

レーザー光を用いた鉄道用大容量通信システムの開発

中川 伸吾* 松原 広* 中村 一城**
辰井 大祐* 春山 真一郎*** 寺岡 文男#

Development of Mobile Broadband Laser Communication System for Railways

Shingo NAKAGAWA Hiroshi MATSUBARA Kazuki NAKAMURA
Daisuke TATSUI Shinichiro HARUYAMA Fumio TERAOKA

We attempted to develop a more high-speed internet connecting system applicable to railways, to improve customer service and efficiency of operator's telecommunication between the ground facilities and trains under operations. We manufactured a mobile communication system, capable of recording the transfer rate of 1Gbps in theory by applying the laser beam communication technology. We carried out a field test using trains in active service, and obtained the result of the transfer rate of approximately 700Mbps on the TCP layer between the ground and the train running at a speed of approximately 130km/h.

キーワード：移動体通信，レーザー光通信，ハンドオーバ，通信方式，高速大容量通信

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いる。一般向けのサービスとしては、2009年に国内初のサービスが開始されたモバイルWiMAX¹⁾が注目されている。サービスエリアは2010年4月末時点で、三大都市圏や全都道府県庁所在都市、およびそれらの周辺の一部地域であり、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。

日本の鉄道における旅客サービスとしての移動体データ通信は、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²⁾が先駆的事例である。また、JR東海では、列車無線のデジタル化にとともに、2009年3月に東海道新幹線のN700系車両において無線LAN接続サービスを開始した³⁾。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。また海外でも、ヨーロッパや韓国的高速列車などで、HSPA (High Speed Packet Access) などを用いた車内での無線インターネット接続サービスが導入されている。

一方、大容量の無線通信技術として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に利用されている。これはレーザー光の強い指向性を活かして長距離通信を実現し、また拡散しないことによる秘匿性をもつ通信方式であるが、列車のように高速に移動し、かつ不規則に振動する移動体へは適用されていない。

場所に捉われないネットワーク接続環境に対する需要が今後ますます高まることが予測される中、鉄道においてもより大容量の、幅広い場面で活用できるネットワーク接続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。

このような背景から、筆者らは、レーザー光通信技術の地上・列車間通信への適用を目指して研究・開発に取り組んでいる。本稿では、開発した通信装置や要素技術、それらを組み込んだ通信システム、およびその性能を確認するために実施したフィールド試験について述べる。

2. レーザ光通信の実現方式

2.1 通信方式の検討・評価

ひとくちにレーザー光通信といっても、その通信方式は様々である。そこで、3種類の通信方式の通信システムを試作し、性能評価を行った。概要は次のとおりである。

(1) 漏洩光ファイバ方式 (図1)

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ー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

* 輸送情報技術研究部 (旅客システム)
** 信号通信技術研究部 (通信)
*** 慶應義塾大学大学院 (システムデザイン・マネジメント研究科)
慶應義塾大学 (理工学部情報工学科)

特集：輸送情報技術

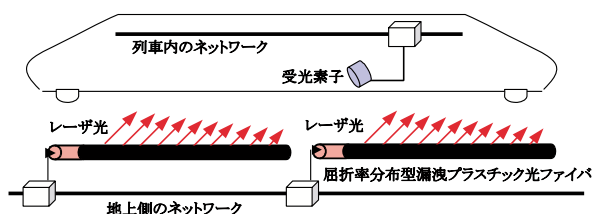


図1 漏洩光ファイバ方式による通信

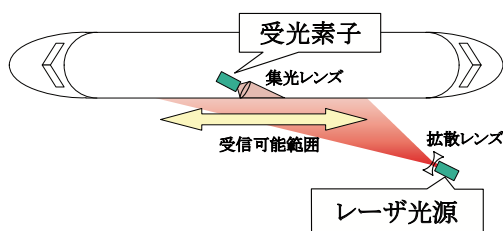


図2 光拡散ビーム方式による通信

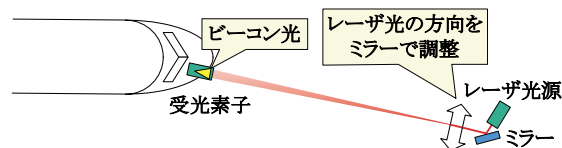


図3 レーザスキャン方式による通信

表1 3種類の光通信方式の比較

方式	光漏洩方式	光拡散方式	レーザースキャン方式
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	連続的な敷設が必要	多くの基地局が必要	装置に可動部が存在

能である。

(2) 光拡散ビーム方式 (図2)

レーザーダイオードから放射されるレーザー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、それを列車側面の受光素子に当てて通信を行う方式である。受信側では集光レンズを通してレーザービームを受信する。1つのレーザーダイオードで比較的広範囲に通信することができる。

(3) レーザスキャン方式 (図3)

受信機の発するビーコン光を目標にして、送信機が列車の進行に合わせて可動式のミラーを動かし、レーザーダイオードから放射するレーザービームを受信機に当てることにより、連続的に列車を追尾して通信を行う方式である。

試作した通信装置による通信試験を行った結果を表1に示す。この結果、通信距離が確保できること、地上側設備としても実現性が高いことから、レーザー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。

2.2 レーザスキャン方式による地上・列車間通信

鉄道環境でのレーザースキャン方式による光通信のイメージを図4に示す。レーザー光通信装置を車上と沿線の地上に設置し、互いにレーザー光を相手側に向けて発射することにより、双方向通信を行う。以下、列車側の通信装置を車上局、地上側の通信装置を基地局と呼ぶ。両装置は、データ伝送用のレーザー光のほかに、これとは波長が異なる赤外光であるビーコン光の光源を位置検出用に搭載し、互いに相手側の発するビーコン光に向けてレーザー光を発射する。

レーザースキャン方式では、原理的に1対1での通信しか行えず、また列車の走行区間全体を1台の基地局でカバーすることは現実的に困難である。そのため、鉄道環境への適用の際は、基地局を沿線に複数設置し、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である。一般に、この切り替え機構はハンドオーバーと呼ばれている。

これらのことから、レーザースキャン通信の鉄道環境への適用には、以下の点が課題になり、これをふまえて通信システムの開発を行った。

- (1) 列車が高速に移動し、また不規則に振動する状況下でも、高精度な追尾を行い、通信を維持しなくてはならない。
- (2) ハンドオーバーの際には通信の途絶が原理的に発生するため、列車の走行に合わせて自動的に、かつ短時間でハンドオーバーを実行しなくてはならない。

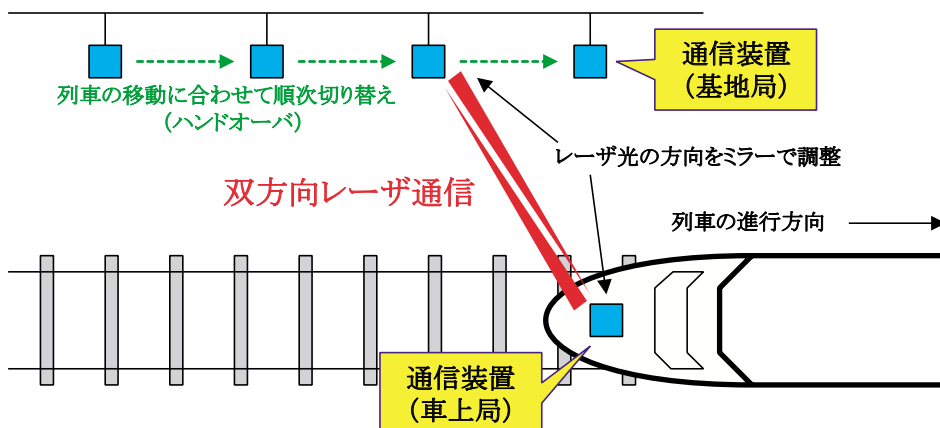


図4 鉄道沿線でのレーザースキャン方式による光通信

3. 開発した光通信システム

3.1 通信装置の構成

本研究で開発したレーザー光通信装置（車上局・基地局ともに同一のものである）を図5に、その諸元を表2に示す。大きさ・重量は、通信距離の検討（4.1節で詳述する）に基づき、車上や沿線地上への設置が可能なレベルとした。また、レーザー光の強度はJIS規格（JIS C 6802「レーザー製品の安全基準」）において「裸眼においてもレンズ等で集光しない限り安全」とされるクラス1Mのレベルとした。通信性能は理論上、物理層レベルで伝送速度1.25Gbpsとなるよう設計した。

通信装置の構成図を図6に示す。ミラーを制御する2軸のミラーアクチュエータは新たに開発したもので、1枚のミラーを上下・左右の2軸方向に制御することが可能であり、通信装置の小型軽量化に貢献している。

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。これを常に繰り返すことで、一方または両方の通信装置が移動する場合でも、互いを追尾して通信を継続することができる。また、途中でビーコン光を見失った場合でもすぐに追尾を再開できる。

- (1) 通信装置は、図6に示すように、相手装置から入射したビーコン光をミラーで反射した上で、2つの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る。
- (2) 広角レンズ側の4分割センサによってビーコン光の受光量を測定し、その結果を制御回路に送る。広角レンズは視野が広いので、広い範囲から来るビーコン光を捕捉することができる。
- (3) 制御回路は、(2)の受光量から相手装置の存在方向を計算して、ミラーアクチュエータに、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ミラーの角度を制御する信号を送る。
- (4) ミラーアクチュエータは、(3)の制御信号に基づいてミラーを制御する（図7）。
- (5) 望遠レンズ側の4分割センサを用いて(2)～(4)と同様の処理を行う。これによってより精密な位置合わせを連続的に実行でき、受光素子に正確にレーザー光が当たってレーザー信号を読み取れるようになる。

3.2 高速ハンドオーバ機構

本システムでは、鉄道沿線に地上ネットワークを構成することが必要である。このとき、地上ネットワークを単一のネットワークセグメントから構成することは、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、適度な長さのサブネットに分割することが必要である。そのため本システムでは、ハンドオーバを行う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が必要となる。また、本シ

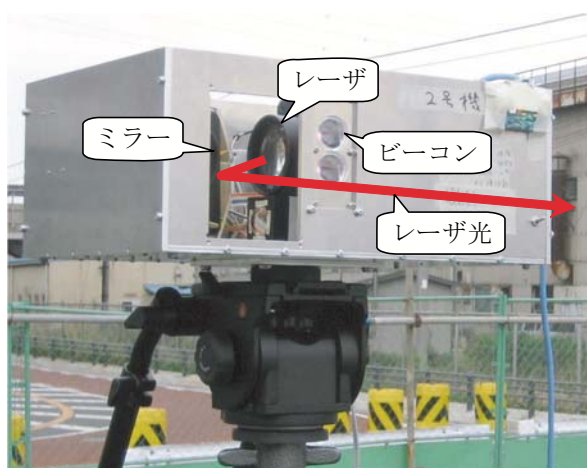


図5 開発した通信装置の外観

表2 開発した通信装置の諸元

寸法	W470 × D260 × H162 (mm)
重量	12kg (耐振機構含む)
通信距離	最長約 300m
ビーコン光の波長	850nm (赤外線)
レーザー光の波長	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°
レーザー光の強度	クラス 1M

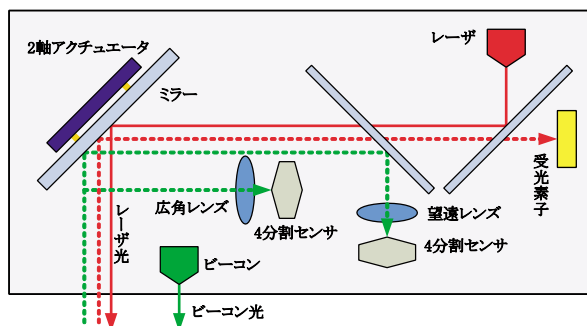


図6 通信装置の構成図

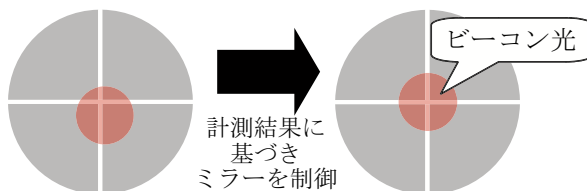


図7 4分割センサを用いた追尾方法の原理

ステムは将来性を考慮し、IPv6に基づいたネットワークモビリティプロトコルであるNEMO Basic Support⁴⁾を使用しているため、ハンドオーバ処理もこれに対応する必要がある。これらをふまえて、ハンドオーバの高速化に取り組んだ。

3.2.1 サブネット内ハンドオーバ

サブネット内ハンドオーバはリンク層ハンドオーバであり、①車上局が基地局を捕捉した旨のモバイルルータ

特集：輸送情報技術

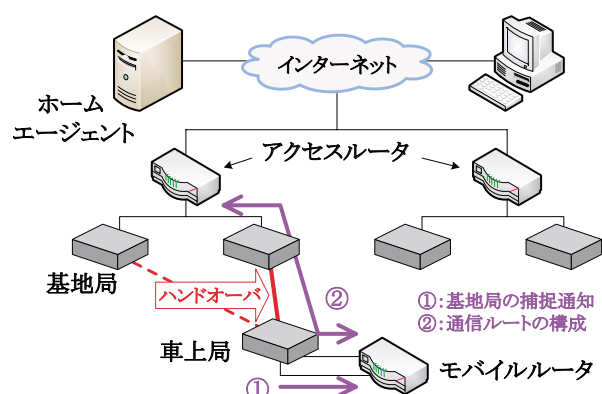


図8 サブネット内ハンドオーバーの手順

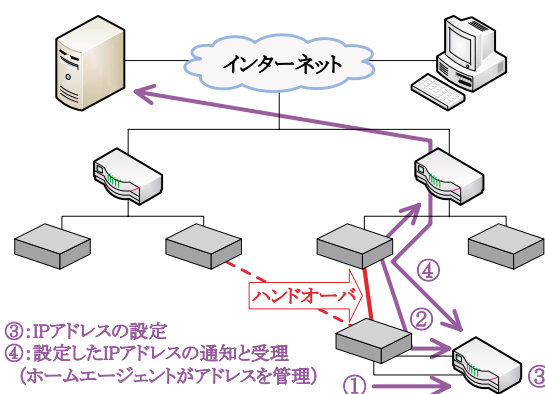


図9 サブネット間ハンドオーバーの手順

(車上局に接続するルータ、以下MR) への通知、②通信ルートの構成、という手順で行われる(図8)。①については、車上局とMRの間をデータ伝送用とは別の制御情報用のケーブルで接続して高速に実現する。①の通知をトリガーとして、MRはアクセサラータ(地上側のルータ、以下AR)にルート要求を送信し、その返事を受信した時点でルートが構成されてハンドオーバーは完了する。

3.2.2 サブネット間ハンドオーバー

リンク層ハンドオーバーの終了後、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間のものかどうかを判定し、サブネット間ハンドオーバーであれば、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(図9)。一般にネットワーク層ハンドオーバーは、Mobile IPv6の protocols を利用した場合1秒以上の時間を必要とするため、以下の2点の改良により遅延を解消し高速化を実現した。

- (1) MRがARに対し経路情報を要求する際、MRが同時に複数の返信を受けることを防ぐため、一般にARは返信を送るまでにランダムな時間(最大0.5秒)待機するが、本システムではMRが同時に複数のARに接続することはないので、ARは待機せずに返信を送る。
- (2) MRは、取得した経路情報を用いてIPアドレスを設定する際、一般に、設定したアドレスが同じネットワーク内の他のMRと重複していないかを調べる。この重複確認のために1秒間の待機が発生する。本システムは不特定多数のMRを対象にするものではないので、あらかじめMRに固有のインタフェースIDを設定することで重複を避け、この重複確認を省略して待機時間を解消する。

4. 鉄道環境への適用に向けた検討・実験

4.1 基地局の設置方法

基地局は、沿線の遮蔽物や線路形状の影響で、通信可能距離を長くしても、その性能を必ずしも十分に発揮できるとは限らない。また、通信可能距離を短くすれば、ビーコン光の出力や、通信装置の部品の大きさや性能が低く抑え

られるため、装置の小型軽量化が可能となる。そこで、基地局の適正な通信距離の目安を算出するため、ケーススタディとして東海道新幹線(東京～新大阪間515.4km)を例とし、必要な基地局数のシミュレーションを行った。

線路の勾配は考慮せず、建築限界(線路中心から左右各1825mmとする)の外は一切見通せないと仮定して、車上局が東京～新大阪間のどの位置にあっても、いずれかの基地局との通信が可能となるような環境の構築に必要な基地局数を試算した。その結果を図10に示す。通信距離を300m～400m程度より長くしても、基地局数の減少は小幅にとどまっており、通信装置の現実的な通信距離としてこの程度が適していることがわかった。

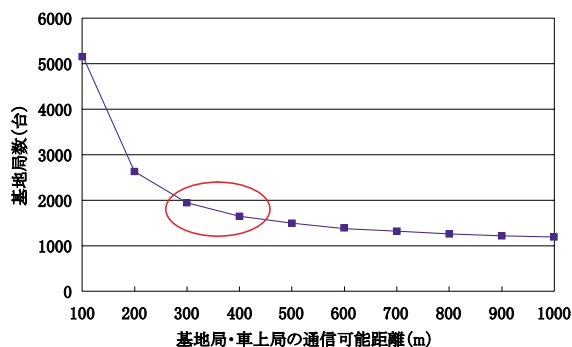


図10 東海道新幹線全線をカバーするために必要な基地局の数(試算結果)

4.2 降雨の影響に対する考え方

屋外でレーザ光通信を行う場合、伝送空間の環境は必ずしも良好ではない。一般に、光は雨、霧、雪などによって減衰し、そのレベルは視程と密接な関係があることが知られており⁵⁾、本システムにおいても同様であると考えられる。そこで、降雨環境を模擬した実験装置を用いて、降雨が通信特性に与える影響を把握するための実験を行った。

降雨実験装置内の降雨区間を挟んで2台の通信装置を対向させ、降雨量を最大1時間あたり200mmまで変化させてパケットロス率やスループットを測定すると同時に、視程計を用いて視程の測定を行った。その結果、降雨量が多くなるにつれて視程が短くなり、ビーコン光やレー

ザ光の減衰が発生していることを確認した。また、降雨量が少なくても雨粒が小さい霧状になると、同様に視程が短くなりビーコン光の受信レベルが低下した。このことから、雨や霧などの本システムの性能への影響には視程と同じ傾向があることが確認できた。ただし、雨粒が霧状になり受信レベルが極端に低くなったときを除けば、パケットロスやスループットの低下は起こらなかった。

屋外で光による通信システムを構築する場合は、このような気象現象による通信不良を完全に避けることは不可能であるため、光エネルギーの減衰を見込んでシステムマージンを設けて一定以上のシステム稼働率の確保を図るのが一般的である。そこで、東海道新幹線が通過する8都府県の気象台における実測の視程データを入手し、視程とレーザー光減衰量との一般的な関係式を用いて、視程を考慮した基地局設置間隔について検討した。その結果、図11に示すように、基地局間隔を300mにしてシステム稼働率99.9%を確保するためには、最も気象条件の良い京都でも3dB以上、条件の悪い岐阜では8dB以上のシステムマージンが必要であることがわかった。

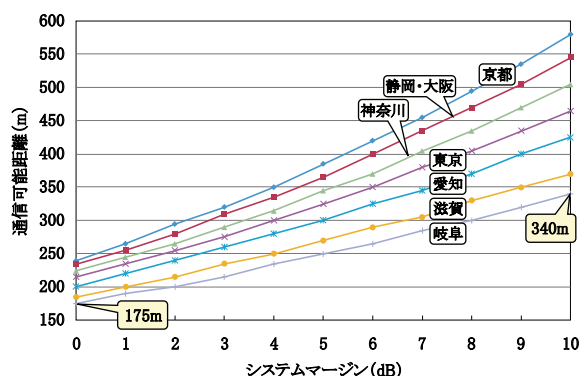


図11 システム稼働率99.9%を確保するためのマージンと通信距離の関係

5. フィールド試験

5.1 機能確認試験

開発したシステムの静的特性、および移動体通信への適用可能性を把握するため、(財)日本自動車研究所の城里テストセンターにおいて通信試験を実施した。

まず、2台の通信装置を対向して固定し、それぞれにPCを直結して通信を行い、ネットワークの性能を計測するベンチマークソフトであるNetperfを用いてスループットを測定した。両装置間の距離を変えながら実験を行った結果、320mの距離において、TCPでの通信で923Mbps、UDPでは936Mbpsが計測された（この値は320m以下の場合も同じであった）。さらに360mまで距離を伸ばしても、TCPで最大791Mbps、UDPで最大854Mbpsまでスループットが低下したものの、通信は可能であった。固定地間の通信においては4.1節での検討に

照らして十分な伝送距離が得られることが確認できた。

鉄道環境でのフィールド試験においては、列車の窓ガラスに熱線吸収ガラスが用いられているため、これによる赤外光の減衰を考慮する必要がある。このため、列車窓ガラスを模擬した熱線吸収ガラスを2つの通信装置の間に設置し、同様に固定地間通信を行って熱線吸収ガラスの影響を評価した。その結果、ガラスをレーザー光の光路に垂直に置いた場合通信可能距離は200mとなり、ガラスの影響が確認された。ただし、通信可能距離の範囲内では、ガラスが無い場合と同じスループットが得られた。

5.2 在来線沿線におけるフィールド試験

開発したシステムについて、鉄道環境への適用可能性を把握するため、2010年1月から2月にかけての5日間、JR西日本管内の東海道本線立花駅～甲子園口駅間でフィールド試験を実施した。試験機器の構成を図12に、試験の様子を図13に示す。地上側では、3台の基地局を100mごとに電化柱に取り付け、それぞれハンドオーバー処理装置と光ファイバケーブルで接続した。一方車上側では、車上局を下りの新快速列車の最後部乗務員室に搭載し、後ろ向きに固定した。列車の試験区間の通過速度は時速120～130kmであり、計算上はおよそ2.7～3秒ごとにハンドオーバーが実行されることになる。

延べ20回の通信実験を行った結果、制御用PCの不調で失敗した1回を除く全19回で地上・車上間通信を実現し、TCPでおよそ500～700Mbps、UDPで最大約850Mbpsのスループットを得た（図14）。さらに、ハイビジョン動画の双方向伝送実験を行った結果、地上側・車上側双方で、相手側が送信した動画を、ハンドオーバーによる通信途絶の影響を受けずスムーズに閲覧することができた。

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、理論上0.03秒程度で実現できるよう設計したが、本試験では0.4秒程度を要した（図15）。これは列車振動等の影響を受けレーザー光の受信レベルが不安定になっていることが原因であると考えられる。アプリケーションによってはこの程度でも問題にはならないが、一方で新幹線などを対象としたより高速域での通信では通信断などの問題も発生しうると考えられるため、実用化に向けては耐振性能の向上、プロトコルの改良等によりさらなる改善を進める必要があることがわかった。

5.3 新幹線沿線におけるフィールド試験

在来線での試験結果をふまえ、より高速な列車への適用可能性を把握するため、2010年3月の3日間、JR西日本管内の山陽新幹線新大阪駅～新神戸駅間でフィールド試験を実施した。設置条件の都合上、地上側の基地局は1台とし、線路外の防音壁に取り付けた。車上局は上り列車の最後部乗務員室に搭載した。本試験では、基地局

特集：輸送情報技術

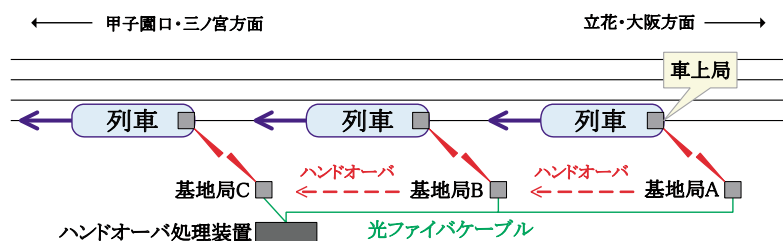


図12 在来線フィールド試験の機器構成



図13 在来線フィールド試験の様子

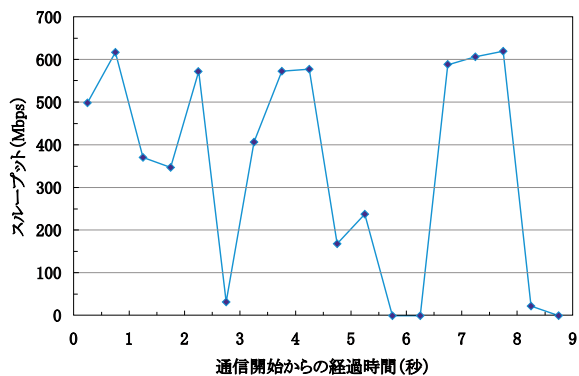


図14 スループット測定試験の結果 (UDP)

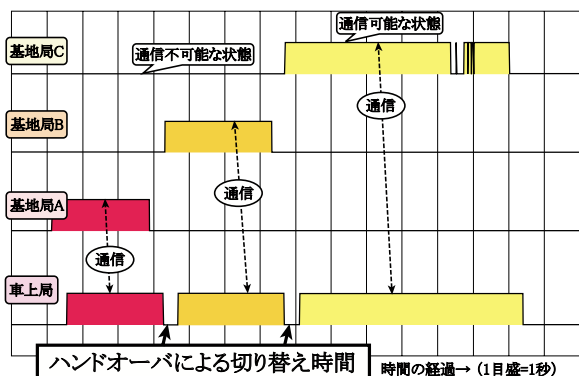


図15 ハンドオーバー性能試験の結果

が1台のみであるためハンドオーバーは行わず、地上・車上間の1対1での通信性能の評価を目的とした。

通信実験は延べ6回行い、列車の試験区間の通過速度は時速約240km～270kmであった。試験の結果、このような高速走行時においても、車上局・基地局は相互に相手側のビーコン光を捕捉し、最長で約0.7秒追尾できた。また、0.006秒程度ではあるが、基地局が車上局の発するレーザ光を受光し、物理層での通信を確立することができた。ただし、上位層におけるデータパケットの

正常な送受信には至らなかった。

試験結果を分析した結果、新幹線の窓ガラスによる減衰で通信距離が極端に短くなってしまいうことに加え、基地局設置位置から約50m先にある電化柱により、車上局・基地局間の光路が一時的に遮断され、その後ビーコン光の再捕捉ができなくなっていたことが判明した。この試験により、基地局の設置条件、新幹線のガラスの影響に対する対策、新幹線の走行速度への対応などの点を配慮することが重要であることが明らかになった。

6. まとめ

本研究では、次世代の地上・列車間の大容量通信システム構築のための基盤技術の確立を目標として、レーザ光通信方式の1つであるレーザスキャン通信技術の適用について検討と開発を行った。その結果、開発したシステムを用いて、在来線において500～700Mbps程度の大容量通信を地上・列車間で実現でき、新幹線においても走行する列車に対する一定時間の追尾が実現でき、鉄道環境における光通信の実現可能性を示すことができた。また、基地局の設置方法や降雨の影響について考察した。

今後は、これまでに得られた成果をふまえ、通信システムの性能向上を進めるとともに、具体的なアプリケーションを想定した検討を進めていきたいと考えている。

謝辞

5.2節および5.3節で述べたフィールド試験の実施にあたり多大な協力をいただいた、西日本旅客鉄道株式会社をはじめとする関係各社に深く感謝の意を表する。

文献

- 1) UQ コミュニケーションズ株式会社, <http://www.uqwimax.jp/>
- 2) 晝間, 眞部, 町田: つくばエクスプレスのインターネット利用環境整備, JREA 2005年10月号, pp.26-28, 2005
- 3) 杉山, 吉澤: 東海道新幹線車内インターネット接続サービス, JREA 2009年8月号, pp.27-30, 2009
- 4) Devarapalli et al., "Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol", RFC 3963, 2005.
- 5) 若森ほか: 光無線通信システムのための光波伝搬特性調査研究, 電子情報通信学会技術研究報告 MW マイクロ波, MW2003-94, Vol.103, No.237, pp.143-148, 2003