

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560387

研究課題名（和文） 光アクセスシステムにおける光ファイバ非線形効果に関する研究

研究課題名（英文） A study on effects of fiber nonlinearity on lightwave access systems

研究代表者

前田 譲治 (MAEDA JOJI)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：10256670

研究成果の概要：受動型光アクセスネットワークにおいて、伝送光パワーが上昇した場合のファイバ非線形の影響を、デジタル伝送、アナログ伝送の両者について数値的・実験的に調べた。次世代の 10Gbps、32 分岐程度のデジタル伝送システムではファイバ非線形の影響は小さいことが予見された。一方、アナログ伝送においては、ファイバ非線形によるパラメトリック利得のために、低パワーの場合よりも良好な伝送が可能であることが示された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	480,000	3,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：通信方式（無線、優先、衛星、光、移動）、フォトニックネットワーク、光ファイバ通信、光アクセス、非線形光学、マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

1980 年代に実用化された光ファイバ通信は、国内の大容量通信が必要な幹線系および海底ケーブルによる国際通信に適用されてきたが、近年のブロードバンド通信への爆発的な要求から、一般加入者が直接接続するアクセス系システムに急ピッチで導入されつつある。

一方、地上波デジタル放送の本格化など、無線サービスの広帯域化も急速に進展している。そのサービスエリア拡大や不感地帯対策技術として、光ファイバ無線がある。これは、無線信号と同一の高周波信号で光をアナロ

グ変調し、光ファイバで伝送するものである。アクセス系の光デジタル伝送は最大 1Gbps 程度が実現されているが、10Gbps のイーサネット規格が策定され、実用化技術が進展しつつある現在、10Gbps のイーサネットフレームをストレス無く伝送するシステムが近い将来要求されることは必至である。一方、携帯端末の高速化に対応した無線搬送波周波数の上昇に伴い、光ファイバ無線システムの動作周波数帯もマイクロ波帯以上へ拡大しなければならない。

各種サービスの広帯域化は信号周波数帯域の拡大を伴う。このことは、重畳される雑音

の増加を意味するため、所望の信号対雑音比を実現するためには信号強度の増加が不可欠である。光ファイバ伝送では伝送光パワーの増加が必要になるが、これは光ファイバの光学非線形性が顕在化することにつながる。光ファイバの光学非線形性で、10GHz 程度の帯域を持つ信号に対して影響を及ぼすのはラマン散乱と光カー効果である。このうち光カー効果の一種である自己位相変調は、ファイバの群速度分散との相互作用により変調不安定と呼ばれるパラメトリック効果を生ずる。光ファイバにおける変調不安定は光ファイバソリトンの発生メカニズムとしてよく知られており、ソリトン光源や光ソリトン伝送の実験的検証を通じて広く認知されている。

これまで、アクセス系光伝送において光ファイバのカー効果が大きく取り上げられたことはなかった。これは、伝送速度が1Gbps以下と比較的低速であるために、ブリルアン散乱による伝送パワー制限が存在すること、アクセス系の伝送距離が数 km 以内と短く、低パワーではカー効果が顕在化しないことが原因として挙げられる。しかし、伝送容量の拡大によって10GHz級の信号帯域が現実化すると、ブリルアン散乱が抑制される一方、伝送光パワーの増加に伴って光カー効果が問題となることが予想される。更に、光サービスエリアの拡大に伴い、山村地域では伝送距離数十 km 級のシステムが必要と目される。すなわち、伝送距離の上からも光カー効果の影響が顕在化することが予測される。

2. 研究の目的

筆者は本助成に関わる研究の開始までに、10GHz 級の変調信号帯域をもつ光信号がファイバ中を伝送したときの波形歪及びその影響を数値解析によって検討し、これと平行して予備的な実証実験を行ってきた。

光デジタル伝送については、10Gbps PON システムにおける波形歪の影響を数値シミュレーションによって調べてきた。ノードにおける分配数が大きくなると、基幹ファイバでの伝送パワーも大きくしなければならない。このため、中央局からノードまでの間に生じる変調不安定が波形を大きく歪ませることを予見した。

その一方で、マイクロ波帯搬送波によってアナログ変調した光信号を、ファイバ中を伝送させた場合の信号波形劣化を実験によって示してきた。アナログ変調された光信号では、ファイバの群速度分散がもたらす側波帯間の位相ずれによって、その変調成分が伝送距離に対して周期的に消失する。この現象はフェージングと呼ばれ、変調信号がマイクロ波領域に入ると顕在化する。ところで、デジタル変調で問題となる変調不安定、すなわちフ

アイバ中のパラメトリック増幅の利得は、変調信号周波数の関数になることが知られている。しかし、無線信号のような狭帯域信号についてはパラメトリック利得の周波数依存性の影響は小さい。更に、変調不安定は波長分散による位相回転を抑制するように働くため、フェージングの影響が抑えられる。このため、変調不安定を光ファイバ無線等の狭帯域サービスに応用することにより、性能改善を実現する可能性がある。実験では、10.5GHz の正弦波で $1.55\mu\text{m}$ のレーザ光を強度変調し、単一モードファイバ 10~25km を伝送した。この結果、受信端における変調度が伝送パワーと伝送距離に応じて変化することを示した。

本助成にかかわる研究では、上記の予備的検討を進展させ、システムへの影響を数値解析及び実験によって明らかにすること、生じた不具合を改善するための手法を検討することを目的とした。具体的には、以下の点を明らかにすることを目指した。

(1) アクセス系光デジタル伝送における非線形波形劣化の影響

次世代の光アクセスネットワークで使用が検討されている10GbpsNRZ信号の高伝送パワー時の伝送特性をシミュレーションと実験によって明らかにする。実験では、単一モードファイバと光アッテネータを用いてPONシステムの模擬線路を構築する。これにより、伝送パワーとパルス波形歪の関係、および伝送特性劣化との関係を定量的に明らかにする。

(2) 光アナログ伝送におけるパラメトリック増幅の影響

伝送ファイバ中のパラメトリック効果が光アナログ伝送に与える影響を、数値シミュレーションと実験によって明らかにする。実験では、伝送速度100Mbps級の光アナログ伝送システムを構築し、伝送ペナルティを測定する。これにより、伝送パワーに対する伝送光波形及び符号誤り率特性の変化を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) アクセス系光デジタル伝送における非線形波形劣化の影響

シミュレーションでは、伝送速度10Gbpsを超える伝送距離20km程度の光デジタル伝送システムを想定し、自己位相変調による波形歪みと、これによって発生するペナルティとの関係を予見する。

実験では、伝送距離が最大25kmの光デジタル伝送システムを構築する。パルスパターン発生器によって9.953GbpsのNRZフォーマットの擬似ランダム信号を発生し、光送信機で光信号に変換する。この出力をエルビウム添加増幅器で増幅した後、光アッテネータを

用いてファイバ入射端のパワーを変化させ、ファイバ伝送後の光波形を観測する。また、光受信機で電気に変換された信号のビット誤り率を、誤り率測定器を用いて測定し、自己位相変調による波形歪と伝送ペナルティとの関係を定量化することを目指す。なお、受信データの誤り率測定を行う際に必要なデータクロックは、光受信機内蔵のものを用いる。

(2) 光アナログ伝送におけるパラメトリック増幅の影響

シミュレーションでは、搬送波周波数 10GHz 以上、伝送速度 100Mbps 以上の光アナログ伝送を想定し、QAM 信号によって強度変調した光信号波形の変化を調べる。受信機で発生する定常雑音を重畳した後、ホモダイン検波によって得られた直交位相平面上のコンスタレーションを求め、得られた信号点分布から符号誤り率を推定する。また伝送パワーと符号誤り率の変化から伝送ペナルティを求める。

実験では、搬送波周波数 10.8GHz、伝送速度 111Mbps の BPSK 受信機を構築する。

送信機における搬送波発振器の位相ドリフトに対応するため、中間周波数 300MHz のスーパーヘテロダイン受信を行い、中間周波数における搬送波再生によって同期検波を実現する。

送信高周波信号は、パルスパターン発生器出力によって周波数シンセサイザ出力を直接 BPSK 変調して発生する。この信号をマッシュアップ強度変調器に入力して光変調を実現する。光源には C バンドで発振する DFB レーザを用いる。伝送後の光を高速光検出器で高周波電気信号に変換し、これを作製した受信機で復調し、符号誤り率測定器を用いてビット誤り率を測定する。エルビウム添加光増幅器と光アッテネータを用いてファイバ入射端のパワーを変化させ、伝送パワーと伝送ペナルティの関係を調べる。

4. 研究成果

(1) アクセス系光デジタル伝送における非線形波形劣化の影響

デジタル伝送の研究では、データ列のパターンによる波形歪の相違を考慮し、実システムで予想されるシンボル分布をシミュレートするプログラムを開発した。作成したプログラムを用いて、物理層伝送速度 12.5Gbps のシステムについて検討を行ったところ、現在実用的とされる 32 分岐以下のシステムでは、非線形波形劣化が伝送制限要因とはならないことが分かった。ただし、クロック再生の際に重要となる時間軸への影響については別途考慮が必要である。

速度 9.953Gbps の伝送実験を行なったところ、平均送信パワーの上昇に伴い、ペナルティが

減少する傾向が見られた。ただし、測定システムの性能制限要因が、現在まで特定できておらず、実験結果の妥当性を検証する必要がある。具体的には、低受光パワー時におけるビット誤り率の増加が、波形劣化による識別誤りによるものか、データクロック再生装置の不安定によるものかが判別できていない。データ識別部とクロック再生部を分離した実験が必要である。

(2) 光アナログ伝送におけるパラメトリック増幅の影響

シミュレーションでは、搬送波周波数 10GHz、16 値および 64 値の QAM 信号を伝送した場合、受信時のコンスタレーションに現れる変化を検討した。

非線形性を考慮しない場合にはフェージングの影響によってシンボル点間距離が小さくなるが、光カー効果が存在する場合には、パラメトリック増幅によってシンボル点間距離が広がり、ペナルティを軽減することができることが予見された。

初期変調度が大きい場合、飽和によって生じる波形歪は、図 1 に示すようにコンスタレーションの歪となって現れる。この場合、伝送光パワーがあるレベルを超えると伝送ペナルティが急激に増加する。ただし、このペナルティは電気段におけるアナログ的な等化によって補正することが可能であり、6dB 程度のパワーマージンの拡大が可能であることが予見された。

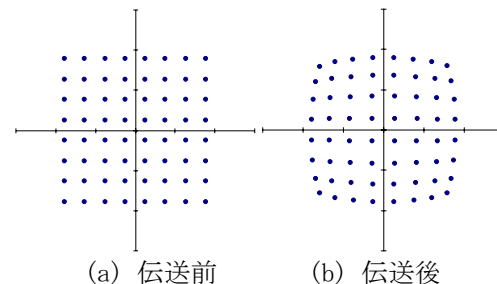


図 1, 64QAM、光送信機出力+14.4dBm、伝送前(a) および 30km 伝送後(b) のコンスタレーション

周波数 10.8GHz の副搬送波による速度 111Mbps の BPSK 伝送実験では、ファイバ伝送パワーを 0dBm から +20dBm までの範囲で変化させ、無信号状態での受信端における高周波信号パワーと、BPSK 伝送時のビット誤り率、およびこれから算出されるペナルティを測定した。

伝送距離 25km の場合、送信機出力パワーが +15dBm までは、伝送パワーが大きいほど受信高周波信号パワーが上昇し、ペナルティが減少した。図 2 に示す通り、高周波信号パワーの増加率と、ペナルティの減少度はよく一致した。これはファイバ中の自己位相変調と分

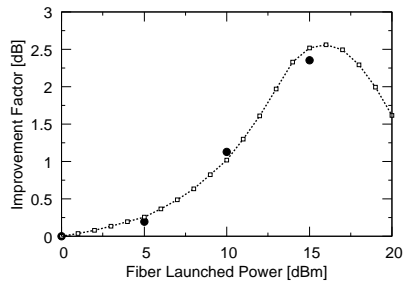


図 2, 高周波信号パワーの上昇度 (点線) とペナルティの改善度 (黒丸) との関係

散の協働によってパラメトリック利得が発生し、分散による信号劣化を補ったためであると推定される。一方、送信機出力パワーが +15dBm を超えると、受信信号に大きな雑音を重ね、信号伝送が不可能になった。雑音の重畳とともに伝送光パワーの飽和が見られることから、これは伝送ファイバ中のブリルアン散乱の影響であることが分かった。

本実験の結果、高速光アナログ伝送で問題となる波長分散によるフェージングは、比較的大きな伝送パワーを用いることで抑制可能であるが、伝送特性の改善度はブリルアン散乱によって制限されることが明らかになった。この結果は、光ファイバ無線を利用した無線アクセスシステムの高速度・サービスエリアの拡大に安価かつ有効な技術を提供するものである。

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)

[雑誌論文] (計 10 件)

- [1] 山中慎吾, 前田譲治, 有理高調波モード同期ファイバリングレーザのパルス安定化, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 106, no. 284, pp. 59-64 (2006) 査読無し.
- [2] 藤野矩之, 前田譲治, “高速光アクセスネットワークにおけるSPM-GVD効果による光波形劣化の数値的検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 106, no. 349, pp. 41-44 (2006) 査読無し.
- [3] 福地晋也, 前田譲治, 朝倉洋佑, “超高速分散管理ソリトン伝送における偏波モード分散の影響,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 107, no. 153, pp. 49-52 (2007) 査読無し.
- [4] Shingo Yamanaka and Joji Maeda, “Fluctuation Reduction in a Rational Harmonic Mode-Locked Fiber Ring Laser using Carrier-Suppressed Return-To-Zero Modulation Format,” Proc. SPIE, Noise and Fluctuations in Photonics, Quantum Optics, and Communications, vol. 6603 (2007) 査読有り.

[5] Shingo Yamanaka and Joji Maeda, “Stable Pulse Generation from a Rational Harmonic Mode-Locked Fiber Ring Laser Using Carrier-Suppressed Return-To-Zero Modulation Format,” Technical digest of OECC/IIOC 2007, pp.634-635 (2007) 査読有り.

[6] Joji Maeda and Yutaka Fukuchi, Numerical Study on High-Speed Optical RZ Pulse Transmission in Fiber Link With Dispersion-Slope Management, IEEE J. Quantum Electron., vol.43, no.9, pp.743-750 (2007) 査読有り.

[7] 藤原淳, 前田譲治, “QAM信号の光ファイバ無線伝送におけるSPM-GVD効果に関する数値的検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 107, no. 444, pp. 19-23 (2008) 査読無し.

[8] 須賀直樹, 前田譲治, “遅延検波を利用したRZ-PSK方式の長距離伝送に関する数値的考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 108, no. 83, pp. 33-38 (2008) 査読無し.

[9] 草間和豊, 前田譲治, “光ファイバ無線システムにおけるフェージングのファイバ非線形を用いた回避法に関する実験的検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 108, no. 309, pp. 25-30 (2008) 査読無し.

[10] Joji Maeda, Kazutoyo Kusama, and Yutaka Fukuchi, “Mitigation of signal fading in radio over fiber transmission using fiber nonlinearity,” Optics Express, vol. 17, issue 6, pp.4518-4525 (2009) 査読有り.

[学会発表] (計 9 件)

[1] Joji Maeda, Taichi Masuko, and Atushi Fujiwara, “A Numerical Study on Signal Degradation in Radio over Fiber Transmission due to Modulation Instability,” Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (Post Deadline), 26 Apr. 2006, Kobe.

[2] 山中慎吾, 前田譲治, 有理高調波モード同期ファイバリングレーザのパルス安定化, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会LQE2006-91, 2006年10月13日, 福岡.

[3] 藤野矩之, 前田譲治, “高速光アクセスネットワークにおけるSPM-GVD効果による光波形劣化の数値的検討,” 電子情報通信学会光通信システム研究会OCS2006-69, 2006年11月17日, 東京.

[4] 福地晋也, 前田譲治, 朝倉洋佑, “超高速分散管理ソリトン伝送における偏波モード分散の影響,” 電子情報通信学会光通信システム研究会OCS2007-29, 2007年7月20日, 米沢.

[5] Shingo Yamanaka and Joji Maeda, “Fluctuation Reduction in a Rational Harmonic Mode-Locked Fiber Ring Laser using Carrier-Suppressed Return-To-Zero Modulation Format,” SPIE Symposium on Noise and Fluctuations: Noise and Fluctuations in Photonics, Quantum Optics, and Communications, 22 May 2007, Florence, Italy.

[6] Shingo Yamanaka and Joji Maeda, “Stable Pulse Generation from a Rational Harmonic Mode-Locked Fiber Ring Laser Using Carrier-Suppressed Return-To-Zero Modulation Format,” OECC/IOOC 2007, 12 July 2007, Yokohama.

[7] 藤原淳, 前田譲治, “QAM信号の光ファイバ無線伝送におけるSPM-GVD効果に関する数値的検討,” 電子情報通信学会光通信システム研究会OCS2007-88, 2008年1月24日, 大分.

[8] 須賀直樹, 前田譲治, “遅延検波を利用したRZ-PSK方式の長距離伝送に関する数値的考察,” 電子情報通信学会光通信システム研究会OCS2008-16, 2008年6月13日, 千歳.

[9] 草間和豊, 前田譲治, “光ファイバ無線システムにおけるフェージングのファイバ非線形を用いた回避法に関する実験的検討,” 電子情報通信学会光通信システム研究会OCS2008-88, 2008年11月20日, 由布院.

[その他]

解説記事：前田 譲治, “光ファイバ無線 (RoF),” 映像情報メディア学会誌, vol. 61, no. 1, pp. 43-45 (2007).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 譲治 (MAEDA JOJI)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：10256670

(2) 研究分担者 (2006～2007 年度)

福地 裕 (FUKUCHI YUTAKA)

東京理科大学・工学部・講師

研究者番号：70366433

(3) 連携研究者 (2008 年度)

福地 裕 (FUKUCHI YUTAKA)

東京理科大学・工学部・講師

研究者番号：70366433