

符号分割多重無線伝送方式を利用した ミリ波ROF路車間通信システム —上り回線の伝送特性—

原田博司[†] 佐藤勝善[†] 藤瀬雅行[†]

筆者らは、ミリ波帯の無線周波数を用いて路車間移動通信システムを実現するために、光ファイバ無線(Radio on Fiber:ROF)通信技術と符号分割多重無線伝送方式を利用した新しいミリ波路車間通信システムを提案を行ってきた。そして、36GHz帯のミリ波帯無線周波数を用いて提案システムを構築し、制御局から移動局に対して伝送を行う下り回線において車が連続的に移動した場合においてもエラーフリー伝送が行うことができることを示してきた。本稿では、上り回線においても試験を行い、その伝送特性について評価を行っている。

Experimental Feasibility Study on a Radio-on-fiber Based Millimeter-Wave Road-Vehicle Communication System by a Code Division Multiplexing Radio Transmission Scheme - Transmission performance on uplink -

Hiroshi Harada[†], Katsuyoshi Sato[†] and Masayuki Fujise[†]

A radio-on-fiber (ROF) based millimeter-wave road-vehicle communication (RVC) system by a code division multiplexing radio transmission scheme has been proposed. And an experimental testbed to realize the proposed system has been developed and feasibility studies has been done. In our previous paper, an error-free continuity mobile communication system with the rate of 4.608 Mbps was realized on the ROF based millimeter wave RVC system under the mobile speed of 30 km/h on the downlink. In this paper, as an extended work, we show several results of the transmission performance on the uplink and arrange key items to realize two-way communication on the millimeter-wave RVC system.

1 はじめに

近年、高度情報通信システムを利用して、道路交通システムを高度化させる高度道路交通システム(Intelligent Transport Systems:以下ITSとする。)に関する研究開発が盛んに行われている。このITSシステムには、路側ネットワークと車との通信を利用した路車間通信システム及び車と車との通信を利用した車々間通信システムに分類することができ、種々の機関で共同研究、標準化等が行われている[1][2]。特に路車間通信システムはITS用通信ネットワークを実現する上での基幹通信網として必須であり、今後は、動画像、インターネット網を包含した総合的なマルチメディア情報を用いた通信を行うことになるであろう。

このようなマルチメディア路車間通信システムを実現する場合、最も重要になる点として、使用する周波数の問題が挙げられる。現在、陸上移動通信におい

ては主に2GHz以下の無線周波数が用いられている。しかし、当該周波数においてはチャンネルが逼迫しており、新しい周波数の開拓、及び利用が望まれる。また、動画像をベースにした通信を考える場合、少なくとも数Mbps以上の情報の伝送レートが必要になる。このような広い周波数帯域を確保するために、また、複数のユーザに対しても安定した広帯域情報を供給するためには少なくとも2GHz帯以上の無線周波数が望まれる。特に、もし30GHz帯以上のミリ波帯無線周波数をこのようなITS用の路車間通信システムに用いることができるならば、十分な周波数帯域幅を確保でき、マルチメディアを利用したITSがより身近なものになると考えられる。

しかし、このようなミリ波帯を用いて既存のセルラー構造による移動通信システムを構築する場合、信号の距離減衰が大きいため、そのセル半径が数10m程度と小さくなる。その結果、通信を行うための送受信機を多数路側に設置する必要があり、また、セル間の干渉を押さえるため、隣接セル間で異なる周波数を用いる場合は、ハンドオーバーを数10m単位で頻繁に行わなければならない、コストの面、およびシステムの構成面からみても実用に際してはさらなる検討を要する[2]-[4]。

[†] 総務省 通信総合研究所 横須賀無線通信研究センター
[†] Yokosuka Radio Communications Research Center,
Communications Research Laboratory, Ministry of Public
Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications

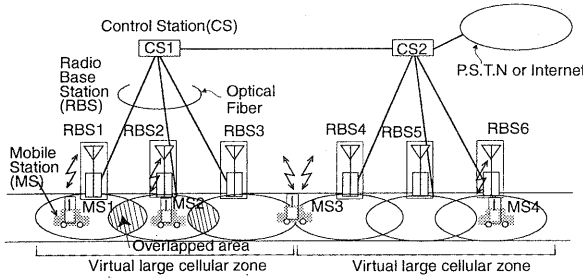


図1 提案システムの概要図

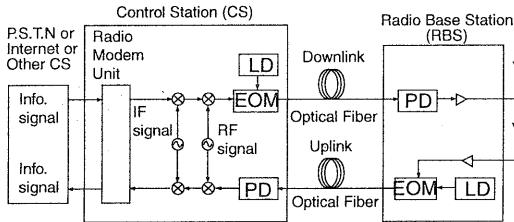


図2 ROF通信技術

総務省通信総合研究所では、以上の問題点を解決し、安定したマルチメディア路車間通信システムを実現させるための一つの方策として、光ファイバ無線 (Radio on Fiber: ROF) 通信技術と符号分割多重 (Code Division Multiplexing: CDM) 無線伝送方式を利用した新しいミリ波路車間通信システムを提案及びテストベッドを用いた実証試験を行ってきた[3][4]。そして 36GHz 帯のミリ波帯無線周波数を用いて提案システムを構築し、車が連続的に移動した場合においても制御局から移動局の下り回線において 4.608 Mbps のデジタル情報がエラーフリーで伝送を行うことができることを野外実験を通して実証した[3][4]。本稿では、上り回線においても同様の伝送試験を行い、エラーフリーで伝送する上で検討すべき課題についてまとめている。

2 提案路車間通信システムの構成法

2.1 システム構成

提案システムの概要図を図 1 に示す。提案方式においては、複数の無線基地局 (Radio Base station: RBS) が路側に設置されている。各 RBS はミリ波帯を用いて移動局 (Mobile Station: MS) と通信を行っている。そして、各 RBS は ROF 通信技術を用いて制御局 (Control Station: CS) と接続されている。図 1 の場合は、RBS1 から RBS3 が CS1 と接続され、RBS4 から RBS6 が CS2 と接続されている。ROF 通信技術とは図 2 に示すように従来 RBS にあった無線変復調装置をすべて CS に集中配備し、CS と複

数の RBS 間を光ファイバで接続するとともに、各 RBS には RBS がカバーするセルラゾーン内に存在する MS から送信された無線信号を用いてレーザーダイオード (Laser diode: LD) を直接もしくは光外部変調器 (Optical External Modulator: EOM) に代表される光変調素子を用いてレーザーダイオードを変調し光信号に変換し、CS に伝送する機能と CS 側において生成した無線周波数帯信号によって変調された光信号を受信し、フォトダイオード (Photo diode: PD) に代表される受光素子を用いて無線周波数帯信号を検出し、RBS がカバーするセルラゾーン内に放射する機能のみをもたせ、無線変復調、回線制御等を CS で集中的に行うシステムである[2]-[5]。また、CS においては、公衆網、インターネット網、他の広域通信網、および他の CS より伝送された情報信号を無線信号変復調ユニット (Radio Modem Unit: RMU) を用いて伝送したい無線周波数で変調された信号を生成し、この生成された無線信号を用いて、LD を直接もしくは EOM に代表される光変調素子を通じて LD を変調し光信号に変換し、RBS に伝送する機能と、RBS から送信された RBS 側において生成した無線信号によって変調された光信号をそのまま PD に代表される受光素子を用いて無線信号を検出し、その後 RMU において、復調及び他のネットワークに対応した信号フォーマットに変換し、公衆網、インターネット網、他の広域通信網、および場合によっては他の CS に伝送する。

この ROF 通信技術を用いることにより、RBS は光と無線との間のコンバータを装備するだけになり、路側の送受信装置は CS に集中配備されることになる。また各 RBS からはミリ波の無線信号が送信されるため、ミリ波独自の大きな自由空間損失により、各 RBS が作り出すセルラゾーンは小さいが、すべての RBS から同じ周波数を送信することにより、結果として一つの大きな仮想的な同一周波数を用いたセルラゾーンが構成できることが分かる。このとき図 1 に示すように CS に装備された送受信機と MS に装備された送受信機が複数の RBS を介して仮想的なセルの中において通信していることになる。もちろん、この一つの CS が収容する仮想的なセルにおいて収容できる人数は限られている。その結果、図 1 に示すように複数の CS が複数の仮想的なセルを管理する可能性がある。また CS についても図 1 においては距離を離して書いているが、この CS をすべて一つの場所に統合して装備させ、CS をも集中管理することも可能である。そのとき CS を集中配備する局を統合制御局と呼ぶこともできる。

図 1 においては RBS1-RBS3 は MS と通信を行うために同じ周波数のミリ波帯無線信号を用いて仮想的なセルを構成している。また、RBS4-RBS6 も MS と通信を行うために同じ周波数のミリ波帯無線信号を用いて仮想的なセルを構成している。すなわち 2 つの CS が 2 つの仮想的なセルを作っている。この

ROF 通信技術を用いた RBS 群が作り出す仮想セルラゾーン(Virtual Cellular Zone: VCZ)を利用して移動通信を行うシステムのことを ROF-VCN(Radio on Fiber Virtual Cellular Network)と呼ぶ。

この提案方式を実現する場合、いくつかの点について考慮する必要がある。まず下り回線においては、同じ CS に接続され、同じ周波数を用いるセルの構成法について検討を行う必要がある。このとき各 RBS は同一周波数を送信するため、隣接する RBS から送信される同一周波数の無線信号は互いに干渉する。この同一周波数の信号が干渉するエリアをオーバーラップエリアと呼ぶことにする。図 1 にはこのエリアが図示されている。このエリアの大きさは RBS で用いるアンテナ、送信電力に依存する。そこでこのエリアに関する最適化の検討を行う必要がある。また、この干渉エリアにおいても低ビット誤り率(bit error rate: BER)で伝送が可能な無線伝送方式について検討を行う必要がある。

また、上り回線においては MS に設置されたアンテナから送信された信号を複数の RBS で受信し、そのまま CS に伝送する。このとき、各 RBS を経由して CS まで伝送される時間がそれぞれ異なるため CS の RMU で複数の RBS からの信号の干渉が生じる。したがって、この干渉に対しても十分耐性のある無線伝送方式について検討を行う必要がある。

また、ミリ波を用いた移動通信を行う場合、マイクロ波帯および準マイクロ波帯で移動通信を行う場合と比べ、ドップラー周波数に起因する周波数のオフセットおよび受信機内の発振機の位相雑音が問題になる。この問題を解決することが可能な無線伝送方式についても検討を行う必要がある。

2.2 符号分割多重無線伝送方式を利用した干渉軽減法

上記問題点を解決する無線伝送方式の一つとして、筆者らは符号分割多重(Code division multiplexing: CDM)を用いた無線伝送方式の提案を行ってきた[3]-[4]。なぜなら、CDM 無線伝送方式はこのような遅延のある信号を符号の伝送速度の逆数の時間分解能で分離することができ、分離した信号の位相、振幅を補償し、さらに Rake 合成に代表される最大比合成を行うことも可能である[6][7]。さらに CDM 無線伝送方式は情報信号を符号を用いて拡散させるため、その信号帯域幅も拡散される。この信号帯域幅はドップラー周波数等に比べ十分広く、ドップラー周波数に対する耐性も有する。

図 3 に基本的な CDM 無線伝送方式に対する送信機と受信機の構成を示す。送信側においては、高速の情報信号を直並列変換器によって低速の複数の情報信号に分離する。そして、それら分離された信号を識別するために、符号を重畳して、その後多重化して伝送する。そのため、送信する情報の伝送速度は、この符号の伝送速度に等しくなる。このとき、

この符号を構成する一単位をチップ(chip)といい、そして符号の伝送速度をチップレート(chip rate)と呼ぶ。

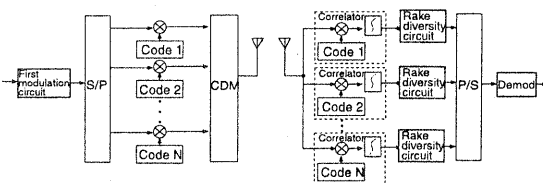


図3 符号分割多重伝送方式の概要図

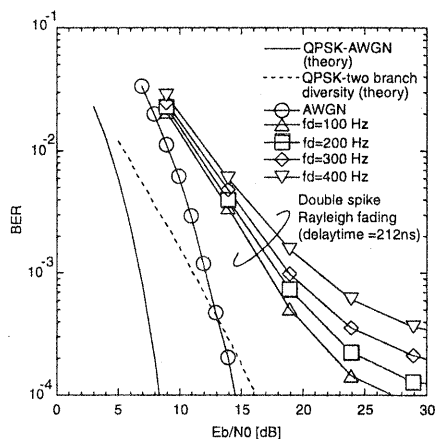


図4 符号分割多重伝送装置の室内実験特性

受信側においては、このチップレートで伝送され、受信された信号と送信側で用いた、符号との間で相関がとられる。このときの相関はチップレートの逆数の時間分解能をもって相関がとられ、マルチパスフェージングに代表される電波伝搬路上での振幅及び、位相変動が高精度に推定できる。また、各並列チャンネルで用いられる符号の自己相関値が符号が同期した点以外で十分小さく、また、各並列チャンネルで用いられる符号間の相互相関値が十分小さい場合は、それぞれ、各マルチパス信号の遅延時間差もチップレートの逆数の時間分解能をもって推定でき、また、その各マルチパス信号それぞれについて、振幅及び位相変動が推定できる。さらに、この推定した各マルチパス信号を最大比合成し、ダイバーシチ効果を得ることができる。

この図 3 に示す CDM 無線伝送方式の提案路車間通信システムに対する有効性を調べるために、本稿では、送信機と受信機のプロトタイプ用意し、図 1 に示すシステムを介して情報信号の伝送を行う。ここで拡散符号として筆者らによって提案および開発された巡回拡張巡回シフト型符号を用いた。この符号の詳細は文献[6][7]に記述されている。この送信機と

受信機は5段の M 系列をベースとした符号を用い、220ns までの遅延波に対してその振幅、および位相を推定し、それらを最大比合成することによって受信することが可能である。このとき符号分割多重数は10チャンネルあり、そのうち1チャンネルはパイロットチャンネルとして電波伝搬特性推定用として用いられる。そして、各チャンネルは一次変調として 512 kbps の QPSK が用いられている。それゆえに全体の伝送ビットレートはパイロットを除いて9チャンネル多重するので 4.608Mbps となる。その他、符号分割多重を行う送信機および受信機に関する情報を表1に示す。そして、AWGN、および2パス等レベルレイリーフェージング環境下における符号分割多重の送信機、および受信機の BER の室内実験特性を図4に示す。ここで2パス等レベルレイリーフェージングとは、212ns 離れた2つの平均電力が等しいレイリーフェージング存在下での特性のことである。図4よりドップラ一周波数が 200 Hz となった場合でもマルチパス環境下で $10e-4$ のオーダの BER 特性を得ることができることが分かる。

表1 符号分割多重伝送方式で用いられるパラメータ

First Modulation	QPSK
Symbol rate / parallel channel	256 ksps
Num. of parallel channels	10 (1pilot +9 traffic channels)
Total transmission bit rate	4.608 Mbps
Spread code	Cyclic extended-and-shifted codes based on five-stage M-sequence [6],[7]
Code length	37 2 guard chips at the top of 5-stage M-sequence 4 guard chips at the bottom of 5-stage M-sequence Cyclic-shift interval : 3
Number of codes	10
Chip rate	9.472 Mchip/s

表2 ITS 実験コースで用いられるパラメータ

RBSs in systems A	Squared-cosecant-type antenna Gain : 14 dBi Circular right-handed polarization Frequency band: 37 GHz Position of the antenna : 5 m high
RBSs in systems B	Horn-based-type antenna Gain: 21 dBi Circular right-handed polarization Frequency band: 37 GHz Position of the antenna : 5 m high
Mobile station	2-elements patch-array antenna Gain: 6 dBi Circular right-handed polarization Position of the antenna : 2.1 m high TX Power: 7 dBm Frequency band: 37 GHz

3 上り回線における伝送特性

3.1 実験コースの概要

提案路車間通信システムの伝送特性の評価を行うために ITS 用実験コースを構築し、野外伝送試験を行った。提案通信システムの下り回線については既に野外伝送試験を行い、車が連続的に移動した場合においてもエラーフリー伝送ができることを示している[3][4]。本稿では、上り回線における伝送試験を行う。図5にその実験コースの概要を示す[8]。図5では上り回線の構成のみを示している。実験コースには6つのRBSが20m間隔ごとに設置されている。そして、車の進入方向に対して近い順にRBS1からRBS6まで番号がつけられている。全てのRBSとCSとの間は同じ長さの光ファイバ(673m)を用いたROF技術により接続されている。そして、MSとRBSとの間は37GHz帯の無線周波数を用いて通信が行われる。RBS1からRBS3までのアンテナとして squired-cosecant タイプのアンテナおよびRBS4からRBS6までのアンテナとして、ホーンアンテナをベースにしたアンテナを用いる。これらのアンテナの外観図および下り回線においてRBSから7dBmの出力で送信した場合の受信電力は図5に示されている。そして、このアンテナを同じくするRBS1からRBS3までをシステムAおよびRBS4からRBS6までをシステムBと呼ぶ。そして、本伝送試験においてはMSにおいて信号を発生させ、RBSを介してCSに伝送する上り回線の評価するものとする。このときCSはMSで送信された信号を複数の物理的に離れたRBSに設置されたアンテナから受信することになる。そして本実験コースにおいて20mの各RBSが作るセルを6つあわせて約120mの仮想セルラーゾーンを作っていることになる。

また、図5の中にはMSとして用いる測定車も示している。測定車には一つの送信アンテナ2.1mの高さに設置されている。その他のRBS及びMSに関する情報は表2にまとめている。また、RBSとCSとの間は2種類のROF技術を用いて接続されている。システムAに対しては図2と同様でRBSにおいて受信された37GHz帯の無線信号とElectroabsorption (EA)型[9]の外部変調器を用いてレーザからの光信号を変調し、その後、CSの方に伝送している。一方、システムBについてはRBSにおいて、MSからの37GHz帯の送信信号を5.8GHz帯の中間周波数帯にダウンコンバートし、その信号をLiNbO3型の外部変調器を用いてレーザからの信号を変調し、その後CSに伝送し、その後CSで復調されている。RBSにおいてダウンコンバートするための信号源は下り回線の情報と一緒にCSから下り回線を通して、各RBSに供給される。

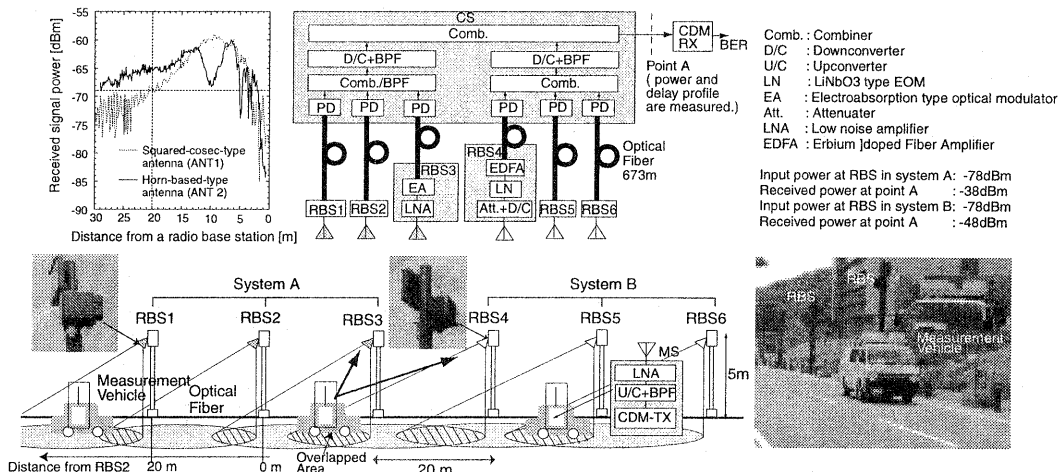


図5 ITS実験コースの概要

3.2 CDM無線伝送方式による伝送特性

2.2 節に示した既提案の CDM 無線伝送方式を ITS 実験コースでの上り回線の変復調方式として用いた場合の伝送特性を図6及び7に示す。ここで送信機は MS に装備し符号分割多重信号を生成させ、それを、6つの RBS を介して、CS で受信し、そのときの伝送ビット誤り特性を測定している。測定車の平均時速として時速 4km (図 6) と時速 20km (図 7) の 2 種類を用いた。伝送方式の評価として、送信側で誤り訂正符号を用いず伝送を行う場合 (図 6(a), 図 7 (a)) と送信側で誤り訂正符号を用いて伝送を行う場合 (図 6(b), 図 7 (b)) の 2 種類について評価を行った。誤り訂正符号としては、符号化率 1/2、拘束長 7 の畳み込み符号、および硬判定ビタビ復号を用いている。また、誤り率データは 16ms ごとに取得される。つまり時速 20km で測定車が走行する場合、誤り率データは 8.8cm ごとに取得される。この最小の測定距離を観測点(Observation point)という。今回、符号分割多重伝送装置の伝送レートは 4.608Mbps であるため、16ms の間には 73728 ビットの伝送が可能である。すなわち、16ms の間で 1 つデータが誤った場合、その瞬時誤り率は $10e^{-5}$ のオーダーになることが分かる。また、図 6 には CDM 無線伝送装置への信号入力レベル (図5のA地点におけるレベル) と CDM 無線伝送装置のパイロットチャネルを利用した図5のA地点における受信信号の遅延プロファイル特性 (時間分解能 26 ns / 各時間ポイント当たり) も Observation point 毎に示している。さらにまた図6及び7にはそれぞれ RBS1 から RBS6 の位置を示している。

図 6(a), (b) の CDM 無線伝送装置への信号入力レベルを示すグラフより、システム A (RBS1 から RBS3) で受信される電力はシステム B で受信される電力に比べ約 10 から 13dBm 高い。これは、システ

ム B のアンテナゲインがシステム A に比べ約 7dB 高いため、光素子 RBS における過入力を防ぐために 20dB のアッテネータを挿入し、結果としてシステム B から CDM 無線伝送装置への信号入力レベルが低くなっているためである。このアンテナ入力電力と、CDM 無線伝送装置への信号入力レベルとの関係の例は図 5 に示している。CDM 無線伝送装置への信号入力レベルが低い場合はデータ誤りが発生する可能性がある。

また、図 6(a), (b) の受信信号の遅延プロファイル特性を示すグラフより、システム B の RBS が信号を受信する時間がシステム A と比べて 5 ポイント (時間換算で 130ns 程度) 遅れている。この理由は、RBS と CS の光ファイバの長さは 673m と等しいが、システム B は受信した信号を光で変調後 27m から 30m の光ファイバを用いた光ファイバアンプ (EDFA) を用いて増幅している。その結果、その分の遅延時間が生じるためである。また、図より MS がシステム A およびシステム B の中のみを走行中は受信信号の分散時間はほぼ 2 ポイント (52ns) 程度であることが分かる。これは無線の自由空間伝搬距離に換算すると約 16m となることから、一つの MS から送信された信号は最大でも最も近い基地局とその次に近い局までしか伝搬伝搬しないことが分かる。また、その 2 つの基地局を経由して CS で受信した信号間の時間差が最も大きいのは RBS3 付近に MS が存在する場合で、このとき MS より送信された信号は RBS3 と RBS4 で受信され、CS に伝送される。この 2 つの信号の CS までの時間差は、MS が RBS の直下で路側ぎりぎりにいる場合、RBS3 及び RBS4 までの距離差は RBS 間の距離が 20m、RBS と MS のアンテナの高さの差が約 3m であることから約 17m (約 56ns の自由空間伝搬時間に相当) と RBS3 から CS まで及び RBS4 から CS までの距離は光ファイバアンプによる遅延差が 27m-30m (遅延時間差 150ns に相当) より、約 200ns の時間

差(8ポイント分)となる。今回用いたCDM無線伝送装置は前章より約 220ns 以内の遅延波に対して耐性が高い。アンテナ側に設置されているので、路側からの MS の距離によっては、CS で受信される信号の信号時間差がこの許容値を超える可能性がある。また、システムAおよびシステムBの中を走行している間は、遅延時間が少ないが、CDM伝送方式の遅延波分解能が少ない場合は、それらが分離、合成できず、複数の基地局から受信した同一信号がそれぞれ干渉することになる。したがって干渉の影響により受信信号レベルが低下し誤りが生じる可能性がある。

図 6(a)のデータ誤り率より、MS が図1のオーバーラップゾーンにいる場合、誤りが生じている。これは、システムAにMSがいる場合は、複数の基地局で受信した信号の遅延時間差が少ないため、マルチパスを分離できず干渉波となり、結果誤りが生じ、システムBにいる場合は、CDM無線伝送装置に入力される信号電力が低いいため誤りが生じる。また、システムAとBの境界にMSがいる場合は、光ファイバアンプによる遅延差がさらに加わり、誤り率が多くなる。

しかし、誤りの数が少ないところでは、誤り訂正符号を使うとエラーフリー伝送ができることが図 6(b)より分かる。しかし、システムBのRBS間の境界ではCDM無線伝送装置への入力が高いため誤りが残っている。また、時速20kmで走行した場合においても図7に示すとおり、同じ傾向が現れている。したがって、受信する無線装置に対する信号レベルを十分確保し、誤り訂正を効率よく使うことによって、上り回線においてもミリ波連続エラーフリー通信は十分可能になる。

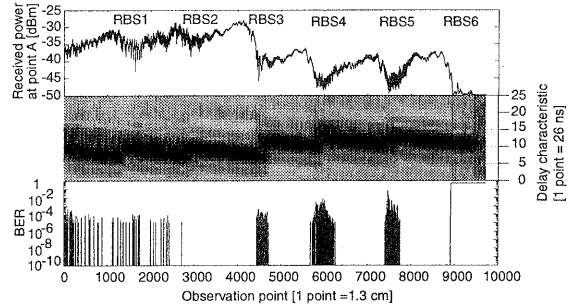
4 おわりに

本稿では、符号分割多重無線伝送方式と光ファイバ無線伝送技術を用いたミリ波路車間通信システムにおいて、上り回線でも 4.608Mbps 連続通信がエラーフリーで可能であることを 37 GHz 帯での ITS 用の専用実験設備を用いることによって実証した。光ファイバアンプ等、光ファイバを利用して増幅するものはデータ伝送遅延が生じ、場合によっては、システムの許容量以上の遅延波を発生させる可能性もあるため素子の特性を勘案して、システムを構築する必要がある。今後は、マイクロ波帯に対する提案システムの導入も検討していく予定である。

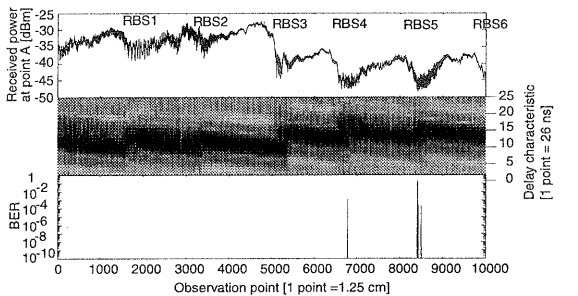
参考文献

- [1] R.Fukui, Proc. 5th World Congress of Intelligent Transport Systems, Oct. 1998.
- [2] M.Fujise et. al., Wireless Communication Rechnologies, chapter8, Kluwer academic publishers, 2000.
- [3] H.Harada et.al., Proc. The 1st workshop on ITS Telecommunications, pp.155-160, Oct. 2000.
- [4] 原田他,電子情報通信学会技術報告, ITS2000-39,pp.25-30,Nov 2000.
- [5] 原田他,電子情報通信学会技術報告, ITS2000-10,pp.55-62,May 2000.

- [6] H.Harada, Proc. IEEE VTC'99 Spring, pp.1819-1825, May, 1999.
- [7] H.Harada et.al., Proc. IEEE ICC'97, pp.929-923, Jun.1997.
- [8] 藤瀬他, 2000年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会, SA-7-5, Sept. 2000.
- [9] N.Mineo et. al., 電子情報通信学会技術報告, LQE97-119, Nov. 1997.

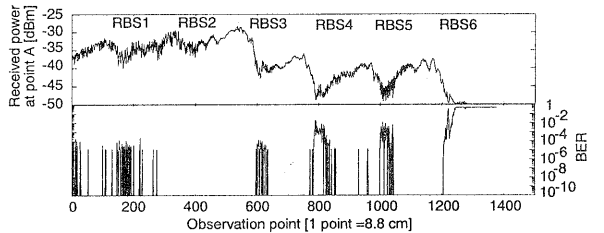


(a) 誤り訂正符号を用いない場合

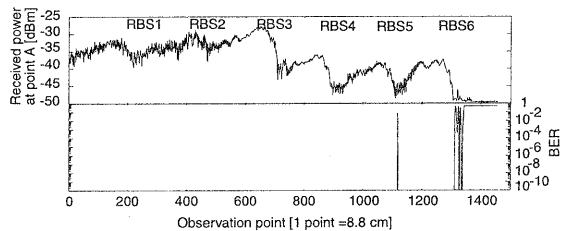


(b) 誤り訂正符号を用いる場合

図6 平均時速4kmの場合の提案システムの伝送特性



(a) 誤り訂正符号を用いない場合



(b) 誤り訂正符号を用いる場合

図7 平均時速20kmの場合の提案システムの伝送特性