

鉄道の通信環境を高速大容量化する

松原 広
輸送情報技術研究部
(旅客システム 研究室長)

中村 一城
信号通信技術研究部
(通信 副主任研究員)

中川 伸吾
同
(同 研究員)

関 清隆
同
(主任研究員)



まつばら ひろし



なかがわ しんご



なかむら かずき



せき きよたか

はじめに

近年、携帯電話を中心としたモバイルネットワークが普及し、様々なサービスが提供されています。またモバイルWiMAXに代表されるような新しい通信方式も提案され、既にサービスが開始されています。このような移動体通信サービスは、今後多くの需要が見込まれ、益々重要なインフラになると思われます。

ところで、鉄道における移動体通信サービスとして、2006年に運用を開始したつくばエクスプレスの無線LANサービスや、LCX (Leaky Coaxial cable: 漏洩同軸ケーブル) のデジタル化を機に、2009年からサービスを開始したJR東海による無線LANを使ったインターネットサービスが注目されています。これらの通信サービスによって、車内におけるインターネット接続や電子メールの送受信が可能になるなど、鉄道における移動体通信環境は大きく進歩しましたが、さらなる高速大容量化により、多様なサービ

スが提供できるようになります。

一方、高速大容量通信技術として実用化されているものにレーザー光を用いた光通信技術があり、人工衛星の通信やビル間通信などに利用されています。これらは「レーザー光は一方方向に進み広がり難い」というレーザー光の特徴を生かして長距離通信を実現したものであると同時に、「電波のように周りに広がらず盗聴が困難である」という高い秘匿性を生かしたのですが、列車のように高速に移動するものに対する通信手段としては利用されていませんでした。

本稿では、鉄道における高速大容量通信サービスを実現するために、この光通信技術を高速移動体に応用した研究開発について紹介します。

高速移動体通信に適した光通信方式

高速で移動する列車と地上との間の光通信環境を構築するには、移動する列車に搭載した光通信装置と地上側に設置した光通信装置が、連続的に通信を行う必要があります。そこで、このような通信を実現するものとして、①漏洩光ファイバ方式、②光拡散ビーム方式、③レーザスキャン方式の三つの実験システムを試作・評価しました。なお、これらのシステムにおいては、基本性能を確認する目的で製作しており、地上から車上への片方向通信を行うものとなりました。

(1) 漏洩光ファイバ方式

図1に示すように、屈折率分布型漏洩プラスチック光ファイバという光ケーブルを、送信側に敷設することによってレーザー光を一様に漏らし、受信側の受光素子によって信号を受信する方式で、電波を利用したLCXによく似た方法です。機械的な可動部がないことが利点ですが、光ケーブルを鉄道沿線に沿って敷設する必要があり、コストがかかるという欠点があります。

(2) 光拡散ビーム方式

送信側のレーザー光を拡散レンズにより水平方向(扇型)

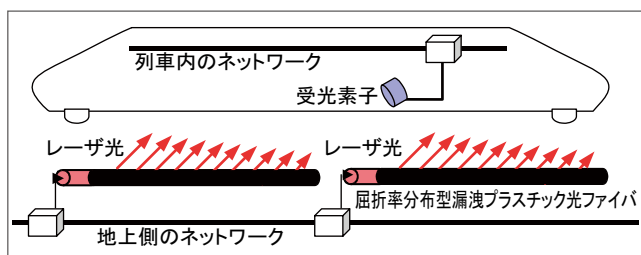


図1 漏洩光ファイバ方式の通信イメージ

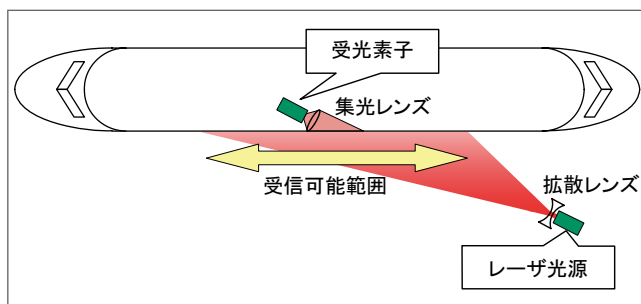


図2 光拡散ビーム方式の通信イメージ

に広げて、受信側は集光レンズによってレーザー光を受信し、列車の進行方向に対し連続的な通信領域を確保する方式です。このイメージを図2に示します。機械的な可動部がないことが利点ですが、受信可能範囲が狭く、地上側の装置をこの通信領域ごとに敷設する必要があります。コストがかかるという欠点があります。

(3) レーザスキャン方式

受信側の通信装置にビーコン光を設置し、送信側はこのビーコン光にレーザー光が当たるように可動式のミラーを制御することによって通信を実現する方式です。このイメージを図3に示します。レーザー光は光が広がりにくいという特徴を生かすことで遠くまで通信距離を確保できるという利点がありますが、ミラーなどの機械的な可動部が存在するという欠点があります。

試作した前記の三つの方式の光通信装置について、それぞれ実験を行い性能を確認しました。結果を表1に示します。この結果、稼働部は存在するものの通信距離を確保することが比較的容易で、地上側の設備としても実現性の高いレーザスキャン方式の研究開発を進めることにしました。

レーザスキャン方式による 鉄道用移動体通信

レーザスキャン方式による光通信方式を鉄道沿線で実際に適用するためには、車上には容易にビーコン光を捕えるために移動局のレーザー通信装置を列車の最後尾に搭載し、地上には基地局のレーザー通信装置を列車の進行方向に向け、相手のビーコン光に向けてレーザー光を発射することにより双方向通信を行うようにします。ところで、この方式は原理的に1対1の通信しか行うことができません。このため、図4に示すように基地局を列車の進行方向に並べて設置し、基地局を切り替えながら通信する必要があります。この仕組みをハンドオーバと言います。すなわち、地上側では高速に移動する列車に搭載している移動局を追尾しながら瞬時にハンドオーバを実行し、車上側では次々と現れる基地局を見つけ出し瞬時に追尾するという動作を行うことが必要になります。

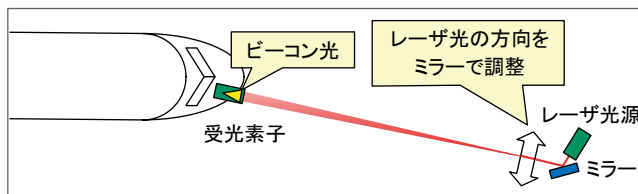


図3 レーザスキャン方式の通信イメージ

表1 各光通信方式の比較

方式	漏洩光ファイバ方式	光拡散ビーム方式	レーザスキャン方式
原理	光ファイバから一様にレーザー光を放射	拡散レンズによって一定の領域にレーザー光を放射	ビーコン光に向けてミラーを制御することによりレーザー光を放射
通信速度	△(約100Mbps) [出力: 100mW]	△(約100Mbps) [出力: 100mW]	△(約400Mbps~) [出力: 10mW]
通信距離	× (数m~10m)	△ (20m~)	○ (300m~)
信頼性 保守性	△ (連続的に敷設)	△ (多くの基地局要)	△ (可動部が存在)

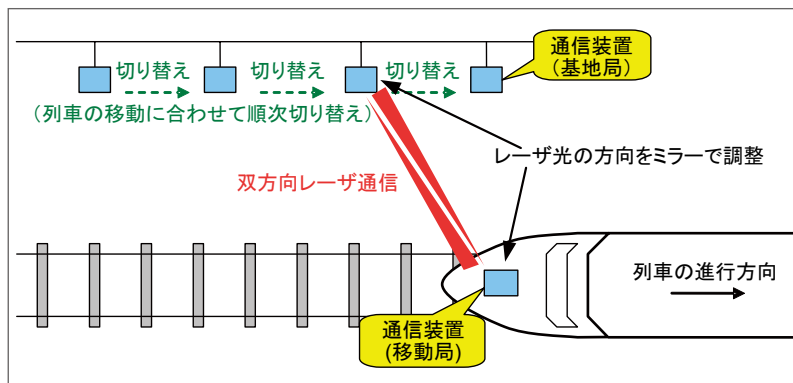


図4 鉄道沿線におけるレーザスキャン方式による光通信

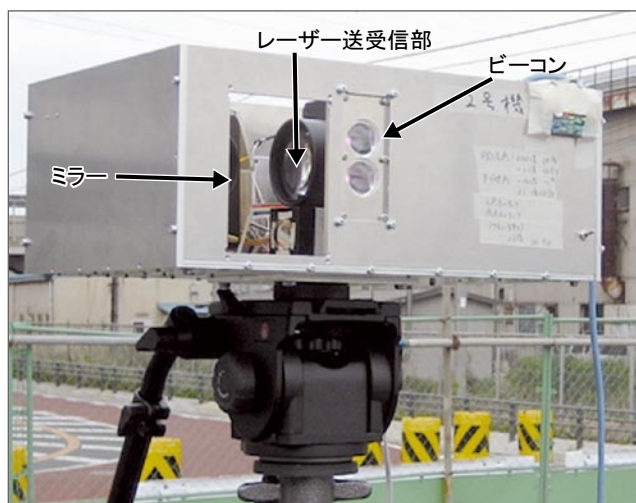


図5 開発した通信装置の外観

表2 光通信装置の諸元

大きさ	470(W) x 260(D) x 162(H)mm
重さ	12kg
通信距離	約300m
ビーコン光波長	850nm(赤外線)
レーザ光波長	785nm(赤外線)
送信出力	+1dBm
送信ビームサイズ	距離200m伝搬時で直径1m
受光光量	-6dBm ~ -34dBm
受入許容角度	±0.15°
レーザ光の強度	クラス1M

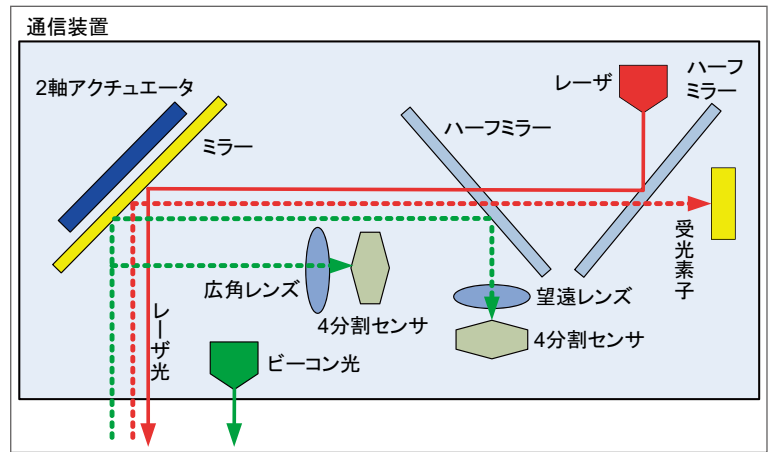


図6 開発した通信装置の構成

光通信システムの開発

レーザスキャン方式による光通信システムの実現可能性を検証するために新たに開発した通信装置の外観を図5に、諸元を表2に、構成を図6に示します。ビーコン光とレーザ光は同じ赤外線ですが、干渉しないように異なる波長の赤外線を用いています。相手のビーコン光に向けてレーザ光を発射するためには、2軸アクチュエータを制御してミラーの向きを合わせます。この時、捕えたビーコン光が上下、左右のどちらにずれているかを検知するために4分割センサという受光素子を用い、広角レンズと望遠レンズを介した2個のセンサを搭載しています。広角レンズ側のセンサを用いて±15°の範囲でビーコン光を捕らえ、さらに望遠レンズ側のセンサを用いた詳細な角度調整を行うことにより、相手のビーコン光を追尾しながら、レーザ光を正確に照射し通信を行います。なお、通信速度として1Gbpsを目指し回路設計しました。

ところで、この光通信装置には、①鉄道沿線への適用を考慮し現実的な通信距離の確保と通信装置の小型軽量化が両立できていること、②通信装置に耐振対策が施されていることが必要になります。また、光通信装置を使ってネットワークシステムを構築するには、③高速なハンドオーバを実現することが大切です。以下に、これらについて述べます。

(1) 通信距離と小型軽量化

通信距離を確保しようとする、高精度な光学系の仕組みや強いビーコン光が必要となり、小型軽量化が難しくなります。一方、通信距離を犠牲にすると小型軽量化は容易になります。1局あたりの通信距離が短くなるために多くの基地局の設置が必要になります。そこで、基地局の適正な通信距離を算出するため、東海道新幹線(東京～新大阪間)を例とし、通信距離に対する必要な基地局数のシミュレーションを行いました(図7)。その結果、通信距離を300～400mより長くしても、曲線部で見通しが利かな

くなることにより、必要な基地局数はあまり減少しないことがわかりました。これにより、通信距離を300～400mとして設計することによって、車両に搭載できる小型軽量の通信装置を開発することができました。

(2) 耐振対策

鉄道沿線において、振動による影響は避けられません。地上局には電車の通過による大きな振動がかかります。また移動局においては、そもそも電車が揺れているために、この揺れを前提にした対策が必要になります。そこで、振動が通信特性に与える影響や通信装置自体の耐振特性を確保するため加振試験を行いました。その結果、前後・左右・上下の3軸それぞれで加速度0.125G、周波数1～80Hzの加振を行っても通信特性に影響がないこと、および通信装置の共振や物理的な損傷などが発生しないことを確認しました。

(3) 高速ハンドオーバ

鉄道沿線に光通信ネットワークを構築するには、基地局をレール沿いに設置することになりますが、その構成方法も大変重要です。本方式のネットワークとしては、図8に示すように、一定の区間にサブネットワークを構成し、このサブネットワークを接続することによって、全体を構成

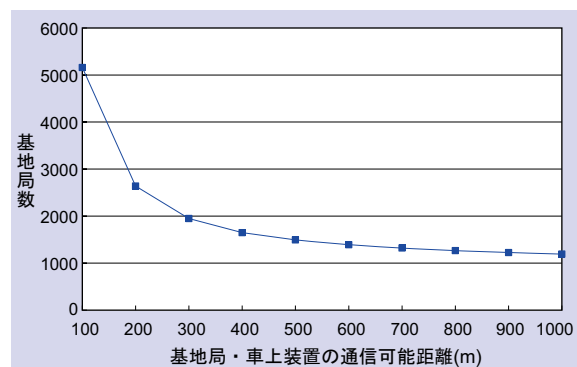


図7 東海道新幹線(東京～新大阪)全線をカバーするために必要な基地局数のシミュレーション結果

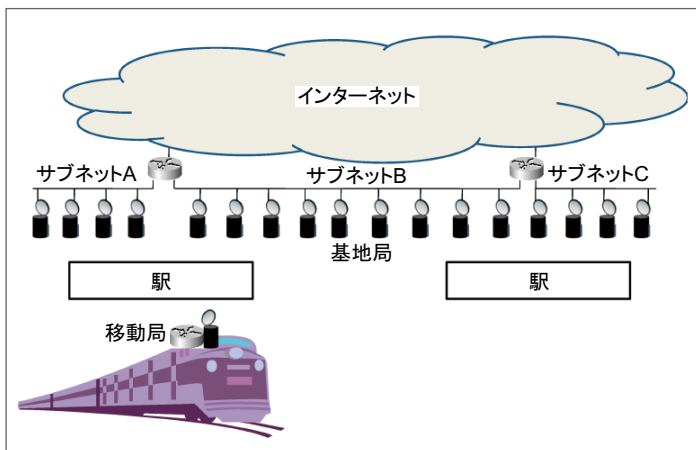


図8 鉄道沿線におけるネットワーク設置のイメージ

する方法が現実的です。そのためハンドオーバーについても、サブネット内ハンドオーバーとサブネット間ハンドオーバーを考える必要がありますが、いずれも列車の移動に伴い高速に行う必要があります。本システムにおいては、このサブネット内ハンドオーバーとサブネット間ハンドオーバーについて、一般的に利用されているプロトコル（情報をやりとりするための通信手順）を改良することによって、通常1秒程度かかるハンドオーバー時間を、理論的に数十ミリ秒で行えるように高速化しています。

フィールド試験による検証

開発した光通信システムの実用可能性を検証するために、①自動車を用いた機能確認試験、②在来線による試験、③新幹線による試験の三つのフィールド試験を実施しました。

(1) 自動車を用いた機能確認試験

静的特性などの基本特性を確認するため、2009年9月に（財）日本自動車研究所において機能確認試験を実施しました。その結果、通信装置を固定した実験では、320m離してもTCP（Transmission Control Protocol：インターネットで利用される標準プロトコルの一つで信頼性は高いが転送速度は低いという特徴がある通信手順）での通信で923Mbps、UDP（User Datagram Protocol：TCPとは逆に信頼性は低いが転送速度は高いという特徴のある通信手順）を用いた場合936Mbpsのスループット（実質的な通信速度）を得ました。また、自動車による走行実験では、100km/hの走行時でもTCPで最大656Mbpsのスループットを得ました。

(2) 在来線による試験

鉄道環境への適用可能性を検証するために、2010年1～2月にJR西日本管内の東海道本線（立花～甲子園口駅間）でフィールド試験を実施しました。試験の様子を図9に示します。ここでは、特に鉄道環境におけるハンドオーバー性能を検証するため、地上側に3台の基地局を100mずつの間隔を空けて電架柱に取り付けました。これらは全て光



図9 在来線における現地試験の様子

ファイバケーブルで接続されており、各々の間でサブネット内ハンドオーバーとサブネット間ハンドオーバーが起こるように設定しています。一方、車上装置は列車の最後部乗務員室に後ろ向きに設置しました。

列車の通過速度は約120～130km/hでしたが、試験の結果、TCPでおよそ500～700Mbps、UDPで最大約850Mbpsのスループットを得ました。また双方向ハイビジョン動画の伝送実験にも成功し、地上側・車上側双方で相手方が送信した動画をスムーズに表示することができました。なお、ハンドオーバーについては、通信切断から次の基地局との安定した通信の確立まで0.4秒程度を要しました。理論上は数十ミリ秒程度のハンドオーバーが可能ですが、窓ガラスや列車振動などの実環境からの影響を複合的に受け、レーザ光の受信レベルが多少不安定になっていることが原因ではないかと思われました。

(3) 新幹線による試験

より高速な列車への適用可能性を探るため、2010年3月にJR西日本管内の山陽新幹線（新大阪～新神戸間）を利用したフィールド試験を実施しました。なお、この試験では設置条件などの制約により、基地局を1台のみとし、ハンドオーバーは行わずに光通信装置の基本性能を確認する試験としました。

列車の通過速度は約240～270km/hでしたが、試験の結果、このような高速走行で、かつ設置条件も厳しい状況においても、約0.7秒の追尾に成功し、新幹線環境への適用の可能性があることがわかりました。

おわりに

今後は、スループットのさらなる向上、ハンドオーバー時間の短縮、高速走行における検証などの課題に向けた研究開発を進めるとともに、システムの実用化も視野に入れながら、具体的なアプリケーションを想定した検討を行っていきたいと考えています。なお、本研究は慶應義塾大学との共同研究・委託研究により実施しました。RRR