

# 不等間隔ステップサイズによるスプリット・ステップ・フーリエ法 (SSFS) の性能向上

## Improving the performance of Split-Step Fourier Scheme with non-uniform step sizes

小林 俊彦<sup>†</sup>那賀 明<sup>†</sup>Toshihiko Kobayashi<sup>†</sup>Akira Naka<sup>†</sup><sup>†</sup> 茨城大学大学院 理工学研究科 電気電子システム工学専攻<sup>†</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University.

### 1. 背景・目的

近年、長距離・大容量伝送の需要が増加しているが、その需要に応えるためには、光ファイバ通信において光増幅器の光出力パワーを増大させ、信号対雑音比を大きくする必要がある。しかしながら、光出力パワーの増大により、より大きく光ファイバの非線形効果を受けることに繋がる。非線形効果は、波長分散と共に波形ひずみを発生させ、信号品質の低下を引き起こしている。

現在主流である 1 波長当たり 100[Gbps] の伝送容量を超える 1 波長当たり 400[Gbps] 以上といったより大容量な伝送を実現するためには、非線形効果を正確に演算し、補償する必要がある。そのためにスプリット・ステップ・フーリエ法 (SSFS: Split-Step Fourier Scheme) が考案された。SSFS はファイバをステップサイズ  $h$  で分割し、そのステップ内で線形効果 (損失、分散) と非線形効果が独立に作用するものと仮定し繰り返し演算することで近似解を求める方法である。ステップサイズ  $h$  は、非線形長  $L_{NL}$  の  $x$  倍で設定される。

本研究では、計算機シミュレーションにより、非線形効果を考慮した長距離光増幅中継系において、伝送路の演算に光パワーによりステップサイズが変化する不等間隔 SSFS を用いた場合の、DP-QPSK 変調方式での伝送特性と計算時間を評価する。

### 2. 評価に用いた手法と構成

図 1 に今回用いた評価系を示す。信号生成と伝送 (光増幅中継系)、EDC (Electrical Dispersion Compensation)、適応等化、BER (誤り率) 判定で構成される。本研究では、シンボルレート 32[Gbaud] の DP-QPSK 信号を生成する。得られた BER は、Q 値に変換して特性を評価する。

伝送損失 0.2[dB/km] の光ファイバ 124.822[km]、光増幅器の中継数 10 台から構成される総伝送距離 1248.22[km] とする。光ファイバには DSF (Dispersion Shifted Fiber) を使用し、分散値は -4[ps/nm/km]、有効コア面積  $A_{eff}$  は 50[ $\mu\text{m}^2$ ]、非線形係数は 2.02[1/W/km] である。光増幅器において、増幅後のパワーが一定となるように光信号を増幅し、雑音を付加する。自然放光係数は 1.581 とした。伝送路の計算に用いる SSFS は、光パワーの最も強い値で決定した非線形長  $L_{NL}$  より、全てのステップサイズを設定する等間隔 SSFS と、光パワーの減衰に応じて非線形長  $L_{NL}$  を設定し、光パワーの弱い範囲ではステップサイズを大きくする不等間隔 SSFS の 2 種類を使用する。本研究では、ステップサイズ  $L_{NL}/10$  の等間隔 SSFS を基準とした。受信器では EDC による波長分散補償を行ったあと、適応等化を行い、BER を評価する。

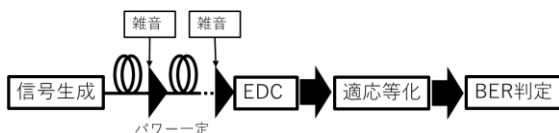


図 1 評価系構成

### 3. 評価結果

図 2 に、非線形効果を考慮した光増幅中継系において、光増幅器出力パワーが強い範囲での等間隔 SSFS および不等間隔 SSFS の伝送特性比較を行った結果を示す。光増幅器出力パワーが増加するに従い OSNR、Q 値は共に向上する。しかし、光増幅器出力パワーが強い範囲では、非線形効果の影響が強くなるため、光増幅器出力パワーが強くなるほど Q 値は劣化する。光増幅器出力パワーが強くなるにつれて、 $L_{NL}/10$  の不等間隔 SSFS は、基準とした等間隔 SSFS よりも特性が劣化する。そのため、光増幅器出力パワーが強い範囲で正確な非線形効果を演算する場合、よりステップサイズの小さい  $L_{NL}/20$  の不等間隔 SSFS を用いる必要がある。

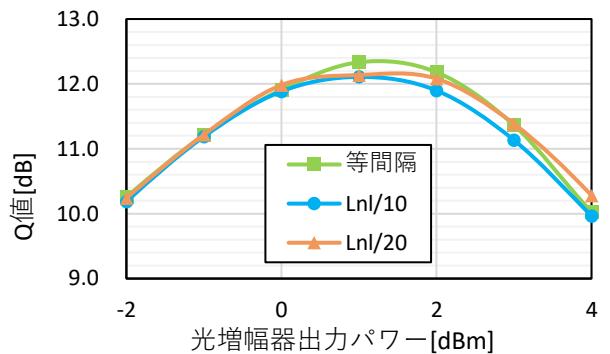


図 2 等間隔 SSFS と不等間隔 SSFS の Q 値

図 3 に非線形効果を考慮した光増幅中継系において、等間隔 SSFS および不等間隔 SSFS の計算時間比較を行った結果を示す。基準とした等間隔 SSFS とほぼ同等の伝送特性を示した  $L_{NL}/20$  の不等間隔 SSFS は、光増幅器出力パワーが 10dBm の条件を除き、等間隔 SSFS よりも短い計算時間であることが確認できた。

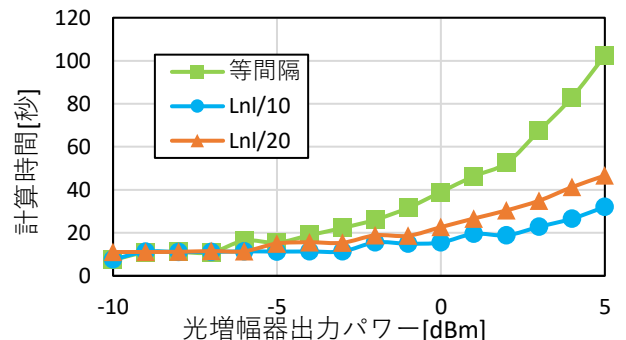


図 3 等間隔・不等間隔 SSFS の計算時間

### 4 結論

非線形効果を考慮した光増幅中継系において、不等間隔 SSFS を導入することにより、等間隔 SSFS と同程度の伝送特性を保ちつつ、計算時間を短縮することが可能であることが確認できた。

参考文献 [1] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics," Chapter 2, Academic Press, 1989.