

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	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

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)} 塚本 勝俊[†] 小牧 省三[†]

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ブ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

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替を可能にしたり、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

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

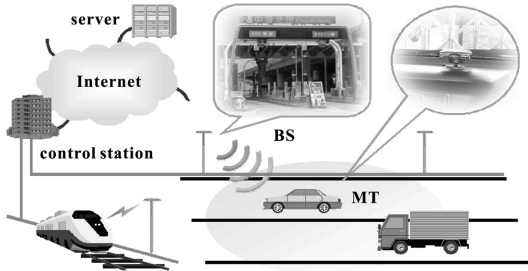


図1 路車間通信システム

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び見通し線の確保、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

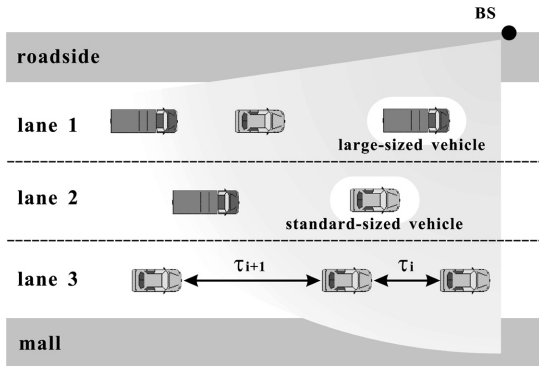


図2 車両トラフィックの統計モデル
Fig.2 Statistical model of vehicle traffic.

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

Lane		1	2	3
Free flow	Vehicle speed [km/h]	80	95	110
	Mean time headway [s]	3.5	2.5	2.0
	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 τ_i [s]) の分布に、確率密度関数が

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

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

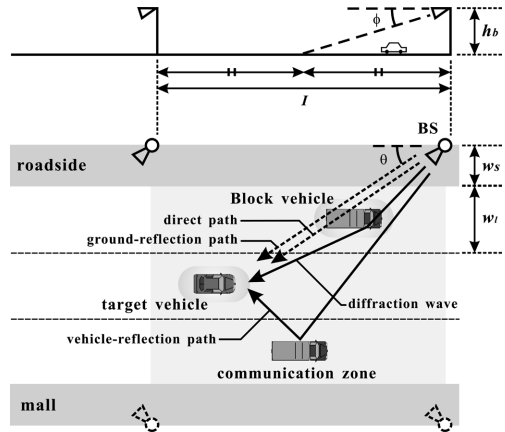


図3 電波伝搬モデル
Fig.3 Radio propagation model.

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、この車両トラフィ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

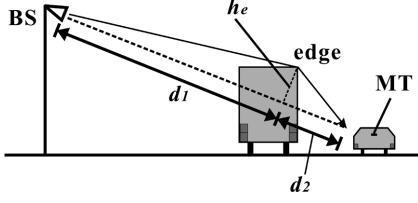


図4 ナイフエッジ回折モデル
Fig. 4 Knife-edge diffraction model.

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心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。

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

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

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。

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

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

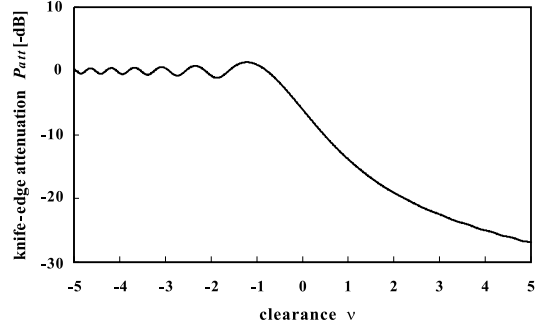


図5 ナイフエッジ回折損
Fig. 5 Knife-edge attenuation.

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 P_{diff} は

$$P_{diff} = P_d - P_{att} \text{ [dBm]} \quad (4)$$

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。

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

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。

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

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

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

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 (Carrier-to-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 p_L を次のように定義する．

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

ただし， $\langle \cdot \rangle$ 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

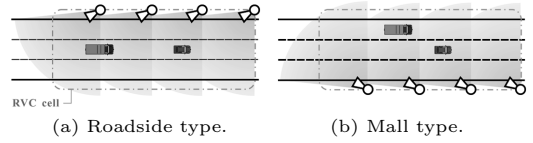


図6 片側 BS 配置
Fig. 6 Single-sided BS arrangement.

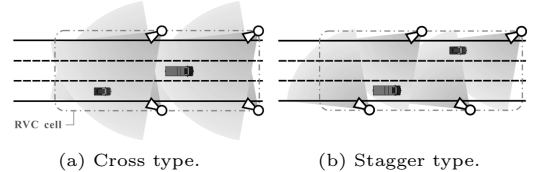


図7 両側 BS 配置
Fig. 7 Double-sided BS arrangement.

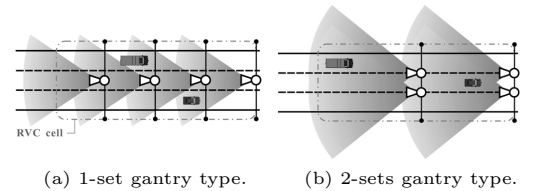


図8 ガントリー BS 配置
Fig. 8 Gantry BS arrangement.

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ーからの送信を仮定した場合（ガントリー BS 配置）であり，中央車線上に配置したものを (a) 1局ガントリー配置，各車線間に配置したものを (b) 2局ガントリー配置と呼ぶ．これらの分散アンテナ配置法は，ガントリー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．

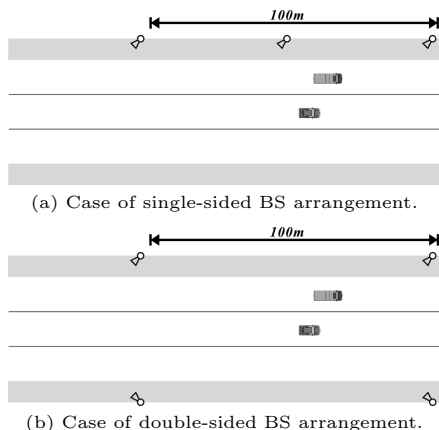


図9 BS密度(2の場合)
Fig.9 BS density (Case of 2).

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 GHz
Tx power P_t	10 dBm
Tx/Rx antenna gain G_t, G_r	2 dBi
Rx bandwidth	5 MHz
Rx noise figure	10 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 m (Lrg) 2.5 m
Vehicle height	(Std) 1.5 m (Lrg) 4.0 m
Dashboard height	(Std) 1.0 m (Lrg) 2.5 m

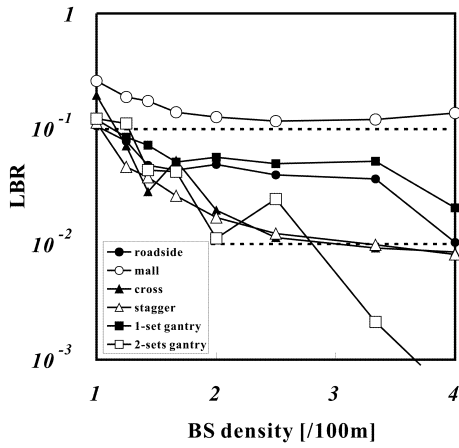
Tx:Transmitter, Rx:Receiver
Std:Standard-sized vehicle, Lrg:Large-sized vehicle

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。

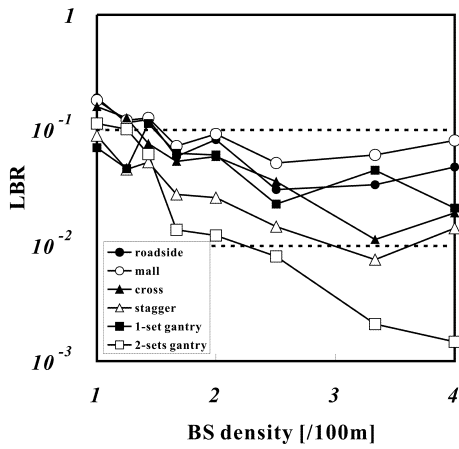
次に、各分散アンテナ配置間でのリンクブロッキング率特性について考察を加える。

(1) 片側BS配置の特性

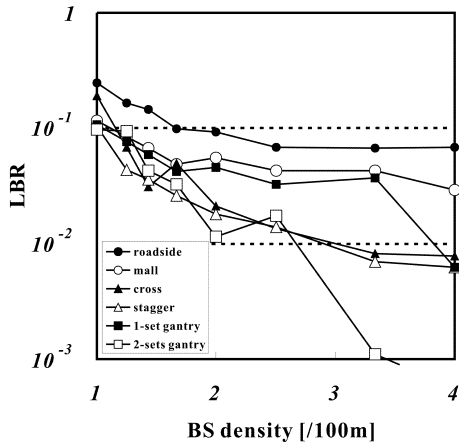
図10より、路側アンテナが低い場合の路側均等配置と中央均等配置の間で各車線のリンクブロッキング率を比較すると、路側均等配置では第3車線ほど、また中央均等配置では第1車線ほど劣化していることが分



(a) Lane 1.

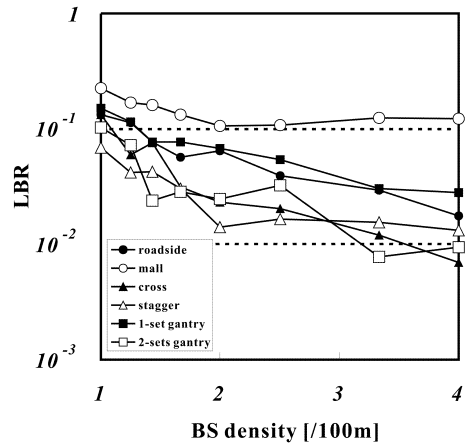


(b) Lane 2.

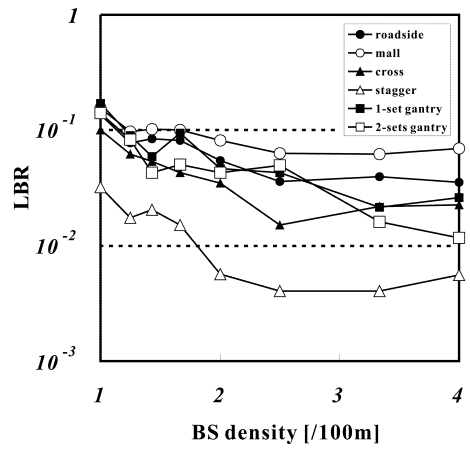


(c) Lane 3.

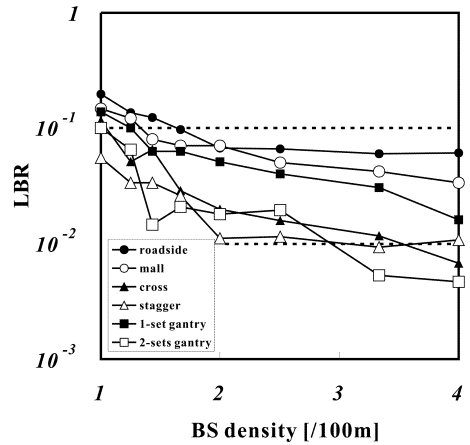
図 10 リンクブロッキング率 (自由流, $h_b=6m$)
Fig. 10 Link-blocking rate (Free flow, $h_b=6m$).



(a) Lane 1.

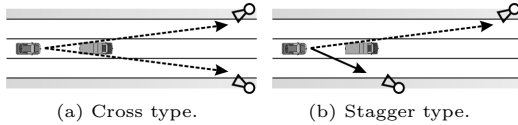


(b) Lane 2.



(c) Lane 3.

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, $h_b=12m$).



(a) Cross type. (b) Stagger type.

図 12 千鳥配置による効果

Fig. 12 Merit of stagger type BS arrangement.

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

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はほぼ同様の振舞いをする事が分かる。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ブ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ブ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ティ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り分かる。

(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

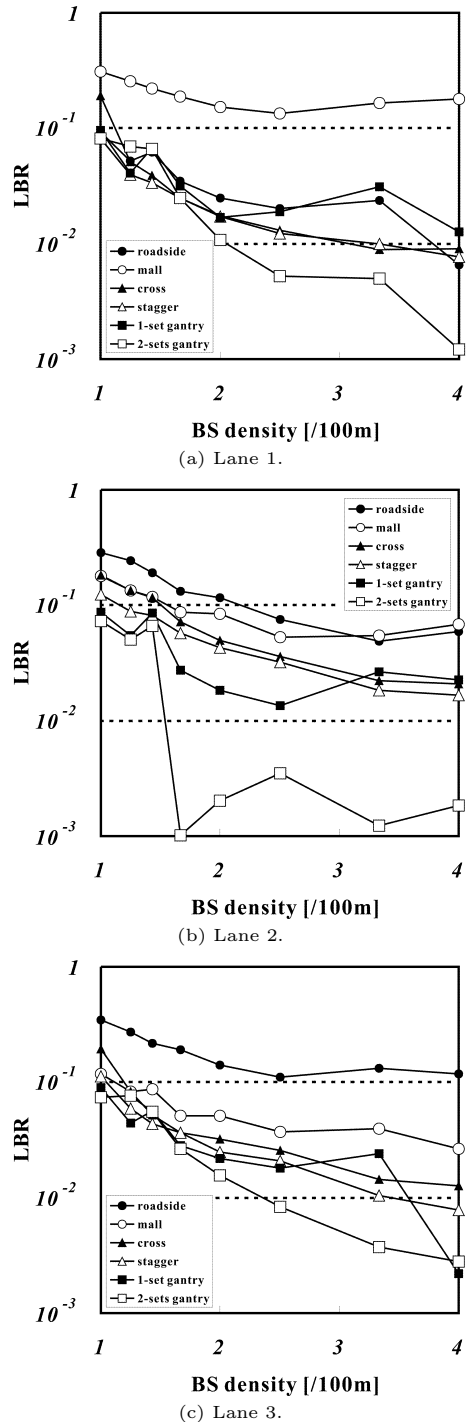
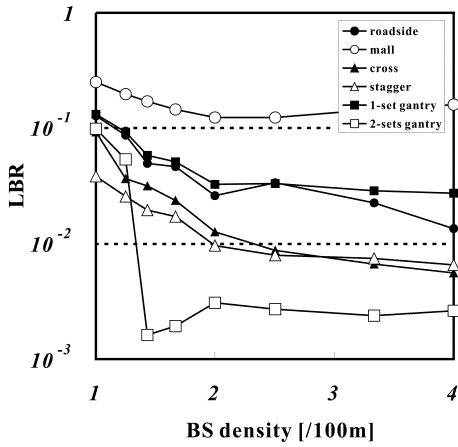
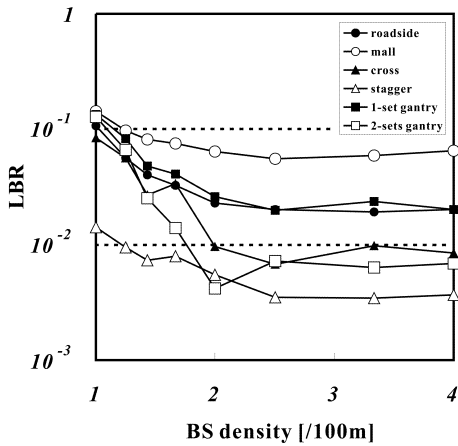


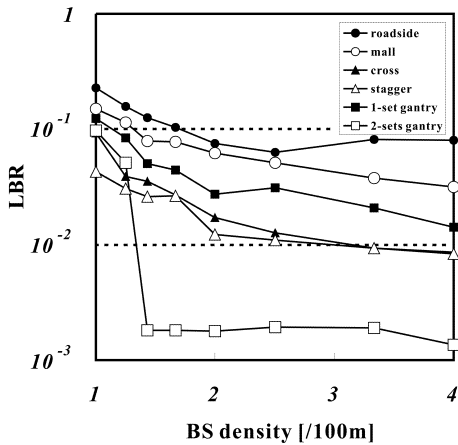
図13 リンクブロッキング率 (渋滞流, $h_b=6m$)
Fig. 13 Link-blocking rate (Congested flow, $h_b=6m$).



(a) Lane 1.



(b) Lane 2.



(c) Lane 3.

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

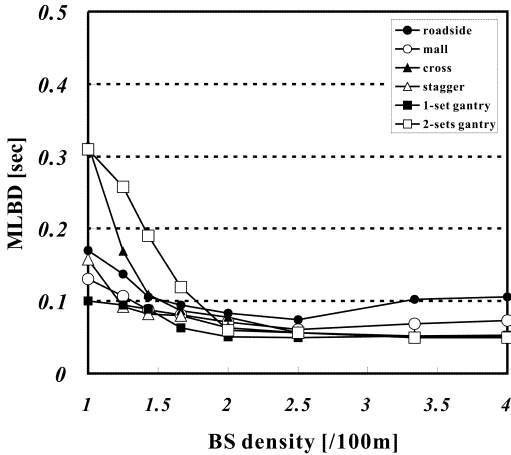
路側アンテナが高い場合の 2 局ガントリ配置における各車線のリンクブロッキング率は自由流と異なる振舞いを示しており、第 1 車線と第 3 車線におけるリンクブロッキング率が、路側アンテナが低い場合のものと比較して大きく改善されていることが図 13 及び図 14 より分かる。これは、路側片側配置の場合と同様に、渋滞流では路側アンテナを高く設置することによる見通し線の遮断率の低減が支配的となるためであると考えられる。

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。

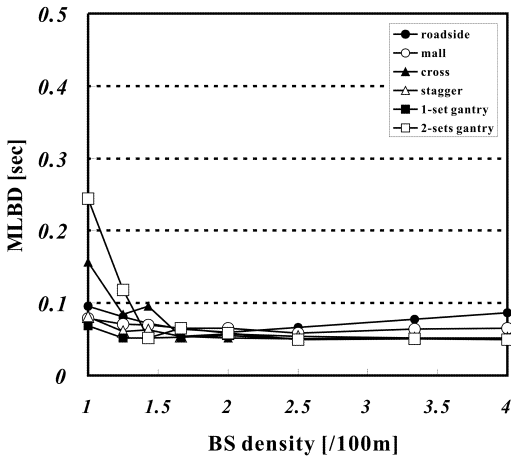
4.2 平均リンクブロッキング継続時間

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

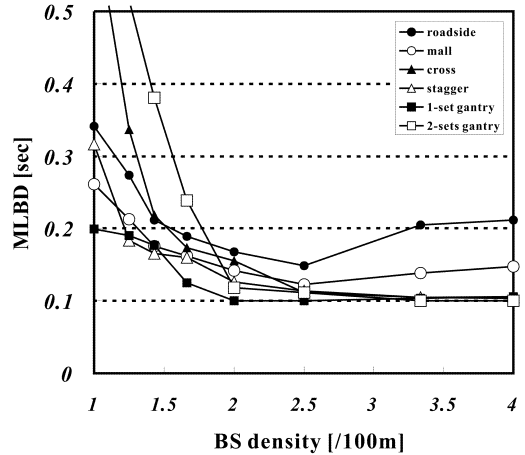


(a) $h_b=6m$.

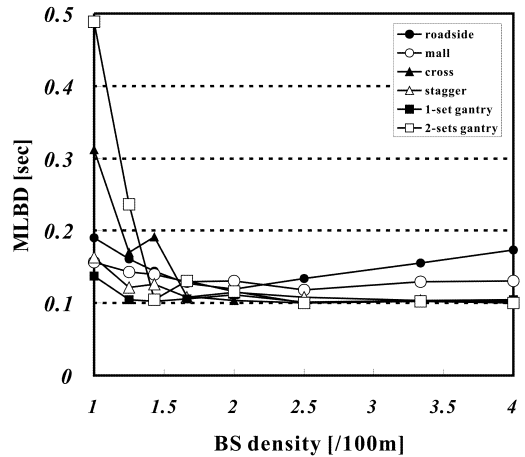


(b) $h_b=12m$.

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).



(a) $h_b=6m$.



(b) $h_b=12m$.

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).

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 $\leq 80m$)、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

隔 $\leq 100m$) 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ならず、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

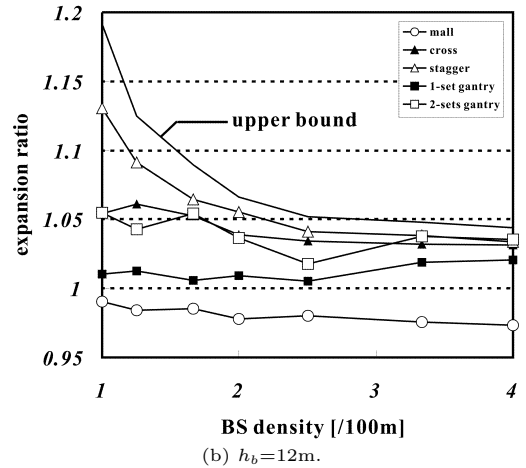
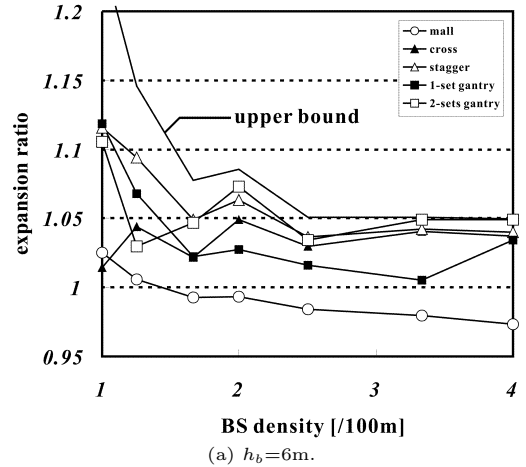


図 17 実効セル面積拡張率 (自由流)
Fig. 17 Effective cell area expansion ratio (Free flow).

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

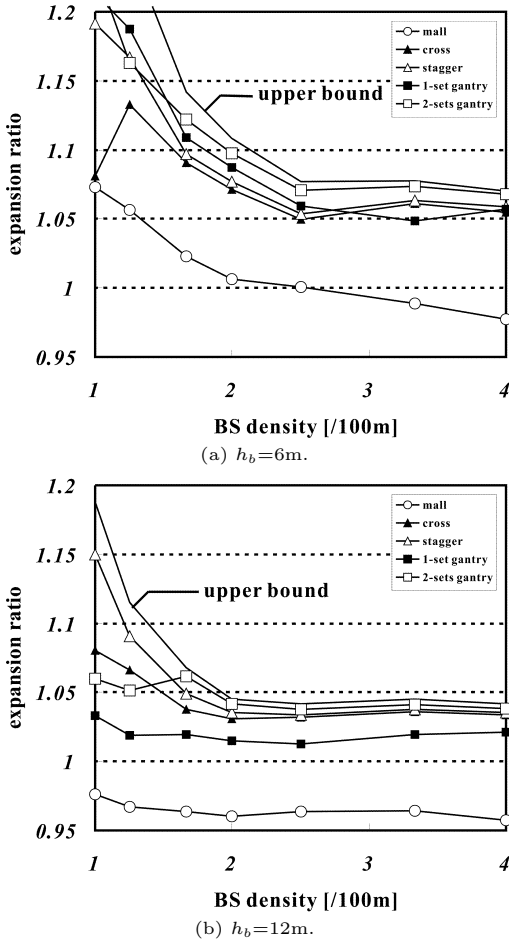


図 18 実効セル面積拡張率 (渋滞流)
Fig.18 Effective cell area expansion ratio (Congested flow).

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ブ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

- [1] 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ブ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.

- [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 millimeter-wave 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, “複局送信を用いた 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.