

## クルマ向けサービスにおけるインフラ側アンテナ技術

竹内 和則<sup>†</sup> 浦山 博史<sup>†</sup> 本多 輝彦<sup>†</sup> 千葉 勇<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>株式会社トヨタ IT 開発センター    <sup>‡</sup>三菱電機株式会社 鎌倉製作所

<sup>†</sup>〒107-0052 東京都港区赤坂六丁目 6 番 20 号

<sup>‡</sup>〒247-8520 神奈川県鎌倉市上町屋 325 番地

Email: †{kazunori, urayama, [te-honda](mailto:te-honda@jp.toyota-itc.com)}@jp.toyota-itc.com ‡Isamu.Chiba@kama.melco.co.jp

あらまし 路車間通信でクルマに種々の情報を提供することにより、クルマの安全を高める手法が検討されている。上記に有効な路側機のアンテナについて検討する。情報を提供するスポットの形状、スポット内外の電波強度などの要求条件を導出し、要求条件を満たす有力なアンテナ技術として DBF (Digital Beam Forming)を取り上げる。路側機アンテナの設計に DBF 技術を適用し、シミュレーションによりスポット内外の電界強度分布図(コンター図)を求め、従来アンテナと定量的に比較した。その結果 DBF 技術を用いた路側機アンテナの性能の飛躍的改善が得られることを示し、同時に路側機アンテナの設計の指針となるアンテナの大きさと得られる性能の関係を明らかにした。

キーワード 路車間通信、DBF

## DBF technology applicable to the road-to-vehicle communication antenna

Kazunori TAKEUCHI<sup>†</sup>, Hirofumi URAYAMA<sup>†</sup>, Teruhiko HONDA<sup>†</sup>,  
Isamu CHIBA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>TOYOTA InfoTechnology Center Co.,Ltd.

<sup>‡</sup>Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corporation

<sup>†</sup>6-6-20 Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107-0052 JAPAN

<sup>‡</sup>325 Kamimachiya, Kamakura-shi, Kanagawa, 247-8520 JAPAN

Email: †{kazunori, urayama, [te-honda](mailto:te-honda@jp.toyota-itc.com)}@jp.toyota-itc.com ‡Isamu.Chiba@kama.melco.co.jp

### Abstract:

The effectiveness of Digital Beam Forming (DBF) technology applied to the antenna on the road side station is examined. The specification required for the antenna is proposed related to the shape of the service spot, which should be provided accurately along the lane nearby the crossing. The calculated beam pattern configured by the DBF results in excellent performance compared to the conventional array antenna with simple tilt beam.

**Keyword** Road-to-vehicle communication, DBF

## 1. まえがき

近年、クルマにおける安全確保について衝突安全の立場からだけでなく、クルマに対して積極的に情報を提供していくことで事故発生率を減らす予防安全の検討が進められている。

事故発生率をみると交差点での出会い頭事故が統計的に大きな数字を占めている[1]。このようなケースではクルマに対して交差点の情報を事前に提供するという対処法が考えられる。

交差点手前および内側でクルマにとって有益な情報としては、

- ・ 現時点(リアルタイム)の信号情報
- ・ 信号の変わるまでの残り時間
- ・ 自車の車線位置に対応した信号情報(車線毎の情報選択)
- ・ 渋滞した交差点で、渡りきった先に自車が入る余裕があるかどうか。
- ・ 交差する方の車線において、交差点に接近してくるクルマの情報
- ・ 大型車両の後ろに隠れているクルマの情報
- ・ 合流地点において、死角から進入する合流車の情報
- ・ 交差点右折時に、対向車の死角からの危険情報
- ・ 路側に設置された交通標識等の情報
- ・ 交差点の先が見通し外カーブに続く場合、その先の道路状況(停車中のクルマの情報など)

などが考えられる[2][3][4]。

このように交差点の各々の位置で、その位置で求められる情報を路側からクルマへ伝える手段としては無線(電波)、可視光・赤外線やレーザ、超音波などの媒体が挙げられる。この中でも無線は路-車間が別のクルマ等で遮蔽されても回折により受信できる機会が期待できること、車載アンテナに水平面無指向性をもたせればクルマの向き(ヘディング)による感度の影響が少ないこと、

広帯域な情報を多重して配布できることなどの点で有利である。

また、無線(電波)による路車間通信として ETC に代表される DSRC(Dedicated Short Range Communication)を、運転支援を含む情報提供にも適用できないか検討されている[4][5]。

無線を他のメディアと比較した場合、大きな問題点はその配布範囲の限定である。交差点手前や内側の細かい位置に応じた情報を配信するとき、可視光・赤外線であれば照射範囲からの漏れを抑えることが比較的簡単である。しかし、無線では非常に高い周波数を用いない限り照射範囲を絞り込むことは困難である。また、情報を配布しているスポットに対して均質な強度で電波を提供することが望ましいが[6]、この要求を満たすことも簡単ではない。

上記の二つの要求を実現する技術の有力な候補は放送衛星や通信衛星で使用されるビームのフットプリント作成技術である[7]。この技術により路側機アンテナの開口面の位相・振幅を高度に制御し、条件を満足するビームを形成することが考えられる。

本報告では交差点での予防安全を目的とした情報提供を路側機からクルマへ無線で配信する際に路側機アンテナに必要な技術要求について考察し、その要求を実現するアンテナ技術として DBF を取り上げる。ビーム形成アルゴリズムとして知られる定包絡線アルゴリズム(CMA)の応用で得られる成果についてシミュレーション結果をもとに明らかにする。

## 2. サービスモデルの検討

技術要求条件を導出するために、無線通信を使ったクルマ向けサービスのモデルとして、交差点や見通し外カーブにおける出会い頭の事故に対して有効と考えられる例を図 1,2 に示す。[4]

図 1,2 の例において情報を配布するエリアの

位置は、クルマが進入する交差点やカーブの手前ではなくはならずドライバーが必要な安全動作を取るための時間的余裕も加味して設計する必要がある。そのエリアの形状は直進、左折、右折など進入する車線ごとに必要な情報が異なるため、車線に沿った短冊形が望ましい。

優先車線から進入するクルマの情報を  
非優先車線のクルマに伝える

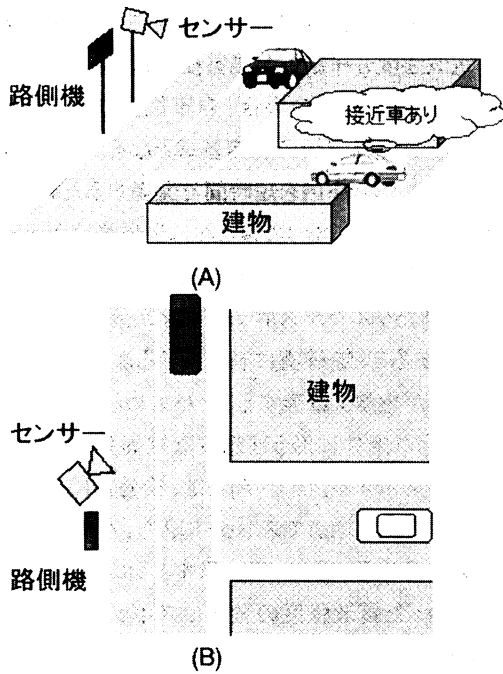
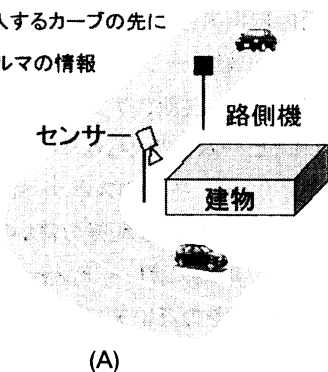


図1 路車間通信によるサービスモデル(見通しの利かない交差点における走行支援)

これから進入するカーブの先に  
停車中のクルマの情報を伝える



(A)



(B)

図2 路車間通信によるサービスモデル(見通しの利かないカーブにおける走行支援)

このように形成されたエリアに進入するクルマに対して適切な情報を効率よく配布するための情報多重化手段の主な例を以下に示す。

#### (方式-1) 時分割方式

路側機は一つのキャリアに、例えば交差点付近の全てのクルマに配布されるべき全情報を時分割で多重化する。路側機ではクルマの各位置に対応した情報を取り出すための識別子をパケットヘッダに埋め込む。クルマは路側機からの情報の中から、識別子をもとに自車の現在位置に合致した情報を抽出する。クルマは一つの周波数での待ち受けだけで必要な情報を取得できる。この方式では情報の抽出を OSI リファレンスモデルの上位にあたるアプリ層にて行う必要がある。

#### (方式-2) 単一チャンネルサービス ID 方式

IEEE802.11 における ESS-ID のように、同じ周波数チャンネルを使用するが、キャリアに識別子を持たせることで各位置に対しての情報を分別できるようにする。この方式も各位置に必要な情報はパケットにより時分割で送られるが、方式-1 の時分割方式と異なり、下位層にてサービス ID を指定することで、自車位置に相当する情報を自動

的に取得できる。

#### (方式-3) 符号多重方式

CDMA に代表される手法で、同じ周波数チャンネルを用いるがコード分割により多重化する。クルマは下位層にてコードを指定することにより、自車位置に必要な情報を取得できる。

#### (方式-4) 周波数多重方式

無線の周波数をいくつかに分割し、周波数チャンネルごとに異なる位置に対応する情報を送る。クルマは自車位置に対応する周波数チャンネルを選択することにより必要な情報を取得できる。

#### (方式-5) スポット分割(ピコセル)方式

電波の配布範囲を絞り込み、各位置に必要な電波のみをその場所に送信する。クルマは自車位置にて最も高い受信感度の電波を受け取ることで必要な情報を取得できる。

方式-1 から 4 では、クルマは自車位置に相当する識別子、サービス ID、コード、周波数チャンネル等を常に知っている必要がある。

そのためにクルマ側で識別子等を地図データベースと併せ保持し、高精度な測位システムにより自律的にその情報を抽出する手法や、路側で各情報配布スポットの入り口に狭域ビーコンや道路マーカを設置し、進入するスポットの識別子をクルマに提供する手法などが考えられる。

しかし、これらの手法は各々のクルマが高度なナビゲーションシステム等を搭載している必要がある。スポット毎の路側ビーコン、マーカについては、その敷設数が一つの交差点に対して数箇所ずつ必要となる。

これに対して、方式-5 ではクルマは自車位置の情報は必要としない。現在位置で最も強い電波を受信することで必要な情報を取得できる。単

一の周波数で待ち受ければよいので車載受信機は一つで済み、周波数スキャン機能も不要である。マーカ、ビーコンの敷設工事も必須ではなくなる。

このような利点を有するスポット分割方式は、路側機のアンテナで高度なビーム制御を行い、目的の位置に目的の形状のスポットを形成することで実現される。以下、本方式の実現に向けての技術要件を整理する。

スポット分割方式では、情報配布スポット内外の電波強度分布制御が最重要課題である。

スポット分割方式の場合、自車位置での電波強度だけが情報選択の判定基準となる。走行するクルマはスポット内を短時間で通過するため、通過の時間経過に沿って滑らかに受信強度が上昇し、滑らかに下降するような電界分布が理想的である。またクルマがスポットを外れた後は、スポット外であることを確実に判定できるように受信電界強度が急激に減衰することが求められる。

このような条件に沿う理想的な電界強度分布を図 3 に図示する。図 3-(A)では、交差点に進入するクルマは A 地点でスポットに入り、A 地点でスポットから出る。図 3-(B)に示すようにクルマの進路に沿った電波強度の分布はスポット内で平坦な特性の台形パターンであることが望ましい。

図 3 に示すようなスポットを形成する路側機アンテナを考えると、無線 LAN 基地局でよく用いられるダイポールアンテナやコリニアアンテナではその水平面内無指向性の放射パターンから考えて困難である。一般に一つの交差点で複数のスポットが必要であり、左記のアンテナでは他のスポットへ漏れるビームを抑えられないために大きな相互干渉が生じる。各々のスポット毎にビームを絞って配信するためには利得の高いアンテナが必要となるが、単純にアレーアンテナやパラボラアンテナ等の利得の高いアンテナを用いた場合はスポット内の電界均一性の点で十分な性能が

得られないという問題点がある。

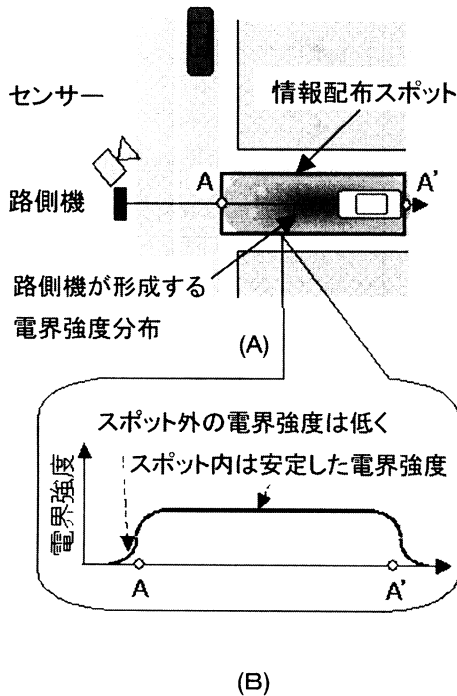


図3 情報配布スポットにおける理想的な電界強度分布

次節以降、前述の技術要件を満たすアンテナの実現にむけ、DBF 技術を利用したスポット内の電界強度分布の均一化効果を議論する。

### 3. アンテナ性能評価方法

前節で述べた路側機アンテナの性能評価方法を導出する。一般的にアンテナは設置の制限からできるだけ小型であることが求められるが、所望の性能、特に利得を満たすためには必要最小限の開口面積は確保しなくてはならない。路側機のアンテナ設計の際には、その性能を定量的に示すための指標の策定が求められる。

求められる性能は以下にまとめられる。

(1) 交差点の求められる場所にスポットが形成で

き、スポット内で所要の電界強度を満たす。

(2) スポット内では均一な強さで電波が受信される。

また、(1)、(2)を定量的に表現した場合、以下の形で示すことができる。

(1) スポット内で所要電波強度を満足するエリアの面積比

(2) スポット内での電界強度分布の最大値、最小値の比

今回、図4に示す路側機と情報配布スポットの位置関係、スポットの形状において、上記(1)、(2)に示す性能評価を行った。

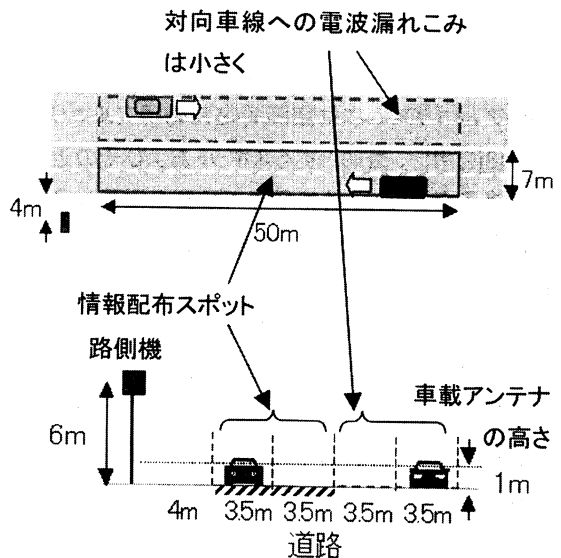


図4 路側機と情報配布スポットの位置関係

### 4. シミュレーションによる性能評価

アンテナのシミュレーションにより、DBF の性能評価を行った。DBF 技術の有効性を確認するため、アンテナ自体は同じものを用い、DBF の適用あり、なしでの性能差を確認した。

シミュレーションに使用したアンテナは、NxN 素子

を正方配列した平面アレーアンテナである。素子間隔は半波長(0.5λ)とする。開口面の大きさの指標としてNを変化させ、そのときのスポット内外の電界強度分布を算出する。

アレーの素子はマイクロストリップアンテナを一般的な  $\cos(\theta)$  指向性で近似してモデル化する。素子相互の結合は考慮しない。また、DBF 適用のあり、なしに関わらず、図 4 のようにアンテナの法面は車線に平行に向ける。

DBF を用いない場合(以降、単純アレー)では、各素子を均一な振幅で励振させ、等差的に傾斜位相をつけることで主ビームを情報配布スポットの中心にチルトさせる。

これに対して、DBF では、デジタル演算によりアンテナの各素子の励振振幅と位相の調整を行い、任意のスポットの形状に対して最適なビームを形成するアルゴリズムを盛り込む。ビーム形成のためのアルゴリズムには空間的定包絡線アルゴリズム[8]を用い、目的とするスポットおよびその近傍に格子点を設け、各格子点で所要の電界強度となるように素子の位相と振幅の最適化計算を行う。

本報告ではスポット内の各電界強度を、その地点に向けられたアンテナ利得と自由空間損失の和の形で示す。

周波数は ITS 用途をふまえ ETC 等で利用されている 5.8GHz を用いて計算を行った。

## 5. DBF の性能評価結果

図 4 で示した情報配布スポットに対するシミュレーション結果を図 5、図 6 に示す。

図 5 は、スポット内で所要の電界強度を満足するエリアの面積比を、素子数を 16(=4×4)、36(=6×6)、64(=8×8)と変化させた場合について示した。今回、所要の電界強度を-76dB に設定した。

図 6 はスポット内での電界強度の最大値と最小値の比を示した。

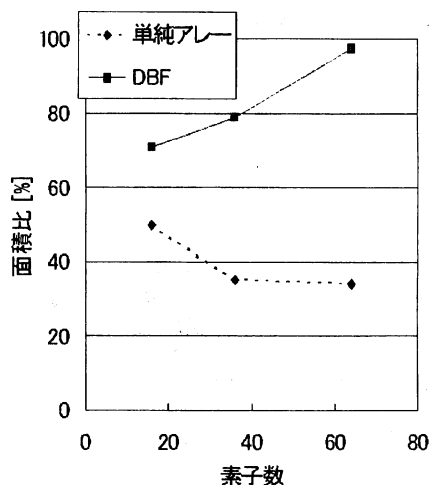


図 5 スポット内で所要電波強度を満足するエリアの面積比

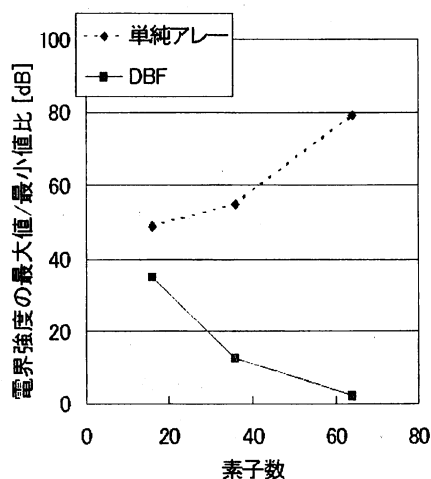


図 6 スポット内での電界強度の最大値/最小値比

図 5 に示すように、単純アレーの場合は素子数が 16(4×4)の時、スポット内で所要の電界強度を満足するエリアの面積比(以降、面積比)が高々 50%程度であり、素子数を増やしていても逆に面積比が低下してしまう。これは素子数が増えることで指向性利得が高くなり、放射パターンが鋭くなるため、スポットの一部に対しては高い電界強度となるが、その周辺では逆に電界強度が急激

に落ち込み、図 6 に示すようにスポット内で電界強度の差が大きくなってしまったためである。

単純アレーでのこのような欠点は、アンテナの各素子が均一な振幅と等差位相による励振条件としたことに由来している。単純アレーで形成されるビームはペンシルビームであり、スポットのひろがりに関して適切な形状にはならない。単純アレーでは素子数が増えることは望ましい方向に向かず、逆にスポット全体でみると性能が劣化してしまうことが明らかになった。

これに対して、DBF により最適なビーム形成を行った場合は、素子数の増加により明らかな性能向上が得られた。これは、素子数を増やすことによって得られたアンテナの性能向上が情報配布スポットにわたって均等にビームを分配するよう働くためである。DBF の効果が少ない素子数  $16(=4 \times 4)$  の場合でも、面積比、電界強度の最大値/最小値比の両方において単純アレーより優れた結果が得られることが図より明らかである。

図 5 から、図 4 の情報配布スポットにおいて所要の電界強度をほぼ満たすアンテナは、素子数  $64(=8 \times 8)$  を有する DBF を適用したアンテナであることが明らかになった。このアンテナでは 97.5% の領域で必要な電界強度を満足している。残り 2.5% のエリアで要求を割ったのは、後に示すように隣の対向車線への漏れこみを防ぐ最適化も行ったために境界近傍での電界強度が部分的に欠けてしまったためである。均一性の点でも、このアンテナで得られたスポットは強弱差わずか 2dB 程度と優秀な値を得られた。

交差点でのスポットの配置・形状は、各々の場所において相異なるものであり路側機アンテナはその場所に応じて設計しなくてはならないが、図 5, 6 は、このようなアンテナの大きさに対する設計指針を与えるものである。

次に、素子数 64 のときの情報配布スポットに

おける電界強度分布のコンター図を図 7 に示す。このコンター図ではスポット内の電界強度分布の均一性と、スポット外への漏れこみの様子をあらわしている。DBF を適用した解析計算では対向車線への漏れこみを最小限にと抑えるような最適化も併せて実施している。

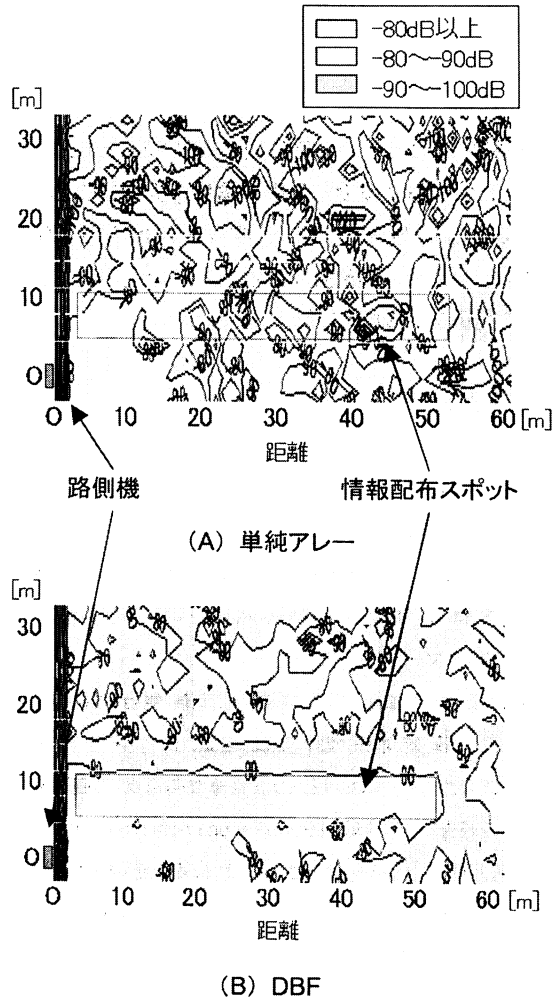


図 7 スポットおよび周囲の電界強度分布

単純アレーにおいては、スポット内のコンターはまだら模様になっており、その中のクルマに対して安定した情報配布の点で問題であることが確認できる。電界強度でも、スポット内であるかどうか判別することは難しい。

他方、DBF を用いたアンテナではスポット内の電界強度分布は図 6 で示したように均質である。さらに、スポットの入り口の地点や対向車線との電界強度に明らかな差を作り上げることに成功している。単純アレーに比べて図 3 で示したようなスポットに大きく近づいていることは明らかである。

## 6. 結論

路側機アンテナにDBF技術を用いることで、指定した領域内で安定した電界強度を実現することができることを示した。また、アンテナ小形化への要求に際して、電界強度の性能とアンテナの大きさの関係を明らかにした。

## 参考文献

- [1] 警察庁交通局交通企画課 "平成 16 年 11 月末交通事故統計"
- [2] <http://www.ahsra.or.jp/>  
AHSRA (Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association) における実証実験「スマートクルーズ 21」
- [3] 佐藤 勝善,加藤 明人,高橋 賢,藤瀬 雅行,堀松 哲夫,佐藤 純,木田 弘幸,深江 唯正, 田村 禎啓,赤澤 逸人," YRP におけるミリ波帯車々間通信実証実験の報告",信学技報,ITS2003-4,pp17-22,May.2003
- [4] 宮長健二, 山崎秀聡,高井 均,鈴木保彦,寺嶋正紀,金子繁樹,"STD-T75 規格に PSK-VP 複局方式を適用構成した路側ダイバーシチのフィールド実験結果", 信学技報,ITS2003-39,pp13-18,Jan.2004
- [5] 櫛田和光,"[招待論文]ITを活用した安全支援システムの紹介", 信学技報,ITS2003-33,pp13-19, Nov.2003
- [6] 井上 洋,牧野浩志,"走行支援道路サービスにおける DSRC の安全性信頼性設計",情報処理学会研究報告,2003-ITS-16,pp.59-63,Mar.2004
- [7] 米澤 ルミ子,小西 善彦,千葉 勇,浦崎 修治,

"フェーズドアレーアンテナにおける送信ビーム制御による近傍干渉波の抑圧," 信学論(B-II), vol. J81-B-II, no. 5, pp. 515-522, 1998

- [8] Isamu Chiba and Shinichi Morita "Space-CMA Algorithm for Array Pattern Synthesis", 2005 ISAP, (To be published.)