

適応フィルタを用いた OFDMA-PON における偏波回転補償の研究

M2012MM030 岡田真人

指導教員：奥村康行

1 はじめに

近年、無線通信を用いたネットワークへのアクセス件数が増加している。特に、高速データ通信に対する要求が高まっており、有限である帯域を効率よく使用するための変調方式が必要となっている。これを解決する方法として Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) がある。OFDM は、地上波デジタル放送、IEEE 802.11a などの無線 LAN、電力線モデムなどの伝送方式に採用されている通信方式であり、携帯電話の世界でも次世代通信技術として注目されている。

OFDMA-PON (Passive Optical Network) の通信方式では、光ファイバの張力やねじれにより発生する偏波回転の影響によりユーザ間で信号同士の干渉が起こり、BER 値が高くなってしまいう課題がある。本研究ではこの課題の解決策として、適応フィルタを用いて偏波回転補償の効果を検討する。適応フィルタは Least Mean Square (LMS) アルゴリズムと Recursive Least Square (RLS) アルゴリズムをそれぞれ用い、受信機でパイロット信号を基準として偏波補償を行った。そして、各適応フィルタの偏波回転補償が可能な偏波回連量範囲を特定し、特性の考察を行う。

2 OFDMA-PON の構造

OFDMA-PON は、近年大きな注目を集めている分野であり、OFDM 信号の高い周波数利用率の利点を活かして大容量化した通信方式である。

2.1 OFDMA-PON の構造 (OLT)

図 1 は、偏波多重方式 OFDMA-PON の構造を示している。Optical Line Terminal (OLT) 側では、外部共振器レーザ (ECL) は強度変調 (IM) を作動させ、X と Y の 2 つの光キャリアを生成する。外部共振器レーザの波長を選択することにより、50 GHz 光インターリーバは 2 つの光キャリアを分離する。その後、個々の光搬送波は、IM に送られ独立した高周波 OFDM 信号によって変調される。IM の出力は、直交偏波を有する 2 重偏波多重キャリア OFDM 信号を生成するために偏光ビームスプリッター (PBS) によって組み合わせる。最後に、OFDM 信号は 25GHz 光インターリーバに抑圧され、出力信号が生成される [1]。

2.2 OFDMA-PON の構造 (ONU)

図 2 は、OFDMA-PON における Optical Network Unit (ONU) の構造を示している。受信側では、PBS により分割された 2 つの二重偏波多重キャリア OFDM 信号は、直接の 2 つの PD (フォトダイオード) によって検出される。この段階では、OFDM 信号は、依然として RF (高周波) 信

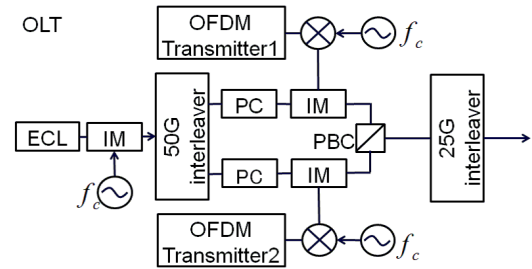


図 1 OFDMA-PON の構造 (OLT)[1]

号であるため、その後 2 つの OFDM 受信機でベースバンドにダウンコンバートされる。最後に、MIMO PolDeMux 受信機で、DSP アルゴリズムを介し各偏光の元のデータを復元される [1]。

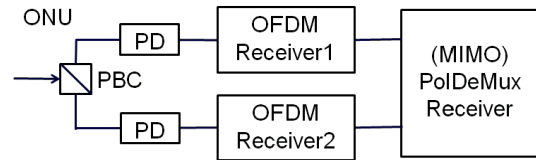


図 2 OFDMA-PON の構造 (ONU)[1]

3 OFDMA-PON の課題と解決法

偏波多重方式を用いた OFDMA-PON の通信方式では、偏波回転によるユーザ間で信号同士の干渉が発生し BER 値が高くなる課題がある。本研究では、この課題に対して適応フィルタを用いて BER 値の改善を提案する。

3.1 偏波の回転による信号の回り込み

OFDMA-PON では、光ファイバに加わる張力やねじれにより発生する偏波回転による信号の回り込みの影響によりユーザ間で信号同士の干渉が発生し、BER 値が高くなってしまいう課題がある。図 3, 4 は、偏波回転による信号の回り込みを示している。2 つの入力偏波信号成分偏波 X と偏波 Y は、出力では偏波 X と偏波 Y のいずれかの偏波信号成分に移行する。図中の係数 a と c は、OFDM データ信号とキャリア信号の偏波回転を表すために使用される。

3.2 光ファイバ内の偏光状態変化

光ファイバコードにねじれや曲がりがあると、出力ポートにおける偏光状態が変化するため、注意が必要である。光ファイバにねじれが加わると、ねじれ角に比例して偏光方向が回転することが知られている。偏光方向回転量は対称ねじれの最大角に対して極値をとった後、ねじれ

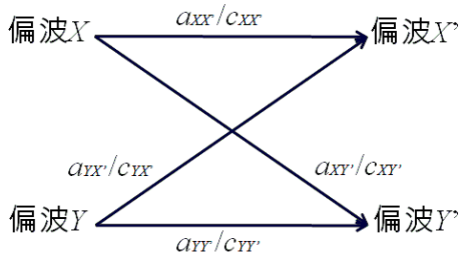


図 3 偏波の回転による信号の回り込み

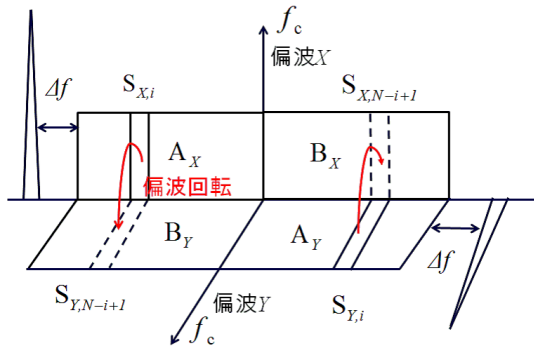


図 4 偏波の回転による信号の回り込みのイメージ

角の増大とともに減少し、ねじれ無しの場合の状態に漸近する。ねじれた光ファイバ中を伝搬する光の偏光方向は、光ファイバのねじれ角 θ に比例して $\alpha\theta$ だけ回転し、 α は 0.07 程度の定数である [2][3]。これは右回り円偏光と左回り円偏光に対する屈折率が異なるために起こる [4]。また、一様に曲げられた光ファイバには、曲率の 2 乗に比例する複屈折が誘起され、曲がりとともに張力が加わると、曲率と歪みの積に比例する複屈折が誘起される [5]。

3.3 両端固定対称ねじれ光ファイバの偏光状態測定

図 5 に示すように、全長約 1.5m、幅 2mm の 8 心テープ光ファイバの中央部 0.6m の両端 A、B を固定し、固定区間の中央部に幅 20mm のテープ回転つまみ C をとりつけ、これによりテープ光ファイバに最大のねじれ θ_0 を与えた。波長 $1.55\mu\text{m}$ の半導体レーザ光 (LD) を光ファイバコードにより取り出し、偏光子 P1 でテープ面に垂直な直接偏光とした後、テープ内の最内側光ファイバに入射した。テープファイバの固定区間 AB には一定の張力 T が加えられている。テープ回転つまみ C のねじれ角 θ_0 を固定し、偏光子 P2 透過パワーの透過軸角度依存性について光パワーメータ (PM) を用いて測定した [6]。

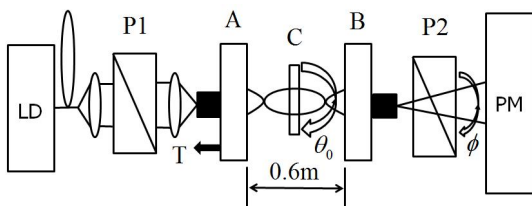


図 5 両端固定対称ねじれ光ファイバの偏光状態測定 [6]

3.4 偏光主軸回転におけるねじり角依存性

偏光主軸回転角度 Θ のテープ回転つまみ角度 θ_0 依存性について説明する。張力 $T=1.5\text{N}$ の場合は、テープ回転つまみ角度 $\theta_0 = \pi/2$ において極大値 0.27π をとった後減少に転じ、テープ回転つまみ角度 $\theta_0 = \pi$ で偏光主軸回転角度 $\Theta = 0$ となった。張力 $T=3\text{N}$ の実験結は、テープ回転つまみ角度 $\theta_0 = \pi/4$ において極大値 0.36π をとった。その後、テープ回転つまみ角度 θ_0 が大きくなるにつれて偏光主軸回転角度 Θ が一定の値に収束した [6]。

3.5 課題の解決法

本研究ではこの課題の解決策として、適応フィルタを用いて偏波回転補償の効果を検討し、受信機でパイロット信号を基準として偏波補償を行う。適応フィルタは LMS アルゴリズムと RLS アルゴリズムを用いてシミュレーションを行う。

4 適応フィルタ

適応フィルタは LMS アルゴリズムと RLS アルゴリズムをそれぞれ用いる。受信機でパイロット信号を基準として適応フィルタより誤差を推定し、受信信号とパイロット信号から誤差値をより低い値に収束させ、重み係数より偏波回転補償を行う。

5 適応フィルタを用いた OFDM シミュレーションの構成と条件

図 6 に本研究でのシミュレーション構成を示す。まず、参照信号を受信側に送り、その後に受信信号を受け取り、この 2 つの信号から重み係数を求め、偏波回転による信号同士の干渉の補償を行う。

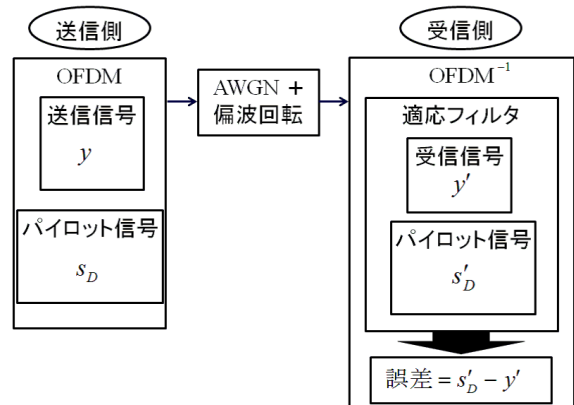


図 6 シミュレーション構成

本研究では、OFDMA-PON において発生する偏波回転による複数ユーザからの信号の干渉に対して、適応フィルタを用いて偏波回転による干渉の補償特性をシミュレーションによって求める。適応フィルタは LMS アルゴリズムと RLS アルゴリズムを用い、受信機でパイロット信号を基準として偏波補償を行う。シミュレーション諸元を表 1 に示す。

表 1 適応フィルタシミュレーションの条件

適応フィルタ	LMS, RLS
LMS ステップサイズ	0.1
RLS 忘却整数	1
LMS 適応フィルタ更新回数	476000
RLS 適応フィルタ更新回数	6000
QAM シンボル数	256000
データキャリア変調方式	16QAM
伝送路条件	AWGN + 偏波の回転
SNR[dB]	0 ~ 16
偏波回転量	$\pi/36 \sim \pi/4$
有効シンボル長	256
ガードインターバル長	16
回転つまみねじれ角度	0 ~ 2π
張力	1.5N, 3N

6 シミュレーション結果

シミュレーションは、下り方向での OFDM 信号に AWGN と、偏波回転を加え偏波回転補償の効果を検討する。

6.1 適応フィルタにおける誤差値ごとの BER 曲線

最適フィルタを用いて $\pi/36 \sim \pi/4$ の偏波回転量に応じて誤差収束速度を求めた。図 7 は、適応フィルタにおける誤差値ごとの BER 曲線である。誤差値が低くなるごとに BER 値が改善されており、誤差値が 0.02 以下の場合、偏波回転無しの場合の BER 曲線と近似し、偏波回転補償される結果となった。よって本研究では誤差値を 0.02 以下に収束させ偏波回転補償を行う。

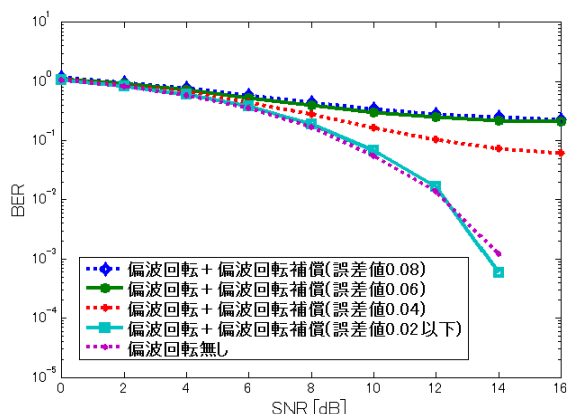


図 7 適応フィルタにおける誤差値ごとの BER 曲線

6.2 LMS アルゴリズムと RLS アルゴリズムの比較

図 8 は、偏波回転量における LMS と RLS アルゴリズムの比較である。両アルゴリズムも偏波回転量が多くなるにつれて偏波回転補償に必要な繰り返し回数が多くなった。RLS アルゴリズムの方が LMS アルゴリズムと比べ偏波回転補償に必要な繰り返し回数が少く収束速度は 3 桁以上速い結果となった。また、RLS アルゴリズムの偏

波回転補償困難な範囲は $\pi/4 \pm \pi/180$ に対して LMS アルゴリズムは、 $\pi/4 \pm 4\pi/45$ となり偏波回転補償を行える範囲が大きい結果となった。

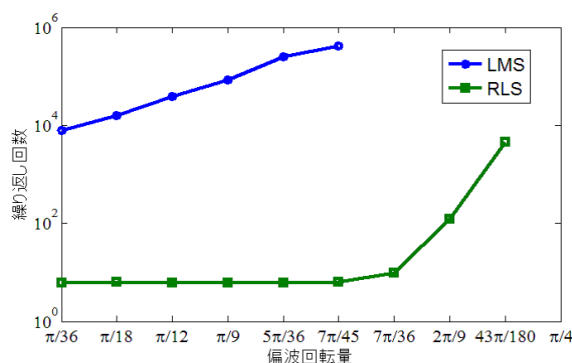


図 8 LMS アルゴリズムと RLS アルゴリズムの比較

6.3 LMS アルゴリズムを用いた両端固定対称ねじれ光ファイバにおける偏波回転補償

先行研究の両端固定対称ねじれ光ファイバ偏光状態の実験データを元に LMS アルゴリズムを用いて OFDMA-PON の偏波回転補償のシミュレーションを行った。シミュレーションは、張力を 1.5N と 3N に設定した。ねじれ角を大きくしてゆき偏波回転補償が可能な範囲の LMS アルゴリズム繰り返し回数を求めた。図 9 に張力 1.5N の場合のシミュレーション結果を示す。横軸がテープつまみ回転角度、縦軸が LMS アルゴリズムの繰り返し回数を表している。テープつまみ回転角度が大きくなるごとに補償に必要な LMS 繰り返し回数は多くなっている。ねじれ角が $0 \sim \pi/4$ 間は、補償することができた。テープつまみ回転角度が $\pi/3$ の時は、偏波回転量が $31\pi/180$ であった。ステップサイズ 0.1 では前シミュレーション結果より誤差収束不可能であり、両端固定対称ねじれ光ファイバでの偏波回転補償可能なテープつまみ回転角度は $\pi/4$ までとなった。図 10 に張力 3N の場合のシミュレーション結果を示す。線が不連続の場所は、偏波回転補償は不可能である。回転角度 $\pi/2$ の時、最大を取りその後テープつまみ回転角度が大きくなるごとに一定の値に収束した。

6.4 RLS アルゴリズムを用いた両端固定対称ねじれ光ファイバにおける偏波回転補償

先行研究の両端固定対称ねじれ光ファイバ偏光状態の実験データを元に RLS アルゴリズムを用いて OFDMA-PON の偏波回転補償のシミュレーションを行った。シミュレーションは、張力を 1.5N と 3N に設定した。ねじれ角を大きくしてゆき偏波回転補償が可能な範囲の RLS アルゴリズム繰り返し回数を求めた。図 11 に張力 1.5N の場合のシミュレーション結果を示す。テープつまみ回転角度が $5\pi/12$ までは回転角度が大きくなるごとに偏波回転補償に必要な RLS 繰り返し回数は多くなっており、テープつまみ回転角が 0.5π の時、最大の約 6000 回を取った。その後減少に転じ、一定の値に漸近する結果となった。図 12 に張力 3N の場合のシミュレーション結果を示す。テ

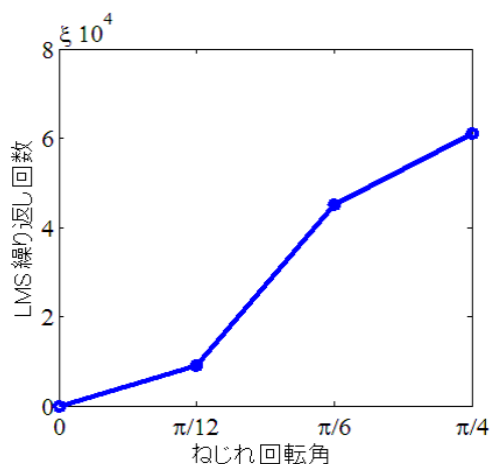


図 9 テープつまみ回転角度 θ_0 における偏波回転補償に必要な LMS 繰り返し回数 ($T=1.5N$)

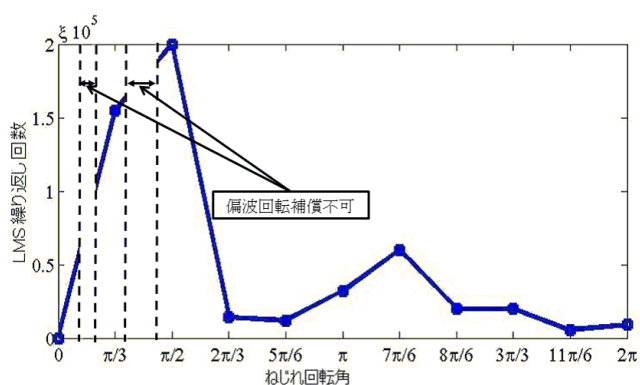


図 10 テープつまみ回転角度 θ_0 における偏波回転補償に必要な LMS 繰り返し回数 ($T=3N$)

つまみ回転角が $\pi/6$ の時最大の約 60 回を取った．その後、テープつまみ回転角度が大きくなるにつれて一定の値に収束した．

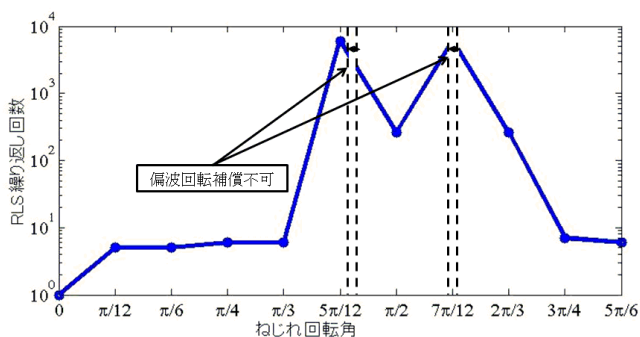


図 11 テープつまみ回転角度 θ_0 における偏波回転補償に必要な RLS 繰り返し回数 ($T=1.5N$)

7 考察

RLS アルゴリズムの方が LMS アルゴリズムよりも収束速度は速く、多くの偏波回転量に対して補償が可能で

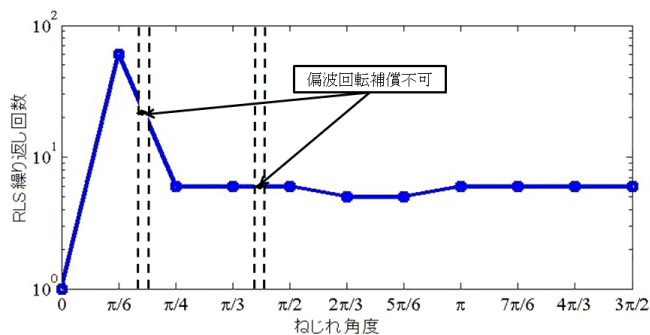


図 12 テープつまみ回転角度 θ_0 における偏波回転補償に必要な RLS 繰り返し回数 ($T=3N$)

あった．また、テープつまみ回転角が大きくなっても、偏波回転量は必ずしも比例するわけではなかった．テープつまみ回転角が大きくなっても、偏波回転補償に必要な繰り返し回数は多くならなかった．

8 今後の課題

受信した OFDM 信号を復調するためには、送信したデジタル信号の先頭を検知するためにタイミング検出を行う必要がある．タイミング検出ではパイロット信号とデジタル信号の相関値を求めることで行われる．今後の課題として、パイロット信号を用いたタイミング検出のプログラムを作成し、OFDM 信号の偏波回転による相関値の変化を調べ、タイミング検出の実現性を検討する．

参考文献

- [1] Dayou Qian, Neda Cvijetic, " 108 Gb/s OFDMA-PON With Polarization Multiplexing and Direct Detection, " IEEE J.Lightw.Technol, pp.484-493, vol.28, no.4, February 15, 2010 .
- [2] A.M.Smith, " Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber, " Appl.Opt.vol.19, no.15, pp.2606-2611, 1980.
- [3] J.Sakai, T.Kimura, " Birefringence and polarization characteristics of single-mode optical fibers under elastic deformations, " IEEE J.Quantum Electronics, QE-17, 6, pp.1041-1051, 1981.
- [4] 石黒浩三, " 両端固定ねじれテープ光ファイバ内の偏光状態変化, " 第 7 版, 裳華房, 第 3 章, 1990.
- [5] R.Ulrich, S.C.Rashleigh, W.Eickhoff, " Bending-induced birefringence in single-mode fibers, " Opt.Lett.5, 6, pp.273-275, 1980.
- [6] 立田 光廣, 縄田耕二, " 両端固定ねじれテープ光ファイバ内の偏光状態変化, " 信学技報 OFT2006-43, 2006.
- [7] 神谷 幸宏, " MATLAB によるデジタル無線通信技術, " コロナ社, Dec . 2008 .