

光アクセスネットワークにおける信号間の干渉除去方式

M2017SC001 福岡慶剛

指導教員：奥村康行

1 はじめに

現在, FTTH が発達し光アクセスネットワークは各家庭に広がり光ファイバが分枝的に敷設されている. 光アクセスネットワークを経済的, 効率的に実現するのが PON 技術であり, 高度化に向けた研究が盛んに行われている. 本研究では, PON を用いた光アクセスネットワークの更なる高度化に向け, 信号処理技術のアクセスネットワークへの応用を提案する. 本研究では偏光多重 OFDMA-PON と OSDMA-PON にて報告されている問題を, 信号処理技術である独立成分分析と適応フィルタを用いて補償した. 提案手法は OptSim と MATLAB を用いたシミュレーションにより評価した. 2 節では偏光多重 OFDMA-PON で発生する偏波回転問題を独立成分分析を用いて補償し, 3 節では OSDMA-PON でのサブキャリア干渉によるビート雑音を適応フィルタを応用し補償する. 4 節では本研究のまとめについて記述する.

2 独立成分分析を用いた偏波回転の補償

本節では偏光多重 OFDMA-PON にて発生する偏波回転問題によるビット誤りを独立成分分析を用いて補償することを提案し, シミュレーションにより評価する.

2.1 PolMux OFDMA-PON と課題

光 OFDMA-PON(Orthogonal Frequency Division Multiple Access - Passive Optical Network) は従来の OFDM 技術を光通信へと応用したもので, 周波数帯域の効率の良い利用が可能となる [1]. 近年では偏光多重技術を用い, 更なる高性能化された PolMux(polarization multiplexing) OFDMA - PON が報告されている [2]. ここで, OFDMA-PON の概略図を次の図 1 に示す.

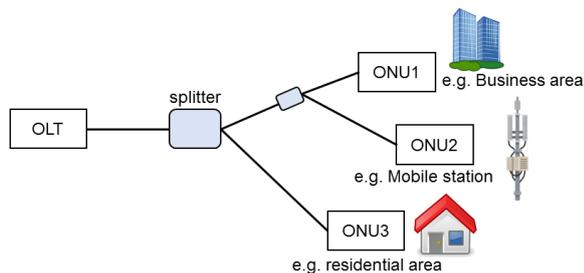


図 1 PON の概要図

偏光多重技術を応用することで, 大容量化を可能とする PolMux OFDMA-PON であるが, 偏波回転による各偏光の干渉が報告されている [2]. 偏波回転とは, 通信中光ファイバへの捻じれ等の要因により水平偏波, 直交偏波が互いに干渉し合い, 偏光状態の変化によるビット誤りで通信に支障をきたすものである.

2.2 独立成分分析の応用

本研究では先述の偏波回転の課題を, 独立成分分析を用いて対策を行う. 図 2 に本研究の概要図を示す. 図中の Pol-X, Pol-Y はそれぞれ水平偏波, 垂直偏波のどちらかを表している. この 2 つの偏波が偏波回転により相互に干渉し, Pol-X', Pol-Y' へと遷移する. 遷移した信号ではビット誤りが発生し, 通信に支障をきたす. そこで本研究は, この干渉し合った Pol-X' と Pol-Y' を ICA (Independent Component Analysis: 独立成分分析) を用いることで, 元信号 Pol-X, Pol-Y を復元し, ビット誤りを補償する.

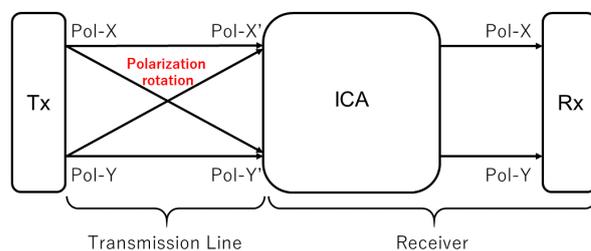


図 2 本研究の概要図

独立成分分析は様々な用途に用いられている信号処理技術であり, 代表的な例題として複数の混ざり合った音源から特定の音源を抽出するカクテルパーティー効果がある [3][4]. 本研究では, このカクテルパーティー効果の音信号を, 光信号に置き換え, 偏波回転により干渉し合った二つの偏波から元信号を抽出するアプローチをとる.

独立成分分析では, 観測された信号 x のみを用いて, 元信号に類似する分離信号 y を分離行列 W を用いて求める.

$$y(t) = Wx(t) \quad (1)$$

分離信号 y を独立とするには分離信号の同時分布, 周辺分布を考え, その差が小さくなれば独立となる. そのため, 独立成分分析では評価関数に Kullback-Leibler divergence(D) を用いて, $D(W)$ を次のように表す.

$$D(W) = \int p(y) \log \frac{p(y)}{\prod_{i=1}^n p(y_i)} dy \quad (2)$$

この $D(W)$ の最小値を求めるのが独立成分分析である. 本研究では更新即として, 自然勾配法を用いる.

$$W_{t+1} = W_t + \mu [I - (y(t)y(t)^T)] W_t \quad (3)$$

ここでの μ をステップ幅とする [3]. 本研究の独立成分分析は上記の手法を用いて実現される.

2.3 シミュレーション概要

本研究はシミュレーションにより前述した提案を試行する。使用するソフトウェアはOptSimとMATLABである。次の図3にシミュレーション環境の概要を示す。OptSimを用いて大枠の光アクセスネットワークを構築し、MATLABを連携させることにより独立成分分析を実現する。また、シミュレーションの条件および使用PCを次の表1に示す。本研究では、偏波回転は偏光状態変化のJones Matrix[5]を用いて模擬されている。

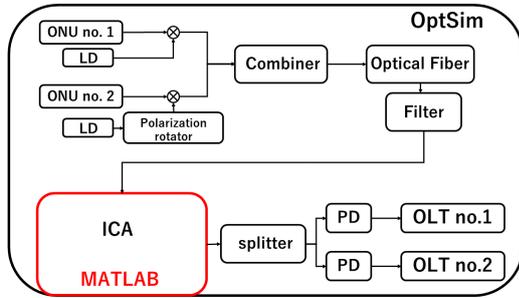


図3 シミュレーション環境 (PM OFDMA-PON)

表1 シミュレーション条件

シミュレーション条件	
光波長	1550nm
送信 bit 数	65000bit
キャリア変調	16QAM
光ファイバ長	10km
独立成分分析解法	自然勾配法
勾配法ステップ幅	0.001
評価方法 1	OSNR/SER
評価方法 2	コンスタレーション

2.4 偏波回転補償シミュレーション結果

次の図4, 図5にシミュレーション結果を示す。図4はコンスタレーションを、図5はBER(Bit Error Rate)を示す。まず、図4ではファイバねじれ角 $4\pi/9$ の場合のノイズ無し理想環境下のコンスタレーションを独立成分分析の有無で比較している。左図が独立成分分析を適用しない場合、右図が適用した場合である。偏波回転によりばらつきがみられたコンスタレーションが、独立成分分析を適用することにより、16QAMのコンスタレーションが大幅に改善されていることが分かる。

続いて、図5(a)では紫色破線、緑色破線が独立成分分析を適用していない場合で、それぞれファイバのねじれ角 $\pi/9$, $2\pi/9$ の場合である。ねじれ角が大きいほど干渉が強くなりビット誤りが多く発生している。これらに対し独立成分分析を加えたのが青色破線、橙色破線である。独立成分分析を適用することにより、ビット誤り率の低下が見取れる。図5(b)では独立成分分析の効果が顕著に表れる。図5(b)中の紫、緑色破線は独立成分分析を適用していないねじれ角 $3\pi/9$, $4\pi/9$ の場合である。これらの結果は、

ビット誤り率が非常に高く、通信に大きな支障をきたしている。対して青色、橙色破線は独立成分分析を加えたもので、それぞれビット誤り率の大幅な改善がされている。

以上の結果より、偏光多重通信方式における、偏波回転の問題に対して、信号処理技術である独立成分分析を適用することは有用であると考えられる。

独立成分分析は受信信号のみから偏波回転の補償が可能である。これにより、参考文献[2]では偏波回転の補償にトレーニングパターンを用いるため、データ信号の効率向上が提案手法の利点として挙げられる。

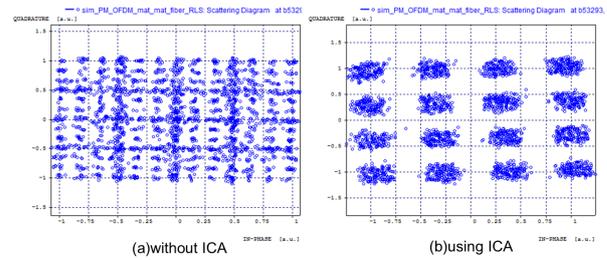
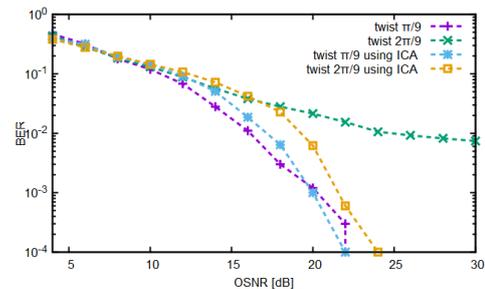
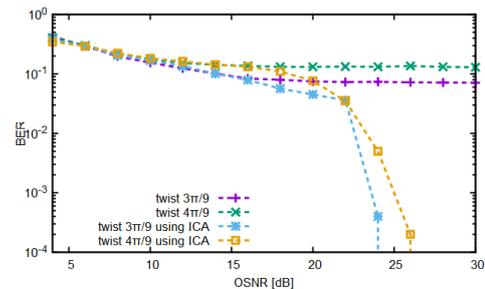


図4 偏波回転補償結果 (コンスタレーション)



(a) ねじれ角 20 度, 40 度 (低干渉)



(b) ねじれ角 60 度, 80 度 (高干渉)

図5 偏波回転補償結果 (BER 特性)

3 OSDMA-PONにおけるビート雑音の補償

本節ではサブキャリア多重を用いるアクセスネットワークにて、サブキャリア同士の干渉により発生するビート雑音を、適応フィルタを用いることで補償し、ビット誤りを低減することを提案する。

3.1 OSDMA-PON

OSDM-PON(Orthogonal Subcarrier Division Multiplexing - PON)[6] は、各 ONU へサブキャリアを割り当

て、サブキャリアを直交多重させた PON である。本研究では、サブキャリアを割り当てたいつつかの ONU に対し、1つの光キャリアを割り当て、ネットワークを形成していく。OSDM-PON の利点としては複雑なハードウェアが不要であり、経済的、簡易的にネットワークの設置が可能な点である。次の図 9 に OSDM-PON の概要図を示す。

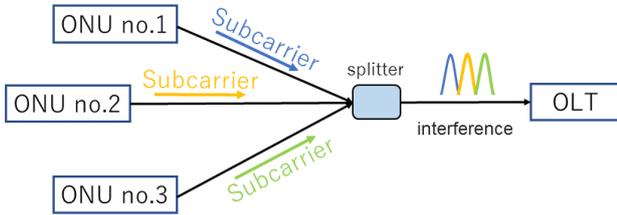


図 6 OSDM-PON の構造 [6]

3.2 OSDMA-PON における波長割り当てと課題

参考文献 [6] では 1つの ONU へ 1つのサブキャリアを割り当て、それぞれに光キャリアを割り当てている。対して本研究では 1つの光波長に対して、次の図の割り当てのように、4つのサブキャリアを配置し、1つの光キャリアを割り当てる。参考文献では、光キャリアに対するサブキャリア多重では、隣接サブキャリアの干渉によるビート雑音が報告されている。そこで、この課題に対し適応フィルタ (LMS アルゴリズム) を応用することで、サブキャリアの干渉を補償し、ビット誤りを低減させるのが、本研究の試みである。

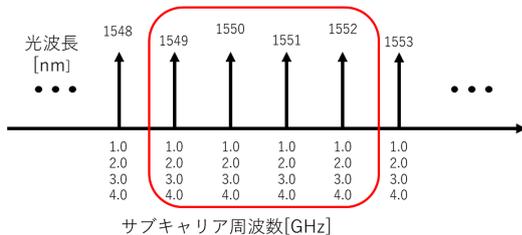


図 7 本研究におけるサブキャリアの割り当て

3.3 適応フィルタの応用

適応フィルタは、独立成分分析と同様に様々な用途に用いられている信号処理技術である。代表的な例題としてはシステム同定、ノイズキャンセリング等が挙げられる [7][8]。本研究では解法アルゴリズムに LMS (Least Mean Square) アルゴリズムを用いる。次の図 8 に適応フィルタのイメージ図を示す。適応フィルタは、受信信号と所望信号との差をアルゴリズムにより小さく更新し、目的信号を生成するものである。

本研究で用いたアルゴリズムを次式に示す。ここでの $e(n)$ は出力信号、 $d(n)$ を所望信号、 \mathbf{X} は入力信号ベクトル、 \mathbf{W} はフィルタ係数ベクトルである。

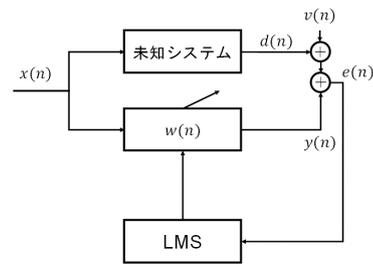


図 8 適応フィルタの構成 [8]

$$e(n) = d(n) - \mathbf{W}_n^T \mathbf{X}_n = d(n) - \mathbf{X}_n^T \mathbf{W}_n \quad (4)$$

フィルタ係数の更新則は次の通りである。ここでの μ はステップ幅である。

$$\mathbf{W}_{n+1} = \mathbf{W}_n + \mu e(n) \mathbf{X}_n \quad (5)$$

本研究ではノイズ成分を、隣接サブキャリアとして考え、希望信号と受信信号から目的信号を算出し、サブキャリアの干渉によるビート雑音を補償していく。

3.4 シミュレーション概要

提案した手法をシミュレーションしていく。シミュレーションソフトは、OptSim と MATLAB を用いる。シミュレーションの概略図を次の図 11 で示し、シミュレーション条件を表 2 で示す。シミュレーションとしては、図 6 の赤枠にあるように 4つの光キャリアで多重させる。4つの光キャリアに 4つのサブキャリアを多重させ、ONU を 16 台用いたネットワークを構築する。ONU no.1~4 に 1550nm の光キャリアを与え、サブキャリアを 1 から 4GHz を多重させる。同じように、ONU no.5~8 に 1549nm、ONU no.9~12 に 1551nm、ONU no.13~16 に 1552nm の光キャリアを割り当てている。

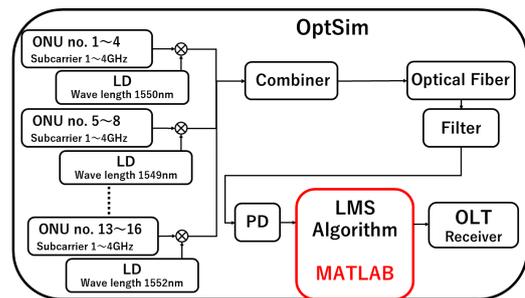


図 9 シミュレーション環境 (OSDMA-PON)

3.5 シミュレーション結果

次の図 10 にコンスタレーションを、図 11 に SER (Symbol Error Rate) の結果を示す。ここでの結果は 1550nm の光キャリアを割り当てた ONU no.1, no.2 の受信点の結果を示している。図 10 の左図では適応フィルタを用いなかった場合、右図が適応フィルタを用いた場合で

表 2 シミュレーション条件

シミュレーション条件	
光波長	1549~1552nm
送信 bit 数	10000Symbol
OLT:ONU	1:16
サブキャリア	1.0GHz~4.0GHz
光ファイバ長	5km
適応フィルタアルゴリズム	LMS アルゴリズム
ステップ幅	0.0005
評価方法 1	コンスタレーション
評価方法 2	SER

ある。比較をすると左図ではサブキャリア干渉によりコンスタレーションにばらつきがみられる。それに対し右図では、16QAM のコンスタレーションのまとまりが良くなり、改善されていることが確認できる。

続いて、図 11 では紫色破線では ONU no.1 の 1GHz サブキャリアを、緑色破線では ONU no.2 の 2GHz のサブキャリアを受信し、適応フィルタを用いなかった場合である。図より SER が OSNR が高い状態でも低くならずサブキャリア干渉の影響があることが分かる。それに対し図中の青色破線、橙色破線では上記の結果に対し適応フィルタを用いた場合を示している。青色破線、橙色破線共に SER の改善がみられている。また、緑色、橙色破線が紫色、青色破線に対して SER が高くなっているのは、隣接サブキャリアの数の差であると考えらる。1GHz では隣接サブキャリアが 2GHz の 1 つだけだが 2GHz は 1GHz と 2GHz の 2 つあるためビット誤りが増加していると考えられる。提案手法では参考文献 [6] におけるサブキャリア干渉を適応フィルタを用いることで補償し、参考文献と比較し、サブキャリア周波数の使用効率を向上させた。

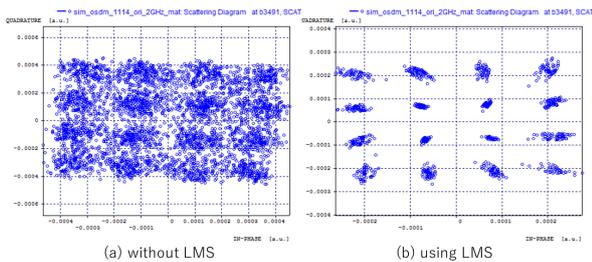


図 10 ビート雑音補償結果 (コンスタレーション)

4 まとめと今後の課題

本論文の第 2 節では、偏光多重 OFDMA-PON で発生する偏波回転問題を独立成分分析を用いて補償することを提案した。結果として、独立成分分析を用いることで BER、コンスタレーションにて改善が確認された。独立成分分析を用いることで、偏波回転による偏光干渉の補償が可能であり、有用性を確認した。本研究は提案段階ではあるが、偏波多重方式を使用する様々な通信で応用が考えら

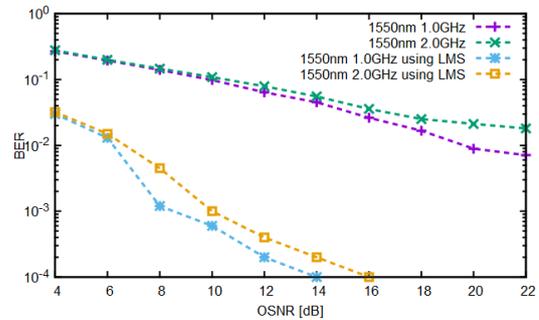


図 11 ビート雑音補償結果 (SER 特性)

れる。今後の課題としては、現実に近づけた大規模なネットワークでのシミュレーション、異なる独立成分分析の解法による比較等が挙げられる。

続く第 3 節では、複数のサブキャリアに対し、複数の光キャリアを多重させたネットワークである OSDMA-PON において、適応フィルタを応用することで隣接サブキャリアの干渉により発生するビート雑音の補償を提案した。結果、発生したビート雑音の影響を適応フィルタ、LMS アルゴリズムを用いることで SER 及びコンスタレーションの改善が確認され、適応フィルタを用いることでビート雑音の影響を補償したことを確認した。信号処理技術である適応フィルタを用いることで、ハードウェアの制約緩和が期待できると考えられる。今後の課題としては、ONU の台数を増やす等、実際の環境に近づけたシミュレーション等が挙げられる。

参考文献

- [1] William Shieh, Ivan Djordjevic, "OFDM for Optical Communications," Elsevier Inc. 2010.
- [2] D. Qian and N. Cvijetic, "108 Gb/s OFDMA-PON with Polarization Multiplexing and Direct Detection," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.28, no.4, pp.484-493, Feb. 2010.
- [3] A. Hyvrinen, E. Oja, "Independent component analysis: Algorithms and applications," Neural Networks, vol.13, no.4-5, pp.411-430, Mar. 2000.
- [4] 陳 延偉, "独立成分分析法 (ICA) のパターン認識・画像処理への応用と MATLAB シミュレーション," トリケップス社, Dec. 2007.
- [5] T. Mitsuhiro and N. Koji, "Polarization state evolution in a twisted ribbon fiber with its both ends fixed," IEICE technical report, vol.106, no.350, pp.15-21, Nov. 2006.
- [6] 上田 裕己, 栗山 宜己, 高 将士, "16-QAM を用いた直交サブキャリア多重方式に基づく OSDMA-PON の検討," IEICE Technical Report, CS2011-41, Sep. 2011.
- [7] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, 4th ed, Prentice-Hall, 2002.
- [8] 島村 徹也, "～MATLAB による～実戦 デジタル信号処理," トリケップス社, June, 2010.