

媒質中を伝わる波動の分散の推定

～導波路を伝わるテラヘルツ波の場合～

総合研究大学院大学 複合科学研究科 統計科学専攻
モデリング研究系 特任研究員 石川 顕

1. はじめに

多くの物理現象について、媒質中を伝わる波動は、周波数（波長）によって位相速度（または群速度）が異なる分散(dispersion)の性質を示す。速度(v)と周波数(ω)、波長(λ)の関係を示す分散関数(dispersion function)は、 $v=f(\omega)$ で表わされる。本研究では、1次元の導波路(ファイバー)を伝わる波についての波動伝搬シミュレーションを行い、最適な測定条件を決定する方法を模索した。

2. 導波路を伝わるテラヘルツ波

THz(テラヘルツ)波とは、光と電磁波の中間にあたる周波数領域の電磁波(周波数100GHz～10THz)である。近年の半導体や超伝導材料の発展に伴い、導波路を伝わるTHz波の重要性が注目されている。光ファイバーを伝わるTHz波は分散性を顕著に示すことがわかっており、その利用に際して分散特性の測定・予測が重要である。

THz波の導波路として主に用いられるのは、フォトニック結晶(photonic crystal)を材料とするフォトニック・クリスタルファイバー(PCF)(Russel et al.1995)(図1)である。PCFを伝わる電磁波の時間波形測定には時間領域分光(TDS法:Time Domain Spectroscopy)が用いられ、このTDS法で単位長さのファイバーの伝搬特性を測定する際にカットバック法(異なる長さのファイバーについての入力波、出力波の測定を行う)が用いられる。この研究では、カットバック法による最適ファイバー切断長を決定するための、THz波の導波路伝搬シミュレーションを行った。

3. 導波路伝搬シミュレーション

ある入力波形を定義し、長さLの導波路を伝搬した後の出力波形をフーリエ変換によって計算し、入力、出力波形に独立な観測ノイズ(白色ノイズ)を加える。この入力、出力波形(例:図2)を比較し伝搬パラメータ(分散パラメータDと、減衰(損失)パラメータ α の2変数)の推定値を最小二乗法により決定する。この推定値と設定値(真値)を比較し、パラメータ推定誤差の長さによる変化(図3)を調べることで、仮定した実験条件(導波路の長さ)の適切さを判断する。この過程をさまざまなパラメータ、長さについて繰り返し、最適な計測条件を決定する。この結果、最適な測定導波路長が、次の経験的べき乗則に近似できることが分かった。

損失パラメータ α についての最適導波路長： $L_{\alpha} = C_{\alpha} \cdot \alpha^{-1.4} \cdot D^{0.4} \cdot S_N^{0.3}$ 、($C_{\alpha}=70.0$),

分散パラメータDについて最適導波路長： $L_D = C_D \cdot \alpha^{-0.30} \cdot D^{-0.28} \cdot S_N^{0.21}$ ($C_D=11.5$)

4. 最適導波路長決定法の統計的妥当性を確認シミュレーション

また、以上の結果が現実の実験に適用可能か確認するため、最適導波路長決定法の統計的妥当性を確認するシミュレーションを行った。初めの0次近似モデル(パラメータ設定、波形合成、パラメータの推定、パラメータ推定誤差の計算という一連の過程)を繰り返し試行した結果、最も外れた推定値を取り出し、これを真値と置き換えて、同様の試行過程を繰り返し、これを1次近似モデルと置く。この結果、1次近似モデルと0次近似モデルがほぼ同様のパラメータ推定誤差の極小値を示す長さを示すことを確認した。この2つの段階の結果がほぼ一致することにより、べき乗則の実験式がTDS法の実験においても有効であることがわかった。

以上の結果から、テラヘルツ波の導波路特性測定のためのカットバック法を用いた実験の最適な設計方法が予想されることを示した。

参考文献

- 1) M.Goto, A.QUEMA, H.Takahashi, S. Ono and N. Sarukura: Jpn. J. Appl. Phys.,Vol. 43, No. 2B,(2004)
- 2) T. Birks, J. Knight and P. Russell: Opt. Lett. 22 (1997) 961.
- 3) Carlito S. Poncea Jr. 'Development of Integrated Optics for First Principle Analysis of Terahertz Spectrum of Some Biomolecules', SOKENDAI,PhD(2008)

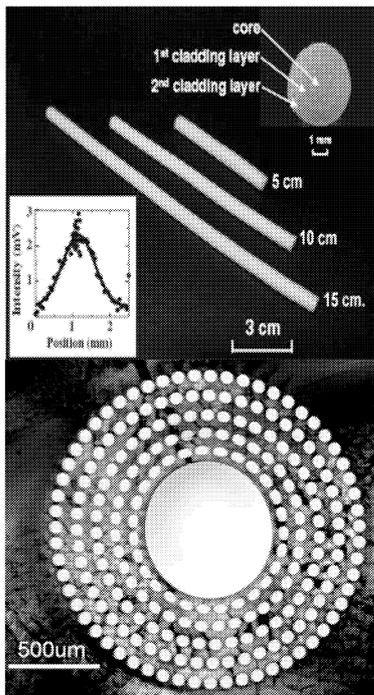


図1：フォトニック・クリスタル・ファイバーの外見(上)と断面写真(下)

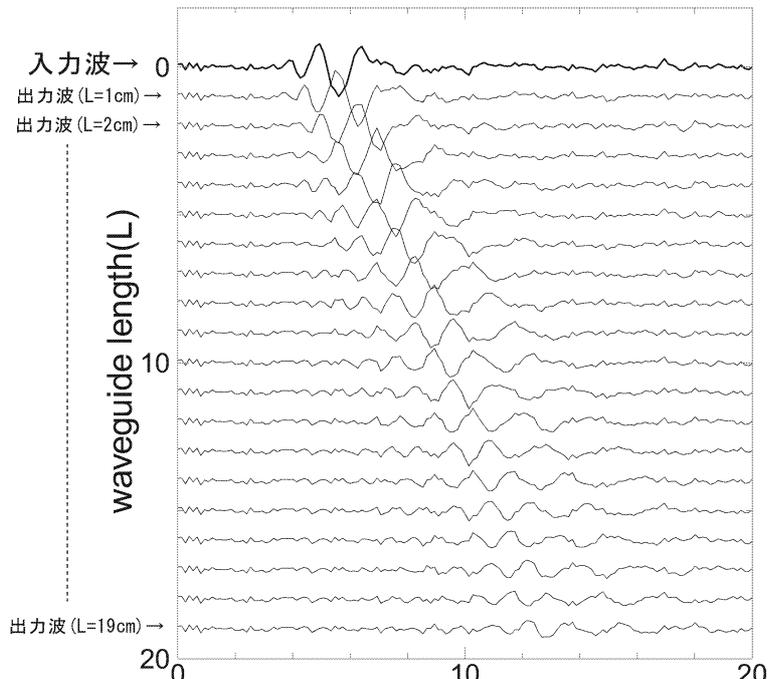


図2：フォトニック・クリスタル・ファイバーを伝わる THz 波の伝搬波形の例(シミュレーション)

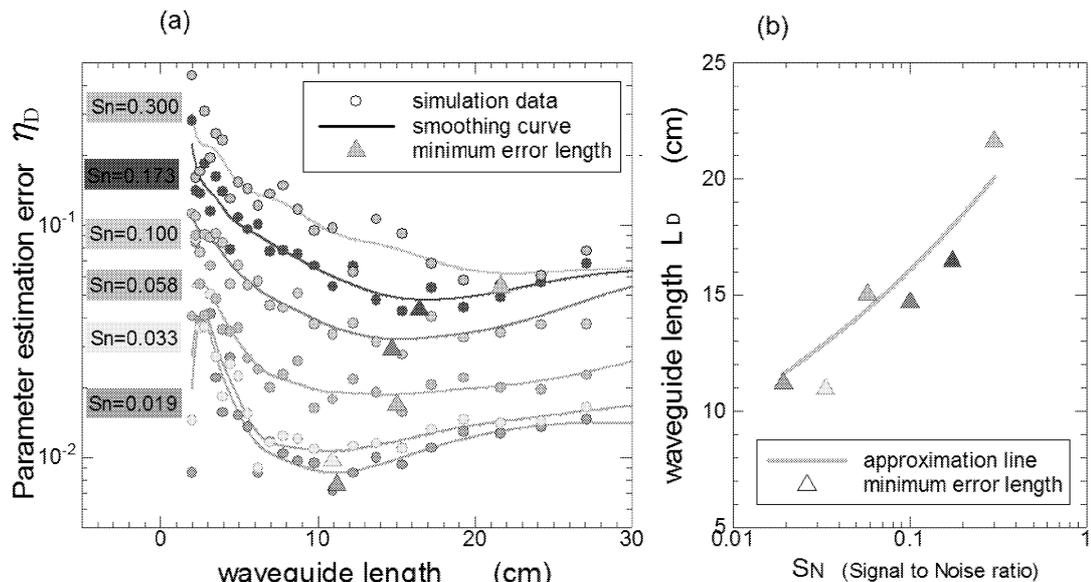


図3：(a) 推定された伝搬パラメータ(分散パラメータD)の相対推定誤差(η_D)と、ファイバー長の関係、異なるノイズ振幅(Sn)について計算した場合、および (b) パラメータ(Sn)と推定誤差が最小になる長さ(L_D)の関係(右)