

波長伝達マトリクス法を用いた WDM ネットワークにおける 波長ルーティング機能の確認

岡田 耕平^{*1}, 小口 喜美夫^{*2}

Verification of wavelength routing function by Wavelength Transfer Matrix for WDM networks

Kohei OKADA^{*1} and Kimio OGUCHI^{*2}

ABSTRACT: The wavelength transfer matrix is a powerful approach to designing and verifying the wavelength routing needed for complicated WDM networks. This paper first describes the wavelength transfer matrix, its basic form and some extensions. A full-mesh WDM PON system that can directly connect ONUs and an OLT is proposed and analyzed in terms of wavelength by using the wavelength transfer matrix method.

Keywords: AWG, WDM network, Wavelength routing, Wavelength Transfer Matrix

(Received October 6, 2006)

1. 序 論

近年、ブロードバンドアクセスネットワークは IT (Information Technology: 情報技術) を利用する人々に新しいライフスタイルを提供してきている。通信ネットワーク上を行き交うコンテンツは、テキストからイメージ等へと大容量化してきており、さらに、家庭内のセキュリティの向上や遠隔医療サービスなどの実現のために、家庭向けの通信端末や白物家電がネットワークに接続される傾向にある。そのためアクセスネットワークでは、大容量なデータ伝送を可能とする光通信技術がより需要を増すと考えられる。一本の光ファイバ内に波長の異なる複数の光信号を通して信号多重する WDM (Wavelength Division Multiplexing: 波長分割多重) 技術は、従来広域光ネットワークで長距離伝送に主に利用されていたが、近年では、各波長に宛先を割り当てて通信する超高速な波長ルーティングネットワークとしての研究が盛んに行われている[1]。

波長ルーティングネットワークで使用される波長数の増加や、ネットワーク構成の複雑化が進むと、波長ごとの固有の行き先を割り当てる波長設計や、波長の入出力の特性の確認が非常に困難となる。その問題点を解決す

るために、波長ルーティングネットワークにおける波長設計や、光サブシステムにおける波長の入出力の特性を数式演算により簡易に把握するための手法である波長伝達マトリクス法が提案されている[2]。しかしながら、波長ルーティングネットワークにおいて波長ルータとしての役割を担う AWG (Arrayed Waveguide Grating: アレイ導波路回折格子) に関する数式は基本形のみが検討されていた。

一方、波長ルーティング技術をアクセスネットワークに利用した、WDM-PON (Passive Optical Network: 受動光ネットワーク) は将来のアクセスネットワークとして期待されており、とくにアジアを中心に積極的に実用化への検討が行われている[3, 4]。WDM-PON では、局側に設置される OLT (Optical Line Terminal: 局側終端装置) とネットワークに接続するユーザ宅に設置される ONU (Optical Network Unit: 光加入者端末) との間で固有の波長が割り当てられているため、OLT-ONU 間ではピアツーピアの通信が可能である。WDM-PON の新たな機能として、ONU 間の VPN (Virtual Private Network) を提供する構成が提案されている[5]。この構成は OLT と ONU の間に配備された波長ルータ (AWG) のポート間を光ファイバでループバック接続する構成により実現された。しかしながら、同一の VPN にある ONU 間で OLT-ONU 間と同様なピアツーピア通信がすべての ONU 間で可能であ

^{*1}: 工学研究科電気電子工学専攻修士学生

^{*2}: 電気電子工学専攻教授 (oguchi@st.seikei.ac.jp)

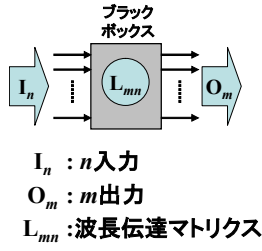


図1 波長回路の基本構造

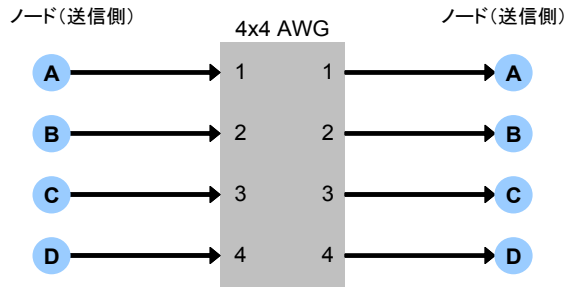


図2 4 × 4 AWG のスター型配線

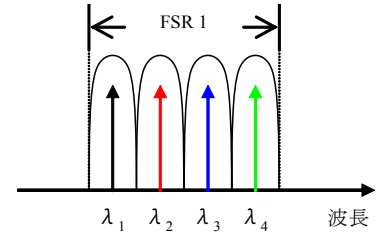


図3 4 × 4 AWG の波長通過帯域

るループバック接続法，すなわちフルメッシュ型の WDM-PON 構成を実現するループバック接続法は検討されていなかった。

本論文では，2 章で波長伝達マトリクス法について，波長回路の基本構成と AWG を例にあげて解説する。3 章では，AWG の波長伝達マトリクスに関する数式を拡張する。4 章では，WDM-PON の波長ルータにおけるループバック接続法の規則性について検討する。5 章では，4 章の検討結果を基に，すべての ONU と OLT 間をフルメッシュ型に接続するループバック接続法を提案し，それにより構成される WDM-PON 構成を波長伝達マトリクス法により記述する。

2. 波長伝達マトリクス法について

波長回路の基本構造を図1に示す[2]。図の I_n 側から複数の波長（以後，波長群）が入力するとき，図のブラックボックスで何らかの処理がされ，波長群は O_m 側から出力される。ただし，入力波長群と出力波長群は一般的に異なる。この図に示される構造の波長伝達マトリクスは二次元行列となる。これらの行列は以下の式で定義される。

$$O_m = L_{mn} \cdot I_n \quad (1)$$

このとき， O_m は m 行 1 列の出力行列であり， L_{mn} はこの波長回路の m 行 n 列の波長伝達マトリクスであり， I_n は n 行 1 列の入力行列である。

ここで，具体例を用いて説明する。図2に4つのノ

ード A, B, C, D へ接続された 4 × 4 周回性 AWG のスター型配線図を示す。使用されている周回性 AWG の波長通過帯域とルーティングテーブルをそれぞれ図3，図4に示す。各ノードは4つの波長 λ_1 - λ_4 を使用して他の3つのノードと通信する。接続されているノード A-D の論理的なネットワークポロジを図5に示す。図6に実際の光回路を用いた場合の 4 × 4 AWG の波長の入出力の関係を示す。ここで，図の X_k はノード X (X: A, B, C, D) から入力される波長 λ_k を意味する。このとき，各ノードから入力される波長群を表す入力行列 I_4 は以下の式で示される。

$$I_4 = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \\ B_1 + B_2 + B_3 + B_4 \\ C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ D_1 + D_2 + D_3 + D_4 \end{pmatrix} \quad (2)$$

(2)式において，入力行列 I_4 の1列目はノード A から，2列目はノード B から，3列目はノード C から，4列目はノード D からの入力波長をそれぞれ意味する。 $m=n=4$ すなわち 4 入力 4 出力の周回性 AWG の波長伝達マトリクスは以下の(3)式ようになる。

$$L_{4 \times 4} = \begin{pmatrix} \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 \\ \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_1 \\ \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_1 & \Lambda_2 \\ \Lambda_4 & \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

波長伝達マトリクスと入力波長の要素の演算は $\Lambda_k \cdot \lambda_k = \lambda_k$ ， $\Lambda_k \cdot \lambda_l = 0$ ($k \neq l$) と定義される。従って，4 入力 4 出力の AWG の出力特性を表す出力行列 O_4 は(1)式を用いて以下のように計算される。

	1	2	3	4
1	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
2	λ_2	λ_3	λ_4	λ_1
3	λ_3	λ_4	λ_1	λ_2
4	λ_4	λ_1	λ_2	λ_3

図4 4 × 4 AWG のルーティングテーブル

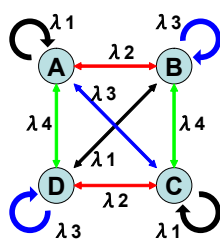


図5 ノード間の論理的トポロジ

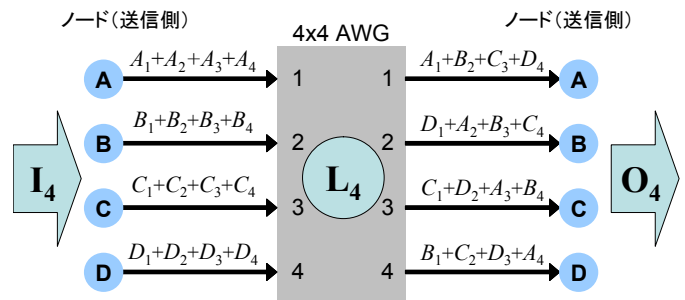


図6 4 × 4 AWG ノード間の論理的トポロジ

$$\mathbf{O}_4 = \begin{pmatrix} O_1 \\ O_2 \\ O_3 \\ O_4 \end{pmatrix} = \mathbf{L}_{4 \times 4} \cdot \mathbf{I}_4 = \begin{pmatrix} A_1 + B_2 + C_3 + D_4 \\ D_1 + A_2 + B_3 + C_4 \\ C_1 + D_2 + A_3 + B_4 \\ B_1 + C_2 + D_3 + A_4 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(4)式の例では、出力行列の1列目である O_1 (A_1, B_2, C_3, D_4)はノード A への出力波長, 2列目の O_2 はノード B への出力波長, 3列目の O_3 はノード C への出力波長, 4列目の O_4 はノード D への出力波長である。(4)式の出力結果と図6を比較すると、波長伝達マトリクス法が正しく動作していることがわかる。

3. 波長ルーティング機能の拡張化[6][7]

3.1 AWGの波長伝達マトリクスの一般化

将来の WDM-PON において CWDM (Coarse WDM)と DWDM (Dense WDM)を複合する技術は効果的な実装法のひとつである。このような技術を利用した WDM-PON では波長配置が従来検討されてきている WDM-PON より複雑化する。波長伝達マトリクス法を、パラメータを用いて一般化することにより、複雑化した WDM-PON の波長配置の確認や波長設計を容易に解決ことが可能である。本章では、CWDM/DWDM AWG への波長の入出力を一般化するために、AWG へ入力する波長群と AWG のポート数とコースネスと FSR(Free Spectral Range: フリースペクトラルレンジ)の数をパラメータとし一般式の作成を行う。コースネスとはある AWG のひとつの通過

波長帯域を通る入力波長数を意味する。したがって、DWDM ではコースネスは CWDM のそれよりも多くなる。図7に一般的な周回性 AWG の波長通過特性と入力する波長位置のモデルを示す。図において、AWG のポート数を n 、コースネスを c 、FSR の数を f とする。例えば、波長 $\lambda_1 - \lambda_{ncf}$ がある入力ポートから $n \times n$ 周回性 AWG を通過するとき、図8に示されるように波長群はルーティングされる。

すべての周回性 AWG の入力ポートから波長群が入力するとき、入力行列は以下の(5)式で表される。

$$\mathbf{I}_{(n,c,f)} = \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{ncf} \\ \vdots \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{ncf} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^{ncf} \begin{pmatrix} \lambda_i \\ \vdots \\ \lambda_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

このとき行列の列数は n である。図7で示される AWG の波長伝達マトリクスは以下の(6)式で表される。

$$\mathbf{L}_{(n,c,f)} = \sum_{i=1}^c \sum_{j=0}^{f-1} \begin{pmatrix} \Lambda_{ncj+i} & \Lambda_{ncj+1c+i} & \Lambda_{ncj+2c+i} & \dots & \Lambda_{ncj+(n-1)c+i} \\ \Lambda_{ncj+1c+i} & \Lambda_{ncj+2c+i} & \vdots & & \Lambda_{ncj+i} \\ \Lambda_{ncj+2c+i} & \vdots & \Lambda_{ncj+(n-1)c+i} & \ddots & \Lambda_{ncj+1c+i} \\ \vdots & \Lambda_{ncj+(n-1)c+i} & \Lambda_{ncj+i} & \dots & \vdots \\ \Lambda_{ncj+(n-1)c+i} & \Lambda_{ncj+i} & \Lambda_{ncj+1c+i} & \dots & \Lambda_{ncj+(n-2)c+i} \end{pmatrix} \quad (6)$$

(5)(6)式の n, c, f へそれぞれ値が代入されると、これらの一般化された式により、AWG からの出力波長を表す出力行列を計算することが可能となる。次節では、実際に値を代入することで一般化された式の確認を行う。

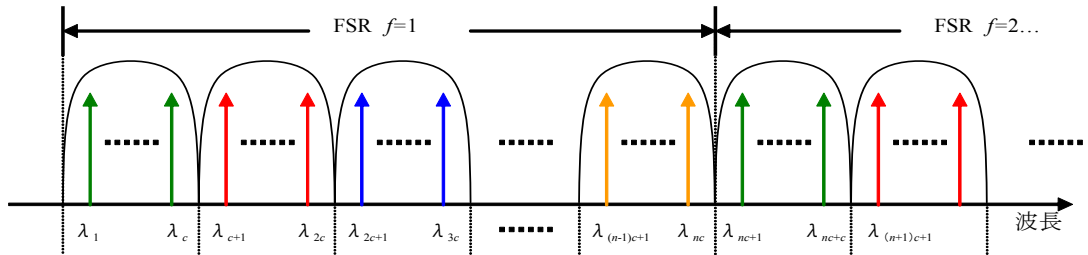


図7 一般的な AWG の波長特性と入力波長位置

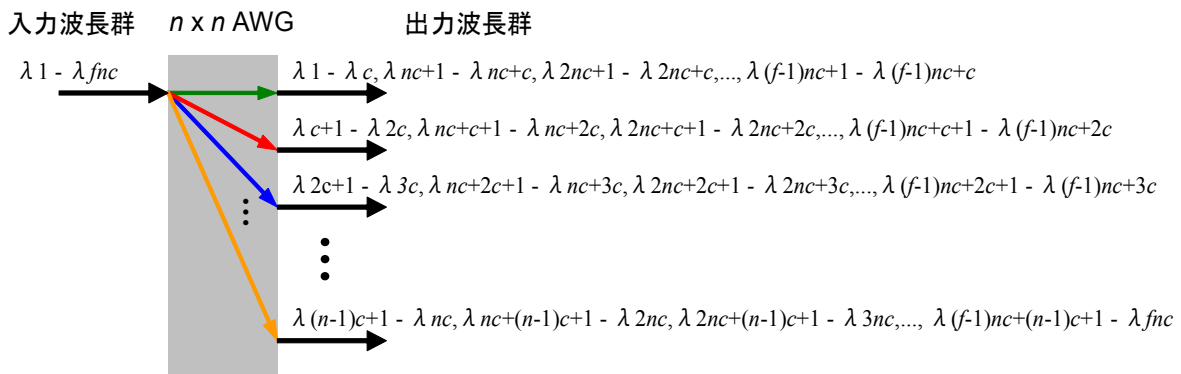


図8 $n \times n$ AWG の波長入出力特性

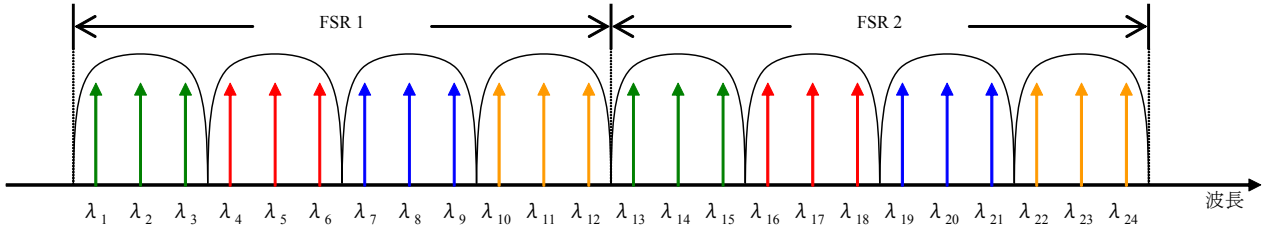


図9 4×4 AWGの波長通過特性と波長配置

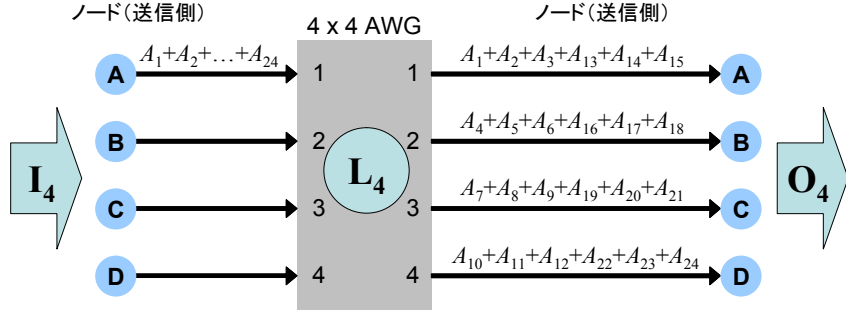


図10 4×4 AWGの波長入出力特性

3. 2 一般化されたマトリクスの確認

ここでは、 $c=3$, $f=2$ を例にとった4×4 AWGについて前章で一般化された数式の確認をおこなう。図9に4×4 AWGの波長通過特性と波長配置を示す。図10に、このAWGへポート1から波長 $\lambda_1\sim\lambda_{24}$ が入力されるときの波長入出力特性を示す。この出力波長群を波長伝達マトリクス法により記述する。まず、入力波長群を表す入力行列は、(5)式を用いて、下の(7)式のように記述される。この式で、AWGの入力ポート2, 3, 4からは波長は入力されないので、この行列の2, 3, 4列目の要素は0とおく。(6)式より、4×4 AWGの波長伝達マトリクスは下の式(8)で表される。従って、(1), (7), (8)式より、AWGからの出力波長群を表す出力行列は演算の結果下の(9)式で記述される。

$$\mathbf{O}_{(4,3,2)} = \mathbf{L}_{(4,3,2)} \cdot \mathbf{I}_{(4,3,2)} = \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + A_3 + A_{13} + A_{14} + A_{15} \\ A_4 + A_5 + A_6 + A_{16} + A_{17} + A_{18} \\ A_7 + A_8 + A_9 + A_{19} + A_{20} + A_{21} \\ A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{22} + A_{23} + A_{24} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式この出力行列の1列目はノードAへの出力波長群、2列

$$\mathbf{I}_{(4,3,2)} = \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14} + A_{15} + A_{16} + A_{17} + A_{18} + A_{19} + A_{20} + A_{21} + A_{22} + A_{23} + A_{24} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{L}_{(4,3,2)} = \begin{pmatrix} \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 + \Lambda_{13} + \Lambda_{14} + \Lambda_{15} & \Lambda_4 + \Lambda_5 + \Lambda_6 + \Lambda_{16} + \Lambda_{17} + \Lambda_{18} & \Lambda_7 + \Lambda_8 + \Lambda_9 + \Lambda_{19} + \Lambda_{20} + \Lambda_{21} & \Lambda_{10} + \Lambda_{11} + \Lambda_{12} + \Lambda_{22} + \Lambda_{23} + \Lambda_{24} \\ \Lambda_4 + \Lambda_5 + \Lambda_6 + \Lambda_{16} + \Lambda_{17} + \Lambda_{18} & \Lambda_7 + \Lambda_8 + \Lambda_9 + \Lambda_{19} + \Lambda_{20} + \Lambda_{21} & \Lambda_{10} + \Lambda_{11} + \Lambda_{12} + \Lambda_{22} + \Lambda_{23} + \Lambda_{24} & \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 + \Lambda_{13} + \Lambda_{14} + \Lambda_{15} \\ \Lambda_7 + \Lambda_8 + \Lambda_9 + \Lambda_{19} + \Lambda_{20} + \Lambda_{21} & \Lambda_{10} + \Lambda_{11} + \Lambda_{12} + \Lambda_{22} + \Lambda_{23} + \Lambda_{24} & \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 + \Lambda_{13} + \Lambda_{14} + \Lambda_{15} & \Lambda_4 + \Lambda_5 + \Lambda_6 + \Lambda_{16} + \Lambda_{17} + \Lambda_{18} \\ \Lambda_{10} + \Lambda_{11} + \Lambda_{12} + \Lambda_{22} + \Lambda_{23} + \Lambda_{24} & \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 + \Lambda_{13} + \Lambda_{14} + \Lambda_{15} & \Lambda_4 + \Lambda_5 + \Lambda_6 + \Lambda_{16} + \Lambda_{17} + \Lambda_{18} & \Lambda_7 + \Lambda_8 + \Lambda_9 + \Lambda_{19} + \Lambda_{20} + \Lambda_{21} \end{pmatrix} \quad (8)$$

目はノードBへの出力波長群、3列目はノードCへの出力波長群、4列目はノードDへの出力波長群を意味する。(9)と図10の出力結果を比較すると、波長伝達マトリクス法が正しく動作していることが確認できた。

4. ループバック光ファイバにより実現する仮想光ネットワーク

前章では単純なAWGの入出力の波長伝達マトリクスについて検討した。将来のWDMネットワークのアプリケーションではより複雑なネットワーク構成が考えられる。その代表的な例としては、ループバック光ファイバを用いたWDM PON (Passive Optical Network)がある[1][5]。従来のWDM-PONではすべてのONU間での通信は可能でなかった。しかし、AWGに効果的なループバック光ファイバを接続し波長ルータとして配置することで一部のONU間での通信が可能となっている。まず、このループバック光ファイバの使用により可能となるONU間の通信の規則性を検討する。次章ではすべてのONU間とOLTとの通信を可能とするループバック光ファイバの接続パターンに基づくWDM-PON構造を提案する。

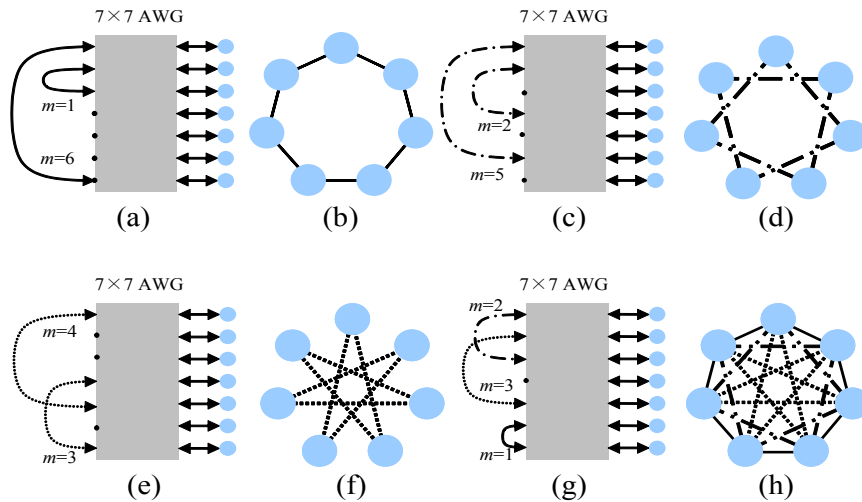


図 11 7 × 7 AWG を用いたループバック接続とそれにより構成される論理的なネットワークトポロジ
出力ポート

	1	2	3	4	5	6	7
1	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
2	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_1
3	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_1	λ_2
4	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_1	λ_2	λ_3
5	λ_5	λ_6	λ_7	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
6	λ_6	λ_7	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
7	λ_7	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6

図 12 7 × 7 AWG のルーティングテーブル

ループバック型 WDM-PON 構造ではパラメータ m により論理的なネットワークトポロジが変化する。 m はループバック接続における二つの接続ポート間の距離（ポート数+1）である。図 11 に 7 ポートの AWG を用いたループバック接続とそれにより構成される論理的なネットワークトポロジを示す。図 12 にこの AWG のルーティングテーブルを示す。図 11 における(a)は $m=1$ もしくは 6 の場合、(c)は $m=2$ もしくは 5 の場合、(e)は $m=3$ もしくは 4 の場合におけるループバック接続の例を示している。(a)の接続により可能となる論理的な ONU 間のトポロジは(b)であり、(c)の接続により可能となる論理的な ONU 間のトポロジは(d)、(e)の接続により可能となる論理的な ONU 間のトポロジは(f)にそれぞれ示される。同時にこれら 3 パターンのループバック接続がされると、すべての ONU 間で直接通信することが可能であり、論理的なトポロジはフルメッシュ型となる。(g)は 3 パターン ($m=1, 2, 3$) の接続を同時に実現する接続例であり、論理的な

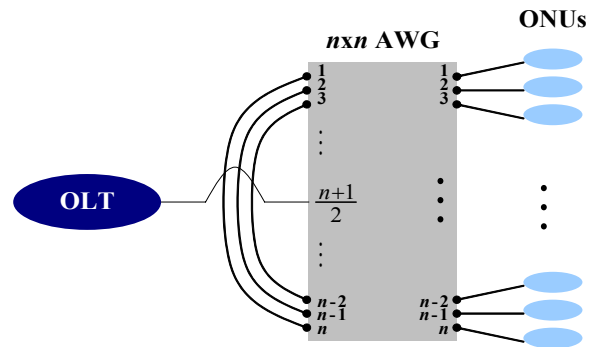


図 13 提案する WDM-PON 構造

トポロジは(h)に示されるようにフルメッシュ型となる。 $n \times n$ AWG におけるループバック接続の規則を適用するために、 n を奇数と偶数の場合に分けて一般化する。

1) n が奇数のとき

$m=1$ もしくは $n-1$ の接続では隣接する ONU 間の通信が可能となり、 $m=2$ もしくは $n-2$ の接続では一つ飛ばしの ONU 間での通信が可能となり、 $\dots$ 、 $m=(n-1)/2$ もしくは $(n+1)/2$ 接続では $(n-1)/2$ 個の ONU を飛ばした ONU 間での通信が可能となる。従って、 $(n-1)/2$ 本のループバック光ファイバによって、ONU 間の論理的なトポロジはフルメッシュ型となる。

2) n が偶数のとき

$m=1$ もしくは $n-1$ の接続では隣接する ONU 間の通信が可能となり、 $m=2$ もしくは $n-2$ の接続では一つ飛ばしの ONU 間での通信が可能となり、 $\dots$ 、 $m=n/2$ の接続では $n/2$ 個の ONU を飛ばした ONU 間での通信が

可能となる。従って、ONU 間の論理的なネットワークポロジをフルメッシュ型とするためには $n/2$ パターンのループバック光ファイバが必要である。

5. 提案する WDM-PON 構造

5.1 構造

図 13 に提案する WDM-PON 構造を示す[8]。ある周期性 $n \times n$ (n は奇数) AWG の左側の $(n-1)/2$ 番目のポートから OLT へ、右側の各ポートから ONU へそれぞれ光ファイバを用いて接続されている。ある規則に基づいた AWG の左側の出力ポートのペア、すなわちポート 1 とポート n 、ポート 2 とポート $n-1$ 、 $\dots$ 、ポート $(n-1)/2$ とポート $(n+3)/2$ はそれぞれループバック光ファイバにより接続されている。これらのループバック接続は $n-1$ パターンをすべて含むため、この構造は ONU 間の直接通信が可能であり論理的なトポロジはフルメッシュ型となる。

5.2 波長伝達マトリクス法を用いた提案構造の確認

図 14 に 7×7 AWG における提案構造を示す。AWG の左側の 4 番目のポートから OLT へ、右側の各ポート 1-7 から ONU へそれぞれ光ファイバを用いて接続されている。AWG の左側の出力ポートのうち、ポート 1 とポート 7、ポート 2 とポート 6、ポート 3 とポート 5 はそれぞれループバック光ファイバにより接続されており、 $m=6$, $m=4$, $m=2$ の 3 パターンのループバック接続を同時に実現している。従って、この構造ではすべての ONU 間の直接通信が可能でかつすべての ONU が OLT と直接通信可能な構成となっていることがわかる。従って、論理的なネットワークポロジは図 15 で示されるようなフルメッシュ型となっている。

図 14 で示される WDM-PON 構造の波長入出力特性を波長伝達マトリクス法により確認する。各 ONU は波長 λ_1 から λ_7 を送信するので、ONU から入力される波長群を

表す入力行列は以下の式(10)で表される。使用される AWG の波長伝達マトリクスは以下の(11)式のように決まる。

$$\mathbf{I}_7 = \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 \\ B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + B_7 \\ C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 \\ D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6 + D_7 \\ E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 \\ F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 \\ G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 + G_7 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{L}_{7 \times 7} = \begin{pmatrix} \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_5 & \Lambda_6 & \Lambda_7 \\ \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_5 & \Lambda_6 & \Lambda_7 & \Lambda_1 \\ \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_5 & \Lambda_6 & \Lambda_7 & \Lambda_1 & \Lambda_2 \\ \Lambda_4 & \Lambda_5 & \Lambda_6 & \Lambda_7 & \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 \\ \Lambda_5 & \Lambda_6 & \Lambda_7 & \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 \\ \Lambda_6 & \Lambda_7 & \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_5 \\ \Lambda_7 & \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_5 & \Lambda_6 \end{pmatrix} \quad (11)$$

このとき、 X_k はノード X(A, B, ..., G) から入力される波長 λ_k を意味する。従って、(1), (10), (11)式より、各 ONU へ出力される波長群を表す出力行列は以下のように計算される。

$$\mathbf{O}_7 = \mathbf{L}_{7 \times 7} \cdot \mathbf{I}_7 = \begin{pmatrix} A_1 + B_2 + C_3 + D_4 + E_5 + F_6 + G_7 \\ G_1 + A_2 + B_3 + C_4 + D_5 + E_6 + F_7 \\ F_1 + G_2 + A_3 + B_4 + C_5 + D_6 + E_7 \\ E_1 + F_2 + G_3 + A_4 + B_5 + C_6 + D_7 \\ D_1 + E_2 + F_3 + G_4 + A_5 + B_6 + C_7 \\ C_1 + D_2 + E_3 + F_4 + G_5 + A_6 + B_7 \\ B_1 + C_2 + D_3 + E_4 + F_5 + G_6 + A_7 \end{pmatrix} \quad (12)$$

この行列の 4 列目はポート 4 からの出力波長群であるので、4 列目の波長は OLT で受信される。図 14 に示されているポート 1 から 7、ポート 2 から 6、ポート 3 から 5 へのループバック光ファイバ部分の波長伝達マトリクスは以下の行列で表される。

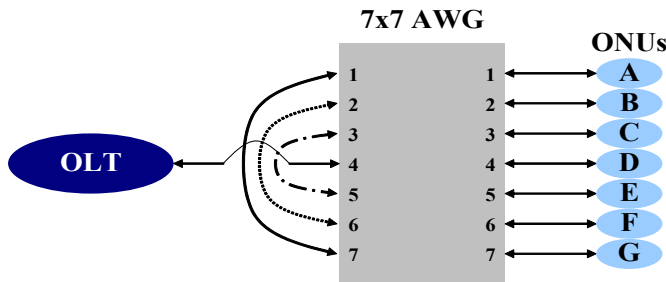


図 14 7×7 AWG を用いた提案構造

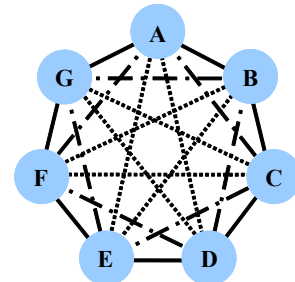


図 15 提案構造により実現する論理的なネットワークポロジ

$$\mathbf{S}_{7 \times 7} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

AWG の波長伝達マトリクスは入力側と出力側のポートに関して対称であるので、AWG の波長伝達マトリクスは(10)式と同様である。したがって、最終的に各 ONU へ出力される波長群を表す出力行列は $\mathbf{L}$, $\mathbf{S}$, $\mathbf{L}$, $\mathbf{I}$ の積により下の(14)ように計算される。

$$\mathbf{O}_7' = \mathbf{L}_{7 \times 7} \cdot \mathbf{S}_{7 \times 7} \cdot \mathbf{L}_{7 \times 7} \cdot \mathbf{I}_7 = \begin{pmatrix} B_1 + D_2 + F_3 + 0 + C_5 + E_6 + G_7 \\ A_1 + C_2 + E_3 + G_4 + 0 + D_6 + F_7 \\ G_1 + B_2 + D_3 + F_4 + A_5 + 0 + E_7 \\ F_1 + A_2 + C_3 + E_4 + G_5 + B_6 + 0 \\ 0 + G_2 + B_3 + D_4 + F_5 + A_6 + C_7 \\ D_1 + 0 + A_3 + C_4 + E_5 + G_6 + B_7 \\ C_1 + E_2 + 0 + B_4 + D_5 + F_6 + A_7 \end{pmatrix} \quad (14)$$

この行列の 1 列目は ONU A の受信波長, 2 列目は B の受信波長, ..., 7 列目は G の受信波長をそれぞれ意味する。各 ONU における受信波長をみると、当該 ONU 以外のすべての ONU からの入力波長が受信されていることがわかる。これはすべての ONU 間で直接通信が可能であることをあらわしている。したがって図 14 により実現する構成論理的なネットワークポロジが図 15 と等しくなることが確認された。

6. 結 論

本稿では、波長伝達マトリクス法をさまざまな構成の波長ルーティングネットワークをより簡易に記述できるよう一般化をおこなった。また、ループバック光ファイバの接続パターンとそれにより実現する論理的なネットワークポロジについてまとめ、すべての ONU 間での直接通信と OLT との通信を同時に可能とする WDM-PON 構成を提案した。AWG とループバック光ファイバを有する WDM-PON の提案した構成が波長伝達マトリクス法により記述可能であることを示し、入出力特性が正しいことが確認できた。本論文で提案された手

法を用いると、今後考えられるより複雑なネットワーク構成やその波長特性を簡易かつ効果的に設計もしくは確認することが可能となる。

参考文献

- [1] H. Yoshimura and K. Oguchi, "Future trend in optical devices for photonic networks," NTT Review, vol. 4, no.3, pp. 4-8, May 2002.
- [2] K. Oguchi, "New notations based on the wavelength transfer matrix for functional analysis of wavelength circuits and new networks using AWG-based star coupler with asymmetric characteristics," Journal of Lightwave Technology, Vol.14, No.6, pp.1255-1263, June, 1996.
- [3] Qiguang Zhao, et al., "A novel internetworking scheme for WDM passive optical network based on remodulation technique," in Proc. OFC/NFOEC2006, Paper JThB67, Anaheim, CA, March 2006.
- [4] Bo Zhang, et al., "A simple high-speed WDM PON utilizing a centralized supercontinuum broad band light source for colorless ONUs," in Proc. OFC/NFOEC2006, Paper OTuC6, Anaheim, CA, March 2006.
- [5] C. -J. Chae, M. Khnal and R. S. Tucker, "WDM passive optical network for broadband access and flexible customer networking", 5th Chitose International Forum Technical Digest, pp.30-31, Chitose Institute of Science and Technology, October 2004.
- [6] K. Okada, Y. Tsuchida, T. Yamaguchi and K. Oguchi, "Verification of wavelength routing function in a loop-back type passive network using wavelength transfer matrix", The 10th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2005), pp.24-25, Seoul, Korea, July 4-8, 2005.
- [7] K. Oguchi and K. Okada, "Effective verification of wavelength routing function by wavelength transfer matrix method", IEEE TENCON2005, 1C01.5, Nov. 21-24, 2005.
- [8] 特許出願中