

符号依存パルスピーク値比較による波長分散補償法

速水 佑治^{†a)} (学生員) 外山 裕太^{††}
 岩下 克^{†b)} (正員)

A Chromatic Dispersion Compensation Method by Comparing
 Pattern Dependent Pulse Peak Values

Yuji HAYAMI^{†a)}, Student Member,
 Yuta TOYAMA^{††}, Nonmember,
 and Katsushi IWASHITA^{†b)}, Member

[†] 高知工科大学, 香美市
 Kochi University of Technology, 185 Miyanokuchi,
 Tosayamada-cho, Kami-shi, 782-8502 Japan

^{††} (株) きんてん, 大阪市
 KINDEN Corporation, 2-3-41 Honjo-Higashi, Kita-ku,
 Osaka-shi, 531-8550 Japan

a) E-mail: 115075h@gs.kochi-tech.ac.jp
 b) E-mail: iwashita.katsushi@kochi-tech.ac.jp

あらまし 40 Gbit/s を超える超高速光ファイバ伝送システムでは, 時間的に変動する波長分散を補償する必要がある. 本論文では, 波長分散を補償するため, 自己位相変調発生時, 符号パターンに依存して変化するパルスピーク値に注目し, 零分散波長からのずれをモニタする手法を提案し, シミュレーションと実験により提案手法の有効性を明らかにする.

キーワード 波長分散補償, SPM, 超高速光ファイバ伝送

1. まえがき

近年, インターネットの急速な普及により, 基幹ネットワークのトラフィックが増大している. それに伴い, 基幹ネットワークの大容量化が求められている. 基幹ネットワークにおいては, 波長分散が信号劣化の主要因となる. 波長分散は分散補償ファイバや光部品を用いて補償できる. しかし, 波長分散は伝送速度の2乗に比例して信号に影響を与えるため, 特に40 Gbit/s を超える超高速伝送に対しては, 光ファイバの温度変化などによる波長分散の微弱な時間的変化を補償する必要がある. この波長分散を補償する際, 分散値を常に監視し, 可変分散補償器を用いて変化量に応じた補償を行う. 信号伝送時に分散値を監視するため, 受信アイパターンより判定する方法[1], 光フィルタを用いてスペクトルをスライスする方法[2]などが提案されているが, 波長分散を掃引する必要がある, 複雑になるなどの課題があった.

我々は, NRZ (Non-Return to Zero) 符号を用いる IM-DD (Intensity Modulation-Direct Detection) 方式において, 自己位相変調 (SPM: Self Phase Modu-

lation) 発生時, ビットパターンに応じて変化するパルスピーク値に注目し, 零分散波長からのずれをモニタする手法を提案し[3], シミュレーションと実験により実現可能性を明らかにしたので報告する.

2. 波長分散補償原理

提案する波長分散モニタの原理及び波長分散補償の全体構成をそれぞれ図1, 図2に示す. 提案する波長分散補償方法はFBG (Fiber Bragg Grating) などの波長分散補償素子への制御信号をデータから抽出する方法である.

光ファイバに入射する光パワーを増大するとSPMが発生する. 図1に示すとおりSPMが起きた際, 正常分散領域 (normal region) ではパルス広がりが生じ, 異常分散領域 (anomalous region) ではパルス圧縮が生じる. そのため, パルス幅が狭いと, 広い場合に比べ圧縮または広がりの影響を著しく受け, 分散の値によってパルスのピーク値が大きく変動する. そこで, 分散の極性に対してパルスピークの大小関係が異なるNRZ信号において孤立した“1”のあるパターン (narrow pulse) と連続した“1”のあるパターン (wide pulse) のピーク値を監視する. 図2に示すとおり, 0,

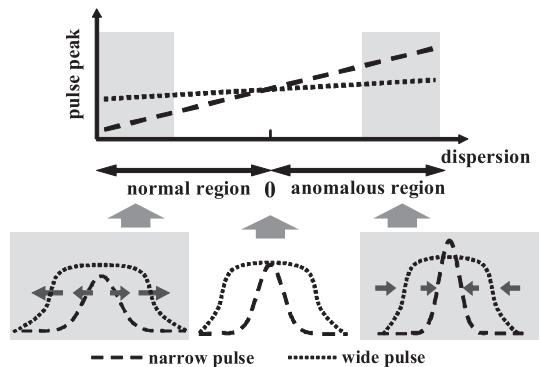


図1 波長分散補償の原理
 Fig. 1 The principle of chromatic dispersion compensation.

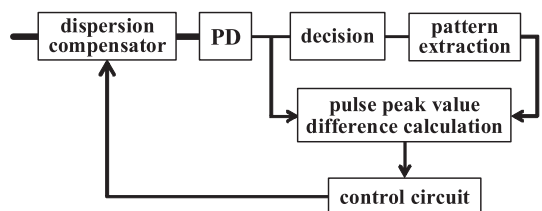


図2 波長分散補償の全体構成
 Fig. 2 The configuration of chromatic dispersion compensation.

1 のビット列より二つのビットパターンを抽出し、パルスピーク値の差を計算する．その計算結果の極性に応じて分散補償器の制御を行う．

3. パルスピーク値の SPM 依存性

スーパーガウス波形を入力し、SPM が発生した際のパルス $U(L, t)$ は

$$U(L, t) = A_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^{2m} + j\phi_{NL}(L, t) \right] \quad (1)$$

で表すことができる [4]．ここで L はファイバの長さ、 A_0 は振幅の最大値、 T_0 はパルス幅、 m (整数) はガウス型波形の次数を示す．SPM 発生時の位相変化 ϕ_{NL} は

$$\phi_{NL}(L, t) = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} \exp \left[-\left(\frac{t}{T_0} \right)^{2m} \right] \quad (2)$$

で表される．ここで L_{NL} は非線形ファイバ長 $L_{NL} = (\gamma P_0)^{-1}$ 、 γ は非線形効果変数、 P_0 はファイバ入射光のピークパワー、 L_{eff} は実効ファイバ長 $L_{eff} = L[1 - \exp(-\alpha L)]/(\alpha L)$ 、 α はファイバの減衰定数を示す．波長分散による伝達関数 $H(L, \omega)$ は

$$H(L, \omega) = \exp \left(j \frac{\beta_2}{2} L \omega^2 \right) \quad (3)$$

で表される．ここで $\beta_2 (= -\lambda^2 D/2\pi c)$ は波長分散パラメータ、 λ は光源の波長、 D は分散値、 c は光速である．以上より、式 (1) と (3) を用いて SPM と波長

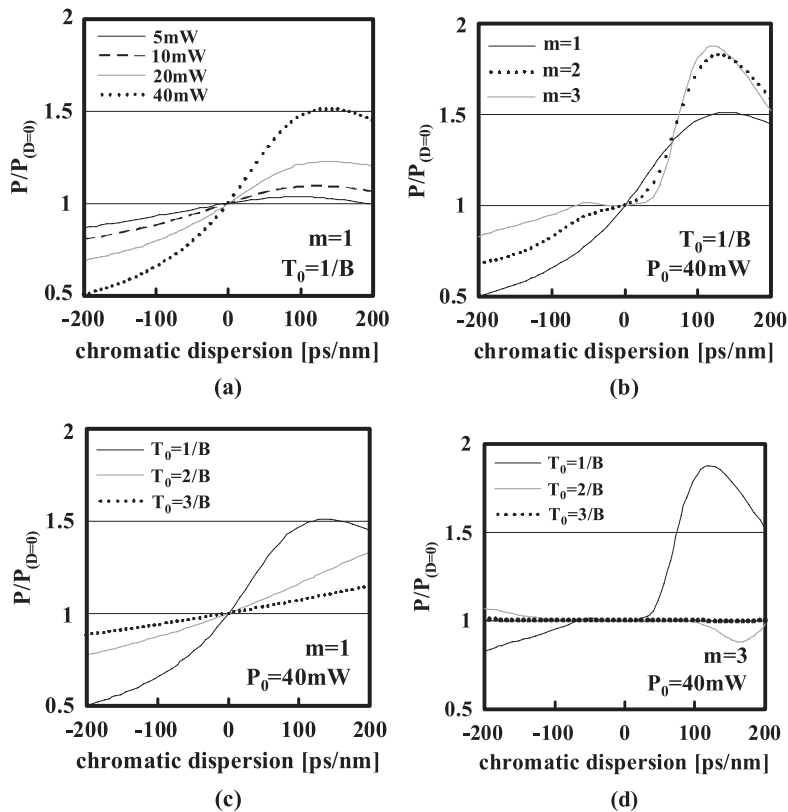


図 3 パルスピーク値の入射光強度 P_0 、パルス幅 T_0 、波形 m 依存性、(a) $m = 1$ 、 $T_0 = 1/B$ における P_0 依存性、(b) $T_0 = 1/B$ 、 $P_0 = 40\text{mW}$ における m 依存性、(c) $m = 1$ 、 $P_0 = 40\text{mW}$ における T_0 依存性、(d) $m = 3$ 、 $P_0 = 40\text{mW}$ における T_0 依存性

Fig. 3 The dependence of the incident optical power P_0 , the pulse width T_0 and waveform m , (a) The dependence of P_0 for $m = 1$ and $T_0 = 1/B$, (b) The dependence of m for $T_0 = 1/B$ and $P_0 = 40\text{mW}$, (c) The dependence of T_0 for $m = 1$ and $P_0 = 40\text{mW}$, (d) The dependence of T_0 for $m = 3$ and $P_0 = 40\text{mW}$.

分散によってファイバ長 L を伝搬したときの波形

$$A(L, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(L, \omega) H(L, \omega) \exp(-j\omega t) d\omega \quad (4)$$

を得る。

式 (4) を用いて, P_0, T_0, m の三つのパラメータを変化させた際, 波長分散の極性に応じて変化するパルスピーク値の検討を行った。ここで, ビットレート $B = 40 \text{ Gbit/s}$, $\gamma = 1.8 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, $L = 80 \text{ km}$, $\alpha = 0.046 \text{ km}^{-1}$ とした。得られた波形は, 帯域 28 GHz ($0.7 \cdot B$) の低域フィルタを用いて高周波成分を除去した。波形から, 各分散値におけるパルスピーク値を P とし, 分散値 0 ps/nm のパルスピーク値 $P_{(D=0)}$ で規格化を行い, $P/P_{(D=0)}$ を計算した。

$T_0 = 1/B$, $m = 1$ として, P_0 を変化させた際の計算結果を図 3 (a) に示す。(a) より P_0 が大きくなるに従い, パルスのピーク値は波長分散の極性に対し, 大きく変化している。また, 150 ps/nm 付近でピーク値が下降している。これは, 波長分散により圧縮されたパルスが更に分散を与えられたことで, 広がり始めたことによるためである。次に $P_0 = 40 \text{ mW}$, $T_0 = 1/B$ として, m を変化させた結果を図 3 (b) に示す。 m を大きくするに従いパルスの形状は方形波に近づく。(b) よりパルスピーク値は $m = 1$ のとき分散の極性に対し顕著な変化を得た。逆に, $m = 3$ のとき $\pm 50 \text{ ps/nm}$ までの範囲では分散の極性に対し変化が小さかったが, $+50 \text{ ps/nm}$ 以上ではピーク値が急激に大きくなった。これは, 圧縮によりパルスのピークをほぼ一定の値に保ちながら, 徐々にパルスの立上り立下り間隔が小さくなり, 更に分散を与えられることにより立上り立下り間隔がより接近し, 急激にパルスピークが大きくなったことに起因する。続いて $P_0 = 40 \text{ mW}$ とし, $m = 1, 3$ において T_0 を変化させた結果をそれぞれ図 3 (c), (d) に示す。(c), (d) より T_0 を大きくするに従ってパルスピーク値の変化は小さくなる傾向にある。 $m = 1$, $T_0 = 1/B$ のとき分散の極性に対して最も変化が大きく, 逆に $m = 3$, $T_0 = 3/B$ のとき最も変化が小さかった。したがって, P_0 を大きくし, $m = 1$, $T_0 = 1/B$ のパルスと $m = 3$, $T_0 = 3/B$ のパルスのピーク値より差を求め, 比較することで分散の極性が得られると予想される。この結果を踏まえ, シミュレーターを用いてのシミュレーション及び実験を行う。

4. シミュレーション

提案補償法を光ファイバ伝送系に適用することを目的に検討を行った。前章の検討よりパルス幅の狭い場合は, 広い場合に対してパルスピーク値の変動が著しく, 提案手法が使えることが明らかになった。そこで, NRZ 符号を用いる光伝送系では, そのパルス幅がビットパターンにより異なることを利用し, 提案手法の実現可能性を検討した。

シミュレーションは, 変調信号を 40 Gbit/s の NRZ (PRBS: $2^{11} - 1$) とし, チャープのないプッシュプル変調を行った。ファイバに入力する光信号のパワーは, 自己位相変調を起こすため平均 13 dBm とした。ファイバ長は 80 km とし, 波長分散は一律に与えた。PRBS より 5 ビットのビットパターンを抽出し, その中心ビットのパルスピーク値の変化を検出した。

シミュレーション結果を図 4 に示す。分散の極性に対してパルスピーク値の変化が顕著な二つのビットパターン $[0, 1, 1, 1, 0]$, $[1, 0, 1, 0, 1]$ を PRBS より抽出し, それぞれすべての値を平均化した。図 4 は, その平均化したパルスピーク値 P を分散値 0 ps/nm における NRZ 信号の “1” の平均値 $P_{\text{average}(D=0)}$ で規格化し, $P/P_{\text{average}(D=0)}$ を結果とした。また, 波長分散 -48 ps/nm , $+48 \text{ ps/nm}$ におけるアイパターンを図 5 に示す。

図 4 から分散の正負において, ピーク値の大小関係が大きく変化していることが分かる。また, 波長分散 $+48 \text{ ps/nm}$ において, ビットパターン $[1, 0, 1, 0, 1]$ のピーク値が最も大きくなり, 更に分散を与えるとピー

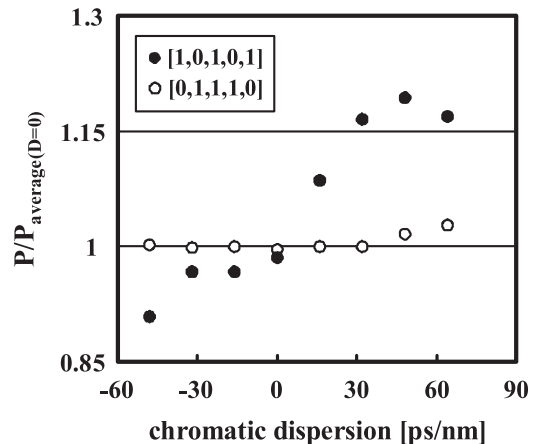


図 4 シミュレーション結果

Fig. 4 Simulation results.

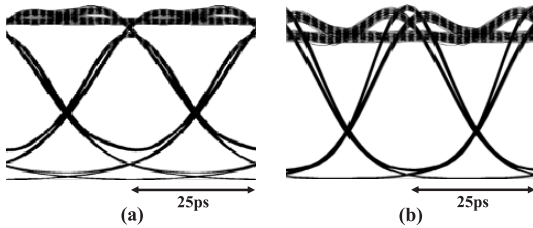


図 5 図 4 の波長分散値におけるアイパターン, (a) -48 ps/nm , (b) $+48 \text{ ps/nm}$

Fig. 5 Eye diagrams at each chromatic dispersion value of Fig. 4, (a) -48 ps/nm , (b) $+48 \text{ ps/nm}$.

ク値は減少した。これは、SPM の影響と分散値の増加により、一度圧縮された光パルスが更に分散を与えられたことで、広がったためである。

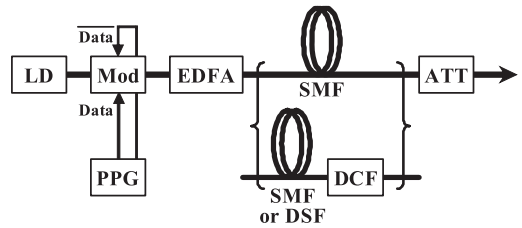
5. 実験的検討

5.1 実験系

実験は模擬的に 10 Gbit/s で行った。測定系を図 6 に示す。変調信号は 10 Gbit/s の NRZ (PRBS: $2^{11} - 1$) とし、シミュレーション同様プッシュプル変調を行った。SPM を起こすため光アンプ (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) を用い、ファイバに入力する光信号のパワーを 12.5 dBm とした。伝送用ファイバは、正の波長分散領域として、光源の波長 $1.55 \mu\text{m}$ において $1.3 \mu\text{m}$ 零分散のシングルモードファイバ (SMF: Single Mode Fiber) を用いた。 $1.55 \mu\text{m}$ における SMF の波長分散は $+17 \text{ ps/km/nm}$ である。また、伝送距離を 25 km, 50 km, 75 km と変化させ、分散値ごとのパルスピーク値を測定した。負の大きな波長分散を得ることが困難であったため、入射側に SMF を挿入して SPM を発生させ、その後段に分散補償ファイバ (DCF: Dispersion Compensating Fiber) を接続することで全分散量を調節した。 $1.55 \mu\text{m}$ における DCF の波長分散は -1007 ps/nm である。更に分散値の大きい領域については、SMF に変えて波長 $1.55 \mu\text{m}$ において零分散である分散シフトファイバ (DSF: Dispersion Shifted Fiber) 25 km を接続した。DSF は SPM を生じさせるために用いた。ビットパターンは、シミュレーションの際、分散の極性に対して最も顕著な結果が得られた二つのパターンを符号系列より抽出して測定した。

5.2 実験結果

波長分散は、伝送速度の 2 乗に比例して信号劣化に影響するため、実験時の分散値 ($\text{dispersion}_{10\text{G}}$) 及び実験時の分散値を 40 Gbit/s に対する影響



LD: Laser Diode PPG: Pulse Pattern Generator
Mod: LiNbO₃ Modulator ATT: Optical attenuator

図 6 測定系の構成
Fig. 6 Experimental setup.

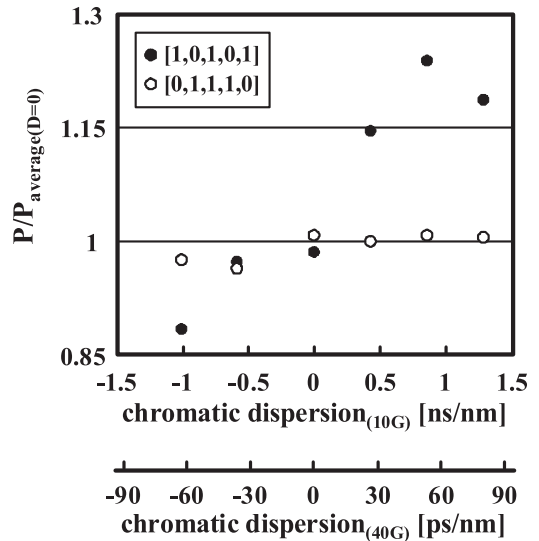


図 7 測定結果
Fig. 7 Experimental results.

になるよう等価変換した結果 ($\text{dispersion}_{40\text{G}} : \text{dispersion}_{10\text{G}} * (10\text{G}/40\text{G})^2$) を図 7 に示す。図 7 は、シミュレーションで検出した 2 パターンのパルスピーク値 P を PRBS より抽出し、図 4 同様に分散値 0 ps/nm における NRZ 信号の “1” の平均値 $P_{\text{average}(D=0)}$ で規格化し、 $P/P_{\text{average}(D=0)}$ を結果とした。40G における波長分散 0 ps/nm, -63 ps/nm , 及び $+80 \text{ ps/nm}$ のアイパターンを図 8 に示す。

図 7 より、正の分散領域及び 40G における分散値 -63 ps/nm では、シミュレーション結果と同じ傾向が得られた。また、40G における分散値 -36 ps/nm に対しては、2 パターンのパルスピーク値の大小関係は、わずかな差で正の分散領域と同じになった。しかし、実験よりこの分散値では、波形劣化はほとんど起きなかったため、実際にこの分散を補償する必要はない。

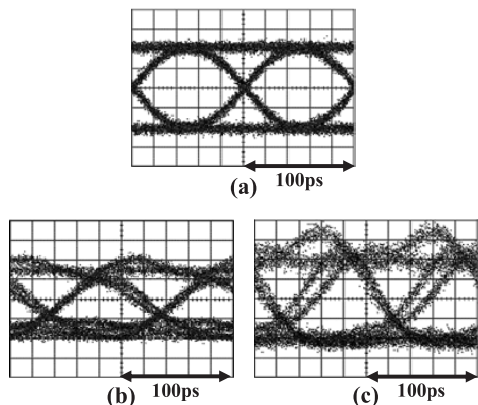


図8 図7の波長分散値(40G)におけるアイパターン,
(a) 0 ps/nm, (b) -63 ps/nm, (c) +80 ps/nm
Fig. 8 Eye diagrams at each dispersion value of for
40G Fig. 8, (a) 0 ps/nm, (b) -63 ps/nm, (c)
+80 ps/nm.

6. むすび

40 Gbit/s を超える超高速光ファイバ伝送システムにおいて、時間的に変動する波長分散をインサースで補償する手法を提案した。その結果シミュレーション及び実験より、SPM 発生時、分散の極性に対してパルスピーク値の変化の著しい2パターンが存在し、この2パターンのパルスピーク値の差をモニターすることにより、時間的に変動する波長分散を補償する可能

性があることを示した。

本方式は SPM のみを用いているため、他の非線形が現れる WDM (Wavelength Division Multiplexing) 伝送へそのまま適用することは難しいが、四光波混合を避けるため、ノンゼロ分散シフトファイバを用いた場合は相互位相変調もランダム化されるため、パルスピーク値を平均化することにより本提案と同様の結果が得られることが期待できる。

文 献

- [1] H. Takeshita and K. Fukuchi, "A novel optical signal performance monitoring method using eye pattern image analysis," ECOC2003, Tu4.2.2, Rimini, Italy, Sept. 2003.
- [2] Q. Yu, Z. Pan, L.-S. Yan, and A.E. Willner, "Chromatic dispersion monitoring technique using sideband optical filtering and clock phase-shift detection," J. Lightwave Technol., vol.20, no.12, pp.2267-2271, 2002.
- [3] Y. Hayami and K. Iwashita, "Chromatic dispersion compensation by monitoring bit-pattern-dependent intersymbol interference in NRZ format," OECC/IOOC2007, 13P-11, pp.724-725, Yokohama, July 2007.
- [4] G.P. Agrawal, Lightwave Technology Telecommunication Systems, Wiley-Interscience, Rochester, NY, 2005.

(平成 21 年 1 月 21 日受付, 3 月 18 日再受付)