

3-4-2 ミリ波路車間通信技術

3-4-2 Technologies of Millimeter-wave Road-vehicle Communications

佐藤勝善 原田博司 児島史秀 藤瀬雅行

Katsuyoshi SATO, Hiroshi HARADA, Fumihide KOJIMA, and Masayuki FUJISE

要旨

ミリ波帯を用いた路車間通信技術について、特にマルチモードサービスや大容量伝送を可能にする ROF 技術を用いた路車間通信技術について、ソフトウェア無線技術とともに当所の開発状況を報告する。現在、36GHz 帯を用いて ETC, PHS, BS を同時にサービスできる ROF 路車間通信システムを実現しているが、その概要、課題について述べるとともに、マルチモードサービスの実現に当たって重要なソフトウェア無線技術と、ソフトウェアラジオ車載端末の紹介を行う。また、YRP 共同研究グループにおける活動についても述べる。

In recent years interest in ITS (Intelligent Transport Systems) technology has been growing, because it is thought that ITS can solve problems such as traffic jams and traffic accidents. Communication between roadside base stations and vehicles is a critical element of an ITS. In this paper, we describe the road-vehicle communication (RVC) system using ROF technology and software radio. These systems can realize multimode service and high speed data transmission. We developed RVC system using ROF technology which can transmit three kind of services (ETC, PHS, BS) simultaneously. The software radio with small size for mobile terminal is also developed. The overview of these systems is shown. In addition, activities of YRP (Yokosuka Research Park) ITS Joint Research Group are shown.

[キーワード]

路車間通信, ミリ波, ROF, ソフトウェア無線, 電波伝搬
road-vehicle communications, millimeter wave, Radio on Fiber, software radio, propagation

1 はじめに

現在の道路交通の高度化、複雑化に対応するため ITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム) の実現が期待されている。ITS のメリットは安全、効率化、環境問題などに及び、非常に広範である。例えば、ITS に期待される効果の代表的な例として渋滞の解消が挙げられるが、これは道路交通の効率化にとどまらず燃料消費効率の上昇をもたらす、エネルギー問題の緩和につながる。このような ITS を実現するに当たり無線通信技術はその根幹をなすものであるが、そのなかでも、路側のインフラと車側のユーザを結ぶ路車間通信の果たす役割は非

常に大きい。路車間通信の例としては、既に ETC (Electric Toll Collection: 料金自動収受) や VICS (Vehicle Information and Communication System: 道路交通情報通信システム) などが実用化されているが、今後サービスの多様化、DSRC の発展を想定した場合、大容量伝送、マルチサービスの実現が望ましい。このような背景から通信総合研究所では、ROF 技術を用いた路車間通信技術の実用化へ向けた研究を続けている。本報告では、当研究所におけるミリ波帯 ROF 路車間通信の研究について述べる。

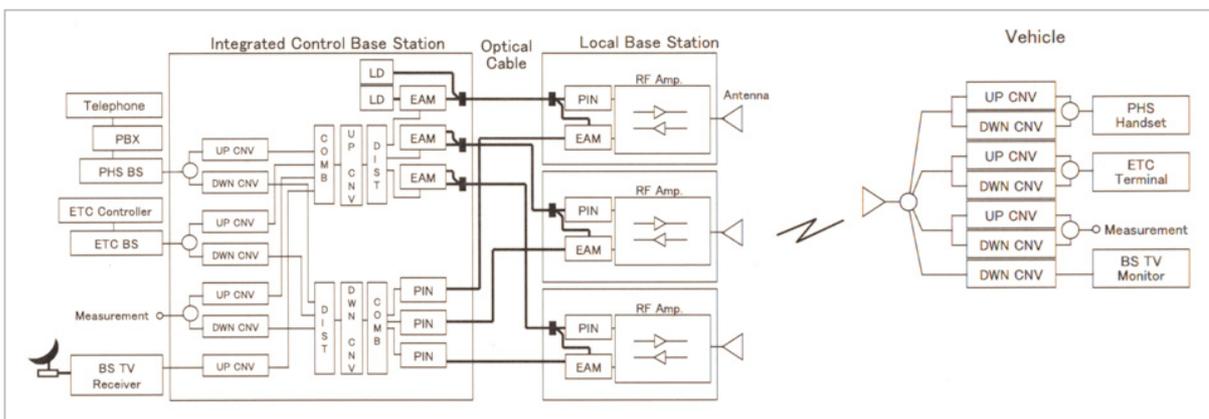


図3 36 ~ 37GHz 帯 ROF マルチサービス実験システムの構成

波数利用効率の向上に結びつけることができる。また、新しい通信方式による通信システムの開発、運用に際し、新たなハードウェアを開発することなく、ソフトウェア開発のみで早期に立ち上げることができる等のメリットもあり、更に、産業廃棄物等の減少といった環境的な側面まで包含することも可能です。すべての観点からみて「人間に優しい」システムが構築できる。そして、通信総合研究所においてもこのフレキシブルなシステムの効率的な実現に向けて様々な検討を1997年より本格的に検討を行っている。

3 36 GHz 帯 ROF 路車間通信システム

3.1 36 GHz 帯 ROF 路車間通信システム

ROF 路車間通信の大容量伝送の特徴を活かすには、無線区間に広帯域の確保が可能なミリ波帯の利用が有効であると考えられる。このような観点から、伝送帯域を広く確保できるミリ波帯を利用した ROF 路車間通信システムの開発を行った。図3にその基本構成の一部を示す。このように本設備は、ITS サービスとして ETC (Electronic Toll Collection) 無線通信サービスとして PHS (Personal Handyphone Systems) 放送サービスとして BS (衛星放送) を提供可能な構成となっている。本実験設備は制御基地局、光ファイバ区間、局地基地局、無線区間、車載装置から構成されている。制御基地局は YRP (横須賀リサーチパーク) 実験室に設置し、局地基地局は YRP 内の公道約 240m の実験コースに設置されている。局地基地局の間隔は 20m であり、現



図4 統合基地局、局地基地局、移動局

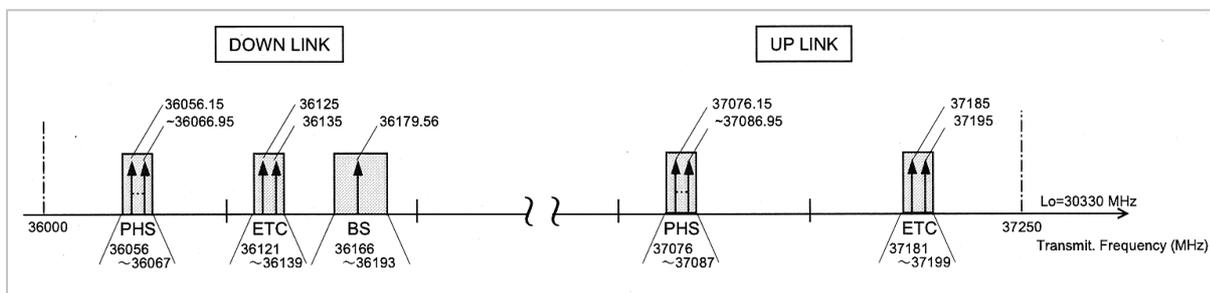


図5 共用周波数帯における周波数配置

在 10 台の局地基地局を設置している。図 4 に局地基地局、移動局の外観を示す。本実験システムでは、既存の無線サービスの RF 信号をミリ波帯の周波数に変換し、局地基地局と車両間の無線区間の一元化を図っている。このような通信形態では、車載装置のアンテナや RF 装置を複数サービスに共用でき、大幅に簡素化できる利点がある。図 5 に、共用周波数帯における複数無線サービスの周波数配置を示す。実験用共用周波数帯として、上りは 36.00 ~ 36.50GHz、下りは 36.75 ~ 37.25GHz のそれぞれ 500MHz を確保している。前述したように本実験システムでは、ETC、PHS、BS を同時に提供可能である。制御基地局でこれらのサービスの周波数変換を行い、統合された 36GHz 帯の無線信号で、光にアナログの強度変調を施す。無線区間でミリ波帯の共用周波数帯に統合された複数サービスの無線信号を得る方法として、制御局でミリ波帯に変換統合して光に載せて光ファイバ伝送する方法と、光ファイバ伝送区間ではそれぞれのサービスの RF 信号あるいは中間周波数帯に変換統合された信号を伝送し、局地基地局でミリ波帯に周波数変換する方法がある。本実験システムでは、これらの両者の実験が可能な構成となっている。車載装置の構成としては、受信 RF 信号をそれぞれのサービスの元の周波数に変換し既存の端末を利用できる構成となっている。

3.2 次歪の影響

本システムの実現に際し大きな問題となるのは、3 次歪みによる影響である。統合基地局において PHS、ETC 及び BS 衛星放送の 3 種類のサービス信号が 5.8GHz 帯で統合され、光変調された後に光ファイバ伝送路を通じて局地基地局に伝送されるが、その際途中のアンプ等の歪みの

影響によりサービス信号帯域内にノイズが発生することがある。例として、図 6 に無線のダウンリンクにおける各サービス信号の周波数配置と、予想される 3 次歪の発生箇所を示す。3 次歪には 3 信号によって生じる Three - Tone タイプのもの(図 6 中の A)と、2 信号によって生じる Two - Tone タイプのもの(B, C, D)が考えられるが、いずれの 3 次歪も図 2 に見られるようにサービス信号の帯域内でも発生する可能性があり、その場合には D/U 比の劣化による各サービス信号の特性劣化の原因となるものである。

図 7 に無線のダウンリンクにおける各サービス信号と、3 次歪のスペクトルを示す。図では ETC 信号と BS 信号による 3 次歪(IM3)の一部が PHS 信号の帯域内に発生しており、PHS サービスの劣化が予想されたが、統合サービス信号の無線伝搬路における減衰等を考慮し、同様の検討を行った結果、3 次歪による特性の劣化は十分小さいことを確認した。

3.3 ROF 路車間通信におけるミリ波伝搬

既に述べたように本システムは空間伝送部分に 37GHz 帯のミリ波を用いている。ミリ波帯は、その広帯域性から大容量の通信を行う可能性を有しているが、その一方、極めて高い周波数であるため伝搬に関わる解決すべき問題を多く抱えている。例えば、ミリ波は伝搬損が大きいため遠距離の通信には必ずしも適さない。大きな伝搬損は周波数利用効率という観点で見れば利点とみなすこともできるが、比較的広い指向性のアンテナを使用する場合には、通信方式等にもよるが数十メートル程度のサービスエリアを確保するのが限界である。また、遮蔽による効果が非常に大きく大型車のような遮蔽体が伝搬路を遮った場合には通信が極めて困難であると

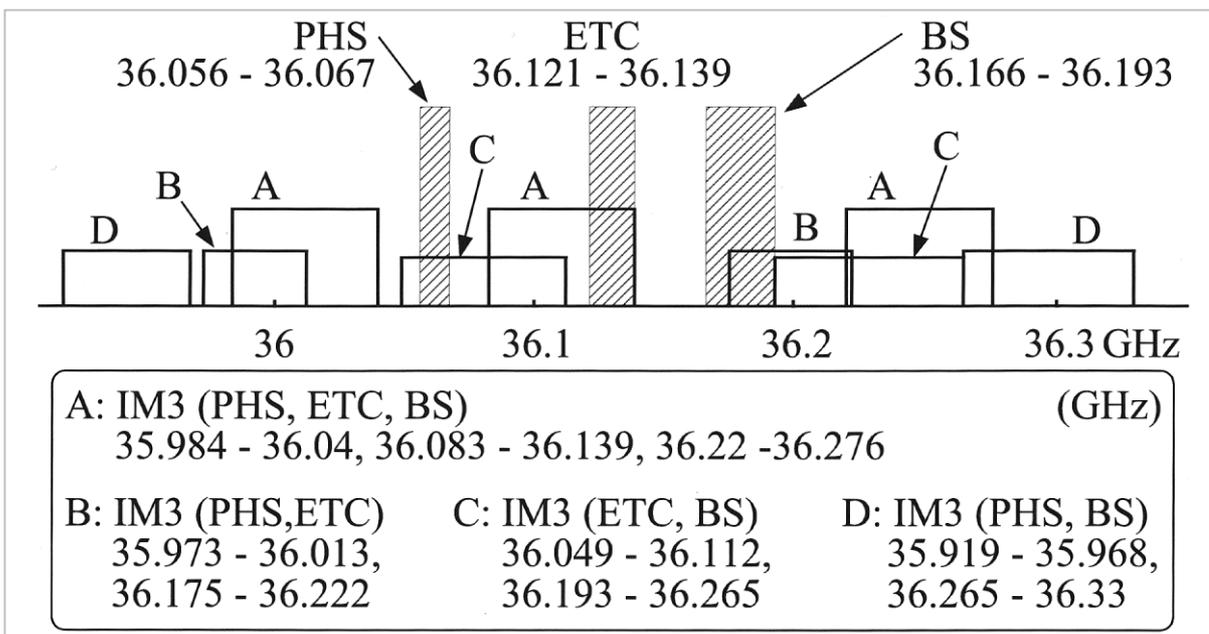


図6 3次歪の発生箇所

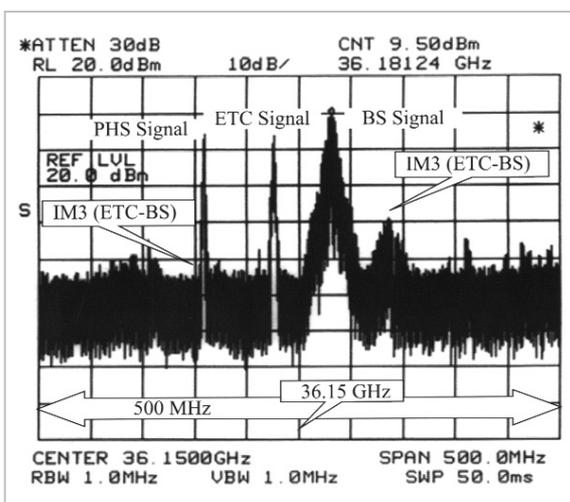


図7 信号と3次歪のスペクトル

ともに、雨滴の影響を受けやすいという問題もある。路車間通信に応用する場合について考えれば、基地局と端末局の相対速度は大きくなり、ドップラーシフトの影響も無視できない。

しかしながら、その広帯域性は大きな利点である。特にROF路車間通信においては大容量の伝送が求められており、そのような意味でも本システムの実現にはミリ波の伝搬部分の問題解決が必須である。特にROF技術を用いた本システムでは干渉が大きな問題となる。ROFシステムでは一つの統合基地局につながれた複数の局地基地局から同じ周波数のミリ波を放射すれば

システムをシンプルにすることができるとともに、一つの局地基地局のサービスエリアは小さくとも、共通の統合基地局につながれた隣接する局地基地局のサービスエリアを連続する仮想的なエリアとみなすことができるようになる。しかし、この場合、各局地基地局サービスエリア境界付近では激しい干渉が避けられない。

図8に受信電力の測定例を示す。ここで基地局のアンテナはコセカント2乗パターンのものを使っており、通常のホーンアンテナと比較するとサービスエリア内のダイナミックレンジは小さくなっている。各局地基地局サービスエリアの境界付近では大きなレベル変動が見られる。この領域における電界変動をより詳細にみると(図9)、周期が波長の数倍程度の非常に細かい干渉パターンがみられる。場所によっては20dB程度の変動が測定される。このように、仮想的に大きなサービスエリアとみなすには何らかの対策が必要である。

ここでは、その一つとしてダイバーシティによる方法をあげておく。非常に干渉の変動周期が小さいためと、広い帯域で周波数特性をあまり持たない方法として、偏波を用いたダイバーシティについて検討を行っている。図10に、隣り合う基地局の偏波を右旋円偏波、左旋円偏波と異なるものを用いた場合のサービスエリア境

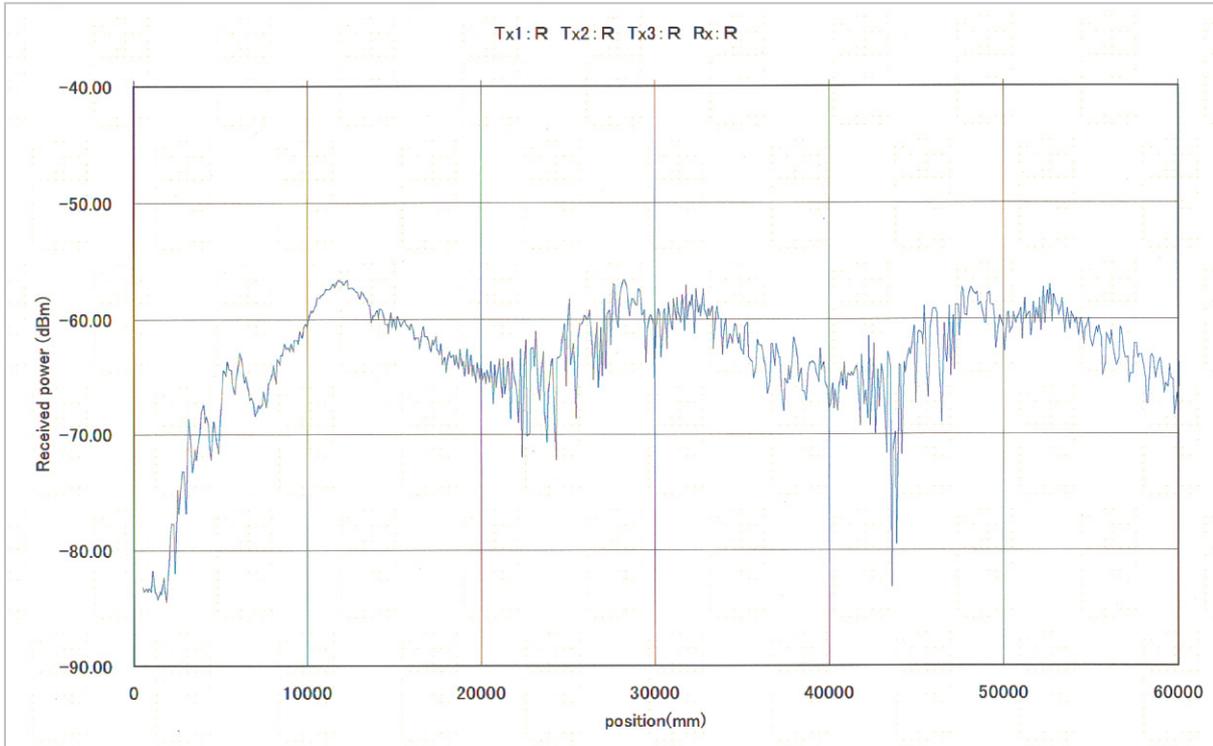


図8 受信電力の測定値 基地局の位置は0, 20, 40m

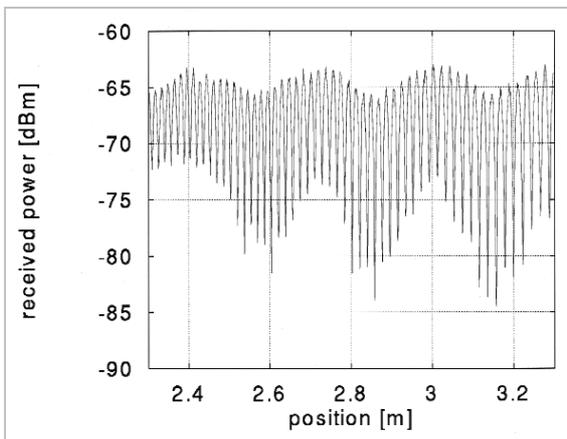


図9 サービスエリア境界付近での受信電力 隣り合う基地局の偏波を同旋回の円偏波とした場合

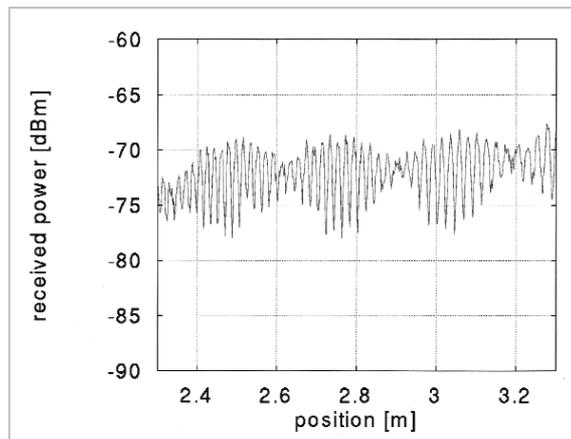


図10 サービスエリア付近での受信電力 隣り合う基地局の偏波を互いに逆旋回の円偏波とした場合

界付近での受信電力変動を示す。図10に見られるように、同じ偏波を用いた場合に比べ振動の振幅は小さくなっていることが確認できる。アンテナ軸比の改善等まだ解決を要する部分はあるが、有力な方法といえる。

4 ソフトウェアラジオ車載端末

「ソフトウェア無線技術」をITSに適用する場合、ITS環境独特の状態を検討する必要がある。

それは時間によって、複数のサービスを同時に享受したいという要求がでてくる可能性があるということである。すなわち、今後は、マルチモード通信のみならず同時に複数ものサービスが必要となるマルチプロセス無線通信システムを実現しなければならない。通信総合研究所ではこれを実現するためにマルチモード・マルチプロセスソフトウェア無線通信(Multi-mode Multi-process Software Radio : MMSR)技術を提案し、検討を行ってきた。その成果として高能

率化された MMSR 通信技術を用いた車載用小型端末装置の試作を行った。図 11 に試作装置の外観図を示す。また、表 1 にシステムの諸元を示す。

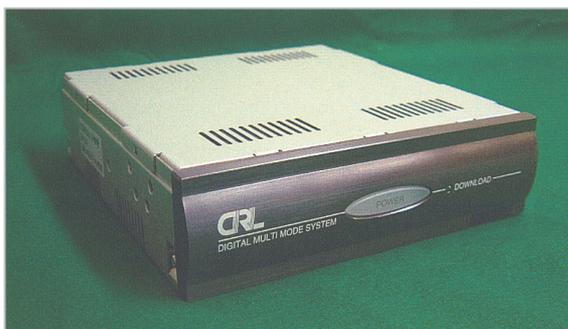


図 11 ソフトウェアラジオ車載端末の外観図

当該小型ソフトウェア無線端末は GPS、VICS、ETC、AM、FM ラジオ、FM 文字多重放送のサービス及び BPSK、QPSK、GMSK、ASK、 $\pi/4$ QPSK 等の任意の変復調処理機能が幅 17.5 cm、奥行き 19.0 cm、高さ 5 cm の小型ソフトウェア無線技術を用いて実現可能である。これらのサービスは高度道路交通システムでの適用を考慮し同時運用が可能である。また、当該装置のソフトウェア無線信号処理部は二つの 200 万ゲートの FPGA のみで作成し、端末は電圧 12V、電流 2 ~ 3A の電源で動作する。また、ソフトウェアは、有線のみならず、無線回線からもダウンロード可能である。

図 12 に当該小型ソフトウェア無線端末のシステム構成図を示す。この端末のデジタル信号処理部は主に二つの FPGA と一つの制御用 CPU によって実現されている。FPGA に対するソフト

ウェア及び PCSR を実現するための差分情報はイーサネットケーブルで接続された一つの PC 内に格納されており、適宜、FPGA にダウンロードされる。RF 及び IF ユニットに関しては、ETC と GPS のものはこの端末の外部より供給される。VICS と FM、AM ラジオの RF 及び IF ユニットのみがこの端末の中に設置されている。

二つの FPGA のうち一つの FPGA の中には、PCSR 技術を用いた変復調信号処理部がダウンロードされる。この変復調信号処理部は PCSR 技術を用いているため、パラメータのみで BPSK、QPSK、GMSK、ASK、及び $\pi/4$ QPSK の各種変調方式を実現可能である。このとき、パラメータとして、システムのクロック周波数、用いる変調方式、送信機及び受信機に対する波形整形フィルタの計数、直交変調器及び復調器に対する局部発信周波数、送信機と受信機のデータクロック周波数、クロック再生の際に用いるループフィルタの係数及びデータ復調のためのしきい値レベルが入力される。

当該試作装置を評価する方法として、各システムを実現する上でのソフトウェアの容量及びソフトウェアのダウンロード時間を表 2 及び表 3 に示す。本装置は、図 11 より分かるように、ETC 及び USER モードを用いる場合は、FPGA 1、そして、それ以外のシステムを利用する場合は FPGA 2 を用いる。ダウンロードする通信サービスの数及び FPGA の使用量によらず、FPGA 1 及び 2 を用いる場合は、それぞれ 1241 kbyte のソフトウェアをダウンロードする必要性がある。一つの FPGA にダウンロードする時間

表 1 システム諸元

Service	CPS, VICS, ETC, Broadcasting (AM, FM), FM Multiple service, User mode (BPSK, QPSK, GMSK, ASK, $\pi/4$ QPSK)
RF frequency band	5.8GHz, 1.5GHz, 76-100MHz, 0.5-1.6MHz
IF frequency band	70kHz-5MHz
Configuration	2FPGAs (2million gates x2) + PCSR and MMSR technologies
Maximum number of simultaneous services	5 (variable)
AD Conversion	IF over-sampling 20Msps, 10bit
Software download	Ethernet VICS radio channel (broadcasting-type) ETC radio channel (communication-type)

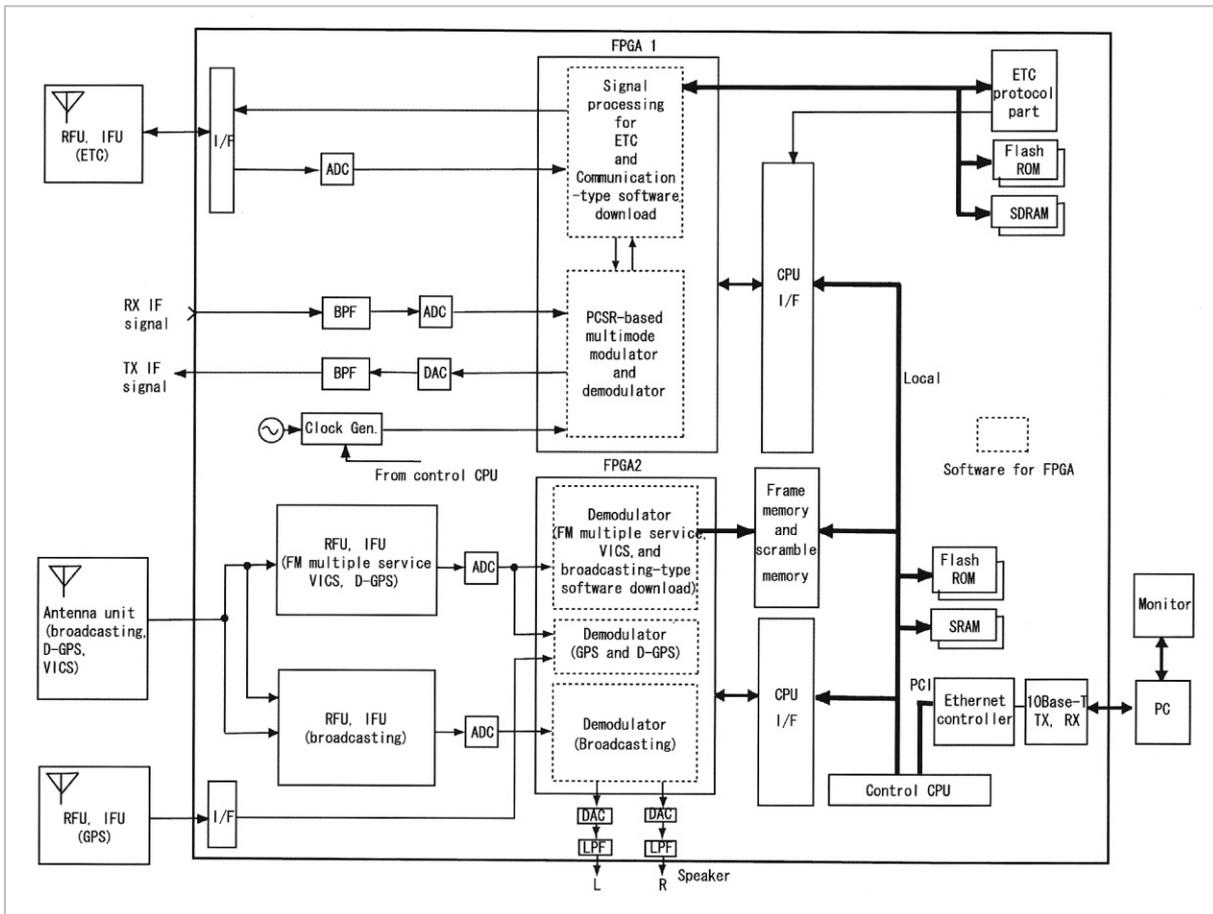


図 12 システム構成図

表 2 ソフトウェア容量

Service	Time (byte)	Service	Time (byte)
ETC	1241k	GPS	1241k
FM Multiple	1241k	Broadcasting	1241k
VICS	1241k	Download	1241k
USER mode (full download)	1241k	/4QPSK (parameter)	1.73k
ASK (parameter)	1.73k	BPSK (parameter)	1.73k
QPSK (parameter)	1.73k	GMSK (parameter)	1.73k

表 3 ソフトウェアダウンロード時間

Service	time	Service	time
1.ETC	8380ms	4.VICS	8260ms
2.FM Multiple	8260ms	5.GPS	8750ms
3.Broadcasting	8260ms	6.Download	16650ms
1+2	16620ms	1+2+3	16620ms
1+2+3+4	16640ms	1+2+3+4+5	16650ms
USER mode (full download)	8380ms	/4QPSK (parameter)	less than 1ms
ASK (parameter)	less than 1ms	BPSK (parameter)	
QPSK (parameter)	less than 1ms	GMSK (parameter)	

は表3よりおおむね8秒であるため、最大でも16秒以内ですべてのソフトウェアの変更が終了する。

また、機能検証用試作装置と同様に、USERモードを用いて、フルダウンロードでシステムの変更を行った場合と差分情報のみで変更を行った場合のダウンロードソフトウェアの容量比較及びダウンロードに要する時間の比較を行った。その結果も表2及び表3に示す。上表より、差分情報駆動型ソフトウェア無線通信技術を用いることにより、ダウンロードすべきソフトウェアの容量は、約1/1000及びコンフィグレーション時間は1/8000程度に減少される。また、機能検証用試作装置と同様に、差分情報駆動型ソフトウェア無線通信技術を用いることにより、変復調方式を各種変化させてもダウンロードに要する時間はほとんど変わらない。これは変調方式変更時の情報がシステム間の差分の情報のみでありあまりその量が変わらないためである。

5 マルチメディアレーン・マルチメディアステーション

ROF 路車間通信システムを具現化するに当たり、基地局設備をはじめとする各設備を導入し、インフラを充実させるにはある程度の時間を要する。すなわち初期のうちは主要道路等のごく一部の地域のみでインフラの実装が完了した状況が考えられ、一部地域のみでサービスが行われる形態が予想される。すなわち、自動車が走行中に長時間にわたり連続的にRVCサービスを受ける状況は考えにくく、実際のサービスエリアは行程のうちの一部であるか、あるいは不連続な区間であると考えることが妥当である。結果として、システムの提供するサービス内容もこのことによる制限を受けると予想され、初期段階におけるサービス形態としては、リアルタイム性を重視しないメディアによる大容量一括ダウンロードの形態が考えられる。

このような大容量一括伝送サービスを提供するITS路車間通信インフラとして、マルチメディアレーンとマルチメディアステーションの概念を提案する。マルチメディアレーンとマルチメディアステーションはいずれも大容量一括伝

送サービスを前提とした局地的な設備であり、設置されたROF局地基地局より自動車に対して情報ダウンロードを行う。このうち一回の情報ダウンロードに対して一つの局地基地局を使用するものをマルチメディアステーションと定義し、複数の局地基地局の使用を前提とするものをマルチメディアレーンと定義する。これらのシステム概要を表4に示す。定義上、マルチメディアレーンでは情報ダウンロード中の自動車の移動は前提となり、主な適用としては通常車線や側道などが考えられる。対してマルチメディアステーションの場合には、利用する自動車の移動速度に関して前提条件はない。しかしながら、自動車が一つの局地基地局からダウンロードできる情報量は移動速度に応じて少なくなる。このことから大容量情報を得るための実際の利用形態としては、駐車場などに設置された局地基地局からの、停止状態における情報ダウンロードが主流になると考えられる。

表4 システム概要

マルチメディアレーン	
定義	連続する複数の局地基地局を用いて情報ダウンロード。
自動車	情報ダウンロード中は自動車の移動が前提。
主な適用	通常車線, 側道
マルチメディアステーション	
定義	ひとつの局地基地局を用いて情報ダウンロード。
自動車	情報ダウンロード中の車速に前提なし。停止が主流か。
主な適用	駐車場

マルチメディアレーンのシステムモデルを図13に示す。マルチメディアレーンは路側に設置された複数の局地基地局と入口ゲートによって構成される。サービスのダウンロードを希望する自動車の到来をゲートが受け付け、局地基地局によるサービスデータの送信を行う。自動車は複数の局地基地局セルを通過しながらデータをダウンロードする。ここで、本稿では自動車がデータのダウンロードに用いる連続セルにはすべて同一の周波数チャンネルを割り当て、自動車端末側によるハンドオーバーの制御を軽減する

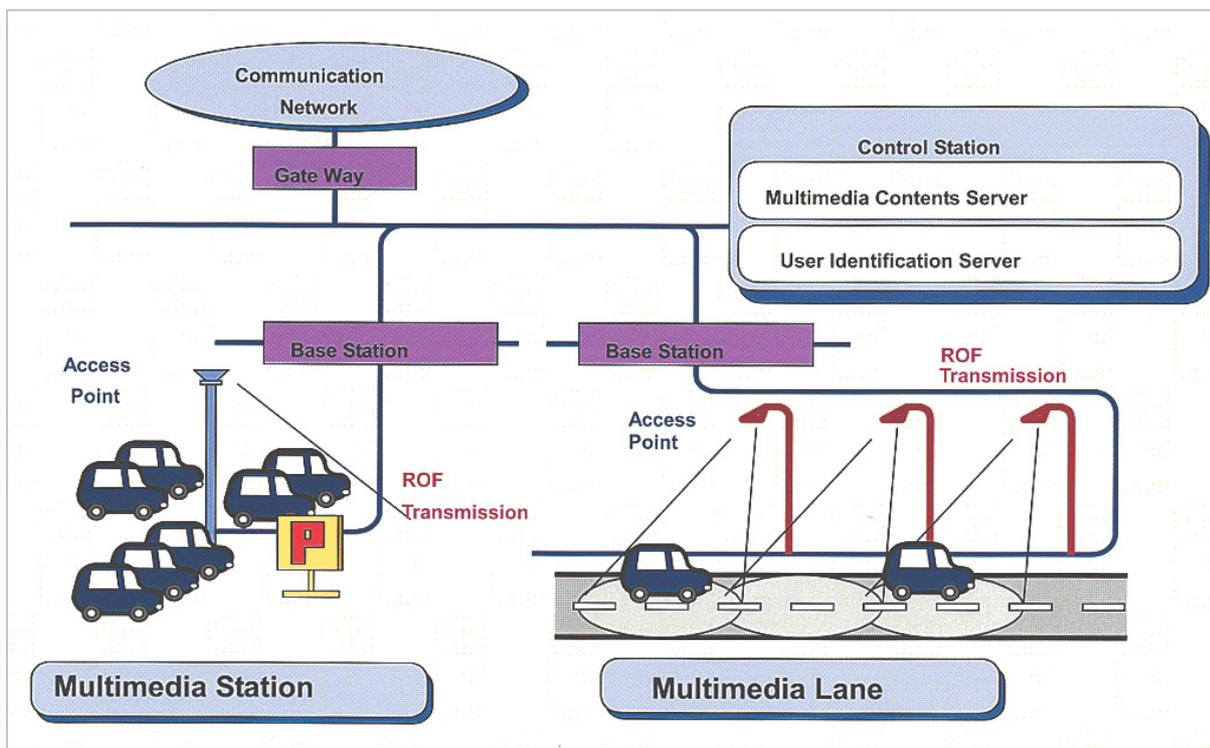


図 13 マルチメディアレーン、マルチメディアステーションのシステムモデル

ことを前提としている。

マルチメディアステーションのシステムモデルを図13に示す。マルチメディアステーションは、一回の情報ダウンロードに要する局地基地局が一つである点を除いては、構成上はほぼマルチメディアレーンと同じであり、局地基地局単位で自動車の到来を受け付ける設備が存在する。

6 YRP ITS 共同研究グループ

横須賀リサーチパーク(YRP)では、平成10年度よりITS情報通信に関する研究開発を通信総合研究所及び民間企業により共同研究グループを形成し行っており、ITS共同研究グループは車車間通信、路車間通信、それぞれの分科会に分かれて活動している。

路車間通信共同研究分科会はROF技術を用いた路車間通信技術に関する、標準化に資する成果を得ることを目的として活動している。分科会は伝搬SWG、高速無線伝送SWG、マルチサービスSWGの三つのサブワーキンググループから成っており、グループごとに実験・机上検討が活発に行われている。

7 おわりに

ミリ波帯を用いたROF路車間通信の実現に必要な技術的要件、当所にて開発しているミリ波ROF路車間通信実験施設について述べた。ミリ波ROF路車間通信は非常に幅広い技術の集合体である。現在、より多様なアプリケーションを伝送可能にすることと、マルチメディアステーションについての標準化に資する技術項目の検討を行っている。ミリ波ROF路車間通信システムは非常に多くの先端技術の集合体であり、実用化するには多くの技術的課題を解決していかなくてはならない。一つは、同一周波数帯に多数のアプリケーションを収納することによる問題点の解決(IM3等)、もう一つはミリ波を使うことによる問題点である(伝搬、デバイス)。これらの要素を着実に解決していく。今後、伝送可能なサービスを増やしていくとともに、車車間通信との融合を行い、統合的な路車、車車間通信を行う予定である。

参考文献

- 1 藤瀬, 原田, "Radio on Fiber 路車間マルチモード通信の一形態について", 1998年電子情報通信学会ソサイエティ大会 SAD-2-8.
- 2 藤瀬 他, "ROFによるITSマルチサービス路車間通信実験システム(1)", 2000年信学会総合大会
- 3 Y. Ebine, "Development of fiber-radio systems for cellular mobile communications" proc. of MWP'99, pp.249 ~ 252.
- 4 T. Kuri, K. Kitayama, A. Stohr, and Y. Ogawa, "Fiber-optic Millimeter-wave downlink system using 60GHz-band external modulation", J. Lightwave Technology., Vol.17, No.5, pp.799~806, May 1999.
- 5 児島, 藤瀬 他, "ITS路車間通信におけるマルチメディア・レーン & ステーションの提案", 電子情報通信学会ITS研究会, 2000.2.
- 6 原田, 神尾, 藤瀬, "高度道路交通システムにおけるマルチモード・マルチサービスソフトウェア無線通信システム", 信学会ソフトウェア無線時限研究会, SR99-21, 1999.11.
- 7 原田, 峯尾, 藤瀬, "IM/DD デジタル光通信網を利用した光無線融合通信システムの実現可能性に関する一検討", 1999年電子情報通信学会総合大会 B-5-258, 1999.3.
- 8 F. Kojima, K. Sato, and M. Fujise, "Evaluation of Intermodulation Distortion for ROF-Based Multimode Road-Vehicle Communication System."
- 9 K. Sato, F. Kojima, M. Fujise, "Measurements of Propagation in a Millimeter-Wave ROF Road-Vehicle Communication System" proc. of WPMC'00.



佐藤勝善

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター無線伝送グループ主任研究員電波伝搬



原田博司

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター無線伝送グループ主任研究員博士(工学) 移動通信方式及びシステム



児島史秀

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター無線伝送グループ研究員 博士(工学) 通信方式



藤瀬雅行

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター無線伝送グループリーダー 工学博士 光ファイバ通信、無線通信