

プラスチック光ファイバーの周波数特性測定法

—ネットワークアナライザ測定法とインパルス応答波形測定法の比較—

橋爪 信郎*・石田 亮介**・岡崎 純**・高井 恭平**・内藤 和優**

(平成20年10月31日受理)

Methods of Frequency Characteristic Measurement of Plastic Optical Fiber — Comparison between Network Analyzer Method and Impulse Response Waveform Method —

Nobuo HASHIZUME, Ryouzuke ISHIDA, Jun OKAZAKI, Kyouhei TAKAI and Kazuhiro NAITO

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

Frequency characteristics of a plastic optical fiber (POF) measured by two different methods are compared. One is the more conventional method in which network analyzer is used for direct measurements. The other is the method in which an impulse response waveform of the POF is transformed into frequency domain by Fourier Transform. The latter gives different results depending on how the influence of the measuring system is corrected. However, both methods give almost the same results when the correction is implemented by using the frequency characteristics obtained by the Fourier Transform of the impulse response waveform of the measuring system.

Key Words: plastic optical fiber, frequency characteristics, network analyzer method, impulse response waveform method, Fourier transform

1. はじめに

プラスチック光ファイバー (POF: Plastic Optical Fiber) の伝送帯域の測定には通常、以下の2つの方法のどちらかが用いられる。1つはネットワークアナライザと光電変換器を使い、正弦波状に強度変調した光を周波数掃引しながら被測定 POF 中を通過させ、光パワーの減衰を周波数の関数として測定する直接的な方法である。2つ目は POF にインパルス光を入射し、インパルス応答波形をフーリエ変換する方法である。著者らは従来、第1の方

法で周波数特性測定を行ってきた¹⁾。本報告では2つの方法を併せて用い比較検討した。また、いずれの方法においても測定機器が測定結果に及ぼす影響を取り除くことにより正確な特性が得られる。このことに関しては従来から様々な方法が報告されている^{2) - 4)}。本報告では補正法についても検討を加えた。

2. 実験

2.1 周波数特性測定

図1(a)にネットワークアナライザを用いた周波数特

* 広島工業大学工学部電子情報工学科, 電子・光システム工学科

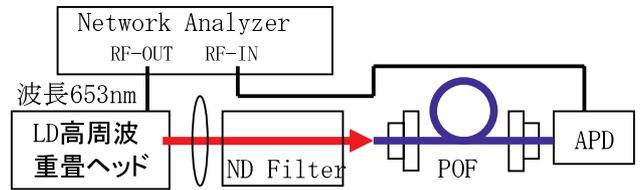
** 広島工業大学工学部電子・光システム工学科

性測定装置の構成を示す。実験に用いた POF は三菱レイヨン社製 Super ESKA SH-4001 (NA 0.5, ファイバー径 1mm) で伝送帯域の仕様書値は 40MHz/50m, APD (アバランシェフォトダイオード) は浜松ホトニクス社製 C5658-SPL-S4003 (特注, 受光部直径 1mmφ, 遮断周波数 600MHz), LD 高周波重畳ヘッドは旭データシステムズ社製 ALTH-103R(S) (周波数帯域 1MHz ~ 1.7GHz), ネットワークアナライザは Agilent 社製 E5061A (周波数帯域 300kHz ~ 1.5GHz) である。

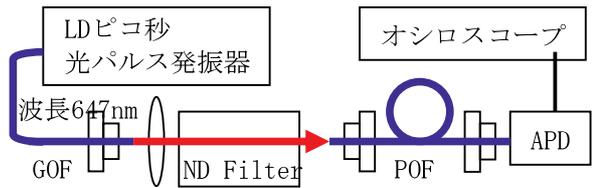
POF 長がたとえば 31m の場合, 図 1(a)における POF 長が 31m の場合の高周波電力減衰量から POF 長が 1m の場合の高周波電力減衰量を Excel 上で差し引いた値に 1/2 を掛けることにより, LD ヘッド, APD などの測定機器の影響を取り除き, POF 長 30m の光パワーの減衰量を得ることができる⁵⁾。この測定法は POF 中の伝搬光が POF 中を 1m 通過した後でもその角度分布に変化がないことを前提にしている。

実際に測定してみると, LD ヘッドからの出射光を POF1m を経由して APD に入射させたときの周波数特性と POF1m を経由しないで APD に直接入射させた場合の周波数特性とは直流成分 (約 0.15dB) を除いて差がほとんど認められなかった。すなわち, POF1m が及ぼす影響は測定機器の周波数特性にマスクされて無視できることが分かった。したがって, 以下の周波数特性の計算では POF1m を経由しないで APD に直接入射させた場合 (POF 基準長ゼロ) の周波数特性を差し引きに用いた。

また, POF61m と POF31m の差から POF30m の周波数特性を求めると, 当然のことであるが, POF31m と POF1m の差から求めた POF30m の周波数特性とは大きく異なる結果が得られた。それぞれの周波数特性を図 2(a), 図 2(b)に示す。図は低周波における減衰量が一致するように 2つの特性の直流レベルを補正して示してある。以下に述べる周波数特性はすべて同様の処理を行った。



(a) 周波数特性測定装置



(b) インパルス応答波形測定装置

図 1 : 測定装置の構成

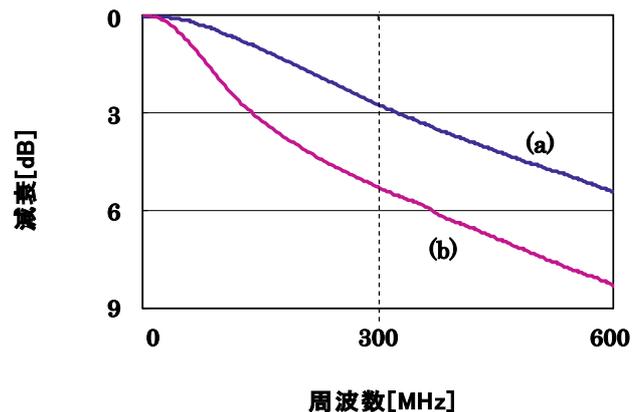


図 2 : POF 基準長の違いによる POF 長 30m の周波数特性の違い (a) POF31m - POF1m (b) POF61m - POF31m

2.2 インパルス応答波形測定

図 1(b)にインパルス応答波形測定装置の構成を示す。図 1(a), 図 1(b)いずれの場合においても POF 入射端には平行光線を入射させ (集光レンズ, スクランプラー等不使用), 出射端は APD 受光窓に密着させた⁶⁾。また, POF, APD も同一のものを使用した。オシロスコープは Agilent 社製 Infiniium 54835A (周波数帯域 1GHz) でサンプリング間隔は 0.25ns である。ピコ秒光パルス発振器は浜松ホトニクス社製 PLP-01 (パルス幅 72ps) であり, 出力光パルスはインパルスとみなすことができる。図 3 に POF 長が 0 ~ 101m の場合に図 1(b)の装置で測定したインパルス応答波形を示す。測定範囲内ではパルス波形はガウス分布型とはいえない。

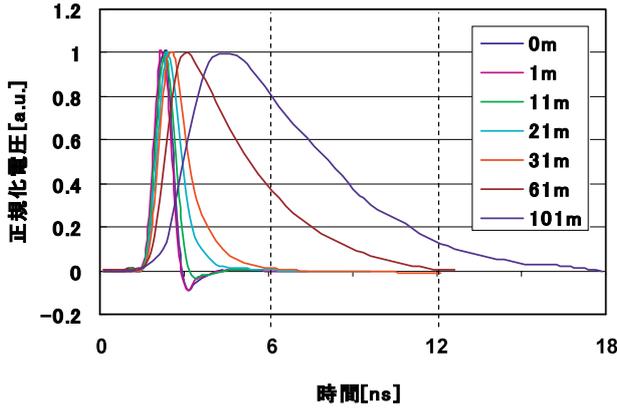


図3：様々なPOF長のインパルス応答波形

3. CRモデルを用いたインパルス応答波形の補正

図1(b)の装置で測定したPOFのインパルス応答波形は測定装置（APD及びオシロスコープ）の影響を含んでいるため、この影響を取り除きPOFのみのインパルス応答波形を抽出する必要がある。測定装置の影響を取り除く際に、パルス波形をガウス分布型として補正を簡便に行う方法^{2) - 4)}もあるが、実際の波形は図3に示すようにガウス分布型とは程遠い。本章では測定装置の過渡応答特性がCR回路のそれと仮定した場合について述べる。

補正にはAPD + オシロスコープの立上り時間 t_r を用いた。 t_r はピコ秒光パルス発生器から出射するインパルス光をGOF, POFを経由せず直接APDに入射させることでインパルス応答波形を観測し、その波形をExcel上で時間に関して積分し、得られたステップ波形の10% - 90%値を採った値である。実測値は $t_r = 0.6ns$ であった。それぞれの波形を図4(a), 図4(b)に示す。

ちなみに、 $\sqrt{(0.35/f_{APD})^2 + (0.35/f_{OSC})^2} ns$ から計算したAPDとオシロスコープのカスケード接続の立上り時間は $0.68ns$ であり、実測値に比較的近い値を示す。ここで、 f_{APD} および f_{OSC} はそれぞれAPDおよびオシロスコープの-3dBカットオフ周波数であり、仕様書に記載の値それぞれ $0.6GHz$ と $1.0GHz$ とした。

補正はExcel上で次式を用いて行った。 $h(t) = h'(t) + \frac{dh'(t)}{dt} \cdot \frac{t_r}{2.2}$ 。ここで $h'(t)$ は補正前のインパルス応答波形、 $h(t)$ は補正後のインパルス応答波形を表す。すなわち、APD + オシロスコープの過渡応答は立上り時間 $t_r (= 0.6ns)$ のCR等価回路で表すことができるとした。POF長31mの場合の補正前、補正後の波形を図5に示す。補正後の波形は補正前の波形に比べてCR回路の影響が除去され、凹凸がやや顕著になっていることが分かる。

なお、ピコ秒光パルス発生器からの出射光をGOFおよびPOF1mを経由してAPDに入射させたときのインパルス

ス応答波形はGOFおよびPOFを経由しない場合の波形と差がほとんど認められなかった。すなわち、GOF + POF1mが及ぼす影響はAPD + オシロスコープの立上り時間 t_r にマスクされて無視できることが分かった。したがって、2.2節で述べたインパルス応答波形測定法はGOF + POF1mが測定回路中にある場合もない場合も同じ結果を与える。

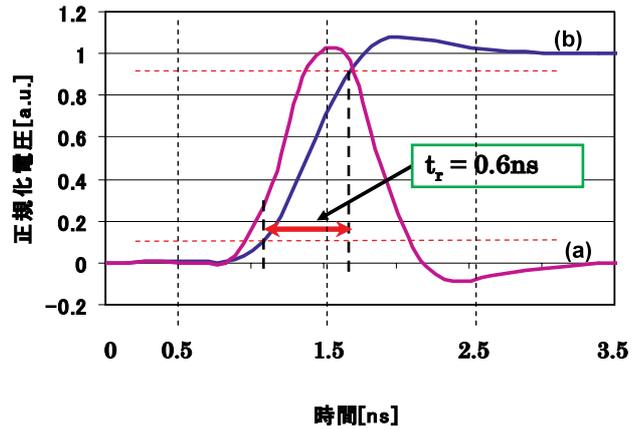


図4：(a) APD + オシロスコープのインパルス応答波形、(b) その時間積分波形

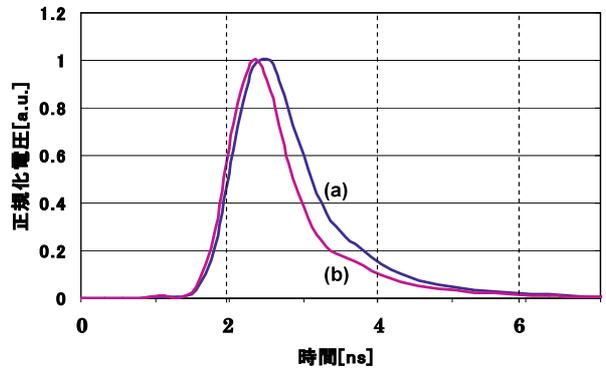


図5：POF長31mのインパルス応答波形
a) 補正前 b) CRモデルで補正後

4. フーリエ変換

インパルス応答波形をフーリエ変換することによって周波数特性を得ることができる。

実際には、サンプリングされたインパルス応答波形を基にしてExcel上でフーリエ級数変換を行った。図6にその際採用した基本周期の設定法を示す。インパルス応答波形に現れる人為的 (artificial) な雑音波形を除外するように時間幅 $T (= 7ns \sim 16ns)$ を切り出しその数倍を基本周期 T_n とした。たとえば図6に例示する時間幅 $T = 7ns$ の場合、基本周期 T_n は $7ns \times 8$ と設定した。基本周波数 $1/T_n$ は

17.9MHz となり、周波数分解能としては十分である。基本周期 T_n 中のパルス電圧の値として最初の T には上記測定データを入れ、残りの $7T$ にはゼロを敷き詰めた。本報告ではフーリエ変換として本方法でもって替えた。

フーリエ級数変換を行う場合に使う基になる波形データは 0.25ns 間隔でサンプリングされている。ナイキストの定理によると、波形の周波数成分は 2GHz まで正しく求められるので、サンプリング間隔が原因で周波数特性に誤差が入ることはない。

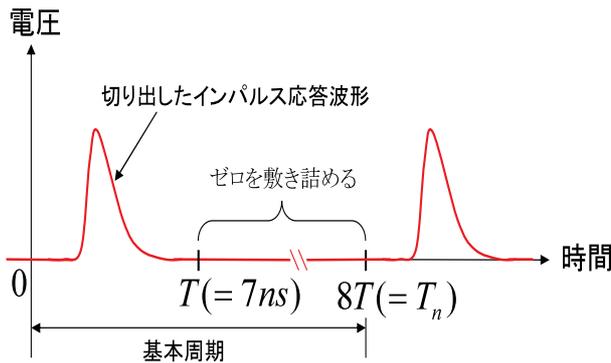


図6：フーリエ級数変換における基本周期の設定法

5. インパルス応答波形經由周波数特性の補正

POF のみの周波数特性は図 1(b) の装置を用いて測定した補正前のインパルス応答波形を基にして、それをフーリエ変換して得られる周波数特性から APD + オシロスコープの周波数特性を Excel 上で引き算をすることで得ることが出来る。APD + オシロスコープの周波数特性はピコ秒光パルス発生器から出射するインパルス光を直接 APD に入射させたときのインパルス応答波形図 4(a) をフーリエ変換することによって得ることが出来る。それを図 7(a) に示す。

一方、POF のみの周波数特性は 3 章で述べた CR 定数モデルによる補正を施した後のインパルス応答波形を基にして、それをフーリエ変換しても得ることが出来る。この方法は POF の補正前のインパルス応答波形を基にして、それをフーリエ変換して得られる周波数特性から立上り時間 t_r の CR 回路の周波数特性を差し引くことと原理的に等価である。

図 7(b) に CR 回路の周波数特性を併せて示す。図 7(a) と図 7(b) を比較すると図 5(a) 経由の周波数特性の方が CR 回路の周波数特性よりも $0 \sim 300\text{MHz}$ 辺りまでの減衰量が少ない。当然のことながら、図 7(a) の周波数特性の方が APD + オシロスコープの周波数特性をより正確に表す。

図 8 に POF 長 31m の場合の周波数特性を示す。図 8(a)

は補正前のインパルス応答波形をフーリエ変換して得られた周波数特性、図 8(b) は補正に当って図 7(a) を差し引きに用いた周波数特性、図 8(c) はネットワークアナライザを用いて測定した周波数特性、図 8(d) は CR 回路モデルに基づいてインパルス応答波形を補正してそれをフーリエ変換して得られた周波数特性を示す。図から分かるように図 8(b) と図 8(c) の周波数特性は全周波数帯域にわたりほぼ一致する。図 8(a) の周波数特性は 300MHz 以上において図 8(b) と図 8(c) の特性から乖離し補正が必要であることを示している。図 8(d) の特性は図 8(b) と図 8(c) の特性から $200 \sim 500\text{MHz}$ 辺りで乖離している。これは図 7 における 2 つの補正法の差が現れているからである。

図 9 に POF 長が 101m の場合の周波数特性を示す。図 9(a) は補正前のインパルス応答波形をフーリエ変換して得られた周波数特性、図 9(b) は補正に当って図 7(a) を差し引きに用いた周波数特性をそれぞれ示す。図から分かるように POF 長が長くなると 3 つの特性の差が小さくなる。インパルス応答波形が拡がり、補正の効果が少なくなるからである。

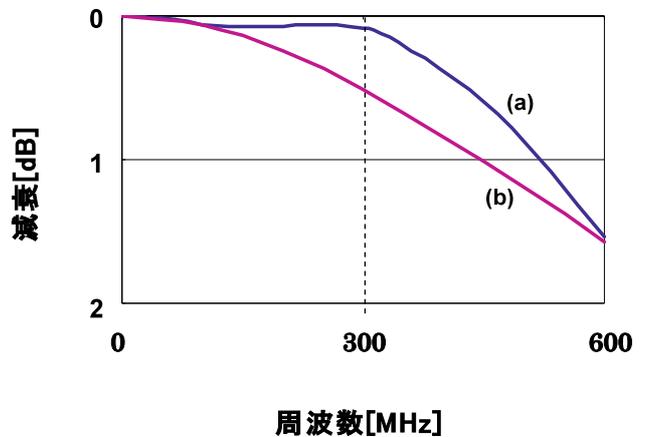


図7：APD + オシロスコープの周波数特性：(a) 図 4(a) を基にした周波数特性 (b) CR 回路モデルの周波数特性

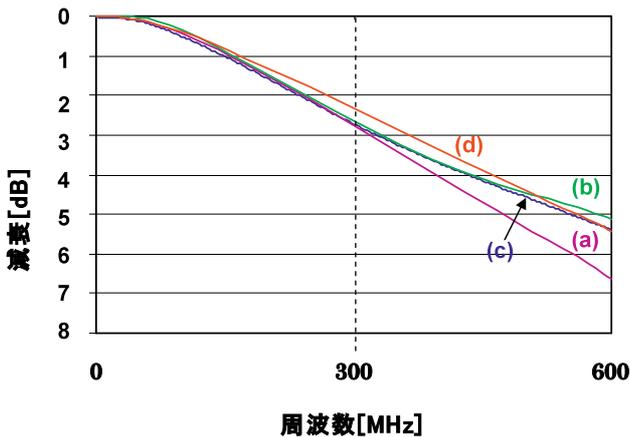


図 8 : POF 長 31m の周波数特性
(a) 補正前 (b) 図 7(a)で補正 (c) ネットワークアナライザ測定 (d) CR モデルで補正

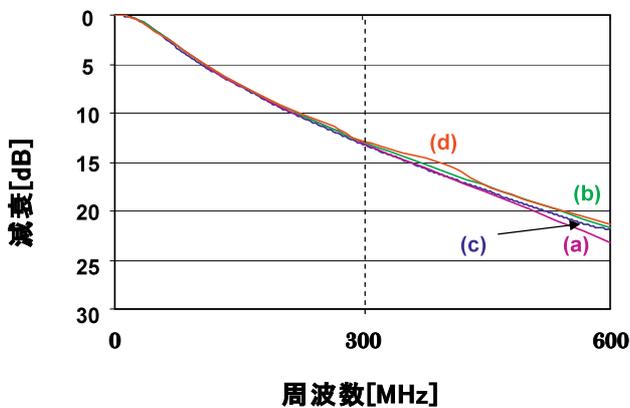


図 9 : POF 長 101m の周波数特性
(a) 補正前 (b) 図 7(a)で補正 (c) ネットワークアナライザ測定 (d) CR モデルで補正

7 まとめと今後の課題

POF の周波数特性測定方法としてインパルス応答波形をフーリエ変換する方法を試みた。測定結果は従来、著者等が行ってきたネットワークアナライザで直接測定する方法と良く一致した。前者による周波数特性の導出にあたって、測定機器の影響の補正法が大切であることが分かった。すなわち、測定機器の CR 回路モデルは誤差を生じ易いこと、測定機器のインパルス応答波形から導出した周波数特性で補正を行なう方がより正確な特性を与えること、などである。

本報告の実験条件は POF への入射光が平行光の場合に限った。集光光入射あるいは斜め光入射の場合は以下のような問題が予測される。すなわち、POF は石英光ファイバーに比べて光伝搬角度分布の拡がり急速である。基準長 POF が 0m と (たとえば) 1m の違いが基準長通過後の光角度分布へ与える影響の違い、あるいはネットワークアナライザ直接測定法において POF 出射端と APD との結合状態にあたる影響は平行光入射の場合より大きい。それらが測定結果にどのような影響を与えるかは今後の検討課題である。

謝 辞

本研究の一部は平成 20 年度私立大学等経常費補助金「私立大学教育研究高度化推進特別補助」(教育・学習方法等改善支援経費)“光情報技術の体験・対話型教育研究支援”のもとで行われたものであることを記して、それを可能にするに当たってご理解を賜り多大のご支援をいただいた関係の皆様へ深謝いたします。

参考文献

- 1) 橋爪信郎, 齋藤千晴, 清水貴弘, 橋本陽介, 前本浩史, 仁田直貴, 西田晃「プラスチック光ファイバーのインパルス応答波形および周波数伝達関数測定における諸問題」広島工業大学紀要 研究編 第 41 巻 (平成 19 年 2 月) pp.1-6
- 2) テクトロニクス アプリケーション・ノート「プローブ測定技術と活用」pp.2-3
- 3) A.Weinert: “Plastic Optical Fibers”, Publicis MCD Verlag, pp.45-47
- 4) Gert Keizer: “Optical Fiber Communications”, McGraw-Hill, pp.544-548
- 5) 広島工業大学 学生実験指導書「電子・光システム工学実験 C・D」2008 年度版
- 6) 橋爪信郎, 石浦朋広, 伊吹健児, 中島文徳, 西垣内順, 本田幸生, 齋藤千晴, 石田亮介「プラスチック光ファイバーの不均一性ならびに受光器の配置が測定特性に及ぼす影響」広島工業大学紀要 研究編 第 42 巻 (平成 20 年 2 月) pp.1-5