

光ファイバ通信におけるデジタルトランスフォーメーション



研究ノート

五十嵐 浩 司*

Digital Transformation in Optical Fiber Communications

Key Words : Optical Fiber Communications, Digital Signal Processing

はじめに

現在、製造業やサービス業などの産業だけでなく社会生活に対してもデジタル技術を適用・実装させることで、新しい産業・文化を創生するデジタルトランスフォーメーション (Digital transformation: DX) が進んでいる。この DX の大前提が、インターネット・ワイヤレスモバイル通信の急速な普及によって人・もの・サービスすべてが大容量ネットワークに接続されていることである。その根幹が、超長距離に超大容量の情報を伝送する光ファイバ通信技術である。本稿では、光ファイバ通信の発展と、そこに出現したデジタル革命について説明する。学術的な意味を考え、今後の発展を描こう。

光ファイバ通信の発展

電磁波に信号を変復調し伝送を行う搬送波伝送では、搬送波に用いる電磁波の周波数に比例して通信容量の拡大が可能である。光ファイバ通信で活用される光波の周波数はおよそ 200 THz であり、ワイヤレス通信の電波のその 1 万倍に達する。光波の高い周波数を活かすことで、超高速なデータ伝送が可能となる。光ファイバ通信における大容量化は 40 年にわたり持続的に更新されてきた。国内における光ファイバ通信の大容量化の進展を図 1 に示す¹⁾。1981 年に NTT によって商用化されて以来、

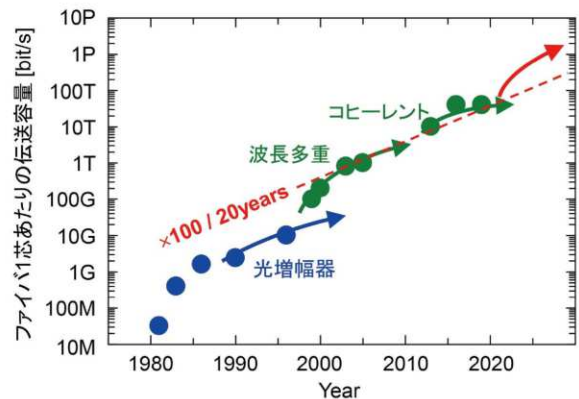


図1 光ファイバ通信における大容量化の変遷。

急激な大容量化を達成してきた。この 20 年においても、ざっくり 100 倍を超える大容量化を継続し、インターネットやモバイル通信の普及による大容量化の需要に持続的に応えてきた。将来にわたりデジタル情報社会を深化させるためにも、今後も光ファイバ通信の大容量化を持続させることは、本分野に係る研究者・技術者の責務である。

2010 年までの光ファイバ通信では、光の明暗にデジタル情報の“0”と“1”を割り当てる方式がベースであった。すなわち、光波のエネルギーによる情報伝達である。一方、ワイヤレス通信では、電磁波の振幅と位相の両成分を受信するコヒーレント検波技術によって、周波数当たりの伝送容量が高い高度な通信を実現している。通信理論の観点からは、ワイヤレス通信に比べると光ファイバ通信は極めて原始的であったと言わざるを得ない。光通信では、なぜ光波の波動性を活用するコヒーレント方式が用いられなかったのだろうか？ この最大の理由は、半導体レーザーから得られるレーザー光は、波としては極めて品質が悪いためである。より正確には、半導体レーザーの周波数安定度が極めて低く、1 MHz 程度の揺らぎを有するためである。



* Koji IGARASHI

1974年8月生まれ
 東京大学大学院 工学系研究科 電子工学専攻博士課程 (2002年)
 現在、大阪大学 大学院基礎工学研究科 システム創成専攻 デジタルフォトリクス 教授 博士(工学)
 専門/光通信
 TEL : 06-6850-6335
 E-mail : iga.koji.es@osaka-u.ac.jp

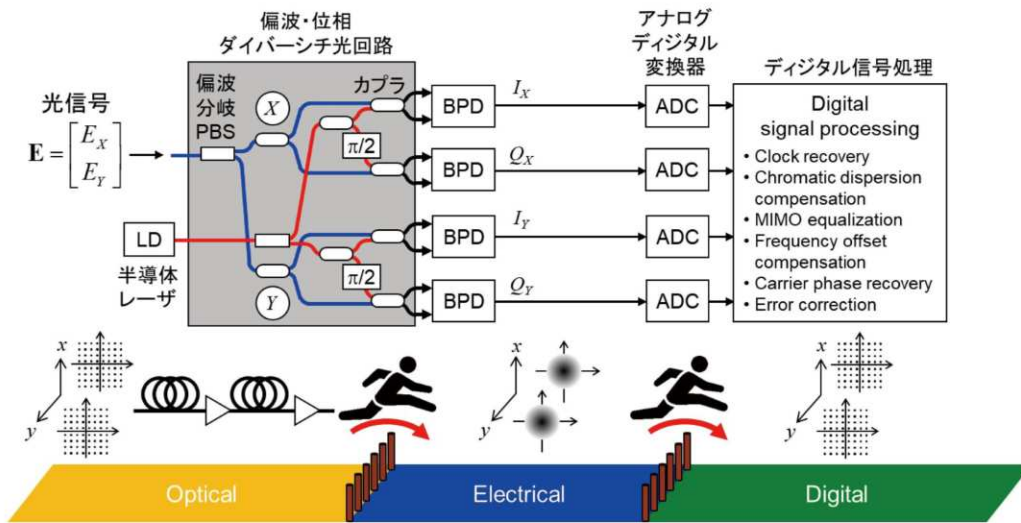


図2 デジタルコヒーレント受信方式の構成とその概念。

原始的なエネルギー検出ベースでも、光波の広帯域性を活かせば1990年代でも10 Gbit/s以上の高速伝送が容易に達成された。ちなみに、この時代は100 Mbit/sイーサネット(100BaseT)がようやく普及し始めた頃である。更に、1990年代初頭に光ファイバ増幅器が実用化され、その方向性に拍車がかかる²⁾。運が良かったことに、光増幅器は、当時の感覚では無限ともいえるほどの5 THzの帯域を有していた。その広帯域性を活かし、異なる波長に異なる信号を多重する波長多重(周波数多重と同義)技術によって容易に大容量化が達成された。周波数利用率を考えなくとも波長数を増やすことで、実験室レベルでは2000年までに1 Tbit/sの大容量化が達成され、比較的研究開発は順調であった^{3,4,5,6)}。

光ファイバ通信におけるデジタル革命

誰もが予想することだが、波長多重数は光増幅器帯域によって制限される。波長多重帯域が光増幅器帯域に達した2005年頃には、光増幅器帯域を効率的に活用することの重要性に気付き始めた⁷⁾。そこでリバイバルしたのが、光波の振幅・位相・偏波の全成分を活用するコヒーレント光受信方式である。コヒーレント方式の最大の課題であった半導体レーザーの周波数揺らぎはどのように解決したのだろうか？ ストレートフォワードに考えると、高品質な半導体レーザーが登場したのだろうか？ 否、半導体レーザーの性能自体は1990年代と大差ない。これを解決したのはデジタル技術である。アナログ電圧

信号をサンプリングし、データをメモリ上に蓄えることができるアナログ・デジタル変換器の高速化が進み、2000年以降にそのサンプリング周波数は光信号速度相当の10 GSample/sに達した。その速度のリアルタイムオシロスコープが市販され、コヒーレント光受信技術の研究を細々と行っていた大学研究者がこれに注目し、光ファイバ通信への活用を始めた^{8,9)}。これが「デジタルコヒーレント受信器」の発明である(図2)。コヒーレント光受信方式による光電変換は線形写像であり、光領域・電気領域の境界はなくなり、どちらの領域でも周波数揺らぎ抑圧は可能となる。更に、アナログ・デジタル変換器を用いてデータをデジタル領域にストアすれば、高度なデジタル信号処理が活用可能となる。従来、光領域における波形歪みや雑音に対して

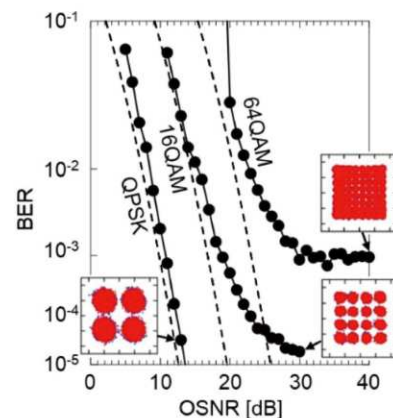


図3 デジタル信号処理を用いて復調された偏波多重直交振幅変調光信号のビット誤り率測定結果。

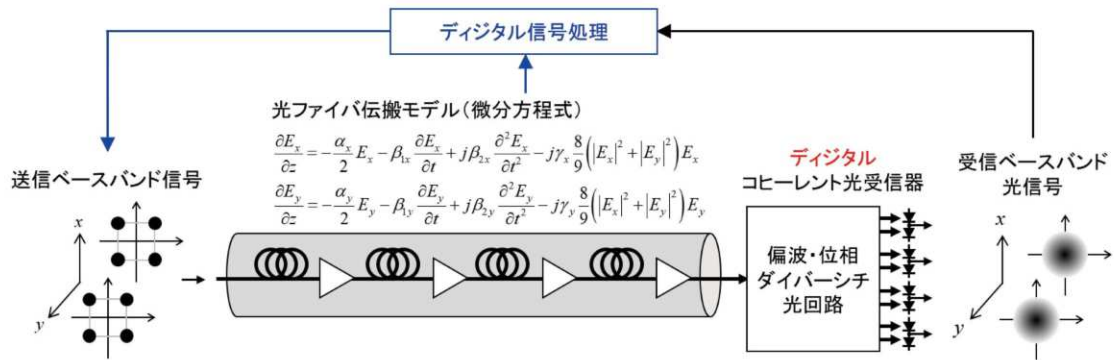


図4 事前情報として光ファイバ伝搬モデルを活用する受信信号から送信信号の推定問題。

は光領域で抑圧・補償が必要と思いついていたが、光電変換が線形写像であれば電気領域・デジタル領域でも解決できると発想した瞬間であった。これを機に、デジタル信号処理が光ファイバ通信分野における主要テーマの一つに躍り出た。送受信器対向構成における偏波多重高次直交振幅変調光信号のビット誤り率の測定結果例を図3に示す。破線は各変調方式における理論値を示す。デジタル信号処理によって、偏波多重分離・キャリア位相推定を行った結果、理論値に近い良好な受信特性が得られる。

デジタルコヒーレント受信技術が2005年に提案され、高々5年後の2010年には100 Gbit/sシステムに実導入された^{10,11,12)}。従来、光ファイバ通信分野の研究開発では、半導体レーザやフォトダイオードなどの半導体デバイス、光フィルタなどの光デバイス、そして光ファイバの研究開発がメインであった。近年ではそれに加えて、数理学・情報科学を基礎とするデジタル信号処理の専門家が参入し、光ファイバ通信の研究開発分野が大きく様変わりした。これは、光ファイバ通信分野に訪れたデジタル革命であった。

デジタルコヒーレント伝送技術の意味

デジタルコヒーレント技術が光ファイバ通信にもたらしたものは何だったのだろうか？ 超大容量・長距離光ファイバ通信を実現するためには、様々な技術課題を解決する必要がある。それら課題解決は、半導体レーザ・受光器・光フィルタなどのデバイスの高性能化によって達成されてきたのが古典的な光ファイバ通信であった。別の言い方をすれば、デバイス性能によって課題解決法が制限される

システムであった。一方、光・電気・デジタルの境界を取っ払ったデジタルコヒーレント技術によって、光領域の課題を光領域で解決する必要がなくなった。問題解決にはアナログデバイスよりも高度なデジタル技術の方が適している。デジタル技術によって、数理工学・情報理論の学術的な知見を容易に具現化できる。更に運が良かったことに、光ファイバ伝送に伴う光信号の発展を記述するための伝搬方程式が既に浸透していたことである。その結果、伝送路チャンネルモデルが容易に構築できた。図4に示すように、受信信号から送信信号への推定問題を解くうえで、事前情報として光ファイバ伝搬モデルを用いて、様々な工学・情報科学の学術的知識を取り入れることが可能であった。光通信において数理モデルで定義される問題を解くことができたようになったこと、これがデジタルコヒーレント技術の学術的意味である。

おわりに

この20年において、光ファイバ通信の研究開発分野に訪れたデジタルトランスフォーメーションを説明した。以上のようにまとめてみると、それが必然のようにも感じるところがある。しかしながら、実際は様々なタイミングでキーパーソンが活躍し、必然とも言える結果を導いたことの連続であった。光ファイバ伝送システムを数理モデルに落とし込むことによって、人間の発想が加速する。数理学によって定義された光ファイバ通信のアイデアが今後一般化することを予想し、本稿をめる。

参考文献

- 1) 中沢正隆・萩本和男：2023年 Japan Prize 受賞講演, (2023).
- 2) K. Hagimoto et al., IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol. 9, No. 5, pp.673-681 (1991).
- 3) H. Onaka et al., OFC'96, PD19 (1996).
- 4) T. Morioka et al., OFC'96, PD21 (1996).
- 5) T. Tsuritani et al., Electron. Lett., Vol. 35, No. 24, pp.2126-2128 (1999).
- 6) T. Naito et al., ECOC'99, PD2-1 (1999).
- 7) A. H. Gnauck, and P. J. Winzer, IEEE J. Lightwv. Technol., Vol. 23, No. 1, pp.115-130 (2005).
- 8) R. Noe, Photon. Technol. Lett., Vol. 17, No. 4, pp.887-889 (2005).
- 9) D. S. Ly-Gagnon et al., Electron. Lett., Vol. 41, No. 4, pp.59-60 (2005).
- 10) H. Sun et al., Opt. Express, Vol. 16, No. 2, pp.873-879 (2008).
- 11) E. Yamazaki et al., Opt. Express, Vol. 19, No. 14, pp.13179-13184 (2011).
- 12) H. Sun et al., IEEE J. Lightwv. Technol., Vol. 38, No. 17, pp.4744-4755 (2020).

