

Title	路車間通信システムにおける複局同時送信による実効 セル面積拡張のための分散アンテナ配置法の検討
Author(s)	今尾,勝崇;塚本,勝俊;小牧,省三
Citation	電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス. 2005, J88-C(12), p. 1082-1095
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3185
rights	copyright©2005 IEICE
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

文 論

路車間通信システムにおける複局同時送信による実効セル面積拡張 のための分散アンテナ配置法の検討

今尾 勝崇^{†a)} 小牧 省三[†] 塚本 勝俊[†]

Roadside Antenna Arrangement for Effective Cell Area Expansion in Road-to-Vehicle Communication System with Simultaneous Transmission

Masataka IMAO^{†a)}, Katsutoshi TSUKAMOTO[†], and Shozo KOMAKI[†]

あらまし 高度道路交通システムを運用する上で必要不可欠な技術として路車間通信技術があり,送受信アン テナ間での高品質な無線通信が必要とされる.特に,緊急を要する情報の送受信はリアルタイムに行われること が望ましいため、車両ができる限り継続して無線基地局を見通しつつ情報の送受信を行える環境を構築する必要 がある.しかしながら,一つのBSで構成される路車間通信セル内では,車両の高速移動に伴って頻繁に発生す るリンクプロッキングが受信信号品質に深刻な劣化を引き起こす.これに対し,複数の分散アンテナからの複局 同時送信によって一つの路車間通信セルを構成すると、マクロダイバーシチ効果により大型車両の電波の影への 進入時に発生するシャドウイングの平易かつ効果的な低減が期待されるが、その効果を最大化する分散アンテナ の配置法はこれまで検討されていない.そこで本論文では,路車間通信システムにおける実効セル面積拡張効果 の高い分散アンテナ配置法について検討を行う、交通流と多重路伝搬を考慮した受信電力に関する計算機シミュ レーションを行った結果から,千鳥及び2局ガントリ配置を用いた場合にその効果が大きく得られることを明ら かにする.

キーワード 路車間通信,分散アンテナ配置,複局同時送信,リンクブロッキング,車両トラヒック

1. まえがき

将来の道路交通システムを担うマルチメディア情報 基盤として、無線通信技術を核とした高度道路交通 システム (ITS: Intelligent Transport Systems) に 関心が集まっており,道路等の社会的な資本を有効に 活用しつつ,渋滞や交通事故,環境悪化をはじめと した諸問題を解決し,運転者の安全性や快適性を向 上させることを目標として様々な研究開発が行われて いる [1] ~ [3]. ITS の前身として 2001 年 3 月からサー ビスが開始されたノンストップ自動料金支払いシス テム (ETC: Electronic Toll Collection system)で

a) E-mail: imao@roms.comm.eng.osaka-u.ac.jp

は,狭域無線通信 (DSRC: Dedicated Short Range Communication) 規格[4] が採用されているが,これ を ETC 以外の多様な ITS サービスにも活用するため の技術的条件が同年4月に総務省により策定された.こ れにより,車載器への道路交通情報やコンテンツの配 信を実現するためのインターネット ITS [5],[6] や, 複 数のアプリケーションに対応できるITS車載器[7]をは じめとした新しいサービスの実現のための研究開発が 積極的に進められている.一方で,次世代ITSの国際 標準案としてCALM (Communication Air interface for Long and Medium range) [8] が国際標準化機構 (ISO: International Organization for Standardization)の専門委員会において検討されている.CALM では,既存のDSRCとの親和性を保ちつつ,無線LAN や携帯電話通信網などの通信メディアとの切換を可能 にしたり,車車間通信と路車間通信を連携させること によって車両間での情報共有を行うことにより,運転

[†] 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻, 吹田市 Division of Electrical, Electronic and Information Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita-shi, 565-0871 Japan



図1 路車間通信システム Fig.1 Road-to-vehicle communication system.

者にとって更に利便性の高いITSサービスが実現でき ることを目指している[9],[10].

このように,様々な ITS のサービスを将来的に展 開・運用していく上で必要不可欠な技術に路車間通信 (RVC:Road-to-Vehicle Communication)技術があ り,図1に示すように,道路上の路側ユニット(BS: Base Station)における路側アンテナと,車両に設置 した車載ユニット(MT:Mobile Terminal)におけ る車載アンテナとの間での高速かつ高品質な無線通信 が必要とされる.また,交通事故情報等の緊急を要す る情報の送受信は,可能な限りリアルタイムに行われ ることが望ましいため,道路を走行中の車両が継続し て情報の送受信を行える環境を構築する必要がある.

しかしながら,一つのBSで構成される路車間通信 セル内では,周辺車両の位置関係が時々刻々と変化し, これに伴うマルチパスフェージングやシャドウイング による伝搬路特性の大きくかつ高速な変動が発生する ため,路車間通信時のリンクブロッキングが受信信号 品質の深刻な劣化を引き起こす.これに対し,複数の BSを用いて一つの路車間通信セルを構築する分散アン テナは,一つのBSが担っていた路車間通信機能を複 数のBSに分散させる効果があり, 複局同時送信によ るマクロダイバーシチ効果が得られることから,本手 法を適用した様々な通信手法が提案されている[11]~ [14].特に,長時間にわたる通信遮断を誘引するシャド ウイングは,路車間通信中の車両が大型車両の電波の 影に進入した場合に発生し,リンクブロッキングの主 たる要因として問題となることが指摘されている[15] が,分散アンテナシステムを適用することで路車間通 信セル内に配備された複数の BS が通信対象となるた め,シャドウイング発生率の大幅な低減が期待できる.

ところで,分散アンテナから送信される電波は様々 な伝搬路を経て車載アンテナに到来するが,このうち 直接波は他の多重波による電力と比較して最も大き い電力を有するのが普通である.したがって,直接波 の存在の可否はリンクブロッキング発生率やその継続 時間に大きく寄与するため,路車間通信システムにお けるリンクブロッキング低減のためには,分散アンテ ナと車載アンテナを結ぶ見通し線の確保, すなわち各 車両が周辺の車両に影響されることなく分散アンテ ナを効率良く見通せる環境の構築が肝要であるといえ る.しかしながら,リンクブロッキング低減を目的と した分散アンテナの配置に関する検討は数少ない.文 献 [16] では, 狭域路車間通信システムにおいて, 数種 類の路側アンテナ配置に対する通信可能時間のシミュ レーション評価を行っているが,分散アンテナの配置 や設置間隔に対する評価は行われていない.また,文 献[17]では,路車間通信と車々間通信を協調させるこ とによるシャドウイング発生率の改善効果が,様々な 路側アンテナ配置に対してシミュレーションにより評 価されているが,電波伝搬を考慮した分散アンテナの 配置や設置間隔に対する最適性に関する検討は行われ ていない.

そこで本論文では, 複局同時送信を用いた路車間通 信システムにおいて,交通流と多重路伝搬を考慮した 受信電力に関する計算機シミュレーションを行い,そ の結果に基づき実効セル面積の拡大効率の高い分散ア ンテナ配置法について検討を行う.まず2.では,交通 流を特徴づけるパラメータを示し,これらを導入した 交通流モデルを構築する.また,路車間通信システム における路側アンテナからの直接波,反射波,回折波 を考慮した電波伝搬モデルを構築し、リンクブロッキ ングの定義について概説する.次に3.では,本論文で 検討を行う路車間通信システムにおける分散アンテナ 配置を示し,各分散アンテナ配置の特徴を述べる.更 に,4.において各分散アンテナ配置に対するリンクブ ロッキング特性を計算機シミュレーションにより評価 する.また,分散アンテナ配置と実効セル面積の関係 について検討を加え,その拡大効率の良い分散アンテ ナ配置を明らかにする.最後に,5.で本論文のまとめ を述べる.

2. 路車間通信システムモデル

2.1 車両トラヒックの統計モデル

図2に,本論文で用いる車両トラヒックの統計モデ ルを示す.本モデルでは片側3車線の道路を仮定し, 路側に最も近い車線を第1車線,中央分離帯に最も近



図 2 車両トラヒックの統計モデル Fig. 2 Statistical model of vehicle traffic.

表1 交通流パラメータ Table 1 Traffic flow parameters.

Lane		1	2	3
	Vehicle speed [km/h]	80	95	110
Free	Mean time headway [s]	3.5	2.5	2.0
flow	Erlang phase	7	4	3
	LVR [%]	80	70	40
Congested flow	Vehicle speed [km/h]	10	15	20
	Mean time headway [s]	5.5	5.0	4.5
	Erlang phase	6	6	6
	LVR [%]	50	40	30

い車線を第3車線と定義する.また,次の三つのパラ メータを用いて交通流を特徴づける.まず,同一車線 を走行する車両の速度 v を正規分布に従って変化させ る.次に,各車線の車間距離(図2中の $\tau_i[s]$)の分布 に,確率密度関数が

$$p(\tau_i) = \frac{(k\mu)^k}{(k-1)!} \tau_i^{k-1} e^{-k\mu\tau_i}$$
(1)

で与えられるアーラン分布を導入する [18].ただし, μ [s] は平均車頭時間, k は位相パラメータである.k は 交通流のランダム性を表す指標であり,この値を設定 することにより自由流若しくは渋滞流のときに適した 統計モデルを容易に構築することが可能となる.例え ば,kを小さくすると交通量が小さく,各車両がほぼ 独立して走行している状態が表現でき,kを大きくす ると各車両の車頭間隔は一定間隔に近づくため交通量 の大きい状態が表現できる [19].更に,大型車と普通 車の2車種を考え,車線ごとの全車両数に占める大型 車の割合(大型車混入率(LVR:Large-sized Vehicle Rate))を導入し,その値は車線間で独立に変化させ



Fig. 3 Radio propagation model.

るものとする.

本論文では,表1に示す交通流モデルにおける交通 流パラメータを用いて,実際の交通流[20]に基づいた 二つの交通流すなわち自由流と渋滞流を想定して計算 機シミュレーションを行う.自由流では,路側に近い 第1車線ほど車両速度を遅く,位相パラメータ及び大 型車混入率を大きく設定し,車両ごとのランダム性が 失われた混雑する傾向を与えている.一方,渋滞流で は,各パラメータの値に大きな差が現れないように設 定して,いずれの車線においても混雑し,各々の車両 の振舞いは同様となるようにしている.本論文では, ある車両に対して,まず大型車混入率に基づいて普通 車または大型車の車種を割り当て,車両速度として正 規分布,次車両までの車間距離としてアーラン分布に 従う乱数を発生させることにより十分に長い車列を構 築し,この車両トラヒックを用いて計算機シミュレー ションを行う.

2.2 電波伝搬モデル

本論文では,路車間通信時に用いる周波数帯をDSRC の標準規格[4]に基づいて 5.8 GHz と仮定する.また, 本周波数帯ではその波長が周辺に存在する車両や道路 の規模と比較して十分に短い値であるため,車両に到 来する電波を幾何光学的に重ね合わせる電波伝搬モデ ルを採用する.

図3に,直接波,反射波,回折波を導入した電波伝 搬モデルを示す.路車間通信を行う車両を対象車両 (target vehicle)と呼び,路側アンテナと対象車両の 車載アンテナの見通し線を遮る位置に存在する車両を 遮へい車両(block vehicle)と呼ぶ.同図では,BSは



Fig. 4 Knife-edge diffraction model.

路側または中央分離帯に等間隔に配置されており,隣 接する BS で区切られた各々の区間が,一つの BS がカ バーする通信ゾーンとなる.ただし,路側アンテナと してパッチアンテナ[21]を仮定し,最大放射方向が通 信ゾーンの中心すなわち第2車線における通信ゾーン の中点に位置する方向となるように,方位角 θ 及び傾 斜角 ϕ を次のように設定する.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{w_s + 3/2 \times w_l}{I/2} \right) \text{ [rad]}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{h_b}{I/2} \right) \text{ [rad]}$$
(2)

ただし,w_s,w_l,h_bはそれぞれ路側または中央分離帯 幅,車線幅,路側アンテナ高であり,Iは隣接するBS 間の距離である.また,車載アンテナには無指向性ア ンテナを用い,各車両のダッシュボード上に設置され るものとする.路側アンテナから到来する電波として 直接波,路面反射波,及び隣接車線を走行する車両に おける反射波(以下では車両反射波と呼ぶ)を仮定し た場合,これらの3波による総合受信電力P_{d+r}は次 式で与えられる.

$$P_{d+r} = P_t + G_t + G_r + 10 \log_{10} \left| D_d \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{D_{li} R_{li} \lambda}{4\pi r_{li}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (r_{li} - r_d)} \right|^2 \quad [dBm] \qquad (3)$$

ここで, P_t [dBm] は送信電力, G_t [dB] 及び G_r [dB] は 路側及び車載アンテナの利得, D_d 及び D_l は直接波及 び路面/車両反射波に対する指向性利得, r_d 及び r_l は 直接波及び路面/車両反射波の光学的距離, R_l は路面/ 車両反射係数, λ は波長である[22].また,nの値は車 両に到来する大地反射波及び車両反射波の数の和であ る.ただし,路側アンテナと車載アンテナの位置関係 によって車両反射波の数は変化するが,本モデルでは 発生し得るすべての車両反射波を考慮する.また,複



数の車両を経由する多重反射波の発生頻度は非常に低いため,ここでは無視できるものとした.

路車間通信システムでは,周辺車両の位置関係は時々 刻々と変化するため,対象車両で受信すべき直接波や 路面反射波が他の車両,特に大型車によって遮られる 場合が頻繁に発生する.しかしながら,遮へい車両の 稜線における回折波が、通信を継続するために有効な 電力を有していれば通信遮断を回避できる.このこと は理論的 [23], 実験的 [24] にも示されているため,本 モデルでは直接波と反射波に加えて大型車の稜線にお ける電波回折を導入する.また,大型車の稜線におけ る回折損はナイフエッジ回折理論により近似できるこ とが実験的に確認されており[25], 簡便な解析が可能 であることから,本モデルではナイフエッジ回折理論 を適用する、図4に、三次元の幾何光学近似を用いた 場合のナイフエッジ回折モデルを示す [26].多重回折 波が有する電力は非常に小さいため,これを無視でき るものとする場合,回折波により得られる電力Pdiff は

$$P_{diff} = P_d - P_{att} \quad [dBm] \tag{4}$$

で与えられる.ただし, P_d は直接波電力であり, P_{att} は次式で与えられるナイフエッジ回折損である.

$$P_{att} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} + C^{2}(\nu) - C(\nu) + S^{2}(\nu) - S(\nu) \right\} \right] \text{ [dB]}$$
(5)

ここで, $C(\nu)$ 及び $S(\nu)$ はそれぞれフレネル余弦積分 及びフレネル正弦積分である.また, ν はクリアラン ス係数であり,図4中の d_1 , d_2 ,及び余剰高 h_e を用 いて次式で表される.

$$\nu = h_e \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$
(6)

クリアランス係数 ν に対するナイフエッジ回折損 P_{att} の変化の様子を図5に示す.同図より,直接波が遮ら れた状態 ($\nu > 0$) であっても, ν が小さい範囲ではナ イフエッジ回折損が比較的小さいことが分かる.

回折波電力は,直接波や反射波の電力と比較して非 常に小さいため,回折波と直接波,回折波と反射波に よる干渉は無視できるものと仮定すると,直接波,反 射波,回折波を考慮した対象車両における総合受信電 力 P_R は

$$P_{R} = \begin{cases} P_{d+r} \quad [\text{dBm}] \\ (\text{w/ direct and/or reflection path}) \\ P_{diff} \quad [\text{dBm}] \\ (\text{w/o direct and reflection path}) \end{cases}$$
(7)

で得られる.

2.3 リンクブロッキングの定義

本論文では,対象車両における受信 CNR (Carrierto-Noise power Ratio)が所要BER(Bit Error Rate)を達成するための所要 CNR を下回るとき,こ れをリンクブロッキングと定義し,リンクブロッキン グの発生頻度を表すリンクブロッキング率 pL を次の ように定義する.

$$p_L =$$
 $\langle \frac{通信ゾーン通過時のリンクブロッキング継続時間の総和}{通信ゾーン通過時間} \rangle$
(8)

ただし, 〈・〉は全車両の集合平均である.

3. 分散アンテナの配置方法

分散アンテナから複局同時送信を行い,一つの路 車間通信セルを構成する方法は,車両の前後のBSか ら電波を送信する手法がこれまでに検討されている [11],[12]が,本論文では車載器をダッシュボード上に 設置するものと仮定しており,車両後方から到来する 電波の受信は困難であるため,車両前方の複数のBS から送信する手法を適用する.

図6~図8に,本論文で検討対象とする分散アンテ ナを用いた路車間通信セル構成法を示す.図6は道路 の片側からの送信を仮定した場合(片側BS配置)で あり, BS を路側に均等に配置したものを (a) 路側均





Fig. 8 Gantry BS arrangement.

等配置,中央分離帯に均等に配置したものを(b)中央 均等配置と呼ぶ.また,図7は道路の両側からの送信 を仮定した場合(両側BS配置)であり,BSを対面に 配置したものを (a) 向合せ配置, 交互に配置したもの を (b) 千鳥配置と呼ぶ.更に,図8は道路上のガント リからの送信を仮定した場合(ガントリBS 配置)で あり,中央車線上に配置したものを(a)1局ガントリ配 置,各車線間に配置したものを(b)2局ガントリ配置 と呼ぶ.これらの分散アンテナ配置法は,ガントリ配 置以外はいずれも道路照明の標準的な配置法として一 般的に用いられているものである[27].

更に, BSの設置コストの観点から片側 BS 配置と両 側 BS 配置において公平な比較を行うため,本論文で はBS密度(BS density)をパラメータとして変化さ せる.ただし,BS密度とは車線の延長方向100m当り のBSの数として定義する.例えば,BS密度が2の場 合の路側アンテナ配置は図9のようになり,路側片側 配置では 50m 間隔,向合せ配置では 100m 間隔で BS が配置されている状態を表す.

論文 / 路車間通信システムにおける複局同時送信による実効セル面積拡張のための分散アンテナ配置法の検討



4. シミュレーション

本章では,2.1で述べた手法により構築した車両トラ ヒックに基づき,3.で示した各分散アンテナ配置に対 する普通車のリンクブロッキング特性を計算機シミュ レーションにより評価する.また,分散アンテナ配置 と実効セル面積の関係について検討を加え,その拡大 効率の良い分散アンテナ配置を明らかにする.

表2に,本論文で用いたシミュレーション条件を示 す.本論文では路車間通信システムにおけるダウンリ ンクを検討対象とし,DSRCの標準規格[4]に基づいて 変調方式及び所要誤り率をそれぞれQPSK及び10⁻⁵ に設定した.また,隣接する路車間通信セルから到来 する電波による干渉は,異なる周波数チャネルの繰返 し利用[28],[29]等により無視できるものと仮定した. 更に,路側アンテナ高として,現行のETCで用いら れている標準的な路側アンテナ高である6m,及び高 速道路における道路照明の一般的な設置高である12m を採用した.

4.1 リンクブロッキング率

4.1.1 自由流におけるリンクブロッキング率

図10及び図11に,路側アンテナ高が6mと12mの 場合の自由流におけるBS密度に対するリンクブロッ キング率(LBR:Link-Blocking Rate)をそれぞれ示 す.ただし,各図中の(a),(b)及び(c)はそれぞれ第1 車線,第2車線及び第3車線のリンクブロッキング率 である.

各図より,リンクブロッキング率はいずれの分散ア ンテナ配置においても,BS密度を大きくするにつれて

表 2	シミュレーション条件
Table 2	Simulation parameters.

	-
Tx frequency f	$5.8\mathrm{GHz}$
Tx power P_t	$10\mathrm{dBm}$
Tx/Rx antenna gain G_t,G_r	2 dBi
Rx bandwidth	$5\mathrm{MHz}$
Rx noise figure	$10\mathrm{dB}$
Modulation method	QPSK
Required BER	10^{-5}
Number of lane	3
Number of vehicle kind	2 (Std/Lrg)
BS antenna height h_b	6.0/12.0 m
Lane width w_l	4.0 m
Roadside/Mall width w_s	2.0 m
Vehicle length	(Std) 4.5 m (Lrg) 10.0 m $$
Vehicle width	(Std) $2.5~\mathrm{m}$ (Lrg) $2.5~\mathrm{m}$
Vehicle height	(Std) 1.5 m (Lrg) 4.0 m
Dashboard height	(Std) 1.0 m (Lrg) 2.5 m

Tx:Transmitter, Rx:Receiver

Std:Standard-sized vehicle, Lrg:Large-sized vehicle

揺らぎつつ減少する傾向があることが分かる.この結 果より,分散アンテナシステムでは複数の路側アンテ ナから到来する電波による干渉が頻繁に発生してしま うという欠点を有するものの,送信ダイバーシチによ る路側アンテナの見通し確率改善の効果が支配的であ るといえる.また,本論文における計算機シミュレー ションでは約30000台の車両を対象としたが,BS密 度に対するリンクブロッキング率の揺らぎは車両台数 を増加させても同様の傾向が得られた、一方、回折波 を考慮せず,直接波,路面反射波,及び車両反射波の みを考慮して計算機シミュレーションを行った場合に はこの揺らぎはほとんど現れないことを確認した.し たがって,この揺らぎは回折波の電力による影響であ ると考えられる.すなわち,受信車両と路側アンテナ の距離が離れるにつれて回折角は小さくなるため回折 損が小さくなる一方で,距離減衰による受信電力の低 下も発生し,これらの支配関係は分散アンテナの配置 や間隔に対して単調でない振舞いを行うため、受信電 力が変化することによるものと考えられる.

次に,各分散アンテナ配置間でのリンクブロッキン グ率特性について考察を加える.

(1) 片側 BS 配置の特性

図10より,路側アンテナが低い場合の路側均等配置 と中央均等配置の間で各車線のリンクブロッキング率 を比較すると,路側均等配置では第3車線ほど,また 中央均等配置では第1車線ほど劣化していることが分



図 10 リンクブロッキング率(自由流, $h_b=6m$) Fig. 10 Link-blocking rate (Free flow, $h_b=6m$).



図 11 リンクブロッキング率(自由流, $h_b=12m$) Fig.11 Link-blocking rate (Free flow, $h_b=12m$).



かる.これは,BSと対象車両の間に存在する車両が 多くなるほど,見通し線が遮断される可能性が高くな るからである.また,この特性は路側アンテナを高く しても大きな変化がないことが図11より分かる.こ れは,路側アンテナを高く設置すると見通し線の遮断 率は低減するものの,路側アンテナと対象車両の車載 アンテナとの距離が長くなることに起因する電力減衰 により,その低減が相殺されるからである.更に,BS 密度を1から4すなわちBS間隔を100mから25mに 縮小することにより,リンクブロッキング率の値を最 大で1/10程度に抑えられることが同図より分かる.

(2) 両側 BS 配置の特性

図10及び図11より,向合せ配置と千鳥配置におけ る各車線のリンクブロッキング率を比較すると,ある BS密度におけるBS間隔は片側BS配置の2倍となっ ているにもかかわらず,ほとんどのBS密度において 片側BS配置の場合よりも良いリンクブロッキング特 性が得られていることが分かる.これは,対象車両と 遮へい車両の位置関係は短時間のうちにはあまり変化 がないため,片側BS配置では通信ゾーン内において 同一の遮へい車両によりシャドウイングを受け続ける 傾向があるのに対し,両側BS配置では路側と中央分 離帯に配置されたBSに対してはそれぞれ異なる車両 がシャドウイングを引き起こすため,双方のBSが同 時に遮へいされる可能性が非常に低くなるからである.

次に,図10より路側アンテナが低い場合の向合せ配 置と千鳥配置における各車線のリンクブロッキング率 に注目すると,第1車線と第3車線においては両者に 大差はないが,第2車線では千鳥配置の方が良い特性 が得られていることが分かる.これは,千鳥配置は向 合せ配置における中央分離帯側のBSを,その間隔の 半分だけオフセットした配置にすぎないため,第1車 線と第3車線に与えるリンクブロッキングの改善効果 はほとんどないものの,第2車線に対しては図12に示 すように幾何学的に優れた配置法となっているからで ある.すなわち,第2車線における大型車両が直後を 走行する対象車両へ引き起こすシャドウイングの影響 は,片側BS配置を向合せ配置に変更しても幾何学的 位置関係により全く改善されないが,千鳥配置はこの 影響も軽減する効果があるからである.更に,路側ア ンテナを高く設置すると第2車線の車両は隣接車線の 大型車によるシャドウイングの影響を受けなくなるた め,この効果がより顕著に現れていることが図11より 分かる.また,BS密度を1から4すなわちBS間隔を 200mから50mに縮小することにより,リンクプロッ キング率の値を最大で1/20程度に抑えられることが 同図より分かる.

(3) ガントリBS 配置の特性

図10より,路側アンテナが低い場合の1局ガント リ配置における各車線のリンクブロッキング率を比較 すると,第1車線では路側均等配置のものと、また第 3車線では中央均等配置のものとほぼ同様の振舞いを することが分かる.これは,第1車線における大型車 両が直後を走行する対象車両へ引き起こすシャドウイ ングの影響は,路側均等配置を1局ガントリ配置に変 更しても幾何学的位置関係により全く改善されないた めであり,第3車線の場合も同様の理由による.また, この特性は路側アンテナを高くしても大きな変化がな いことが図11より分かる.更に,BS密度を1から4 すなわちBS間隔を100mから25mに縮小することに より,リンクブロッキング率の値を最大で1/10程度 に抑えられることが同図より分かる.

次に,図10において路側アンテナが低い場合の2局 ガントリ配置における各車線のリンクブロッキング率 に注目すると,BS密度が3より大きくなるといずれ の車線においても最も良いリンクブロッキング特性が 得られていることが分かる.これは,2局ガントリ配 置は車線間にBSを配置することによってシャドウイ ングの影響を極めて低く抑えられることと,BS間隔 が短いときは仮に見通しが遮断された場合でも回折波 による比較的大きな電力を得ることができることに起 因する.また,BS密度を1から4すなわちBS間隔を 200mから50mに縮小することにより,リンクブロッ キング率の値を最大で1/100程度にまで大きく抑えら れることが同図より分かる.

しかしながら,2局ガントリ配置における各路側ア ンテナの傾斜角は,路側や中央分離帯に路側アンテナ を配置する場合と比較して大きい値となっているため, 路側アンテナを高くすると通信ゾーンがより縮小され るという欠点を有する.したがって,路側アンテナが 高い場合は2局ガントリ配置におけるリンクブロッキ ング特性が悪化していることが図11より分かる.ま た,第2車線においては向合せ配置の場合と同様に, 幾何学的位置関係によりガントリ上の2本の路側アン テナが同時に遮断されるため,千鳥配置の場合よりリ ンクプロッキング率が悪化していることが同図より分 かる.

以上の結果から,自由流に対しては千鳥配置と2局 ガントリ配置が,最もリンクブロッキング率を低く抑 えられる分散アンテナ配置法であることが分かる.

4.1.2 渋滞流におけるリンクブロッキング率

図13及び図14に,路側アンテナ高が6mと12mの 場合の渋滞流におけるBS密度に対するリンクプロッ キング率をそれぞれ示す.ただし,各図中の(a),(b) 及び(c)はそれぞれ第1車線,第2車線及び第3車線 のリンクプロッキング率である.

各図より,リンクブロッキング率はいずれの分散ア ンテナ配置においても,BS密度を大きくするにつれ て揺らぎつつ減少する傾向があることが分かる.この 結果より,やはり渋滞流の場合も自由流と同様に,複 数の路側アンテナからの到来波による電波干渉に対し て送信ダイバーシチによる路側アンテナの見通し確率 改善の効果が支配的であるといえる.また,BS密度 に対するリンクブロッキング率の揺らぎの要因も自由 流の場合と同様であると考えられる.

次に,各分散アンテナ配置間でのリンクブロッキン グ率特性について考察を加える.

(1) 片側 BS 配置の特性

図13及び図14より,路側均等配置と中央均等配置 の間で各車線のリンクブロッキング率を比較すると, 路側アンテナを高く設置することで路側均等配置の第 2車線のリンクブロッキング率が特に大きく改善され ることが自由流と異なる特性として分かる.これは, 渋滞流では,路側アンテナと対象車両の車載アンテナ との距離が長くなることに起因する電力減衰によるリ ンクブロッキングの増加に比べ,路側アンテナを高く 設置することによる見通し線の遮断率の低減が支配的 となるためであると考えられる.また,BS密度を1か ら4すなわちBS間隔を100mから25mに縮小するこ とにより,自由流の場合と同様にリンクブロッキング 率の値を最大で1/10程度に抑えられることが同図よ リ分かる.

(2) 両側 BS 配置の特性

図13及び図14より,向合せ配置と千鳥配置の間で 各車線のリンクブロッキング率を比較すると,やはり 自由流の場合と同様の理由により,あるBS密度にお



図 13 リンクブロッキング率 (渋滞流, $h_b=6m$) Fig. 13 Link-blocking rate (Congested flow, $h_b=6m$).



図 14 リンクブロッキング率(渋滞流, $h_b=12m$) Fig.14 Link-blocking rate (Congested flow, $h_b=12m$).

ける BS 間隔は片側 BS 配置の2倍となっているにもか かわらず,ほとんどの BS 密度において片側 BS 配置 の場合よりも良いリンクブロッキング特性が得られて いることが分かる.特に,第2車線では路側アンテナ を高く設置することで隣接車線からのシャドウイング が発生しなくなるため,幾何学的位置関係により2本 の BS までの見通し線が同時に遮られる向合せ配置や 2局ガントリ配置に比べ,千鳥配置のリンクブロッキ ング率が最も良い特性を示していることが図14より 分かる.また,BS 密度を1から4すなわち BS 間隔を 200m から 50m に縮小することにより,自由流の場合 と同様にリンクブロッキング率の値を最大で1/20 程 度に抑えられることが同図より分かる.

(3) ガントリ BS 配置の特性

路側アンテナが高い場合の2局ガントリ配置におけ る各車線のリンクブロッキング率は自由流と異なる振 舞いを示しており,第1車線と第3車線におけるリン クプロッキング率が,路側アンテナが低い場合のもの と比較して大きく改善されていることが図13及び図 14より分かる.これは,路側片側配置の場合と同様に, 渋滞流では路側アンテナを高く設置することによる見 通し線の遮断率の低減が支配的となるためであると考 えられる.

以上の結果から,渋滞流についても千鳥配置と2局 ガントリ配置が,リンクブロッキング率の改善に対し て最も効果のある分散アンテナ配置法といえる.

4.2 平均リンクブロッキング継続時間

前節では,自由流と渋滞流におけるリンクブロッキ ング率を評価したが,異なるアンテナ配置間で等しい リンクブロッキング率が得られても,多数の短時間リ ンクブロッキングが発生しているのか,数回の長時間 リンクブロッキングが発生しているのかにより,通信 品質は大きく異なる.そこで,本節では平均リンクブ ロッキング継続時間(MLBD: Mean Link-Blocking Duration)について検討を加える.

図15及び図16に,自由流と渋滞流における全車線のBS密度に対する平均リンクブロッキング継続時間をそれぞれ示す.渋滞流では車線間の速度差が小さく,いったん大型車の電波の影に進入するとその状態を脱するまでに長時間を要するため,平均リンクブロッキング継続時間は自由流のものと比べて全体的に大きな値を示していることが同図より分かる.また,図15及び図16より,路側均等配置と中央均等配置における平均リンクブロッキング継続時間は,BS密度が2(BS



図 15 平均リンクブロッキング継続時間(自由流) Fig. 15 Mean link blocking duration (Free flow).

間隔=50m)までは減少し、この値を超えるとBS密度の増加に従って再び悪化していることが分かる.このことは、同アンテナ配置におけるリンクブロッキング率がBS密度の増加に対してほぼ単調に減少していたことを勘案すると、BS密度が2までは長時間のリンクブロッキングの改善が支配的であり、この値を超えると長時間のリンクブロッキングはほとんど解消されないことを示していると考えられる.

これに対し,両側BS配置における平均リンクブロッ キング継続時間は,BS密度の増加に伴って単調に減 少しており,BSアンテナが低く設置されている場合 はBS密度を2.5以上(BS間隔≦80m),BSアンテナ が高く設置されている場合はBS密度を2以上(BS間



図 16 平均リンクブロッキング継続時間(渋滞流) Fig. 16 Mean link blocking duration (Congested flow).

隔≤100m)とすることにより,BS密度が4(BS間隔 =50m)の場合と同程度の平均リンクブロッキング継 続時間が得られることが同図より分かる.また,向合 せ配置と2局ガントリ配置の場合は,BS密度が2を 下回ると平均リンクブロッキング継続時間が急激に悪 化し,その特性は2局ガントリ配置においてより顕著 に現れていることが分かる.特に,BS密度が2から1 になると,平均リンクブロッキング継続時間は自由流 で最大6倍,渋滞流で最大8倍にまで悪化することが 分かる.これは,2局ガントリ配置におけるリンクブ ロッキングは同一車線を走行する大型車両が引き起こ し,大型車両の電波の影を抜け出すのに長時間を要す るためである.一方,千鳥配置の場合はBS密度が2 を下回っても平均リンクブロッキング継続時間は片側 BS 配置と同様の振舞いを行い, BS 密度を2から1に することによる平均リンクブロッキング継続時間の悪 化の割合は,1.5倍から3倍程度に抑えられているこ とが分かる.これは,前節で述べたように,幾何学的 位置関係により2本のBSまでの見通し線が同時に遮 られる向合せ配置や2局ガントリ配置に対し,千鳥配 置は継続してリンクブロッキングが発生する頻度を小 さく抑えられることによるものである.

以上より,同程度のリンクブロッキング率であって も2局ガントリ配置より千鳥配置の方が平均リンクブ ロッキング継続時間を小さくでき,連続的な通信誤り を抑える観点から千鳥配置が優れた分散アンテナ配置 法であるといえる.

4.3 実効セル面積拡張率

図17及び図18に,自由流と渋滞流における全車線の BS 密度に対する実効セル面積拡張率(Effective cell area expansion ratio)をそれぞれ示す.ただし,実 効セル面積とは,路車間通信セル内において所要CNR を満たす通信エリア面積として定義し,セル内の分散 アンテナから到来する多重路伝搬による電波干渉や大 型車両によるシャドウイングを考慮している.また, 実効セル面積拡張率はリンクブロッキングを低減する ことによる路車間通信セル内の実効セル面積の拡大 率とする.ただし,実効セル面積拡張率は路側均等配 置における実効セル面積を基準とし,同配置を用いた 場合に,路車間通信セル内すべてにおいて所要CNR を満たすために必要な実効セル面積拡張率を"upper bound"として各図中に示した.

図17及び図18より,中央均等配置の場合は,自由 流,渋滞流ともに実効セル面積拡張率が1を下回る場 合が多く,ほとんどのBS密度に対して実効セル面積 の拡大効果が得られないことが分かる.これは,中央 均等配置はBSを路側均等配置と等しい間隔で中央分 離帯に配置したものにすぎず,第1車線と第3車線の リンクブロッキング特性が入れ替わるほかに特別な効 果がないからである.また,1局ガントリ配置の場合 は,渋滞流においてBSアンテナが低く設置されてい る場合のみ実効セル面積の拡大効果が得られているが, これ以外の場合は拡大率がほとんど1.03以下にとど まっており,実効セル面積の大きな改善が得られてい るとは言いがたい.

これに対し,千鳥配置または2局ガントリ配置を用 いてBS密度を2.5以下とすると,BSアンテナが低い



図 17 実効セル面積拡張率(自由流) Fig. 17 Effective cell area expansion ratio (Free flow).

場合は BS 密度の減少に従って実効セル面積拡張率が 大きくなる傾向があり, BS 密度が1の場合に自由流 で1.1, 渋滞流で1.2の拡大率が得られていることが 図17(a) 及び図18(a) から分かる.また,千鳥配置の 場合,この効果は BS アンテナを高く設置しても維持 でき,BS 密度が1の場合に自由流で1.13,渋滞流で 1.15の拡大率が得られることが図17(b) 及び図18(b) より分かる.これは,BS を道路に対して非対称に配 置することによる効果であり,BS アンテナ高にかか わらず高い実効セル面積拡大効果が得られる分散アン テナ配置法といえる.

一方,2局ガントリ配置の場合にBSアンテナ高を高 く設置すると,BS密度を小さくすることによる実効 セル面積の拡大効果はほとんど得られなくなる.これ



図18 実効セル面積拡張率(渋滞流) Fig.18 Effective cell area expansion ratio (Congested flow).

は、2局ガントリ配置においてBSアンテナ高が高い場 合に自車線の大型車によるシャドウイングが発生する 場合は、大型車の深い電波の影に進入しているときで あり、BS密度にかかわらず長時間のシャドウイング を受け続ける傾向が大きいからであると考えられる.

以上から,交通流やBSアンテナ高による影響が小 さい千鳥配置が,実効セル面積の拡張に効果が高いこ とが分かる.

5. む す び

本論文では,路車間通信システムにおいて,分散ア ンテナによる複局同時送信を用いた実効セル面積の拡 大効果が高いアンテナ配置を明らかにするため,分散 アンテナ配置法として片側BS配置,両側BS配置,ガ ントリ BS 配置を取り上げ, 交通流と多重路伝搬を考 慮した計算機シミュレーションを行ってそれらのリン クプロッキング特性を評価した.その結果,以下のこ とが明らかになった.

- リンクブロッキング率は,自由流,渋滞流ともに千 鳥配置または2局ガントリ配置を用いることで低く抑 えられ,BS間隔を200mから50mに縮小することによ る改善率は自由流の場合でそれぞれ最大1/20,1/100 となる.

- 平均リンクブロッキング継続時間は,千鳥配置を 用いることで BS 間隔にかかわらず低く安定した値が 得られ,BS 間隔を 100m 以上にすることによる平均 リンクブロッキング継続時間の悪化の割合が最も小さ く抑えられる.

- 実効セル面積の拡大効果は,交通流やBSアンテ ナ高による影響が小さい千鳥配置が最も大きく,路側 均等配置の実効セル面積に対してBS密度が1の場合 に自由流で最大1.13,渋滞流で最大1.2の拡大率が得 られる.

今回の検討では,分散アンテナの指向方向をサービ スゾーンの中央方向に固定したが,この指向方向の最 適化を今後の課題としている.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助 金基盤研究 (B)14350202の補助によるものである.

文 献

- M. Fujise, "Radio over fiber transmission technology for ITS and mobile communications," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E84-A, no.8, pp.1808–1814, Aug. 2001.
- [2] R. Kohno, "Signal processing and ASIC's for ITS telecommunications," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E85-A, no.3, pp.566–572, March 2002.
- [3] 岩田武夫,田口清貴,田中明彦,植田浩司,枝元祐介,大澤 晋,小澤慎治,長谷川孝明,中村博行,"道路の未来を切り開 く ITS,"電学誌,vol.124, no.12, pp.762–781, Dec. 2004.
- [4] **電波産業会**, ARIB STD-T75, Sept. 2001.
- [5] http://www.internetits.org/
- [6] 砂原秀樹, 佐藤雅明, 植原啓介, 青木邦友, "IPCar: イン ターネットを利用した自動車プロープ情報システムの構 築," 信学論 (B), vol.J85-B, no.4, pp.431-437, April 2002.
- [7] 岡賢一郎,伊川雅彦,西脇剛史,津田喜秋,毛利徳彦, "マル チアプリケーションを実現する DSRC 応用車載器," 三菱 電機技報, vol.78, no.9, pp.39–42, Sept. 2004.
- [8] http://www.its-jp.net/ISODB/
- [9] 小佐井潤,武藤健二,松ヶ谷和沖,難波秀彰,"車載ルータに よるシームレスローミングの実現,"信学技報,ITS2003-20, Sept. 2003.
- [10] V. D. Hoang, Z. Shao, and M. Fujise, "Multi hops internet connection for vehicles outside RSE coverage area," Proc. ITST2004, pp.298–302, July 2004.

論文 / 路車間通信システムにおける複局同時送信による実効セル面積拡張のための分散アンテナ配置法の検討

- [11] 福井良太郎,柿田法之,屋代智之,重野 寛,松下 温, "道路照明を用いた連続無線ゾーン構成法による路車間 通信システムの実用性の評価,"情処学論,vol.43, no.12, pp.3931–3938, Dec. 2002.
- [12] 時永潤也,和田友孝,斉藤洋一,"複局送信による路車間通 信システムの伝送品質改善効果,"2005 信学総大, A-17-7, March 2005.
- [13] K. Sato and M. Fujise, "Effect of diversity in a millimeterwave ROF road-vehicle communication system," Proc. ITST2004, pp.264–268, July 2004.
- [14] 山崎 泰,安永正幸,岡本栄晴,宮本良一,"路車間通信における無線ゾーン動的制御システムに関する一検討,"2001 信学総大, A-17-40, March 2001.
- [15] 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,"信学技報,ITS2003-118, March 2004.
- [16] C. Wietfeld, "Performance evaluation of vehicle-roadside communication systems in shadowing & multipath fading environments," Proc. IEEE VTC, vol.2, pp.947–952, July 1995.
- [17] 森田洋介,長谷川孝明, "シャドウイング回避のための路 車間・車々間統合通信について,"信学技報, ITS2002-32, Nov. 2002.
- [18] M. Katayama, "Time headway distribution of traffic flow," Proc. JSCE, no.189, pp.107–115, May 1971.
- [19] 佐佐木綱, 交通流理論, pp.4-9, 技術書院, 1973.
- [20] 電波産業会, 5.8 GHz 帯における移動業務と他業務の周波 数共用技術の調査検討報告書, pp.189–198, March 2002.
- [21] 後藤尚久, 図説アンテナ, pp.194-217, コロナ社, 1995.
- [22] N. Taguchi, T. Kimura, T. Horimatsu, A. Kato, and M. Fujise, "Propagation characteristics of 60 GHz millimeter wave for ITS inter-vehicle communications (3)," Proc. ITST2000, pp.259–262, Oct. 2000.
- [23] 森本恵介,梶原昭博,"回折波による見通し外車両検知につ いて、"2001 信学ソ大(基礎・境界), A-17-15, Sept. 2001.
- [24] A. Yamamoto, K. Ogawa, A. Inui, K. Nagao, T. Horimatsu, A. Kato, and M. Fujise, "Simple propagation models for ITS inter-vehicle communications," Proc. ITST2001, pp.303–308, Oct. 2001.
- [25] 荒木 正,志村竜宏,石河伸一,"復局送信を用いた 5.8 GHz 帯路車間通信の電波伝搬特性,"1998 信学ソ大(基礎・境 界), SAD-2-20, Sept. 1998.
- [26] S. R. Saunders, Antennas and propagation for wireless communication systems, pp.45–51, John Wiley & Sons, 1999.
- [27] 高井潤三, 金原 正, 田島利男, 道路照明, pp.36-41, 技術 書院, 1966.
- [28] 福原忠行,石川博康,杉山敬三, 篠永英之,"連続的無線セル 構成における DSRC 通信実験,"2001 信学ソ大 (基礎・境 界), A-17-8, Sept. 2001.
- [29] 平岩賢志,坂本敏幸,森 光正,野明俊道,西澤隆彦, "DSRC(ARIB STD-T75 準拠) システムの実装及び評価," 信学論(A), vol.J86-A, no.12, pp.1382–1393, Dec. 2003.

(平成17年4月6日受付,7月11日再受付)



今尾 勝崇 (学生員)

2002 阪大・工・通信卒.2003 同大大学院工 学研究科通信工学専攻博士前期課程了.現在, 同大学院工学研究科電気電子情報工学専攻博 士後期課程在学中.無線通信システムの研究 に従事.IEEE学生員.



塚本 勝俊 (正員)

1982 阪大・工・通信卒.1984 同大大学院修 士課程了.同大学助手,講師を経て,現在, 同助教授.光通信方式,無線通信方式,光電 波融合通信方式に関する研究に従事.工博. ITE,IEEE 各会員.1996 本会論文賞,2004 同業績賞受賞.



小牧 省三 (正員:フェロー)

1970 阪大・工・通信卒.1972 同大大学院 修士課程了.同年電電公社(現NTT)入社. 1990 大阪大学助教授,1992 同大学教授.無 線通信方式並びに光通信方式に関する研究に 従事.工博.IEEEシニア員.1977 本会論文 賞,1994 同業績賞受賞.