

鉄道における ブロードバンド 無線伝送



立石 幸也*



馬場 貴博**



鈴木 祐輔*



高荷 洸*

鉄道システム、特に地上と車上間においても利用可能なブロードバンド無線伝送サービスの発展が望まれている。本研究はブロードバンド無線伝送が鉄道においてどのように活用可能か把握するため、鉄道における無線伝送の現状調査を行い伝送方式の比較を行った。その結果、首都圏の在来線ではWiMAXの活用によるブロードバンド環境が整ってきていることがわかった。また、新幹線でのブロードバンド無線伝送サービスの技術的課題と可能性を把握するために、ブロードバンド無線機による伝送試験を行い4.4Mbpsの伝送が可能であることを確認した。

●キーワード：ブロードバンド無線、列車無線、インターネット、LCX、スループット

1. はじめに

近年本格的なユビキタス時代の到来を迎え、ブロードバンド無線技術をベースとしたさまざまな伝送サービスが提供され始めている。新たな電波利用分野は「無線ネットワークのブロードバンド化がもたらす方向性」「無線システムの多様化がもたらす方向性」の二つの方向性によって進んでいくといわれている。¹⁾

鉄道システムでは、特に地上と車上間においても利用可能なブロードバンド伝送サービスの発展が望まれている。インターネット接続などの一般旅客サービスのみならず、鉄道運行に直接かかわる無線システムの高機能化、ブロードバンド化も必要となる。

現在当センターにおいて、地上と車上を有機的に結合した次世代首都圏鉄道システムの研究を行っている。この次世代首都圏鉄道システムにおいては、地上と車上間の情報伝送にブロードバンド無線を導入することにより、地上と車上のシステム機能の最適配置を行って、安全性、安定性、利便性の向上、コストダウンを目指している。そのため、ブロードバンド無線伝送が鉄道においてどのように活用可能か把握することを目的に、当社システムを中心に現在採用されている無線伝送システムの現状調査を行った。

また、新幹線でのブロードバンド無線伝送サービスの技術的課題と可能性を把握するために、ブロードバンド無線機による伝送試験を行った。本稿では、以上の2点について報告を行う。

2. 鉄道における無線によるデータ伝送の現状

2.1 在来線

当社において現在、多くの無線技術が活用されている。そのほとんどが鉄道運行业務に使用されており、鉄道事業に割り当てられた専用の周波数を用いている。その代表的な

ものが列車無線である。国鉄時代の昭和60年から順次整備されてきたが、これまではアナログ無線の音声通話だけであった。設備が経年20年となったため、伝送品質の向上および機能向上をめざし、列車無線のデジタル化の検討が進められ、2007年の山手線を皮切りに2010年までに首都圏の在来線すべてにデジタル列車無線が導入された。

デジタル無線システムの導入により、音声通話のほか、データ伝送が行われている。輸送指令からの指示（通告）を文字伝送で乗務員室にあるモニター画面へ表示することができる。また、車両客室内表示器にて列車の運行状況をお客さまへ情報提供することができる。

その他にも地上からは東京圏輸送管理システム導入線区内の列車在線や遅延時間などの伝送を行ったり、車上から車両故障情報を指令や車両基地の端末へ伝送表示することにより、復旧を支援することができる。

デジタル列車無線の伝送速度は9.6kbpsであり、ブロードバンド無線伝送とは言い難いが音声の符号化技術、伝送誤りを訂正する技術などを効率よく採用して、9.6kbpsという少ない情報を有効に活用して伝送を行っている。

また、当社で実用化を進めている無線を用いた列車制御システムであるATACSIにおいても、このデジタル列車無線と同様の無線技術を採用している。これらのシステムは電波法では狭帯域デジタル通信方式と定められており、4.8kHzと極めて狭い無線帯域で伝送している。

一般的に高速大容量の無線システムを「ブロードバンド無線伝送」というが、これは大量の情報を送るためには広い（ブロードな）無線帯域幅が必要であることに由来している。代表的なものに無線LANやWiMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access）などの汎用無線システムがある。

これらの無線方式は通勤列車などの乗降口上部の大型液晶案内装置（VIS）への運行情報伝送や、特急電車内のインターネットサービスに用いられている。無線LANの場合は、

ホームなどにアクセスポイントを設置し車上で通信を行う。無線LANの電波到達範囲は最大100m程度のため、主に駅停車中に必要な情報を伝送する。一方、WiMAXの場合は電波到達範囲が広いので、駅中間の走行中においても情報伝送が可能となり、逐次最新の情報を送ることができる。

新型成田エクスプレス（E259系）では車内のサービス向上のため、インターネット接続サービスを2009年10月から開始している。本システムは車両の屋根上のアンテナでWiMAX基地局と通信を行い、車内に設置した中継装置にて無線LANに変換して乗客が持っている端末と通信を行ない、インターネットへの接続を可能としている。

在来線におけるもう一つのブロードバンド無線伝送システムに、ミリ波を活用したシステムがある。このシステムの用途は先に示したVISへの伝送である。拠点となる駅にて停車中に、100Mbpsの高速伝送を行っている。ミリ波は非常に高速な伝送が可能である反面、アンテナの指向性が極めて狭いため、車上アンテナと地上アンテナとの結合に関して特段の考慮が必要となる。その他のミリ波の用途として、ホーム監視用画像伝送や踏切障害物検知などがあり、他社で使用されている。現在はアナログ方式が主流であるが、今後デジタル化が進むと思われる。

2.2 新幹線

東北・上越新幹線の列車無線は2002年11月に、最新のデジタル無線技術を活用した方式に更新された。従来のアナログ方式では実現できなかったさまざまなデータ伝送サービスが開始された。デジタル化により装置性能が改善され、伝送品質が向上したことによりデータ伝送の高速化が図られた。これにより、新しいシステムが可能となった。主なものに、新幹線指令伝達システム、車両技術支援システム、通信機器監視、車内情報提供システムがあり、また、新幹線の安全を支える保安システムの一部にもデジタル無線によるデータ伝送が活用されている。

現在のデジタル新幹線列車無線で使用されている無線機の性能は、在来線で使用されている9.6kbpsより遥かに高速であり、最大伝送速度は384kbpsである。しかし、現在の無線システムはすでに音声通話や業務用の用途にて使用されており、容量に余裕がないため、近年要求が高まっている新幹線車内インターネット接続に対応するのは難しいのが現状である。一般のお客さまにブロードバンド伝送サービスを提供するためには、よりいっそうの高速な無線伝送システムが必要となる。

3. ブロードバンド無線伝送の必要性

3.1 伝送方式の比較

ブロードバンド無線伝送を行うには無線伝送に広い帯域幅と安定した無線受信レベルが必要となる。ブロードバンド無線伝送ができるのは2章で述べた無線LAN、WiMAX、ミリ波

があげられる。表1に2章で紹介した各伝送方式の比較を示す。無線LAN、WiMAX、ミリ波は伝送に必要な周波数帯域は確保されている。

ブロードバンド無線伝送としてミリ波が100Mbpsともっとも高速伝送が可能である。しかし、ミリ波で連続的にサービスするためには、走行中にも安定した無線受信レベルを確保するため、基地局の設置や雨による減衰など現時点では技術的な課題は多い。また個人が直接ミリ波で通信することはできないため、WiMAXのインターネット接続のように列車で一旦ミリ波を受信して、客室内へ無線LANなどのアクセスポイントを設置する形になる。

表1のミリ波はVIS伝送に使用している60GHzであり、この周波数は特に伝播損失が大きい。伝播損失の少ない40GHzを使って航空機による高速移動体の伝送技術の研究開発が、独立行政法人情報通信研究機構で行われており、その成果の応用先として鉄道でのブロードバンド無線伝送について報告されている。²⁾

WiMAXは首都圏の鉄道沿線においても多くの基地局が設置されており、駅構内においては弱電界対策として小型基地局や中継基地局が設置されている。このように、首都圏の在来線では安定した無線受信レベルを比較的得やすいためブロードバンド無線伝送の環境は整っているといえる。

一方、WiMAXを新幹線で利用するにはトンネル内の伝送と沿線の基地局数が課題となる。首都圏は在来線と同様基地局数が多く比較的通信可能であるが、その他の地域は駅周辺のみが使用可能である。WiMAXは列車無線と比べて使用している周波数が異なるので、トンネル対策としてLCXを使用して伝送することは難しい。

表1 伝送方式の比較

伝送方式	空間波 在来線	LCX 新幹線	無線LAN	WiMAX	ミリ波
周波数	400MHz	400MHz	2.4/5GHz	2.5GHz	60GHz
伝送速度	9.6kbps	384kbps	11/54Mbps	40Mbps	100Mbps ~
帯域幅	4.8kHz	288kHz	22/20MHz	10MHz	約200MHz
伝送範囲	3km	1.5km (中継)	100m-2km	1km	50m

3.2 インターネット環境の潮流

図1にインターネット環境の潮流を示す。まず、オフィスや家庭でのブロードバンド化が進み、次に携帯電話によるインターネットアクセスが可能となり、単につながりだけでなくブロードバンド化が進んできた。これにより、いつでも、どこでもブロードバンド伝送が可能となった。しかし、携帯電話は携帯電話基地局と直接通信しているため、トンネルのある鉄道では携帯電話基地局との通信には特別な対策が必要である。東北新幹線の仙台までのトンネル内は対策が進んでいるが、まだ十分とはいえない。

3.1で示したようにブロードバンド無線伝送を行うには、広い

帯域幅と安定した無線受信レベルが必要となる。新幹線列車無線システムは全線にLCXが敷設されており、安定した無線受信レベルが確保されているため、384kbpsの伝送速度ではほぼ誤りなしに無線伝送が行われている。東海道新幹線ではLCX無線回線にて2Mbpsの速度でインターネットサービスが行われている。³⁾

東北・上越新幹線のデジタル化は2002年に行われており、すぐに新方式に取り替えるというわけにはいかないが、新幹線において将来のブロードバンド無線伝送環境を整える必要がある。以上のようなインターネット環境の潮流に対応するため、当センターでは新しい無線方式による試験を行った。

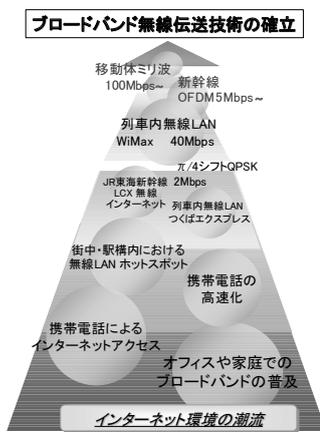


図1 インターネット環境の潮流

4. 新幹線ブロードバンド無線伝送試験システム

走行中の新幹線車両内でも安定的にかつ経済的にブロードバンド無線伝送を実現するため光ファイバによる中継方式と、既設の漏洩同軸 (LCX) ケーブルを組み合わせたブロードバンド無線伝送システム (以下、本システム) の開発を行った。本項では開発したシステムの概要について述べる。

4.1 光中継システム構成

電波などの高周波信号は同軸ケーブルによって伝送されるのが一般的であるが、近年では光ファイバによる伝送が可能になっており、この技術はRadio on Fiber (RoF) と呼ばれる。光ファイバを用いることで、同軸ケーブルと比較し、大容量かつ低損失な長距離伝送が可能になることから、本システムは光ファイバによる中継方式を採用した。本システムの構成を図2に示す。

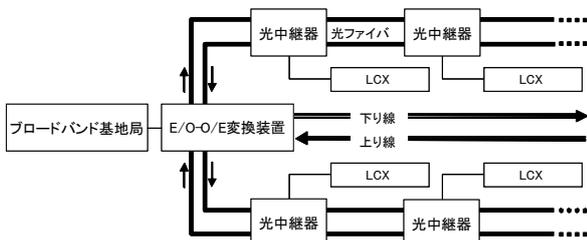


図2 ブロードバンド伝送システムの構成図

4.2 光中継器

図2における光中継器は、基地局→列車方向 (Down Link, DL) の光/電気変換機能 (O/E) と、列車→基地局方向 (Up Link, UL) の電気/光変換機能 (E/O) を持ち、隣接光中継器へも信号を伝える。今回開発した光中継器の内部構成を図3に、外観を図4に示す。

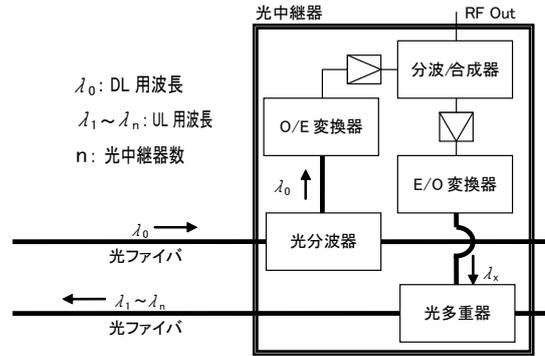


図3 光中継器内部構成図

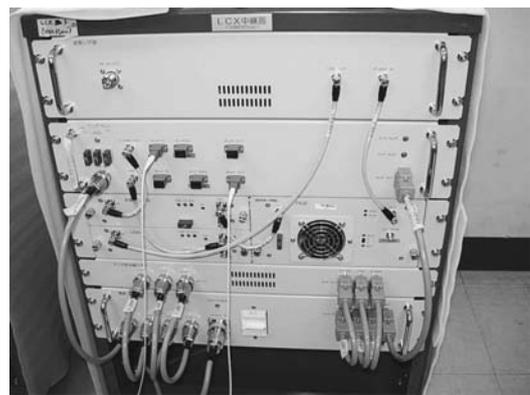


図4 光中継器外観

図3に示すように、DLは光ファイバ1芯線を1波で使用しているが、ULについては光中継器ごとに異なる信号が送られてくる。そのため、光中継器ごとに異なる波長の光を割り当て、光波長多重 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) を行うことで、ULについても1芯線に対応可能としている。

4.3 E/O - O/E 変換装置

(a) ダイバーシチなしの場合

図2において基地局の高周波信号を光信号に変換して送信する、また受信した光信号を高周波信号に変換するのが、E/O-O/E変換装置である。基地局が送受信ともにダイバーシチなしの場合の内部構成を図5へ示す。

基地局の送信部 (TX) から受けたDL信号は、分配器で上り線側と下り線側に分けられ、それぞれE/O変換部にて光信号へと変調される。

また、UL信号については、光分波器にて光信号が波長ごとに分離され、それぞれO/E変換部で高周波信号に変換された後、上り線側と下り線側の信号が合成されて基地局の受信部 (RX) に接続される。E/O変換器とO/E変換器は

一対向のみとし、その間の光伝送損失を形成するものはすべて受動素子としているため、熱雑音が重畳されることなく高品質な光伝送を実現している。

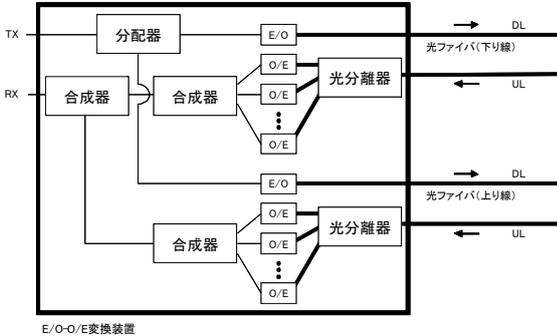


図5 E/O-O/E変換装置内部構成 (基地局受信ダイバーシチなし)

(b) 基地局受信ダイバーシチありの場合

昨今では受信感度の増大を目的に、ダイバーシチ技術を用いるケースが増えてきている。新幹線においては、線路の両側に一条ずつのLCXケーブルが敷設されていることから、基地局の受信ダイバーシチが可能である。今回は受信ダイバーシチが適用できるようにE/O-O/E変換装置を製作した。なお、列車無線のUL信号が回り込まぬよう、バンド排除フィルタ (Band Elimination Filter, BEF) を内蔵している。内部構成図を図6に示す。

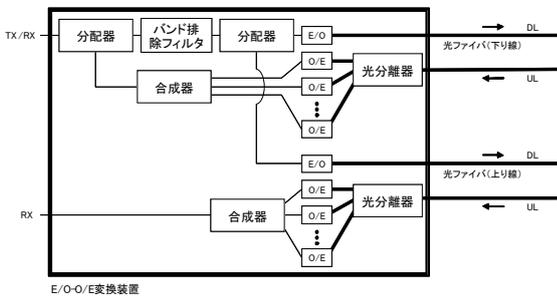


図6 E/O-O/E変換装置内部構成 (基地局受信ダイバーシチ)

4.4 ブロードバンド無線機の概要

今回試験に使用したブロードバンド無線システムは、ヨーロッパの鉄道において400MHz帯の空間波方式にて実用化されている汎用の無線システム⁴⁾の周波数を、新幹線用に変更したものである。今回のシステムは、新幹線におけるブロードバンド無線伝送対応の光中継器の開発とブロードバンド無線伝送の可能性を評価することが目的であるので、ブロードバンド無線機は汎用品を活用した。ただし、高速鉄道のLCX伝送路において本方式の試験をするのは、国内はもとより海外でも初めての試験であり、技術的意義は大きい。今回使用した汎用のブロードバンド無線機の仕様は表2のとおりである。

技術的特徴は表1の多重方式と変調方式の2点である。多重方式のOFDMとはOrthogonal Frequency-Division Multiplexingの略であり直交周波数分割多重方式という。この特徴は1.28MHzの帯域内で、1波の帯域幅11.25kHzの電波を113波使用し、周波数間隔を密にしても相互に干渉し

ないような変調方式にて送信することにより、最大伝送速度が5.3Mbpsで伝送可能となっている。

表2 ブロードバンド無線機仕様

無線周波数	f_c : 416.25MHz (UL) f_c : 460.75MHz (DL)
無線送信出力	2W (基地局) 0.2W (移動局)
占有周波数帯域	1.28MHz (UL) 1.28MHz (DL)
多重方式	OFDM
変調方式	適応変調方式 (BPSK - 256QAM)
ダイバーシチ	無し (DL) スペースダイバーシチ (UL)
伝送速度 (無線リンク)	UL: 1.8Mbps (実効 1.6Mbps) DL: 5.3Mbps (実効 4.4Mbps)

図7に周波数帯域幅の比較を示す。従来方式で384kbpsを伝送するには288kHzの帯域が必要となる。1.28MHzの帯域で伝送する場合、電波は4つまでしか送ることができず、最大で約1.5Mbpsまでしか送ることができない。

次の特徴である適応変調方式は、電波の強さや雑音の量に従って変調方式を適宜変更することによって最適な伝送速度を選択する技術である。2つの技術は新幹線LCX無線システムで初めて試験をする技術である。

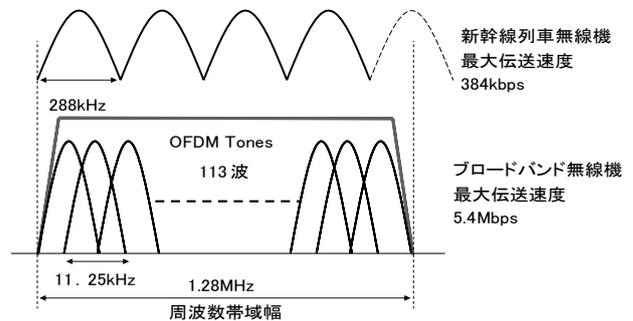


図7 周波数帯域幅の比較

4.5 既設 LCX ケーブルの共用

4.1では本システムがLCXケーブルを、既設の列車無線に対して排他的に占有できるという前提において、光伝送システムの構成を考えた。実際には現在敷設されているLCXケーブルは列車無線によって使用されており、本システムの導入によって列車無線に影響が出ないようにシステム設計を行う必要がある。列車無線の構成を述べると伴にLCXケーブル共用に必要な構成について検討を行った。

4.5.1 列車無線の構成

東北・上越新幹線の列車無線は、沿線を約30kmごとに分割した通信ゾーンで構成している。このゾーン内では、1スパン=約1.5km長のLCXケーブルが複数段直列に接続されており、スパンごとに発生する伝送損失は1.5kmごとに設置された中継器によって損失分が補償増幅される。電界を一樣に近づけるため、LCXケーブルは、基地局側から終端側へ

向かって放射特性を変えて製作されている。

1つのゾーンでは、駅通信機器室などに設置された基地局装置を起点として、ゾーンの終端点までLCXケーブルで信号を中継伝送している。構成を図8に示す。

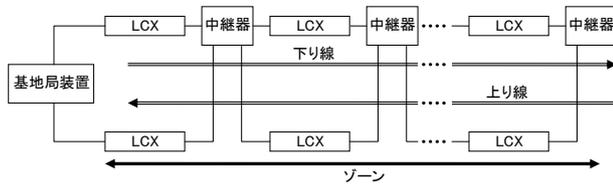


図8 列車無線構成図

4.5.2 ブロードバンド無線機との接続構成

本システムの周波数は表2に示したとおりであるが、列車無線で使用している周波数とはULで約2MHz、DLでは約8MHzと接近している。本試験では列車無線とLCXケーブルを共用することから、列車無線に影響を与えずに高周波信号を重畳する必要がある。

そこで、2種のインターフェース装置 (I/F) を用いて本システムをLCXケーブルに接続する。詳細を図9に示す。

I/F (A) には方向性結合器を用いて、列車無線基地局へ本システムのDL信号が流れ込み、送信IM (intermodulation) が発生することを防止する。これによりLCXケーブルを異なるシステム間で相互干渉することなく、共用利用するシステムを実現している。しかし、列車無線の伝送品質を落とさないために、方向性結合器への接続では、本システムに-10dBの結合損を持たせた。

I/F (B) は列車無線の周波数のみを通過させるバンドパスフィルタを用いている。本システムのUL信号がLCXを経由して、本システムの基地局側へ流れ込み、光ファイバ経由のUL信号とマルチパスにより干渉を起こすことを防止している。

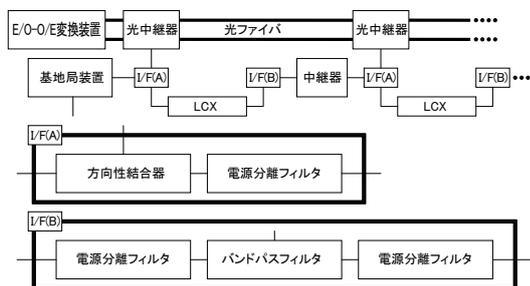


図9 I/Fによる本システムとLCXケーブルの接続

5. システム性能評価試験

5.1 スループットの速度特性

新幹線車両の走行速度を60km/h~240km/hまでの間で変化させ、各走行速度における本システムの性能評価を行った。移動局の設置箇所は運転台と乗客室の2ヶ所とした。図10に運転台に移動局を設置した様子を示す。この位置では、窓枠などにさえぎられ、LCXを直接見通すことは出来ない。

図11にDLスループットの速度特性を示す。図11において横軸が新幹線車両の走行速度、縦軸がDLのスループット特性を表している。図11より走行速度が速くなるにつれてスループットが低下する傾向が見られた。移動局の設置箇所としては運転台よりも乗客室の方が良好なスループット特性となっていることがわかる。



図10 運転台における移動局設置状況

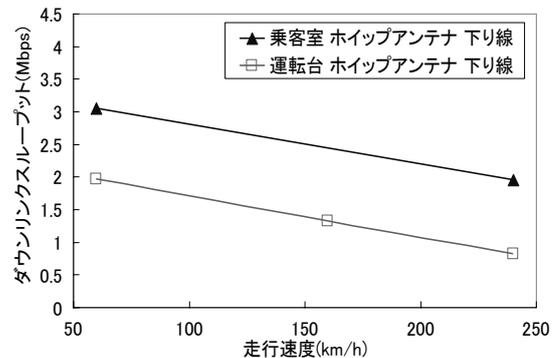


図11 DLスループットの走行速度特性

5.2 スループットのレベル特性

スループット特性をさらに向上させるため、乗客室窓に新幹線列車無線にて使用されている平面アンテナを設置して、評価試験を実施した。図12に乗客室における移動局設置状況を示す。図13は横軸が時刻を表しており、左縦軸がDLスループット、右縦軸がDL受信レベルを表している。図13より240km/h走行時においても受信レベルが良好なポイントにおいては最大で4.2Mbpsのスループットが得られることが確認出来た。



(1) 平面アンテナ (2) ホイップアンテナ

図12 乗客室における移動局設置状況

この時の試験区間における信号雑音比 (SNR: signal-noise ratio) 対DLスループット特性を図14に示す。図14よりSNRが上昇するにつれてスループットも上昇する傾向が見て

取れる。SNRが良好なポイントにおいては無線機の実効値に近い特性が得られており、基地局の適応変調において最も効率の良い256QAMの変調方式が動作していることが確認出来た。

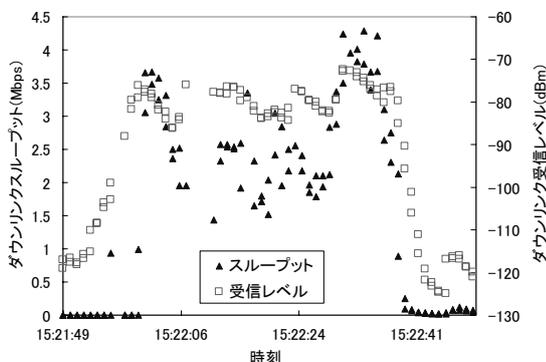


図13 240km/h走行時におけるDLスループット及び受信レベル特性

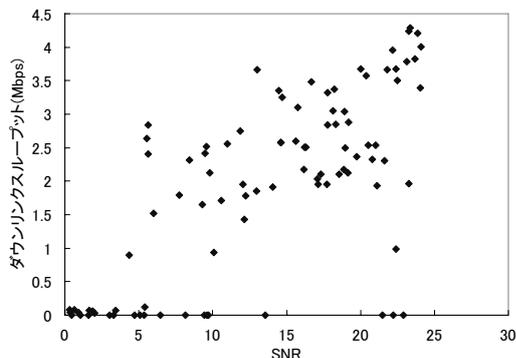


図14 240km/h走行時におけるSNR対DLスループット特性

5.3 複数移動局によるスループット評価

車上の移動局の数を2台に増やした時、UL、DLそれぞれのスループットがどのように変動するかを評価した。図15に移動局数を2台とした時のDLスループット特性を、図16にULスループット特性を示す。両図において移動局1台のスループットが移動局2台のスループットを合計した特性の概ね1/2となっていることがわかる。このことから本システムにおいて移動局数を増やした場合、1台当たりのスループットは、1台だけのときに得られる最大のスループットを移動局数で割った値になることが確認出来た。

図15と図16を比較すると、図16のスループット特性の方が安定していることが見てとれる。ULに実装されているスペーシング機能の効果による。ダイバーシチ機能とは二つの受信機で別々のアンテナで受信し、相互を補完しあう受信方式である。デジタル列車無線ではULとDLの両方に搭載されているが、今回使用した無線機にはULのみに実装されていたので、DLにおいてこのダイバーシチ機能があればより高品質の伝送が可能となる。

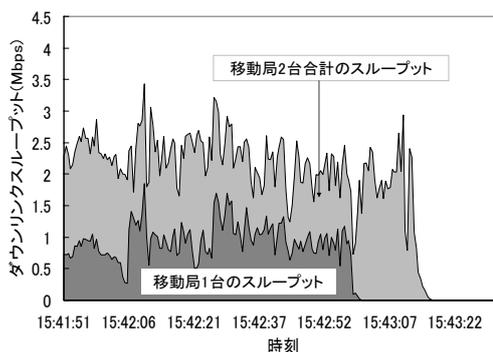


図15 移動局2台時のDLスループット特性

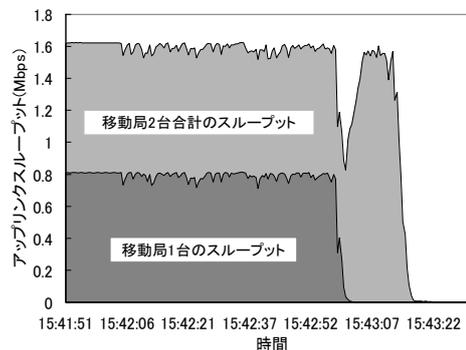


図16 移動局2台時のULスループット特性

6. おわりに

地上と車上間においても利用可能なブロードバンド伝送サービスの提供が可能な無線システムの評価のために、まず、鉄道におけるデータ伝送の現状を調査を行い、現在鉄道で使用されている各種システムの比較を行った。

その中で、在来線においてはWiMAXによりブロードバンド無線伝送が可能であるのに対し、新幹線においてはトンネル内などWiMAXによる伝送に課題があることを述べた。そして、既存システムより高速な伝送が可能な無線システムの検討を行い、既設LCXを共用した中継システムを開発した。最新の技術を取り入れたブロードバンド無線機による実車走行試験により、試験に用いた無線機の最大能力での4.4Mbpsでの伝送が可能であることを確認した。

今後、本研究成果を基に新幹線列車無線のシステム更新に向け、今回の試験よりも高速な伝送を実現するため要素技術の研究やサービスモデルの検討を進めていく。

参考文献

- 1) 新田隆夫, “電波新産業創出戦略 ~2010年代の電波利用方策~”, 総務省電波資源拡大のための研究開発成果報告会, 2009年6月24日
- 2) 情報通信研究機構, “ミリ波帯高速移動体通信システム技術の研究開発”, 総務省周波数ひっ迫対策のための技術試験事務平成21年度報告書, 2010年6月24日
- 3) 杉山寛之, “東海道新幹線車内インターネット接続サービスの導入”, 鉄道と電気技術, Vol.19, No.11, pp.10-14, Nov.2008.
- 4) 川端啓之, “ブロードバンドの核心-フラッシュOFDMと802.20-”, NIKKEI COMMUNICATIONS, No.461, pp.99-95, May.2006.