

特集 ミリ波帯無線信号を用いたROF路車間通信システムにおける無線スポットアクセス方式の提案*

A Proposal of Spot Access System for Millimeter-wave Road-Vehicle Communication Systems by means of Radio-on-Fiber Technology

青 木 豊

Yutaka AOKI

田 口 隆 志

Takashi TAGUCHI

原 田 博 司

Hiroshi HARADA

藤 瀬 雅 行

Masayuki FUJISE

Road-vehicle communication system is considered as a key technology to realize Intelligent Transport Systems (ITS). In this paper, a spot access system is proposed for broadband wireless package Road-vehicle transmission system based on radio-on-fiber (ROF) technology. The proposed system is characterized by the following: (1) Its cell is enough small not to hold more than one vehicle. (2) Each cell has no overlaps. (3) A large data package is divided into several small unit packages and transferred from several cells. By using numerical evaluation, it is clarified that higher average data transmission rate can be obtained in comparison with continuity access system, which has overlapped cell structure.

Key words : ITS, Road-vehicle communication system, Radio on fiber, Spot access system, Millimeter-wave

1. まえがき

日本, ヨーロッパ, アメリカ, カナダ, オーストラリア, 韓国, 中国等の国々で, 高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport Systems) と呼ばれるシステムの研究開発が国家プロジェクトとして進められている。特に日本においてはITS関係5省庁〔郵政省 (現総務省), 通商産業省 (現経済産業省), 運輸省 (現国土交通省), 建設省 (現国土交通省), 警察庁) によって1996年7月に「高度道路交通システム (ITS) 推進に関する全体構想」が策定され, ITSが以下のような位置付けで捕らえられている¹⁾。

第1にITSは道路交通に関する総合的な情報通信システムであり, 交通渋滞軽減, 交通事故減少, 輸送効率化, 地球環境との調和を実現する切り札である。

第2にITSは21世紀のマルチメディア移動通信の中核をなすものであり, 将来の多彩なアプリケーション創造によるITSビジネスの開花が期待されるものである。

第3にITSは国民生活の大部分を占める移動空間 (道路, 交通, 車両) に関する施策であり, 最先端の情報通信技術により豊かで活力あり多様なライフスタイルが期待される高度情報通信社会を先導する役割が期待できるものである。

ITSにとって地上ネットワークと車両との移動通信技術, すなわち路車間通信技術は欠くべからざる根幹

技術である。路車間通信に適用できる通信システムのうち現在までに実現されているものは主に, (1) 携帯電話 (Personal Digital Cellular: PDC), (2) VICS (Vehicle Information and Communication System) におけるFM多重放送, 電波ビーコン, 光ビーコン, (3) ETC (Electric Toll Collection) および5.8GHz帯DSRC (Dedicated Short Range Communications) である。DSRCは通信速度が1Mbpsで他のシステムに対して高速であるものの, 車という「国民生活の大部分を占める移動空間」に「豊かで活力あり多様なライフスタイル」を実現するためには, 画像情報伝送等の大容量通信が不可欠であり, さらに通信速度を高める必要がある。

日本では総務省所管の独立行政法人通信総合研究所がミリ波を用いた大容量路車間通信の実現を目指し官民の大規模な共同研究を実施している²⁾。この官民共同研究はYRP (Yokosuka Research Park)³⁾ 研究開発協議会 / ITS共同研究グループ / のもとで実施され, 1999年度の民間参加企業は沖電気, オプトウエーブ, KDDI, サムスン, 住友電気工業, 東芝, 日本無線, ノキア・ジャパン, 日立製作所, 日立電子, 日立電線, 古河電気工業, 松下通信工業, 三菱電機, 三菱電線, モトローラ, デンソーである。

この共同研究では, 光ファイバを無線周波数帯信号の伝送媒体として利用することで路側基地局装置の簡

* (社)電子情報通信学会の了解を得て, 信学技報 Vol.100 No.75, ITS2000-11(2000.5)より一部加筆して転載

素化，低廉化が期待できる光ファイバ無線通信（Radio on Fiber：以下ROFと略す）³⁾⁴⁾⁵⁾の技術規格策定と，30GHz以上のミリ波帯無線周波数を用いて路車間通信を行うための技術規格策定とが推進されている．ミリ波帯無線周波数を用いることによって画像情報を伝送するために必要な周波数帯域幅を確保できる反面，信号の距離減衰が大きくなるため，一つの無線基地局がカバーできるエリアが30GHz以下のマイクロ波帯周波数を用いる場合に比べ小さくなる．従ってこのミリ波帯無線周波数を用いた通信システムの特徴を生かした路車間通信システムを構築する必要がある．

本報告においては，このROF技術を用いたミリ波大容量路車間通信の無線通信方式としてスポットアクセス通信方式を提案し，本方式が一般のPDC等のセルラー通信に適用されている連続系セル構成方式に対して，平均データ伝送速度を大きくできる点，基地局設置密度を低くできる点で有利であることを示す．

2. 連続系セル構成方式による無線移動体通信の問題点

PDC等の代表的な移動通信システムにおいては，サービスエリアをセルと呼ぶ多数の無線ゾーン（マクロセル，半径で0.5～20km）に分割し，各セルの中心に無線基地局（BS）を設置する⁶⁾．マクロセルであるため，基地局の数がPHS（Personal Handy-phone System）のマイクロセル（半径で0.1～0.5km）に対して少なく済み，インフラコストが有利である．また各セルは隣接セルと重なる部分をもつ．このことによって端末局は途切れることなく通信することができる．

しかし，各セルが隣接セルと重なる部分をもつため，混信防止のためあるセルと隣接セルでは搬送周波数を変える必要が生じる．このため，例えばPDCの場合はサービスに与えられた全周波数帯域（810-826，1429-1453MHz）を分割して各セルに割り当てる必要が生じる．このことによりユーザー1台あたりが利用できる帯域が全帯域に対して小さくなり，伝送できるデータ速度が制限される．

さらに一つのセルを広域としたことにより，セル内に複数のユーザー端末が存在することに対応する必要が生じる（多元接続）．このためアクセス時間を分割して各ユーザーに割り当てる必要がある（時間分割多重，TDMA）．このことにより平均データ伝送速度がさらに小さくなる．

以上で述べたような連続系セル構成方式のセルを路車間通信に適用するとユーザー1台あたりが利用できる帯域，通信時間が少なくなり使命である大容量通信の実現が困難となる．

そこで，上記問題を解決するために以下に示すようなスポットアクセス通信方式を提案する．

3. スポットアクセス通信方式

スポットアクセス通信方式においてはFig. 1に示すようにROF技術を用い，一つの統合基地局と複数の局地基地局とを光ファイバで接続する．その上で従来は局地基地局に設置されていた無線変復調装置，回線制御装置を単一の統合基地局に集中配備する．統合基地局は無線周波数帯の信号により光を変調し，この光信号を路側に設置された局地基地局に伝送する機能を有し，局地基地局は伝送された光信号を受信し，もとの無線周波数帯の信号に変換する機能を有する．

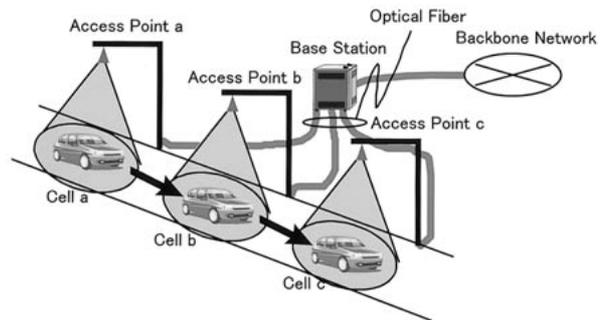


Fig.1 Spot access system based on ROF

この方法により局地基地局には端末から送信された無線周波数帯の信号をそのまま光信号に変換する機能と，統合基地局から送信された光信号をそのまま無線周波数帯の信号に変換して放射する機能のみを持たせる．また複数の局地基地局は，路側に一定の間隔で設置する．この各局地基地局が構成するセルの大きさは以下の条件を満たすものとする．

一つのセルの大きさはユーザー端末が高々一台入れる程度（これを以下パーソナルセルと称する）とする．

一つのセルと隣接セルが重ならない（セル間相互作用なし）．

一つのセルで伝送が完了しない大きな情報の伝送はあらかじめ複数に分割し，複数のセルを用いて伝送する（データの分割伝送）．

以上の条件により車両は間欠的にセルに入出し，セルに滞在中にデータ通信を行う．

の条件によってセル内で時間分割，周波数分割等の多元アクセスを施す必要が無くなる．このため一つのユーザー端末に対して，一つのセルに与えられた全帯域と全通信時間を与えることができ高速通信が可能となる．また， の条件によって理想的にはすべてのセルが同一の周波数帯域を使用することができ，一つのサービスに与えられた全周波数帯域をすべてのセルで使用することができる．このため各ユーザー端末はサービスに与えられた全周波数帯域を使用することができ，より高速な通信が可能となる．さらに路側に設置する局地基地局の数を減らすことができ，後述するように全体システムの低廉化が図れる．

またデータが一つのセル滞在時間内では伝送不可能な程度に大きい場合であっても，条件 により伝送が可能となる．さらに，セル滞在中のデータ伝送速度を高くすることが可能であるため，車載器内に十分大きなバッファメモリーもしくはハードディスクに代表される高速大容量記憶媒体を装備し，セル滞在中に逐一受信データを格納することによってFig. 2に示すように，間欠的なデータ伝送のみで連続的なデータの使用が可能となる．

このことによってインターネットで配信されているストリームビデオ，ストリームラジオ等の動画や音声を視聴することが可能となる．また，ある程度の遅延を許容できるならばリアルタイム映像，音声をダウンロード，アップロードすることが可能となる．

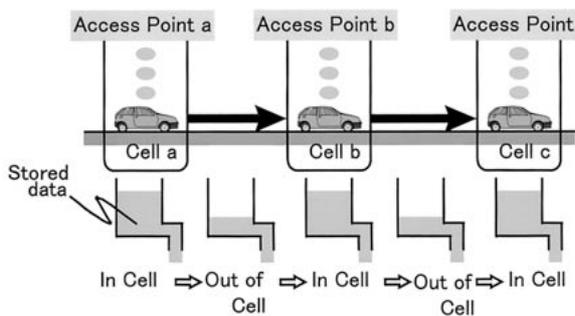


Fig.2 Continuity communication by proposed spot access scheme

4. セル形状，搬送波周波数の検討

路車間通信の対象とする車両は大型トラックから普通車，軽自動車まで様々である．しかしセルの大きさが，普通車，軽自動車に対して上記条件 を満たすならば，それより大きな車両に対しては必ず は満たされるため，普通車，軽自動車に対して検討すれば良い．

Table 1 に典型的な車両のサイズを示す．Table 1 が

ら車両全長は4m程度であることが分かる．このことからセルの車両進行方向の長さが4m程度であると，走行中はもちろん渋滞中でもセル内に2台以上の車両は入らないと考える．また，車両幅方向の長さは2m程度であることがわかる．しかし車両が必ずしも車線中央を走行するとは限らないことからセルの車両幅方向の長さは幅員程度が望ましいと考える．

Table 1 Typical size of small cars

	Length[m]	Width[m]	Height[m]
Sedan	4.9	1.8	1.5
Compactcar	3.4	1.5	1.4

次に搬送波周波数について考える．一般に搬送波周波数を高くするとビームの指向性が高くなり絞りやすい．従って上記のようなパーソナルセルを形成する場合は，搬送波周波数は高いほうが望ましい．また，条件 を満たすようにする場合，周波数がマイクロ波程度に低いと，路面，車両による回折，散乱で干渉が生じると考える．そこで指向性が十分高く，かつ大気中の減衰が大きいミリ波⁹⁾を用いることが望ましい．

次にアンテナ位置に関して，幅員方向と車両進行方向に場合分けして検討する．まず幅員方向に関して検討する．ミリ波を用いる場合，直進性が高くなるために（例えば，横のレーンを走行中の）近傍の大型車両や標識等で搬送波が遮蔽されることがある．このシャドウイングを回避するためには車両の上方にアンテナを設置することが望ましい（Fig. 3）．

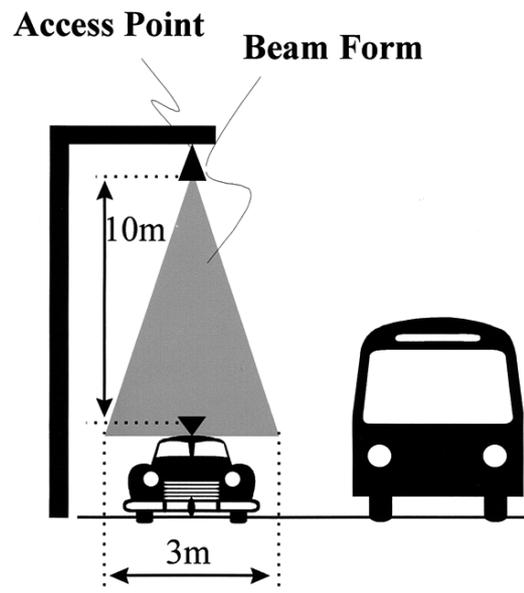


Fig.3 Beam form in transverse direction

また、車両進行方向についても同様に上方から下方に放射することが望ましいが、アンテナ直下から前後対称にビームを形成するとドップラー現象により車両がアンテナ直下を通過する前後で搬送波周波数、位相が不連続に変化する。従って、Fig. 4のように直下から前後、どちらかにビームを形成することが望ましい。また、高さはなるべく高いことが望ましいが10m程度が現実的と考えられる。

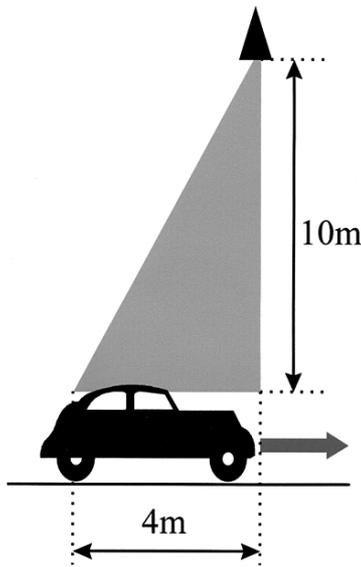


Fig.4 Beam form in direction of motion

5. スポットアクセス方式の高速通信特性

以上では 5.1 の条件によるスポットアクセス通信方式の特徴を説明し、条件を満たすセルの形状に関して検討した。本節では 4 節で示したセルを用いたスポットアクセス通信方式の連続系セル構成方式に対する高速通信特性について数値計算により検討する。

5.1 基地局アンテナ利得

スポットアクセス方式では、Fig. 3、及びFig. 4に示したセルを用いる。基地局アンテナ利得 G_t [dB]は、

$$G_t = 10 \log_{10} \frac{4 d^2}{A} \quad (1)$$

で求めることができる。ここで d [m]は伝搬距離、 A [m²]は車載アンテナ高さでのビームが照射する面積である。この式により d を 10m、 A を長さ 4m × 幅 3m と代入すると、スポットアクセス方式の基地局アンテナ利得は 20dB となる。また連続系セル構成方式ではビームをできる限り広い範囲に放射することで、一つの基地局がカバーできるエリアが広がる。最大に広い条件として Fig. 4 に示したアンテナから路面に向けて半球状にビームを放射する場合を考える。半球

であるのでビームが車載アンテナ高さで照射する面積 A は

$$A = \frac{1}{2} \times (4 d^2) [m^2]$$

となり、これを式 (1) に代入するとそのアンテナ利得は 3dB となる。

5.2 スポットアクセス方式の高速通信特性

基地局からデータを送信し、車載器で受け取る場合についてスポットアクセス方式の連続系セル構成方式に対する高速通信特性を数値計算した。

一般にデータ伝送速度が増加すると、それに応じて必要な帯域幅が増加する。帯域が増加すると雑音帯域幅が増加することによって受信雑音が増加し、受信波の搬送波電力対雑音電力比 (Carrier to Noise power Ratio ; CNR) が劣化する。受信波の CNR と平均 BER は 1 対 1 対応の関係にあり、CNR 劣化によって平均 BER は悪化する。従ってシステムで要求される平均 BER に対して必要とされる CNR が一意に決まり、他の回線条件 (放射電力、伝搬損失、アンテナ利得等) が一定の条件で、どの程度の帯域幅まで電力余裕があるかを計算することによって高速通信特性が評価できる。

まず第一に各変調方式による平均 BER とその平均 BER を得るための所要 CNR との関係は、Table 2 のようになる⁵⁾。これによると CNR 劣化によって平均 BER は増加し、例えばシステムにおいて要求される BER が 1×10^{-6} の場合は QPSK では 14dB の CNR が必要であることが分かる。

Table 2 Required CNR²⁾

BER	QPSK	16QAM	64QAM	256QAM
10^{-3}	10	17	23	28
10^{-6}	14	21	27	33

では、次に上記で述べた方式の高速通信特性を計算する。電力余裕を M [dB]、伝搬の結果得られる CNR を $CNRR$ [dB]、システムで要求される CNR を $CNR0$ [dB] とすると、

$$M = CNRR - CNR0 \quad (2)$$

という関係がある。

ここで $CNRR$ [dB] は受信電力を P_r [dBm]、雑音電力を N [dBm] として

$$CNRR = P_r - N \quad (3)$$

となる。

P_r [dBm]は、送信電力を P_t [dBm]、基地局アンテナ利得を G_t [dB]、車載器アンテナ利得を G_r [dB]、伝搬損失を L_{prop} [dB]として

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{prop} \quad (4)$$

となる。

以上の式により、電力余裕の伝送速度（すなわち帯域幅）による変化が計算できる。

Table 3に本計算で用いるパラメータの値を示す。放射電力を10dBmとした。基地局アンテナ利得は、5-1節で述べた計算によりスポットアクセス方式で20dB、連続系セル構成方式で3dBとした。伝搬距離はアンテナ直下の場合を想定しFig. 3, Fig. 4に示したように10mとした。周波数は37GHz、変調方式はQPSKとした。要求される平均BERを仮に 1×10^{-6} とした。この場合にQPSKで要求されるCNRはTable 2により14dBとなる。

Table 3 Parameters used in numerical evaluation

Parameters	Spot Access	Continuity Access
Radiated power[dBm]	10	
Antenna Gair[dBi] (local base station)	20	3
Antenna Gair[dBi] (wireless terminal)	3	
Propagation distance[m]	10	
Carrier frequency[GHz]	37	
Modulation method	FSK	
Required bit error rate	1×10^{-6}	
Required CNR[dB]	14	
Noise figure[dB] (receiver)	10	
Absolute temperature[K]	300	
Bandwidth[MHz]	1-200	

計算を実行した結果をFig. 5に示す。連続系セル構成方式では帯域幅70MHzあたりで電力余裕がゼロになるのに対して、スポットアクセス方式では200MHzでも16dBである。同じ16dBの値は連続系セル構成方式では4MHzでしか得ることができず、スポットアクセス方式は連続系セル構成方式に対して各セル内で約50倍の伝送速度を持つことが分かる。

6. スポットアクセス方式路車間通信の基地局配置

5節でスポットアクセス方式が連続系セル構成方式に対して、約50倍の伝送速度を持つと見積もることができた。しかしスポットアクセス方式にはFig. 6に示すように連続系セル構成方式には無い通信不可能区

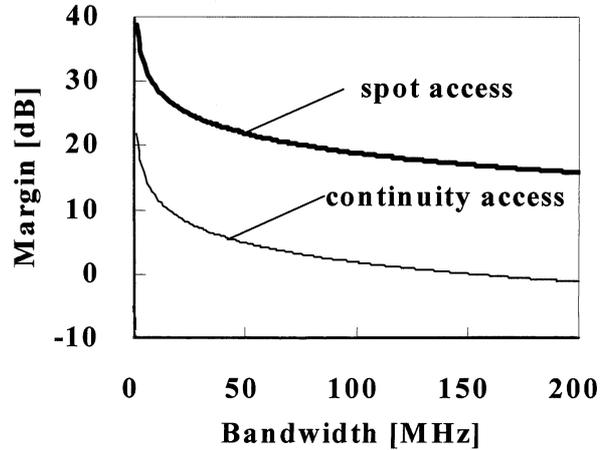


Fig. 5 CNR margin of proposed spot access system in comparison with continuity access system

間が存在する。

本節では通信可能区間（Sections On Transmitting: 以下ではSOTと略す）の長さに対する通信不可能区間（Sections Not Transmitting: 以下ではSNTと略す）の長さによって変化する平均伝送を計算し、連続系セル構成方式に対して高い伝送速度を維持できる条件を導く。

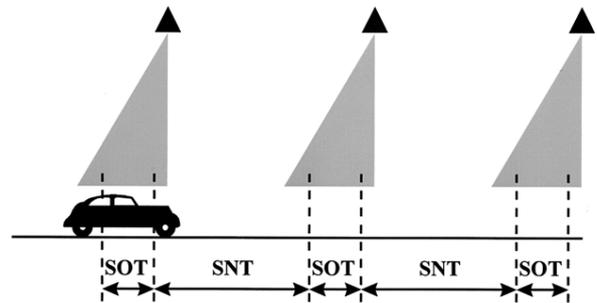


Fig. 6 Sections on transmitting (SOT) and sections not transmitting (SNT) in proposed spot access system

計算に先立ち仮定を述べる。車両のセル滞在時間のうち、回線オン、オフ等の制御に要する時間を考慮し、所望のデータ伝送に使用できる時間を5割とする。すなわち、5節で述べたセルの車両進行方向の長さ4mのうち有効長（所望のデータ伝送に使用できる長さ）を2mとする。また、車両速度は一定であるとし、セルの[有効長、非有効長]と[通信時間、オフ時間]とは線形に1対1対応すると仮定する。また電力余裕を16dBとする。このときスポットアクセス方式では帯域200MHzをとれるが、連続系セル構成方式では4MHzである。この帯域は、変調方式として変調指数0.5でガウスフィルタにより帯域制限したFSKを用い

た場合、それぞれ200Mbps、4 Mbpsの伝送速度が得られる。

平均データ伝送速度[bps]を以下のように定義する。

$$E = \frac{Lon}{Lon + Loff} \quad (5)$$

$$Rav = R \cdot E \quad (6)$$

ここでRav[bps]は平均データ伝送速度、R[bps]は有効区間でのデータ伝送速度、Eを区間有効率、Lon[m]は有効区間の長さ、Loff[m]は非有効区間の長さである。

以上の仮定に基づくスポットアクセス方式の平均データ伝送速度をFig. 7に示す。この結果より区間有効率が2%以上で、連続系セル構成方式のデータ伝送速度4 Mbpsを上回ることが分かる。区間有効率2%で上記仮定に基づいてセルを配置すると100mごとにセルを配置するだけで連続系セル構成方式を上回る通信速度を得られることが分かる。

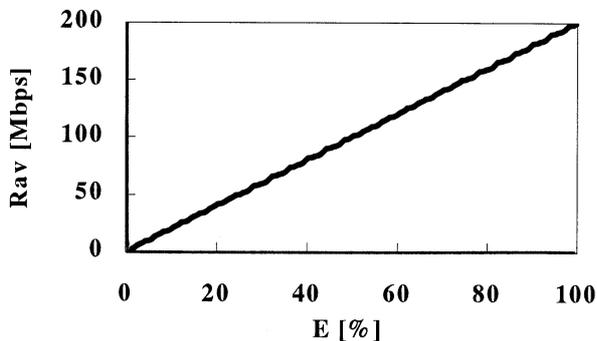


Fig.7 CNR margin of proposed spot access system in comparison with continuity access system

7. むすび

光ノミリ波融合路車間大容量一括伝送方式としてスポットアクセス方式を提案し、その高速伝送特性を数値計算により評価した。その結果、連続系セル構成方式に対して各セル内において約50倍の平均データ伝送速度が得られる可能性があることが明らかになった。

また、約100メートルごとにこのスポットアクセス局地基地局を配置するだけで、連続系セル構成を上回る平均データ伝送速度が得られることが分かった。今後は実験等を通して、提案方式の有効性を検証する予定である。

8. 謝辞

本研究を進めるにあたり、有益なご助言を頂きましたYRP (Yokosuka Research Park) 研究開発協議会、ITS共同研究グループ、Radio on Fiber路車間通信共同研究分科会、システム統合サブグループの関係者各位に感謝いたします。

<参考文献>

- 1) ITS情報通信システム研究会：「ITSテレコミュニケーションビジネス」,(クリエイト・クルーズ,1999)
- 2) 原田博司, 前野隆宏, 長尾康之, 久津木研二, 青木豊, 清水崇之, 渡辺彰彦, 大村純夫, 松生雅信, 小椋正紀, 松尾望, 館田良文, 加藤博光, 徳田清仁, 藤瀬雅行, “ミリ波帯無線信号を用いたROF路車間通信システムにおけるシステム構成方法に関する一検討” 信学技報, ITS2000-10 (2000-05)
- 3) <http://www.yrp.co.jp/>
- 4) 塚本勝俊, 岡田実, 小牧省三, 森永規彦, “光電波融合通信方式の技術動向”, 信学技報 MW, 96-25, pp33-28 (1996)
- 5) Hiroshi Harada, Hee-Jin Lee, Shozo Komaki, Norihiko Morinaga, “Performance Analysis of Fiber-optic Millimeter-Wave Band Radio Subscriber Loop”, IEICE Trans. Commun., E76-B,9, pp.1078-1090, Feb. 1993.
- 6) 原田博司, 李嬪珍, 小牧省三, 森永規彦, “ミリ波帯無線搬送波・光伝送システムの最適変調方式” 信学技報, RCS92-80 (1992-10)
- 7) Hiroshi Harada, Katsuyoshi Sato, Masayuki Fujise, “A feasibility study on a Radio-on-fiber Communication systems by a code division multiplexing radio transmission scheme”, ITST2000, S6-1, pp155-160 (2000)
- 8) 木村馨根：「光・無線通信システム」, pp113-125 (オーム社, 1998)
- 9) 佐藤勝善, 藤瀬雅行, 清水聡, 池田光, 森部英隆, “37GHz帯ROFを用いた路車間通信伝搬モデル”, 信学ソサイエティ大会, A-17-13, 1999

< 著 者 >



青木 豊
(あおき ゆたか)

基礎研究所
化合物半導体デバイス，通信システムの研究に従事．



田口 隆志
(たぐち たかし)

基礎研究所
ミリ波デバイス・システムの研究を経て、現在、研究企画に従事．



原田 博司
(はらだ ひろし)

独立行政法人通信総合研究所
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 工学博士
デジタル信号処理を利用した高速移動通信技術，ソフトウェア無線通信技術，ITSに関する研究に従事．



藤瀬 雅行
(ふじせ まさゆき)

独立行政法人通信総合研究所
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
ミリ波ITS情報通信の研究に従事．