

鉄道における高速大容量移動体通信技術 の動向と課題

土屋 隆司* 関 清隆** 春山 真一郎***

Current Status of Broadband Wireless Communication Technologies in Railways and Future Challenges to Them

Ryuji TSUCHIYA Kiyotaka SEKI Shinichiro HARUYAMA

This paper describes the current status of broadband communication technologies which can be applied to railway transport, particularly focusing on the application to broadband services for passengers on board the train. In the first half of this paper, we give a brief overview of the current status of wireless LAN (IEEE802.11), satellite communication, next-generation mobile phone, millimeter wave communication and optical communication technologies. In the latter half, we make an account of the three different optical communication technologies which we are currently developing to be used for broadband communication for trains.

キーワード：移動体通信，無線LAN，WiMAX，携帯電話，次世代移動体通信，光通信

1. はじめに

近年のインターネットや携帯電話の急速な普及を背景に、いつでも、どこでも大容量通信ネットワークに接続し、低廉なコストで通信を行うことによって、旅客サービスや各種鉄道業務の高度化を図りたいという要望が強まっている。必要な情報がタイムリーに届けられる、またマルチメディア系のさまざまなアプリケーションがストレスなく利用できるためには、高速移動する列車と地上との間の大容量通信技術を確立する必要がある。現時点では、列車内での旅客に対する、高速・大容量のネットワークサービスは限定的にしか実現されておらず、大部分の利用者は携帯電話やPHSサービスが利用可能な範囲での車内利用を行っている。当然、携帯電話のサービスレベルも今後向上していくものと考えられるが、種々の列車環境でのサービスの連続性、均一性等を考慮すると、鉄道側での通信環境の整備が必要と考えられる。また、新幹線等の高速列車内での利用を考えると、300km/h以上の移動速度において大容量の連続的な通信サービスを安定的に提供することが必要となり、これは技術的にも未知の領域である。本稿では、鉄道への適用を念頭に置きつつ、次世代携帯電話、無線LAN、ITS関連技術

等、今後進展が期待される無線通信技術の動向を概観するとともに、列車に対する高速大容量通信を実現する有望な技術のひとつである光通信方式に着目し、その対列車通信手段としての可能性について、これまでに実施した実験結果等も踏まえて考察する。

2. 移動体通信技術の動向

列車と地上を結ぶ通信リンクの構築手法にはさまざまなものがある。従来から使用されてきた漏洩同軸ケーブル(LCX=Leaky coaxial cable, 同軸ケーブルの外部に、一定間隔でスロットを設けたもの)は、トンネル内等の閉鎖空間を含め、線的なエリアでの安定的な通信を実現する手段として優れており、新幹線の列車無線等で活用されてきた。しかし、LCXでは、使用可能な帯域が限られており、高速通信への適用は困難である。実際、LCXを用いた乗客向けのサービスは列車公衆電話等に限られてきた*1。今後ますます多様化が予想される利用者の通信ニーズに応えるためには、近年、発展の著しい無線通信技術の鉄道への適用が期待される。そこで以下では、これらの無線通信技術の動向を、鉄道への適用を念頭に置きつつ、概観する。

* 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

*1 東海道新幹線においては、2009年よりLCXを利用し、車内でインターネット接続サービスが提供される予定である。通信速度は低い(最大で約2Mbps/列車)ものの、新幹線における初めての公衆インターネットサービスとして注目される。

特集：輸送情報技術

2.1 無線LAN (IEEE802.11)

(1) 規格の概要

「無線LAN (Wireless LAN)」と称されるものにはさまざまな通信規格があるが、最も一般的に使われているのがIEEE802シリーズ¹⁾である。なかでも2.4GHz帯を使うIEEE802.11bは、最も初期の段階から使われてきた規格であり、PC向けの無線LANカード等の形で廉価な製品が供給されてきた。IEEE802.11bでは最大伝送速度が11Mbpsであったが、同一周波数帯で、より高速な通信(～54Mbps)を実現したのがIEEE802.11gである。IEEE802.11b/gが使用する2.4GHz帯は、電子レンジ等、(通信目的以外の)産業用、医療用機器で使用されているISM帯と呼ばれる周波数であり、免許不要という利点はあるものの、これらの機器からの干渉が通信性能に影響することが避けられない。

一方、5GHz帯を用いた規格として策定されたのがIEEE802.11aであり、最大で54Mbpsの伝送が可能である。この周波数帯は他の電波利用機器との干渉が少なく、利用可能なチャネルも拡大しているという利点もあるが、一方で、気象レーダとの干渉を回避しなければならないという制約もある。

この他、現在規格化が進行中の次世代無線LAN規格にIEEE802.11nがある。これは、MIMO (Multiple Input Multiple Output, 送信側、受信側双方に用意された複数のアンテナを用いた効率的な伝送方式)等の技術を用いて100Mbps以上の高速通信を可能にするものであり、各方面への適用が期待されている。使用する周波数は2.4GHz/5GHzである。

(2) 列車における無線LAN利用

近年では無線LAN搭載のノートPCが一般化し、また都市圏では、街のいたるところに無線LANのアクセスポイントが整備され、公共空間におけるネット接続があたり前のものとなりつつある。鉄道においても、東海道・山陽新幹線主要駅や首都圏地下鉄(東京メトロ、都営地下鉄)各駅をはじめとする多くの駅で、無線LANサービスの提供が行なわれている。

一方、移動する列車に対して無線LANによる通信サービスを実現する試みも実施されている。国内では、JR西日本が2001年より「沿線無線WAN」と称する高速移動体通信の実験を福知山線において実施しており、この分野における先駆的な取り組みとして知られている²⁾。この他、JR東日本・成田エクスプレスにおける実験³⁾、JR北海道・日本テレコム(現ソフトバンクテレコム)による千歳線における実験⁴⁾等、鉄道事業者による実験的な取り組みが各地で実施されている。

(3) つくばエクスプレスにおける無線LANサービス

2005年に開業したつくばエクスプレス線において、列車内無線LANインターネット接続トライアルが行なわ

れ注目を集めた。2006年8月には本格的な商用サービスも開始された⁵⁾。このサービスでは各駅に引き込まれた光ファイバによりデータセンタに接続するとともに、地上に設置された高指向性アンテナと列車の前後両端に設置されたアンテナを用いて安定的な地上・列車間の通信(IEEE802.11b/gを使用)を実現している。列車上では、5GHz帯による車両間中継に加えて、乗客に対してはIEEE802.11b/gによる無線LAN接続サービスを提供している。また、mobile IP技術を用いることにより、列車移動に伴って地上の物理的な接続先が変わっても同一のアドレスでの通信が可能な環境を実現している。

2.2 衛星通信

(1) 衛星通信の概要

衛星通信は1機の通信衛星で広域を通信エリアに収めることができ、地理的なエリアによらずほぼ均一なサービスを提供できること、移動体との通信のために、沿線への基地局設置が不要となる等のメリットがある。しかし、一方で、連続的な通信サービスの提供のためには、トンネル内等、衛星からの信号が受信できないエリアへの対策が不可欠であるというデメリットもある。民間の衛星通信向けに一般的に使用されているのは、12～18GHzの周波数帯(Ku帯)および、26～40GHz帯(Ka帯)である。

(2) 列車における衛星通信の利用

列車内のインターネットサービスの提供手段として地上・車上間の通信に衛星通信を用いる検討が欧州を中心にさかんに行なわれている。たとえば、欧州委員会(European Commission)が資金提供して実施されたプロジェクトであるFIFTH (Fast Internet for Fast Trains Hosts)^{6) 7)}では、イタリアの高速鉄道ETR500に対して衛星を用いた通信コネクションを実現し、乗客にブロードバンド通信サービスを提供する実験が実施された(2002年～)。この実験を受けて2004年からは一般向けのサービスも開始された。FIFTHの実験で想定された用途および要求データレートを表1に示す。

表1 列車ごとの要求データ転送速度(想定値)

用途	要求データレート		
	衛星→列車	列車→衛星	
デジタルTV等	4×2Mbps	-	
インターネットサービス	ひとりあたり	30Kbps	10Kbps
	全体	1500Kbps (*)	500Kbps (*)
合計	9.5Mbps	0.5Mbps	

(*) 利用者数500人、同時利用率10%を仮定

衛星からの電波が受信できないトンネル内や駅舎内向け対策として、ギャップファイラー(電波の届かない/届

きにくいエリアの受信特性を改善するための中継装置等)の設置や衛星通信と無線LANとのシームレスハンドオーバー等の検討が行なわれている。

(3) 航空機内でのインターネットサービス

鉄道への応用ではないが、移動体との衛星通信の応用として、ボーイング社による Connexion By Boeing がある。航空機に設置されたアンテナから衛星を介してインターネット接続を行なうサービスであり、2004年にルフトハンザ航空で導入された。その後、日本航空、全日空、シンガポール航空等が導入し、有料でのサービス提供を行ってきたが、ボーイング社は2006年にはこのサービスからの撤退を表明した。

機内での利用は無線LAN (IEEE802.11b) での接続であるが、衛星リンクの制約で通信速度は50～数100Kbps程度であった。

2.3 携帯電話

(1) 携帯電話による高速通信

世界的には未だ、第2世代携帯電話 (2G) である GSM (Global System for Mobile Communications) が主流である*2。日本では、独自の2G方式である PDC (Personal Digital Cellular) が使われてきたが、ここ数年で一気に第3世代 (3G) への移行が進んでいる*3。3G方式としては、W-CDMA (NTTドコモ、ソフトバンクモバイルが採用) と CDMA2000 (auが採用) がある。3G携帯電話では一般的に数100Kbps～2Mbps程度の通信速度が可能であるが、これをさらに高速化したいいわゆる3.5世代 (3.5G) と呼ばれる CDMA2000 1xEV-DO や HSDPA 等の方式がすでに各携帯キャリアで導入されており、最大で10Mbpsを超える高速通信が可能となった。

(2) 第4世代移動通信システム

3G, 3.5Gの市場への展開と併行して、次世代 (第4世代) の移動通信システムの検討が世界的に進められている。通信速度としては50～数100Mbps程度が想定されている。次世代無線通信システムのアーキテクチャは、全ての端末がIPベースでネットワークが構築され、かつ2G, 3Gや既存の無線LAN等の複数の通信インフラと融合し、その通信ネットワークを自動で切り替える機能を有するシームレスな通信サービスを提供する等、単なる通信速度の向上だけでなく、従来の通信システムとは大きく異

*2 GSMをベースに開発された鉄道用の無線デジタル通信システムにGSM-R (Global System for Mobile communications - Railway) があり、欧州を中心に利用が拡大している。指令・運転台間の情報のやりとりや運行管理システムのサブシステムとしての利用を想定した拡張機能 (機能識別アドレス等) に特徴がある。

*3 携帯キャリアにより差はあるが、2008年1月現在で契約台数の約8割が3G端末である (電気通信事業協会データに基づく)。

なる機能を提供するものとなることが予想されている。

なお、2007年11月、国際電気通信連合 (ITU) は次世代移動通信システム用の周波数帯として、3.4～3.6GHzの200MHz幅等、複数の周波数帯を決定した。

(3) 第4世代移動通信システムの鉄道への適用

前項で述べた第4世代移動通信システムが鉄道環境においても手軽に利用できるようになれば、列車の乗客等に対して、今より高速で利便性の高い通信サービスを提供できるようになることが期待される。

しかし、移動性を保ちつつ、ある程度の伝送レートが得られる帯域幅を確保するためには、使用できる周波数帯は3～5GHz帯の部分になる。このような高い周波数帯を利用する場合、電波伝搬損失特性や建物浸透特性の観点に加えて経済性の観点からみても、現在の2G, 3Gと同等の大きさをもった通信エリアを確保することは困難であると考えられる。

以上より、第4世代移動通信システムの鉄道における利用は限定的なものとならざるを得ないと考えられ、列車上で継続的な高速通信サービスを提供するためには、上記システムとそれを補完する技術を組み合わせたシームレス通信もしくは新たな要素技術を投入した高速通信技術の導入が必要になるものと考えられる。

2.4 WiMAX

(1) WiMAX とモバイル WiMAX

WiMAX⁸⁾ は (Worldwide Interoperability for Microwave Access) の略であり、IEEE802.16で規格化が行なわれた無線通信方式である。無線LANに比べて広い通信エリアをカバーできるという特徴を持つ。元々は加入者系通信網の末端部分 (いわゆるラストワンマイル) の固定地間でブロードバンドサービスを実現する手段として検討されたものである。しかし、その後、移動体での利用を想定したモバイルWiMAX (IEEE802.16e) が策定され、移動体通信への適用にも関心が集まりつつある。なお、モバイルWiMAXの使用周波数帯は、2～6GHz、伝送速度は15～75Mbps程度である。

2007年12月、総務省は、周波数2.5GHz帯の次世代高速無線通信に関して、「ワイヤレスブロードバンド企画」(KDDIなど6社が出資) と、PHS事業者のウィルコムに免許を与えるよう電波監理審議会に諮問した。このうち、「ワイヤレスブロードバンド企画」はWiMAX方式でのサービスを予定しており、2009年以降に商用サービスが開始される見通しとなった。

(2) 鉄道における WiMAX の利用

モバイルWiMAXの規格は、120km/h程度までの移動速度の移動体との通信が想定されている。新幹線のような高速移動体への適用は困難であるが、在来線列車等での利用は可能であると考えられている。今後、移動列車

特集：輸送情報技術

を対象にした実証的な評価が行なわれるものと考えられ、引き続き、その動向には注視していく必要がある。

2.5 DSRC

(1) DSRCの概要

DSRCはDedicated Short Range Communicationの略で狭帯域通信を意味する。道路交通の高度化・知能化のプロジェクトであるITS (Intelligent Transport System) における中心的通信手段のひとつである。DSRCは、自動車内に設置された車載機と路側の無線機との間での通信(いわゆる、路車間通信)の規格であり、現在のところ、ETC (Electronic Toll Collection, 自動料金収受システム)での利用が中心である。

DSRCには、実用化を進める日米欧がそれぞれ独自の標準化を行なっている。日本では電波産業界 (ARIB) が定める規格であるSTD-T75等が使われる。

周波数帯は5.8GHz、通信速度は最大4Mbpsである。

(2) DSRCの多目的利用

DSRCは前述のようにETCでの利用が中心であったが、近年では、ETC以外への適用(多目的化)も進められている⁹⁾。具体的には、駐車場の入退出の管理やインターネット接続、ガソリンスタンド等での決済、個人向け情報配信サービス等への適用が拡大することが期待されている。

このようなETCの多目的利用のために、サービス提供事業者が利用者を識別する必要があり、そのための管理番号として「利用者番号」*4を提供するシステムが構築されている。

(3) インターネットITS

前項で述べたように、ITS用の路側インフラの整備と併行して、これらを使ったさまざまなアプリケーションの展開へ向けた検討が進められている。このような取り組みのひとつがインターネットITSである¹⁰⁾。インターネットITS協議会では、IPv6をベースにしたITSの共通プラットフォームの構築をめざして活動しており、各地での実証実験を通じた仕様検討が進められている。このような活動成果のひとつとして、2006年には「インターネットITSプラットフォーム仕様書第2版」が発行された。

インターネットITSのスコープには、DSRCのみならず、携帯電話や無線LAN等、他の無線通信技術も含まれており、汎用技術も含めた自動車環境における総合的な通信プラットフォームとなることが期待されている。

2.6 ミリ波通信

(1) ミリ波通信の概要

ミリ波は、波長10mm~1mm、周波数30~300GHzの電波であり、主にレーダ、通信等の用途で利用される。

国内では、60GHz帯のミリ波が通信目的で使用されている(小出力の場合、免許不要)。ミリ波は、直進性が強くマルチパスの影響を受けにくいこと、他のミリ波システムとの相互干渉が避けやすく、広い帯域を占有した通信が可能であることなどの理由により、局所的な大容量通信システムとしての利用が期待されている。

(2) 鉄道におけるミリ波通信の利用検討

ミリ波に関しては、将来の有望な対列車高速通信手段のひとつとして従来から検討が進められてきた。

たとえば、JR東海では、列車上での高い通信速度に対する要求の今後の高まりを想定し、100Mbps以上で双方向通信が可能なミリ波通信方式などの実験的検討を進めている¹¹⁾。

また、山梨リニア実験線ではミリ波を用いた次世代列車無線構築を目指す実験が実施され、500km/hの高速移動中の対列車通信で、誤り率 1×10^{-4} 以下の連続したデータ伝送回線を確保できる見通しが得られている¹²⁾。

2.7 光空間波

鉄道における移動体通信技術としてはLCXや無線LANが実用化されており、ミリ波による実験も進められている。これらの通信システムの伝送速度は、数百kbps~数100Mbps程度である。レーザを用いる光無線通信は広帯域伝送が可能であり、固定地間では2Gbps以上の製品が実用化されているなど、次世代の高速大容量通信媒体として有力な候補と考えられる。そこで次章では、空間を伝搬する光を媒体として移動体通信を行なう手法について実験結果等も交えて紹介する。

3. 光通信を用いた対列車大容量通信技術

3.1 光空間波を用いた移動体通信

空間を伝搬する光を媒体として移動体通信を行うためには、地上と車上それぞれに発光器及び受光器を設置し、車上の発光器と地上の受光器間でのリンクを構成する必要がある。直進性の高い光を用い、1台の発光器である程度の通信エリアを確保するために、以下に示す3方式を検討した。なお以下では、地上一車上リンクの構成を記述しているが、逆方向のリンクも発光器と受光器の位置を交換することで構成可能である。

3.2 対列車光通信の3方式

(1) 漏洩光ファイバ方式

光ファイバ通信では、光源から発せられた光はコアとクラッドの境界面での全反射によりコア内に閉じ込められて遠方まで伝搬するが、この光を伝送途中で意図的に漏洩させて通信を行う方式が漏洩光ファイバ方式である^{13) 14) 15)}。沿線に光ファイバを敷設することで、連続的な通信エリアを構成する(図1)。光ファイバ側面の粗

*4 (財)道路システム高度化推進機構(ORSE)が管理する。

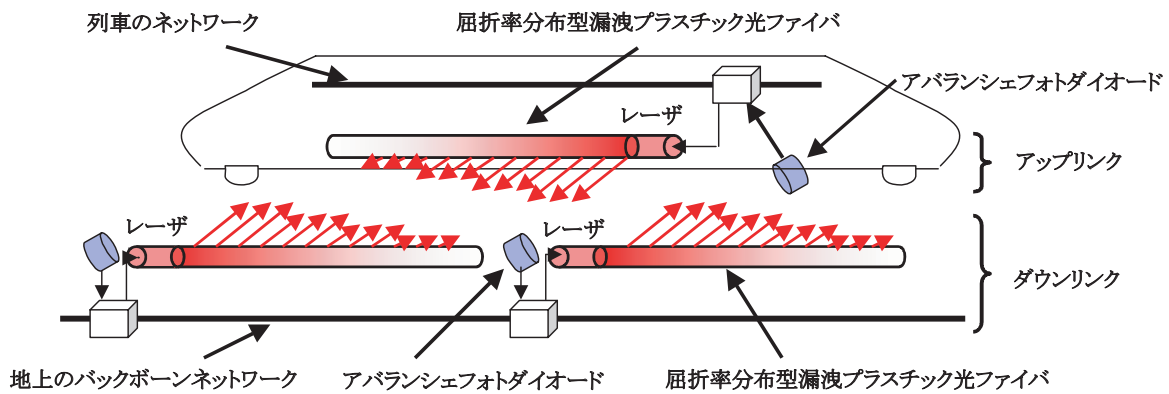


図1 漏洩光ファイバ方式

さの違いや光ファイバへの散乱体の混入等により、漏洩量や通信エリアが変化する。

(2) 光拡散ビーム方式

レーザーダイオードから放射される光ビームを意図的に水平方向にのみ広く拡散し、それを列車側面に当てることによって通信を行う方式である^{16) 17)} (図2)。光源の前にレンズを置くことにより、ビームを水平方向に広げることが可能となる。このような性質をもつレンズに、シリンジカル凹レンズやラインジェネレータレンズがある。シリンジカル凹レンズは「かまぼこ型」のレンズであり、水平方向にだけレンズの効果をもつ。ただし、光は同一強度で屈折するため、列車が遠方にいる場合には受信強度が弱くなる。ラインジェネレータレンズは、ビームを水平方向に広げるとともに、入射ビームとレンズの照射軸をずらすと放射されるビームの強度に偏りができるという特性をもつ。したがって、列車が遠方にいる方向に照射されるビームの強度を強くしておくことにより、通信エリア内での受光レベルの変動を抑えることができる。

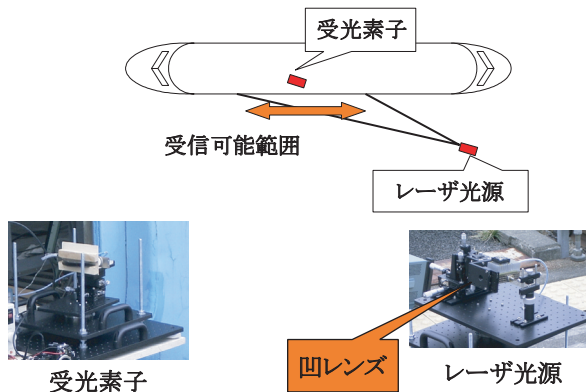


図2 光拡散ビーム方式

(3) レーザスキャン方式

列車追尾機構を設け、レーザービームを列車の移動に合わせて車上の受光器に向けるよう制御を行う方式である^{18) 19)} (図3)。上下方向及び左右方向への制御を行う2枚のミラーを用いて、全方向への制御を行う。

レーザースキャン方式

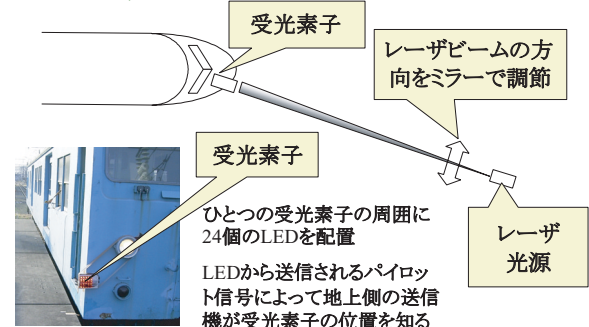


図3 レーザスキャン方式

3.3 各方式の比較

前述の各方式について鉄道総研内の試験線において受光レベル、ビット誤り率等の測定を実施した結果も踏まえて各方式を比較する。

1台の送信機で広い通信エリアをカバーできるのは、レーザースキャン方式である。この方式は、レーザー出力も小さくてすむため、高速伝送にも適しているが、一方ミラー駆動のためのメカニズムが必要になる。送信機と受信機間の距離を変えて、受信機における受信信号レベルとビット誤り率を測定した結果を図4に示す。

一方、漏洩光ファイバ方式と光拡散ビーム方式は、機械駆動部は不要であるが、光拡散ビーム方式でも100mW出力のレーザーで25m程度の通信エリアが限度であり、漏洩光ファイバ方式はさらに狭い。逆に、多数の送信機を連続して並べ各車両ごとに受信機を搭載すれば、1車両当たりGbpsオーダの超高速伝送が実現できる可能性もある。また漏洩光ファイバ方式は送信機と受信機を近接させた方が、受光レベルが上げることができると、駅ホーム等、離隔のとれない箇所での適用に向いていると考えられる。

3.4 今後の展望

現在、鉄道総研と慶應大学は、対列車通信へ適用可能な光通信方式として、上述の3方式の中からレーザースキャン方式について、実験による実証的検討を共同で進

特集：輸送情報技術

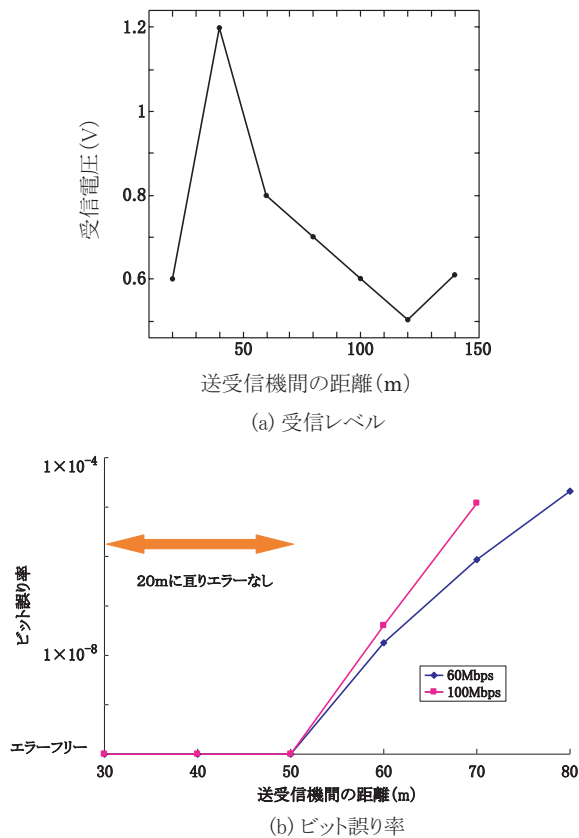


図4 レーザスキャン方式の伝送特性

めている。十分な通信距離の確保やパイロット信号（ビーコン）の追尾性能の向上等の課題への取り組みを引き続き行ない、鉄道用大容量通信システムの要素技術としての確立をめざしたい。

4. おわりに

本稿では、鉄道への適用を念頭に置きつつ、次世代携帯電話、無線LAN等、今後進展が期待される無線通信技術の動向を概観した。また、列車に対する高速大容量通信を実現する有望な技術のひとつである光通信方式に着目し、その対列車通信手段としての可能性について、既往の実験結果等も踏まえて考察した。引き続き、この分野の技術動向の把握に努めるとともに、光通信技術について対列車通信への適用へ向けた実証的検討を進めていきたい。

文献

- 1) B.O'Hara and A.Petrick. IEEE 802.11 Handbook* A Designer's Companion. 1999.
- 2) 森, 山内, 加川, 石井, “鉄道移動体におけるIPネットワーク構築について”: 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol.103, No.673 (20040224) pp.29-34
- 3) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/01/010510_2_.html

- 4) <http://www.softbanktelecom.co.jp/release/2004/nov/1116/index.html>
- 5) <http://www.ntt-bp.net/pc/tsukuba/index.html>
- 6) M Alvarez D?az, S. Scalise, G. Sciascia, R. Mura, P. Conforto, and . Ernst, “DVB-S air interface over railroad satellite channel: Performance and extensions,” in Proc. of Sixth Baiona Workshop on Signal Processing in Communications, Baiona, Spain, Spetember 8-10 2003.
- 7) Losquadro, A Ghelardini “FIFTH - Fast Internet for Fast Trains Hosts: A satellite technology applications in train environment”, 6th World Congress on Railway Research (WCRR) 2003.
- 8) WiMAX FORUM, <http://www.wimaxforum.org/home/>
- 9) <http://www.its.go.jp/ITS/j-html/useofetc/20070626/useofetc.pdf>
- 10) <http://www.internetits.org/ja/top.html>
- 11) 今井, 河合: “ミリ波通信技術の新幹線への適用の検討”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol.2003年基礎・境界 (20030910) p.183, 電子情報通信学会
- 12) 新倉, 秋山, 安達: “山梨実験線ミリ波列車無線実験システム”, 鉄道総研報告, Vol.15, No.11, pp35-40, 2001
- 13) 志村, 松澤, 春山, 石樽, 小池, 中川: “漏洩プラスチック光ファイバーを用いた列車通信システムにおける実験的検討”, 電子情報通信学会信学技報, RCS2005-143, pp.113-118, January 2006
- 14) 志村, 菅原, 鈴木, 近藤, 春山, 石樽, 小池, 中川: “GI型漏洩プラスチック光ファイバーを用いた列車通信システムの実験的検討”, 電子情報通信学会信学技報無線通信システム研究会, RCS2004-51, pp.13-18, 2004年
- 15) 松澤, 志村, 春山, 石樽, 小池, 中川: “列車通信システムでの使用を想定したGI型プラスチック光ファイバーの性能改善”, 電子情報通信学会信学技報, OCS2005-21, pp.55-60, 2005
- 16) H. Kotake, T. Matsuzawa, A. Shimura, M. Nakagawa, “A New Ground-to-Train Communication System using Free-Space Optics Technology,” Computers in Railways 2006 (Comprail 2006), pp. 683-692, Prague Czech Republic, 2006.
- 17) H. Kotake, S. Haruyama, M. Nakagawa, K. Seki, “BER characteristic of ground-to-train communication system using free-space optics technology”, 9th International Conference on Transparent Optical Networks, pp.165-169, Rome, Italy, 2007.
- 18) 松澤, 小竹, 志村, 春山, 石樽, 小池, 中川, 関: “光無線通信技術を利用した対列車通信システム”, 電子情報通信学会信学技報, CQ2006-57, OIS2006-44, IE2006-59, pp.41-46, OIS, 2006
- 19) 松澤, 春山, 中川, 関: “光無線通信と移動体追跡技術を利用した対列車通信システムに関する検討”, 電子情報通信学会信学技報, OCS2006-76, pp.13-18, 2007