

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

電波を光に乗せて 列車に伝送する

近年、無線周波数の電気信号を光ファイバーによって伝送するファイバー無線 (Radio over Fiber : 略称 RoF) の技術が進み、GHz オーダーの非常に高い周波数の電気信号でも少ない損失で数kmの距離を伝送することが可能となってきています。列車無線などの対列車通信システムにおいても、RoFの技術を活用することにより、これまで線路に沿って多数並べていた無線装置の構成をシンプルにすることができ、低コストで通信容量の大容量化を図ることが可能となります。ここでは、まず移動体通信で使用される周波数帯の現状と課題に触れたのち、RoF技術の概要とRoF技術を用いたミリ波による対列車通信システムの研究開発について紹介します。



中村 一城
Kazuki Nakamura
信号・情報技術研究部
ネットワーク・通信研究室
室長
【専門分野】無線通信システム, EMC



川崎 邦弘
Kunihiko Kawasaki
信号・情報技術研究部
部長
【専門分野】対列車通信システム, 電波環境

移動体通信で使われる周波数

現在、携帯電話や無線LAN、列車無線などの移動体通信システムの多くは、VHF帯 (30MHz~300MHz) や UHF帯 (300MHz~3GHz) の電波を利用しています。これらの周波数帯は、電波を発振したり増幅したりするためのデバイスが安価で、品質も安定しており、またアンテナの大きさをコンパクトにしやすいことから、非常に多くの移動体通信システムで使われています。このため、空いている周波数がほとんどなく、今後のユーザーの増加や伝送容量の拡大に対応できない状況となっています。このような状況を解決するため、近年では、3GHz以上の周波数帯の有効利用が促進されており、とくに移動体通信にまだあまり利用されていないミリ波帯 (30GHz~300GHz) を活用することが検討されています¹⁾。

ミリ波を使った無線通信

ミリ波帯に限らず、電波を使って通信を行うためには、送りたい情報を電波に乗せる送信機と、受信した電波から情報を取り出す受信機、そして空間

に電波を放射したり伝搬してきた電波を電気信号に戻すためのアンテナ (図1) が必要となります。送信機や受信機では、電波を安定して発振・増幅する必要がありますが、近年の半導体デバイスの製造技術の発展により、ミリ波帯まで動作する素子が登場しており、また価格も下がりつつあります。アンテナについても、アレーアンテナのようなコンパクトで性能の高いアンテナが登場しています。このため、ミリ波を使った無線通信システムは徐々に普及してきており、最近では60GHz帯を使った無線LAN (参照) が製品として販売されています。鉄道でも、車

60GHz帯の無線LAN

現在最も普及している無線LANは、2.45GHz帯・5GHz帯を利用するものです (IEEE 802.11a/b/g/nとして規格が策定されてます)。60GHz帯の無線LANは、2012年にIEEE 802.11adという規格でその仕様が策定されたもので、10m程度の短距離ですが最大で約7Gbpsの高速通信が可能です。60GHz帯は空気による減衰が大きく、直進性が強く遮蔽物の裏に電波が届きにくい性質があるので、室内や近距離での通信に向いています。



図1 アンテナの例

両基地構内での入換作業の支援や、駅停車中の車両とホームとの間での画像・データなどの伝送に40GHz帯・60GHz帯が利用されています。

ミリ波を使うときの課題

ミリ波などのきわめて高い周波数を使って、列車のように長い距離を走行する移動体と地上との間で連続的に通信を行うには、解決しなければならない課題がいくつかあります。そのうちの一つに、周波数が高いため空間やケーブルでの電波の減衰が大きいので、アンテナを並べる間隔と、無線機とアンテナとの距離を短くしなければならないという問題があります。

VHF帯やUHF帯の列車無線では、沿線に配置する無線機（基地局と呼びます）は、数km～十数kmごとに並んでおり、無線機とアンテナの間は同軸ケーブル（参照）と呼ばれる高周波用のケーブルを使って接続していま

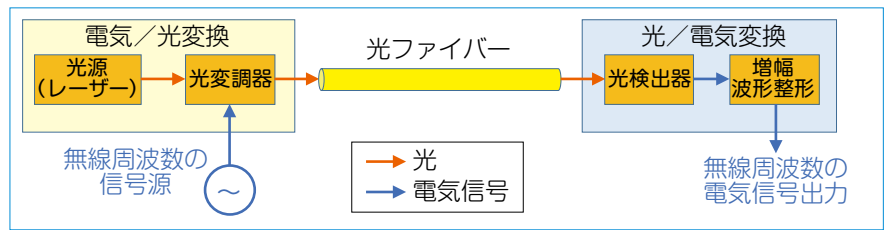


図2 光ファイバー無線 (RoF) の基本構成

す。しかし、ミリ波帯では、電波が届く距離が数百m～1km程度で、同軸ケーブルは2～3m程度までしか伸ばせないことから、無線機とアンテナを一体化した複雑で高価な装置を線路の沿線に多数並べなければなりません。このため、ミリ波による対列車通信システムの導入コストは非常に高くなってしまいます。

このような課題を解決する手段の一つとして注目されているのが、無線周波数の電気信号を、同軸ケーブルではなく光ファイバーを使って遠くまで伝送する光ファイバー無線 (RoF: Radio over Fiber) の技術です (図2) 2)。

光ファイバー無線とは

光ファイバー無線では、電気信号を光に変換するためのデバイス（電気／光変換：Electric-Optic変換：略称：E/O）と、光から電気信号に戻すためのデバイス（光／電気変換：Optic-Electric変換：略称：O/E）、そして光ファイバーの3つを使います。

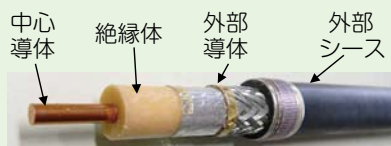
一般的な光ファイバー通信では、送りたい情報をデジタル化して0と1の符号に変換し、この0と1に対応させて高速で光源（半導体レーザーが多い）

をON/OFFして送信するデジタル変調が用いられます。これに対し、光ファイバー無線では、無線周波数の電気信号、つまりアナログ信号で光の強弱に変化をつけます（＝アナログ変調）。光ファイバー無線で使用される電気／光変換デバイスは、光変調器とも呼ばれ、ニオブ酸リチウム (LiNbO₃) などの誘電体に電圧をかけた時の光学的な特性の変化（参照）を利用するものや、半導体の電界吸収効果を利用するものなど、いくつかの方式があります。一方、光／電気変換には、光の強弱によって電気の導通状態が変化するフォトダイオードなどが使用されます。一般的な光ファイバー通信でも同様のデバイスが使用されますが、0か1かが判定できればよい光ファイバー通信に対し、光ファイバー無線では光の強弱から元の無線周波数のアナログの電気信号を再現しなければならないので、直線性に優れたデバイスが必要です。

光ファイバーは、光をほとんど減衰させずに遠くまで伝えることができますので（1kmで失われる電力は数%程度）、同軸ケーブルではとうてい届かせることができない数km～十数kmの距離でも無線周波数の信号を送るこ

同軸ケーブル

同軸ケーブルは、高周波信号を配線するためのケーブルで、下図のように1本の中心導体と同心円状の外部導体からできています。同軸ケーブルに電波を通したときの減衰量は、心線と外部導体の直径で決まり、太いほど減衰は少なくなりますが、扱いが困難になります。



誘電体の電気光学効果

ある種の固体や液体に電圧を加えると、それに比例して屈折率が変化する現象（ポッケルス効果）が現れます。この現象を利用して、電圧によって屈折率を変えることにより、光の位相を変化させることができます（位相変調器）。さらに、位相変調器で位相を変化させた光と、位相を変えていない光源からの光を干渉させることによって、位相の変化を光の強度の変化に変換することができます。この原理を使って光の強度を変調するデバイスをマッハツェンダ光変調器と呼びます。本文で紹介しているニオブ酸リチウムは、これらの変調器で使われている代表的な誘電体材料です。

とができます。

この技術は、ビル内や地下空間、山間部など、屋外の携帯電話基地局のアンテナや放送局の送信所などからの電波が届きにくい場所（不感地帯）へ、サービスエリアを確保するためのアンテナを設置する際の情報伝送路として、すでに実用化されています（図3）³⁾。

現在主に実用化されている光ファイバー無線は、移動体通信に盛んに利用されている数GHzの周波数の電気信号を送送するものですが、近年では、電気／光変換デバイス、光／電気変換デバイスとも性能を向上させるための研究が進められており、数十GHzの周波数の電気信号の伝送が可能になってきています⁴⁾。

鉄道におけるRoFの活用

鉄道でも、すでにRoFの技術が活用されています。たとえば、一部の新幹線の列車無線システムでは、機器室に設置されている基地局と線路沿線に設置されている中継器とを接続するために利用されています⁵⁾。新幹線の列車無線システムは400MHz帯を使っていますが、RoFを利用することで基地局と中継器間の距離による減衰の影響などを極力なくし、より安定した通信品質が実現されています。

RoFとミリ波の融合

先に述べたように、RoFの技術を使わずにミリ波による対列車通信システムを実現しようとすると、ミリ波の無線機（信号源＋変復調機能）とアンテナの双方を備えた基地局を沿線に多数設置する必要があります（図4）。

ここで、RoFの技術を採用することにより、まずアンテナと無線機の間を分離できますので、図4では沿線の全ての基地局に内蔵しなければならなかった無線機を、指令所などの中央に

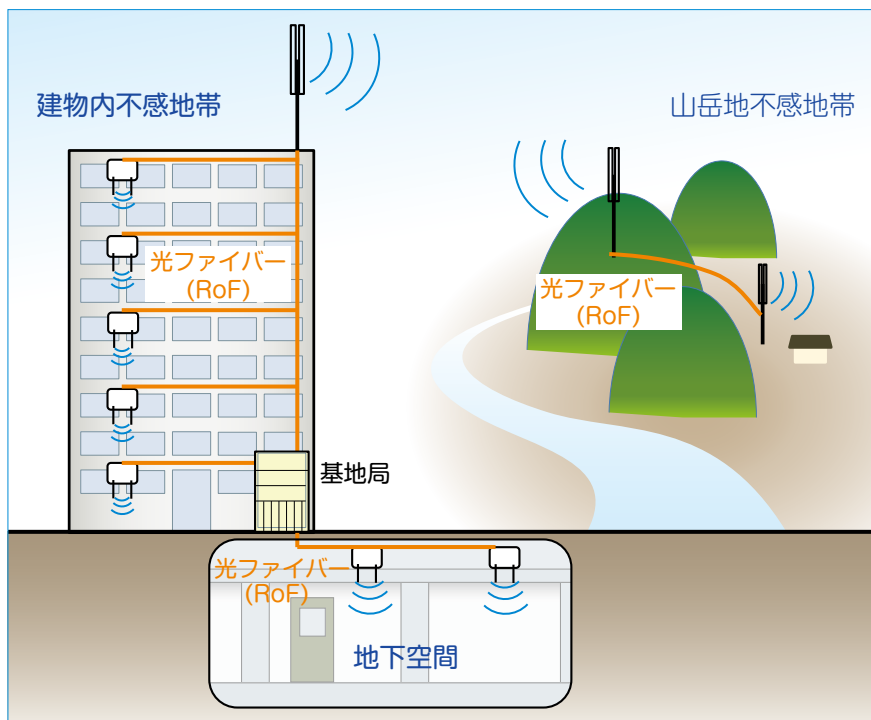


図3 携帯電話システムにおけるRoFの活用事例

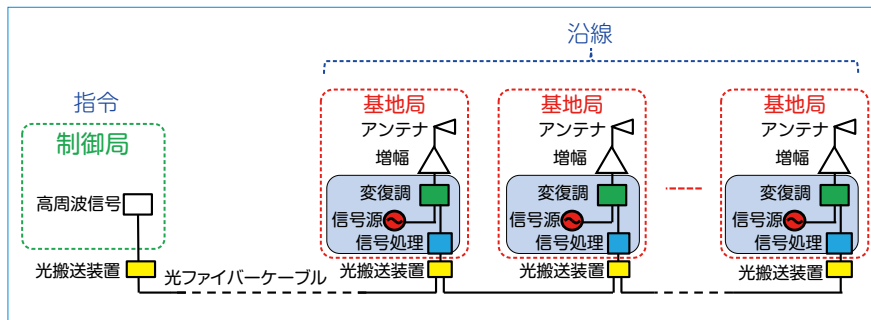


図4 RoFを使わないミリ波列車無線システムの構成例

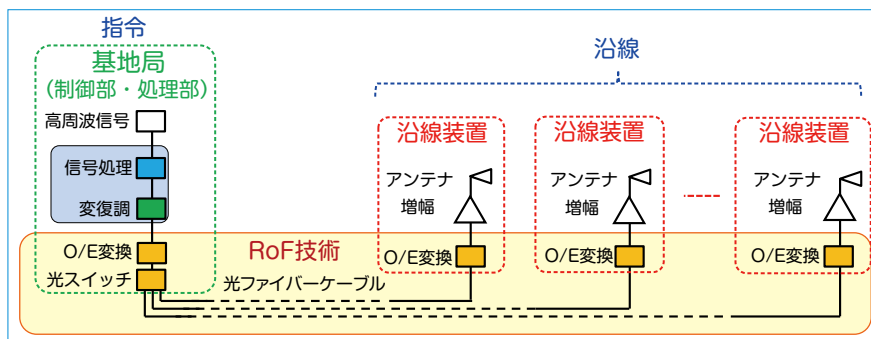


図5 RoFを活用したミリ波列車無線システムの構成例

集約することができます（図5）。沿線に配置する装置は、光と電気を相互に変換する機能と増幅器、そしてアンテナのみで済みますので、構成がシンプルになり、コストを抑えることができます。さらに、装置の小型化・低消費電力化も可能となりますので、設置スペースや電源に制約のある沿線への設

置も容易になることが期待できます。

鉄道総研での取り組み

現在、40GHz帯および90GHz帯のミリ波を用いた対列車通信システムの研究に取り組んでいます。この研究では、図5に示したRoFを活用したミリ波列車無線の構成をベースに、現在の

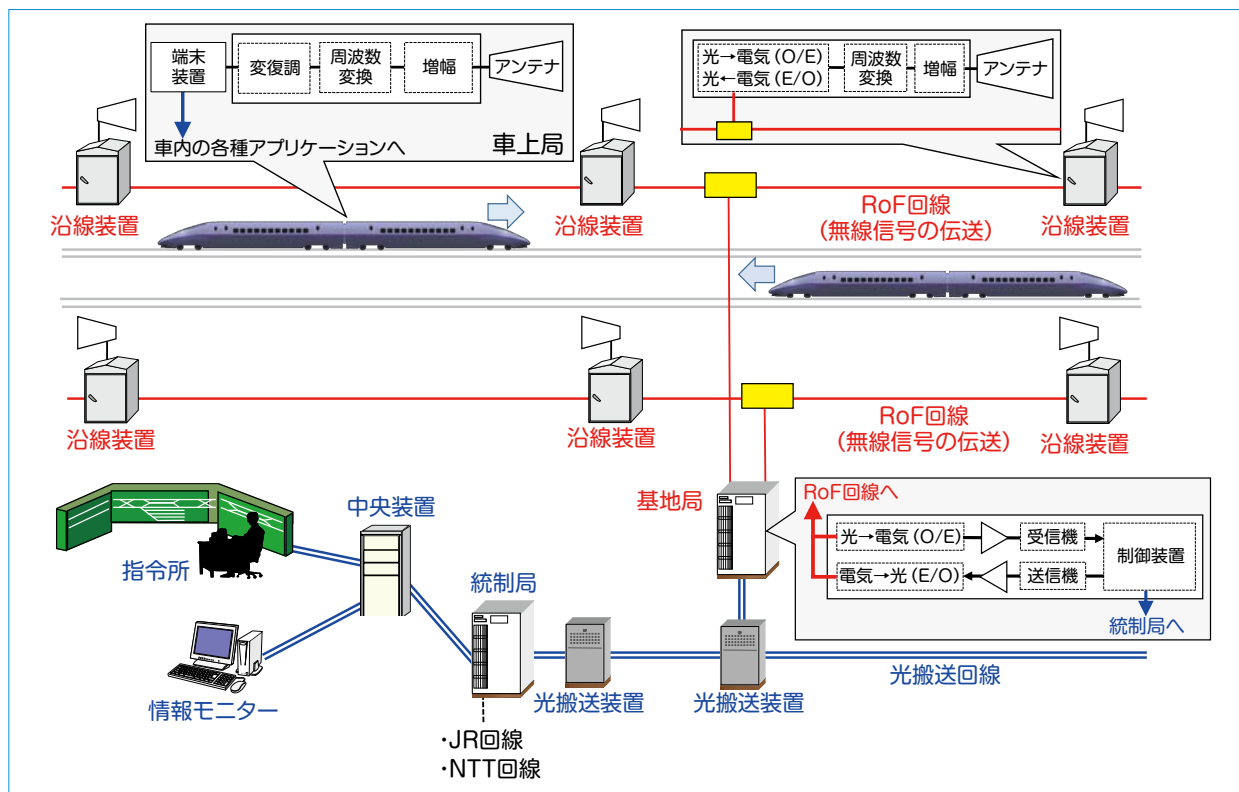


図6 鉄道総研が提案するミリ波帯による対列車通信システムの基本案



図7 試作装置による実験の様子

列車無線システムからの置き換えを想定した新しい対列車通信システムを検討しています(図6)。

90GHz帯のミリ波については、2016年度にRoFを使用した無線通信装置を試作して、実証実験を行いました(図7)。90GHz帯の周波数の電気信号を直接伝送できるRoFの研究も進められています。今回の試作装置では、周波数が約10GHzの電気信号を発生させてRoFで伝送し、沿線装置の中で10GHzから90GHzに周波数を変換しています。

この試作装置を用いて、走行中の列車と地上との間でデータ伝送実験を行

い、1Gbps以上の伝送速度が実現できることを確認しました。

おわりに

ここでは、光ファイバーによって無線周波数の電気信号を遠くまで伝送できるRoFの技術を紹介し、適用事例や現在取り組んでいる対列車通信システムへの活用例を紹介しました。RoFを活用することにより、ミリ波のように高い周波数の電波でも長い距離にわたって配信できるようになるので、線路内を監視するためのレーダーシステムへの適用も可能です⁶⁾。

RoFによって伝送できる信号の周波数がより高くなれば、ますますその活用場面は増えると考えられます。今後も、RoFの技術動向に注目しながら、鉄道におけるさまざまな無線を利用したシステムへの活用・導入に向けた研究開発を進めていく予定です。

なお、本研究開発の一部は、総務省における電波資源拡大のための研究開発「ミリ波帯による高速移動用バックホール技術の研究開発」として、株式

会社日立製作所、国立研究開発法人情報通信研究機構、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所、電子航法研究所、KDDI総合研究所と共同で実施したものです。[RRR]

文献

- 1) 総務省：周波数再編アクションプラン(平成28年11月改定版)、2016
- 2) 前田譲治：光ファイバ無線(RoF)、映像情報メディア学会誌、Vol.61, No.1, pp.43-45, 2007
- 3) 福家裕、谷川大祐、藤井昌宏、木村泰子：W-CDMA/LTEシステム共用RoFシステムの開発、NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル、Vol.18, No.4, pp.25-29, 2011
- 4) 菅野敦史、久利敏明、川西哲也：光で電波を送るー最先端光通信技術を利用した超高速無線通信の実現に向けてー、NICT NEWS, No.432, pp.5-6, 2013
- 5) 岩永伸理、千田晴康、越馬淳、久保博嗣：東海道新幹線デジタル列車無線システム、三菱電機技報、Vol.83, No.6, pp.17-20, 2009
- 6) 中村一城、川崎邦弘、岩澤永照、山口大介：新たな周波数帯のミリ波で線路内の障害物を検出する、RRR, Vol.73, No.2, pp.24-27, 2016