電力会社の通信網を考慮した波長多重伝送の検討

(非会員) 金岡 泰弘 (関西電力株式会社)
 (正 員) 山下 育男 (関西電力株式会社)
 (正 員) 下浦 一宏 (関西電力株式会社)
 (正 員) 青海 恵之 (関西電力株式会社)
 (非会員) 猪口 勝司 (株式会社関西テック)

Studies of WDM transmission suitable for the optical network of electric power companies

Yasuhiro Kanaoka, non-Member (The Kansai Electric Power Co. Inc.)
 Ikuo Yamashita, Member (The Kansai Electric Power Co. Inc.)
 Kazuhiro Shimoura, Member (The Kansai Electric Power Co. Inc.)
 Shigeyuki Seikai, Member (The Kansai Electric Power Co. Inc.)
 Masaji Inoguchi, non-Member (Kansai Tech. Corporation)

WDM transmission suitable for the optical network of electric power companies is discussed considering its characteristics such as medium transmission length under 300km and relatively long span length over 100km. The channel spacing in optical wavelength and the input power to fibers are evaluated by bit error rate mainly for 10Gbit/s $\times$ 8-channel WDM transmission where typical erbium doped fiber amplifiers are used.

In the study on the transmission using dispersion shifted fibers, 100GHz spacing is too small and unequal spacing is effective. This is confirmed by a field experiment carried out using an optical ground wire which includes dispersion shifted fibers with a total length of 588km consisting of 6 spans. WDM on single mode fibers is discussed from the viewpoint of dispersion compensation. The channel spacing of 100GHz is found to be enough to transmit 20 channels through the 360-km line consisting of 3 spans if the dispersion compensation is made together at the receiver end.

キーワード：光通信、波長多重伝送、OPGW、波長間隔、分散補償

1. はじめに

電力会社の通信網は、本・支店、発電所、変電所等が通信拠点になるため、拠点数が少なく、かつ、比較的距離をおいて存在しているという特徴がある。また、保有している光ファイバの大半が、1.3 μ m 用の単一モード光ファイバ (SMF : Single Mode Fiber) であり、1.5 μ m 帯における光損が必ずしも小さいとは限らないことが特徴として挙げられる。このような電力会社の光通信網においても、今後伝送容量が増大することが考えられ、その際には 1.5 μ m 帯における波長多重伝送を用いることは必須であると考えられる。

光波長多重伝送は、マルチメディア等の発展による飛躍的な増大が予想される伝送容量に対応できる現実的な方法として、内外で大規模な研究が進められている。すでに、トータルの伝送速度でテラビット (Tbit/s) 以上⁽¹⁾、波長数で 50 波長以上⁽²⁾、伝送距離で 1 万 km 以上⁽³⁾のものも多く発表されている。

しかし、前述の電力会社の光通信網の特徴を十分考慮した検討は少なく⁽⁴⁾⁽⁵⁾、特に中継距離あるいは中継区間の光損が大きい場合の波長多重伝送については、波長配置や分散補償についての検討が十分ではない。

本論文では、中継距離が 100km 以上 (区間の光損で 27dB 以上)、伝送距離で 300km 以上、波長数で 8 以上の伝送を主たる検討対象として、比較的一般的な光増幅器を用いた場合の波長配置や送信光強度を実験的に調べる。1 波長当たりの伝送速度は 10Gbit/s として、それらを符号誤り率 (BER : Bit Error Rate) で評価する。光ファイバとしては、分散シフト光ファイバ (DSF : Dispersion-Shifted Fiber) と SMF の両方を考慮し、後者では分散補償方法も検討する。

論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、検討する伝送路のモデルと用いる光増幅器について簡単に述べる。第 3 章では、DSF の伝送路について、波長配置と送信光強度を BER で評価した後、光ファイバ複合架空地線

(OPGW : Optical Ground Wire)を用いたフィールドでのテスト結果を述べる。第4章では伝送路をSMFとし、波長間隔とBERの関係を検討し、次に、波長数を20とした場合について、分散補償量とBERの関係を詳細に検討する。

2. 伝送路モデルと実験構成

〈2・1〉伝送路モデル 電力会社の通信網の特徴をもとにして、波長多重伝送を検討するモデルを以下のように考える。伝送距離は電力会社の管内の伝送距離が大部分含まれる360kmとする。中継数については少ない方が好ましいが、360kmを無中継、あるいは1中継で伝送させるのは現実的ではない。従って中継数は実用的でかつ最少数の構成と考えられる、2中継とする。図1は以上のモデルを図示したものである。また、この伝送路モデルのレベルダイアグラムを、次節の光増幅器を用いて8波長多重を行う場合について併せて示している。

図1 伝送路モデルとレベルダイアグラム
Fig 1. Model of transmission line and level diagram.

〈2・2〉波長多重用伝送用光増幅器 実験には低雑音で高出力を得やすい2段構成(前段980nm励起、後段1480nm励起)のEDFAを用いた。また前段と後段の間には、1530nm帯のASE除去用ファイバグレーティング、利得調整用光減衰器を挿入できる構造としており、8波長多重時に波長1546nm～1558nmで使用する場合の波長間の利得偏差は1dB以内となっている⁽⁶⁾。

図1の伝送モデルにおいて、許容されるスパン毎の光損を調べるために、中継器を上述のEDFAとし、光ファイバを光減衰器で置き換えてBERを測定した。その結果、増幅器の出力(15dBm)をそのまま光減衰器に入力した場合、8波長多重伝送では許容されるスパン毎の光損は31.5dBであった。

3. 伝送路をDSFとする伝送実験による検討

〈3・1〉実験構成 伝送路をDSFとする場合の、図1に基づく実験構成を図2を示す。

信号光の送信側での合波、および受信側での分波にはアレイ導波路回折格子(AWG: Arrayed-Waveguide-Grating)を用いた。使用したAWGはITUグリッド50GHz(約0.4nm)間隔40chタイプのものである。

図2 実験構成
Fig 2. Experimental setup.

変調はLN変調器により一括して行い、15段のPN系列のNRZ信号を得た。伝送用DSFの直前のSMFは波長間のビットパターンをずらすためのものである⁽⁷⁾。受信側では前述の増幅器をプリアンプとして用いた後、AWGで波長分離を行い、各波長の誤り率特性などを測定した。

伝送路としてのDSFは、平均ゼロ分散波長が1547nm、光損が0.21dB/km、ピース長20kmである。

伝送波長は、ITUグリッドで定められた波長から、実験構成に応じて適宜選択した。

〈3・2〉波長間隔と入力光強度 伝送ファイバをDSFとして波長多重伝送を行う場合、これを制限する要因として、四光波混合(FWM: Four Wave Mixing)が挙げられる。この影響を少なくする方法として、波長間隔を大きくする、波長間隔を不等間隔とする等の手法があるが、ここでは等間隔8波長多重伝送について波長間隔とファイバ入力光強度の検討を行った。

はじめに、波長間隔をITUグリッドの100GHz間隔として8波長多重伝送を行ったところ、FWMのため、ファイバ入力に制限され、今回検討したモデルで許容される光損を満たすことができず、伝送が行えなかった。

次に、本増幅器の帯域の中で、ITUグリッドでは一番間隔が大きくとれる、200GHz(約1.6nm)間隔(8波長で1546.1nm～1557.4nm)で伝送実験を行った。

図3に、ファイバ全入力(トータルパワー)を6dBmから13.5dBmへ変化させた場合の誤り率の最良値を、伝送特性が最悪であった波長1552.5nmについて示す。この図にはファイバの代わりに光減衰器を用いた場合の誤り率の最良値も併せて示している。ファイバ全入力に6dBm、9dBmと小さい場合には、DSFと減衰器いずれの場合も、誤り率特性がフロア傾向となった。これは、今回のモデルで許容される光損を満たすことができないレベルまでファイバ入力を小さくしたため、中継、及び受信側で用いる光増幅器への入力強度が弱くなり、光増幅器の発生するASE雑音によりSN比が劣化したことによる。次に

ファイバ全入力を 10.5dBm、12dBm とした場合は、両者ともフロア傾向のない誤り率特性となったが、ファイバ全

図3 8波長多重伝送時の誤り率特性
Fig. 3. BER performance of the 8-WDM transmission.

入力を増やして 13.5dBm とした場合、D S F 伝送では誤り率にフロア傾向がでた。この傾向は減衰器を用いた場合には発生していないので、F W M の影響と考えられる。この場合の 360km 伝送後の光のスペクトルを図 4 に示す。伝送波長以外にも F W M による新たな波の発生が観測されているので、伝送波長にも、隣接する波長からの F W M 光が重畳していることが考えられる。

図4 8波長伝送時のスペクトル
Fig. 4. Spectrum of the 8-WDM transmission.

以上より、D S F を伝送路とする等間隔波長配置の 8 波長多重伝送では、100GHz 間隔ではファイバへの入力が制限されて伝送ができず、200GHz 間隔では F W M の影響より、ファイバ全入力の上限は 12dBm に制限された。

表 1 不等間隔 10 波長多重伝送での波長
Table 1. Wavelengths for the 10 WDM transmission.

C H	波 長	C H	波 長
1	1546.9nm	6	1552.5nm
2	1547.7	7	1554.1
3	1549.3	8	1554.9
4	1550.1	9	1556.6
5	1551.7	10	1557.4

〈3・3〉 不等間隔配置による高密度化 前節では、波

長間隔を 200GHz 等間隔としたが、増幅器の帯域内で、さらに波長多重数を増加させる場合には、200GHz 以下の波長間隔にする必要がある。波長間隔を狭くすると F W M の影響が大きくなるので、ここでは、波長間隔が交互に 100GHz と 200GHz である不等間隔とした場合の、10 波長多重伝送について検討を行った。用いた波長を表 1 に示す。

図5 10波長多重伝送時の誤り率特性
Fig. 5. BER performance of the 10-WDM transmission.

図 5 は、ファイバ全入力を 9dBm から 12dBm へ変化した場合の誤り率の最良値を、伝送特性が最悪であった波長 1554.1nm について示している。ファイバ全入力が 9dBm のときは、ファイバ伝送を行った場合と、減衰器の場合の双方とも、S N 比の劣化のため誤り率特性にフロア傾向が生じた。ファイバ全入力が 10.5dBm の場合は、両者とも誤り率にフロア傾向が生じなかったが、入力を 12dBm とした場合は、ファイバを伝送させた場合についてのみ、誤り率にフロア傾向が現れた。これは <3・2> 節で述べたのと同様、F W M の影響によると考えらる。ファイバ全入力を 10.5dBm と 12dBm とした場合のファイバ伝送後のスペクトルを図 6 に示すが、ファイバ全入力が 12dBm とした場合には、F W M の発生が観測されている。

図6 10波長多重伝送時のスペクトル
Fig. 6. Spectrum of the 10-WDM transmission.

以上より、100GHz、200GHz 間隔を混合させた、不等間隔の 10 波長多重伝送では、200GHz 等間隔 8 波長多重伝送に比べて、伝送可能なファイバ全入力範囲は狭くなったが、ファイバ全入力の上限が 10.5dBm で伝送が可能であった。

〈3・4〉 OPGWによるフィールド伝送実験 不等間隔での波長多重伝送の有効性を確認するために、実際に敷設されている光ケーブルを用いたフィールド伝送実験を行った⁽⁸⁾。

表2 OPGWの諸元
Table 2. Specifications of the OPGW.

・ファイバの種類	DSF
・ファイバ長	98km
・平均光損	25.4dB
・平均ゼロ分散波長	1550.0nm

光ケーブルは、関西電力城端開閉所（富山県）から市荒川発電所（福井県）の大黒部幹線（275kV）に敷設されているOPGWで、表2の諸特性を持っている。

図7は伝送実験系である。OPGWのスパン長は98kmであるが、中の心線を折り返して用いることにより長距離の伝送実験を行った。ここでは送信側での波長の合波に3dBカプラおよびスターカプラを用い、受信側での波長の分離に波長可変光フィルタを用いた。

図7 フィールド伝送実験の構成
Fig. 7. Experimental setup for the field experiment.

はじめに8波の波長間隔を1548.5nm～1559.0nmの等間隔とし、ファイバ全入力を11dBmとした場合、OPGW 392km伝送では8波長ともフロア傾向のない誤り率特性を

図8 フィールド伝送実験での誤り率特性とスペクトル
Fig. 8. BER Performance and spectrum of the field experiment.

得たが、伝送距離を伸ばし588km伝送を行った場合、波長1548.5nmにおいて、 10^{-9} 以下の誤り率特性を得ることができなかった。そこで波長1548.5nmを1547.5nmに代え、この波長のみを不等間隔とすると、誤り率特性が改善した。この場合の誤り率特性と、スペクトルを図8に示す。波長によりフロア傾向が現れたが、各波共 10^{-9} 以下の誤り率特性を得ることができた。また波長が1550.0nmの特性が一番悪かったのは、ファイバの平均ゼロ分散波長と一致したためと考えられる。また1547.5nmと1550.0nmの波の間に、FWMによると考えられる新たな波の発生が観測されている。

以上より、不等間隔の波長多重伝送（8波長多重、588km伝送）が有効であることが、実際に敷設されているファイバで確認できた。

4. SMFを伝送路とする伝送実験による検討

伝送路をSMFとする場合は、DSFを伝送路とする場合に比べて、ファイバによる非線形効果が少ないため、より高密度な波長多重伝送が行える。ここでは1550nmでの平均分散値が16.0ps/km/nm、平均の光損が0.19dB/kmのSMFを用いた。

〈4・1〉 実験構成 伝送路をSMFとして伝送を行うには、分散補償を行う必要が生じる。ここでは分散補償に市販のDCFを用いた。分散補償を行う位置については、中継スパン毎に分散補償を行うか、送信端または受信端で一括して行うかが考えられる。また本実験のようなファイバ入力では、ほぼ線形な伝送系であると考えられるため、補償位置が伝送波形に影響を及ぼすことはほとんどないと考えられる。しかし今回のモデルでは、中継間隔が120kmと長く、スパン毎にDCFを付加した構成では、各スパンの光損がスパン毎に許容される光損よりも大きくなる。従ってその場合はDCFによる光損を補償する光増幅器が必要となり、光増幅器の必要台数がDSFを伝送路とする場合の2倍となり不経済である。そこで今回は、図2に示す実験構成からSMF 10kmを除き、光ファイバをSMFとし、受信端でまとめて分散補償を行う構成とした。この場合、DCFの光損を補償する光増幅器は2台となる。また、受信端で一括して分散補償を行うことは、システム構築や保守においても利点があると考えられる。

〈4・2〉 波長間隔の検討 伝送路をSMFとして伝送を行う場合には、DSFとする場合に比較して、FWMの影響を受けにくい。このため波長間隔はDSF伝送の場合に比べて狭くすることが期待できる。そこでまず、8波長多重伝送において、波長間隔を50GHzと100GHzにした場合の伝送特性の違いを検討した。

はじめに8波を50GHz間隔の1554.5nmから1557.4nmとした場合の誤り率特性を測定した。この場合、SMF、DCFへの入力パワー、および分散補償量を変化させたが、フロア傾向のない誤り率特性を安定に得ることはできなかった。安定な特性を得るには、DCFを3分割し3台の光

増幅器を用いることが必要であった。2台の場合に十分な特性を得られなかったのは、DCFへの入力パワーを増加させると、ファイバの非線形効果によると考えられる誤り率特性の劣化が起こり、逆にパワーを小さくすると、十分なSN比を得ることができなかったためである。

次に8波を100GHz間隔の1552.5nmから1558.2nmとした場合の誤り率特性を測定した。この場合には、DCFを2分割してそれぞれに光増幅器を用いる方法でフロア傾向のない誤り率特性を得ることができた。

以上より、100GHz間隔は50GHz間隔に比べて、より経済的で安定な伝送が可能であることがわかった。

図9 120km × 3スパン伝送時の誤り率特性

Fig 9. BER performance of the 120km × 3spans transmission.

〈4・3〉 20波長多重伝送実験 前節の検討より、波長間隔を100GHzとした波長多重伝送で、光増幅器の帯域(13nm)を考慮すると、可能な多重数は16である。しかし、増幅器帯域外の増幅特性の劣化は比較的緩やかであるため、帯域外の波長を用いても波長間の利得偏差が問題にならない条件内では、伝送が可能である。ここでは多重数を20とし、波長を100GHz間隔で1546.1nm(CH1)から1561.4nm(CH20)として伝送実験を行った。

る15dBm、分散補償率(=DCFによる補償分散量/SMFによる累積分散量)を86%として、DCFへの入力を変化させた。その結果DCFへの全入力パワーが10dBmを越えたと誤り率にフロア傾向が現れた。これはDCFのモードフィールド径がSMFに比べて小さく、SMFでは問題とならないパワーで非線形効果が生じたためと考えられる。

次に、分散補償ファイバへの全入力10dBmとして分散補償率を変化させた。図9に分散補償率を変化させた場合の誤り率の最良値をCH1およびCH20について示す。各波長がフロア傾向のない誤り率特性を得ることができたのは分散補償率が83%から91%の範囲であった。

図10 80km × 5スパン伝送時の誤り率特性

Fig 10. BER performance of the 80km × 5spans transmission.

比較のために、80km × 5スパン(400km)伝送で、各スパンで分散補償を行った場合の、分散補償率に対するCH1およびCH20の誤り率の最良値を図10に示す。この場合、各波長でフロア傾向のない誤り率特性を得られたのは、分散補償率が85%から93%の範囲であった。

図9および図10の結果は、400km程度の伝送においては、分散補償を受信端で一括して行っても、各スパンで

図11 120km × 3スパンと80km × 5スパン伝送時のアイパターン

Fig 11. Eye patterns of the 120km × 3spans transmission and the 80km × 5spans transmission.

はじめにSMFへの入力パワーを増幅器の最大出力であ

分散補償を行うことと同様の効果があることを示している。

図11の上段は120km×3スパン(360km)伝送後、(分散補償率86%)のアイパターンであり、下段は80km×5スパン(400km)伝送後(分散補償率88%)のアイパターンである。アイパターンにおいても同等の特性が得られていることがわかる。

5. まとめ

電力会社の通信網を考慮し、8波長多重120km中継(各スパンの許容光損31.5dB)、3スパン伝送を中心に、波長間隔や光ファイバ入力を検討した。

はじめに伝送路をDSFとした伝送実験において、波長間隔が等間隔配置の8波長多重伝送では、100GHz間隔ではファイバの非線形効果のためにファイバへの入力十分とれず、伝送ができなかった。200GHz間隔ではファイバによる四光波混合などの非線形効果の影響を避ける必要から、ファイバ全入力12dBm以下で伝送が可能であった。次に不等間隔配置による波長数の高密度化を検討した。10波長多重伝送では、波長間隔を交互に100GHz、200GHzとする不等間隔とすることにより、ファイバへの全入力が10.5dBmで無エラー伝送が可能であった。また、不等間隔での波長配置の有効性を確認するために、実際に敷設されているOPGWを用い、8波長多重、中継間隔98kmで伝送実験を行った。その結果、波長間隔を不等間隔とすることにより、伝送距離588kmでBERが 10^{-9} 以下の伝送が可能であった。

次にSMFを用いた伝送では、分散補償に着目した伝送実験を行った。まず波長間隔50GHzの可能性について調べたが、120km、3スパン伝送のBER特性に若干のフロアが現れた。100GHz間隔では無エラー伝送が可能であった。100GHz間隔では20波長多重伝送についても検討したが、120km、3スパン伝送で分散補償率の余裕は8%であった。さらに分散補償位置について検討した。すなわち各スパン毎の補償を行う場合の例として、中継間隔80km、5スパンの伝送を用いた。この場合、分散補償余裕は、先の受信端での一括補償とほぼ同じであり、分散補償の位置に対する制約は緩やかなものであることがわかった。

(平成11年7月26日受付、同11年11月15日再受付)

文 献

- (1) K. Uchiyama, et al, "3Tbit/s (160Gbit/s, 19ch) OTDM-WDM Transmission Experiment," OFC'99, PD-1, San Diego, USA, (1999).
- (2) S. B. Aleston, et al, "Narrow Band 1.02Tbit/s (51x20Gbit/s) Soliton DWDM Transmission Over 1000km of Standard Fiber with 100km Amplifier Spans," OFC'99, PD-4, San Diego, USA, (1999).
- (3) M. Suzuki et al, "170Gb/s Transmission Over 10,850km using Large Core Transmission Fiber," OFC'98, PD-17, San Jose, USA, (1998).
- (4) 山下他, "OPGWを用いた波長多重伝送実験", Trans. IEE of Japan, Vol117-C, No5, May, 1997.
- (5) 山下他, "増設を考慮した10Gbit/s×12波長無中継伝送の検討", Trans. IEE of Japan, Vol118-C, No3, March, 1998.
- (6) 中里他, "ハイブリッドEDFAを用いた長スパン波長多重多段光増幅中継システムの検討", 1996年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1116, 1996年9月
- (7) S. Aisawa et al, "Ultra-Wide Band, Long Distance WDM Transmission Demonstration: 1Tbit/s (50 x 20Gb/s), 600km Transmission Using 1550 and 1580nm Wavelength Bands," OFC'98, PD-11, San Jose, USA, (1998).
- (8) 金岡他, "大黒部幹線OPGWにおける60Gbit/s (10Gbit/s, 6ch) 588km波長多重伝送実験", 電気学会通信研究会, CMN-98-35, 1998年6月

金岡 泰弘

(非会員) 1964年5月20日生。87年3月京都大学工学部電気工学科卒業。89年3月同大学電子工学科修士課程修了。同年関西電力株式会社入社、現在に至る。光通信の研究に従事。99年電気学会より電気学術振興賞、進歩賞受賞。現在、同社総合技術研究所研究員。電子情報通信学会会員。

山下 育男

(正員) 1965年10月27日生。88年3月大阪大学工学部通信工学科卒業。90年同大学修士課程修了。同年関西電力株式会社入社、現在に至る。光通信、光増幅の研究に従事。現在、同社総合技術研究所副主任研究員。電子情報通信学会会員。

下浦 一宏

(正員) 1962年10月14日生。86年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。88年同大学修士課程修了。同年関西電力株式会社入社、現在に至る。光通信、光増幅の研究に従事。99年電気学会より電気学術振興賞、進歩賞受賞。現在、同社総合技術研究所シニアリサーチャー。電子情報通信学会会員。

青海 恵之

(正員) 1945年9月19日生。69年大阪大学工学部通信工学科卒業。74年同大学博士課程修了。同年日本電信電話公社茨城通信研究所入所。以来、ミリ波線路、光線路の研究に従事。87年立命館大学理工学部電気工学科教授。91年関西電力株式会社入社。電子情報通信学会より82年論文賞、85年業績賞を受賞。現在、同社総合技術研究所チーフリサーチャー。工博。OSA、電子情報通信学会、応用物理学会、各会員。

猪口 勝司

(非会員) 1957年11月24日生。81年大阪工業大学工学部電気工学科卒業。92年株式会社関西テック入社、現在、同社研究開発グループ員。関西電力総合技術研究所駐在にて光通信、光増幅等の研究に従事。