

任意屈折率分布を持つ光ファイバの分散特性解析

— 群遅延時間と全分散の高精度解析法について —

An Analysis for Characteristics of Optical Fiber with an Arbitrary Refractive Index Profile

- High Accuracy Analysis Method for Group Delay Time and Total Dispersion -

○鈴木祐介¹, 古川慎一²*Yusuke Suzuki¹, Shin-ichi Furukawa²

Abstract: We propose a new method to analytically calculate group delay time and total dispersion of optical fibers with an arbitrary refractive index profile. This is a method (VMD-DFD) combined the differential formula of determinant (DFD) with the vector multilayer division method (VMD). VMD-DFD can be obtained exact value of group delay time τ or total dispersion S when a refractive index profile is consisted of only homogeneous refractive index such as ideal W-type fiber. For refractive index profiles of α -power profile with trench and W-type using as an element of multi-core fibers, accuracy of τ or S computed using VMD-DFD is discussed by comparing to those computed using a high-precision method which is proposed in our earlier work.

1. まえがき

光通信システムの超大容量化を実現するため、クラッド内にコアを複数配置するマルチコア光ファイバが種々検討されている^{[1][3]}. マルチコア光ファイバの超大容量化には、構成要素となる 1 本のコア (以下、要素ファイバと呼ぶ) 当たりの伝送容量を大きくするように設計することが望ましい. 要素ファイバには、単一モードファイバとモード多重伝送のための数モードファイバ^{[3][4]}がある. 大容量化の実現に向けて、単一モードファイバは、使用波長域における全分散を小さく設計する必要があり、MIMO 技術を採用する数モードファイバは、モード間の群遅延時間差 (モード間遅延差) を小さく設計しなければならない. 従って、マルチコア光ファイバの要素ファイバ設計では、モード間遅延差や全分散を精度よく解析することが重要となる.

本研究では、群遅延時間 $\tau [(1/c) \cdot (d\beta/dk)]$ と全分散 $S [-d\tau/d\lambda = k^2 / (2\pi c) \cdot (d^2\beta/dk^2)]$ の解析法としてベクトル多層分割法 (VMD: vector multilayer division) に行列式の微分公式 (DFD: differential formula of determinant) を組み合わせた新しい手法 (VMD-DFD 法) を提案する. VMD-DFD 法には次の利点がある.

- (1) 任意屈折率分布に適用可能である.
- (2) τ と S の微分をすべて解析的に求めるため、数値微分による誤差を生じない.
- (3) 用いる近似は多層分割法の分割数のみである.
- (4) 屈折率分布がすべて均質な屈折率で構成される場合、分割数に関係なく厳密解が得られる.

数値解析では、要素ファイバとして代表的な屈折率分布について、VMD-DFD 法から求めた τ と S の検討を行った.

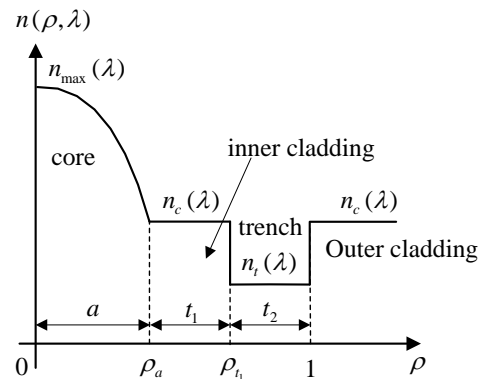


Fig. 1. Refractive index profile examined VMD-DFD.

2. 数値解析

図 1 に示した屈折率分布を持つ光ファイバについて、群遅延時間 τ と全分散 S の計算に VMD-DFD 法 (以下、VMD と略す. 定式化の詳細については文献 [5] 参照) を適用し、精度の検討を行った. 図 1 の屈折率分布は次式で表されるものとする.

$$\text{コア: } n(\rho, \lambda) = n_c(\lambda) [1 + \Delta_a(\lambda) \{1 - (\rho/\rho_a)^\alpha\}] \quad (1)$$

$$\text{中間クラッド: } n(\rho, \lambda) = n_c(\lambda) \quad (2)$$

$$\text{トレンチ: } n(\rho, \lambda) = n_c(\lambda) [1 + \Delta_t(\lambda)] \quad (3)$$

$$\text{外部クラッド: } n(\rho, \lambda) = n_c(\lambda) \quad (4)$$

式(1)において $\alpha = \infty$ の場合はステップ型コアに相当する. $\Delta_a(\lambda) (\triangleq [n_{\max}(\lambda) - n_c(\lambda)]/n_c(\lambda))$ はコアと外部クラッドとの比屈折率差, $\Delta_t(\lambda) (\triangleq [n_t(\lambda) - n_c(\lambda)]/n_c(\lambda))$ はトレンチと外部クラッドとの比屈折率差である. 外部クラッドの屈折率 $n_c(\lambda)$ には SiO_2 に対する Sellmeier の 3 項式^[6]を用いた. $n_{\max}(\lambda)$ は GeO_2 を添加したコアの屈折率の最大値, $n_t(\lambda)$ は F を添加したト

レンチの屈折率である^[7]。以下では、 α 乗型コアを多層近似する場合、 τ の外挿した真値との相対誤差が 10^{-8} 以下となる分割数を用いて計算している。具体的な数値解析では、VMD から求めた τ と S の値を検討するため、文献[8]で筆者らの提案した差分解析法による高精度解析法（VRK-DFD：vector analysis applied Runge-Kutta method and differential formula of determinant, 以下 VRK と呼ぶ）との比較を行った。

2. 1 群遅延特性

図2は、 α 乗型コアとトレンチで構成された屈折率分布を持つ2モードファイバについて、 λ （S+C+L-band:1460nm $\leq\lambda\leq$ 1625nm）に対する $\Delta\tau$ （ $\triangleq|HE_{11}$ モードの群遅延時間 $-HE_{21}$ モードの群遅延時間|）を示した図である。伝送損失が最小となる波長 $\lambda=1550$ nm でモード間遅延差 $\Delta\tau$ を $\Delta\tau=0$ [ps/km]とするように設計した（ $\Delta_a(1550)=0.3\%$, $\Delta_r(1550)=-0.5\%$, $a=10.6537[\mu\text{m}]$, $t_1/a=t_2/a=1.0$ ）。VMD から求めた $\Delta\tau$ （—）は VRK から求めた $\Delta\tau$ （●）とよく一致している。

2. 2 全分散特性

ステップ型コアとトレンチで構成された屈折率分布^[2]を持つ単一モードファイバについて、 λ に対する S を求めた結果を図3に示す。O-bandの動作波長として代表的な $\lambda=1310$ nm で全分散 S を $S=0$ [ps/nm/km]とするように設計した（ $\Delta_a(1310)=0.3\%$, $\Delta_r(1310)=-0.6\%$, $a=3.85[\mu\text{m}]$, $t_1/a=1.5$, $t_2/a=1.0$ ）。検討した波長範囲（1210nm $\leq\lambda\leq$ 1600nm）すべてにおいて、VMDの結果（—）は、VRKの結果（●）とよく一致している。

7本のコアを配置したマルチコアファイバの要素ファイバに採用されている屈折率分布にW型分布がある^[3]。図4は λ に対する S を示した図である。 $\lambda=1550$ nm で $S=0$ [ps/nm/km]と分散スロープ $dS/d\lambda=0$ [ps/nm²/km]を同時に満たし、S+C+L-bandの波長領域で $|S|\leq 1$ [ps/nm/km]となる構造を設計した（ $\Delta_a(1550)=0.5\%$, $\Delta_r(1310)=-0.25\%$, $a=2.9015[\mu\text{m}]$, $t_1/a=0.0$, $t_2/a=1.0$ ）。図3と同様に、VMDとVRKの両手法から求めた S の値はよく一致している。

3. まとめ

本研究では、 τ と S を解析的に求める新しい手法としてVMD-DFD法を提案した。 α 乗型コアにトレンチを付加した分布とW型分布について、VMD-DFD法から求めた τ と S をVRK-DFD法から求めた値と比較検討した。その結果、両手法から求めた τ と S は精度よく一致することからVMD-DFDが有効な手法であることが分かった。

4. 参考文献

[1] Y.Sasaki, K.Takenaga, N.Guan, S.Matsuo, K.Saitoh and M. Koshiba: "Large-effective-area uncoupled few-mode multicore fiber", Optics Express, Vol.20, No.26, pp.

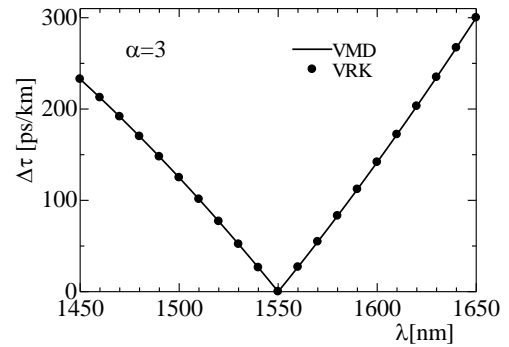


Fig. 2. Differential mode delay $\Delta\tau$ versus wavelength λ

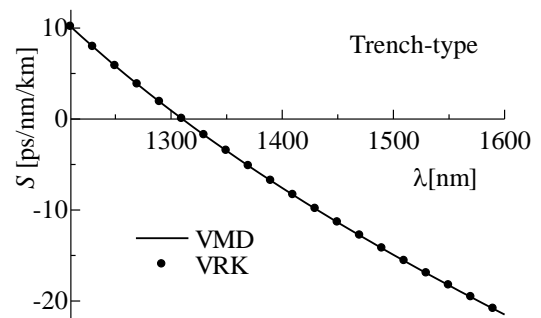


Fig. 3. Total dispersion S versus wavelength λ .

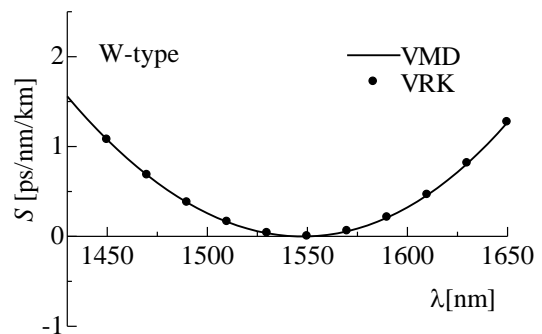


Fig. 4. Total dispersion S versus wavelength λ .

B77-B84 (2012)
 [2] K.Takenaga, Y.Arakawa, S.Tanigawa, N.Guan, S.Matsuo, K.Saitoh and M. Koshiba: "Reduction of Crosstalk by Trench-Assisted Multi-Core Fiber", OSA/OFC/NFOEC 2011, OWJ4 (2011)
 [3] 武笠和則・今村勝徳・安田正隆・杉崎隆一・八木健: "3Mを同時に実現する大 Aeff 7 コア 2 モードファイバ", 信学技法 OFT2012-38, Vol.112, No.261, pp.33-36 (2012)
 [4] 森崇嘉・坂本泰志・和田雅樹・山本貴司・山本文彦: "広帯域 WDM-MIMO システムに向けた低 DMD4LP モードファイバ", 信学会総合大会, B-13-10, pp.475 (2013)
 [5] 古川慎一・鈴木祐介: "任意屈折率分布を持つ光ファイバの分散特性解析", 電学会電磁界理論研資 EMT-13-65, pp.33-38 (2013).
 [6] M.J.Adams, "An introduction to optical waveguide," John Wiley & Sons, New york (1981).
 [7] H.Etzkorn and W.E.Heinlein: "Low-dispersion single-mode silica fiber with undoped core and three F-doped claddings," Electron. Lett., vol. 20, No.10, pp.423-424, (1984).
 [8] 古川慎一・日向 隆・細野敏夫: "1.3 μm と1.55 μm の波長で全分散を零にする単一モード光ファイバの設計法", 信学論 B, Vol.J68-B, No.8, pp.896-903 (1985)