

DISPERSIONE DEI MODI DI POLARIZZAZIONE DI FIBRE OTTICHE SOTTOPOSTE A SPIN ED AVVOLTE IN BOBINA

Laureando: Matteo Rizzo

Relatore: Prof. Luca Palmieri

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELLE
TELECOMUNICAZIONI**

Data di Laurea: 18 Aprile 2011

Anno Accademico 2010/2011

Autorizzo la consultazione e il prestito della tesi. Firma

Rizzo Matteo

*Un ringraziamento a tutti coloro che mi hanno
sostenuto, familiari e amici, e al prof. Luca
Palmieri per la sua disponibilità in questi miei anni
di studio universitario.*

Indice

1	Introduzione	1
2	Basi Teoriche	5
2.1	Dispersione dei modi di polarizzazione	6
2.2	Spin	8
2.3	Fibra avvolta con raggio costante	8
2.4	Fibra avvolta in bobina	9
3	Esiti Simulazioni	11
3.1	Fibra avvolta con raggio costante	12
3.1.1	Dipendenza dal periodo p	13
3.1.2	Dipendenza da L	20
3.1.3	Dipendenza da L_F	22
3.1.4	Dipendenza da L_B	22
3.2	Fibra avvolta in bobina	26
3.2.1	Dipendenza dal raggio della fibra	26
3.2.2	Dipendenza da L_B	30
3.3	Confronto tra i due tipi di avvolgimento	39
4	Conclusioni	43

Capitolo 1

Introduzione

La dispersione dei modi di polarizzazione (PMD, polarization mode dispersion) è un ostacolo in molti sistemi di trasmissione su fibra ottica in quanto limita il prodotto bitrate-distanza; questo ancor più ai giorni d'oggi in cui si trasmette ad alte velocità, anche 100 Gb/s, e si tenta di fare sempre meglio oltre alle lunghe distanze di alcuni collegamenti, come quelli transoceanici.

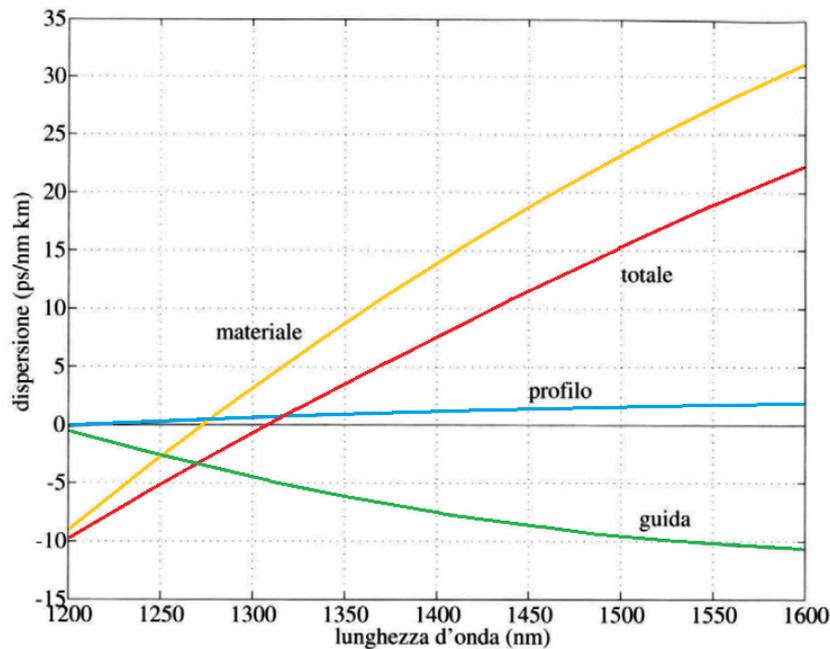
La PMD ha origine dalla natura reale della fibra ottica monomodale, la quale non è perfettamente circolare a causa di varie imperfezioni sia intrinseche, come asimmetrie del nucleo e del mantello e tensioni interne dovute alla presenza di droganti, che estrinseche, come torsioni, curvature, pressioni esercitate dal processo di cablaggio, durante la posa o dovute all'azione dell'ambiente dopo l'installazione. A causa di queste imperfezioni i due stati di polarizzazione ortogonali non sono più degeneri, quindi hanno costanti di propagazione e velocità di gruppo diverse che danno vita alla PMD e a un ritardo di gruppo differenziale (DGD, differential group delay) tra i due stati di polarizzazione [1], [2]. Questo fenomeno può essere descritto assimilando la fibra ad un mezzo birifrangente; la birifrangenza apparente della fibra è in genere aleatoria sia nel tempo, sia lungo la fibra, di conseguenza sono aleatorie anche le proprietà della PMD. La natura aleatoria della PMD e del DGD comporta notevoli difficoltà nel realizzare dispositivi di compensazione efficaci, veloci e poco sensibili alla modulazione del segnale, al contrario di ciò che avviene per la dispersione cromatica che è un effetto deterministico. Per le fibre già installate, se si vuole aumentare il bit rate, non resta che utilizzare compensatori concentrati posti di fronte al ricevitore per compensare la PMD, i quali dovranno essere attivi a causa delle fluttuazioni nel tempo della PMD stessa [3], [4], [5]. Sarebbe pratico utilizzare compensatori con pochi parametri di controllo in maniera tale da limitare la complessità e velocizzare la risposta del dispositivo; tuttavia un compensatore con tanti parametri di controllo è più flessibile e capace di compensare più efficace-

mente la PMD. Invece, per ciò che riguarda la produzione di fibre, sono stati migliorati i processi produttivi per ridurre le asimmetrie nel profilo d'indice e il livello di stress nel profilo. Questo ovviamente non basta per produrre fibre ottiche che siano intrinsecamente a bassa PMD, così si applica una torsione alla fibra (spin) quando questa si trova ancora in fase calda durante il processo di filatura, torsione che può essere in un solo verso (spin unidirezionale) o prima in un verso e poi in quello opposto (spin periodico). Questa tecnica, proposta per la prima volta nel 1981 in un articolo [6] da Barlow e che fu ampiamente usata nella produzione di fibre ottiche solo a partire dalla metà degli anni '90, è molto utilizzata e permette l'utilizzo di vari profili di spin [7] la cui efficacia dipende fortemente dalle caratteristiche di birifrangenza della fibra, vale a dire dalla lunghezza di battimento L_B e dalla lunghezza di correlazione L_F [8]. Si è provato empiricamente che i profili di spin periodici [9], [10] sono più efficaci nel ridurre il DGD (anche di qualche ordine di grandezza) rispetto ai profili unidirezionali che danno anche problemi di torsione dopo la produzione [11].

Come accennato prima, la dispersione cromatica è un effetto deterministico che causa una distorsione dell'impulso; un impulso che viaggia nella fibra occupa una certa banda e la velocità di gruppo dipende dalla frequenza, quindi le varie componenti dell'impulso a frequenze diverse viaggiano a velocità diverse distorcendo l'impulso stesso. Questa dispersione scaturisce da tre effetti che si sommano:

- **Dispersione di materiale:** questo termine è dovuto alla dipendenza dalla lunghezza d'onda dell'indice di rifrazione del nucleo e del mantello, questa dispersione è positiva per lunghezze d'onda maggiori di 1270 nm e negativa altrimenti;
- **Dispersione di guida:** questo contributo è dovuto al fatto che la struttura del modo cambia, e quindi la sua costante di propagazione, al variare della frequenza, cioè se la frequenza tende a quella di taglio il modo tende ad espandersi anche nel mantello, invece, all'aumentare della frequenza, il modo tende a confinarsi sempre di più nel nucleo. Per le lunghezze d'onda di interesse pratico questo contributo è sempre negativo.
- **Dispersione di profilo:** a causa del drogaggio l'indice di rifrazione del nucleo varia in maniera diversa con la frequenza rispetto all'indice di rifrazione del mantello, quindi varia leggermente il profilo d'indice. Nelle fibre standard questo effetto è trascurabile.

Comunque, la dispersione cromatica si può compensare collegando una fibra dopo quella di trasmissione, di solito non più lunga di un paio di chilo-



metri, che abbia una dispersione cromatica opposta in segno rispetto a quella del tratto di fibra da compensare. Questa fibra compensatrice viene avvolta in una bobina per poter creare un modulo di discrete dimensioni, che in genere prende il nome di Dispersion Compensating Module (DCM); tali moduli sono insensibili alla modulazione, al bit rate, hanno basse perdite di inserzione e ovviamente devono avere anche bassa PMD (oltre a essere suddivisi per dispersione, lunghezza da compensare e banda di funzionamento). In un ambiente in cui ogni cosa sta diventando piccola per necessità e concezione, anche questi moduli si stanno rimpicciolendo a loro volta, il che significa che la fibra compensatrice viene avvolta in bobine sempre più piccole, anche di 2 cm di diametro. Per poter far ciò, mantenendo e migliorando le prestazioni del dispositivo, si devono fare i conti con le perdite per curvatura; queste ormai non sono più un grosso problema grazie alle fibre insensibili alla curvatura che seguono il recente standard ITU G.657, le quali possono essere avvolte con raggi piccolissimi per molte volte e dare un'attenuazione di soli 0.1 dB/giro per 7 mm di raggio di curvatura. In generale ci sono due modi per migliorare le proprietà di curvatura della fibra monomodale e creare questo tipo di fibre; la prima consiste nell'incrementare l'indice di rifrazione del nucleo, la seconda consiste nel cambiare l'indice di rifrazione del mantello. Sono stati proposti vari approcci, molti dei quali modificano il mantello; i più importanti sono riportati in Figura 1.1, mentre in Figura 1.2 sono riportate le perdite per curvatura in funzione del raggio per i vari tipi di fibra.

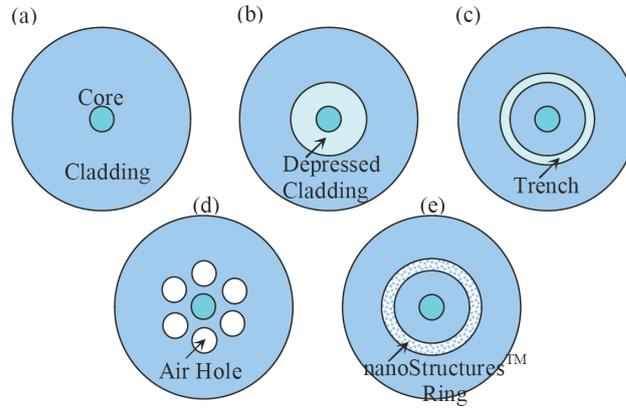


Figura 1.1: Vari modelli di fibre insensibili alla curvatura.

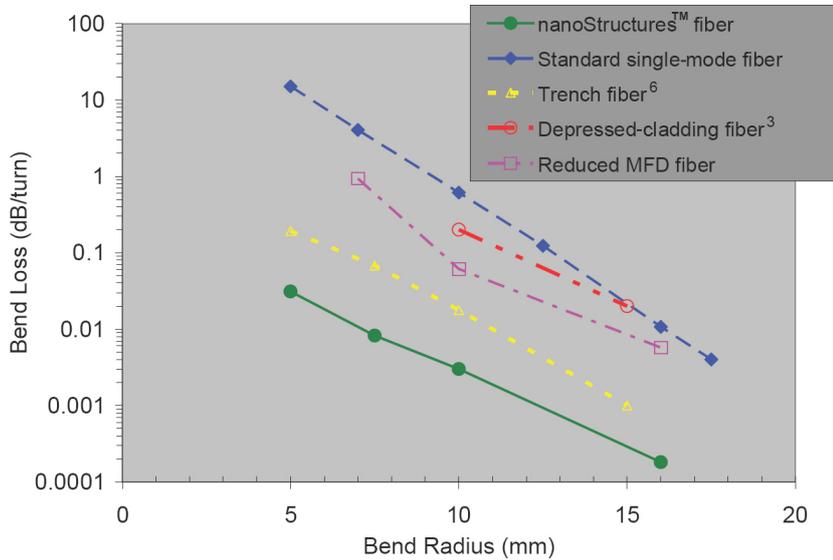


Figura 1.2: Perdita per curvatura al variare del raggio di curvatura per i vari modelli.

L'obiettivo della tesi è di ottimizzare questi moduli per la compensazione della dispersione cromatica in funzione della curvatura e, in particolare, trovare per la prima tipologia di fibra tra quelle qui sopra le combinazioni di ampiezza A_0 e periodo p dello spin sinusoidale e del raggio di curvatura R che contrastino gli effetti negativi della birifrangenza da curvatura e diano un DGD più piccolo possibile. Nel secondo capitolo si andranno ad introdurre tutte le basi teoriche su cui si basano le simulazioni i cui esiti saranno ampiamente mostrati e commentati nel terzo capitolo; infine nel quarto capitolo si trarranno le conclusioni.

Capitolo 2

Basi Teoriche

Quando ci si presta a studiare una fibra ottica e gli effetti dello spin periodico su di essa si devono prendere in considerazione quattro quantità: la lunghezza di battimento L_B , che è inversamente proporzionale all'intensità della birifrangenza media; la lunghezza di correlazione L_F , che descrive la scala delle lunghezze su cui un insieme di fibre con birifrangenza aleatoriamente variabile diventano scorrelate; il periodo di spin p ; l'ampiezza dello spin A_0 . Lo studio analitico dei vari effetti in gioco è molto complicato se ci si riferisce a una fibra reale, per questo in molti articoli si sono studiate (sia analiticamente che numericamente) fibre in casi particolari che rendono più semplice l'analisi; per esempio il caso di regime di "corto periodo" ($p \ll L_B$) [9], [12], e il caso di fibra a birifrangenza deterministica ($L_F \rightarrow \infty$) [9] e [13]; quindi lo studio di fibre reali per telecomunicazioni è più limitato all'aspetto numerico, su cui si concentrerà questa tesi, e a quello sperimentale.

Per poter simulare numericamente fibre reali si deve fare riferimento ad un modello per la birifrangenza molto realistico. Wai e Menyuk hanno proposto due modelli simili tra loro: il primo, chiamato FMM (*Fixed Modulus Model*), considera la birifrangenza con modulo costante e orientazione variabile; il secondo, chiamato RMM (*Random Modulus Model*), invece considera variabili sia il modulo che l'orientazione della birifrangenza [14]. Molti esperimenti hanno rivelato che il modulo della birifrangenza è variabile e non fisso, dando quindi più veridicità al modello RMM [15]. In particolare si è osservato che i due modelli danno risultati identici in certi regimi e diversi in altri [16]; se si considera il SIRF (*Spin Induce Reduction Factor*), ovvero il rapporto tra il DGD della fibra con spin e il DGD della stessa fibra ma senza spin, in funzione di A_0 si hanno queste differenze tra i due modelli (spin sinusoidale):

- per $p \ll L_B$ entrambi i modelli danno risultati identici al variare di L_F ;
- per $p \geq L_B$ i due modelli sono in accordo se L_F è piccola, quindi quando lo spin ha minor effetto, e in disaccordo quando L_F è grande; questo perché se il modulo è fisso lo spin riesce a compensarlo esattamente, cosa che non avviene se il modulo è variabile.

In questa tesi ci si concentrerà nel caso in cui il periodo di spin è circa uguale alla lunghezza di battimento in quanto questa situazione è sempre presente nelle fibre compensatrici; anche per questo motivo si utilizza il modello RMM invece del modello FMM. Nei prossimi paragrafi verranno illustrate le fondamentali teoriche su cui si basano le simulazioni i cui esiti saranno discussi nel capitolo 3.

2.1 Dispersione dei modi di polarizzazione

Nel seguente paragrafo si dà una spiegazione della teoria su cui si basano i modelli, concentrandosi poi sul modello RMM e lasciando i calcoli e i passaggi più teorici al riferimento [14].

Le caratteristiche della PMD sono completamente descritte dal vettore dispersione di polarizzazione (PDV, *Polarization Dispersion Vector*) $\bar{\Omega}(z, \omega)$, il cui modulo è pari al DGD $\Delta\tau$. L'evoluzione di $\bar{\Omega}$ in funzione della distanza è governata dall'equazione dinamica [17]

$$\frac{\partial \bar{\Omega}(z, \omega)}{\partial z} = \frac{\partial \bar{\beta}(z, \omega)}{\partial z} + \bar{\beta}(z, \omega) \times \bar{\Omega}(z, \omega),$$

dove $\bar{\beta}(z, \omega) = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T$ è il vettore di birifrangenza locale totale, ovvero comprende tutti gli effetti che agiscono sulla fibra, e ω la pulsazione. Questa equazione è facilmente risolvibile se si fa una semplificazione, di cui se ne parlerà qui sotto, e se si utilizza il modello a lamine per rappresentare la fibra.

Il modello a lamine considera la fibra come un insieme di tante piccole lamine della stessa lunghezza L_R , ognuna con un certo valore costante di birifrangenza. Affinché questo funzioni correttamente bisogna che la lunghezza delle lamine sia sufficientemente piccola in modo che la fibra sia il più possibile simile a una fibra reale; di conseguenza si devono considerare L_B , L_F e i parametri di spin e, in particolare, si deve soddisfare la seguente condizione:

$$L_R \ll \left\{ L_B, L_F, p, \frac{p}{2A_0} \right\}.$$

A questo punto rimane solo da definire la birifrangenza della fibra.

Entrambi i modelli (RMM e FMM) assumono nulla la birifrangenza circolare intrinseca, quindi resta solo la birifrangenza lineare $\bar{\beta}_{int} = (\beta_1, \beta_2, 0)$; infatti nelle fibre ottiche reali per telecomunicazioni la birifrangenza circolare è trascurabile. Inoltre, essi assumono che solo il modulo della birifrangenza dipenda da ω , quindi si può scrivere $\bar{\beta}_{int}(z, \omega) = b(z, \omega)\hat{\beta}_{int}(z)$, dove b è il modulo e $\hat{\beta}_{int}$ l'orientazione. Di conseguenza la derivata di $\bar{\beta}_{int}$ in ω presente nell'equazione dinamica si trasforma nella derivata di b in ω , che si assume sia pari a

$$b_\omega(z) = \frac{\partial b(z, \omega)}{\partial \omega} = \frac{b(z, \omega)}{\omega},$$

come comunemente fatto in letteratura; questa scelta viene presa per semplificare l'equazione dinamica e perché non comporta alcuna alterazione dei risultati.

Il modello RMM [14] descrive $\beta_1(z)$ e $\beta_2(z)$ come processi di Langevin indipendenti così definiti:

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial z} = -\rho \beta_i(z) + \sigma \eta_i(z), \quad i = 1, 2$$

dove $\eta_1(z)$ e $\eta_2(z)$ sono processi gaussiani, bianchi, statisticamente indipendenti, con media nulla e deviazione standard unitaria; di conseguenza $b(z, \omega)$ è una variabile aleatoria di Rayleigh. I parametri ρ e σ definiscono le proprietà statistiche della birifrangenza, infatti la lunghezza di correlazione e la lunghezza di battimento valgono rispettivamente

$$L_F = \frac{1}{\rho} \quad L_B = \frac{2\pi\sqrt{\rho}}{\sigma} .$$

Con questo modello si può ottenere la birifrangenza intrinseca di una qualsiasi fibra ottica con certe proprietà statistiche (L_F e L_B).

2.2 Spin

Il modello appena visto descrive l'evoluzione aleatoria della birifrangenza intrinseca di una fibra senza spin. Però, la fibra è soggetta a vari agenti esterni e interni, volontari ed involontari quali spin, twist e curvature, che ne modificano la birifrangenza.

Lo spin, il quale consiste nella torsione della fibra secondo certi profili quando questa è ancora in fase calda, migliora notevolmente le prestazioni della fibra in termini di riduzione della PMD e del DGD. Quando si applica lo spin gli assi della birifrangenza subiscono una rotazione dipendente dal profilo di spin $A(z)$ applicato durante la filatura. La birifrangenza della fibra con spin è uguale alla birifrangenza intrinseca ruotata di un angolo pari a due volte il profilo di spin attorno al vettore $(0, 0, 1)^T$, ovvero

$$\bar{\beta}_{spin}(z) = \mathbf{R}_3[2A(z)]\bar{\beta}_{int}(z)$$

dove

$$\mathbf{R}_3[2A(z)] = \begin{pmatrix} \cos(2A(z)) & -\sin(2A(z)) & 0 \\ \sin(2A(z)) & \cos(2A(z)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

rappresenta la rotazione sinistrorsa (quella destrorsa la si ottiene invertendo il segno ai due seni).

Esistono molti profili di spin, ma uno dei più usati, che verrà considerato nella tesi, è il profilo di spin sinusoidale, il quale ha la seguente formula:

$$A(z) = A_0 \sin\left(2\pi\frac{z}{p}\right) .$$

2.3 Fibra avvolta con raggio costante

Come primo approccio si considera la situazione ideale in cui la fibra viene avvolta su una bobina seguendo una traiettoria circolare con raggio costante; questa situazione non è realizzabile nella realtà ma permette di studiare la dipendenza del DGD dalla sola curvatura. Nel paragrafo successivo vedremo cosa succede nel caso reale in cui si avvolge la fibra su una bobina, fibra che seguirà una traiettoria ad elica circolare.

La birifrangenza indotta dalla curvatura è non nulla solo nella prima delle tre componenti del vettore, quindi è lineare, per il sistema di riferimento

utilizzato ed è sempre costante in z : il suo modulo varia con la curvatura $K = 1/R$ ($R =$ raggio di curvatura) secondo la seguente formula [19] :

$$\beta_{curv}(K) = 0.276 \frac{n^3}{\lambda} r^2 K^2$$

dove n è l'indice di rifrazione del nucleo, λ è la lunghezza d'onda considerata e r è il raggio della fibra. La dipendenza dalla pulsazione è semplice e la si ottiene sapendo che $\lambda = 2\pi c/\omega$, quindi si ha semplicemente che

$$\frac{\partial \beta_{curv}(K)}{\partial \omega} = \frac{\beta_{curv}(K)}{\omega} .$$

In questa situazione la birifrangenza totale della fibra, che è data dalla somma delle birifrangenze che agiscono sulla fibra stessa, è pari a

$$\bar{\beta}_{tot}(z) = \bar{\beta}_{spin}(z) + \begin{pmatrix} \beta_{curv}(K) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Questa sarà la birifrangenza che andrà inserita nell'equazione dinamica, insieme alla sua derivata data dalla somma delle derivate delle due componenti, per ottenere il PDV e poi il DGD.

2.4 Fibra avvolta in bobina

Ora si considera il caso reale di avvolgimento della fibra attorno a una bobina strato sopra strato, osservando l'aggiunta di un altro fenomeno alla curvatura: la fibra segue una traiettoria ad elica circolare con passo h (il doppio del raggio totale della fibra), raggio R e un certo senso di rotazione, subendo una torsione γ e una curvatura κ costanti fino a che non si finisce il primo strato (ovviamente la bobina ha una sua larghezza finita l); a tal punto si crea lo strato successivo che avrà lo stesso passo, un raggio maggiore e il senso opposto rispetto allo strato precedente, portando la fibra a subire una torsione e una curvatura sempre costanti ma diverse nella quantità, e per la torsione anche nel segno; le cose si ripetono strato dopo strato.

L'entità della torsione e della curvatura vengono date dalle formule geometriche dell'elica circolare, come fatto in [18] :

$$\gamma = \frac{h}{h^2 + (2\pi R)^2} \qquad \kappa = \frac{(2\pi)^2 R}{h^2 + (2\pi R)^2}$$

Il twist, o twist rate, indotto da questa torsione è $\tau(z) = \gamma z$; questo agisce in due modi diversi sulla birifrangenza: per prima cosa ruota la birifrangenza lineare di un angolo $2\tau(z)$ attorno al vettore $(0, 0, 1)^T$; inoltre induce una birifrangenza circolare pari a $g\tau'(z)$, dove g è il coefficiente di rotazione elastottico circa uguale a 0.144 [1].

La curvatura, invece, induce una birifrangenza lineare (come visto nel paragrafo precedente) proporzionale alla curvatura stessa secondo la seguente formula [19] :

$$\beta_{curv}(\kappa) = 0.276 \frac{n^3}{\lambda} r^2 \kappa^2 \quad .$$

La dipendenza da κ sottintende la dipendenza da z per il fatto che ogni strato è soggetto a una curvatura diversa. Concludendo, la birifrangenza totale della fibra è data dalla somma delle varie birifrangenze che agiscono su di essa, in questo caso :

$$\bar{\beta}_{tot}(z) = \mathbf{R}_3[2\tau(z)]\bar{\beta}_{spin}(z) + \begin{pmatrix} \beta_{curv}(\kappa) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g\tau'(z) \end{pmatrix}$$

La derivata in ω di questa birifrangenza non è semplice come nel paragrafo precedente per la presenza del coefficiente g ; mentre i primi due addendi della formula qui sopra vengono semplicemente divisi per ω come visto in precedenza, il terzo addendo avrà un trattamento diverso. La dipendenza da ω di questo coefficiente è stata studiata in [20] e ha portato al seguente risultato:

$$\frac{dg}{d\omega} \cong 0.09 \frac{g}{\omega} \quad .$$

Conoscendo la birifrangenza totale e la sua derivata possiamo risolvere l'equazione dinamica e ottenere il PDV e poi il DGD.

Capitolo 3

Esiti Simulazioni

Nel capitolo precedente sono state poste le basi necessarie a simulare la fibra nei casi di interesse, ovvero sia nel caso di avvolgimento ideale con raggio costante sia nel caso di avvolgimento reale in bobina. Le simulazioni hanno come risultato il DGD, mediato su 1000 fibre statisticamente equivalenti, al variare di molti parametri: lunghezza di correlazione L_F , lunghezza di battimento L_B , lunghezza della fibra L , ampiezza dello spin sinusoidale A_0 , periodo dello spin sinusoidale p e curvatura K , o raggio di curvatura R . Per ognuno di questi parametri sono stati scelti degli intervalli di valori da esplorare, tipici delle fibre ottiche compensatrici prodotte al giorno d'oggi.

Le lunghezze L_F e L_B solitamente assumono valori non maggiori a una o due decine di metri; in alcuni casi particolari, tra cui le fibre compensatrici, L_B è di pochi metri, o anche meno, quindi c'è maggiore tensione meccanica all'interfaccia nucleo-mantello per il grande salto d'indice. In genere, per moduli DCM, la fibra avvolta è lunga da qualche centinaia di metri al chilometro circa, in base al tratto di fibra da compensare per cui sono state progettate. Inoltre, questi moduli, grazie alle nuove tecnologie, sono sempre più piccoli, quindi il raggio di curvatura da considerare sarà molto piccolo, nell'ordine dei centimetri, e verrà confrontato con il caso ideale di raggio infinito. Infine, i parametri di spin rispecchiano i parametri realmente utilizzati in fabbrica con l'aggiunta di altri valori con cui fare il confronto: in particolare si vedranno ampiezze da 0 a 100 radianti e periodi da 0.5 a 5 metri.

La fibra che verrà simulata avrà come indice di rifrazione del nucleo $n = 1.467$ e come raggio del mantello $r = 62.5 \mu\text{m}$, invece la lunghezza d'onda presa in considerazione sarà $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

Il DGD che si ottiene dalle simulazioni in alcuni casi è solo quello finale della fibra, in altri casi si tiene memoria dei valori del DGD in tratti intermedi della fibra per osservare anche l'andamento lungo l'asse longitudinale z . Per analizzare gli effetti dello spin e della curvatura sul DGD si introdurrà il

fattore di riduzione indotto dallo spin (SIRF, *Spin-Induced Reduction Factor*) che è pari al rapporto tra il DGD medio di una fibra con spin e il DGD medio che la stessa fibra avrebbe se non fosse sottoposta a spin, ovvero :

$$SIRF(z) = \frac{\langle \Delta\tau_{spin}(z) \rangle}{\langle \Delta\tau_{unspun}(z) \rangle} .$$

Si può dire che lo spin porta benefici nel caso in cui il SIRF sia minore di 1, e che peggiori le cose se il SIRF è maggiore di 1. Il DGD e il SIRF verranno studiati insieme per avere un'informazione completa su ciò che accade al variare dei parametri.

Nei prossimi paragrafi verranno mostrati i risultati di simulazioni fatte per entrambi i tipi di avvolgimento della fibra visti nel capitolo precedente, facendo anche un confronto tra i due.

3.1 Fibra avvolta con raggio costante

Nelle simulazioni di cui si analizzeranno i risultati ora, e nel resto della tesi, sono state utilizzate molte variabili in maniera da poter analizzare vari andamenti. In questo caso: la lunghezza di battimento L_B assume i valori 1 e 10 m ; la lunghezza di correlazione L_F assume i valori 2 e 10 m ; l'ampiezza dello spin A_0 varia nell'intervallo $[0, 20]$ rad ; il periodo di spin p assume i valori 0.5, 1 e 5 m ; la curvatura K varia nell'intervallo $[0, 93]$ m^{-1} (dove 93 m^{-1} corrispondono a 1.08 cm di raggio della bobina); infine, un'altra variabile è la lunghezza della fibra L , infatti il DGD viene salvato ogni 100 metri per poter osservare il suo andamento lungo la fibra. La lunghezza della fibra utilizzata è $L = 1000$ m , che essendo molto più grande di L_F pone la fibra nel "regime di lunga distanza", e quindi fuori dalla regione di transizione. L'ultimo parametro è la lunghezza di ogni lamina L_R del modello a lamine, la quale è fondamentale onde evitare problemi di risoluzione; questa è stata scelta secondo il seguente criterio:

$$L_R = \min \left\{ L_B, L_F, p, \frac{p}{2A_0} \right\} / 10.$$

In questa sezione si analizzeranno il DGD e il SIRF tramite grafici in funzione di A_0 e K al variare degli altri parametri visti in precedenza. In particolare i grafici del SIRF saranno dei grafici di profilo (*contour plot*) aventi tutti la stessa scala dei colori, in maniera da poterli confrontare, e con i seguenti livelli $[0, 0.33, 0.66, 1, 1.5, 2]$ a delimitare le aree colorate.

3.1.1 Dipendenza dal periodo p

I periodi di spin p che verranno considerati sono tre come detto in precedenza, ovvero 0.5, 1 e 5 m . Prima di vedere la dipendenza del DGD e del SIRF dal periodo di spin si farà un'analisi della dipendenza del DGD dai parametri A_0 e K in un particolare caso.

Si consideri una fibra ottica con: $L_B = 1 m$ e $L_F = 2 m$. Questo tipo di fibra presenta un'alta birifrangenza e, di conseguenza, un DGD relativamente alto, ma ha il vantaggio di essere poco sensibile alla birifrangenza indotta dopo la produzione della fibra da vari fenomeni, per esempio la curvatura. A questa fibra viene applicato uno spin con periodo $p = 0.5 m$ ed ampiezza A_0 variabile come visto in precedenza, lo stesso vale per la curvatura K ; con queste condizioni si ottengono le figure 3.1 e 3.2 che rappresentano, rispettivamente, DGD e SIRF. Entrambe le figure hanno andamenti interessanti nelle regioni in cui la curvatura diventa importante; ovviamente ci si focalizzerà sulle zone in cui il DGD è più basso, che saranno chiamate zone di minimo. Si nota che la regione ottenuta per A_0 compreso tra 0 e 1.2 rad e per ogni $K > 20 m^{-1}$ è una regione di minimo, come evidenziato anche dal SIRF che assume valori inferiori a 0.6: uno spin molto veloce riesce in media a “cancellare” più efficacemente la birifrangenza intrinseca, lasciando “campo libero” alla birifrangenza da curvatura che alza il DGD; invece, in questo caso, uno spin più lento agisce meno efficacemente lasciando interagire la birifrangenza intrinseca con la birifrangenza da curvatura allo stesso livello ottenendo un DGD più basso. Aggiungendo sempre più curvatura il DGD, per ogni $A_0 > 1.2 rad$, aumenta sempre di più, specialmente quando la birifrangenza da curvatura diventa di un ordine di grandezza inferiore della birifrangenza intrinseca, cioè per $30 < K < 65 m^{-1}$; questo aumento è poco evidente nel grafico del DGD visto che si passa da circa 1 ps a 3 ps ed il massimo DGD del grafico è 8 ps (quindi un problema di colori), ma si vede benissimo nel SIRF, il quale assume valori maggiori di 1 arrivando fino a 5. Quando la birifrangenza da curvatura diventa dello stesso ordine di quella intrinseca, ovvero per $K > 65 m^{-1}$, la curvatura e lo spin interagiscono allo stesso livello creando delle risonanze che provocano massimi alternati a minimi nel DGD, come si vede nelle figure; le combinazioni favorevoli sono appunto date da queste zone di minimo, nelle quali il SIRF assume valori inferiori a 0.6, contro i valori maggiori di 2 dei massimi che fanno da intermezzo. Infine, quando la birifrangenza da curvatura, che è un fenomeno deterministico, diventa più grande di quella intrinseca il DGD ricomincia a crescere, tranne nella “vallata” iniziale in cui lo spin è piccolo e interagisce poco con la curvatura.

Aumentando il periodo di spin p a $1 m$ si ottengono i grafici 3.3 e 3.4; ora il periodo è raddoppiato rispetto a prima, quindi lo spin rate α è dimezzato. I grafici appaiono più distesi del caso precedente lungo le variabili A_0 e K , infatti le regioni di minimo e di massimo sono più ampie, compresa la “vallata” per valori piccoli di A_0 ; il valore del DGD è rimasto più o meno lo stesso per i minimi, intorno ai $0.6 ps$, invece il valore dei massimi è abbastanza diminuito (il valore massimo è $5 ps$ circa). Questi cambiamenti nel DGD si rispecchiano nel SIRF, nel quale le zone di minimo hanno più o meno lo stesso valore, minore di 0.6 , mentre le zone di massimo hanno valore inferiore (il massimo è 3). Oltre a questi cambiamenti generali si nota la presenza di altre zone di minimo: mentre i minimi per $70 < K < 80 m^{-1}$ sono rimasti, anche se ora sono posizionati sugli A_0 in cui nel caso $p = 0.5 m$ erano presenti i massimi (e per i massimi viceversa), vi sono altre due “fascie” di minimi per $45 < K < 60 m^{-1}$ e per $K > 85 m^{-1}$. Tutte queste differenze sono legate al diverso periodo di spin utilizzato: essendo ora questo periodo più lungo lo spin ordina meglio l’alta birifrangenza intrinseca portando a una riduzione del DGD soprattutto nelle condizioni più sfavorevoli; come prima il DGD comincia a crescere quando la birifrangenza da curvatura diventa un ordine di grandezza inferiore a quella intrinseca ($K > 30 m^{-1}$), ma ora le due grandezze interagiscono creando le risonanze già a partire da $K > 50 m^{-1}$, dove la birifrangenza da curvatura è circa metà di quella intrinseca.

Aumentando ancora il periodo di spin p a $5 m$ si ottengono i grafici 3.5 e 3.6; ora lo spin rate α è molto piccolo. Il DGD viene praticamente “appiattito”, ovvero il profilo di spin agisce ancora più efficacemente avendo un periodo più lungo, quasi eliminando i massimi (infatti rimangono solo delle leggere strisce diagonali); in generale il DGD è inferiore agli $1.5 ps$, tranne che per la zona in cui l’ampiezza è piccola o nulla e la curvatura è grande dove il DGD arriva anche a $3.5 ps$ a causa dell’effetto quasi nullo dello spin. Osservando il SIRF si vede che questo non è mai superiore all’unità, a parte pochi casi con A_0 piccolo, a dimostrare le affermazioni fatte qui sopra sull’efficacia del profilo di spin in tal caso. In particolare, sia nel grafico del DGD che in quello del SIRF, si nota la presenza di una “vallata”, per A_0 tra 4 e $20 rad$ e per K tra 55 e $92 m^{-1}$, in cui il SIRF è minore di 0.3 ed è il minimo.

Confrontando i tre casi si nota che aumentando il periodo di spin le cose migliorano sempre di più, ovvero il DGD e il SIRF si riducono: l’azione maggiore viene fatta nei casi in cui si creano le risonanze che portano alle zone di massimo, ciò per il fatto che lo spin irrobustisce ulteriormente l’alta birifrangenza della fibra rendendola sempre meno sensibile alla curvatura.

Si nota una grossa differenza tra i casi $p = 0.5, 1 m$ e il caso $p = 5 m$; per quest'ultimo caso ci si aspetterebbe un andamento simile ai precedenti, seppur con i miglioramenti apportati da un periodo più lungo: per questo motivo è stata fatta una simulazione che estendesse l'ampiezza A_0 fino a $100 rad$ per il caso $p = 5 m$, dalla quale si sono ottenuti i grafici 3.7 e 3.8. Questi due grafici evidenziano delle analogie con i casi con periodo inferiore: pure qui il DGD da un certo A_0 in poi, cioè dopo la “vallata” iniziale, comincia a risalire, come evidenziato anche dal SIRF che ritorna all'unità e va oltre; sono presenti anche qui le zone di minimo intervallate da zone di massimo, però in numero molto maggiore e più piccole.

Analizzando tutti i grafici, e con il supporto di simulazioni su periodi intermedi, si individua un trend grafico che varia col periodo p : si ipotizza che il legame tra DGD, A_0 e K sia qualitativamente sempre lo stesso (diciamo quello di figura 3.3) e all'aumentare del periodo di spin p si verifica una compressione del grafico lungo l'asse K e un'estensione del grafico lungo l'asse A_0 (riducendo p si ha l'effetto opposto). In forma numerica questo trend è dato dal legame tra lo spin rate α e la birifrangenza $1/L_B$ ($= 1$ in tal caso); osservando i grafici si evincono le seguenti condizioni:

- Se $\alpha < 5 rad/m$ si è nella “vallata” di condizioni favorevoli;
- Se $\alpha > 5 rad/m$ si è nella zona dei minimi alternati ai massimi, quindi solo alcune condizioni sono favorevoli.

Per esempio, per $p = 0.5$ si è visto che la “vallata” si estende fino ad $A_0 = 1.2$, a cui corrisponde uno spin rate $\alpha = 5$.

Concludendo, è meglio utilizzare uno spin rate piccolo se si vuole avvolgere la fibra con raggi piccoli ed avere una riduzione del DGD rispetto al caso senza spin.

	$p = 0.5 m$	$p = 1 m$	$p = 5 m$	$p = 5 m - A_0$ esteso
DGD	Figura 3.1	Figura 3.3	Figura 3.5	Figura 3.7
SIRF	Figura 3.2	Figura 3.4	Figura 3.6	Figura 3.8

Tabella 3.1: Tabella delle figure di cui si è parlato qui sopra ottenute per $L_B = 1 m$, $L_F = 2 m$, $A_0 = [0, 20] rad$, $K = [0, 93] m^{-1}$, $L = 1000 m$, raggio costante.

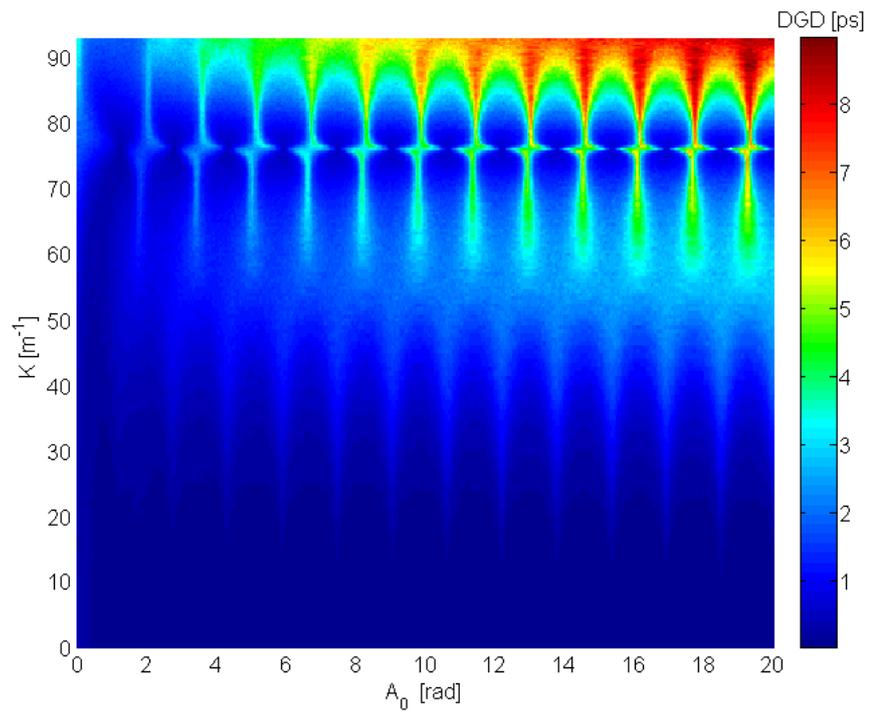


Figura 3.1

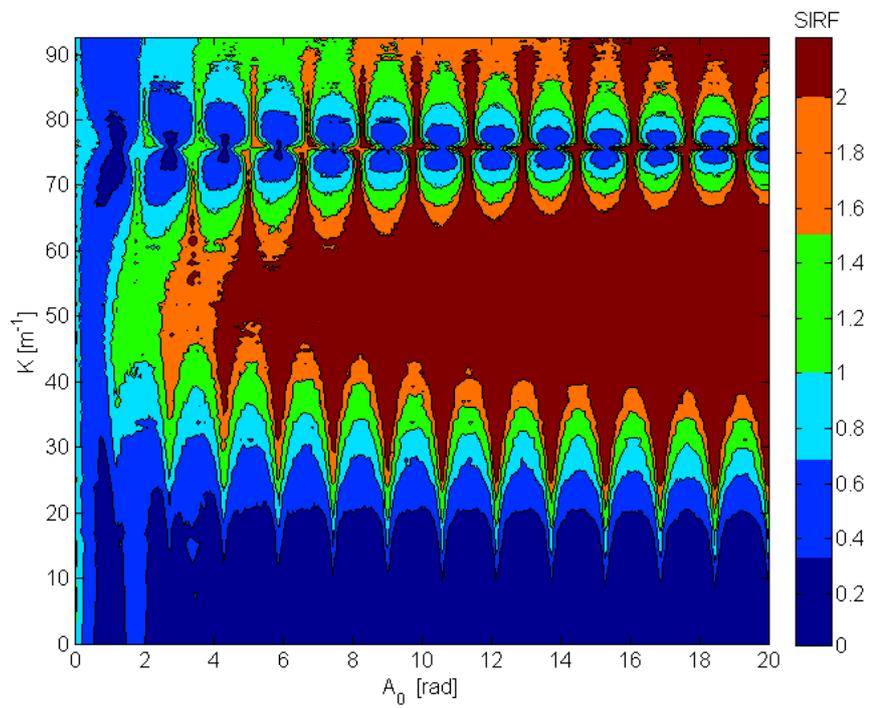


Figura 3.2

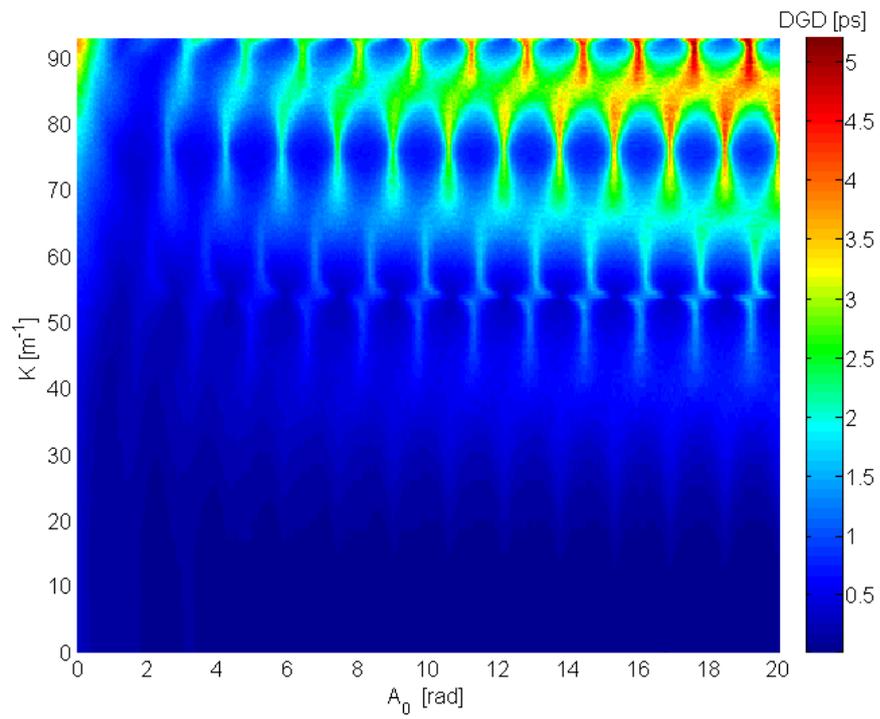


Figura 3.3

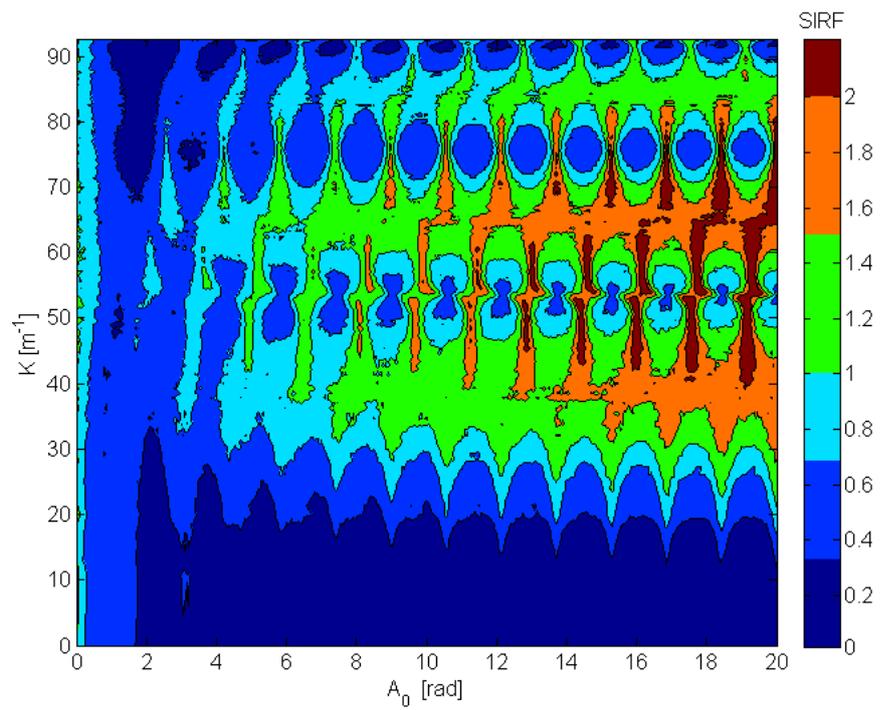


Figura 3.4

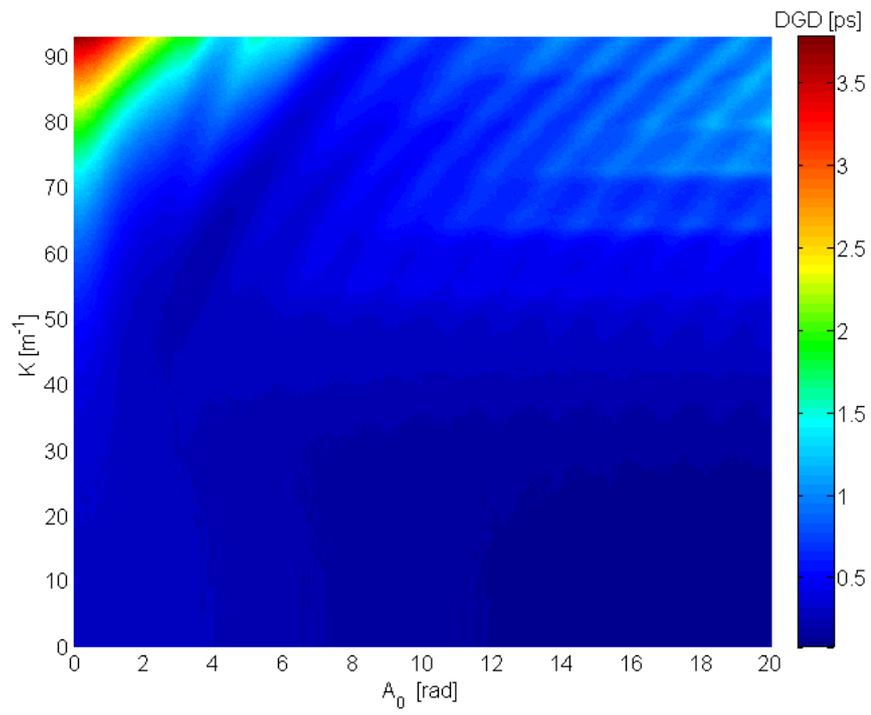


Figura 3.5

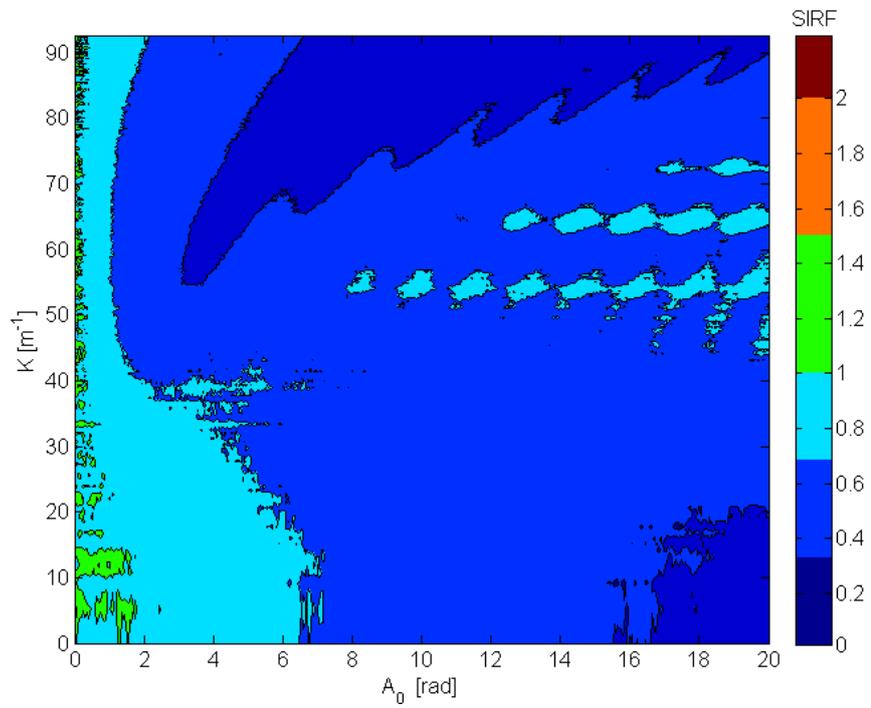


Figura 3.6

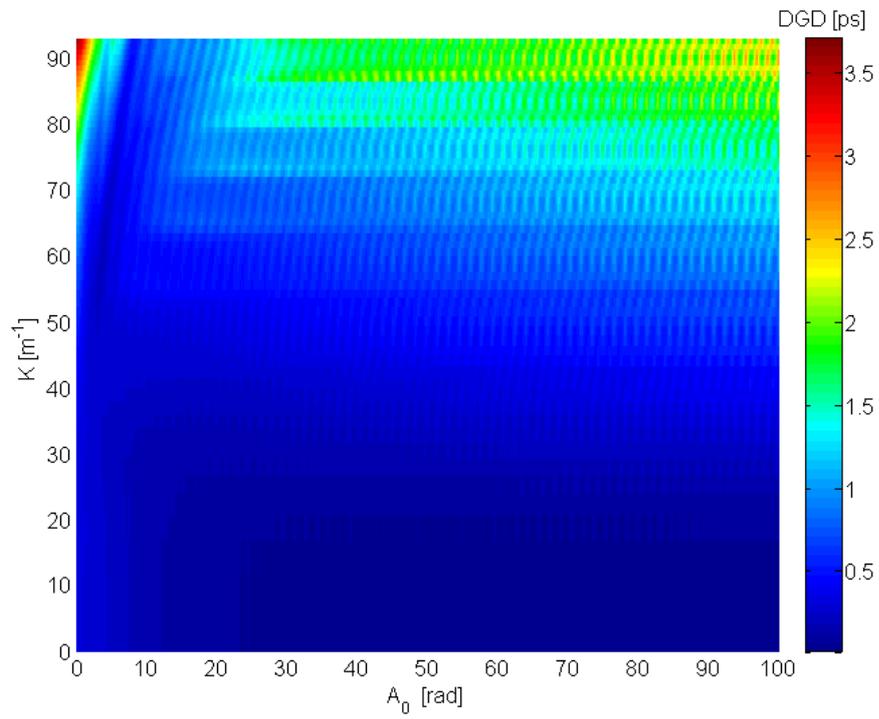


Figura 3.7

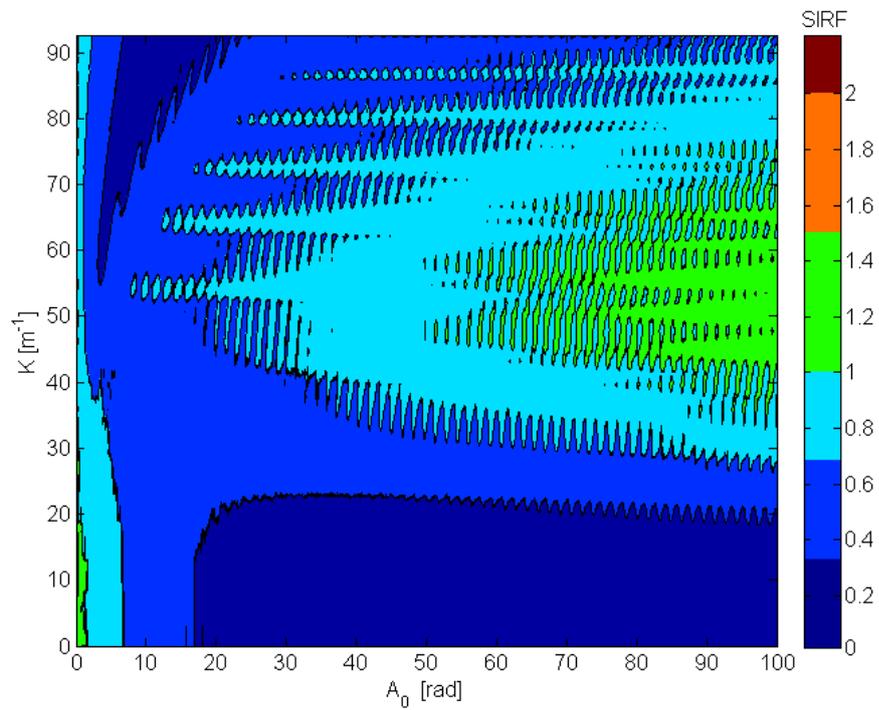


Figura 3.8

3.1.2 Dipendenza da L

Come noto, in una fibra con birifrangenza aleatoria e nel regime di lunga distanza il DGD cresce con la radice quadrata della lunghezza della fibra; la velocità con cui questa evoluzione arriva a regime è diversa a seconda del periodo di spin utilizzato. Analizzando i tre casi visti in precedenza, di cui si può osservare il DGD ogni 100 m , è emerso che più il periodo è piccolo e più lungo è questo transitorio; ad esempio, per il caso più lento, $p = 0.5$, il DGD arriva a regime attorno ai 600-700 m , come si può notare dalle figure 3.9, 3.10 e 3.11 (la scala dei colori è adattata ad ogni immagine perché il DGD cresce sempre lungo z e non si noterebbero le differenze mettendo una scala unica per tutte e tre le immagini). Una situazione simile si osserva sui grafici del SIRF che però non verranno mostrati. Invece, per $p = 1$ m il regime viene raggiunto a 400 m e per $p = 5$ m a 200 m .

Questo vale al variare di L_F e L_B fintanto che la fibra resta nel regime di lunga distanza.

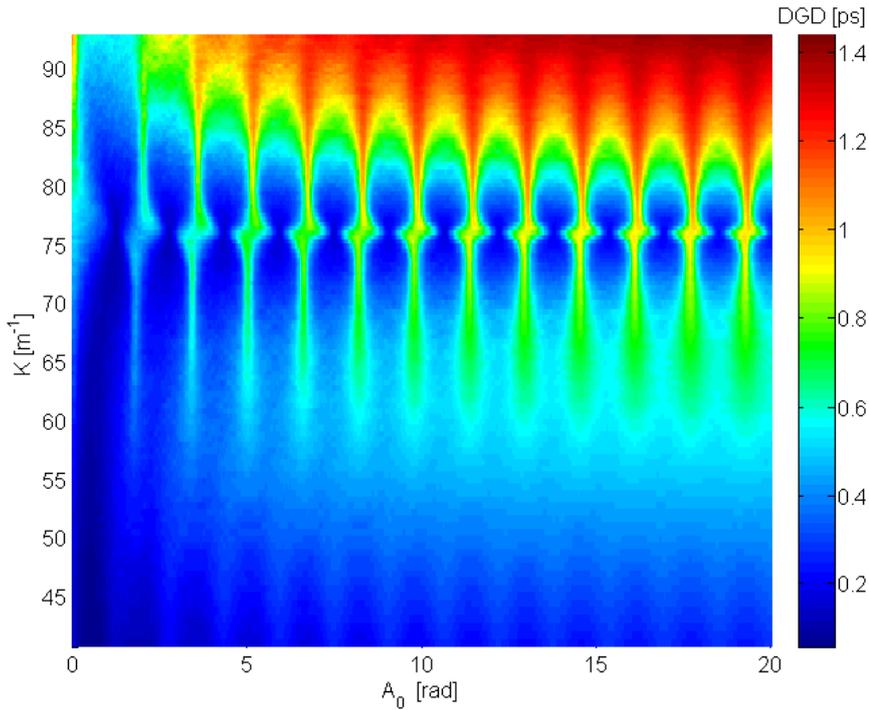


Figura 3.9: DGD a 100 m per $L_B = 1$ m , $L_F = 2$ m , $p = 0.5$ m .

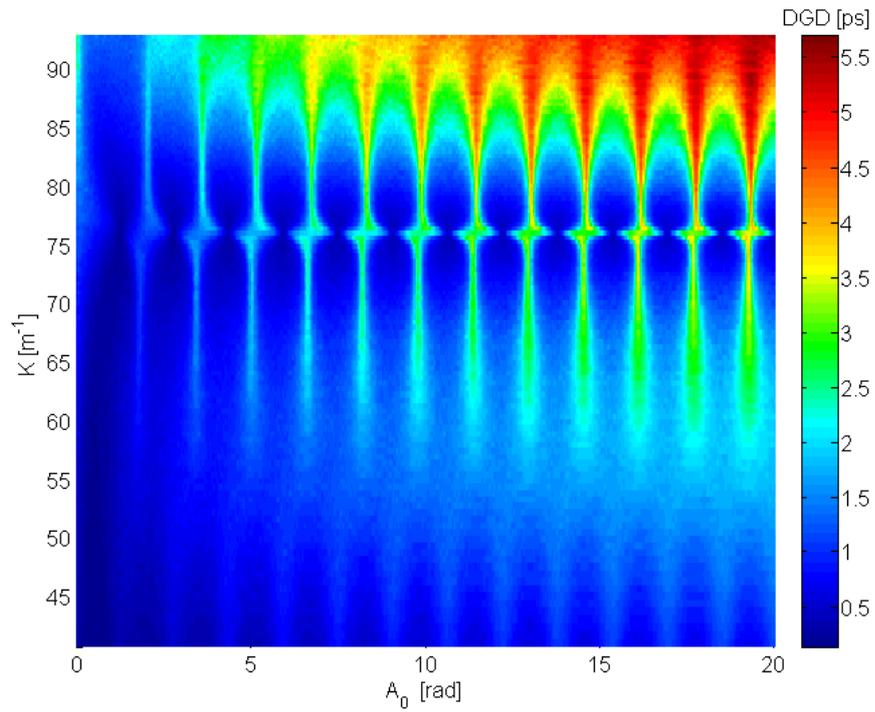


Figura 3.10: DGD a 500 m per $L_B = 1$ m, $L_F = 2$ m, $p = 0.5$ m.

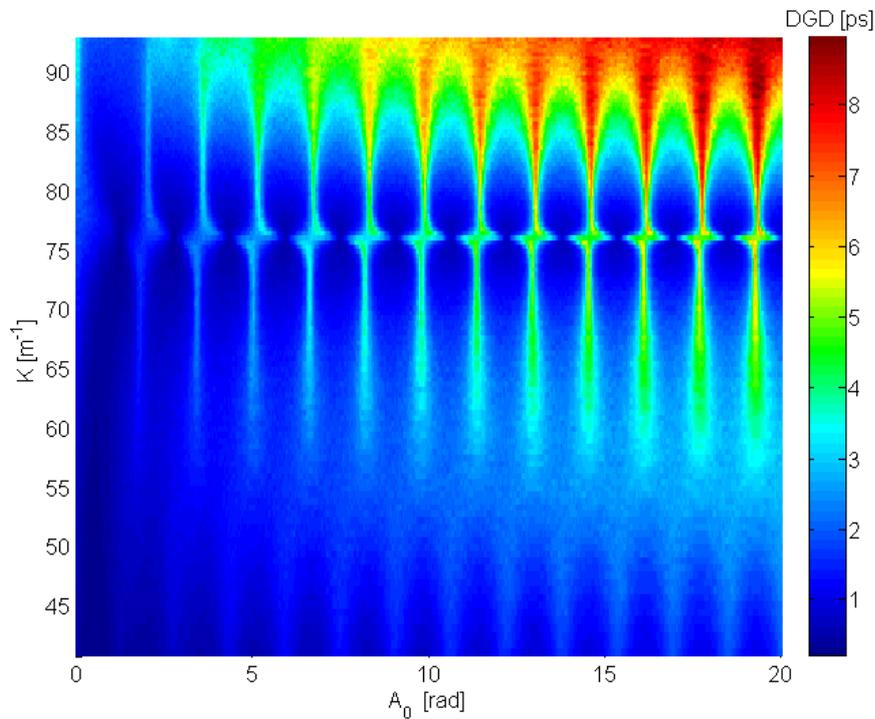


Figura 3.11: DGD a 1000 m per $L_B = 1$ m, $L_F = 2$ m, $p = 0.5$ m.

3.1.3 Dipendenza da L_F

Fino ad ora si è utilizzato $L_F = 2 m$; per poter capire cosa accade al variare di L_F sono state fatte delle simulazioni con gli stessi parametri utilizzati qui sopra, a parte la lunghezza di correlazione che ora vale $L_F = 10 m$. Analizzando i risultati e confrontandoli con quelli dei casi precedenti si osserva che le differenze sono le stesse per ogni periodo di spin utilizzato, per questo motivo si riporteranno i grafici solo nel caso $p = 5 m$, ovvero le figure 3.12 e 3.13, che saranno confrontate con le figure 3.5 e 3.6 (si imposta la scala dei colori delle seconde alle prime in maniera da poterle confrontare facilmente). L'aumento di L_F porta a una riduzione sia del DGD che del SIRF, come si può notare nelle figure, la quale è più o meno della stessa entità in ogni punto del grafico. Questa riduzione è legata al fatto che l'aumento della lunghezza di correlazione rende l'evoluzione della birifrangenza intrinseca lungo la fibra meno rapida e così viene ordinata meglio dallo spin.

3.1.4 Dipendenza da L_B

La lunghezza di battimento L_B è inversamente proporzionale alla birifrangenza della fibra, infatti vale $L_B = 2\pi/|\beta|$; quindi, aumentare dieci volte L_B corrisponde a ridurre dieci volte la birifrangenza. Mentre per il caso $L_B = 1 m$ la somma di birifrangenza intrinseca, che è un fenomeno aleatorio, e birifrangenza da curvatura, che è un fenomeno deterministico, rimane molto aleatoria visto che la prima componente è più grande o dello stesso ordine della seconda, nel caso in cui $L_B = 10 m$ tale somma è pressoché deterministica per ragioni opposte, di conseguenza si avrà un DGD più basso, il quale però cresce linearmente con la curvatura; si trova riscontro di ciò in figura 3.14 ottenuta con gli stessi parametri utilizzati in precedenza e con $p = 5 m$ e $L_B = 10 m$. Da questa figura e da quella del SIRF (figura 3.15) si vede che comunque esistono delle zone di minimo nelle quali ci sono delle risonanze tra la birifrangenza intrinseca e quella da curvatura. Queste figure (3.14 e 3.15) possono essere confrontate con le figure 3.12 e 3.13 (avendo già appurato che la variazione di L_F porta a piccoli cambiamenti) per vedere bene le differenze (i grafici del DGD e del SIRF hanno la stessa scala dei colori per poterli confrontare).

Ora si analizzano le figure 3.14 e 3.15. La birifrangenza da curvatura diventa di un ordine di grandezza inferiore a quella intrinseca da $K = 10 m^{-1}$ in poi: per K più piccoli il DGD è minimo e il SIRF è minore di 0.6, quindi la curvatura non influisce quasi per niente e lo spin fa il suo effetto; per K più grandi, in particolare $10 < K < 30 m^{-1}$, la birifrangenza da curvatura diventa dello stesso ordine di grandezza di quella intrinseca, queste interagiscono

negativamente provocando un aumento del DGD rispetto al caso senza spin e il conseguente aumento del SIRF oltre l'unità fino a 2.6 massimo. Per $K > 30 \text{ m}^{-1}$ la birifrangenza da curvatura diventa sempre più grande di quella intrinseca rendendo la birifrangenza totale quasi deterministica; infatti il DGD cresce linearmente con la curvatura in generale, confermato dal fatto che il SIRF diventa e resta unitario. Questa dipendenza lineare la si ha anche per $K < 30 \text{ m}^{-1}$ quando l'ampiezza dello spin è molto piccola e rende lo spin praticamente inefficace. Oltre a questo trend generale ci sono molte zone di minimo disposte su fasce diagonali, quelle stesse fasce che si vedono leggermente nelle figure 3.5, 3.6, 3.12 e 3.13 e che rappresentano delle condizioni particolari in cui lo spin riesce ad agire positivamente su una fibra con una birifrangenza che dipende molto dalla curvatura. Si nota che queste fasce nascono, insieme ai massimi per $10 < K < 30 \text{ m}^{-1}$, dagli A_0 che danno i minimi per $K = 0$: queste sono diagonali perché, all'aumentare della curvatura, serve un'ampiezza di spin maggiore per fare effetto rispetto al caso $K = 0$. Inoltre, in generale, all'aumentare di A_0 lo spin diventa troppo veloce e meno efficace rendendo meno profonde le zone di minimo.

Concludendo, mentre la variazione di L_F non apporta grossi cambiamenti, la variazione di L_B lo fa. Questo tipo di fibre a bassa birifrangenza non sono adatte ad essere avvolte e utilizzate nella realtà in quanto ci possono essere altri fattori che inducono birifrangenza, come la torsione, e la loro elevata sensibilità non garantisce nessun risultato.

	$L_B = 1 \text{ m}, L_F = 10 \text{ m}$	$L_B = 10 \text{ m}, L_F = 2 \text{ m}$
DGD	Figura 3.12	Figura 3.14
SIRF	Figura 3.13	Figura 3.15

Tabella 3.2: Tabella delle figure di cui si è parlato qui sopra ottenute per $p = 5 \text{ m}$, $A_0 = [0, 20] \text{ rad}$, $K = [0, 93] \text{ m}^{-1}$, $L = 1000 \text{ m}$, raggio costante.

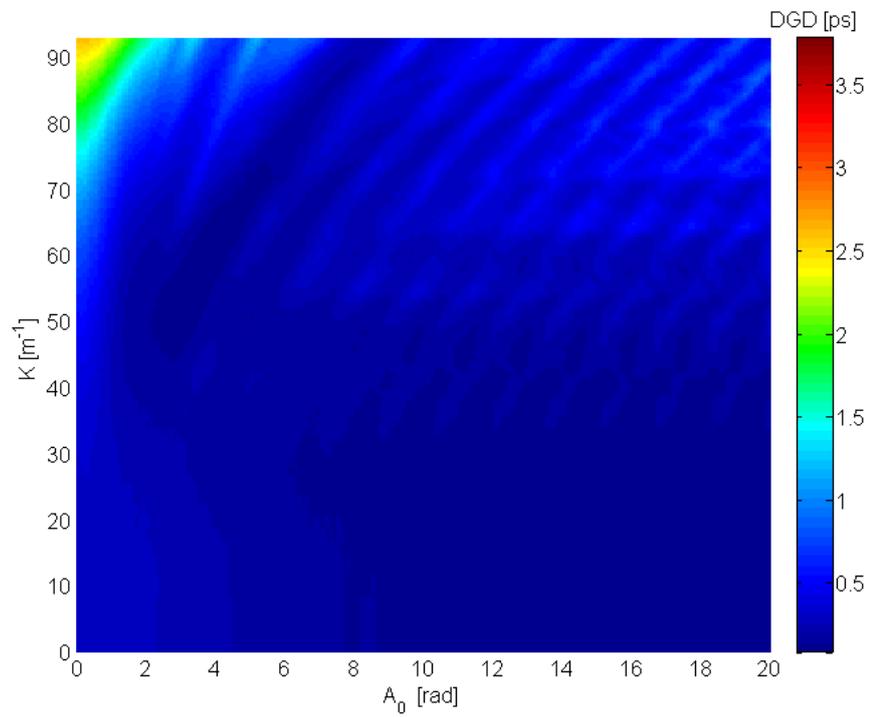


Figura 3.12

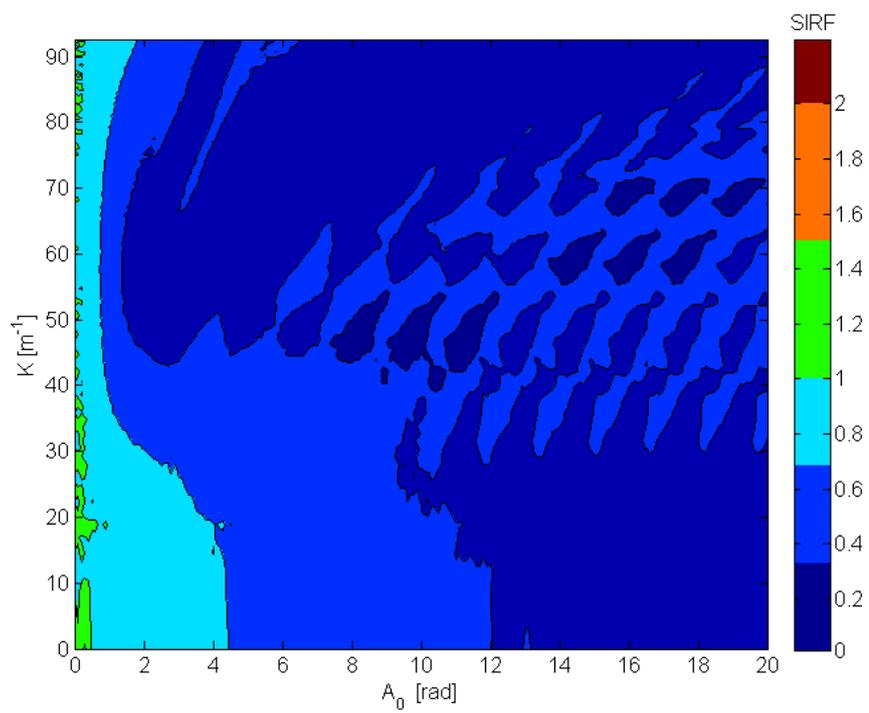


Figura 3.13

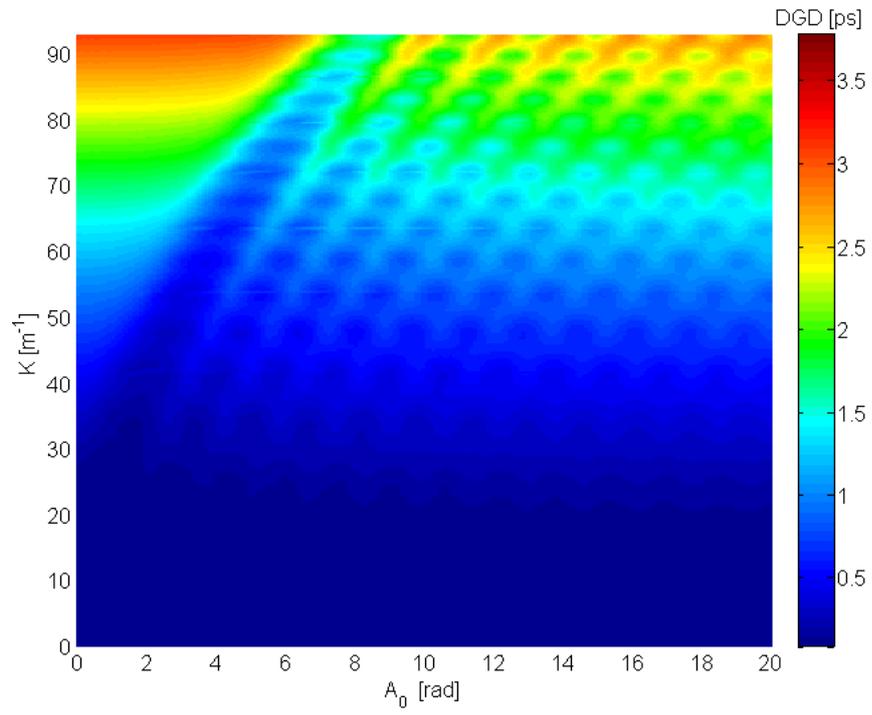


Figura 3.14

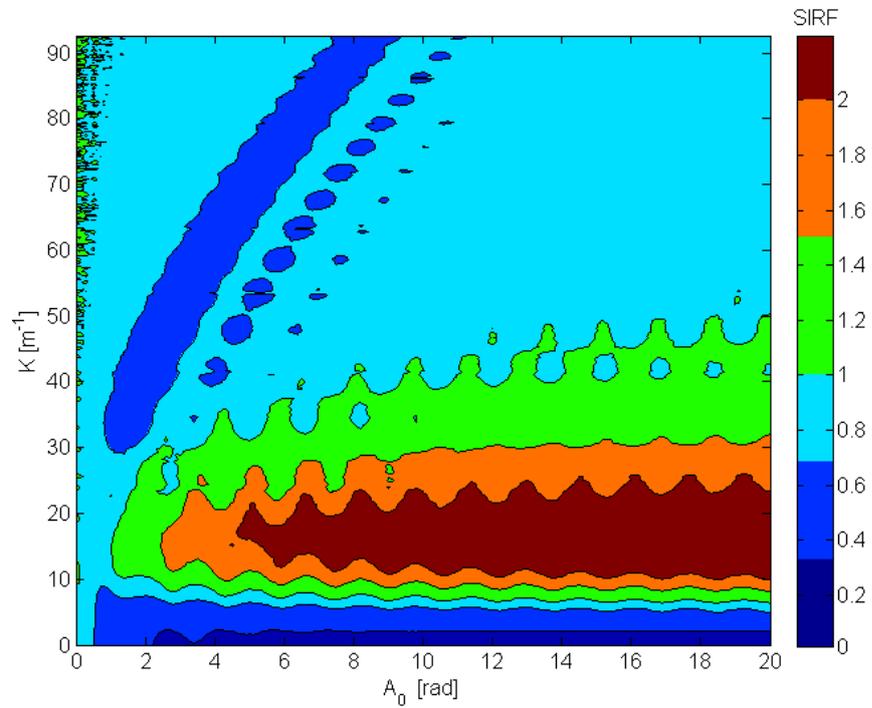


Figura 3.15

3.2 Fibra avvolta in bobina

Nel capitolo precedente è stato spiegato a cosa ci si riferisce parlando di avvolgimento in bobina e ora si analizzeranno gli esiti di simulazioni fatte con questa condizione più realistica. Appurato dalla sezione precedente sull'avvolgimento a raggio costante che la situazione migliore la si ha nel caso in cui il periodo di spin sia $p = 5 m$, tutte le simulazioni successive sono state fatte utilizzando tale valore. Riferendosi ai valori reali per le fibre ottiche compensatrici sono stati scelti i seguenti parametri: la lunghezza di battimento L_B varia nel range $[0.5, 10] m$; la lunghezza di correlazione L_F assume il valore $10 m$; l'ampiezza dello spin A_0 varia nel range $[0, 50] rad$; la curvatura K , che qui si riferirà al primo strato dell'avvolgimento in bobina, varia nel range $[0, 93] m^{-1}$; la lunghezza della fibra è $L = 1000 m$. Un altro parametro da considerare in questo caso è il passo h dell'avvolgimento in bobina, il quale dipende dal diametro della fibra utilizzata, che dipende a sua volta dal diametro del nucleo (il cui raggio è sempre $r = 62.5 \mu m$) e dallo spessore dei rivestimenti acrilici (variabile): per queste simulazioni sono stati utilizzati due passi differenti, ovvero 140 e $250 \mu m$. Infine è stata scelta la larghezza della bobina, ovvero $l = 2 cm$, necessario per calcolare quanti strati avrà l'avvolgimento in bobina.

In questa sezione si analizzeranno il DGD e il SIRF tramite grafici in funzione di A_0 e K al variare degli altri parametri visti in precedenza; non si parlerà della dipendenza da L in quanto sarebbe una ripetizione di quanto già detto nella sezione precedente. I vari grafici del SIRF, anche qui grafici di profilo con gli stessi livelli, avranno la stessa scala dei colori in maniera da poterli confrontare.

3.2.1 Dipendenza dal raggio della fibra

In base al raggio della fibra l'avvolgimento può essere formato da più o meno strati, andando ad incidere sulla birifrangenza indotta dall'avvolgimento. Ragionando si intuisce che più strati ci sono, quindi più grande è il raggio della fibra, minore sarà la birifrangenza da curvatura totale in quanto questa è inversamente proporzionale al raggio di avvolgimento, come visto nel secondo capitolo.

Si consideri una fibra con $L_B = 1 m$, $L_F = 10 m$ e tutti i parametri indicati nel paragrafo precedente, inoltre si consideri un passo di $140 \mu m$. In queste condizioni si ottengono le figure 3.16 e 3.17: il DGD è abbastanza piatto al variare di A_0 e K e assume valori inferiori a $1.2 ps$, ma nella zona per $A_0 < 2 rad$ e $K > 70 m^{-1}$ il DGD cresce ed arriva anche a $2 ps$ perché lo spin, avendo poco effetto per la sua piccola ampiezza, non riesce a contrastare

la curvatura. Particolari sono le numerose increspature verticali, ovvero per K costante, le quali derivano dagli A_0 che danno i massimi relativi per $K = 0 \text{ m}^{-1}$; queste si spostano leggermente in A_0 a partire da $K = 15 \text{ m}^{-1}$ fino a $K = 30 \text{ m}^{-1}$, dove la birifrangenza da curvatura e quella intrinseca hanno circa la stessa intensità. Per K maggiori la birifrangenza da curvatura diventa sempre più grande ma influenzando poco, a parità di A_0 , sul DGD della fibra, perchè questa ha birifrangenza intrinseca alta. Tali increspature derivano dall'effetto combinato dello spin e del tipo di avvolgimento visto che sono costanti in K ; infatti, l'avvolgimento, oltre ad aggiungere la curvatura aggiunge una torsione, che cambia segno ad ogni strato dell'avvolgimento, e quindi agisce come un profilo di spin triangolare. Come si vedrà alla fine di questo capitolo, la torsione è molto debole rispetto alla curvatura, per questo le increspature sono leggere. Si nota un altro andamento, legato a quello appena visto, al variare di A_0 : per $0 < K < 30 \text{ m}^{-1}$ il DGD, in generale, tende a decrescere all'aumentare di A_0 (cosa più evidente nel SIRF che vale 0.7 in $A_0 = 5 \text{ rad}$ e 0.1 in $A_0 = 50 \text{ rad}$) in quanto la curvatura è poca e lo spin riesce ad agire sempre meglio; invece, per $30 < K < 90 \text{ m}^{-1}$ avviene l'effetto opposto, ovvero il DGD in generale cresce all'aumentare di A_0 in quanto ora la curvatura è più grande e rende sempre meno efficaci gli spin più veloci (infatti per spin lenti, $A_0 < 5$, si nota una "vallata" di minimi).

Ora si considera una fibra identica alla precedente ma con un raggio maggiore che dia un passo di $250 \mu\text{m}$: in questa condizione si ottengono le figure 3.18 e 3.19. Queste sono pressoché identiche alle figure 3.16 e 3.17, la differenza sta soprattutto nel DGD che ora è più basso per il fatto che l'avvolgimento, avendo più strati composti da meno fibra, nel complesso apporta una birifrangenza più piccola; il SIRF, invece, è leggermente più alto perché, essendoci più strati ed avendo la torsione intensità maggiore, lo spin indotto dalla torsione è più veloce e forte e va di più in contrasto con lo spin della fibra. Queste differenze nell'avvolgimento saranno spiegate meglio nell'ultimo paragrafo di questo capitolo.

	$h = 140 \mu\text{m}$	$h = 250 \mu\text{m}$
DGD	Figura 3.16	Figura 3.18
SIRF	Figura 3.17	Figura 3.19

Tabella 3.3: Tabella delle figure di cui si è parlato qui sopra ottenute per $L_B = 1 \text{ m}$, $L_F = 10 \text{ m}$, $p = 5 \text{ m}$, $A_0 = [0, 50] \text{ rad}$, $K = [0, 93] \text{ m}^{-1}$, $L = 1000 \text{ m}$.

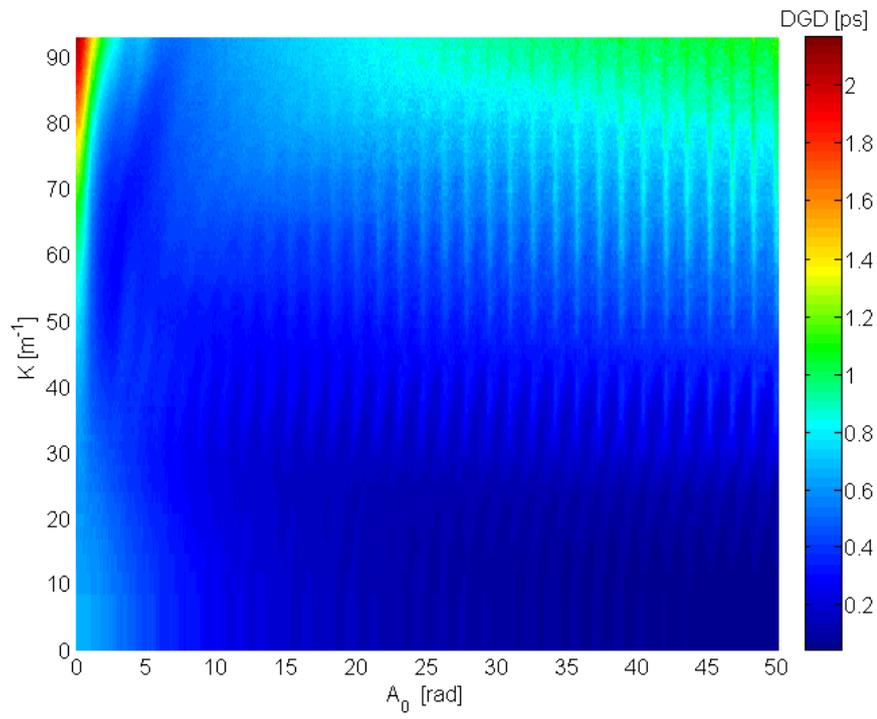


Figura 3.16

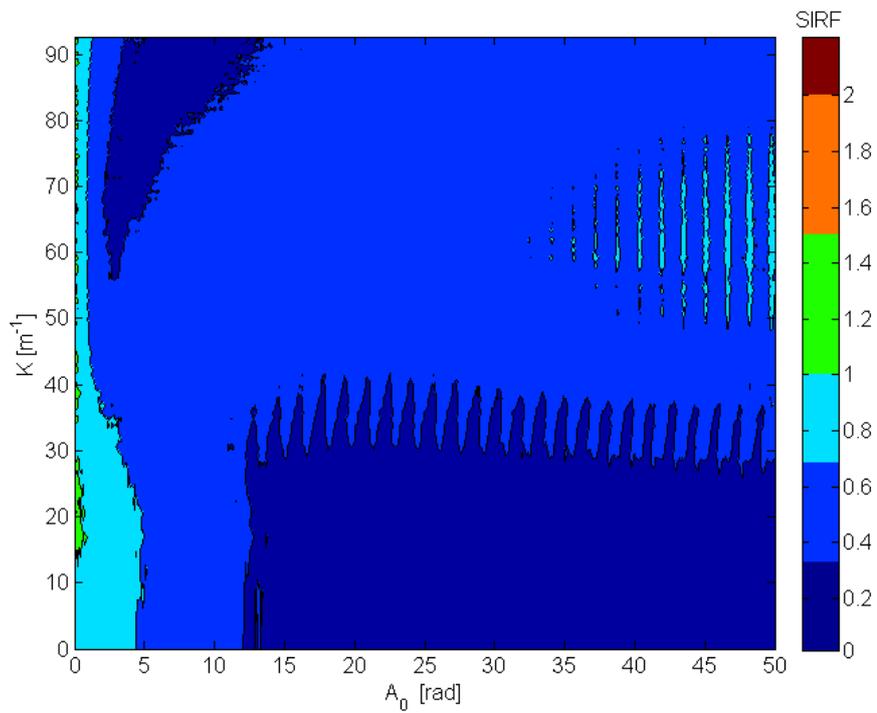


Figura 3.17

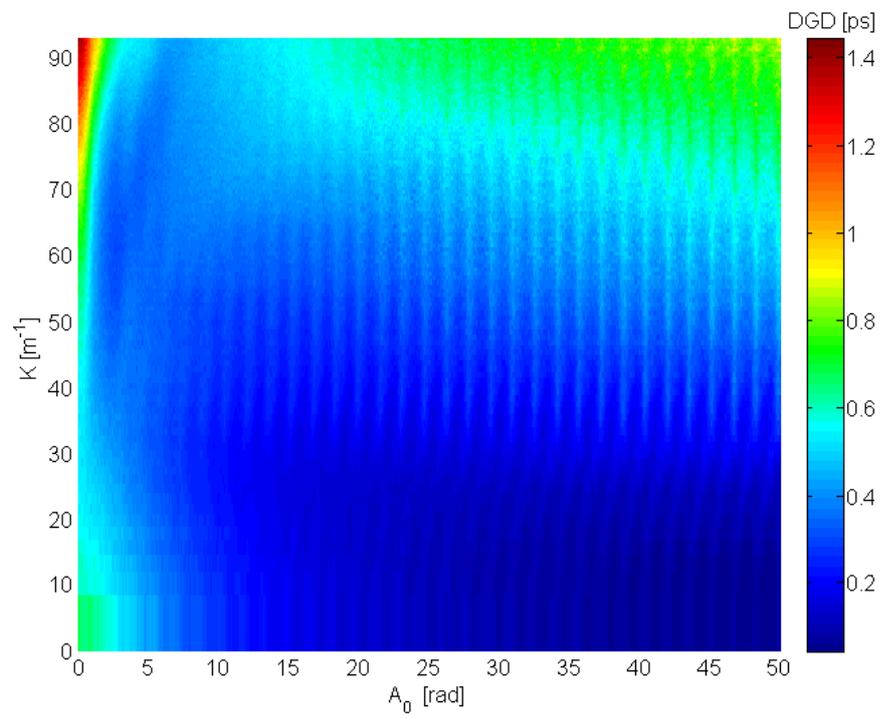


Figura 3.18

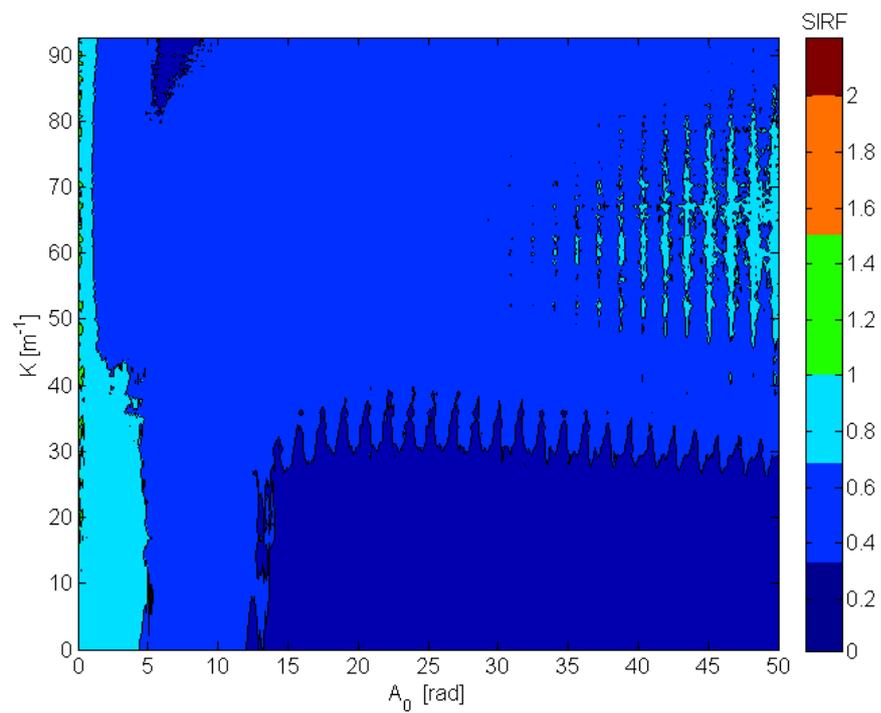


Figura 3.19

3.2.2 Dipendenza da L_B

Il parametro L_B è molto importante nelle fibre ottiche perché, come visto nel caso a raggio costante, influenza molto la birifrangenza intrinseca ed inoltre, come L_F , non è controllabile in fase di produzione. Una prima analisi della dipendenza del DGD e del SIRF da questo parametro la si fa confrontando le figure 3.16 e 3.17 ($L_B = 1 \text{ m}$) con le figure 3.20 e 3.21, ottenute con gli stessi parametri delle prime ma con $L_B = 5 \text{ m}$. L'aumento di L_B comporta una riduzione della birifrangenza, quindi si riduce anche il DGD nel caso in cui la curvatura sia assente o poco intensa (come si vede nei grafici per $K < 10 \text{ m}^{-1}$ e per ogni A_0); però, la riduzione della birifrangenza rende la fibra più sensibile alla curvatura (in generale alla birifrangenza dell'avvolgimento), allora il DGD diventa più del doppio e in alcuni punti addirittura 6 volte maggiore rispetto al caso $L_B = 1 \text{ m}$. Nel DGD sono ancora presenti le increspature verticali, anche se ora si spostano molto di più in A_0 e sono più numerose. Si nota che il DGD subisce delle forti variazioni per $10 < K < 50 \text{ m}^{-1}$, vi sono zone di minimo intervallate da zone di massimo per il fatto che la fibra è sensibile e la curvatura non è ancora dominante; queste variazioni sono poco visibili nel grafico del DGD, ma sono ben visibili nel grafico del SIRF, il quale ora è maggiore di 1 e arriva anche a 3.5, mentre nel caso $L_B = 1 \text{ m}$ non superava i 0.5 nella stessa zona. Per $K > 50 \text{ m}^{-1}$ il SIRF si stabilizza e decresce al crescere della curvatura; in realtà la curvatura diventa dominante e fa crescere il DGD linearmente, però lo spin agisce comunque positivamente rendendo il DGD più piccolo rispetto al caso senza spin, di conseguenza il SIRF è minore di 1. Come visto anche nei casi con raggio costante, aumentare A_0 peggiora le cose e per A_0 piccoli, in questo caso da 1.5 a 10 *rad*, è presente una "vallata" di minimi in cui il DGD cresce lentamente con la curvatura e il SIRF è addirittura inferiore a 0.3.

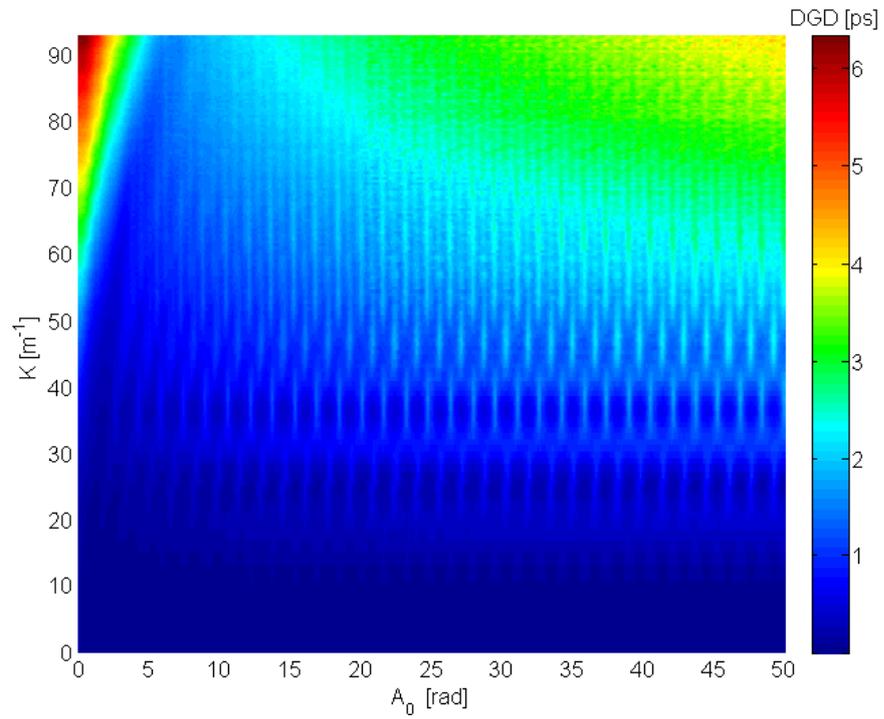


Figura 3.20: DGD per $L_B = 5 \text{ m}$, $L_F = 10 \text{ m}$, $p = 5$, passo $140 \mu\text{m}$.

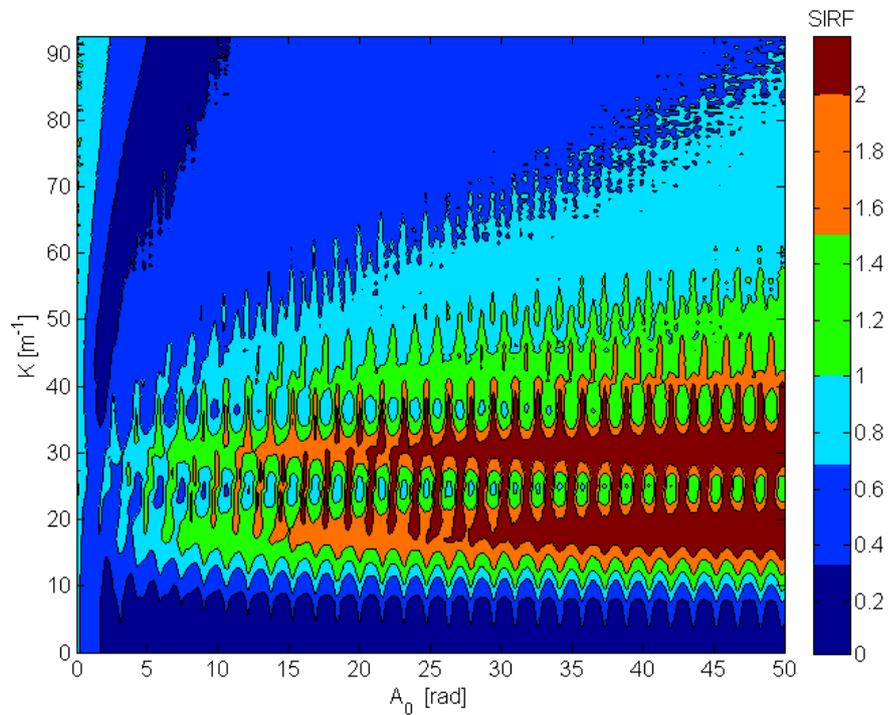


Figura 3.21: SIRD per $L_B = 5 \text{ m}$, $L_F = 10 \text{ m}$, $p = 5$, passo $140 \mu\text{m}$.

Questa prima analisi sulla dipendenza da L_B ha dato delle indicazioni chiare su ciò che avviene, però ora ci si addentra nei particolari analizzando i risultati di simulazioni in cui si varia L_B in maniera più fine. In queste simulazioni sono stati utilizzati i seguenti parametri: la lunghezza di battimento L_B varia nel range $[0.5, 10]$ m ; la lunghezza di correlazione L_F assume il valore 10 m ; l'ampiezza dello spin sinusoidale A_0 varia nel range $[0, 40]$ rad ; il periodo dello spin è $p = 5$ m ; la curvatura K varia nel range $[0, 93]$ m^{-1} ; la lunghezza della fibra è $L = 1000$ m ; il passo assume il valore $h = 140$ μm . Ogni simulazione è stata fatta per un A_0 fisso e variando L_B e K , quindi i grafici che verranno mostrati saranno del DGD e del SIRF in funzione di L_B e K .

Si va ad analizzare per primo il caso senza spin tramite il grafico del DGD di figura 3.22. Come visto in precedenza, il DGD cresce al crescere della curvatura, in particolare cresce di più se L_B è grande e di meno se L_B è piccolo: il caso migliore lo si ha per $L_B = 0.5$ m , dove addirittura il DGD decresce da 1.35 ps per $K = 0$ m^{-1} a 1.11 ps per $K = 41$ m^{-1} e poi cresce lentamente fino ad 1.57 ps per $K = 92$ m^{-1} , mentre il caso peggiore lo si ha per $L_B = 10$ m , dove il DGD passa dai 0.07 ps per $K = 0$ m^{-1} ai 7.4 ps per $K = 93$ m^{-1} . Queste sono tutte conferme del fatto che aumentare L_B riduce il DGD ma rende la fibra più sensibile alla curvatura.

Ora si aggiunge un altro effetto al problema, ovvero lo spin, e si osserva cosa succede analizzando il DGD delle figure 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27 ottenute utilizzando rispettivamente le seguenti ampiezze dello spin: 5 , 10 , 20 , 30 e 40 rad . Tutti questi grafici hanno, in generale, lo stesso andamento in K e L_B del caso senza spin, ma con delle differenze apportate proprio dallo spin: quella più evidente è il valore del DGD, il quale risulta più basso e la cui riduzione è maggiore per le zone con una curvatura di una certa entità; l'ampiezza di spin migliore è quella più piccola (ovvero ci si trova nella "vallata" vista nei paragrafi precedenti) e all'aumentare di questa il DGD tende a crescere sempre di più. Per ogni ampiezza di spin si osserva che il DGD, per uno o più insiemi di valori di K , cresce meno lentamente all'aumentare di L_B : queste fasce rappresentano quelle zone di minimo viste nei paragrafi precedenti. Analizzando i grafici del SIRF corrispondenti a quelli del DGD, ovvero le figure 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, si evince ancora una volta che è meglio utilizzare ampiezze di spin piccole per avere un guadagno, in particolare un SIRF minore di 0.6 , sia in queste fasce di minimo che in generale.

Concludendo, è meglio lavorare con fibre aventi un'alta birifrangenza, ovvero un piccolo L_B , per ridurre al minimo la sensibilità della fibra dalla curvatura visto che si lavora con curvature di una certa intensità; inoltre è

meglio utilizzare degli spin rate non troppo veloci; in questo modo si può avvolgere la fibra con raggi diversi ottenendo più o meno lo stesso risultato.

	$A_0 = 0 \text{ rad}$	$A_0 = 5 \text{ rad}$	$A_0 = 10 \text{ rad}$
DGD	Figura 3.22	Figura 3.23	Figura 3.24
SIRF		Figura 3.28	Figura 3.29

	$A_0 = 20 \text{ rad}$	$A_0 = 30 \text{ rad}$	$A_0 = 40 \text{ rad}$
DGD	Figura 3.25	Figura 3.26	Figura 3.27
SIRF	Figura 3.30	Figura 3.31	Figura 3.32

Tabella 3.4: Tabella delle figure di cui si è parlato qui sopra ottenute per $L_B = [0.5, 10] \text{ m}$, $L_F = 10 \text{ m}$, $p = 5 \text{ m}$, $K = [0, 93] \text{ m}^{-1}$, $L = 1000 \text{ m}$, $h = 140 \text{ }\mu\text{m}$.

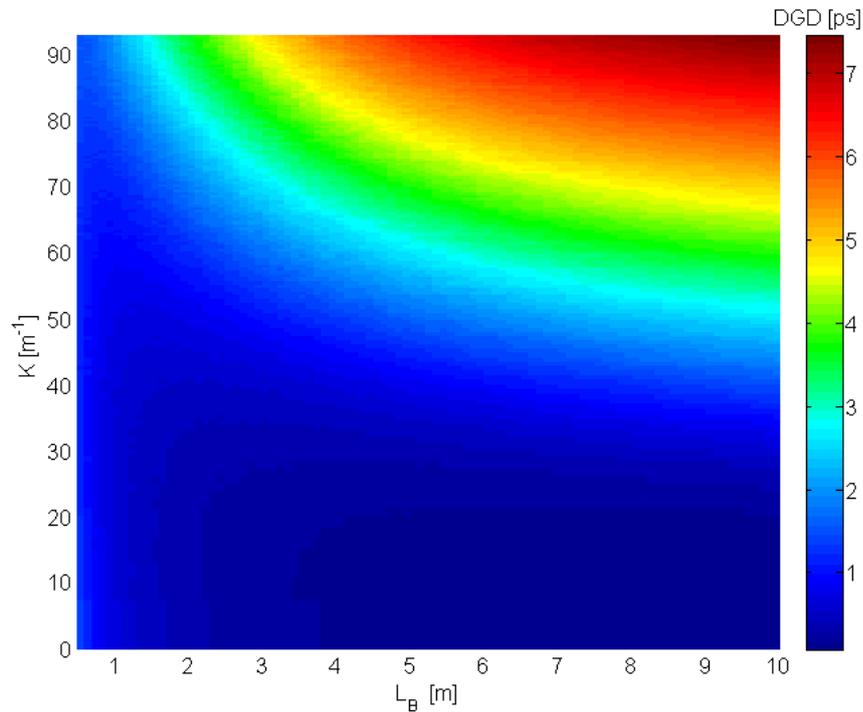


Figura 3.22

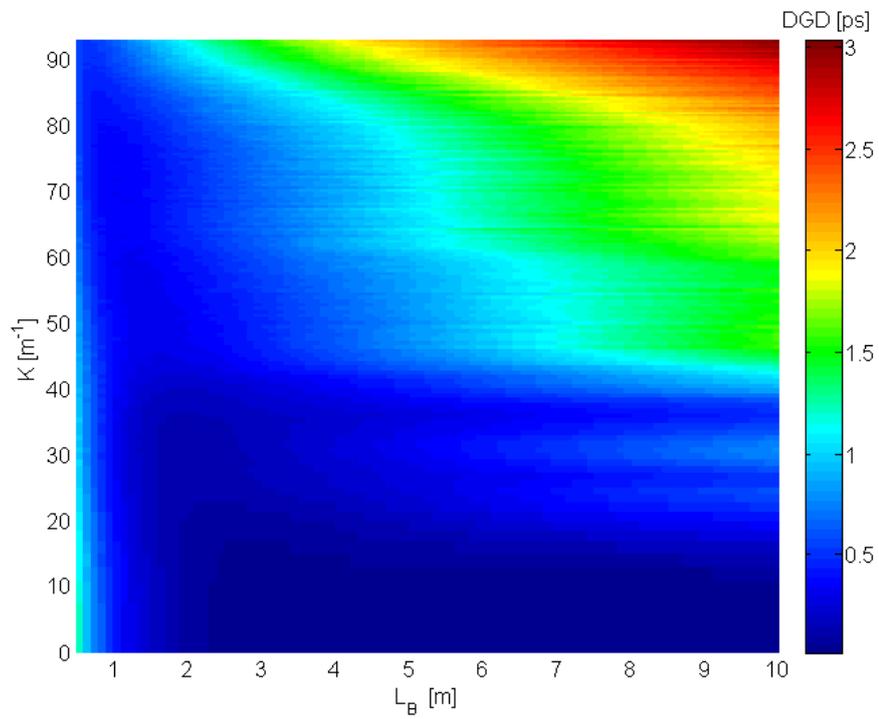


Figura 3.23

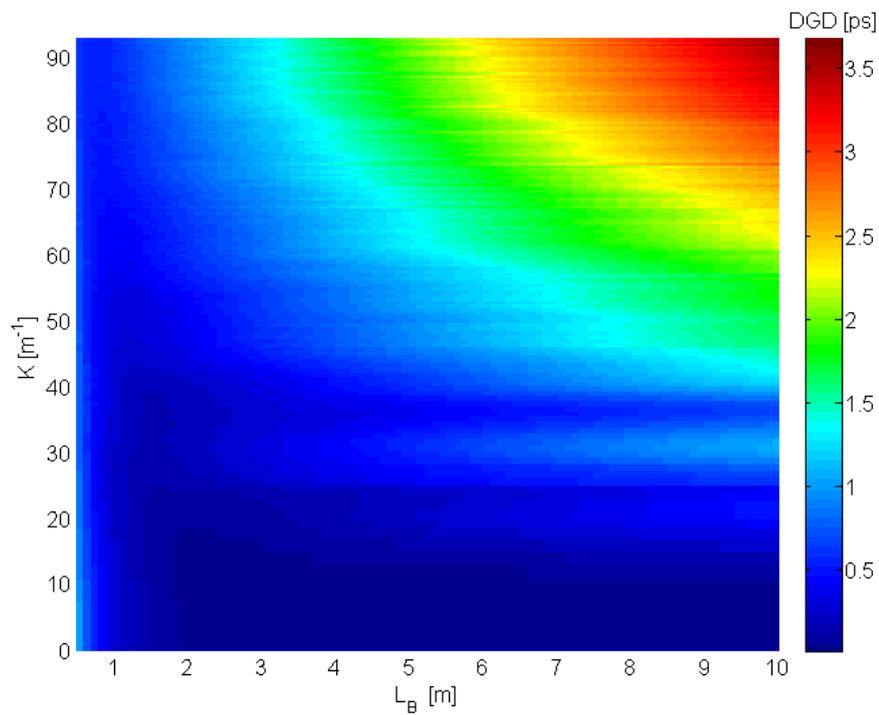


Figura 3.24

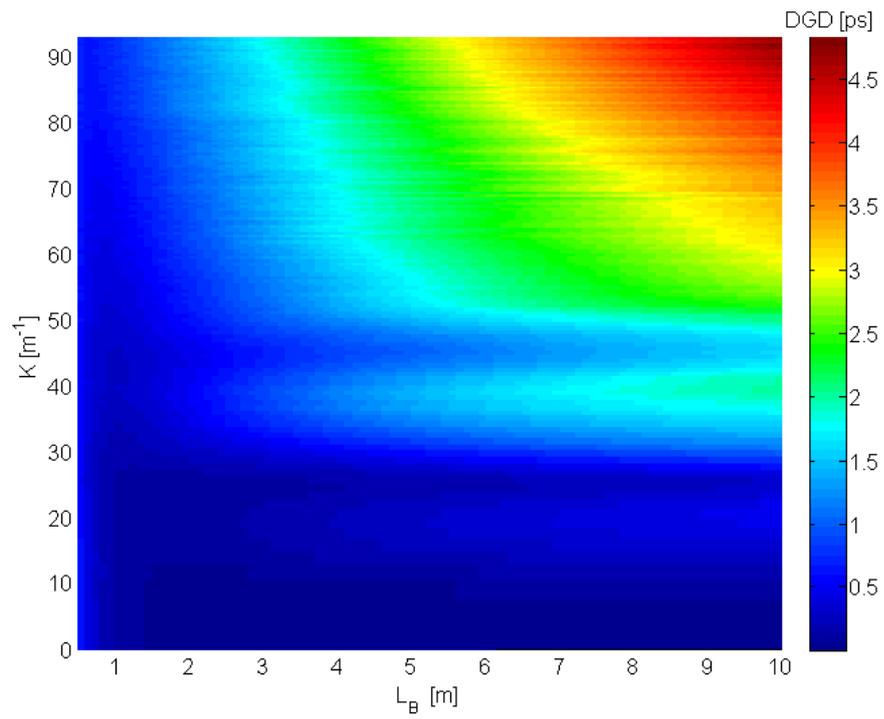


Figura 3.25

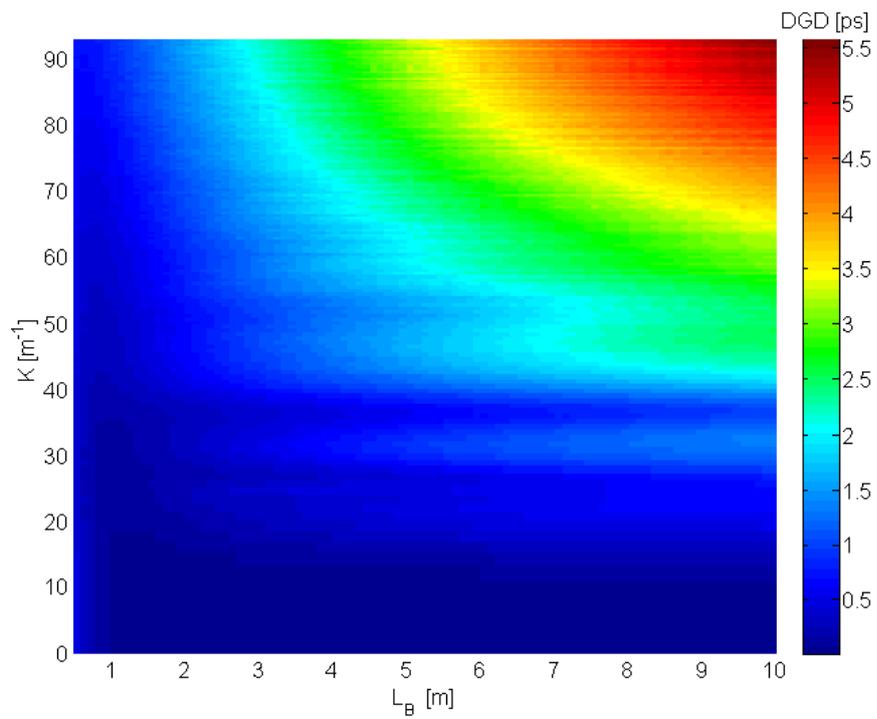


Figura 3.26

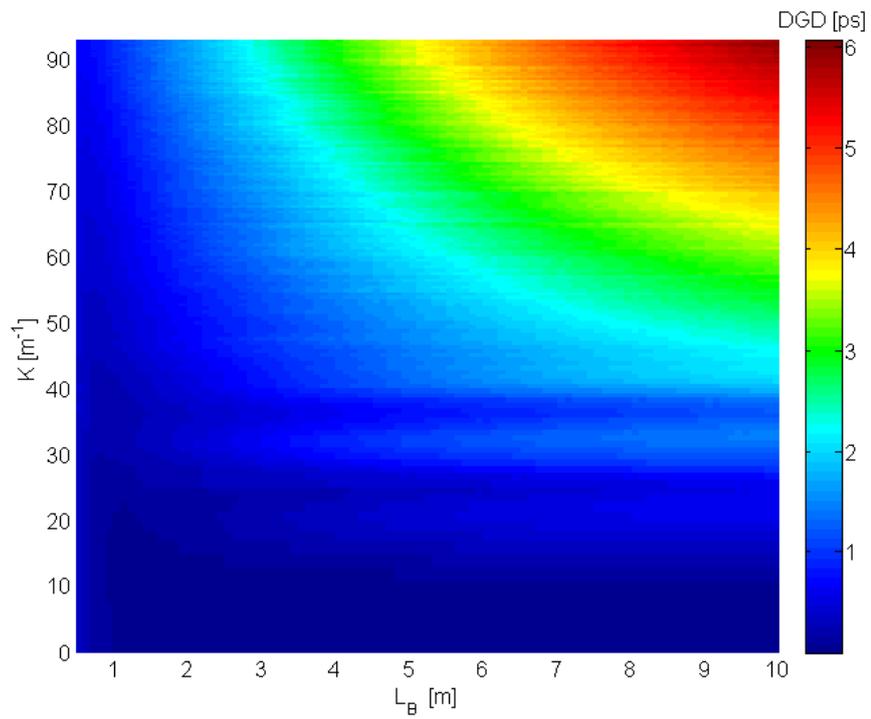


Figura 3.27

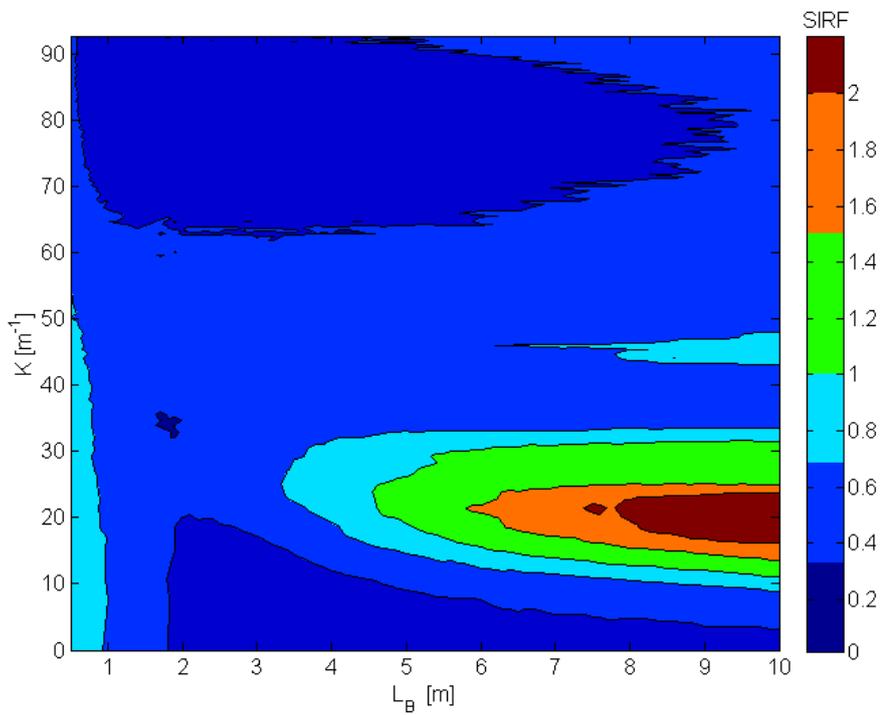


Figura 3.28

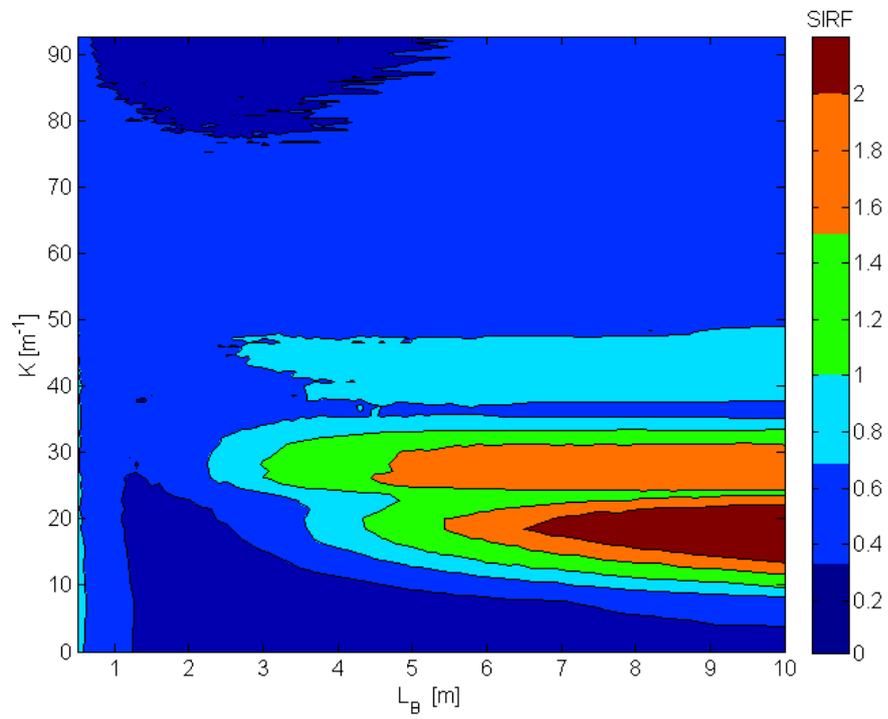


Figura 3.29

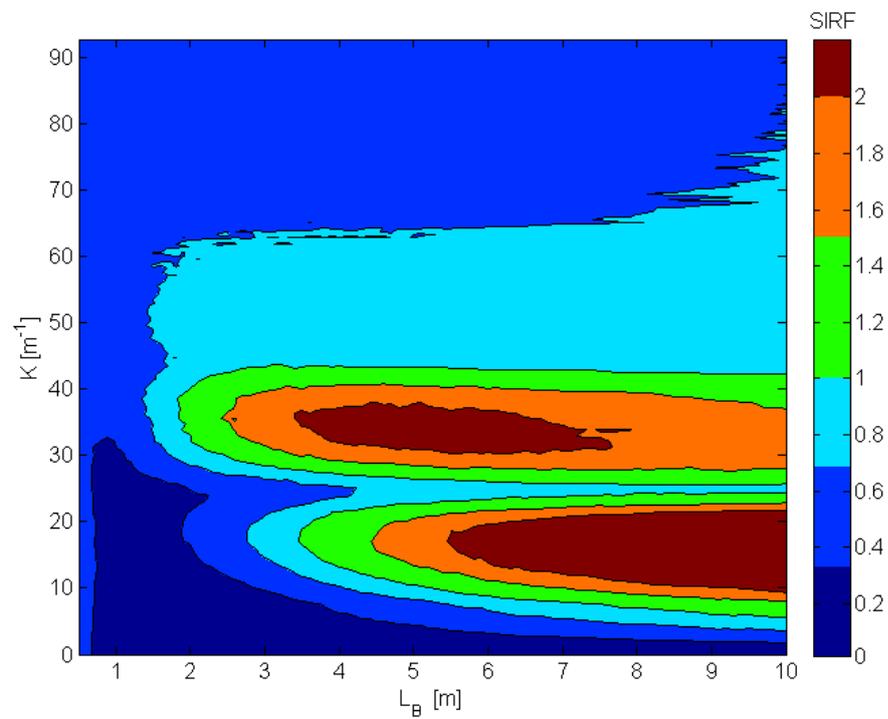


Figura 3.30

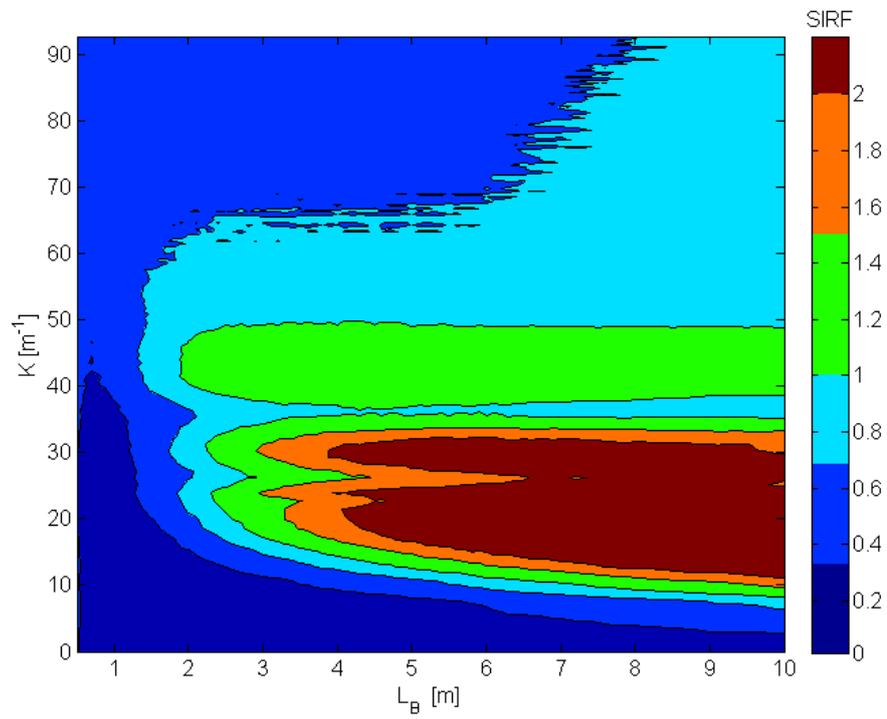


Figura 3.31

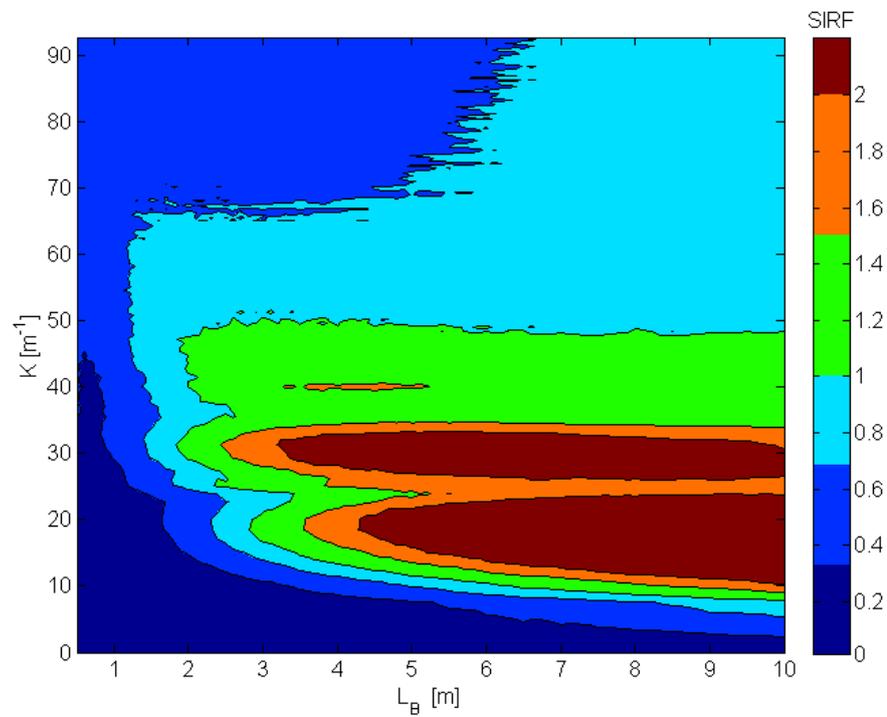


Figura 3.32

3.3 Confronto tra i due tipi di avvolgimento

I due tipi di avvolgimento considerati sono abbastanza diversi tra loro, come visto nel secondo capitolo; in particolare l'avvolgimento a raggio costante non è realistico, sia perché non si può avvolgere fisicamente una fibra sempre con lo stesso raggio seguendo un cerchio sia perché non è possibile aggiungere in qualche modo una birifrangenza che resti costante su tutta la fibra; invece l'avvolgimento in bobina è molto realistico visto che riproduce l'avvolgimento ad elica e tiene conto dei vari strati che si vanno a creare. Si può fare un confronto tra i due tipi di avvolgimento, in un caso particolare, confrontando la figure 3.33 e 3.34 ottenute con raggio costante con le figure 3.16 e 3.17 ottenute con l'avvolgimento in bobina. Guardando i grafici del DGD (3.16 e 3.33) la differenza sostanziale la si ha quando la curvatura diventa importante, ovvero per $K > 40 m^{-1}$, dove il DGD è molto frastagliato e in alcuni punti raggiunge i $7 ps$ nel caso di raggio costante, mentre è molto stabile e non supera mai i $2 ps$ nel caso di avvolgimento in bobina; per K più piccoli le differenze tra i due casi sono davvero minime, ciò a causa del grande raggio di curvatura che porta a creare sulla bobina un solo strato o un numero di strati molto limitato facendo assomigliare l'avvolgimento a quello con raggio costante. Questa differenza di comportamento al variare di K la si ritrova nel SIRF: i due grafici (3.17 e 3.34) sono praticamente identici per $K < 40 m^{-1}$, mentre per K maggiori nel caso di avvolgimento a raggio costante vengono evidenziate tutte le zone di minimo che danno anche un SIRF più piccolo del caso di avvolgimento in bobina.

Come già visto, queste differenze sono dovute alla diversa birifrangenza indotta: mentre nel caso di raggio costante questa è costante lungo tutta la fibra e dipende solo dalla curvatura, nel caso di avvolgimento in bobina questa diminuisce strato dopo strato e dipende anche dalla torsione. Si capisce che la curvatura è molto più grande della torsione e incide di più sul DGD osservando le formule di κ e γ nel paragrafo 2.4 e le loro figure 3.35 e 3.36 ottenute per una curvatura iniziale di $K = 23.9 m^{-1}$ e per i due diversi passi h (nella figura 3.36 la torsione di ogni strato dovrebbe avere segno opposto rispetto agli strati adiacenti, ma per poter fare meglio il confronto si è scelto di rendere tutto positivo). In queste due figure si nota che nel caso in cui $h = 250 \mu m$ la curvatura e la torsione diminuiscono più velocemente rispetto al caso $h = 140 \mu m$ essendoci più strati; mentre la curvatura parte sempre da $23.9 m^{-1}$, la torsione è maggiore nel caso con passo più grande e provoca quelle differenze nel DGD di cui si è parlato nel paragrafo 3.2.1. A ulteriore conferma di tutto si osserva il grafico 3.37 ottenuto simulando con $L_F = 10$, $L_B = 1$, $p = 5$, $A_0 = 10$ e $h = 140 \mu m$ nei seguenti casi: raggio costante; avvolgimento in bobina; avvolgimento in bobina senza torsione.

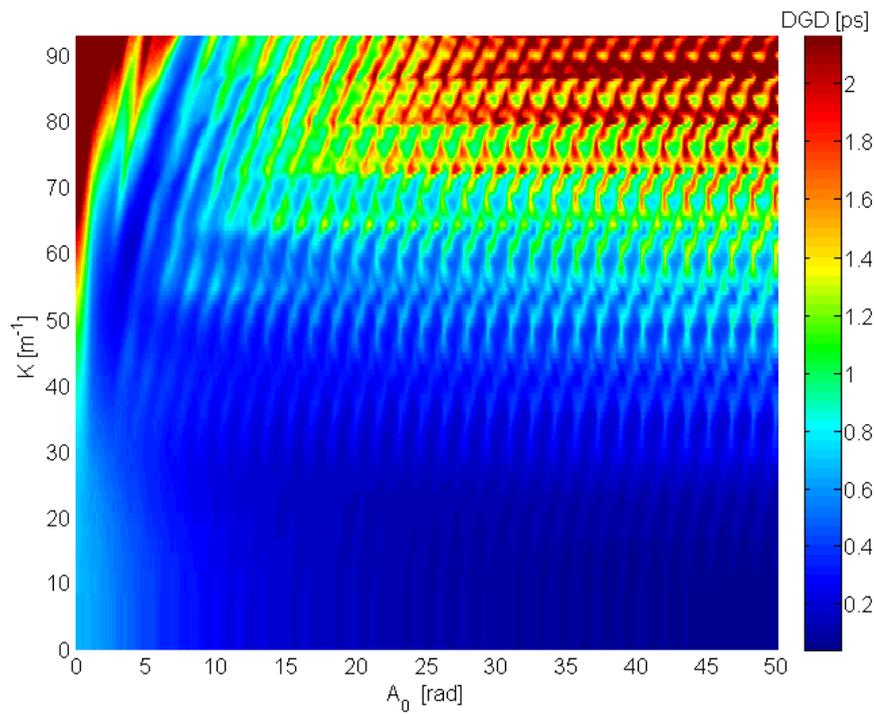


Figura 3.33: DGD per $L_B = 1 \text{ m}$, $L_F = 10 \text{ m}$, $p = 5$, raggio costante.

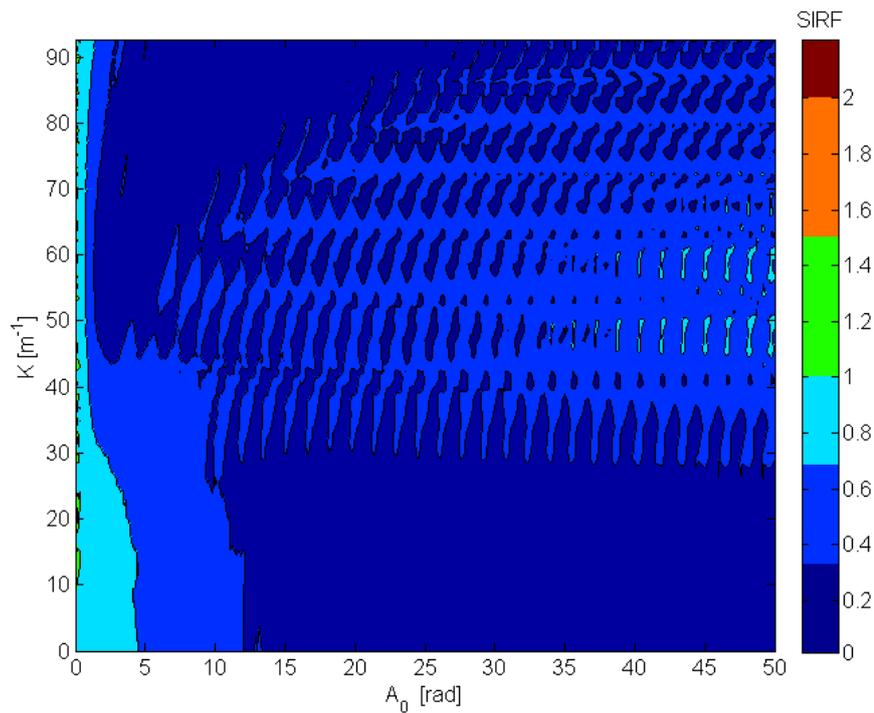


Figura 3.34: SIRF per $L_B = 1 \text{ m}$, $L_F = 10 \text{ m}$, $p = 5$, raggio costante.

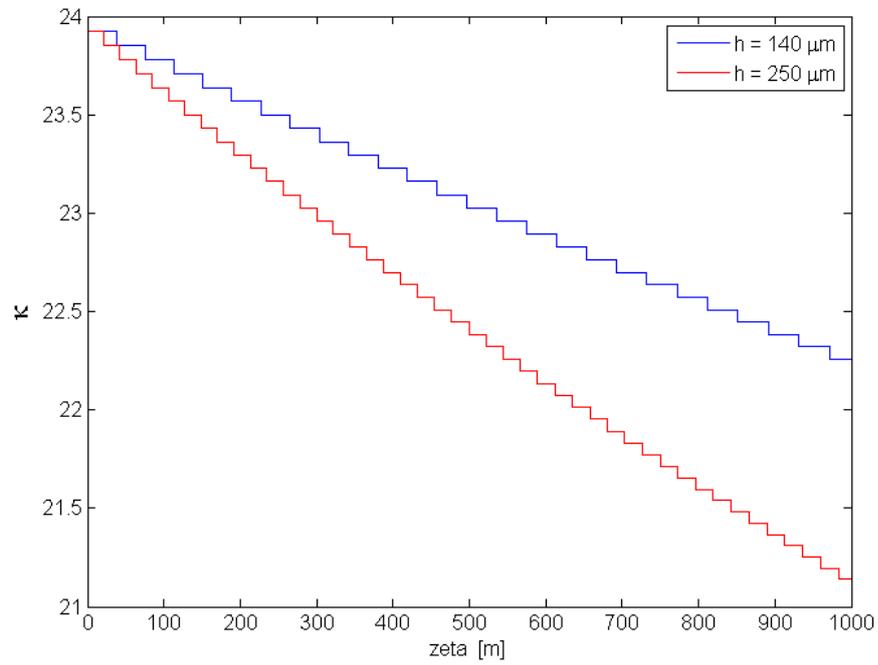


Figura 3.35: Curvatura nell'avvolgimento in bobina

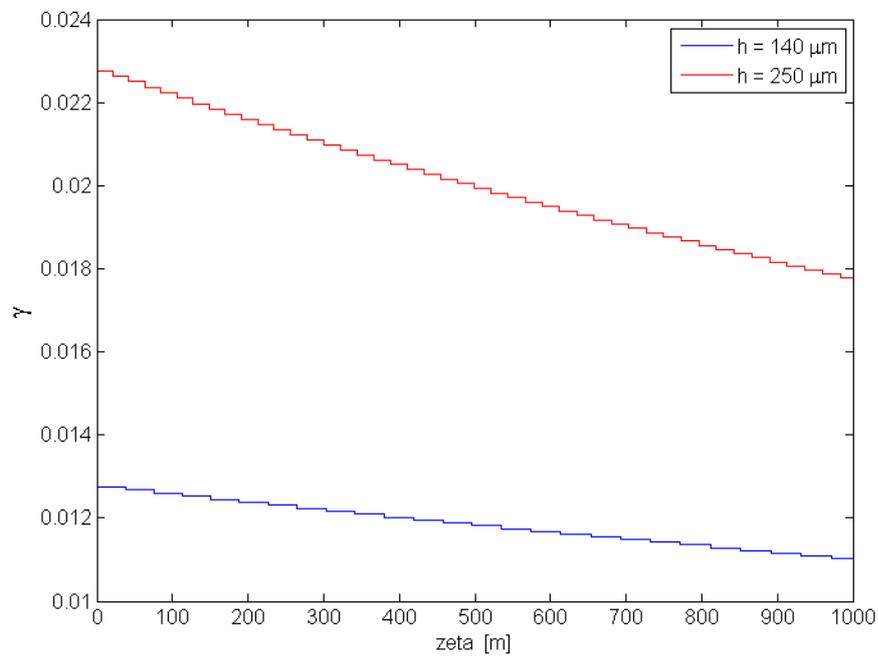


Figura 3.36: Torsione nell'avvolgimento in bobina

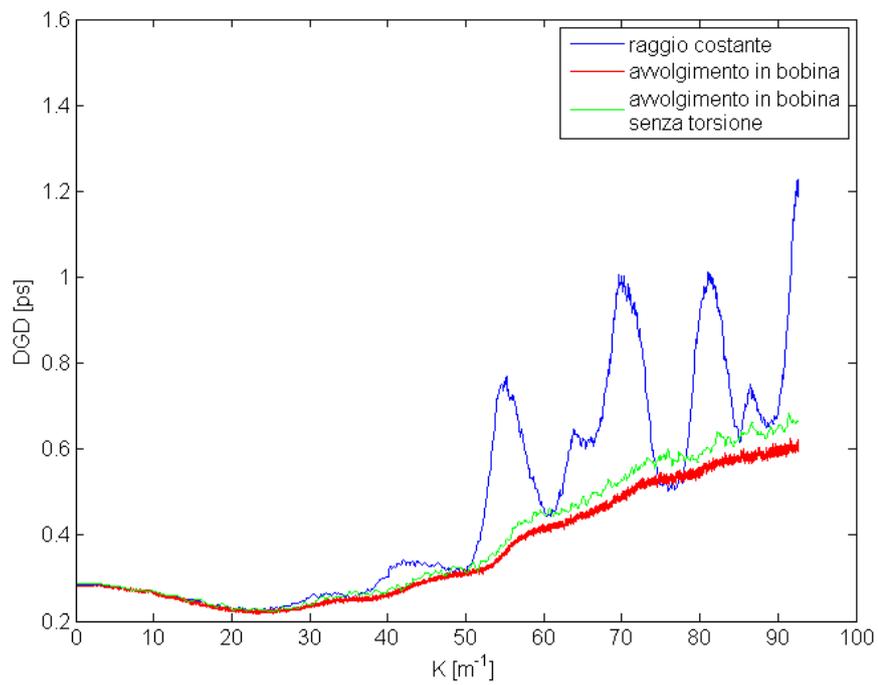


Figura 3.37: DGD per $L_B = 1 m$, $L_F = 10 m$, $p = 5$, $A_0 = 10$ e $h = 140 \mu m$

Capitolo 4

Conclusioni

In questa tesi sono state analizzate molte condizioni diverse con lo scopo di trovare quella ottimale, ovvero quella che porti ad avere il DGD più basso per una fibra avvolta in bobina con raggi di curvatura nell'ordine dei centimetri. Ne risulta che, innanzitutto, si devono usare fibre ad alta birifrangenza intrinseca, condizione già soddisfatta per le fibre compensatrici, in modo che sia dello stesso ordine di grandezza della birifrangenza da curvatura. Invece, si è visto che la lunghezza di correlazione L_F , per i parametri utilizzati, influenza poco i risultati. Lo spin da applicare in fase di produzione deve essere lento, cioè basso spin rate α : è meglio avere un periodo lungo in maniera che agisca più pesantemente sulla birifrangenza e renda il DGD più stabile al variare di A_0 e K ; nella tesi il migliore è 5 *m* ma probabilmente periodi più lunghi danno risultati migliori; l'ampiezza che dà la condizione migliore, per i raggi di curvatura considerati, assume valori tra i 3 e i 10 *rad* circa, ovvero si cade nella "vallata" in cui il DGD è più basso a causa dell'interazione allo stesso livello tra birifrangenza intrinseca e birifrangenza da curvatura; si possono utilizzare anche ampiezze fino ai 30-40 *rad* con prestazioni leggermente peggiori in quanto lo spin agisce meglio sulla birifrangenza intrinseca e lascia spazio alla birifrangenza da curvatura. Infine, il raggio della fibra è un parametro che dipende molto dalle dimensioni del DCM progettato dalla casa produttrice ed inoltre, dentro il DCM, non servono tanti rivestimenti esterni alla fibra visto che questa è già protetta dal modulo ed è affogata nel silicone, il quale la tiene anche bloccata. In linea di massima si può dire che si hanno prestazioni migliori, in termini di riduzione del DGD e di stabilità dello stesso al variare di A_0 e K , se il raggio è più grande.

Bibliografia

- [1] S. C. Rashleigh: *Origins and control of polarization effect in singlemode fibers*, in Journal of Lightwave Technology, vol. LT-1, pp. 312-331, 1983.
- [2] C. D. Poole e J. Nagel: *Polarization effects in lightwave systems*, in Optical Fiber Telecommunications, I. P. Kaminow and T. Koch, Eds. San Diego, CA: Academic, 1997.
- [3] F. Heismann, D. A. Fishman, e D. Wilson: *Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a 10 Gb/s transmission system*, in Tech. Digest ECOC'98, Madrid, 1998, pp. 529-530.
- [4] M. Romagnoli, P. Franco, R. Corsini, A. Schiffrini, e M. Midrio: *Time-domain Fourier optics for polarization-mode dispersion compensation*, in Opt. Lett., vol. 24, pp. 1197-1199, 1999.
- [5] H. Sunnerud, C. Xie, M. Karlsson, R. Samuelsson, e P. A. Andrekson: *A comparison between different PMD compensation techniques*, in J. Lightwave Technol., vol. 20, pp. 368-378, Mar. 2002.
- [6] A. J. Barlow, J. J. Ramskov-Hansen, e D. N. Payne: *Birefringence and polarization mode-dispersion in spun single-mode fibers*, Appl. Opt., vol. 20, pp. 2963, 1981.
- [7] M. J. Li e D. A. Nolan: *Fiber spin-profile designs for producing fibers with low polarization mode dispersion*, in Optics Letters, Vol. 23, Issue 21, pp. 1659-1661 (1998).
- [8] A. Galtarossa, L. Palmieri, M. Schiano, e T. Tambosso: *Measurements of beat length and perturbation length in long single-mode fibers*, in Optics Letters, Vol. 25 Issue 6, pp. 384-386, 2000.
- [9] A. Galtarossa, L. Palmieri, A. Pizzinat: *Optimized Spinning Design for Low PMD Fibers: An Analytical Approach*, in Journal of Lightwave Technology, Vol. 19 Issue 10, pp. 1502-1512 (2001).

- [10] A. Galtarossa, P. Griggio, L. Palmieri, A. Pizzinat: *Optimised Spinning Techniques for Ultra-Low PMD Fibres*, invited paper, *29th European Conference on Optical Communication*, Rimini (IT), 9 settembre 2003, Vol. 4, pp. 934-937.
- [11] D. Sarchi, G. Roba: *PMD Mitigation Through Constant Spinning and Twist Control: Experimental Results*, in *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2003* paper: WJ2.
- [12] A. Galtarossa, P. Griggio, A. Pizzinat, e L. Palmieri: *Calculation of mean differential group delay of periodically spun randomly birefringent fibers*, in *Optics Letters*, vol. 27, pp. 692-694, 2002.
- [13] X. Chen, M.-J. Li, e D. A. Nolan: *Polarization mode dispersion of spun fibers: An analytical solution*, in *Optics Letters*, vol. 27, pp. 294-296, 2002.
- [14] P. K. A. Wai e C. R. Menyuk: *Polarization mode dispersion, decorrelation, and diffusion in optical fibers with randomly varying birefringence*, in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, pp. 148-157, Feb. 1996.
- [15] A. Galtarossa, L. Palmieri, M. Schiano, e T. Tambosso: *Statistical characterization of fiber random birefringence*, in *Optics Letters*, vol. 25, pp. 1322-1324, 2000.
- [16] Anna Pizzinat, Luca Palmieri, Brian S. Marks, Curtis R. Menyuk, e Andrea Galtarossa: *Analytical Treatment of Randomly Birefringent Periodically Spun Fibers*, in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, pp.3355-3363, Dec. 2003
- [17] C. D. Poole, J. H. Winters, and J. A. Nagel: *Dynamical equation for polarization dispersion*, in *Optics Letters*, vol. 6, pp. 372-374, 1991.
- [18] L. Palmieri: *Accurate distributed characterization of polarization properties in optical fibers*, in *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, pp. 1-6, 19-23 Sept. 2010
- [19] L. Palmieri, A. Galtarossa, e T. Geisler: *Distributed characterization of bending effects on the birefringence of single-mode optical fibers*, in *Optics Letters*, vol. 35, No. 14, pp. 2481-2483, 15 luglio 2010.
- [20] R. E. Schuh, X. Shan, e A. S. Siddiqui: *Polarization mode dispersion in spun fibers with different linear birefringence and spinning parameters*, in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 1583-1588, Sept. 1998.