

# 立ち上がりの鋭い方形通過特性光フィルタ

Flat Passband Binomial Optical Filter

黄 登山\*・藤井陽一\*

Dengshan HUANG and Yoichi FUJII

## 1. はじめに

光 FDM, WDM 技術は、大容量伝送技術として期待されている。その中の、キーデバイスとしての光フィルタは、マッハツェンダ型光フィルタとその改良型が目目されている<sup>1)~3)</sup>。

しかし、普通のマッハツェンダ (MZ) 型光フィルタの通過特性は、正弦関数状である。これを多段縦続接続すると (CMZ (Cascaded coupler Mach-Zehnder) フィルタと略する)、狭帯域化できるが、阻止特性を低くすることができない。

この阻止特性が低くなるように、多数縦続させたファイバカップラの、各カップラの結合長さがすべて同じ、つまり、均一分布ではなくて、たとえば、二項分布等をさせると言う提案が目目されている<sup>2)</sup>。

しかし、通過帯域幅は広くなる、とくに、その立ち上がり特性が悪くなる。通過帯域幅を狭くするためには、縦続段数を、大きくしなければならない。

しかし、光 FDM, WDM システムでは、図 1 (a) に示すように、鋭い立ち上がりの方形通過特性を持ち、周波数周期を変え易い光フィルタが便利である。

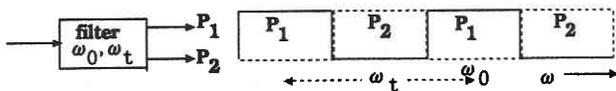


図1 方形通過特性フィルタ  
ω<sub>t</sub>: 周波数周期 ω<sub>o</sub>: 中心周波数

このような鋭い立ち上がりの方形通過特性フィルタを設計するため、結合長さが二項式分布になるカップラを用いて、結合部に、さらに遅延ループを採用し (CMZR (Cascaded coupler Mach-Zehnder with a ring Resonator) フィルタと略する)、これによる共振的周波数特性を利用

\*東京大学生産技術研究所 第3部

して、立ち上がりの鋭い方形通過特性光フィルタを提案し、その特性を解析した。

## 2. 原 理

図 2 に、今回提案する光フィルタの基本構造を示す。i 番目のカップラの振幅通過行列 T は、次のようになる<sup>2)</sup>。

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \kappa L_i & j \sin \kappa L_i \\ -j \sin \kappa L_i & \cos \kappa L_i \end{bmatrix} \quad i=1, 2, \dots, N+1 \quad (1)$$

但し、κ は結合係数、L<sub>i</sub> は、i 番目のファイバカップラの結合長さである。

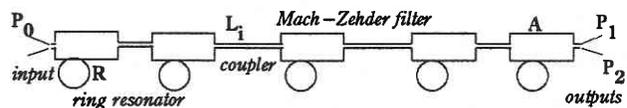


図2 多段縦続遅延ループ・マッハツェンダ型 (CMZR) 光フィルタの構造  
L<sub>i</sub>: i 番目のカップラの結合長さ  
A: マッハツェンダ干渉計の長辺の長さ  
R: 共振ループの長さ

図2 多段縦続遅延ループ・マッハツェンダ型 (CMZR) 光フィルタの構造

L<sub>i</sub>: i 番目のカップラの結合長さ  
A: マッハツェンダ干渉計の長辺の長さ  
R: 共振ループの長さ

論文<sup>2)</sup>によると、このフィルタの総結合長さ L<sub>tot</sub> は、出力のところに最大値をとるために次の式に満足しなければならない:

$$\kappa L_{\text{tot}} = \kappa \sum L_i = \pi / 2 \quad (2)$$

各カプラの結合部長さ  $L_i$  の分布係数  $w_i$  は、いろいろ選択することが可能である<sup>2)</sup>。

例えば、( $i=1, 2, \dots, N+1$ )

$$\text{均一分布: } w_i = 1 \quad (3)$$

$$\text{二項式分布: } w_i = N! / (i-1)! (N-i+1)! \quad (4)$$

$$\text{正弦波分布: } w_i = \cos(\pi a (i - (N+2)/2) / N) \quad (5)$$

とすると、 $i$  番目のカプラの結合部長さ  $L_i$  は次の式で表される。

$$L_i = w_i L_i / \sum w_i \quad (6)$$

この分布形状によって、フィルタの立ち上がり特性と阻止特性を変えることができる。

論文<sup>2)</sup>に、各種の分布に対して、フィルタ通過帯域特性および阻止特性の比較がおこなわれている。その結論によると、通過帯域幅の狭帯域化と阻止特性の改善はトレードオフの関係にあるが、その中でも、二項式分布の阻止特性が最良であることが明らかにされている。

従って、ここでは、二項式分布だけを取りあげることにする。

このフィルタの設計目的は、方形通過特性を持ち、周期を容易に変えられるようにすることにある。

このフィルタは、二項式分布多段縦続接続マッハツェーングダフィルタを基本とし、マッハツェーングダ干渉計の1辺に、共振ループを用い、その共振点を適当に設計して、方形の周波数通過特性を得るものである。

この方法によると、通過帯域幅が広くなるという問題がなくなる。その理由は、通過帯域幅が基本的に共振ループの共振点から決まるからである。この場合、マッハツェーングダ干渉計両辺の振幅通過行列は、次のようになる。

$$T = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta A) & 0 \\ 0 & (u - \exp(-j\beta R)) / (1 - u \exp(-j\beta R)) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\beta$  は光の伝搬定数、 $A$  はマッハツェーングダ干渉計の長辺の長さである。

$A$  から、フィルタの周波数周期が次の式によって、求められる：

$$\omega_t = 2\pi c / A \quad (8)$$

$u$  は共振ループの振幅結合係数である、

$$u = \cos(\kappa L) \quad (9)$$

$L$  は、共振カプラの結合長さである。

ここで、共振ループ長さ  $R$  は、マッハツェーングダ干渉計の最大透過周波数時に、最大透過率が得られる周波数

$$\omega = \omega_0 \pm \omega_t / 4 \quad (10)$$

の時、共振するように、下記のように選択する。

$$R = 2A - 2\pi / (n\omega_0) / 4 \quad (11)$$

第1項は、共振周波数が周波域周期  $\omega_t$  の2分の1になるように、選択した。

第2項は、共振が  $\omega_0 \pm \omega_t / 4$  に起こると100%通過率が  $\omega_0$  になるように、選択した。但し、 $\omega_0$  は信号中心周波数で、 $n$  はファイバの屈折率である。

そして、 $N$  段光 CMZR フィルタの振幅通過行列は、次の式で表される。

$$\begin{bmatrix} a1_{\text{out}} \\ a2_{\text{out}} \end{bmatrix} = T(N+1) \dots T(1) \begin{bmatrix} a1_{\text{in}} \\ a2_{\text{in}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

上記の議論から、カプラ（共振ループのカプラを含まない）の個数と遅延ループ部の振幅結合係数  $u$  が、重要なパラメータとなることがわかる。 $u$  の値と縦続接続の段数  $N$  を変えて、以下の計算をおこなった。

### 3. 計 算 例

計算に用いたパラメータの値は  $\lambda_0 = 1.5 \mu\text{m}$ 、 $A = 15\text{mm}$  とした。

図3に  $N (=5)$  を固定して、 $u$  を変化した時の二項式分布効果を示す。

フィルタ通過帯域幅が、フィルタ周期の半分（方形通過特性）で、阻止特性が  $-50\text{dB}$  ぐらいである。しかし、 $u$  が増加すると、共振が強くなるので、立ち上がり特性が鋭くなるとともに、通過帯域の変動も大きくなる。

$u < 0.5$  時の変動は、大体  $0.1\text{dB}$  以下で、 $u = 0.8$  とすると、変動が  $2\text{dB}$  以上になる。

図4に  $u (=0.5)$  を固定して、 $N$  を変化した時の二項式分布効果を示す。フィルタ通過帯域幅が、フィルタ周期の半分（方形通過特性）で、阻止特性が  $-50\text{dB}$  ぐらいである。

$N$  が増加すると、立ち上がり特性がすこし鋭くなるとともに、通過帯域の変動も少しある。

研 究 速 報

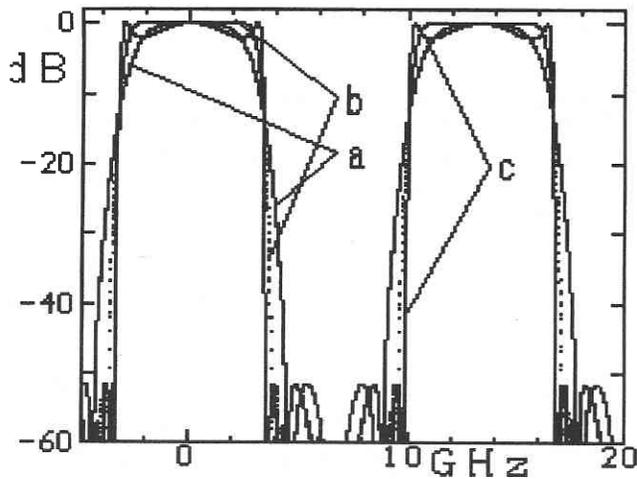


図3 二項式分布 CMZR フィルタの通過特性  
 $N=5$ ,  $u=0.3$  (a),  $0.5$  (b),  $0.8$  (c)  
 共振ループの振幅結合係数  $u$  の影響が大きい  
 $u$  が増加すると、立ち上がり特性が鋭くなる  
 $u$  が増加すると、通過帯域の変動が大きくなる

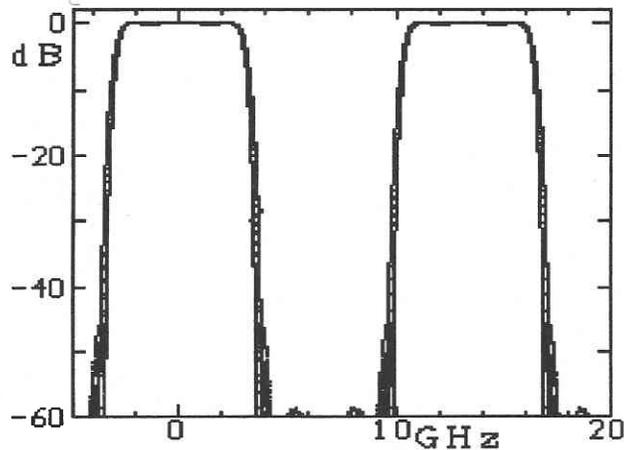


図4 二項式分布 CMZR フィルタの通過特性  $u=0.5$ ,  $N=3$  (a),  
 $5$  (b),  $8$  (c) 段数  $N$  の変化の影響が少ない

$N > 5$  の立ち上がり特性が  $N=5$  より、改善は少ない。

以上を計算したところ、遅延ループの挿入によって、鋭い方形通過特性を持っている光フィルタを設計することができることを示した。これに関して次の結論を得た。

●共振ループ振幅結合係数  $u=0.3$  以上にすると、フィルタ通過帯域幅を、共振ループの共振点から決めることができる。その共振点は、フィルタの中心周波数から周波数周期の4分の1のところなので、方形通過特性ができる。

● $u$  が、大きくなると、立ち上がり特性が、鋭くなるとともに、通過帯域幅における透過率の変動も大きくなる。

● $u$  が小さくなると通過帯域における透過率の変動が、徐々になくなるとともに、立ち上がり特性も鈍くなる。

●段数  $N$  が増加すると、立ち上がり特性が少し鋭くなるとともに、通過帯域における透過率の変動も少し大きくなる。

これらから、 $N=2\sim 6$ ,  $u=0.3\sim 0.5$  の時、方形通過特性と、通過帯域における透過率の変動が、 $0.1$  dB 以下、阻止特性が  $-45$  dB 以下にすることが可能であるということが出来る。

ほかの分布についても、いろいろ計算したが、結果は、二項式分布より優れたものはなかった。

4. ま と め

縦続マッハツェンダフィルタを基本とし、そのマッハツェンダ干渉計の短辺に、さらに共振ループを用いて、その共振点を適当に設計して、方形の周波数通過特性の光フィルタができることを示した。

本提案の光フィルタを利用して、二つの応用システムを提案した。このフィルタは、光 WDM システムへの応用が期待される。  
 (1995年12月5日受理)

参 考 文 献

- 1) H. A. Haus and Y. Lai, "Narrow-band optical channel-dropping filter", J. Lightwave Technol., Vol. 10, pp 57-62, 1992.
- 2) M. Kuznetsov, "Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for Wavelength-Division-Multiplexed optical systems", J. Lightwave Technol., Vol.12, pp 226-230, 1994.
- 3) H. Venghaus, et al, "Meander-type wavelength demultiplexer with weighted coupling", Appl. Phys. Lett. 61 (17), 26 October 1992.