

Title	高度道路交通システムにおける通信遮断解消技術に関する研究
Author(s)	今尾, 勝崇
Citation	大阪大学, 2006, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1249
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

高度道路交通システムにおける
通信遮断解消技術に関する研究

今尾 勝崇

大阪大学大学院 工学研究科 通信工学専攻

2006年 1月

謝 辞

本論文は、大阪大学大学院工学研究科教授小牧省三博士の御指導の下に、筆者が大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻在学中に行った研究成果をまとめたものである。本研究の遂行にあたり、懇篤なる御教示、御鞭撻を賜った小牧省三教授に衷心より謝恩の意を表する次第である。

本論文をまとめるに際し、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授三瓶政一博士ならびに助教授塚本勝俊博士に懇切丁寧なる御教示、御助言を賜った。ここに深く感謝の意を表する次第である。

大阪大学大学院在学中より通信工学全般および本研究に関して御教示、御助言を賜った大阪大学大学院工学研究科教授北山研一博士、同河崎善一郎博士、同馬場口登博士、同滝根哲哉博士、同井上恭博士、大阪大学産業科学研究所教授元田浩博士、同溝口理一郎博士をはじめとする大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻の諸先生方、広島国際大学教授森永規彦博士（大阪大学名誉教授）、中部大学教授塩澤俊之博士（大阪大学名誉教授）、元大阪大学大学院工学研究科教授前田肇博士（故人）に厚く感謝申し上げる。

また、研究の途上、有益な御助言と御協力、御激励を頂いた杉浦泰伸氏（現株式会社デンソー）、高橋伸氏（現株式会社デンソー）、濱田悠司氏（現三菱電機株式会社）をはじめとする大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻卒業生ならびに梶原亮氏、牛谷善哉氏をはじめとする大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻小牧研究室の諸氏に感謝申し上げる。

最後に、寛大なる心をもって惜しめない援助と理解を頂いた家族と友人に感謝を捧げる。

内容梗概

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科在学中に行った高度道路交通システムにおける通信遮断解消技術に関する研究成果をまとめたものであり、以下の5章により構成されている。

第1章は、本論文における研究背景及び関連分野の研究動向について概説を行うとともに、本研究の位置付けと目的を明らかにする。

第2章では、通信遮断解消技術の評価を行うために必要となる路車間通信システムのモデル化を行う。路車間通信環境では様々な車両が個々の希望速度で走行しており、周辺車両の位置関係は時々刻々と変化する。本論文ではまず、交通流の状態を表現するための様々な指標の中で交通流現象に特に大きな影響を及ぼす車頭時間分布の統計的特徴について詳述し、この特性に基づいた交通流モデルの構築を行う。また、車両の高速走行や周辺車両による電波遮へいに伴う無線通信伝搬路特性の高速な変動は、通信遮断の主たる原因として大きな影響を及ぼす。これらの要因を考慮して、出来る限り実交通環境に近いシミュレーションを用いた通信遮断解消技術の評価を行うため、周辺車両における電波反射及び電波回折を導入した多重路電波伝搬モデルの構築を行う。以上のモデルを導入した路車間通信システムモデルを示し、本論文で採用する通信遮断の定義を示す。

第3章では、路車間通信システムへの適応変調の適用を提案し、それによる通信遮断解消効果を明らかにする。路側アンテナと車載アンテナを結ぶ見通し線が大型車両によって遮へいされると、通信中の車両における受信信号電力は著しく低下するが、大型車両の車体稜線を経て到来する回折波が無線通信を維持する上で有効な電力を有していれば、適応変調を用いて受信信号電力に応じた変調フォーマットの切り換えを行うことで、従来であれば通信遮断であった受信信号電力まで許容することが可能となる。本章では、第2章で構築した路車間通信システムモデルを用いて計算機シミュレーションを行い、通信遮断継続時間ならびに実効伝送速度の改善効果を定量的に評価し、適応変調を用いることの有効性を示す。

第4章では、路車間通信システムにおける通信遮断解消のために、分散アンテナを用いた複局同時送信を提案し、通信遮断率及び通信遮断継続時間を最小にする分散アンテナ配置法を明らかにする。複数の路側アンテナを用いて1つの路車間

通信セルを構築する分散アンテナは、1つの路側アンテナが担っていた路車間通信機能を複数の路側アンテナに分散させることができ、マクロダイバーシチ効果による通信遮断の解消が期待できる。このとき、走行中の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常に見通せるように分散アンテナの配置を工夫すれば、その効果を最大限に引き出すことが可能となる。本章では、既存の道路インフラを有効活用した6種類の分散アンテナ配置を考案し、第2章の路車間通信システムモデルを用いた計算機シミュレーションから得た通信遮断率ならびに通信遮断継続時間に関する結果から、最適な分散アンテナ配置を明らかにする。また、実効セル面積の観点からもその拡大率の高い分散アンテナ配置を明らかにする。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果と高度道路交通システムに与えるインパクトについて述べ、本論文の総括とする。

目次

第1章 序論	1
1.1 高度道路交通システム	1
1.2 通信遮断に関連する従来研究と技術課題	6
1.3 研究の目的と概要	8
第2章 路車間通信システム	11
2.1 序言	11
2.2 道路交通流	11
2.2.1 道路交通流の指標	11
2.2.2 平均速度, 交通密度, 交通流率の関係	13
2.2.3 車頭時間分布	14
2.2.4 道路交通流のモデル	16
2.3 道路交通環境下の電波伝搬	18
2.3.1 直接波と路面反射波による受信信号電力	18
2.3.2 車両反射波と回折波を考慮した電波伝搬モデル	21
2.4 路車間通信システムモデル	24
2.5 通信遮断の定義	24
2.6 結言	25
第3章 適応変調を用いた通信遮断解消技術	27
3.1 序言	27
3.2 適応変調を用いた通信遮断解消技術	27
3.3 シミュレーション	32
3.3.1 シミュレーション条件	32
3.3.2 通信遮断率	34
3.3.3 通信遮断継続時間	44
3.3.4 実効伝送速度	49

3.3.5	平均受信データ量	59
3.4	結言	62
第4章	分散アンテナを用いた複局同時送信による通信遮断解消技術	63
4.1	序言	63
4.2	分散アンテナの適用効果	63
4.3	分散アンテナ配置法	64
4.4	シミュレーション	66
4.4.1	シミュレーション条件	66
4.4.2	通信遮断率	69
4.4.3	平均通信遮断継続時間	77
4.4.4	実効セル面積拡張効果	81
4.5	結言	84
第5章	結論	85
	参考文献	89
	付録	99
A	幾何光学近似による電波伝搬環境の検証例	99
B	直交振幅変調方式の平均 BER	105
本論文に関する原著論文		107
A	学会論文	107
B	国際会議発表	107
C	総合大会発表	108
D	研究会発表	108
E	筆頭外論文発表	108

図目次

1.1	高度道路交通システム (ITS) のサービス展開	2
1.2	高度道路交通システム (ITS) のサービス形態	3
1.3	路車間通信システム	5
2.1	車両走行に関する時空間図	12
2.2	平均速度 \bar{v}_s , 交通密度 d , 交通流率 q の関係	14
2.3	車頭時間分布	16
2.4	車両トラヒックの統計モデル	18
2.5	2波電波伝搬モデル	19
2.6	直接波と路面反射波のモデル	20
2.7	周辺車両における電波反射及び電波回折を考慮した電波伝搬モデル	22
2.8	ナイフエッジ回折モデル	23
2.9	路車間通信システムモデル	25
3.1	ある車両における受信信号電力の変動例	28
3.2	ある車両における無線通信環境の時間変化	28
3.3	直交振幅変調方式の BER	30
3.4	適応変調方式の適用効果	31
3.5	所要 CNR に対する通信遮断率 (Free flow, $h_b=5\text{m}$)	35
3.6	所要 CNR に対する通信遮断率 (Free flow, $h_b=10\text{m}$)	36
3.7	見通し線の存在限界	37
3.8	車両反射波の存在限界	39
3.9	車両の位置関係に対する余剰高の変化	39
3.10	所要 CNR に対する通信遮断率 (Congested flow, $h_b=5\text{m}$)	41
3.11	所要 CNR に対する通信遮断率 (Congested flow, $h_b=10\text{m}$)	42
3.12	通信遮断継続時間の累積確率分布 (Free flow, $h_b=5\text{m}$)	45
3.13	通信遮断継続時間の累積確率分布 (Free flow, $h_b=10\text{m}$)	46
3.14	通信遮断継続時間の累積確率分布 (Congested flow, $h_b=5\text{m}$)	47

3.15	通信遮断継続時間の累積確率分布 (Congested flow, $h_b=10\text{m}$)	48
3.16	実効伝送速度の累積確率分布 (Free flow, $h_b=5\text{m}$)	50
3.17	実効伝送速度の累積確率分布 (Free flow, $h_b=10\text{m}$)	51
3.18	実効伝送速度の累積確率分布 (Congested flow, $h_b=5\text{m}$)	56
3.19	実効伝送速度の累積確率分布 (Congested flow, $h_b=10\text{m}$)	57
3.20	平均受信データ量 (Free flow)	60
3.21	平均受信データ量 (Congested flow)	61
4.1	分散アンテナの適用効果	64
4.2	片側 RBS 配置	65
4.3	両側 RBS 配置	65
4.4	ガントリ RBS 配置	65
4.5	RBS 密度 (2 の場合)	66
4.6	RBS 密度に対する通信遮断率 (Free flow, $h_b=6\text{m}$)	70
4.7	RBS 密度に対する通信遮断率 (Free flow, $h_b=12\text{m}$)	71
4.8	千鳥配置による通信遮断解消効果	72
4.9	RBS 密度に対する通信遮断率 (Congested flow, $h_b=6\text{m}$)	75
4.10	RBS 密度に対する通信遮断率 (Congested flow, $h_b=12\text{m}$)	76
4.11	RBS 密度に対する平均通信遮断継続時間 (Free flow)	78
4.12	RBS 密度に対する平均通信遮断継続時間 (Congested flow)	79
4.13	RBS 密度に対する実効セル面積拡張率 (Free flow)	82
4.14	RBS 密度に対する実効セル面積拡張率 (Congested flow)	83
A.1	鉄道検車場の見取り図とそのモデル	100
A.2	13 段コーリニア型半波長ダイポールアンテナの指向特性	101
A.3	受信信号電力の実測結果	102
A.4	受信信号電力の数値計算結果	103
B.1	直交振幅変調方式の信号点配置	105

表目次

3.1 シミュレーション条件	33
3.2 交通流に関するパラメータ	34
3.3 平均実効伝送速度 (Free flow)	54
3.4 平均実効伝送速度 (Congested flow)	59
4.1 シミュレーション条件	67
4.2 交通流に関するパラメータ	68
A.1 数値計算に用いたパラメータ	101

第1章 序論

1.1 高度道路交通システム

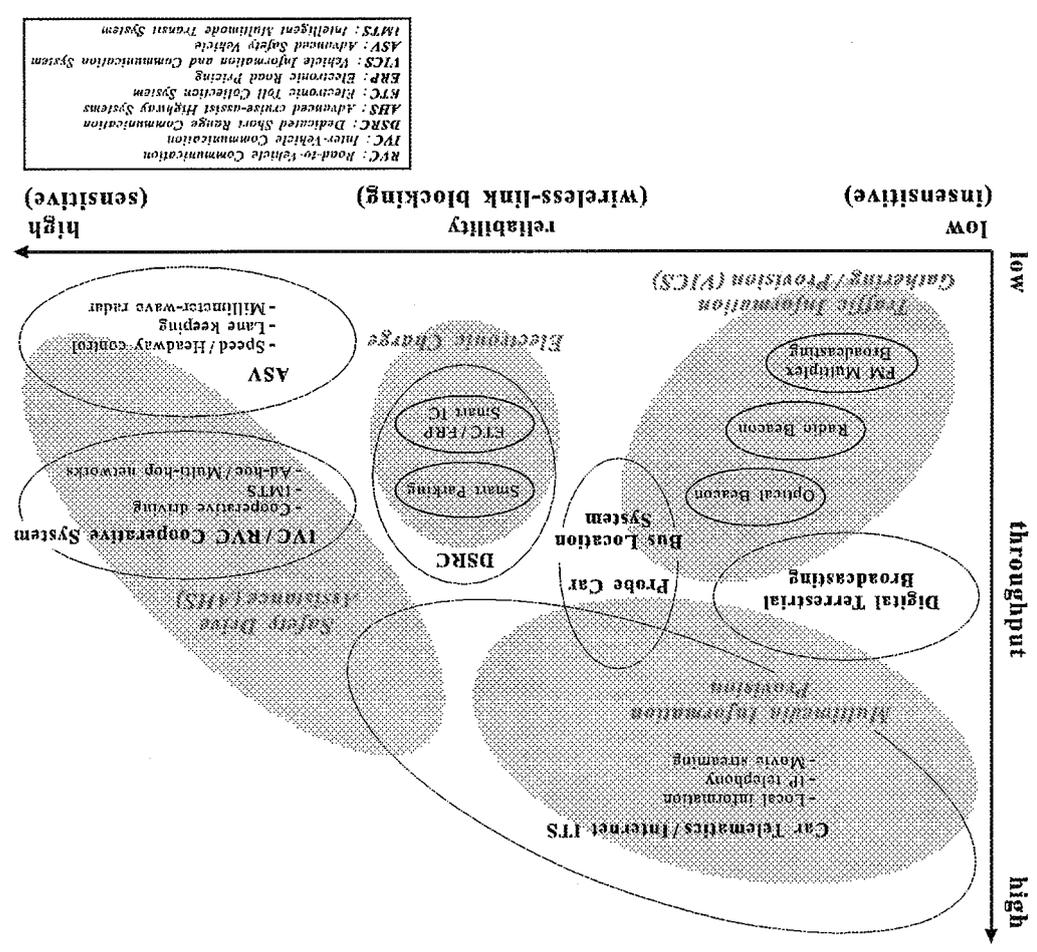
道路交通環境の最適化を図ることを目的とした高度道路交通システム（ITS：Intelligent Transport Systems）は、近年様々な形のサービスとして実用化されており、運転者の負担を可能な限り軽減することによる交通事故の解消や運転者の安全性及び快適性の向上に大きく貢献している [1]～[3]。ITS は、交通事故防止などを目的とした安全運転機能、渋滞緩和などを目的とした円滑走行機能、環境汚染の抑制などを目的とした環境機能に基づいた9つの開発分野から構成されており、それぞれの分野において様々な研究開発が行われている。また、これらの機能を実現するために、計算機による高度な情報処理や無線通信などの最先端の情報通信技術（ICT：Information and Communication Technology）を核とした図 1.1 に示すような様々なサービス展開及び図 1.2 のようなサービス形態が想定されている。

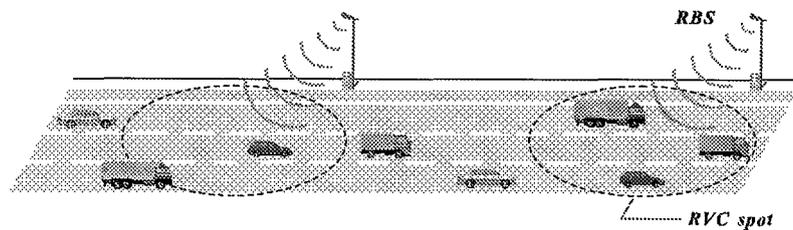
ITS の最初のサービスとして 2001 年 3 月に運用が開始されたノンストップ自動料金収受システム（ETC：Electronic Toll Collection system）[4] は、その利用者が増加の一途をたどっており、料金所における渋滞の緩和や環境問題の改善に確実な効果が現れている [5]。ETC で用いられている路車間通信（RVC：Road-to-Vehicle Communication）システムは、1997 年 11 月に電波産業会（ARIB：Association of Radio Industries and Businesses）において策定された標準規格 ARIB STD-T55[6] に基づいて構築されており、5.8GHz 帯の周波数を用いて最大 1Mbps の通信が可能である。また、伝送速度の高速化ならびに狭域無線通信の利用可能性を広げる目的として、5.8GHz 帯での双方向通信が可能な狭域無線通信（DSRC：Dedicated Short Range Communication）技術が 2001 年 9 月に標準規格 ARIB STD-T75[7] として電波産業会において策定され、後に国際標準化された。DSRC では、最大 4Mbps の信号伝送速度で約 30m の範囲での通信が可能であり、この技術を適用したスマートインターチェンジの設置 [8]、パーキングエリアやガソリンスタンドにおける自動料金収受 [9],[10] などが実験的に開始されている。さらに、これらのサービスを含めた将来の複数のアプリケーションに対応可能な ITS 車載器 [11] を始め

とした新しいサービスの研究開発も積極的に進められており、交通環境のさらなる利便化が期待されている [12],[13].

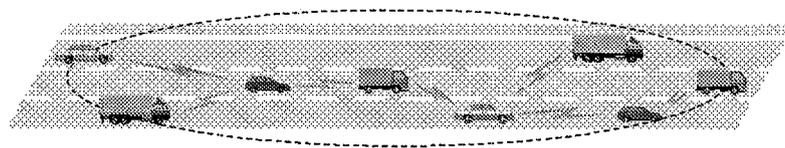
一方、自動車企業等による自動車の高機能化のための研究開発も著しく、安全運転支援のための車載センサを用いた車間距離及び走行車線の維持機能がすでに実用化されている [14]~[16]. また、携帯電話通信網やインターネット ITS など放送網への接続による渋滞情報や天候情報を始めとしたインターネット ITS などのテレマティクス情報の双方向提供サービス [17]~[19] も本格的に始まりつつあり、自動車 1 台が保有する情報は格段に増加していると言える。これらの情報に加え、

図 1.1 高度道路交通システム (ITS) のサービス展開

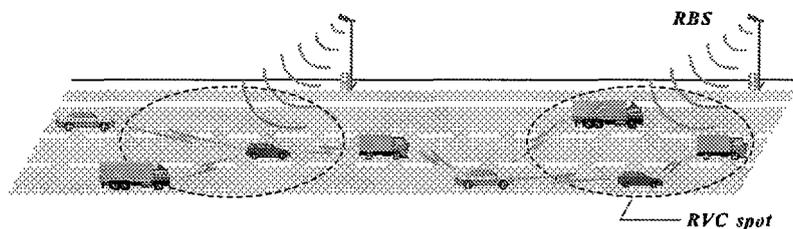




(a) 路車間通信 (RVC) ネットワーク



(b) 車車間通信 (IVC) ネットワーク



(c) 車車間・路車間通信 (IVC-RVC) 融合ネットワーク

図 1.2 高度道路交通システム (ITS) のサービス形態

運転者の意思判断を含めた車両走行状態の情報を共有するための技術の1つとして、車車間通信 (IVC: Inter-Vehicle Communication) 技術に関する様々な研究開発 [20]~[22] 及び標準化 [23],[24] が行われている。特に、見通しの悪い道路曲線部における走行速度やハンドル操作補助、及び交差点における右折時や出会い頭における事故を回避するための技術などは、対向車線を走行する車両との通信が必要不可欠であり、これまでに開発されている路車間通信技術やセンサ技術だけではその実現性に限界がある。従って、車車間通信技術はより安全かつ快適な運転環境を提供するために有効な技術とされており、将来実現される車群走行の制御を行うための基盤技術となることが期待されている [25],[26]。

さらに、ITSの最終目標として掲げられている完全自動運転のために必要不可欠となる走行支援道路システム（AHS：Advanced cruise-assist Highway Systems）の確立のためには、緊急を要する情報を始めとした安全運転支援のための様々な情報を、車車間通信ネットワーク内外に存在する車両と共有するとともに、IP（Internet Protocol）ネットワークなどを経由して道路管理システムへも通知することが要求される [27]。また、このような情報は位置や時間に依存することなく入手することが望ましいため、車両の走行中に出来る限り継続的な通信が行える環境を構築することが必要とされる。そのためには、路車間通信と車車間通信の双方を核とした大規模な道路交通ネットワークが必要となるが、これを実現するための手法の1つとして路車間通信ネットワークを通じて離れた車群間の通信を補う手法が挙げられる。車車間通信と路車間通信を融合した車車間・路車間通信融合ネットワークでは、近隣車両とのマルチホップ通信により情報の中継を行うことで、路側基地局（RBS：Roadside Base Station）の存在しないエリアでも迅速かつ継続的な送受信が可能となるため、実現に向けた様々な研究がなされている [28]~[37]。このような車車間・路車間通信融合ネットワークでは、各車群内で共有される速度や位置などのプローブ情報が路車間通信ネットワーク側にいったん集約されるため、道路交通ネットワーク全体の通信品質を高く維持するためには、路車間通信ネットワークの通信品質を特に高く維持することが肝要であるとされている [36],[37]。

また、次世代ITSの国際標準案として国際標準化機構（ISO：International Organization for Standardization）の専門委員会において検討されている中広域無線通信規格（CALM：Communication Air interface for Long and Medium range） [38] では、車車間・路車間通信融合ネットワークの実現により運転者にとってさらに利便性の高いITSサービスが実現できることを目指しており、DSRCとの親和性を保ちつつ、既存の無線アクセスネットワーク（RAN：Radio Access Network）とのハンドオーバーや、車両間または車群間での情報共有を行うための技術的基準の明確化が期待されている [39],[40]。

以上に代表されるような道路交通システムの情報化を支えるアプリケーションの共通基盤として、スマートウェイと呼ばれる概念が提唱されている。スマートウェイは、光ファイバやセンサ等を扱う情報ネットワーク基盤（information network devices）、各車両のプローブ情報等を扱うデータ基盤（data storage devices）、及

び DSRC 等の通信基盤（communication devices）によって構成された次世代の道路であり、これらの共通基盤を活用することで ITS に関する様々なサービスを実現可能とするものである [5],[41].

情報ネットワーク基盤では、道路上で收受された膨大な量の情報をやり取りするため、RBS と制御局（CS：Control Station）の間での大容量かつ高速な通信が要求される。また、将来に実現される複数のアプリケーションに対応できるような拡張性の高い伝送方式が要求される。光ファイバを用いた光電波融合伝送（RoF：Radio-on-Fiber）技術は、これらの要求に応える情報ネットワーク基盤を構築する手法として最も注目されている [42]~[44]. RoF 技術は、CS から送信される電波をあらかじめ光信号に変換し、光ファイバケーブルを用いて RBS まで伝送した後、再び電波に変換して車両に情報を提供しようというものである。このような仕組みを用いることで、通信方式などに変更が生じた場合でも各 RBS の変更は必要なく、将来の情報量の増加にも対応可能となる [45].

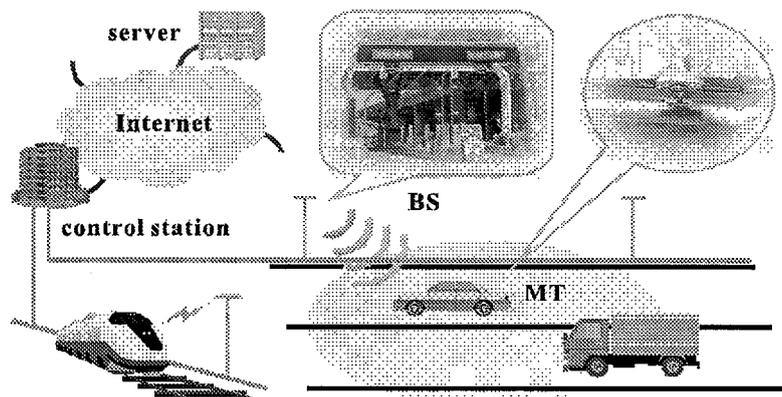


図 1.3 路車間通信システム

一方、通信基盤を支える DSRC を始めとした路車間通信システムでは、図 1.3 のような道路上に設置した RBS における路側アンテナと車両に設置した車載ユニット（OBU：On-Board Unit）における車載アンテナの間での高速かつ高品質な無線通信技術が必要とされる。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、マルチパスフェージング (multipath fading) やシャドウイング (shadowing) が発生する伝搬路の特性は、周辺車両の位置関係が時々刻々と変化するため非常に速く変動し、信号品質に大きな影響を及ぼすこととなる。特に、路車間通信を行っている車両が大型車両の影に進入した場合によく発生する長時間に渡る通信遮断は、限られた時間内で通信を行う路車間通信システムにとって致命的な信号品質の劣化をもたらすことが懸念されている [27]。従って、道路交通の変動過程を考慮した通信遮断特性を明らかにし、これを改善するための手法について評価検討を行うことは重要な課題であると言える [46]~[49]。

1.2 通信遮断に関連する従来研究と技術課題

路車間通信システムにおける通信遮断は、周辺の道路構造や車両の存在によって発生する受信信号電力の変動に起因するため、これに関する評価検討を行うためには実際の道路交通を想定した環境を構築する必要がある。これは、周辺車両の存在に起因する反射波や回折波が無線通信を行う上で有効な電力を有していれば、大型車両による電波遮へいが発生するような場合においても通信遮断の発生を回避できるからである。また、回折波による電力が受信信号電力特性に大きく影響を与えることは基礎実験 [50],[51] などですでに明らかにされているが、道路交通の変動過程を考慮した路車間通信システムにおいて、反射波や回折波からの受信信号電力を積極的に利用することによる通信遮断の解消効果はこれまでに検討されていない。したがって、路車間通信システムにおいてこれらの電波伝搬特性を考慮し、適切な通信方式に関して検討を行うことの意義は大きい。

路側アンテナから周辺車両を経由して到来する反射波や回折波の電力は、直接波の電力に対して通常比較的小さい値となる。このとき、路車間通信時の通信方式として多値変調方式を採用した場合、変調多値数を大きくとると伝送容量が大きくなるため実効伝送速度が向上するが、所要の受信信号電力が高いため直接波の遮へいによる受信信号電力の低下に起因する通信遮断が発生しやすくなるという欠点がある。一方、通信遮断を最小限に抑えるために変調多値数を小さくすると、実効伝送速度が向上しないという欠点がある。これらの問題点を改善するために、適応変調方式 [52] を路車間通信システムに適用することが考えられる [53],[54]。すなわ

ち、受信搬送波電力対雑音電力比（CNR：Carrier power to Noise power Ratio）が高いときには多値数の大きい変調方式を用い、受信 CNR が低くなったときには、多値数の小さい変調方式に切り替えて電波反射や電波回折による受信信号電力を有効に利用することで、通信遮断の発生を最小限に抑えつつ、実効伝送速度の向上を図ることができるわけである。先述のように、DSRC の標準規格では QPSK（Quadrature Phase Shift Keying）を用いた最大 4Mbps の無線伝送速度が規定されており、これに準拠した様々な路車間通信システムが実現されつつあるが、将来のアプリケーションに対応できるような高速伝送方式を実現していく上で、適応変調を適用した路車間通信システムにおける通信遮断特性及び実効伝送速度の改善効果を評価することの意義は大きい。

ところで、路側アンテナから到来する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ため、路側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路側アンテナを必ず見通せるシステムの構築を行うことも、通信遮断解消のための重要な技術と言える。複数の RBS を用いて 1 つの路車間通信セルを構築する分散アンテナシステムは、これを最も簡便に実現できる手法であり、1 つの RBS が担っていた路車間通信機能を複数の RBS に分散させることで、複数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 [55]～[58]。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、通信遮断の主たる要因として問題となることが指摘されている [27] 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 RBS が通信対象となるため、通信遮断発生率の大幅な低減が期待できる。

しかしながら、通信遮断解消に対して効果の高い分散アンテナ配置に関する検討は数少ない。文献 [31] では、路車間通信と車車間通信を協調させることによる通信遮断発生率の改善効果が、様々な RBS 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は検討されていない。また、文献 [59] では、狭域路車間通信システムにおいて、数種類の RBS 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。

1.3 研究の目的と概要

そこで本研究では、道路交通の変動と多重路伝搬に起因する劣悪な無線通信環境下にある高度道路交通システムにおける通信遮断の解消を目的とし、第1番目の手法として路車間通信システムへの適応変調の適用を提案 [60]~[64] し、通信遮断継続時間ならびに実効伝送速度の改善効果を定量的に評価する。また、第2番目の手法として分散アンテナを用いた複局同時送信を提案 [65]~[68] し、通信遮断率及び通信遮断継続時間を最小にする分散アンテナ配置法を明らかにする。

本論文は、これらの目的に沿っておこなった高度道路交通システムにおける通信遮断解消技術に関する研究成果をまとめたものであり、以下の第2章から第5章により構成される。

第2章では、通信遮断解消技術の評価を行うために必要となる路車間通信システムのモデル化を行う。路車間通信環境では様々な車両が個々の希望速度で走行しており、周辺車両の位置関係は時々刻々と変化する。本論文ではまず、交通流の状態を表現するための様々な指標の中で交通流現象に特に大きな影響を及ぼす車頭時間分布の統計的特徴について詳述し、この特性に基づいた交通流モデルの構築を行う。また、車両の高速走行や周辺車両による電波遮へいに伴う無線通信伝搬路特性の高速な変動は、通信遮断の主たる原因として大きな影響を及ぼす。これらの要因を考慮して、出来る限り実交通環境に近いシミュレーションを用いた通信遮断解消技術の評価を行うため、周辺車両における電波反射及び電波回折を導入した多重路電波伝搬モデルの構築を行う。以上のモデルを導入した路車間通信システムモデルを示し、本論文で採用する通信遮断の定義を示す。

第3章では、路車間通信システムへの適応変調の適用を提案し、それによる通信遮断解消効果を明らかにする。路側アンテナと車載アンテナを結ぶ見通し線が大型車両によって遮へいされると、通信中の車両における受信信号電力は著しく低下するが、大型車両の車体稜線を経て到来する回折波が無線通信を維持する上で有効な電力を有していれば、適応変調を用いて受信信号電力に応じた変調フォーマットの切り換えを行うことで、従来であれば通信遮断であった受信信号電力まで許容することが可能となる。本章では、第2章で構築した路車間通信システムモデルを用いて計算機シミュレーションを行い、通信遮断継続時間ならびに実効伝送速度の改

善効果を定量的に評価し、適応変調を用いることの有効性を示す。

第4章では、路車間通信システムにおける通信遮断解消のために、分散アンテナを用いた複局同時送信を提案し、通信遮断率及び通信遮断継続時間を最小にする分散アンテナ配置法を明らかにする。複数の路側アンテナを用いて1つの路車間通信セルを構築する分散アンテナは、1つの路側アンテナが担っていた路車間通信機能を複数の路側アンテナに分散させることができ、マクロダイバーシチ効果による通信遮断の解消が期待できる。このとき、走行中の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常に見通せるように分散アンテナの配置を工夫すれば、その効果を最大限に引き出すことが可能となる。本章では、既存の道路インフラを有効活用した6種類の分散アンテナ配置を考案し、第2章の路車間通信システムモデルを用いた計算機シミュレーションから得た通信遮断率ならびに通信遮断継続時間に関する結果から、最適な分散アンテナ配置を明らかにする。また、実効セル面積の観点からもその拡大率の高い分散アンテナ配置を明らかにする。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果と高度道路交通システムに与えるインパクトについて述べ、本論文の総括とする。

第2章 路車間通信システム

2.1 序言

本章では、通信遮断解消技術の評価を行うために必要となる路車間通信システムのモデル化を行う。路車間通信環境では様々な車両が個々の希望速度で走行しており、周辺車両の位置関係は時々刻々と変化する。そこで、まず交通流の状態を表現する様々な指標について詳述し、この特徴に基づいた交通流モデルの構築を行う。また、車両の高速走行や周辺車両による電波の反射や遮へいに起因して無線通信伝搬路の特性は高速に変動し、通信遮断の主たる原因となる。そこで、周辺車両における電波反射及び電波回折を考慮した多重路電波伝搬モデルを構築する。さらに、以上のモデルを用いて路車間通信システムモデルを構築し、最後に本論文における通信遮断の定義を示す。

2.2 道路交通流

2.2.1 道路交通流の指標

各車両の時間的、空間的な移動を模式的に表現した時空間図 (time-space diagram) を図 2.1 に示す [69]。道路上の車両は各々の希望速度や加減速をもって走行しており、その振舞いは車種や運転者によって様々である。このような車両の集団としての流れを交通流 (traffic flow) と呼び、その統計的性質は様々な確率分布によって表現されるが、この指標を与えるための測定手段として地点観測及び区間観測という2種類の手法がある。

地点観測とは、図 2.1 において、時間間隔 $T[\text{sec}]$ の間に地点 P を通過する車両の状態を観測する手法である。この観測方法を行うことにより、先行車両と後続車両の間の車頭時間 (time headway) $\tau_i[\text{sec}]$ 及び各車両の地点速度 $v_i[\text{m/s}]$ が得られ、これらの情報から交通流に関する統計量として時間平均速度 (time mean speed) や交通量 (traffic volume) が求められる。ここで、時間平均速度とは、観測地点を固定して一定時間内に計測された地点速度の集合平均値のことである。また、交通量とは道路のある地点をある時間内に通過する車両数のことであり、これを単位時間当たりの車両数として正規化したものを交通流率 (flow rate) という。すなわ

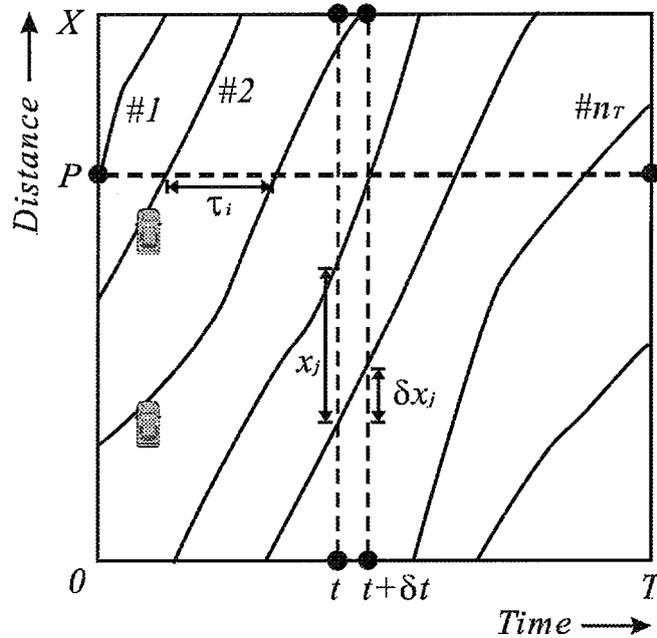


図 2.1 車両走行に関する時空間図

ち、図 2.1 の地点 P において時間間隔 T [sec] の間に通過した車両が n_T [veh] であれば、交通流率 q [veh/sec] は n_T/T となり、観測時間 T [sec] は個々の車両の車頭時間 τ_i [sec] の総和であるから、交通流率 q [veh/sec] は次式に示すように平均車頭時間 $\bar{\tau}$ [sec] の逆数となる。

$$q = \frac{n_T}{T} = \frac{n_T}{\sum_i \tau_i} = \frac{1}{\bar{\tau}} \quad [\text{veh/sec}] \quad (2.1)$$

区間観測とは、図 2.1 において、ある時刻 t [sec] において一定区間 X [m] の道路における車両の状態を観測する手法である。この手法を用いて、時刻 t [sec] および微小時間 δt [sec] 後すなわち時刻 $t + \delta t$ [sec] の道路の状態を比較することにより、先行車両と後続車両の間の車頭距離 (headway) x_j [m] 及び各車両の位置変化 δx_j [m] が得られ、これらの情報から交通流に関する統計量として空間平均速度 (space mean speed) や交通密度 (traffic density) が求められる。ここで、空間平均速度とは、道路延長方向の一定区間内においてある瞬間に存在する車両の地点速度の集合平均値のことであり、交通密度とは単位長の道路 1 車線あたりに存在する車両数のことである。また、図 2.1 の区間観測において時間軸上の時刻 t [sec] において一定区間

X [m] の道路上に存在する車両の車頭距離 x_j [m] の合計は区間長 X [m] に等しいので、この区間長に存在する車両の台数を n_X [veh] とすれば、交通密度 d [veh/m] は次式に示すように平均車頭距離 \bar{x} [m] の逆数となる。

$$d = \frac{n_X}{X} = \frac{1}{\bar{x}} \quad [\text{veh/m}] \quad (2.2)$$

2.2.2 平均速度, 交通密度, 交通流率の関係

道路上のある観測地点を単位時間内に通過する車両数は、平均速度（時間平均速度または空間平均速度）を \bar{v}_s [m/sec] とすると、観測開始時刻に上流側 \bar{v}_s [m] の区間内に存在する車両数に等しい。このことから、距離 \bar{v}_s [m] の区間内の車両数は交通密度 d [veh/m] を用いて $d\bar{v}_s$ [veh] と表されるので、交通流率 q [veh/sec] は

$$q = d\bar{v}_s \quad [\text{veh/sec}] \quad (2.3)$$

と表現できる。この式は、平均速度、交通密度、及び交通流率の間に常に成り立つ関係であり、交通流率が一定のもとでは平均速度と交通密度の間に強い負の相関関係があることが経験的に知られている [70],[71]。これは、運転者は走行速度が速くなるほど安全性を保つために車間距離を大きくとる傾向があり、平均速度が大きくなるほど交通密度が小さくなることに起因している。これらの相互関係を模式的に示すと図 2.2 のようになる [71]。

式 (2.3) 及び平均速度と交通密度が負の相関をもつということより、交通流率が最大となる臨界点 q_c [veh/sec] が存在することが分かる。このときの交通密度と平均速度をそれぞれ臨界密度（critical density） d_c [veh/m] 及び臨界速度（critical speed） v_c [m/sec] と呼ぶ。一方、交通密度が 0[veh/m] となるときの平均速度を自由速度（free speed）、平均速度が 0[m/sec] となるのときの交通密度を飽和密度（jam density）といい、それぞれ v_f [m/sec] 及び d_j [veh/m] で表される値となる。

道路交通流は、臨界点を境界としてその状態が大きく変化し、臨界点よりも交通密度の小さい状態は自由流（free flow）または非渋滞流（noncongested flow）、臨界点よりも密度の大きい状態は混雑流または渋滞流（congested flow）と呼ばれる。自由流領域では各車両は比較的自由に走行することができるが、渋滞流領域では走行の自由性が制限される。また、臨界点付近では交通流の状態が不安定であ

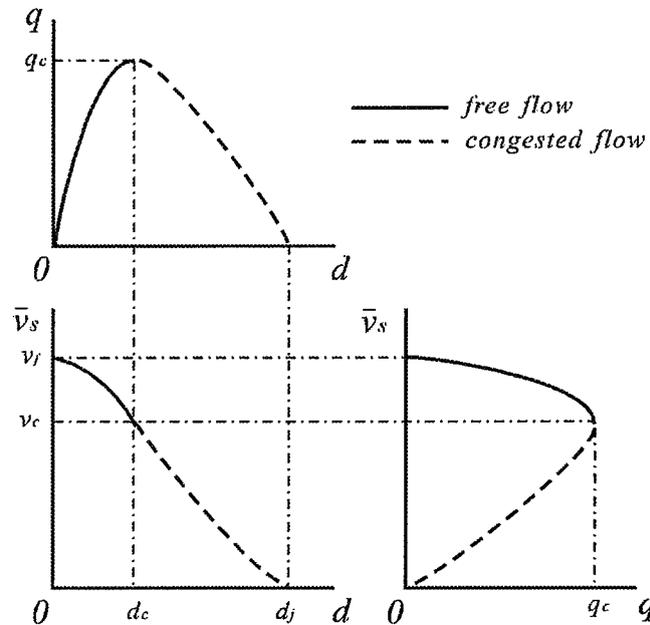


図 2.2 平均速度 \bar{v}_s , 交通密度 d , 交通流率 q の関係

り、自由流領域と渋滞流領域の間を遷移するため、個々の車両速度の少しの乱れから平均速度の低下や重度の渋滞をもたらすことがある。

2.2.3 車頭時間分布

前項で述べたように、交通流率や交通量の時間的な変化は、交通流の状態を表現するための様々な指標の中でも交通流現象に特に大きな影響を及ぼす。従って、本項では交通量と逆数の関係にある車頭時間分布の統計的特徴について詳述する。

道路があまり混雑していない場合、車両の発生や通過は確率論における独立事象とみなすことができ、車両の到着としてポアソン分布 (Poisson distribution) が適用できる。このとき、車両の流れを単位時間当たり平均 m [veh] の車両が到着するランダム過程であるとする、ある時刻 t [sec] までの間に n [veh] の車両が到着する確率 $P(n, t)$ は、

$$P(n, t) = \frac{(mt)^n}{n!} e^{-mt} \quad (2.4)$$

と表される。これより、ある時刻 t [sec] までの間に車両が到着しない確率 $P(0, t)$ と

その余事象すなわちある時刻 $t[\text{sec}]$ までの間に少なくとも 1 台以上の車両が到着する確率 $P(t)$ は、それぞれ次のようになる。

$$P(0, t) = e^{-mt} \quad (2.5)$$

$$P(t) = 1 - e^{-mt} \quad (2.6)$$

ここで、式 (2.6) は車両の到着間隔が $t[\text{sec}]$ 以下である確率に相当し、車頭時間間隔 $t[\text{sec}]$ の累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) となる。従って、車頭時間間隔 $t[\text{sec}]$ の確率密度関数 (PDF: Probability Density Function) $f(t)$ は、平均が $\mu = 1/m$ 、分散が $\sigma^2 = 1/m^2$ である次のような負の指数分布 (negative exponential distribution) となる。

$$f(t) = \frac{dP(t)}{dt} = me^{-mt} \quad (2.7)$$

実際の交通流では、車長に相当する時間分だけ車頭時間間隔の補正を行う必要があり、この指数分布を一定の最小車頭時間間隔だけシフトさせた分布 (shifted negative exponential distribution) を用いる場合がある [71]。

一方、交通量が多くなり道路が混雑してくると、先行車両に後続車両が追従して走行する傾向が強くなる。また、最小車頭時間間隔のばらつきが大きくなることなどから、アーラン分布 (Erlang distribution) が実際の車頭時間間隔により適合する分布として知られている [69]~[74]。ある時刻 $t[\text{sec}]$ までの間に $k[\text{veh}]$ 以上の車両が到着する確率 $P(t)$ は、式 (2.4) を n について $[k, \infty)$ の範囲で合計して

$$P(t) = \sum_{n=k}^{\infty} \frac{(mt)^n}{n!} e^{-mt} = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(mt)^n}{n!} e^{-mt} \quad (2.8)$$

と表され、これは $k[\text{veh}]$ 以上の車両が存在している時間間隔 $t[\text{sec}]$ の CDF となる。従って、この時間間隔 $t[\text{sec}]$ の PDF は、平均が $\mu = k/m$ 、分散が $\sigma^2 = k/m^2$ である次のようなアーラン分布となる。

$$f(t) = \frac{dP(t)}{dt} = \frac{m^k t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-mt} \quad (2.9)$$

ここで、 k はアーラン分布の位相パラメータとなり、 $k = 1$ の場合が指数分布となるなど、 k の値のとり方により様々な追従状態にある車頭時間分布を表現すること

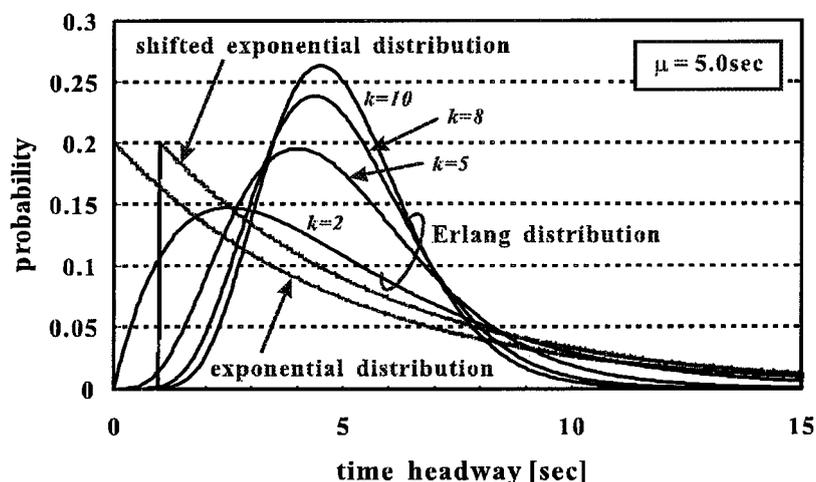


図 2.3 車頭時間分布

が可能である。図 2.3に、車頭時間分布としてアーラン分布を適用した場合の例を示す。

アーラン分布の位相パラメータには整数値が用いられるが、より忠実な車頭時間分布の表現を行うためこれを実数全体に拡張したガンマ分布 (Gamma distribution) が用いられる場合もある。さらに、最小車頭時間に対するシフト量を考慮することにより、これらの分布はピアソン III 型分布 (Pearson type III distribution family) として包括的に表現することができる [71],[75]。実交通流から得られたデータのより正確なモデル化を行うためには、出来る限り自由度の大きな分布すなわちガンマ分布やピアソン III 型分布を用いることが望ましいが、これらの分布は数学的に非常に複雑である。一方、アーラン分布は指数分布に従う確率変数の和の分布であり、指数分布そのものが待ち行列理論において理論を簡便化する性質も有しているため、車頭時間のモデル化の際の分布として適用されることが最も多い。

2.2.4 道路交通流のモデル

道路交通流のモデル化には様々な手法が存在するが、(1) 個々の車両の走行をランダム確率過程とみなし、確率理論によってミクロスコピックな解析を行う確率論的方法、(2) 道路交通流全体を流体とみなし、気体運動の理論を適用してその現象

の変化をマクロスコピックに表現する流体力学的方法、及び、(3) 交通流において前方車両に追従する後続車両の振舞いの規則性を仮定し、各車両の状態を表す微分方程式を用いて走行状態及びその変化を明らかにする動力学的方法が代表的な手法としてよく用いられる [70],[76]。本論文では、このうち容易な解析が可能であり最もよく用いられている確率論的方法による交通流モデルの構築を行う。

また、このような手法を適用して交通流モデルを構築する際、定常的もしくは非定常的な状態における動的な理論解析を行うことは非常に困難であるため、実際には計算機シミュレーションが用いられることが多い。交通流シミュレーションは、交通流に関するモデルを用いて時間変化などに対する交通流状態の再現を行うものであり、追従走行をベースとして微小時間間隔ごとに各車の位置を更新するピリオディックスキャニング (periodic scanning) 方式や、個々の車両の速度や加速度を変更するといったような事象の生起を追跡するイベントスキャニング (event scanning) 方式によるシミュレーションが多く用いられる [69]。本論文では、このうちピリオディックスキャニング方式によるシミュレーションを採用する。

図 2.4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い車線を第 3 車線と定義する。また、次の 3 つのパラメータを用いて交通流を特徴付ける。まず、同一車線を走行する車両の速度 v [km/h] を車線間で変化させる。次に、各車線の車頭時間 (図 2.4中の τ_i [sec]) の分布に、確率密度関数が

$$p(\tau_i) = \frac{(k/\mu)^k}{(k-1)!} \tau_i^{k-1} e^{-\frac{k}{\mu}\tau_i} \quad (2.10)$$

で与えられるアーラン分布を導入し [73]、これに基づいて車間距離を変化させる。ただし、 μ [sec] 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も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き、交通量の大きい状態が表現できる。さらに、大型車両と普通車両の 2 車種を考え、車線毎の全車両数に占める大型車両の割合を大型車両混入率 (LVR: Large-sized Vehicle Rate) として導入し、その値は車線間で独立に変化させるものとする。

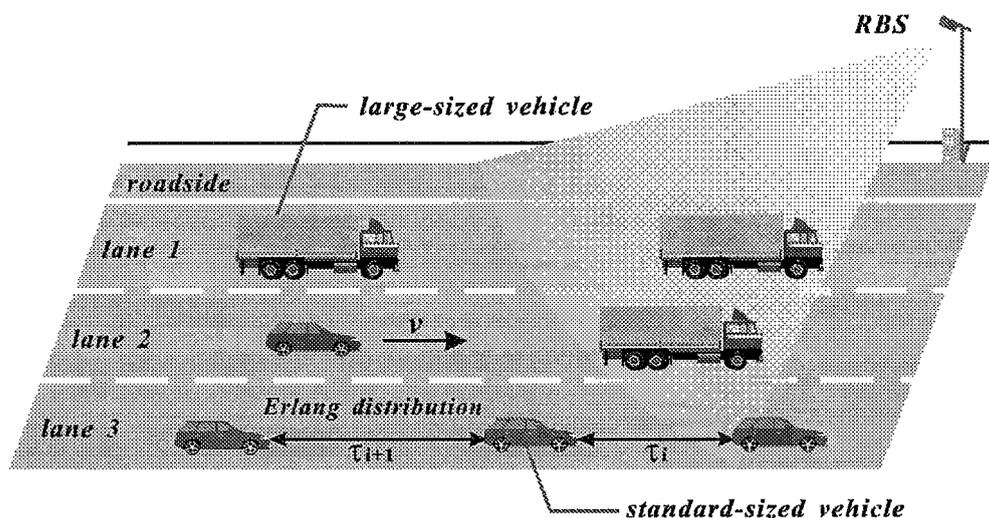


図 2.4 車両トラヒックの統計モデル

2.3 道路交通環境下の電波伝搬

本論文で通信遮断特性の評価検討を行う路車間通信システムでは、車両の高速走行や周辺車両による電波遮へいに伴う無線通信伝搬路の高速な変動が発生し、これが通信遮断の主たる原因として大きな影響を及ぼす。従って、本節では通信遮断解消技術の忠実な評価検討を行うために、周辺車両における電波反射及び電波回折を導入した多重路電波伝搬モデルの構築を行う。ただし、路車間通信時に用いる周波数帯は DSRC の標準規格に基づいて 5.8GHz と仮定し、その波長は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（付録 A 参照）。以下に、本論文で用いる電波伝搬モデルの構築手法を詳述する。

2.3.1 直接波と路面反射波による受信信号電力

狭域の路車間通信環境では、路側アンテナから到来する電波の経路数は限られているため、周辺車両等が比較的少ない環境では、RBSからの直接波（direct path）及び路面反射波（ground-reflection path）の2波が受信点へ到来する2波電波伝搬モデル（2-ray radio propagation model）が適用される [77],[78]。図 2.5に、直接波

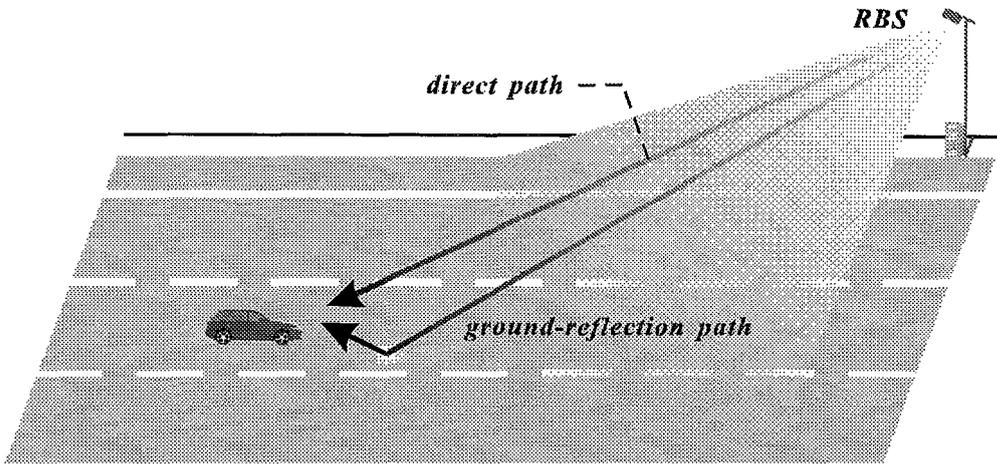


図 2.5 2 波電波伝搬モデル

と路面反射波の 2 波を仮定した電波伝搬モデルを示す。また図 2.6 に、直接波と路面反射波の電波伝搬特性解析のためのモデル図を示す。ただし、 r_d 及び r_l はそれぞれ直接波及び路面反射波の光学的距離である。

路側アンテナ及び車載アンテナとして無指向性アンテナを仮定し、路面反射時の電力減衰を無視した場合、直接波及び路面反射波による受信電界強度をそれぞれ e_d 、 e_l とすると、電界強度は光学的距離に逆比例することから

$$e_l = \frac{r_d}{r_l} e_d \quad (2.11)$$

という関係が成り立つ。

この式に、路側アンテナ及び車載アンテナの指向性利得及び路面反射係数 R_l を導入すると、直接波及び路面反射波による受信電界強度 E_d 、 E_l はそれぞれ

$$E_d = D_{1(\alpha)} D_{2(\alpha)} e_d \quad (2.12)$$

$$E_l = R_g D_{1(\beta)} D_{2(\beta)} e_l = \frac{r_d}{r_l} R_l D_{1(\beta)} D_{2(\beta)} e_d \quad (2.13)$$

で与えられる。ただし、 $D_{1(\alpha)}$ 及び $D_{2(\alpha)}$ はそれぞれ路側アンテナにおける直接波出射方向（図 2.6 の角度 α の方向）及び車載アンテナにおける直接波入射方向の指向性利得、また、 $D_{1(\beta)}$ 及び $D_{2(\beta)}$ はそれぞれ路側アンテナにおける路面反射波出

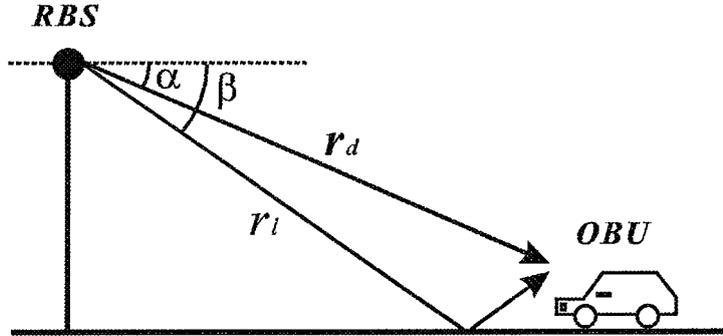


図 2.6 直接波と路面反射波のモデル

射方向（図 2.6 の角度 β の方向）及び車載アンテナにおける路面反射波入射方向の指向性利得である。

路面反射波は直接波に比べて光路差 $r_l - r_d$ に相当する位相遅れが生じることを考慮すると、直接波及び路面反射波による合成受信電界 E_{2ray} は、

$$\begin{aligned} E_{2ray} &= E_d + E_l \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_l - r_d) \right\} \\ &= D_{1(\alpha)} D_{2(\alpha)} e_d + \frac{r_d}{r_l} R_l D_{1(\beta)} D_{2(\beta)} e_d \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_l - r_d) \right\} \\ &= e_d \left[D_{1(\alpha)} D_{2(\alpha)} + \frac{r_d}{r_l} R_l D_{1(\beta)} D_{2(\beta)} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_l - r_d) \right\} \right] \quad (2.14) \end{aligned}$$

となる。ただし、 λ は波長である。ここで、 E_{2ray} と e_d の比をとると

$$\left| \frac{E_{2ray}}{e_d} \right|^2 = \frac{P_{2ray}}{P_d} = \left| D_{1(\alpha)} D_{2(\alpha)} + \frac{r_d}{r_l} R_l D_{1(\beta)} D_{2(\beta)} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_l - r_d) \right\} \right|^2 \quad (2.15)$$

を得る。ただし、 P_{2ray} 及び P_d はそれぞれ 2 波電波伝搬モデルを用いた場合の総合受信電力、及び送受信アンテナの素子として無指向性アンテナを用いたときの直接波のみによる受信電力である。このとき P_d は、送信電力 P_t 、路側アンテナの利得 G_t 、車載アンテナの利得 G_r 、及び波長 λ を用いて

$$P_d = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right)^2 \quad (2.16)$$

と表せる [79] ので、式 (2.15) 及び式 (2.16) より

$$P_{2ray} = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right)^2 \left| D_{1(\alpha)} D_{2(\alpha)} + \frac{r_d}{r_l} R_l D_{1(\beta)} D_{2(\beta)} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_l - r_d) \right\} \right|^2$$

$$\begin{aligned}
&\equiv P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right)^2 \left| D_d + \frac{r_d}{r_l} R_l D_l \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_l - r_d) \right\} \right|^2 \\
&= P_t G_t G_r \left| D_d \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right) + R_l D_l \left(\frac{\lambda}{4\pi r_l} \right) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_l - r_d) \right\} \right|^2 \quad (2.17)
\end{aligned}$$

を得る。ただし、 $D_d = D_{1(\alpha)} D_{2(\alpha)}$ 、 $D_l = D_{1(\beta)} D_{2(\beta)}$ とした。式(2.17)より、直接波と路面反射波の光路差によって電波干渉が発生し、受信電力が大きく変動することが分かる。

2.3.2 車両反射波と回折波を考慮した電波伝搬モデル

本論文で用いる車両トラヒックの統計モデルは、実交通流を想定したものであるため、周辺車両の位置関係は時々刻々と変化する。このような環境における道路上での電波伝搬環境は、RBSからの直接波及び路面反射波に加え、周辺車両からの反射波、回折波を含めた多重路伝搬を考慮する必要がある[80]～[84]。本項では、前項で述べた2波電波伝搬モデルに周辺車両における電波反射及び電波回折を導入した電波伝搬モデルを構築する。

図2.7に、直接波、路面反射波、車両反射波(vehicle-reflection path)、及び回折波(diffraction wave)を仮定した電波伝搬モデルを示す。ただし、車両反射波とは、受信点に到来する電波のうち隣接車線を走行する車両の側面において反射された電波とする。

前項で述べた2波電波伝搬モデルに車両反射波を導入するには、式(2.17)に車両反射波による受信電界をベクトル的に加えればよい。すなわち、直接波、路面反射波、及び車両反射波による総合受信電力 P_{d+l} は次式で与えられる。

$$P_{d+l} = P_t G_t G_r \left| D_d \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right) + \sum_{i=1}^p R_{l_i} D_{l_i} \left(\frac{\lambda}{4\pi r_{l_i}} \right) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_{l_i} - r_d) \right\} \right|^2 \quad (2.18)$$

ここで、 D_{l_i} は路面及び車両反射波に対する指向性利得、 r_{l_i} は路面及び車両反射波の光学的距離、 R_{l_i} は路面及び車両反射係数である。また、 p の値は車両に到来する路面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全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。

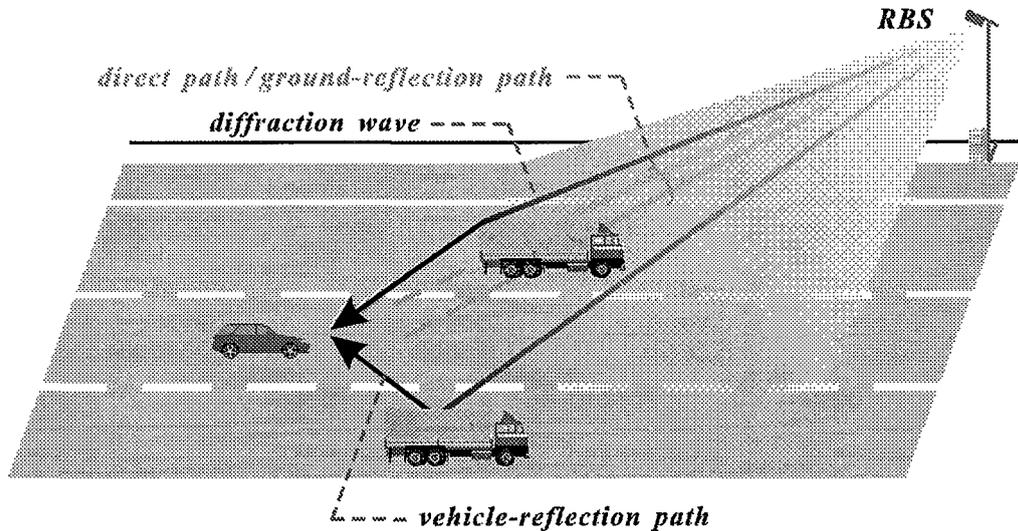


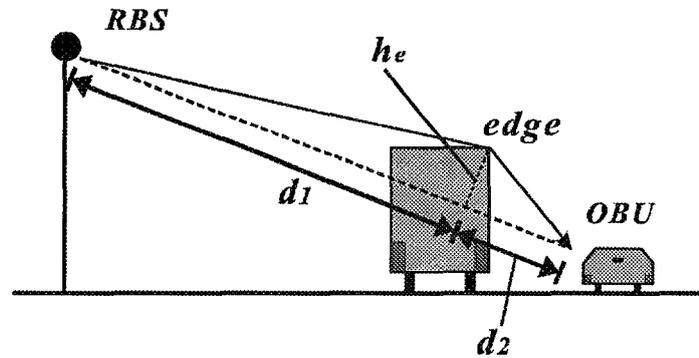
図 2.7 周辺車両における電波反射及び電波回折を考慮した電波伝搬モデル

路車間通信システムでは、周辺車両の位置関係の頻繁な変化に伴って、直接波や路面反射波が他の車両、特に大型車両によって遮られる場合が頻繁に発生する。しかしながら、大型車両の車体稜線を経由す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、通信を維持することが可能である。このことは理論的 [85]、実験的 [50] 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両の車体稜線における電波回折を導入する。ここで、大型車両の車体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 [86]、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 2.8(a) に、3次元の幾何光学近似を用いた場合の大型車両の車体稜線における電波回折モデルを示す [87]。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

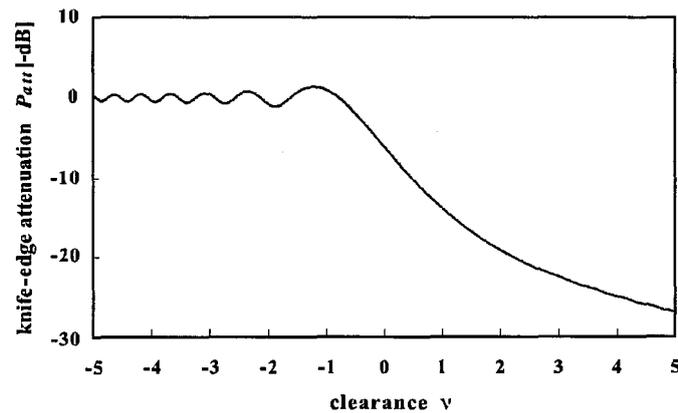
$$P_{diff} = P_d - P_{att} \text{ [dBm]} \quad (2.19)$$

で与えられる。ただし、 P_d は直接波の存在を仮定した場合の仮想電力であり、 P_{att} は次式で与えられるナイフエッジ回折損である。

$$P_{att} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} + C^2(\nu) - C(\nu) + S^2(\nu) - S(\nu) \right\} \right] \text{ [dB]} \quad (2.20)$$



(a) 大型車両の車体稜線における電波回折モデル



(b) ナイフエッジ回折損

図 2.8 ナイフエッジ回折モデル

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 2.8(a) 中の d_1 、 d_2 、及び余剰高 h_e を用いて次式で表される。

$$\nu = h_e \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (2.21)$$

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 2.8(b) 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し、直接波あるいは反射波、またその両方が存在するときは回折波を無視して、受信点における総合受信電力 P_R を

$$P_R = \begin{cases} P_{d+r} \text{ [dBm]} & (\text{w/ direct and/or reflection path}) \\ P_{diff} \text{ [dBm]} & (\text{w/o direct and reflection path}) \end{cases} \quad (2.22)$$

で与える。

2.4 路車間通信システムモデル

図 2.9 に、上述の交通流モデル及び直接波、反射波、回折波を考慮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 (obstruction vehicle) と呼ぶ。本モデルでは、RBS は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 RBS で区切られた各々の区間を、1 つの RBS がカバーする通信ゾーン (communication zone) と定義する。また、路側アンテナは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。

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{w_s + 3/2 \times w_l}{L/2} \right) \text{ [rad]} \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{h_b}{L/2} \right) \text{ [rad]} \end{aligned} \quad (2.23)$$

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、 L は隣接する RBS 間の距離である。また、車載アンテナは各車両のダッシュボード上に設置されるものとする。

2.5 通信遮断の定義

本論文では、対象車両における受信 CNR が所要誤り率 (BER: Bit Error Rate) を達成するための所要値を下回るとき、これを通信遮断と定義し、通信遮断の発生頻度を表す通信遮断率 (LBR: Link-Blocking Rate) p_L を次のように定義する。

$$p_L = \left\langle \frac{\text{通信ゾーン通過時の通信遮断継続時間の総和}}{\text{通信ゾーン通過時間}} \right\rangle \quad (2.24)$$

ただし、 $\langle \cdot \rangle$ は全車両の集合平均である。

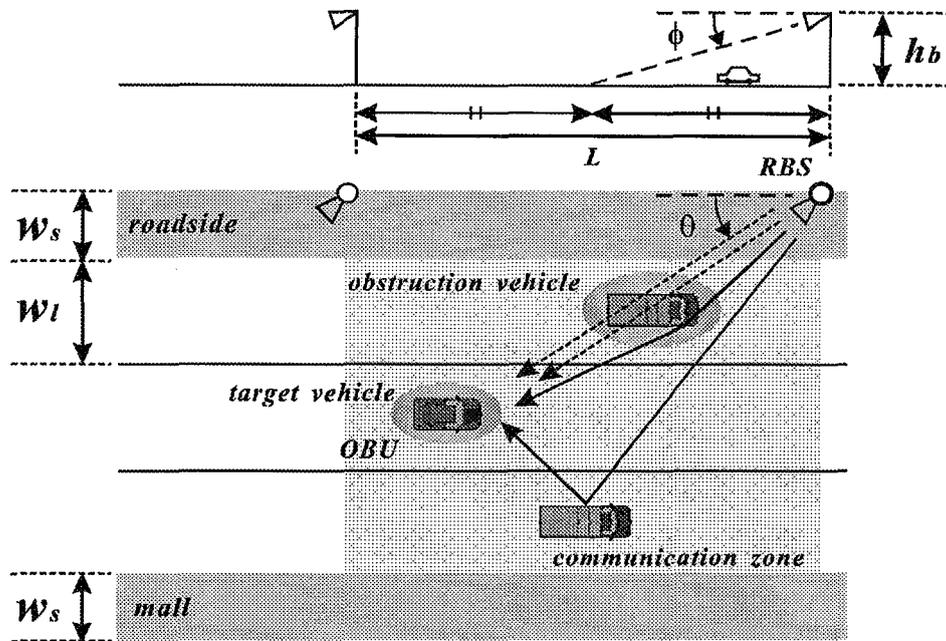


図 2.9 路車間通信システムモデル

2.6 結言

本章では、交通流現象を大きく特徴付ける指標を導入した交通流モデル、及び周辺車両における電波反射及び電波回折を導入した多重路電波伝搬モデルの構築を行い、通信遮断解消技術の評価検討を行うために必要となる路車間通信システムのモデル化を行った。また、通信遮断の定義を示すとともに、その評価指標として3章以降で用いる通信遮断率に関して説明を加えた。

第3章 適応変調を用いた通信遮断解消技術

3.1 序言

本章では、適応変調の路車間通信システムへの適用による通信遮断解消効果を明らかにする。路側アンテナと車載アンテナを結ぶ見通し線が大型車両によって遮へいされると、通信中の車両における受信信号電力は著しく低下するが、大型車両の車体稜線を経て到来する回折波が無線通信を維持する上で有効な電力を有していれば、適応変調を用いて受信信号電力に応じた多値数の小さい変調フォーマットに切り換えることで、固定的な変調方式を用いた場合に発生する通信遮断を解消できる。本章では、第2章で構築した路車間通信システムモデルを適用した計算機シミュレーションを用いて、通信遮断継続時間ならびに実効伝送速度の改善効果を定量的に評価し、適応変調を用いることの有効性を示す。

3.2 適応変調を用いた通信遮断解消技術

実際の交通流では、各車両の位置関係は時々刻々と変化し、これに応じて電波伝搬環境も激しく変動する。図3.1に、通信ゾーン内の第2車線を走行する対象車両すなわち路車間通信を行う車両における受信信号電力の変動例を示す。同図より、この対象車両に対して4種類の特徴的な電波伝搬環境が存在していることが分かる。これらの環境を、対象車両が受ける順に領域A、領域B、領域C、及び領域Dとし、各領域での周辺車両の位置関係を図3.2に示す。これらの各領域における電波伝搬環境の特徴を以下に述べる。

- 領域A

直接波及び路面反射波は第1車線を走行する車両（遮へい車両）によって遮られる。また、第3車線には対象車両のすぐそばを走行している車両が存在しているが、幾何学的な位置関係により、第3車線の車両における反射波は対象車両には到達しない。従って、第2車線を走行する車両は回折波による電力のみが得られる。このときの受信信号電力は、-65dBmを下回る小さな値となっている。

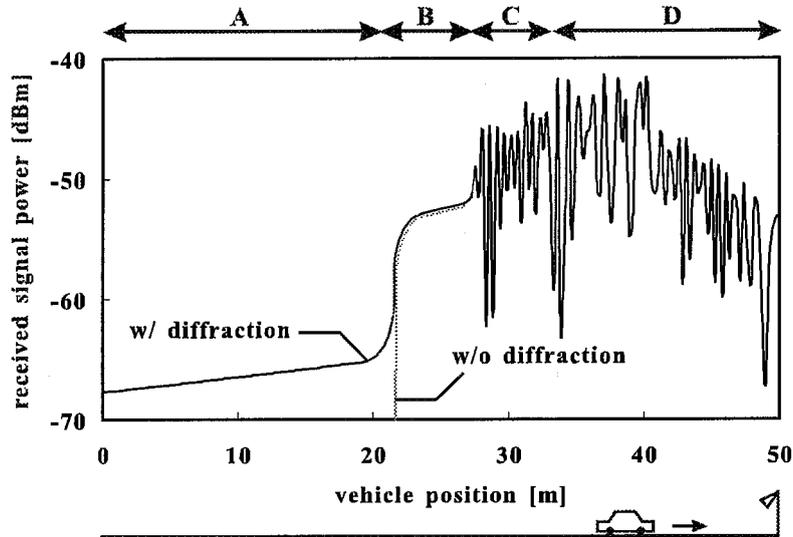


図 3.1 ある車両における受信信号電力の変動例

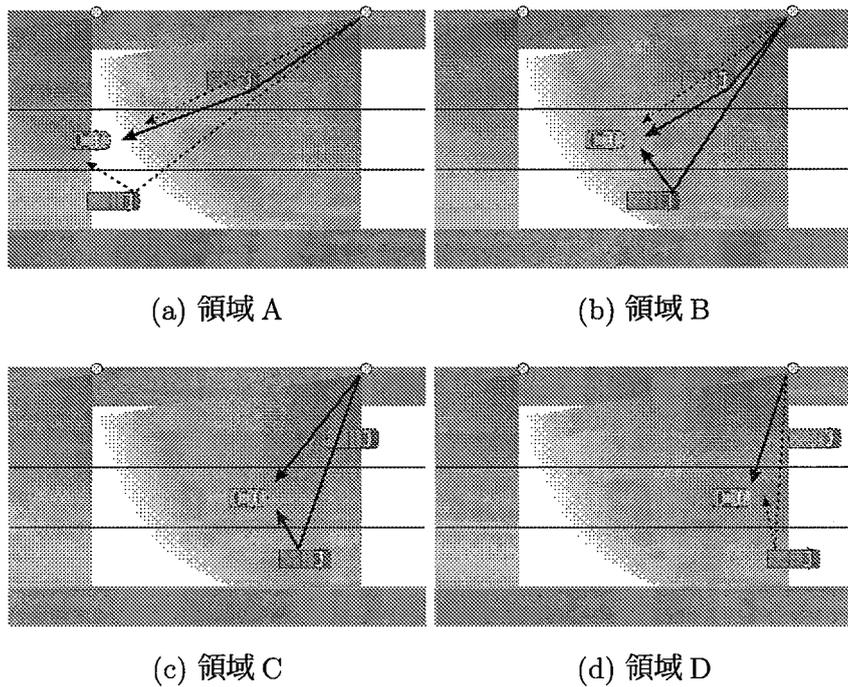


図 3.2 ある車両における無線通信環境の時間変化

- 領域 B

直接波及び路面反射波は、第 1 車線を走行する車両（遮へい車両）によって遮られたままであるが、第 3 車線を走行する車両は第 2 車線を走行する対象車両の速度よりも速く、2 台の車両間の距離は大きくなる。その結果、幾何学的位置関係が変化し、対象車両は第 3 車線を走行する車両で反射した反射波（車両反射波）を受信できるようになる。反射する車両の車体が金属であるため、その受信信号電力は直接波と同程度の大きな値となっている。

- 領域 C

対象車両と第 1 車線を走行する車両（遮へい車両）との位置関係が変化し、直接波と路面反射波が到達する。また、第 3 車線を走行する車両における反射波も受け続け、直接波、路面反射波、車両反射波間で干渉を起こすため受信信号電力が激しく変動し、最大で 20dB 程度の落ち込みが発生している。

- 領域 D

第 3 車線を走行する車両における反射波が、幾何学的位置関係により再び対象車両に到達しなくなり、直接波及び路面反射波のみを受信する。このとき、受信信号電力の変動幅は 10dB 程度である。また、対象車両は RBS 直下に近づくため平均受信信号電力が減少し始めている。

狭域の通信ゾーン内において出来るだけ多くの情報を送受信するためには、路車間通信システムにおける伝送容量と周波数利用効率の向上が必要とされる。これを実現する手法の 1 つに、情報信号の変調方式として直交振幅変調（QAM: Quadrature Amplitude Modulation）方式を用いる方法がある。QAM は、搬送波の振幅と位相を同時に変化させる変調方式で、2 次元信号空間に M 値の信号点を割り当てるため、他の変調方式と比較して周波数利用効率が優れている。また、単一搬送波で多くのビット信号が送信可能であるため、伝送容量を増加させることができる [88]。

ガウス雑音下でのグレイ符号割り当ての QAM 方式の適用を仮定した場合、その平均 BER は

$$\text{BER} = \frac{2}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \text{erfc} \sqrt{\frac{3\gamma}{2(M-1)}} \quad (3.1)$$

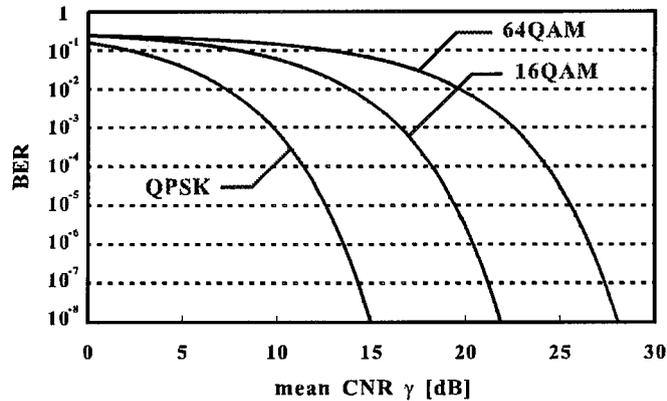


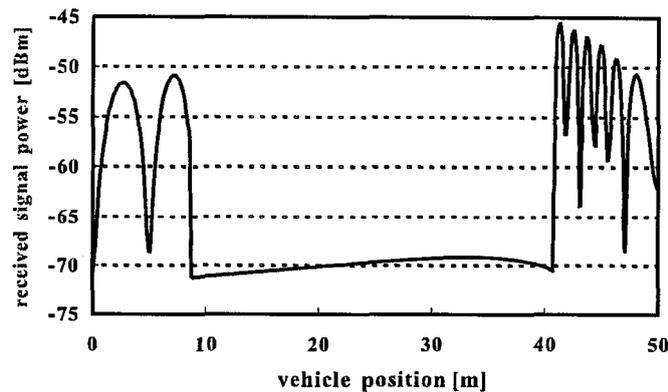
図 3.3 直交振幅変調方式の BER

で与えられる（付録 B 参照）。ただし、 γ は平均 CNR、 M は変調多値数である。これより、QPSK ($M=4$)、16QAM ($M=16$)、64QAM ($M=64$) の BER を図示すると図 3.3 のようになる。同図より、ある BER を得るための CNR は、変調多値数 M が増加するに従って大きくなるのが分かる。これは、送信電力一定のもとで比較した場合、変調多値数を大きくするほど最小信号点間距離が小さくなり、誤りが発生しやすくなることに起因する。

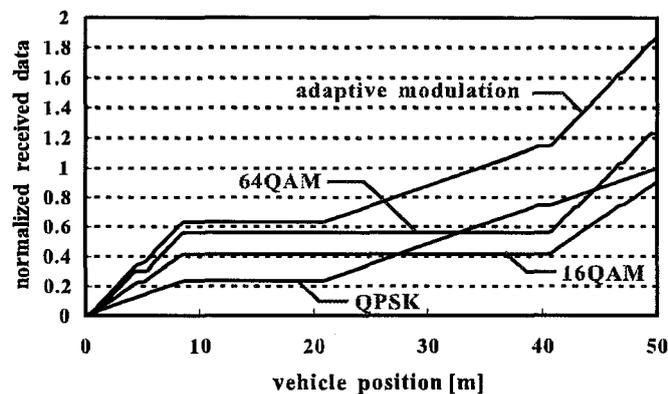
電波伝搬環境が著しく変動する状況において路車間通信を実施する際に、変調多値数の大きな QAM を用いる場合、大型車両が引き起こすシャドウイングなどによる受信信号電力の低下に起因する通信遮断が発生しやすくなるという欠点がある。一方、通信遮断の発生を最小限に抑えるために、変調多値数の小さな QAM を用いる場合、伝送容量が小さいために実効伝送速度が向上しないという欠点がある。これらの問題点を改善するために、本論文では受信信号電力に応じて変調多値数を変化させる適応変調方式を路車間通信システムに適用する。すなわち、受信 CNR が高いときには多値数の大きい変調方式、通信遮断などにより受信 CNR が低くなるときには多値数の小さい変調方式を用いることで、通信遮断の発生率を出来る限り低く抑えつつ実効伝送速度の向上を図ることを目的としている [60]～[64]。

図 3.4 に、適応変調方式の適用効果を説明するための図を示す。同図 (a) は、通信ゾーン内である対象車両における受信信号電力の変動例であり、同図 (b) は各多値変調方式及び適応変調方式を用いた場合の正規化受信信号量の累積値である。

ただし、正規化受信信号量とは、通信ゾーン内において QPSK を用いて得られた受信信号量の総和を 1 として正規化した値である。また、適応変調方式を用いる場合の変調多値数の切り換えの際に発生する制御遅延は考慮していない。



(a) ある車両における受信信号電力の変動例



(b) 正規化受信信号量の累積値

図 3.4 適応変調方式の適用効果

同図より、対象車両の位置が 10m から 40m の区間は回折波による弱い受信信号電力が得られているが、このうち 10m から 20m の区間では受信信号電力が特に弱く、いずれの変調方式を用いても所要 CNR を下回ってしまうため受信信号量は増加しない。一方、車両位置が 20m を超えると QPSK を用いた場合のみ信号の受信が可能となる。また、16QAM 及び 64QAM を用いた場合では、回折波によ

る弱い受信信号電力のみが得られる 10m から 40m の区間では非通信状態となる。しかしながら、対象車両の位置が 40m を超えると受信信号電力が大きくなるため、16QAM と 64QAM を用いた場合ともに信号の受信が可能となるが、16QAM を用いた場合は QPSK を用いた場合よりも受信データ量の総和は少なくなっている。

これに対し、QPSK, 16QAM, 64QAM を受信信号電力に応じて適応的に切り替える適応変調方式を用いた場合、車両位置が 20m から 40m の区間では受信 CNR が低くても通信可能な QPSK, 40m から 50m の区間では受信 CNR が高いため高速通信が可能な 64QAM を用いることで、効率よく信号が受信できることが分かる。次節以降では、以上の効果を計算機シミュレーションにより定量的に評価する。

3.3 シミュレーション

3.3.1 シミュレーション条件

表 3.1 に、本節で用いる計算機シミュレーションの条件を示す。本シミュレーションでは、DSRC の標準規格に基づいて、路車間通信で使用する周波数帯の中心周波数として 5.8GHz を用いたダウンリンク通信を想定する。路側アンテナ（送信アンテナ）は方形開口アンテナとし、車載アンテナ（受信アンテナ）には無指向性アンテナを用いる。送信側では変調方式を適応的に切り替えられるものとし、受信 CNR に応じて QPSK, 16QAM, 64QAM の 3 種類を用いるものとする。また、車載アンテナは各々のダッシュボード上に設置されるものと仮定する。DSRC の標準規格では誤り訂正符号として BCH(63,51) 符号の使用が規定されており、これを適用することで通信遮断率を等価的に低減することが可能であるが、本シミュレーションでは変調多値数を適応的に切り換えることによる通信遮断解消効果に着目しているため、誤り訂正符号の適用は考慮していない。

次に、実交通環境に基づいた自由流及び渋滞流に関する交通流パラメータを表 3.2 に示す [89]。ただし、各車線内の車両速度は等しいものと仮定した。自由流では、路側に近い第 1 車線ほど混雑する傾向があるものとし、車両速度を小さく、またアーラン分布の位相パラメータ及び大型車両混入率を大きく設定した。また、渋滞流では、各車線の交通流状態はほぼ同じ傾向を示すものとし、車線毎の車両速度、アーラン分布の位相パラメータ、及び大型車両混入率の差を小さく設定した。

表 3.1 シミュレーション条件

RBS (Transmitter)	Transmitted frequency, f		5.8 GHz
	Transmitted power, P_t		10 dBm
	Antenna configuration		Rectangular aperture
	Antenna gain, G_t		10 dBi
	Antenna height, h_b		5m or 10m
	Deployment interval, L		50m or 100m
OBU (Receiver)	Antenna configuration		Omni-dipole
	Antenna gain, G_r		5 dBi
	Bandwidth, B		5 MHz
	Noise figure, F		10 dB
	Required BER		10^{-5}
	Required CNR (Required power)	QPSK	12.6 dB (-84.2 dBm)
16QAM		19.5 dB (-77.3 dBm)	
64QAM		25.6 dB (-71.2 dBm)	
Lane width, w_l			4.0 m
Roadside width, w_s			2.0 m
Road reflection coefficient			0.8
Vehicle reflection coefficient			0.9
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
Vehicle dashboard height			(Std) 1.0 m, (Lrg) 2.5 m

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

表 3.2 交通流に関するパラメータ

Lane		Lane 1	Lane 2	Lane 3
Free flow	Mean vehicle speed	80 km/h	90 km/h	100 km/h
	Mean time headway	4.0 sec	3.0 sec	2.0 sec
	Phase (Congestion factor)	4	3	2
	Large-sized vehicle rate (LVR)	0.7	0.5	0.3
Congested flow	Mean vehicle speed	10 km/h	15 km/h	20 km/h
	Mean time headway	5.0 sec	5.0 sec	5.0 sec
	Phase (Congestion factor)	6	6	6
	Large-sized vehicle rate (LVR)	0.5	0.4	0.3

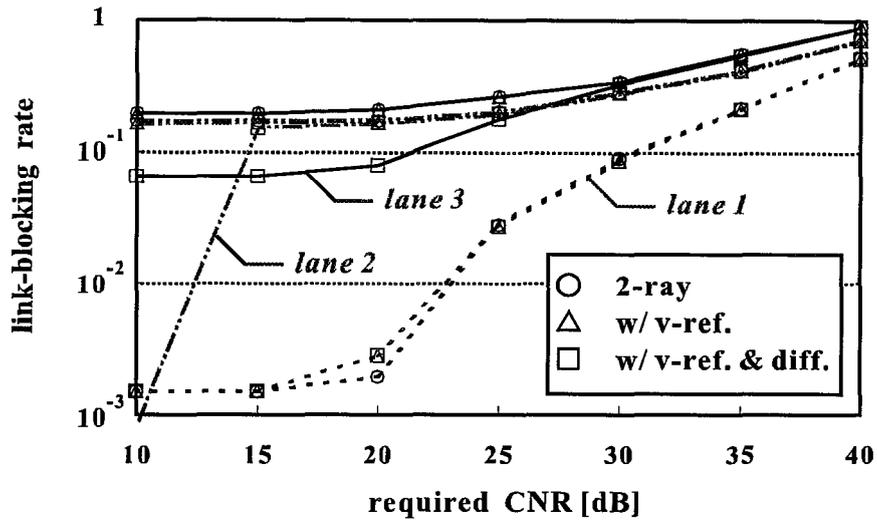
3.3.2 通信遮断率

3.3.2.1 自由流における通信遮断率特性

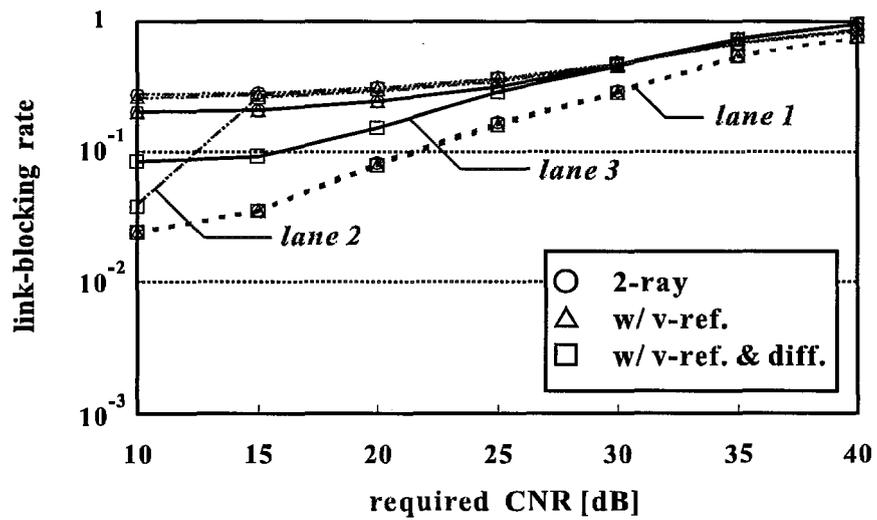
本項では、自由流における所要 CNR と通信遮断率の関係を計算機シミュレーションにより示す。図 3.5 及び図 3.6 に、普通車両を対象車両としたときの所要 CNR に対する通信遮断率を示す。ただし、図中の “w/ v-ref. & diff.” は直接波、路面反射波、車両反射波、及び回折波の到来を仮定した場合であり、その比較対象として “2-ray” すなわち直接波及び路面反射波の到来のみを仮定した場合、及び “w/ v-ref.” すなわち直接波、路面反射波、及び車両反射波の到来を仮定した場合を同図に示している。

3.3.2.1.1 路側アンテナ高及び通信ゾーンに対する通信遮断率特性

図 3.5 及び図 3.6 各々の (a) と (b) を比較することにより、車線によらず、いずれの場合においても通信ゾーンの拡大に伴って通信遮断率が悪化することが分かる。これは、対象車両が路側アンテナから遠い位置に存在するほど、路側アンテナと対象車両の間に存在する車両数が増加し、それらが遮へい車両となり路側アンテナとの見通し線を遮る可能性が増加するためである。また、図 3.5 と図 3.6 を比較する

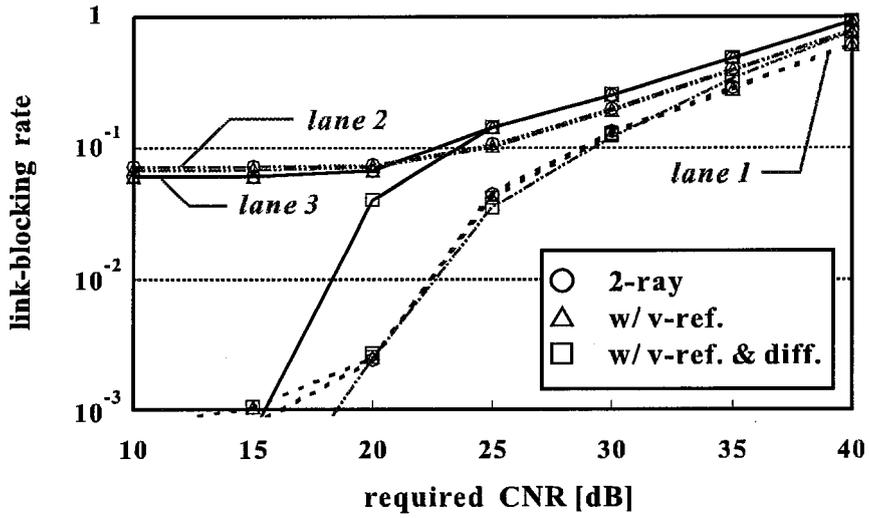


(a) $L=50\text{m}$

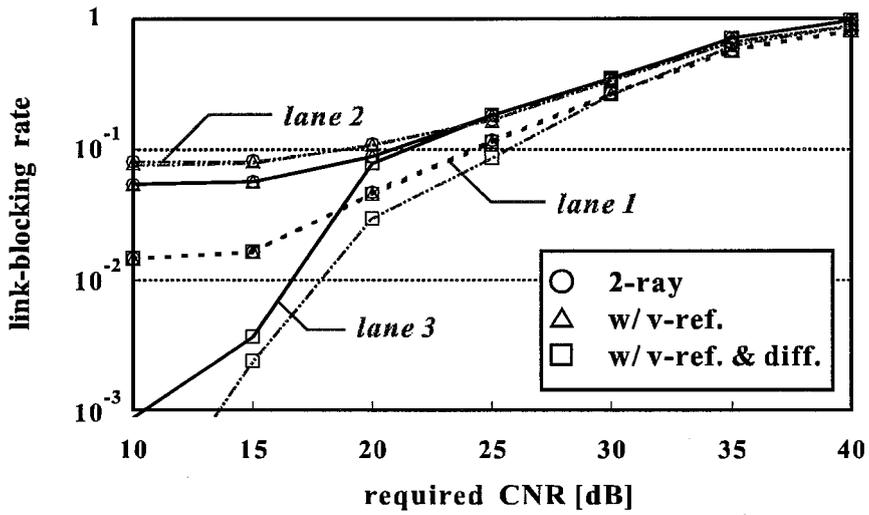


(b) $L=100\text{m}$

図 3.5 所要 CNR に対する通信遮断率 (Free flow, $h_b=5\text{m}$)



(a) $L=50m$



(b) $L=100m$

図 3.6 所要 CNR に対する通信遮断率 (Free flow, $h_b=10m$)

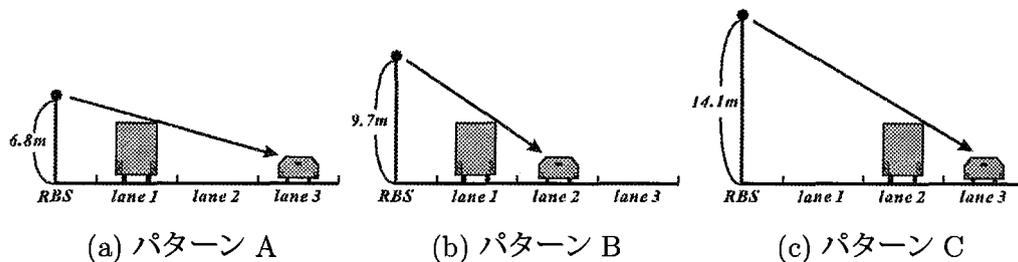


図 3.7 見通し線の存在限界

ことにより、第2車線及び第3車線においては、路側アンテナ高を高くすることで通信遮断率の低減が得られることが分かる。これは、路側アンテナ高を高くすることで、対象車両から路側アンテナを見通すことができる可能性が高くなるからである。特に、図 3.7に示したように、路側アンテナ高を10mにすることによって第1車線の大型車両による通信遮断が全く発生しなくなるため、第2車線及び第3車線では通信遮断率の大幅な低減が得られている。

しかしながら、第1車線における通信遮断率は、路側アンテナ高を高くしてもほとんど低減されないか、むしろ悪化している場合があることが分かる。これは、路側アンテナ高を高くすることによって見通し線がより高確率で確保されるものの、第1車線は路側アンテナと対象車両との距離が他の2車線と比較して短く、路側アンテナ高を高くすることによる伝搬減衰の増加が通信遮断率の変化に影響を与えているからであると考えられる。

3.3.2.1.2 車両反射波及び回折波に対する通信遮断率特性

車両反射波は、路側アンテナと対象車両の幾何学的位置関係によりその反射点が一意に決まる。従って、その反射点の位置に車両が存在するか否かが通信遮断の特性に大きな影響を及ぼす。また、回折波の電力は2.3節で述べたように余剰高に比例したクリアランス係数に従って減衰するため、この余剰高の大きさが通信遮断の特性に大きな影響を及ぼす。

まず、図 3.5及び図 3.6各々の“2-ray”と“w/ v-ref.”を比較することにより車両反射波に対する効果をみてみると、通信遮断率の顕著な変化はいずれの車線におい

でも見られないことが分かる。特に、第3車線においては、到来する車両反射波が存在しないので、直接波及び路面反射波の到来のみを仮定した場合と全く同じ特性を示している。また、第2車線における車両は、第3車線を走行する車両からの車両反射波を受信できる可能性があるが、第3車線の平均車頭距離は非常に大きく、路側アンテナと対象車両の幾何学的位置関係により一意に決まる反射点に車両がちょうど存在する確率は極めて低いため、車両反射波による効果がほとんど現れないものと考えられる。

一方、第1車線においては路側アンテナ高が5mの場合に僅かながら車両反射波による効果が見られる場合がある。これは、異なる経路を通った車両反射波すなわち第2車線及び第3車線から到来したものを同時に受信できる可能性が高くなるからである。しかしながら、路側アンテナ高が10mになると、図3.8に示したような路側アンテナと対象車両の幾何学的位置関係により、車両反射波がほとんど到来しなくなるので、車両反射波による効果は全く現れない。また、図3.5(a)の場合のみ、車両反射波の存在を仮定した場合の通信遮断率は、これを仮定しない場合より悪くなっており、直接波や路面反射波との干渉により必ずしも通信遮断率が低減されるわけではないということを示している。

次に、図3.5及び図3.6各々の“w/ v-ref.”と“w/ v-ref. & diff.”を比較することにより回折波に対する効果をみてみると、第2車線及び第3車線における通信遮断率が回折波により大きく低減されていることが分かる。また、路側アンテナ高を高くすれば、路側アンテナと対象車両との距離が大きくなり伝搬減衰が僅かに増加する一方で、クリアランス係数の値は小さくなり回折波の電力が非常に大きくなるので、回折波による低減効果がより大きく現れる。特に、路側アンテナ高を10mにした場合の第2車線における通信遮断率は、第1車線の大型車両における回折波を考慮することにより第1車線よりも低い値が達成されている。

また、路側アンテナ高が5mのとき、所要CNRを低くするに従ってまず第3車線の通信遮断率が徐々に低減され、次いで第2車線の通信遮断率が低減される。一方、路側アンテナ高が10mのときは、所要CNRを低くするに従ってまず第2車線の通信遮断率が徐々に低減され、次いで第3車線の通信遮断率が低減されるという傾向がある。この要因を考察するため、図3.9に対象車両と遮へい車両の位置関係に対する余剰高の変化の様子を示す。

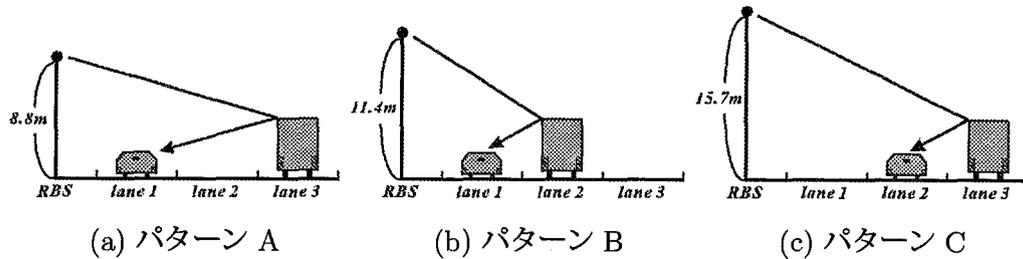


図 3.8 車両反射波の存在限界

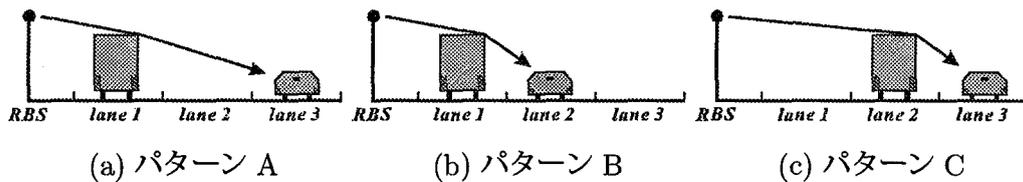


図 3.9 車両の位置関係に対する余剰高の変化

路側アンテナ高が低いときは、第2車線及び第3車線における通信遮断は、ともに第1車線の大型車両によるものが支配的となるので、図 3.9(a) 及び図 3.9(b) のような状況が頻繁に発生していると考えられる。このとき、余剰高は図 3.9(a) の方が小さくなり、回折波による電力が大きな値となるため、第3車線における車両は第2車線における車両より大きな電力が得られやすいこととなる。一方、路側アンテナ高が高いときは、第2車線における通信遮断は第1車線の大型車両によるもの、また第3車線における通信遮断は第2車線の大型車両によるものがそれぞれ支配的となるので、図 3.9(b) 及び図 3.9(c) の状況が頻繁に発生していると考えられる。このとき、余剰高は図 3.9(b) の方が小さくなり、回折波による電力が大きな値となるため、第2車線における車両は第3車線における車両より大きな電力が得られやすいこととなる。

これに対し、第1車線における対象車両は、直前を走行する大型車両による通信遮断が支配的であり余剰高が非常に大きいので、回折波による通信遮断率の低減効果はほとんど得られない。

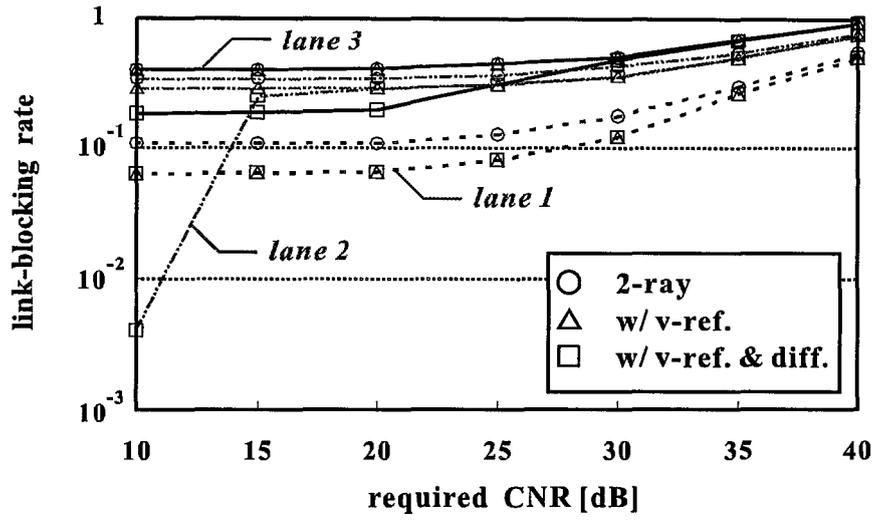
3.3.2.2 渋滞流における通信遮断率特性

本項では、渋滞流における所要 CNR と通信遮断率の関係を計算機シミュレーションにより示す。図 3.10及び図 3.11に、普通車両を対象車両としたときの所要 CNR に対する通信遮断率を示す。ただし、図中の“w/ v-ref. & diff.”は直接波、路面反射波、車両反射波、及び回折波の到来を仮定した場合であり、その比較対象として“2-ray”すなわち直接波及び路面反射波の到来のみを仮定した場合、及び“w/ v-ref.”すなわち直接波、路面反射波、及び車両反射波の到来を仮定した場合を同図に示している。

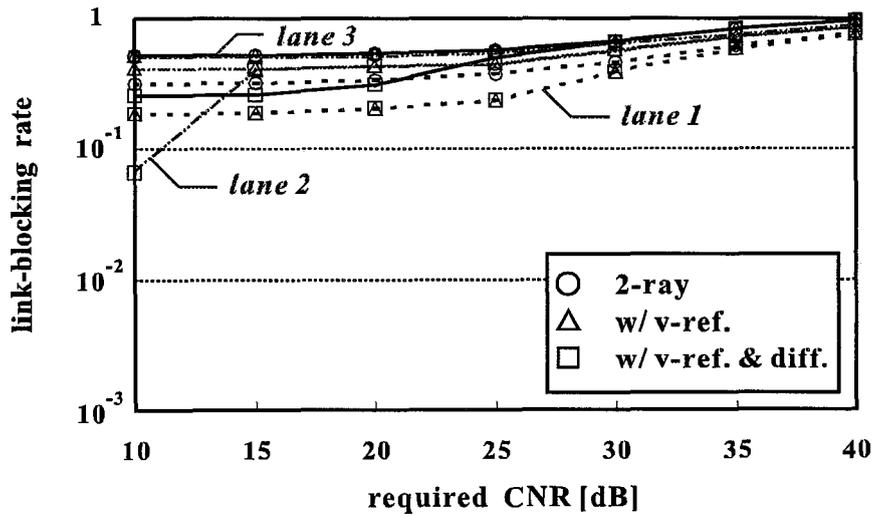
3.3.2.2.1 路側アンテナ高及び通信ゾーンに対する通信遮断率特性

図 3.10及び図 3.11より、渋滞流の場合の通信遮断率は自由流と比較して全体的に悪化する傾向がある。これは、通信ゾーン内に存在する車両台数が自由流の場合よりも多く、路側アンテナと対象車両との見通し線を遮る可能性がより高くなるからである。一方、自由流の場合と同様に、図 3.10及び図 3.11各々の (a) と (b) を比較すると、車線によらず、いずれの場合においても通信ゾーンの増加に伴って通信遮断率が悪化することが分かる。これは、対象車両が路側アンテナから遠い位置に存在するほど、路側アンテナと対象車両の間に存在する車両数が増加し、それらが遮へい車両となり路側アンテナとの見通し線を遮る可能性が増加するためである。

また、図 3.10と図 3.11を比較することにより、車線によらず路側アンテナ高を高くすることで通信遮断率の低減が得られることが分かる。これは、路側アンテナ高を高くすることで、対象車両から路側アンテナを見通すことができる可能性が高くなるからである。さらに、自由流の第1車線においては、路側アンテナ高を高くすることによる見通し線確保の確率の増加と伝搬減衰による電力減衰の相殺により、通信遮断率の低減はほとんど見られなかったが、渋滞流では第1車線においても低減されている。これは、渋滞流では通信ゾーン内に存在する車両台数が自由流の場合よりも多く、路側アンテナ高を高くすることによる対象車両における見通し線の確保の割合がより大きいからであると考えられる。また、自由流と同様に、路側アンテナ高を 10m にすることによって第1車線の大型車両による通信遮断が全く発生しなくなるため、通信遮断率の大きな低減が得られている。

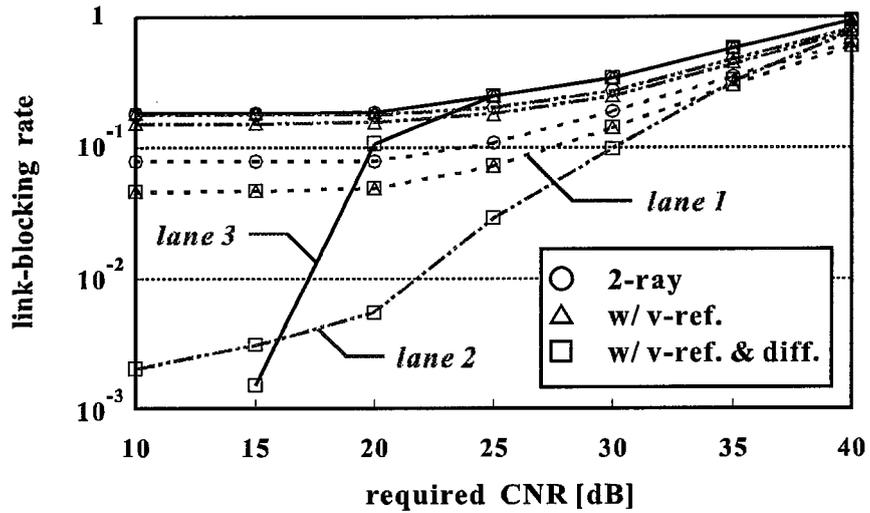
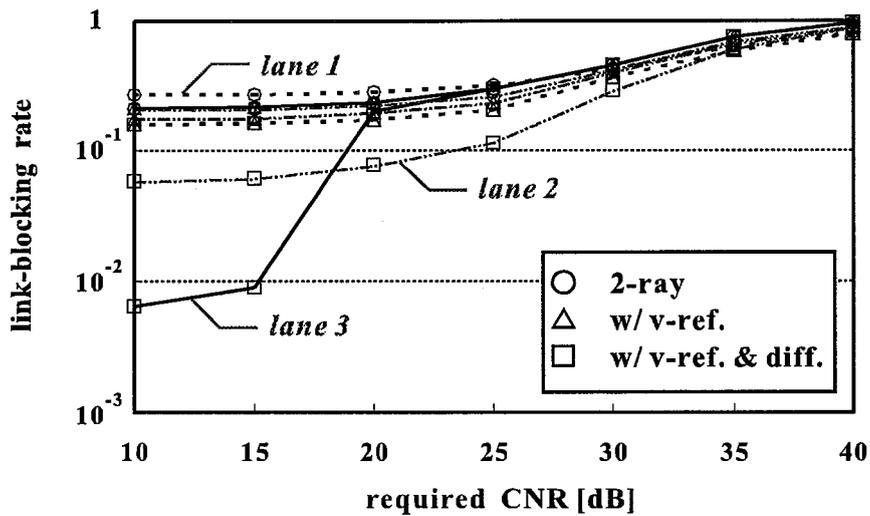


(a) $L=50\text{m}$



(b) $L=100\text{m}$

図 3.10 所要 CNR に対する通信遮断率 (Congested flow, $h_b=5\text{m}$)

(a) $L=50\text{m}$ (b) $L=100\text{m}$ 図 3.11 所要 CNR に対する通信遮断率 (Congested flow, $h_b=10\text{m}$)

3.3.2.2.2 車両反射波及び回折波に対する通信遮断率特性

まず、図 3.10及び図 3.11各々の“2-ray”と“w/ v-ref.”を比較することにより車両反射波に対する効果をみてみると、第 1 車線及び第 2 車線において通信遮断率の低減が得られていることが分かる。これは、渋滞流では第 2 車線と第 3 車線の平均車頭距離がともに非常に短いので、路側アンテナと対象車両の幾何学的位置関係により一意に決まる反射点に車両がちょうど存在する確率が自由流の場合よりも十分に大きくなり、車両反射波による効果がよく現れるためであると考えられる。また、第 1 車線の対象車両は第 2 車線及び第 3 車線からの 2 つの経路からの車両反射波の到来が期待できるので、車両反射波による通信遮断率の低減効果は第 1 車線において最も顕著に現れる。一方、第 3 車線においては車両反射波が存在しないので、直接波及び路面反射波の到来のみを仮定した場合と全く同じ特性を示す。

次に、図 3.10及び図 3.11各々の“w/ v-ref.”と“w/ v-ref. & diff.”を比較することにより回折波に対する効果をみてみると、第 2 車線及び第 3 車線において回折波の効果がよく現れていることが分かる。すなわち、路側アンテナ高が低いときは、所要 CNR を低くするに従って第 3 車線の通信遮断率がまず低減され、次いで第 2 車線の通信遮断率が低減されている。一方、路側アンテナ高を高くすると、所要 CNR を低くするに従って第 2 車線の通信遮断率が急激に低減され、次いで第 3 車線の通信遮断率が低減される。これらの振る舞いは自由流の場合と同じ傾向であり、これは図 3.9に示した対象車両と遮へい車両の位置関係に対する余剰高の変化に起因する。

これに対し、第 1 車線を走行する普通車両は、直前を走行する大型車両による通信遮断が支配的であり、自由流よりも平均車頭距離が短いため、余剰高がより大きな値となる。よって、第 1 車線における対象車両の通信遮断率は所要 CNR を低くしてもほとんど低減されない。

3.3.3 通信遮断継続時間

3.3.3.1 自由流における通信遮断継続時間特性

本項では、計算機シミュレーションによる自由流における通信遮断継続時間の統計的性質に関して検討を加える。図 3.12及び図 3.13に、普通車両を対象車両としたときの通信遮断継続時間の累積確率分布を示す。

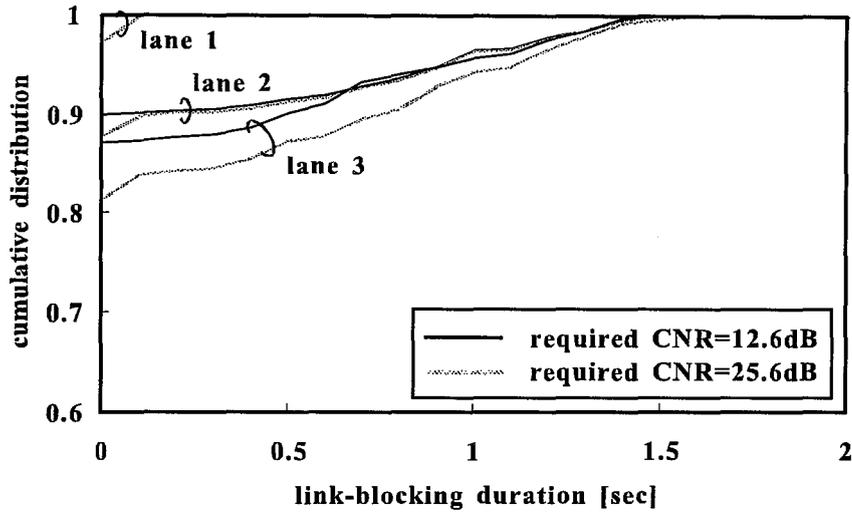
各図より、路側アンテナ高や車種に関係なく、所要 CNR を低くすることで比較的短時間の通信遮断を解消できることが分かる。しかしながら、長時間の通信遮断は所要 CNR を変化させてもほとんど変わらない。この理由として、長時間の通信遮断は路側アンテナから離れた領域で発生しやすく、元々弱い電力しか有していない回折波が伝搬減衰によりさらに弱められるため、所要 CNR を低くしても通信遮断は回避できない傾向があるからであると考えられる。

次に、各図の (a) と (b) を比較すると、路側アンテナが高い場合、通信ゾーンを 100m から 50m とすることで、第 1 車線を走行する全車両の 99%以上の通信遮断継続時間が 0.2sec 以内に抑えられていることが分かる。一方、所要 CNR が高いほど、通信ゾーンの拡大に伴って長時間の通信遮断の発生頻度が高くなっていることが同図より分かる。

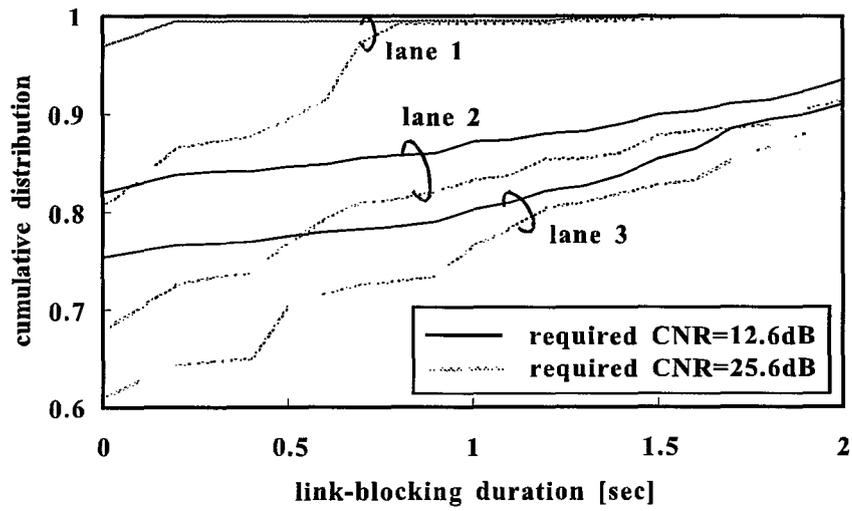
また、各図において車線間の差異を比較すると、路側アンテナ高が低い場合は、第 3 車線の通信遮断継続時間が他の 2 車線と比べて最も悪くなっていることが分かる。これは、第 2 車線を走行する車両は第 1 車線の大型車両によって通信遮断が引き起こされるのに対し、第 3 車線を走行する車両は第 1 車線と第 2 車線の大型車両によって通信遮断が引き起こされ、その確率が高くなるためである。一方、路側アンテナ高が高くなると、第 2 車線を走行する車両は幾何学的位置関係により第 1 車線の大型車両からの通信遮断を全く受けなくなり、自車線を走行する大型車両からの通信遮断のみを受けするため、第 2 車線の通信遮断継続時間特性は第 1 車線のものと同様になると考えられる。

3.3.3.2 渋滞流における通信遮断継続時間特性

本項では、計算機シミュレーションによる渋滞流における通信遮断継続時間の統計的性質について検討する。図 3.14及び図 3.15に、普通車両を対象車両とした

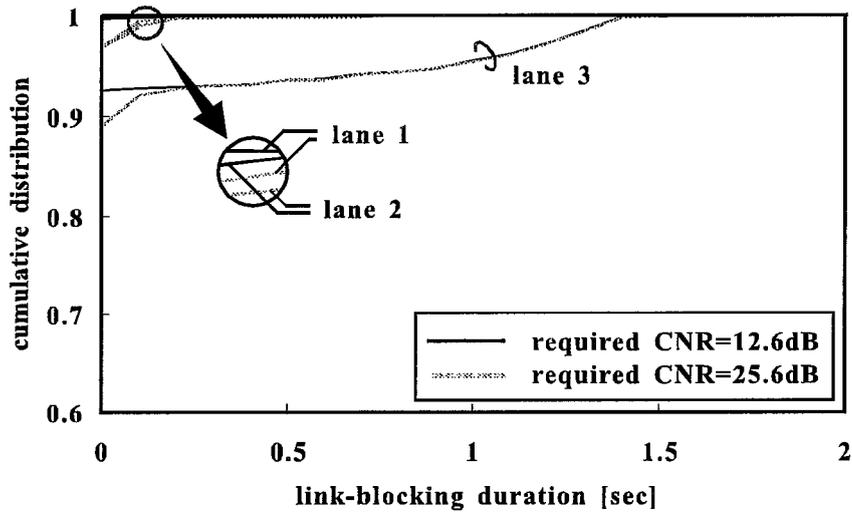
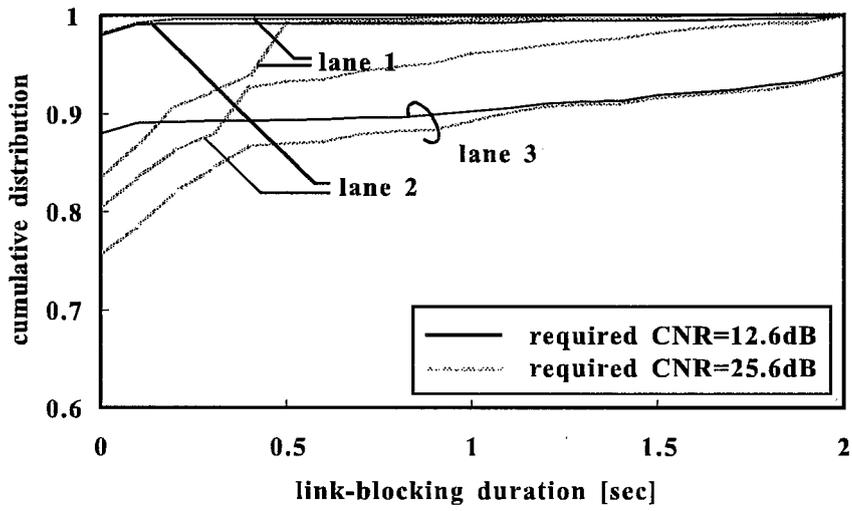


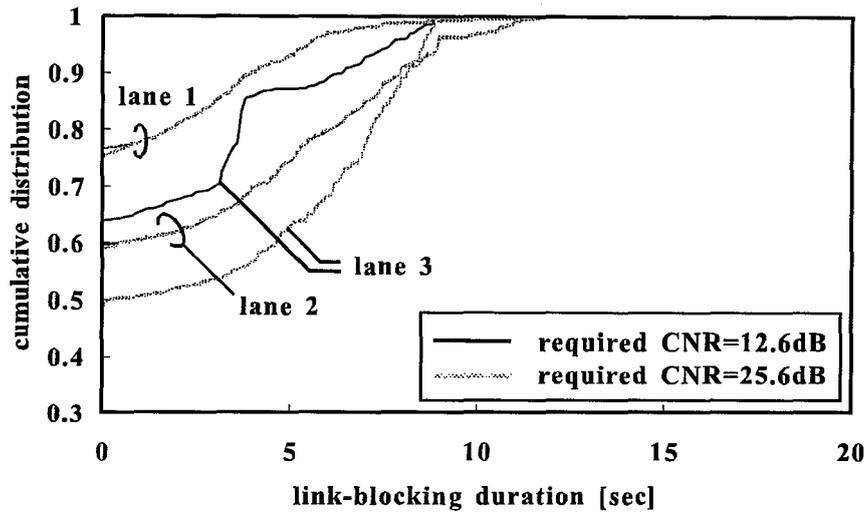
(a) $L=50\text{m}$



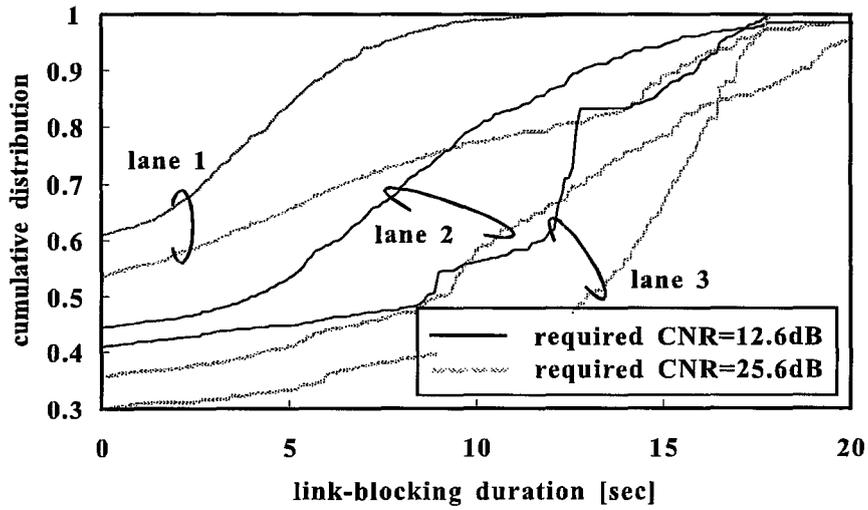
(b) $L=100\text{m}$

図 3.12 通信遮断継続時間の累積確率分布 (Free flow, $h_b=5\text{m}$)

(a) $L=50\text{m}$ (b) $L=100\text{m}$ 図 3.13 通信遮断継続時間の累積確率分布 (Free flow, $h_b=10\text{m}$)

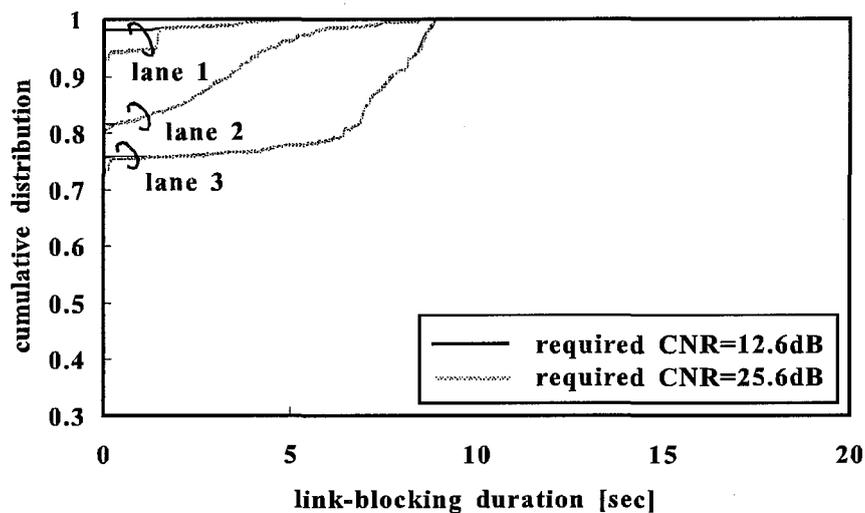
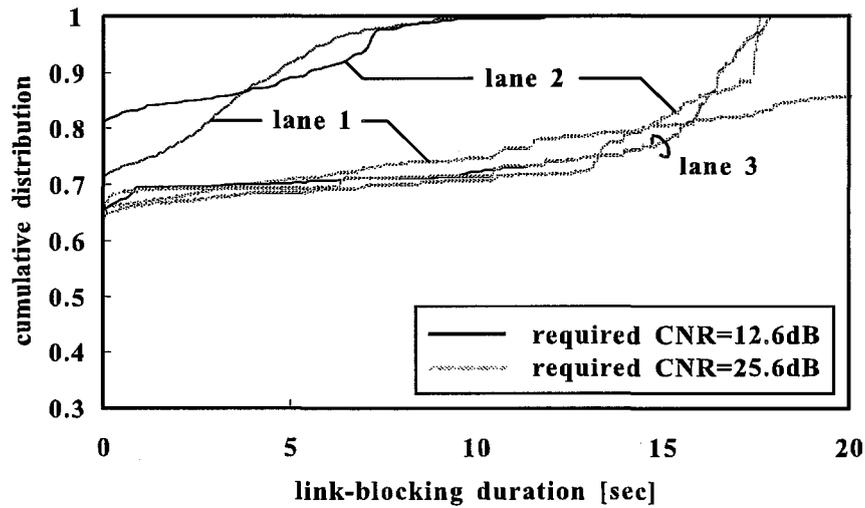


(a) $L=50\text{m}$



(b) $L=100\text{m}$

図 3.14 通信遮断継続時間の累積確率分布 (Congested flow, $h_b=5\text{m}$)

(a) $L=50\text{m}$ (b) $L=100\text{m}$ 図 3.15 通信遮断継続時間の累積確率分布 (Congested flow, $h_b=10\text{m}$)

ときの通信遮断継続時間の累積確率分布を示す。

各図より、所要 CNR を低くすることで比較的短時間の通信遮断を解消できるものの、自由流の場合と同様の理由により、長時間の通信遮断は所要 CNR を変化させてもほとんど変わらず、5.0sec 以上にもなる長時間の通信遮断が依然として発生していることが分かる。

次に、各図の (a) と (b) を比較すると、路側アンテナが高い場合、通信ゾーンを 100m から 50m とすることにより、第 1 車線を走行する全車両の 98% 以上の通信遮断継続時間が 1.0sec 以内に抑えられていることが分かる。一方、自由流と同じく、所要 CNR を高くした場合は、通信ゾーンの拡大に伴って長時間の通信遮断がより多く発生していることが同図より分かる。また、路側アンテナ高を高くすることによる通信遮断継続時間の解消効果は自由流ほどは得られないことが分かる。これは、渋滞流では周辺車両の位置関係が短時間ではあまり変化せず、長時間の通信遮断を引き起こしやすい傾向があるからであると考えられる。

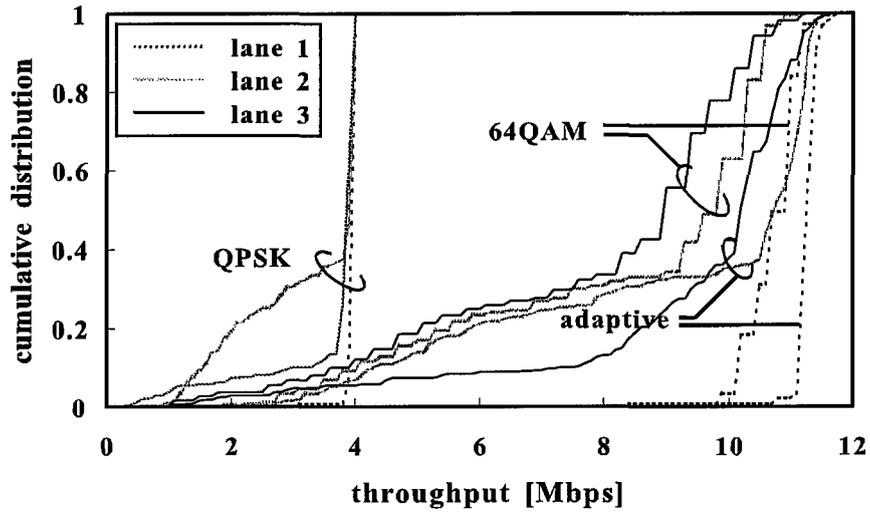
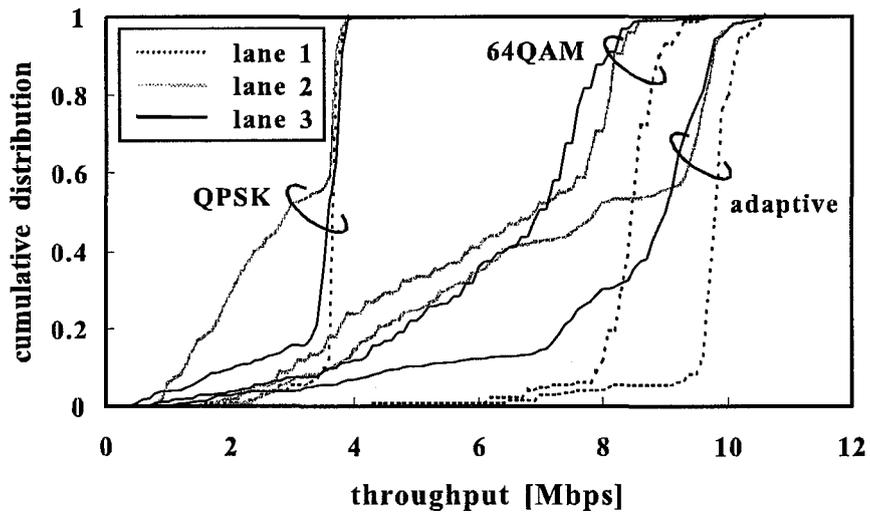
3.3.4 実効伝送速度

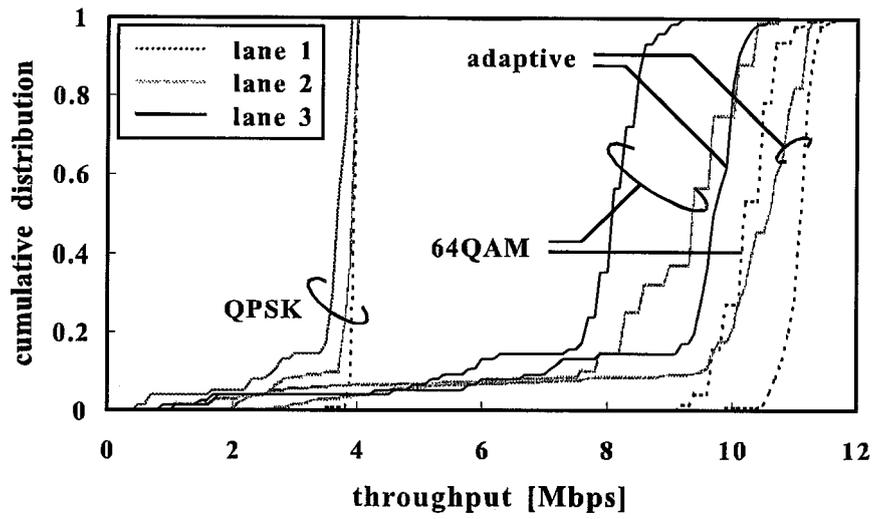
3.3.4.1 自由流における実効伝送速度特性

本項では、自由流における実効伝送速度の改善効果を計算機シミュレーションにより検討する。図 3.16 及び図 3.17 に、普通車両を対象車両としたときの各多値変調方式及び適応変調方式に対する、ダウンリンクの実効伝送速度の累積確率分布を示す。DSRC の標準規格では、変調方式として QPSK を用いた場合の信号伝送速度は 4Mbps として規定されている [7]。よって、本節では QPSK を用いた無線通信をベースとし、受信信号電力が大きい場合に多値数の高い 16QAM と 64QAM を適応的に切り替え、通信容量を増加させることによる実効伝送速度の改善効果について考察する。ただし、適応変調方式を用いる場合の変調多値数の切り替えの際に発生する制御遅延は考慮していない。

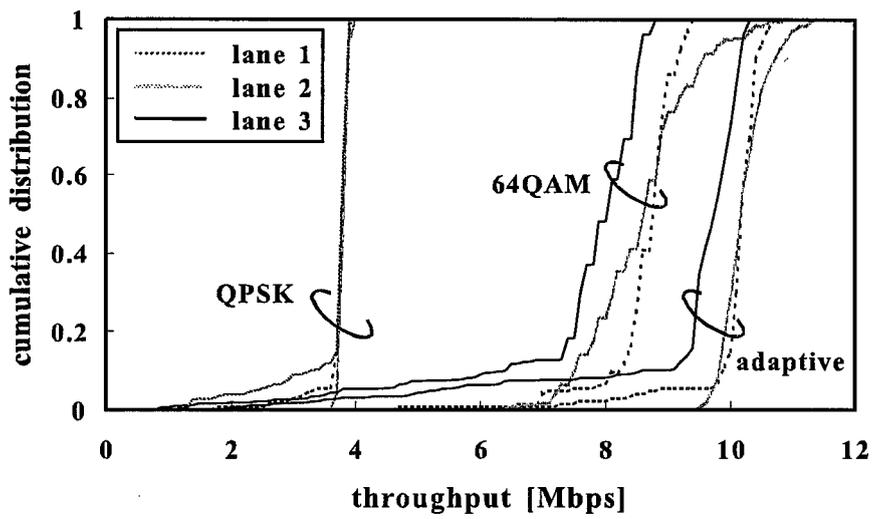
3.3.4.1.1 路側アンテナ高及び通信ゾーンに対する実効伝送速度特性

各図において、横軸に対するグラフの傾きが急峻な部分ほど、実効伝送速度の分布が集中していることとなるが、自由流においては各変調方式の最大実効伝送速

(a) $L=50\text{m}$ (b) $L=100\text{m}$ 図 3.16 実効伝送速度の累積確率分布 (Free flow, $h_b=5\text{m}$)



(a) $L=50\text{m}$



(b) $L=100\text{m}$

図 3.17 実効伝送速度の累積確率分布 (Free flow, $h_b=10\text{m}$)

度 (QPSK : 4Mbps, 16QAM : 8Mbps, 64QAM : 12Mbps) に近づくと従ってグラフの傾きが大きくなっていることが分かる。これは、自由流では通信遮断率及び通信遮断継続時間が共に小さく、最大実効伝送速度に近い値が得られやすいからであり、その特性は路側アンテナ高を高くすることでより顕著に現れることが分かる。しかしながら、変調多値数を大きくすると小さな受信信号電力は許容されず、長時間の通信遮断が発生しやすくなるため、多値数が大きいほど最大信号伝送速度に近い実効伝送速度が得られにくくなる。

また、各車線間の実効伝送速度分布の差異をみると、多値数が大きく所要 CNR の高い 64QAM を用いた場合は、直接波が見通せるか否かが実効伝送速度の特性に大きく影響するため、路側アンテナから遠い第3車線ほど実効伝送速度が低下していることが分かる。一方、多値数の小さい 16QAM や QPSK を用いると、回折波による小さな受信信号電力を許容できる可能性が大きくなるので、各車線間の特性の差異は軽減される。これらの固定変調方式に対し、適応変調方式は 64QAM の伝送速度の高速性を保ちつつ通信遮断発生時に変調多値数を小さくして回折波による電力を利用することができるため、64QAM のみを用いた場合よりも実効伝送速度を向上でき、かつ各車線間の特性の差異を軽減することが可能となる。

次に、図 3.16 の (a) と (b) を比較すると、路側アンテナ高が 5m の場合に通信ゾーンを 50m から 100m に拡大することで、いずれの変調方式を用いても実効伝送速度が低下することが分かる。また、通信ゾーンを拡大することによる実効伝送速度の低下は、変調多値数が大きいほど顕著に現れる。これらは、路側アンテナから遠く離れた車両ほど路側アンテナの見通し線が遮へいされる可能性が高く、通信遮断継続時間が長くなる傾向があるからである。

一方、適応変調方式を用いた場合、通信ゾーンを拡大することによる実効伝送速度の低下はみられるものの、64QAM で許容されない CNR を変調多値数を下げることによって許容することにより、64QAM のみを用いた場合と比較して低実効伝送速度の割合が大幅に低減されることが分かる。さらに、この効果は通信ゾーンを拡大するとより大きくなり、実効伝送速度の最大値に注目すると、適応変調方式を用いると 64QAM のときと比較して最大 1.17 倍となることが分かる。これは、路側アンテナから遠く離れた車両は直接波が遮へいされ回折波のみが到来する場合は頻繁に発生するので、適応変調方式の効果がより顕著に現れているためである。

また、図 3.17の (a) と (b) を比較すると、路側アンテナ高が 10m の場合に通信ゾーンを 50m から 100m に拡大することで、64QAM を用いた場合の実効伝送速度が顕著に低下していることが分かる。これは、先に述べたように路側アンテナから遠く離れた車両ほど直接波を見通せない可能性が高くなるからである。しかしながら、適応変調方式を用いた場合、回折波による小さな受信信号電力を QPSK や 16QAM を用いて受信することが可能であるため、通信ゾーンを拡大しても実効伝送速度の大きな低下は見られない。

次に、車線毎の実効伝送速度の特性を比較すると、図 3.16における第 2 車線の実効伝送速度が他の 2 車線と比較して特に低下していることが分かる。これは、路側アンテナ高が低い場合は、第 2 車線の普通車両は大型車両混入率の大きい第 1 車線の大型車両が引き起こす通信遮断に大きく支配され、非常に長時間の通信遮断が発生しやすいからである。また、長時間の通信遮断時は回折波による受信信号電力が非常に小さいため、適応変調を用いても実効伝送速度の大きな改善効果は得られない。一方、図 3.17より、路側アンテナ高を高くすると、第 2 車線の普通車両は第 1 車線の大型車両からの通信遮断を受けにくくなることに加え、回折波による受信信号電力も大きくなるため、第 2 車線の実効伝送速度は路側アンテナ高が低いときに比べて大きく向上できることが分かる。

3.3.4.1.2 平均実効伝送速度の改善効果

適応変調方式を用いることによる平均実効伝送速度の改善効果に関する検討を加えるため、64QAM 及び適応変調方式を用いた場合の普通車両の平均実効伝送速度を表 3.3に示す。同表より、適応変調方式を用いた場合の 64QAM に対する平均実効伝送速度の改善効果は、路側アンテナ高によらず大きく得られることが分かる。また、車線毎に比較すると、適応変調方式を用いた場合の平均実効伝送速度の改善効果は第 1 車線ほど小さく第 3 車線ほど大きいことが分かる。さらに、通信ゾーンを拡大することで平均実効伝送速度はより大きく向上でき、例えば、路側アンテナ高が 5m の場合の普通車両においては、通信ゾーンが 50m のときに適応変調方式を用いることで、第 1 車線で 1.05 倍、第 3 車線で 1.19 倍となったものが、通信ゾーンを 100m とすれば適応変調方式を用いることで、第 1 車線で 1.15 倍、第 3 車線で 1.30 倍にまで向上できる。

表 3.3 平均実効伝送速度 (Free flow)

(a) $L=50\text{m}$

RBS height	5m		10m	
	64QAM	adaptive	64QAM	adaptive
Lane 1	10.76	11.30	10.28	11.10
Lane 2	8.47	9.24	8.84	10.08
Lane 3	7.94	9.49	7.67	9.17

[Mbps]

(b) $L=100\text{m}$

RBS height	5m		10m	
	64QAM	adaptive	64QAM	adaptive
Lane 1	8.44	9.74	8.68	10.12
Lane 2	6.19	7.31	8.62	10.26
Lane 3	6.36	8.26	7.66	9.38

[Mbps]

3.3.4.2 渋滞流における実効伝送速度特性

本項では、渋滞流における実効伝送速度の改善効果を計算機シミュレーションにより検討する。図 3.18及び図 3.19に、普通車両を対象車両としたときの各多値変調方式及び適応変調方式に対する、ダウンリンクの実効伝送速度の累積確率分布を示す。本項でも QPSK を用いた無線通信をベースとし、16QAM と 64QAM を適応的に切り替えて通信容量を増加させることによる実効伝送速度の改善効果について考察する。ただし、適応変調方式を用いる場合の変調多値数の切り替えの際に発生する制御遅延は考慮していない。

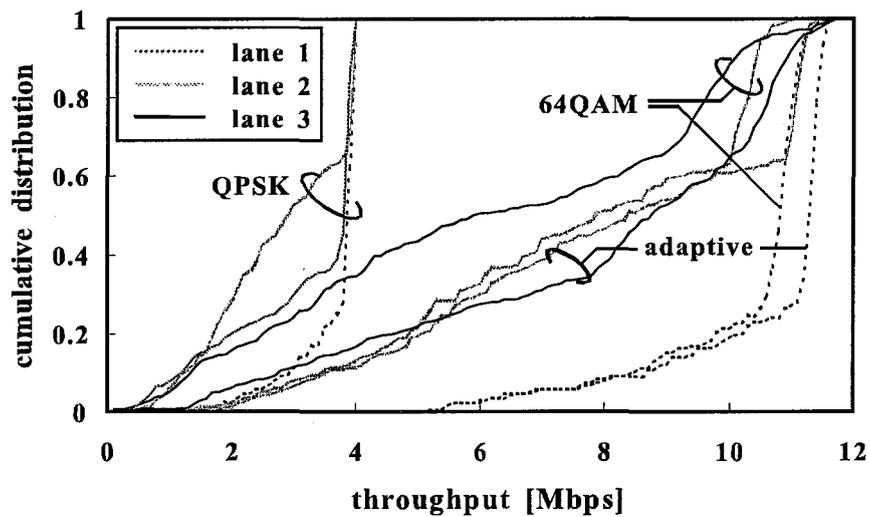
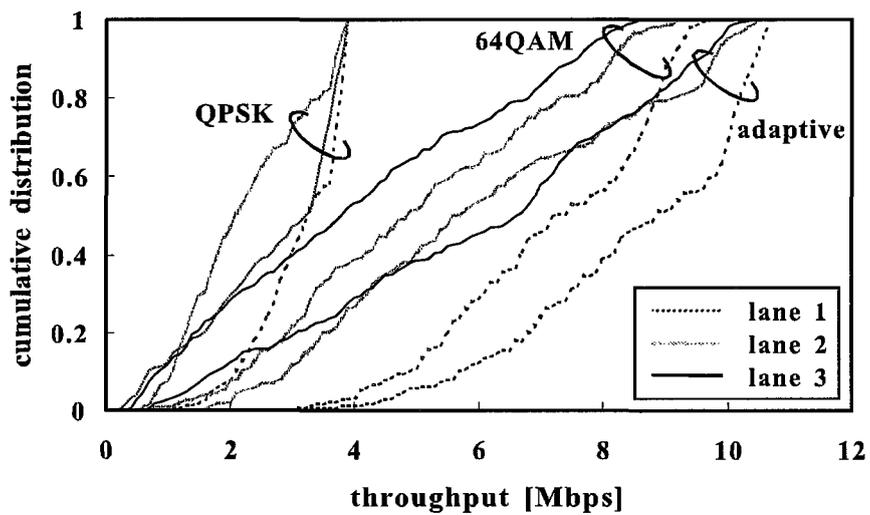
3.3.4.2.1 路側アンテナ高及び通信ゾーンに対する実効伝送速度特性

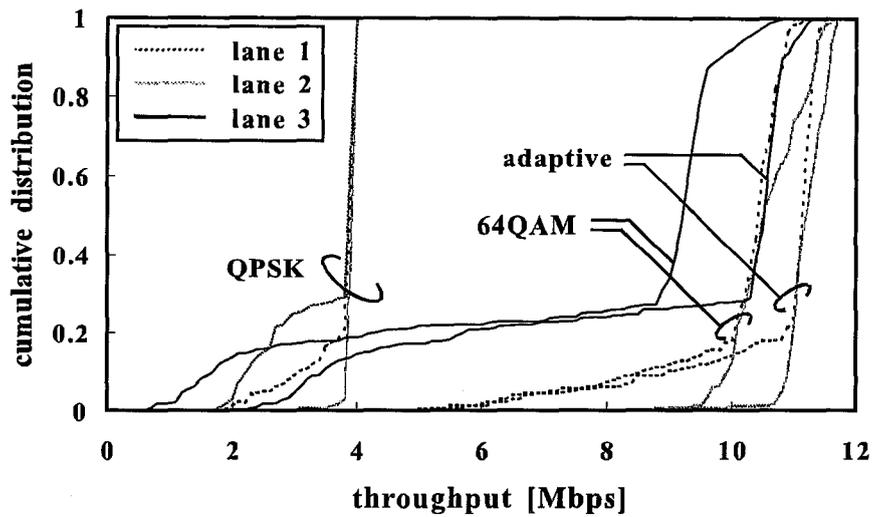
図 3.18と図 3.19より、渋滞流の場合では、低実効伝送速度の割合が非常に大きいことが自由流の場合と大きく異なる特性として挙げられる。これは、3.3.3項で述べたように、渋滞流では車線間の速度差が小さくかつ車両速度が遅く、非常に長時間の通信遮断が発生しやすい傾向があり、実効伝送速度が向上しにくいためであると考えられる。この影響は路側アンテナ高が低い場合すなわち通信遮断率が大きいときに特に顕著に見られることが分かる。

また、図 3.18と図 3.19を比較することにより、路側アンテナ高の変化に対する実効伝送速度の特性に関して考察すると、路側アンテナ高が 5m のときは実効伝送速度の値が 0Mbps から各変調方式の最大実効伝送速度（QPSK：4Mbps, 16QAM：8Mbps, 64QAM：12Mbps）の値までほぼ一様に分布していることが分かる。これは、路側アンテナ高が低いときは、普通車両は周辺を走行する大型車両による通信遮断が支配的となり、実効伝送速度が向上しにくい傾向があるからである。しかしながら、路側アンテナ高を 10m にすると、通信遮断率及び通信遮断継続時間は自由流と同程度にまで低減できるため、実効伝送速度の分布も自由流の場合と同様の傾向を示していることが分かる。

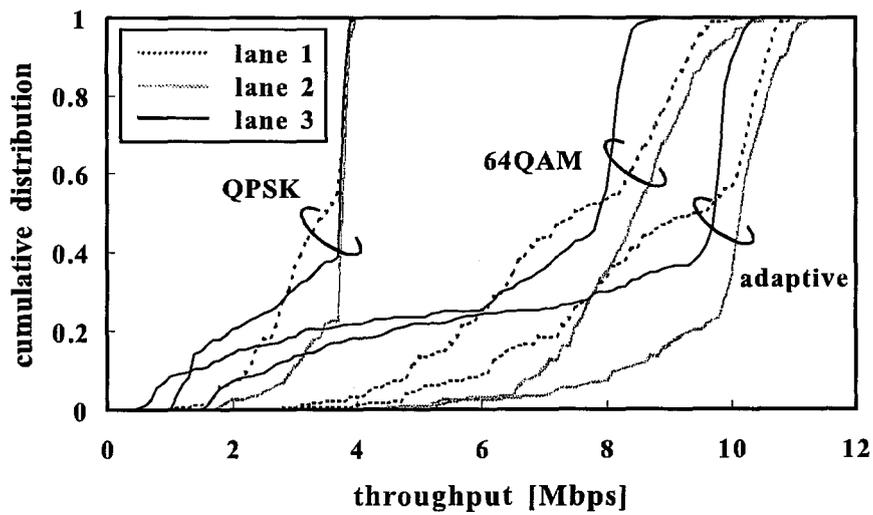
次に、車線毎の実効伝送速度の特性を比較すると、路側アンテナ高が 5m の場合、第 2 車線及び第 3 車線の実効伝送速度が第 1 車線の値と比較して大きく低下していることが分かる。3.3.2項や 3.3.3項ですでに述べたように、第 1 車線は自車線を走行する大型車両による通信遮断しか発生しないが、第 2 車線や第 3 車線は隣接車線を走行する大型車両による通信遮断が支配的であり、通信遮断継続時間は極めて長時間となる。これに加え、渋滞流では各車線の大型車両混入率の差が小さいため、第 2 車線及び第 3 車線の実効伝送速度は共に悪化する。

また、自由流の場合と同様に、各固定変調方式における車線間の実効伝送速度の分布の差異は多値数が大きいほど顕著に現れる。一方、適応変調方式を用いた場合、64QAM の伝送速度の高速性を保ちつつ通信遮断発生時に変調多値数を小さくして回折波による電力を利用できるため、64QAM の場合よりも実効伝送速度を向上できるが、第 1 車線と第 2 車線、及び第 1 車線と第 3 車線の通信遮断率の差が非常に大きいため、車線間の差異はあまり軽減されない。一方、路側アンテナ高を 10m にすると、直接波が遮へいされる可能性が低くなることに加え、第 2 車線や第

(a) $L=50\text{m}$ (b) $L=100\text{m}$ 図 3.18 実効伝送速度の累積確率分布 (Congested flow, $h_b=5\text{m}$)



(a) $L=50\text{m}$



(b) $L=100\text{m}$

図 3.19 実効伝送速度の累積確率分布 (Congested flow, $h_b=10\text{m}$)

3車線における回折波による電力も大きくなるため、車線間の差異は軽減され、低実効伝送速度の割合も路側アンテナ高が5mのときと比較して小さく抑えられる。

さらに、図3.18の(a)と(b)を比較すると、路側アンテナ高が5mの場合に通信ゾーンを50mから100mに拡大することで、いずれの変調方式を用いても実効伝送速度が低下することが分かる。これは、路側アンテナから遠く離れた車両ほど路側アンテナの見通し線が遮へいされる可能性が高く、通信遮断継続時間が長くなる傾向があるからである。一方、適応変調方式を用いた場合、通信ゾーンを拡大することにより実効伝送速度の低下はみられるものの、64QAMで許容されないCNRを変調多値数を小さくして許容することにより、64QAMと比較して低実効伝送速度の割合が大幅に低減されていることが分かる。さらに、この改善効果は通信ゾーンを拡大するとより大きく得られており、実効伝送速度の最大値に注目すると、適応変調方式を用いることで64QAMのときと比較して最大1.23倍となっていることが分かる。これは、路側アンテナから遠く離れた車両は直接波が遮へいされ回折波のみが到来する場合は頻繁に発生するので、渋滞流の場合においても適応変調方式の効果がよく現れるためであると考えられる。

また、図3.19の(a)と(b)を比較すると、路側アンテナ高が10mの場合に通信ゾーンを50mから100mに拡大すると、64QAMを用いた場合の実効伝送速度が顕著に低下していることが分かる。この理由は、自由流の場合において述べたように、路側アンテナから遠く離れた車両ほど直接波を見通せない可能性が高くなるからである。しかしながら、適応変調方式を用いた場合、回折波による小さな受信信号電力をQPSKや16QAMを用いて受信することが可能であるため、通信ゾーンを拡大しても実効伝送速度の大きな低下は見られないことが分かる。

3.3.4.2.2 平均実効伝送速度の改善効果

適応変調方式を用いることによる平均実効伝送速度の改善効果に関する検討を加えるため、64QAM及び適応変調方式を用いた場合の普通車両の平均実効伝送速度を表3.4に示す。同表より、自由流の場合と異なり、路側アンテナ高を高くすることによる平均実効伝送速度の改善効果は自由流の場合ほどには得られないことが分かる。これは、周辺車両との距離が互いに近く、路側アンテナ高を高くすることによる回折波電力の増加の割合が自由流の場合よりも小さいためと考えられる。ま

表 3.4 平均実効伝送速度 (Congested flow)

(a) $L=50\text{m}$

RBS height	5m		10m	
	64QAM	adaptive	64QAM	adaptive
Lane 1	10.34	10.72	10.12	10.74
Lane 2	7.56	8.06	10.64	11.26
Lane 3	6.15	7.94	7.77	9.06

[Mbps]

(b) $L=100\text{m}$

RBS height	5m		10m	
	64QAM	adaptive	64QAM	adaptive
Lane 1	7.21	8.52	7.38	8.80
Lane 2	5.06	6.11	8.40	9.89
Lane 3	4.04	6.00	6.42	8.03

[Mbps]

た、車線毎で比較すると、適応変調方式を用いた場合の平均実効伝送速度の改善効果は第1車線ほど小さく第3車線ほど大きいことが分かる。さらに、通信ゾーンを拡大することで平均実効伝送速度はより大きく向上でき、例えば、路側アンテナ高が5mの場合の普通車両においては、通信ゾーンが50mのときに適応変調方式を用いることで、第1車線で1.04倍、第3車線で1.29倍となったものが、通信ゾーンを100mとすれば第1車線で1.18倍、第3車線で1.48倍にまで向上できる。

3.3.5 平均受信データ量

通信ゾーン内に存在する複数の車両による時分割多重を用いたダウンリンク通信を想定した場合、各車両当たりの実効伝送速度は3.3.4項で考察したRBSで得ら

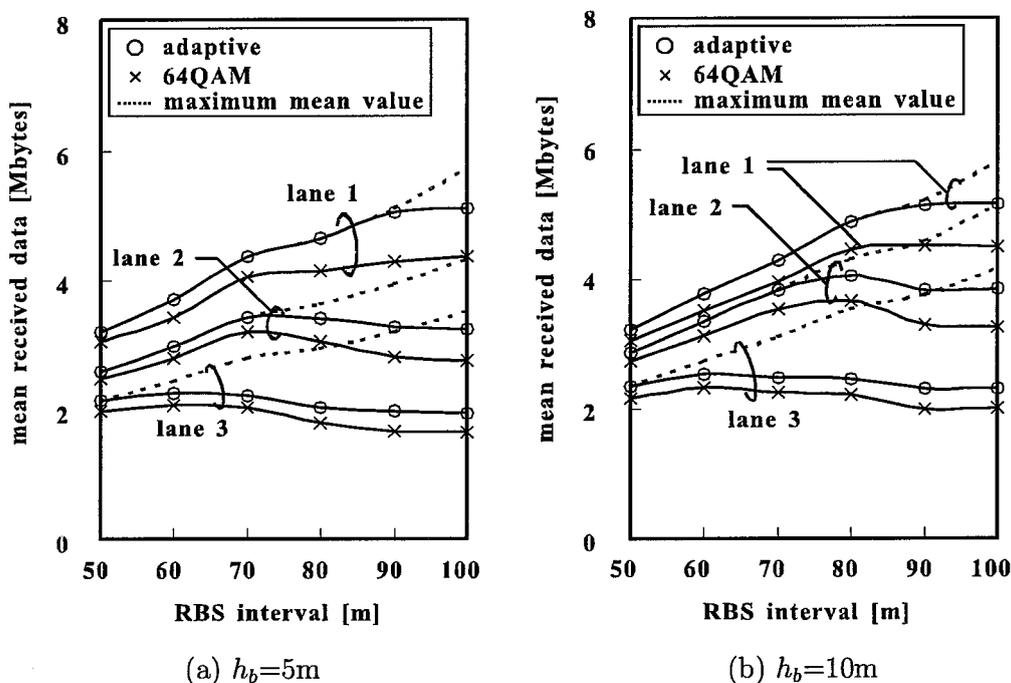


図 3.20 平均受信データ量 (Free flow)

れる実効伝送速度より減少するため、受信可能なデータ量も減少する。また、RBS 間隔を大きくすると通信ゾーンに滞在する時間は長くなるが、通信ゾーン内に存在する車両数も増加するため、受信可能なデータ量は必ずしも増加するとは限らないと考えられる。従って本項では、複数の車両による同時アクセスを想定した場合の、車両 1 台当たりの平均通信量すなわち平均受信データ量に関する考察を加える。図 3.20 及び図 3.21 に、自由流と渋滞流における車両 1 台当たりの平均受信データ量を示す。ただし、同図中の平均受信データ量は、各路側アンテナ間隔に対する通信遮断率を考慮した値であり、次式で与えられるものとする。

$$\begin{aligned} & \text{平均受信データ量 [Mbytes]} \\ &= \frac{\text{各変調方式の最大実効伝送速度} \times \text{通信ゾーン滞在時間} \times (1 - \text{通信遮断率})}{\text{通信ゾーン内の平均車両台数}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

また、図 3.20 中の破線は、適応変調を用いた場合に RBS から送信可能な平均データ量を表しており、各 RBS 間隔に対する通信遮断率を考慮した値である。

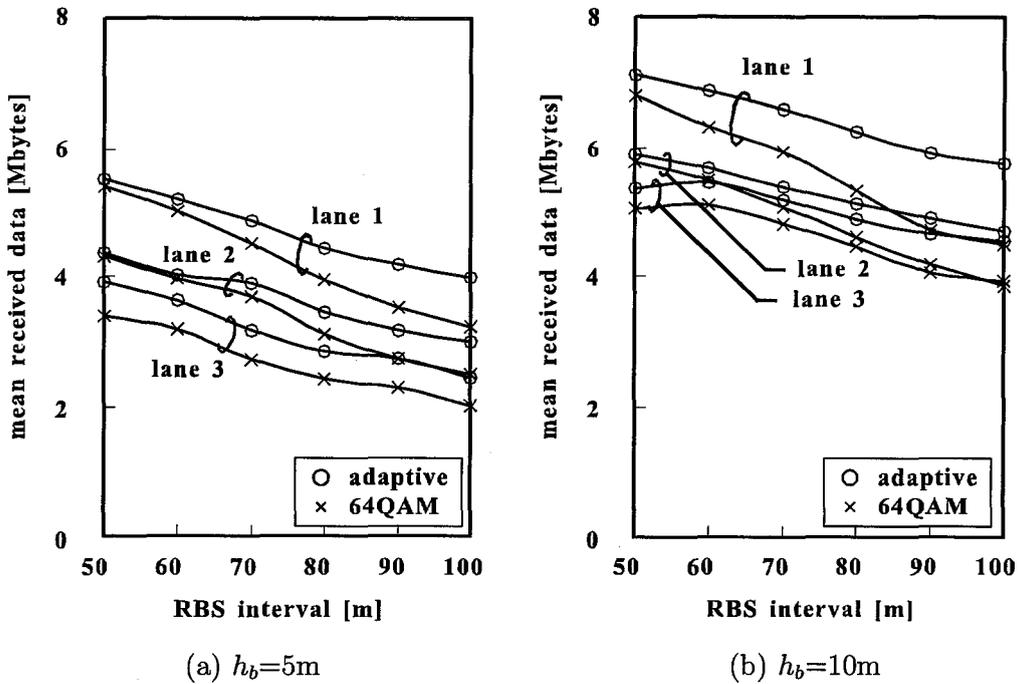


図 3.21 平均受信データ量 (Congested flow)

図 3.20より, 自由流の場合はいずれの車線においても RBS 間隔が大きくなるに従って平均受信データ量が徐々に増加するが, RBS 間隔が第 1 車線, 第 2 車線, 及び第 3 車線においてそれぞれ 100m, 70m, 及び 60m となる付近で各々その値が最大となっていることが分かる. これは, RBS 間隔を大きくとることで各車両が通信可能な区間が広がるため通信ゾーンの滞在時間が増加する一方で, 通信ゾーン内に存在する車両数が多くなるために車両 1 台当たりの受信データ量が減少することにより, 平均受信データ量の値が相殺されるためである. また, 自由流における車両密度は第 3 車線ほど大きな値となっているため, 平均受信データ量の最大値を与える RBS 間隔も第 3 車線ほど小さい値になる.

一方, 図 3.21より, 渋滞流の場合の平均受信データ量は, RBS 間隔が 50m から 100m の間では平均受信データ量が最大となる点は存在せず, RBS 間隔の増加に従って単調に減少することが分かる. これは, 渋滞流では自由流と比較して車両密度が高く, RBS 間隔を大きくとることによる通信ゾーンの拡大に対し, 通信ゾー

ン内に存在する車両数の増加が支配的となるためであると考えられる。

以上より、平均受信データ量を最大化する RBS 間隔は交通流の状態に大きく依存するため、RBS を設置する場所において発生し得る交通流の状態をあらかじめ把握し、これに適した RBS 間隔を選択する必要があると言える。

3.4 結言

本章では、適応変調を路車間通信システムへ適用することによる通信遮断の解消効果について検討を行った。本手法は、路側アンテナと車載アンテナを結ぶ見通し線が大型車両によって遮へいされた場合、この大型車両の車体稜線を経て到来する回折波の電力を、適応変調を用いて受信信号電力に応じた変調フォーマットの切り換えを行うことで有効に利用し、通信を出来る限り維持する技術である。交通流と多重路伝搬を考慮した受信信号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、路車間通信システムにおいて所要 CNR を低くすることで回折波の電力を有効に利用でき、通信遮断率を大幅に低減できること明らかにした。また、この結果を利用して実効伝送速度を定量的に評価した結果、適応変調を用いることで実効伝送速度を大幅に向上できることを明らかにした。

第4章 分散アンテナを用いた複数同時送信による通信遮断解消技術

4.1 序言

本章では、複数同時送信を用いた路車間通信システムにおける通信遮断解消に効果の高い分散アンテナの配置方法について検討を行う。複数の路側アンテナを用いて1つの路車間通信セルを構築する分散アンテナは、1つの路側アンテナが担っていた路車間通信機能を複数の路側アンテナに分散させる効果があり、マクロダイバーシチ効果による通信遮断の解消が期待できる。このとき、走行中の車両が周辺の車両に影響されることなく分散アンテナのいくつかを常に見通せるような優れたアンテナ配置方法を見出せば、その効果を最大限に引き出すことが可能となる。本章では、第2章で構築した路車間通信システムモデルを適用した計算機シミュレーションを用いて、既存の道路インフラを有効活用した6種類の分散アンテナ配置に対する通信遮断率ならびに通信遮断継続時間の特性を比較し、最適な分散アンテナ配置法を明らかにする。また、実効セル面積の拡大効果の観点からも検討を行い、その拡大率が最大となる分散アンテナ配置を明らかにする。

4.2 分散アンテナの適用効果

様々なITSのサービスを今後展開・運用していく上で必要不可欠な技術の1つとして路車間通信技術が挙げられるが、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、1つのRBS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。また、図4.1(a)に示すような大型車両による見通し通信路の遮へいに起因する通信遮断が路車間通信時の受信信号品質の深刻な劣化を引き起こす。

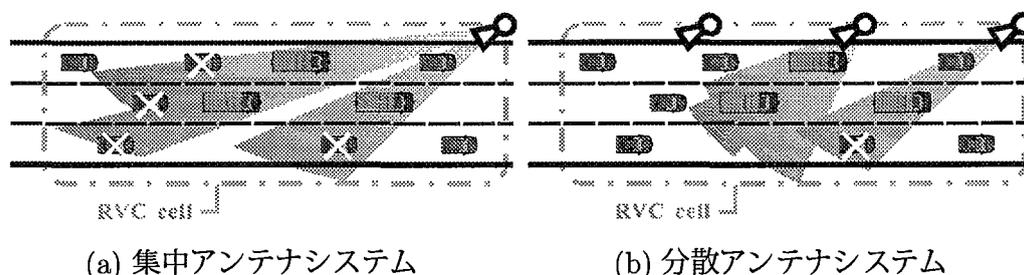


図 4.1 分散アンテナの適用効果

これに対し、複数の RBS を用いて 1 つの路車間通信セルを構築する分散アンテナは、図 4.1(b) のように路車間通信セル内に配備された複数の RBS が通信対象となり、複数同時送信によるマクロダイバーシチ効果が得られるため、通信遮断発生率の大幅な低減が期待できる。このとき、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。従って、直接波の存在の可否は通信遮断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通信遮断低減のためには、分散アンテナと車載アンテナを結ぶ見通し線を出来る限り確保できるように分散アンテナを配備しなければならない。よって本章では、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よく見通せる環境の構築を目的とし、様々な分散アンテナ配置に対する通信遮断特性に関する計算機シミュレーションを行うことで、最も特性の良い分散アンテナ配置法を明らかにする [65]~[68]。

4.3 分散アンテナ配置法

分散アンテナから複数同時送信を行い、1 つの路車間通信セルを構成する方法として、車両の前後に存在する RBS から電波を送信する手法が検討されている [55],[56] が、本論文では車載アンテナ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 RBS から送信する手法を適用する。

図 4.2~図 4.4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

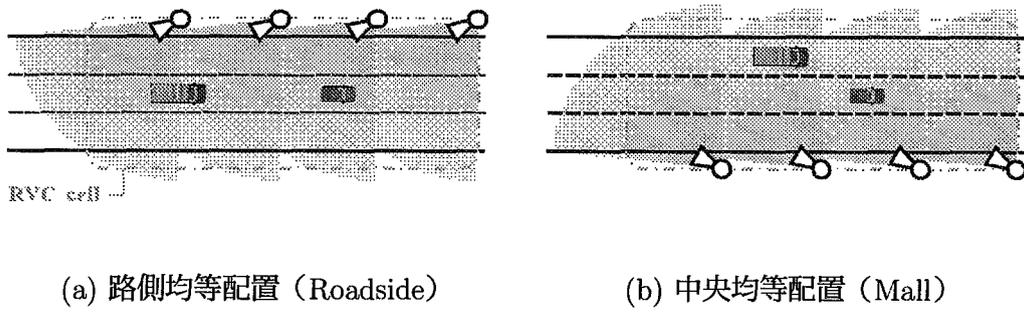


図 4.2 片側 RBS 配置

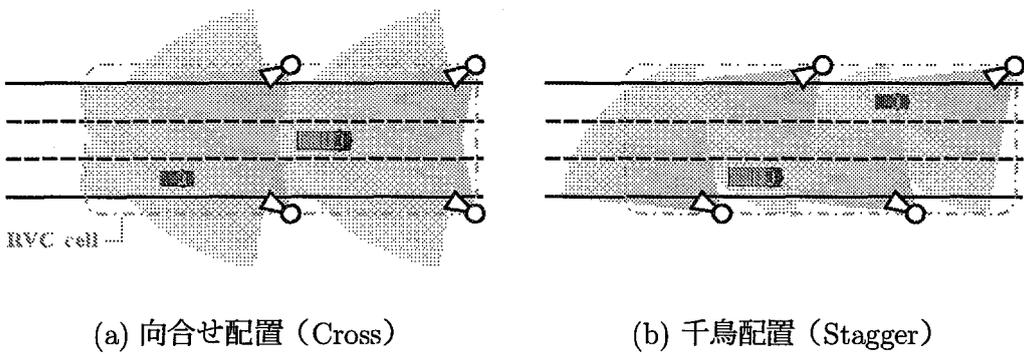


図 4.3 両側 RBS 配置

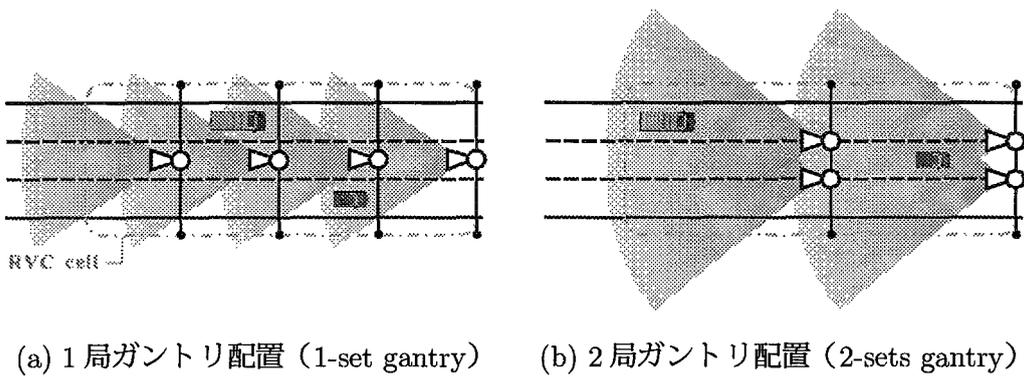


図 4.4 ガントリー RBS 配置

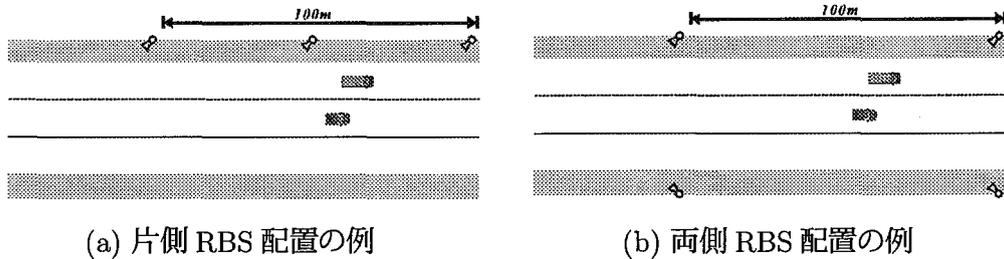


図 4.5 RBS 密度 (2 の場合)

ル構成法を示す。図 4.2は道路の片側からの送信を仮定した場合（片側 RBS 配置）であり，RBS を路側に均等に配置したものを (a) 路側均等配置，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 4.3は道路の両側からの送信を仮定した場合（両側 RBS 配置）であり，RBS 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。さらに，図 4.4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 RBS 配置）であり，RBS を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，ガントリ配置を除いて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手法である [90]。

さらに，RBS の設置コストの観点から全ての RBS 配置において公平な比較を行うため，本論文では RBS 密度 (RBS density) をパラメータとして変化させる。ただし，RBS 密度とは車線の延長方向 100m あたりの RBS の数として定義する。例えば，RBS 密度が 2 の場合の RBS 配置は図 4.5 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 RBS が配置されている状態を表す。

4.4 シミュレーション

4.4.1 シミュレーション条件

本節では，2.2.4項で構築した車両トラヒックに基づき，4.3節で示した各分散アンテナ配置に対する普通車両の通信遮断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，その拡大効率のよい分散アンテナ配置を明らかにする。

表 4.1 シミュレーション条件

RBS (Transmitter)	Transmitted frequency, f	5.8 GHz
	Transmitted power, P_t	10 dBm
	Antenna configuration	Omni-dipole
	Antenna gain, G_t	2 dBi
	Antenna height, h_b	6m or 12m
OBU (Receiver)	Antenna configuration	Omni-dipole
	Antenna gain, G_r	2 dBi
	Bandwidth, B	5 MHz
	Noise figure, F	10 dB
	Modulation method	QPSK
	Required BER	10^{-5}
Lane width, w_l		4.0 m
Roadside width, w_s		2.0 m
Road reflection coefficient		0.8
Vehicle reflection coefficient		0.9
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
Vehicle dashboard height		(Std) 1.0 m, (Lrg) 2.5 m

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

表 4.2 交通流に関するパラメータ

Lane		Lane 1	Lane 2	Lane 3
Free flow	Mean vehicle speed	80 km/h	95 km/h	110 km/h
	Mean time headway	3.5 sec	2.5 sec	2.0 sec
	Phase (Congestion factor)	7	4	3
	Large-sized vehicle rate (LVR)	0.8	0.7	0.4
Congested flow	Mean vehicle speed	10 km/h	15 km/h	20 km/h
	Mean time headway	5.5 sec	5.0 sec	4.5 sec
	Phase (Congestion factor)	6	6	6
	Large-sized vehicle rate (LVR)	0.5	0.4	0.3

表 4.1に、本節で用いる計算機シミュレーションの条件を示す。本シミュレーション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の標準規格に基づいて変調方式及び所要BERをそれぞれQPSK及び 10^{-5} に設定した。ただし、誤り訂正符号の適用は考慮していない。また、1つの路車間通信セルを構成する分散アンテナ間の電波干渉は考慮するが、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利用[91],[92]により無視できるものと仮定した。さらに、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。

また、本節では表4.2に示した交通流パラメータを用いて、実際の交通流[89]に基づいた2つの交通流すなわち自由流と渋滞流を想定して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両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が同様となるようにしている。

4.4.2 通信遮断率

4.4.2.1 自由流における通信遮断率

図 4.6及び図 4.7に、路側アンテナ高が 6m と 12m の場合の自由流における RBS 密度に対する通信遮断率をそれぞれ示す。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 車線の通信遮断率である。

各図より、通信遮断率はいずれの分散アンテナ配置においても、RBS 密度を大きくするに連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、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向上の効果が支配的であると言える。また、本論文における計算機シミュレーションでは約 3×10^4 台の車両を対象としたが、RBS 密度に対する通信遮断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。従って、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連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信号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、受信信号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通信遮断率特性について考察を加える。

4.4.2.1.1 片側 RBS 配置の特性

図 4.6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通信遮断率を比較すると、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 車線ほど悪化していることが分かる。これは、RBS 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 4.7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

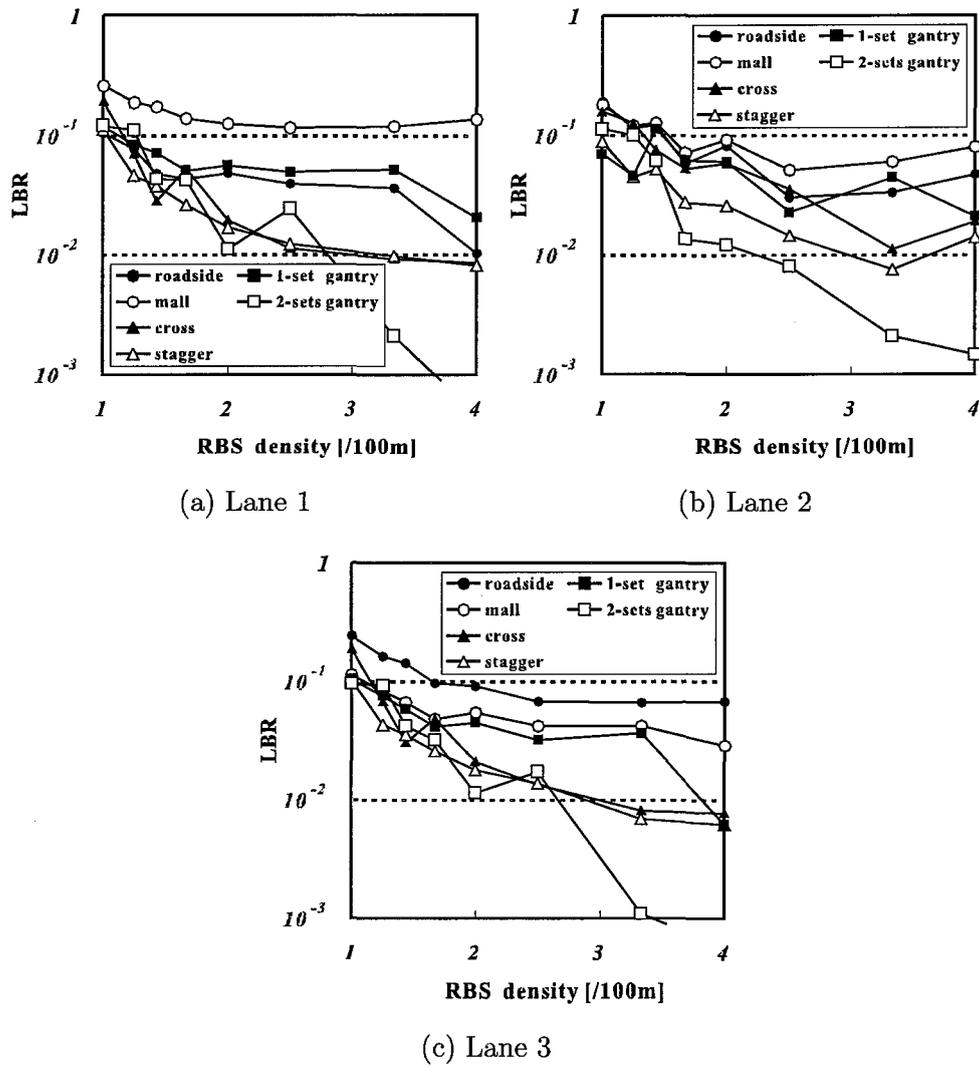


図 4.6 RBS 密度に対する通信遮断率 (Free flow, $h_b=6m$)

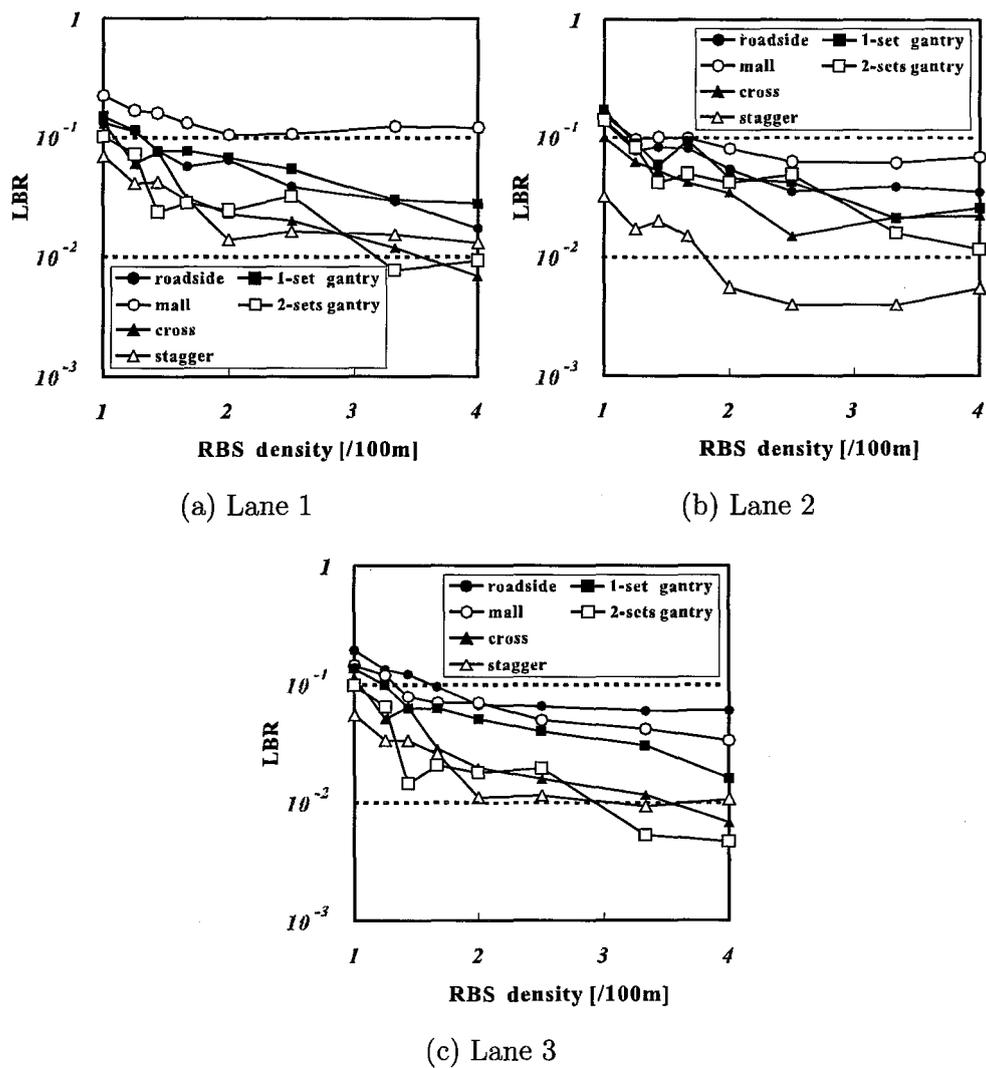


図 4.7 RBS 密度に対する通信遮断率 (Free flow, $h_b=12m$)

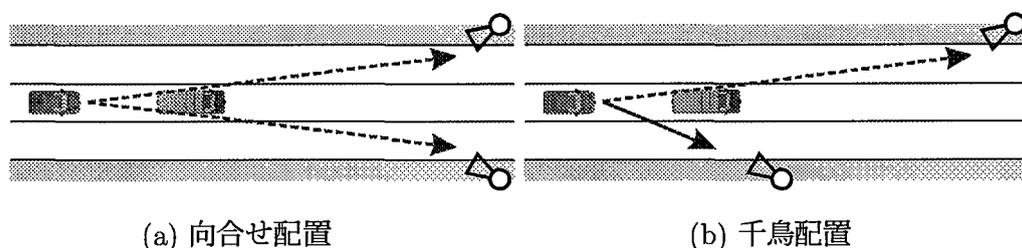


図 4.8 千鳥配置による通信遮断解消効果

電力減衰により、その低減が相殺されるからである。さらに、RBS 密度を 1 から 4 すなわち RBS 間隔を 100m から 25m に縮小することにより、通信遮断率の値を最大で 1/10 程度に抑えられることが同図より分かる。

4.4.2.1.2 両側 RBS 配置の特性

図 4.6 及び 図 4.7 より、向合せ配置と千鳥配置における各車線の通信遮断率を比較すると、ある RBS 密度における RBS 間隔は片側 RBS 配置の 2 倍となっているにも関わらず、ほとんどの RBS 密度において片側 RBS 配置の場合よりも良い通信遮断率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 RBS 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通信遮断を受け続ける傾向があるのに対し、両側 RBS 配置では路側と中央分離帯に配置された RBS に対してはそれぞれ異なる車両が通信遮断を引き起こすため、双方の RBS 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 4.6 より路側アンテナ高が低い場合の向合せ配置と千鳥配置における各車線の通信遮断率に注目すると、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 RBS を、その間隔の半分だけオフセットした配置に過ぎないため、第 1 車線と第 3 車線に与える通信遮断の低減効果はほとんどないものの、第 2 車線に対しては図 4.8 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通信遮断の影響は、片側 RBS 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。さらに、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両による通信遮断の影響を受けなくなるため、その効果がより顕著に現れていることが図4.7より分かる。また、RBS密度を1から4すなわちRBS間隔を200mから50mに縮小することにより、通信遮断率の値を最大で1/20程度に抑えられることが同図より分かる。

4.4.2.1.3 ガントリ RBS 配置の特性

図4.6より、路側アンテナ高が低い場合の1局ガントリ配置における各車線の通信遮断率を比較すると、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通信遮断の影響は、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設置しても大きな変化がないことが図4.7より分かる。さらに、RBS密度を1から4すなわちRBS間隔を100mから25mに縮小することにより、通信遮断率の値を最大で1/10程度に抑えられることが同図より分かる。

次に、図4.6において路側アンテナ高が低い場合の2局ガントリ配置における各車線の通信遮断率に注目すると、RBS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通信遮断率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RBSを配置することによって通信遮断の影響を極めて低く抑えられることと、RBS間隔が小さいときは見通し線が遮断された場合でも回折波による比較的大きな電力が得られることに起因する。また、RBS密度を1から4すなわちRBS間隔を200mから50mに縮小することにより、通信遮断率の値を最大で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設置すると通信ゾーンがより縮小されてしまうという欠点を有する。従って、路側アンテナ高が高い場合は2局ガントリ配置における通信遮断率が悪化していることが図4.7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てしまうため、千鳥配置の場合より通信遮断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、最も通信遮断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。

4.4.2.2 渋滞流における通信遮断率

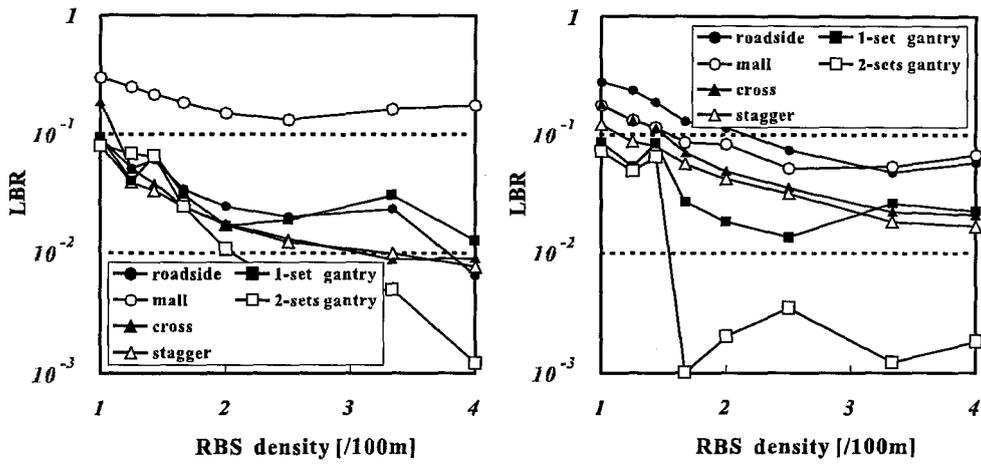
図4.9及び図4.10に、路側アンテナ高が6mと12mの場合の渋滞流におけるRBS密度に対する通信遮断率をそれぞれ示す。ただし、各図中の(a),(b)及び(c)はそれぞれ第1車線、第2車線及び第3車線の通信遮断率である。

各図より、通信遮断率はいずれの分散アンテナ配置においても、RBS密度を大きくするに連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向上の効果が支配的であると言える。また、RBS密度に対する通信遮断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通信遮断率について考察を加える。

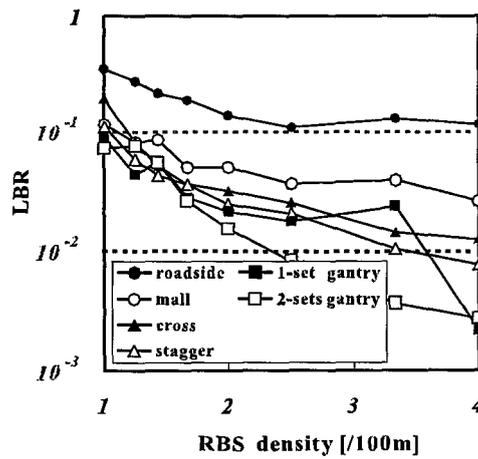
4.4.2.2.1 片側RBS配置の特性

図4.9及び図4.10より、路側均等配置と中央均等配置の間で各車線の通信遮断率を比較すると、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車線の通信遮断率が特に大きく低減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通信遮断の増加に比べ、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、RBS密度を1から4すなわちRBS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通信遮断率の値を最大で1/10程度に抑えられることが同図より分かる。



(a) Lane 1

(b) Lane 2



(c) Lane 3

図 4.9 RBS 密度に対する通信遮断率 (Congested flow, $h_b=6m$)

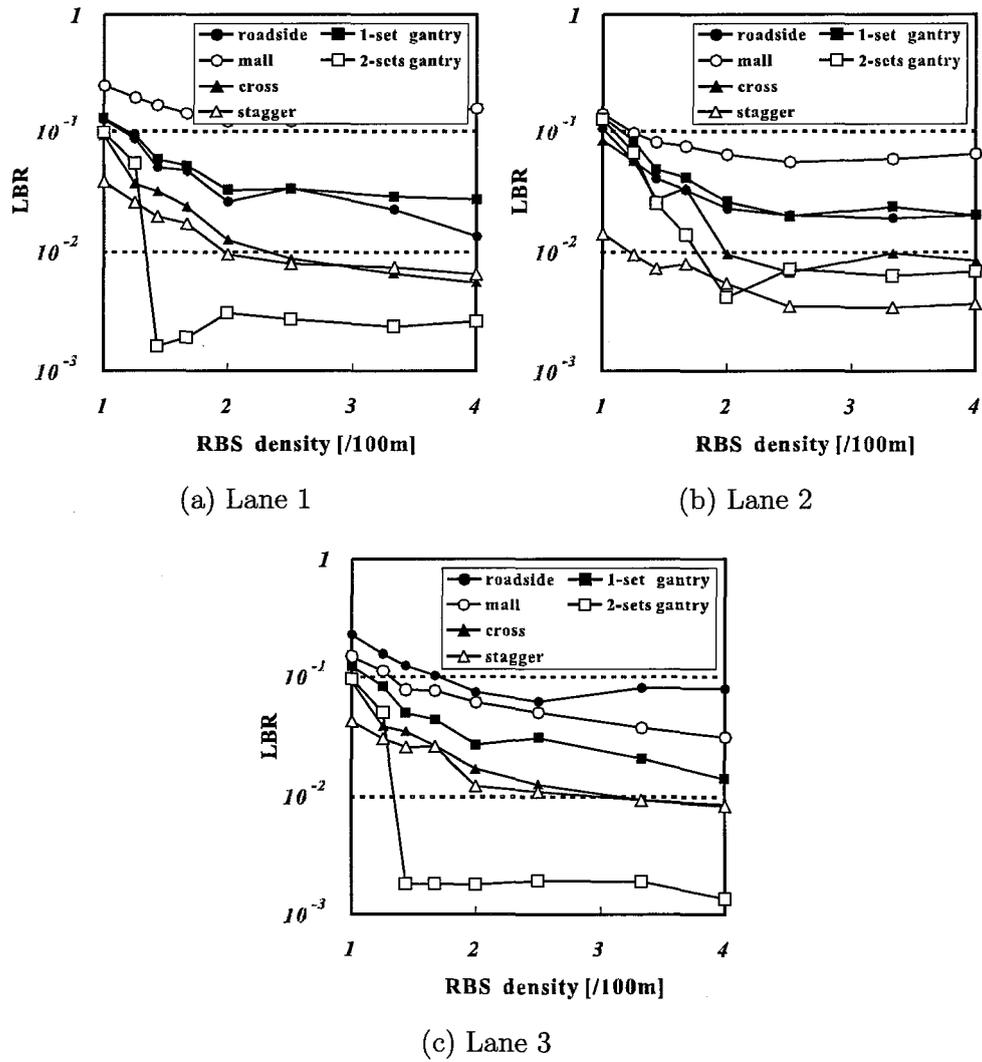


図 4.10 RBS 密度に対する通信遮断率 (Congested flow, $h_b=12\text{m}$)

4.4.2.2.2 両側 RBS 配置の特性

図 4.9及び図 4.10より、向合せ配置と千鳥配置の間で各車線の通信遮断率を比較すると、やはり自由流の場合と同様の理由により、ある RBS 密度における RBS 間隔は片側 RBS 配置の 2 倍となっているにも関わらず、ほとんどの RBS 密度において片側 RBS 配置の場合よりも良い通信遮断率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通信遮断が発生しなくなるため、幾何学的位置関係により 2 本の RBS 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、千鳥配置の通信遮断率が最も良い特性を示していることが図 4.10より分かる。また、RBS 密度を 1 から 4 すなわち RBS 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通信遮断率の値を最大で 1/20 程度に抑えられることが同図より分かる。

4.4.2.2.3 ガントリ RBS 配置の特性

路側アンテナ高が高い場合の 2 局ガントリ配置における各車線の通信遮断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 車線における通信遮断率が、路側アンテナ高が低い場合のものと比較して大きく低減されていることが図 4.9及び図 4.10より分かる。これは、片側 RBS 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、通信遮断率の低減に対して最も効果のある分散アンテナ配置法と言える。

4.4.3 平均通信遮断継続時間

前項では、自由流と渋滞流における通信遮断率を評価したが、異なる分散アンテナ配置間で等しい通信遮断率が得られても、多数の短時間通信遮断が発生しているのか、数回の長時間通信遮断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、本項では平均通信遮断継続時間（MLBD：Mean Link-Blocking Duration）について検討を加える。

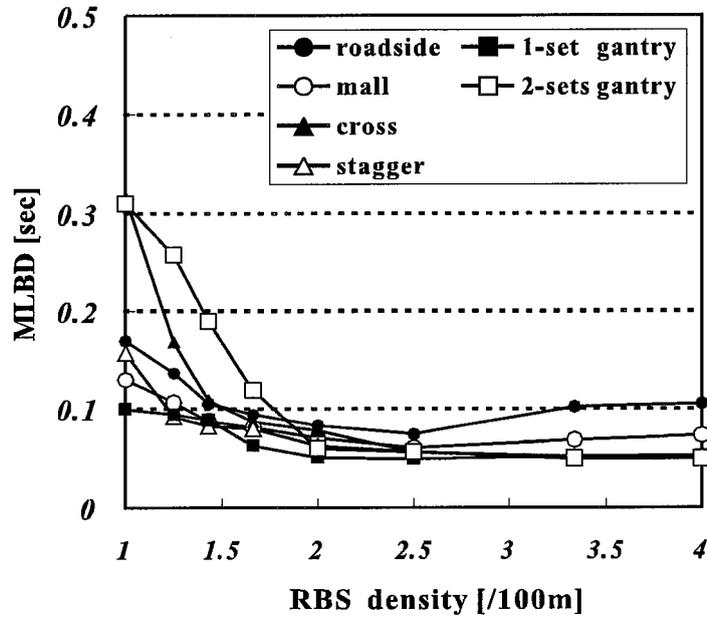
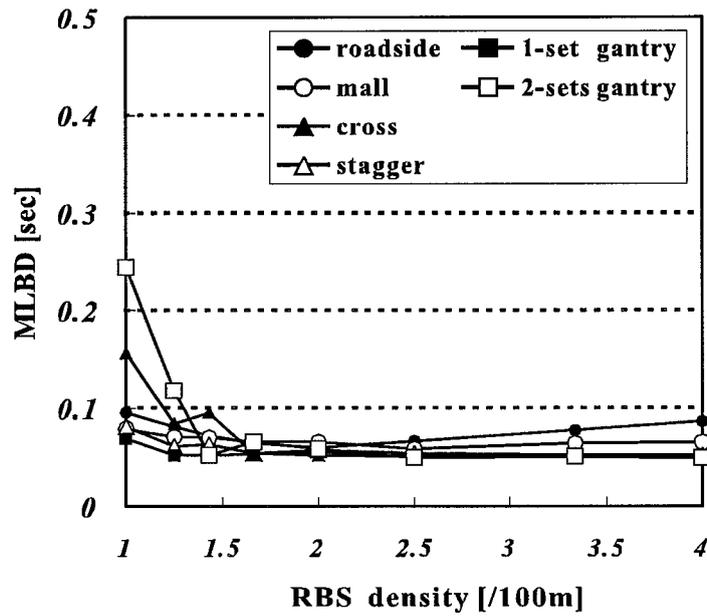
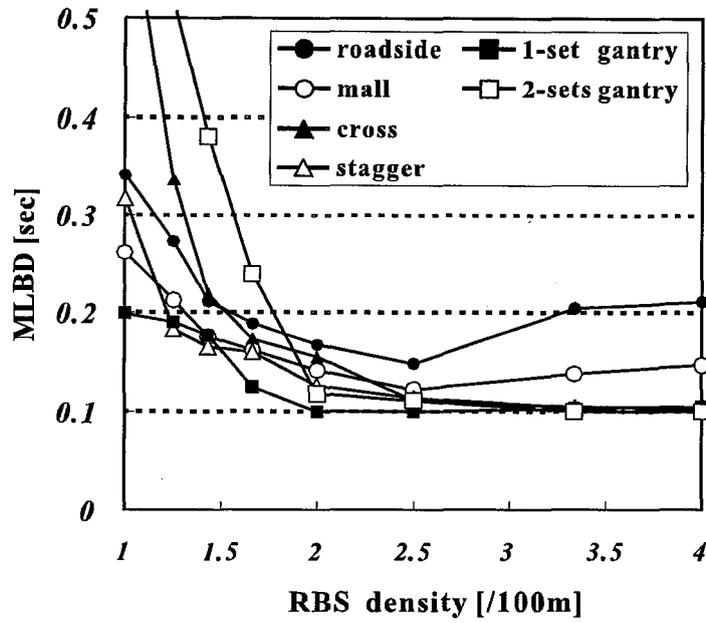
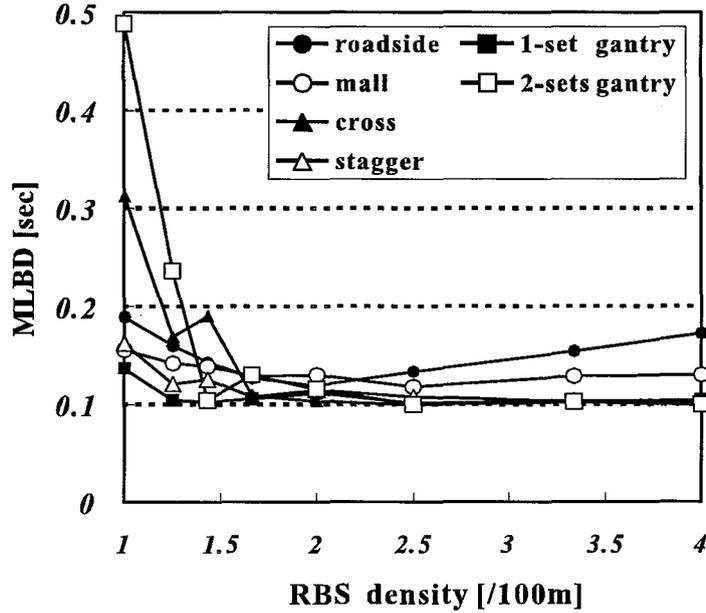
(a) $h_b=6m$ (b) $h_b=12m$

図 4.11 RBS 密度に対する平均通信遮断継続時間 (Free flow)



(a) $h_b=6m$



(b) $h_b=12m$

図 4.12 RBS 密度に対する平均通信遮断継続時間 (Congested flow)

図 4.11及び図 4.12に、自由流と渋滞流における全車線の RBS 密度に対する平均通信遮断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、いったん大型車両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、平均通信遮断継続時間は自由流のものとは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 4.11及び図 4.12より、路側均等配置と中央均等配置では、RBS 密度が 2 (RBS 間隔=50m) となるまでは RBS 密度の増加に従って平均通信遮断継続時間が減少し、この値を超えると RBS 密度の増加に従って平均通信遮断継続時間が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通信遮断率が RBS 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、RBS 密度が 2 となるまでは長時間の通信遮断の低減が支配的であり、この値を超えると長時間の通信遮断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 RBS 配置における平均通信遮断継続時間は、RBS 密度の増加に伴ってほぼ単調に減少しており、路側アンテナが低く設置されている場合は RBS 密度を 2.5 以上 (RBS 間隔 $\leq 80\text{m}$)、路側アンテナが高く設置されている場合は RBS 密度を 2 以上 (RBS 間隔 $\leq 100\text{m}$) とすることにより、RBS 密度が 4 (RBS 間隔=50m) の場合と同程度の平均通信遮断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、RBS 密度が 2 を下回ると平均通信遮断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、RBS 密度が 2 から 1 になると、平均通信遮断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通信遮断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 RBS 密度が 2 を下回っても平均通信遮断継続時間は片側 RBS 配置と同様の振舞いを行い、RBS 密度を 2 から 1 にすることによる平均通信遮断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、前項で述べたように、幾何学的位置関係により 2 本の RBS 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通信遮断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、同程度の通信遮断率であっても 2 局ガントリ配置より千鳥配置の方

が平均通信遮断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言える。

4.4.4 実効セル面積拡張効果

最後に、各分散アンテナ配置における通信遮断の解消効率を比較するため、自由流と渋滞流における全車線の RBS 密度に対する実効セル面積拡張率 (Effective cell area expansion ratio) を図 4.13 及び図 4.14 にそれぞれ示す。ただし、実効セル面積とは、路車間通信セル内における通信可能エリアすなわち所要 CNR を満たす通信エリアの面積として定義し、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通信遮断を考慮している。また、実効セル面積拡張率は、各分散アンテナ配置を用いて通信遮断を低減することによる路車間通信セル内における実効セル面積の拡張率とし、路側均等配置における実効セル面積を基準とする。すなわち、実効セル面積及び実効セル面積拡張率は次式のように表される。

$$\text{実効セル面積} = \text{通信ゾーン面積} \times (1 - \text{通信遮断率}) \quad (4.1)$$

$$\text{実効セル面積拡張率} = \frac{\text{各分散アンテナ配置における実効セル面積}}{\text{路側均等配置における実効セル面積}} \quad (4.2)$$

さらに、実効セル面積拡張率の最大値は次式のように与えられるので、これを“upper bound”として各図中に示している。

$$\text{実効セル面積拡張率の最大値} = \frac{\text{通信ゾーン面積}}{\text{路側均等配置における実効セル面積}} \quad (4.3)$$

図 4.13 及び図 4.14 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 RBS 密度に対して実効セル面積の拡張効果が得られないことが分かる。これは、中央均等配置は RBS 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過ぎず、第 1 車線と第 3 車線の通信遮断率の特性が入れ替わる他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、路側アンテナが低く設置されている場合は実効セル面積の拡張効果が得られているが、路側アンテナ高が高い場合は拡張率が 1.03 以下に留まっており、実効セル面積の大きな拡張効果が得られているとは言い難い。

これに対し、千鳥配置又は 2 局ガントリ配置を用いて RBS 密度を 2.5 以下とすると、路側アンテナ高が低い場合は RBS 密度の減少に従って実効セル面積拡張

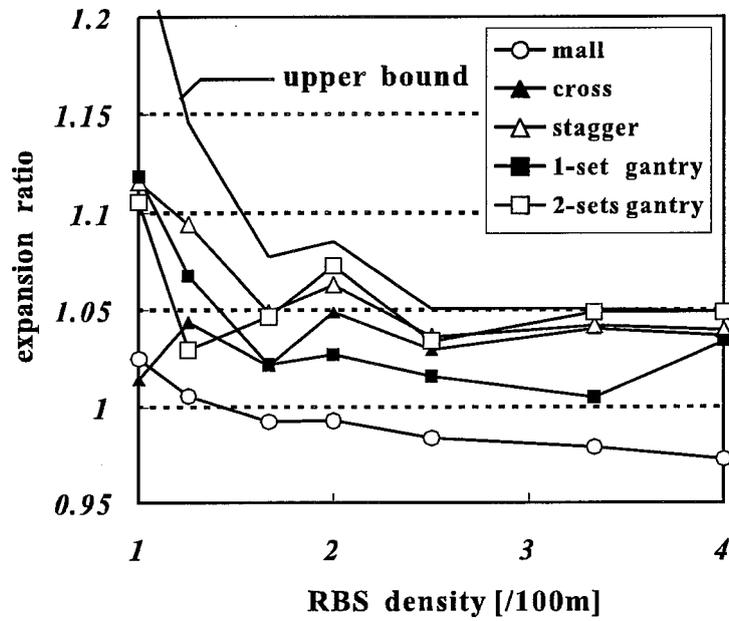
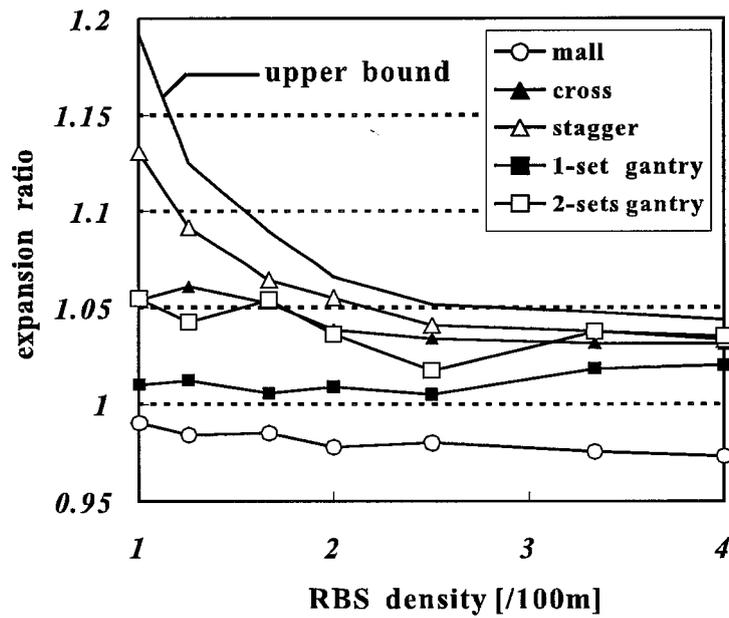
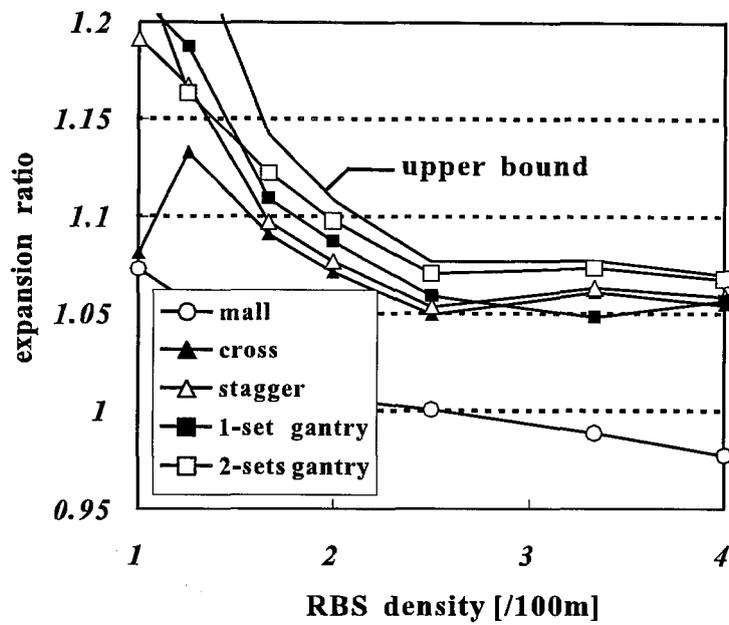
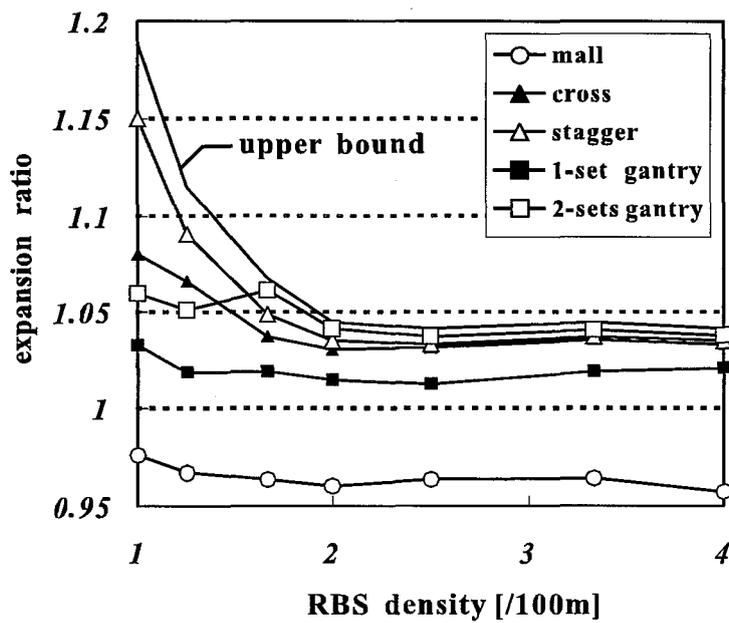
(a) $h_b=6m$ (b) $h_b=12m$

図 4.13 RBS 密度に対する実効セル面積拡張率 (Free flow)



(a) $h_b=6m$



(b) $h_b=12m$

図 4.14 RBS 密度に対する実効セル面積拡張率 (Congested flow)

率が大きくなる傾向があり、RBS密度が1の場合に自由流で1.1、渋滞流で1.2の拡張率が得られていることが図4.13(a)及び図4.14(a)から分かる。また、千鳥配置の場合、この効果は路側アンテナを高く設置しても維持でき、RBS密度が1の場合に自由流で1.13、渋滞流で1.15の拡張率が得られることが図4.13(b)及び図4.14(b)より分かる。これは、RBS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、路側アンテナ高に関わらず高い実効セル面積拡張効果が得られる分散アンテナ配置法と言える。

一方、2局ガントリ配置の場合に路側アンテナを高く設置すると、RBS密度を小さくすることによる実効セル面積の拡張効果はほとんど得られなくなる。これは、2局ガントリ配置において路側アンテナ高が高い場合に自車線の大型車両による通信遮断が発生する場合は、大型車両の深い電波の影に進入しているときであり、RBS密度に関わらず長時間の通信遮断を受け続ける傾向が大きいからであると考えられる。

以上より、交通流や路側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。

4.5 結言

本章では、複局同時送信を用いた路車間通信システムにおける通信遮断解消効率のよい分散アンテナ配置について検討を行った。本手法は、走行中の車両が周辺の車両に影響されることなく路側アンテナを見通せるような優れた分散アンテナ配置の構築を目標とするものであり、1つの路側アンテナが担っていた路車間通信機能を複数の路側アンテナに分散させることによるマクロダイバーシチ効果を利用した通信遮断の解消を実現する技術である。既存の道路インフラを有効活用した分散アンテナ配置に対し、交通流と多重路伝搬を考慮した受信信号電力に関する計算機シミュレーションをおこなった結果から、通信遮断率ならびに通信遮断継続時間の特性を定量的に評価し、千鳥配置及び2局ガントリ配置が最も良い特性が得られることを示した。また、実効セル面積の拡張効果に関して検討を加え、千鳥配置がその拡張効率の最も高い分散アンテナ配置であることを明らかにした。

第5章 結論

本論文では、道路交通流の変動と多重路伝搬に起因する劣悪な無線通信環境下にある高度道路交通システムにおいて、出来る限り通信を維持するための通信遮断解消技術に関する研究成果をまとめた。以下に、本研究で得られた成果を総括する。

第3章では、適応変調の路車間通信システムへの適用による通信遮断の解消効果を明らかにした。本手法は、路側アンテナと車載アンテナを結ぶ見通し線が大型車両によって遮へいされた場合、この大型車両の車体稜線を経て到来する回折波の電力を、適応変調を用いて受信信号電力に応じた変調フォーマットの切り換えを行うことで有効に利用し、通信を出来る限り維持する技術である。

交通流と多重路伝搬を考慮した受信信号電力に関する計算機シミュレーションを用いて、本手法の適用による通信遮断率の改善効果について評価を行った結果、以下のことが分かった。

- 路車間通信において所定の通信品質を確保するため、所要 CNR の低い変調方式を用いることで回折波を利用することが可能となり、通信遮断率を低減できる。例えば、路側アンテナ高が 10m の場合、64QAM (BER=10⁻⁵) に必要な所要 CNR である 25.6dB を、QPSK (BER=10⁻⁵) に必要な 12.6dB とすることにより、自由流と渋滞流ともに通信遮断率を約 1/10 にできる。また、誤り訂正符号を適用して符号化利得を得ることにより、通信遮断率のさらなる低減が期待できる。
- 自由流と渋滞流ともに、第2車線及び第3車線における通信遮断率は、路側アンテナ高を高くすることで大きく低減でき、第2車線においては第1車線と同程度にまで改善される一方、第1車線の通信遮断率の低減に路側アンテナを高く設置することはあまり効果がない。
- 他車両における電波反射による受信信号電力は、自由流においては第1車線及び第2車線の通信遮断率の低減に僅かな効果があるが、第3車線では全く

効果が得られない。また、渋滞流においては他車両での反射波が第 1 車線の通信遮断率の低減に大きく寄与する。

- 他車両における電波回折波は、自由流では路側アンテナ高が低い場合は第 3 車線の通信遮断率を最も大きく低減でき、路側アンテナ高が高い場合は第 2 車線の通信遮断率を最も大きく低減できる。また、渋滞流では、回折波は路側アンテナ高が高い場合に第 2 車線の通信遮断率を最も大きく低減できる。

また、通信遮断継続時間の改善効果について評価を行った結果、以下のことが分かった。

- 上記と同様に所要 CNR を低くすることにより、路側アンテナ高が 10m で通信ゾーンを 50m とした場合、自由流の場合は第 1 車線の全車両の 99% 以上の通信遮断継続時間を 0.2sec 以内に、渋滞流の場合は第 1 車線の全車両の 98% 以上の通信遮断継続時間を 1.0sec 以内にそれぞれ抑えられる。また、誤り訂正符号を適用して符号化利得を得ることにより、これらの値をさらに小さく抑えられることが期待できる。
- 自由流と渋滞流ともに、所要 CNR を低くするに従って短時間の通信遮断の割合は減少するが、長時間の通信遮断の割合はあまり減少しない。
- 自由流と渋滞流ともに、所要 CNR を低くして回折波による電力を有効利用することにより、通信ゾーンを 50m から 100m に拡大しても通信遮断継続時間の悪化を小さく抑えられる。

以上の結果をもとにして、QPSK, 16QAM, 64QAM を受信 CNR に応じて切り換える適応変調を適用した場合に達成できる実効伝送速度ならびに平均受信データ量の結果から、以下のことが分かった。

- 適応変調を用いることで、64QAM を固定的に用いる場合に比べて実効伝送速度を大幅に向上でき、RBS 間隔が 100m のときに平均実効伝送速度を自由流及び渋滞流の場合にそれぞれ最大約 1.3 倍及び約 1.5 倍にできる。

- 自由流では、適応変調方式を用いることで 64QAM の場合よりも実効伝送速度を常に向上でき、各車線間の実効伝送速度の差が軽減され、さらに低実効伝送速度となる時間の割合を大幅に低減できる。
- 渋滞流では、路側アンテナ高が低い場合は適応変調方式を用いることで 64QAM よりも実効伝送速度を常に向上できるが、各車線間の実効伝送速度の差はほとんど軽減されない。一方、路側アンテナ高が高い場合は適応変調方式を用いることで 64QAM よりも実効伝送速度を常に向上でき、かつ各車線間の実効伝送速度の差も小さくなる。
- 自由流と渋滞流のいずれの場合でも、通信ゾーンを拡大することによる実効伝送速度の低下を、適応変調方式を用いることで補償できる。また、複数の車両が多重アクセスする場合、自由流では各車両の平均受信データ量を最大化する最適な RBS 間隔が 60m~100m に存在するが、渋滞流では最適間隔は存在せず通信ゾーンの拡大に従って平均受信データ量は減少する。

第 4 章では、複数局同時送信を用いた路車間通信システムにおける通信遮断解消効率のよい分散アンテナ配置を明らかにした。本手法は、走行中の車両が周辺の車両に影響されることなく路側アンテナを見通せるような優れた分散アンテナ配置の構築を目標とするものであり、1つの路側アンテナが担っていた路車間通信機能を複数の路側アンテナに分散させることによるマクロダイバーシチ効果を利用した通信遮断の解消を実現する技術である。

交通流と多重路伝搬を考慮し、QPSK を用いる通信方式を仮定して計算機シミュレーションを行って求めた通信遮断率を、既存の道路インフラを有効活用した 6 種類の分散アンテナ配置（路側片側配置、中央片側配置、向合せ配置、千鳥配置、1局ガントリ配置、2局ガントリ配置）について比較した結果、以下のことが分かった。

- 向合せ配置と千鳥配置は、ある RBS 密度における RBS 間隔が片側 RBS 配置の場合の 2 倍となるにも関わらず、ほとんどの RBS 密度に対して片側 RBS 配置の場合よりも良い通信遮断率が得られる。
- 自由流と渋滞流ともに、千鳥配置又は 2 局ガントリ配置を用いることで最も通信遮断率を低く抑えられる。また、その通信遮断率は RBS 間隔を 200m か

ら 50m へと縮小することにより、自由流の場合、それぞれ最大約 1/20 と約 1/100 に、渋滞流の場合、両配置ともに最大約 1/20 に低減できる。

また、同様の計算機シミュレーションから得た通信遮断継続時間の結果から、以下のことが分かった。

- 両側 RBS 配置における平均通信遮断継続時間は、向合せ配置と千鳥配置とともに RBS 密度の増加に伴って単調に減少し、路側アンテナ高が低い場合は RBS 密度が 2.5 以上 (RBS 間隔 $\leq 80\text{m}$)、路側アンテナ高が高い場合は RBS 密度が 2 以上 (RBS 間隔 $\leq 100\text{m}$) のとき、RBS 密度が 4 (RBS 間隔 = 50m) のときと同程度の良好な平均通信遮断継続時間 (0.05~0.1sec) が得られる。
- 千鳥配置を用いたときの平均通信遮断継続時間は、RBS 間隔によらず低い値となり、他のアンテナ配置を用いて RBS 間隔を 100m 以上にすると平均通信遮断継続時間が急激に悪化するのに対し、その割合を最も小さく抑えられる。

さらに、路車間通信の実効セル面積に関する考察を加えた結果、以下のことが分かった。

- 実効セル面積の拡張効果は、交通流や路側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 RBS 密度が 1 の場合に自由流で最大 1.13、渋滞流で最大 1.2 の拡張率が得られる。

近い将来実現することが期待されている走行支援道路システムでは、緊急を要する情報を始めとした安全運転支援のための様々な情報を、車車間通信ネットワーク内に存在する車両間で共有するとともに、路車間通信ネットワークを介して車群間でも共有することが必要不可欠である。さらに、このような情報の収受及び共有は、位置や時間に依存することなくシームレスに行う必要があるため、これを実現できる環境を道路上に構築しておくことが望まれる。

本論文における通信遮断解消技術に関する成果は、道路を走行中の車両が可能な限り継続して情報の送受信を行える環境の構築を可能とするものであり、本技術を路車間通信システムに適用することで、運転者の安全性及び快適性の向上に大きく貢献することによる道路交通環境の最適化の実現が期待できる。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 川嶋弘尚, 森山誠二, 川合 誠, 辻 孝之, 石田真之助, 峯田憲一, 田中英男, 中野年章, 木暮哲哉, 富松 光, 高橋寿平, 堀内浩規, “ITS を支える映像情報メディア技術,” 映情学誌, vol.59, no.6, pp.811-841, June 2005.
- [3] 藤瀬雅行, “ミリ波 ITS 通信システム,” 信学誌, vol.87, no.9, pp.744-749, Sept. 2004.
- [4] 藤森祥弘, 丸山 信, 太刀川喜久男, 長嶋敏夫, 堀井志朗, “ノンストップ自動料金収受システム ETC,” 電学誌, vol.119, no.10, pp.590-607, Oct. 1999.
- [5] 国土交通省道路局, <http://www.mlit.go.jp/road/>
- [6] 電波産業会, ARIB STD-T55, Nov. 1997.
- [7] 電波産業会, ARIB STD-T75, Sept. 2001.
- [8] S. Hirai, M. Kawana, H. Ouchi, and Y. Manabe, “The function of ETC road-side system for smart interchange / parking area connection type as a social experiment,” Proc. 12th World Congress on ITS, Nov. 2005.
- [9] Y. Tsuda, K. Togashi, M. Ikawa, S. Makita, and T. Nishiwaki, “Development of DSRC parking system,” Proc. 11th World Congress on ITS, Oct. 2004.
- [10] Y. Sato, “Introduction and evaluation of intelligent parking system utilizing DSRC in Toyota city,” Proc. 12th World Congress on ITS, Nov. 2005.
- [11] 伊川雅彦, 後藤幸夫, 熊澤宏之, 津田喜秋, 岡賢一郎, “DSRC の多目的利用を実現する路車間通信の環境に適した通信プロトコルの設計と実装,” 信学論 (A), vol.J88-A, no.2, pp.218-227, Feb. 2005.

- [12] 電波産業会, ARIB STD-T88, May 2004.
- [13] 西日本高速道路株式会社, <http://www.w-nexco.co.jp/>
- [14] 神尾 寿, 自動車 ITS 革命, ダイヤモンド社, 2004.
- [15] 堀松哲夫, 一津屋正樹, “実用化を迎えたミリ波レーダシステム,” 信学誌, vol.87, no.9, pp.756-759, Sept. 2004.
- [16] 高橋 宏, “次世代自動車の課題,” 信学誌, vol.88, no.10, pp.785-789, Oct. 2005.
- [17] TOYOTA Internet Drive, <http://toyota.jp/g-book/>
- [18] 中村康久, “NTT ドコモのテレマティクスの取り組み,” 信学技報, ITS2003-37, MoMuC2003-81, Jan. 2004.
- [19] NHK 受信技術センター, 知っておきたい地上デジタル放送, NHK 出版, 2005.
- [20] T. Hasegawa, “A concept reference model for inter-vehicle communications,” Proc. 10th World Congress on ITS, Nov. 2003.
- [21] 上田 篤, 水井 潔, 井原俊夫, “コードホッピングスペクトル拡散方式を用いた車車間通信・測距統合システム,” 信学論 (A), vol.J86-A, no.12, pp.1394-1403, Dec. 2003.
- [22] 渡辺正浩, 田中信介, 小宮山牧兒, 小花貞夫, 藤瀬雅行, “ITS 車車間通信におけるマルチホップ動画ストリーミングの実験評価,” 情処学研報, 2005-ITS-20(6), March 2005.
- [23] S. Katsuki, T. Miyoshi, and Y. Nakama, “Research concerning standardization of DSRC-based services,” Proc. 12th World Congress on ITS, Nov. 2005.
- [24] ITS 情報通信システム推進会議, <http://www.itsforum.gr.jp/>
- [25] F. Umeda and I. Shimada, “Communication requirements of inter-vehicle communications for safety applications,” Proc. 12th World Congress on ITS, Nov. 2005.

- [26] 森純一郎, 上木淳平, 中村友亮, 堀井康史, 岡田博美, “車載機器間通信による車両衝突回避システムの開発,” 信学技報, SST2002-112, A-P2002-211, RCS2002-328, MoMuC2002-137, MW2002-219, March 2003.
- [27] 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.
- [28] Y. Hamada, M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Non-regenerative millimeter-wave inter-vehicle relay scheme for spot type road-to-vehicle communication system and its improvement effect in communication outage rate,” Proc. 7th Topical Symposium on Millimeter Waves (TSMMW2005), pp.45-48, Feb. 2005.
- [29] 濱田悠司, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, 澤 良次, 熊沢宏之, “路車間通信システムにおけるアンテナ配置によるシャドウイング率改善の検討,” 2003 信学総大, A-17-11, March 2003.
- [30] 濱田悠司, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “路車間通信と車車間通信の融合によるシャドウイング発生率改善手法の一検討,” 信学技報, ITS2003-19, Sept. 2003.
- [31] 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.
- [32] V. D. Hoang, Z. Shao, and M. Fujise, “Multi hops Internet connection for vehicles outside RSE coverage area,” Proc. 4th International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2004), pp.298-302, July 2004.
- [33] 塚本晃司, 藤井雅弘, 伊丹 誠, 伊藤紘二, “車々間・路車間統合システムを用いた単一方向巡回ネットワークの提案と評価,” 信学論 (A), vol.J87-A, no.9, pp.1236-1244, Sept. 2004.
- [34] 台蔵浩之, 岩橋 努, 渡辺 尚, “車車間通信と路車間通信を統合する MAC プロトコルの評価について,” 信学技報, ITS2003-114, March 2004.

- [35] 伊藤祐幸, 永長知孝, 森香津夫, 小林英雄, “路車間通信システムを補完する車
両間通信ネットワークに関する一検討,” 2002 信学総大, A-17-9, March 2002.
- [36] 牛谷善哉, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “車車間・路車間融合通信システム
における大型車中継によるリンクブロッキング率の改善効果,” 2005 信学総大,
A-17-6, March 2005.
- [37] 牛谷善哉, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “大型車両を基点とした車車間通信と
路車間通信の融合による通信エリア拡張に関する検討,” 信学技報, RCS2005-51,
July 2005.
- [38] K. Evensen, “CALM and WAVE,” Proc. 4th International Workshop on ITS
Telecommunications (ITST2004), pp.129-135, July 2004.
- [39] 長谷川孝明, “ITSにおける無線LANの活用と標準化の課題,” 情報処理, vol.45,
no.8, pp.836-841, Aug. 2004.
- [40] 長谷川孝明, “ITS分野の体系化について,” 信学技報, ITS2004-97, March 2005.
- [41] 道路新産業開発機構, ITS Handbook 2005-2006, 2005.
- [42] M. Fujise, K. Sato, H. Harada, and F. Kojima, “ITS multi-service road-vehicle
communications based on radio on fiber systems,” Proc. 2nd International
Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'99),
pp.119-122, Sept. 1999.
- [43] H. Ogawa, “Microwave and millimeter-wave fiber optic technologies for subcar-
rier transmission systems,” IEICE Trans. Commun., vol.E76-B, no.9, pp.1078-
1090, Sept. 1993.
- [44] H. Harada, K. Sato, and M. Fujise, “A radio-on-fiber based millimeter-wave
road-vehicle by a code division multiplexing radio transmission scheme,” Proc.
2nd International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2001), pp.47-
52, Oct. 2001.

- [45] 東野武史, 蓑田佑紀, 今尾勝崇, 村越昭彦, ルンホンハイ, 塚本勝俊, 小牧省三, “ブロードバンドユビキタスのためのソフトウェア無線ネットワークと電波エージェント,” 第7回 YRP 移動体通信産学官交流シンポジウムプロシーディングス, pp.152-153, June 2005.
- [46] 梶原 亮, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “路車間 TCP/IP 通信システムにおける電力差分比較によるシャドウイング判別法に関する一考察,” 2004 信学総大, B-15-37, March 2004.
- [47] 梶原 亮, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “路車間 TCP/IP 通信システムにおける長期通信遮断推定法の提案とそのスループット改善効果,” 信学技報, NS2004-50, RCS2004-96, July 2004.
- [48] R. Kajiwara, M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Estimation method of shadowing and its throughput improvement effect in road-to-vehicle TCP/IP communication system,” Proc. 2nd Asia Pacific Wireless Communication Symposium (APWCS2005), pp.265-269, Aug. 2005.
- [49] N. Yosoku, M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Discriminating method between cell boundary and shadowing by utilizing DS/SS ranging scheme for millimeter-wave road-to-vehicle communication system,” Proc. 7th Topical Symposium on Millimeter Waves (TSMMW2005), pp.49-52, Feb. 2005.
- [50] A. Yamamoto, K. Ogawa, A. Inui, K. Nagao, T. Horimatsu, A. Kato, and M. Fujise, “Simple propagation models for ITS inter-vehicle communications at 60GHz,” Proc. 2nd International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2001), pp.303-308, Oct. 2001.
- [51] A. J. Rustako, Jr., M. J. Gans, G. J. Owens, and R. S. Roman, “Attenuation and diffraction effects from truck blockage of an 11GHz line-of-sight microcellular mobile radio path,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.40, no.1, pp.211-215, Feb. 1991.

- [52] 三瓶政一, 森永規彦, “高速ワイヤレスデータ伝送のための適応変調技術,” 信学誌, vol.85, no.4, pp.245-251, April 2002.
- [53] 石井寛人, 長谷川孝明, “DSRCにSNR環境適応通信を利用した場合の基礎的検討,” 信学技報, ITS99-110, March 2000.
- [54] T. Sakamoto and K. Abe, “Performance analysis of adaptive modulation technique on DSRC system,” Proc. 3rd International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2002), pp.161-164, Nov. 2002.
- [55] 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,” 情報学論, vol.43, no.12, pp.3931-3938, Dec. 2002.
- [56] 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.
- [57] K. Sato and M. Fujise, “Effect of diversity in a millimeter-wave RoF road-vehicle communication system,” Proc. 4th International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2004), pp.264-268, July 2004.
- [58] 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.
- [59] C. Wietfeld, “Performance evaluation of vehicle-roadside communication systems in shadowing & multipath fading environments,” Proc. 45th Vehicular Technology Conference (VTC'95), vol.2, pp.947-952, July 1995.
- [60] M. Imao, S. Takahashi, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Shadowing rate considering effect of radio diffraction and traffic flow for road-to-vehicle communication system,” Proc. 3rd International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2002), pp.295-299, Nov. 2002.
- [61] M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Shadowing improvement effect of reflection and diffraction under random traffic flow in road-to-vehicle communi-

- cation system,” Proc. 2003 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2003), vol.2, pp.699-702, Nov. 2003.
- [62] 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “適応変調方式を用いた電波回折の有効利用によるシャドウイング率と実効伝送速度の改善効果,” 信学技報, ITS2003-46, MoMuC2003-90, Jan. 2004.
- [63] M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Impact on throughput performance by utilizing diffraction power for road-to-vehicle communication system,” Proc. 4th International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2004), pp.165-170, July 2004.
- [64] M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Application of adaptive modulation for road-to-vehicle communication system and its improved effect in shadowing duration,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E87-A, no.10, pp.2639-2648, Oct. 2004.
- [65] 今尾勝崇, 高橋 伸, 杉浦泰伸, 塚本勝俊, 小牧省三, 澤 良次, 深江唯正, “路車間通信システムにおける車両トラヒックとシャドウイング発生確率の関係に関する一考察,” 2002 信学総大, A-17-38, March 2002.
- [66] 今尾勝崇, 濱田悠司, 塚本勝俊, 小牧省三, “路車間通信システムにおけるシャドウイング低減のための路側アンテナ配置に関する検討,” 信学技報, A-P2004-50, SAT2004-48, MW2004-50, OPE2004-40, July 2004.
- [67] M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Roadside unit arrangement for improving link-blocking performance in road-to-vehicle communication antenna system,” Proc. 5th International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2005), pp.37-40, June 2005.
- [68] 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “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,” 信学論 (C), vol.J88-C, no.12, pp.1082-1095, Dec. 2005.
- [69] 福田 正, 交通工学, pp.42-55, 朝倉書店, 2002.

- [70] 佐佐木綱, 飯田恭敬, 交通工学, pp.121-149, オーム社, 1995.
- [71] 越 正毅, 交通工学通論, pp.78-112, 技術書院, 1989.
- [72] F. A. Haight, Mathematical theories of traffic flow, pp.103-106, Academic Press, 1965.
- [73] M. Katayama, "Time headway distribution of traffic flow," Proc. JSCE, no.189, pp.107-115, May 1971.
- [74] 越 正毅, 岩崎征人, 大蔵 泉, 西宮良一, "渋滞時の交通流現象に関する研究," 土木学会論文集, no.306, pp.59-70, Feb. 1981.
- [75] 森村英典, 大前義次, 応用待ち行列理論, pp.11-17, 日科技連出版社, 1977.
- [76] 米谷栄二, 渡辺新三, 毛利正光, 佐佐木綱, 加藤 晃, 交通工学, pp.77-78, オーム社, 1986.
- [77] N. Taguchi, T. Kimura, T. Horimatsu, A. Kato, and M. Fujise, "Propagation characteristics of 60GHz millimeter wave for ITS inter-vehicle communications (3) -Distance characteristics for antennas with different directivity-," Proc. 1st International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2000), pp.259-262, Oct. 2000.
- [78] Y. Segawa, M. Okada, and S. Komaki, "Performance of COFDM based transmitter diversity in a road-to-vehicle communication system," IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, vol.2, no.4, pp.192-196, Dec. 2001.
- [79] 後藤尚久, 新井宏之, 電波工学, pp.93-97, 昭晃堂, 2000.
- [80] Y. H. Kim, K. S. Yang, S. Kawakami, A. Kato, and M. Fujise, "Impact of multipath outage characteristics on 60GHz millimeter-wave inter-vehicle communication systems," Proc. 2nd International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2001), pp.291-295, Oct. 2001.
- [81] 前田 慎, 和田友孝, 岡田 実, 塚本勝俊, 小牧省三, "ミリ波車々間通信におけるマルチパス伝搬特性の一検討," 信学技報, A-P97-161, Jan. 1998.

- [82] M. Okada, M. Maeda, K. Tsukamoto, and S. Komaki, "A joint road-to-vehicle and vehicle-to-vehicle communications system based on non-regenerative repeater," Proc. 50th Vehicular Technology Conference (VTC'99-Fall), vol.4, pp.2233-2237, Sept. 1999.
- [83] 和田友孝, 前田 慎, 岡田 実, 塚本勝俊, 小牧省三, "ミリ波車車間通信における信号伝搬特性," 信学論 (B-II), vol.J81-B-II, no.12, pp.1116-1125, Dec. 1998.
- [84] 和田友孝, 前田 慎, 岡田 実, 塚本勝俊, 小牧省三, "ミリ波車々間通信システムにおける信号伝送特性の一検討," 信学技報, RCS97-155, Nov. 1997.
- [85] 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.
- [86] 荒木 正, 志村竜宏, 石河伸一, "複局送信を用いた 5.8GHz 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.
- [87] S. R. Saunders, Antennas and propagation for wireless communication systems, pp.45-51, John Wiley & Sons, 1999.
- [88] 滑川敏彦, 奥井重彦, 通信方式, pp.187-191, 森北出版, 2003.
- [89] 電波産業会, 5.8GHz 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.
- [90] 高井潤三, 金原 正, 田島利男, 道路照明, pp.36-41, 技術書院, 1966.
- [91] 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.
- [92] 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.

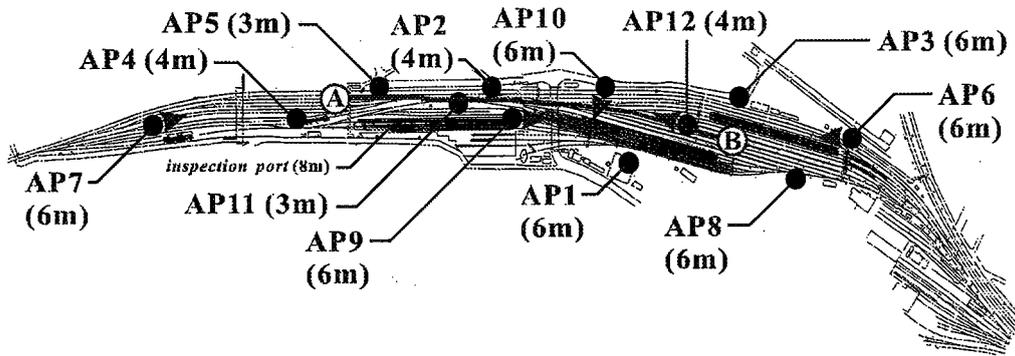
付 録

A 幾何光学近似による電波伝搬環境の検証例

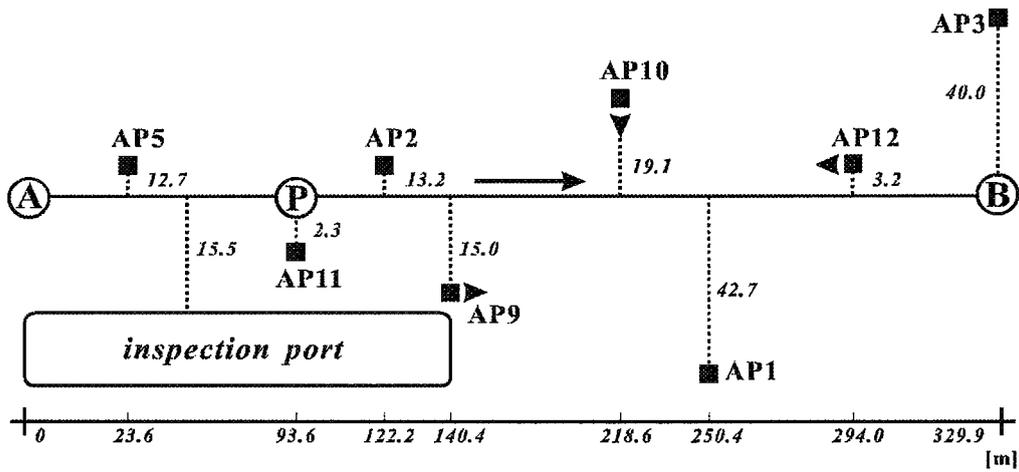
無線電波伝搬のモデル化を行う際には、無線通信に用いる電波の波長が周辺に存在する建造物や障害物の規模に対して十分に小さい値である場合は、受信点に到来する電波を幾何光学的に重ね合わせる手法が用いられることが多い。本章では、この手法を適用して、鉄道検車場における無線 LAN システム (IEEE802.11b) の電波伝搬環境を数値計算により検証した例を示す。

図 A.1(a) に、検証の対象とした鉄道検車場の見取り図を示す。検車場内には 12 基の無線 LAN アクセスポイント (AP: Access Point) が配備され、検車場内に待機する列車と無線通信が可能である。各 AP における送信アンテナには 13 段コーリニア型半波長ダイポールアンテナが用いられ、AP7, AP9, AP10, 及び AP12 以外は路面に対して垂直に設置されている。また、AP7, AP9, AP10, 及び AP12 はそれぞれ同図中に示した方向に 5deg 程度傾けて設置されている。同図中央より左側は引上線区間であり、列車の入れ替えが行われるときにのみ使用される。一方、同図中央より右側は着発線区間であり、複数の列車が常時待機している。

次に、図 A.1(b) に数値計算に用いる鉄道検車場のモデルを示す。AP5 付近に設置されている歩道橋を走行開始地点 A、AP3 付近を走行終了地点 B として、第 9 番線の走行を想定した数値計算を行う。本モデルでは、走行開始地点 A から走行終了地点 B までは直線状の線路であると仮定し、各 AP から第 9 番線の線路までの垂直距離、及び走行開始地点から各 AP までの距離を見取り図から算出してモデルに適用している。また、各 AP に設置されている送信アンテナの種類及び設置高 (図 A.1 中に表記) は、検車場で実際に用いられているものに基づいている。ただし、AP9, AP10, 及び AP12 に設置された送信アンテナは、図 A.1(a) 中に示した方向に各々 5deg 傾けられているものと仮定した。数値計算に用いたその他のパラメータを表 A.1 に示す。いずれの数値も、検車場における無線伝搬環境測定の際の測定条件に基づいた値である。また、13 段コーリニア型半波長ダイポールアンテナの指向特性を図 A.2 に示す。同図より、13 段コーリニア型半波長ダイポールアンテナは、アンテナ素子に垂直な方向に対して非常に鋭い指向性を有していることが分かる。



(a) 鉄道検車場の見取り図



(b) 数値計算に用いるモデル

図 A.1 鉄道検車場の見取り図とそのモデル

表 A.1 数値計算に用いたパラメータ

Reference track		9th track
AP	Transmitted power	10 dBm
	Antenna configuration	13 elements colinear-type 1/2-wavelength dipole
	Antenna gain	10 dBi
	Connection cable loss	8 dB
Train	Antenna configuration	1/2-wavelength dipole
	Antenna gain	2 dBi
	Antenna height	2.5 m
	Window transmission loss	2 dB

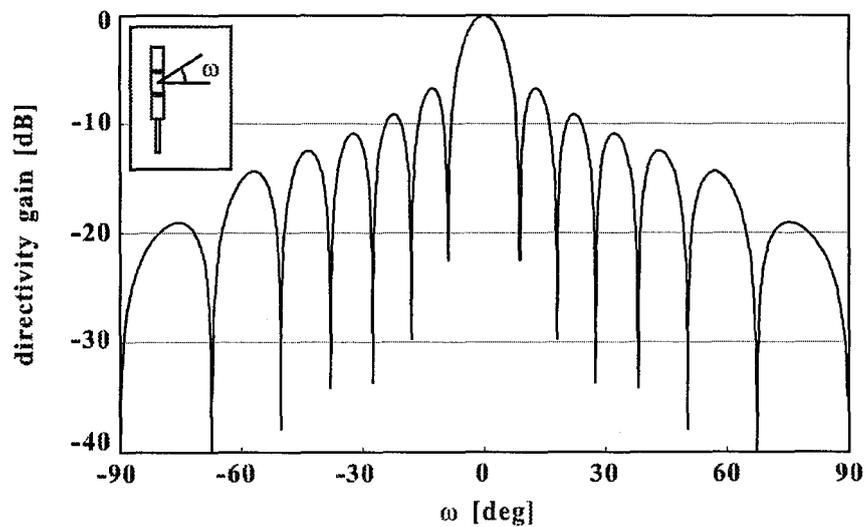


図 A.2 13 段コーリニア型半波長ダイポールアンテナの指向特性

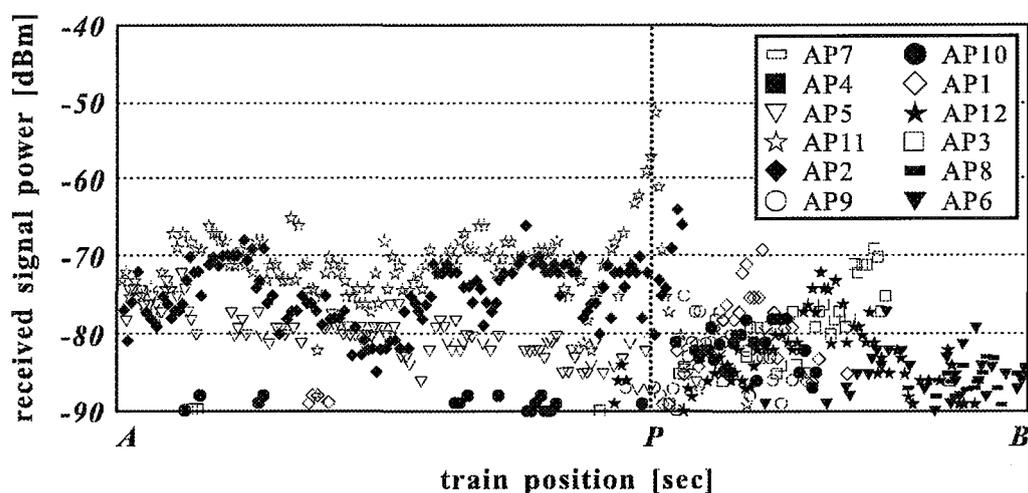
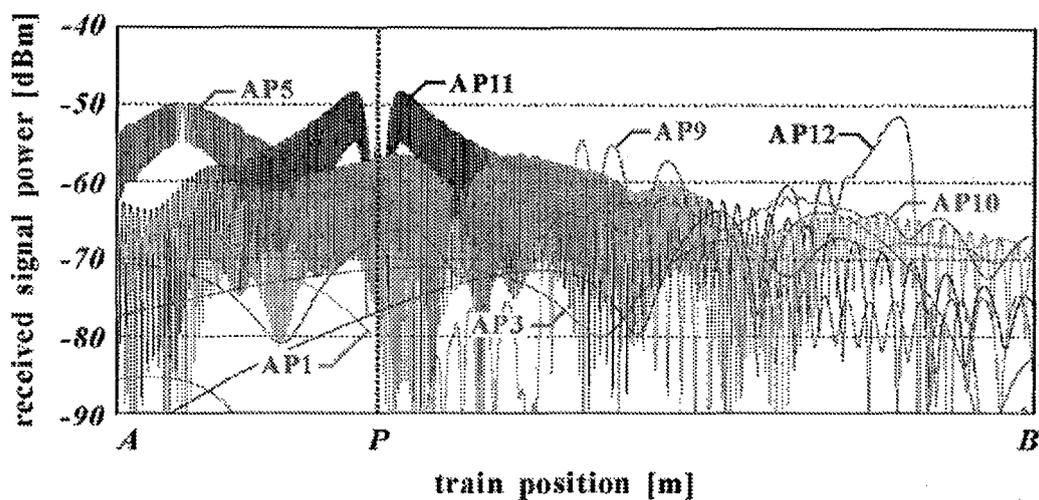


図 A.3 受信信号電力の実測結果

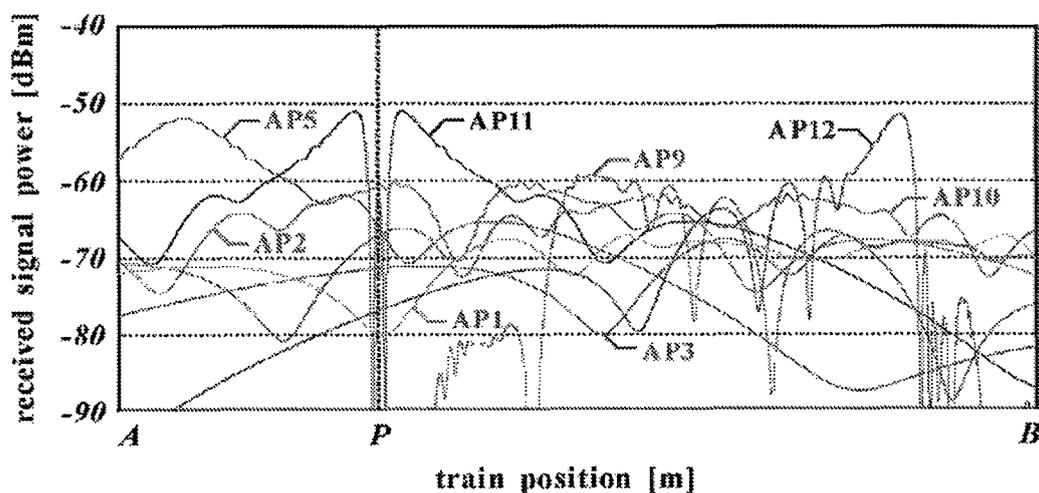
図 A.3に、検車場における受信信号電力の実測結果を示す。本結果は、実際に検車場において列車を走行させ、運転席に設置された受信アンテナにおける受信信号電力を測定した値であり、横軸は通過時刻である。走行開始地点から AP11 付近（地点 P）までは引上線区間であるため列車の走行速度が遅く、AP11 付近（地点 P）を超えた付近から走行終了地点までは着発線区間であるため列車の走行速度は徐々に速くなっている。

また、図 A.4に数値計算による受信信号電力の計算結果を示す。ただし、同図 (a) は検修庫における電波反射を考慮した場合であり、同図 (b) はこれを考慮しない場合の計算結果である。各図の横軸は列車の位置であり、図 A.3と比較を行うために地点 P の位置を同図中に示した。

図 A.3と図 A.4(b)を比較することにより、検車場における無線伝搬環境の数値計算による再現性について検証を行う。以下では、実際の検車場において測定された受信信号電力の値を“実測値”，数値計算により得られた受信信号電力の計算結果を“計算値”と表記する。



(a) 検修庫における電波反射を考慮した場合



(b) 検修庫における電波反射を考慮しない場合

図 A.4 受信信号電力の数値計算結果

- AP11からの受信信号電力の最大値は、実測値と計算値とも約-50dBmとなっておりよく一致している。ただし、計算値では送信アンテナのヌル点に起因する受信信号電力の大きな低下が見られるが、実測値の精度が荒いためこれに一致するような場所が存在しているかどうかは不明である。

- AP2からの受信信号電力の最大値は、実測値と計算値で数dBm程度の差はあるものの、いずれの場合も約-60dBmとなっておりよく一致している。
- AP9からの受信信号電力は、地点Pを超えた付近から実測値と計算値ともに急激に低下し、-80dBm程度まで落ち込んでおりよく一致している。計算値ではその直後に再び受信信号電力が急激に上昇しているが、列車背部からの電波の受信を考慮して数値計算を行ったためであると考えられる。
- AP10からの受信信号電力は、実測値では時刻によらず-80dBm付近となっているが、計算値では-65dBm程度となっており、不一致が見られる。
- AP1からの受信信号電力の最大値は、実測値と計算値とも約-70dBmとなっておりよく一致している。計算値では受信信号電力は-70dBm～-80dBmの付近で緩やかに変動しているが、実測値ではその変動がより顕著である。
- AP12からの受信信号電力の最大値は、計算値では-50dBm程度であるが、実測値ではほぼ同じ位置で最大値をとるものの、計算値で得られた値ほど大きな受信信号電力は得られていない。一方、最大値を超えると実測値と計算値ともに-75dBm程度の受信信号電力が得られておりよく一致している。
- AP3からの受信信号電力の最大値は、実測値と計算値ともに約-70dBmとなっておりよく一致している。

以上の結果より、送信アンテナが傾けられているAP10及びAP12で実測値と計算値にやや不一致が発生していることが確認できる。これは、送信アンテナとして適用している13段コーリニア型半波長ダイポールアンテナは、半値角が非常に小さく傾斜角を僅かに変化させただけでも受信信号電力特性は大きく変化するため、モデル化の際に誤差が発生したと考えることができる。また、AP10及びAP12が設置されている区間は着発線区間であり、測定に用いた列車以外にも複数の列車が存在しているため、これに起因する電波反射による受信信号電力の低下及び激しい変動が実測値に影響を与えていることも要因として考えられる。一方、その他のAPに対しては実測値と計算値の間でよく一致した受信信号電力特性が得られていることが分かり、幾何光学近似を用いた数値計算が実フィールドの電波伝搬環境を再現する手段として非常に有効であるということが確認された。

B 直交振幅変調方式の平均 BER

本章では、平均 0、分散 σ^2 のガウス雑音環境下における直交振幅変調方式の平均 BER の導出を行う。図 B.1 に、変調多値数が M である直交振幅変調 (M-ary QAM) 方式の同相-直交平面における信号点配置を示す。ただし、 $M = 2^{2m}$ であり、 $2m$ は 1 つの信号点当りのビット数である。

ある信号点が、隣接する特定の信号点と誤って判定される (例えば図 B.1 中の信号点 d を信号点 e と誤る) 確率を P_e とすると、各信号点が等確率で発生する仮定の下で

$$\begin{aligned}
 P_e &= \frac{1}{2^{2m}} \int_{\frac{\delta}{2}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \\
 &= \frac{1}{2^{2m}} \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\delta}{2\sqrt{2}\sigma}\right)
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

と表すことができる。ただし、 δ は最短信号点間距離であり、信号点の最大振幅 A を用いて次式で与えられる。

$$\delta = \frac{\sqrt{2}A}{2^m - 1} \tag{B.2}$$

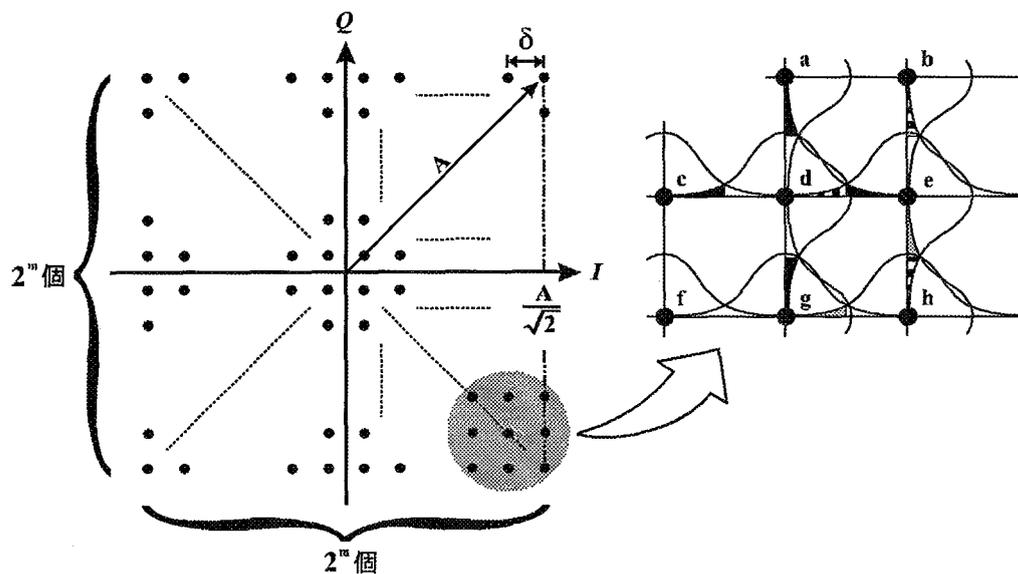


図 B.1 直交振幅変調方式の信号点配置

信号点の振幅が A の場合（例えば図 B.1中の信号点 h），信号点が誤って判定される場合は信号点 e もしくは信号点 g の 2 通りであるから，信号点を誤る確率（SER：Symbol Error Rate）は $2P_e$ で与えられる。

信号点の同相成分もしくは直交成分のいずれか一方の振幅が $A/\sqrt{2}$ の場合（例えば図 B.1中の信号点 e），信号点が誤って判定される場合は信号点 b，信号点 d，信号点 h の 3 通りであるから，SER は $3P_e$ で与えられる。

信号点その他の位置に存在する場合（例えば図 B.1中の信号点 d），信号点が誤って判定される場合は信号点 a，信号点 c，信号点 e，信号点 g の 4 通りであるから，SER は $4P_e$ で与えられる。

従って，各信号点の発生確率が等確率であるとき，M-ary QAM の SER は

$$\begin{aligned}
 \text{SER} &= 4 \cdot 2P_e + 4(2^m - 2) \cdot 3P_e + \{2^{2m} - 4 - 4(2^m - 2)\} \cdot 4P_e \\
 &= \left[\frac{4}{2^{2m}} + \frac{6}{2^{2m}}(2^{2m} - 2) + \frac{2}{2^{2m}}(2^{2m} - 2^{m+2} + 4) \right] \text{erfc} \left(\frac{\delta}{2\sqrt{2}\sigma} \right) \\
 &= \frac{2}{2^m} (2^m - 1) \text{erfc} \left(\frac{\delta}{2\sqrt{2}\sigma} \right) \\
 &= 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \text{erfc} \left(\frac{\delta}{2\sqrt{2}\sigma} \right) \tag{B.3}
 \end{aligned}$$

と導出することができる。さらに，各信号点の符号としてグレイ符号の割り当てを仮定すると，隣接する信号点のビット配列の相違は 1 ビットのみである。ゆえに，ある信号点が隣接する各信号点と誤って判定される場合が各々独立であると仮定した場合，平均 BER は

$$\text{BER} = \frac{1}{2m} \text{SER} = \frac{2}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \text{erfc} \left(\frac{\delta}{2\sqrt{2}\sigma} \right) \tag{B.4}$$

で与えられる。また，平均 CNR γ は

$$\gamma = \frac{(M-1)\delta^2}{12\sigma^2} \tag{B.5}$$

となるので，式 (B.5) を用いて式 (B.4) を書き直すと

$$\text{BER} = \frac{2}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \text{erfc} \sqrt{\frac{3\gamma}{2(M-1)}} \tag{B.6}$$

として， γ に対する平均 BER が得られる。

本論文に関する原著論文

A 学会論文

1. Masataka Imao, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, "Application of adaptive modulation for road-to-vehicle communication system and its improved effect in shadowing duration," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E87-A, no.10, pp.2639-2648, Oct. 2004.
2. 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, "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," 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J88-C, no.12, pp.1082-1095, Dec. 2005.

B 国際会議発表

1. Masataka Imao, Shin Takahashi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, "Shadowing rate considering effect of radio diffraction and traffic flow for road-to-vehicle communication system," Proc. 3rd International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2002), pp.295-299, Seoul, Korea, Nov. 2002.
2. Masataka Imao, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, "Shadowing improvement effect of reflection and diffraction under random traffic flow in road-to-vehicle communication system," Proc. 2003 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2003), vol.2, pp.699-702, Seoul, Korea, Nov. 2003.
3. Masataka Imao, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, "Impact on throughput performance by utilizing diffraction power for road-to-vehicle communication system," Proc. 4th International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2004), pp.165-170, Singapore, Singapore, July 2004.

4. Masataka Imao, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, "Roadside unit arrangement for improving link-blocking performance in road-to-vehicle communication antenna system," Proc. 5th International Workshop on ITS Telecommunications (ITST2005), pp.37-40, Brest, France, June 2005.

C 総合大会発表

1. 今尾勝崇, 高橋 伸, 杉浦泰伸, 塚本勝俊, 小牧省三, 澤 良次, 深江唯正, "路車間通信システムにおける車両トラヒックとシャドウイング発生確率の関係に関する一考察," 電子情報通信学会 2002 年総合大会, A-17-38, March 2002.

D 研究会発表

1. 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, "適応変調方式を用いた電波回折の有効利用によるシャドウイング率と実効伝送速度の改善効果," 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2003-46, MoMuC2003-90, Jan. 2004.
2. 今尾勝崇, 濱田悠司, 塚本勝俊, 小牧省三, "路車間通信システムにおけるシャドウイング低減のための路側アンテナ配置に関する検討," 電子情報通信学会技術研究報告, A-P2004-50, SAT2004-48, MW2004-50, OPE2004-40, July 2004.

E 筆頭外論文発表

1. 濱田悠司, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, 澤 良次, 熊沢宏之, "路車間通信システムにおけるアンテナ配置によるシャドウイング率改善の検討," 電子情報通信学会 2003 年総合大会, A-17-11, March 2003.
2. 濱田悠司, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, "路車間通信と車車間通信の融合によるシャドウイング発生率改善手法の一検討," 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2003-19, Sept. 2003.
3. 梶原 亮, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, "路車間 TCP/IP 通信システムにおける電力差分比較によるシャドウイング判別法に関する一考察," 電子情報通信学会 2004 年総合大会, B-15-37, March 2004.

4. 梶原 亮, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “路車間 TCP/IP 通信システムにおける長期通信遮断推定法の提案とそのスループット改善効果,” 電子情報通信学会技術研究報告, NS2004-50, RCS2004-96, July 2004.
5. Yuji Hamada, Masataka Imao, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, “Non-regenerative millimeter-wave inter-vehicle relay scheme for spot type road-to-vehicle communication system and its improvement effect in communication outage rate,” Proc. 7th Topical Symposium on Millimeter Waves (TSMMW2005), pp.45-48, Seoul, Korea, Feb. 2005.
6. Naoya Yosoku, Masataka Imao, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, “Discriminating method between cell boundary and shadowing by utilizing DS/SS ranging scheme for millimeter-wave road-to-vehicle communication system,” Proc. 7th Topical Symposium on Millimeter Waves (TSMMW2005), pp.49-52, Seoul, Korea, Feb. 2005.
7. 牛谷善哉, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “車車間・路車間融合通信システムにおける大型車中継によるリンクブロッキング率の改善効果,” 電子情報通信学会 2005 年総合大会, A-17-6, March 2005.
8. 東野武史, 蓑田佑紀, 今尾勝崇, 村越昭彦, ルンホンハイ, 塚本勝俊, 小牧省三, “ブロードバンドユビキタスのためのソフトウェア無線ネットワークと電波エージェント,” 第7回 YRP 移動体通信産学官交流シンポジウムプロシーディングス, pp.152-153, June 2005.
9. 牛谷善哉, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “大型車両を基点とした車車間通信と路車間通信の融合による通信エリア拡張に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2005-51, July 2005.
10. Ryo Kajiwara, Masataka Imao, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki, “Estimation method of shadowing and its throughput improvement effect in road-to-vehicle TCP/IP communication system,” Proc. 2nd Asia Pacific Wireless Communication Symposium (APWCS2005), pp.265-269, Sapporo, Japan, Aug. 2005.

11. 篠原敬英, 松井真奈美, 今尾勝崇, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “異種無線アドホックネットワークにおける受信成功率に関する基礎的検討,” 電子情報通信学会 2006 年総合大会, B-15-11, March 2006.
12. 牛谷善哉, 今尾勝崇, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “大型車両を基点とした車車間・路車間融合通信システムにおけるリンクブロッキング率の改善効果に関する検討,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.89, no.6, June 2006 (採録決定).

今尾 勝崇 1978年9月5日大阪府に生まれる。2002年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業，2003年大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士前期課程修了。現在大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士後期課程3年。高度道路交通システムを対象とする無線通信ネットワークに関する研究に従事。電子情報通信学会学生員。IEEE学生員。

