

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	有川 学
論文題目	Back propagation control of model-based multi-layer adaptive filters for optical communication systems (光通信のためのモデルベース適応多層フィルタの誤差逆伝播による制御)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、長距離・大容量の光ファイバ通信システムで生じる各種の信号歪みを複数の適応フィルタで補償するために、全ての適応フィルタの係数を一括して決定する深層展開によるアプローチについて検討したものである。具体的には、各信号歪みの物理モデルに応じた適応フィルタを受信機内で多層に構成し、深層ニューラルネットワークの学習手法を用いて最終層の出力を基に係数を決定する手法である。本論文は以下に示すように全8章で構成される。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景と目的を概観している。大容量化の需要が続く光ファイバ通信では、高度で複雑な送受信技術の採用に伴い、これまで無視されていた送受信機内デバイスの不完全性に起因する信号歪みが顕在化している。このような歪みは予めその特性を把握するのが困難であるため、一般に出力信号が所望信号に近づくようにフィルタ係数が決定される適応フィルタによって補償されるが、光ファイバ通信では他にも様々な特性をもつ信号歪みを補償する必要がある。それぞれの歪みを補償するためのフィルタを受信機内に複数用意すると、最終段以外の各フィルタではその出力信号に他の歪みの影響が残るため、適応フィルタの適用が困難であるという問題があった。本章ではこの問題を解決するためのアプローチとして深層展開を利用する展望について述べている。</p> <p>第2章では、本論文で対象とする適応多層フィルタの理論的な土台として、有限インパルス応答フィルタと光ファイバ通信における各種信号歪みの数理モデルについて説明している。</p> <p>第3章では、光ファイバ通信システムの送受信機内デバイスの不完全性に起因する信号歪みと光ファイバの波長分散に起因する信号歪みを補償するために、受信機内に適応多層フィルタを構成し、誤差逆伝播を用いて全層のフィルタ係数を決定する手法を提案している。波長分散などの通常の線形歪みは複素信号の実部と虚部に同一の複素数が乗算される狭義線形モデルで表現される一方、IQ不均衡などの送受信機内デバイスの不完全性に起因する歪みは実部と虚部に異なる複素数が乗算される広義線形モデルで表現され、その補償においてもそれぞれ狭義線形フィルタと広義線形フィルタが用いられる。一般に狭義線形フィルタと広義線形フィルタは順序非可換であるため、これらの全ての歪み補償のための多層フィルタは歪みが発生する逆順、すなわち、受信機内デバイスの不完全性に起因する信号歪み補償のフィルタ、波長分散補償フィルタ、送信機内デバイスの不完全性に起因する信号歪み補償のフィルタの順で構成する必要がある。最終層からの誤差逆伝播と確率的勾配降下法で多層フィルタ全体を最適化する提案手法により、高精度かつ高効率な信号歪み補償が可能であることを、計算機シミュレーションと実験の両面から実証している。</p> <p>第4章では、第3章で提案した適応多層フィルタの誤差逆伝播と確率的勾配降下法による収束後の各層のフィルタ係数から、光ファイバ通信システム内で生じている各信号歪みを検出する手法について検討している。一般に、送受信機内デバイスの不完全性に起因する信号歪みの影響は波長分散などに比べて微小であり、その歪みのパラメータを受信信号から推定することは困難であるが、広義線形フィルタと狭義線形フィルタの順序非可換性を利用することで、信号歪み補償のためのフィルタ係数から信号歪みを引き起こすデバイスの不完全性のパラメータを高精度に推定可能であることを、計算機シミュレーションと実験の両面から実証している。このことは適応多層フ</p>			

フィルタの各層が意図通りに機能していることの裏付けとなっている。

第5章では、第3章で提案した適応多層フィルタを拡張することで、送受信機内デバイスによる非線形歪みも補償可能な手法について検討している。送受信機内の非線形歪みとして増幅器の飽和による信号歪みを想定し、適応多層フィルタに2つの非線形Volterraフィルタ層を導入することで、非線形フィルタと線形フィルタの順序非可換性を利用した提案アプローチによって非線形歪みも補償可能であることを、計算機シミュレーションと実験の両面から実証している。

第6章では、超長距離光ファイバ通信システムに提案アプローチを適用するための手法について検討している。超長距離光ファイバ通信では、波長分散による遅延広がり非常に大きくなり、それに伴って波長分散を補償するためのフィルタ長も大きくなるため、誤差逆伝播の計算量が許容できない程度にまで増大してしまう。一方、波長分散は静的な信号歪みであり、その補償は固定のフィルタを用いて実現可能である。そこで、送信機内デバイスの不完全性に起因する信号歪みと波長分散の非可換性を考慮しつつ、静的な波長分散補償を適応多層フィルタの前段に掃き出す構成を検討し、その有効性を超長距離光ファイバ伝送実験によって実証している。

第7章では、適応多層フィルタの各層の出力が入力と内部パラメータに関して微分可能なパラメトリックな関数であれば提案アプローチが適用可能であることを利用し、そのさらなる応用可能性を検証している。信号のサンプリングレート変換が微分可能な関数であることを利用し、通信システムでは損失関数を与える基準がシンボルレートでしか得られないという問題を解決するために、誤差逆伝播を用いた分数間隔適応周波数領域フィルタによる波長分散補償とMIMO信号検出を実現する手法を提案している。結合型4コアファイバ伝送実験により、提案アプローチを用いることで受信信号のオーバーサンプリング率を大幅に削減可能であることを実証している。

第8章では、第3章から第7章で述べられた適応多層フィルタによる光ファイバ通信システムの信号歪み補償の研究で得られた結論をまとめ、今後の展望を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、長距離・大容量の光ファイバ通信システムで生じる各種の信号歪みを複数の適応フィルタで補償するために、全ての適応フィルタの係数を一括して決定する深層展開によるアプローチについて検討したものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 送受信機内のデバイスの不完全性に起因する信号歪みを補償する広義線形フィルタと光ファイバの波長分散を補償する狭義線形フィルタが順序非可換であることを利用することで、深層ニューラルネットワークの学習手法を用いて、異なる特徴をもつ信号歪みを補償する複数の適応フィルタの係数を一括して決定可能であることを、計算機シミュレーションと実験によって明らかにしている。
2. 誤差逆伝播によって得られた、各種の信号歪みを補償するための適応多層フィルタの係数から、各信号歪みのパラメータを推定する手法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションと実験によって確認している。特に、送受信機内のデバイスの不完全性に起因する信号歪みは一般に微小であり、波長分散などの他の信号歪みの影響を受けた受信信号からそのパラメータを推定することは困難であったが、順序非可換性を利用した提案手法による信号歪みの分離によって、それが可能であることを実証している。
3. 提案アプローチが広義線形モデルや狭義線形モデルで表現される信号歪みだけでなく、非線形の信号歪み補償にも有効であることを明らかにしている。特に光ファイバ通信では、送受信機内の様々なデバイスや光ファイバの有する非線形性に起因する非線形歪みはその特性を大きく制限する要因となっているため、提案手法によって大幅な特性改善が期待される。
4. 提案アプローチを超長距離光ファイバ通信システムに適用可能とするため、一般に順序非可換な波長分散補償と送信機内のデバイスの不完全性に起因する信号歪み補償を入れ替えるための手法や、受信信号のサンプリングレートを削減するためのアプローチを提案し、実験によりその有効性を明らかにしている。
5. 従来の深層展開に関する研究では主に繰り返しアルゴリズムを対象に、その収束特性を改善することに主眼が置かれているのに対し、本論文では通信システムの受信機のような多段にフィルタリングが施されるようなシステムにおいても深層展開のアイデアが有効であることを明らかにしている。

以上のように本論文は、光ファイバ通信で生じる各種の信号歪みを補償するための適応多層フィルタを物理モデルに応じて構成し、その係数を最終層の出力を基に一括して決定するための手法を構築して有効性を明らかにしたものである。この結果は、学術上だけでなく光ファイバ通信の実応用上も意義がある。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年8月21日に論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認められた。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。