



光導波回路を用いた全光型信号処理フィルタ

笹山 浩二

NTT 交換システム研究所 〒180 武蔵野市緑町 3-9-11

(1992年1月31日受理)

All Optical Signal Processing Filter Using Planar Lightwave Circuit

Koji SASAYAMA

NTT Communication Switching Laboratories,
3-9-11, Midori-cho, Musashino 180

1. はじめに

光のもつ高速性・広帯域性・並列性等の優れた特長を活かした光信号処理技術は、将来の光通信・光コンピューター・画像処理システム等への広範囲な応用が期待され、研究が活発に行われている。

信号処理の基本演算の一つであるフーリエ変換は、光学の分野においても有用であり、特に結像・回折現象を記述するために大いに利用されている。「レンズの焦点面において得られるフーリエ変換の結果は物体と同じ性質の光の分布である」というように光学装置自体が物理的なフーリエ演算素子となっている例もある。しかし、ここで論じているフーリエ変換は空間周波数の概念を用いた空間的フーリエ変換であり、光学的情報の3次元的特性を利用するものである。一方、実周波数を対象にした時間的フーリエ変換を直接的に利用した光信号処理は、従来ほとんど研究されていない。

本稿では、時系列的に入力される広帯域な光信号の処理を目的とする、光導波路遅延線を用いた信号処理フィルタを紹介する。ここで述べるフィルタは、信号を周波数により選別するシステムすなわち周波数濾波器という狭義のフィルタではなく、時間軸領域の信号処理も含む線形なプロセッサという広義のフィルタを指している。

光導波路は数十 THz に及ぶ広帯域な伝送路であるから、このフィルタは通過周波数帯域の広い高速光信号の処理に有効である。また、汎用・実時間信号処理回路として開発されたので、光コンピューター・光交換等広い適用範囲がある。本稿ではその応用について解説する。

2. 全光型信号処理フィルタの構成と原理

2.1 信号処理フィルタの原理

本節では、全光型信号処理フィルタを解説する上での導入部として、電気工学の分野でよく知られている信号処理フィルタについて概説する。従来より周波数選択(狭義のフィルタリング)を行う回路として、線形素子(コイル・コンデンサー・抵抗)を用いた LCR フィルタがよく知られている。一方、演算記号素子(加算器・乗算器・単位時間遅延素子)を用いた信号処理フィルタも開発されており、これは設計・構成・機能変更が容易であるという LCR フィルタにはない特長をもっている。LCR フィルタの作用が微分方程式で表されるのに対し、信号処理フィルタの作用は差分方程式で表される。具体的には入力信号を $x(t)$ 、出力信号を $y(t)$ 、 a_k 、 b_k を定数、単位遅延時間を τ とするとき、入出力関係は以下の定数係数線形差分方程式

$$y(t) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k x(t-k\tau) - \sum_{k=1}^m b_k y(t-k\tau) \quad (1)$$

によって表現される。(1)式に含まれている演算は加算・乗算・単位時間遅延の3種類であり、図1に示すように演算記号素子の多段に接続することにより(1)式を表現できる。(1)式は、出力信号を得るのに過去の(時間遅延を施された)出力信号を帰還させて利用しているから、図1に示すフィルタを巡回型フィルタと呼ぶ。またこのフィルタは、インパルス応答が無限に続くので、IIR (infinite impulse response) フィルタとも呼ばれる。一方、

$$b_k = 0 \quad (k=1, \dots, m) \quad (2)$$

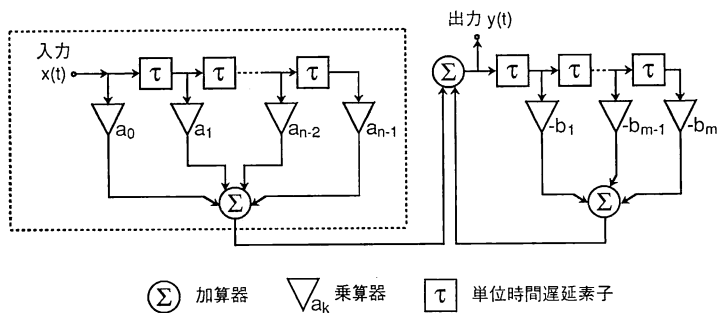


図 1 信号処理フィルタの構成 (点線内は非巡回型構成)

の場合、回路構成は図 1 の点線で囲まれた部分で示される。このフィルタを、信号が帰還せずに流れていくので非巡回型フィルタ、またはインパルス応答が有限なので FIR (finite impulse response) フィルタと呼ぶ。この回路構成の場合入力信号は、遅延線 (単位時間遅延素子の縦続接続) に対して横断的 (transversal) に設置されたタップと呼ばれる分岐枝に分配され、乗算器で係数を掛けられ、加算器で和をとられる。この場合は特にトランスバーサルフィルタと呼ぶ。

次に線形な離散時間系の伝達関数・周波数特性について説明する。(1)式の入出力信号は連続時間関数であるが、単位時間遅延素子を用いてサンプリングしているので、瞬間的には時間関数が離散的な数値系列で表される。そこで入出力信号を

$$x(t) = x(p\tau) \equiv x_p, \quad y(t) = y(p\tau) \equiv y_p \quad (3)$$

と離散数値系列で表現し、(1)式に離散時間系のフーリエ変換に対応する Z 変換¹⁾を施すと、

$$Y(z) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k X(z) z^{-k} - \sum_{k=1}^m b_k Y(z) z^{-k} \quad (4)$$

変形して

$$Y(z) = \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} a_k z^{-k} \left/ \left(1 + \sum_{k=1}^m b_k z^{-k} \right) \right. \right\} X(z) \equiv H(z) X(z) \quad (5)$$

を得る。ここで z^{-1} の有理関数 $H(z)$ を伝達関数と呼ぶ。周波数特性 $H(\omega)$ は、伝達関数 $H(z)$ の Z 平面における単位円上の値、すなわち

$$H(\omega) \equiv H(\exp(j\omega\tau)) \quad (6)$$

で与えられる。j は虚数単位を示す。このことから離散時間系の周波数特性は、周期 $2\pi/\tau$ の周期関数であることがわかる。今、入力信号を単位インパルス (デルタ関数)

$$x_0 = 1, \quad x_p = 0 \quad (p \neq 0) \quad (7)$$

とすると $X(z) = 1$ であるから、応答 $Y(z)$ は $H(z)$ に等しくなり、出力信号 $y(t)$ は伝達関数 $H(z)$ の逆 Z 変

換 h_p に等しい。これをインパルス応答と呼ぶ。

最後に IIR フィルタと FIR フィルタの機能の違いを定性的に述べる。FIR フィルタは完全な直線位相 (定遅延) 特性を実現できるという利点がある反面、急峻な遮断特性を実現するには、IIR フィルタに比べてきわめて高い次数を要する。一方 IIR フィルタは比較的低次で急峻特性を実現できるほか、全域通過特性 (振幅周波数特性が全域にわたって一定値のまま、位相のみが回転する特性) を実現できるという利点を持つ。どちらを選ぶかは、要求する周波数特性に応じて決定する。

2.2 伝達関数の光学的表現

本節では、伝達関数を光学的に表現したコヒーレント光トランスバーサルフィルタ^{2,3)}の構成を説明する。単位遅延時間 τ 、タップ数 n の光トランスバーサルフィルタの回路構成を図 2 に示す。 τ を短くすることにより時間軸上の分解能が高い、すなわち繰り返し周波数特性の帯域が広いフィルタが得られ、 n を多くとることにより

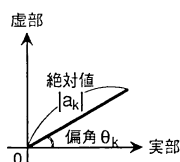
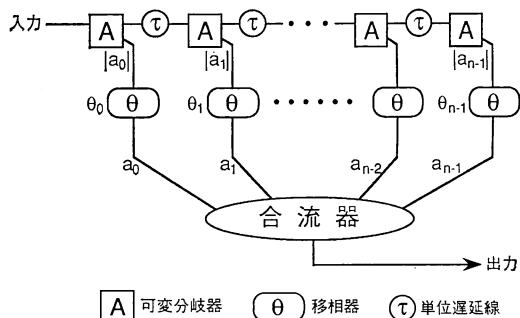
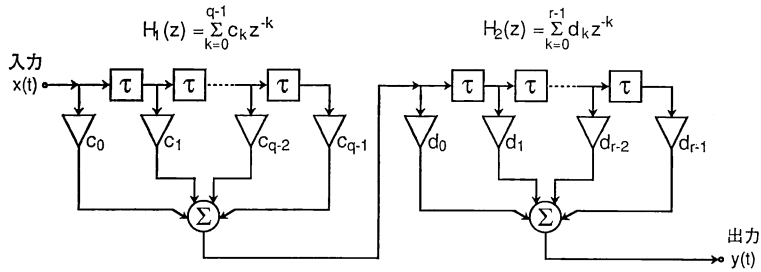


図 2 コヒーレント光トランスバーサルフィルタの構成



$$\text{伝達関数: } H(z) = H_1(z) \cdot H_2(z)$$

図3 非巡回型フィルタの縦続型構成

周波数軸上の分解能が高い、すなわち急峻な周波数特性を持つフィルタが得られる。遅延線に入力された光信号は、遅延線に沿って等間隔に配置されたタップに分配されて所定の遅延を施され、各々重み付けされ、コヒーレントに結合される。タッピング・重み付け・結合は各々時間遅延・乗算・加算に対応している。各処理要素の機能を光部品で表現するために、遅延は導波路の遅延線、重み付けは可変分岐器・移相器、結合は合流器を用いている。

タップに分配された信号に対する重み付け係数 a_k (タップ係数) の表現を具体的に説明する。各タップ係数の絶対値は、可変分岐器を用いて任意の比率に分配された光の電界振幅 $|a_k|$ で表現する。またタップ係数の偏角は、移相器による光の電界位相のシフト量 θ_k で表現する。入力信号を $x(t)$ 、出力信号を $y(t)$ 、光のキャリア周波数を ω としたときの振幅変調光の入出力関係は次式で表される。

$$y(t)\exp(j\omega t) = \sum_{k=0}^{n-1} |a_k| x(t - k\tau + \theta_k/\omega) \cdot \exp\{j\omega(t - k\tau + \theta_k/\omega)\} \quad (8)$$

ここで、 $\omega\tau = 2m\pi$ (m は整数) となるように単位遅延時間 τ を設定し、また各タップごとに設定される移相量 $\theta_k \ll \omega\tau$ が成り立つとき、

$$y(t)\exp(j\omega t) = \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} |a_k| \exp(j\theta_k) x(t - k\tau \{1 - \theta_k/(k\omega\tau)\}) \right\} \cdot \exp(j\omega t) \\ \cong \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} |a_k| \exp(j\theta_k) x(t - k\tau) \right\} \exp(j\omega t) \quad (9)$$

となり、信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ の入出力関係として

$$y(t) \cong \sum_{k=0}^{n-1} |a_k| \exp(j\theta_k) x(t - k\tau) \quad (10)$$

が得られる。 $|a_k| \exp(j\theta_k)$ は、図2に示すように絶対値 $|a_k|$ 、偏角 θ_k の複素数である。このようにして、タッ

プ係数として複素数が表現でき、光の受動素子では直接に実現できない乗算を等価的に表現している。

光波の特性を利用することによりタップ係数として複素数表現が可能になると、自由度が増えるためフィルタの周波数特性の設計が容易になる。また高次元の非巡回型フィルタは、伝達関数を因数分解し、その各因数を直接的に表現した低次元のトランスバーサルフィルタを多段に継続接続することにより実現できる。その場合、タップ係数として複素数が使えると任意の因数分解が可能のため、図3で示すフィルタの多段接続が任意に行える。そのためタップ数を増やした高次元のフィルタを容易に実現できる。その他にも複素演算を活かした新たなフィルタ機能実現の可能性もある。

3. コヒーレント光トランスバーサルフィルタの作製

3.1 設計仕様

数百 THz に及ぶ高周波の光波の位相を安定に制御することは、光を導く方法として光ファイバを用いる、あるいは光信号を空間伝搬させるという方法では不可能である。この問題を解決する有力な方法として、平面基板上に光導波路を集積して平面光波回路 (PLC) を構成することが考えられる。光ファイバ製造技術と LSI 微細加工技術を融合することによりシリコン基板上に低損失な石英系光導波路を作製する PLC 技術を用いて、光トランスバーサルフィルタを構成した。16タップのフィルタ回路を図4に示す。可変分岐器は、二つの方向性結合器と半波長だけ長さの異なる2本の導波路と一つの薄膜ヒーターで構成されたマッハツェンダー干渉計である^{4,5)}。片方の導波路上に装荷されたヒーターは熱光学効果により、加熱された導波路を通る光信号の位相をシフトさせる。ヒーターによる位相シフト量をゼロから π まで変えるのに応じて、出力側の方向性結合器のタッピ

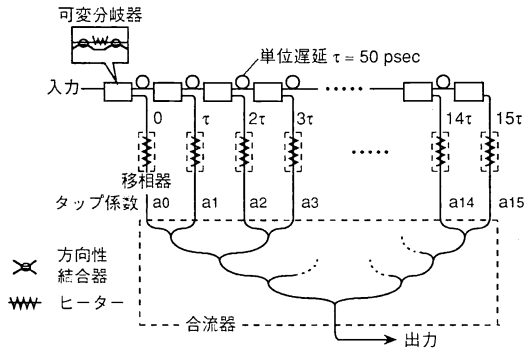


図 4 平面光波回路技術を用いて作製された 16 タップフィルタの回路構成

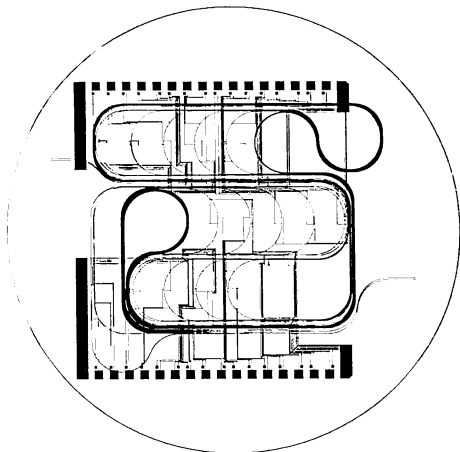


図 5 3 インチシリコン基板上に作製された 16 タップフィルタの導波路配置図 (左上が入力端, 右下が出力端)

ングポートにゼロから 1 まで任意の分岐比の光信号を出力できる。移相器は、同様に導波路上に薄膜ヒーターを装荷して実現する。この移相器はタップ係数の偏角を決定するだけでなく、可変分岐器や合流器における波長オーダーの光路長のずれを補償する働きもしている。遅延線は、単位遅延長として 1 cm, すなわち単位遅延時間として $\tau=50$ ps に設定した。よってフィルタの周波数特性は、光の周波数領域で $\tau^{-1}=20$ GHz を周期として同じ形を繰り返す。合流器は、Y 型合流器を図に示すようにツリー状に組み合わせて構成している。

3 インチのシリコン基板上に作製された 16 タップフィルタの導波路配置を図 5 に示す。PLC 集積技術によって、遅延線の単位長が短く、長さの精度が高く、タップ数が多いフィルタが実現できる。

3.2 作製技術

PLC 構成の基本材料である石英系光導波路の構造を

説明する⁶⁾。シリコン基板上に厚さ 50 μm 程度の石英ガラスクラッド層が形成されており、その中心付近に酸化ゲルマニウムがドーピングされた光導波路コア部が埋め込まれている。コア部の寸法は、単一モード光ファイバのコア直径に整合するよう設計されている。シリコン基板上の光導波路パターンをいろいろ工夫することによりさまざまな平面光波回路を実現することができる。

上記の石英系光導波路を作製するために、光ファイバ製法を応用した火炎加水分解堆積 (FHD: flame hydrolysis deposition) によるガラス膜形成と、LSI 微細加工技術である反応性イオンエッチング (RIE: reactive ion etching) とを組み合わせている (図 6)。まず、光ファイバ作製時と同じ気体状原料を酸水素炎中で加水分解して得られるガラス微粒子を、シリコンウェハ上に吹き付け堆積させる (a)。続いて、ガラス微粒子膜を電気炉中で高温に加熱し、シリコン基板の上を覆う透明なガラス膜とする (b)。ガラス微粒子の組成 (ドーパント濃度) を変えることにより下部クラッド層、コア層の 2 層構造の光導波膜としている。次に、反応性イオンエッチングによりコア層の不要部分を除去してリッジ状のコア部を残す (c)。最後にコア部を覆うように上部クラッド層を再び FHD 工程で形成し、光導波路ができあがる (d, e)。

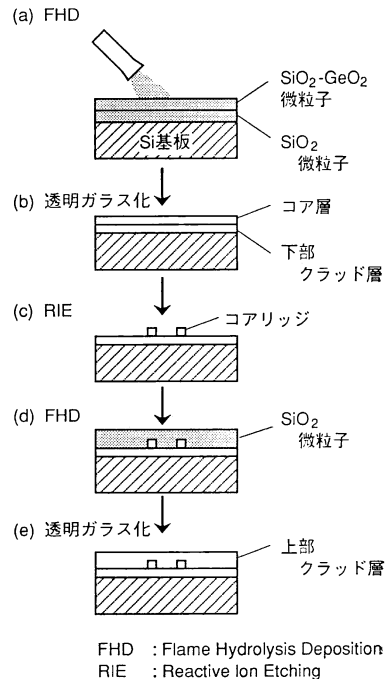


図 6 石英系光導波路作製工程

FHD : Flame Hydrolysis Deposition
RIE : Reactive Ion Etching

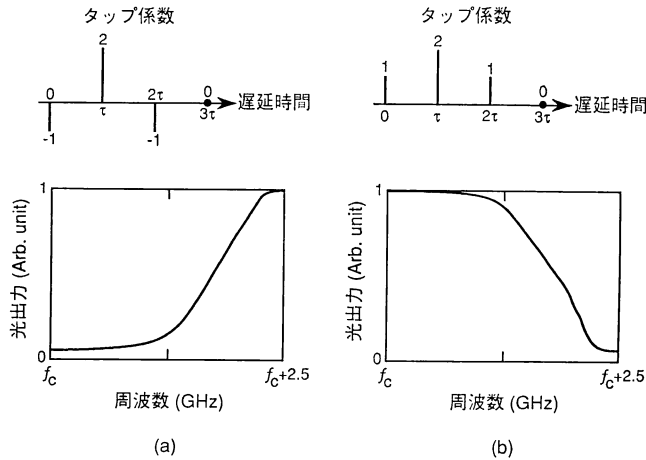


図7 高域・低域フィルタの周波数特性
 (a)高域フィルタ, (b)低域フィルタ (単位遅延時間 $\tau=200$ ps, タップ数 $n=4$, f_c は光のキャリア周波数を示す).

導波路の光伝搬損失は、パターン形状にも依存するが、直線部では 0.1dB/cm 以下であり、平面基板上の光導波路としては最も低損失な部類に属する。単一モード光ファイバとの接続損も 0.5dB/point 以下が可能である。

4. 応用領域と実現例

ここで紹介しているコヒーレント光トランスバーサルフィルタは、汎用な信号処理フィルタとして開発されているため、周波数・時間双方の領域で広い応用範囲がある。処理対象の信号帯域は、従来の電気の DSP (digital signal processor) がクロック速度で制限されているのに比べ、離散的にタッピングしているとはいえアナログ的に処理しているため原理的に制限はない。そのため光の周波数領域の広帯域な信号を実時間で処理できる。実際は、用いる光部品 (方向性結合器等) の動作帯域で制限されるが、事実上 THz の信号まで処理可能である。本節では、具体的なフィルタの応用例を紹介し、実際の実験結果を報告する。

4.1 周波数領域における信号処理

周波数選択素子という狭義のフィルタが代表的応用例である。図7に高域フィルタ, 低域フィルタの周波数特性を示す。これらは、 $\tau=200$ ps, $n=4$ のフィルタを用い、図に示すタップ係数を設定して実現した。これらを用いて、2.4 GHz と 150 MHz の周波数多重信号を分離する動作実験を行った。図8に示すように、光の周波数領域で多重された変調信号が、フィルタを光のまま光速で通過した後、高域フィルタで 2.4 GHz の高周波成分

が、低域フィルタで 150 MHz の低周波成分が、それぞれ抽出されていることがわかる。

係数を設定して所望の周波数特性が得られ、その特性を切り替えられることに着目して、システム応用例として、周波数分割型ハイウェイスイッチ用のマルチチャネルセレクタ⁷⁾を紹介する。光周波数多重交換システムに

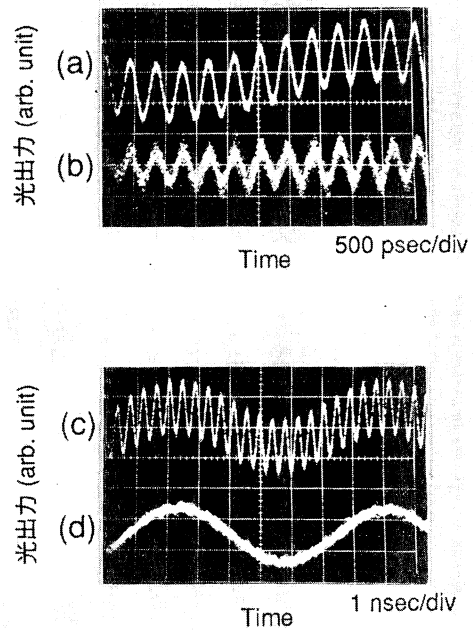


図8 周波数多重信号の分離動作
 上図 高域フィルタによる 2.4 GHz 信号の濾波
 (a)入力多重信号波形, (b)出力濾波波形
 下図 低域フィルタによる 150 MHz 信号の濾波
 (c)入力多重信号波形, (d)出力濾波波形

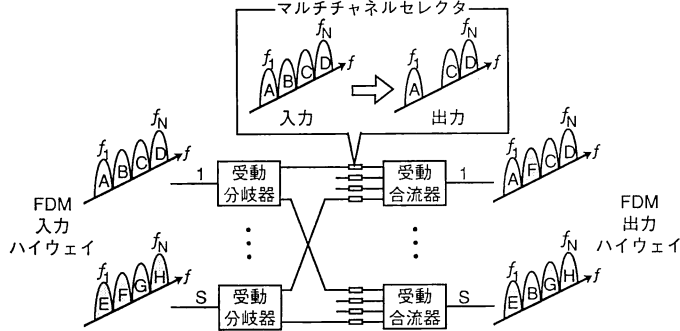


図 9 FDM マルチチャンネルセレクタを用いた周波数分割型ハイウェイスイッチの構成

おいては、周波数スイッチ（変換素子）、周波数分離・多重素子、周波数分割型ハイウェイスイッチが必要である。ここでは周波数チャンネルごとに空間スイッチングを行う周波数分割型ハイウェイスイッチの実現を目指して、複数の周波数分割多重（FDM）信号から任意の複数チャンネルを同時に選択できる FDM マルチチャンネルセレクタへの適用を説明する。図 9 にシステム応用例を示す。受動分岐器、受動合流器で構成される $S \times S$ のマトリクススイッチにおける S^2 本の FDM リンクに設置されたマルチチャンネルセレクタは各々、 N 波多重された光信号から所定のハイウェイに出力される周波数チャンネルのみを選択する。この構成は、論理的に N 枚の $S \times S$ 非閉塞スイッチマトリクスと等価である。16 タップフィルタを用いて、2.5 GHz 間隔・8 チャンネルのマルチチャンネルセレクタを実現し、3 チャンネルを選択する基本動作を確認した。測定したセレクタの周波数特性と、離散フーリエ変換で計算された理論曲線を図 10 に示す。周波数チャンネル数・通過信号帯域は、各々タップ数・単位遅延時間に依存しているので、将来より多チャンネルの広帯域信号用のセレクタが実現できる。

4.2 時間領域における信号処理

周波数領域と時間領域はフーリエ変換の関係で結ばれているので、同じ特性のフィルタでも使い方（見方）によって異なる応用が考えられる。図 7 で示した HPF は時間領域では、微分回路としても動作する。この HPF に 50 Mbit/s の矩形波を入力した時の入出力波形を図 11 に示す。入力波形の立ち上り、立ち下りで鋭いピークを持つ微分波形が得られていることがわかる。

システム応用例としては、伝送路上のパルス波形の遅延ひずみを補償する等化器が考えられる。これは、伝送路の持つ周波数特性を打ち消して無ひずみの伝送路を得るためのものである。タップ係数を適応的に変えて伝送路の伝達関数の逆特性を作り出す自動等化器が、ディジ

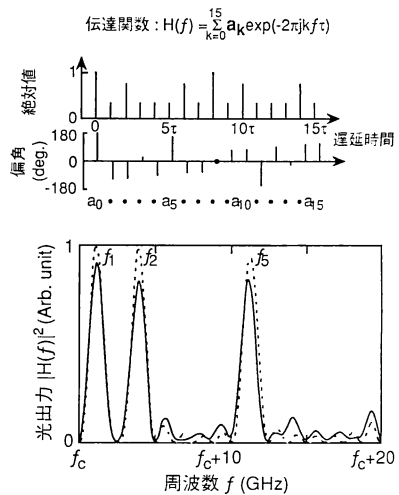


図 10 16 タップフィルタを用いた 8-ch マルチチャンネルセレクタの周波数特性
周波数多重された $f_1 \sim f_8$ の 8 チャンネルから f_1, f_2, f_5 の 3 チャンネルを選択する（実線：測定された周波数特性、破線：図中の伝達関数より計算される理論曲線）。

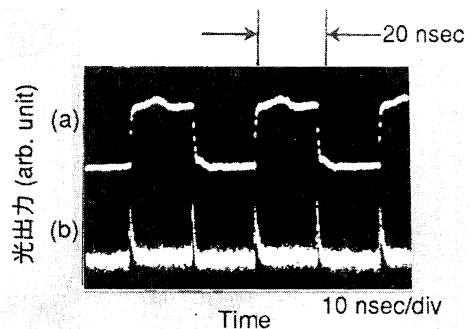


図 11 高域フィルタを用いた微分回路の動作
(a) 50 Mbit/s 矩形入力波形、
(b) 微分出力波形

タルフィルタを用いて実用化されている。光通信においても、長距離伝送時の信号劣化の原因である光ファイバの分散を補償する等化器が必要である。コヒーレント検波により、電気信号に変換してから分散補償する方法も提案されているが、将来の全光通信網の実現に向け、光トランスバーサルフィルタを用いた全光型等化器の実現も可能である。

最後に、複素演算機能を活かした光 FFT 回路⁸⁾を紹介する。これは、時系列的に入力される光信号の周波数成分を所定の出力端子に出力するものである。8 出力の光 FFT 回路の構成を図 12 に示す。分岐器と遅延線を用いて等間隔に等分配された入力信号 $t_0 \sim t_7$ は、次式の離散フーリエ変換により出力スペクトル信号 $f_0 \sim f_7$ に変換される。

$$f_k = \sum_{l=0}^7 W^{kl} t_l \quad (k=0, \dots, 7) \quad (11)$$

ここで W はひねり因子と呼ばれるもので、次式で示すように複素信号の位相回転を表現する。

$$W = \exp(-\pi j/4) \quad (12)$$

(11) 式は、FFT の基本演算である 2 入力 2 出力のバ

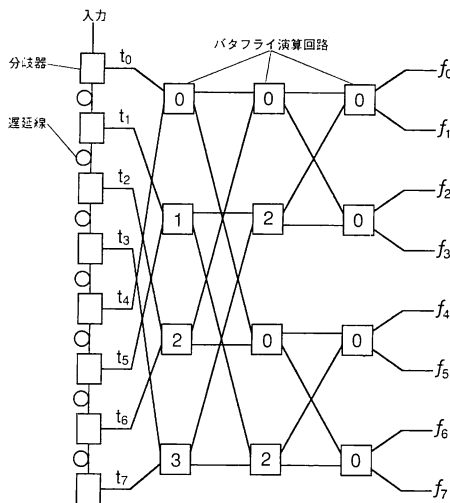


図 12 8 出力の光 FFT 回路の構成

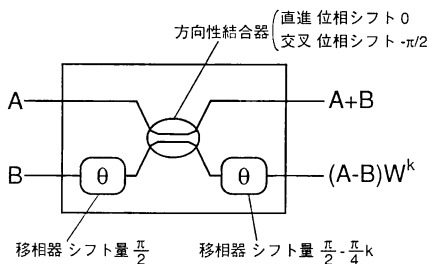


図 13 バタフライ演算回路

フライ演算回路を、図 12 に示すように多段に組み合わせて表現できる。図中「 k 」($k=0, 1, 2, 3$) の表示のあるバタフライ演算回路は、図 13 に示すように入力信号 A, B に対して、 $A+B, (A-B)W^k$ を出力する。信号の和・差・位相回転という操作は前章で解説した光受動部品 (方向性結合器・移相器) で実現可能である。電気での FFT 回路と異なり、光遅延線の長さを短くしてサンプリングレートを上げられるので、通過信号帯域の上限は THz に達する。そのため広帯域な光信号の実時間スペクトル解析が可能である。

5. おわりに

光導波回路を用いた全光型信号処理フィルタを紹介した。光の波としての性質を活かして、任意の複素タップ係数の表現を可能にし、そのフーリエ変換で得られる周波数特性を自由に設計できる。フィルタ回路を構成する可変分岐器・移相器等の光受動部品を、シリコン基板上に石英系光導波路を用いてモノリシック集積し、安定な位相制御を可能にしている。汎用な信号処理回路として開発されているので、周波数選択素子・微分回路などの基本機能回路から、FDM マルチチャンネルセレクタ・全光型等化器・光 FFT 回路などのシステム応用まで幅広い適用範囲が考えられる。今後、集積技術の向上により多タップのフィルタを実現して、実用的なデバイスとして各種システムへの適用が期待される。

文 献

- 1) 鎌田一雄：“離散時間信号とシステム”，デジタル信号処理の基礎，辻井重男監修 (電子情報通信学会，1988) pp. 37-42.
- 2) K. Sasayama, M. Okuno and K. Habara: “Coherent optical transversal filter using silica-based single-mode waveguides,” *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1508-1509.
- 3) K. Sasayama, M. Okuno and K. Habara: “Coherent optical transversal filter using silica-based waveguides for high-speed signal processing,” *J. Lightwave Technol.*, **9** (1991) 1225-1230.
- 4) N. Takato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba and M. Kawachi: “Silica-based single-mode waveguides on silicon and their application to guided-wave optical interferometers,” *J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 1003-1009.
- 5) M. Okuno, A. Sugita, Y. Ohmori, K. Sasayama and M. Kawachi: “Integrated-optic tunable taps and their application to large-scale transversal filters,” *Lasers and Electro-Optics Society, OE6-2* (1991).
- 6) 河内正夫：“プレーナ光波回路技術”，NTT R&D, **40** (1991) 199-204.
- 7) K. Sasayama, M. Okuno and K. Habara: “Frequency-division-multiplexing multi-channel selector using a coherent optical transversal filter,” *Conference on Optical Fiber Communication, TuC2* (1992).
- 8) 笹山浩二，葉原敬士：特願平 2-36279.