



Title	逆散乱変換に基づく光ファイバ伝送路の異常箇所推定技術に関する研究
Author(s)	本村, 拓海
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/103221
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (本 村 拓 海)

論文題名 逆散乱変換に基づく光ファイバ伝送路の異常箇所推定技術に関する研究

論文内容の要旨

本論文は、光ファイバ伝送路中の異常箇所推定技術に関する研究成果をまとめたものであり、以下の6章で構成した。

第1章は序論であり、本研究の研究背景として、インターネットトラフィックの増大に対応するための大容量光ファイバ伝送技術、高信頼性光ファイバネットワークを実現するための異常推定技術の必要性について述べた。まず、光ファイバの伝送容量を制限する非線形シャノン限界を打破する伝送方式として、逆散乱変換 (inverse scattering transform: IST) に基づく伝送方式が有望であることを述べた。次に、光ファイバ伝送路中の異常箇所を推定する技術として、近年盛んに研究されているデジタルコヒーレント技術を用いた手法について説明した。そして、IST に基づく伝送と異常箇所推定を同時に実現する技術の必要性について述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、光ファイバ中を伝搬する光波の振る舞いを記述する非線形Schrödinger方程式およびその初期値問題の解法であるISTについて説明した。次に、ISTの情報伝送技術への応用として、固有値変調および散乱係数 b 変調について述べた。これらをもって、第3章以降の技術提案への導入とした。

第3章は、ISTを用いた異常箇所推定技術に関する章である。光ファイバ中を伝搬する光波は固有値と散乱係数 b によって特徴付けられ、それらを変化させることにより伝送中の波形変化を制御できること、および、異常な雑音が付加された場所によって固有値の挙動が変化することを示した。第3章では、離散固有値の分散と共分散を用いて異常雑音が付加された箇所を推定する手法の原理提案を行った。また、異常雑音に対する推定精度の変化や、離散固有値配置と推定精度の関係、推定に必要なパルス数に対する依存性、異常箇所に対する依存性、入射電力に対する依存性について計算機シミュレーションにより調査した結果を示した。そして、提案手法において適切な条件を用いることで、キロメートルオーダーの異常雑音付加箇所の推定が可能であることを示した。

第4章は、散乱係数 b 変調信号を用いた異常箇所の推定に関する章である。第3章で述べた異常箇所推定技術は、異常推定専用の光パルスを用いるため同時に情報伝送ができず、通信を遮断する必要があるという課題が残っていた。第4章では、散乱係数 b 変調を施した光パルスを用いることで、光ファイバの非線形歪みの影響を受けない情報伝送を行いつつ、光ファイバ伝送路中の異常箇所推定が可能な技術を提案した。まず、摂動逆散乱変換によって、雑音の影響を受けたときの離散固有値の振る舞いを解析的に調査した結果について述べた。次に、制限つき散乱係数 b 変調と通常の散乱係数 b 変調の2種類の変調信号を用いた異常箇所推定手法を提案し、それらの異常箇所の推定精度について数値シミュレーションを通して明らかにした。そして、提案手法により変調信号を用いた異常箇所推定が可能であることを示した。

第5章は、光ファイバの製造工程で生じるファイバ長手方向の分散パラメータの揺らぎが、離散固有値と散乱係数 b に及ぼす影響について調査した内容に関する章である。光ファイバの分散パラメータの揺らぎにより離散固有値や散乱係数 b が変動する場合、第3章および第4章で提案した異常箇所推定技術に影響を及ぼすと考えられる。まず、双方向光時間領域反射測定法を用いて、ファイバ長手方向の分散パラメータの分布を測定し、測定結果から分散分布のモデリングを行った。次に、そのモデルを用いて、分散パラメータの揺らぎが離散固有値を1つ有する光パルス (1-ソリトン) に及ぼす影響を、理論解析および数値シミュレーションの両面から評価した。また、離散固有値が2つの光パルス (2-ソリトン) や4つの光パルス (4-ソリトン) に対しても解析を行い、現実的な光ファイバの分散パラメータの揺らぎが離散固有値に及ぼす影響が十分に小さいことを示した。さらに、散乱係数 b に及ぼす影響についても数値シミュレーションによって評価した結果を述べた。

第6章では、以上の研究によって得られた成果を総括し、本論文の結論を述べた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (本 村 拓 海)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	准教授	三 科 健
	副 査	教授	丸 田 章博
	副 査	教授	田 中 雄一
	副 査	教授	滝 根 哲哉
	副 査	教授	落 合 秀樹
	副 査	教授	宮 地 充子
	副 査	教授	清 水 昌平
	副 査	教授	駒 谷 和範

論文審査の結果の要旨

高度情報通信社会を支える将来の光ファイバ通信ネットワークには、超高速・大容量といった高度化のみならず、高信頼性を同時に実現することが求められる。本論文では、将来の大容量光ファイバ伝送を実現する技術として逆散乱変換に基づく伝送方式に着目し、高信頼光ファイバネットワークの実現に必要な異常箇所推定技術の研究に関して得られた三つの研究成果をまとめている。

- (1) 逆散乱変換に基づく異常箇所推定技術として、離散固有値を用いて光ファイバ伝送路中の異常な光増幅器の位置を推定する手法を提案している。そして、提案手法の実現可能性と性能を数値シミュレーションにより評価した結果を示している。さらに、様々な条件下における利用を想定し、①光増幅器の雑音指数、②異常雑音箇所、③推定に必要なパルス数、④パルスの入射電力を変化させたときの推定精度を調査した結果について述べている。結論として、提案手法において適切な条件を用いることで、キロメートルオーダーの異常雑音箇所推定が可能であることを示している。
- (2) (1)で提案する手法では異常検出専用の光パルスを用いるため、同時に情報伝送ができず、通信を遮断する必要があるという課題が残る。この課題を解決するため、散乱係数に変調を施した光パルスを用いることで、光ファイバの非線形性の影響を受けない情報伝送を行いつつ、光ファイバ伝送路中の異常箇所推定が可能な技術を提案している。具体的には、制限付き散乱係数変調と通常の散乱係数変調の 2 種類の変調信号を用いた異常箇所推定手法を提案している。そして、数値シミュレーションにより提案手法の性能を評価し、異常箇所推定と情報伝送が同時に実行可能であることを示している。
- (3) 光ファイバの分散パラメータの揺らぎにより離散固有値や散乱係数が変動する場合、(1)および(2)で提案した異常箇所推定技術に影響を及ぼすと考えられる。そのため、光ファイバの製造工程で生じるファイバ長手方向の分散パラメータの揺らぎが、離散固有値と散乱係数に及ぼす影響について調査している。具体的には、双方向光時間領域反射測定法を用いて非零分散シフトファイバの長手方向の分散分布を測定した結果を示し、分散パラメータの度数分布がガウス分布で近似できることを示している。そして、測定結果に基づいて分散揺らぎを持つ光ファイバ伝送路をモデル化し、1-ソリトン解、2-ソリトン解、および4-ソリトン解の伝送シミュレーションを行っている。シミュレーション結果より、2-ソリトン解の離散固有値の変動が 1-ソリトン解のそれよりも大きいことを明らかにしたが、分散揺らぎの標準偏差が 0.1 ps/nm/km 程度の実用的な非零分散シフトファイバを用いた場合、2-ソリトン解の伝送において、離散固有値の変動量が十分に小さいことを示している。結論として、2-ソリトン解を用いた(1)および(2)の異常箇所推定において、分散揺らぎの影響が十分に無視できることを示している。

以上のように、本論文は逆散乱変換に基づく光ファイバ伝送路の異常箇所推定技術に関する研究成果をまとめたものである。離散固有値を用いて異常雑音箇所を推定する手法を提案し、数値シミュレーションにより提案手法の実現可能性および性能を評価している。そして、提案手法の実用化に向けた課題に対する調査として、情報伝送と異常箇所推定を両立する手法の実現可能性、および、光ファイバの分散パラメータの揺らぎが提案手法に及ぼす影響について評価している。これらの成果は、将来の超大容量・超高信頼光ファイバ通信ネットワークを構築する上で不可欠な成果であり、工学的な見地から非常に意義深い。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。