

1710 レーザ光を用いた鉄道用高速大容量通信システム

○中川 伸吾 (鉄道総研)

松原 広 (鉄道総研)

[電] 関 清隆 (鉄道総研)

[電] 中村 一城 (鉄道総研)

春山 真一郎 (慶應義塾大学)

寺岡 文男 (慶應義塾大学)

Broadband Telecommunication System for Railways Using Laser Technology

Shingo NAKAGAWA, Hiroshi MATSUBARA, Kiyotaka SEKI, Kazuki NAKAMURA,

Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City, Tokyo

Shinichiro HARUYAMA, Keio University 4-1-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama City, Kanagawa

Fumio TERAOKA, Keio University 3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama City, Kanagawa

Recently communication technology using laser beams has improved. The communication system, where two fixed communication equipment radiate laser beam each other, has achieved transfer rate of several Gbps between the instruments.

On the other hand, as the need for mobile computing environment is expected to increase, providing it on railways will also be necessary. We are carrying out the development in order to apply the laser beam communication technology to the mobile communication system on railways.

Keywords: Mobile communication, Handover, Broadband, Laser beam, Network mobility

1. はじめに

近年、移動体通信技術は目覚ましい発展を遂げており、サービス事例も続々と出現している。一般向けのサービスとしては、2009年2月に試験サービスながら国内初のサービスが開始されたモバイルWiMAXが注目されている。サービスエリアは2009年9月末時点で首都圏・中京圏・関西圏の一部にとどまるが、エリア内であれば在来線の走行速度においておおむね利用可能である。

鉄道における旅客サービスとしての移動体通信は、2006年に商用サービスが開始されたつくばエクスプレスでの無線LANサービスが先駆的事例である。また、JR東海でも、列車無線のデジタル化にともなって、2009年3月から東海道新幹線のN700系車両において無線LAN接続サービスを行っている。これは沿線の漏洩同軸ケーブルを活用するもので、基地局を新たに設置する必要がなく、鉄道環境に特化したサービスとして注目を集めている。

一方、大容量の無線通信技術としてレーザ光通信技術がある。これは、通信装置が別の通信装置に対してレーザ光を用いることでデータ伝送を実現する通信方式である。既に人工衛星を用いた通信やビル間通信で、数Gbps程度の通信を行った実績があり、大容量無線通信技術として高い可能性をもっている。

場所に捉われないネットワーク接続環境(モバイルコンピューティング環境)に対する需要は今後ますます高まることが予測される。このような中、鉄道においてもモバイルコンピューティング環境を提供できれば、旅客サービスなどの面での鉄道の利便性向上につながられる。

そこで我々は、鉄道環境における高速・大容量な移動体通信技術、レーザ光通信技術の鉄道環境への応用について研究・開発を進めている。

2. レーザ光通信の鉄道環境への適用

ひとくちにレーザ光通信といっても、その通信方式は様々である。我々は、(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3種類の通信方式について、通信システムを試作し性能評価を行った。

(1)漏洩光ファイバ方式は、沿線と列車内に光ファイバケーブルを置き、その側面から意図的に漏洩させたレーザ光を用いて通信を行う方式である。線路に沿って線的に光ファイバを敷設できるため、連続的に通信エリアを構成することが可能である。(図1)

(2)光拡散ビーム方式は、レーザダイオードから放射されるレーザビームを凹レンズによって水平方向(列車の進行方向)にのみ広く拡散させ、それを列車側面に当てて通信を行う方式である。送信側では扇形にレーザビームを拡散し、受信側では集光レンズでこれを受け、またフィルタを用いて太陽光などの影響を除去している。レーザビームを拡散させることにより、1つのレーザダイオードで広範囲に対して通信を行える。(図2)

(3)レーザスキャン方式は、レーザダイオードから放射されるレーザビームを可動式のミラーによって反射し、列車の進行に合わせてミラーの向きを動かすことで連続的な通信を行う方式である。受信側はビーコン光を発し、送信側はこれを受光して受信機の位置を検知し、そこに向かってレーザビームを発せられるようにミラーの方向を調整する。これを連続的に行うことで列車を追尾できる。(図3)

それぞれについて装置を試作し通信試験を行った結果、表1のような結果を得た。この結果を受け、我々はレーザスキャン方式を用いて鉄道用高速大容量通信システムの研究・開発を進めることとした。

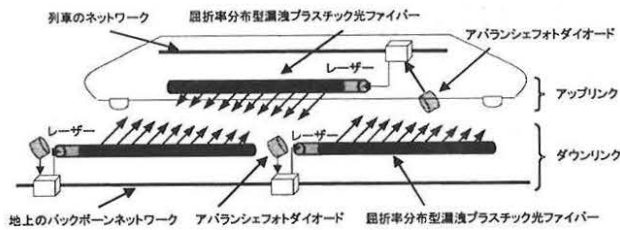


図1 漏洩光ファイバ方式による通信

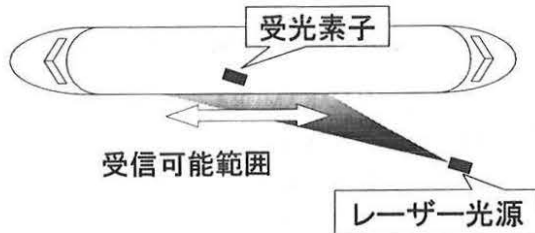


図2 光拡散ビーム方式による通信

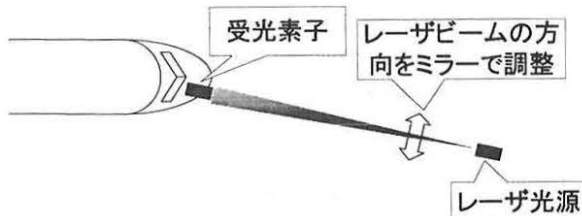


図3 レーザスキャン方式による通信

表1 試作した各通信システムの性能比較

	(1)漏洩光ファイバ	(2)光拡散ビーム	(3)レーザスキャン
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	連続的な敷設が必要	基地局が多数必要	可動部が存在

3. レーザスキャン方式による通信の鉄道環境への適用

レーザスキャン方式によって列車・地上間の連続的な通信を実現するイメージを図4に示す。レーザ光通信装置を列車の最後尾と沿線の地上に設置し、互いにレーザ光を相手側に向けて発し、また相手側からのレーザ光を受光することで、双方向に通信を行う。以下、列車側の通信装置を車上装置、地上側の通信装置を基地局と呼ぶ。ここで、通信装置は1対1での通信しか行えない（同時に複数台との通信はできない）こと、列車は線的に長い距離を移動（走行）することなどから、基地局を複数台設置し、通信を行う基地局を列車の走行に合わせて切り替えることが必要になり、以下の点が課題になる。

(1)列車の走行により両通信装置の相対的な位置が高速に変化する状況においても、高精度な追尾を行い、通信を維持しなければならない。特に不規則かつ予見不可能な列車の振動に対応しなければならない。

(2)通信を行う基地局の切り替えを、列車の走行に合わせて自動的に、かつ高速に行わなければならない。

そこで我々は、これらの課題の解決をめざして、レーザ光通信装置やシステムの性能向上に取り組んだ。

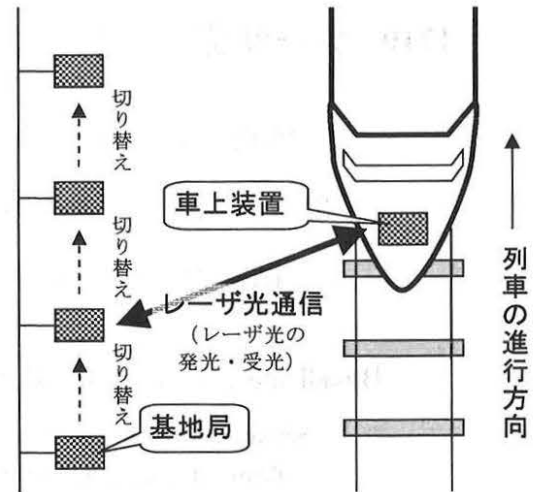


図4 レーザスキャン方式での連続的な通信イメージ

4. 通信装置の構成

ここまでの検討をふまえて開発した通信装置の諸元、通信性能を表2に示す。車上装置と基地局とは装置としては同一のものである。大きさは車上・地上への設置が可能なレベルに抑えてある。また、沿線作業員や乗務員、旅客などがレーザ光を見る可能性があることから、レーザ光の強度はJIS規格（JIS C 6802「レーザ製品の安全基準」）において「裸眼で安全」（レンズ等で集光しない限り安全）とされるクラス1Mのレベルとしている。通信性能は理論上、物理層レベルで伝送速度1.25Gbpsとなるよう設計している。

通信装置の構成図を図5に示す。本装置はレーザ光とビーコン光の2種類の波長の異なる赤外光を用いている。データの伝送はレーザ光で行い、双方が相手側の発するビーコン光を目標にしてレーザ光を向けることにより、双方向通信を実現する。また、装置内部のミラーは上下・左右方向に傾けられる2次元ミラーアクチュエータによって制御されており、レーザ光の発光・受光、ビーコン光の受光を的確に行えるようにしている。

通信を確立するために通信装置で行われる処理のフローを以下に示す。

(1)通信装置は相手装置の方向にビーコン光を発する。

(2)ビーコン光を受けた装置は、入射したビーコン光をミラーで反射し、4分割センサで受光する。4分割センサは4つに分割された面それぞれの受光量を計測できるセンサであり、装置内に2つ存在し、それぞれ視野の広い広角レンズ、視野の狭い望遠レンズを通して受光するよう配置されている。

(3)最初に、広角レンズ側の4分割センサによって広範囲にビーコン光を探索する。4分割センサはビーコン光の受光量を計測して制御回路に送る。

表2 通信装置の諸元

大きさ（外枠）	幅 37cm, 奥行き 26cm, 高さ 16cm
重量	9kg
通信距離	10~100m
送信出力	+1dBm
送信ビームサイズ	距離 100m 伝搬時で 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

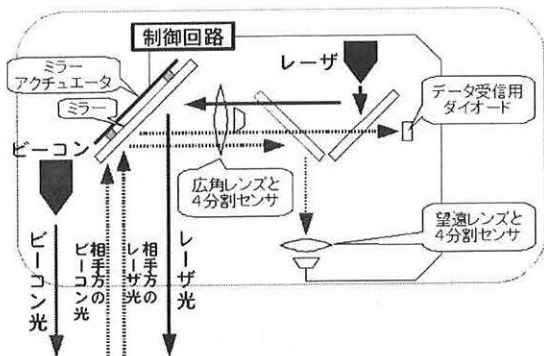


図5 通信装置の構成模式図

(4)制御回路は受けたビーコン光の量から相手装置の存在方向を計算し、ミラーアクチュエータにミラー角度を調整するための制御信号を送る。

(5)ミラーアクチュエータは、受信した制御信号によってミラーの角度を調整し、4分割センサの中央にビーコン光の光軸が当たるようにする。

(6)さらに精密なミラー角度の調整を、望遠レンズ側の4分割センサを用いて行う。処理手順は(3)~(5)と同様である。この様にミラーの方向を制御することで、正確に相手装置の方に向けてレーザー光を発射でき、また相手装置からのレーザー光を正確に受光できるようになる。

以上の処理を常に繰り返すことで、2つの通信装置が相対的に移動する場合でも互いを追尾して通信を継続することができる。

5. 高速ハンドオーバー機構

本システムを鉄道環境に適用する場合、列車が線的に移動するため、基地局は線路に沿って設置される。基地局は一定の間隔で配置されるアクセッサーを経由してネットワークに接続しており、基地局のうちの1つと車上装置との間でレーザー光通信を行うことで列車内にネットワーク接続環境を提供する。このため、列車の走行にともなって使用する基地局を切り替える機構が必要となる。この切り替えのことをハンドオーバーと呼ぶ。切り替えの際には通信が途切れるため、ハンドオーバーは高速に行わねばならない。

本システムにおけるハンドオーバーのイメージを図6に示す。鉄道沿線にネットワークを構成する場合、単一のネットワークとすることは、内部トラフィックの量や距離などの面から非現実的であるため、基地局を接続するネットワークを区間ごとにサブネットに分割しておく必要がある。そのため本システムでは、ハンドオーバーを行う2台の基地局が同一サブネット内にあるケースと異なるサブネットにあるケースの2種類のハンドオーバーが必要となる。また、本システムは将来性を考慮し、IPv6をサポートするモビリティプロトコルを使用しているため、ハンドオーバー処理もこれに対応する必要がある。

サブネット内ハンドオーバーはリンク層ハンドオーバーであり、(1)通信装置の捕捉、(2)捕捉した旨のモバイルルータ(車上装置に接続するルータ)への通知、(3)通信ルートの構成、の3つの処理から成る。(1)については4章に示す機構を用いて高速に行う。(2)については、車上装置とモバイルルータの間をデータ伝送用とは別に制御情報用のケーブルで接続し、車上装置が(1)の終了をモバイルルータに通知することで実現する。この通知をトリガーとして、モバイルルータは地上側のアクセッサーにルート要求を送信する。モバイルルータがその返事を受信

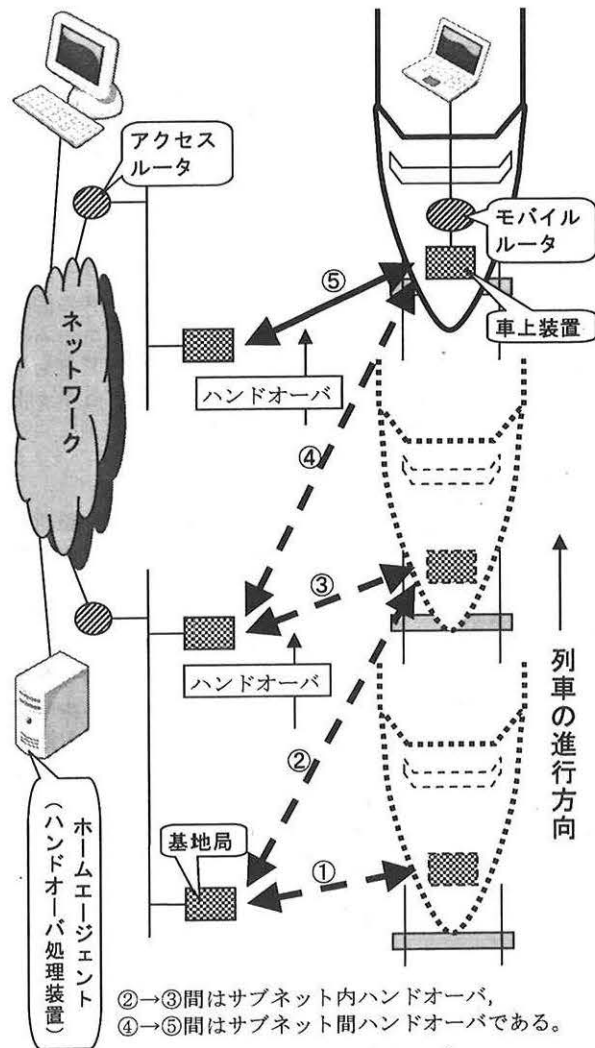


図6 ハンドオーバーのイメージ

した時点でルートが構成され、リンク層ハンドオーバーは完了する。

この後サブネット情報を取得して、このハンドオーバーがサブネット内、サブネット間のいずれであるかを判定し、前者ならばここでハンドオーバー処理を終了し、後者ならばモバイルルータへの新たなIPアドレスの設定などのネットワーク層ハンドオーバーを行う。ネットワーク層ハンドオーバーは、Mobile IPv6のプロトコルを利用した場合、以下の理由により1秒以上の時間を必要とする。

(1)モバイルルータは、地上側のアクセッサーに対し経路情報を要求する。この要求はマルチキャストであり、一般には複数のアクセッサーから同時に返信が返ってくるのが想定される。これを防ぐため、返信までに0~0.5秒のランダムな遅延を発生するようにしている。

(2)モバイルルータは、取得したIPアドレスがそのネットワークで既に使用されていないかを調べる。これは、取得したIPアドレスをネットワーク内の全ノードに対してマルチキャストし、そのアドレスを使っているノードからの返信が1秒以内に來なければ取得確定、という流れで行われる。これらの処理により、1秒間の待機が必要になる。

本システムの適用環境やアプリケーションによっては、この遅延は致命的な通信遮断となるため、これら2点に対して、本システムのネットワーク構造に特化した形での対策を施した。(1)については、本システムではモバイ

ルルータが接続するアクセسلルータは常に1つのみであるため、複数のアクセسلルータからの返信を待つ必要がない。このため、ランダムな遅延を発生させないようにすることで高速化する。また、(2)については、モバイルルータのインタフェースIDが重複しないようにあらかじめ設定することで、既に使用されているアドレスを取得しないようにする。

本システムでは以下の手順でネットワーク層ハンドオーバーを行う。(1)モバイルルータが新しいネットワーク内での一時アドレスを取得する、(2)モバイルルータの固有アドレスと取得した一時アドレスとを地上側のホームエージェントに送る、(3)ホームエージェントが両アドレスの対応関係を受理し、モバイルルータの存在するネットワークについての位置情報を更新する。

6. 通信性能試験

開発した通信装置・ハンドオーバー機構の性能を確認するための試験を行った。まず、通信装置の静的特性を把握するため、2台の通信装置を対向させて固定し、それぞれにPCを直結して両PC間の通信のスループットを測定した。その結果、TCPを用いて最大で923Mbpsのスループットが得られた。さらに、両装置を320m離れた状態でもこのスループットは維持された。また、スループットが落ちるものの、最長で360m離れた状態でも通信が可能であることを確認した（この状態で得られたスループットは最大791Mbpsである）。

次に、地上に3台の基地局を100mの間隔で直線上に設置し、基地局からの離隔2mの位置を、車載装置を乗せた自動車で行き、地上・車上間のスループットを測定した。その結果、時速100kmで行った場合でも最大656Mbpsのスループットが得られた。

7. 鉄道環境への適用に向けた検討

レーザ光通信の鉄道環境への適用にあたっては、他にも検討すべき事柄がある。特に、レーザ光通信には、車上装置と基地局が互いに見通しが利かないと通信ができないという特性があるため、この点を考慮した検討が必要である。

7.1 基地局の設置

本システムを鉄道環境へ適用するには、基地局を沿線に複数設置する必要がある。単純に考えれば、その数は（路線の長さ）÷（基地局の通信可能距離）となるが、線路形状（曲線など）の影響や、他の沿線設備が遮蔽物となるために、実際はこれより多くの基地局が必要になる。そこで、ケーススタディとして東海道新幹線を例とし、必要な基地局数の検討を行った。

線路を平面上に置き、建築限界（線路中心から左右各1825mmとする）外は一切見通せないと仮定して、東京～新大阪間のどの位置に車上装置があってもいずれかの基地局との通信を可能とするために必要な基地局数を試算した。試算結果を図7に示す。通信可能距離が長いほど基地局数は減少するが、300m程度より長くても減少数は小幅にとどまっており、通信装置の通信可能距離をこの程度とするのが適当であることを示唆している。

7.2 天候による通信への影響

レーザ光通信においては、伝送路、すなわち通信装置間の空間の状態が通信に大きな影響をおよぼす。特に霧、雨、雪といった気象現象はレーザ光を大きく減衰させ、

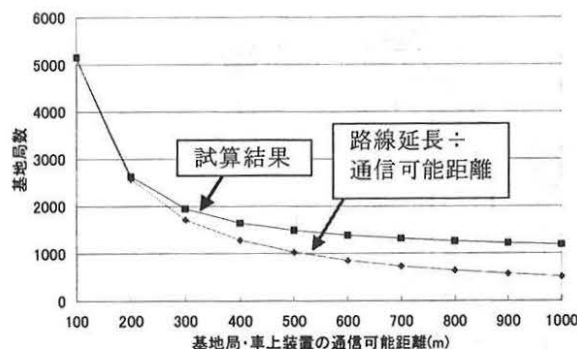


図7 試算結果：東海道新幹線全線をカバーするために必要な基地局の数

通信品質の低下を招きうる。一般に、光を用いた無線通信システムにおいては、これらの影響を避けることはできないため、一定のシステム稼働率を確保できるように、ある程度の減衰を見込んでシステムマージンを持って設計される。

気象現象によるレーザ光の減衰量は、視程距離と密接に関係することが知られている。そこで、気象庁が測定した視程データに基づき、気象現象の影響を考慮した基地局配置方法について検討した。東海道新幹線が通過する8都府県のデータを用いて検討した結果、最も視程の短い岐阜県の場合、システムマージンを0dBとすると基地局間隔を175m以下にしないとシステム稼働率99.9%が確保できないことがわかった。逆に、7.1節での検討に基づいて基地局間隔を300m以上にするを想定した場合、8dB以上のシステムマージンを設ける必要があることがわかった。

8. 終わりに

本稿では、レーザ光を用いた鉄道用高速大容量通信システムの開発および鉄道環境への適用について述べた。我々は、本システムの実用化に向けては、以下のような課題が残されていると考えている。

7章で述べたように、本システムは気象条件の影響を完全に避けることは不可能であり、高い信頼性が求められるアプリケーションに対しては、他の通信方式を併用することも視野に入れなければならない。また、ハンドオーバー時にわずかではあるが通信が途切れることも考慮しなければならない。ターゲットとするアプリケーションによって求められるサービス品質は異なるため、実用時にはこの点について十分に検討する必要がある。

また、基地局や車上装置自体についても、沿線や列車への設置のためには、小型軽量化や耐振性・耐久性の向上は必須である。車上装置については具体的な列車への設置方法、基地局については耐候性や電源確保の方法、アクセسلルータの設置箇所やネットワークの構成などが課題になる。

我々はこういった点に対し、引き続き検討・検証を進めるとともに、通信性能、追尾性能、ハンドオーバー性能の向上を目指して実験を重ねている。

参考文献

- 1) NIKKEI NET. <http://www.nikkei.co.jp/>
- 2) 独立行政法人情報通信研究機構プレスリリース. <http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h17/060202/060202.html>