

DWDM 波長モニターの開発

Development of DWDM Channel Monitor

柴谷 一弘*	藤井 秀一*	長井 史生*	藤田 潤一*
Kazuhiro SHIBATANI	Shuichi FUJII	Fumio NAGAI	Junichi FUJITA
中村 健人*	瀧谷 俊哉*	三ツ木 直樹**	尾関 幸宏***
Taketo NAKAMURA	Toshiya TAKITANI	Naoki MITSUGI	Yukihiko OZEKI

要旨

多くの人たちが、パソコンやスマートフォンを用いてインターネットを利用する時代になった。最近では、クラウドサービスの普及も始まり、ネットワークを流通する情報は今後も増えると思われる。光ブロードバンドは、このような大容量通信サービスを支えるために、高密度波長多重伝送 (DWDM) へと進化した。各基地局には光分岐挿入システム (ROADM) が導入されており、DWDM 信号の分岐と挿入が行われている。ここで紹介する波長モニターは、ROADM への搭載を想定しており、DWDM 信号の状態を監視するものである。一方、情報量の増大により、通信機器の消費電力と発熱が問題になってきている。この対応策として、光信号を電気信号に変換せず、光信号のまま制御する ROADM システムの有効性が注目されている。ROADM の普及にとって、波長モニターは重要な機能モジュールである。

今回、リニアバリアブルフィルター (LVF) を用いたポリクロム方式の波長モニターを試作した。DWDM 信号のチャンネル間隔は 50 GHz 間隔に対応した。検出処理時間を短縮するため、ポリクロム方式を採用して、信号処理の高速化も試みた。波長モニターの試作とその評価結果について報告する。

執筆者



柴谷一弘



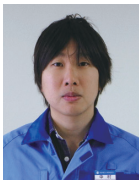
藤井秀一



長井史生



藤田潤一



中村健人



瀧谷俊哉



三ツ木直樹



尾関幸宏

Abstract

Today, people the world over connect to the internet using a PC or a smartphone, cloud services have also multiplied, and the amount of information flowing through the internet is expected to increase dramatically.

To support the high-capacity communication service that this demands, optical broadband has evolved into DWDM (dense wavelength division multiplex) technology. At each telecommunication base station, a ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexer), which adds and drops DWDM optical signals, is installed. A channel monitor is anticipated to be mounted on the ROADM, and observes conditions of the DWDM signals.

Meanwhile, the power consumption and heat generation of telecommunication equipment have become problems due to increase in data traffic on the internet.

In response, the effectiveness of the ROADM, which controls optical signals without converting them into electrical signals, has been attracting attention. The channel monitor is a key functional module in disseminating the ROADM.

We made a prototype of a polychromator channel monitor using a LVF (linear variable filter). The prototype of the channel monitor is structured of an optical module and a signal processing (deconvolution) unit. The polychromator type has a characteristic that it has an advantage in a high speed processing compared to a monochromator type and that securing reliability is also relatively easy. The LVF is used for a spectroscopic element to make polarization dependency small with its simple structure. The detection wavelength band is C-band, and detection channel spacing of DWDM signal is 50 GHz. The optical module is made thin with the size of the optical module being 106 mm x 70 mm x 15 mm, and the thickness being 15 mm. As the deconvolution, a combination of Richardson-Lucy method and Van-Cittert is used to achieve a higher processing speed.

After evaluation of the prototype, it was confirmed that the optical module was almost made as designed. Excellent results for detection accuracy were obtained by an evaluation at 20 dB of an input power dynamic range. Further, it is anticipated that the detection processing time will be 50 ms or less using a general-purpose digital signal processor (DPS).

* コニカミノルタテクノロジーセンター(株) 要素技術開発センター
** コニカミノルタテクノロジーセンター(株) 企画部
*** コニカミノルタテクノロジーセンター(株) マーケティング部

1 はじめに

今や、多くの人たちが、職場や自宅に自分専用のパソコンを持ち、インターネットを利用する時代になった。また、携帯電話などの携帯情報端末を持ち歩く人の数も年々増え続けている。平成23年度末において、携帯情報端末の世帯普及率は94.5%に達している¹⁾。特に、情報携帯端末においては、スマートフォンの普及が急速に進んでいる。人々は、パソコンやスマートフォンなどの情報端末をインターネットに接続し、電子メール、WWW、コンテンツ配信、動画・音楽配信、電子商取引などの多種・多様な大容量通信サービスを利用している。最近では、クラウドサービスも進化しており、サービスを利用する企業や個人が増えている。クラウドコンピュータ化により、ネットワークを流通する情報量は、今後も大幅に増えると推測される。

一方、大容量通信サービスを支えるブロードバンドでは、ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) を中心に普及が進んできたが、光ファイバー伝送路を利用者宅に引き込むFTTH (Fiber To The Home) の契約数が年々増え続けている。今後は、光ブロードバンドがすべての世帯で利用されると考えられる。

光通信は、ネットワークトラフィックの増大に対応するために、従来の波長多重伝送 (WDM: Wavelength Division Multiplex) から高密度波長多重伝送 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplex) へと進展している。DWDMの波長多重数は、100 GHz間隔で40波程度、50 GHz間隔で80波程度である。光通信網の各基地局には光分岐挿入システム (ROADM: Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) が導入されており、DWDM信号の分岐と挿入の制御が行われている。ROADMシステム内には波長選択スイッチ (WSS: Wavelength Selective Switch) があり、このWSSにより光信号を電気信号に変換することなく、DWDM信号の分岐・挿入が行われる。ここで、波長モニターはWSSとセットで主に用いられ、DWDM信号の状態を監視する役割がある^{2) 3)}。

本報では、DWDM信号における各チャネル信号(各波長信号)の光パワーを検出するための波長モニターについて報告する。Fig. 1 に試作した波長モニタの外観を示す。

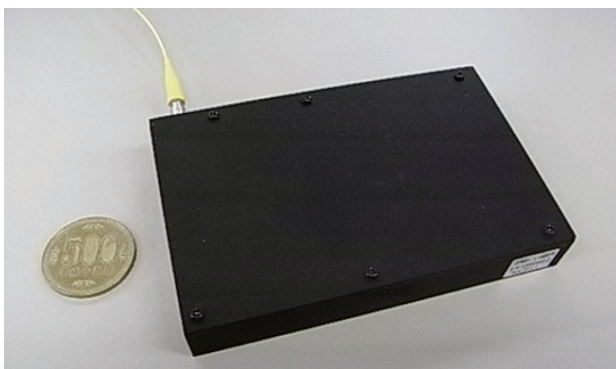


Fig. 1 DWDM channel monitor.

2 波長モニターの方式と目標仕様

2.1 波長モニターの方式

波長モニターの基本的な機能は、DWDM信号に含まれるそれぞれの波長とそのパワーを検出することである。波長モニターは、光通信波長帯(近赤外線)を検出対象とする一種の分光器と言える。分光器の検出方式には、(a)モノクロ方式と(b)ポリクロ方式がある。よって、波長モニターの検出方式にもこの2つの方式がある。

(a) モノクロ方式

モノクロ方式は、1つのフォトダイオード(PD)を検出素子として持ち、チューナブルフィルターの透過特性をスキャンして分光情報を取得する方式である。この方式は、測定時にチューナブルフィルターの透過特性をスキャンする時間が必要であり、検出時間の短縮化には不利である。また、チューナブルフィルターの多くは透過特性をスキャンするための可動部があり、その可動部の信頼性確保が課題になる。

(b) ポリクロ方式

ポリクロ方式は、分光素子により分光された光量分布を複数のPD(PDアレイ)を用いて一括で分光情報を取得する方式である。この方式は、一度に分光情報を取得できるので、検出時間の短縮化に有利である。また、可動部を有する部品を用いないため、信頼性確保も比較的容易という特徴がある。

光通信網インフラを安定的に支えるために、波長モニターに要求される機能は高速処理と信頼性の高さと考え、ポリクロ方式の波長モニターを開発することにした。ポリクロ方式の分光素子として、回折格子を用いる方式^{4) 5)}と、リニアバリアブルフィルター(LVF: Linear Variable Filter)を用いる方式^{6) 7)}がある。偏波依存性が少なく構成がシンプルで、組立時における光学素子の位置決め配置の容易さも考慮して、分光素子にはLVFを採用した。

Fig. 2 に、波長モニターのブロック図を示す。波長モニターは、分光情報を取得するための光学モジュールと、分光情報から入力信号に含まれる波長成分の各パワーを算出するための信号処理部(デコンボリューション処理部)から構成されている。DWDM信号は、ファイバコリメーターを介して光学モジュールに入力される。光学モジュールにより取得されるLVFの分光情報にはLVFの透過特性が影響している。このLVFの透過特性は、デコンボリューションにより除去される。

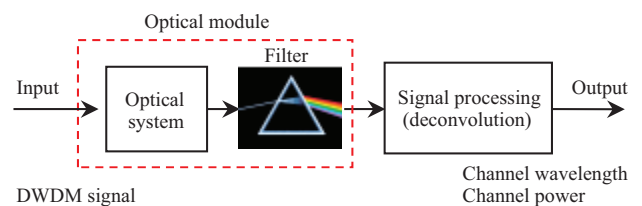


Fig. 2 Block diagram of DWDM channel monitor. The channel monitor is a kind of spectrometer and is composed of an optical module and a deconvolution processing unit.

2.2 波長モニターの目標仕様

Table 1 に主要項目についての目標仕様を示す。試作機の検出波長帯はC-Bandである。L-Bandに対応するには、分光素子のLVFをL-Band用に変更するだけで対応できるようにした。1チャンネル信号あたりのパワーダイナミックレンジは30dBの大きさ確保を目標とし、PDアレイの検出値を16bitでAD変換することにした。絶対周波数検出精度の目標仕様は6.25GHz以下とし、チャンネル間隔50GHzのDWDM信号のみでなく、将来のフレックスグリッドへの対応も考慮した。検出時間の目標仕様は、ポリクロ方式の利点を生かし、50ms以下(モノクロ方式より10倍程度高速)とした。光学モジュールの寸法は106mm×70mm×15mmとし、厚さ15mmの薄型とした。

Table 1 Target specifications of prototype. The optical module is only 15 mm thick. Absolute frequency detection accuracy is designed to correspond not only to a channel spacing of 50 GHz of the DWDM signal, but also to a future flexgrid. Targeted detection processing time is 50 ms or less.

Operating frequency	C band
Input power dynamic range	30 dB (from -40 to -10 dBm/ch)
Absolute power detection accuracy	± 0.5 dB
Absolute frequency detection accuracy	± 6.25 GHz or less
Detection processing time	50 ms or less
Mechanical dimensions	106 × 70 × 15 mm

3 光学モジュール

3.1 光学モジュールの設計

3.1.1 リニアバリアブルフィルタによる分光原理

Fig. 3 に、LVFを用いた分光原理を示す。LVFは、LVF上の位置に対応した特定の波長を透過させる光学バンドパスフィルターである。LVF上の透過光の位置とその波長の関係は線形特性になっている。つまり、LVF上の透過光の位置(X_c)を検出すれば、その波長(λ_c)を知ることができる。LVF上のどこを透過した光かを検出するため

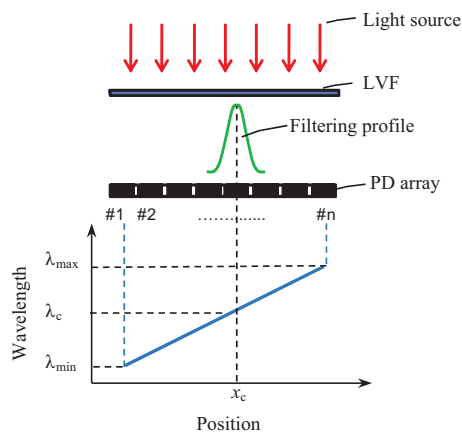


Fig. 3 Principle of spectrum using LVF. If the position (X_c) of light transmitted through the LVF is detected, the corresponding wavelength (λ_c) can be obtained. The position of the transmitted light is detected by a PD array positioned behind the LVF.

に、LVFの背後にはPDアレイが配置されている。DWDM信号は、光学モジュールの光学系により一様な平行光に波形整形されたのちLVFに導かれ、その透過光はPDアレイにより検出される。ここで、LVFに波長 λ_c の単一波長を入射させた場合、その透過光は位置 X_c にピークを有し、ある半値幅をもった光量分布となる。この光量分布は、LVFの波長選択における透過特性を示している。

Fig. 4 の(A)に、LVFを透過した2つの波長の光量分布が重なりあった様子を示す。このとき、PDアレイの検出値は、それぞれの波長が1波ずつLVFを透過したときの光量分布を重ね合わせた値となる。このような状態では、信号光に含まれる波長成分とそのパワーを、PDアレイの検出値から直接的に求めることはできない。そこで、Fig. 4 の(B)に示すように、PDアレイの検出値を信号処理(デコンボリューション)により狭窄化スペクトルに変換する必要がある。本報の波長モニターでは、デコンボリューションにより高い波長分解能を実現している。

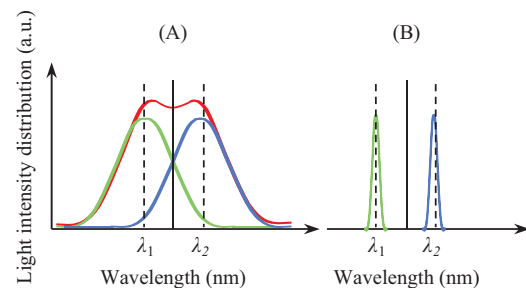


Fig. 4 (A): Detection wavelength by optical module. (B): Result of deconvolution processing. Spectrum A, composed of two light intensity wavelength distributions, is converted into narrowed spectrum B by deconvolution.

3.1.2 光学モジュールの構成

Fig. 5 に、光学モジュールの構成図を示す。光学モジュールの主要部品は以下の6部品になる。

- ①ファイバーコリメーター
- ②シリンダリカルミラー
- ③集光レンズ
- ④LVF
- ⑤折り返しミラー
- ⑥PDアレイ (InGaAs ラインセンサー)

ファイバーコリメーターから導かれたDWDM信号は、シリンダリカルミラーで反射拡散される。その反射拡散光は、集光レンズにより平行光に変換され、LVFへと導かれる。LVFを透過した光は、折り返しミラーによりその光路を90°下向きに曲げられ、受光面を上向きに配置されたPDアレイにより検出される。

光学モジュールの厚さを15mmに抑えるために、受光面を上向きにしてPDアレイを配置した。ファイバーコリメーターとシリンダリカルミラーは、位置ずれしたときのPD検出値への影響が大きいため、筐体に対してYAG溶接で固定した。その他の部品は、調整機構を介して接着固定されている。光学モジュールの信頼性を確保する

ために、可動部のない固定部品で全てを構成した。また、精度よくデコンボリューションを行うために、経時変化と温度特性変化が小さくなるように、各部品の固定方法にも配慮した。

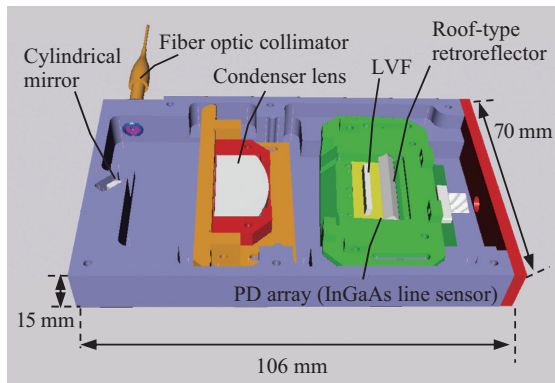


Fig. 5 Configuration of optical module. Reliability of the optical module is secured by having no moving parts. The fiber collimator and the cylindrical mirror, which have high optical sensitivity, are fixed with YAG welding.

3. 1. 3 光学系の設計

Fig. 6 に光学モジュール上面から見た光学系の光線軌跡図を、Fig. 7 に光学モジュール側面から見た光線軌跡図を示す。

ファイバーコリメーターは、外形φ4mm、レンズ焦点距離5.07mmである。シリンジカルミラーは、半径2.02mmの円柱ガラスにAlコーティングされ、その上に酸化防止用の保護膜が施されている。集光レンズは、外形φ45mm、レンズ焦点距離32.72mmの円形レンズを厚さ3.5mmにスライス加工したものである。折り返しミラーは、ガラス母材にAl+MgF₂コーティングされたものである。

ファイバーコリメーターから導いたDWDM信号を拡散させるのにシリンジカルミラーを用いたのは、レンズを用いた場合に生じる面間反射の影響を排除するためである。シリンジカルミラーは、その表面状態が拡散光の光量分布に影響を与えるので、一様な光量分布が得られるように表面加工が施されている。

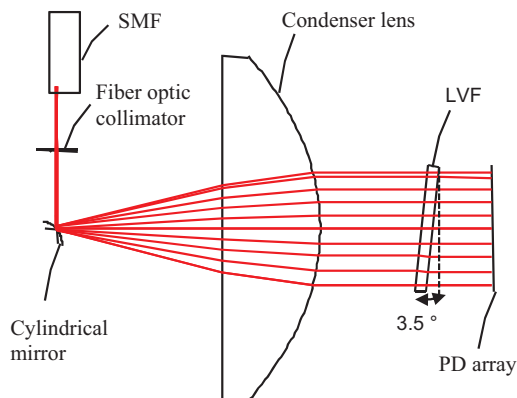


Fig. 6 Top view of optical path.

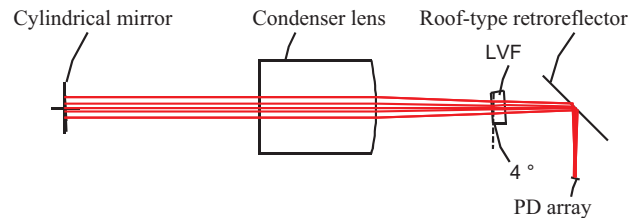


Fig. 7 Side view of optical path.

LVFの寸法は、フィルター面が16mm×3mm、厚さ1.5mmである。透過光の波長と位置の関係(スロープ)は約3.5pm/μmであり、透過率は75%以上である。透過光の光量分布の半値幅は約50GHz(0.4nm)相当である。LVFは、上面図において3.5°、側面図において4.0°傾けて配置し、フィルター面からの反射光が迷光として影響しないように配慮した。

PDアレイは画素数512個のInGaAsラインセンサーである。画素サイズは25μm×250μmであり、画素ピッチは25μmである。この画素ピッチは、LVF透過光において約11GHzに相当する。InGaAsラインセンサーのパッケージはセラミック製であり、温度調整用のペルチェ素子を適用せずにコストダウンを図った。温度特性の補正は、温度の測定値を用いて信号処理で対応する。

Fig. 8は、LVFを配置しない状態において、PDアレイ上の光量分布シミュレーションの結果を示す。周辺光量落ちと光量分布の左右バランスは、シリンジカルミラーに依存する。PDアレイ周辺部の光量落ちは、PDアレイ中心部の光量に対して、20%程度に抑えた。光量分布をより均一にするために、拡散度合いを大きくすると、光学系感度が大きくなりすぎるという問題が発生する。

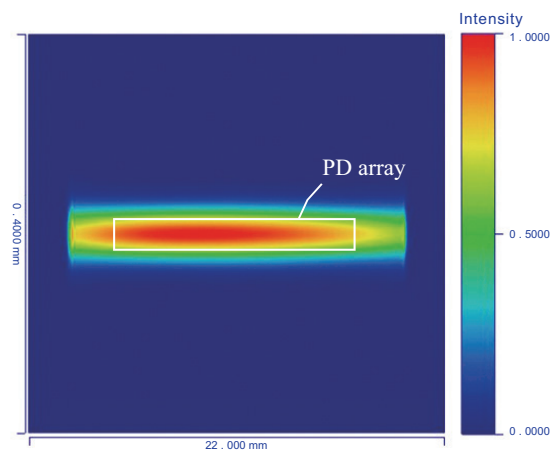


Fig. 8 Simulation result of light distribution on PD array. Decrease in the amount of light at periphery of the PD array is kept to about 20% of the amount of light in the center.

3. 2 光学モジュールの試作

Fig. 9 に、試作した光学モジュールの内部写真を示す。筐体の内部は、迷光対策として黒塗り処理(レイダント処理)が施されている。シリンジカルミラーはホルダーに接着固定され、そのホルダーは筐体にYAG溶接固定され

ている。筐体のYAG溶接部はレイデント処理が除去されている。PDアレイは、駆動制御基板にはんだ付け実装されており、その基板は位置決め調整部を介して筐体に固定されている。光学モジュールの温度特性補正用として、LVFとPDアレイにはサーミスタが取り付けられている。

PDアレイの1ラインキャプチャの露光時間は変更可能である。ここでは、露光時間を850 μ sに設定した。PDアレイは、奇数画素と偶数画素で独立してアンプを持っている。奇数画素と偶数画素を同期させて読み出すことで、1ラインキャプチャの読み出し時間を約2.6msとした。1ラインキャプチャに要する時間を、露光時間と読み出し時間を合わせて2.7ms以下に抑えた。

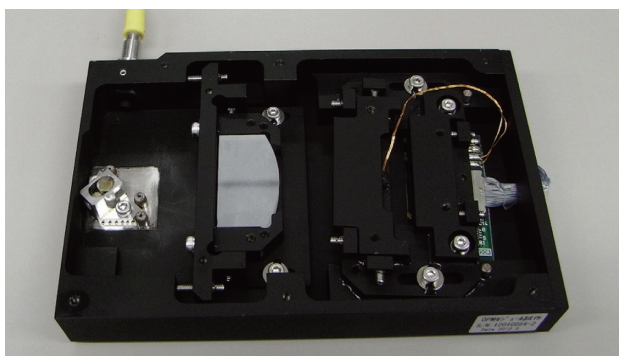


Fig. 9 Inside of optical module. The inside of the case is painted black (Raydent processing) to prevent stray light. No Raydent processing was applied to the YAG welded parts to maintain the quality of the welding.

Fig. 10 は、光学モジュールに特定の5つの波長を入力したときのPDアレイの出力値を示す。5つの入力波長は、便宜上周波数表示とするが、196.25 THz, 195.04 THz, 193.85 THz, 192.53 THz, 191.25 THzである。それぞれの入力パワーは-16.27 dBmとした。グラフの横軸はPDアレイの画素番号を示し、縦軸は各画素の検出値(AD変換器(16bit)の出力値)を示す。縦軸の約16700カウント付近における検出値のフラット部は、PDアレイの各画素がもつ暗出力を示している。各画素の暗出力値は、信号処理する前に差し引かれる。

193.85 THz (256番画素, LVF中央付近)の検出ピーク値を基準に、196.25 THz (45番画素, LVF端付近)と191.25 THz (500番画素, LVF端付近)の検出ピーク値を比較すると、196.25 THzで約17%の光量落ち、191.25 THzで約24%の光量落ちが確認できる。周辺光量落ちが20%をやや超えたところが存在するが、その傾向はシミュレーション結果と同様であり、ほぼ設計値とおりに試作ができてしていると判断できる。

Fig. 11 は、Fig. 10 に示した5つの波長のPDアレイ検出値のピーク値を重ね合わせた図である。それぞれのピーク位置から3 dB低下したところでPDアレイ検出値の半値幅(FWHM)を評価すると、5~6.5画素であった。これは、55~72 GHzに相当し、LVF仕様の半値幅よりもやや大きな結果となった。これは、組立調整の影響と考える。

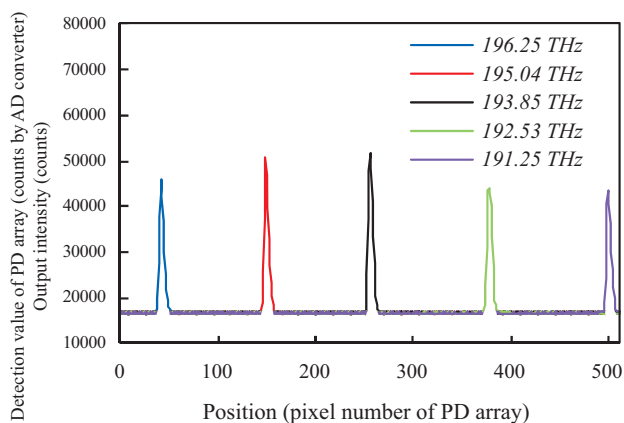


Fig. 10 Detection values of five different wavelengths on the PD array. Shown here are detection values of the PD array when a power of -16.27 dBm was input to each wavelength. The decrease in detection value at several wavelengths (at lower and higher positions) is an effect of the decrease in the amount of light indicated in Fig. 8. Because the entire area of the C-band is covered, the prototype can be seen as constructed nearly as it was designed. The lower levels in the figure show dark output of the PD array.

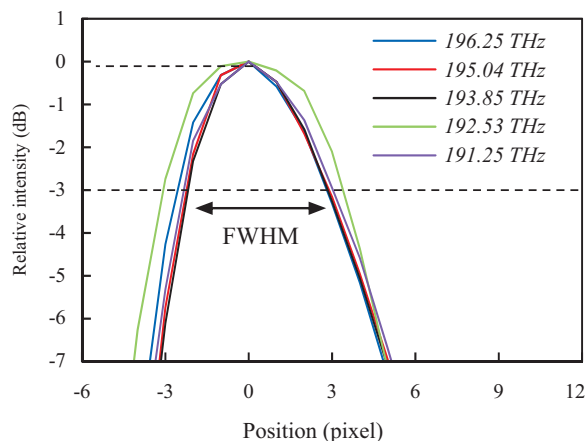


Fig. 11 Comparison of full width half maximum (FWHM) of detection values of five different wavelengths on PD array. When comparing the FWHM of five wavelengths with common peak positions, the FWHM is found to be 5 to 6.5 pixels (corresponding to 55 to 75 GHz). The values are a little larger than the specification of about 50 GHz, but are considered to be within tolerance.

4 信号処理 (デコンボリューション)

4.1 アルゴリズム

デコンボリューションは測定ノイズに弱いという特徴がある。耐ノイズ性の高いデコンボリューションのアルゴリズムとしては、Tikhonov Regularization法⁸⁾⁹⁾やRichardson-Lucy法とVan-Cittert法を組み合わせた方法¹⁰⁾などが知られている。ここでは、演算時間を短くするため、特異値分解を用いない方法(Richardson-Lucy法とVan-Cittert法を組み合わせた方法)を用いることにした。この信号処理は2つのステップから構成されている。ステップ1では、Richardson-Lucy法を用いて、DWDM信号に含まれる波長成分を大まかに推定する。ステップ2では、ステップ1の結果を初期値として、Van-Cittert法

を用いて、含まれる波長成分とそのパワー値の推定精度を上げる。今回は、DSPへの実装は行わず、汎用パソコンを用いて信号処理を行った。

4.2 伝達関数

デコンボリューションを行うには、光学モジュールの伝達関数が必要になる。ここで準備する伝達関数は、波長刻み幅を6.25 GHzとした761波長分のデータである。一方、各波長の伝達関数は512画素のPDアレイにより測定するが、この512個の測定値は内挿処理により761個のデータに変換を行っている。よって、伝達関数マトリクスは761×761の大きさになる。

信号処理時間は伝達関数のサイズに依存し、サイズが大きくなると処理時間が長くなる。ここで、伝達関数サイズ761×761の条件で、試作したデコンボリューションの演算時間を推定した。20 GFLOPSの演算能力のあるDSP（例えば、TMS320C6655 [TI製]）を用いた場合、演算時間の推定値は12 msであった。ラインセンサーのデータ読み出し時間2.6 msと処理のオーバーヘッドを考慮しても、処理時間が50 ms以下にできることが見込める。

5 評価

Fig. 12に評価方法を示す。50 GHz間隔で隣接した3つの波長を同時入力し、両端の波長AとCの入力パワーは一定に保ち、中央の波長Bの入力パワーを徐々に下げていく。C-Bandの帯域全体について評価を行うため、帯域内の4つのグループで隣接3波を入力した。Table 2に、4つのグループにおける隣接3波の波長条件を示す。Table 3に評価条件を示す。評価1は、各波長の入力パワーを-12 dBmに設定し、波長Bの入力パワーを1 dB刻みで-22 dBmまで低下させた。評価2は、各波長の入力パワーを-18 dBmに設定し、波長Bの入力パワーを1 dB刻みで-28 dBmまで低下させた。評価3は、各波長の入力パワーを-22 dBmに設定し、波長Bの入力パワーを1 dB刻みで-32 dBmまで低下させた。

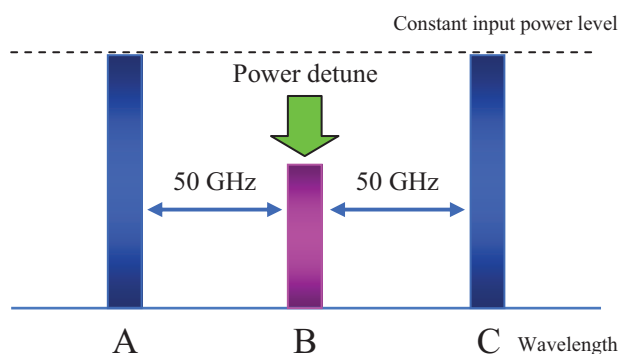


Fig. 12 Evaluation method using 3 neighboring wavelengths. Three adjacent wavelengths are input at 50 GHz intervals, after which only the power of the center wavelength is gradually lowered to a certain value. The detection value at each 1 dB step of the center value is evaluated.

Table 2 Four groups of 3 adjacent wavelengths.

	Frequency (THz)		
	A	B	C
Group 1	196.100	196.050	196.000
Group 2	194.700	194.650	194.600
Group 3	193.150	193.100	193.050
Group 4	191.750	191.700	191.650

Table 3 Evaluation conditions. The center wavelength B is gradually lowered by 1 dB steps.

Evaluation No.	Input power (dBm)		
	A	B	C
Evaluation 1	-12	-12 to -22 (1 dB steps)	-12
Evaluation 2	-18	-18 to -28 (1 dB steps)	-18
Evaluation 3	-22	-22 to -32 (1 dB steps)	-22

Table 4 Evaluation result.

Input power dynamic range	20 dB (from -32 to -12 dBm/ch)
Absolute power detection accuracy	± 0.6 dB (RMS)
Absolute frequency detection accuracy	± 2.7 GHz (RMS)
Detection processing time	< 50 ms (estimate)

Table 4に、入力パワーダイナミックレンジを20 dBとしたときの、波長検出精度とパワー検出精度の結果を示す。絶対パワー検出精度は±0.6 dB (RMS値)であり、絶対周波数検出精度は±2.7 GHz (RMS値)であった。絶対パワー検出精度は目標仕様をやや下回る結果であったが、絶対周波数検出精度は目標仕様を満たす結果を得た。

6 まとめ

波長モニターの光学モジュールと信号処理（デコンボリューション）をそれぞれ試作・評価し、以下のことを確認できた。

- (1) 分光素子にLVFを用いたポリクロ方式の光学モジュールを設計・試作し、試作機がほぼ設計とおりに行っていることを確認できた。
- (2) Richardson-Lucy法とVan-Cittert法を組み合わせたデコンボリューションを用いることで、汎用DSPにおいて全体の処理時間を50 ms以下にできる見込みを得た。
- (3) 波長モニター試作機の波長検出精度とパワー検出精度を評価したところ、入力パワーダイナミックレンジ20 dBにおいて、目標仕様をほぼ満たす結果を得た。

今後は、入力パワーダイナミックレンジ30dBにおいて、目標仕様を満たすように、光学モジュールの安定化とデコンボリューションのチューニングを行っていく。また、LVFの透過光半値幅を圧縮することも効果が大きいので、LVFの特性改善も検討課題である。

●参考文献

- 1) 平成24年度情報通信白書
- 2) Mei Li et al., Spectral Recovery for Low-Resolution Optical Spectrum Monitors, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL.20,NO.13, JULY 1, 2008, 1109-1111
- 3) D.C.Kiper et al., Optical Performance Monitoring, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL.22, NO.1 JANUARY 2004, 294-304
- 4) 君塚薫 他, WDM モニタ WD100, 横河技報, Vol.44 No.1 (2000), 3-6
- 5) 三瓶義広 他, WDM モニタ WD200, 横河技報, Vol.46 No.2 (2002), 47-50
- 6) 川越宣和 他, 分光測色計CM-1000, MINOLTA TECHNO REPORT No.5 1988, 97-105
- 7) Min Min et al., Design of A Hyperspectral Nitrogen Sensing System for Citrus, Written for presentation at the 2006 ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE Portland Convention Center Portland, Oregon 9-12 July 2006
- 8) N.C. Nguyen, A Note on Tikhonov Regularization of Linear Ill-Posed Problems, Massachusetts Institute of Technology, October 3, 2006
- 9) Mei Li et al., Regularization Techniques for Extracting OSNR From Low Resolution WDM Channel Monitors, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL.27, NO.9 MAY 1,2009, 1162-1171
- 10) P.Campisi et al., Blind Image Deconvolution, Theory and Applications, Taylor and Francis, 2007, 277-316