

Envelope compact FDTD法を用いた光導波路 の固有モード計算法

田中, 宏季 / TANAKA, Hiroki

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

2

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025342>

Envelope compact FDTD 法を用いた光導波路の固有モード計算法

A TECHNIQUE FOR CALCULATING EIGENMODES OF AN OPTICAL WAVEGUIDE BY THE ENVELOPE COMPACT FDTD METHOD

田中宏季

Hiroki TANAKA

指導教員 柴山純

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

We propose a technique for calculating eigenmodes of optical waveguides, in which the complex-envelope formulation is applied to the compact finite-difference time-domain (FDTD) method. We first formulate the envelope compact (EC) FDTD method for the eigenmode analysis. The frequency component can be incorporated into the field equations as a known quantity with the envelope formulation. We next analyze the eigenmodes of a two-dimensional slab waveguide using the EC-FDTD method. It is found that the calculated value automatically converges to the eigenmode and the propagation constant without an exact initial guess of the propagation constant. It is also shown that the results agree well with those of the exact solution.

Key Words : Finite-difference time-domain (FDTD) method, Compact FDTD method, Eigenmode analysis, Complex-envelope formulation

1. はじめに

導波路型デバイス [1]-[8] の固有モードを計算する手法として、ビーム伝搬法 (BPM) に虚軸法を適用した虚軸 BPM や Yee 格子に基づく虚軸 BPM がある。他方、電磁界問題の数値解法として、FDTD 法 [9] が広く用いられている。さらに、伝搬方向に均一な導波路における分散関係の算出を目的として、compact FDTD (C-FDTD) 法 [10] が提案されている。また、我々は複素包絡線 (envelope) 型の計算 [11] を陰的 FDTD 法に適用してきた [12]。包絡線型を導入することで、時間領域の手法である FDTD 法の計算式に周波数の情報を既知の値として組み入れることができる。本稿では、包絡線型の計算を C-FDTD 法に適用した固有モード計算法を提案する [13]-[15]。

2. 本論

(1) 定式化

はじめに固有モード解析のための envelope compact (EC) FDTD 法の定式化を行う。本稿では 2 次元の TE モードについて議論する。電磁界成分を次のように表現する。

$$\tilde{\phi} = \phi e^{j\omega_0 t} \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{\phi} = [\tilde{H}_x, \tilde{H}_z, \tilde{E}_y]^T$ は電磁界の瞬時値、 $\phi = [H_x, H_z, E_y]^T$ は複素電磁界成分、 $e^{j\omega_0 t}$ は搬送波成分、

ω_0 は中心角周波数である。式 (1) を Maxwell の方程式に代入すると、次式を得る。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = ([A] - j\omega_0 [I])\phi \quad (2)$$

ここで、 $[A]$ は空間方向の微分項を含む行列、 $[I]$ は単位行列である。式 (2) における伝搬方向の微分項 $\partial/\partial z$ を固有モードの伝搬定数 β を用いた $-j\beta$ に置き換え、差分化すると次式を得る。

$$H_{x,i+1/2}^{n+1/2} = \frac{a_-}{a_+} H_{x,i+1/2}^{n-1/2} - \frac{2c\Delta t}{a_+ \mu_r} j\beta E_{y,i+1/2}^n \quad (3)$$

$$H_{z,i}^{n+1/2} = \frac{a_-}{a_+} H_{z,i}^{n-1/2} - \frac{2c\Delta t}{a_+ \mu_r \Delta x} (E_{y,i+1/2}^n - E_{y,i-1/2}^n) \quad (4)$$

$$E_{y,i+1/2}^{n+1} = \frac{a_-}{a_+} E_{y,i+1/2}^n - \frac{2c\Delta t}{a_+ \varepsilon_r} j\beta H_{x,i+1/2}^{n+1/2} - \frac{2c\Delta t}{a_+ \varepsilon_r \Delta x} (H_{z,i+1}^{n+1/2} - H_{z,i}^{n+1/2}) \quad (5)$$

ここで、 ε_r は比誘電率、 μ_r は比透磁率、 c は真空中の光速、 $a_{\pm} = 2 \pm j\omega_0 \Delta t$ である。

(2) 二次元スラブ導波路の固有モード解析

基本モードと一次モードの伝搬が可能な二次元スラブ導波路の固有モードを解析する。導波路のコアとクラッドの屈折率はそれぞれ $n_{co}=1.02$ 、 $n_{cl}=1.00$ であ

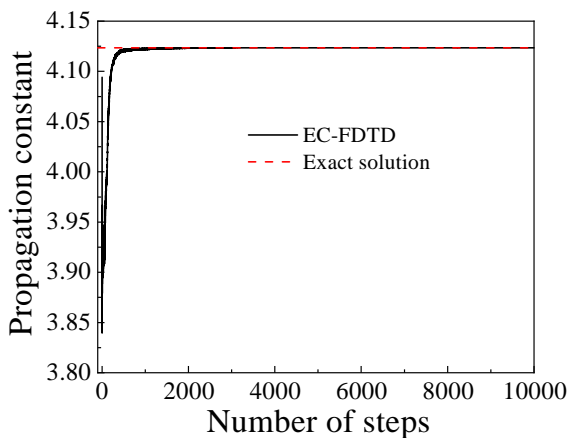


図1 伝搬定数

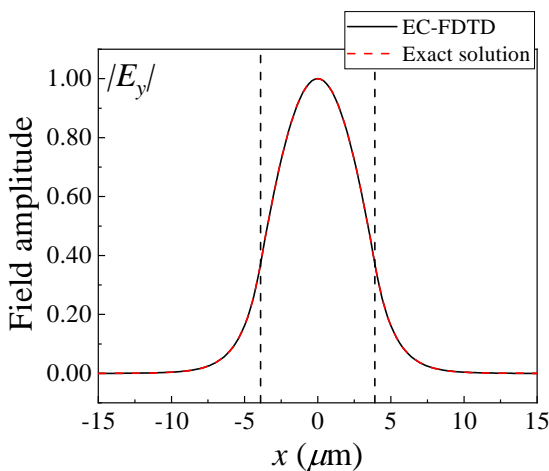


図2 界振幅

り、コア幅は $w = 7.8 \mu\text{m}$ である。波長を $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ とする。空間の刻み幅を $\Delta x = 0.2 \mu\text{m}$ に選ぶ。基本モードの抽出には左右対称な矩形波を、一次モードの抽出には反対称な矩形波を初期界に選ぶ。本手法では、界分布から伝搬定数を計算し、式 (3), (5) に含まれる β を毎ステップ更新する。 β は以下の変分表現より算出する。

$$\beta = \sqrt{\frac{k_0^2 \int n^2 |E_y|^2 dx + \int E_y^* \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} dx}{\int |E_y|^2 dx}} \quad (6)$$

ここで、 k_0 は自由空間波数、 n は屈折率である。また、初期値 β_0 は n_{co} と n_{cl} の平均値を利用する。

本手法によって得られた β を評価する。図1に基本モードにおける計算ステップ数に対する β を示す。比較として、厳密解を併記する。得られた伝搬定数は計算ステップを重ねることで厳密解に近い値に収束していることが見出せる。また、伝搬定数の厳密な初期値を設定せず、固有モードの伝搬定数に近い値を自動的に得られることがわかる。

図2に10000ステップ目における E_y 成分の界振幅を示す。比較として、厳密解を併記する。本手法より得られた固有モード形状は厳密解とほとんど一致している。また、図示しないが、一次モードについても同様の結果が得られることを確認している。これらの結果から、EC-FDTD法によって固有モード計算の可能であることがわかる。

3. 結び

包絡線型の計算をC-FDTD法に適用した固有モード計算法を提案した。伝搬定数の厳密な初期値を必要とせず、計算結果が伝搬定数と固有モード界に自動的に収束することを明らかにした。これらを厳密解と比較し、よい一致が得られることを明示した。

参考文献

- 1) J. Shibayama, H. Tanaka, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Design of the surface plasmon resonance waveguide sensor in the terahertz regime," *URSI-Japan Radio Science Meeting*, BP-28, 2019.
- 2) 柴山, 田中, 山内, 中野, "テラヘルツ帯における SPR 導波路型センサの特性改善," 信学総大, C-15-14, 2020.
- 3) 柴山, 田中, 山内, 中野, "テラヘルツ帯における 3次元 SPR 導波路型センサの固有モード解析," 信学総大, C-15-17, 2021.
- 4) 田中, 柴山, 山内, 中野, "テラヘルツ帯における 3次元 TM 透過/TE 除去導波路型偏光子の解析," 信学ソ大, C-15-12, 2021.
- 5) 田中, 柴山, 山内, 中野, "テラヘルツ帯における 3次元 TM 透過/TE 除去導波路型偏光子の設計と解析," 信学技報, vol. 121, no. 358, EST2021-56, pp. 1-5, 2022.
- 6) 田中, 柴山, 山内, 中野, "半陰的 FDTD 法を用いた TE 透過型 THz 導波路偏光子の解析," 信学総大, C-15-7, 2022.
- 7) 柴山, 大塚, 田中, 山内, 中野, "半導体層を用いたテラヘルツ TE 透過/TM 除去導波路型偏光子," 信学総大, C-3/4-31, 2022.
- 8) 柴山, 横幕, 田中, 山内, 中野, "3次元 MIM 導波路の励振に関する一考察," 信学総大, C-1-8, 2022.
- 9) A. Taflov and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, 2005.
- 10) A. Asi and L. Shafai, "Dispersion analysis of anisotropic inhomogeneous waveguides using compact 2D-FDTD," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 15, pp. 1451-1452, 1992.
- 11) J. D. Pursel and P. M. Goggans, "A finite-difference time-domain method for solving electromagnetic problems with bandpass-limited sources," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 1, pp. 9-15, 1999.
- 12) J. Shibayama, M. Muraki, R. Takahashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Performance evaluation of several implicit FDTD methods for optical waveguide analyses," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 6, pp. 2465-2472, 2006.
- 13) 柴山, 田中, 山内, 中野, "包絡線型 FDTD 法を用いた新しい固有モード計算法," 信学ソ大, C-1-5, 2020.
- 14) 柴山, 田中, 山内, 中野, "包絡線型 compact FDTD 法を用いた光導波路の固有モード計算法," 信学技報, vol. 120, no. 328, EST2020-78, pp. 129-133, 2021.
- 15) H. Tanaka, J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Eigenmode analysis of an optical waveguide by the envelope FDTD method," in *Proc. Progress in Electromagnetic Research Symposium*, Hangzhou, 0P1a, 2021.