

# 知っておきたいキーワード

## 光ファイバ無線 (RoF)

正会員 前田 譲 治†

† 東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科

"Radio over Fiber" by Joji Maeda (Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Noda)

キーワード：光ファイバ、無線サービス、光ファイバ無線、リモートアンテナ

### 有線なのに無線??

光ファイバはガラスやプラスチックなどの透明な誘電体でできた「線」で、内部で全反射を繰り返すことで光を伝えています。光ファイバを使った通信は「有線通信」です。ところが、「光ファイバ無線」という名称には「無線」が付いています。おかしな名前ですが、これはRadio on FiberもしくはRadio over Fiberの訳です<sup>1)</sup>。略称のRoFでご存知の方も多いことと思います。無線のサービスを提供するのに、途中でファイバを使った光伝送を含むシステムのことです。なお、赤外線等を空間内に飛ばして通信する「光無線」というものもあるのですが、話がややこしくなるので、この辺で本題に移ります。

放送や携帯電話などのサービスを行うためには、サービスエリアに電波が届かなければなりません。ところがトンネルや地下街などは、屋外を伝わる

電波の届きにくい、いわゆる「不感地帯」です。このような場所では、利用者の数はそれほど多くないのですが、専用のアンテナを設置しないとサービスができません。ところが、屋外と同様の装置をいちいち導入するのはコストがかかりすぎます。

それでは、アンテナだけを多数用意して、供給する高周波信号を同軸ケーブルで送るのはどうかというと、同軸ケーブルの損失が大きく、賢い方法とは言えません。同軸ケーブルの損失は周波数が高くなるほど大きくなるため、GHz帯の電波を使う第3世代携帯やPHSでは特に問題になります。例えば、8D-SFA (PE) (フジクラ)<sup>2)</sup>という外部導体直径約8mmの超低損失同軸ケーブルでも、900MHzで0.11dB/m、2400MHzでは0.22dB/mという損失を持ちます。このケーブルを100m使用すると、損失は900MHzでは11dB、2400MHzでは22dBにも

なってしまいます。さらに、伝送途中に電磁妨害を受けてしまうことや、太くて重いケーブルを敷設するのが難しいといった問題もあります。

一方、光ファイバはどうかというと、最も一般的な石英(ガラス)ファイバの損失は波長1,550nm付近でおよそ0.2dB/km (=0.0002dB/m)です。上の同軸ケーブルと比べると、文字通り桁違いに小さいのです。さらに光ファイバ素線1本の太さはおよそ0.2mm程度で、同軸ケーブルとは比較にならないほど軽いものです。そこで、電波と同じ高周波信号で光をアナログ変調し、この光をファイバ内に通して送り、アンテナの極めて近くで再度電気信号に戻してアンテナから放射すれば、同軸ケーブルを使わずにアンテナの数を増やすことができます。これが光ファイバ無線です。

### キーワード募集中

この企画で解説して欲しいキーワードを会員の皆様から募集します。ホームページ (<http://www.ite.or.jp>) の会員の声より入力可能です。また電子メール ([ite@ite.or.jp](mailto:ite@ite.or.jp))、FAX (03-3432-4675) 等でも受け付けますので、是非、編集部までお寄せください。(編集委員会)

### 光ファイバ無線の概要

図1に、最も単純な光ファイバ無線の概略図を示します。まず下り側、すなわち、局から遠く離れたアンテナ（リモートアンテナ）に向かって送る例について考えましょう。まず、送信しようとしている高周波信号によって光源からの光の振幅を変調します（光の分野では「強度変調」と呼んでいます）。これをEO変換といいます。光源には主として半導体レーザが用いられます。最も安価な変調方式は、半導体レーザの駆動電流を直接変調する方式（図1(a)）で、主として数GHz以下の信号に対して使われます。それ以上の周波数については、半導体レーザが応答しないため、光変調器を使って変調します（図1(b)）。光ファイバを伝送された光は、リモートアンテナの近くで、光検出器と増幅器によって元の電気信号に戻された後に（これをOE変換といいます）リモートアンテナから放射されます。

携帯電話等の端末から局に送る上り信号を收容する場合には、リモートアンテナで受けた信号を、その近くのEO変換器で光振幅の変化に直し、局

に向かってファイバ中を伝送させます。局ではOE変換器によって再び電気信号に直します。図1(c)の例では、上り信号と下り信号を1本のファイバで送るために、光サーキュレータを用いて分離していますが、上りと下りで

異なったファイバを用意する方法や、波長を変えて分離する方法もあります。また、リモートアンテナ付近の構成を簡単にするため、局側で光源を用意する方法も考案されています。

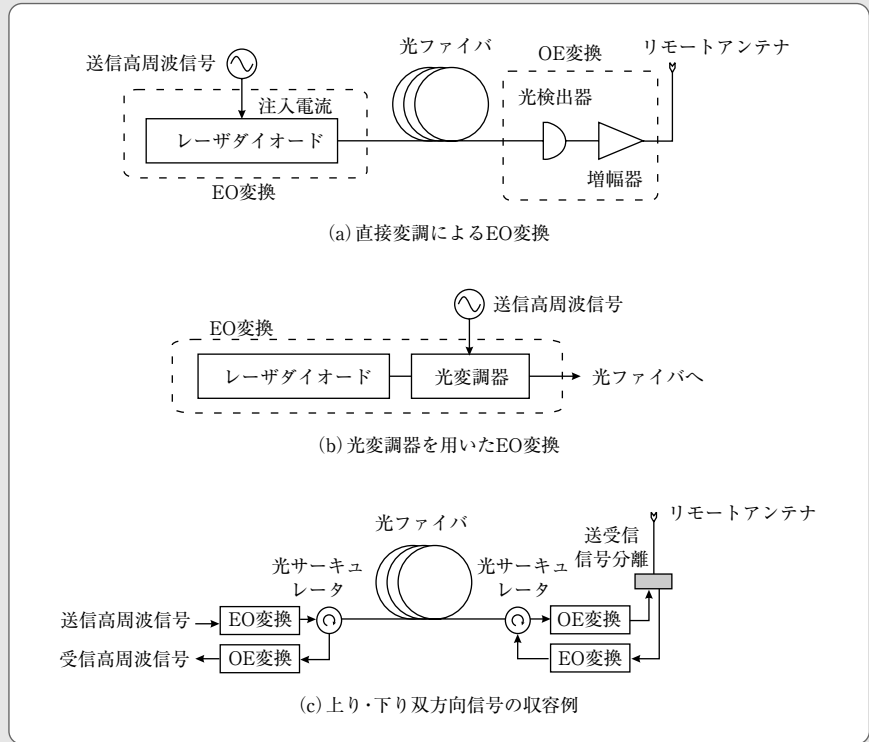


図1 光ファイバ無線 (RoF) の概略図

### 光ファイバ無線の応用

光ファイバ無線の応用として有名なのは、先に述べた無線サービスの不感地帯対策です。図2に示すようなオフィスビルの内部や地下街、トンネル内への携帯電話サービスの拡張に広く使われています。地上デジタル放送のワンセグサービスについても、光ファイバ無線の応用が期待されており、すでに対応製品が発売されています<sup>3)</sup>。

光ファイバ無線のメリットが発揮されるのは、1本のアンテナで收容する端末の数が少なく、設置するアンテナの数が多き場合です。光ファイバ無線の応用をめざして、現在研究が盛んに行われている分野は、ミリ波を利用した高度道路交通システム (ITS) やセルラ通信などです。周波数60GHz付近のミリ波は、大気中での減衰が極めて

大きいことで知られています。このとき、アンテナ1本あたりがカバーするエリアは小さくなるのですが、この性質を逆に使うと、1本のアンテナで收容する端末の数を制限することができます。高速化ができます。また、マルチ

パスの影響によるエリア間の干渉も防ぐことができます。セルの小ささは、アンテナを密に立てることによってカバーするわけで、正に光ファイバ無線に最適な応用と言えるでしょう。

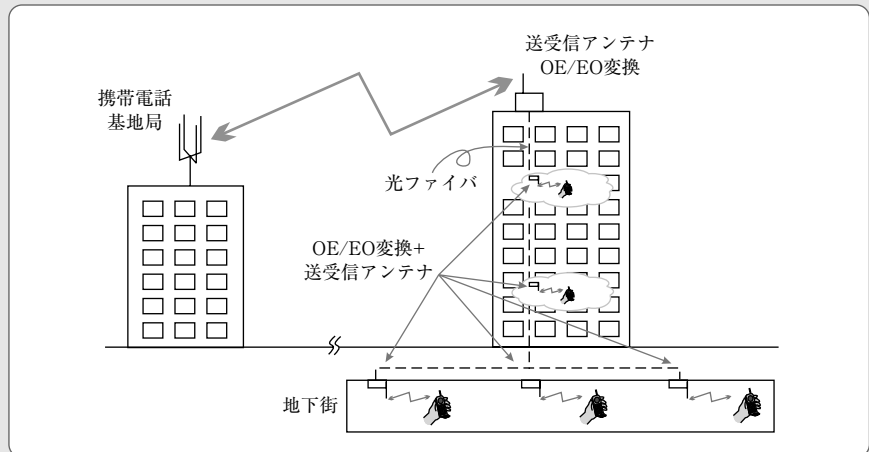


図2 光ファイバ無線によるサービスエリアのオフィスビルおよび地下街への拡大

### 光ファイバ無線の問題

光ファイバ無線にも問題があります。その原因として、① デバイスの周波数帯域、② 光変調時の非線形性、③ ファイバ中の多重反射によるエコー（特にアナログ映像伝送で問題）、④ ファイバの分散、⑤ ファイバの光学非線形性、が挙げられます。ここでは、ファイバ特有の問題である④と⑤について述べます。

#### (1) 分散の影響

ファイバの分散とは、伝搬する光の群速度がバラつくことです。原因としては、伝搬する経路の違い（モード分散）、群速度の波長依存性（波長分散）、ファイバ中の偏光状態に応じた群速度の違い（偏波分散）があります。このうち、単一モードファイバを用いたファイバ無線で主に問題になるのは波長分散で、一種のフェージングをもたらします。

周波数  $f$  の信号で振幅変調された光の周波数スペクトルを見ると、図3 (a) に示すように、搬送波から  $f$  だけ離れた両側に（光領域の）変調側波帯が存在します。このときの光電界ベクトルを図3 (b) に示します。搬送波を基準位相にとると、上側波帯 (USB) と下側波帯 (LSB) がちょうど複素共役の関係を保ちながら、搬送波の電界ベクトルの先端を中心に周波数  $f$  で回転します。この結果、トータルの電界ベクトルの動く方向は白抜き矢印で示すように振幅方向となり、周波数  $f$  で強弱する振幅変調が得られます。

ところが、波長分散が存在すると、これらの変調側波帯の伝搬速度が異なるため、受信端における両側波帯の位相関係が崩れます。図3 (c) のように、両側波帯の位相が  $180^\circ$  ずれた場合、

トータルの電界ベクトルの動く方向は実線で示すように位相方向のみとなり、振幅方向の動きは常にゼロになってしまいます。両側波帯の間で振幅変調成分を相殺してしまうのです。この現象は伝送距離について周期的に現れることから、フェージングの一種とされています。

変調周波数が高いほど両側波帯の群速度差が大きくなるため、このフェージングは、より短い伝送距離で発生します。その対策として、光領域における片側搬送波 (光SSB) 伝送が提案されています<sup>4)</sup>。光SSBであれば、反対側の側波帯がないので変調成分が相殺される心配はありません。また、ファイバとは逆の分散特性を持つ素子を入れて、分散のそのものをなくしてしまう「分散補償」という方法も検討されています。

#### (2) 非線形性の影響

光学非線形性とは、光の強度に依存して発生する現象のことです。光ファイバ無線で特に問題となるのは誘導ブリルアン散乱です<sup>5)</sup>。

ブリルアン散乱は、分子の音響振動エネルギーに光のエネルギーの一部が

変換される現象です。進行する光によって音響振動が生じ、これによってその光自身が反射され、一部の光が受信端に届かなくなってしまいます。これが誘導ブリルアン散乱です。誘導ブリルアン散乱は、伝送光パワーがあるレベル（しきい値）を超えると顕著になるという特徴を持ちます。しきい値を超えた分の光は、反射されて送信側に戻されてしまい、受信端には到達しなくなります。伝送中のC/Nを確保したい光ファイバ無線システムでは、なるべく大きい光パワーで伝送したいところですが、この誘導ブリルアン散乱によって最大伝送パワーが制限されてしまいます。

誘導ブリルアン散乱は、光の周波数広がり が1GHz程度以内の場合に大きく現れます。このため、地上波の映像信号伝送では極めて大きな性能劣化要因になります。その解決策として、ファイバ内の光が通過する部分の構造を工夫して誘導ブリルアン散乱を抑え込む方法や、種類の異なるファイバをつないで特性をばらつかせる方法、光変調の前に予変調を加えて、光スペクトルを広げる方法などが提案されています。

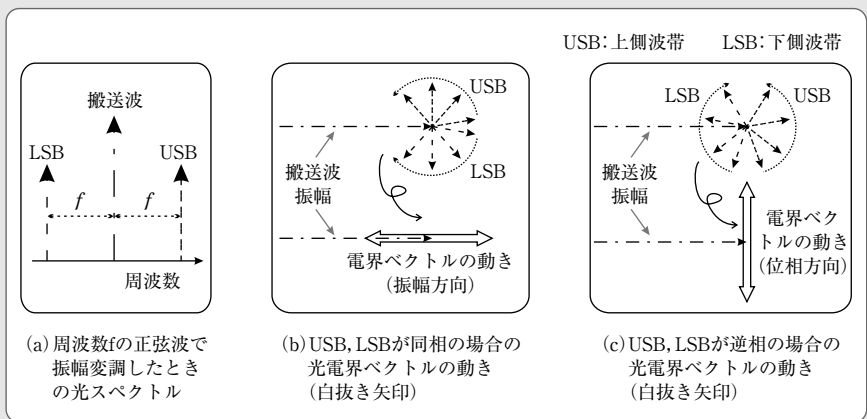


図3 光ファイバ伝送時のフェージングの原理

### 参考文献

- 1) H. Al-Raweshidy and S. Komaki eds., "Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks," Artech House, Boston (2002)
- 2) SFA (PE) 型同軸ケーブル特性表, [http://www.fujikura.co.jp/comm\\_sys/metal/coaxical/faes-fape.pdf](http://www.fujikura.co.jp/comm_sys/metal/coaxical/faes-fape.pdf)
- 3) 例えば, <http://www.furukawa.co.jp/tukuru/pdf/ftth-5.pdf>
- 4) G.H. Smith, D. Novak and Z. Ahmed: "Technique for Optical SSB Generation to Overcome Fibre Dispersion Penalties in Fibre-radio System", Electron. Lett., 33, pp.74-75 (1997)
- 5) G.P. Agrawal: "Nonlinear Fiber Optics, 3rd. ed.", Academic Press (2001)



まえだ じょうじ  
前田 譲治 1988年、東京大学工学部電気工学科卒業。1993年、東京大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程単位取得退学。同年、東京理科大学理工学部電気工学科助手、同学科講師を経て、電気電子情報工学科助教授となり、現在に至る。光ファイバ通信、量子光学の研究に従事。博士（工学）、正会員