

適応 DS/FH-CDMA 方式と簡易適応電力制御を用いた 車々間通信システム

小林 真史[†] 藤井 威生[†] 神谷 幸宏[†] 鈴木 康夫[†]

[†]東京農工大学 工学部 電気電子工学科 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

E-mail: [†] m-koba@cc.tuat.ac.jp

あらまし 近年、交通事故、渋滞などの問題の解決を目的として ITS の研究が盛んに行われおり、その中の一つに車々間通信がある。車々間通信においては各車両同士が周期的に速度、加速度、位置等の情報を通信することで、ドライバーの運転を支援することが望まれる。現在の研究では、測距と通信が同時に可能な DS/CDMA 方式が提案されているが、各車両は自律分散的に通信を行ない、集中的に通信を制御する管理局がないため遠近問題が避けて通れない課題となる。そこで、本研究では距離に応じて、チップレート、拡散方式、送信電力を自律分散的に変えることで遠近問題の影響を軽減する適応 DS/FH-CDMA 方式と簡易適応電力制御を提案し、計算機シミュレーションにより DS-CDMA 方式との比較から、その有効性を確認した。

キーワード ITS、車々間通信、遠近問題、適応 DS/FH-CDMA 方式、簡易適応電力制御

Vehicle to Vehicle Communication Systems using Adaptive DS/FH-CDMA and Simple Adaptive Power Control

Masashi KOBAYASHI[†] Takeo FUJII[†] Yukihiro KAMIYA[†] Yasuo SUZUKI[†]

[†] Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo University of Agriculture & Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

E-mail: [†] m-koba@cc.tuat.ac.jp

Abstract In recent years, ITS has attracted attention for solution of traffic problems, such as traffic accidents and traffic congestion and so on. Among many systems for ITS, Vehicle to Vehicle Communication Systems using Boomerang System which can perform communication and ranging simultaneously have been proposed. However, since these systems use DS-CDMA system, near-far problem occurs. In this paper, in order to solve near-far problem, Adaptive DS/FH-CDMA system and Simple Adaptive Power Control are proposed. The effectiveness of the proposed system is evaluated by the computer simulation and the performance is compared with the DS-CDMA system.

Keyword ITS, Vehicle to Vehicle Communication, near-far problem, Adaptive DS/FH-CDMA, Simple Adaptive Power Control

1. はじめに

近年、交通事故、渋滞などの問題解決を目的とした ITS (Intelligent Transport Systems) の研究が盛んに行われており、その中の一つに車々間通信がある。車々間通信において、安全で効率的な運行を行うために、周囲の車両の状況の把握と周辺の車両との情報交換が望まれる。従来の研究として、車々間の距離測定時の信号に相手の情報を乗算することで、1 つの信号波のみで測距と通信を同時に行う、ブーメラン方式が提案されている[1]。

ブーメラン方式では、スペクトル拡散方式 (Spread Spectrum: SS 方式) の一つである DS (Direct Sequence) 方式が通常用いられている。各車両が自律分散的に通信を行う車々間通信では、集中的に通信を制御する管理局がないため、ブーメラン方式では遠近問題が避けて通ることができない課題となる。この解決法として、遠近問題に強いとされる FH (Frequency Hopping) 方式の利用が提案されている[2]。しかし、所望の距離分解能をもつ測距を行うには高速な周波数シンセサイザが必要となり、実用的ではない。他にも、FH 方式の効

果で遠近問題に強く、DS方式の効果で一定の距離分解能を得ることができる DS/FH ハイブリッド方式が提案されている[3]が、測距における距離分解能の低下が近い車両に対して問題となることが予想される。

そこで本稿では2段階構成のプーマラン方式を用いて、拡散方式(DS/FH)と送信電力の適応制御を行う適応 DS/FH-CDMA方式と簡易適応電力制御の複合システムを提案する。まず第1段階のプーマラン方式では、各車両が用いるPN符号とホッピングパターンおよび車両間の距離を知るために一定の周期で通信を行う。次に、第2段階のプーマラン方式では、第1段階で得た各車両間の距離に応じて、近い車両に対しては帯域を十分に広く用いたDS-CDMA方式を、遠い車両に対しては簡易適応電力制御を用いて送信電力を大きく、同時に占有する帯域の狭いDS/FH-CDMA方式を用いて常時通信を行う。ここで簡易適応電力制御とは、通信する車両間の距離に応じて、離散的に電力を操作するものである。この際用いるPN符号、ホッピングパターンは、第1段階で得た各車両のものを用いる。この操作を行うことで、近い車両に対しては距離分解能を向上させることが可能となり、遠い車両に対しては距離分解能が低下するものの、FH方式の特性に加えて、簡易適応電力制御を用いるため遠近問題の影響を改善することができる。計算機シミュレーションにより、簡易適応電力制御を用いた適応 DS/FH-CDMA方式の提案複合システムを、簡易適応電力制御を用いないDS-CDMA方式と簡易適応電力制御を用いたDS-CDMA方式との比較から、有効性を確認した。

2. 適応 DS/FH-CDMA方式と簡易適応電力制御

本節では、DS方式、FH方式、適応 DS/FH-CDMA方式、簡易適応電力制御について説明する。各方式のスペクトルを図1に示す。

DS方式は、情報信号に拡散符号を乗算(SS変調)し、スペクトルを広げて送信する方式である。この方式では、同一周波数帯を利用して遠い車両と通信を行おうとした場合に、距離の近い車両から電力の大きな信号を受信すると大きな干渉を受け、遠い車両の信号が受信できないという遠近問題が発生する。一方、FH方式は定められた順序に従って時間的に周波数を切り換えていく方式である。この方式では周波数が重ならない限り干渉とならないため、遠近問題に強い方式とされているが、精度の高い測距が困難であるという短所をもつ。

本稿で提案する適応 DS/FH-CDMA方式は、通信する車両間の距離に応じて用いるチップレート、拡散方式等を自律分散的に変えることで、近い車両に対しては距離分解能を向上させることができ、遠い車両に対しては、距離分解能は低下するものの確実な通信が可

能となる。

しかし、単にDS/FHの比率を変えるだけでは問題が残る。なぜなら、図1(c)に示す適応 DS/FH-CDMA方式における複数信号が同時に送信されている例のように、受信車両が遠い車両とFH方式で通信しているときに、隣接車両が最も近い車両のDS方式の信号を送信すると、その信号は全ての周波数帯域を用いるため大きな干渉となるからである。そのため、遠い車両の信号を受信できるように簡易適応電力制御を併用する。これは、通信する車両との距離に応じて送信電力を離散的に操作するもので、通信する車両との距離が遠くなる程、送信電力を大きくするものである。つまり、遠い車両は簡易電力制御とFH方式の特性を強くもたせたDS/FH-CDMA方式を用いたことで、遠近問題の影響を改善することが可能となる。

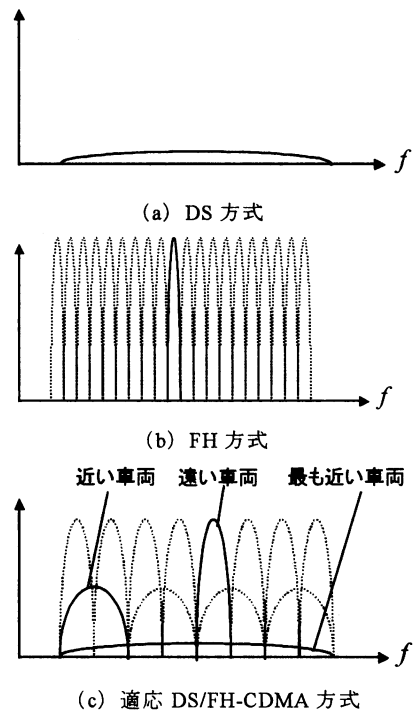


図1 各方式のスペクトルの様子

3. プーマラン方式

適応 DS/FH-CDMA方式は、距離に応じてチップレート、拡散方式、電力等、様々なパラメータを変えるため、何らかの方法で情報を送信する前に車両間距離を知る必要がある。本稿では文献[4]を参考として、2段階構成の改良型プーマラン方式を用いている。本節ではまず従来型のプーマラン方式を説明し、次に改良型プーマラン方式を説明する。

3.1. 従来型プーマラン方式

従来型プーマラン方式の概念図を図2に示す。従来型プーマラン方式ではまず、A車が所有するPN符号(PN_A)をB車に送信する。これを要求信号と呼ぶこととする。B車はA車から送られたPN_Aに自車の位置、速度等の情報(DATA_B)を乗算(SS変調)し、A車に返信する。これを応答信号と呼ぶこととする。A車は応答信号から自車の持つPN_Aで逆拡散(SS復調)し、DATA_Bを取り出すのと同時に、PN_Aの位相差からAB間の距離を測定する。

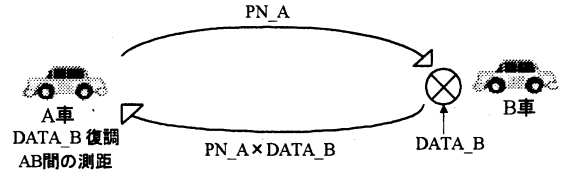


図2 従来型プーマラン方式

3.2. 改良型プーマラン方式

本稿で用いる2段階構成の改良型プーマラン方式は、第1段階で距離を計測し、第2段階で位置や速度等の情報を通信する。そのため、第1段階と第2段階では通信する目的が異なる。ただし、第1段階と第2段階で用いる周波数帯は別の帯域を用いるものとして、互いの干渉は考慮しないものとする。

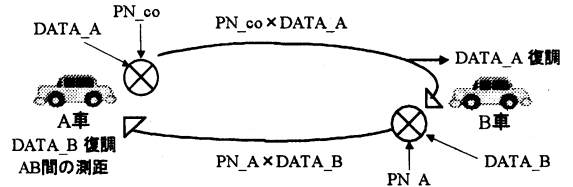
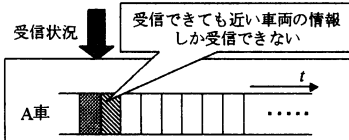
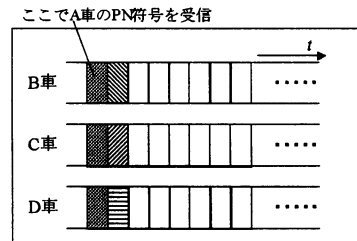


図3 第1段階で用いる改良型プーマラン方式

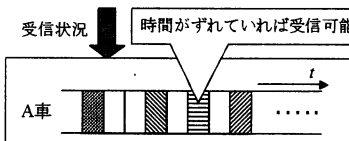
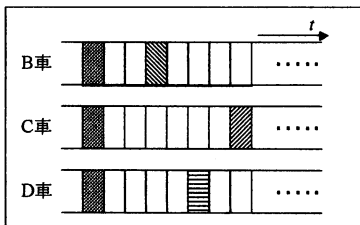
3.2.1. 第1段階

第1段階で用いる改良型プーマラン方式の概念図を図3に示す。第1段階ではA車が所有するPN_Aの情報をDATA_Aに組み入れ、全ての車両が共通に使用するPN符号(PN_co)を乗算(SS変調)し拡散して送信する。ただし、DATA_Aに組み入れるPN符号の情報は各PN符号に対応したインデックスナンバーを用いるとする。また、すべての車両はインデックスナンバーに対応したPN符号との関係がわかる対応表を持つものとする。A車の要求信号は全ての車両が共通してもつPN_coであるためB車において逆拡散(SS復調)が可能となり、DATA_Aに組み入れたインデックスナンバーからA車のもつPN_Aを判別する。B車は自車が用いるPN符号(PN_B)、ホッピングパターン(Hop_B)と返信に要した時間を組み入れた情報(DATA_B)をA車が用いるPN_Aに乗算(SS変調)させ、A車に返信する。A車は応答信号からPN_Aを用いて、DATA_Bを取り出すのと同時に、PN_Aの位相差とDATA_Bに含まれる遅延時間からAB間の距離を測定する。同様の操作をB車以外の他の車両に対して行うことで、周囲にいる他の車両のPN符号とホッピングパターン、車間距離が分かる。

ここで問題点として、A車の要求信号がB車以外の車両にも届くため、B車がA車に向けて返信している間に、B車以外の車両の応答信号がほぼ同時にA車に到来することも考えられる。さらに、DS-CDMA方式を用いていることから遠近問題の影響を大きく受け、近い車両のみの信号しか受信できなくなってしまう問題が生じる(図4(a))。そこで、第1段階ではA車からの信号を各車両が受信したときに、ランダムに時間差をつけて返信することにする(つまり、A車はそれ



(a) 受信後すぐ返信する場合



(b) 時間差をつけて返信する場合

図4 第1段階における問題点

が終わるまで次の通信を待つことになる)。すると、近い車両からの要求信号があっても、時間がずれていれば遠い車両からの応答信号があった場合でも受信可能となる(図4(b))。また、測距を行う場合には返信する遅延情報の中にこの時間差を入れておけば問題ない。

3.2.2. 第2段階

第2段階で用いる改良型ブーメラン方式の概念図を図5に示す。第2段階ではA車は第1段階で得たPN_BとHop_Bを、A車の位置、速度、第1段階で計測したAB間の距離等の情報(DATA_A)と乗算(SS変調)させ、B車に送信する。このときの帯域ホップ数、送信電力のパラメータはAB間の車間距離に応じて決定する。B車は自身のPN_BとHop_Bを用いて逆拡散(SS復調)し、DATA_Aを得る。DATA_AからB車はA車の情報とAB間の距離がわかる。B車は自身のPN_Bに自車の位置、速度等の情報(DATA_B)を乗算(SS変調)し、A車に返信する。A車は第1段階で得たPN_BとHop_Bを用いて逆拡散(SS復調)し、B車の情報を得る。また、第2段階においても、PN_Bを用いて測距を行う。

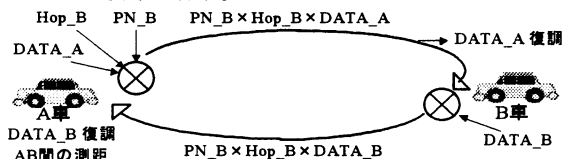


図5 第2段階で用いる改良型ブーメラン方式

3.2.3. 第1段階、第2段階の通信の様子

第1段階では、各車両との車間距離、PN符号とホッピングパターンを知るため、一定の周期で十分帯域の広いDS-CDMA方式を用いて通信を行う。DS-CDMA方式で用いるPN符号には各車両に対して適切な符号が割り振られている。また、各PN符号はインデックスナンバーが割り振られており、情報量は少ないものとしている。そのため、第1段階では、通信する情報がPN符号とホッピングパターンのみであり、通信する時間が短くなるので、3.2.1項で説明したようなA車からの信号をB車が受信した後、B車はランダムな時間差をつけて返信することで遠近問題の影響を改善することが可能となる。

第2段階では、位置、速度、加速度等の情報を扱うため、第1段階で扱う情報量より大きく、第1段階で用いた方法では遠近問題の影響を改善することはできない。そのため、各車両間の距離に応じて、2節で説明した適応DS/FH-CDMA方式と簡易適応電力制御の複合システムを用いる。複合システムを用いることで、第1段階に比べ短い周期で常時通信が可能となる。しかし、第2段階のみで通信を続けた場合には新たに近づいてくる車両の認識が困難となる。そこで、本提案システムでは第2段階よりも大きい周期で第1段階の packets を送信することで、新しく近づいてくる車両の認識を行うこととする。

4. 制御条件の決定法

ここでは、第2段階で用いる適応DS/FH-CDMA方式と簡易適応電力制御、通信車両の台数の制限に関する制御条件の決定法について説明する。

適応DS/FH-CDMA方式では第1段階で得た車両間の距離が、0~20m、20~40m、40~100mでチップレート、拡散方式等異なるパラメータを用いる。そのときのスペクトルの様子を図6に示す。図6に示すように車間距離が0~20mの範囲内では距離分解能を細かくするために十分帯域を広げたDS-CDMA方式を、40~100mの範囲内では距離分解能を低下させ、周波数帯域を狭くすることでホッピングする帯域数を増やしたDS/FH-CDMA方式を、20~40mではその中間のパラメータのDS/FH-CDMA方式を用いている。ここでの帯域数とは、定められた順序に従って時間的に切り換えていく周波数の数である。

簡易適応電力制御の送信電力の決定は、第1段階で得た車両間の距離、0~20m、20~40m、40~60m、60~80m、80~100mで遠い車両になる程電力を離散的に大きくする。このような操作は、移動体通信の基地局、端末間で用いられる送信電力制御と異なり、信号電力の測定等複雑な操作を必要としないため本稿で想定するような分散システムでは有効である。

通信車両台数の制限については、第1段階で計測した複数台の車両の中から本稿では距離の短い3台を選び、第2段階ではその3台のみと通信することとしている。これにより、車両混雑時の大幅な通信トラフィック増大を回避することが可能となる。

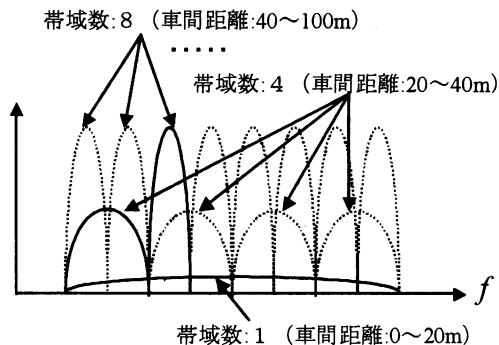


図6 適応DS/FH-CDMA方式のスペクトルの様子

5. シミュレーション

5.1. 第1段階

5.1.1. シミュレーション諸元

提案方式の有効性を検証するために、まず、提案方式の第1段階における特性を計算機シミュレーションにより評価する。第1段階のシミュレーション諸元を表1に示す。

第1段階で用いる拡散方式は、各車両との距離を知るために距離分解能を1mとしたチップレート150 (Mchips/s) のDS-CDMA方式を用いる。PN符号については3.2.3項で説明したように、各車両に対して適切な符号が割り振られているものとし、各PN符号はインデックスナンバーが割り振られ、50(bits)の packets 長で十分な長さであるものとする。送信電力は各車両一定とし、通信可能範囲100m内で干渉が無い場合は完全に通信できるものとする。また、第1段階と第2段階は別の帯域を用いるものとしてお互いの干渉は考慮しない。

応答信号に関しては、DS-CDMA方式を用いており遠近問題の影響を大きく受けてしまうため、3節で説明したように各車両は返信の際ランダムな時間差をつけて返信するものとする。本シミュレーションでは、このような操作によって遠近問題の影響をどの程度改善できるかどうかを確認する。ここでは、各車両がフレーム長を仮定し、各フレーム内に要求信号を1 packet 送信したとき(図7)の応答信号の平均 packet 成功率を求める。ただし、各車両におけるフレーム内の送信タイミングはランダムとする。本稿では、フレーム長を10 packet、30 packet、120 packet とする。

表1 第1段階におけるシミュレーション諸元

拡散方式	DS-CDMA
拡散符号	255chips M 系列
packet 長(bits)	50
データレート(kbps)	588.24
チップレート(Mchips/s)	150
距離分解能(m)	1

5.1.2. シミュレーションモデル

シミュレーションモデルを図8に示す。ここでは、2車線の直線道路の中心の車両から前後120mにランダムに6台(前:3台、後:3台)、12台(前:6台、後:6台)の車両と中心の車両を加えた計7台、13台の車両を配車し、それぞれの場合の特性を検討する。各々の車線はそれぞれ3.5mの幅をもち、最低車間距離は5mとする。信号の電力は距離の2乗に従って減衰し、雑音や路面反射波、フェージングの影響はないものとする。各車両は前後180°のセクタアンテナを用い、信号要求は自車より前の車両に行う。伝搬遅延

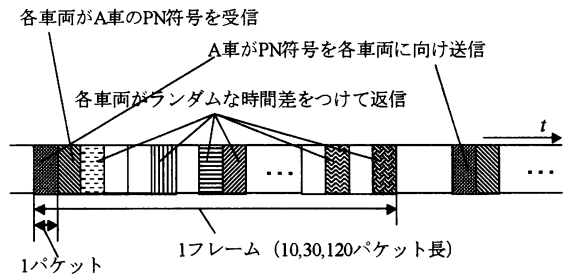


図7 A車の受信状況の様子

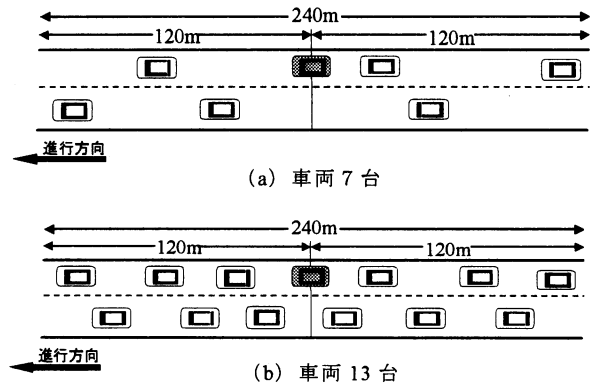


図8 シミュレーションモデル

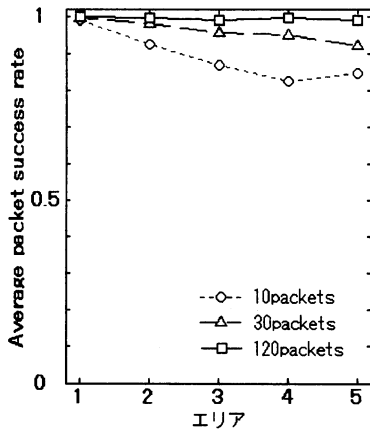
については、今回のシステムが非同期CDMAを考えているため、その影響は少ないと考え、シミュレーションの簡略化のため考慮していない。

車両同士が自律分散的に通信する中で、中心の車両の受信状況から特性を判定する。

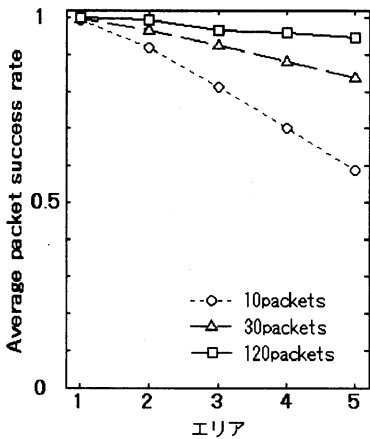
5.1.3. シミュレーション結果

図9(a)、(b)に、車両7台、13台の場合の受信車両における平均 packet 成功率を示す。横軸は、記述を簡略化するために受信車両から0~100mの距離を20m毎に区切った領域に分け、0~20mをエリア1、20~40mをエリア2、40~60mをエリア3、60~80mをエリア4、80~100mをエリア5と割り振っており、各エリアにいる車両の平均 packet 成功率を示している。

シミュレーションの結果、車両7台、13台いずれの場合も遠近問題の影響により受信車両との距離が遠くなる程、平均 packet 成功率が劣化している。しかし、車両7台、13台いずれの場合も平均 packet 成功率がフレーム長10、30 packetの場合に比べ120 packetの場合が一番特性が良好であり、遠近問題の影響を軽減していることが確認できる。



(a) 車両 7 台



(b) 車両 13 台

図 9 第 1 段階終了後の平均パケット成功率特性

5.2. 第 2 段階

5.2.1. シミュレーション諸元

第 2 段階では、第 1 段階でパケット成功率の特性が一番良好であった 120 パケットに 1 回パケットを送信したときの特性を用い、DS-CDMA 方式との比較から提案方式の有効性を検証するために、以下のシミュレーションを行った。第 2 段階のシミュレーション諸元を表 2 に示す。

DS-CDMA 方式では 0~100m で同一のパラメータを用いているが、適応 DS/FH-CDMA 方式では表 2 に示すようにエリアによって異なるパラメータを用いる。

チップレートは、DS-CDMA 方式では距離分解能を 1m とするため 150Mchips/s を用いた。適応 DS/FH-CDMA 方式では送受信間の距離が 0~20m の範囲では距離分解能 1m とした DS-CDMA 方式を、20~40m の範囲では距離分解能 4m、40~100m に関しては距離分解能

表 2 第 2 段階におけるシミュレーション諸元

拡散方式	DS-CDMA方式		適応DS/FH-CDMA方式		
	エリア	1~5	1	2	3~5
車間距離(m)		0~100m	0~20m	20~40m	40~100m
拡散符号		255chips M系列	255chips M系列	63chips M系列	31chips M系列
データレート(kbps)		588.24	588.24	595.24	604.84
チップレート(Mchips/s)		150	150	37.5	18.75
パケット長(bit)		255	255	255	255
距離分解能(m)		1	1	4	8
帯域数		1	1	4	8
ホッピングレート(khop/s)				595.24	604.84
ホッピング系列				ランダム	ランダム

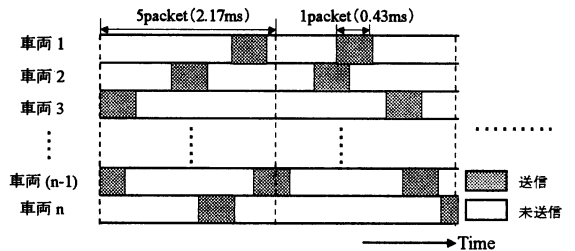


図 10 各車両の送信の様子

8m と徐々に低下させ、チップレートもそれぞれ 37.5Mchips/s、18.75Mchips/s と小さくした DS/FH-CDMA 方式を用いる。

適応 DS/FH-CDMA 方式は、FH 方式の要素を含んでいることから誤り訂正符号を用いることが必要であると考えられる。そのため、誤り訂正符号として(255,107,45) BCH 符号[5]を用いた。これは、107 ビットの情報ビットに 148 ビットの冗長ビットを加えた 255 ビットの内、22 ビットまで誤り訂正できる符号である。

1 パケットを送る送信時間は約 0.43ms であり、本稿では遠近問題の影響を軽減する様子を見るため、図 10 に示すように 5 パケット分の時間である 2.17ms に 1 回、ランダムにパケットを各車両が送信するものとする。また、通信車両台数の制限については、4 節で述べたように第 1 段階で計測したときに自車から近い車両 3 台のみと通信することにする。

送信電力の決定は、第 1 段階で得た距離に応じて簡易適応電力制御を行う。表 3 では、エリア 1 (0~20m) に存在する車両の送信電力を 1 としたときの各エリアの車両の送信電力比を表す。本シミュレーションでは簡易適応電力制御を用いない等電力の DS-CDMA 方式と簡易適応電力制御を行った DS-CDMA、適応 DS/FH-CDMA 方式の計 3 パターン行う。

表3 各エリアに存在する車両の送信電力

エリア1	エリア2	エリア3	エリア4	エリア5
0~20m	20~40m	40~60m	60~80m	80~100m
1	4	8	12	16

5.2.2. シミュレーションモデル

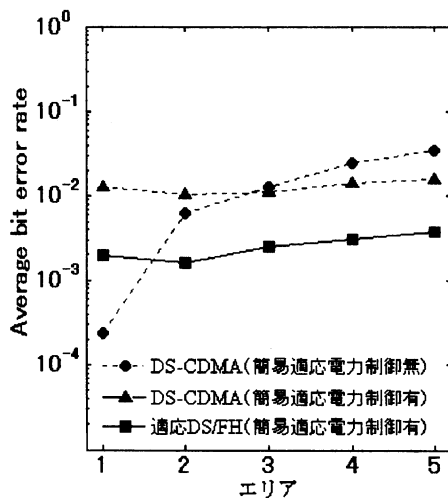
シミュレーションモデルは 5.1.2 項同様であり、車両7台、13台の車両を配車し、車両同士が自律分散的に通信する中で、中心の車両の受信状況から特性を判定する。

5.2.3. シミュレーション結果

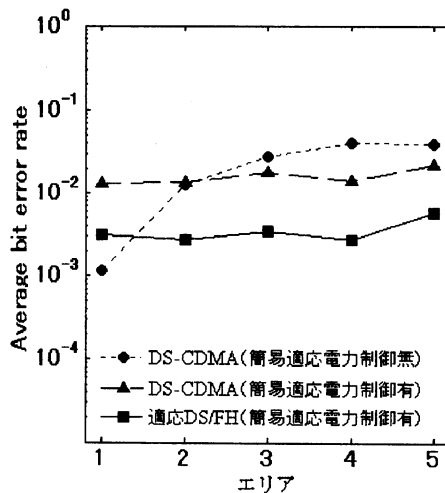
図11(a),(b)では、車両7台、13台のときの中心の車両における平均ビット誤り率特性を表している。簡易適応電力制御を行わないDS-CDMA方式は送信車両との距離が遠くなるにつれ、遠近問題の影響を受け特性が劣化している。逆に、簡易適応電力制御を行ったDS-CDMA、適応DS/FH-CDMA方式は簡易適応電力制御を行わないものに比べ、近い車両との平均ビット誤り率特性は劣化するものの、遠い車両との平均ビット誤り率特性は劣化していない。これは、簡易適応電力制御を行ったことで遠い車両の信号を受信できるようになったためといえる。簡易適応電力制御を行ったDS-CDMA方式と適応DS/FH-CDMA方式を比較した場合、どのエリアにおいてもDS-CDMA方式より適応DS/FH-CDMA方式を用いた方が車両7台、13台共に平均ビット誤り率が低下している。これは簡易適応電力制御を行った上で、全ての車両がDS方式を用いるより、遠い車両に対してはDS/FH方式を用いたことで、近い車両、遠い車両に対して共に干渉を低減できたといえる。

次に、平均パケット成功率を図12(a),(b)に示す。その結果、提案方式の平均パケット成功率は車両7台、13台共に、どのエリアにおいても90%以上の高い値を示している。また、図12では、図11の平均ビット誤り率特性同様に、遠いエリアにおいて簡易適応電力制御を行っていないDS-CDMA方式より簡易適応電力制御を行ったものが良好であることがここでも示されており、車両13台の場合のエリア5においては簡易適応電力制御を用いた適応DS/FH-CDMA方式を用いたことで、平均パケット成功率を約25%向上させることが可能であることが確認できた。また、簡易適応電力制御を行ったDS-CDMA方式と適応DS/FH-CDMA方式を比較した場合、適応DS/FH-CDMA方式を利用することで車両13台ではどのエリアでも平均パケット成功率が約10%弱向上していることが確認できるが、各エリアに存在する車両の送信電力の操作を最適化することでさらに特性の良い結果が出る可能性もある。図11、12において車両7台から13台に増加させても、

平均ビット誤り率、平均パケット成功率共に大きく劣化していないことがわかる。これは、車両3台の通信に制限して通信を行うことで、車両増加に対する特性の劣化を抑えているためと考えられる。

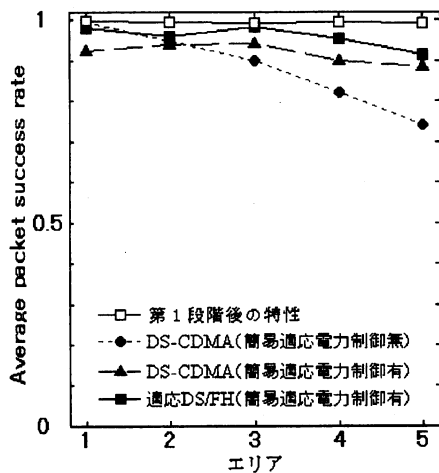


(a) 車両7台

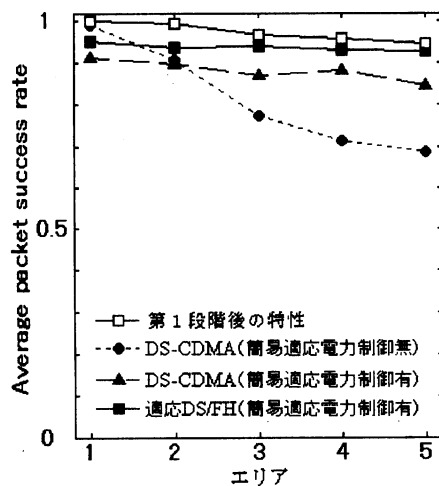


(b) 車両13台

図11 平均ビット誤り率特性



(a) 車両 7 台



(b) 車両 13 台

図 12 平均パケット成功率

6. まとめ

本稿では車々間通信システムに、遠近問題の解消、距離分解能の低下を抑えた適応 DS/FH-CDMA 方式と簡易適応電力制御の複合システムを提案した。この提案方式を用いることで DS-CDMA 方式を用いることで起きる遠近問題の解消と、DS/FH-CDMA 方式を用いることで起きる近い車両に対しての距離分解能の低下を抑えることが可能となる。シミュレーションの結果、簡易適応電力制御を行わない DS-CDMA 方式に比べ提案方式は、近い車両との通信の特性が若干劣化するものの、遠い車両との通信のパケット成功率を向上させることが可能であることを確認した。さらに、車両 13 台と多い場合においても、パケット成功率は 90% 以上の高い値を示すことが確認できた。

文献

- [1] 水井 繁, 内田 雅敏, 中川 正雄, “スペクトル拡散方式を用いた車々間通信・測距統合システム,” 信学論, vol. 78-B-II, no. 5, pp. 342-349, May 1995.
- [2] 水井 繁, “FH/SS 方式を用いた車々間通信・測距統合システム,” 信学技報, ITS-2001-23, pp. 37-42, Sept. 2001.
- [3] 上田 篤, 水井 繁, 井原 俊夫, “DS/FH ハイブリッド SS 方式を用いた車々間通信・測距統合システム,” 信学技報, ITS-2003-9, pp. 1-4, July 2003.
- [4] 水井 繁, “スペクトル拡散方式を用いた車々間通信・測距統合システムの双方向通信化への改良,” 信学技報, ITS-2002-7, pp. 37-42, May 2002.
- [5] 今井 秀樹, “符号理論,” pp. 153-155, (社) 電子情報通信学会, 1990.