

機関番号：13801  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560395  
 研究課題名（和文）周波数掃引光を用いた分布増幅光ファイバ伝送路の離散多重散乱光干渉量測定法の研究  
 研究課題名（英文）Discrete Multipath Interference Test Method using Synthesized Chirped Signal from Directly Modulated DFB-LD  
 研究代表者  
 相田 一夫 (AIDA KAZUO)  
 静岡大学・工学部・教授  
 研究者番号：00311704

研究成果の概要（和文）：ファイバ自体を増幅媒体とする分布増幅伝送路では、劣化したコネクタ等に起因する多重反射光（離散 MPI）による伝送特性劣化が懸念され、その測定法が求められている。本課題は、周波数掃引光を用いて離散 MPI を選択的に検出する測定法を検討している。DFB-LD の周波数偏移モデルに基づき計算機合成した駆動電流により LD を直接変調し、周波数掃引光（～4GHz/ms、全掃引幅約 8GHz）を実現した。本試験光を用い実験伝送路の MPI 測定を行い、離散 MPI を選択的に検出できることを実証した。

研究成果の概要（英文）：Rayleigh backscattering due to microscopic refractive index variation of fibers and discrete reflections from poor connectors and poorly spliced points within the transmission line tend to degrade the receiver performance of the systems. Hence, MPI is one of the most important factors required for high-performance and reliable system construction and operation.

This report describes how to detect discrete multipath interference selectively from others using a linearly chirped test signal and synthesize the signal from a directly modulated DFB-LD. Experiment confirms that our measurement technique can detect high sensitively discrete multipath interference.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究代表者の専門分野：通信・ネットワーク工学、計測工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：周波数掃引光、DFB-LD、分布増幅ファイバ伝送路、多重散乱光干渉量、MPI、離散 MPI、二重レーリー散乱、多重反射、ラマン増幅

## 1. 研究開始当初の背景

光ファイバに信号光を入射すると、ファイバ屈折率の僅かな揺らぎにより信号の伝播方向とは逆向に“レーリー後方散乱光”と呼ばれる後方散乱光が発生する。さらに、この後方散乱光は再散乱され、伝播方向が信号光と同じ前方散乱光（二重レーリー散乱光）が発生する。通常のファイバ伝送路では前方

散乱光は発生過程の往路・復路でそれぞれファイバ損失のため減衰し、極めて小さな値となるので雑音要因とならない。

一方、光伝送信号の超高速化に伴い検討が進められている、強力な励起光をファイバ伝送路に注入しファイバ自体を分布ラマン増幅器とする分布増幅光ファイバ伝送路では、散乱光は往路・復路でそれぞれ増幅されるた

め、利得分布によっては大きな値となる。この前方散乱光は信号光と同一波長なので信号光と干渉（多重散乱光干渉）し、低雑音化を阻害する要因になる。

また、ファイバ伝送路には複数個の光コネクタが使われており、分布ラマン増幅に必要な強力（数百mW～W程度）な励起光による光コネクタ劣化に起因する離散多重反射光（散乱光）の発生も懸念される。

分布増幅伝送路は利得分布が適切であればファイバ損失を相殺し低雑音化に有効であるが、過剰な励起や光コネクタなどが劣化すると多重散乱光が急増し、低雑音化を阻害するようになる。このため、伝送路構築、メンテナンスに多重散乱光干渉量（MPI）の高確度・高感度測定法が必要とされる。

## 2. 研究の目的

多重散乱光電力の総和を検出する従来の多重散乱光干渉測定法（MPI 測定法）の高感度・高確度化だけではなく、MPIの発生原因に対応した各散乱光電力の個別評価能力が重要となる。

そこで本課題では、試験光として時間に対して周波数が直線的に増加（または減少）する周波数掃引光をファイバ伝送路に入射し、伝送路の出力光をフォトダイオード（PD）で直接検波する新測定法を提案している。

離散多重反射光は離散反射点間の往復時間だけ直接光よりも遅れてPDに入射する。その結果、両者の干渉光電流が差周波数に発生するので、周波数測定から往復時間を、電力測定から離散多重反射光電力を評価することが可能となる。

従来法では対応できなかった「コネクタ等に起因する離散多重散乱（反射）光を個別に評価可能な測定法」の確立を目指し、通信業者が伝送路施設後の調整や故障解析、メンテナンスに活用することを狙いとしている。

## 3. 研究の方法

本課題では、出力レベルが一定で直線性が良い高速広帯域周波数掃引光の発生と、実験伝送路による特性評価による提案測定法の有効性の検証が重要である。そこで、下記の(1)～(3)により研究を進めた。

### (1) 直接変調DFB-LDによる直線掃引光発生

DFB-LDの駆動電流を制御して周波数掃引光を発生させる。この制御電流の合成はDFB-LD周波数変調特性計算モデルに基づき行うので、直線性の高い掃引周波数の発生には計算モデルの精密化が重要である。

そこで、DFB-LD出力光の時間周波数特性を精密測定して制御目標との誤差を評価する。この誤差が小さくなるように計算モデルを逐次修正することで精密化を進める。このた

め光サンプリング・ファイバ長切替型ファイバ干渉計を構築し、時間周波数特性の精密測定を行う。

### (2) 出力一定化掃引光発生装置の実装

周波数掃引光を出力する直接変調DFB-LDの出力レベルは時間的に変化しているため、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）の利得応答特性を利用した出力一定化法について検討する。

提案の測定法では掃引光発生装置からの周波数掃引光は、時間的に増加、または減少の一方に変化する必要がある。しかし、直接変調DFB-LDからは、周波数上昇（増加）と低下（減少）を繰り返す掃引光が出力される。そこで、光スイッチにより、片方の掃引光のみを選択する構成が必要となる。DFB-LDならびに光スイッチを同期動作させて周波数掃引光を発生し、その総合特性を評価する。

### (3) 試験伝送路構築と提案方式の特性評価

既知の離散反射点を有する全長数十kmの試験ファイバ伝送路を構築し、周波数掃引光の“掃引速度、掃引帯域幅や掃引の直線性”等の試験光の各種パラメータと、“離散反射点間の距離分解能、ビート出力電力”等の関係を評価し、測定精度について検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 提案測定法の原理

図1に周波数掃引光を用いた離散多重散乱光干渉量測定法の基本構成を示す。周波数掃引光を入射すると、コネクタ等で発生した離散散乱光はこの2つの反射点間を往復するため、直接光より伝播距離が長くなり、直接光より遅れてPDに入射する。このため、直接光と離散反射光の周波数が異なり、干渉電流が発生する。両者のビート周波数から遅延時間（反射点間の距離に対応）が、ビート電力から離散多重散乱光の電力が評価できる。

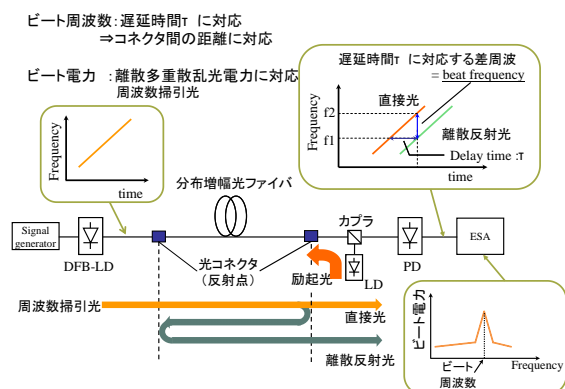


図1 周波数掃引光を用いた離散多重散乱（反射）光干渉量測定法の原理

(2) 周波数偏移モデルとパラメータ抽出

MHz以下の電流駆動によるDFB-LDの周波数偏移は、下式でモデル化される。ここで、式の(a)のアンダーライン部は、レーザ内での熱拡散に依存する温度変化が原因の周波数偏移を表し、(b)は電流と直接対応するキャリア密度変化による周波数偏移を表している。

$$\Delta f(t) = \underbrace{\Delta J_0(\Delta I_{LD}(t)) \otimes F^{-1}(z(f))}_{(a)} + \underbrace{k \cdot \Delta I_{LD}(t)}_{(b)}$$

$\Delta J_0(\Delta I_{LD}(t))$ : 熱変化量     $\Delta I_{LD}(t)$ : 電流変化量  
 $z(f)$ : 熱インピーダンス     $k$ : 係数

上式は温度変化、キャリア密度変化両方の影響が含まれているので、矩形パルス電流への応答特性を測定することで、各要因に式を分離し、熱インピーダンス $z(f)$ や係数 $k$ などのパラメータを抽出することが出来る。

図2は光サンプリング・ファイバ長切替型ファイバ干渉計を使ったDFB-LD周波数変調特性測定系の構成を示す。本測定は、光サンプラー(AOM)による周波数シフトを利用した自己遅延ヘテロダイン検波系となっている。

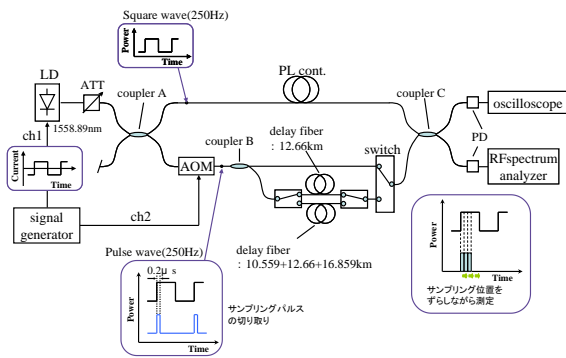


図2 周波数変調特性の測定系

図3は、250Hzの矩形パルスで駆動したDFB-LDの周波数変調特性の測定例を示す。

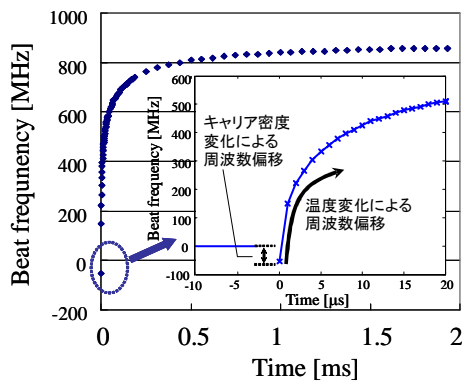


図3 DFB-LD周波数変調特性の測定例

(3) 直線周波数掃引光の合成

周波数掃引光を直接変調DFB-LDにより合成するにあたり、DFB-LDの周波数変調特性と許容駆動電流、ならびに光スイッチの動作速度などの関連光部品の諸特性と、合成された周波数掃引光が標準的な中継区間長80kmに対応可能になることを勘案して、直線掃引区間の掃引光の諸元を決めた(掃引光の繰返し周波数: 250Hz、直線周波数掃引区間の掃引率: 約4GHz/ms、連続掃引時間: 1ms以上)。

一方、折返し区間の設計目標については、最終的には光スイッチで取除くので任意性が高い。今回は、駆動電流に急激な変化が発生しにくい関数系をシミュレーションで探し適用した。

直線周波数掃引区間と折返し区間の目標波形を合体し、区分連続直線掃引光の計算目標とした。この計算目標を実現する駆動電流波形は、前記のDFB-LDの周波数偏移モデル式を用いて数値計算により求めることができる。

駆動電流の繰返し周波数が250Hzと低いので、前記のDFB-LDの周波数偏移モデル式では(a)項が周波数偏移の主要因となる。一方、(b)項は補正項と捉えることができる。この結果、反復計算法を用いることにより同式から、目標データに対応するDFB-LDの駆動信号を算出することができる。

DFB-LD駆動電圧波形(計算値)の合成例と、同波形により駆動したDFB-LD出力光の時間周波数特性(直線掃引区間)の測定値を、図4、図5に示す。図5より1.9msに亘り掃引率:-3.8GHz/msの直線周波数掃引光を合成できたことがわかる。

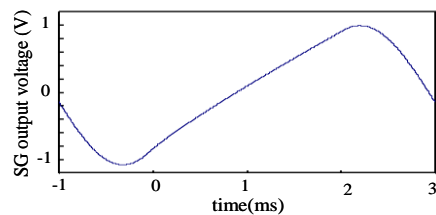


図4 合成したDFB-LD駆動電圧波形

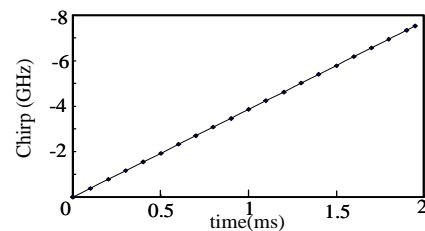


図5 出力光の時間周波数特性

#### (4) 掃引光発生装置の構成と特性

図6は掃引光発生装置の構成ならびに、DFB-LD 出力光と装置出力の時間変動波形を示す。周波数掃引光発生のために DFB-LD を直接変調すると出力レベルが時間的に変化する。EDFA の利得飽和特性と光バンドパスフィルタ (0.7nmFWHM) を用いて光電力を一定化している。この結果、3dB 程度 LD 出力は変動しているものの、本構成により出力変動は 0.1dB 以内に抑圧された。次に、低挿入損失で低漏話な MO 型光スイッチにより直線性の良い区間 (約 1.9ms) を切り取り、MPI 測定に用いる周波数掃引光を得ている。

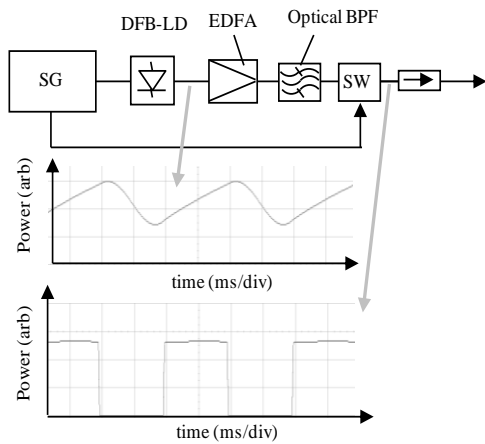


図6 掃引光発生装置の構成と出力変動特性

#### (5) 試験伝送路による提案方式の特性評価

図7に分散 MPI 測定用のファイバ伝送路の構成例を示す。伝送路の両端に可変反射器を設置し、3本のシングルモードファイバ (1km、10.559km と 12.66km)、反射係数-45dB の2個の FC 型光コネクタ (A, B) とにより全長 24.2km の実験伝送路を構成している。本構成では両端の可変反射器の値を変更することにより複数レベルの分散 MPI 値に対して提案測定法の有効性を調べることが出来るので、信憑性の高い評価が可能となる。

図8は送信機側と受信機側の反射係数を -26.5dB とし、受信機への信号入力レベルが -3dBm の場合に、ESA で検出されたビート電力のスペクトル特性を示す。分散反射点間の距離に対応した5本のビート周波 (400, 430, 470, 510, 910MHz) を観測することが出来た。

例えば、470MHz のスペクトルはコネクタ B (反射係数-45dB) と受信機側ファイバ端 (反射係数-26.5dB) 間の多重反射 (分散 MPI) によるものである。観測されたビート電力: -76.5dBm を、分散 MPI に換算すると -76dB となる。一方、伝送路構成から計算される分散 MPI は -76.2dB であり両者が良く一致する結果を得た。



図7 分散 MPI 測定用のファイバ伝送路

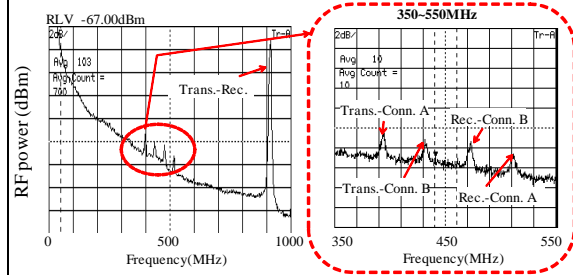


図8 ビート電力スペクトル

#### (6) まとめと今後の展望

計算機で合成した駆動信号により DFB-LD を直接変調して得られた直線周波数掃引光を伝送路特性のテスト光として適用し、受信系に自己ヘテロダイン受信器を用いる分散多重散乱 (反射) 光干渉量測定法を提案した。実験ファイバ伝送路を用いた特性評価により提案方法が分散 MPI 測定方法として高精度・高感度な特性を有していることを実証した。なお、研究期間内に実験できなかったラマン分布増幅伝送路の分散 MPI 評価については、実験系の準備ができしだい行いたいと考えている。

本測定方法は汎用の光部品と測定器類で構成することが出来るので、実用化に向けてのハードルは低いと考えられる。本課題の成果が有効に使われるように、学会等で関連する測定器メーカー、通信業者への働きかけを行っていききたい。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- ① 豊田真一郎  
周波数掃引光を用いた光ファイバ伝送路の分散 MPI 測定法高感度化の検討  
電子情報通信学会 2011 年総合大会  
平成 23 年 3 月 17 日  
東京都市大学世田谷キャンパス
- ② 豊田真一郎  
光ファイバ伝送路の分散 MPI 測定法の実験的検討  
計測自動制御学会 中部支部 静岡地区 研究委員会 研究会  
平成 22 年 12 月 25 日  
静岡大学浜松キャンパス

- ③豊田真一郎  
Measurements of Discrete Multipath Interference using Linearly Chirped Signal  
15<sup>th</sup> Opto-Electronics and Communications Conference  
平成 22 年 7 月 8 日  
札幌国際会議場
- ④佐藤 友理  
周波数掃引光を用いたファイバ伝送路の離散多重散乱光干渉量測定法  
電子情報通信学会 2010 年総合大会  
平成 22 年 3 月 18 日  
東北大学川内キャンパス
- ⑤相田 一夫  
デジタル信号処理による試験光を用いた多重散乱干渉量測定法  
電子情報通信学会光通信システム研究会  
平成 21 年 7 月 29 日  
ウェルシテイ湯河原
- ⑥角田 正悟  
デジタル信号処理による多重散乱光干渉量測定用 FM 変調光の発生  
電子情報通信学会 2009 年総合大会  
平成 21 年 3 月 19 日  
愛媛大学 城北地区
- ⑦角田 正悟  
デジタル信号処理による多重散乱光干渉量測定用 FM 変調光の発生  
平成 20 年度計測自動制御学会中部支部静岡地区計測制御研究発表会  
平成 20 年 12 月 20 日  
静岡大学 浜松キャンパス

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

相田 一夫 (AIDA KAZUO)  
静岡大学・工学部・教授  
研究者番号：00311704

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：