

マルチパス干渉補償技術による 多モード光ファイバの分散補償技術

岩下 克

高知工科大学工学部
〒 782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185

E-mail : iwashita.katsushi@kochi-tech.ac.jp

要約 : LAN の高速化に伴って、すでに敷設した GI 型光ファイバの有効利用が求められている。本研究では G I 型光ファイバのモード分散を補償する新しい方法を提案し、その基本特性についての検討結果を述べる。光ヘテロダイン検波を用い、モード間の伝搬時間の間に一定の関係を与えることにより無線通信と同様の検波が可能であることを示す。この条件を用いてシミュレーションを行い、トランスバーサルフィルタを用いることによりモード分散が電氣的に補償可能であることを示す。

Abstract : More and more bandwidth is required for LAN application. It is important to utilize installed graded-index multimode fiber without replacing newly developed fiber or single-mode fiber. In this paper, we propose a novel compensation method of inter-modal dispersion in multimode fiber. By using optical heterodyne detection, the inter-modal dispersion can be completely compensated by using electrical circuits.

1. はじめに

インターネットや IT 技術の急速な発展により、ますますネットワークの高速化が求められている。特に LAN(Local Area Network) の分野では画像や映像など大容量コンテンツを扱う機会が多くなり、高速化への要求は顕著である。しかし、光ファイバを用いる FDDI (Fiber-Distributed Data Interface) やギガビットイーサなどの LAN では一般に GI(Graded Index) 型多モードファイバが使われている。従来の GI 型光ファイバの帯域は 500MHz·km であり、伝

送距離が 500m ではギガビットイーサには対応できるが、より高速の 10G イーサには帯域が狭いため対応できない。このため、より帯域の広い GI 型光ファイバが開発されている⁽¹⁾。

しかし、現在敷設してある GI 型光ファイバを取替えることは費用的に困難な場合が多い。従って、敷設してある GI 型光ファイバを利用して 10G ビットイーサにも適用できることを目的に様々な研究が進められている。具体的には高周波領域では GI 型ファイバの周波数依存性が少ないことを注目してその周波数領域

のみをサブキャリア伝送 (SCM : Sub-Carrier Multiplexing) する方式⁽²⁾ や分散劣化に対して電気回路で分散等化をする方法^{(3), (4)} などが検討されている。しかし、前者は光ファイバ個々の特性に依存しており、その都度特性を測定する必要がある。後者は電氣的な補償では限界があり、それほどの改善効果は期待できないなどの問題点がある。

本研究では以上の問題を解決するため無線通信で用いられているマルチパスフェージングを補償する技術を多モード光ファイバ光伝送に適用し、モード分散を補償することを提案する。まず、第2章では無線通信と光通信の本質的な違いについて述べ、次に提案する方式の概要を述べる。その提案方式についてシミュレーションを用いて原理確認をする。最後の実際の適用する場合の可能性や問題点を述べる。

2. 無線通信と光通信

ここでは無線通信における検波方式と光通信における検波方式との違いを説明する。図1に概念的にその違いを示す。

無線の電波と光は同じ電磁波であるからここでは簡単のため同一の記号を用いて説明する。両者を電界 $E_s(t)$ で表し

$$E_s(t) = \sqrt{2P_s(t)} \cos\{\omega_s t + \phi(t)\} \quad (1)$$

とする。ただし、 $P_s(t)$ は信号電力、 ω_s は信号の角周波数、 $\phi(t)$ は信号の位相である。

また局部発振器の電界 $E_l(t)$ も同様に表して

$$E_l(t) = \sqrt{2P_l} \cos \omega_l t \quad (2)$$

とする。ただし、 P_l は局部発振信号 (光) の電力、 ω_l は局部発振機の発振角周波数とする。

無線通信における検波方法は図1(a)に示すようにアンテナで受信された信号に局部発振信号を掛け乗積検波することにより中間周波数信号を得る。乗積検波後の中間周波数信号は

$$V(t) \propto \sqrt{2P_s(t)} \cos\{(\omega_s - \omega_l)t + \phi(t)\} \quad (3)$$

となる。

これは無線信号の情報をそのまま周波数だけ変換している。

一方、図1(b)に示す光通信の直接検波では2乗検波であり、受信後の受光素子に流れる電流 $I(t)$ は

$$I(t) = \langle E_s(t)^2 \rangle = RP_s(t) \quad (4)$$

となる。ただし $R (= \eta e / h \nu)$ は変換効率、 η は量子効率、 e は電子の電荷、 h はプランク定数、 ν は光の周波数、 $\langle \dots \rangle$ は平均を示す。

直接検波は電力だけを受信するため、光領域の位相情報が失われる。この式から、 $\phi(t)$ には情報を載せることができず、強度のみにしか情報を載せることができないことを示している。これは光信号が非常に高周波であるため電界を直接変換できる素子が現状では存在しないため、その電力のみを変換することになる。

一方、光ヘテロダイン検波では局部発振光を用いることにより無線と同じことが可能である。

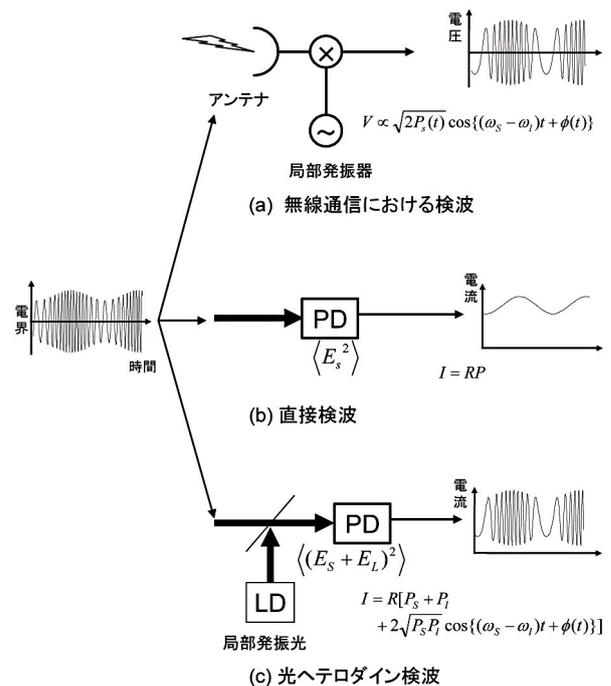


図1 無線通信と光通信における検波方式

すなわち、図1(c)に示すように、光ヘテロダイン検波すると、検波後の電流は

$$I(t) = \langle (E_s(t) + E_l(t))^2 \rangle \quad (5)$$

$$= R\{P_s(t) + P_l + 2\sqrt{P_s(t)P_l} \cos\{(\omega_s - \omega_l)t + \phi(t)\}\}$$

ここで P_l は変化しないので直流成分となる。第1項の $P_s(t)$ は信号で振幅変調の場合は振幅が変化するが通常は十分小さいので無視できる。したがって、信号は

$$I(t) \approx 2R\sqrt{P_s(t)P_l} \cos\{(\omega_s - \omega_l)t + \phi(t)\} \quad (6)$$

となり、無線通信の場合と同じで光の位相や周波数の情報はそのまま電気信号に変換されることがわかる。

以上からわかるように無線の場合は周波数変換を除けば基本的に線形である。したがって、伝搬路で生じた歪は受信側の中間周波数で等化可能であることを示している。光ヘテロダイン検波の場合も同様のことが可能である。しかし、直接検波では受信過程で2乗検波を行うため位相、周波数情報が失われ、入力と出力が線形の関係に無いため完全な等化はできないことを示している。

3. マルチパス干渉補償法

多モード光ファイバにおけるモード分散は光ファイバ内を光が伝搬するときにモードごとに異なる経路を通り、その光路長が異なるため伝搬時間に差が生じる分散である。GI型多モード光ファイバではこれを少なくするためにコアの中心の屈折率を大きくしてモード間の遅延時間差を少なくしているが完全には補償できない。電氣的にモード分散を補償する従来の方法はモード分散が帯域劣化と同じ現象になるため高周波数において劣化した特性をフィルタで持上げることにより補償するものである。しかし、この方法は限界がある。これは直接検波が2乗検波であるため本来の光領域における電界の位

相成分の情報が失われていることに起因する。

一方、無線通信では同様の現象はマルチパス干渉として知られている。これは送信機と受信機の間を伝搬する電波が直接届く電波とビルなどに反射・干渉などで届く場合の種々の伝搬路があるため生じる。無線の場合は伝搬路で受けた歪は受信回路で逆変換することにより補償が可能である。

光通信の場合も同様のことが光ヘテロダイン検波により可能になる。

光ヘテロダイン検波方式を用いてモード分散を補償するには信号光と局部発振光とを合波するときそれぞれの干渉波に光学的に合波する必要がある。これを実現するのは非常に難しい。なぜなら、干渉波はそれぞれモードごとに方向および位置が異なる。それぞれのモードに対して受信の場所と偏波をあわせ、それを時間的に変化する信号に追従するのはきわめて困難である。

従って、以下のような方法を提案する。すなわち、図2に示すように送信側で局部発振光（光の角周波数 ω_c ）を信号光（光の角周波数 ω_m ）と偏波を合せて合波し同時に送信する。この方法により受信端で直接検波することで光ヘテロダイン検波と同等のことが可能となる。

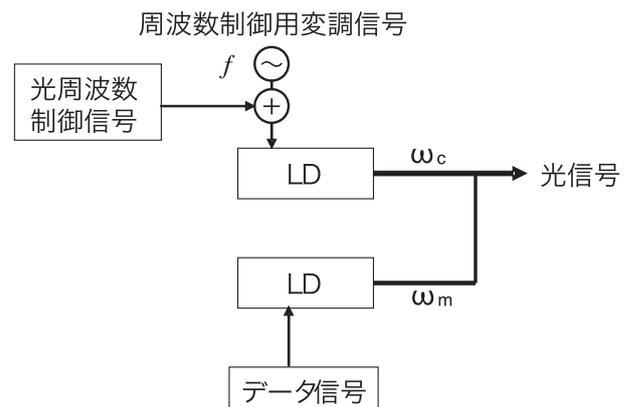


図2 送信光源の構成

しかし、上記の方法は光ヘテロダイン検波は可能になるがマルチパス干渉の場合はそれぞれのパス間の干渉が問題になる。以下にその問題と解決方法を示す。

先行波と遅延波の2つのモードのみで考えると光信号は以下のような成分に分類できる。

- ① 先行波の局部発振器信号－先行波の信号
- ② 遅延波の局部発振器信号－遅延波の信号
- ③ 先行波の局部発振器信号－遅延波の局部発振器信号
- ④ 遅延波の局部発振器信号－先行波の信号
- ⑤ 先行波の局部発振器信号－遅延波の信号
- ⑥ 先行波の信号－遅延波の信号

の信号に分解される。この関係を図3に示す。

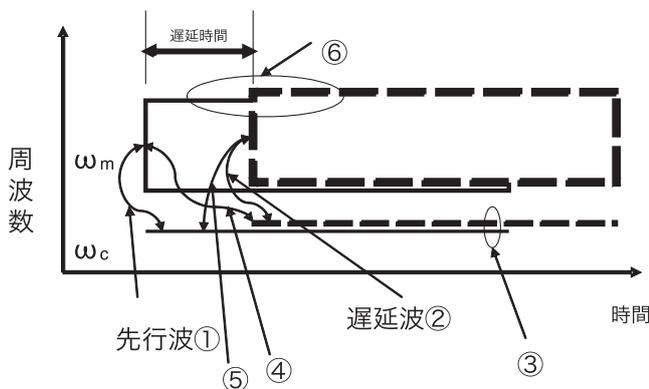


図3 マルチパス干渉における周波数関係

- ① と②は本来の信号である。
- ③は同一の周波数であるため直流成分として検出される。
- ④、⑤は①、②と同じ周波数に入る。
- ⑥は同一の周波数領域にあり、低周波信号として検出されるがバンドパスフィルタにより除去可能である。さらには、信号波が局部発振光に比べて小さい場合はレベルが非常に小さくなり無視できる。

従って、本来の信号と異なりフィルタで除去できないのは④と⑤の信号になる。

これを①、②と同じ信号とみなせるようにするには直流通作をしているキャリア信号が先行波と遅延波で同じになる条件、すなわち、両者の遅延時間差 τ がキャリア光信号の 2π であるという条件

$$\omega_c \tau = 2n\pi \quad (n \text{は整数}) \quad (7)$$

が満足できれば③、④はそれぞれ②と①と同一とみなせることになる。

以上の条件を満足することにより、受信の電気回路において補償可能になる。

このことは結局、局部発振光の代わりに送信側で入れた光が受信側で直接波と遅延波の位相さえあっていれば良いことを示している。このような信号を簡単に作り出す方法として通常のサブキャリア伝送方式がある。

4. シミュレーション結果

以上のことをシミュレーションにより確認した。シミュレーションに用いた伝送系を図4に示す。1Gbpsの4つのデータ信号に対してサブキャリア周波数(4,6,8,10GHz)が異なる4チャンネルのPSK変調をかけFDM(Frequency Division Multiplexing)多重する。その電気信号を光変調器により強度変調する。その出力光信号をG I型光ファイバを伝送する。この伝搬ではモード分散が生じ、先行波と遅延波が発生する。受信信号はPDで受信したのちBPFで不要な周波数成分を除去し、トランスバーサルフィルタで線形等化補償をしたのち同期検波、LPFによる高周波成分を除去した後、識別再生する。

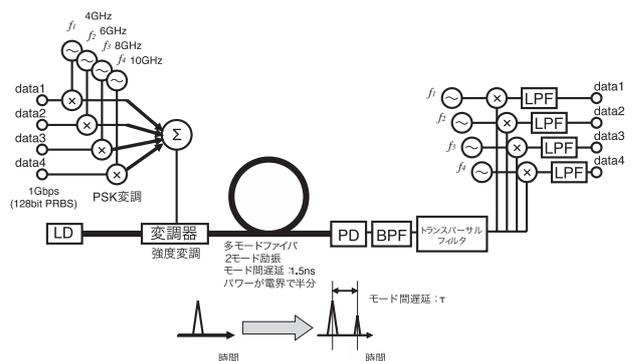


図4 光伝送システムの構成

マルチパス干渉波は簡単のため2つの波のみに別れ、その時間差は1.5ns(1.5タイムスロット)とした。また、位相雑音は無視する。

シミュレーションに用いたプログラムは

Mathematicaにより作成した。

マルチパス干渉がある場合と無い場合、それぞれのシミュレーション結果を図5に示す。この計算では先行波と遅延波との電界振幅比は $\beta = 0.5$ とした。上段はマルチパス干渉が無い場合の波形を示している。すなわち伝送前の波形である。下段はマルチパス干渉で波形劣化が生じている様子を示す。このようにマルチパス干渉により波形劣化が生じることがわかる。

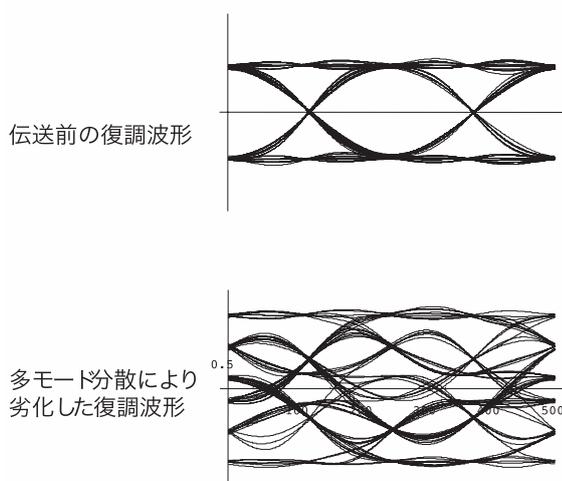


図5 劣化がある場合の復調波形

つぎにトランスバーサルフィルタを用いた補償について検討する。トランスバーサルフィルタの原理を図6に示す。トランスバーサルフィルタは入射してくる信号を分岐し、遅延と振幅調整により補償するものであり、無線通信におけるマルチパスフェージングはこれと同じモデルで議論ができるためその逆を電気回路において実現できれば補償可能である。

$\beta = 0.7$ （電界で表した先行波と遅延波の比）とした場合の補償結果を図7に示す。劣化は伝送前の振幅(S_0)と補償後の振幅(S_1)とし、

$$20 \log \frac{S_1}{S_0} [dB] \quad (8)$$

で計算した。

トランスバーサルフィルタで段数を増やすごとに受信波形が改善されていることがわかる。

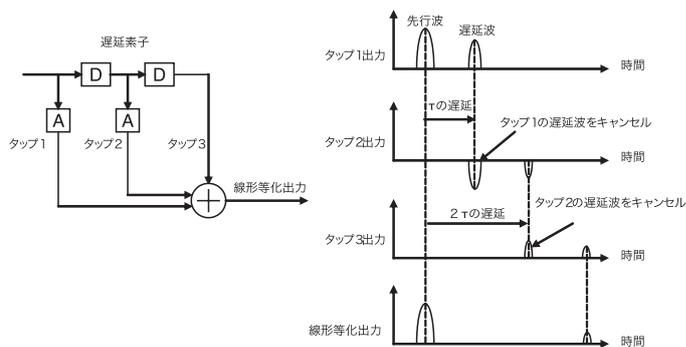


図6 トランスバーサルフィルタの原理

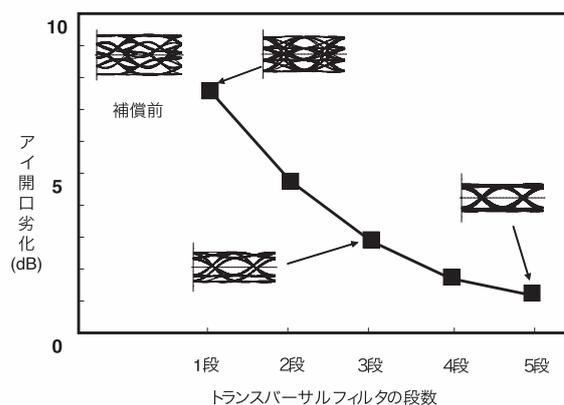


図7 マルチパス干渉補償結果

これは5段までのシミュレーション結果であるがさらにフィルタの段数を増やすことにより更なる改善は可能である。

5. 実システムでの課題

マルチパス干渉の補償を行うにはいろいろの課題が存在する。まず、モードが先行波と遅延波の2つだけの場合は問題が無いが3つやそれ以上になるとそれぞれが式(7)の条件より遅延時間が整数倍になる必要がある。また、モード数も多すぎると補償する電気回路が大変になり現実的ではない。

通常G I型光ファイバのモード数Mは

$$M = a^2 k^2 n_1^2 \Delta \frac{\alpha}{\alpha + 2} \quad (9)$$

で計算できる。ここでaは光ファイバのコア径(半径)kは波数、 n_1 はコアの屈折率、 α は屈折率分布パラメータである。

また、主モード次数mにおけるモードの遅延

時間は

$$t_m = \frac{N}{C} \left(1 + \frac{\Delta\delta}{4M} m + \frac{\Delta^2}{2M^2} m^2 \right) \quad (10)$$

で与えられる。ただし、 N は群屈折率、 c は真空中の光速、 Δ は比屈折率差、 $\delta = \alpha - 2 - \varepsilon$ 、 ε は分散により決まる定数である。

一般的なG I型光ファイバの値を代入すると、 M は約20になる。これは実現できるすべてのモードを励振した場合である。しかし、たとえば励振するモード数を少なくするために入射を単一モード光ファイバにすることにより極力抑えることが可能である⁽⁶⁾。図8にG I型多モード光ファイバ1 kmに短パルスを入射し、出射光の波形を観測することによりモードの分割を観測した結果を示す。入射した光パルスはパルス幅約50ps、波長は1600nmのDFB-LDを得得スイッチングにより発生させた。受信は帯域30GHzのサンプリングオシロスコープで受信した。出射光パルスは高々2～3つに分離されているのみである。しかも3つに分離されてもほぼ等間隔で分離されていることがわかる。

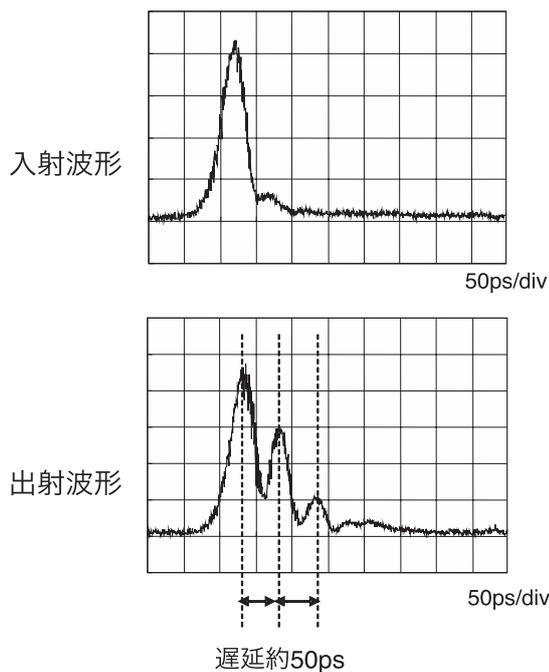


図8 短パルス入射による測定結果

6. まとめ

以上、多モード光伝送システムに無線技術を適用し、マルチパス干渉を電氣的に補償する方法について提案し、その可能性について計算機シミュレーションにより明らかにした。今後は以上の提案を実際実験で有効性を確認する。

謝辞

本研究を進める上でお世話になった本神戸宏学科長および研究室のメンバに感謝します。本研究は私学助成のもとに行われたものです。

文献

- (1) P.Pepeljugoski, S.E.Golowich, A.J.Ritger, P.Kolesar, and A.Risteski, "Modeling and Simulation of Next-Generation Multimode Fiber Links," IEEE J.Lightwave Technol., vol.21, no.5, pp1242-1255, 2003
- (2) L. Raddatz, D.Hardacre, I.H. White, R. V. Penty, D. G. Cunningham, M. R. T. Tan and S.-Y. Wang, "High bandwidth data transmission in multimode fibre links using subcarrier multiplexing with VCSELs," IEE Electron Lett., vol.34, no.7, 1998
- (3) B. L. Kasper, "Equalization of multimode optical fiber systems," Bell Sys. Tech. Journal. vol.61, no.7, 1982
- (4) X. Zhao and F. S. Choa, "Demonstration of 10-Gb/s Transmission over a 1.5-km-Long Multimode Fiber Using Equalization Techniques," IEEE Photon. Tech. Lett., vol.14, no. 8, pp.1187-1189, 2002
- (5) L.Raddatz, I.H. White, D.G.Cunningham, and M.C.Norwell,"An Experimental and Theoretical Study of Offset Launch Technique for the Enhancement of the Bandwidth of Multimode Fiber Links,"IEEE J.Lightwave Technol., vol.16, no.3,pp324-331, 1998