il fenomeno, l'onda acustica e l'onda di Stokes generata su cui viene trasferita parte della potenza inizialmente trasmessa. Definita  $\omega_p$  la frequenza di pompa e  $\Omega_B$  la frequenza, dipendente dalle caratteristiche del mezzo non lineare, dell'onda acustica, la frequenza dell'onda di Stokes risultante sarà data dalla differenza tra le due:  $\omega_s = \omega_p - \Omega_B$ .

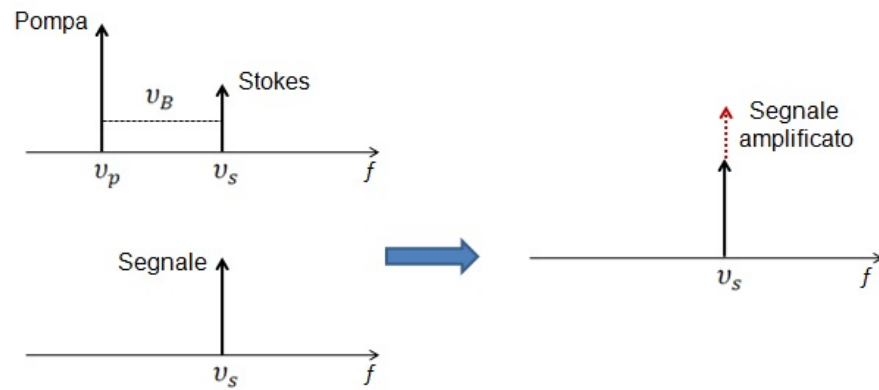
Poiché energia e quantità di moto totali devono conservarsi durante ogni evento di scattering, le frequenze e i vettori d'onda delle tre onde sono descritte da:

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s \quad , \quad k_A = k_p - k_s \quad (1.1)$$

dove  $\omega_p$  ,  $k_p$  e  $\omega_s$  ,  $k_s$  sono le frequenze e i vettori d'onda della pompa e dell'onda di Stokes, rispettivamente.



(a)



(b)

Figura 1.1: *Rappresentazione grafica dello scattering Brillouin stimolato: interazione delle due onde di Stokes e di pompa con l'onda di pressione (a), concetto di amplificazione Brillouin e frequenze interessate (b).*

La relazione di dispersione fra la frequenza  $\Omega_B$  e il vettore d'onda  $k_A$  dell'onda acustica, nell'ipotesi di  $|k_s| \approx |k_p|$ , è data dalla seguente equazione:

$$\Omega_B = v_A |k_A| \approx 2v_A |k_p| \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \quad \text{con } |k_p| = \frac{2\pi n}{\lambda_p} \quad (1.2)$$

Dove  $\vartheta$  è l'angolo compreso fra i campi della pompa e di Stokes. Dall'equazione (1.2) si nota come la distanza in frequenza tra la pompa e l'onda di Stokes, che



viene detta anche Brillouin Shift, coincide con la frequenza dell'onda acustica  $\Omega_B$  e che questa dipenda dall'angolo di scattering: massima quando i due campi hanno direzione opposta ( $\vartheta = \pi$ ) e nulla quando hanno stessa direzione ( $\vartheta = 0$ ). Poiché le uniche direzioni rilevanti in una fibra a singolo modo sono le due parallele all'asse della fibra stessa, segue che si ottiene SBS unicamente in direzione contropropagante al fascio di pompa e con uno spostamento in frequenza Brillouin pari a:

$$\nu_B = \frac{\Omega_B}{2\pi} = \frac{2n\nu_A}{\lambda_p} \quad (1.3)$$

Dove  $n$  indica l'indice di rifrazione alla lunghezza d'onda di pompa  $\lambda_p$ . Lo spostamento in frequenza dell'onda di Stokes rispetto all'onda di pompa è dell'ordine dei 10 GHz e cioè tre ordini di grandezza più piccolo rispetto all'analogo per l'effetto SRS [1]. La crescita dell'onda di Stokes è caratterizzata da uno spettro di guadagno  $g_B(\Omega)$ , con un picco in corrispondenza di  $\Omega = \Omega_B$ ; la larghezza spettrale dello spettro di guadagno è molto piccola, dell'ordine dei 10 MHz nel caso in cui l'effetto venga ottenuto in fibra, rispetto alle larghezze tipiche dell'SRS, che raggiungono i 10 ÷ 100 THz. La larghezza è legata al tempo di decadimento dell'onda acustica o, analogamente nella lettura quanto-meccanica, al tempo di vita del fonone. Infatti, se si assume che l'onda acustica decada con un andamento del tipo  $\exp(-\Gamma_B t)$ , il guadagno Brillouin ha uno spettro di tipo Lorentziano [2]:

$$g_B(\Omega) = g_p \frac{(\Gamma_B/2)^2}{(\Omega - \Omega_B)^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad (1.4)$$

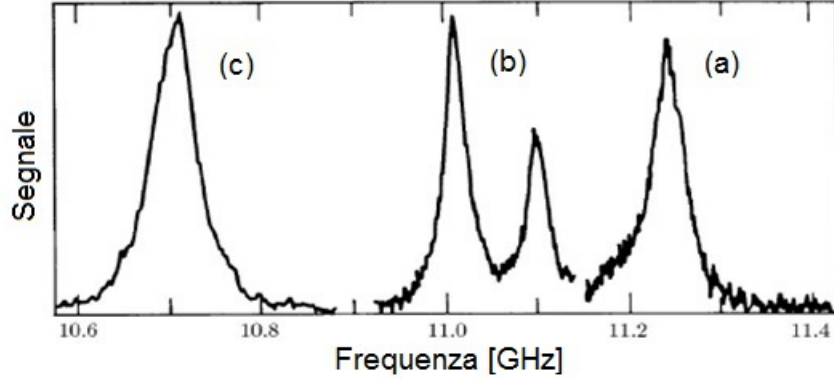
E il valore di picco, in corrispondenza di  $\Omega = \Omega_B$ , è pari a:

$$g_p \equiv g_B(\Omega_B) = \frac{2\pi^2 n^7 p_{12}^2}{c \lambda_p^2 \rho_0 \nu_A \Gamma_B} \quad (1.5)$$

Dove  $p_{12}$  e  $\rho_0$  indicano rispettivamente il coefficiente elasto-ottico longitudinale e la densità del materiale. Lo spettro di guadagno Brillouin è strettamente legato

a quelle che sono le caratteristiche fisico-chimiche delle fibre.

Nella figura sotto sono rappresentati gli spettri di guadagno per tre fibre con differenti strutture e livelli di drogaggio di Germanio nel core [1].



(a)

Figura 1.2: Spettro di guadagno Brillouin per tre fibre con  $\lambda_p = 1.525 \mu m$  [1]: Fibra con core in Silicio (a), Depressed-cladding (b), Fibra Dispersion-Shifted (c).

Si nota come lo spostamento Brillouin diminuisca all'aumentare della concentrazione di Germanio nel core. Per la fibra (a)  $\nu_B \approx 11.25$  GHz, valore molto più alto rispetto a quello che si ottiene per i casi bulk. Anche la larghezza a metà altezza (FWHM) varia al variare del tipo della fibra, ma valori tipici sono nell'ordine dei 100 MHz, per lunghezze d'onda di pompa  $\lambda_p \sim 1.55 \mu s$ .

In condizioni stazionarie, applicabili per pompa in continua (CW) o quasi-continua (quasi-CW), l'andamento spaziale dei due campi di pompa e di Stokes è governato dalle seguenti equazioni:

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_s - \alpha I_p \quad (1.6)$$

$$\frac{(dI_s)}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s \quad (1.7)$$

Nelle quali è stata considerata la natura contropropagante del fenomeno SBS. Inoltre sono state ricavate nell'ipotesi che  $\omega_p \sim \omega_s$ , dal momento che  $\nu_B < \nu_p$ . Di conseguenza anche le perdite in fibra dei due fasci possono essere considerate paragonabili  $\alpha_p \sim \alpha_s \equiv \alpha$ . Si tratta inoltre di un modello scalare in cui si

suppone che i due fasci siano linearmente polarizzati lungo la stessa direzione e la mantengano durante la propagazione. Questa ipotesi è verosimile nel caso in cui la direzione di propagazione coincida con l'asse principale di una fibra a mantenimento di polarizzazione. In fibre standard, l'angolo relativo fra le due polarizzazioni varia casualmente e il guadagno Brillouin  $g_B$  è ridotto di un fattore 1.5 [4].

Lo scattering Brillouin stimolato è un effetto a soglia, pertanto è da sottolineare la forte dipendenza del fenomeno fin qui descritto dalla potenza di pompa effettivamente trasmessa in fibra. L'effetto si presenta in modo rilevante, quindi, solo se la potenza in ingresso alla fibra supera un certo livello, la cosiddetta soglia SBS. Se la potenza di pompa rimane al di sotto di tale valore, il quale dipende dalle caratteristiche del mezzo non lineare e dalla sorgente utilizzata, il guadagno che si ottiene è trascurabile e l'SBS non ha conseguenze rilevanti; se al contrario la soglia viene superata, una parte significativa del segnale trasmesso viene convertita in luce Stokes e retroriflessa. E' possibile a questo punto definire la soglia come il livello di potenza massima che può essere trasmesso in fibra prima che gli effetti dell'SBS limitino la potenza trasmessa all'uscita della fibra ottica, quando cioè ad un aumento della potenza trasmessa non si ha un corrispondente aumento della potenza in uscita, ma esclusivamente un aumento della potenza retroriflessa.

Un'altra definizione, successivamente utilizzata in questo lavoro di tesi, è il valore di potenza inviata quando la totale potenza in ingresso in fibra, diminuita di 20 dB, coincide con la totale potenza retroriflessa.

È possibile stimare numericamente la potenza di soglia trascurando lo svuotamento della pompa [1]; considerando  $I_p(z) = I_p(0) e^{(-\alpha z)}$  nell'equazione (1.6) e integrando lungo la lunghezza  $L$  della fibra, l'intensità dell'onda di Stokes cresce esponenzialmente lungo la direzione contropropagante:

$$I_s(0) = I_s \exp\left(\frac{g_B P_0 L_{eff}}{A_{eff} - \alpha L}\right) \quad (1.8)$$

Dove  $P_0 = I_p(0) A_{eff}$  è la potenza di pompa in ingresso,  $A_{eff}$  è l'area efficace e  $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$  la lunghezza di interazione efficace. L'equazione (1.7) descrive l'amplificazione SBS di un'onda di Stokes incidente in  $z = L$ . Per convenzione si definisce la potenza di soglia SBS come quella potenza in ingresso

che è uguale alla potenza dell'onda di Stokes retroriflessa misurata all'ingresso della fibra ( $z = 0$ ). Da un punto di vista matematico, nel caso di luce di pompa continua e monocromatica, la condizione di soglia SBS per una fibra di lunghezza  $L$ , in condizioni di mantenimento di polarizzazione lungo la fibra, è data da [3]:

$$P_{cr} \approx \frac{21A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (1.9)$$

la soglia è legata in maniera inversamente proporzionale al guadagno e alla lunghezza efficace, mentre è proporzionale all'area efficace. L'utilizzo di una fibra molto lunga e con area efficace piccola comporta una soglia bassa e un guadagno elevato, con molta potenza retroriflessa e poca potenza disponibile in uscita dalla fibra. La soglia SBS è bassa se si utilizzano sorgenti con larghezza di riga  $\Delta\nu_p$  piccola e aumenta proporzionalmente all'allargamento dello spettro del segnale e al coefficiente di polarizzazione  $K$ , come riportato nell'equazione 1.10 [5]:

$$P_{th} \simeq 21 \left( \frac{A_{eff} * K}{g_B * L_{eff}} \right) * \left( \frac{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p}{\Delta\nu_B} \right) \quad (1.10)$$

## 1.2 Amplificazione Brillouin

Giacché il fenomeno dello scattering Brillouin stimolato è associato a processi di crescita e trasferimento di energia tra le onde che interagiscono, è possibile quindi utilizzarlo per amplificare in fibra un segnale trasferendo potenza da un fascio di pompa intenso la cui frequenza è  $\nu_p$ , tenendo presente che la differenza in frequenza fra i due fasci deve essere pari allo spostamento Brillouin  $\nu_B$ . Inoltre, come diretta conseguenza dei commenti effettuati sulla geometria del mezzo di propagazione che permette due soli versi di propagazione principali, pompa e segnale dovranno essere contropropaganti. Per cui:

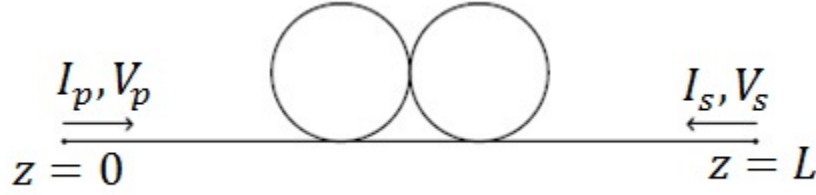


Figura 1.3: Schema di riferimento per la descrizione dell'SBS in una fibra ottica di lunghezza  $L$ : interazione di un'onda di pompa ( $I_p$ ,  $v_p$ ) e di un segnale ( $I_s$ ,  $v_s$ ) contropropaganti.

Trascurando lo svuotamento della pompa, è possibile esprimere analiticamente l'andamento del campo di Stokes:

$$I_s(0) = I_s(L) \exp(g_B L_{eff} - \alpha L) \quad (1.11)$$

dove il termine  $\alpha L$  tiene conto dell'attenuazione in seguito alla propagazione in fibra per un tratto di lunghezza  $L$ . Se la frequenza del segnale coincide con la frequenza di Stokes allora il segnale viene amplificato di un fattore pari a:

$$G_A = \frac{I_s(0)}{I_s(L)} = \exp\left(\frac{g_B P_0 L_{eff}}{A_{eff}}\right) \quad (1.12)$$

L'amplificazione dipende in modo non lineare dalla lunghezza  $L$  del tratto di fibra e dalla potenza di pompa trasmessa. Questa espressione, e quindi l'andamento esponenziale del guadagno all'aumentare della potenza di pompa, è valida in condizioni di piccolo segnale, ovvero di pompa non svuotata.

Una volta superata la soglia SBS, buona parte della potenza di pompa viene trasferita all'onda di Stokes. Per poter considerare nella trattazione matematica, in modo semplice, lo svuotamento della pompa in seguito al raggiungimento della saturazione, si considera valida l'ipotesi di perdite in fibra nulle ( $\alpha = 0$ ); dalle equazioni accoppiate (1.6 e 1.7) risulta quindi che:

$$\frac{d}{dz}(I_p - I_s) = 0 \quad (1.13)$$

Che è possibile utilizzare per ricavare l'espressione in intensità dell'onda di Stokes al variare della lunghezza  $L$  della fibra ottica, con la pompa incidente in  $z = 0$ :

$$I_s(z) = \frac{b_0(1 - b_0)}{G(z) - b_0} I_p(0) \quad (1.14)$$

Dove  $G(z) = \exp[(1 - b_0)g_0z]$ , con:

$$b_0 = \frac{I_s(0)}{I_p(0)}, \quad g_0 = g_B I_p(0) \quad (1.15)$$

Il parametro  $b_0$  è un indicatore dell'efficienza dell'SBS poiché indica la frazione di potenza in ingresso che viene convertita in potenza di Stokes, mentre la quantità  $g_0$  è il guadagno di piccolo segnale associato al processo.

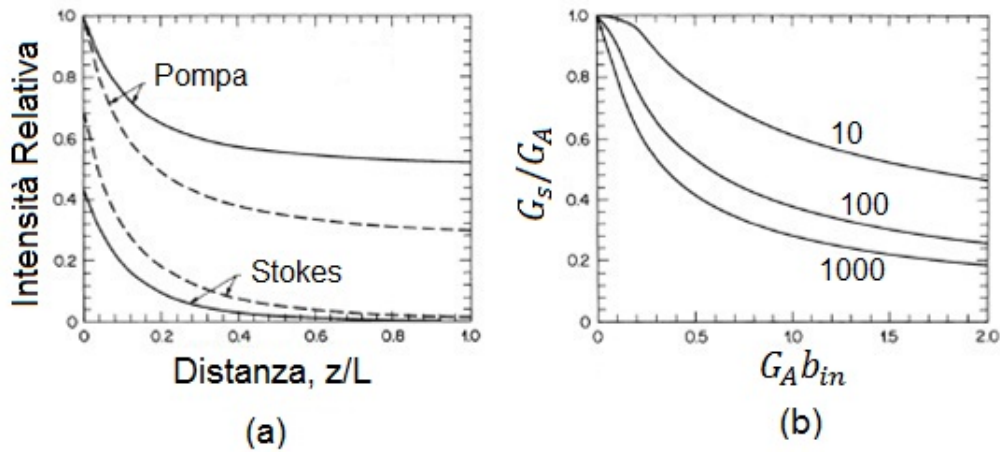


Figura 1.4: Andamento delle intensità dell'onda di pompa e dell'onda di Stokes lungo una fibra di lunghezza  $L$  (a), guadagno di saturazione al variare di  $G_A$  (b), [1].

La Figura 1.4(a) evidenzia che la quasi totalità della potenza viene trasferita nella parte iniziale della fibra (corrispondente al 20% dell'intera tratta).

Definendo il guadagno saturo come:

$$G_s = \frac{I_s(0)}{I_s(L)} = \frac{b_0}{b_{in}} \quad (1.16)$$

con  $b_{in} = I_s(L)/I_p(0)$ .

E il guadagno non saturo:

$$G = \exp(g_0 L) \quad (1.17)$$

Da cui si possono ottenere le curve di saturazione dell'SBS, rappresentate in Figura 1.4(b).

Per quanto riguarda le caratteristiche spettrali dell'SBS, bisogna evidenziare che il guadagno che si ottiene non è limitato alla sola frequenza di Stokes. Assumendo, ad esempio, un segnale di pompa monocromatico, lo spettro del segnale retroriflesso, che è centrato attorno alla frequenza di Stokes e coincide con lo spettro di guadagno spontaneo, che è Lorentziano, con una larghezza di banda  $\Delta\nu_B$  che è dell'ordine dei 10-20 MHz a 1.5  $\mu\text{m}$  e può aumentare fino ad un massimo di circa 100 MHz, a seconda del tipo di fibra utilizzata, avvicinandosi alla lunghezza d'onda di 1.55  $\mu\text{m}$  [1]. La larghezza limitata della banda intrinseca dello spettro di guadagno dell'SBS è forse il limite principale all'applicazione dell'SBS nelle telecomunicazioni. Infatti i valori di FWHM per l'SBS sono decisamente inferiori rispetto a quelli ottenuti con SRS che sono dell'ordine dei 10 THz. Questo limita decisamente il massimo bit rate del segnale che si può elaborare attraverso l'SBS, senza che questo subisca deformazioni significative, a frequenze di cifra di qualche decina di Mb/s [6].

Un'altra caratteristica spettrale legata all'SBS è la generazione di una zona di assorbimento chiamata Brillouin Loss Spectrum (BLS) in posizione simmetrica al Brillouin Gain Spectrum (BGS) rispetto alla frequenza di pompa. Per cui detta  $\nu_p$  la frequenza di pompa il profilo di guadagno Brillouin presenterà una zona di amplificazione ad una frequenza pari a  $(\nu_p - \nu_B)$  ed una zona di perdita ad una frequenza pari a  $(\nu_p + \nu_B)$ .

Le caratteristiche spettrali delle due zone presentano delle similitudini per quanto riguarda la forma, ma differiscono per quello che è l'andamento della larghezza di banda a metà altezza (FWHM) che è minore per il BLS nel caso di onda di Stokes con potenza inferiore [7].

Come per il caso del BGS, se un segnale si trova alla frequenza di Stokes, questo viene amplificato di un valore pari al guadagno Brillouin, così un segnale che si trova alla frequenza di anti-Stokes viene attenuato di un valore simile, pertanto è immediato pensare alle due zone come a dei filtri [8] le cui caratteristiche possono essere modificate andando ad agire sull'intensità dell'onda di Stokes. In [9], per esempio, viene presentato un esperimento in cui la zona di assorbimento BLS viene utilizzata con successo come filtro arresta banda selettivo e molto stretto.

### 1.3 Applicazioni dell'SBS come filtro

Le condizioni che favoriscono l'insorgere dell'effetto Brillouin sono un'elevata lunghezza efficace di interazione (per cui un'area efficace del mezzo molto piccola) e una riga spettrale della sorgente di pompa molto stretta oltre che, chiaramente, una potenza in ingresso superiore alla soglia Brillouin. Queste condizioni possono presentarsi nei sistemi di comunicazione ottica, e quindi l'SBS può diventare un limite alla potenza che si può trasmettere in fibra. Tuttavia le caratteristiche intrinseche dell'SBS possono essere sfruttate per ottenere funzionalità diverse nei sistemi ottici.

Gli esempi più noti di applicazioni dell'SBS nelle comunicazioni ottiche sono i cosiddetti Fiber Brillouin Laser (FBL) e i Fiber Brillouin Amplifiers (FBA). Per quanto riguarda i laser, questi sono sorgenti laser realizzate ponendo il mezzo non lineare, la fibra, in una cavità. Sfruttano il concetto del feedback proprio delle cavità risonanti per abbassare la potenza di soglia richiesta per generare un'oscillazione. Tipicamente il fattore 21 dell'equazione (1.9) viene sostituito con un valore compreso tra 0.1 e 1 a seconda delle perdite. Lo spettro degli FBL, quindi, è l'insieme di un elevato numero di righe spettrali equispaziate tra loro. Infatti, mentre onde di Stokes vengono generate in cascata tramite il fenomeno di SBS nel quale ogni onda funge da pompa per l'onda di ordine successivo, componenti anti-Stokes (aventi cioè frequenza superiore rispetto alla pompa che le genera) nascono per effetto del Four-wave mixing (FWM) tra le onde di pompa e le onde di Stokes che propagano nella medesima direzione [1].



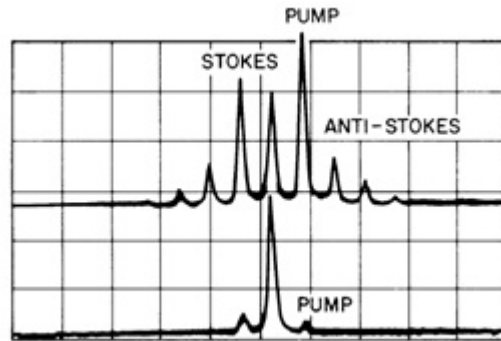


Figura 1.5: *Spettro di un generico FBL in frequenza: è evidenziata la riga spettrale dell'onda di pompa e le componenti che si generano a frequenza inferiori (Stokes) e superiori (anti-Stokes) [1].*

Nel caso in cui SBS venga impiegato per generare amplificazione, i dispositivi che ne sfruttano le caratteristiche vengono comunemente definiti in letteratura [1, 10] come amplificatori ottici distribuiti ed hanno il pregio di garantire guadagni elevati anche con potenze di pompa modeste. Sfortunatamente mostrano anche figure di rumore superiori a quelle degli amplificatori ottici più comunemente utilizzati nelle reti di telecomunicazione, cioè gli Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFA) [10]. Inoltre, per un corretto funzionamento, si rende necessario sintonizzare accuratamente lo spettro di guadagno dell'amplificatore sulla frequenza dei segnali da amplificare, giacché la banda di guadagno dei FBA è molto stretta (da 10 MHz ad un massimo di 100 MHz).

È stata inoltre dimostrata la possibilità di utilizzare l'SBS anche per altri propositi come la sintesi di filtri ottici a banda stretta [11], il rallentamento della luce collegato all'amplificazione Brillouin [12], la conversione da modulazione di fase a modulazione d'ampiezza sfruttando la tecnica chiamata Brillouin Selective Sideband Amplification (BSSA) per la rivelazione diretta della modulazione di fase [13, 14, 15, 16].

I filtri ottici realizzati tramite SBS hanno il vantaggio di non possedere repliche in frequenza della loro funzione di trasferimento, sono facilmente accordabili alla lunghezza d'onda desiderata, a patto di disporre di una sorgente di pompa sintonizzabile, ed è possibile, applicando opportune modulazioni al segnale di pompa, controllare in modo dinamico forma e larghezza di banda del filtro.

Mediante l'SBS è anche possibile ottenere il rallentamento della velocità della luce nel mezzo, questo fenomeno prende il nome di Slow light. In particolare con il

termine ‘Slow-Light’ si intende la propagazione di un impulso ottico ad una bassa velocità di gruppo, definita  $v_g$ , molto minore rispetto alla velocità della luce nel vuoto. Questo fenomeno risulta essere molto interessante in quanto rappresenta la base sulla quale poter sviluppare, per esempio, dei buffer ottici [17]. La velocità di gruppo, in generale può essere espressa come rapporto tra la velocità della luce e l’indice di rifrazione di gruppo  $n_g$  il quale è legato al normale indice di rifrazione  $n$  dalla relazione:

$$n_g = n + \omega \left( \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (1.18)$$

All’indice di gruppo è legato il tempo che l’impulso impiega ad attraversare il materiale ottico, cioè il ritardo di gruppo:

$$T_g = L/v_g = \left( \frac{Ln_g}{c} \right) \quad (1.19)$$

Per cui l’onda di Stokes utilizzata nell’SBS induce una brusca variazione della costante di fase dell’onda di segnale che modifica fortemente l’indice di gruppo espresso dell’equazione (1.18). Questo può essere inteso come una variazione della velocità di gruppo, la quale porta al rallentamento della luce in propagazione e quindi ad un ritardo temporale dato dall’equazione (1.19).

Per quanto riguarda, invece, la conversione fase ampiezza, si è dimostrato come sia possibile, sfruttando la forma del profilo di guadagno Brillouin e la sua caratteristica banda stretta, andare ad amplificare in maniera selettiva particolari componenti spettrali del segnale modulato in fase in modo da ottenere al ricevitore una conversione ad una modulazione di intensità che può poi essere rivelata direttamente.

Esponiamo brevemente il concetto di conversione da modulazione di fase a modulazione di ampiezza attraverso l’utilizzo dell’effetto Brillouin.

Un segnale ottico modulato in fase presenta diversi lobi laterali ognuno dei quali ha una certa relazione di fase e ampiezza con la portante e con ciascuno degli altri lobi, come mostrato in Figura 1.6(a). Se questo segnale modulato in fase fosse fotorivelato direttamente, non si produrrebbe nessuna modulazione d’ampiezza.

Infatti il battimento così ottenuto tra ciascuna componente spettrale con la portante e con le altre componenti sarebbe bilanciato da un battimento con ugual ampiezza e frequenza ma con fase opposta; risultando pertanto in una perfetta cancellazione. Solo andando a rompere questo equilibrio, mediante filtri idonei a tale scopo, si potrebbe avere una modulazione d'ampiezza che potrebbe essere fotorivelata. In [14], attraverso un filtro Brillouin stretto è stata ottenuta l'amplificazione selettiva di una singola porzione dello spettro del segnale modulato in fase che ha portato all'ottenimento della conversione.

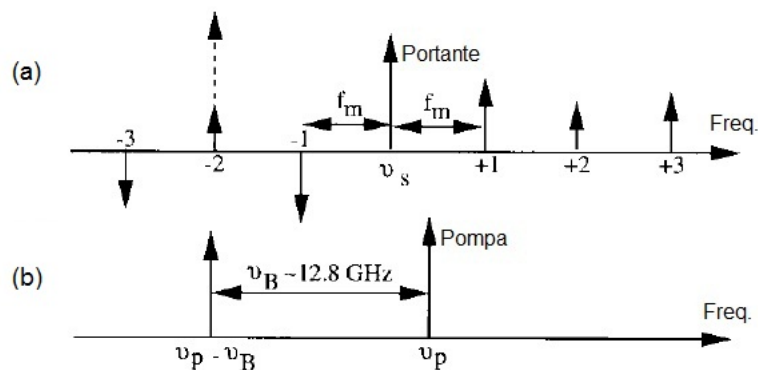


Figura 1.6: *Diagramma spettrale di un segnale modulato in fase (a). Diagramma spettrale che mostra la relazione fra la frequenza di pompa e la frequenza di amplificazione Brillouin (b), [14].*

Da quanto espresso nel paragrafo precedente, si capisce come sia immediato utilizzare la parte del profilo Brillouin che presenta un guadagno (BGS) come filtro per amplificare una componente spettrale ed ottenere la conversione fase-ampiezza. Però è già stato accennato, e verrà poi comprovato nel capitolo relativo all'attività sperimentale, come il profilo Brillouin presenti una zona di perdita di analoga forma (BLS) che allo stesso modo può essere utilizzata per ottenere la conversione. Per ottenere lo stesso risultato si può quindi utilizzare un filtro passabanda così come un filtro notch. Chiaramente invece di un guadagno sulla potenza del segnale a cui il filtro si applica si avrà una perdita, ma il concetto teorico di fondo rimane invariato.

In questo lavoro di tesi verrà affrontato il problema di utilizzare entrambe le parti (BGS e BLS) del profilo di guadagno Brillouin come filtri selettivi per ottenere la conversione fase-ampiezza e la conseguente demodulazione di fase. In

[18], sebbene con un setup sperimentale completamente diverso da quello che implementeremo noi, questa zona di assorbimento viene utilizzata per ottenere la conversione da cross-phase modulation (XPM) a modulazione di intensità e quindi, in parte, siamo consapevoli della reale possibilità di riuscita del nostro esperimento. Prima, però, di implementare questa parte di attività sperimentale sono state effettuate delle simulazioni, che verranno presentate nel secondo capitolo di questo lavoro, e che hanno permesso di verificare l'effettiva possibilità di ottenere la conversione con entrambe le zone del profilo Brillouin.

Ciò che rende effettivamente il nostro esperimento il primo presente in letteratura è l'utilizzo di un segnale di pompa largo rispetto al più comune utilizzo di laser stretti per attivare l'effetto Brillouin. Infatti è possibile scatenare l'effetto Brillouin, e conseguentemente ottenere dei filtri idonei alla conversione di fase, anche con un segnale di pompa, come verrà spiegato nel successivo paragrafo, ottenuto da luce incoerente adeguatamente filtrata.

Finora, tutti gli esperimenti citati in letteratura nel contesto dell'effetto Brillouin prevedevano l'utilizzo di laser come segnali di pompa per lo scatenamento dell'SBS mentre in [16] è stata dimostrata, realizzando un trasmettitore DPSK, la possibilità di impiegare luce ASE incoerente e filtrata per realizzare la pompa Brillouin necessaria alla creazione in propagazione del profilo di guadagno Brillouin utilizzato poi per la conversione fase-ampiezza a bit-rate attualmente in uso nelle applicazioni per telecomunicazioni.

Ciò che rende importante questa possibilità, come si vedrà successivamente, è la sua relativa semplicità di implementazione, se paragonata con l'utilizzo di sorgenti laser coerenti e necessariamente modulate esternamente per ottenere l'allargamento della banda.

## 1.4 Tecniche per l'allargamento della banda ottica dell'amplificazione Brillouin

L'utilizzo di una pompa la cui larghezza di banda supera quella del guadagno fa sì che il processo di amplificazione sia meno efficiente poiché la potenza della radiazione risulta essere distribuita su più frequenze. La soglia di potenza necessaria per innescare il processo di amplificazione si innalza. Impiegando un fascio di pompa con spettro più largo di quello del guadagno Brillouin intrinseco

( $\Delta\nu_B > \Delta\nu_p$ ) è possibile superare la limitazione intrinseca di banda del processo di amplificazione Brillouin. Si ottiene un guadagno effettivo con una larghezza spettrale maggiore. Infatti la banda di guadagno è data dalla convoluzione fra lo spettro della pompa e la curva di guadagno Brillouin [12]:

$$g(\omega) = \tilde{g}_0(\omega) * I_p(\omega_p) \quad (1.20)$$

Che in regime di piccolo segnale diventa:

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g_0 I_p(\omega_p)}{1 - \frac{i(\omega + \Omega_B - \omega_p)}{\Gamma_B/2}} d\omega_p \quad (1.21)$$

e la FWHM del guadagno effettivo risulta maggiore: nel caso di pompa spettralmente molto più larga del guadagno intrinseco ( $\Delta\nu_B > \Delta\nu_p$ ), allora lo spettro di guadagno SBS tende ad assumere le dimensioni e la forma di quello della pompa. Il risultato della convoluzione tende quindi a coincidere con il solo spettro della pompa, traslato in frequenza di un valore pari allo spostamento Brillouin.

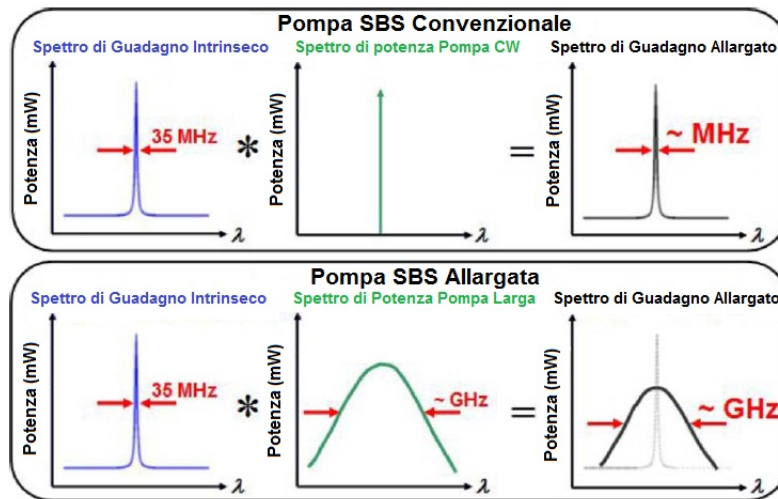


Figura 1.7: Concetto di allargamento dello spettro di guadagno dell'SBS dovuto alla convoluzione di una pompa a banda larga con il guadagno intrinseco [12].

Inizialmente, in [19], questo allargamento è stato ottenuto modulando direttamente la corrente di alimentazione del laser di pompa, un laser distributed-

feedback (DFB), ottenendo un allargamento dello spettro di pompa dell'ordine di  $1.3 \div 2.5$  GHz con un rapporto di estinzione fino a 30 dB. Controllare direttamente la larghezza di riga  $\Delta\nu_p$  è tuttavia difficile e il processo è molto sensibile a fattori esterni come retroriflessioni ottiche nel laser.

In letteratura quindi sono stati presentati diversi metodi alternativi per allargare spettralmente la pompa basati principalmente sulla modulazione esterna del segnale, la quale presenta il grande vantaggio di ottenere le forme spettrali desiderate con maggiore cura. Tra le tecniche impiegate, ad esempio, è stata proposta la modulazione esterna in frequenza del fascio di pompa. Quando la pompa è modulata in frequenza, il valore assoluto della frequenza di Stokes visto localmente dal segnale dipende dal tempo e si sposta in funzione della modulazione della pompa. A causa delle elevate lunghezze di interazione, la dipendenza temporale dello spostamento Brillouin viene mediata e il segnale vede uno spettro di guadagno Brillouin allargato; perché ciò avvenga con efficacia, il periodo della modulazione deve essere molto più piccolo del tempo di transito nel mezzo attivo [20].

Lo stesso effetto di allargamento è stato ottenuto con una modulazione binaria di fase (BPSK) della pompa [7, 11]; scegliendo opportunamente il pattern di modulazione è stato ottenuto uno spettro piatto e con larghezza a metà altezza pari a 1.5 GHz. È importante osservare che l'allargamento dello spettro di guadagno Brillouin comporta una diminuzione dell'entità dell'amplificazione della singola componente spettrale, in riferimento alle componenti già presenti prima dell'allargamento. L'amplificazione totale è distribuita lungo tutto lo spettro di guadagno e il suo valore, corrispondente all'integrale sotteso dallo spettro, rimane costante; allargando questo spettro quindi l'amplificazione di picco diminuirà. Allo stesso modo, nel caso di sorgenti con larghezza di riga significativamente superiore alla larghezza del guadagno Brillouin, la soglia Brillouin risulta innalzata.

In [8] è stata presentata anche un'altra tecnica possibile per l'allargamento della banda ottica dell'amplificazione Brillouin e si basa sulla successione di diverse fibre ottiche come mezzo attivo in cui scatenare l'SBS. In un primo esperimento sono state utilizzate due fibre ottiche, ciascuna con diverse caratteristiche fisiche. Giacché è noto come lo shift Brillouin dipenda dalla fibra in cui il segnale di pompa viene fatto propagare si intuisce come sia possibile, scegliendo opportunamente le fibre da utilizzare, affiancare gli stretti profili di guadagno Brillouin l'uno all'altro in modo da crearne uno la cui larghezza è data dalla somma delle larghezze dei

singoli profili.

Questo concetto è rappresentato in Figura 1.8.

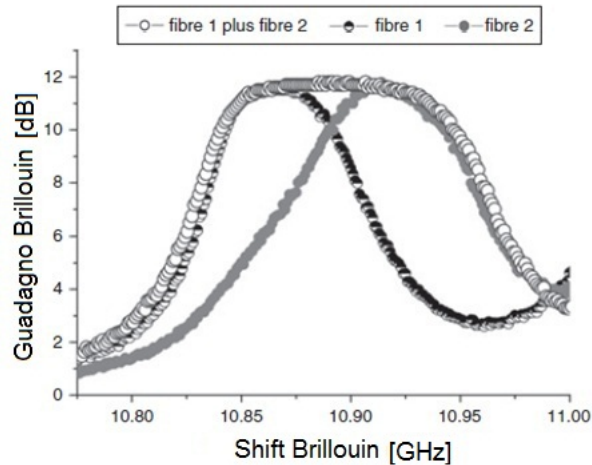


Figura 1.8: Allargamento della banda ottica dello spettro Brillouin ottenuta mediante l'affiancamento di due profili di guadagno dati da diverse fibre utilizzate come mezzo attivo [8].

Molte delle sopracitate tecniche di allargamento della banda di guadagno Brillouin prevedono l'utilizzo di modulatori esterni, di fase o di ampiezza, e, per ogni canale dati del sistema, anche dei relativi generatori di pattern. Volendo operare, come è ragionevole pensare, in un sistema WDM, il costo delle configurazioni che prevedono modulatori esterni cresce rapidamente con il crescere del numero di canali presenti. Pertanto, utilizzare una sorgente incoerente a spettro ampio come pompa per generare amplificazione Brillouin stimolata è stata una soluzione proposta recentemente [12] per ovviare al problema. Questa soluzione è stata adottata nel nostro lavoro di tesi nei setup implementati per ottenere risultati di amplificazione e di conversione fase-ampiezza.

## 1.5 Pompa incoerente

Dal momento che la coerenza temporale della sorgente utilizzata come pompa non è strettamente necessaria per ottenere fenomeni di scattering Brillouin, si è scelto di utilizzare una sorgente di luce ottenuta da emissione spontanea stimolata (ASE,

Amplified Spontaneous Emission) sfruttando in questo modo anche i suoi pregi quali l'economicità e l'elevata larghezza spettrale. Nel nostro caso la luce viene generata da un EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), per cui si ha che l'ASE è il risultato del decadimento spontaneo degli ioni eccitati sullo stato fondamentale nel mezzo attivo [21]. Lo spettro tipico di questa luce generata dagli EDFA è molto largo e si aggira intorno ai 4 THz (FWHM). Anche ragionando su questo valore molto grande di larghezza a metà altezza è stato ritenuto di utilizzare questi dispositivi per far fronte al massimo bit-rate del segnale da elaborare.

In definitiva, si è scelto di utilizzare tale sorgente per la sua natura incoerente, per la facilità di reperimento e utilizzo rispetto a sorgenti a banda stretta come laser e, soprattutto, per la possibilità di sagomare la banda del segnale di pompa semplicemente ponendo nel setup sperimentale i filtri passabanda ritenuti opportuni. Quest'ultima caratteristica è stata ritenuta molto importante in quanto la forma dello spettro del segnale di pompa è in gran parte determinata dalla forma del filtro passabanda utilizzato.

Anche per una pompa Brillouin incoerente in regime di piccolo segnale, come è già stato accennato nel paragrafo sulle applicazioni dell'SBS, lo spettro dell'impulso dopo una propagazione in fibra per una lunghezza  $L$  può essere descritto come:

$$E(z = L, \omega) = E(z = 0, \omega) \exp\left(\frac{g(\omega)L}{2}\right) \quad (1.22)$$

Va notato come l'espressione del guadagno impiegata è stata ottenuta da un modello scalare che, pertanto, non tiene in considerazione gli stati di polarizzazione relativi della pompa e del segnale. Infatti, è noto come la luce ASE sia per sua natura depolarizzata e che, per renderla polarizzata, si debba utilizzare un filtro polarizzatore che comporta una perdita intrinseca di 3 dB in quanto cancella totalmente una polarizzazione della luce in ingresso. In caso di pompa non polarizzata, invece, è necessario tenere in considerazione il non completo allineamento degli stati di polarizzazione utilizzando dei coefficienti diversi nell'espressione del guadagno Brillouin [4].



# Capitolo 2

## Simulazioni

In questo capitolo, dopo una prima parte più teorica, verranno svolte delle simulazioni con il software commerciale Optsim finalizzate a verificare la possibilità di utilizzare un filtro Brillouin come filtro selettore per ottenere demodulazione di fase. In particolare, oltre a valutare i risultati ottenuti utilizzando come filtro la zona di guadagno del profilo Brillouin, si cercherà di verificare la possibilità di usare come filtro anche la zona di perdita del profilo Brillouin, la quale dovrebbe emulare un filtro di tipo notch. Si investigherà, pertanto, la relazione tra il valore del rapporto di estinzione (ER), ottenuto dai diagrammi ad occhio, con le principali caratteristiche dei filtri, cioè altezza/profondità e larghezza di banda a metà altezza (FWHM).

### 2.1 Stato dell'arte ed interessi della modulazione di fase

Tradizionalmente, i sistemi di comunicazione ottica operano con segnali di tipo On-Off keying (OOK), cioè segnali in cui l'informazione è codificata attraverso la modulazione dell'ampiezza del segnale stesso come presenza o assenza della portante, sia con profilo di intensità non-return-to-zero (NRZ) che return-to-zero (RZ), ma nell'ultima decade è tornata in auge la proposta di utilizzare formati di modulazione basati anche sulla modulazione di fase precedentemente scartati per vari motivi tra i quali gli alti costi e la elevata complessità dei dispositivi di rivelazione. Con la riduzione dei costi degli apparati per la rivelazione di questi formati e soprattutto con l'individuazione di applicazioni specifiche in cui questi

formati risultino vantaggiosi si è, per esempio, proposto formati di modulazione che sfruttano la modulazione d'ampiezza per la codifica dell'informazione e quella di fase per migliorare la robustezza del segnale alle non linearità, alla dispersione cromatica e alle deformazioni dovute al filtraggio ottico che, con l'introduzione di questi formati, può essere anche molto stretto [22, 23, 24].

Nella modulazione di fase il formato Phase-Shift keying (PSK) codifica l'informazione nella fase del segnale, la quale assume valori discreti in funzione del bit o della sequenza di bit da trasmettere. Un aspetto vantaggioso della modulazione di fase è l'ampiezza costante. Questo la rende più robusta di altre in presenza di incertezze in ricezione sui livelli di riferimento in ampiezza dei segnali ricevuti [25]. In caso di rivelazione diretta il formato usato è detto Differential Binary PSK (DBPSK o, più semplicemente DPSK) in cui l'informazione non è codificata nella fase assoluta ma bensì nella variazione binaria della fase ottica tra due bit adiacenti. Il bit 1 è indicato da una variazione della fase pari a  $\pi$  ( $180^\circ$ ), il bit 0 invece da una variazione nulla ( $0^\circ$ ). In tal modo non si rende più necessario un riferimento assoluto di fase, ma la fase del bit precedente si usa come fase relativa di riferimento per la demodulazione del bit. L'interesse verso questi formati è motivato da alcuni vantaggi presentati dalla modulazione di fase che consentono un incremento della distanza massima percorribile, potenze di trasmissione più elevate ed efficienza spettrale maggiore. Infatti rispetto all'OOK, utilizzando il formato DPSK e una rivelazione bilanciata è possibile raggiungere pari valori di BER con un rapporto segnale rumore ottico (OSNR) inferiore di circa 3 dB [24]. Questo si spiega confrontando le due costellazioni dei simboli del segnale in Figura 2.1. A pari potenza ottica media, la distanza fra simboli (espressa in termini di campo ottico  $E$ ) nel caso DPSK è aumentata di un fattore  $\sqrt{2}$ ; di conseguenza per ottenere la stessa distanza fra simboli è sufficiente la metà della potenza media richiesta per l'OOK.

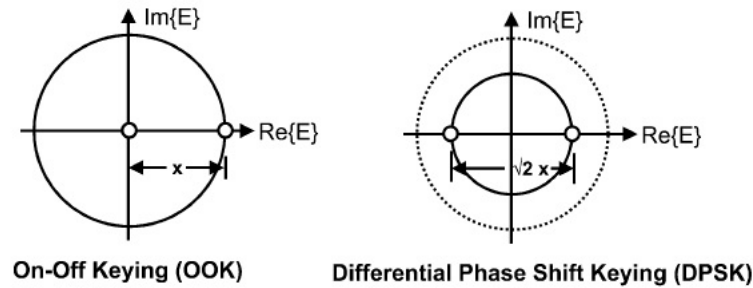


Figura 2.1: Costellazioni di segnali *On-Off Keying* e *Differential Phase Shift Keying* [24]: è mostrata la distanza fra simboli (espressa in termini di campo ottico  $E$ ) a parità di potenza ottica media.

Il formato DPSK offre, inoltre, una maggiore tolleranza all'interferenza intersimbolica rispetto al formato OOK e questo comporta una minore sensibilità a filtraggi ottici a banda stretta: un impulso di un segnale DPSK che viene filtrato otticamente subisce una minore distorsione della forma dell'impulso stesso. Inoltre, altrettanto importante, il formato DPSK, specialmente se associato ad un profilo di tipo RZ, è meno sensibile ad effetti di tipo non lineare. La potenza ottica è infatti distribuita regolarmente sia su bit 1 che 0 (si dice che ha un involuppo quasi costante) e si riducono gli effetti non lineari dipendenti dalla sequenza di bit, quali self-phase modulation (SPM, effetto a singolo canale) e la cross-phase modulation (XPM, effetto a più canali): a causa della variazione di intensità, entrambi questi effetti generano un allargamento dello spettro di segnale che, combinato con la dispersione cromatica, allarga temporalmente l'impulso; in definitiva introducono una penalità in trasmissione. Poiché nel formato DPSK non sono presenti transizioni rapide della potenza ottica, la dispersione cromatica risulta meno penalizzante rispetto al formato OOK [24]. Infine a pari potenza ottica media, la potenza di picco è 3 dB inferiore, riducendo la possibilità di raggiungere la potenza di soglia necessaria ad innescare alcuni effetti non lineari nefasti.

## 2.2 Tecniche per la rivelazione diretta della modulazione differenziale di fase

Il formato DPSK richiede sistemi di demodulazione a rivelazione diretta di tipo interferometrico generalmente più complessi e costosi rispetto al formato classico OOK. Un tipico ricevitore bilanciato per segnali DPSK è composto da un interferometro Mach-Zehnder (MZDI, Mach-Zehnder Delay-Interferometer), che introduce un ritardo differenziale fra i due rami che lo compongono pari alla durata del singolo bit [26]. Questo ritardo è introdotto attraverso differenti lunghezze dei cammini ottici nei rami. L'interferometro è necessario in una rivelazione diretta poiché i fotorivelatori convertono la potenza ottica in un segnale elettrico e sono insensibili alla fase ottica del fascio incidente. Attraverso il MZDI, due bit adiacenti interferiscono costruttivamente (o distruttivamente) causando di fatto la presenza (o l'assenza) di potenza all'uscita dell'interferometro stesso, producendo quindi una modulazione di intensità. Le difficoltà tecnologiche per realizzare un interferometro a ritardo stabile sono state superate e sono state implementate soluzioni sia in fibra ottica che su guide planari. Gli interferometri MZDI in ottica bulk sono più costosi e precisi e sono in genere utilizzati per applicazioni ad alta velocità e su lunghe tratte, dove è meno determinante contenere i costi. Soluzioni ad ottica integrata permettono una riduzione dei costi ma richiedono anche sistemi di stabilizzazione attiva che non sono compatibili con i requisiti di riduzione dei costi. La prima alternativa al ricevitore bilanciato interferometrico è l'utilizzo di un Fiber Bragg Grating (FBG). È stato dimostrato, infatti, che un tale filtro può effettuare correttamente la demodulazione di fase su un segnale [27, 28]. La funzione di trasferimento di questo filtro ha una forma ben approssimabile con una gaussiana e questa rappresenta molto bene il primo arco cosinusoidale della funzione di trasferimento di un interferometro Mach-Zehnder ideale con un ritardo pari ad un bit, come mostrato dalla Figura 2.2 in cui sono poste a confronto la tipica funzione di trasferimento di un filtro Mach-Zehnder con i vari archi cosinusoidali periodici di periodo  $1/T$  (a) e una generica funzione di trasferimento di un filtro gaussiano come potrebbe essere la funzione di trasferimento di un Fiber Bragg Grating.

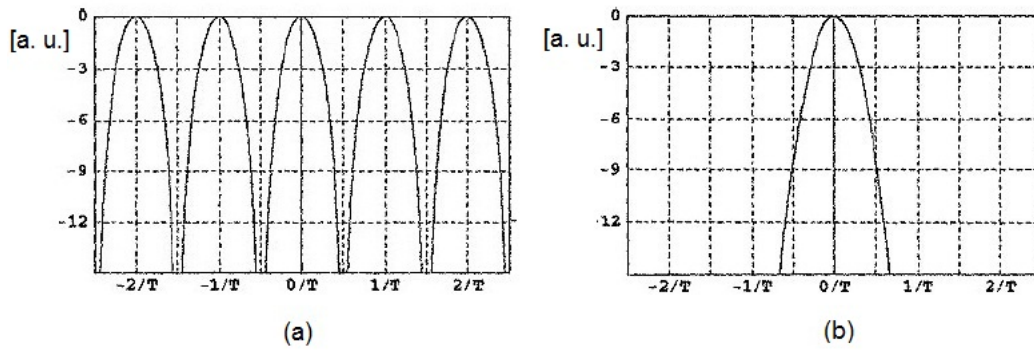


Figura 2.2: Confronto tra funzioni di trasferimento di un filtro Mach Zehnder ritardato di 100 ps per la ricezione di un segnale a 10 Gbit/s (a), e di un filtro gaussiano (b), [28].

La scelta di un FBG come filtro discriminatore permette di contenere i costi di realizzazione del sistema, inoltre offre il vantaggio di accorpate in un singolo elemento (il filtro stesso) tre fondamentali funzioni che generalmente sono compiute da altrettanti dispositivi distinti e cioè il filtraggio dell'ASE, il demultiplexing dei segnali WDM e la demodulazione DPSK. In [27] sono presentati i risultati ottenuti su un segnale di tipo NRZ-DPSK sul quale è stata effettuata la demodulazione di fase mediante un filtro passabanda (BPF) di tipo gaussiano e con larghezza a metà altezza (FWHM) pari a 6.2 GHz. Nell'esperimento riportato, si evidenzia come la funzione di trasferimento del segnale NRZ-DPSK prima e dopo il filtraggio gaussiano presenti l'avvenuta cancellazione dei lobi laterali e come tale segnale presenti un miglioramento delle prestazioni in termini di BER rispetto al segnale OOK di circa 1.2 dB.

Inoltre, come già detto nel paragrafo 1.3 riguardante le applicazioni dell'effetto Brillouin come filtro per ottenere demodulazione, sono state proposte anche delle soluzioni per l'elaborazione dei segnali modulati in fase attraverso l'utilizzo di un filtro Brillouin.

Nel successivo paragrafo verrà analizzata proprio questa soluzione tramite l'utilizzo del software commerciale Optsim.

## 2.3 Risultati delle simulazioni e commenti

E' stato implementato uno schema a blocchi, Figura 2.3, per la simulazione della trasmissione di un segnale binario modulato in fase con un rate di bit pari a 10

Gbit/s, e di una ricezione diretta utilizzando un filtro gaussiano che descrivesse il processo di conversione fase ampiezza al ricevitore.

Come è già sta accennato nel primo capitolo, e come si vedrà in dettaglio nel successivo capitolo riguardante l'effettiva attività sperimentale, il profilo di guadagno Brillouin presenta due zone approssimabili per forma a delle gaussiane. Una si trova a una frequenza inferiore rispetto alla frequenza di pompa in cui si apprezza un guadagno (Brillouin Gain Spectrum, BGS) ed una seconda a una frequenza superiore alla frequenza di pompa in cui si apprezza un assorbimento (Brillouin Loss Spectrum, BLS). Pertanto, si sono identificate queste due zone come possibili filtri gaussiani Brillouin, passabanda nel caso BGS o notch nel caso BLS, da utilizzare per operare la conversione fase-ampiezza.

In [14], la possibilità di sfruttare la zona di guadagno come filtro passabanda selettore è già stata investigata e verificata. Rimane, però, l'idea di poter sfruttare anche la zona di perdita, come filtro notch selettore, allo stesso fine.

Sono state svolte, pertanto, simulazioni che prevedessero l'utilizzo di filtri notch sintetizzati dalla zona BLS atte a verificare le caratteristiche di demodulazione in termini di rapporto di estinzione (Extinction Ratio, ER). Similmente sono state valutate le prestazioni di demodulazione per i filtri passabanda sintetizzati dalla zona BGS per approfondire e caratterizzare la soluzione già citata in letteratura.

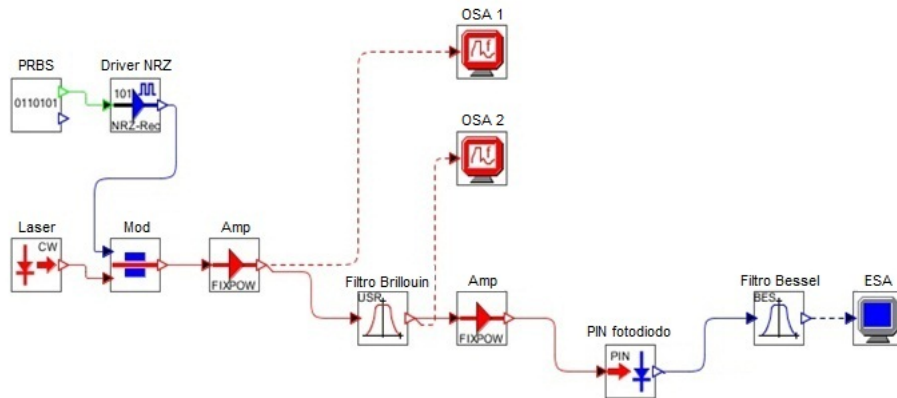


Figura 2.3: Schema a blocchi del sistema di trasmissione e ricezione implementato in Optisim ed usato per le simulazioni di conversione fase-ampiezza.

Il trasmettitore è composto da un generatore di sequenze pseudocasuali (Pseudorandom Binary Sequence, PRBS)  $2^7 - 1$ , un Driver, un diodo laser la cui larghezza a metà altezza (FWHM) è di 500 kHz e un modulatore di fase esterno che necessita di 5 V per la generazione della profondità di modulazione di  $\pi$ . Il segnale modulato, mostrato in Figura 2.4, viene fatto passare nel filtro che emula la demodulazione. Inizialmente questo filtro è stato sintetizzato utilizzando le funzioni di trasferimento dei filtri Brillouin misurate in laboratorio e che verranno approfonditamente descritte nel paragrafo 3.3. Successivamente sono stati sintetizzati, con l'ausilio di Matlab, dei filtri ideali al fine di studiare la relazione tra rapporto di estinzione, ricavato del diagramma ad occhio, e alcune caratteristiche dei filtri come la loro altezza (se filtro passabanda) o profondità (se filtro notch) e la loro FWHM per la ricerca di un filtro ottimo. Per quanto riguarda i filtri ottenuti dall'attività sperimentale legata alle misure di guadagno Brillouin, è stato necessario sovra campionare i punti sperimentali costituenti i filtri di un fattore 4 in modo da avere una sufficiente accuratezza spettrale.

Il segnale filtrato, e quindi idealmente demodulato, viene fatto passare attraverso un amplificatore che porta il valore di potenza del segnale a circa -5 dBm. Infine il segnale arriva al blocco di ricezione che è formato da un fotodiodo PIN con efficienza quantica pari a 0.8 e banda elettrica pari a 10 GHz e da un filtro di Bessel di banda paria a 7.5 GHz.

Per valutare l'efficienza della conversione fase-ampiezza nella rivelazione diretta di un segnale modulato in fase nel caso in cui si utilizzi come filtro demodulatore un filtro di tipo passabanda e nel caso in cui, invece, si utilizzi un filtro di tipo notch si sono andati a studiare i soli diagrammi ad occhio, risultato dell'effettiva avvenuta conversione. In particolare, come detto, si è andato ad indagare il valore di rapporto di estinzione definito come il rapporto tra le intensità rispettivamente dei bit "1" e "0". Questo parametro è indicatore, quindi, della capacità di generare bit 1 e 0 con alto contrasto.

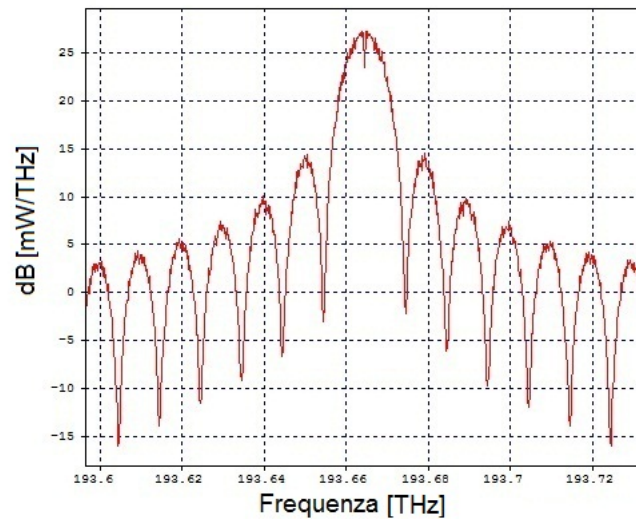


Figura 2.4: Spettro in frequenza di un segnale modulato in fase visto dall'OSA 1 del setup mostrato in Figura 2.4.

Come detto, sono state eseguite in un primo momento delle simulazioni sui filtri sperimentali ottenuti come risultato delle misure di guadagno Brillouin per tre tipi di fibra: Dispersion Shifted (DS) da 9.9 km, True-Wave Single Mode (TW-SMF) da 19.3 km e Free Light (FL) da 24.25 km, corrispondenti alle lunghezze ed alle tipologie di fibra impiegate durante la sperimentazione. Questi filtri sono di due tipologie, passabanda e notch, in quanto, come verrà ampiamente mostrato nel capitolo relativo all'attività sperimentale, il profilo di guadagno Brillouin che si ottiene facendo contropropagare in fibra il segnale di pompa ed un segnale laser in continua (CW) presenta due picchi (BGS e BLS) le cui caratteristiche possono essere utilizzate per sintetizzare dei filtri gaussiani di tipo passabanda e notch appunto.

Se un segnale modulato, come quello mostrato in Figura 2.4 passa attraverso un filtro, passabanda o notch che sia, si avrà una amplificazione o attenuazione di determinate componenti spettrali del segnale stesso. In Figura 2.5 viene mostrato il concetto appena esposto nel caso in cui i filtri utilizzati abbiano una larghezza di banda di circa 7 GHz.

Nel blocco di ricezione del setup di simulazione, un oscilloscopio campionatore mostra il diagramma ad occhio del segnale demodulato. In Figura 2.6 vengono riportati i diagrammi ad occhio riferiti alle situazioni di Figura 2.5 (a) e (b) e cioè di filtraggio del segnale modulato in fase con un filtro di tipo passabanda,



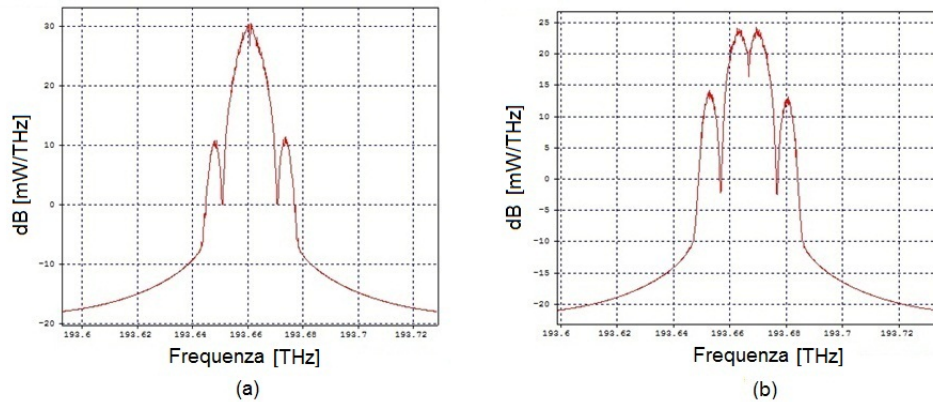


Figura 2.5: Spettro in frequenza di un segnale modulato in fase filtrato da un filtro passabanda (a) e da un filtro notch (b), entrambi con larghezza di banda pari a 7 GHz, ottenuti dai picchi BGS e BLS del profilo di guadagno Brillouin generato dalla fibra DS da 9.9 km visti dall'OSA 2 del setup di Figura 2.3.

Figura 2.6(a), e di tipo notch, Figura 2.6(b), entrambi, come detto, con larghezza di banda di circa 7 GHz.

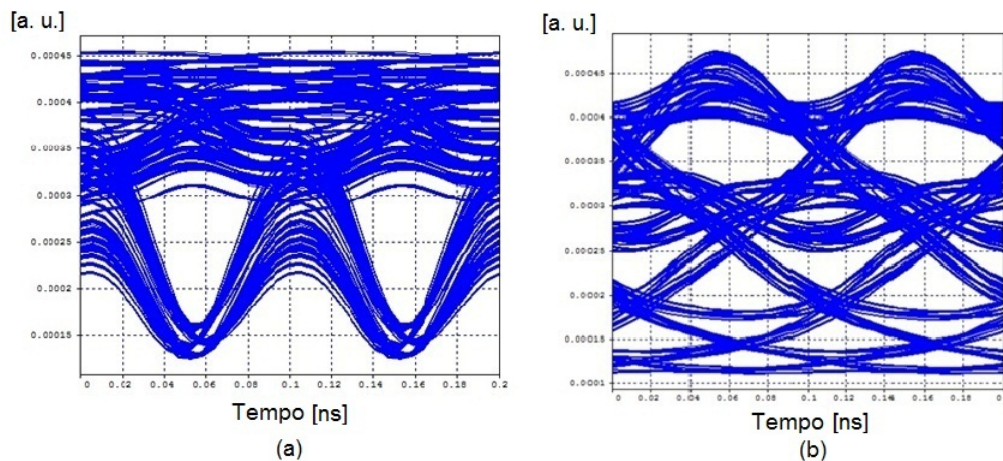


Figura 2.6: Diagramma ad occhio per la demodulazione effettuata con filtro passabanda (a) e con filtro notch (b), entrambi con larghezza di banda pari a 7 GHz.

I risultati di Figura 2.5 e di Figura 2.6 sono mostrati su un intervallo temporale pari a due volte il tempo di bit definito come l'inverso del rate di bit, e cioè 0.2 ns.

Dai diagrammi ad occhio riportati sopra si nota come, soprattutto nel caso di utilizzo del filtro passabanda non si riescano a definire univocamente le transizio-

ni tra gli stati, questo è dovuto principalmente alla interferenza intersimbolica. Riscontrato questo problema il valore del rapporto di estinzione è stato calcolato come rapporto tra i valori medi dei valori rappresentanti gli stati “1” e “0”.

Le simulazioni sono state svolte per tutti i filtri sperimentali sintetizzati ma non tutti sono risultati adatti ad ottenere la corretta demodulazione di fase in quanto alcuni di essi non avevano le caratteristiche, in termini di forma, altezza/profondità e FWHM, necessarie ad operare la demodulazione. Per quelli con i quali è stato possibile demodulare il segnale è stato estrapolato dai diagrammi ad occhio il valore di rapporto di estinzione e lo si è studiato in funzione di altezza/profondità e FWHM del filtro utilizzato.

In Figura 2.7 vengono mostrati questi risultati per il caso di filtro passabanda mentre in Figura 2.8 per il caso di filtro notch.

Indipendentemente dal tipo di filtro utilizzato (passabanda o notch) si nota come i migliori risultati vengano forniti dai filtri sintetizzati dalla fibra DS da 9.9 km. Per quanto riguarda il valore del rapporto di estinzione in funzione dei parametri caratteristici dei filtri, si ha che questo è più alto per quei filtri che hanno altezza (profondità) elevati ed è alto per quei filtri la cui FWHM è intorno ai 6 GHz. Intuitivamente, infatti, un filtro più alto (profondo) è più efficace nel selezionare parte delle frequenze spettrali, il che è alla base del meccanismo di demodulazione di fase basato sul filtraggio stretto, rispetto ad uno meno alto (profondo). Il fatto, poi, che la FWHM ottimale sia intorno a i 6 GHz coincide con i risultati espressi in [22], in cui si dimostra che la FWHM ottima del filtro per la demodulazione è i 2/3 del bit rate utilizzato per la modulazione. In particolare i filtri che hanno fornito i migliori risultati sono stati quelli ottenuti in condizioni sperimentali di elevata potenza di pompa (500 mW).

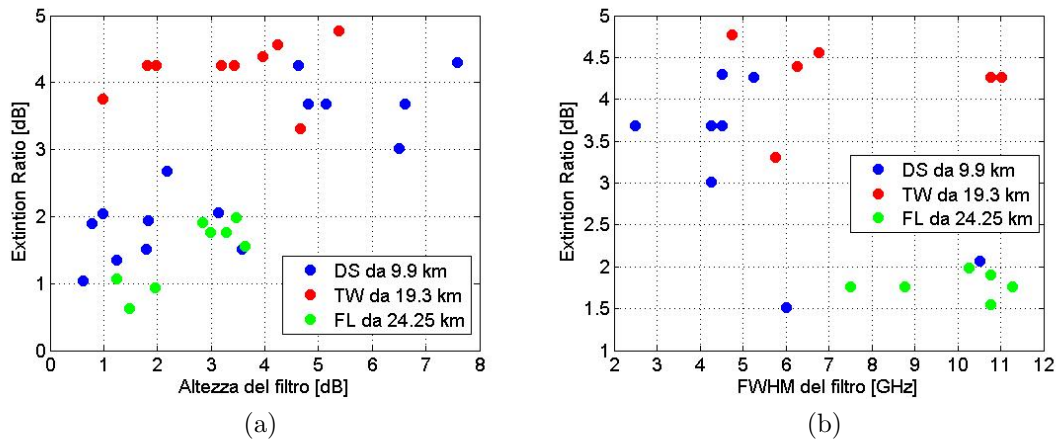


Figura 2.7: Studio del valore di rapporto di estinzione in funzione dell'altezza del filtro (a) e FWHM (b) nel caso di filtro passabanda per le tre fibre investigate.

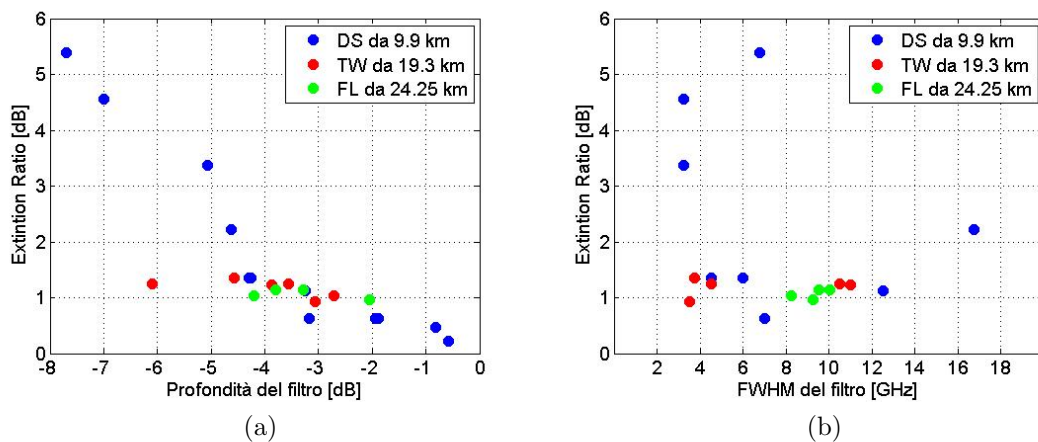


Figura 2.8: Studio del valore di rapporto di estinzione in funzione della profondità del filtro (a) e FWHM (b) nel caso di filtro notch per le tre fibre investigate.

Successivamente si sono sintetizzati dei filtri ideali di forma gaussiana composti da 338 campioni che andassero a investigare quelle altezze (profondità) che non è stato possibile studiare con i filtri ottenuti sperimentalmente. Sono stati generati quindici filtri di tipo passabanda e altrettanti di tipo notch: le altezze (profondità) scelte sono 7 dB, 9 dB, 12 dB, 15 dB e 21 dB, mentre le FWHM sono 5 GHz, 6.7 GHz, 10 GHz.

In Figura 2.9 e in Figura 2.10 vengono mostrati i diagrammi ad occhio in funzione dei valori di altezza (profondità) e di FWHM dei vari filtri utilizzati

per le simulazioni. In ogni diagramma ad occhio riportato, l'asse delle ascisse indica l'intervallo temporale in ns/div, mentre l'asse delle ordinate rappresenta l'ampiezza del segnale fotorivelato in unità arbitrarie.

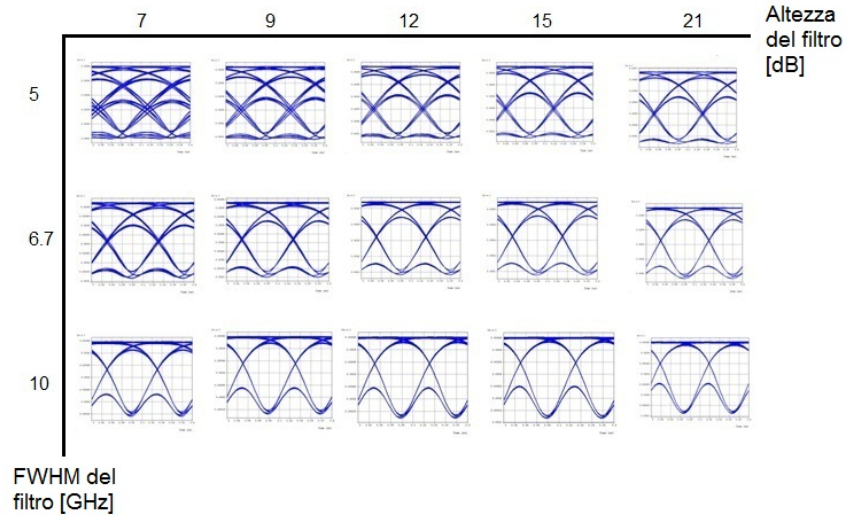


Figura 2.9: Diagrammi ad occhio in funzione dei valori di altezza e dei valori di FWHM dei filtri nel caso di filtri di tipo passabanda.

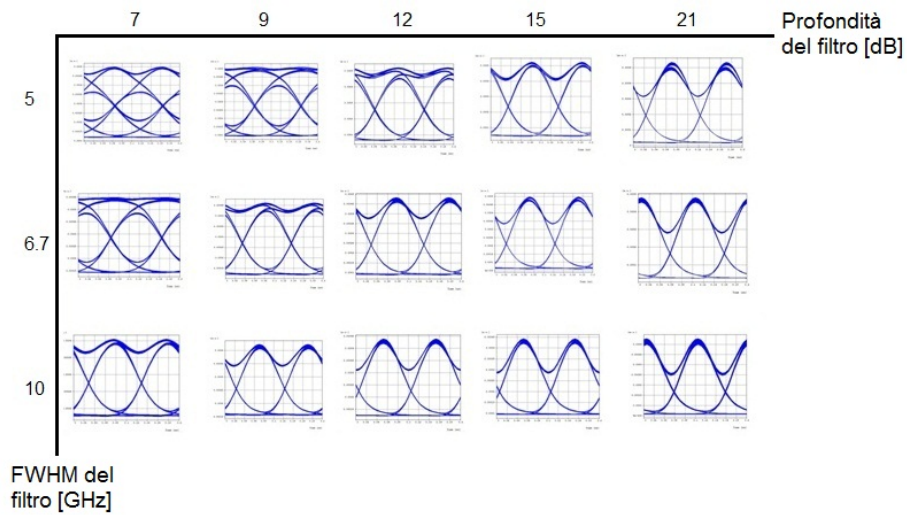


Figura 2.10: Diagrammi ad occhio in funzione dei valori di profondità e dei valori di FWHM dei filtri nel caso di filtri di tipo passabanda.

Semplicemente guardando la forma dei diagrammi ad occhio riportati sopra si capisce come i risultati in termini di apertura dell'occhio migliorino per valori di altezza (profondità) crescenti.

Per meglio studiare i risultati ottenuti da queste simulazioni vengono riportati i grafici dell'andamento del valore di rapporto di estinzione in funzione dell'altezza e della FWHM del filtro passabanda, Figura 2.11, e in funzione della profondità e della FWHM del filtro notch, Figura 2.12.

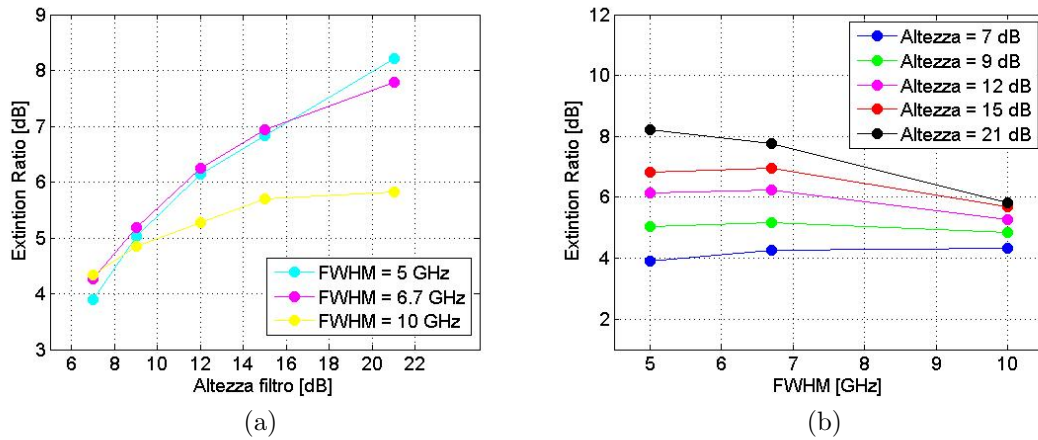


Figura 2.11: Andamento del valore del rapporto di estinzione in funzione dell'altezza del filtro (a) e in funzione della sua FWHM (b) nel caso di filtri di tipo passabanda.

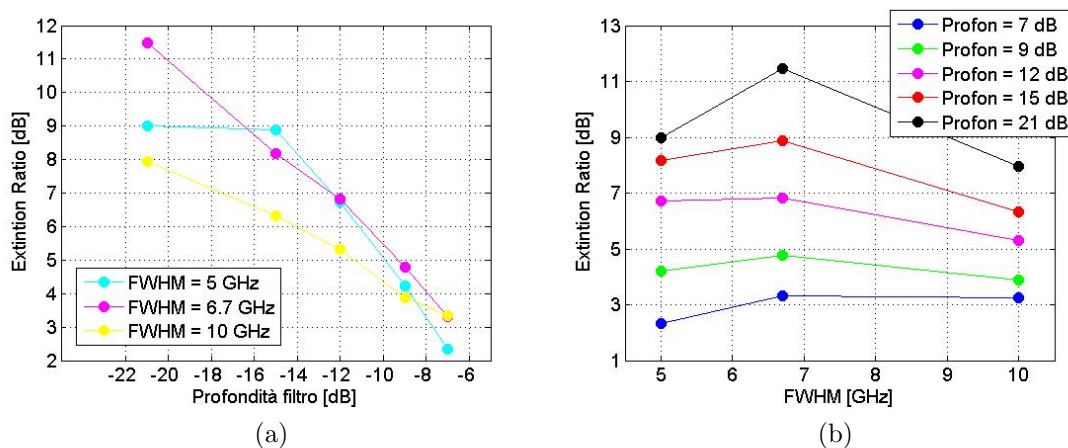


Figura 2.12: Andamento del valore del rapporto di estinzione in funzione della profondità del filtro (a) e in funzione della sua FWHM (b) nel caso di filtri di tipo notch.

Dai grafici riportati si evince come effettivamente aumentando l'altezza o la profondità dei filtri si ottengano migliori valori di ER e che, come già detto, la migliore larghezza a metà altezza sia proprio i  $2/3$  del bit rate utilizzato per modulare il segnale e cioè 6.7 GHz. Altri commenti a margine sono legati ai valori di altezza o profondità e alla forma dei filtri utilizzati. Per quanto riguarda i valori di altezza o profondità, questi sono valori oggettivamente difficili da ottenere se si pensa che, nella situazione oggetto di questo lavoro di tesi, dovrebbero essere dei filtri Brillouin generati in condizioni di pompa incoerente. Per quanto riguarda invece la forma dei filtri è bene dire che quelli sintetizzati con l'ausilio di Matlab sono delle gaussiane perfette mentre quelli ottenuti sperimentalmente sono solo approssimabili a delle gaussiane. Entrambe queste considerazioni contribuiscono a dire come i risultati ottenuti con i filtri sintetizzati con l'ausilio di Matlab siano decisamente migliori rispetto a quelli ottenuti con i filtri sperimentali.

Dalle Figure 2.11 e 2.12 si può, inoltre, effettuare un confronto su quale tipologia di filtro sia meglio utilizzare. I valori ottenuti mostrano chiaramente come, in condizioni ottimali di FWHM, si abbiano migliori valori di ER nel caso si utilizzasse come filtro demodulatore un filtro di tipo notch. La differenza di prestazioni aumenta, a favore del filtro notch, all'aumentare della profondità del filtro.

E' stata dimostrata, attraverso le simulazioni, la possibilità di ottenere demodulazione di fase utilizzando il filtro notch sintetizzato dalla zona di assorbimento del profilo Brillouin.

## 2.4 Conclusioni

Si è verificato, tramite simulazioni effettuate con il software commerciale Optsim, come sia possibile, a partire da un segnale modulato in fase a 10 Gb/s, ottenere demodulazione di fase mediante filtraggio Brillouin e si è studiata la relazione tra il valore di ER, ottenuto dai diagrammi ad occhio, ed alcuni parametri propri dei filtri utilizzati, come l'altezza o profondità e la FWHM. In particolare si sono investigati i casi in cui si utilizzasse come filtro selettore la zona di guadagno BGS e la zona di perdita BLS del profilo Brillouin.

In entrambi i casi è stato possibile verificare l'avvenuta conversione sebbene si siano individuati dei limiti a tale tecnica dovuti alla poca potenza disponibile

nella generazione di filtri Brillouin con altezza o profondità adeguate, così come alla FWHM del filtro utilizzato.

Nella prima parte dell'attività di simulazione, infatti, si sono utilizzati i filtri SBS ottenuti sperimentalmente durante lo studio per la caratterizzazione del profilo di guadagno Brillouin nel caso di fibre DS da 9.9 km, FL da 24.25 km e TW-SMF da 19.3 km. Si è ottenuto che non tutti i filtri sono risultati essere idonei ad ottenere la conversione e che i migliori valori di ER sono stati ricavati utilizzando la fibra DS per valori di potenza di pompa e potenza di segnale contropropagante elevati.

Successivamente sono stati sintetizzati, mediante Matlab, alcuni filtri con maggiore altezza o profondità (da 7 dB a 21 dB) e valori di FWHM (5 GHz, 6.7 GHz, 10 GHz) utili a comprendere quale fosse la migliore situazione in cui operare la demodulazione di fase.

Si è notato come i risultati più convincenti in termini di ER si siano ottenuti per filtri molto alti o molto profondi e FWHM pari a 6.7 GHz, valore ottimo per l'elaborazione di segnali per telecomunicazioni a 10 Gb/s. In particolare, i filtri di tipo notch hanno prodotto migliori valori di ER rispetto ai filtri di tipo passabanda. Inoltre, questo divario aumenta all'aumentare della profondità del filtro impiegato.

# Capitolo 3

## Attività sperimentale

In questo capitolo viene illustrata l'attività sperimentale di investigazione ed approfondimento dell'effetto Brillouin nell'ambito dell'elaborazione ottica del segnale per telecomunicazioni.

Si è caratterizzata la pompa ottenuta dalla sagomatura di una sorgente incoerente, si sono misurati i parametri significativi, in particolare la soglia Brillouin, di varie fibre ottiche a disposizione nel laboratorio dove è stata svolta la tesi e si è caratterizzato l'effetto Brillouin, ottenuto con la pompa realizzata, nelle fibre ottiche selezionate.

Infine è stata dimostrata la demodulazione di fase mediante filtraggio Brillouin valutandone le caratteristiche tramite misure del diagramma ad occhio e di BER.

### 3.1 Soglia Brillouin in continua

Sono state prese in considerazione diverse tipologie di fibra per telecomunicazioni con diverse caratteristiche di lunghezza, di dispersione cromatica (Chromatic Dispersion, CD) e di area efficace. Sono state impiegate fibre a dispersione nulla in terza finestra che hanno area efficace più piccola (Dispersion Shifted, DS), fibre a bassa dispersione che hanno area efficace più elevata (Free Light, FL e True-Wave Single Mode, TW-SMF) e fibre con profilo d'indice a gradino (Standard Single Mode Fiber, SSMF) al fine di operare un confronto sulle diverse prestazioni misurando il valore della soglia SBS.



In Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche di tali fibre:

Proprietà	Fibra DS	Fibra FL	Fibra FL	Fibra SSMF	Fibra SSMF	Fibra TW-SMF
CD (ps/nm·km)	0.01	3	2.5	-16	-15.8	3.5
Lunghezza (km)	9.9	12.8	24.25	20	8.8	19.3
Attenuaz. (dB/km)	0.280	0.213	0.279	0.214	0.224	0.280
$L_{eff}$ (km)	7.32	9.51	12.3	12.73	7.15	11.01
$A_{eff}$ ( $\mu\text{m}^2$ )	50	75	75	75	75	75

Tabella 1: Principali caratteristiche delle fibre utilizzate

In Figura 3.1 viene mostrato il setup sperimentale implementato per la misura della soglia Brillouin in continua. La caratterizzazione è stata realizzata utilizzando come pompa una sorgente laser a cavità esterna (External Cavity Laser, ECL) con larghezza di banda a metà altezza (Full Width Half Maximum, FWHM) di 1 MHz e che ha il vantaggio di essere sintonizzabile in frequenza. Tale larghezza di riga è più stretta della larghezza di banda del guadagno intrinseco Brillouin, per cui convolvendo le due si ha uno spettro di guadagno Brillouin la cui larghezza di banda rimane nell'ordine dei MHz, come riportato in Figura 1.7. Il segnale è amplificato da un amplificatore ottico (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) la cui potenza di saturazione è di 27 dBm e in seguito attenuato tramite un attenuatore ottico variabile (Variable Optical Attenuator, VOA). L'utilizzo di un accoppiatore ottico (Coupler), con rapporto d'accoppiamento nominale dell'1% che è stato misurato in 98.6% e 1.4% a 1550 nm, consente, attraverso la misura della potenza in uscita dal ramo 1% tramite un multimetro (Power Meter, PM), di conoscere la potenza di pompa effettivamente trasmessa nella bobina di fibra, indicata con  $P_{in}$ . Un secondo multimetro misura la potenza in uscita ( $P_{out}$ ), mentre un analizzatore di spettro ottico (Optical Spectrum Analyzer, OSA), collegato al quarto ramo dell'accoppiatore, viene utilizzato per valutare la potenza retroriflessa ( $P_b$ ) in corrispondenza del picco Brillouin. La potenza misurata sull'analizzatore di spettro ottico è stata preventivamente calibrata rispetto al multimetro. In un secondo momento all'OSA è stato sostituito un multimetro per ottenere l'informazione sulla totale potenza retroriflessa, somma dello scattering di Rayleigh e dello scattering Brillouin.

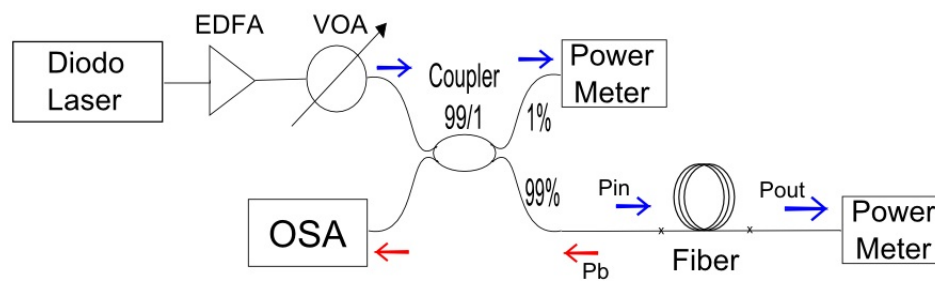


Figura 3.1: *Setup sperimentale implementato per la misura della soglia SBS in continua.*

Al variare della potenza di pompa si ottengono i valori di potenza retroriflessa e di potenza in uscita che, prendendo come esempio la situazione della fibra DS da 9.9 km, vengono mostrati in Figura 3.2.

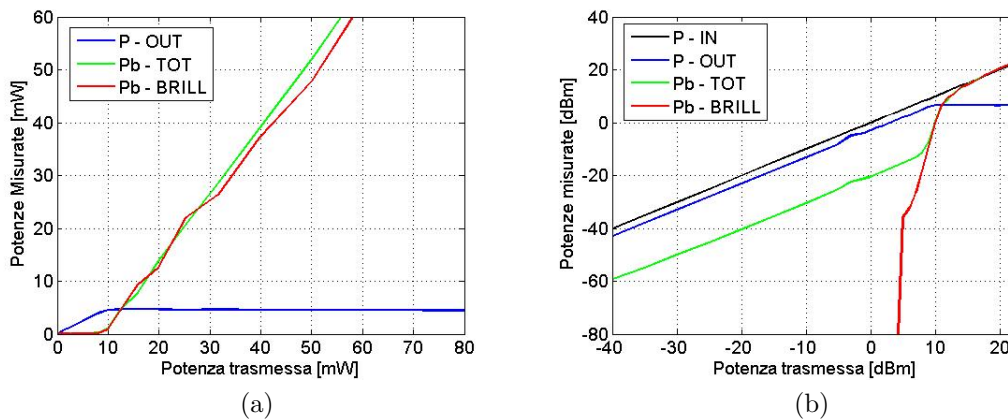


Figura 3.2: *Andamento di  $P_{out}$  (linea blu),  $P_b$  totale (linea verde) e  $P_b$  Brillouin (linea rossa) al variare della potenza in ingresso (linea nera) alla fibra DS da 9.9 km in scala lineare (a) e in scala logaritmica (b).*

Dalla Figura 3.2(a) si nota come la potenza in uscita alla fibra (linea blu), dopo una crescita lineare, si assesti su un valore di circa 6 mW e vi rimanga indipendentemente dalla potenza lanciata in fibra, come atteso, a causa dello scattering Brillouin che limita la massima potenza che può essere inviata in fibra.

La stessa Figura 3.2(b) riporta la scala logaritmica dello stesso andamento in modo da apprezzare come la potenza retroriflessa (linea verde), per valori di potenza di pompa bassi, sia rappresentata solo dallo scattering di Rayleigh, il quale da valutazioni teoriche può essere stimato in circa 25 dB sotto la potenza inviata come misurato nel grafico. In Figura 3.2(b) è stata, inoltre, messa in evidenza la potenza in ingresso alla fibra, in quanto il valore di soglia Brillouin è stato ottenuto dall'intersezione della linea rappresentante la potenza in ingresso alla fibra (linea nera), diminuita di 20 dB, con la linea rappresentante la totale potenza retroriflessa (definizione dell'1%) [29]. Tale concetto è mostrato in Figura 3.3.

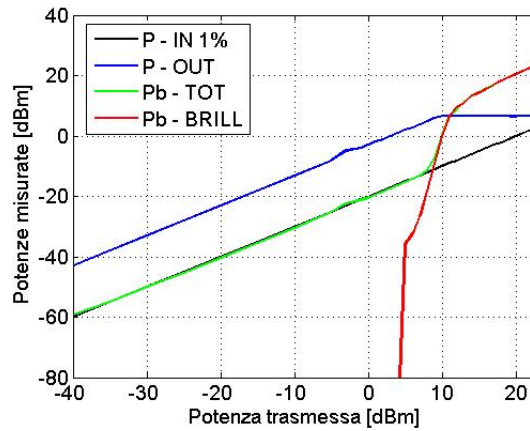


Figura 3.3: Andamento di  $P_{out}$  (linea blu),  $P_b$  totale (linea verde) e  $P_b$  Brillouin (linea rossa) e  $P_{in}$  diminuita di 20 dB (linea nera) al variare della potenza di ingresso alla fibra DS da 9.9 km in scala logaritmica. Applicazione della definizione dell'1%.

Nota il valore di potenza di soglia, risolvendo l'equazione:

$$g_B = 21 \frac{A_{eff}}{P_{th} L_{eff}} \quad (3.1)$$

in cui l'area efficace della fibra di tipo DS è pari a  $50 \mu m^2$ , la lunghezza efficace è pari a 7.32 km, si ottiene un valore del coefficiente di guadagno Brillouin pari a  $5.56 * 10^{-11} m/W$ , paragonabile al valore  $5 * 10^{-11} m/W$  riportato come valore di riferimento in [1] per le comuni fibre utilizzate nei sistemi di comunicazione ottica.

È inoltre possibile osservare in Figura 3.4, l'incrocio ottenuto dalle misure sperimentali tra potenza in uscita (linea blu) e potenza totale retroriflessa (linea verde) dopo che la soglia Brillouin è stata superata.

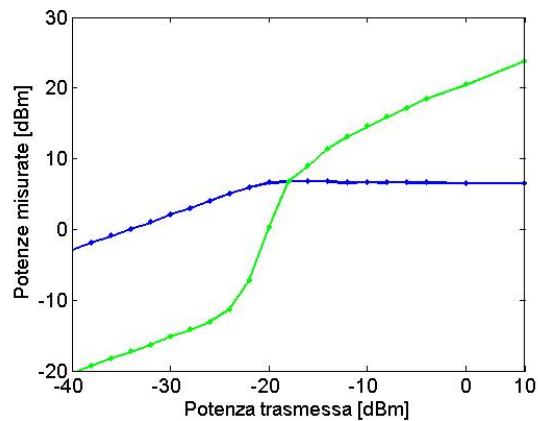


Figura 3.4: Incrocio ottenuto dalle misure sperimentali tra potenza in uscita (linea blu) e potenza totale retroriflessa (linea verde) dopo che la soglia Brillouin è stata superata.

In Figura 3.5 è mostrata la riprova dell'effettivo raggiungimento della soglia Brillouin. In essa è mostrata la somma tra la potenza in uscita alla fibra e la potenza retroriflessa, a cui si sottrae la potenza in ingresso alla fibra. Finché la soglia non viene raggiunta la somma di potenza in uscita e potenza retroriflessa è data dalla sola potenza in uscita; sottraendovi la potenza in ingresso si ottiene il valore della perdita per propagazione in fibra che, nel caso della fibra DS è di circa 2.8 dB. Quando, invece, la soglia viene raggiunta si nota come la differenza tra la totale potenza in uscita e la potenza in ingresso diminuisca, dimostrando il superamento della soglia Brillouin.

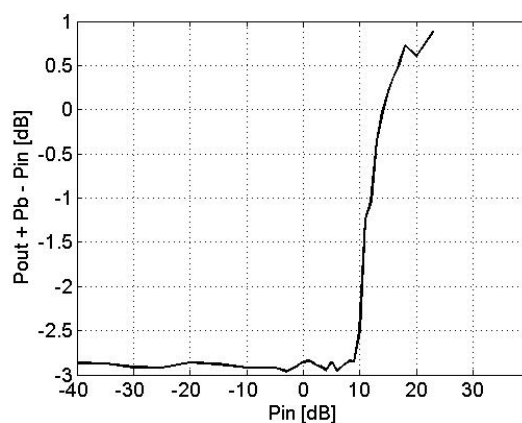


Figura 3.5: Andamento della differenza tra la somma di potenze in uscita e potenza in ingresso al variare della potenza in ingresso alla fibra DS da 9.9 km.

Lo studio svolto, finora, sulla fibra DS da 9.9 km è stato ripetuto per tutte le altre fibre sotto investigazione e mostrato a pagina seguente, dove vengono riportate le immagini in scala logaritmica necessarie alla misura della soglia Brillouin e gli andamenti della differenza tra la totale potenza in uscita e la potenza in ingresso.

In Figura 3.6 si mostrano gli andamenti delle potenze in scala logaritmica necessari alla misura della soglia Brillouin per le altre fibre prese in esame. Si nota come gli andamenti siano molto simili. La differenza per quanto riguarda il valore della soglia Brillouin è minima.

Graficamente è, quindi, possibile ottenere l'informazione relativa alla soglia Brillouin e, analiticamente, l'informazione sul coefficiente di guadagno Brillouin.

Nella tabella sottostante vengono riportati i valori di soglia Brillouin e i valori di coefficiente di guadagno per tutte le fibre prese in esame.

Proprietà	Fibra DS	Fibra FL	Fibra FL	Fibra SSMF	Fibra SSMF	Fibra TW-SMF
Lunghezza (km)	9.9	12.8	24.25	20	8.8	19.3
$P_{th}$   dBm	7.125	10.286	7.35	8.1	10.3	6.55
$P_{th}$   mW	5.16	10.68	5.43	6.46	10.72	4.32
$g_B * 10^{-11}$ (m/W)	5.56	3.1	4.72	3.83	4.1	6.6

*Tabella 2: Risultati sperimentali riguardo il valore della soglia Brillouin e il valore del coefficiente di guadagno per tutte le fibre considerate.*

Da notare come la soglia Brillouin più bassa la possiede una fibra che, generalmente, è considerata poco affetta da non linearità in quanto con un'area efficace grande.

Con il setup riportato in Figura 3.7 si è studiato anche il valore della FWHM dello spettro di guadagno Brillouin.

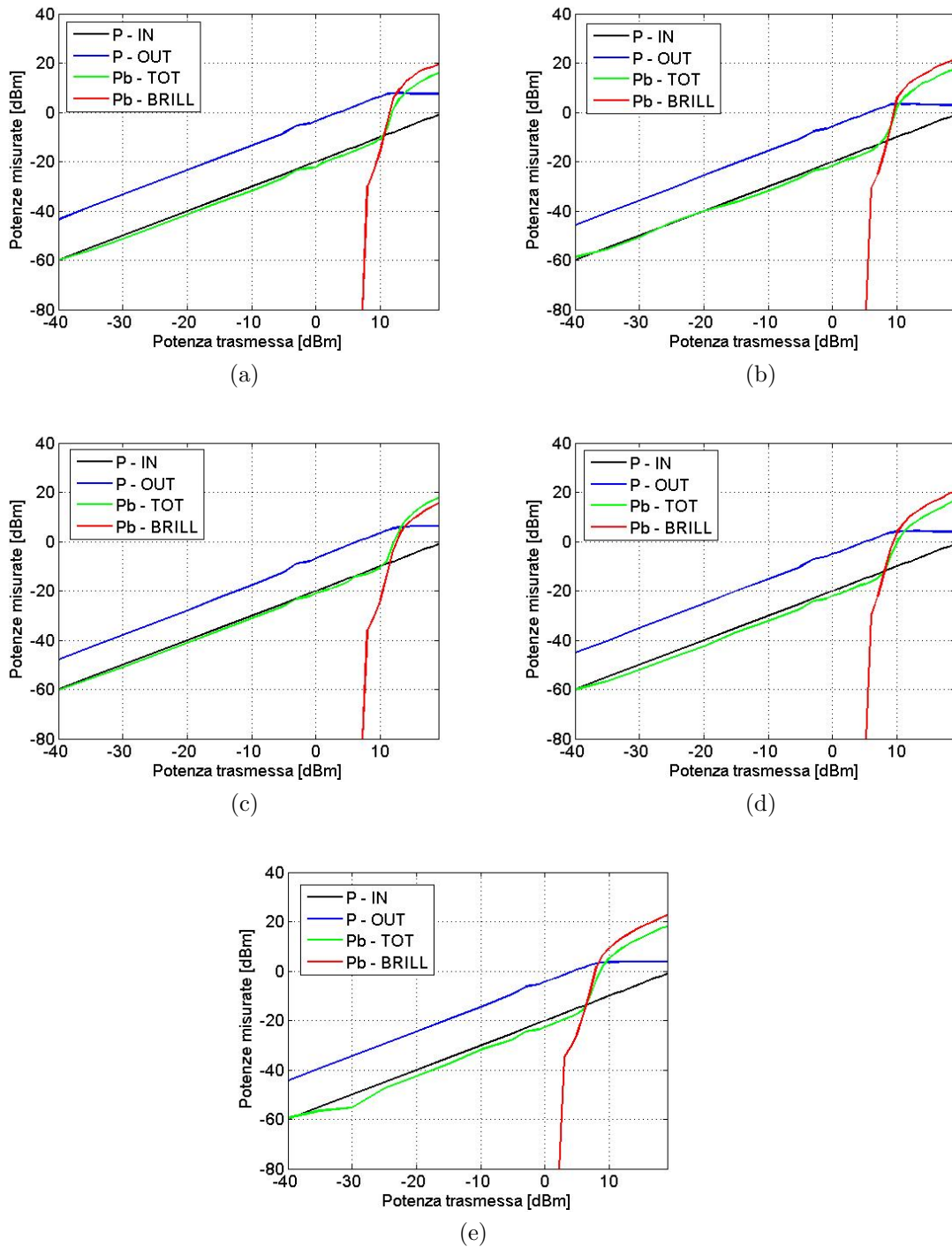


Figura 3.6: Andamento di  $P_{out}$  (linea blu),  $P_b$  totale (linea verde) e  $P_b$  Brillouin (linea rossa) e  $P_{in}$  diminuita di 20 dB (linea nera) al variare della potenza in ingresso per le varie fibre prese in considerazione: fibra FL da 12.8 km (a), fibra FL da 24.25 km (b), fibra SSMF da 8.8 km (c), fibra SSMF da 20 km (d), fibra TW-SMF da 19.3 km (e).

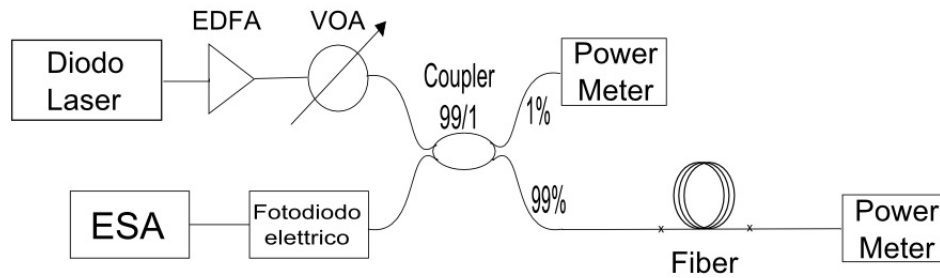


Figura 3.7: Setup per la misura dello spettro di guadagno Brillouin.

Il setup per la misura dello spettro di guadagno Brillouin è costituito da un fotodiodo elettrico di banda elettrica pari a 13 GHz e un analizzatore di spettro elettrico (Electrical Spectrum Analyzer, ESA) con banda elettrica pari a 25 GHz che permettono di visualizzare lo spettro di guadagno Brillouin con una risoluzione molto maggiore rispetto all'OSA. L'immagine dello spettro di guadagno Brillouin appare molto rumorosa ma con l'ausilio di un algoritmo di processamento dati con media mobile ripetuta (Multiple Moving Average) è stato possibile operare un fitting Lorentziano come mostrato in Figura 3.8.

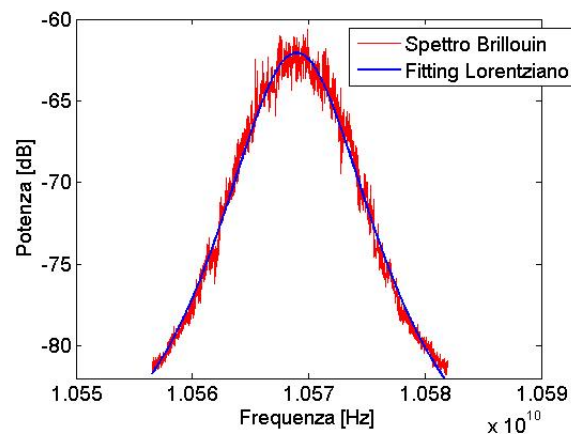


Figura 3.8: Spettro di guadagno Brillouin per la fibra DS da 9.9 km (linea rossa) e fitting Lorentziano (linea blu).

Dal grafico riportato si apprezza come la frequenza centrale della Lorentziana, che è lo spostamento in frequenza del segnale Brillouin, sia 10.569 GHz e come la FWHM dello spettro sia di 7.07 MHz. Tale valore è caratteristico della fibra che

si utilizza e risulta essere leggermente inferiore rispetto ad altri valori riportati in letteratura ( $\sim 10$  MHz) per le fibre di tipo DS.

In Figura 3.9 vengono riportati i risultati della stessa analisi che si è effettuata sulle altre fibre prese in considerazione.

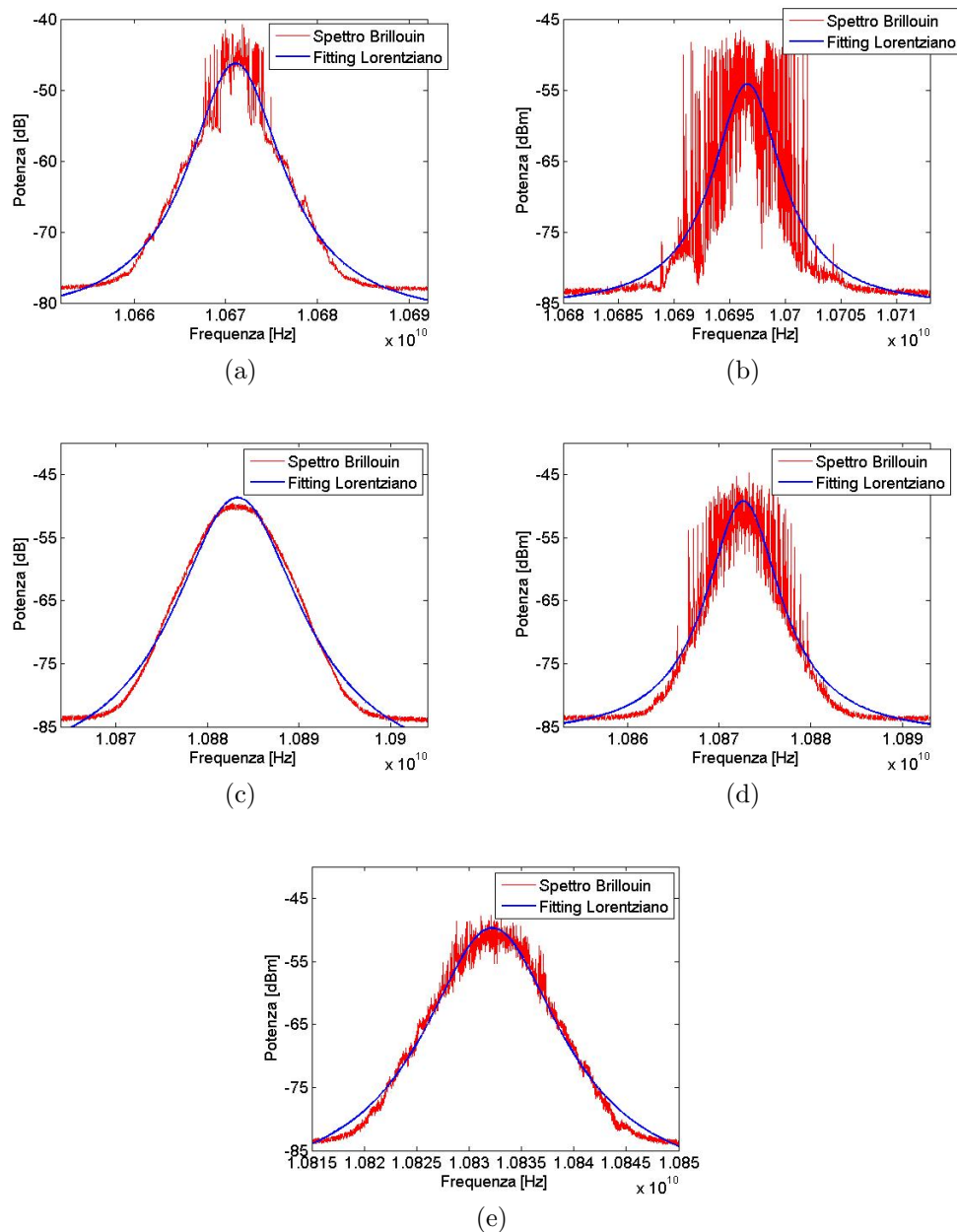


Figura 3.9: Spettro di guadagno Brillouin (linea rossa) e fitting Lorentziano (linea blu) per le fibre prese in esame: fibra FL da 12.8 km (a), fibra FL da 24.25 km (b), fibra SSMF da 8.8 km (c), fibra SSMF da 20 km (d), fibra TW-SMF da 19.3 km (e).



In tabella 3 sono riportati i dati misurati riguardanti la frequenza di spostamento Brillouin e la larghezza di banda a metà altezza del profilo di guadagno Brillouin per tutte le fibre prese in considerazione.

Proprietà	Fibra DS	Fibra FL	Fibra FL	Fibra SSMF	Fibra SSMF	Fibra TW-SMF
Lunghezza (km)	9.9	12.8	24.25	20	8.8	19.3
FWHM (MHz)	7	4.48	6.43	6.14	6.16	6.4
$\nu_B$ (GHz)	10.569	10.671	10.670	10.870	10.883	10.830

*Tabella 3: Risultati sperimentali riguardo al valore di FWHM e di spostamento Brillouin.*

L'informazione sulla larghezza di banda dello spettro di guadagno Brillouin intrinseco permette di studiare l'andamento della soglia Brillouin in presenza di pompa incoerente a banda larga a partire dall'equazione 1.10 nel capitolo 1. Il valore di soglia diminuisce con l'aumentare della banda Brillouin come mostrato in Figura 3.10, la quale riporta la simulazione dell'andamento della soglia per il valore di coefficiente di guadagno calcolato in precedenza nel caso di fibra DS da 9.9 km confrontato con l'andamento di soglia che si avrebbe nel caso di coefficiente di guadagno di  $5 * 10^{-11} m/W$ , [1], quando la sorgente di pompa ha una larghezza di 6.7 GHz, corrispondente alla FWHM del filtro di Bragg a disposizione in laboratorio.

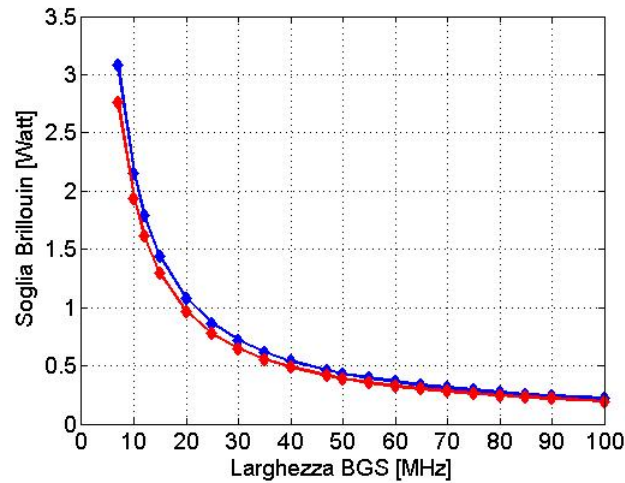


Figura 3.10: Soglia Brillouin in funzione della larghezza di banda del picco BGS nel caso in cui si utilizzi il coefficiente di guadagno ottenuto sperimentalmente per la fibra DS da 9.9 km (linea rossa) e nel caso in cui si utilizzi il valore di riferimento  $5 * 10^{-11} m/W$  [1] (linea blu) .

Per il valore di FWHM dello spettro di guadagno Brillouin ottenuto nel caso di fibra DS da 9.9 km, che è di 7 MHz, si ha un valore di soglia che si aggira intorno ai 2.7 W.

Il valore di soglia per pompa allargata quindi cambia da fibra a fibra, giacché dipende dal coefficiente di guadagno e dalla larghezza di banda dello spettro di guadagno Brillouin.

Nella tabella sottostante vengono riportati i valori di soglia ottenuti con una pompa larga 6.7 GHz per ogni fibra presa in esame andando a risolvere l'equazione 1.10.

Proprietà	Fibra DS	Fibra FL	Fibra FL	Fibra SSMF	Fibra SSMF	Fibra TW-SMF
Lunghezza (km)	9.9	12.8	24.25	20	8.8	19.3
$P_{th}$   W. Pump = 6.7 GHz	2.77	8	2.83	3.52	5.9	2.26

Tabella 4: Risultati sperimentali riguardo la soglia Brillouin ottenuta con pompa allargata.

L'utilizzo di una pompa incoerente per la generazione dell'effetto SBS la cui larghezza di banda supera quella del guadagno Brillouin intrinseco fa sì che il processo di amplificazione sia meno efficiente poiché la potenza della radiazione risulta essere distribuita su uno spettro più ampio di frequenze. La soglia di potenza necessaria per innescare il processo di amplificazione, pertanto, si innalza notevolmente rispetto al valore in continua.

### 3.2 Caratterizzazione del guadagno Brillouin con pompa incoerente

Si è valutato il guadagno Brillouin con pompa a banda larga in regime di piccolo segnale impiegando il setup sperimentale illustrato in Figura 3.11 in cui si sono messi in evidenza (con la numerazione dall'1 all'8) i vari stadi di amplificazione e filtraggio necessari ad ottenere una pompa di potenza e forma adeguata.

La difficoltà di ottenere una potenza sufficiente è dovuta alla necessità di selezionare una banda molto stretta da una sorgente (ASE) che per sua natura è molto più ampia. La sorgente di luce ASE incoerente è un erbio-doped fiber amplifier (EDFA) operante senza ingresso ottico. La luce incoerente viene inizialmente filtrata da un filtro passabanda (Bandpass Filter, BPF) di banda  $\Delta = 1.2 \text{ nm}$  e fatta passare attraverso un analizzatore di polarizzatore (Polarization Analyzer, PA) per selezionare una sola polarizzazione dato che la luce ASE è una luce non polarizzata. Questo passaggio dà luogo ad una perdita secca di 3 dB (lasciare intatta una sola polarizzazione significa propriamente dimezzare la potenza in ingresso al PA), cui si aggiunge una perdita per inserzione di circa 2dB. Successivamente, la luce ASE così filtrata viene amplificata in cascata da due EDFA, il secondo dei quali è in grado di raggiungere potenze di saturazione in uscita pari a  $P_{Max} = 200 \text{ mW}$  ( $P_{Max} = 23 \text{ dBm}$ ). La luce incoerente, la cui banda è già stata ridotta, viene filtrata da un fiber Bragg grating (FBG) funzionante in riflessione, realizzato presso i laboratori del Dipartimento di Fisica del Politecnico di Milano. Tale filtro ha una risposta spettrale di tipo gaussiano con larghezza a metà altezza  $\text{FWHM} = 6.7 \text{ GHz}$  come rappresentato in Figura 3.12 in cui è mostrata la funzione di trasferimento in riflessione del FBG ottenuta sperimentalmente.

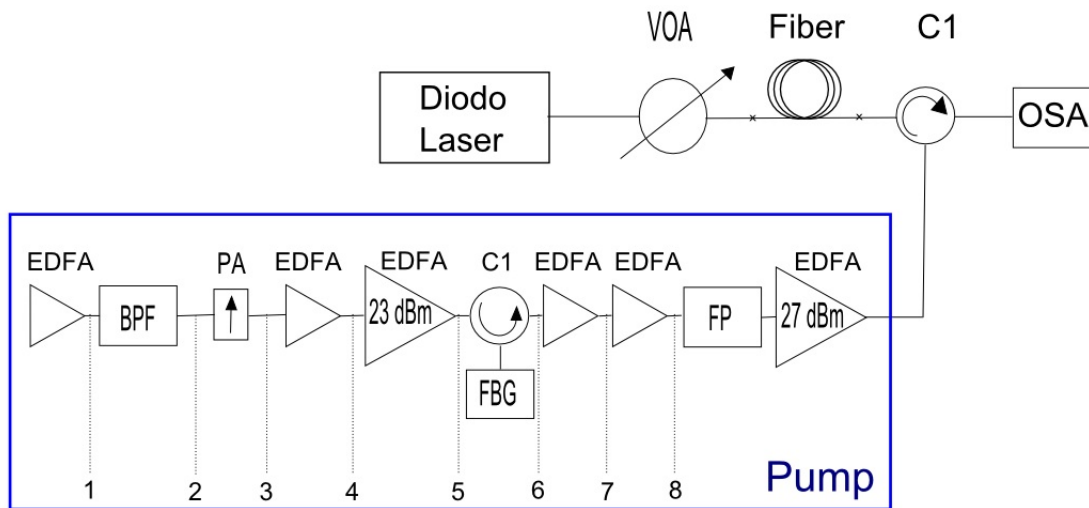


Figura 3.11: *Setup sperimentale implementato per la misura del guadagno Brillouin.*

Il valore della banda a 3 dB del grating di Bragg è adeguata al trattamento di segnali per le telecomunicazioni con bit-rate fino a 10 Gbit/s senza che il segnale stesso venga distorto eccessivamente [30].

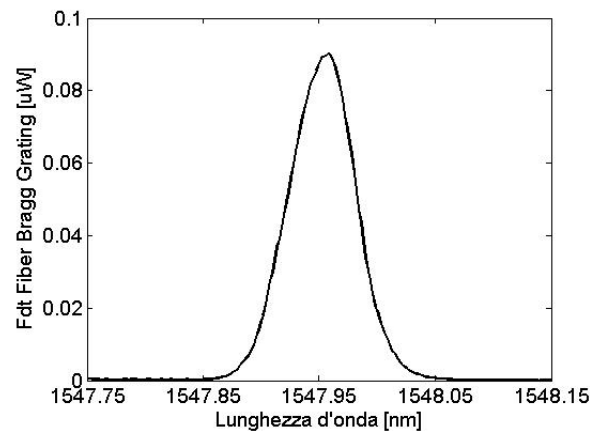


Figura 3.12: *Funzione di trasferimento in riflessione del Grating ottenuta sperimentalmente durante il lavoro di tesi (b) in funzione della lunghezza d'onda.*

Il segnale riflesso dal FBG, attraverso il circolatore C1 viene inviato ad una cascata di due amplificatori EDFA. La sorgente ASE dopo vari stadi di filtraggio perde gran parte della sua potenza. Infatti, filtrare con filtri stretti ( $\sim$  GHz) uno spettro largo implica perdite di filtraggio elevate, a cui si aggiungono le inevitabili

perdite di inserzione dei dispositivi usati, per cui per ottenere una potenza di pompa sufficiente ad apprezzare l'effetto Brillouin è necessario amplificare più volte attraverso successivi EDFA.

La Figura 3.13 riporta l'andamento della potenza di pompa attraverso i vari stadi che compongono la pompa fin qui descritti.

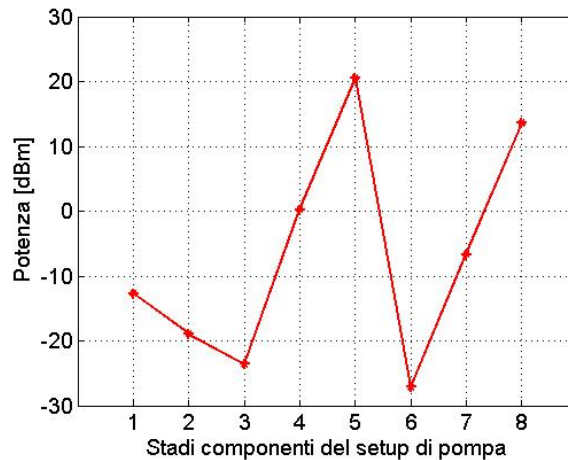


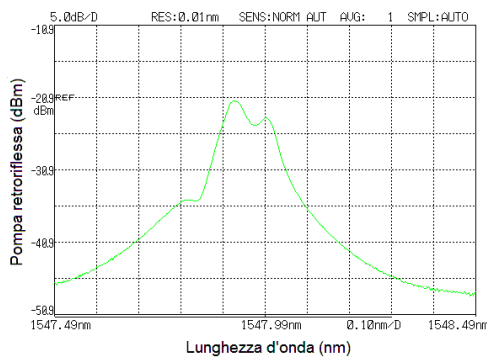
Figura 3.13: Potenze di pompa attraverso gli stadi che compongono la pompa riferiti al setup di Figura 3.11.

Il segnale così ottenuto è amplificato da un EDFA la cui potenza di uscita può raggiungere il valore significativo di  $P_{Max} = 500 \text{ mW}$  ( $P_{Max} = 27 \text{ dBm}$ ) e viene inviato ad un secondo circolatore C2 che lo trasmette in fibra accoppiandolo con un segnale contropropagante.

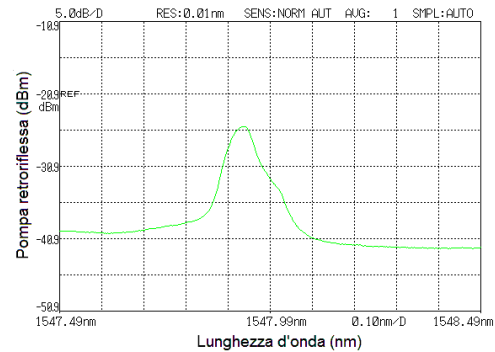
Tale segnale (probe) è ottenuto da un diodo laser (Distributed Feedback Laser, DFB) in continua, con lunghezza d'onda di 1547.92 nm. Le potenze di segnale impiegate per questo studio sono state di 50  $\mu\text{W}$ , 100  $\mu\text{W}$ , 500  $\mu\text{W}$ , per cui per esse è ancora valida l'approssimazione di piccolo segnale e la conseguente ipotesi di crescita lineare del guadagno Brillouin. Per la misura del guadagno Brillouin è stato impiegato un analizzatore di spettro ottico (OSA) previamente tarato mediante un multimetro.

In un secondo momento si è introdotto un filtro Fabry-Perot (FP) con FWHM pari a 7.5 GHz sintonizzato sulla lunghezza d'onda della pompa come stadio precedente all'EDFA finale (come riportato in Figura 3.11) al fine di migliorare il rapporto di segnale rumore ottico (OSNR) della pompa eliminando il rumore associato al segnale di pompa. In questo secondo caso si misura una potenza in

ingresso all'ultimo stadio di amplificazione EDFA di circa 4.5 dBm, il quale è un valore inferiore ai 13.6 dBm che si ottengono dalla cascata di amplificatori (ultimo stadio Figura 3.13), ma sufficiente a permettere all'EDFA da 27 dBm di lavorare in saturazione. Pertanto, nei due casi si invia in fibra la stessa potenza. I risultati che verranno mostrati sono, però, decisamente migliori nel caso in cui il filtro Fabry-Perot sia elemento sagomante della pompa in quanto questo filtra il rumore fuori banda. Dal confronto degli spettri del segnale di pompa retroriflessa in presenza ed in assenza di filtro FP, rispettivamente Figura 3.14(a) e Figura 3.14(b), si nota come la presenza del picco Brillouin, visibile in entrambi a una frequenza inferiore rispetto alla frequenza di pompa, sia più marcata nel caso in cui il filtro FP sia integrato come elemento sagomante della pompa.



(a)



(b)

Figura 3.14: Spettro retroriflesso della pompa a 500 mW in presenza di filtro FP (a) e in assenza di filtro FP (b) in funzione della lunghezza d'onda.

In entrambe le situazioni di presenza ed assenza del filtro FP in pompa sono state condotte le misure di guadagno Brillouin ed i risultati verranno riportati e commentati nel paragrafo successivo.

Nella tabella sottostante vengono riportate le principali caratteristiche dei dispositivi utilizzati nel setup di Figura 3.11.

<i>Dispositivo</i>	<i>Caratteristica</i>	<i>Valore</i>
<b>Filtro passabanda</b>	FWHM	1.2 nm
	Perdite d'inserzione	1.86 dBm
<b>Fiber Bragg Grating</b>	FWHM	6.7 GHz
<b>Polarization Controller</b>	Perdite d'inserzione	1.65 dBm
<b>Circolatore (C1)</b>	Perdite da porta 1 a porta 2	1.80 dBm
	Perdite da porta 2 a porta 3	1.11 dBm
	Return Loss	50 dB sotto
<b>Circolatore (C2)</b>	Perdite da porta 1 a porta 2	1.63 dBm
	Perdite da porta 2 a porta 3	2.33 dBm
	Return Loss	45 dB sotto
<b>Filtro Fabry-Perot</b>	Free Spectral Range (FSR)	4.9 THz
	FWHM	7.5 GHz

Tabella 5: Principali caratteristiche dei dispositivi utilizzati nel setup sperimentale di Figura 3.11.

### 3.3 Misure di guadagno Brillouin: risultati sperimentali e commenti

In questo paragrafo verranno illustrati i risultati sperimentali ottenuti utilizzando, inizialmente, la sola fibra DS da 9.9 km per diversi valori di potenza di pompa e di segnale. Successivamente lo studio verrà ampliato anche alle altre fibre. Si è scelto di iniziare con la fibra di tipo DS in quanto maggiormente soggetta a fenomeni di tipo non lineare poiché fisicamente possiede un'area efficace piccola ( $\sim 50 \mu\text{m}^2$ ) rispetto ad altre fibre. Infatti si è riscontrato come il Brillouin spontaneo ottenuto con pompa in continua per la fibra DS sia maggiore di circa 3 dB rispetto a quello ottenuto per la fibra FL e di 4.6 dB rispetto a quello ottenuto per la fibra TW-SMF, come si vede in Figura 3.15.

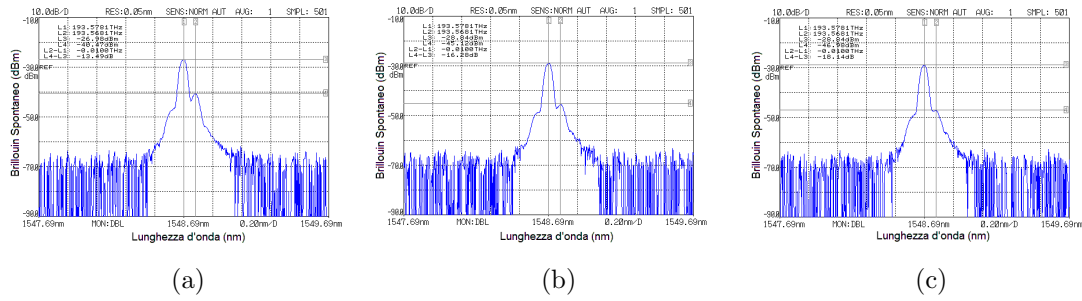


Figura 3.15: Confronto Brillouin spontaneo con pompa in continua per diverse tipologie di fibre ottiche: DS da 9.9 km (a), FL da 24.25 km (b), TW-SMF da 19.3 km (c).

L'analisi si è effettuata utilizzando diverse potenze di pompa (30 mW, 70 mW, 160 mW, 260 mW, 500 mW) e diverse potenze del segnale di probe (50  $\mu$ W, 100  $\mu$ W, 500  $\mu$ W). Inoltre, vista la volontà di caratterizzare con precisione la situazione più adeguata ad operare con l'SBS, si è svolto questo studio in assenza, prima, ed in presenza, poi, del filtro Fabry-Perot come elemento sagomante del segnale di pompa.

Il guadagno è stato calcolato come rapporto tra la potenza di segnale ricevuta nei due casi distinti di pompa spenta e pompa accesa. Le misure spettrali presenti nei grafici riportati sotto sono state ottenute nel seguente modo: si è svolto un "campionamento" dei valori di potenza di pompa ogni 0.01 nm attorno alla frequenza di pompa, successivamente si è attivato anche il segnale laser DFB e lo si è sintonizzato e campionato alle stesse lunghezze d'onda alle quali sono stati presi i campioni di potenza di pompa. A posteriori, per rimuovere la potenza di pompa retroriflessa per scattering di Rayleigh, si è andato a sottrarre i valori raccolti a laser acceso a quelli ottenuti con la sola pompa. Al risultato di questa prima operazione viene sottratto il valore del segnale di probe. In questo modo si isola il solo contributo di guadagno dato dal fenomeno dell'SBS.

In Figura 3.16 vengono mostrate le misure di guadagno in assenza di filtro FP nella pompa in funzione della potenza di pompa e della potenza di segnale. E' immediatamente possibile fare un'analisi sulla forma del profilo che si ottiene: sono evidenti due zone i cui picchi si trovano in posizione simmetrica rispetto alla lunghezza d'onda di pompa. In letteratura sono chiamate zona di guadagno (Brillouin Gain Spectrum, BGS) e zona di assorbimento (Brillouin Loss Spectrum, BLS) [31] e, definita la frequenza di pompa come  $\nu_p$ , e lo spostamento Brillouin come  $\nu_B$ , queste si trovano alle frequenze:



$$\nu_s = \nu_p - \nu_B \quad (3.2)$$

$$\nu_{As} = \nu_p + \nu_B \quad (3.3)$$

I picchi BGS e BLS si trovano a circa 10.6 GHz di distanza dalla frequenza del segnale di pompa, il primo a frequenze più basse (Red-Shifted), equazione 3.2, il secondo a frequenze più alte (Blue-Shifted), equazione 3.3. I valori di perdita nella zona BLS sono simili, in termini assoluti, ai valori di guadagno assunti nella zona BGS. Da notare anche come il picco dello scattering di Rayleigh, che si poteva apprezzare dall'immagine dello spettro del segnale di pompa retroriflesso in Figura 3.14, non dia nessun contributo al guadagno Brillouin: alla lunghezza d'onda di pompa il guadagno Brillouin è nullo. Inoltre si nota come i valori massimi di guadagno e di assorbimento, rispettivamente nelle zone BGS e BLS siano simili e che la loro crescita non sia lineare ma, anzi, al crescere della potenza di pompa tali valori massimi tendono ad avvicinarsi. Si nota come la larghezza a metà altezza (FWHM) del picco di guadagno e del picco di assorbimento si riducano all'aumentare della potenza di pompa impiegata per stimolare l'effetto SBS, come era stato già osservato in [13]. Di fatto il guadagno SBS alla frequenza centrale  $\nu_B$  cresce più rapidamente che lo stesso ai bordi del profilo; si ha quindi un incremento dell'altezza del profilo e una riduzione della larghezza a metà altezza dello stesso.

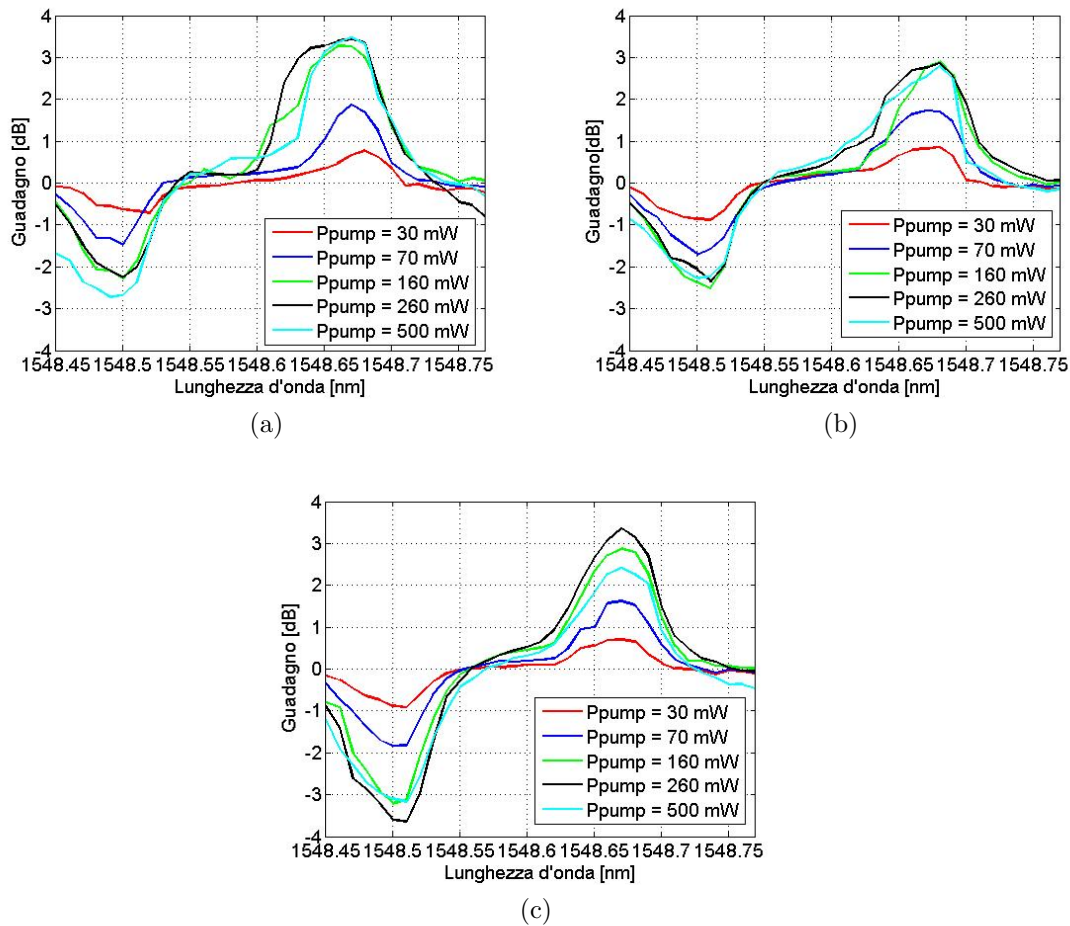


Figura 3.16: Misure spettrali di guadagno in assenza di filtro FP in pompa per varie potenze di segnale:  $50 \mu W$  (a),  $100 \mu W$  (b),  $500 \mu W$  (c).

In Figura 3.17 vengono mostrate le misure di guadagno nel caso, invece, di presenza di filtro FP come elemento sagomante del segnale di pompa. Si nota come valgano le considerazioni fatte precedentemente e come i valori di guadagno Brillouin, soprattutto per valori di potenza di pompa alti, siano migliori rispetto al caso precedente. Inoltre, anche i valori di assorbimento Brillouin sono maggiori nel caso di presenza di filtro FP.

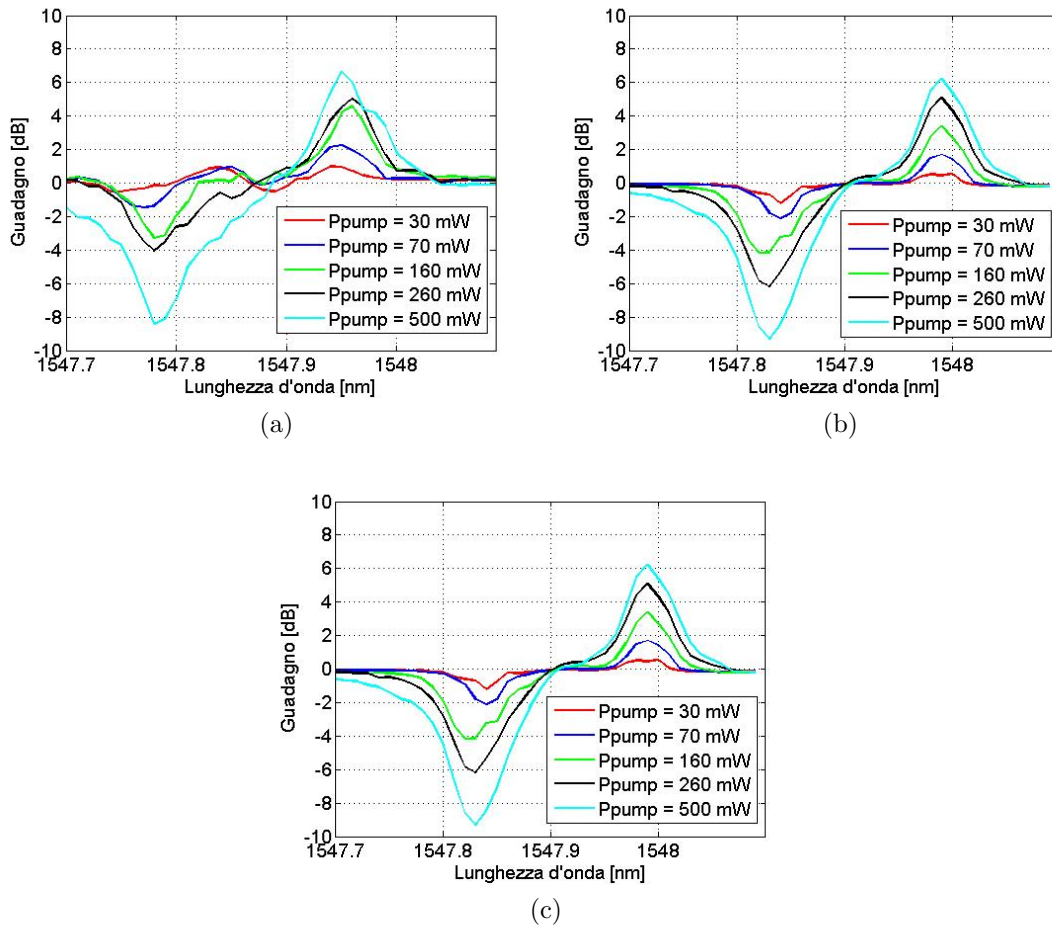


Figura 3.17: Misure spettrali di guadagno in presenza di filtro FP in pompa per varie potenze di segnale:  $50 \mu W$  (a),  $100 \mu W$  (b),  $500 \mu W$  (c).

Per chiarezza riportiamo, in Figura 3.18, i grafici di confronto dei valori massimi di guadagno Brillouin alla frequenza centrale della zona BGS per ogni potenza di pompa nei casi visti sopra, in presenza ed in assenza di filtro FP come elemento sagomante della pompa per le tre diverse potenze di segnale utilizzate.

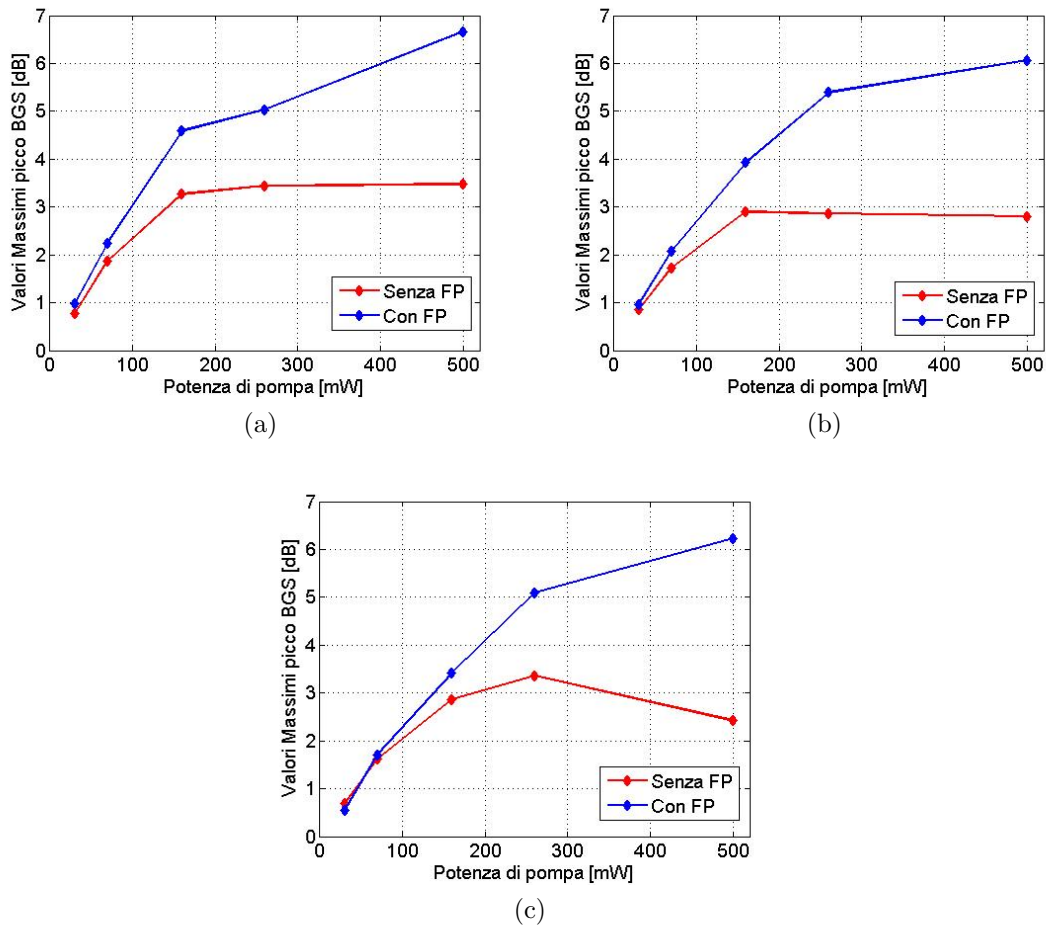


Figura 3.18: Valori massimi di guadagno Brillouin in assenza di filtro FP (linea rossa) e presenza di filtro FP (linea blu) in funzione della potenza di pompa per i valori di potenza di segnale in ingresso alla fibra DS da 9.9 km: 50  $\mu W$  (a), 100  $\mu W$  (b), 500  $\mu W$  (c).

Il confronto operato in Figura 3.18 mostra l'efficacia della pulizia dell'OSNR operata dal filtro FP e confermano come tale filtro utilizzato come elemento sagomante della pompa massimizzi l'effetto di guadagno e di assorbimento Brillouin. Si nota, inoltre, che per valori di potenza di pompa elevati il guadagno satura intorno ai 7 dB.

Infine, si è valutato l'allargamento della larghezza a metà altezza della pompa in funzione della sua potenza. Si è indagato questo aspetto in quanto è noto come una delle cause fondamentali di tale allargamento sia l'effetto di self-phase modulation (SPM) per il quale si ha una dipendenza tra intensità del segnale e indice di rifrazione in mezzi non lineari come la fibra ottica. SPM è, infatti, un

effetto non lineare causato dall'interazione della luce con il mezzo in cui si propaga, che influisce principalmente sulla propagazione di segnali con banda molto stretta come possono essere i laser e che induce una variazione dell'indice di rifrazione del mezzo, quest'ultima dovuta all'Effetto Kerr, la quale produce un cambiamento della fase dell'impulso stesso che si traduce in un cambiamento dello spettro delle frequenze del segnale.

Dall'esperimento condotto si è notato come la FWHM spettrale del segnale di pompa in uscita alla fibra aumenti con la potenza in ingresso, mentre la FWHM del segnale riflesso si mantiene praticamente costante. Questi andamenti sono riportati in Figura 3.19.

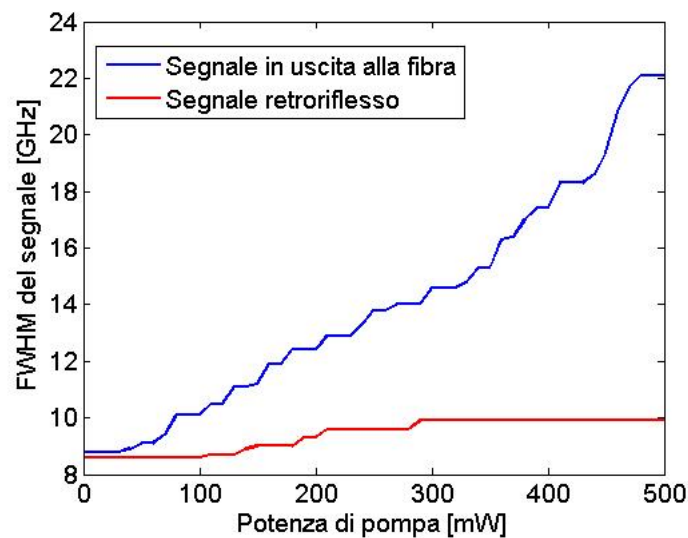


Figura 3.19: Andamento ottenuto sperimentalmente della FWHM del segnale di pompa al termine della fibra (linea blu) e del segnale retroriflesso (linea rossa) in funzione della potenza di pompa.

Si nota come l'aumento della FWHM inizi per valori di potenza di pompa appena superiori ai 50 mW.

In Figura 3.20 viene fatto un confronto fra segnale di pompa retroriflesso (linea rossa) e segnale di pompa in uscita alla fibra (segnale verde). Si nota sul segnale retroriflesso il picco Brillouin e l'allargamento della FWHM del segnale di pompa in uscita alla fibra DS da 9.9 km.

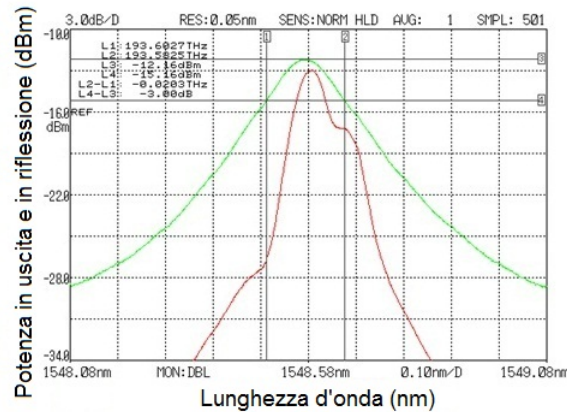


Figura 3.20: Confronto grafico tra onda di pompa retroriflessa (linea rossa) e onda di pompa alla fine della fibra (linea verde) per potenze di pompa di 500 mW.

E' noto come l'entità del guadagno Brillouin abbia una dipendenza forte dalla polarizzazione [32]. Il guadagno, dunque, si massimizza quando, attraverso dei rotatori di polarizzazione, ottenuti con anelli in fibra che realizzano la funzione equivalente a lamine ritardatrici, si allinea, per quanto possibile, la polarizzazione del segnale di probe con quella del segnale di pompa. Questo si traduce in un abbassamento della soglia Brillouin. La relazione che lega soglia Brillouin e polarizzazione è l'equazione 1.10 nel capitolo 1, in cui il parametro  $K$  è una costante determinata dai gradi di libertà dello stato di polarizzazione e vale 1 se la polarizzazione della pompa coincide con la polarizzazione del segnale in ingresso alla fibra [32].

In Figura 3.21 è mostrato quindi il setup sperimentale in cui è stato introdotto un Polarization Controller (PC) tra il diodo laser e l'attenuatore variabile. L'introduzione del PC favorisce un miglioramento in termini di guadagno Brillouin, quindi, sono state ripetute le misurazioni di guadagno per la fibra DS da 9.9 km dopo che, manualmente, si è massimizzato il guadagno on-off alla lunghezza d'onda corrispondente allo spostamento Brillouin. In Figura 3.21 vengono mostrati gli spettri di guadagno Brillouin per valori di segnale pari a 50  $\mu$ W, 100  $\mu$ W e 500  $\mu$ W in tali condizioni.

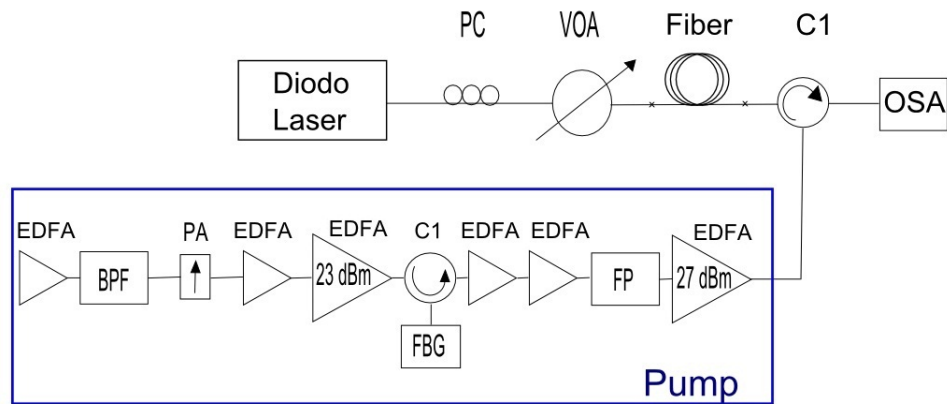


Figura 3.21: *Setup sperimentale implementato per l'ottimizzazione del guadagno Brillouin che vede l'introduzione di un Polarization Controller (PC).*

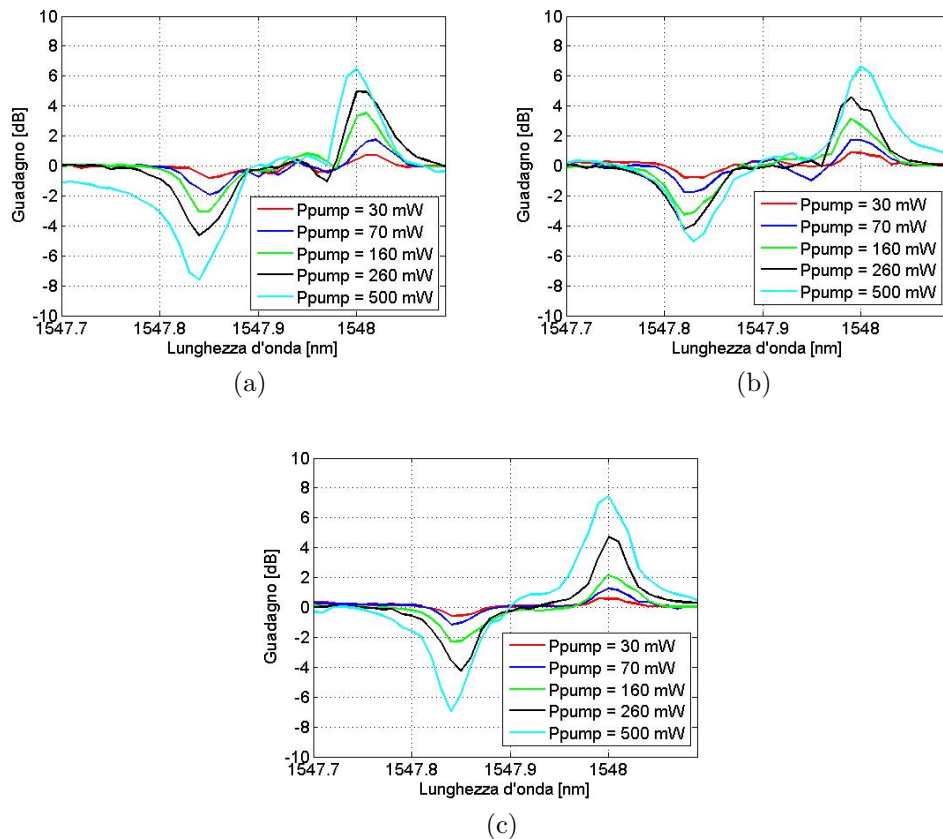
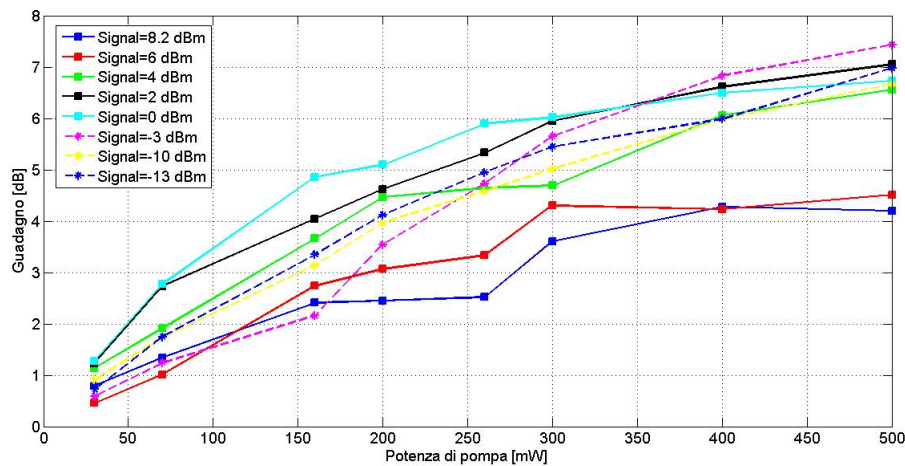


Figura 3.22: *Misure spettrali di guadagno in presenza di filtro FP in pompa e di Polarization Controller per varie potenze di segnale: 50  $\mu$ W (a), 100  $\mu$ W (b), 500  $\mu$ W (c).*

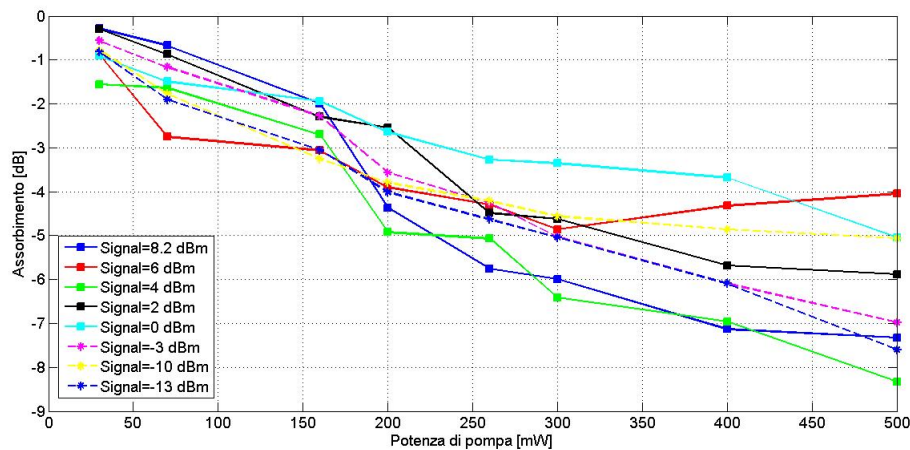
Anche per questo caso sono valide le considerazioni fatte nei precedenti capoversi circa la forma del profilo e la crescita dei valori massimi di guadagno e di assorbimento. Analizzando in dettaglio tutti i valori ottenuti si nota come i valori massimi, per potenze di pompa piccole e molto piccole, si mantengano pressochè invariati rispetto al caso in cui non si era introdotto il PC, mentre come per valori alti di potenza di pompa i valori migliorino. In definitiva, le polarizzazioni delle onde contropropaganti ruotano all'interno della fibra, che non è a mantenimento di polarizzazione, generando un'effetto di media, data la grande distanza che percorrono, che riduce il potenziale miglioramento del PC.

Giacché come valori di guadagno o di assorbimento solitamente si prendono i valori di picco, in Figura 3.23 si mostrano i valori di guadagno e di perdita riferiti alle tre situazioni di Figura 3.22 (linee tratteggiate) e ad altri valori di potenza di segnale di probe più elevati (linee continue).





(a)



(b)

Figura 3.23: Valori massimi del picco di guadagno BGS (a), e valori minimi del picco di perdita BLS (b) in funzione della potenza di pompa.

Questi risultati apportano sostanziali miglioramenti al precedente lavoro di tesi [16] in cui si erano condotte attività simili. Per la stessa fibra ottica utilizzata (DS da 9.9 km di lunghezza), si ha un miglioramento del valore di guadagno dell'85% circa (4.09 dB contro i 7.43 dB) immettendo in fibra una potenza di segnale cinque volte inferiore (2.5 mW contro i 0.5 mW), si nota come la linearità della crescita del guadagno sia più evidente e mantenuta anche per valori di potenza di pompa alti e inoltre si sono ottenute informazioni anche sulla zona BLS del profilo Brillouin.

La stessa misura è stata ripetuta anche per le fibre che, nei precedenti paragrafi, hanno mostrato una soglia Brillouin bassa, rispettivamente in Figura 3.24 la fibra FL da 24.25 km e in Figura 3.25 la TW-SMF da 19.3 km.

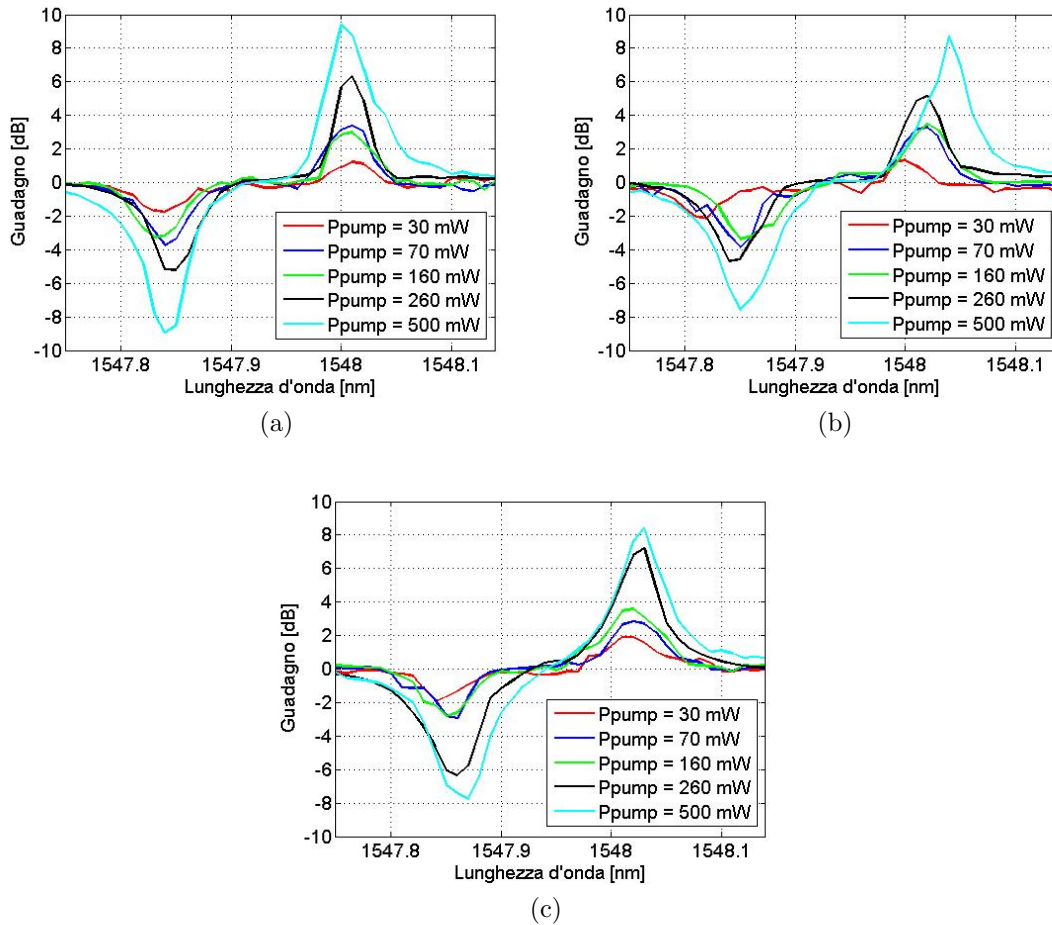


Figura 3.24: Misure spettrali di guadagno per le fibre FL da 24.25 km per varie potenze di segnale: 50  $\mu$ W (a), 100  $\mu$ W (b), 500  $\mu$ W (c).

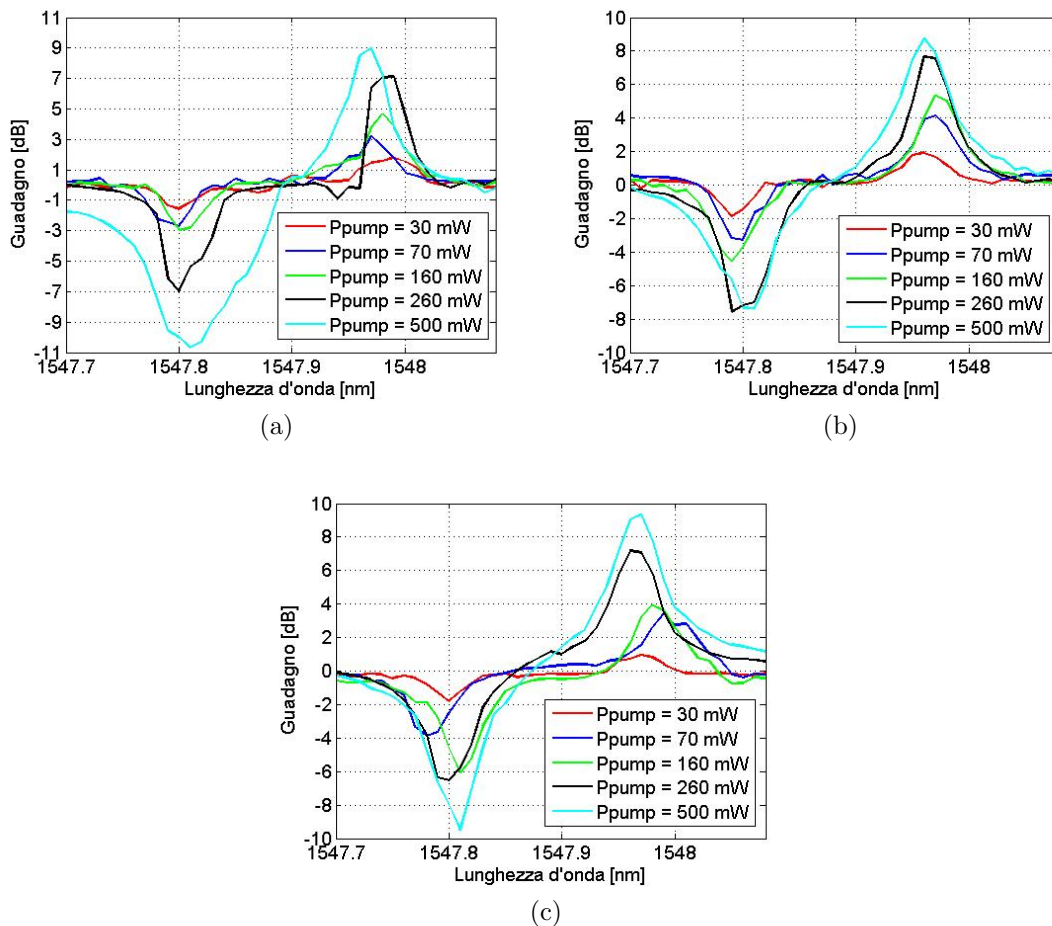


Figura 3.25: Misure spettrali di guadagno per le fibre TW-SMF da 19.3 km per varie potenze di segnale:  $50 \mu\text{W}$  (a),  $100 \mu\text{W}$  (b),  $500 \mu\text{W}$  (c).

Si nota come i valori di guadagno di entrambe le fibre, ma in particolare per la TW-SMF siano fino a 3 dB migliori rispetto alla DS. Questo è imputabile alla maggiore lunghezza della fibra e al basso valore della soglia Brillouin. E' possibile ottenere dei miglioramenti così evidenti in fibre SMF tanto lunghe perchè, diversamente dalle DS comuni, le fibre di tipo Free Light hanno, in genere, un valore di birifrangenza minore e quindi due fasci contropropaganti possono mantenere più a lungo l'allineamento tra le polarizzazioni parallele. Con fibre Free Light, venendo a mancare l'effetto di "media" della birifrangenza elevata, assume quindi particolare importante l'allineamento iniziale della polarizzazione del fascio di pompa e di segnale.

Per quanto riguarda la forma del profilo di guadagno/assorbimento Brillouin

è possibile effettuare su di essa un'ulteriore discussione di tipo quantitativo sulla massima banda utilizzabile dell'SBS ispirata ai lavori presentati in [33, 34]. Infatti, in Figura 3.26(a) si mostra la forma dell'intero profilo Brillouin ottenuto nel caso di singola pompa, mentre nella Figura 3.26(b) e nella Figura 3.26(c), si dimostra come la forma di entrambi i picchi dello spettro del profilo Brillouin, rispettivamente BLS e BGS, siano approssimabili con delle gaussiane. Questo era prevedibile giacché il filtro usato per sagomare la pompa utilizzata per stimolare l'effetto è un Fiber Bragg Grating di forma gaussiana appunto.

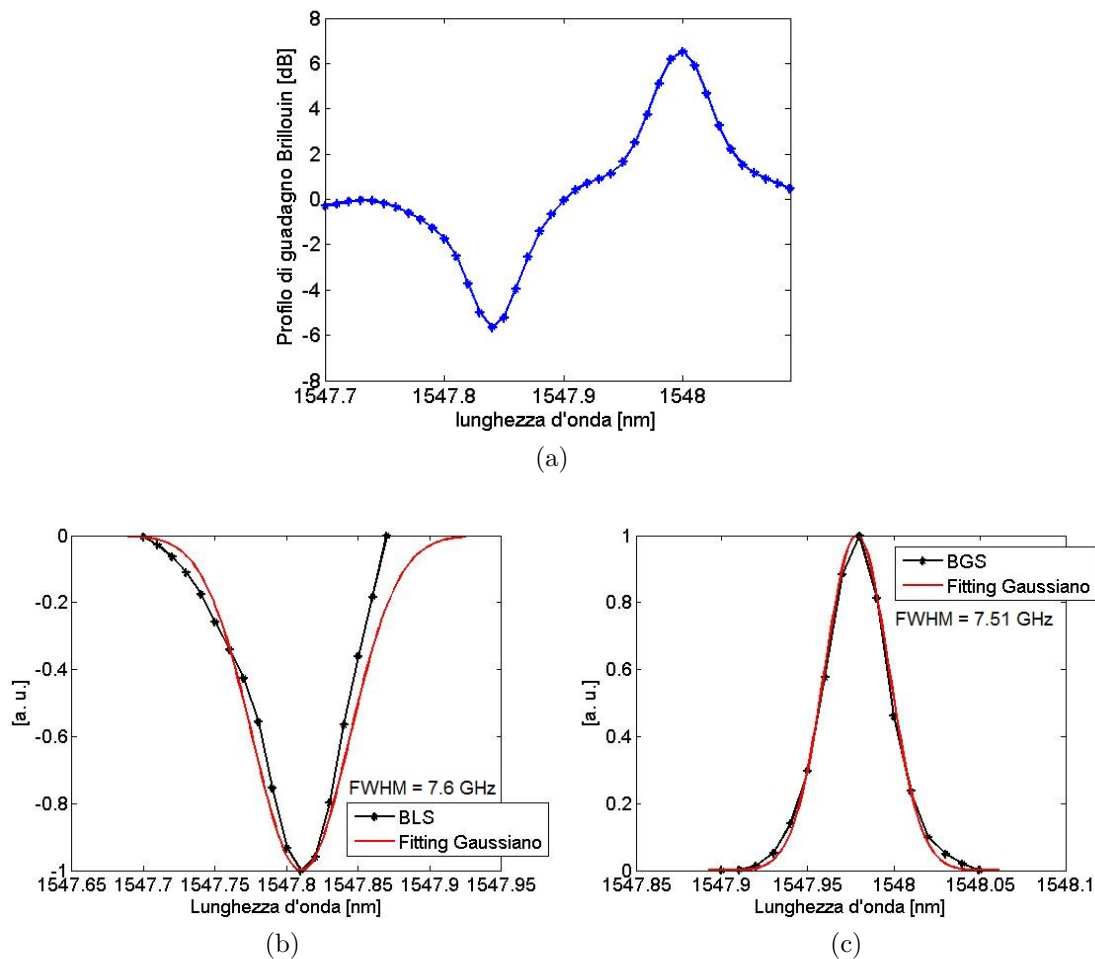


Figura 3.26: Spettro di guadagno (BGS e BLS) Brillouin (a), fitting gaussiano (linea rossa) dei picchi (linea nera) BLS (b) e BGS (c).

Analizzando la figura 3.26(a) si arriva intuitivamente a notare come non sia possibile allargare arbitrariamente la banda dello spettro Brillouin in quanto superato un certo valore limite i picchi di guadagno ed assorbimento si sovrapporreb-

bero. Dato inoltre che picco di guadagno e picco di assorbimento sono simmetrici rispetto alla lunghezza d'onda di pompa e sono da essa spostati esattamente della quantità chiamata frequenza Brillouin, questa è all'incirca il valore limite della banda nel caso di utilizzo di una sola pompa.

In altri lavori [35,36], si è dimostrata la possibilità di allargare ulteriormente la banda semplicemente andando ad utilizzare due pompe a banda larga le cui frequenze centrali differiscono esattamente di due volte la Brillouin Frequency Shift. In questo modo il picco di guadagno di una pompa si sovrappone al picco di assorbimento della seconda, mentre il picco di assorbimento della prima pompa può essere compensato con il picco di guadagno di una eventuale altra pompa. Se in questa regione il picco di guadagno SBS è più largo del picco di assorbimento si viene a generare un nuovo picco di guadagno. Questo, combinato con il primo picco di guadagno si trasforma in un nuovo picco consentendo una più ampia banda, fino a circa 25 GHz.

### 3.4 Demodulazione di fase tramite effetto Brillouin

Per questa seconda parte del lavoro di tesi si è allestito un nuovo setup, mostrato in Figura 3.27, che sfrutta, per la generazione della pompa Brillouin, lo stesso setup di Figura 3.21, ma in più prevede un trasmettitore DPSK (Differential Phase-Shift Keying) formato da un DFB modulato esternamente in fase a 10 Gbit/s mediante un modulatore elettroottico Mach-Zehnder in configurazione push-pull, funzionante tra due massimi di trasmissione per ottenere la profondità di modulazione di  $\pi$ . Il modulatore ottico è pilotato da un Pattern Generator che genera sequenze pseudocasuali (Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS) di lunghezza  $2^{31} - 1$  amplificate elettricamente da un Driver con banda pari a 6 GHz in modo da ottenere i necessari livelli di tensione richiesti dal modulatore. Il segnale così modulato passa attraverso uno stadio di preamplificazione EDFA ed un polarization controller (PC). Mediante un attenuatore variabile (VOA) e un accoppiatore 99/1 collegato ad un multimetro è possibile monitorare la potenza di segnale. La pompa viene immessa in fibra (DS da 9.9 km) mediante il circolatore C2 in direzione contro propagante rispetto al segnale modulato. Il segnale così demodulato viene, quindi, ricevuto: viene filtrato mediante un filtro passabanda

(Bandpass Filter, BPF) sintonizzabile in lunghezza d'onda con larghezza a metà altezza FWHM pari a 0.3 nm e rivelato da un fotodiodo (PD) con banda elettrica pari a 13 GHz. Al fotodiodo sono collegati un Error Detector per la misura del Bit Error Rate (BER) e un Oscilloscopio Campionatore con testina campionatrice a 30 GHz che riceve il segnale di clock dal Pattern Generator e visualizza il diagramma ad occhio del segnale ricevuto.

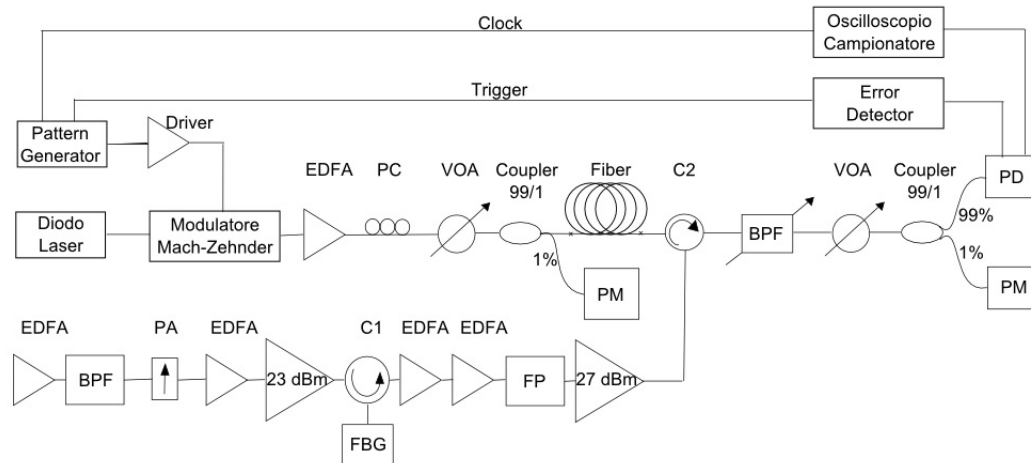


Figura 3.27: *Setup sperimentale implementato per la rivelazione diretta della conversione fase-ampiezza.*

In Figura 3.28 vengono mostrate le immagini, prese da un OSA, dei segnali nelle situazioni descritte nel capoverso precedente. In Figura 3.28(a) si mostra il segnale modulato in fase all'uscita del Mach-Zehnder: si nota il lobo principale alla frequenza portante di modulazione e i successivi lobi laterati rappresentanti le altre componenti spettrali del segnale. In Figura 3.28(b) viene mostrato il segnale di pompa in riflessione quando la potenza di pompa è portata a 500 mW: si nota il picco dello scattering di Rayleigh alla frequenza di pompa e il picco dell'effetto Brillouin a frequenza maggiore. Come detto nel Paragrafo 1.3, per ottenere una conversione fase-ampiezza, si rende necessario filtrare il segnale modulato in fase con filtri idonei a rompere l'equilibrio dei battimenti che si avrebbero se lo stesso segnale fosse fotorivelato direttamente. Le Figure 3.28 (c) e (d) mostrano in che modo opera il filtraggio sullo spettro del segnale modulato selezionando appunto solo alcune componenti spettrali. Queste zone agiscono come filtri stretti sul segnale modulato e le figure mostrano come sia evidente la presenza di una sola

componente spettrale oltre al lobo della portante. La frequenza di tali componenti è riconducibile alla frequenza di picco della zona del profilo Brillouin utilizzata come filtro.

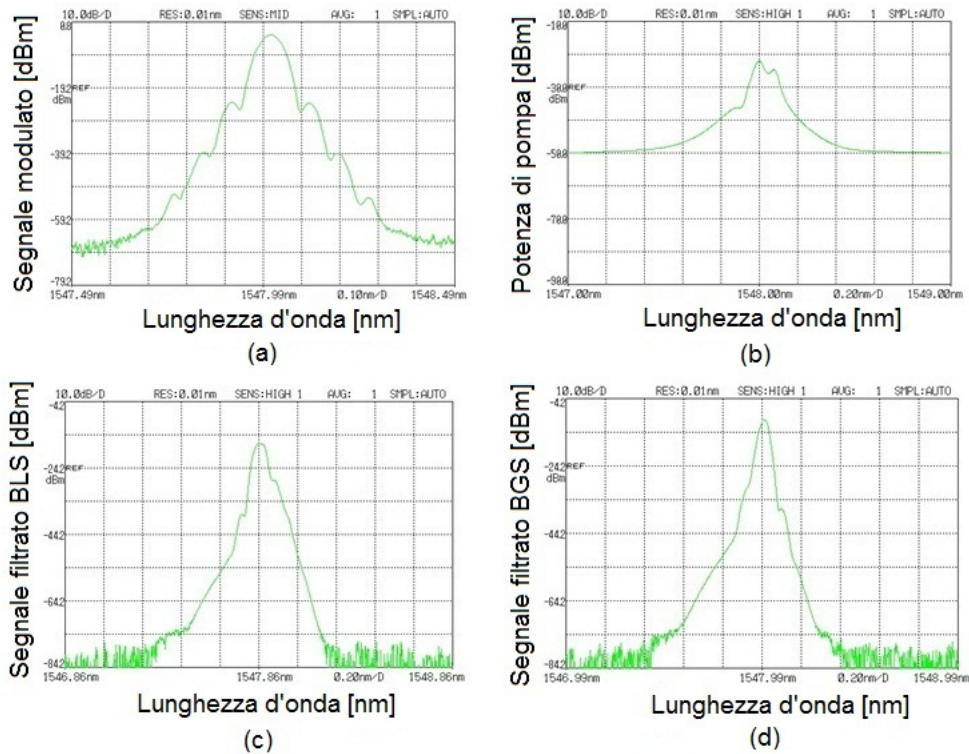


Figura 3.28: Segnale modulato in fase dal modulatore esterno Mach-Zehnder (a), fascio di pompa a 500 mW contropropagante in fibra (b), segnale in ingresso al fotodiodo demodulato e filtrato con filtro sintonizzato sulla zona di perdita BLS (c), e sulla zona di guadagno BGS (d).

### 3.5 Diagrammi ad occhio e curve di BER: risultati sperimentali e commenti

In questo paragrafo verranno mostrati i risultati sperimentali, in termini di diagrammi ad occhio e relative curve di BER, riguardanti la demodulazione ottenuta mediante filtraggio Brillouin. In particolare sono state confrontate diverse configurazioni per valori di pompa e di segnale diverse. Si sono investigati i casi di presenza ed assenza di filtro Fabry-Perot, ovvero con valori diversi di OSNR di pompa. Inoltre, visto che come filtri Brillouin verranno utilizzate le zone di gua-

dagno e di perdita del profilo Brillouin (BLS e BGS), e che le caratteristiche di queste zone vengono determinate dalla potenza del segnale di pompa immesso in fibra, verranno investigate varie potenze di pompa (70 mW, 160 mW, 200 mW, 250 mW, 300 mW, 400 mW, 500 mW) al fine di individuare quella che fornisce i migliori risultati di qualità del segnale ricevuto. Come mezzo non lineare per la generazione del filtro Brillouin si è utilizzata la fibra DS da 9.9 km.

In Figura 3.29(a) è riportato il diagramma ad occhio del segnale modulato quando non viene applicato al segnale nessun filtraggio che permetterebbe la demodulazione. Si nota come non si abbia una intensità costante, ma, dato che il modulatore utilizzato è di tipo Mach-Zehnder, si notano delle rapide transizioni in corrispondenza dei passaggi per lo zero della funzione di trasferimento del modulatore stesso. In Figura 3.29(b), invece, è presentato il diagramma ad occhio del segnale demodulato utilizzando il Fiber Bragg Grating come ricevitore anziché come elemento sagomante del segnale di pompa. Tale segnale è stato utilizzato per misurare la curva di BER di riferimento per il confronto delle prestazioni di demodulazione quando sia impiegato l'SBS come filtro selettore per ottenere conversione fase-ampiezza.

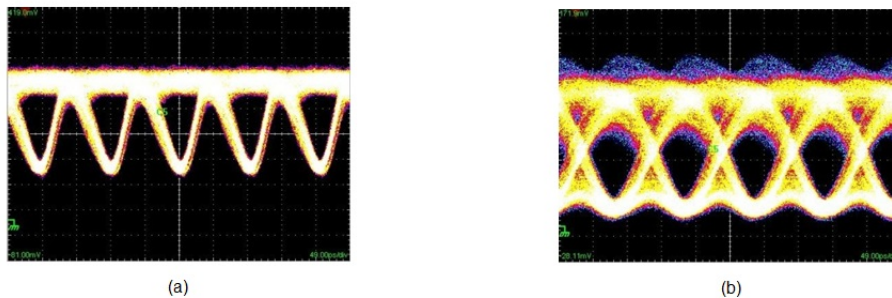


Figura 3.29: *Diagramma ad occhio del segnale non demodulato (a), diagramma ad occhio del segnale demodulato attraverso un filtro Fiber Bragg Grating (b).*

In Figura 3.30 ((a)-(g)) sono riportati i diagrammi ad occhio del segnale di fase demodulato tramite il filtro SBS risultante dalla zona BGS al variare della potenza di pompa da 70 mW (a) fino a 500 mW (g).

Per ottenere tale demodulazione è stato necessario sintonizzare accuratamente la frequenza del segnale in modo che corrispondesse allo shift Brillouin della fibra DS, misurato in precedenza, che è di 10.569 GHz. E' stato, pertanto, indispensabile regolare la frequenza del segnale in modo da ottimizzare la conversione della



modulazione di fase in ampiezza attraverso il corretto allineamento spettrale tra segnale e pompa.

In Figura 3.31 ((a)-(g)) sono invece riportati gli analoghi diagrammi a occhio ottenuti filtrando il segnale con la zona BLS. Chiaramente in questo caso, la frequenza del laser è 10.6 GHz superiore alla frequenza di pompa.

Per entrambi i casi, le immagini sono state prese per valori di potenza di segnale in ingresso alla fibra pari a 8.2 dBm e di potenza in ingresso al blocco di ricezione pari a -1dBm.

Dai diagrammi mostrati in Figura 3.30 si capisce come la presenza della pompa permetta effettivamente la conversione dal formato di fase ad ampiezza costante ad un formato modulato in ampiezza e come il rapporto di estinzione (Extinction Ratio, ER) migliori all'aumentare della potenza di pompa, confermando di fatto l'andamento emerso dalle simulazioni esposte nel capitolo 2.

Più la potenza di pompa è alta, più il filtro SBS è alto e migliori sono i valori di ER, quindi si potrebbe affermare che la condizione migliore per operare la demodulazione sia in condizioni di potenza di pompa molto alta. In realtà, si nota come il rumore dovuto al battimento coerente fra segnale e backscattering di Rayleigh che è la causa dominante di rumore nel caso di pompa allargata [12], aumenta all'aumentare della potenza di pompa. In più, come già accennato, aumentando la potenza di pompa, il guadagno alla frequenza centrale cresce più velocemente rispetto a quello delle frequenze laterali. L'effetto di questa dipendenza è, quindi, una diminuzione della larghezza della banda di guadagno Brillouin [13] al crescere della potenza di pompa. Un segnale modulato filtrato con banda eccessivamente stretta subisce delle distorsioni nella forma dell'impulso con un conseguente peggioramento delle prestazioni al ricevitore [30]. Dalle immagini dei diagrammi ad occhio ottenute sperimentalmente si evince come effettivamente la forma dell'impulso rappresentato venga leggermente distorta per potenze di pompa pari a 400 mW e 500 mW.

Dai diagrammi mostrati in Figura 3.31 si nota come anche con la zona BLS utilizzata come filtro si ottenga la conversione ma solo per potenze di pompa superiori ai 160 mW. Anche per questa situazione si misura un miglioramento dei valori di ER all'aumentare della potenza di pompa. Inoltre non si riscontra nè un aumento dell'apertura dell'occhio, come per il caso BGS, nè una deformazione della forma per potenze di pompa alte. Quello che, invece, si nota è un lieve aumento del rumore all'aumentare della potenza di pompa.

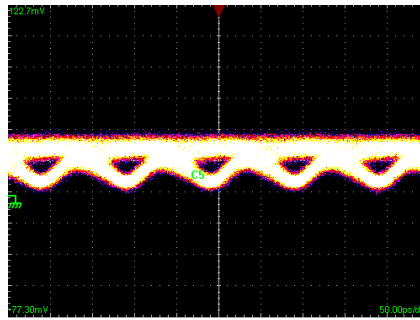
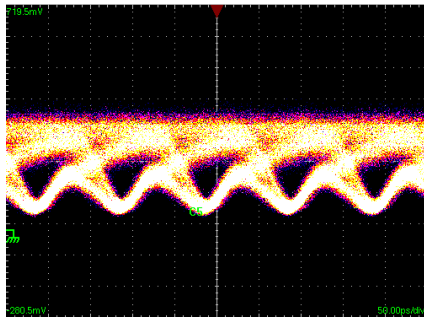
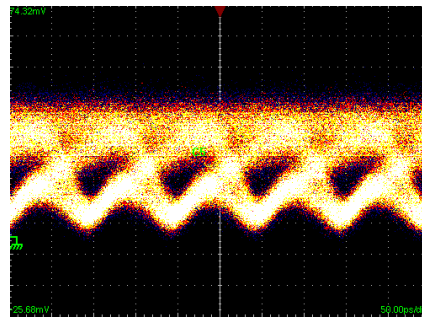
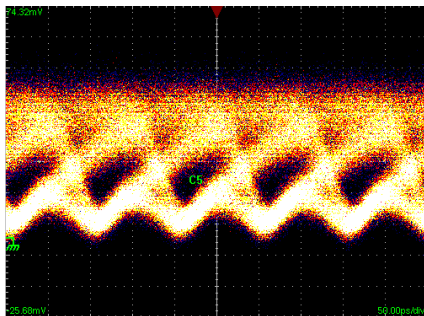
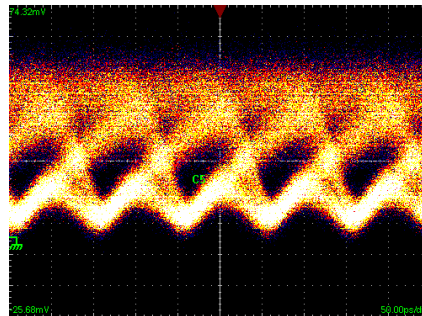
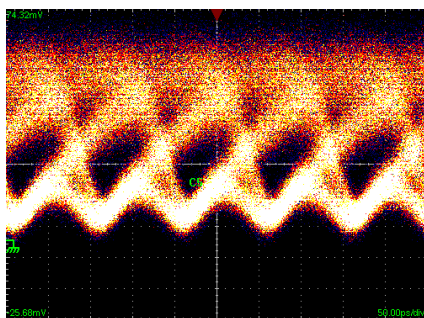
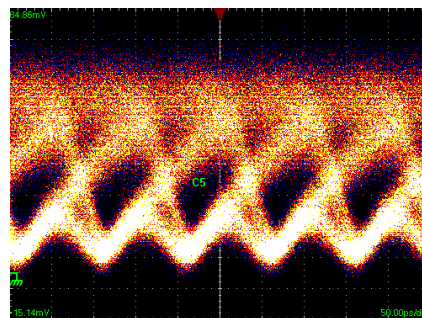
(a)  $P_{pompa} = 70 \text{ mW}$ (b)  $P_{pompa} = 160 \text{ mW}$ (c)  $P_{pompa} = 200 \text{ mW}$ (d)  $P_{pompa} = 250 \text{ mW}$ (e)  $P_{pompa} = 300 \text{ mW}$ (f)  $P_{pompa} = 400 \text{ mW}$ (g)  $P_{pompa} = 500 \text{ mW}$ 

Figura 3.30: Diagrammi ad occhio della demodulazione ottenuta utilizzando il picco BGS per vari valori di potenza di pompa: 70 mW (a), 160 mW (b), 200 mW (c), 250 mW (d), 300 mW (e), 400 mW (f), 500 mW (g).

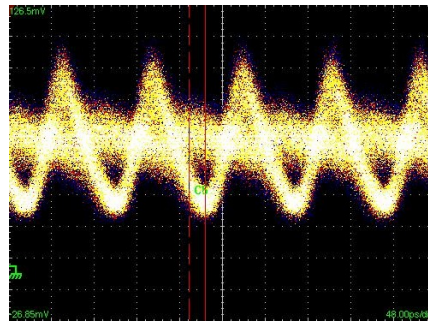
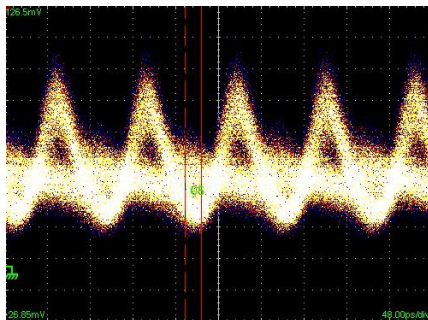
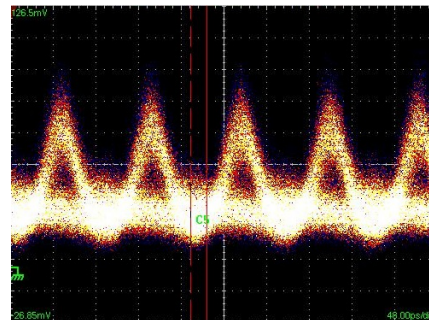
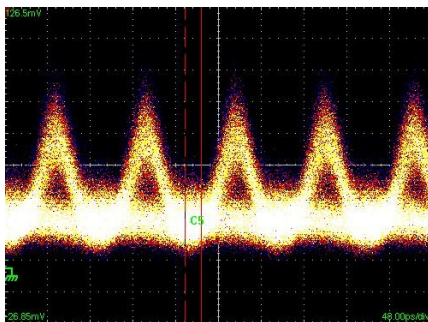
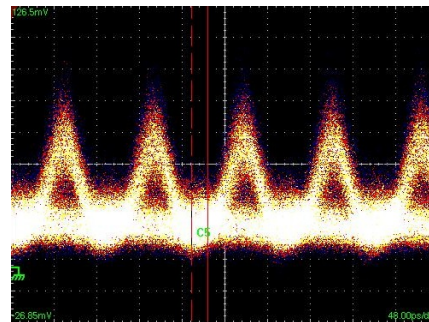
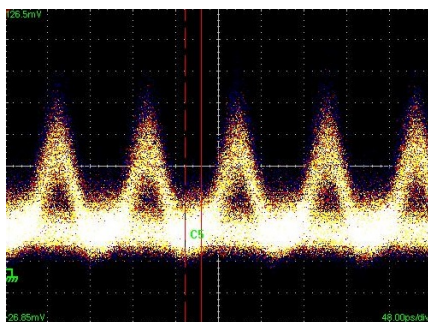
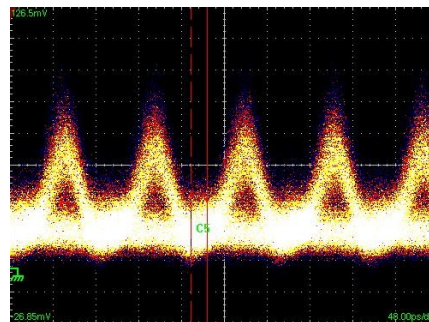
(a)  $P_{pompa} = 70 \text{ mW}$ (b)  $P_{pompa} = 160 \text{ mW}$ (c)  $P_{pompa} = 200 \text{ mW}$ (d)  $P_{pompa} = 250 \text{ mW}$ (e)  $P_{pompa} = 300 \text{ mW}$ (f)  $P_{pompa} = 400 \text{ mW}$ (g)  $P_{pompa} = 500 \text{ mW}$ 

Figura 3.31: Diagrammi ad occhio della demodulazione ottenuta utilizzando il picco BLS per vari valori di potenza di pompa: 70 mW (a), 160 mW (b), 200 mW (c), 250 mW (d), 300 mW (e), 400 mW (f), 500 mW (g).

In Figura 3.32 sono riportate le curve di BER misurate nel caso di demodulazione utilizzando la zona BGS del profilo Brillouin. Si nota come il migliore risultato si ottenga per potenza di pompa pari a 200 mW. Dopodichè le prestazioni degradano all'aumentare della potenza di pompa. Ciò è dovuto all'interferenza intersimbolica (ISI) risultante dallo stringimento della FWHM del filtro all'aumentare della potenza di pompa, come già detto nei commenti delle precedenti figure e nel capitolo teorico. A questa si aggiunge il rumore dovuto allo scattering di Rayleigh che, come abbiamo detto è maggiore all'aumentare della potenza di pompa. La potenza di pompa di 200 mW è quindi il compromesso migliore tra ER elevato, ISI e rumore.

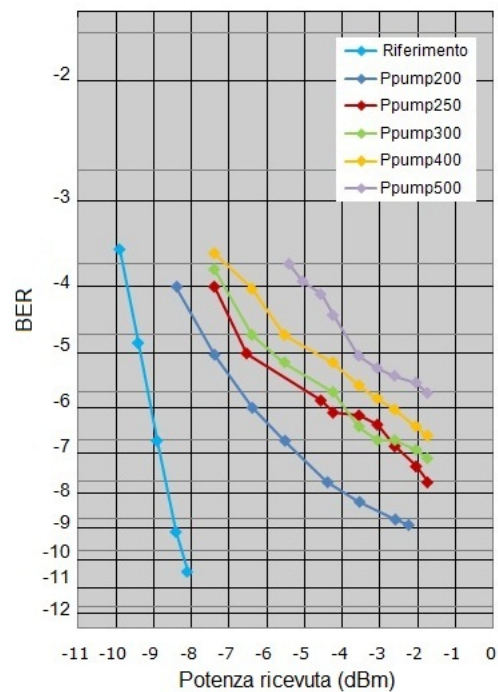


Figura 3.32: Curve di BER per la demodulazione ottenuta utilizzando la zona BGS al variare della potenza di pompa.

Per quanto riguarda, invece, la demodulazione ottenuta con la zona BLS del profilo Brillouin, non è stato possibile misurare delle curve di BER in quanto il principale ostacolo a questa tecnica di demodulazione è sicuramente la presenza marcata di rumore al ricevitore dovuto al backscattering di Rayleigh. Inoltre, essendo il BLS una zona di assorbimento e non di guadagno, è stata notata la necessità di un valore di potenza di segnale in ingresso al ricevitore decisamente

più alto per poter ottenere dei risultati in termini di BER. Questo si può ottenere filtrando meglio il segnale in ingresso al blocco di ricezione in modo da cancellare maggiormente il rumore generato dal backscattering di Rayleigh. Solo per potenza di pompa pari a 200 mW si è stati in grado di ottenere un valore di BER di  $10^{-4}$ . Questo valore definisce tale potenza di pompa come la migliore per ottenere la demodulazione sia nel caso di utilizzo della zona BGS che di utilizzo della zona BLS.

Successivamente si è eliminato il filtro Fabry-Perot dallo stadio di generazione del segnale di pompa.

In Figura 3.33 sono riportati i diagrammi ad occhio per la demodulazione con BGS per alcuni valori di potenza di pompa (200 mW, 250 mW, 300 mW, 400 mW e 500 mW). Dai questi diagrammi ad occhio si nota come si abbia conversione e come non si riscontri maggiore rumore nelle condizioni di potenze di pompa alte. D'altro canto non si ha nemmeno un miglioramento del valore di ER all'aumentare della potenza di pompa.

Successivamente in Figura 3.34 viene riportato lo studio in termini di BER per questa situazione. Dalle curve di BER si osserva come in assenza del filtro Fabry-Perot quale elemento sagomante della pompa si abbia una penalità di circa 2 dB rispetto al caso precedente in cui era presente il filtro. Da notare come l'ottimo si abbia, ancora, per potenza di pompa pari a 200 mW.

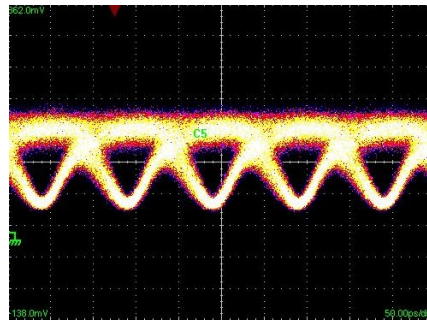
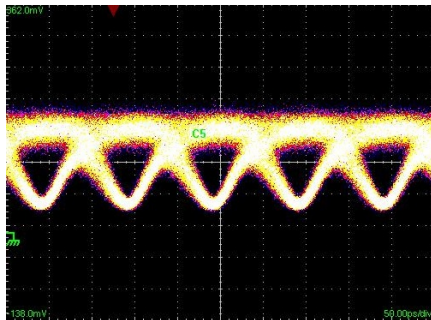
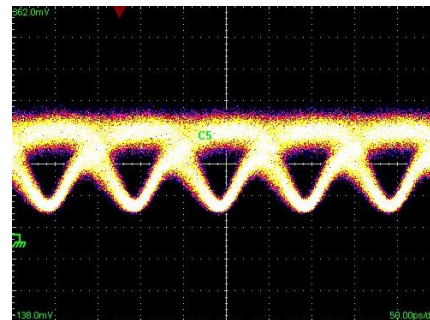
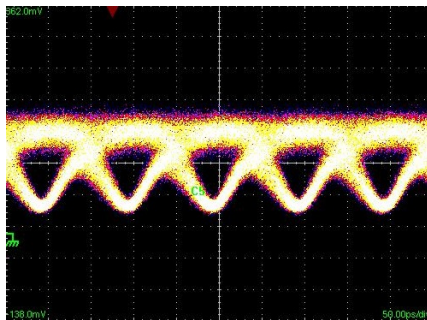
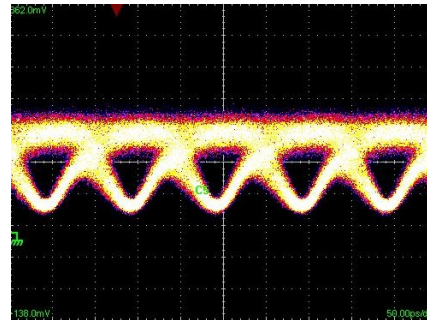
(a)  $P_{pompa} = 200 \text{ mW}$ (b)  $P_{pompa} = 250 \text{ mW}$ (c)  $P_{pompa} = 300 \text{ mW}$ (d)  $P_{pompa} = 400 \text{ mW}$ (e)  $P_{pompa} = 500 \text{ mW}$ 

Figura 3.33: Diagrammi ad occhio per demodulazione ottenuta utilizzando il picco BGS in assenza del filtro FP in pompa per vari valori di potenza di pompa: 200 mW (a), 250 mW (b), 300 mW (c), 400 mW (d), 500 mW (e).

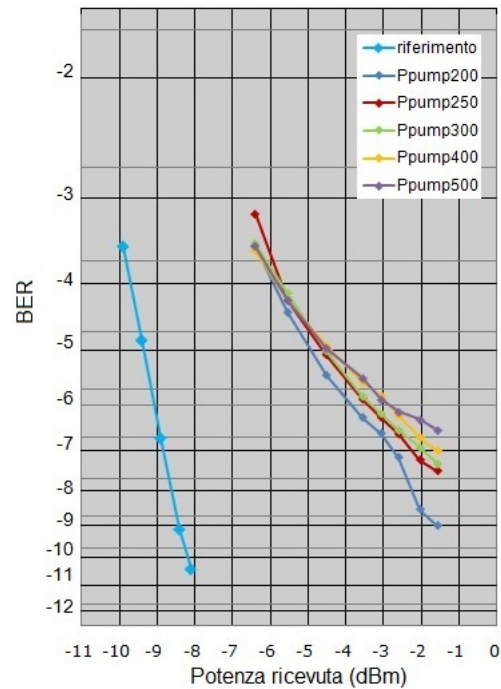


Figura 3.34: Curve di BER per la demodulazione ottenuta utilizzando la zona BGS al variare della potenza di pompa ed in assenza del filtro FP.

In Figura 3.35 è riportato il diagramma ad occhio per la demodulazione ottenuta utilizzando come filtro la zona BLS in caso di assenza di filtro FP e nella situazione ottima per quanto riguarda la potenza di pompa.

Nel caso BLS è ancora più evidente come senza il filtro FP, utilizzato nella costituzione della pompa, non si abbia un'efficiente conversione fase-ampiezza. Il diagramma appare decisamente rumoroso e non è possibile effettuare misure di BER. Ciò conferma che il filtro Fabry-Perot sia effettivamente un elemento indispensabile nel setup di pompa, senza il quale si avrebbero valori di guadagno e assorbimento Brillouin inferiori e troppo rumore per ottenere la ricercata conversione fase-ampiezza per la demodulazione di fase.

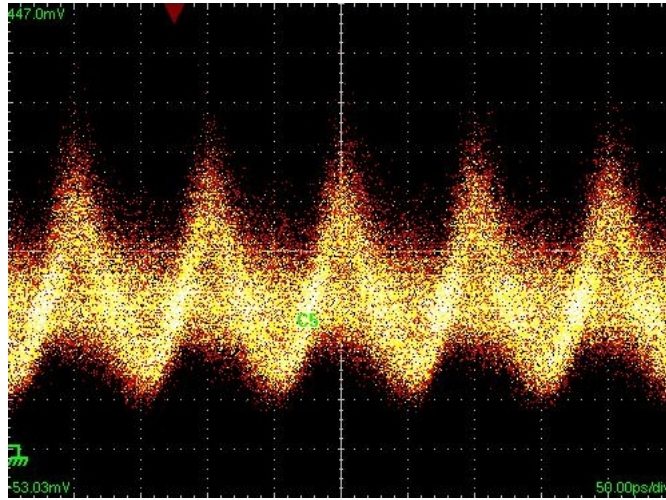


Figura 3.35: *Diagramma ad occhio del segnale demodulato ottenuto utilizzando il picco BLS in assenza di filtro FP in pompa per potenza di pompa pari a 200 mW.*

In definitiva per la fibra DS da 9.9 km presa in considerazione si è giunti a definire sperimentalmente come la condizione ottima per ottenere le migliori prestazioni di demodulazione sia ad una potenza di pompa pari a 200 mW. Pompa che vede la presenza del filtro Fabry-Perot.

### 3.6 Conclusioni

Inizialmente si è investigato il valore di soglia Brillouin in continua per diverse fibre a nostra disposizione al fine di identificare i mezzi non lineari con la soglia più bassa e quindi più adatti al manifestarsi dell'effetto SBS. Si sono, dunque, isolate tre fibre differenti per tipologia, dispersione cromatica e lunghezza, DS da 9.9 km, FL da 24.25 km e TW-SMF da 19.3 km, che presentano la soglia più bassa.

Successivamente si è svolta un'attività finalizzata alla caratterizzazione dettagliata del setup sperimentale di una pompa che generasse un segnale incoerente a partire da luce ASE, adeguatamente filtrata ed amplificata, che offrisse i migliori risultati in termini di guadagno Brillouin. Si è notato come non sia possibile prescindere da un filtro Fabry-Perot come elemento sagomante della pompa e come sia indispensabile un polarization controller per allineare la polarizzazione del segnale di probe con quella della pompa. Si sono, dunque, ricavati i profili di guadagno Brillouin per le tre fibre in esame.



E' stato notato come la forma di tale profilo presentasse una zona di guadagno (BGS) ed una zona di assorbimento (BLS) in posizioni simmetriche rispetto alla frequenza di pompa e spostate da questa esattamente del Brillouin frequency Shift.

Si sono raccolti i valori massimi di guadagno e di assorbimento in tali zone in funzione della potenza di pompa impiegata. In definitiva si è dimostrato sperimentalmente come sia possibile amplificare o attenuare un segnale utilizzando l'effetto Brillouin stimolato da un segnale di pompa incoerente semplicemente sintonizzando il segnale di probe alla frequenza centrale rispettivamente della zona BGS e della zona BLS del profilo Brillouin.

Infine, è stata verificata sperimentalmente la possibilità di effettuare la demodulazione tutto ottica di un segnale DPSK a 10 Gbit/s per mezzo di filtraggio Brillouin (sia passabanda che notch) ottenuto con una pompa incoerente sagomata sfruttando luce ASE, il cui spettro è stato opportunamente filtrato da un fiber Bragg grating con profilo gaussiano largo 6.7 GHz.

Mediante l'analisi dei diagrammi ad occhio e la misura delle curve di BER si è giunti ad identificare in 200 mW di potenza di pompa la condizione ottima per ottenere la più efficiente conversione fase-ampiezza. Inoltre si è evidenziato, essendo la BLS una zona di assorbimento, come fosse necessaria maggiore potenza in ingresso al ricevitore per poter ottenere migliori valori di BER.

# Conclusioni

Obiettivo di questo lavoro di tesi è stato l'ottenere demodulazione di fase mediante effetto Brillouin stimolato in fibre ottiche per telecomunicazioni utilizzando sia il profilo di guadagno Brillouin (BGS) sia quello di assorbimento (BLS) come filtro per la demodulazione di fase.

Si è resa, quindi, necessaria, innanzitutto, la realizzazione della pompa a partire da una sorgente di tipo incoerente e la sua successiva caratterizzazione in termini di prestazioni in potenza. La sorgente di tipo incoerente (Amplified Spontaneous Emission, ASE) impiegata è stata ottenuta a partire da un amplificatore ottico (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) operante senza ingresso ottico. La sagomatura necessaria ad ottenere la desiderata funzione di trasferimento è stata, invece, ottenuta con un Fiber Bragg Grating (FBG) operante in riflessione e realizzato nei laboratori del Dipartimento di Fisica del Politecnico di Milano con un profilo gaussiano e una larghezza di banda a metà altezza (Full Width Half Maximum, FWHM) di 6.7 GHz. Tale banda permette di elaborare, in maniera ottimale, segnali per telecomunicazioni con un bit rate pari a 10 Gb/s. La banda della pompa (ordine dei GHz) è stata ottenuta, quindi, selezionando una porzione della banda molto larga (ordine dei THz) dell'ASE. Si sono resi necessari vari stadi di amplificazione ottica poiché si era riscontrata la difficoltà di riuscire ad ottenere potenze di pompa adeguate.

Infine, un ulteriore filtro Fabry-Perot (FP) con larghezza di banda pari a 7.5 GHz è stato impiegato per migliorare il rapporto segnale rumore ottico della pompa.

Con la pompa ottenuta si sono svolte misure per la caratterizzazione in termini di soglia Brillouin di diverse fibre presenti nel laboratorio dove è stato svolto il lavoro di tesi. Tali fibre presentavano diverse caratteristiche di dispersione cromatica e di lunghezza. In particolare si sono impiegate fibre a dispersione nulla in terza finestra (Dispersion Shifted, DS da 9.9 km), tre fibre a bassa dispersione (due

Free Light, FL da 12.8 km e da 24.25 km e una True-Wave Single Mode Fiber, TW-SMF da 19.3 km) e due fibre con profilo d'indice a gradino (Standard Single Mode Fiber, SSMF da 8.8 km e da 20 km. Per queste prime misure sono state impiegate varie sorgenti con caratteristiche di riga diverse e sono stati riportati i risultati ottenuti con la sorgente di riga più stretta che è risultata essere un laser a cavità esterna (External Cavity Laser, ECL) con riga spettrale di circa 1 MHz. I valori più bassi di soglia sono stati ottenuti per la fibra TW-SMF da 19.3 km, per la quale la soglia vale 4.32 mW, per la fibra DS da 9.9 km, per la quale la soglia vale 5.16 mW e per la fibra FL da 24.25 km, per la quale la soglia vale 5.43 mW. Questi valori risultano essere leggermente superiori a quelli che tipicamente vengono riportati in letteratura come valore di soglia dell'effetto Brillouin nelle normali fibre ottiche per telecomunicazioni. Nel caso, invece, di utilizzo di pompa allargata, proprio la larghezza di banda della pompa accresce il valore di soglia, fino a 2.26 W per la fibra TW-SMF da 19.3 km, fino a 2.77 per la fibra DS da 9.9 km e fino a 2.83 per la fibra FL da 24.25 km. Tali fibre sono state caratterizzate anche in termini di spostamento Brillouin in frequenza e FWHM dello spettro di guadagno spontaneo. Si sono misurati in 7 MHz e 10.569 GHz l'FWHM e lo spostamento Brillouin per la fibra DS, in 6.43 MHz e 10.67 GHz per la fibra FL e in 6.4 MHz e 10.83 GHz per la fibra TW-SMF rispettivamente.

Successivamente, si è andato ad investigare l'ambito relativo al guadagno Brillouin. Si è, pertanto, caratterizzato lo spettro di guadagno e assorbimento Brillouin per le fibre con soglia bassa. Si è notato come il profilo Brillouin presentasse due zone posizionate simmetricamente rispetto alla frequenza di pompa, una in cui si ha guadagno (Brillouin Gain Spectrum, BGS) e l'altra in cui si ha assorbimento (Brillouin Loss Spectrum, BLS). Le due zone presentano caratteristiche spettrali simili per quanto riguarda la forma e la FWHM, strettamente legate alla forma del FBG utilizzato in pompa, inoltre, anche i valori massimi dei due picchi risultano essere, in valore assoluto, molto simili. Si sono, pertanto, misurati i valori massimi e minimi delle due zone per differenti situazioni di potenza di pompa (30 mW, 70 mW, 160 mW, 260 mW, 500 mW) e di potenza di segnale contropropagante (50  $\mu$ W, 100  $\mu$ W, 500  $\mu$ W). Si sono ottenuti guadagni di 9.8 dB per la FL, di 9.7 dB per la TW-SMF e di 7.43 dB per la DS, mentre si sono ottenuti assorbimenti di 8.9 dB per la FL, di 10.2 dB per la TW-SMF e di 7.8 dB per la DS. Per massimizzare i valori di guadagno e di assorbimento Brillouin si è scelto di includere nel setup di pompa un filtro Fabry-Perot come elemento sago-

mante della pompa stessa al fine di migliorare il rapporto segnale rumore ottico della pompa e dei rotatori di polarizzazione per allineare, per quanto possibile, la polarizzazione della pompa con quella del segnale contropropagante.

Infine si è dimostrata sperimentalmente la possibilità di ottenere demodulazione di fase mediante filtraggio Brillouin. Si è allestito un trasmettitore DPSK ed un blocco di ricezione che, al variare della potenza di pompa immessa nella fibra a dispersione nulla (DS), permettesse la visualizzazione dei diagrammi ad occhio del segnale demodulato e lo studio della bontà della demodulazione mediante le misure delle curve di BER. Per ottenere le immagini degli occhi e le curve di BER è stato necessario sintonizzare accuratamente la frequenza del segnale in modo da ottimizzare la conversione della modulazione di fase in ampiezza attraverso il corretto allineamento spettrale tra segnale e pompa. Nel caso di utilizzo della zona BGS come filtro per la demodulazione di fase si è notato dalle curve di BER come la situazione ottimale si ha per potenza di pompa pari a 200 mW per la quale si ottiene un BER di  $10^{-9}$  per potenze di circa -2dBm al ricevitore. Nel caso, invece, di utilizzo della zona BLS come filtro di demodulazione di fase si è dimostrata la possibilità di ottenere demodulazione, ma si è riscontrata anche la necessità di avere maggiore potenza di segnale in ingresso al ricevitore in modo da poter sovrastare il rumore di backscatter di Rayleigh e in modo da compensare l'assorbimento che è caratteristica propria della zona BLS.

Durante questa parte di attività sperimentale sono state condotte anche varie simulazioni con il software commerciale Optsim al fine di caratterizzare in maniera ancora più specifica la bontà della demodulazione di fase nei casi BGS e BLS. In particolare si è studiato la relazione tra il valore del rapporto di estinzione ottenuto con i diagrammi ad occhio del segnale demodulato e alcune caratteristiche dei filtri utilizzati per la demodulazione, come la altezza o profondità e la FWHM. Inizialmente si sono impiegati dei filtri sintetizzati dalle zone di guadagno ed assorbimento Brillouin, successivamente si sono sintetizzati dei filtri con l'ausilio di Matlab per andare ad investigare delle condizioni di altezza (profondità) e FWHM che non era stato possibile ottenere sperimentalmente. Si è dimostrata la possibilità di ottenere demodulazione con entrambe le zone del profilo Brillouin, ma non tutti i filtri sono risultati idonei alla demodulazione. Ne è risultato un'informazione sulla necessità di operare con potenze superiori per ottenere, soprattutto, zone BLS più profonde e quindi filtri più efficienti. Si è notato come la situazione migliore per operare la demodulazione sia un filtro con una FWHM pari a 6.7

GHz e che sia il più alto o profondo possibile.

E' stato dimostrato, infine, nell'ambito dell'amplificazione e del filtraggio, come l'utilizzo di una sorgente incoerente opportunamente filtrata rappresenti una soluzione interessante per l'elaborazione di segnali ottici attraverso l'effetto Brillouin, anche utilizzando fibre standard per le telecomunicazioni come le fibre Dispersion Shifted, le fibre Free Light e le fibre True-Wave Single Mode.

La soluzione proposta è, pertanto, una tecnica tutto ottica che consente di attivare o disattivare la demodulazione del segnale DPSK senza la necessità di spostamenti meccanici di componenti, quali interferometri o filtri. Potrebbe quindi risultare un'interessante soluzione da sfruttare nella realizzazione di sistemi filtri add&drop completamente ottici per segnali WDM.

# Bibliografia

- [1] G. P. Agrawal. "*Nonlinear Fiber Optics*". Academic Press, 3° edition, 2001.
- [2] R. W. Boyd. "*Nonlinear Optics*". Academic Press, 1992. Cap 8
- [3] R. G. Smith. "*Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering*". Applied Optics, Vol. 11, No. 11: 2489-2494, 1972.
- [4] M. O. van Deventer, e A. J. Boot. "*Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single mode fibers*". Lightwave Technology, Journal of, Vol. 12, No. 4: 585-590, 1994.
- [5] Daniel A. Fishman, Jonathan A. Nagel. "*Degradation due to stimulated Brillouin scattering in multigigabit intensity-modulated fiber optic systems*". IEEE Lightwave technology, Journal of, Vol. 11, No. 11: 1721-1728, 1993.
- [6] A. E. Willner, Bo Zhang, Lin Zhang, L. Yan, e I. Fazal. "*Optical signal processing using tunable delay elements based on slow light*". Selected Topics in Quantum Electronics. IEEE, Journal of, Vol. 14, No. 3: 691-705, 2008.
- [7] A. Loayssa, D. Benito, e M. J. Garde. "*High-resolution measurement of stimulated Brillouin scattering spectra in single-mode fibres*". IEE Proc. Optoelectron, Vol. 148, No. 3: 143-148, 2001.
- [8] T. Tanemura, Y. Takushima, e K. Kikuchi. "*Narrowband optical filter, with a variable transmission spectrum, using stimulated Brillouin scattering in optical fiber*". Optics Letters, Vol. 27, No. 17: 1552-1554, 1989.
- [9] H. I. Kim. "*Interaction of Stokes wave with a probe signal located on the anti-Stokes wavelength in single mode fiber*". ISCIT, 2009.

- [10] R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy. “*Fiber Brillouin amplifier*”. Optical Quantum Electronics, Vol. 21, 1989.
- [11] Paolo Nardi. “*Sintesi di filtri ottici mediante stimulated Brillouin scattering*”. Master’s Thesis, Politecnico di Milano, A. A. 2002-2003.
- [12] Bo Zhang, L. Yan, L. Zhang, e A. E. Willner. “*Multichannel SBS slow light usig spectrally sliced incoherent pumping*”. Lightwave Technology, Journal of, Vol. 26, No. 23: 3763-3789, 2008.
- [13] L. Yi, Y. Jaouen, W. Hu, J. Zhou, Y. Su, e E. Pincemin. “*Simultaneous demodulation and slow light of differential phase-shift keying signals using stimulated-brillouin-scattering-based optical filtering in fiber*”. Optical Letters, Vol. 32, No. 21: 3182-3184, 2007.
- [14] X. S. Yao. “*Phase-to-amplitude modulation conversion using Brillouin selective sideband amplification*”. Photonics Technology Letters, IEEE Vol. 10, No. 2: 264-266,1998.
- [15] X. S. Yao. “*Brillouin selective sideband amplification of microwave photonic signals*”. Photonics Technology Letters, IEEE Vol. 10, No. 1: 138-140,1998.
- [16] Marco Brunero. “*Elaborazione tutto-ottica del segnale per telecomunicazioni attraverso l’effetto Brillouin*”. Master’s Thesis, Politecnico di Milano, A. A. 2009-2010.
- [17] Kwang Yong Song, Miguel Herráez, e Luc Thévenaz. “*Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering*”. Opt. Express, Vol. 13, No. 1: 82-88, 2005.
- [18] M. Saruwatari, K. Tsuji, N. Onodera e T. Yamaguchi. “*Wavelength-flexible optical signal conversion using a NOLM-based XPM circuit followed by a Brillouin-assisted notch-filtering technique*”. Photonics in Switching Conference, IEEE, 2006.
- [19] A. Zadok, A. Eyal, e M. Tur. “*Gigahertz-wide optically reconfigurable filters using stimulated Brillouin scattering*”. Lightwave Technology, Journal of, Vol. 25, No. 8: 2168-2174, 2007.

- [20] N. A. Olsson e J. P. van der Ziel. “*Fibre Brillouin amplifier with electronically controlled bandwidth*”. Electronics Letters, Vol. 22, No. 9: 488-490, 1986.
- [21] P. C. Becker, N. A. Olsson, e J. R. Simpson. “*Erbium-Doped Fiber Amplifiers: fundamentals and technology*”. Academic Press, 1999.
- [22] E. Forestieri e G. Prati. “*Narrow filtered dpsk implements order-1 caps optical line coding*”. Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 16, No. 2: 662-664, 2004.
- [23] D. Penninckx, M. Chbat, L. Pierre, e J.-P. Thiery. “*The phase-shaped binary transmission (psbt): a new technique to transumi far beyond the chromatic dispersion limit*”. Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 9, No. 2: 259-261, 1997.
- [24] A. H. Gnauck e P.J. Winzer. “*Optical phase-shift keyed transmission*”. Lightwave Technology, Journal of, Vol. 23, No.1: 115-130, 2005.
- [25] G. Tartara. “*Introduzione ai sistemi di comunicazione*”. Etas libri, 2001.
- [26] E. A. Swanson, J. C. Livas e R. S. Bondurant. “*High sensitivity optically pre-amplified direct detection DPSK receiver with active deay-line stabilization*”. Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 6, No. 2: 263-265, 1994.
- [27] I. Lyubomirsky e Cheng-Chung Chien. “*DPSK demodulator based on optical discriminator filter*”. Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 17, No. 2: 492-494, 2005.
- [28] W.V. Sorin, K.W.Chang, G. A. Conrad, e P. R. Hernday. “*Frequency domain analysis of an optical FM discriminator*”. Lightwave Technology, Journal of, Vol. 10, No. 6: 787-793, 1992.
- [29] M. Ferrario, L. Marazzi, P. Boffi, A. Righetti, e M. Martinelli. “*Impact of Rayleigh backscattering on stimulated scattering threshold evaluation for 10 Gb/s NRZ-OOK signals*”. Opt. Express, Vol. 17, No. 20: 18110-18115, 2009.
- [30] P. Boffi, L. Marazzi, P. Martelli, P. Parolari, A. Righetti, R. Siano, e M. Martinelli. “*Combined amplitude-phase shift code tolerance to phase modulation profile*”. Optical Fiber Technology, Vol. 15, No. 1: 102-105, 2009.



- [31] D. S. Lim, H. K. Lee. “*Figure-of-eight Brillouin/Erbium fiber laser*”. Electronics Letters, Vol. 34, No. 25, 1998.
- [32] M. Oskar van Deventer, A. J. Boot. “*Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers*”. IEEE Lightwave technology, Journal of, Vol. 12, No. 4: 585-590, 1994.
- [33] Lilin Yi. “*Fiber non linearities based slow light for high bit rate communication systems*”. Master’s Thesis, Telecom Paris, A.A. 2007.
- [34] Kwang Yong Song, M.G. Herraiez, L. Thevenaz. “*Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering*”. Optic Express, Vol. 13, No. 1: 82-88, 2005.
- [35] K. Y. Song and K. Hotate. “*25GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers*”. Opt. Letters, Vol. 32, No. 3: 217-219, 2007.
- [36] T. Schneider, M. Junker and K.U. Lauterbach. “*Potential ultra wide slow-light bandwidth enhancement*”. Optics Express, Vol. 14, No.23: 11082-11087, 2006.