

研究番号 甲第 4786 号

セルラ移動通信システムにおける
CDMA パケット通信に関する研究

森 香津夫

セルラ移動通信システムにおける CDMA パケット通信に関する研究

森 香津夫

2000 年 1 月 11 日

名古屋大学図書



11315855

目次

1 序論	1
1.1 移動通信の動向	1
1.2 セルラ移動通信システムにおける CDMA パケット通信の問題点と課題	7
1.3 研究の目的	10
1.3.1 セルラ移動パケット通信の理想像 (あるべき姿)	10
1.3.2 本論文の目的	11
1.4 本論文の構成	12
参考文献	15
2 CDMA 方式の用いたセルラ移動通信システム	20
2.1 はじめに	20
2.2 セルラ方式	20
2.2.1 セル構成	21
2.2.2 チャネル割当て	21
2.3 符号分割多元接続 (CDMA) 方式	22
2.3.1 多元接続方式の特徴	22
2.3.2 スペクトル拡散変調方式	23
2.3.3 CDMA 方式のビット誤り率	24
2.3.4 CDMA セルラ方式	29
2.3.5 送信電力制御	31
2.3.6 CDMA セルラシステムのチャネル容量	33
2.4 まとめ	36
参考文献	37
3 無線パケット通信における制御方式	39
3.1 はじめに	39

3.2	回線交換方式とパケット交換方式	39
3.2.1	回線交換方式	39
3.2.2	パケット交換方式	40
3.3	チャンネルアクセス制御方式	40
3.3.1	ALOHA 方式	41
3.3.2	PRMA 方式	45
3.3.3	送信許可確率制御	47
3.3.4	実際の無線チャンネルにおける性能	48
3.4	CDMA セルラパケットシステムでの送信電力制御	50
3.5	まとめ	51
	参考文献	53
4	CDMA セルラパケット通信におけるチャンネル負荷適応型送信制御	55
4.1	はじめに	55
4.2	従来型送信電力制御の問題点	57
4.3	適応送信制御	58
4.3.1	適応送信電力制御 (ATPC)	58
4.3.2	適応拡散利得制御 (APGC)	61
4.4	システムモデル	63
4.4.1	前提条件	63
4.4.2	DS/CDMA チャンネルモデル	64
4.4.3	トラヒックモデル	66
4.5	性能評価	67
4.5.1	評価パラメータ	67
4.5.2	評価項目	68
4.5.3	変曲点 R_{ip} の最適化	70
4.5.4	基本特性評価	70
4.5.5	ショートメッセージ伝送特性	77
4.6	まとめ	86
	参考文献	87
5	CDMA セルラパケット通信におけるサービス公平性の維持	91
5.1	はじめに	91
5.2	システムモデル	92

5.2.1	サイトダイバーシチ受信	93
5.3	サイトダイバーシチ適用時の伝送特性評価	93
5.3.1	評価項目	94
5.3.2	伝送特性	95
5.4	パイロット信号受信電力差基準送信制御	96
5.4.1	パイロット信号受信電力差の測定	97
5.4.2	送信電力制御 (TPCF)	97
5.4.3	送信許可確率制御 (PPCF)	99
5.5	性能評価	100
5.5.1	送信電力制御時の特性	100
5.5.2	送信許可確率制御時の特性	104
5.6	性能比較	108
5.7	まとめ	109
	参考文献	110
6	公平性維持可能な送信許可確率制御における性能改善	112
6.1	はじめに	112
6.2	従来の送信許可確率制御法の問題点	113
6.3	適応送信許可確率制御	113
6.3.1	パケット受信率の推定	114
6.3.2	パケット受信率における誤差の最小化	115
6.4	システムモデル	116
6.4.1	トラヒックモデル	116
6.5	特性評価	116
6.5.1	サービス公平性	117
6.5.2	スループット特性	119
6.5.3	チャンネル負荷変動の影響	120
6.6	まとめ	122
	参考文献	124
7	音声 / データ統合 CDMA パケット通信における送信許可確率制御	126
7.1	はじめに	126
7.2	CDMA/PRMA アクセス方式	127
7.2.1	チャンネル構成とアクセスプロトコル	128

7.2.2	CDMA/PRMA アクセス方式の問題点	128
7.3	システムモデル	129
7.3.1	DS/CDMA チャンネルモデル	130
7.3.2	移動局 (MS) モデル	132
7.4	音声システムのマルコフ解析	133
7.4.1	定常状態解析	133
7.4.2	パケット廃棄率の導出	135
7.5	送信許可確率適応制御	138
7.5.1	end-of-use フラグの導入	138
7.5.2	送信許可確率適応制御の詳細	138
7.6	性能評価	143
7.6.1	評価パラメータ	143
7.6.2	評価項目	144
7.6.3	比較対象	144
7.7	評価結果	145
7.7.1	単一セル環境	145
7.7.2	セルラ環境	151
7.8	まとめ	154
	参考文献	155
8	総括	158
8.1	本研究のまとめ	158
8.2	今後の課題, 展開	160
	謝辞	162
	業績一覧	163

第 1 章

序論

1.1 移動通信の動向

1979 年，世界に先駆けてセルラ方式の自動車電話 (アナログ方式) サービスが，我が国で開始されてから本年度 20 年，この間の移動通信サービスは急速な発展を成し遂げている。移動通信サービスを代表する自動車・携帯電話 (以後，携帯電話と呼ぶ)，PHS (Personal Handy-phone System) や無線呼出の需要がここ数年間で爆発的な伸びを示している (図 1.1)。郵政省の発表によると，我が国の 1999 年 10 月末時点での上記の 3 サービスを合わせた加入者数は 5,523 万で，携帯電話の対前年同月増加率は約 25% である。この対前年同月増加率は 1996 年の驚異的な 135% をピークに減少に転じているが，依然高い伸びを示しており，今後も加入者は増加するものと考えられる [1]–[3]。また，世界各国の移動通信サービスの普及率を見てみると，1999 年 3 月末時点で北歐 3 カ国 (フィンランド，スウェーデン，ノルウェー) の 50% 以上を筆頭に，香港，イタリア，オーストラリア，シンガポールなどが 25% 以上，アメリカ，イギリス，フランスなどが 20% 以上となっている (我が国は約 32%) [4]。この普及率は現在も増加の傾向を示しており，移動通信は地球規模で不可欠な存在になりつつある。

移動通信システムの現状

我が国において商用化あるいは研究開発が進められている移動通信システムを，情報伝送速度と移動局の移動速度 (或はカバー範囲) で棲み分けを行なうと図 1.2 に示すようにマッピングされる [5]。図中のシステムの多くが，サービスエリア内に複数の基地局を配置し，移動局は最寄りの基地局からサービスを受けるセルラ方式を採用している。

現在，商用化サービスの中心である PDC (Personal Digital Cellular telecommunication system) [6] や PHS [7] などのデジタル方式の携帯電話システムは，第二世

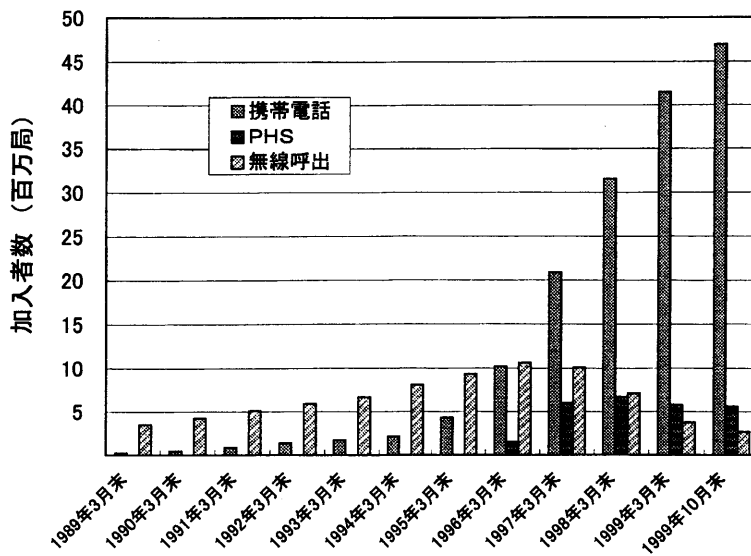


図 1.1: 移動通信サービスの加入者数の推移

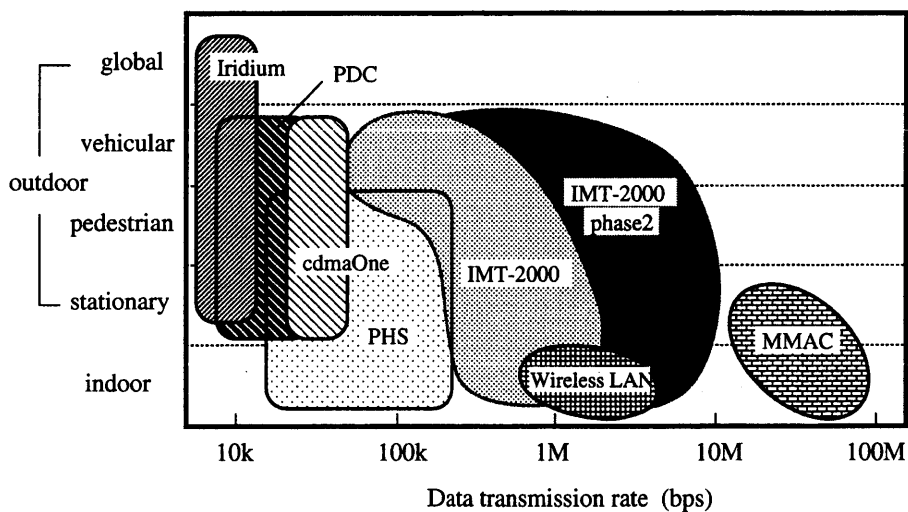


図 1.2: 移動通信システムの棲み分け

代方式 (アナログ方式の携帯電話システムを第一世代方式) と呼ばれ、PDC は静止から高速移動の移動局に対して最大 28.8kbps の情報伝送速度のサービスを提供している。1998 年 7 月よりサービスが開始されている cdmaOne[8] も、PDC とほぼ同様のサービスを提供している。PHS は、PDC に比べ情報伝送速度で高速サービス (最大 64kbps) の提供を可能とするが、移動局の移動速度が制限され低速移動 (歩行程度) までの移動局がサービスの対象となっている。さらに、移動速度を制限して静止あるいは準静止の端末を対象としたシステムとして、屋内系の無線 LAN (Local Area Net-

work) [9] などがある。無線 LAN システムの情報伝送速度は、10Mbps から 100Mbps 程度である。このように、現在商用サービスが提供されている移動通信システムの提供するサービスは、低速情報伝送・高速移動あるいは高速情報伝送・静止に 2 極化される。

ところで、移動通信需要の増大による周波数資源のひっ迫は、各国とも厳しいが、とりわけ我が国は特に厳しい状況にある。また、移動通信需要の多様化に対応するために、マルチメディア通信や世界規模でのローミングなどが提供できるシステムが望まれており、次世代 (第三世代) の携帯電話システム IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000) の標準化・実用化が精力的に行なわれている。IMT-2000 の標準化は、ITU-R (国際電気通信連合 無線通信セクタ) で進められており、1999 年末に無線インタフェースの詳細仕様が勧告される [10]-[12]。IMT-2000 は、マルチメディアに対応し世界規模でローミングを可能とするデジタル方式のシステムで、当初世界統一規格を目指した。しかし、各国各地域の移動通信事情から 4 種類の規格が存在する見込みである [13],[14]。この IMT-2000 や次々世代携帯電話システム (IMT-2000 phase2) は高速情報伝送・高速移動のサービスの提供を目指しており、現在サービス提供が不可能な領域をカバーするシステムとなる (図 1.2)。また、さらに高速な情報伝送の提供するシステムとして、2002 年の実用化を目指して研究開発が進められている MMAC (Multimedia Mobile Access Communicationsystem) がある。このシステムは、移動の制約を受けるものの PDC,PHS や IMT-2000 などの屋外系システムより遥かに高速な情報伝送サービス (~ 100Mbps) を提供する。

一方、移動通信システムは前述の陸上系システムばかりでなく、衛星を利用したシステムもあり、赤道上空約 36,000km の軌道上にある静止衛星を利用したシステムと周回衛星を利用したシステムに大別できる。両者とも衛星を介して船舶、航空機、車等に移動通信サービスを提供している [15]-[17]。現在、我が国の静止衛星を利用した移動通信サービスは、インマルサット (KDD) 及び N-STAR (NTT ドコモグループ) の通信衛星を介して提供されている。周回衛星を利用した移動通信システムでは、1999 年 1 月に日本イリジウムが我が国で初めて通信サービスの提供を開始した。イリジウムシステムは、高度約 780km の 6 つの極軌道に 11 機ずつ計 66 機の衛星を配して地球全体をサービスエリアとするものである。海上、山岳部など今まで通信が不可能だった地域での新たな通信手段として期待されている。また、オーブコムジャパンが 1999 年 3 月から、36 機の周回衛星を介してサービスの提供を開始している。

前述の移動通信システムはいずれも音声通信を主体にサービスが行なわれているが、他方、データ通信においてはインターネットが急速な勢いで普及している。1998 年

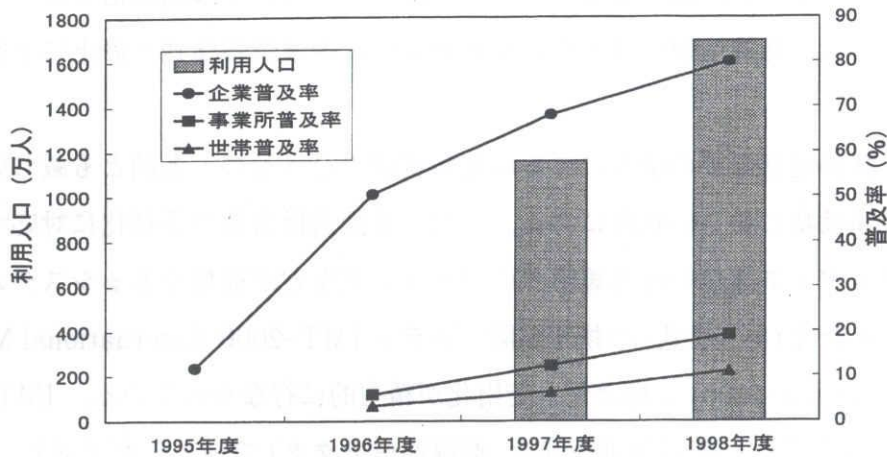


図 1.3: 我が国におけるインターネットの普及状況

度の我が国におけるインターネット利用者は、約 1,700 万人 (個人利用率 18%) と推計される [1]。また、「平成 10 年度通信利用動向調査」によれば、インターネット世帯普及率は 11%、事業所 (従業員数 5 人以上) 普及率 19.2%、企業 (同 300 人以上) 普及率 80.0% に達している (図 1.3)。いずれも高い伸びを示しており、インターネットが社会の様々な局面に浸透しつつある。このようなインターネットの急速な普及に伴い、インターネットを「いつでも、どこでも」利用することができるような移动通信サービスが提供され始めている。1998 年度には、従来の電話サービスのほか、電子メールとの相互接続やブラウザ閲覧などインターネットとの融合を図ったデータ通信関連サービスの展開がなされている [18],[19]。

移动通信システムにおける交換方式

固定通信、移动通信を問わず、電話サービスの通信方式には回線交換方式が採用されている。回線交換方式は、通信に先立ち回線の確保を行ない、通信中はその回線を占有する交換方式である [20],[21]。回線交換方式は、音声のように情報が連続的に発生する通信に適しているが、データ通信のように情報発生が離散的な通信には不適とされている。データ通信に適した交換方式として、情報が存在する時のみパケットを構成し、多種多様な端末からの情報を多重化して伝送するパケット交換方式がある。移动通信システムにおいても、データ通信の需要に対応するために、パケット交換サービスが提供されている。我が国における PDC パケット通信 (PDC-P) サービス [22]-[24] や北米の CDPD (Cellular Digital Packet Data) [25] などである。

PDC-P は 1997 年 3 月からサービスが開始されており、現在最大情報伝送速度 28.8kbps のサービスが提供されている。PDC システムにパケット通信用物理チャネルを追加し、一部の無線チャネルをパケット通信用物理チャネルに割当て有線のパケット交換網に接続してサービスを提供している。したがって、PDC-P は、回線交換方式のシステムの一部の無線チャネルを利用して、パケット通信サービスを提供している形態であるといえる。パケット通信用物理チャネルには、回線交換型データ通信サービスと同程度の伝送速度を提供可能な 1 スロットパケット通信用物理チャネルとより高速な伝送速度を提供可能な 2 スロットおよび 3 スロットパケット通信用物理チャネルがある。PDC システムでは、物理チャネル内の論理的なチャネルを機能チャネルと呼ぶが、ユーザパケット伝送用の機能チャネルは UPCH(ユーザパケットチャネル)と定義されている。パケット通信用物理チャネルの上りチャネルアクセス制御には、制御用物理チャネルと同様の部分エコー付き空線制御ランダムアクセス方式(ICMA-PE: Idle-signal Casting Multiple Access with Partial Echo)が採用されている。UPCH 機能チャネルが複数存在する場合、複数の UPCH 機能チャネルに対してそれぞれランダムアクセスを行なうことにより複数の上り信号の並列伝送が可能となっている。

移動通信システムでは、データ通信の需要が年々増大しているものの依然トラヒックの大部分は音声である。一方、有線通信網では、米国において数年前にデータトラヒックが音声を上回っている。我が国においてもデータトラヒックが音声に肉迫しており、数年の間には逆転すると言われている。近い将来、移動通信システムのトラヒックもデータが主になることが予想され、移動通信システムの採用する交換方式もパケット交換に移行することが望ましいと考えられる。

移動通信システムにおける多元接続方式

移動通信システムを多元接続方式の観点からみると、第一世代のアナログ方式携帯電話は、周波数分割多元接続方式(FDMA: Frequency Division Multiple Access)を採用していた。第二世代の PDC, GSM (Global System for Mobile communications) や PHS は、周波数分割された各チャネルをさらに時間分割する時分割多元接続方式(TDMA: Time Division Multiple Access)を採用している。また、cdmaOne では符号によりユーザを分割する符号分割多元接続方式(CDMA: Code Division Multiple Access)が採用されている。IMT-2000 の有力候補とされている W-CDMA[26] や cdma2000 は直接拡散 CDMA (DS/CDMA) 方式を採用する。このように、CDMA 方式を採用する移動通信システムの実用化や開発が盛んに行われている。現在、移動通信システムの多元接続方式は TDMA 方式が主流であるが、第三世代システムにおい

ては CDMA 方式が主流となるであろう。

CDMA 方式は、スペクトル拡散技術を応用した多元接続方式であり、各ユーザは拡散符号と呼ばれる符号により識別される。このため、CDMA 方式は、FDMA 方式や TDMA 方式とは異なる特長を有する [27]–[30]。FDMA と TDMA 方式の場合は、それぞれ周波数軸と時間軸を分割して個々のユーザに割り当てるので、理想的な状態では他のユーザからの干渉妨害が全く発生せず、規定された品質で通信ができる。これに対し、CDMA 方式の場合は同一周波数帯域を多くのユーザが共有しあって通信するため、同時通信するユーザ数が少ない時には高品質の通信を享受できるが、ユーザ数が増えてくると徐々に品質が劣化する。このように通信品質や同時通信可能ユーザ数(チャンネル容量)にソフト的な特長を有する CDMA 方式をセルラシステムに適用すると、ボイスアクティベーションやソフトハンドオフ等を複雑な制御なしに実現することが可能となるため、FDMA 方式や TDMA 方式に比較して高効率なセルラ移動通信システムの構築が可能となる [31]–[33]。

一方、CDMA 方式の通信品質は、同時に通信するユーザ数により決定される。つまり、CDMA 方式を採用した移動通信システムを効率良く運用するためには、同時通信ユーザ数を可能な限り小さくすることが不可欠となる。この観点において、CDMA 方式はパケット通信と親和性が良い多元接続方式であるといえる。

移動通信システムにおける通信の公平性

通信サービスにおいては、普及率が向上し、国民生活に不可欠なサービスに該当すると考えられる場合、そのサービスはユニバーサルサービスとして、誰もが利用可能な条件で過疎地を含むあまねく全地域に安定的に供給を図るべきとされる。我が国では、日本電信電話株式会社法第 2 条により、電話サービスがこのユニバーサルサービスに該当する [34],[35]。このようなサービスでは、利用者に提供されるサービスの品質をできる限り公平に保つことも重要であると言える。つまり、利用者が何処でも何時でも同等のサービスを享受できることが望まれる。ここでサービスの公平性 (Fairness) とは、そのシステムで想定される種々の条件下で均一な通信品質が得られることを意味する。移動通信サービスは現在のところユニバーサルサービスには該当しないと考えられるが、セルラ移動通信システムではサービスエリアの全国への拡大やサービスエリア全域での公平なサービスの提供が可能となるように、基地局配置およびセル設計が行われている。普及率の推移から推測すると、今後の移動通信サービスにはユニバーサルサービスの性格が要求されると考えられ、移動通信システムにおける通信の公平性の確保は今後重要となるであろう。

以上のような移動通信を取り巻く近年の環境や移動通信システムの動向を考慮すると、今後の移動通信システムはデータ通信あるいはマルチメディア通信サービスの提供が不可欠となる。通信網のマルチメディア化に関しては、有線通信網では ATM (Asynchronous Transfer Mode) 方式 [36],[37] あるいは IP over WDM (Wavelength Division Multiplex) 方式 [38],[39] で実現されつつある。いずれの場合も情報をパケット化して伝送する方式である。一方、移動通信システムはこれまで回線交換方式を採用して発展してきた。しかし今後は、多くの移動通信システムが、無線チャネルを含め ATM や IP と親和性の高いパケット通信方式を採用することになるであろう。CDMA 方式とパケット通信を結合した無線通信方式、CDMA パケット通信は、効率の良いマルチメディア移動通信を実現できる方式として有望である。一方、これまでの移動通信システムはセルラ方式により大きく発展してきた。セルラ方式は周波数資源を最大限に活用できる方式であり、限られた周波数資源を利用して広範なエリアへのサービス提供が必要な移動通信システムにとって、セルラ方式は今後も不可欠な方式である。

このように、DS/CDMA 方式とセルラ方式による移動パケット通信 (以後、CDMA セルラパケット通信と呼ぶ) は、周波数資源の有効利用を可能とし、かつ、”いつでも、どこでも、マルチメディア通信を” 実現可能とする方式である。したがって、CDMA セルラパケット通信は将来のマルチメディア移動通信システムを実現する通信方式として極めて有望な通信方式である。本研究では、CDMA セルラパケットシステムを研究の対象として取り扱う。

1.2 セルラ移動通信システムにおける CDMA パケット通信の問題点と課題

無線回線を伝送媒体にしたパケット通信、無線パケット通信は、これまでに多くの研究者によりさまざまな研究がなされてきたが、当初は主に無線 LAN や衛星通信を対象とした研究であった [40]-[44]。PDC-P などの移動パケットサービスの実用化などを背景に、近年陸上移動通信を対象とする研究が盛んになっている [45]-[49]。移動通信システムの多くは、サービスエリア内に複数の基地局を配置し、移動局は最寄りの基地局からサービスを受けるセルラ方式を採用しているが、これまでの無線パケット通信の研究は陸上移動通信を対象としたものであっても、シングルセル環境での研究が大部分であった。実際の陸上移動通信システムの環境であるセルラ (マルチセル) 環境での研究はあまりなされていない。

移動通信環境下の無線回線は、基地局－移動局間の距離による距離減衰や、移動局周辺の地形や地物による電波の反射、回折等で発生するシャドーイングやフェージングによるレベル変動を受ける。変復調方式など無線伝送方式の研究においては、無線回線の変動に関して深く検討されているが、移動通信システムの見地からの研究では特にフェージングによる影響があまり考慮されていない。これは、これまでの移動通信システムの見地からの研究の多くが、回線交換システムを対象としていたためである。回線交換システムでは、回線保留時間に対しフェージングによるレベル変動が極めて短いため、この変動が平均化され無視できるからである。しかしながら、パケットの長さはフェージング周期に対してそれほど長くないため、フェージングによるレベル変動の影響を移動パケットシステムでは無視することはできない。

CDMA 移動通信システムでは、受信時の電力の不揃いに起因する遠近問題 (near-far problem) が発生するため、周波数利用効率向上の目的で送信電力制御が実施される。CDMA セルラパケットシステムにおいても、同様の目的で送信電力制御が必要となる。CDMA セルラパケットシステムで送信電力制御を実施すると、最大スループットを向上させることが可能となる。しかし、高チャネル負荷時に、スループット特性が急激に劣化し送信電力制御を実施しない場合の特性までも下回る [50]。これまでの回線交換システムでは、呼接続 (設定) 制御等により簡単にトラヒック制御を行なうことが可能であったため、高チャネル負荷時の特性劣化はさほど問題にならなかった。パケットシステムでは呼接続 (設定) 制御を行わないサービス (コネクションレスサービス等) が存在し、このようなサービスにおいてトラヒック変動により一時的に高チャネル負荷状態に陥った場合、伝送効率が急激に低下する。これは、システムの安定性の面で問題となり、安定性維持のために高チャネル負荷時におけるスループット特性の改善が望まれる。また、CDMA セルラパケットシステムでは、各移動局に個別の下り回線が常時存在するとは限らないため、各々の移動局に対する制御コマンドの受渡しを行なう閉ループ送信電力制御が難しい。このため、閉ループ制御が容易に実施される回線交換システムに比べ、送信電力制御の精度は低いと考えられ、CDMA セルラパケットシステムの送信電力制御にはある程度の制御誤差が存在するものと予想される。さらに、フェージングによるレベル変動によっても、受信時のレベルの不揃いが発生する。CDMA パケットシステムにおける送信電力制御誤差に起因する受信電力の不均一についての研究が行なわれているが [48]、シングルセル環境でのみの検討であり、またフェージングによるレベル変動との関係が考慮されていない。一方、受信時のレベルの不揃いは、捕捉効果 (capture effect) を生ずる可能性がある。特に、CDMA パケットシステムでは、高チャネル負荷時に僅かな受信レベル

差が捕捉効果を生み出すと予想される。このような CDMA パケットシステムにおける送信電力制御誤差やフェージングによる受信電力の不揃いと捕捉効果の関係を明らかにすることが望まれている。

セル構成のマイクロセル化によるセルの重なりや CDMA システムでのソフトハンドオフ等は、サービスエリア内で提供されるサービス品質に地理的な不均一性を発生させる可能性がある。移動局位置によるサービス品質の地理的な不均一性は、通信の公平性の観点で問題となる。例えば、無線パケット通信システムではサービス品質としてパケットの受信確率が考えられるが、パケット受信確率に地理的な不均一性が存在する場合、受信確率の大きい地域からのパケットばかりが受信され、小さい地域からのパケットはいくら送信しても受信されないという現象を生み出す。このことは、通信の公平性の観点で問題になるばかりでなく、サービス品質の低い地域での再送パケットの増大に起因するシステム全体の効率低下を招く可能性がある。これまでに、このような通信の公平性に関する研究が、無線 LAN でのアクセス制御 [51] やパケットのキューイング制御 [52] やスケジューリング制御 [53] において行なわれている。また、回線交換型の TDMA セルラシステムでセルの重なりに起因する不公平性の検討 [54] が行なわれているが、CDMA セルラパケットシステムについては検討がされていない。特に、CDMA セルラパケットシステムにサイトダイバーシチを適用した時に発生すると予想されるサービス提供の不公平性を、システム特性上明らかにすることが望まれる。サイトダイバーシチは、スループット特性を向上させることが可能であるため、この利点を損なうことなく公平性の維持を図る制御方式の検討を行なう必要がある。

セルラパケットシステムにおいて、データ通信と同時に音声通信を可能とする伝送方式の代表的な方式に PRMA (Packet Reservation Multiple Access) 方式 [55],[56] がある。この方式は元来狭帯域通信で研究されてきた方式であるため、CDMA 環境に適用した場合、同一時刻へのパケット集中による特性劣化などの問題が存在する [47],[57]。これに対し、パケットの送信制御によりこのような問題を緩和する制御方式が研究されている [47]。しかしこの研究では、音声 / データの持つメディア特性が十分検討されておらず、その特性に応じた適切な伝送がなされていない。マルチメディアの統合伝送の観点から、メディア特性を考慮した伝送方式を検討する必要がある。また、これまでの CDMA パケット通信でのマルチメディア統合伝送方式の検討は、単一セル環境で実施されているものが大部分である。セルラ環境では干渉条件が異なるため、単一セル環境で検討結果が適用できるとは限らない。したがって、CDMA パケット通信でのマルチメディア統合伝送方式の検討においても、セルラ環境での検討

が必要である。

1.3 研究の目的

1.3.1 セルラ移動パケット通信の理想像 (あるべき姿)

実際のセルラ移動通信環境 (変動を伴う無線回線とセル外干渉のあるマルチセル環境) 下において、優れたパケット通信システムを実現する上で重要な項目は次の3点であり、しかも、それらが同時に成り立つ必要がある。

- システム性能の向上
- 通信の公平性の確保
- マルチメディア通信の実現

本研究では、無線システム構成の見地からこれらの項目が同時に達成されていることを、CDMA セルラ移動パケット通信システムのあるべき姿と考える。

システム性能の向上

通信システムにおいて、システム性能の向上は至上使命となっている。特に無線通信システムにおいては周波数資源が有限であることから、周波数資源の有効利用の観点でシステム性能の向上が強く求められている。パケット通信システムのシステム性能を表すパラメータとしてスループット特性があり、これを可能な限り大きくすることが重要となる。また、ある種のサービス形態を考えた時、スループットの最大値を大きくすると同時に、その特性が種々のシステム条件下で大きく変化せず安定的であることも重要な事項である。

通信の公平性の確保

現在のセルラ移動通信システムではサービスエリアの全国への拡大やサービスエリア全域での公平なサービスの提供が可能となるように、基地局配置およびセル設計が行われている。ここでサービスの公平性 (Fairness) とは、そのシステムで想定される種々の条件下で均一な通信品質 (パケットサービスでは、情報伝送速度、スループット特性、伝送遅延特性など) が得られることを意味する。セルラ移動パケットシステムにおいても従来の回線交換型システムと同様に、サービスエリア全域での公平なサービスの提供が必要である。特に、セルラ移動パケットシステムでは、提供されるサー

ビス品質に地理的な不均一性が存在すると、サービス品質の優れた地域からのパケットのみが受信され、サービス品質の劣る地域からのパケットはいくら送信しても受信されないという現象を生み出す。パケット通信では通常送信に失敗したパケットは再送されるため、サービス品質の劣る地域からのトラフィック量が増大することになる。CDMA セルラ移動通信システムでは、地理的にトラフィック量の不均一があると、システム全体の性能に悪影響を与える場合がある [58],[59]。CDMA セルラパケットシステムにおけるサービス品質の地理的な不均一性は、通信の公平性の観点で問題になるばかりでなく、システム全体の効率低下を招く可能性がある。

一方、セルラ移動通信システムでは、通信の公平性を確保するためにシステム全体の効率を犠牲にしては意味がない。通信の公平性は、システム性能の劣化を伴わずに実現されるべき項目である。セルラ移動通信システムでは周波数資源有効利用の観点から、システム全体の性能が向上する場合には通信の不公平性の存在は許容されると考えることもできる。

マルチメディア通信の実現

データトラフィックの増加に伴い移動通信システムがパケット交換方式に移行したとしても、依然、音声トラフィックは存在する。パケット通信はデータトラフィックの伝送用に開発された通信方式であるため、音声トラフィックを伝送する場合にはいくらかの工夫が必要となる。したがって、セルラパケットシステムにおいても、音声トラフィックを扱う場合にはデータ通信と同時に音声通信を可能とする伝送方式が不可欠になる。データと音声では要求されるサービス品質 (Quality of Service: QoS) が異なるため、これらの要求品質を考慮したマルチメディア通信の実現が重要となる。

1.3.2 本論文の目的

本論文の目的は、無線システム構成の見地から、フェージングのあるマルチセル環境において CDMA 方式を適用した無線パケット通信システムの特性向上を図る方策を提案し、その特性評価を行なうことにある。

本論文では、特に、CDMA セルラパケットシステムにおけるシステムの安定性、サービス提供の公平性およびサービス品質の保証に着目して検討を進める。システムの安定性については、呼接続 (設定) 制御を実施しないコネクションレスサービス等を提供する場合について検討し、低負荷から高負荷状態にわたって急激な特性変化を回避して安定的なサービスを提供できるパケットの送信制御方式を検討する。サービス提供の公平性に関しては、サイトダイバーシチ受信の適用がシステムの公平性に与え

る影響について検証し、公平性を維持可能とする制御方式の検討を行なう。さらに、サービス品質の保証に関しては、音声 / データ統合伝送の場合を想定し、可能な限り音声通信のサービス品質を保証できる制御方式の検討を行なう。

具体的には、本論文において以下の3つの点について検討を行なう。

1. アクセスプロトコルに Slotted ALOHA 方式を採用した CDMA セルラパケットシステム (以後、CDMA セルラ Slotted ALOHA システム と呼ぶ) において送信電力制御を実施している場合のシステムの安定性を検証し、高チャネル負荷時の急激な特性劣化を回避することでシステム安定性を向上させる制御方式の提案を行なう。ここでは、セルラシステムの特徴を考慮し、送信電力と拡散率を制御することで積極的に捕捉効果を利用するパケットの送信制御方式を提案する。同時に、送信電力制御誤差やフェージングによる受信電力の不揃いと捕捉効果の関係を明かにする。
2. サイトダイバーシチ受信を適用した CDMA セルラ Slotted ALOHA システムにおけるサービス提供の公平性について検討する。
 - (a) サイトダイバーシチ受信が、CDMA セルラ Slotted ALOHA システムのサービス提供の公平性に与える影響について明かにする。
 - (b) サービス提供の公平性を維持可能とする2つの制御方式の検討を行なう。また、これらの制御方式の比較検討を行なう。
3. CDMA セルラパケットシステムにおいて、高効率な音声通信の提供を可能とする制御方式の検討を行なう。音声 / データ統合伝送において、両メディアの特徴とチャネル負荷を考慮して、送信許可確率により両メディアの送信をチャネル状況に応じて適応的に制御して、音声パケットを優先伝送する方式を提案する。

1.4 本論文の構成

本論文は、次のような内容で構成される。

第2章では、CDMA方式を用いたセルラ移動通信システムの基礎的事項について簡単に説明する。ここではまず、セルラ方式についてセル構成とチャネル割当てに関して述べる。次に、各多元接続方式の特徴を記述した後CDMA方式の基盤技術となっているスペクトル拡散変調方式について述べ、CDMAセルラシステムとそのチャネル容量について記述する。

第3章では、無線パケット通信における制御方式に関連する事項について述べる。狭帯域(拡散変調しない)無線パケット通信について、最も基本的なチャネルアクセス制御方式である ALOHA 方式および音声パケット通信を可能にする PRMA 方式について概要と基本特性について述べる。また、実際の無線チャネルにおける性能への影響について、低速フェージングおよび捕捉効果を考慮した場合について述べる。特に第3章では、本研究に直接関係する CDMA セルラシステムでの送信電力制御、および無線パケットシステムでの送信許可確率制御について言及する。

第4章では、CDMA セルラパケットシステムにおいてコネクションレスサービス等を提供する場合のシステムの安定性を向上させるために、高チャネル負荷状態での特性を改善する方式について検討する。基地局での受信電力差による捕捉効果を利用した送信電力制御により、低負荷から高負荷状態までの全ての負荷領域で良好かつ安定的な特性が得られる制御方式を提案する。この方式は高チャネル負荷状態でのスループット特性の改善に寄与するが、移動局位置の違いによる移動局間のパケット受信時の不公平性も生ずる。この移動局位置によるパケット受信の不公平性を改善するために、第4章ではさらに、送信電力制御と共に送信パケットの拡散利得の制御を実施する送信方式についても検討する。また、送信電力制御誤差やフェージングによる受信電力の不揃いと捕捉効果の関係を明かにする。

第5章では、CDMA セルラパケットシステムにサイトダイバーシチ受信を適用した場合のサービス提供の公平性について検討する。基地局でのパケット受信率の観点から検証し、一般的な送信電力制御を行なった場合にパケット受信率がパケットの送信位置に依存すること、すなわち、サービス提供に関して地理的な不公平性が存在することを指摘する。次に、この不公平性を改善する手法として、周辺基地局からのパイロット信号受信電力差に基づく送信電力制御法および送信許可確率制御法を提案し、これらの伝送特性をサービスの公平性とシステム効率(スループット特性)の観点から評価する。また、両方式の性能について比較検討を行なう。

第6章では、第5章で検討した公平性維持のための送信許可確率制御法のさらなる特性改善について検討する。第5章では制御パラメータをチャネル負荷の大小に係わらず固定値に設定したが、ここでは各チャネル負荷に適した制御パラメータを自律的に求め、送信許可確率を適応的に制御する方式を提案する。これにより、チャネル負荷が変動した場合の特性劣化を回避することを可能となることを示す。

第7章では、CDMA セルラパケットシステムにおいて、現在の携帯電話システムのトラヒックの大部分を占める音声トラヒックを如何に収容し、効率の良い音声/データの統合伝送を実現するかを検討する。音声/データ統合伝送が可能な上り回線プロ

トコルとして PRMA (Packet Reservation Multiple Access) 方式に着目し, DS/CDMA 環境に適用した場合の音声伝送システムの packets 廃棄率特性をマルコフ解析より解析的に導出する. その後, CDMA/PRMA 方式のシステム性能向上手法として, 使用可能なチャネルリソースとそれを競合する移動局数に基づいて送信許可確率を制御する送信許可確率制御方式, および, end-of-use フラグを使用して R-ALOHA (Reservation ALOHA) プロトコル [42],[43] における予約解放を明示的に行なうことで多元接続干渉に起因する予約の途中解除を回避する改良型 R-ALOHA プロトコルを提案する.

最後に, 本論文の総括を第 8 章で行ない, 今後の課題および展開についても記述する.

参考文献

- [1] 郵政省, 通信白書 平成 11 年度版, 1999 年 6 月
- [2] 石川 嘉彦, “21 世紀に向けての陸上移動通信システムの動向,” 電子情報通信学会誌, vol.80, no.12, pp.1242–1246, 1997 年 12 月.
- [3] 羽鳥 光俊, “次世代の移動通信小特集 – 移動通信の変遷と展望,” 電子情報通信学会誌, vol.82, no.2, pp.102–107, 1999 年 2 月.
- [4] 木下 康昭, H. Ihrfors, J. Lintusaari and J. Paivinen, “北欧セルラ電話の動向 – 固定電話を越える国 –,” 電子情報通信学会誌, vol.82, no.10, pp.1028–1034, 1999 年 10 月.
- [5] I&F, 日経 BP 企画, “移動通信,” 日経エレクトロニクス, 11 月 16 日号, no.730, pp.154–157, 1998 年 11 月.
- [6] 電波産業会, デジタル方式自動車電話システム標準規格 RCR STD-27 H, 1999 年 2 月.
- [7] 電波産業会, 第二世代コードレス電話システム標準規格 第 3.2 版 RCR STD-28, 1999 年 2 月.
- [8] 電波産業会, CDMA 方式携帯自動車電話システム標準規格 ARIB STD-T53 1.2 版, 1998 年 11 月.
- [9] 大澤 智喜, “高速無線 LAN 技術,” 電子情報通信学会誌, vol.80, no.12, pp.1251–1254, 1997 年 12 月.
- [10] 渡辺 文夫, 秦 正治, 佐々木 秋穂, “IMT-2000 の無線方式標準化プロセス,” 電子情報通信学会誌, vol.81, no.5, pp.473–478, 1998 年 5 月.
- [11] 佐々木 秋穂, 山木 浩治, “IMT-2000 標準化の状況,” 電子情報通信学会誌, vol.82, no.2, pp.116–122, 1999 年 2 月.

- [12] 保田 佳之, 秦 正治, 土肥 智弘, 佐藤 孝平, “IMT-2000 標準化の状況,” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.7, no.2, pp.64-66, 1999 年 7 月.
- [13] 田原 康生, 歌野 孝法, 沖中 秀夫, 丸山 辰夫, “IMT-2000 のサービスとシステム要求条件,” 電子情報通信学会誌, vol.82, no.2, pp.108-115, 1999 年 2 月.
- [14] 杉山 泰一, “次世代携帯電話「IMT-2000」が見えた,” 日経コミュニケーション, 6 月 7 日号, no.295, pp.98-105, 1999 年 6 月.
- [15] 佐藤 孝平, “移動体衛星通信システムの技術動向,” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.4, no.2, pp.29-36, 1996 年 7 月.
- [16] 伊藤 泰彦, “間近かに迫る衛星携帯電話サービス,” 電子情報通信学会誌, vol.80, no.12, pp.1247-1250, 1997 年 12 月.
- [17] 藤川 雅朗, 杉山 泰一, “「究極」に挑む衛星携帯電話,” 日経コミュニケーション, 10 月 19 日号, no.280, pp.92-117, 1998 年 10 月.
- [18] 安井 晴海, 高槻 芳, “手のひらに乗るインターネット,” 日経コミュニケーション, 3 月 1 日号, no.289, pp.98-117, 1999 年 3 月.
- [19] 榎 啓一, “i モードサービスの概要,” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.7, no.2, pp.6-11, 1999 年 7 月.
- [20] 電子情報通信学会 編, 新版データ通信, コロナ社, 1979 年
- [21] 木村 英俊, 広崎 膨太郎, デジタル通信, 丸善, 1991 年.
- [22] 大貫 雅史, 小林 勝美, 中村 勝志, 木村 茂, 宮崎 亮智, “移動パケット通信システム特集 - システム概要,” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.5, no.2, pp.6-9, 1997 年 7 月.
- [23] 大貫 雅史, 小林 勝美, 永田 清人, 村瀬 淳, “PDC パケット通信方式,” 電子情報通信学会誌, vol.81, no.3, pp.253-258, 1998 年 3 月.
- [24] 杉山 泰一, “頭角を表す携帯電話のパケット通信,” 日経コミュニケーション, 10 月 5 日号, no.279, pp.53, 1998 年 10 月.
- [25] M. S. Taylor, W. Waung, and M. Banan, Internetwork mobility : The CDPD approach, Prentice Hall, 1997.

- [26] 岡坂 定篤, 古谷 之綱, 渡辺 文夫, “IMT-2000 の無線伝送方式,” 電子情報通信学会誌, vol.82, no.2, pp.108–115, 1999年2月.
- [27] 横山 光雄, スペクトル拡散通信システム, 科学技術出版社, 1988年.
- [28] 小川 明 監修, CDMA 方式と次世代移動体通信システム, トリケップス, 1995年
- [29] R. Prasad, CDMA for wireless personal communications, Artech House, 1996.
- [30] 深沢 敦司, 瀧澤 由美, 羽鳥 光俊, “スペクトル拡散通信の基礎と移動通信への応用,” 電子情報通信学会誌, vol.81, no.1, pp.51–59, 1998年1月.
- [31] W. C. Y. Lee, “Overview of cellular CDMA”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.2, pp.291–302, May 1991.
- [32] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley III, “On the capacity of a cellular CDMA system,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.2, pp.303–312, May 1991.
- [33] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, K. S. Gilhousen, and E. Zehavi, “Soft handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.12, no.8, pp.1281–1288, Oct. 1994
- [34] 郵政省電気通信局, マルチメディア時代のユニバーサルサービス・料金に関する研究会 報告書, 1996年5月
- [35] 郵政省, マルチメディア時代に向けた料金・サービス政策に関する研究会 報告書, 1998年6月22日
- [36] 村田 正幸 訳, ATM ネットワーク, 科学技術出版, 1997年.
- [37] 松島 栄樹 訳, ATM 詳解 – 新世代通信網構築技術, プレンティスホール出版, 1996年.
- [38] 須田 稔, “KDD テラビットハイウェイ構想 (KTH21) について,” 電気通信, vol.62, no.634, pp.2–6, 1999年10月.
- [39] 奈須野 裕, “次世代ネットワーク開発への取り組み,” 電気通信, vol.62, no.634, pp.7–11, 1999年10月.

- [40] L. Kleinrock and F. A. Tobagi, "Packet switching in radio channels: part I - carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-23, no.12, pp.1400-1416, Dec. 1975.
- [41] F. A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet switching in radio channels: part II - the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-23, no.12, pp.1417-1433, Dec. 1975.
- [42] S. S. Lam, "Packet broadcast networks—a performance analysis of the R-ALOHA protocol," *IEEE Trans. Comput.*, vol.C-29, no.7, pp.717-726, Jul. 1980.
- [43] S. Tasaka, "Stability and performance of the R-ALOHA packet broadcast system," *IEEE Trans. Comput.*, vol.C-32, no.8, pp.717-726, Aug. 1983.
- [44] S. Tasaka and Y. Ishibashi, "A reservation protocol for satellite packet communication—a performance analysis and stability considerations," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-32, no.8, pp.717-726, Aug. 1984.
- [45] M. J. McTiffin, A. P. Hulbert, T. J. Ketseoglou, W. Heimsch, and G. Crisp, "Mobile access to an ATM network using a CDMA air interface," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.12, no.5, pp.990-908, June 1994.
- [46] K. Toshimitsu, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "A novel spread slotted aloha system with channel load sensing Protocol," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.12, no.4, pp.665-672, May 1994.
- [47] A. E. Brand and A. H. Aghvami, "Performance of a joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.14, No.9, pp.1698-1707, Dec. 1996.
- [48] C. F. Kou and H. Leib, "Power imbalance effects on packet CDMA", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.14, no.9, pp.1830-1840, Dec. 1996.
- [49] 浅井 裕介, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, "セルラー環境下における CDMA ALOHA 方式の特性に関する一考察," 電子情報通信学技術研究報告, SST97-57, RCS97-96, Sep. 1997.

- [50] A. Sheikh, Y. Yao, and S. Cheng, "Throughput enhancement of direct-sequence spread-spectrum packet radio networks by adaptive power control", *IEEE Trans. Commun.*, vol.42, no.2/3/4, pp.884–890, Feb./Mar./Apr. 1994
- [51] Y. Takiyasu and E. Amada, "High-performance, fair access control method for wireless LANs," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E77-B, no.7, pp.855–861, July 1994
- [52] T. S. Eugene Ng, I. Stoica, and H. Zhang, "Packet fair queueing algorithms for wireless networks with location-dependent errors," in *Proc. IEEE INFOCOM '98*, vol.3, pp.1103–1111, San Francisco, March 1998
- [53] M. Kang and S. Wilbur, "A fair guaranteed down-link sharing scheme for cellular packet switched networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM '97*, vol.2, pp.472–479, Phoenix, Nov. 1997
- [54] X. Lagrange and B. Jabbari, "Fairness in wireless microcellular networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.47, no.2, pp.472–479, May 1998
- [55] D.J. Goodman, and Sherry X. Wei, "Efficiency of packet reservation multiple access," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 170–176, Feb. 1991.
- [56] S. Nanda, D.J. Goodman, and Uzi Timor, "Performance of PRMA: A packet voice protocol for cellular systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 584–598, Aug. 1991.
- [57] X. Dong and L. Li, "A spread spectrum PRMA protocol with randomized arrival time over fading channels for microcellular networks," in *Proc. IEEE VTC'97*, pp. 1336–1340, May 1997.
- [58] 武尾 幸次, 佐藤 慎一, "CDMA マイクロセル移動体通信システムにおける不均一トラヒックを考慮したダイナミックセル構成法の効果," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-B-II, No.7, pp.565–577, 1997年7月
- [59] K. Takeo and S. Sato, "Evaluation of a CDMA cell design algorithm considering non-uniformity of traffic and base station locations," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E81-A, No.7, pp.1367–1377, July 1998.

第 2 章

CDMA 方式の用いたセルラ移動通信システム

2.1 はじめに

本章では、CDMA 方式を用いたセルラ移動通信システムに関する基礎的事項についてまとめる。

まず最初に、現在サービスが行なわれている携帯電話システムなど回線交換型の移動通信システムのシステム構成技術なかで最も重要なセルラ方式について述べる。その後、符号分割多元接続 (CDMA) 方式について簡単にまとめる。ここでは、多元接続方式の概要、CDMA 方式に使われるスペクトル拡散変調を述べ、CDMA 方式におけるビット誤り率を導出し、CDMA セルラ方式について述べる。また、CDMA セルラ方式において極めて重要な技術となる送信電力制御について概要を説明する。最後に、CDMA セルラシステムのシステム容量について簡単に言及する。

2.2 セルラ方式

PDC (Personal Digital Cellular telecommunication system) や PHS (Personal Handy-phone System) など現在サービスの提供が行なわれている移動通信システムの多くが、セルラ方式を採用している。セルラ方式は、移動通信システムのサービスエリアを複数のセル (無線ゾーン) で形成し、お互いに干渉が許容できる距離だけ離れたセル間で周波数を再利用する方式である [1]–[4]。各セルには 1 つの基地局が配置され、各々の基地局が使用可能な無線チャネルを利用してセル内に存在する移動局と通信を行なう。セルラ方式では周波数を繰り返し使用することで極めて多くのチャネルを利用することができ、高い周波数利用効率を得られる。また、セル半径を小さくすると移動局と基地局間の距離が小さくなるために、送信電力も節約でき超小型携帯端末の利用が可能となる。

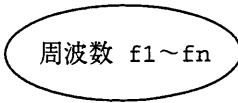
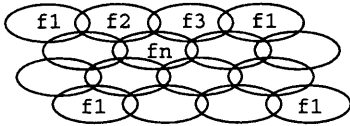
	単一(シングル)セル方式	複数(マルチ)セル方式
セル構成		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数はユーザごとに固定 ・またはマルチチャネルアクセス ・制御が容易 ・送信電力が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数繰り返し利用 ・マルチチャネルアクセス ・高度な回線制御が必要 ・送信電力が小さい
適用システム	<ul style="list-style-type: none"> ・MCA ・コンビニエンスラジオフォン ・簡易無線(タクシー無線) など 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動車携帯電話 ・PHS ・船舶電話 ・航空機電話 ・テレターミナル など

図 2.1: セル方式の比較

2.2.1 セル構成

図 2.1に、セル構成の比較を示す [1],[2]。単一(シングル)セル方式は使用可能チャンネル数が利用可能な周波数帯域で一意的に決まり、容量に限界があるものの、システムは簡易な構成である。複数(マルチ)セル方式は、サービスエリア内の複数のセルで周波数を再利用しているため、トラフィック密度の高い地域では、セルを小さくし繰り返し距離を小さくすることにより容量の問題は大きく改善される。半面、ユーザがどのセルに属していても着信可能とするためや、通信がセル間をまたがる場合にも通信の接続性を確保するために、位置登録やチャンネル切替え(ハンドオフ)等の高度な制御が必要となり、システム構成が複雑になる。

回線交換型のセルラシステムでは、周波数繰り返し距離をどの程度に設定し、各セルにどのように無線チャンネルを配置するかが重要な課題になる [5],[6]。繰り返し距離は、セル形状、伝搬損失の距離変動特性やシステムの要求品質などに依存するが、セクタ化やビームチルティング技術を適用することにより、これを小さくすることが可能となる。また、各セルへのチャンネル配置は、移動局への通信チャンネルの割当ての問題と密接な関係がある。

2.2.2 チャンネル割当て

チャンネル割当てには、大別して、各セルの使用するチャンネルを予め決める固定法と、各セルの呼の状況に応じて時間的に変化させるダイナミック法がある [7]。固定法は、各セルで使用するチャンネルが決まっているので制御等が簡単であり、従来から使用さ

れてきた。しかし、各セルの呼量の変化に柔軟に対応することができない。一方、ダイナミック法は、要求に従って割当てを行なうことにより呼量の変動に対応した効率の良い割当てができる。ダイナミック法は、割当チャンネルの選択の方法により、チャンネルの使用効率やハンドオフ時の強制切断率が異なるため、様々な方式が提案されている。代表的な方式にチャンネル棲み分け法 [8] や ARP (Autonomous Reuse Partitioning) 法 [9] がある。

2.3 符号分割多元接続 (CDMA) 方式

2.3.1 多元接続方式の特徴

移動通信システムにおいては、多くの移動局が1つの基地局に対して通信を行なう。システムに与えられた一定の周波数帯域を、多数の通信チャンネルに分割して通信に使用する。このような通信チャンネルへのアクセスの方法を多元接続という。

多元接続方式は3つの方式に大別され、周波数分割多元接続方式 (Frequency Division Multiple Access: FDMA)、時分割多元接続方式 (Time Division Multiple Access: TDMA)、符号分割多元接続方式 (Code Division Multiple Access: CDMA) がある [6],[10]。図 2.2にこれらの概念図を示す。

FDMA 方式では、システムに与えられた周波数帯域を分割し各局に割り当てるため、信号は狭帯域で伝送される。信号は連続的であるので、送信に際し時間的に同期は必要としない。また、受信においても復調に伴って高速な同期制御を必要としない。FDMA 方式は装置化が容易に実現できるため、これまでアナログの携帯電話システムに採用されてきた。しかし、周波数利用効率向上のためには、一層の狭帯域化や高周波化を進める必要があり、周波数の安定度が問題になってくる。

TDMA 方式では、時間を分割して各局に割り当てる。各局は信号をバースト的かつ周期的に送信するため、送信に際し時間的な同期が必要となり、また、ピーク電力も大きくなる。セル内の移動局の位置により伝搬時間が異なるため基地局において移動局の信号が重なる場合があり、これを防止する目的でガードタイムを設ける必要がある。ガードタイムは効率の面では劣化要因になるため、最小限に設定する必要がある。ガードタイム期間の短縮化や信号対熱雑音比の向上から、FDMA 方式と併用することが一般的である。周波数安定度の要求が比較的厳しくなく、また、基地局の送信機が少なくすむ利点がある。TDMA 方式は、我が国の PDC システムに採用されている他、各国のデジタル携帯電話システムに広く採用されている。

CDMA 方式では、FDMA 方式や TDMA 方式のように周波数や時間といった物理

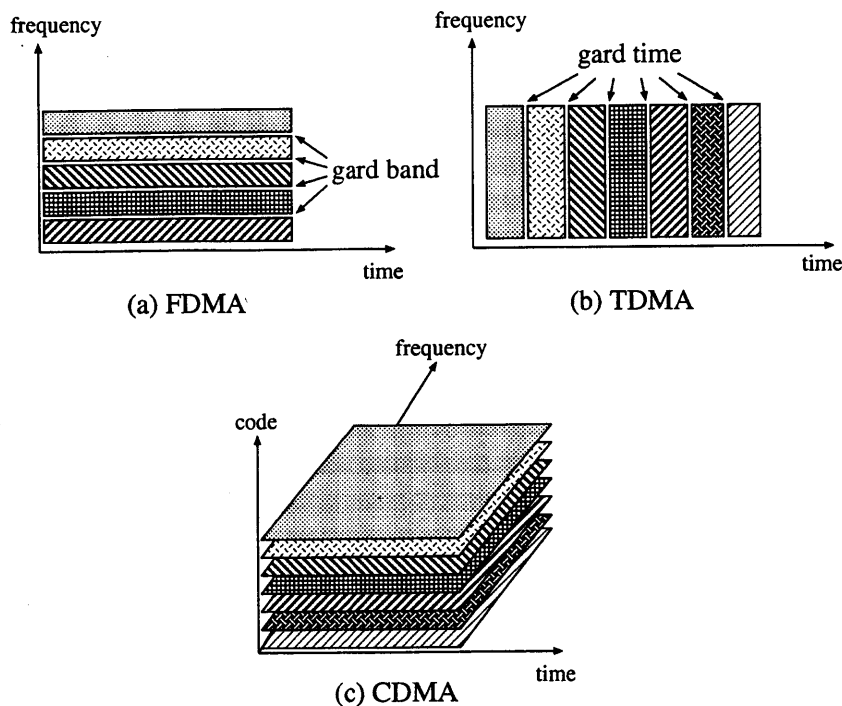


図 2.2: 多元接続方式

的空間を分割するのではなく、同一周波数、同一時間空間に存在する個々のユーザを符号により識別する。通信チャンネルには周波数や時間といった明確な区別がないため、CDMA 方式のチャンネル数は通信品質により決定される。CDMA 方式では、同時通信するユーザ数が少ない時には高品質の通信を楽しむことができるが、ユーザ数が増えてくると徐々に品質が劣化することになる。CDMA 方式は、スペクトル拡散技術の特徴のうち符号によりユーザを識別できる機能を活用した多元接続方式である。

2.3.2 スペクトル拡散変調方式

スペクトル拡散 (Spread Spectrum: SS) 通信は、情報の帯域幅よりはるかに広い帯域幅に信号のエネルギーを拡散変調して通信を行なう方式である [7],[10],[11]。スペクトル拡散変調は拡散の方法により、直接拡散 (Direct Sequence: DS) 方式と周波数ホッピング (Frequency Hopping: FH) 方式に分けられる。CDMA 方式には DS/SS 方式を使用するのが一般的である。

DS/SS 方式の送信時には、図 2.3 に示すように従来の通信方式と同様の「情報変調」を行なった後、さらに雑音状の拡散符号を用いた「拡散変調」を行なう。これにより、信号の帯域を数十～数千倍に広げる。受信側では、送信側と同じ拡散符号を用いて、「拡散復調」(逆拡散ともいう)を行なった後、情報の復調を行なう。受信側で加わる

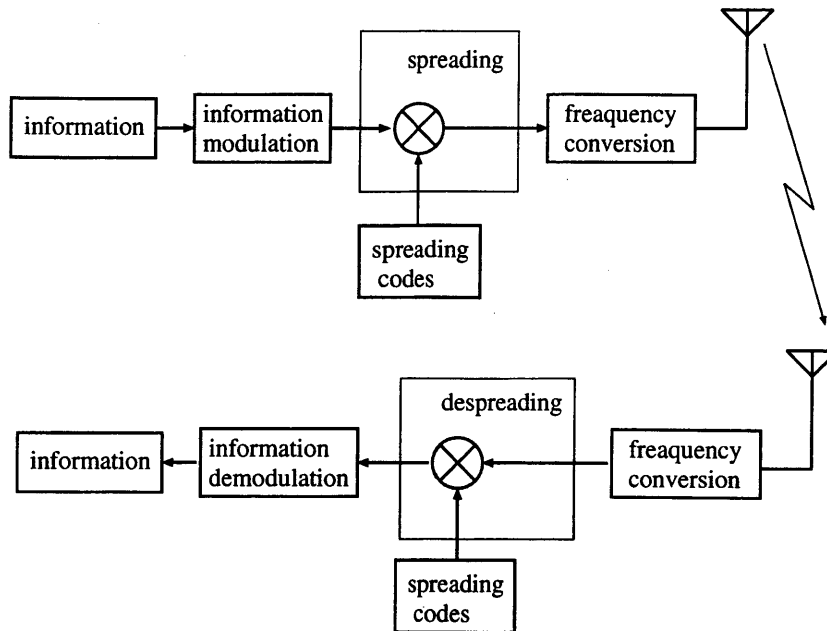


図 2.3: DS/SS 通信のブロック図

干渉や雑音は拡散符号と相関がないため、拡散復調の時に排除される。これによる拡散復調前後の信号対雑音比 (Signal to Noise Ratio: SNR) の改善を処理利得 (processing gain) という。

DS/SS 方式は、他の通信システムに与える干渉、他から受ける干渉の影響が小さい、マルチパスに強い、強力な秘匿性があるなどの特徴を持っている。

2.3.3 CDMA 方式のビット誤り率

CDMA 方式のビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) 特性を求める。簡単のために、送受信機は理想的なものを仮定し、情報変調方式としては BPSK(Binary Phase-Shift Keing) を考える。第 k ユーザの送信情報信号を $b_k(t)$ とすると、 $b_k(t)$ は、

$$b_k(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} b_{k,m} \text{rec}_s(t - mT_s) \quad (2.1)$$

と表すことができる。ただし、 $b_{k,m}$ は m 番目の送信情報ビット (-1 or +1) である。また、 $\text{rec}_s(t)$ は幅 T_s の方形波パルス信号であり、

$$\text{rec}_s(t) = \begin{cases} 1 & ; 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

で表せる。送信情報信号は、次式で表される拡散信号 $b_k(t)$ により各々直接拡散される。

$$a_k(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_{k,l} \text{rec}_c(t - lT_c) \quad (2.3)$$

ただし、 $a_{k,l}$ は l 番目の拡散符号の 1 チップ (-1 or +1), $\text{rec}_c(t)$ は幅 T_c の方形波パルス信号である。なお、拡散率 (処理利得) を G_p とすると、 $T_s = G_p \cdot T_c$ である。

第 k ユーザから送信される拡散信号は、

$$s_k = \sqrt{2P} b_k(t) a_k(t) \cos(\omega_c t + \theta_k) \quad (2.4)$$

となる。ここで、 P は信号電力を表す。

各ユーザからの信号は非同期で送信され、伝送路で両側電力スペクトル密度 $N_0/2$ の白色ガウス雑音加わり、さらに、全てのユーザからの信号が等電力で受信されるとすると、受信機に入力される信号は、

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{2P} b_k(t - \tau_k) a_k(t - \tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_k) + n(t) \quad (2.5)$$

で表すことができる。ただし、 $\phi_k = \theta_k - \omega_c \tau_k$ である。

この受信信号から受信機で第 k ユーザの信号を復調するものとする。このとき、受信機において拡散信号と搬送波の同期が完全であると仮定すると、一般性を失うことなしに、 $\tau_i = 0$, $\phi_i = 0$ とすることができる。また、 $k \neq i$ においては、 $0 \leq \tau_k < T_s$, $0 \leq \theta_k < 2\pi$ とする。

受信機では、受信信号に搬送波および拡散系列信号を乗積した後積分することで逆拡散を行ない、情報の再生を行なう。ここで、 m 番目の情報に対する積分出力は、

$$Z_{i,m} = \int_{mT_s}^{(m-1)T_s} r(t) a_i(t) \cos \omega_c t dt \quad (2.6)$$

となる。以下、 $m = 0$ で考える。式 (2.6) と式 (2.5) より

$$Z_i = Z_{i,0} = \sqrt{P/2} T_s b_{i,0} + \sqrt{P/2} \sum_{k=1, k \neq i}^K [b_{k,-1} R_{k,i}(\tau_k) + b_{k,0} \hat{R}_{k,i}(\tau_k)] \cos \phi_k + \int_0^{T_s} n(t) a_i(t) \cos \omega_c t dt \quad (2.7)$$

となる。ただし、式中 $R_{k,i}(\tau)$ および $\hat{R}_{k,i}(\tau)$ は、拡散系列間の部分自己相関であり、

$$R_{k,i}(\tau) = \int_0^\tau a_k(t-\tau)a_i(t) dt \quad (2.8)$$

$$\hat{R}_{k,i}(\tau) = \int_\tau^{T_s} a_k(t-\tau)a_i(t) dt \quad (2.9)$$

で定義される。これらは、第 k ユーザと第 i ユーザの信号間のタイミングの違い、および各々の拡散符号の部分相互相関で定まる。

式 (2.7) の第 1 項は信号成分、第 2 項は干渉成分、第 3 項は雑音成分を表し、これらを各々、 $Z_{i,D}, Z_{i,U}, Z_{i,N}$ と表記する。これらのうち $Z_{i,N}$ は、分散

$$\text{Var}\{Z_{i,N}\} = \frac{N_0 T_s}{4} \quad (2.10)$$

のガウスランダム変数である。また、各ユーザの信号における搬送波初期位相、情報ビットの値、遅延量 τ_k が互いに独立かつランダムであることより、ユーザ数 K が充分大きい時に、干渉成分 $Z_{i,U}$ もガウスランダム変数とみなすことが可能である。式より明らかに干渉成分 $Z_{i,U}$ の平均は 0 である。また、この分散は、

$$\text{Var}\{Z_{i,U}\} = \frac{P}{2} E\left[\sum_{k=1, K \neq i}^K [b_{k,-1} R_{k,i}(\tau_k) + b_{k,0} \hat{R}_{k,i}(\tau_k)] \cos \phi_k \right]^2 \quad (2.11)$$

となる。ここで、 $E[\]$ は遅延量 τ_k 、搬送波初期位相 ϕ_k 、情報ビット $b_{m,k}$ に関する集合平均である。このうち τ_k について、集合平均を時間平均に読み替え、さらに $\tau_k, b_{m,k}$ が k, m に関して独立であることを考えると、式 (2.11) は、

$$\text{Var}\{Z_{i,U}\} = \frac{P}{4T_s} \sum_{k=1, k \neq i}^K \int_0^{T_s} R_{k,i}^2(\tau_k) + \hat{R}_{k,i}^2(\tau_k) d\tau_k \quad (2.12)$$

となる。このように干渉成分の分散は、各ユーザの信号の拡散信号の部分相互相関関数によって与えられる。ここで、特に拡散系列がランダム系列とみなせるような場合には、 $Z_{i,U}$ の分散は、

$$\text{Var}\{Z_{i,U}\} \approx \frac{PT_s^2 K - 1}{2 \cdot 3G_p} \quad (2.13)$$

で与えることができる。

上述のように、雑音成分および干渉成分をガウスランダム変数とみなすことができ

るので、これらの分散値の和と信号成分の自乗値の比、すなわち、信号対雑音干渉電力比 ($SNIR$) を

$$SNIR = \frac{Z_{i,D}^2}{Var\{Z_{i,U}\} + Var\{Z_{i,N}\}} \quad (2.14)$$

と定義すると、式 (2.14) に式 (2.13) および式 (2.10) を代入して、

$$SNIR \approx \left\{ \frac{K-1}{3G_p} + \frac{N_0}{2E_b} \right\}^{-1} \quad (2.15)$$

となる。ここで、 E_b はビット当りのエネルギーを表し、

$$E_b = PT_s \quad (2.16)$$

である。したがって、ビット誤り率は次式で表すことができる。

$$P_{eb}(K) = Q \left[\left\{ \frac{K-1}{3G_p} + \frac{N_0}{2E_b} \right\}^{-1/2} \right] \quad (2.17)$$

ここで、 $Q(x)$ は Q 関数であり、

$$Q[x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2/2} du \quad (2.18)$$

で与えられる。

ビット誤り率の数値例

図 2.4 に、式 (2.17) により得られたビット誤り率特性を示す。ここでは、 E_b/N_0 を無限大としており、雑音に対して信号エネルギーが十分大きい場合を示している。この場合、多元接続干渉のみが存在している状況である。ビット誤り率特性は、同時通信局数の増加とともに、緩やかに劣化していくことがわかる。また、拡散率 (処理利得) が大きくなると、ビット誤り率が減少している。

図 2.4 に示したビット誤り率を用いてパケット成功確率を求める。1つのパケット送信中の同時通信局数は不変であり、1ビットでも誤るとパケットが正しく受信できないと仮定した場合、ビット誤り率 P_{eb} の伝送路に長さ L [bits] のパケットを送信した場合のパケットの受信成功確率 P_s は次式で表わすことができる。

$$P_s = \{1 - P_{eb}\}^L \quad (2.19)$$

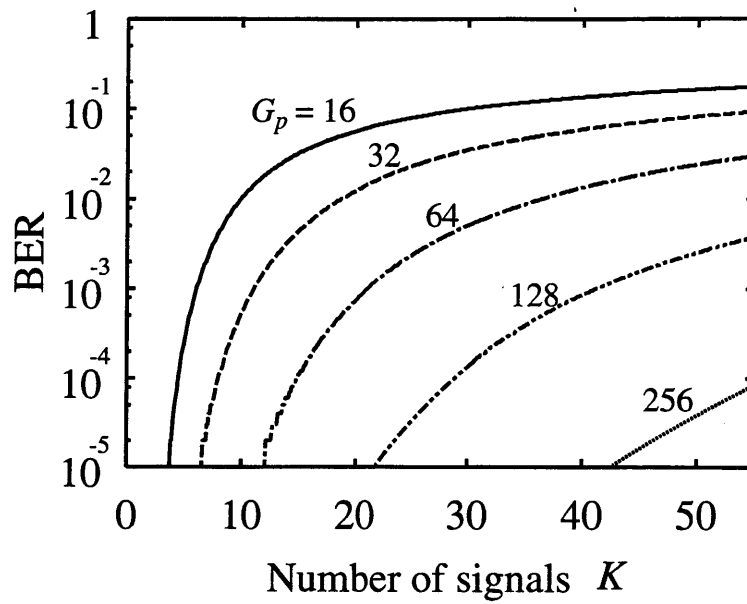


図 2.4: 同時送信局数対ビット誤り率特性 ($E_b/N_0 = \infty$)

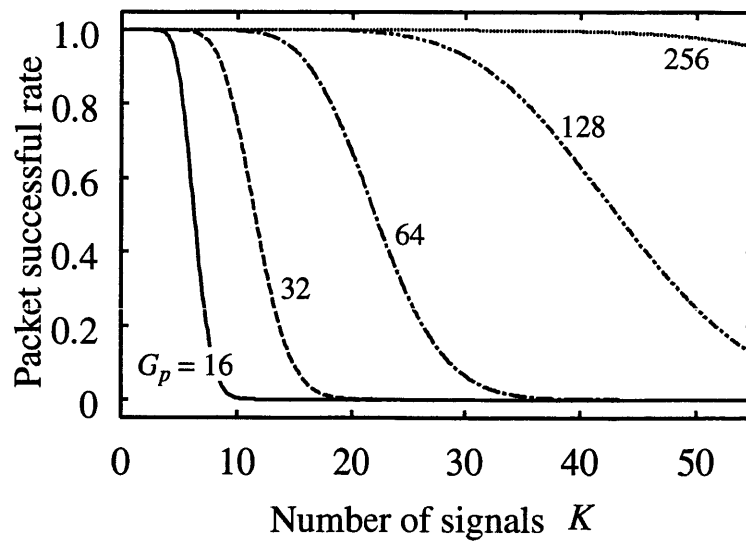


図 2.5: 同時送信局数対パケット成功率特性 (パケット長 $L = 544$ [bits])

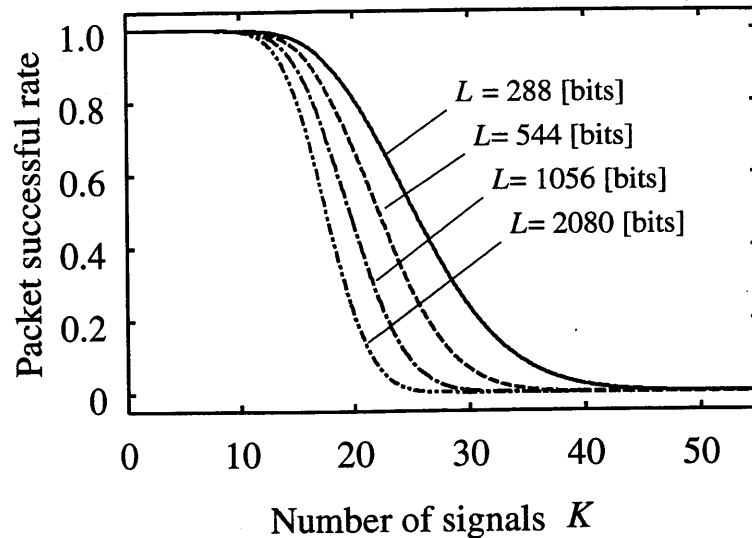


図 2.6: 同時送信局数対パケット成功率特性 (拡散利得 $G_p = 64$)

図 2.5には、式 (2.19) により算出したパケット成功率特性を示す。パケット長 L を 544 [bits] (ヘッダ: 32, 情報: 512) とした。パケット成功率においても、同時通信局数の増加とともに特性が緩やかに劣化していくことがわかる。また、図 2.4, 2.5 より、ビット誤り率 P_{eb} が $10^{-4} \sim 10^{-3}$ の領域において、パケット成功率が劣化していることが読みとれる。これは、パケット長 L にも依存するが、 10^{-4} 程度のビット誤り率の伝送路を用意すれば、良好なパケット通信が行なえることを意味している。次に、パケット長 L がパケット成功率に与える影響を図 2.6 に示す。拡散率 (処理利得) を 64 とした。式 (2.19) において明らかなように、同時通信局数が同じ場合、パケット長が大きくなるとパケット成功率は劣化する。

2.3.4 CDMA セルラ方式

CDMA 方式を移動通信に適用した場合、各ユーザの情報はそれぞれのユーザに固有の拡散符号で拡散される (図 2.7)。これらの信号は同じ周波数帯域で重ね合わせて送信され、受信側で受信したいユーザの拡散符号を用いて情報を取り出す。

移動通信における CDMA 方式の特徴には、スペクトル効率が高い、マルチパスに強い、秘話性がある、多種類のデータ速度に対応できる、過負荷に対し品質が急激に劣化しないなどがある。

CDMA 方式をセルラシステムに適用する場合、全てのセルで同じ周波数帯域を使用することが可能となる。これにより、FDMA や TDMA 方式で必須であったチャネル配置、チャネル割当ての問題がなく周波数管理が極めて簡単になる。

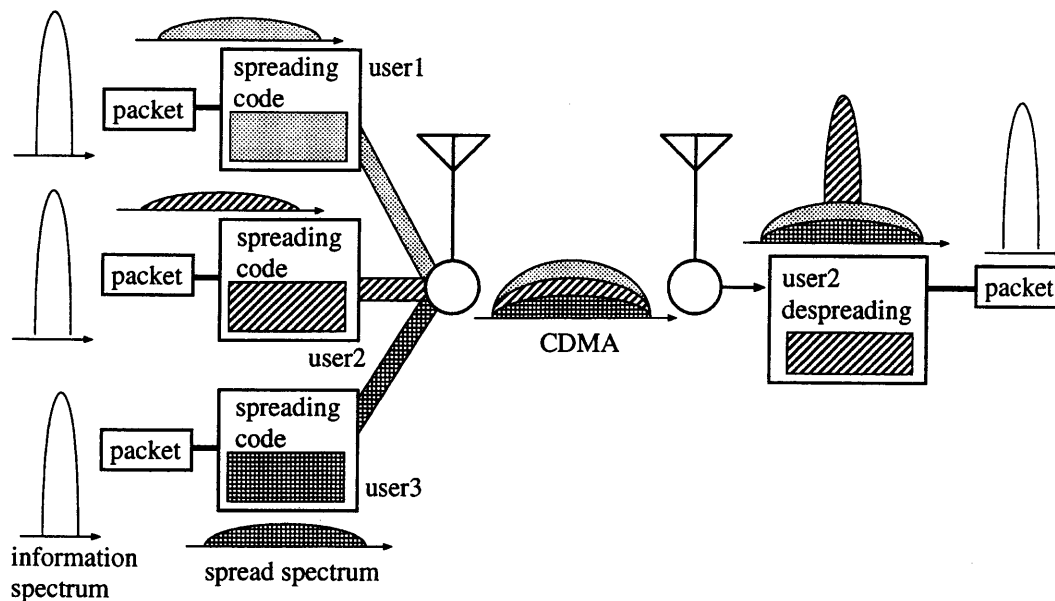


図 2.7: CDMA 方式の動作

セルラ方式では通信の継続性を確保するためにハンドオフが必須になることは既に述べたが、CDMA の場合、隣接セルにおいても同じ周波数帯が使用されているため、その特徴を生かしたソフトハンドオフが可能となる。ソフトハンドオフでは、セル境界に来た移動局に対してハンドオフ時に複数の基地局から信号を送信する。これらの信号は、すべて同一周波数帯で基地局の識別信号が含まれている。移動局は、これらの信号を全て復調することで、一種のダイバーシチ効果を得ることになる。ソフトハンドオフは、ハンドオフ時の切断や品質劣化を改善できる技術である。

CDMA セルラ方式では、基地局から移動局への回線(下り回線)と移動局から基地局への回線(上り回線)で、チャンネルの特性が異なる。下り回線は1基地局から多くの移動局への通信になるため、拡散信号を互いに直交することにより干渉を抑えることができる。一方、上り回線では、多くの移動局が非同期に伝送することになり、セル内およびセル外干渉が発生する。

干渉信号を減らす方策として、音声通信ではボイスアクティベーション (voice activation) が有効である。ボイスアクティベーションは、音声の無音区間の信号送信を停止し干渉量を抑制して、システム容量の増大を図る。CDMA セルラ方式では、システムに新たな機能を追加することなく移動局が自律的にボイスアクティベーションを実施することのみにより、大幅な干渉量抑制効果が得られる。

また、CDMA の上り回線においては、遠近問題 (near-far problem) [12] が発生す

る。これは、移動局が同じ電力で信号を送信した場合、移動局－基地局の距離の違いにより基地局での受信電力に差が発生し、遠い移動局からの信号品質が劣化する問題である。この問題は、特定の移動局の通信品質が悪くなるという状況にとどまらず、システム全体で大幅な効率低下を招く。CDMA の下り回線では希望信号と干渉信号が同じ伝搬経路で受信されるため、遠近問題の影響はそれほど大きくない。

2.3.5 送信電力制御

前述の遠近問題を解決する方法に送信電力制御 (Transmission Power Control: TPC) がある。送信電力制御では、基地局での受信品質が全ての信号において同じになるように送信電力を制御する。基地局から遠い移動局の信号は大きな伝搬損失を受けるが、近い移動局の信号は小さな伝搬損失しか受けなため、送信電力は基地局から遠い移動局程大きくなる (図 2.8)。セルラシステムで送信電力制御を効率良く用いるには、最も強い信号を受信した基地局 (接続基地局という) に対して制御を実施する必要がある。これにより移動局は送信電力を小さくでき、システム全体の効率が向上する。

CDMA セルラシステムで実施されている送信電力制御法は、大別して開ループ制御と閉ループ制御の 2 種類の方式がある [13]。

開ループ送信電力制御

開ループ送信電力制御では、下り回線と上り回線の伝搬損失を同じと仮定して、移動局がパイロット信号等の下り回線信号の伝搬損失を計測 (推測) し、その値に基づいて上り方向の送信電力を決定する。 P_{tgt} をある移動局から到来する信号の接続基地局での目標受信電力、 P_{loss_d} を接続基地局と移動局間の下り回線伝搬損失の計測 (推測) 値とすると、移動局は信号送信に先だって次式により送信電力 P_{tx} を算出する。

$$P_{\text{tx}} = P_{\text{tgt}} \cdot P_{\text{loss}_d} \quad (2.20)$$

FDD(Frequency Division Duplex) システムなどでは、上下回線の伝搬経路は一般に同一ではないため、開ループ制御の制御精度は低く、いくらかの制御誤差 P_{err} が存在する。実際の上り回線の伝搬損失を P_{loss_u} とすると、開ループ送信電力制御により決定される送信電力 P_{tx} は、

$$P_{\text{tx}} = P_{\text{tgt}} \cdot P_{\text{loss}_u} \cdot P_{\text{err}} \quad (2.21)$$

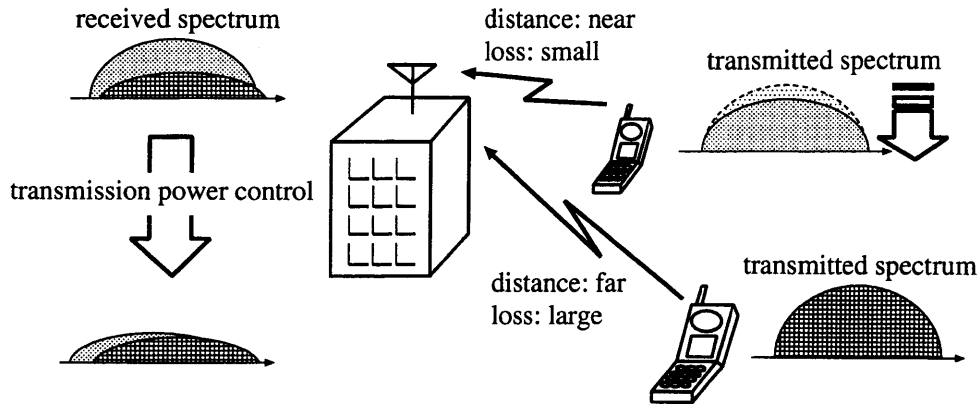


図 2.8: 遠近問題と送信電力制御

と書換えることができる。ゆえに、基地局で実際に受信される信号の受信電力 P_{rx} は、

$$P_{rx} = P_{tgt} \cdot P_{err} \quad (2.22)$$

となる。通常、目標受信電力 P_{tgt} は同じ基地局に接続されている全ての移動局で一定に設定される。

閉ループ送信電力制御

閉ループ送信電力制御では上下回線の使用周波数帯域の違いによる制御誤差が存在した。この影響を小さくするために、閉ループ送信電力制御が実施される。

閉ループ送信電力制御では、基地局が移動局の送信した信号の受信電力および平均ビットエネルギー対干渉電力密度 (E_b/I_0) を測定する。平均 E_b/I_0 は受信信号の誤り特性に最も影響を与えるパラメータである。測定された E_b/I_0 が所望値に対し低い / 高いかにより、基地局は移動局の送信電力の上昇 / 減少の指示を示すコマンドを下り回線を通じて送信する。移動局はコマンドの内容に従い、送信電力の制御を実施する。この場合の電力の制御幅は、1.0 [dB] 程度が一般である。

セルラ環境ではマルチパスフェージングにより受信信号が変動するため、さらに各々の移動局からの信号の誤り率を測定して、その結果により E_b/I_0 の所望値を移動局毎に制御するアウトループ制御と呼ばれる送信電力制御を併用するのが一般的である。

閉ループ送信電力制御の制御誤差は、1.5 ~ 2.1 [dB] 程度であると言われており、実際に IS-95(cdmaOne) システムにおいて実験的に求めた値 (1.5 ~ 2.5 [dB] [14]) とほぼ一致している。

2.3.6 CDMA セラシステムのチャンネル容量

チャンネル容量は、ユーザが同時に使い得る最大のチャンネル数を表す。FDMA 方式や TDMA 方式の場合、チャンネル容量の概念が明確であり、与えられたチャンネル容量内で通信需要に増減があっても、それが通信品質に影響しないのが通常である。しかし、CDMA 方式ではチャンネル容量の概念が明確でなく、通信需要の多寡が品質に影響を与える。すなわち、CDMA 方式においては通信品質の劣化のみによってチャンネル容量が決定される。ここでは、この点を考慮して、回線交換型 CDMA セラシステムの上り回線のチャンネル容量について示す。

まず、シングルセルで送信電力制御が理想的に機能している場合を考える。信号を送信している移動局数が K で、着目移動局の受信信号電力が S [W] の時、平均ビットエネルギー対干渉電力密度 (E_b/I_0) は、

$$E_b/I_0 = \frac{W/R}{(K-1) + (N/S)} \quad (2.23)$$

ここで、 W はシステムに割り当てられた全帯域幅 [Hz]、 R は各チャンネルの情報伝送速度 [bits/s]、 N はシステム帯域内の熱雑音電力 [W] である。したがって、CDMA 方式のチャンネル容量は、

$$K = 1 + \frac{W/R}{E_b/I_0} - \frac{N}{S} \quad (2.24)$$

で与えられ、要求される通信品質 (E_b/I_0) で制限される。

次に、より現実に近いシステムとして、マルチセルシステムにおいて移動局にボイスアクティベーションを適用した場合を考える。CDMA セラシステムでは隣接セルでも同じ周波数帯域を使用するため、隣接セルから到来する干渉が存在する。隣接セルからの総干渉電力を I [W] とすると、マルチセルシステムの E_b/I_0 は次式で与えられる。

$$E_b/I_0 = \frac{W/R}{\sum_{i=1}^{K-1} \chi_i + (I/S) + (N/S)} \quad (2.25)$$

ここで、 χ_i は、1 会話中で音声の発生を表すランダム変数であり、確率 α で 1、確率 $(1-\alpha)$ で 0 の分布をもつ。

セルが 3 分割にセクタ化され、各セクタに存在する移動局数を K_s で、隣接セルに

においても同数の移動局が存在し、隣接セル干渉がガウス分布であるとする、 I/S の平均 $E(I/S)$ および分散 $var(I/S)$ は、

$$E(I/S) \leq 0.247K_s, \quad var(I/S) \leq 0.078K_s \quad (2.26)$$

となる [15]。また、ビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) 10^{-3} が $E_b/I_0 = 5$ で得られるとする。BER が 10^{-3} を越えない確率を P とすると、システムの不稼働率 $(1 - P)$ は次式で表すことができる。

$$1 - P = Pr(BER > 10^{-3}) = Pr\left(\sum_{i=1}^{K_s-1} \chi_i + I/S > \delta\right) \quad (2.27)$$

ここで、

$$\delta = \frac{W/R}{E_b/I_0} - \frac{N}{S}, \quad E_b/I_0 = 5 \quad (2.28)$$

である。 χ_i は二項分布のランダム変数、 I/S は平均、分散が式 (2.26) で与えられるガウス変数であるので、式 (2.27) は、

$$\begin{aligned} 1 - P &= \sum_{k=0}^{K_s-1} Pr(I/S > \delta - k | \sum \chi_i = k) Pr(\sum \chi_i = k) \\ &= \sum_{k=0}^{K_s-1} \binom{K_s-1}{k} \alpha^k (1-\alpha)^{K_s-1-k} \cdot Q\left(\frac{\delta - k - 0.247K_s}{\sqrt{0.078K_s}}\right) \end{aligned} \quad (2.29)$$

となる。

音声有音率 $\alpha=3/8$, $\delta=30$ の場合の移動局数 K_s に対する $(1 - P)$ を示したのが、図 2.9 の左端の曲線である [15]。右端の曲線は隣接セル干渉がないシングルセル ($I=0$) の場合の特性である。また、その中間の曲線は、隣接セルの移動局数が着目セルの $1/2$ および $1/4$ の場合を示している。図 2.9 から、サービス限界の通信品質が 10^{-3} の BER である時、この品質を 99% の時間で保証できるチャンネル容量は、隣接セルの移動局数が着目セルと同じ時セクタあたり 36 回線となる。隣接セルの移動局数が少ない場合、チャンネル容量は増加する (例えば、 $1/2$ の時セクタあたり 44 回線)。

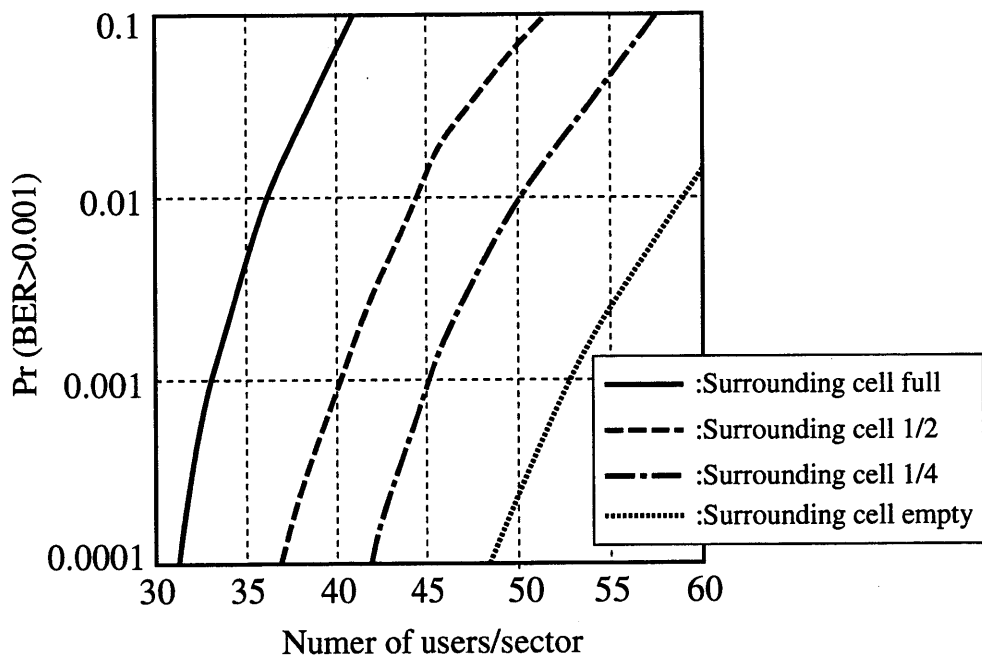


図 2.9: 上り回線のセクタ当りのチャンネル容量 ($W = 1.25$ MHz, $R = 8$ kb/s, voice activity = $3/8$)

2.4 まとめ

本章では、CDMA方式を用いたセルラ移動通信システムに関する基礎的事項についてまとめた。

回線交換型の移動通信システムのシステム構成技術なかで最も重要なセルラ方式について述べ、CDMA方式について他の多元接続方式との比較、スペクトル拡散変調およびCDMAセルラ方式について述べた。また、CDMA方式におけるビット誤り率、CDMAセルラシステムのシステム容量を導出した。

参考文献

- [1] 中島 信生, “セル構成技術の進展～マイクロセル化に向けて～,” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.1, no.2, pp.21-29, 1993 年 10 月.
- [2] 桑原 守二 監修, デジタル移動通信, 科学新聞社, 1992 年.
- [3] 古谷 之綱, “無線回線制御技術,” 電子情報通信学会誌, vol.73, no.8, pp.819-823, 1990 年 8 月.
- [4] T. S. Rappaport, *Wireless communications*, Prentice Hall, 1996.
- [5] 奥村 善久, 進士 昌明 監修, 移動通信の基礎, 電子情報通信学会, 1986 年.
- [6] 田中 良一, やさしいデジタル移動通信, 電気通信協会, 1993 年.
- [7] 笹岡 秀一 編, 移動通信, オーム社, 1998 年.
- [8] 古谷 之綱, 赤岩 芳彦, “自律分散チャネル割当て方式の提案 チャネル棲み分け法,” 信学全大, 2314, 1986 年.
- [9] 金井 敏仁, “マイクロセル移動通信システムにおける自律分散ダイナミックチャネル割当て方式 (ARP),” 電子情報通信学技術研究報告, RCS91-32, 1991.
- [10] 小川 明 監修, CDMA 方式と次世代移動体通信システム, トリケップス, 1995 年
- [11] 横山 光雄, スペクトル拡散通信システム, 科学技術出版社, 1988 年.
- [12] R. Prasad, *CDMA for wireless personal communications*, Artech House, 1996.
- [13] A. J. Viterbi, *CDMA principle of spread spectrum communication*, Addison Wesley, 1995.
- [14] R. Padovani, “Reverse link performance of IS-95 based cellular systems,” *IEEE Personal Communications*, vol.1, no.3, pp.28-34, Third Quater 1994.

- [15] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley III, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.2, pp.303–312, May 1991.

第 3 章

無線パケット通信における制御方式

3.1 はじめに

本章では、無線回線を通信媒体としたパケット通信に関する事項についてまとめる。まず最初に、回線交換方式とパケット交換方式の概要について述べる。次に、無線パケット通信のアクセス制御技術について、最も基本的なチャンネルアクセス制御方式である ALOHA 方式、および無線パケット通信において音声通信を可能とする PRMA (Packet Reservation Multiple Access) 方式について簡単に述べ、その基本特性を示す。ここで述べる ALOHA 方式および PRMA 方式は狭帯域通信環境で動作するものを対象とする。また、実際の無線チャンネルにおける性能への影響として、低速フェージングおよび捕捉効果を考慮した場合について述べる。最後に、本研究において制御の対象として取り扱う送信許可確率や CDMA セルラパケット通信での送信電力制御について簡単に言及する。

3.2 回線交換方式とパケット交換方式

通信システムの交換方式には、回線交換方式とパケット交換方式の 2 種類がある [1]-[3]。回線交換方式は、音声通信のように情報が連続的に発生する通信に適しており、パケット交換方式はデータ通信のように情報発生が離散的な通信に適している。

3.2.1 回線交換方式

回線交換方式は、通信に先立ち通信チャンネルの確保を行ない、通信中はそのチャンネルを占有する交換方式である。回線交換方式の伝送路は、通常、一定時間周期のフレーム上に複数の通信チャンネルを多重化した周期多重形式をとっており、各通信チャンネルはフレーム上の決まった位置に決まったビット数の情報信号で構成される。各通信チャンネルの識別はフレーム上の時間位置で行なわれ、このような多重化方式を position mul-

tiplexing と言うこともある。デジタル回線交換では、このように多重化されて入力される複数のデジタル伝送路上の任意の通信チャンネルを、出力側の任意の伝送路の任意のチャンネルに交換するものである。各端末は、通信開始時に通信チャンネルを要求し、割り当てられたチャンネルに対して通信終了まで毎フレーム情報を載せて通信を行なう。回線交換方式では、各端末に対し一定のネットワークリソースが物理的かつ固定的に確保されているため、即時性が保証されておりネットワーク内で情報が消滅してしまうことはない。その反面、情報伝送速度は伝送路のフレーム構成に依存するために固定であり、また、伝送路の持つ通信チャンネル数以上の通信の要求があった場合にはその通信はブロックされる。

3.2.2 パケット交換方式

パケット交換方式では、端末は情報が存在する時のみにその情報量に適した最適な長さのパケットを構成し伝送路に送信する。このため、情報源の速度やトラフィック特性に対する自由度の高い通信を行なうことが可能になる。パケットの長さは可変長であり、多種多様な端末から送信されたパケットは伝送路で多重化されるため、交換に際してパケットの切れ目を識別することが必要になる。パケットの切れ目の識別法は、ユニークなパターン (例えば、01111110) をフラグとして挿入する方法が一般的である。フラグの検出を行ない、その直後からパケットが始まるとして送受信される。多重化された伝送路上でのチャンネル識別はパケットのヘッダ (label ともいう) によって行なわれるため、パケット多重化を label multiplexing と言うこともある。パケット交換は、このようにして多重化されたパケットをそのヘッダの情報を手がかりに宛先に応じて振り分け、中継しながら最終端末に伝達するものである。パケット交換は蓄積型の交換方式であるため、伝送路上で発生する伝送誤りを検出し、再送することにより信頼性の高い通信を実現することができる。また、通信端末間で伝送速度や伝送制御手順を合わせておく必要がない。一方、常に蓄積交換機が介在するため、伝送遅延が大きく即時性の要求される通信には不適である。また、各端末に対しネットワークリソースが固定的に確保されているわけではないので、ネットワーク内の輻輳によりパケットが消滅してしまう現象が本質的には避けられない。

3.3 チャンネルアクセス制御方式

パケット交換方式が初めて無線通信に適用されたのは、ハワイ大学の ALOHA システムである。ALOHA システムは、島々に点在する端末を無線通信によってホストコ

ンピュータに接続し，これらの中でタイムシェアリングを実現することを目標に開発された．特徴的なのは，それまでポイント－ポイント接続を基本としていたパケット交換に加え，端末間での無線チャネルの共用やブロードキャストの概念が ALOHA システムに導入されていたことである．

端末間での無線チャネルの共用を制御する技術がチャネルアクセス制御技術であり，ALOHA システムでの方式 (ALOHA 方式) が無線パケット通信におけるチャネルアクセス制御方式の最も基本的な方式となっている．チャネルアクセス制御方式は，ランダムアクセス (コンテンション) 方式と予約 (ノンコンテンション) 方式に大別される．

3.3.1 ALOHA 方式

ALOHA 方式はランダムアクセス方式の 1 つであり，パケットの送信に先だって帯域 (チャネル) の割当てを行なわない方式である．伝送路がスロットと呼ばれる時間構造を持たない pure ALOHA 方式と，時間構造を持つ slotted ALOHA 方式の 2 方式に大別される [4],[5]．

pure ALOHA 方式

pure ALOHA 方式は，伝送するパケットが発生すると各端末が直ちにパケットの送信を開始する方式である．端末は，他の端末が送信しているか否かによって送信開始時刻を送らせることがないため，送受信の制御が極めて簡単である半面，他端末のパケットと衝突する可能性が高いという欠点が存在する．

あるパケットに着目し，そのパケットの伝送が成功する条件を考える．固定長のパケットを考えパケット長を T_p ，そのパケットの送信開始時刻を t_s とすると，時刻 $t_s - T_p$ から t_s までの間に他のパケットの送信があると，着目しているパケットは既に送信されている他パケットと衝突する．また，時刻 t_s から $t_s + T_p$ の間に他のパケット送信が開始されても，着目パケットは衝突を受けることになる (図 3.1)．すなわち，あるパケットの伝送が成功するためには，送信開始時刻の前後 T_p の間 (合計 $2T_p$ の間) に，他のパケットが送信されないことが条件となり，この確率を P_{sPA} とする．

パケットが平均 λ (パケット / 秒) のポアソン過程に従って発生するものとする，時間間隔 τ に k 個のパケットが発生する確率は，

$$P(k, \tau) = e^{-\lambda\tau} \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} \quad (3.1)$$

である．したがって，パケットを平均 λ で送出したときの pure ALOHA 方式のパケッ

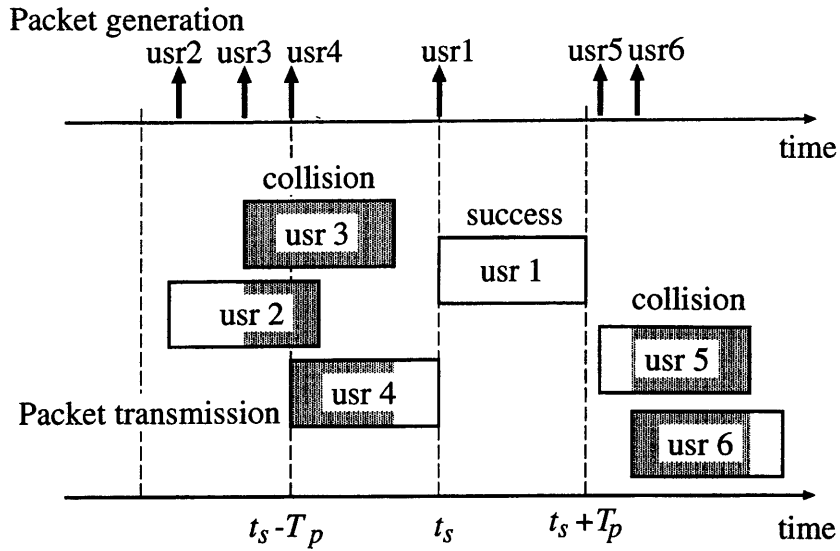


図 3.1: pure ALOHA 方式によるパケット送信

ト伝送成功確率 P_{sPA} は,

$$P_{sPA} = P(0, 2T_p) = e^{-2\lambda T_p} \quad (3.2)$$

となる。スループット S_{PA} をパケット長時間における伝送に成功した平均パケット数と定義すると、平均トラヒック量と伝送成功確率 P_{sPA} の積で求めることができる。

$$S_{PA} = \lambda T_p P_{sPA} = \lambda T_p e^{-2\lambda T_p} = G e^{-2G} \quad [\text{packets}/T_p] \quad (3.3)$$

ここで、 G は $G = \lambda T_p$ で与えられる平均トラヒック量である。最大スループット S_{\max} は、 S を G で微分し、 $dS/dG = 0$ とおくことにより求めることができる。

$$\frac{dS_{PA}}{dG} = e^{-2G} - 2G e^{-2G} = 0 \quad (3.4)$$

したがって、pure ALOHA 方式の最大スループット $S_{\max PA}$ は $G = 1/2$ の時に

$$S_{\max PA} = \frac{1}{2e} = 0.1839 \quad [\text{packets}/T_p] \quad (3.5)$$

と求められる。

slotted ALOHA 方式

pure ALOHA 方式は伝送路が時間構造を持たないため、パケット送信は任意の時間に開始される。slotted ALOHA 方式は、伝送路がスロットと呼ばれる時間構造を持ち、全てのパケット送信がスロットの先頭に同期して開始される。各端末はパケット送信に際し同期制御が必要となるが、基地局から放送されるパイロット信号などを基準にして、基地局と端末の同期を実現する。通常、スロット長はパケット長に等しい(厳密に言えば、同期ずれが隣接スロットに与える影響を低減するガードタイム分だけパケット長より大きい)。端末が他の端末のパケット送信を考慮せずに独自にパケットの送信を開始する点では、pure ALOHA 方式と同様である。パケットがスロットに同期して送信されるので、衝突の場合はパケットが完全に重なることになる。pure ALOHA 方式のような部分的なパケットの衝突は発生しないため、パケットの衝突確率は pure ALOHA 方式に比べて小さくなる。

slotted ALOHA 方式において、パケットの伝送が成功する条件を考える。slotted ALOHA 方式では、あるスロットに到着したパケットは次のスロットで送信される。あるスロットに到着したパケットがそのシステムで1個の場合、次のスロットで送信されるパケットは1個だけなので衝突は発生せず伝送は成功する。2個以上のパケットが同一スロットに到着した場合、次のスロットでその全てが送信されるので、衝突が発生し伝送は失敗に終わる(図 3.1)。すなわち、パケットの伝送が成功するためには、スロット長の間 T_p に1パケットだけ到着することが条件となる。

pure ALOHA 方式と同様に考えると、パケット伝送が成功する確率 P_{sSA} は式 (3.1) において $k = 0, \tau = T_p$ の場合であるので、

$$P_{sSA} = P(0, T_p) = e^{-\lambda T_p} \quad (3.6)$$

となる。これより、slotted ALOHA 方式のスループット S_{SA} は、

$$S_{SA} = \lambda T_p P_{sSA} = \lambda T_p e^{-\lambda T_p} = G e^{-G} \quad [\text{packets}/T_p] \quad (3.7)$$

であり、最大スループット $S_{\max SA}$ は $G = 1$ の時に

$$S_{\max SA} = \frac{1}{e} = 0.3679 \quad [\text{packets}/T_p] \quad (3.8)$$

と求められる。

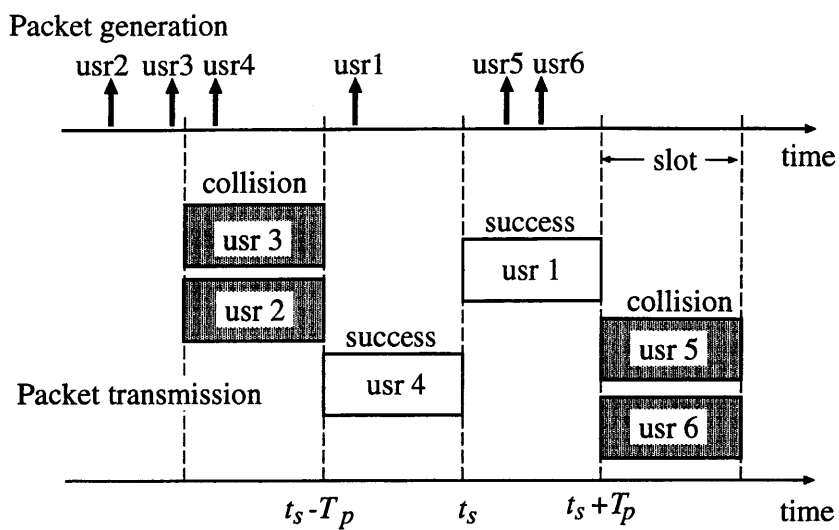


図 3.2: slotted ALOHA 方式によるパケット送信

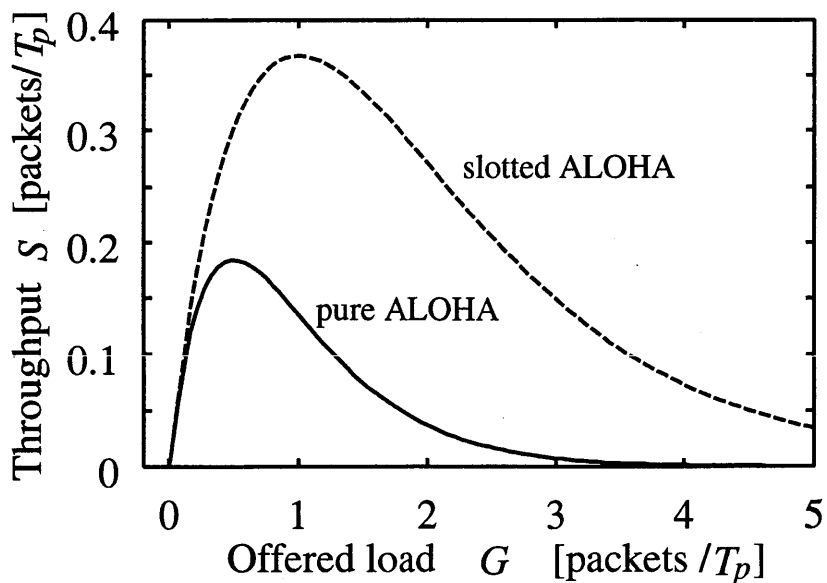


図 3.3: ALOHA 方式のスループット特性

数値例

図 3.3に、pure ALOHA 方式および slotted ALOHA 方式のスループット特性を示す。slotted ALOHA 方式の特性は、pure ALOHA 方式より優れた特性を示しており、最大スループットで 2 倍の値を得ることができる。

3.3.2 PRMA 方式

PRMA (Packet Reservation Multiple Access) 方式は、音声通信のように情報が周期的に発生しかつ伝送遅延に対する要求が厳しい通信を、無線パケット通信システムにおいてサポートするために提案されたアクセス方式である [6]。

音声通信の収容を目的としているため、PRMA 方式の伝送路は、音声レートに適合した周期でフレームが構成される。各フレームのタイムスロットは、有音状態にある音声端末により動的予約され、予約を持つ端末は TDMA 方式と同じ方法で伝送路を共有する。PRMA 方式は、R-ALOHA (Reservation ALOHA) 方式 [7] と類似した方式であるが、チャンネルの混雑が原因で発生からある時間以上経過しても送信できなかったパケットが端末により廃棄される点で大きく異なる。

PRMA 方式の伝送路は複数のタイムスロットでフレームが構成されており、端末は各スロットの状態 (“予約” or “空き”) を基地局からの下り回線により認識している (図 3.4)。各端末は音声の有音 / 無音識別機能を有しており、有音状態になった端末は、“空き” スロットに対してパケット (音声情報を含む) を slotted ALOHA 方式で送信する。この時、同様の状態にある端末からのパケットと競合する。伝送に成功した場合、端末はそのスロットを予約したことになり、以後のスロットでは他端末と競合することはない。有音区間の終わりでは、端末が “予約” スロットに何も送信しないことにより、予約の解除が行なわれる。“空き” スロットへのパケットの送信が不成功に終わった場合、端末は後続のスロットに確率 p でパケットを再送する。この確率 p は、送信許可確率 (transmit permission probability) と呼ばれている。再送は、パケット送信が成功し “予約” が得られるまで継続される。“空き” スロットを競合している間、端末はパケットを FIFO (First-In First-Out) バッファに格納する。バッファサイズは要求される遅延特性によるが、音声通信の場合 32ms 程度の遅延が許容されるので、フレーム周期が 16ms のときバッファサイズは 2 となる。バッファが満状態の時に新たなパケットが生起すると、バッファ内の最古のパケットが廃棄される。PRMA 方式の場合、パケット廃棄は音声区間の最初の領域で発生するため、音声品質に与える影響は少ない [8]。

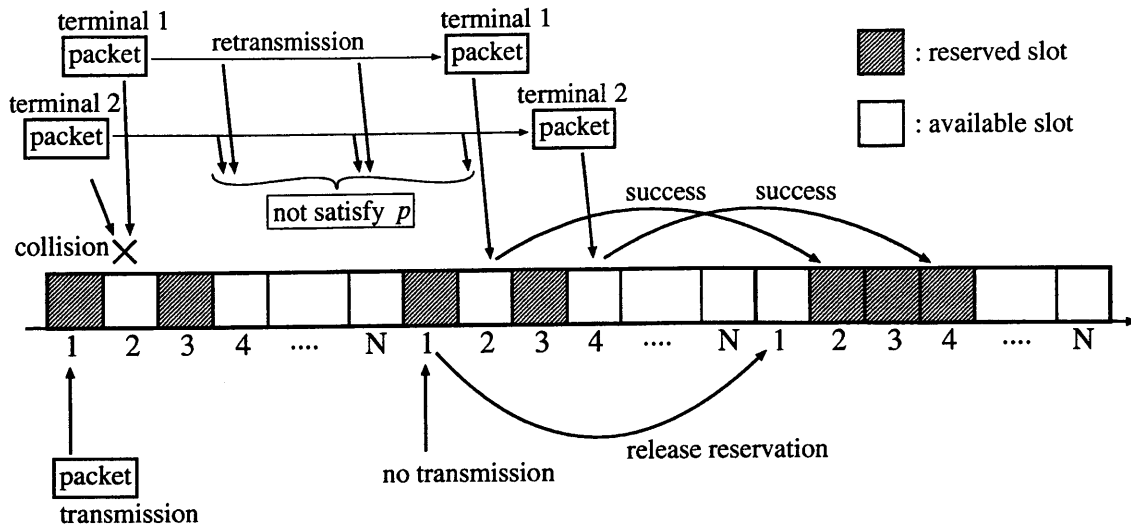


図 3.4: PRMA アルゴリズム

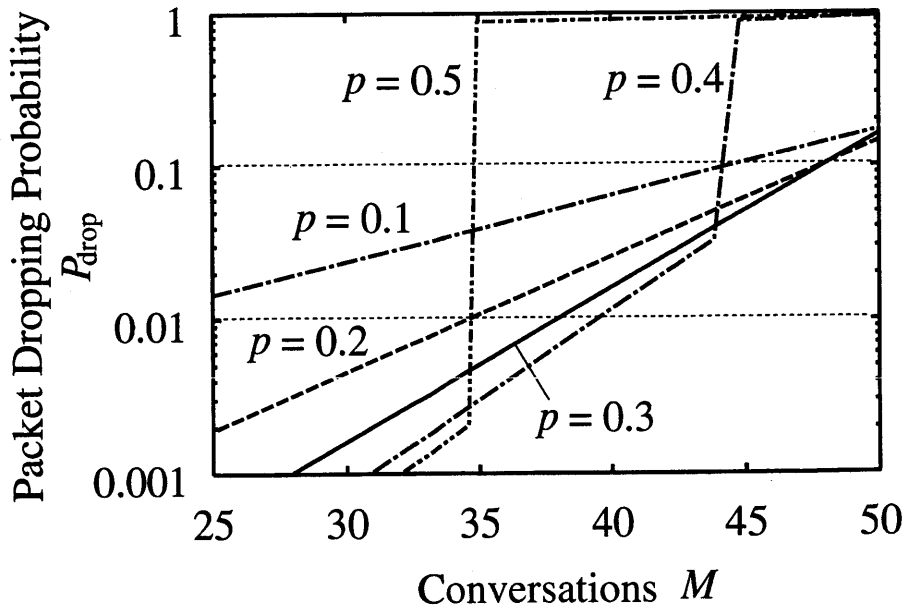


図 3.5: PRMA 方式のパケット廃棄率特性

PRMA 方式の packets 廃棄率特性の一例を図 3.5 に示す [9]。図 3.5 は、PRMA チャネルレート 720kb/s、音声レート 32kb/s、PRMA フレーム周期 0.016s、許容遅延時間 0.032s で、音声モデルに 3 状態モデル (有音区間 1.00s、無音区間 1.35s、ミニ有音区間 0.275s、ミニ無音区間 0.05s) を用いた時の解析結果である。packets 廃棄率の解析的導出については、文献 [9] に詳しく述べられている。

音声品質が保持できる packets 廃棄率 1% 以下 [8],[10] を満たすユーザ数は、送信許可確率 $p = 0.3$ のとき 38 であり、この値が上記の PRMA システムの最大収容可能音声ユーザ数である。同様のフレーム構造をもつ回線交換型 TDMA システムの最大収容可能ユーザ数は 20 であるため、PRMA システムは音声ユーザに関して TDMA システムの約 2 倍の回線容量を持つ。

3.3.3 送信許可確率制御

図 3.5 に示されているように、PRMA システムの packets 廃棄率特性は、送信許可確率 p によって変化している。また、同時通信ユーザ数により、packets 廃棄率を最小にする送信許可確率が異なることがわかる。このように、packets 通信システムでは送信許可確率によりそのシステム特性が大きく変化する。

slotted ALOHA システムにおいて、送信許可確率により端末の packets 送信の制御を行なう場合を考える。送信許可確率を適用した場合、実際に伝送路に送信されるトラフィック量 G_a は、生起 packets 数と送信許可確率の積と考えられる。システムに印加されるトラフィック量が G [packets/ T_p] の時、 G_a は、

$$G_a = p \cdot G \quad (3.9)$$

となる。したがって、slotted ALOHA システムに送信許可確率を適用した場合のスループット S_{SA_p} は、

$$S_{SA_p} = G_a \cdot e^{-G_a} = p \cdot G \cdot e^{-(p \cdot G)} \quad [\text{packets}/T_p] \quad (3.10)$$

で与えられる。

送信許可確率を適用した場合の slotted ALOHA システムのスループット特性の一例を図 3.6 に示す。図 3.6 には、送信許可確率を $p = 0.3, 0.5, 0.8$ と変化した場合の特性を示している。送信許可確率を適用することにより、高負荷領域のスループット特性が改善している。一方、低負荷領域においては特性劣化が見られる。しかしながら、

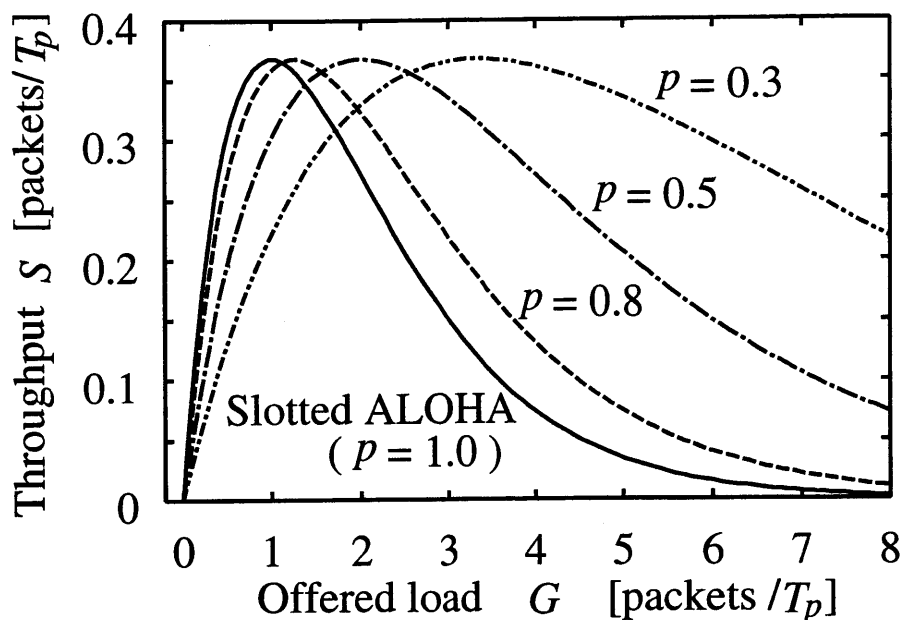


図 3.6: slotted ALOHA 方式での送信許可確率の影響

slotted ALOHA システムでは、送信許可確率により伝送路に送出されるパケット数を適切に制御することで、全体的なシステム特性が改善できる可能性があると言える。

3.3.4 実際の無線チャネルにおける性能

本章ではこれまで、無線チャネルを誤りのない全く理想的なチャネルとして捉えてきたが、実際の無線通信では、電界強度が距離やフェージングによって影響を受け、それが原因で誤りが発生したりする。したがって、チャネルアクセス制御方式を考える上でこれらによる影響は無視することはできない重要な事項である。ここでは、無線チャネルに対して、より実際に近い仮定を設けた場合のチャネルアクセス制御方式の特性を示す。

低速フェージングの影響

全く理想的な無線チャネルを仮定した場合の pure ALOHA 方式のスループット S_{PA} は次式で表すことができた (第 3.3.1 章)。

$$S_{PA} = Ge^{-2G} \quad (3.11)$$

ここでは、理想的なチャネルに対して、誤りが発生するようなチャネルを考える。ただし、パケットの衝突の仮定に関しては理想的なチャネルと同様とする。一般に、

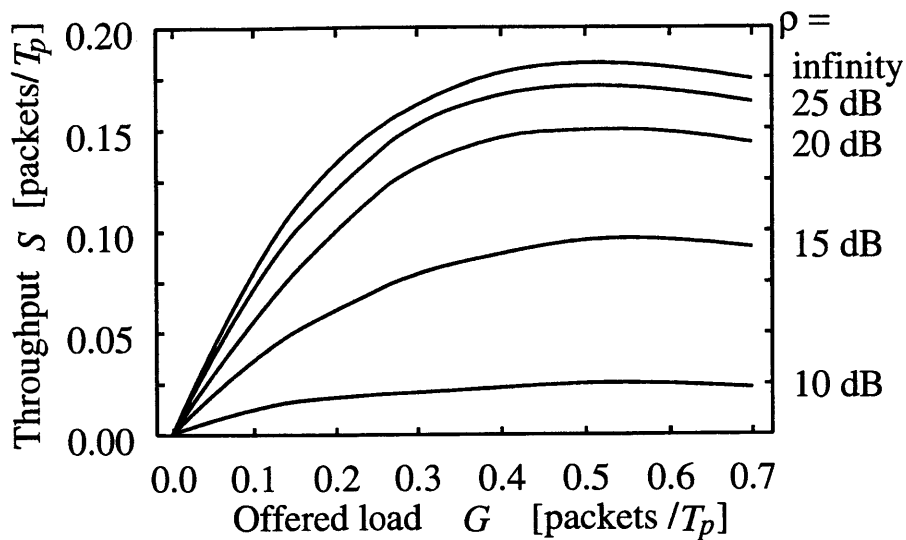


図 3.7: 低速フェージング下での pure ALOHA 方式のスループット特性 (CPFSK 方式, パケット長 1000bits, 応用パケット長 100bits)

無線通信ではビット誤り率がチャンネルの誤りの指標として用いられるが, ここではその結果として発生するパケットの損失の確率を導入する. パケットは, フェージングに起因する電界強度の変動によるビット誤りによって P_e の確率で失われるとする. また, 受信元から送信元への応答信号 (パケット) も P_{ea} の確率で失われるとする. この場合のスループットは次のように式で表すことができる [11].

$$S = Ge^{-2G}(1 - P_e)(1 - P_{ea}) \quad (3.12)$$

式 (3.12) から, パケットが失われる確率が増加するとスループット特性が劣化することがわかる.

実際の無線通信におけるビット誤り率は, フェージング等の無線チャンネルの電波伝搬状況, 変調方式, ダイバーシチなど物理層レベルの通信方式や誤り訂正符号などに影響される. したがって, 確率 P_e や P_{ea} もこれらの条件に依存することになる.

受信電力から信号対雑音電力比 ρ を求め, これと変調方式によって理論的なビット誤り率が決定される. さらに確率 P_e や P_{ea} は, 求めたビット誤り率とパケット長や誤り訂正符号により決定される. フェージングにより受信電力がパケット長に対してゆっくりと変動する (低速フェージング) 場合の pure ALOHA 方式のスループット特性の一例を図 3.7[11] に示す. 理想的な無線チャンネルでのパケット損失はパケットの衝突のみであったが, 図では信号対雑音電力比 ρ が低くなると, ビット誤り発生によるパケッ

ト損失が増加し、スループット特性が悪化する。この傾向は pure ALOHA 方式に限らず、他のチャネルアクセス制御方式でも同様に存在する。

捕捉効果

理想的な無線チャネルでパケットが衝突した場合、衝突に関与したパケットは全て失われると仮定した。二つのパケットの衝突を考えた場合、受信局における各々のパケットの電力が同程度であれば、この仮定は妥当である。ところが、実際の無線チャネルでは、衝突が生じてもパケットが失われずに正常に受信される場合があることが知られている。これは、受信電力の大きいパケットが小さいパケットに打ち勝つためであり、電力の小さいパケットは大きいパケットに対して雑音として作用する。このように、衝突が生じてもパケットが破壊されずに受信される現象を捕捉 (capture) と呼ぶ。捕捉は性能上の改善効果をもたらし、このような効果を捕捉効果 (capture effect) [12]-[14] と呼ぶ。

ある時間に複数のパケットが受信点に到来している場合、受信されるべきパケットを希望パケット、その他のパケットを干渉パケットと考える。希望パケットが正しく受信できるか否かは、干渉パケットとの電力比に依存する。ここでは、希望パケットと干渉パケットの受信電力比があるスレッシュホールド値 (捕捉比) Z_0 以上の場合に希望パケットに対して捕捉効果が生ずると仮定する。実際の通信における捕捉比 Z_0 は、変復調方式などによって決定される。また、希望パケットと干渉パケットの受信電力比は、希望パケットの送信元に対して干渉パケットの送信元がどのような位置に分布しているかに依存する。

図 3.8 [13] に捕捉効果を考慮した場合の pure ALOHA 方式のスループット特性の一例を示す。捕捉比 Z_0 が大きいとパケットの衝突はパケット損失を意味するため、理想的なチャネルの特性に近くなる。一方、捕捉比 Z_0 が小さい場合、捕捉効果が生じてパケットが衝突しても正しく受信される場合が発生し、スループット特性を改善させることができる。

3.4 CDMA セルラパケットシステムでの送信電力制御

CDMA セルラシステムでは遠近問題の軽減のために送信電力制御が不可欠とされている。無線パケットシステムにおいては、捕捉効果によるスループット改善効果が大きい。送信電力制御により各パケットの受信電力が均一化されると捕捉効果が得られなくなる。CDMA セルラパケットシステムでの捕捉効果による最大スループット

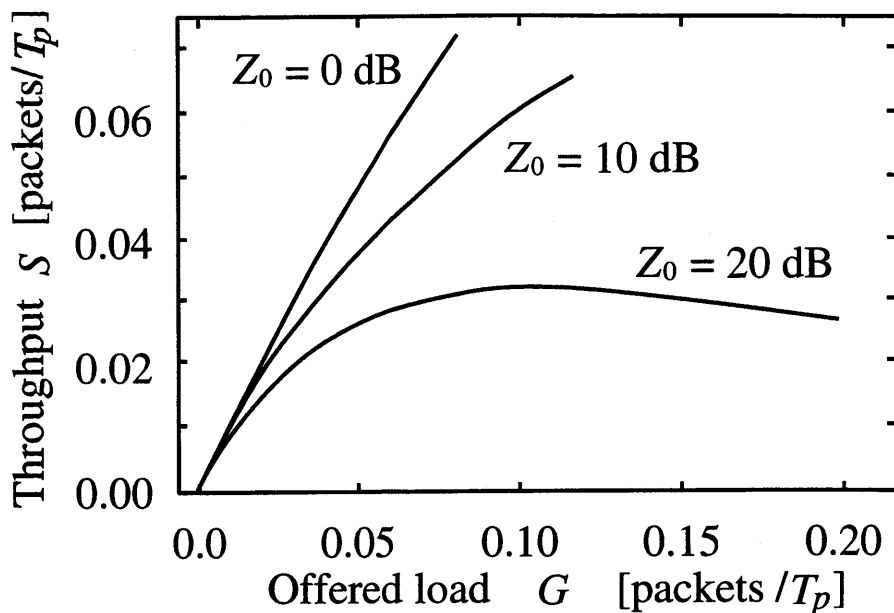


図 3.8: 捕捉効果を考慮した場合の pure ALOHA 方式のスループット特性

ト値の改善効果と送信電力制御によるそれとを比較すると後者による改善効果の方が大きい [15]。また，送信電力制御を実施した場合，受信局から距離的に遠い送信局からのパケットが受信されにくくなるといった，送信局間の不公平性の問題も排除される。したがって，周波数資源有効利用と公平性の観点から，CDMA セルラパケットシステムにおいても送信電力制御を実施すべきであると言える。

回線交換を用いた CDMA セルラシステムでは，開ループと閉ループの 2 種類の方式を併用して精度の高い送信電力制御を実現している [16],[17]。閉ループ制御方式は，回線交換システムのように各移動局に対する上下回線が共に常時存在することを前提にした方式であり，送信電力制御のための制御コマンドを下り回線に重畳して伝送している。

CDMA セルラパケットシステム，特にアクセスプロトコルに slotted-ALOHA などのランダムアクセス方式を採用したシステムでは，各移動局に個別の下り回線が常時存在するとは限らないため，各々の移動局に対する制御コマンドの受渡しが難しい。このため，slotted-ALOHA を採用した CDMA セルラパケットシステムでは閉ループ制御が困難であると考えられ，開ループ送信電力制御のみを実施する。

3.5 まとめ

本章では，無線回線を通信媒体としたパケット通信に関する事項についてまとめた。

回線交換およびパケット交換方式の概要，無線パケット通信のアクセス制御方式である ALOHA 方式，PRMA 方式について簡単にまとめ，その基本特性を示した。また，実際の無線チャネルにおける性能への影響として，低速フェージングおよび捕捉効果を考慮した場合について簡単に述べ，本研究において取り扱う重要な制御技術となる送信電力制御および送信許可確率制御について述べた。

参考文献

- [1] 荒谷 孝夫, 通信ネットワーク, 東京電機大学, 1997 年
- [2] 電子情報通信学会 編, 新版データ通信, コロナ社, 1979 年
- [3] 木村 英俊, 広崎 膨太郎, デジタル通信, 丸善, 1991 年.
- [4] 松下 温 監修, 無線 LAN 技術講座, ソフト・リサーチ・センター, 1994 年.
- [5] L. Kleinrock and F. A. Tobagi, "Packet switching in radio channels: part I - carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-23, no.12, pp.1400-1416, Dec. 1975.
- [6] D. J. Goodman, R. A. Valenzuela, K. T. Gayliard, and B. Ramamurthi, "Packet reservation multiple access for local wireless communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol.37, no.8, pp.885-890, Aug. 1989.
- [7] S. Tasaka, "Stability and performance of the R-ALOHA packet broadcast system," *IEEE Trans. Comput.*, vol.C-32, no.8, pp.717-726, Aug. 1983.
- [8] O. J. Wasen, D. J. Goodman, C. A. Dvorak, and H. G. Page, "The effect of waveform substitution on the quality of PCM packet communications," *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing*, vol.36, no.3, pp.342-348, Mar. 1988.
- [9] S. Nanda, D. J. Goodman, and U. Timor, "Performance of PRMA: A packet voice protocol for cellular systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.3, pp.584-598, Aug. 1991.
- [10] J. Gruber and L. Strawczynski, "Subjective effects of variable delay and speech clipping in dynamically managed voice systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-33, no.8, pp.801-808, Aug. 1985.

- [11] J. Roberts, et al, "Packet radio performance over slow Rayleigh channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-28, no.2, pp.279-286, Feb. 1980.
- [12] C. Namislo, "Analysis of mobile radio slotted ALOHA networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.VT-33, no.3, pp.199-204, Aug. 1984.
- [13] F. Kuperbus and J. Arnbak, "Packet radio in a Rayleigh channels", *Electronics Letters*, vol.18, no.2, pp.506-507, Jul. 1982.
- [14] I. Widipangestu, A. J. Jong, and R. Prasad, "Capture probability and throughput analysis of slotted ALOHA and unslotted np-ISMA in a Rician/Rayleigh environment", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.43, no.3, pp.457-465, Aug. 1994.
- [15] 丹野 元博, 上林 真司, "移動パケット CDMA 通信における送信電力制御の効果," 1996年 電子情報通信学会 総合大会, B-374, pp.374, 1996年3月.
- [16] T. Dohi, M. Sawahashi, and F. Adachi, "Performance of SIR based power control in the presence of non-uniform traffic distribution," in *Proc. 4th IEEE ICUPC'95*, Tokyo, Japan, pp.334-338, Nov. 1995.
- [17] F. Adachi, K. Ohno, A. Higashi, T. Doi, and Y. Okumura, "Coherent multi-code DS-CDMA mobile radio access," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E79-B, no.9, pp.1316-1325, Sep. 1996.

第 4 章

CDMA セルラパケット通信におけるチャネル負荷適応型送信制御

4.1 はじめに

CDMA セルラシステムでは遠近問題が存在するため、その影響を軽減しシステム容量を増大させる目的で、送信電力制御が必須である [1]–[5]。CDMA パケット通信の上り回線においても、送信電力制御を行なうことで、最大スループットを向上させることが可能となる [6]–[10]。しかしながら、CDMA パケット通信では送信電力制御を実施した場合、チャネル負荷が大きくなるとスループット特性が急激に劣化し、送信電力制御を行わない場合の特性までも下回るといった本質的な問題点が存在する [10]。これは、基地局での受信品質が全てのパケットで等しくなるように制御されているためであり、基地局に同時に多くのパケットが到来すると、多元接続干渉が原因で全パケットの受信品質が一斉に所望の品質を満足できなくなる場合があるからである。これまでの回線交換型の移動通信システムでは、呼接続 (設定) 制御等によりトラヒック制御を簡単に行なうことが可能であるため、高チャネル負荷時の特性劣化はさほど問題にならない。移動通信においても今後、呼接続制御を行わないコネクションレスサービスの提供が想定される。ところが、このようなサービスにおいては、簡単な方法でトラヒック制御を実現することは難しく、トラヒック変動により一時的に高チャネル負荷状態に陥った場合に、従来の送信電力制御法では伝送効率が急激に低下して品質の劣化を招く。これは、システムの安定性の面で問題となり、安定性維持のために高チャネル負荷時におけるスループット特性の改善が望まれる。

CDMA パケット通信におけるトラヒック制御法の一つとして、送信確率制御法が検討されている [11]–[13]。送信確率制御法は、無効パケットが干渉にならないことや公平なサービスの提供などの利点が存在するが、システムを効率良く動作させるためには、正確な短期間トラヒックの推定が必要とされる。そのため、予約アクセスなど

比較的容易に短期間トラヒック推定が可能なシステムに適している方式と言える。特に、文献 [13] で提案されている方式では、システム性能を左右する制御パラメータがトラヒック推定値から直接導出されるため、その推定誤差はシステム性能を劣化させる直接的な要因となる。

slotted-ALOHA 方式など短期間トラヒック推定が難しいシステムにおける高チャネル負荷時の特性劣化に対しては、TDMA や FDMA など狭帯域系の無線パケット通信においてスループット特性の改善効果があると知られている受信電力差による捕捉効果 [14]–[19] が有効であると考えられる。CDMA 方式においては、基地局に到来するパケットの受信電力にいくらかの電力差が存在すれば、基地局はパケット集中時においても所要の品質を満たしている電力の大きなパケットを正しく受信することが可能となる。捕捉効果は、スループット特性の改善に寄与するが、一方で、送信位置の違うパケットの受信確率に不公平性が生ずる [20]。このように、CDMA セルラパケットシステムでは、高チャネル負荷時の特性劣化を緩和するために、パケット受信時の公平性を維持しながらも、パケット集中時において受信電力差により一部のパケットを救済することの可能な新たな送信制御法が必要であると考えられる。

本章では、アクセス制御方式に slotted-ALOHA 方式を採用した CDMA セルラパケットシステム (CDMA セルラ slotted ALOHA システム) における高チャネル負荷時の特性劣化を緩和する方法として、チャネル負荷適応型送信制御方式を提案する [21]–[27]。提案方式では、基地局が受信するパケットの受信電力の目標値である目標受信電力と拡散利得を、チャネル負荷と移動局位置により適応的に制御する。基地局は、移動局が目標受信電力を選択する際に用いる目標受信電力設定関数を設定し、この関数をチャネル負荷に応じて制御する。移動局は、接続基地局 (送信電力制御の対象となる基地局) からの距離 (例えば、パイロット信号受信電力等から推定する) に応じて、自己の送信するパケットの受信基地局での目標受信電力値を、基地局の決定した目標受信電力設定関数により選択する [21]–[24],[26]。高チャネル負荷時には、基地局からの距離が異なる移動局のパケットの目標受信電力値間の差分が大きくなるように、目標受信電力設定関数を制御する。これにより、受信電力差による捕捉効果を得る。移動局位置によるパケット受信の不公平性を改善するため、目標受信電力の制御と共に送信パケットの拡散利得の制御を実施する [25], [27]。低い目標受信電力で送信されるパケットは、大きな拡散利得が得られるように送信される。セルラ環境の無線チャネルは、距離減衰、シャドーイングおよびレイリーフェージングの影響を受ける。このような無線チャネルと不完全な送信電力制御を考慮し、セルラ環境において移動局が基地局にショートメッセージを送信する場合の提案方式の特性を評価する。

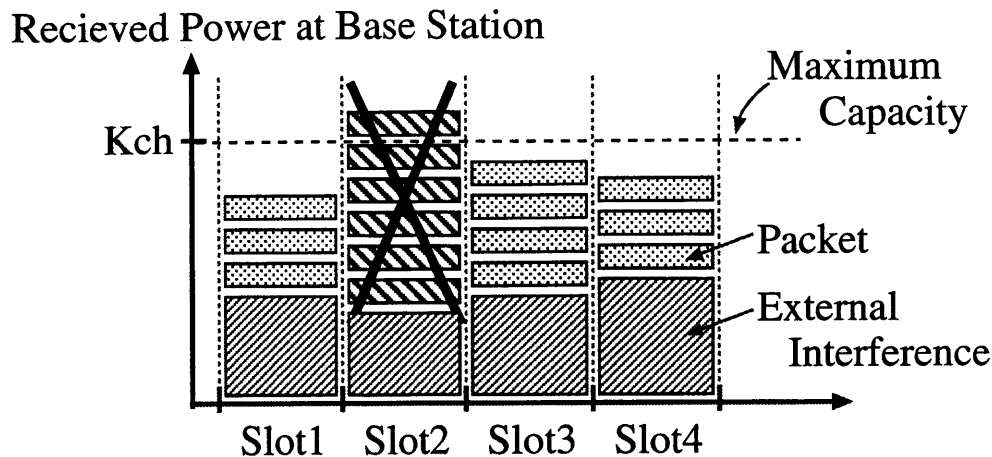


図 4.1: パケットの集中

4.2 従来型送信電力制御の問題点

CDMA パケットシステムでは、開ループ送信電力制御を用いることによりチャネルを効率良く使用できるため、最大スループットが向上する。しかしながら一方で、高チャネル負荷時にはスループット特性が急激に劣化して、送信電力制御を行なわない場合の特性までも下回る。図 4.1に示したように、スロット 2 において多数のパケットが到来して、その量が多元接続干渉で制限される限界容量を超えた場合、従来の送信電力制御方式では接続基地局 (自セルの基地局：通常パイロット信号受信電力の最も大きい基地局) における各パケットの受信電力が等しくなるように制御されるため、全パケットの受信品質が一斉に低下し、最悪の場合、全てのパケットの受信が不可能になる。これが原因で高チャネル負荷時のスループット特性が急激に劣化する。今後移動通信においてサービス提供が期待されているコネクションレスサービス等は、簡単な方法でトラフィック制御を行なうことは難しく、高チャネル負荷時におけるスループット特性の急激な低下は、システムの安定性の面で問題となる。これは、システムの品質劣化の一因となり、安定性維持のために高チャネル負荷時におけるスループット特性の改善が望まれる。

本章では、CDMA セルラ slotted ALOHA システムの上り回線における従来の送信電力制御方式の持つ問題点に焦点をあて、これを改善する送信制御方式を検討し、その伝送特性の評価を行なう。

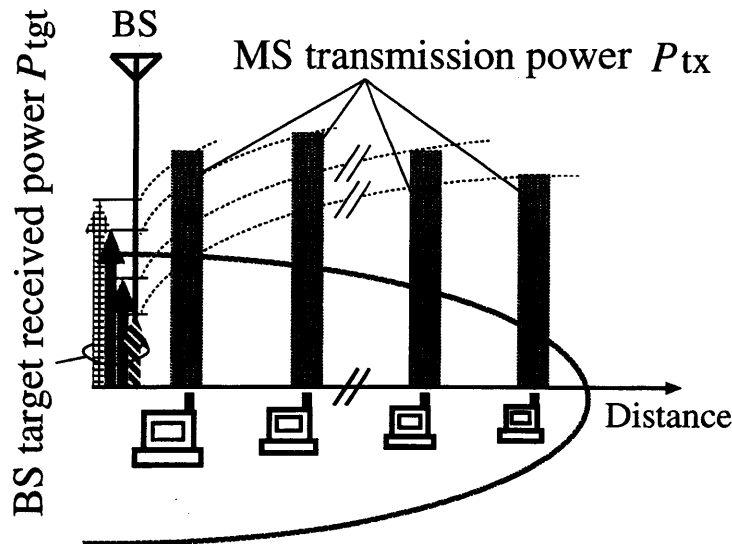


図 4.2: 適応送信電力制御

4.3 適応送信制御

ここでは、受信信号電力差による捕捉効果を利用して、システム性能を向上する方式を提案し、その伝送特性を評価する。

適応送信制御では、パケット集中時においても受信電力差により一部のパケットを救済することが可能となるため、全負荷領域で良好なスループット特性を得ることが期待できる。提案方式では、送信パケットの2つのパラメータ：目標受信電力 P_{tgt} および拡散利得 G_p が制御される。これらのパラメータは、チャネル負荷と移動局位置により、適応的に制御される。

4.3.1 適応送信電力制御 (ATPC)

図 4.2に示すように、各々の移動局は、チャネル負荷に応じて基地局が制御する目標受信電力設定関数を用いて、自己の位置に応じた目標受信電力 P_{tgt} を選択する。その後、送信パケットの送信電力を式 (2.20) で算出し、パケット送信を行なう。

目標受信電力値をチャネル負荷と移動局位置により制御することで、基地局に到来するパケットの受信電力にチャネル負荷に応じた電力差が生じる。パケット集中時においても、この受信電力差により、電力の大きい一部のパケットを救済することが可能となるため、伝送特性の改善が期待でき、従来方式の持つ問題点を改善することが可能となる。

目標受信電力値の設定

移動局の送信するパケットの目標受信電力値 P_{tgt} は、基地局が制御する目標受信電力設定関数を用いて選択される。目標受信電力設定関数は、目標受信電力値 P_{tgt} と接続基地局からの距離 d との関数であり、図 4.3 に示すような簡単な関数で与えられるものとする。図 4.3 に示すように、提案する設定関数は、次の 3 つにパラメータをもつ一次関数である。

- 1) 基準目標受信電力 P_{tgt_s} [dB];
- 2) 変曲点位置 R_{ip} ;
- 3) P_{tgt_s} と距離が R_{cell} (R_{cell} はセル半径) である移動局の P_{tgt} 間の電力差 ΔP_{tgt} [dB]

基地局からの距離が R_{ip} 以下の移動局の目標受信電力は、基準目標受信電力 P_{tgt_s} に設定され、 R_{ip} 以上の移動局の目標受信電力は、基地局からの距離に対して一定の割合 γ で減少する。 γ は次のように定義される。

$$\gamma = \frac{\Delta P_{\text{tgt}}}{R_{\text{cell}} - R_{\text{ip}}} \quad (4.1)$$

基地局は、変曲点 R_{ip} と目標受信電力の差分 ΔP_{tgt} の値をセル内の全移動局に対して周期的に報知する。これにより、移動局は自局内で目標受信電力設定関数を再構成して、自己の位置に応じた目標受信電力 P_{tgt} を算出することが可能となる。

図 4.3 に示した目標受信電力設定関数を用いた場合、基地局からの距離が d である移動局の目標受信電力 $P_{\text{tgt}}(d)$ は、

$$P_{\text{tgt}}(d) = \begin{cases} P_{\text{tgt}_s} - \gamma \cdot (d - R_{\text{ip}}) & ; d > R_{\text{ip}} \\ P_{\text{tgt}_s} & ; d \leq R_{\text{ip}} \end{cases} \quad (4.2)$$

で表すことができる。

式 (4.2) や図 4.3 が示すように、提案方式では基地局からの距離が大きくなると目標受信電力値が小さく設定されるため、セル境界付近の移動局の送信電力が抑制される。したがって付随的な効果として、提案方式は隣接セルへの干渉量を小さくすることも可能であると期待できる。

一方、各々の移動局は、何らかの手段 (例えば、パイロット信号受信電力を測定して推定する方法) で接続基地局からの距離を正確に測定できるものとする。

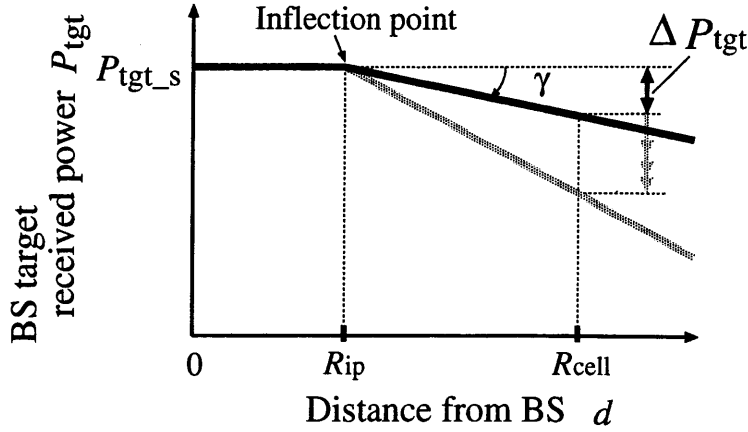


図 4.3: 目標受信電力設定関数

目標受信電力値の制御

図 4.3に示したように、目標受信電力設定関数における ΔP_{tgt} をチャネル負荷に応じて適応的に変化させることで、各パケットの目標受信電力値 P_{tgt} を制御する。図 4.4は、その制御シーケンスを表すブロック図である。基地局においてチャネル負荷を正確に知ることは困難である。したがって、提案方式ではチャネル負荷として、観測期間 T_{obs} 内に基地局で正しく受信できたパケット数 N_{rx} を考える。基地局で N_{rx} を観測して、前観測期間の N_{rx} と比較することにより ΔP_{tgt} を制御する。 $N_{\text{rx}}(t)$ を時刻 t の観測期間における受信パケット数とすると、以下に示すような制御アルゴリズムで ΔP_{tgt} を更新する。

$$\Delta P_{\text{tgt}}(t+1) = \Delta P_{\text{tgt}}(t) \cdot \beta^{S(t+1)} \quad (4.3)$$

ここで、

$$S(t+1) = \begin{cases} (-1) \cdot S(t) & ; N_{\text{rx}}(t) < N_{\text{rx}}(t-1) \\ S(t) & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.4)$$

である。式 (4.3),(4.4) において、 $\Delta P_{\text{tgt}}(t)$ は時刻 t の観測期間における ΔP_{tgt} であり、 $\Delta P_{\text{tgt}}(t+1)$ はその次の観測期間における ΔP_{tgt} である。 β は正の実数 ($\beta \geq 1.0$) をとる更新系数である。また、関数 $S(t)$ は制御の方向を表す符号関数 ($S(t) = 1$ or -1 , $S(0) = 1$) である。

以上のようなアルゴリズムによれば、 N_{rx} が減少した場合には、 $S(t)$ の値が前観測期間の反転値となり、 ΔP_{tgt} は前回の制御方向と逆方向に更新される。したがって、

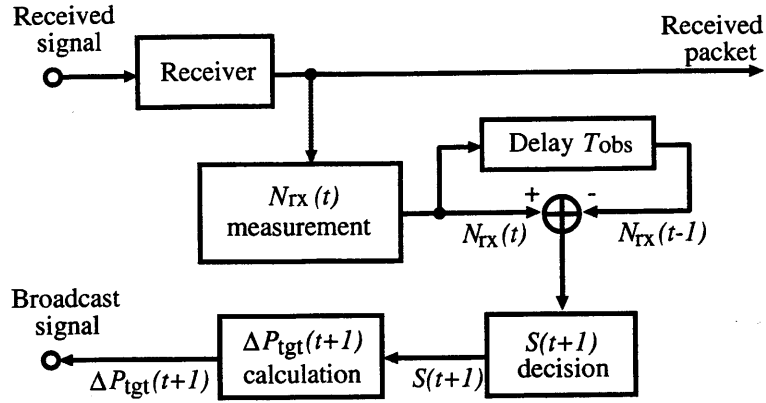


図 4.4: 目標受信電力差 ΔP_{tgt} の制御

ΔP_{tgt} は、常に N_{rx} を大きくする方向に更新される。 ΔP_{tgt} を大きい値に制御することで、捕捉効果が得やすくなる。高チャネル負荷時には、スループットを大きくするように ΔP_{tgt} を大きい値に制御する。逆に、低チャネル負荷時には、遠近問題による特性劣化を減少させるように ΔP_{tgt} を小さい値に制御される。

一方、目標受信電力設定関数を決定する他のパラメータ：変曲点 R_{ip} は、本研究では一定値で与えるものとする。また、平均トラフィックが変動した場合、 N_{rx} も変動すると考えられる。したがって、本アルゴリズムを平均トラフィック変動の激しいシステムに適用する場合は、およその平均トラフィック変動を検出する何らかの手段とともに導入する必要がある。

4.3.2 適応拡散利得制御 (APGC)

前記の送信電力制御法では、基地局から遠い移動局からのパケットは基地局における受信電力レベルが小さいため、これらのパケットを基地局で受信することが難しくなる可能性が存在する。このパケット受信の際の不公平性を軽減させるために、移動局は送信パケットの拡散利得を制御する。拡散利得制御は、送信パケットの目標受信電力に応じて実施する。低い目標受信電力で送信されるパケットは、大きな拡散利得を伴って送信される。図 4.5に示すように、送信パケットの拡散利得 G_p は次式で与えるものとする。

$$G_p = m \cdot g_p, \quad (4.5)$$

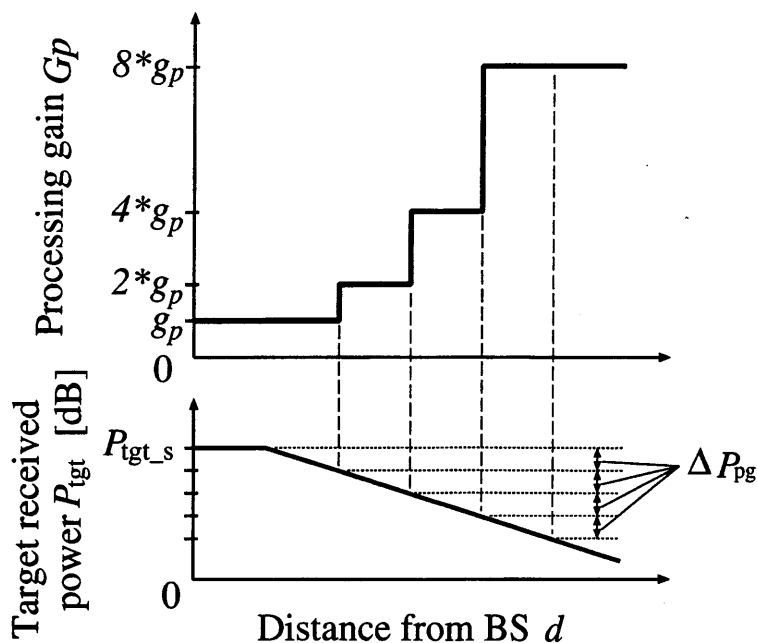


図 4.5: 適応拡散利得制御

ここで,

$$m = 2 \left\lfloor \frac{P_{\text{tgt}_s} - P_{\text{tgt}}}{\Delta P_{\text{pg}}} \right\rfloor, (1 \leq m \leq m_{\text{max}}) \quad (4.6)$$

上式において, $\lfloor x \rfloor$ は x を超えない最大の整数, g_p は目標受信電力が P_{tgt_s} であるパケットの拡散利得である. また, ΔP_{pg} は, より大きな拡散利得を使用するために必要な P_{tgt} における電力差である.

可変拡散利得でパケットが送信される時, 占有周波数帯域を一定にすると, 伝送 (シンボル) レートもまた可変となる. つまり, 大きな拡散率で拡散されるパケットは, 小さな拡散率で拡散されるパケットに比べ, 伝送レートは小さくなる. したがって, slotted-ALOHA システムにおいて, I を拡散利得 g_p で拡散した時のパケット当りの情報量 [bits], H をヘッダ長 [bits] とすると, 拡散利得 G_p のパケットで X ビットの情報を送信するために必要なパケット数 $N_{\text{pkt}_G_p}$ は,

$$N_{\text{pkt}_G_p} = \left\lceil \frac{X \cdot m}{I + (1 - m) \cdot H} \right\rceil, \quad (4.7)$$

で表される. ここで, $\lceil x \rceil$ は, x 以上の最小の整数を表す.

拡散利得制御を適用することにより, 基地局に低い電力で到着するパケットの信号

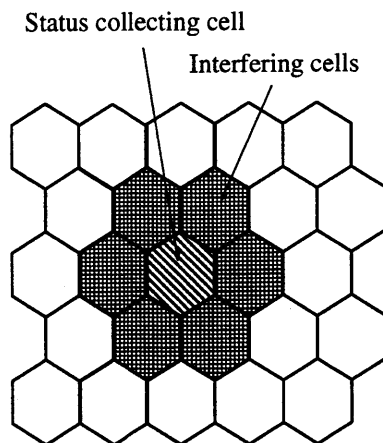


図 4.6: セルモデル

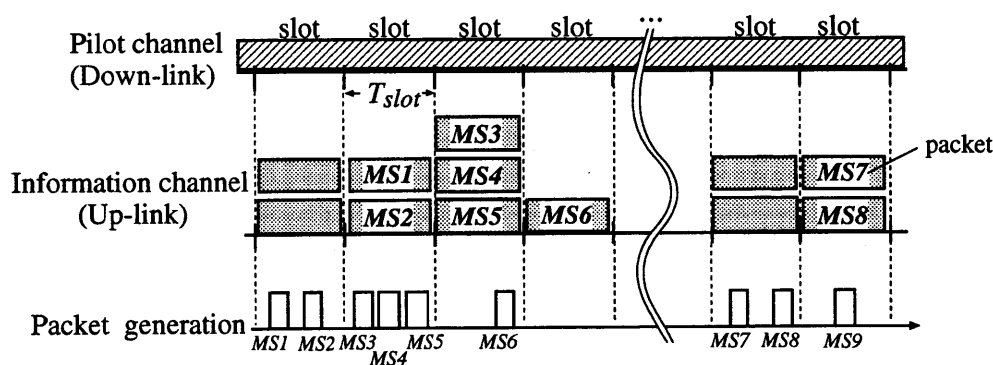


図 4.7: CDMA slotted-ALOHA チャンネルモデル

対干渉比 (SIR) が改善されるため、パケットの受信確率の改善が期待できる。

4.4 システムモデル

検討の対象とするシステムを、図 4.6 に示すようなセルラ環境のマルチセルシステムとする。

4.4.1 前提条件

前提条件として次のような仮定をする。

- サービスエリアは、 $M \times M$ 個のセルから構成される。セル構成は、中心に基地局の配置された正則配置の正六角形マイクロセルとする。各基地局は、常時、パイロット信号を報知している。

- 移動局はサービスエリア内に一様に分布し、最も強いパイロット信号を受信する基地局に対して DS/CDMA 方式でパケットを送信する。各パケットは異なる拡散コードにより拡散変調されるものとする。したがって、到来するパケットの拡散コード間の衝突はない。
- アクセス方式は、図 4.7に示されるような slotted-ALOHA で、スロット同期はサービスエリア内の全基地局で完全であるとする。拡散コード同期は、各パケットの伝搬遅延時間が異なるため、不完全であるとする。また、各スロットには十分なガードタイムが存在するものとする。
- 基地局は複数の受信器を持ち (個数は無限大)、誤りのないパケットは全て受信できる。
- 無線チャネルは、 α 乗の距離減衰と標準偏差が σ_s の対数正規分布をもつシャドーイングを受けるものとする。また、低速のフェージングの影響を受ける場合も考える。
- 干渉パケットは、同一セル内の他移動局と隣接 6 セルに存在する移動局から到来するパケットとする。
- 送信電力制御では、距離減衰とシャドーイングを補償できるものとする。送信電力は一つのパケット送信中は一定とする。送信電力制御に制御誤差がある場合、制御誤差は標準偏差が σ_{pe} の対数正規分布に従うものとする [28],[29]。
- 移動局は、接続基地局との距離を正確に知ることができるものとする。
- 全ての下り回線信号は、移動局で誤りなく正しく受信できるものとする。
- 再送制御を含む制御に要する遅延時間は無視できるものとする。

4.4.2 DS/CDMA チャネルモデル

無線チャネルが距離減衰とシャドーイングを受けると仮定すると、移動局 i が送信電力 $PW_{tx}(i)$ [W] で送信したパケットの基地局 j での受信電力 $PW_{rx}(i, j)$ [W] は、次のように表すことができる。

$$PW_{rx}(i, j) = PW_{tx}(i) \cdot \frac{10^{S(i,j)/10}}{d(i, j)^\alpha} \quad (4.8)$$

ここで、 $S(i, j)$ [dB] は、移動局 i から基地局 j への経路のシャドーイング値、 $d(i, j)$ は移動局 i から基地局 j までの距離である。信号振幅がフェージングによりレイリー分布に従う場合、瞬時の受信電力 $PW_{\text{rxF}}(i, j)$ [W] は平均が $PW_{\text{rx}}(i, j)$ の指数分布に従うことになる。ゆえに、 $PW_{\text{rxF}}(i, j)$ の確率密度関数 $f_{PW_{\text{rxF}}(i, j)}(x)$ は、

$$f_{PW_{\text{rxF}}(i, j)}(x) = \frac{1}{PW_{\text{rx}}(i, j)} \cdot \exp\left(-\frac{x}{PW_{\text{rx}}(i, j)}\right). \quad (4.9)$$

で与えられる [15].

したがって、移動局 i の送信したパケットの接続基地局 l における信号電力対干渉電力比 $SIR_{\text{conn}}(i)$ は、次式で与えられる。

$$SIR_{\text{conn}}(i) = \frac{G_p \cdot PW_{\text{rxF}}(i, l)}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K PW_{\text{rxF}}(k, l)} \quad (4.10)$$

上式において、 G_p は拡散率、 K は基地局 l に同時に到来しているパケット数である。

フェージング周期に比較してパケット長が十分に短ければ (低速フェージング)、受信信号の電力レベルの変動は1つのパケットの受信の間、準静的とみなすことができる。よって本章では、パケット誤り率 $P_{\text{err}}(i)$ を次のような簡単な関数で近似するものとする。

$$P_{\text{err}}(i) = \begin{cases} 0; & SIR_{\text{conn}}(i) \geq SIR_{\text{req}} \\ 1; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.11)$$

ここで、 SIR_{req} は基地局がパケットを正しく受信するために要求される信号電力対干渉電力比である。

式 (4.11) の正当性について以下に記述する。DS/CDMA チャンネルのビット誤り率 (BER) P_{eb} は単一セル構成の場合、一般的に式 (2.17) で表すことができる。雑音に対して信号エネルギーが十分大きい場合 E_b/N_0 は無限大となるので、式 (2.17) は、

$$P_{eb} = Q\left(\sqrt{\frac{3 \cdot G_p}{K-1}}\right), \quad (4.12)$$

となる [30]。また、式 (4.10) は単一セルで送信電力制御が完全である場合には次のよ

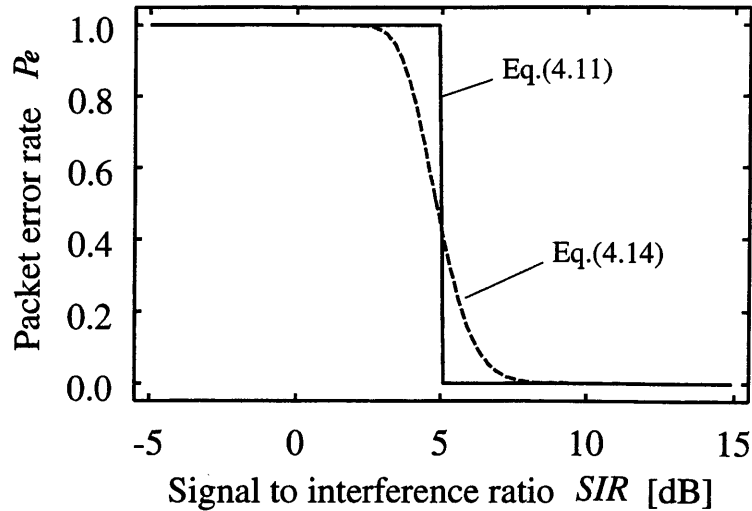


図 4.8: パケット誤り率 (拡散利得 $G_p = 16$)

うに書換えることができる。

$$SIR = \frac{G_p}{K-1}. \quad (4.13)$$

L ビットの packets を BER が P_{eb} の無線チャネルで送信した時のパケット誤り率は、パケット伝送期間内の信号電力が一定の場合、

$$P_e = 1 - \{1 - P_{eb}\}^L. \quad (4.14)$$

となる。図 4.8 は、 $SIR_{\text{req}} = 5$ [dB] の場合の式 (4.11) で求めた P_{err} の値と、 $L = 544$ [bits] の場合の式 (4.14) で求めた P_e の値とを比較したものである。2つの曲線にはあまり違いは見られない。式 (4.14) により算出されるビット誤り率特性は、拡散利得やパケット長に依存する (第 2.3.3 参照) が、いずれの場合においても、式 (4.14) で求めた P_e が 0.5 をとる場合の信号電力対干渉電力比の値を式 (4.11) の SIR_{req} に設定することによりその一般性は保たれる。したがって、式 (4.11) はパケット誤り率の近似として適当である。

4.4.3 トラヒックモデル

移動局

移動局の生起間隔は、各セルにおいて平均が $T_{\text{slot}} \cdot X / (I \cdot G)$ の指数分布に従う。ここで、 T_{slot} はスロット周期、 G はセル毎のチャネル負荷 (スロット間隔当りの平均

発生パケット数), X は平均メッセージ長を表す. 各移動局は, 生起直後にただ1個のメッセージを生成する. メッセージ長の違いにより, 以下の2種類のモデルを考える. パケットは, 固定長でスロット周期 T_{slot} よりガードタイム (スロット間干渉を無視する) だけ短い長さをもつ.

移動局は, 速度 v で直線的に移動する. また, 生存時間 T_{expire} 経過後, 無条件にシステムから消滅する.

基本評価モデル

基本評価モデルのメッセージ長は1 [packet] とする. パケット送信は, 生起したスロットの次スロットの先頭で行なわれる. 移動局は再送を行うものとし, 新規パケットと再送パケットの双方を含めたパケットを生起パケットとし, ポアソン過程に従って生起する.

ショートメッセージモデル

ショートメッセージモデルのメッセージ長は平均 X [bits] とする. メッセージ長は k -アーラン分布に従うものとし, その確率密度関数 $p(x)$ は

$$p(x) = \frac{(k/X)^k}{(k-1)!} x^{k-1} \exp\left(-\frac{kx}{X}\right). \quad (4.15)$$

で表すことができる. この分布に適合するアプリケーション例の1つに電子メールがある [31].

移動局は生起直後のスロットからスロット当り1パケットで順に送信する. 送信パケットが正しく受信されると, 直ち (制御遅延なし) に移動局は応答信号を受信する. 応答信号を受信しなかった場合, 移動局は, 平均が T_{delay} である一様分布に従う再送間隔時間後にパケットの再送を行なう.

4.5 性能評価

特性評価は計算機シミュレーションにより実施した. 統計データは図4.6に示したようにサービスエリアの中心の1セルから収集し, 特性評価に使用した.

4.5.1 評価パラメータ

本検討では, 次のようなシミュレーションパラメータを選択した. マイクロセルを考慮して, 伝搬減衰係数を3.5, シャドローイングの標準偏差を7.0 dB, SIR_{req} を5.0

表 4.1: シミュレーション諸元

	Symbol	Value	
Service area	$(M \times M)$	5×5	[cells]
Cell radius	(R_{cell})	230	[m]
Propagation loss coefficient	(α)	3.5	
Standard deviation of shadowing	(σ_s)	7.0	[dB]
Processing gain	(G_p)	16, 32, 64, 128	
Power difference for APGC	(ΔP_{pg})	3.0	[dB]
Required SIR	(SIR_{req})	5.0	[dB]
Slot duration	(T_{slot})	1	[ms]
Channel load observing duration	(T_{obs})	100	[slots]
Offered channel load	(G)	variable	[packets/ T_{slot} /cell]
Standard deviation of TPC errors	(σ_{pe})	variable	[dB]
Average message size	(X)	3.968	[Kbytes]
Phase index of k -Erlangian distribution	(k)	6	
Average retransmission delay	(T_{delay})	10	[slots]
Mobile speed	(v)	0, 18, 36, 72	[km/h]
Expiry time	(T_{expire})	625	[slots]
Information bit per packet	(I)	1024	[bits]
Header bit per packet	(H)	24	[bits]

dB とした。コンピュータリソースの関係で、比較的小さな基準拡散利得 $g_p = 16$ と $m_{\text{max}} = 8$ を選択した。文献 [31] に基づき、平均メッセージ長 X を 4 kBytes, 位相インデックス k を 6 とした。パケット当りの情報量 I を 1,024 bits (拡散利得 g_p で拡散した場合), ヘッダー 24 bits とすると、メッセージ当りの平均パケット数は、 $(4,000/1,024) * 8 \simeq 31$ となる。移動局のシステムでの生存期間 T_{expire} は、625slot に等しい期間とした。

また、提案方式のパラメータを $\beta = 1.1$, $\Delta P_{\text{tgt}}(0) = 3.0$ dB, および $\Delta P_{\text{pg}} = 3.0$ dB とした。 N_{rx} は誤り無く測定できるものとし、測定間隔は 100 slots 毎とした。

シミュレーションパラメータを表 6.1 に列挙する。

4.5.2 評価項目

システム効率を評価する項目として平均スループット S 特性, 平均伝送遅延 D , 伝送完了確率 p_{cmp} およびパケット受信確率 p_{rec} を選択した。また、サービスの公平性を評価する項目としてセルを幾つかの領域に分割した時の各領域の伝送完了確率 p_{cmp} を用いた。伝送完了確率 p_{cmp} は、移動局が生存期間内に全ての保有パケットの伝送を完了する確率であり、パケット受信確率 p_{rec} は、基地局が到来するパケットを正しく受

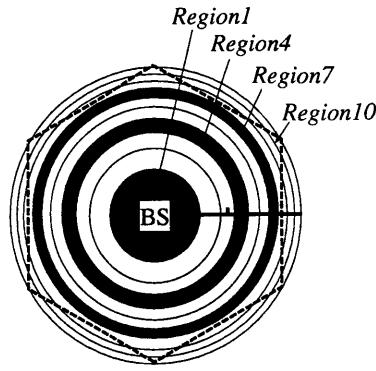


図 4.9: セルの分割 (10 等面積領域)

信できる確率である. これら $S, D, p_{\text{cmp}}, p_{\text{rec}}$ を, 以下のように定義する.

$$S = N_{\text{suc}}/N_{\text{slot}}, \quad (4.16)$$

$$D = N_{\text{rtx}} \times T_{\text{rtx}}, \quad (4.17)$$

$$p_{\text{cmp}} = N_{\text{cmp}}/N_{\text{gen}}, \quad (4.18)$$

$$p_{\text{rec}} = N_{\text{suc}}/N_{\text{tx}}, \quad (4.19)$$

ここで, N_{suc} は基地局で正しく受信できたパケットの総数 (再送パケットを含む), N_{slot} は統計量を収集したスロットの総数, N_{cmp} は T_{expire} 内に全保有パケットの送信を完了した移動局の総数, N_{gen} は移動局が送信したパケットの総数 (再送パケットを含む) である. また, N_{rtx} は平均再送回数, T_{rtx} は平均再送間隔を表す. 平均再送回数 N_{rtx} は, $N_{\text{rtx}} = N_{\text{crpt}}/N_{\text{suc}}$ で求められる. N_{crpt} は, SIR_{req} を満足しないために基地局で受信できなかったパケット数である.

平均伝送遅延 D , 伝送完了確率 p_{cmp} およびパケット受信確率 p_{rec} は, 観測セル内で送信された全てのパケット (移動局) に対するもの, 図 4.9 に示すようにセルを基地局からの距離で同心円状の等面積のリングに N_{div} 分割した場合の各領域で送信されたパケット (移動局) に対するものの 2 つで評価する. 分割時, セル周辺部では 6 角形セルに含まれない領域を持つリングが存在するが, このような領域においても他の領域と同様に等面積の全領域を統計量収集の対象とする.

性能評価は, 従来の送信電力制御法と送信電力制御を行なわない場合との比較検討で行なった.

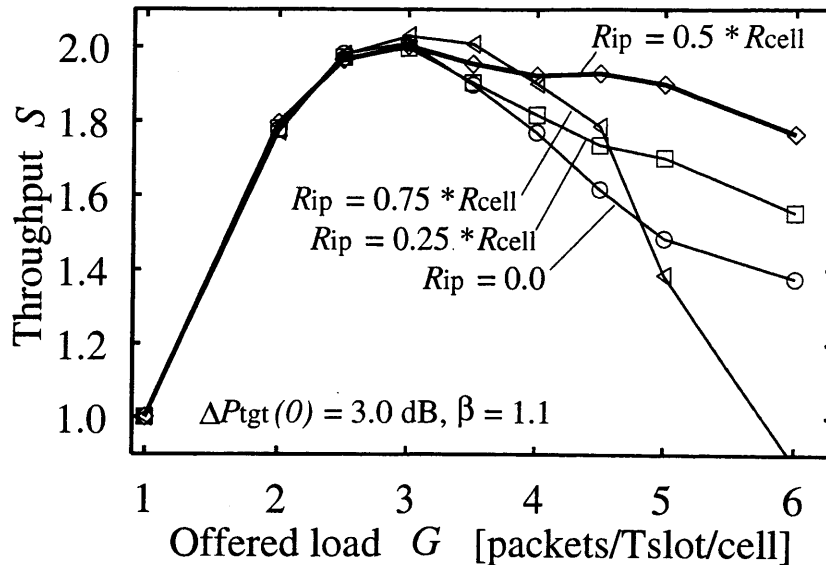


図 4.10: 変曲点 R_{ip} の変化に対するスループット特性 S (完全電力制御).

- 従来方式 (Convventional TPC)
基地局に到来するパケットの平均受信電力を一定に制御する。目標受信電力をセル内の全移動局で同じ値に設定する。
- 送信電力制御なし (Non TPC)
全ての移動局が同じ送信電力でパケットを送信する。基地局に到来するパケットの平均受信電力は、距離減衰とシャドーイングのみに基づく。

4.5.3 変曲点 R_{ip} の最適化

性能評価を行なうに先立ち、目標受信電力設定関数のパラメータの1つである変曲点 R_{ip} の最適化を行なう。図 4.10に、理想的な送信電力制御が行なわれている時に変曲点 R_{ip} の位置を変化させた場合の、セル毎に印加されたチャネル負荷 G に対するスループット特性 S を示す。メッセージモデルは基本評価モデルであり、フェージングは考慮していない。図 4.10より、 $R_{ip} = 0.5 \times R_{cell}$ の場合に、全チャネル負荷領域にわたって比較的良好なスループット特性が得られていることがわかる。したがって以降の検討では、変曲点 R_{ip} を $0.5 \times R_{cell}$ に設定することとする。

4.5.4 基本特性評価

ここでは、メッセージモデルに基本評価モデルを用いて、フェージングのないセルラ環境における提案方式 (適応送信電力制御のみ) の伝送特性の評価を行なう。評価項目は、スループット特性 S および伝送遅延時間特性 D とした。

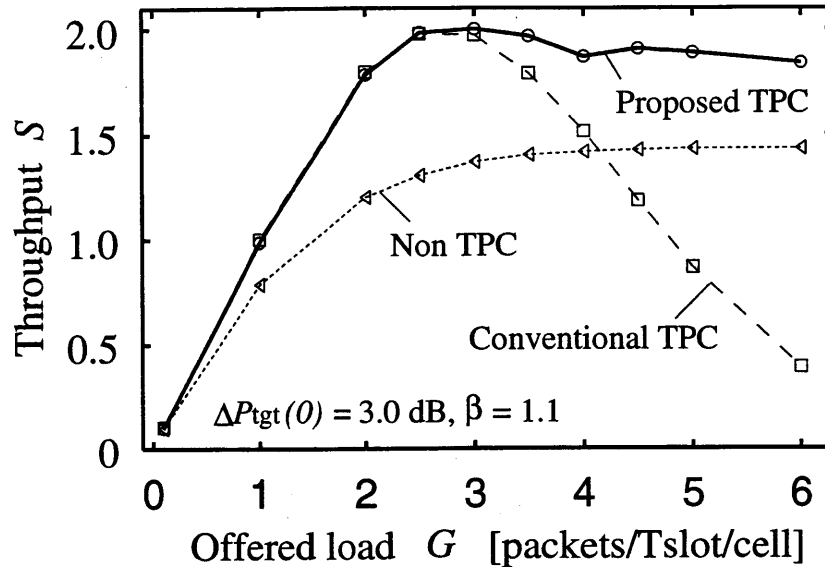


図 4.11: スループット特性 S 対 チャンネル負荷 G (完全電力制御)

スループット特性

送信電力制御が完全に行なわれている場合のスループット特性 S を図 4.11 に示す。図 4.11 には、送信電力制御なし (Non TPC)、従来方式 (Conventional TPC) および提案方式 (Proposed TPC) のスループット特性 S が、それぞれ点線、破線および実線で示されている。従来方式は、送信電力制御なしの場合と比較して最大スループットが大幅に改善されており、文献 [6]–[8] と同様の結果が得られている。しかし、従来方式のスループット特性は、最大スループットに達した後、チャンネル負荷が大きくなると急激に低下し、送信電力制御なしの場合の特性よりも劣化する。一方、提案方式ではその領域での特性劣化が極めて少なく、ほぼ最大スループットを維持している。高チャンネル負荷時における提案方式のスループット特性は、従来方式に比べ大幅に改善している。チャンネル負荷 G が 3.5 の時に約 10%、4.0 の時に約 25% の改善がみられる。さらに、低負荷領域においても提案方式は従来方式と同等の特性が得られており、全負荷領域において良好な特性が得られている。これらの結果から提案方式を用いれば、実用チャンネル負荷領域を拡張することが可能であると言える。

図 4.12 は、チャンネル負荷 G が増加した場合の ΔP_{tgt} 特性を示している。+印はシミュレーション期間中にサンプリングした ΔP_{tgt} の値を、実線はその平均値を、また点線はその時のスループット特性を示す。最大スループットを得るチャンネル負荷領域で、 ΔP_{tgt} は小さくまたその分散も比較的小さく制御されていることがわかる。これは、遠近問題を軽減する方向に制御が働いているためだと考えられる。反対に、高

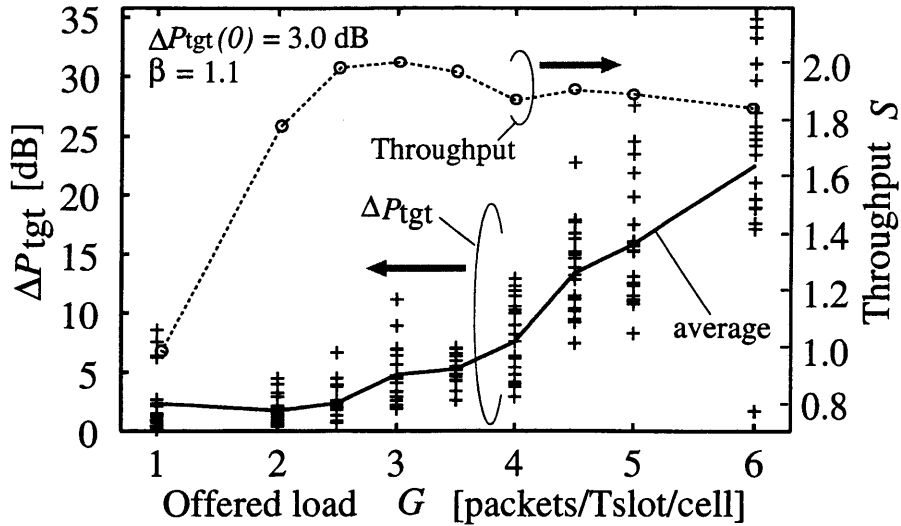


図 4.12: チャンネル負荷 G に対する ΔP_{tgt} 特性 (完全電力制御)

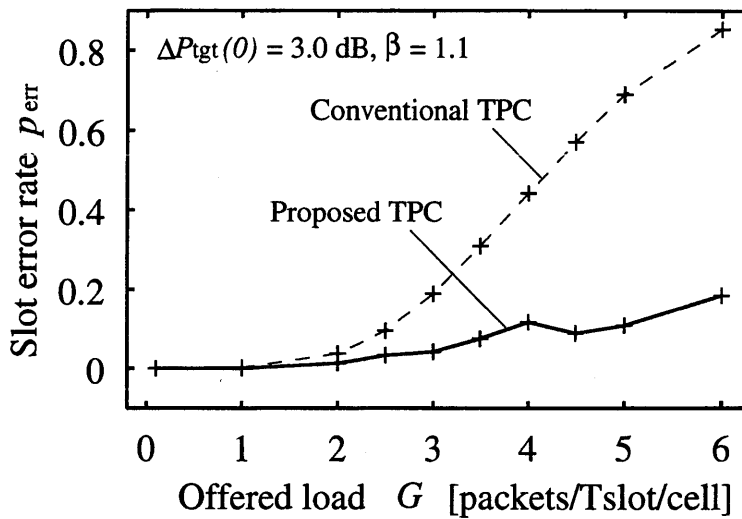


図 4.13: スロットエラー率特性 P_{err} (完全電力制御)

チャンネル負荷時には受信電力差による捕捉効果が得られるように ΔP_{tgt} は大きな値に制御されている。

図 4.13は、チャンネル負荷 G に対するスロットエラー確率 p_{err} 特性を示す。ここで、スロットエラー確率 p_{err} は、パケットが1つ以上送信されたスロットにおいて、基地局が受信したパケットが0であるスロットの発生確率を示す。図 4.13において、破線が従来方式の p_{err} 特性、実線が提案方式の特性である。提案方式の p_{err} 特性は、高チャンネル負荷時に大幅に改善されており、この領域で捕捉効果が得られていることを示し

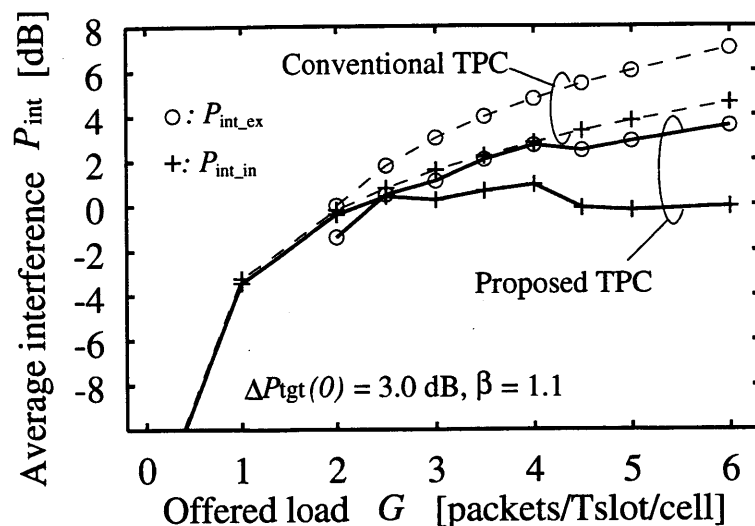


図 4.14: 干渉電力特性 P_{int_in} , P_{int_ex} (完全電力制御)

ている。この捕捉効果による p_{err} 特性の改善が、提案方式のスループット特性の改善に寄与していると考えられる。

図 4.14は、チャンネル負荷 G に対する平均干渉電力 P_{int} を示している。平均干渉電力 P_{int} は、送信電力制御における基準目標受信電力 P_{tgt_s} に対する相対値で表している。図 4.14には、従来方式と提案方式の同一セル干渉電力 P_{int_in} および他セル干渉電力 P_{int_ex} が、それぞれ破線と実線で示されている。チャンネル負荷が大きくなると、提案方式の P_{int_in} , P_{int_ex} はいずれの場合も従来方式の値に比較して小さくなっている。提案方式では、高チャンネル負荷時に ΔP_{tgt} を大きく制御することで、同一セルの他パケットへの干渉や、隣接セルへの干渉が低減されることがわかる。以上から、提案方式は効率的に機能していると判断できる。

伝送遅延時間特性

図 4.15に、観測セル内で送信された全パケットの平均伝送遅延時間 D 特性を示す。図 4.15は、送信電力制御なし、従来方式および提案方式の平均伝送遅延時間 D 特性を示している。全パケットの平均伝送遅延時間 D は、従来方式の場合、チャンネル負荷 G が 3.5 を超えると急激に増大しているが、提案方式では急激な増加はみられない。また、送信電力制御なしの場合と比較しても特性改善がみられ、全領域で良好な特性が得られていることがわかる。

図 4.16は、図 4.9に示したようにセルをリング状に 10 分割した場合の各領域の平均伝送遅延時間 D 特性を示している。図 4.16には、*Region1*, 5, 8 の伝送遅延時間 D

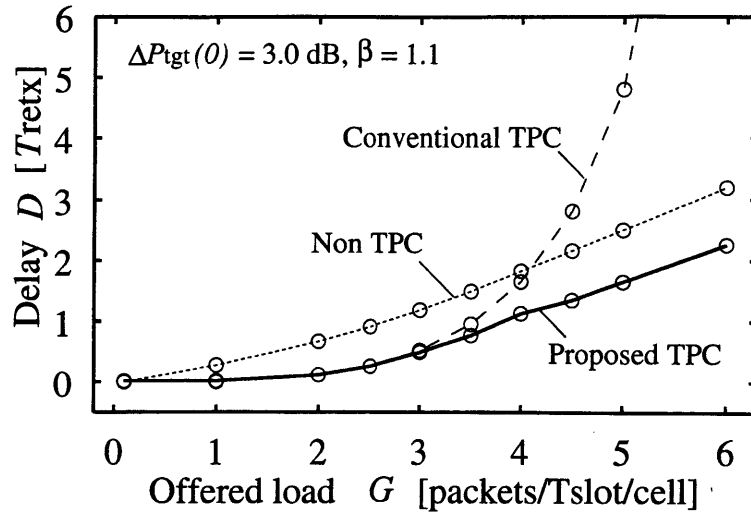


図 4.15: 全パケットに対する伝送遅延特性 D (完全電力制御)

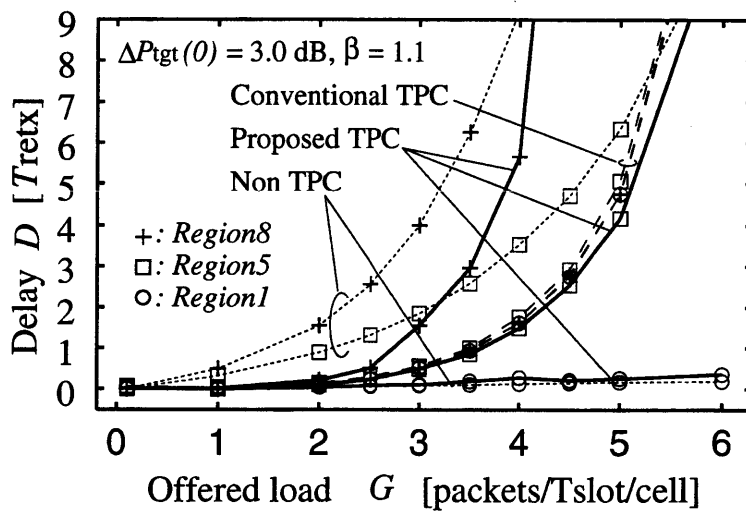


図 4.16: 各領域のパケットに対する伝送遅延特性 D (完全電力制御)

が、送信電力制御なし、従来方式および提案方式の場合について示されている。従来方式の各領域の D 特性は、領域位置に関係なくほぼ同一の特性を示している。これは、セル内の全移動局に対してその位置に関係なく公平なサービスが提供されていることを示している。一方、送信電力制御なしや提案方式では、各領域の D 特性に差がみられる。提案方式の場合、負荷の小さい領域では領域間の差は殆んどみられないが、高チャネル負荷領域 ($G \geq 3.0$) で *Region8* の特性が *Region1* や *Region5* の特性に比べ劣化している。提案方式で *Region8* の特性が劣化するのは、高チャネル負荷領域においてセル端の移動局の送信電力が抑制されるためであると考えられる。また、*Region1*

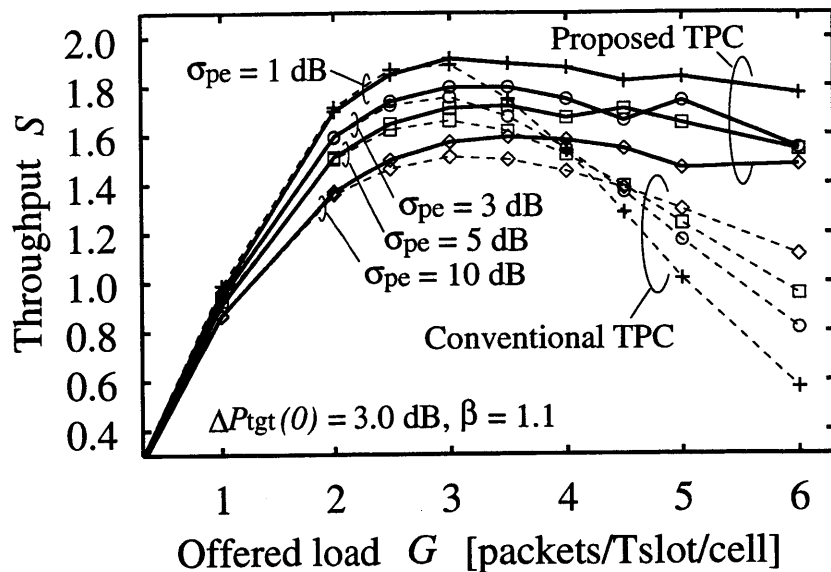


図 4.17: 電力制御誤差に対するスループット特性 S (不完全電力制御)

や *Region5* の特性が従来方式に比較して向上しているのは、受信電力差による捕捉効果によりこれらのパケットが救済されることに起因すると考えられる。提案方式の D 特性は、最大スループットを得るまでのチャンネル負荷の小さい領域では従来方式の特性に、高チャンネル負荷領域では特性の改善された送信電力制御なしの場合の特性に類似している。

送信電力制御における制御誤差の影響

送信電力制御が不完全な場合のスループット特性 S を図 4.17 に示す。図 4.17 は、送信電力制御における制御誤差の標準偏差 σ_{pe} が 1, 3, 5 および 10 dB の場合の特性を、従来方式および提案方式の場合について示している。提案方式のスループット特性は σ_{pe} の値に関係なく、従来方式の特性より優れていることがわかる。高チャンネル負荷時の従来方式の特性は、 σ_{pe} の値が大きくなると改善されるため、この領域における提案方式の特性改善率は、 σ_{pe} が大きくなる程小さくなる。

図 4.18 は、 σ_{pe} の変化に対する従来方式および提案方式の最大スループット値 S_{max} を示している。提案方式の S_{max} は、全ての σ_{pe} に対して従来方式の S_{max} を上回っている。 σ_{pe} が大きくなるに従い、 S_{max} における改善率が大きくなっている。 σ_{pe} が 10 dB の時、5% 程度の S_{max} の改善がみられる。この特性改善は、送信電力制御における制御誤差により、基地局に到来するパケットの受信電力値がさらに分散することに起因するものと考えられる。実際のセルラパケット通信システムでは、送信電力制御

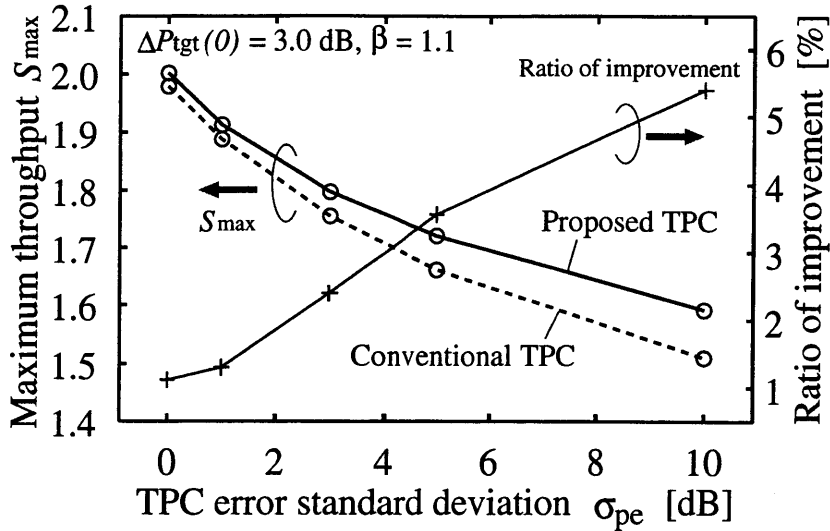


図 4.18: 電力制御誤差に対する最大スループット特性 S_{\max}

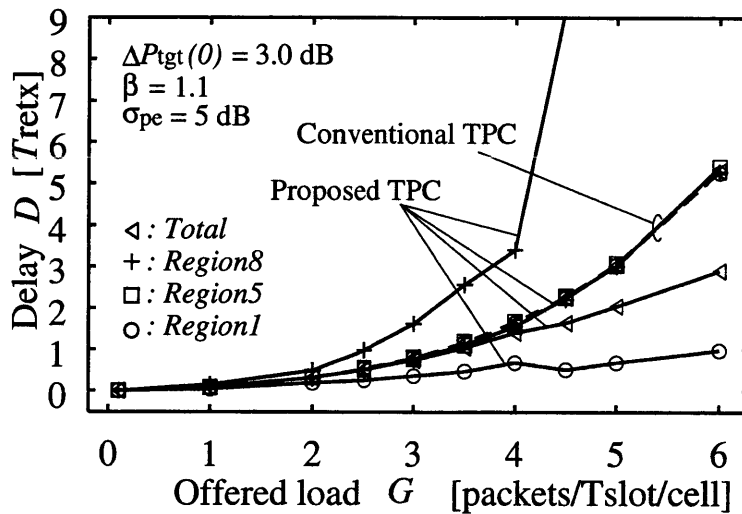


図 4.19: 電力制御が不完全な場合の伝送遅延特性 D

を完全に行なうことは困難であると考えられるため、制御誤差の存在するシステムで最大スループット値 S_{\max} が改善する提案方式は、実システムにおいて有効に動作すると考えられる。

図 4.19に、送信電力制御が不完全な場合 (制御誤差の標準偏差 σ_{pe} が 5 dB) の平均伝送遅延時間 D 特性を示す。図 4.19には、従来方式と提案方式の *Region1*, *5*, *8* および全領域から送信されたパケットの D 特性を示している。完全送信電力制御の場合と同様に、全領域 (*Total*) の提案方式の D 特性は従来方式より優れていることがわか

る。しかし、従来方式は D 特性において領域間の差がないために、領域位置に係わりなく公平なサービスの提供が可能であるが、提案方式の D 特性は高チャネル負荷領域において領域毎に異なる結果となった。

4.5.5 ショートメッセージ伝送特性

ここでは、メッセージモデルにショートメッセージを用いて、フェージングの存在するセルラ環境における提案方式 (適応送信電力制御および適応拡散利得制御) の伝送特性の評価を行なう。評価項目は、スループット特性 S 、伝送完了確率 p_{cmp} およびパケット受信確率 p_{rec} とした。また、移動局の移動についての影響も考察する。

スループット特性

図 4.20 および図 4.21 に、完全な電力制御がなされている時にチャネル負荷 G が変化した場合のスループット特性 S を示す。図 4.20 には、移動局が移動しない場合の低速フェージング環境とフェージングなし環境における提案方式 (ATPC-only) および従来方式の特性が示されている。また、図 4.21 は、フェージング環境における提案方式 (ATPC-only と ATPC+APGC) および従来方式の特性を示している。提案方式 (ATPC-only) は適応送信電力制御のみを実施した場合で、提案方式 (ATPC+APGC) は適応送信電力制御と適応拡散利得制御の両方を実施した場合である。図 4.20 より、従来方式のスループット特性は、フェージング環境において改善していることがわかる。これは、フェージングにより受信パケットの電力レベルが変動し、その結果、捕捉効果が得られるためである。しかしながら、従来方式の特性は、チャネル負荷が大きい時に急激に劣化している。一方、いずれの提案方式 (ATPC-only, ATPC+APGC) も、フェージングの有無に係わらず同等の特性を示しており、また、高負荷時においてスループットの最大値が維持できている。さらに、提案方式は、低負荷状態において従来方式の特性と同等の特性を示している。

図 4.22 は、チャネル負荷 G を変化させた時のフェージング環境における ΔP_{tgt} 特性を示している。□ および + 印は ΔP_{tgt} のサンプル値、折れ線はその平均値を表す。 ΔP_{tgt} は、 $G \leq 2.0$ の領域で小さい値をとっている。高負荷領域で ΔP_{tgt} は、チャネル負荷に従い増加している。この結果から、提案方式は期待どおりに動作していることがわかる。

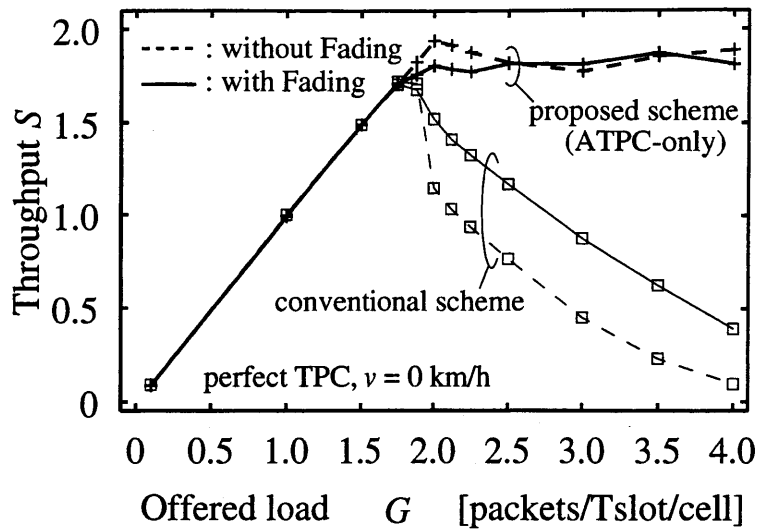


図 4.20: スループット特性 S へのフェージングの影響 (完全電力制御)

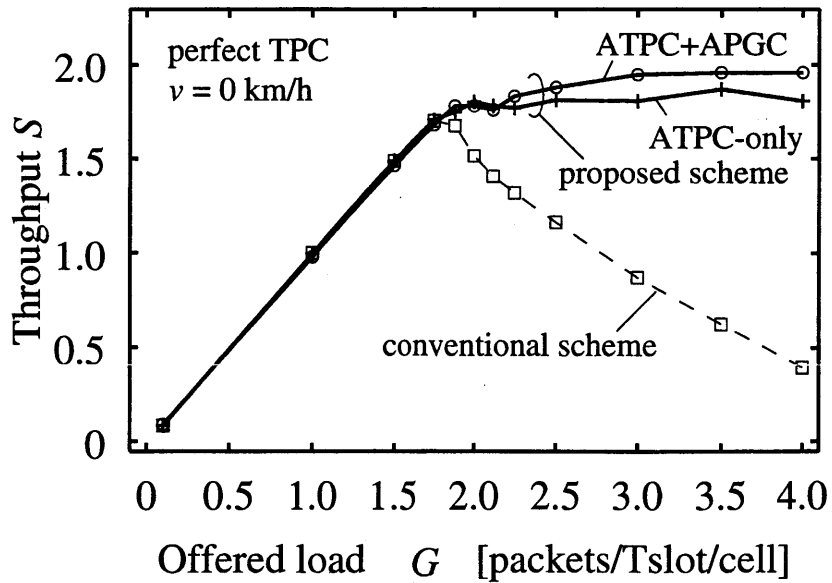


図 4.21: フェージング環境でのスループット特性 S (完全電力制御)

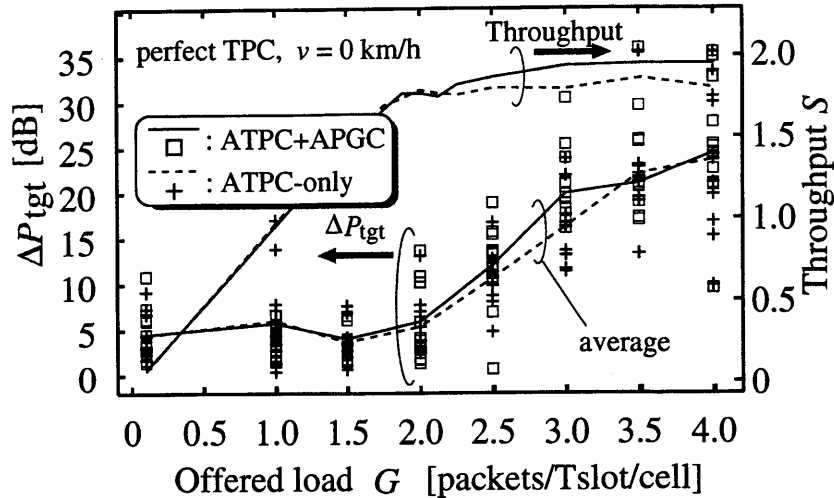


図 4.22: フェージング環境での ΔP_{tgt} 特性 (完全電力制御)

伝送完了確率特性

フェージング環境における伝送完了確率特性 p_{cmp} を図 4.23 に示す。従来方式の p_{cmp} 特性は、チャネル負荷が 2.0 付近で、急激に劣化している。従来方式では高チャネル負荷領域において、ほとんどの移動局が生存時間 T_{expire} 内にメッセージ伝送を完了することが不可能となっている。これは、再送パケットが増加した場合にパケット受信確率が急激に低下するためと考えられる。提案方式 (ATPC-only, ATPC+APGC の両方) では、 p_{cmp} の劣化は従来方式に比較して小さく、約半数以上の移動局が高チャネル負荷領域においてもメッセージ伝送を完了している。これは、高チャネル負荷領域において捕捉効果により提案方式のスループット特性が改善することに起因している。

送信電力制御における制御誤差の影響

送信電力制御が不完全なフェージング環境でのスループット特性を図 4.24 に示す。送信電力制御が完全な場合と同様に、提案方式は高負荷領域においてスループットの最大値を維持している。一方、従来方式はこの領域で特性の劣化がみられる。提案方式および従来方式のいずれの方式においても、スループット特性は送信電力制御誤差の標準偏差 σ_{pe} に従って変化する。制御誤差によりセル周辺部の移動局が送信するパケットの送信電力が大きくなる場合があるため、 σ_{pe} が小さい程、提案方式は良好な特性を示す。一方、従来方式は σ_{pe} が大きくなると良い特性を示す。これは、制御誤差により受信電力レベルが変動して捕捉効果が得られるためである。提案方式のスループット

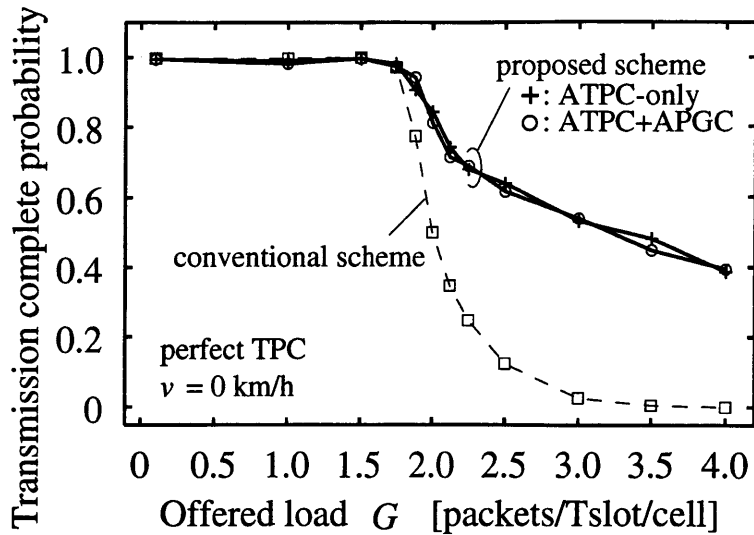


図 4.23: フェージング環境での伝送完了率特性 (完全電力制御).

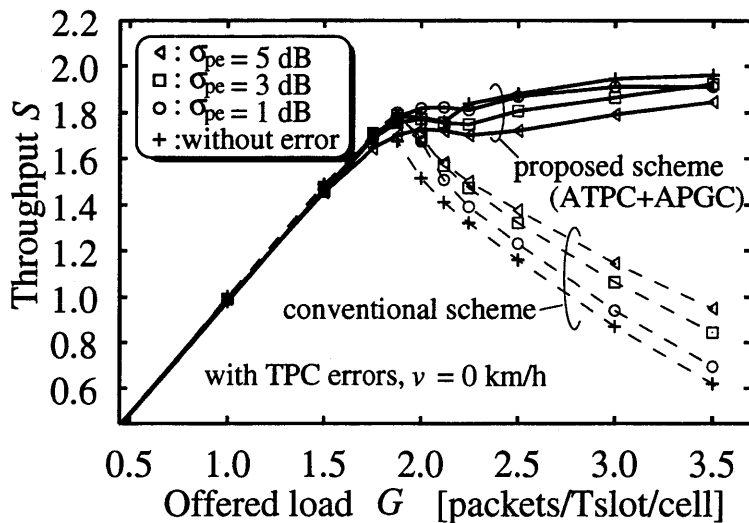


図 4.24: 電力制御誤差のスループット特性 S への影響 (フェージング環境)

プット特性は、大抵の場合従来方式の特性を上回っている。

送信電力制御が不完全なフェージング環境での送信完了確率 p_{cmp} を図 4.25 に示す。提案方式の高チャネル負荷領域における p_{cmp} の劣化幅は、従来方式のそれより小さい。 σ_{pe} が大きい時、提案方式の p_{cmp} は小さくなり、従来方式の p_{cmp} は大きくなる傾向にある。スループット特性と同様に、制御誤差が高負荷領域において p_{cmp} に与える影響は、提案方式に対しては劣化要因、従来方式に対しては改善要因になっていることがわかる。

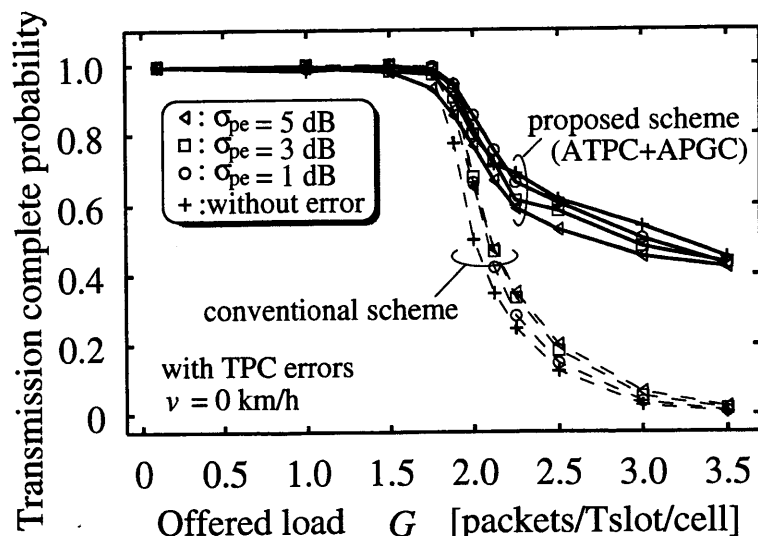
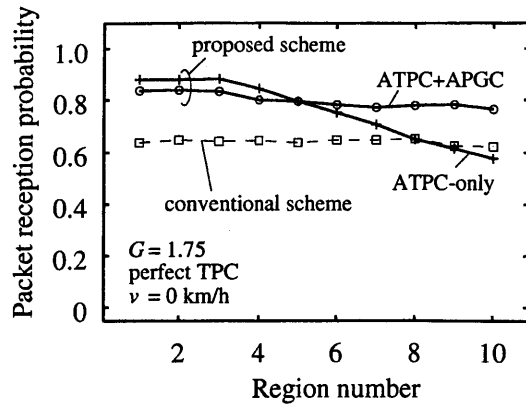


図 4.25: 電力制御誤差の伝送完了率 p_{cmp} への影響 (フェージング環境)

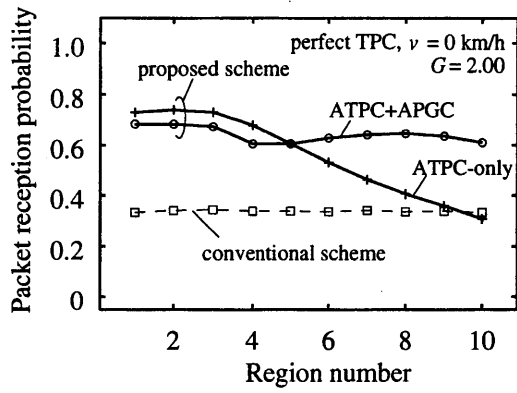
サービスの公平性

図 4.26 に、フェージング環境で理想的な電力制御が行なわれている場合の各領域の packet 受信確率 p_{rec} を示す。従来方式の p_{rec} は、チャネル負荷に関係なくすべての領域で一定である。したがって、従来方式は全負荷領域において全移動局に対して、同等のサービスを提供しているといえる。ところが、提案方式 (ATPC-only) の p_{rec} は、領域位置により異なる。各領域の p_{rec} の違いはチャネル負荷に従い大きくなる。この変化は、高負荷領域において捕捉効果により内側の領域からの packet が救済されるからである。適応拡散利得制御を提案方式に適用することにより、セルの外側からの packet の p_{rec} が改善される。このため、 p_{rec} 特性はすべての領域においてほぼ一定となる。適応拡散利得制御は、基地局から遠くに位置する移動局 (例えば、Region6, Region8 の移動局) から送信された受信電力の小さい packet の SIR を改善するためである。

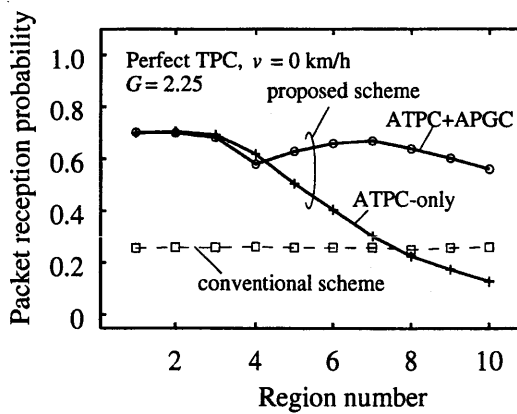
サービスの公平性を評価するために、伝送完了確率 p_{cmp} の評価を行う。図 4.27 は、理想的な電力制御が行われているときのフェージング環境における p_{cmp} を示している。提案方式の p_{cmp} は、領域番号とともに変化し、チャネル負荷が大きいときに領域間の p_{cmp} の違いが大きくなっている。一方、従来方式の p_{cmp} は、チャネル負荷に関係なくすべての領域に対してほぼ一定である。提案方式に適応拡散利得制御を適用することで、基地局から遠方に位置する移動局の p_{cmp} は改善する。しかし、 p_{cmp} はすべての領域に対して一定とはならない。これは、packet を大きな拡散利得で拡散す



(a) $G = 1.75$



(b) $G = 2.00$



(c) $G = 2.25$

図 4.26: 各領域のパケット受信率特性 p_{rec} (フェージング環境, 完全電力制御)

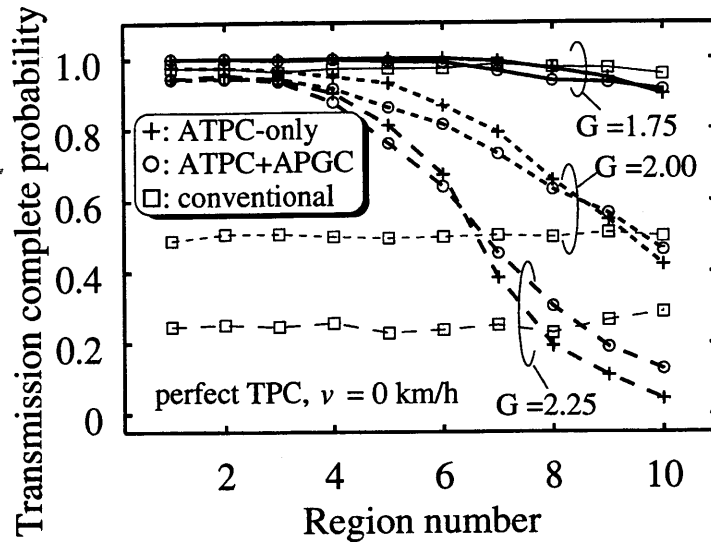


図 4.27: 各領域の伝送完了率特性 p_{cmp} (フェージング環境, 完全電力制御)

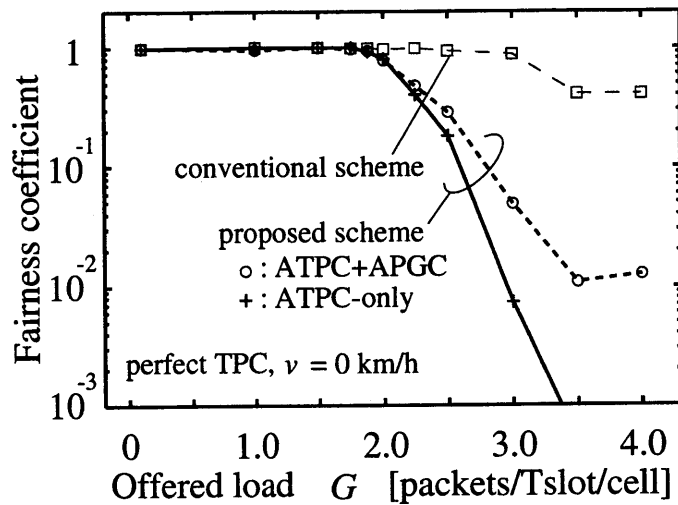


図 4.28: フェージング環境での公平性係数 (完全電力制御)

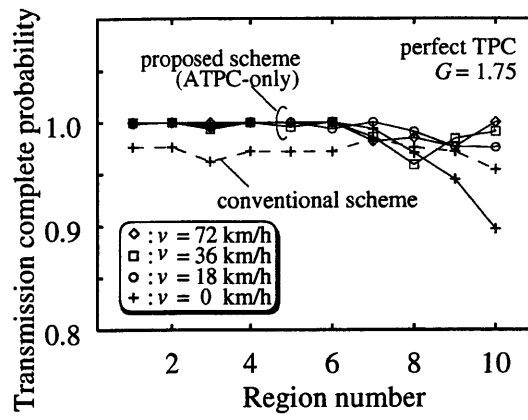
ると、パケット当りの情報量が減少し、パケット数が増加するためである。

図 4.28は、チャネル負荷を変化させたときの公平性係数を表している。この図において公平性係数は、*Region7*と*Region1*の p_{cmp} の比 (p_{cmp} の大きい方が分母)として定義し、公平性係数が1に近いほどすべての移動局に対して公平なサービスが提供されていることを意味する。いずれの方式においてもチャネル負荷が2.0より小さい領域では公平性係数は1に近く、公平性がすべての移動局に対して維持されている。したがって、低負荷領域では移動局は3つの方式に対して同等のサービス品質を持っていると言える。高負荷領域においては、提案方式の公平性係数はチャネル負荷と

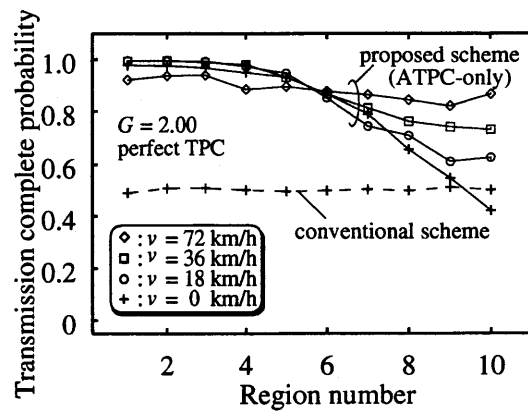
もに劣化する。適応拡散利得制御を適用した提案方式は適応送信電力制御のみを適用した提案方式に比べ公平性係数の劣化は小さい。

移動の影響

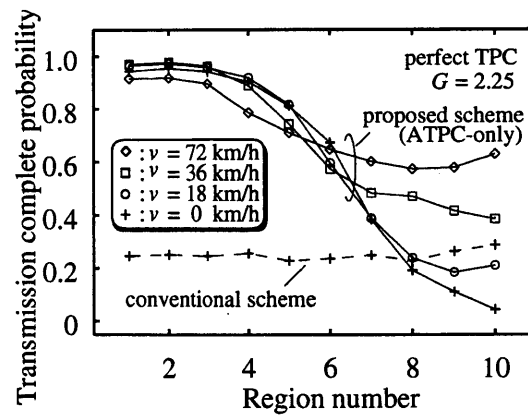
図 4.29は、理想的な電力制御が行われているフェージング環境下で移動局が移動した場合の送信完了確率 p_{cmp} を示している。提案方式 (適応送信電力制御のみ) の p_{cmp} は、いずれのチャネル負荷に対しても、移動局の移動が速いときに一定に近づく。 p_{cmp} の改善は、チャネル負荷が大きい場合あるいは移動速度が速い場合に大きい。これは、移動局の移動によるパケット送信位置の移動の平均化効果によるものである。提案方式は、チャネル負荷が 2.0 で移動速度が 72 km/h の時、全ての移動局に対して同等のサービスの提供が可能である。



(a) $G = 1.75$



(b) $G = 2.00$



(c) $G = 2.25$

図 4.29: 伝送完了率 p_{comp} への移動局の移動の影響 (フェージング環境, 完全電力制御)

4.6 まとめ

本章では将来の移動通信システムにおいてサービス提供が期待されている、コネクションレスサービスなどのトラヒック制御の困難なサービスの提供時のシステム安定性の維持(サービス品質向上)を目的として、CDMAセルラ slotted ALOHA パケットシステムにおける高チャネル負荷時の伝送特性の改善手法について検討した。チャネル負荷と移動局位置により適応的に送信電力制御および拡散利得制御を行なう、適応型送信制御法を提案し、提案方式の上り回線の伝送特性を計算機シミュレーションで評価した。

本章で提案した方式は、高チャネル負荷領域のスループット特性を従来方式に比べ大幅に向上させ、最大スループットを維持することが可能となることがわかった。送信電力制御誤差のある環境や低速フェージング環境では、高チャネル負荷領域のスループットの改善幅は縮小する傾向にあり、これらの環境では提案方式の優位性が僅かに減少した。提案方式は、高チャネル負荷時における急激なスループット特性の劣化を回避することが可能となったため、トラヒック制御の困難なサービスに対するシステムの動作可能チャネル負荷領域を拡張することが可能となることがわかった。

一方、伝送遅延、伝送完了確率やパケット受信確率の評価より、提案方式は最大スループットに達するまでの領域では、各移動局に対して公平なサービスの提供が可能であるものの、高チャネル負荷時にはセル端の移動局の特性が劣化し、地理的な不公平性が生じることがわかった。これに対し、拡散利得制御を適用することで、セル端の移動局のサービス性が幾分改善され、ゆえに、サービスの公平性の観点で改善が得られる結果を得た。この地理的な不公平性に関しては、複数基地局によるパケットのダイバーシチ受信等により、さらに改善されるものと期待できる。ゆえに、提案方式は従来の送信電力制御方式に比較して、トラヒック制御の困難なサービスの品質を向上させることが可能であると言える。

参考文献

- [1] W. C. Y. Lee, "Overview of cellular CDMA", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.2, pp.291–302, May 1991.
- [2] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley III, "On the capacity of a cellular CDMA system", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.2, pp.303–312, May 1991.
- [3] T. Dohi, M. Sawahashi, and F. Adachi, "Performance of SIR based power control in the presence of non-uniform traffic distribution", in *Proc. 4th IEEE ICUPC'95*, Tokyo, Japan, pp.334–338, Nov. 1995.
- [4] F. Adachi, K. Ohno, A. Higashi, T. Doi, and Y. Okumura, "Coherent multi-code DS-CDMA mobile radio access", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E79-B, no.9, pp.1316–1325, Sep. 1996.
- [5] G. E. Corazza, G. D. Maio, and F. Vatalaro, "CDMA cellular systems performance with fading, shadowing, and imperfect power control", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.47, no.2, pp.450–459, May 1998
- [6] K. Joseph and D. Raychaudhuri, "Performance evaluation of cellular packet CDMA networks with transmit power constraints", in *Proc. IEEE ICC'91*, June 1991, pp.1614–1620
- [7] C. F. Kou and H. Leib, "Power imbalance effects on packet CDMA", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.14, no.9, pp.1830–1840, Dec. 1996.
- [8] 丹野 元博, 上林 真司, "移動パケット CDMA 通信における送信電力制御の効果", 1996 信学総大, 分冊通信 1, no.B-374, pp.374, Mar. 1996.

- [9] J. Wu and R. Kohno, "Performance evaluation of wireless multimedia CDMA networks using adaptive transmission control", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.14, no.9, pp.1688–1697, Dec. 1996
- [10] A. Sheikh, Y. Yao, and S. Cheng, "Throughput enhancement of direct-sequence spread-spectrum packet radio networks by adaptive power control", *IEEE Trans. Commun.*, vol.42, no.2/3/4, pp.884–890, Feb./Mar./Apr. 1994
- [11] K. Toshimitsu, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "A novel spread slotted aloha system with channel load sensing protocol," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.12, no.4, pp.665–672, May 1994.
- [12] A. E. Brand and A. H. Aghvami, "Performance of a Joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.14, No.9, pp.1698–1707, Dec. 1996.
- [13] 浅井 裕介, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, "セルラ環境下における CDMA ALOHA 方式の特性に関する一考察", 電子情報通信学技術研究報告, SST97-57, RCS97-96, Sep. 1997.
- [14] C. Namislo, "Analysis of mobile radio slotted ALOHA networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.VT-33, no.3, pp.199–204, Aug. 1984.
- [15] J. C. Arnbak and W. V. Blitterswijk, "Capacity of slotted ALOHA in Rayleigh-fading channels", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.SAC-5, no.2, pp.261–269, Feb. 1987.
- [16] I. M. I. Habbab, M. Kavehrad, and C. W. Sundberg, "ALOHA with capture over slow and fast fading radio channels with coding and diversity", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.7, no.1, pp.79–88, Jan. 1989.
- [17] I. Widipangestu, A. J. Jong, and R. Prasad, "Capture probability and throughput analysis of slotted ALOHA and unslotted np-ISMA in a Rician/Rayleigh environment", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.43, no.3, pp.457–465, Aug. 1994.
- [18] 原 嘉孝, 森川 博之, "ランダム電力選択法を用いたスロット付きアロハ方式に関する性能解析", 電子情報通信学技術研究報告, AP96-65, RCS96-98, Oct. 1996.

- [19] H. Takanashi, H. Kayama, M. Iizuka, and M. Morikura, "Enhanced capture effect for slotted ALOHA employing transmission power control corresponding to offered traffic", in *Proc. IEEE ICC'98*, Atlanta, USA, no.S45.4, pp.1622-1616, June 1998.
- [20] B. Wu and Q. Wang, "Maximization of the channel utilization in wireless heterogeneous multiaccess networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.46, no.2, pp.437-444, May 1997
- [21] 森 香津夫, "CDMA Slotted-ALOHA 通信における適応型送信電力制御方式," 電子情報通信学会 総合大会, B-5-167, 1998
- [22] 森 香津夫, "CDMA Slotted-ALOHA パケット通信における送信電力制御の一検討," 電子情報通信学会 技術研究報告, RCS98-49,1998-06
- [23] K. Mori, "Adaptive transmission power control in CDMA slotted-ALOHA radio communications," in *Proc. IEEE ICUPC'98*, pp.1137-1141, Oct. 1998.
- [24] K. Mori, "Adaptive transmission power control for CDMA slotted-ALOHA system in a slow fading environment," in *Proc. WPMC'98*, pp.410-415, Nov. 1998.
- [25] K. Mori, "Adaptive transmission control for CDMA slotted-ALOHA systems in a Rayleigh fading environment," in *Proc. IEEE ICPWC'99*, pp.174-178, Feb. 1999.
- [26] 森 香津夫, "CDMA Slotted-ALOHA パケット通信におけるチャネル負荷適応型送信電力制御法," 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J82-B, No.5, pp.1012-1021, 1999年5月
- [27] K. Mori, and T. Kobayashi, "Load-based transmission control for CDMA cellular packet systems with Rayleigh fading channels," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E82-A, No.7, pp.1151-1160, July 1999.
- [28] R. Prasad, M. G. Jansen, and A. Kegel, "Capacity of analysis of a cellular direct sequence code division multiple access system with imperfect power control," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E76-B, no.8, pp.894-905, Aug. 1993

- [29] R. Padovani, "Reverse link performance of IS-95 based cellular systems," *IEEE Personal Communications*, vol.1, no.3, pp.28-34, Third Quarter 1994.
- [30] R. K. Morrow and J. S. Lehnert, "Packet throughput in slotted ALOHA DS/SSMA radio systems with random signature sequences," *IEEE Trans. Commun.*, vol.40, No.7, pp.1223-1230, Jul. 1992.
- [31] M. Inoue, H. Morikawa, and M. Mizumachi, "Size-based resource scheduling for wireless message transport," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E80-B, no.3, pp.466-475, Mar. 1997

第 5 章

CDMA セルラケット通信におけるサービス公平性の維持

5.1 はじめに

CDMA セルラシステムでは、サービスエリア内の全てのセルで同じ周波数帯域を使用する [1],[2]。隣接セルでも同じ周波数帯域を使用するため、移動局が複数の基地局と同時通信を行なうソフトハンドオフを CDMA セルラシステムへ適用することは、TDMA システムへの適用に比較して極めて容易に実現することが可能となる。ソフトハンドオフは上り回線のチャンネル容量を増大させることが可能である [3] ため、回線交換方式の CDMA セルラシステムへの導入が広く一般的に実施されている。ソフトハンドオフ時においては移動局は複数の基地局と同時通信を行うため、サイトダイバーシチが実施されている状態であると言える。狭帯域無線パケット通信システムの上り回線で、複数基地局によるパケットの同時受信 (サイトダイバーシチ受信) を行なうとチャンネル利用率 (スループット特性) が向上することが報告されている [4]。これは、パケットが自セルの基地局で受信できなかった場合でも、干渉の少ない他の基地局で受信できる場合が存在するためである。

一方、CDMA セルラシステムでは一般的に送信電力制御が実施されるため、CDMA セルラパケットシステムの上り回線では、セル内の全ての領域の移動局に対して公平なサービスが提供される可能性が高い。しかしながら、CDMA セルラパケットシステムにサイトダイバーシチを適用した場合、これにより救済されるパケットは主にセルの周辺部から送信されたものであり、基地局近傍で送信されたパケットはサイトダイバーシチの恩恵を受けることはできない。このことは、セル全体を見た時にパケット受信率に大きな変動をもたらす原因となり、よって、サービス品質はパケットの送信位置に依存する結果となる。

セルラシステムではユニバーサルサービスの観点からサービスエリア全体において

公平なサービスの提供が重要であり、セル内でサービス提供に不公平性が存在することは望ましくない。さらに、セルラ移動パケットシステムにおけるサービス品質の地理的な不公平性は、サービス品質の優れた地域からのパケットの受信が優遇され、品質の劣る地域からのパケットはいつまでも受信されないという現象を生み出す。パケット通信では通常送信に失敗したパケットは再送されるため、品質の劣る地域からのトラフィック量が増大する。これに起因するトラフィック量の地理的不均一性は、CDMAセルラパケットシステムのシステム全体の性能に悪影響を与える可能性がある [5],[6]。このようなサービス提供の公平性の観点での研究が、無線 LAN[7]、回線交換型のセルラシステム [8],[9] やセルラパケットシステムの下り回線 [10],[11] において行なわれている。サイトダイバーシチを適用した CDMA セルラパケットシステムの上り回線においてもサービス提供の公平性に関する特性を明らかにすることは重要であると考えられる。

本章ではまず、CDMA セルラ slotted ALOHA システムの上り回線にサイトダイバーシチを適用した場合のサービス提供の公平性についてパケット受信率の観点から検証する [12]–[15]。基地局での受信電力が一定となる送信電力制御を実施しているシステムにサイトダイバーシチを適用することで、サービス提供に不公平性の存在することを指摘する。次に、この不公平性を緩和する手法として、2つの送信制御法を提案する。一つが送信電力制御法 [12],[14],[15] であり、他方が送信許可確率制御法 [13],[15] である。これらの提案方式の伝送特性をサービスの公平性とシステムの効率(スループット特性)の観点から評価する。特性評価の結果、いずれの方式ともサービスの公平性を改善することを示す。さらに、これらの方式では、サービスの公平性の改善を考えることにより、システムの効率(スループット特性)が向上することを示す。次に、両方式の性能について比較検討し、送信電力制御法が送信許可確率制御法に優ることを明らかにする。

5.2 システムモデル

検討の対象とするシステムとして、低速フェージングのあるセルラシステムを考える。第 4.4 章に述べたシステムと同様の前提条件、DS/CDMA チャネルやトラフィックモデルを仮定する。但し、本章のトラフィックモデルは、第 4.4 章で述べた基本評価モデルのみを考慮する。

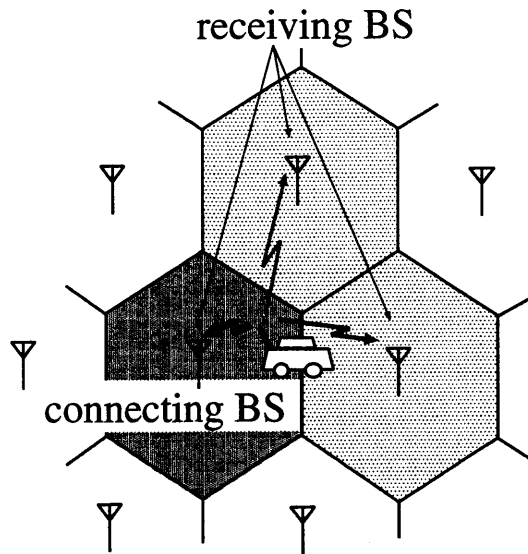


図 5.1: M_{SD} 基地局によるサイトダイバーシチ受信 ($M_{SD} = 3$)

5.2.1 サイトダイバーシチ受信

本章で取り扱うサイトダイバーシチ受信は、図 5.1に示されているようにサービスエリア内の $M \times M$ の基地局のうちの M_{SD} 基地局でパケットを同時受信するものと仮定する。各々のパケットに対して、これらの M_{SD} 基地局は受信電力が大きい順に選択され、通常これらは接続基地局とその周辺の基地局から構成される。サイトダイバーシチは、各々のパケットに対して常に実行される。基地局は複数の受信器を持ち(数は無限大)、誤りのないパケットはその拡散符号に関係なく全て正しく受信される。

各基地局で受信された全てのパケットは、バックボーンネットワークに伝送される。同じパケットが複数の基地局で受信された場合、バックボーンネットワークでは同じパケットが複数個受信されるため、最も SIR の良いパケットが選択される。この種のダイバーシチは、サイト選択合成ダイバーシチとして知られている。

送信電力制御は開ループ制御を仮定し、接続基地局での目標受信電力 P_{tgt} は全てのパケットで一定とする。通常、目標受信電力 P_{tgt} は標準目標受信電力 $P_{tgt,s}$ に設定される。

5.3 サイトダイバーシチ適用時の伝送特性評価

前述のシステムの上り回線の伝送特性を計算機シミュレーションにより求め、評価を行なう。主なシミュレーションパラメータを表 6.1に示す。

統計データは、サービスエリアの中心の 1 セルから収集した。

表 5.1: シミュレーション諸元

	Symbol	Value
Service area	$M \times M$	5×5 (cells)
Cell radius	R_{cell}	230 (m)
Propagation loss coefficient	α	3.5
Standard deviation of shadowing	σ_s	7.0 (dB)
Processing gain	G_p	16
Required SIR	SIR_{req}	5.0 (dB)
Standard deviation of TPC errors [16],[17]	σ_{pe}	0, 1, 3, and 5 (dB)
The number of base stations for site diversity	M_{SD}	3

5.3.1 評価項目

システム効率を評価する項目としてスループット特性 S を，公平性を評価する項目としてセルを幾つかの領域に分割した時の各領域のパケット受信率 p_{rec} を選択した。また，公平性の評価をより直接的に表現するために，パケット受信率 p_{rec} より算出した公平性係数を導入する。

各評価項目は，次のように定義される。

- スループット S : スループットは，基地局あたりのスロット期間中に正しく受信できた平均パケット数を表し， $N_{\text{suc}}/N_{\text{slot}}$ で定義される。ここで， N_{suc} は基地局で正しく受信されたパケットの総数， N_{slot} は統計量を収集したスロットの総数である。
- パケット受信率 p_{rec} : パケット受信率は， $N_{\text{suc}}/N_{\text{gen}}$ で定義される。ここで， N_{gen} はシミュレーション期間内に発生したパケットの総数である。パケット受信率の地理的特性を評価するために，セルを図 5.2 に示したように分割し，各領域の p_{rec} を計算する。分割時， $Region1$ が基地局近傍の， $Region11$ が最遠の領域である。セルの外側の領域では部分的に六角形セルに含まれない領域が存在するが ($Region11$ は全ての領域が六角形セル外)，統計量は六角形セルに含まれない領域を含めた全領域から収集した。
- 公平性係数: 公平性係数は， $RegionN$ と $Region1$ の p_{rec} の比で定義する。値の大きい p_{rec} を分母とし，常に 1 以下になるように定義する。 $RegionN$ の公平性係数は， $Region1$ に対する p_{rec} の分散を表しており，公平性が保たれている場合公平性係数は 1 となる。

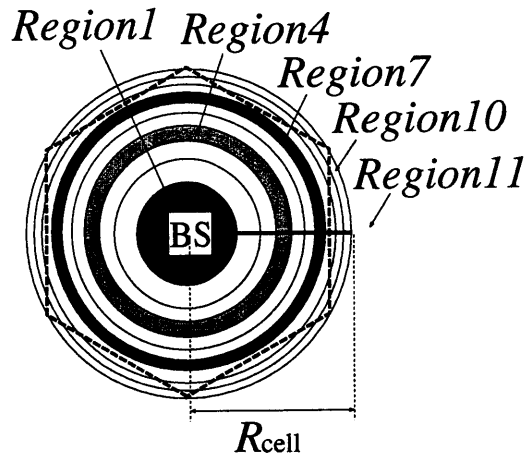


図 5.2: セルの分割 (10 等面積領域)

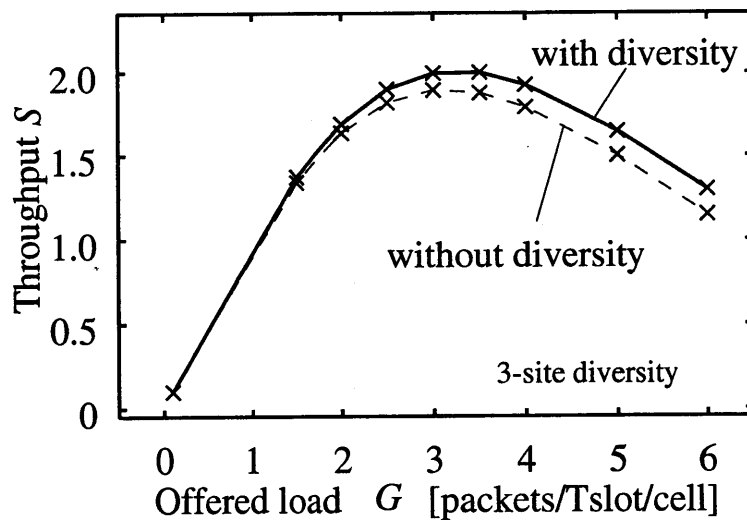


図 5.3: サイトダイバーシティあり / なしの場合のスループット特性 (送信電力制御誤差 $\sigma_{pe} = 3$ dB)

システム効率を評価する他の項目として平均伝送遅延時間 D が一般に知られている。平均伝送遅延 D は、 $(N_{gen}/N_{suc} - 1) \cdot T_{rtx} = (1/p_{rec} - 1) \cdot T_{rtx}$ によりパケット受信率から導出できる。ここで、 T_{rtx} は平均再送間隔である。したがって、パケット受信率は平均伝送遅延 D と等価な評価指標である。

5.3.2 伝送特性

図 5.3 にチャネル負荷 G を 0 から 6 まで変化させた時のスループット特性 S を示す。サイトダイバーシティを適用した場合のスループット特性は、適用しない場合の特性を常に上回っている。図 5.3 から CDMA セルラ slotted-ALOHA システムにサイトダイ

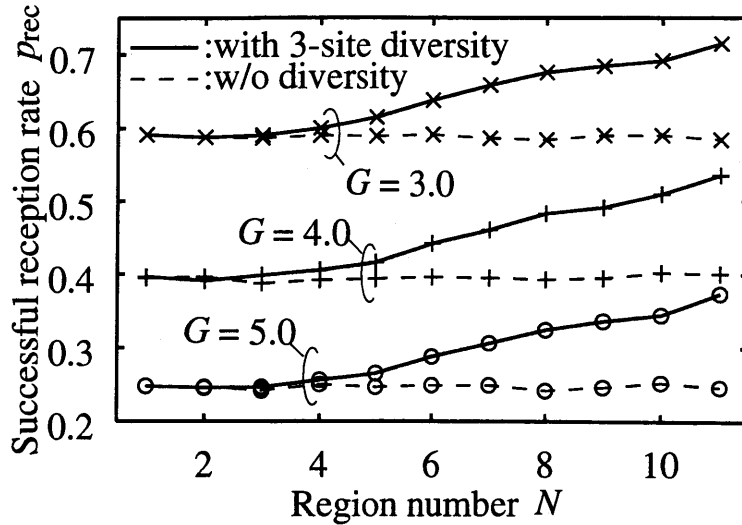


図 5.4: サイトダイバーシチあり / なしの場合の packets 受信率 p_{rec} (送信電力制御誤差 $\sigma_{pe} = 3$ dB)

バーシチを適用するとスループット特性が改善することがわかる。

異なるチャネル負荷 G に対する各領域の packets 受信率 p_{rec} を図 5.4 に示す。全てのチャネル負荷に対してサイトダイバーシチは、セル境界付近の packets 受信率 p_{rec} を大きく改善させる。セル境界に近い程、大きな改善が見られる。これは、接続基地局において受信できなかった packets の別の基地局での受信の可能性が、セル境界付近から送信された packets 程大きくなるからである。 p_{rec} の改善率は、チャネル負荷が大きい程大きくなる。例えば、Region10 では $G = 3.0$ の時 15% 程度の改善であるが、 $G = 5.0$ の時の改善率は 35% 程度になる。セル境界付近の p_{rec} の改善が、スループット特性の改善に貢献している。サイトダイバーシチがない場合、 p_{rec} は全ての領域で一定であるが、サイトダイバーシチを適用すると領域により p_{rec} は異なる。したがって、サイトダイバーシチを適用した場合、packets 受信率には地理的な違いが発生し、サービスの提供に不公平性が存在する。これは、公平なサービスが全ての移動局に対して提供できていないことを示しており、ユニバーサルサービスの観点から大きな問題となる。

5.4 パイロット信号受信電力差基準送信制御

ここでは、上記の不公平問題を改善するために、パイロット信号受信電力差を基準にした 2 つの送信制御方式を提案する。一方が送信電力制御 (TPCF: Transmission Power Control for Fairness) で、他方が送信許可確率制御 (PPCF: Permission Prob-

ability Control for Fairness) である。

送信電力制御法では、移動局の周辺の基地局からの複数のパイロット信号受信電力に応じて、送信パケットの接続基地局での目標受信電力値 P_{tgt} を制御する。また、送信許可確率制御法では、移動局におけるパケット送信の頻度を制御する送信許可確率 p を、同様に複数のパイロット信号受信電力に応じて制御する。 P_{tgt} あるいは p の制御は、接続基地局と他の基地局のパイロット信号受信電力の差を基準に実行される。パイロット信号受信電力の差が小さい時、 P_{tgt} あるいは p が小さくなるように制御する。

5.4.1 パイロット信号受信電力差の測定

提案法の原理を図 5.5 に示す。図 5.5 は最も簡単な例として、2 つの基地局 ($M_{\text{SD}} = 2$) によりパケットが同時受信される場合を示している。

提案法においては、移動局はパケット受信の可能性の高い M_{SD} 個の基地局から到来するパイロット信号の受信レベルを継続的に測定し、フェージングの影響を排除するために測定値を一定時間内で平均化する。その後、接続基地局のパイロット信号の平均受信レベル $P_{\text{rx}l}$ [dB] とその他の基地局の平均受信レベル $P_{\text{rx}k}$ [dB] の差を次式により算出する。

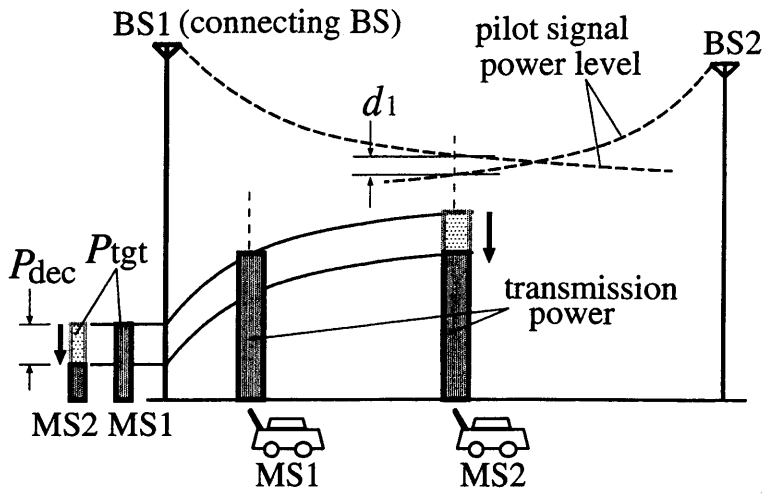
$$d_k = P_{\text{rx}l} - P_{\text{rx}(k+1)}, \quad (k = 1, 2, \dots, M_{\text{SD}} - 1). \quad (5.1)$$

移動局は、送信パケットの目標受信電力 P_{tgt} やパケット送信における送信許可確率 p をパイロット信号受信レベル差 d_k により以下に記述するように制御する。

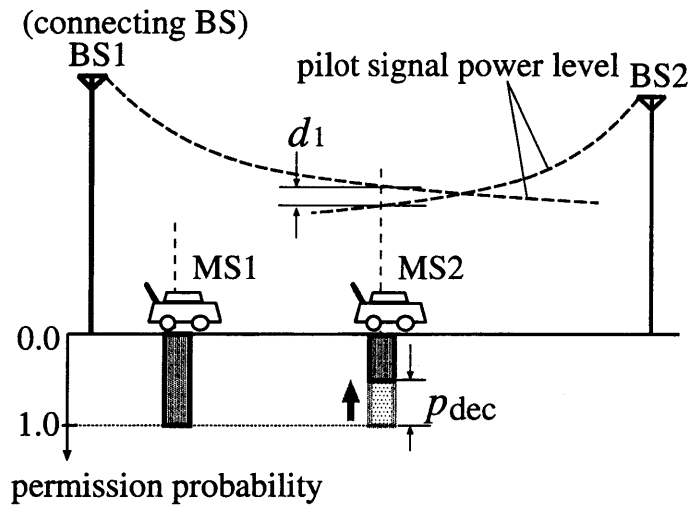
5.4.2 送信電力制御 (TPCF)

移動局がパケットを送信する場合、そのパケットの目標受信電力 P_{tgt} は制御関数を用いて決定される。この制御関数は、パイロット信号の受信レベル差 d_k と目標受信電力における標準目標受信電力値 $P_{\text{tgt},s}$ からの電力減少量 P_{deck} [dB] を関係づける関数として与えられる。ここでは簡単な関数が P_{tgt} の制御に適していると考えられるので、図 5.6 に示されるような一次関数を選択する。図 5.6 に示したように、この制御関数は、次のようなパラメータを持つ。

- 1) 変曲点 d_{ip} ;
- 2) 最大電力差 ΔP_{tgt} (標準目標受信電力 $P_{\text{tgt},s}$ と $d_k = 0$ である移動局の送信するパケットの目標受信電力 P_{tgt} の差分)



(a) 送信電力制御 (TPCF)



(b) 送信許可確率制御 (PPCF)

図 5.5: 公平性維持のための送信制御法

ここで、変曲点 d_{ip} は目標受信電力の制御対象となる d_k の最大値である。つまり、 $d_k < d_{ip}$ である移動局は、 P_{deck} が d_k に従い減少する。一方、 $d_k \geq d_{ip}$ である移動局は、 P_{deck} が 0 となる。 P_{deck} は、

$$P_{deck} = \begin{cases} \Delta P_{tgt} - \gamma \cdot d_k & ; d_k < d_{ip} \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5.2)$$

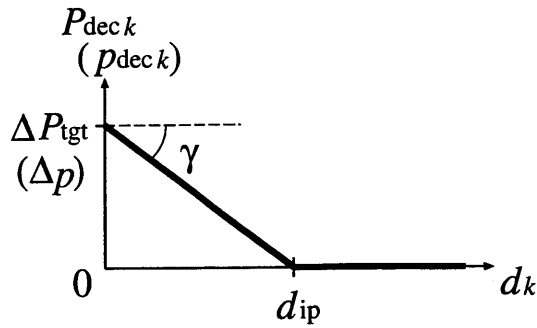


図 5.6: 目標受信電力 (送信許可確率) 制御関数

で与えられる。ここで、 γ は

$$\gamma = \Delta P_{\text{tgt}}/d_{\text{ip}}. \quad (5.3)$$

である。

サイトダイバーシチは M_{SD} 基地局で実施されるため、各々の基地局からのパイロット信号に対して P_{deck} が算出される。その後、移動局は次式を用いて送信パケットの目標受信電力 P_{tgt} を算出する。

$$P_{\text{tgt}} = P_{\text{tgt}_s} - \sum_{k=1}^{M_{\text{SD}}-1} P_{\text{deck}}. \quad (5.4)$$

なお、本送信電力制御法における送信許可確率は常に 1.0 に設定する。

一般に、移動局が接続基地局から離れている程、パイロット信号の受信レベル差 d_k は小さくなる。よって、提案方式を用いれば、そのような移動局の送信するパケットの目標受信電力 P_{tgt} が小さくなる。目標受信電力 P_{tgt} の減少は、直接送信電力を減少させるため、周辺基地局への干渉が小さくなり、チャンネルの利用効率が改善する。

5.4.3 送信許可確率制御 (PPCF)

提案する送信許可確率制御法では、移動局は目標受信電力一定の送信電力制御を実施してパケットをレート p で送信する。移動局は第 5.4.2 節に示した方法と同様の方法で、制御関数により送信許可確率 p を算出する。この制御関数は、パイロット信号の受信レベル差 d_k と送信許可確率における標準送信許可確率 p_s ($=1.0$) からの減少量 p_{deck} を関係づける関数として与えられる。 $d_k < d_{\text{ip}}$ である移動局は、 p_{deck} が d_k に従い減少する。一方、 $d_k \geq d_{\text{ip}}$ である移動局は、 p_{deck} が 0 となる。つまり、 p_{deck}

は,

$$p_{deck} = \begin{cases} \Delta p - \gamma \cdot d_k & ; d_k < d_{ip} \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5.5)$$

で与えられる。ここで, γ は

$$\gamma = \Delta p / d_{ip}. \quad (5.6)$$

この制御関数は, d_k が小さくなる程 p_{deck} を大きくする関数である。

サイトダイバーシチは M_{SD} 基地局で実施されるため, 各々の基地局からのパイロット信号に対して p_{deck} を算出し, 次式を用いて移動局の送信許可確率 p を算出する。

$$p = p_s \cdot \prod_{k=1}^{M_{SD}-1} (1 - p_{deck}). \quad (5.7)$$

本送信許可確率制御法では, 接続基地局から遠い位置にある移動局程, 送信許可確率 p が小さくなるように制御される。送信許可確率 p の減少は移動局のパケットの送信頻度を小さくするので, セル周辺部から大きな送信電力で送信されるパケットの数が抑制されることになる。よって, 送信許可確率制御法においても送信電力制御法と同様に, 周辺基地局への干渉量が抑制され, チャネルの利用効率が向上することが期待できる。

5.5 性能評価

提案方式を適用した CDMA セルラ slotted ALOHA システムの上り回線の伝送特性を計算機シミュレーションで評価する。シミュレーションパラメータは, 第 5.3.2で使用了なものと同じものを使用する。

本節の評価においては, 移動局でのパイロット信号の受信電力レベルは誤りなく正確に測定できるものとした。

5.5.1 送信電力制御時の特性

サービス公平性

最大スループットを得るチャネル負荷 ($G = 3.5$) 時の各領域のパケット受信率 p_{rec} を図 5.7に示す。図 5.7に示した特性は, $d_{ip} = 2.5$ の時のものである。提案送信電力制御方式におけるパケット受信率 p_{rec} の値の領域の違いによる変動は, サイトダイバー

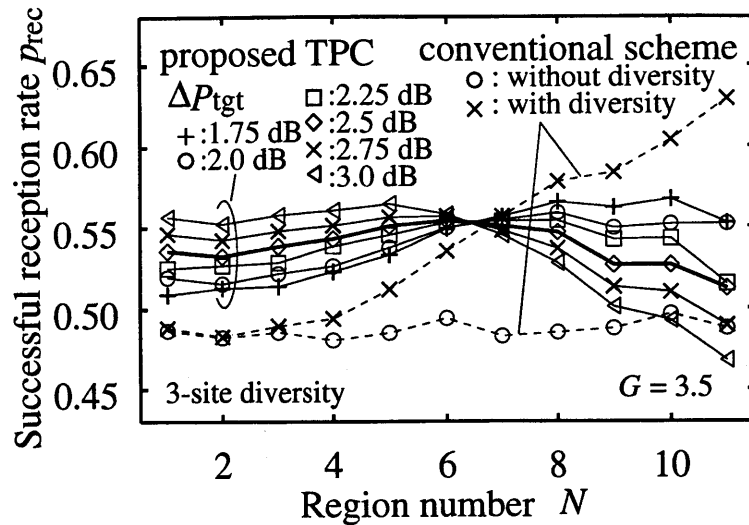


図 5.7: ΔP_{tgt} の変化に対する TPCF 方式の packets 受信率 p_{rec} 特性 ($\sigma_{\text{pe}} = 3 \text{ dB}$, $G = 3.5$)

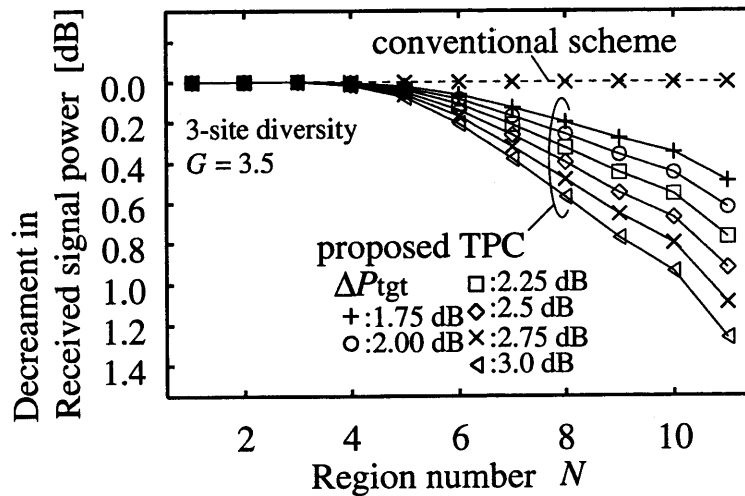


図 5.8: ΔP_{tgt} の変化に対する TPCF 方式の受信電力減少量 ($\sigma_{\text{pe}} = 3 \text{ dB}$, $G = 3.5$).

シチを適用した場合の従来方式に比べて小さい。提案送信電力制御方式の p_{rec} 特性は、 ΔP_{tgt} の値を変えると変化する。これは、図 5.8 に示されているように、 ΔP_{tgt} の変化によりセル周辺部から基地局に到来するパケットの信号電力が変動するためである。 ΔP_{tgt} が大きい時、セル周辺部の p_{rec} は小さくなる。一方、セル中心部の p_{rec} は大きくなる。例えば、 ΔP_{tgt} が 2.0 dB の時、Region10 の p_{rec} は Region1 に比べ大きいですが、 ΔP_{tgt} が 3.0 dB の時は逆に小さくなる。これは、セル周辺部で送信されるパケットの送信電力が抑制されるからであり、その結果、これらのパケットの受信電力が減少するためである。提案送信電力制御法では、適切な ΔP_{tgt} を選択することにより、パケッ

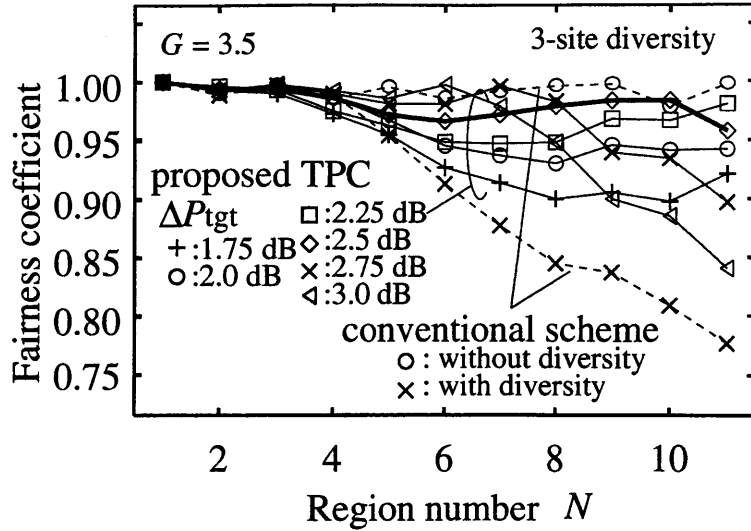


図 5.9: ΔP_{tgt} の変化に対する TPCF 方式の公平性係数 ($\sigma_{\text{pe}} = 3 \text{ dB}$, $G = 3.5$)

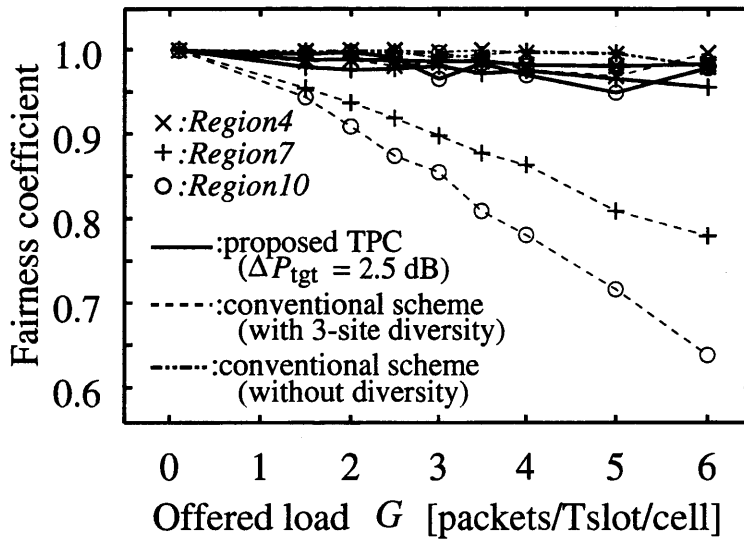


図 5.10: チャンネル負荷 G の変化に対する TPCF 方式の公平性係数 ($\sigma_{\text{pe}} = 3 \text{ dB}$)

ト受信率 p_{rec} の領域間の変動を著しく減少させることが可能となる。

図 5.9 は、図 5.7 と同条件における公平性係数を示している。サイトダイバーシチを適用した従来方式の公平性係数は、領域番号 N に従い減少している。対照的に提案送信電力制御法では、 $\Delta P_{\text{tgt}} = 2.5 \text{ dB}$ の場合に全ての領域においてほぼ 1 に等しい。これは、セル全体に対し公平なサービスが提供されていることを示している。よって、この場合 ΔP_{tgt} の最適値は 2.5 dB となる。

チャンネル負荷 G を 0 から 6 に変化させた場合の公平性係数を図 5.10 に示す。図 5.10 に

は、サイトダイバーシチなしとありの場合の従来方式および提案送信電力制御方式 ($\Delta P_{\text{tgt}} = 2.5$ dB) の公平性係数が、*Region4,7,10* について示されている。*Region4* は距離がセルのほぼ中間となる領域であり、*Region7* は全ての地域が6角形セルの内部に含まれる最外周の領域である。サイトダイバーシチなしの従来方式の公平性係数は、全ての領域について全負荷領域でほぼ1.0であり、全くの公平なサービスが提供されていることを示している。サイトダイバーシチを適用した従来方式では、領域の位置がセル境界に近づく程、また負荷が大きくなる程、公平性係数が減少している。チャンネル負荷 $G = 6$ の場合、*Region10* から送信されたパケットは、*Region1* のものに比較してパケット受信において1.7倍優遇される。一方、提案送信電力制御方式の公平性係数は、全ての領域において全負荷領域でほぼ1.0であり、公平なサービスがセル全体に対して提供されている。

送信電力誤差の影響

CDMA セルラ slotted ALOHA システムにおいて、制御誤差なしの送信電力制御を実現することは極めて困難である。図 5.11 に、送信電力制御の制御誤差の公平性係数に対する影響を示す。提案送信電力制御方式の公平性係数は、全ての σ_{pe} に対してチャンネル負荷に関係なくほぼ1である。一方、従来方式は高負荷領域において公平性係数が劣化している。公平性係数の σ_{pe} の変化による変動は、従来方式に比較して提案送信電力制御方式では極めて小さい。従来方式の公平性係数は、 σ_{pe} が小さい時に低チャンネル負荷領域で1に近く、高チャンネル負荷領域で1から遠ざかる。提案送信電力制御方式では逆に、送信電力制御誤差が大きい時に全チャンネル負荷領域で1に近い。したがって、提案送信電力制御方式は送信電力制御誤差のあるシステムに適している方式であると言える。

スループット特性

図 5.12 に、 $\Delta P_{\text{tgt}} = 2.5$ dB の場合の提案送信電力制御方式のスループット特性 S を示す。提案送信電力制御方式の S 特性は、従来方式に比較して、全てのチャンネル負荷領域で僅かながら向上している。これは、セル周辺部から送信されるパケットの送信電力が抑制されることによって、他セルへの干渉量が抑制されることに起因する。セル全体に公平なサービスの提供が可能なサイトダイバーシチなしの従来方式に比較して、最大スループット値で約10%の向上が得られている。提案送信電力制御方式では、スループット特性を劣化させることなく、セル全体に対して公平なサービスの提供を可能としている。

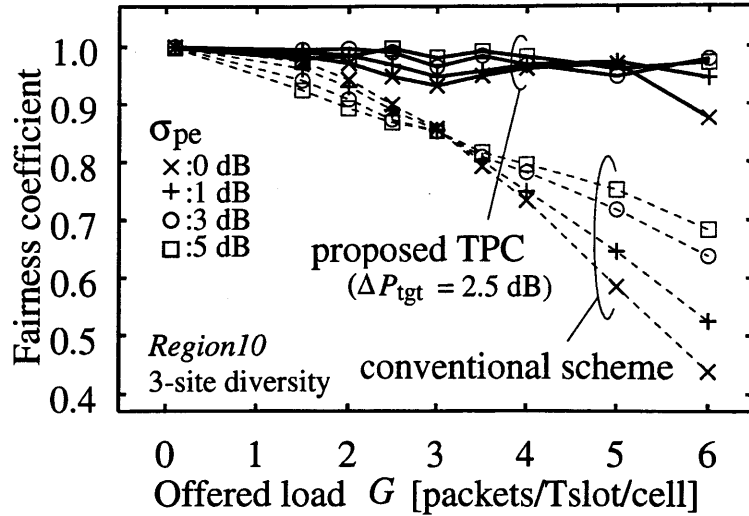


図 5.11: 送信電力制御誤差の TPCF 方式の公平性係数への影響 (Region10)

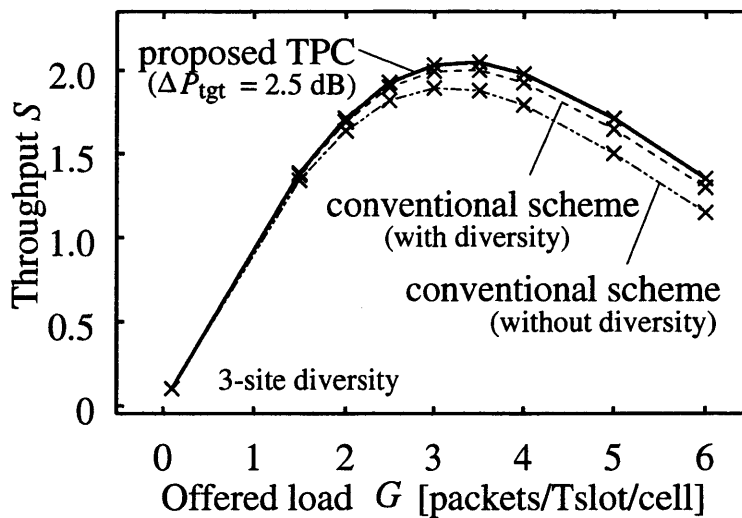


図 5.12: チャンネル負荷 G の変化に対する TPCF 方式のスループット S 特性 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

5.5.2 送信許可確率制御時の特性

サービス公平性

チャンネル負荷 G が 3.5 で $d_{ip} = 2.5$ の時の各領域の packets 受信率 p_{rec} を図 5.13 に示す。提案送信許可確率制御方式における packets 受信率 p_{rec} の領域の違いによる変動は、サイトダイバーシチを適用した場合の従来方式に比べて小さい。送信電力制御方式の場合と同様に、 p_{rec} 特性は Δp の値を変えると変化する。図 5.14 に各領域の移動局の送信レートを示す。送信レートは、移動局で発生した packets 数と実際に無線

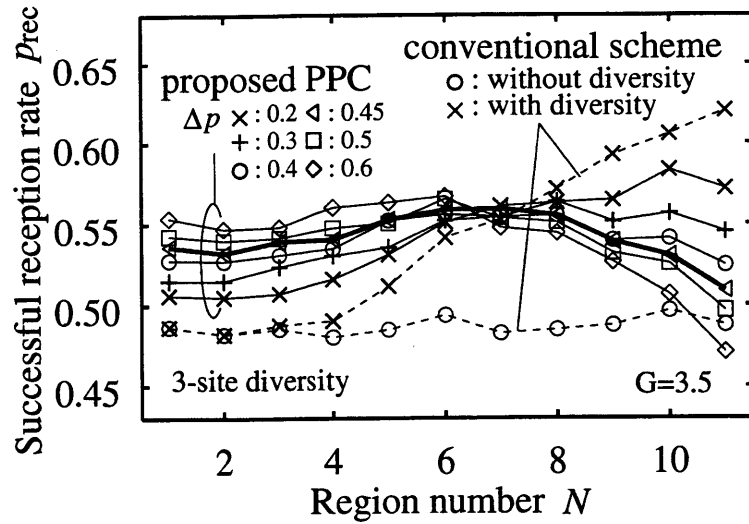


図 5.13: Δp の変化に対する PPCF 方式の packet 受信率 p_{rec} 特性 ($\sigma_{pe} = 3$ dB, $G = 3.5$)

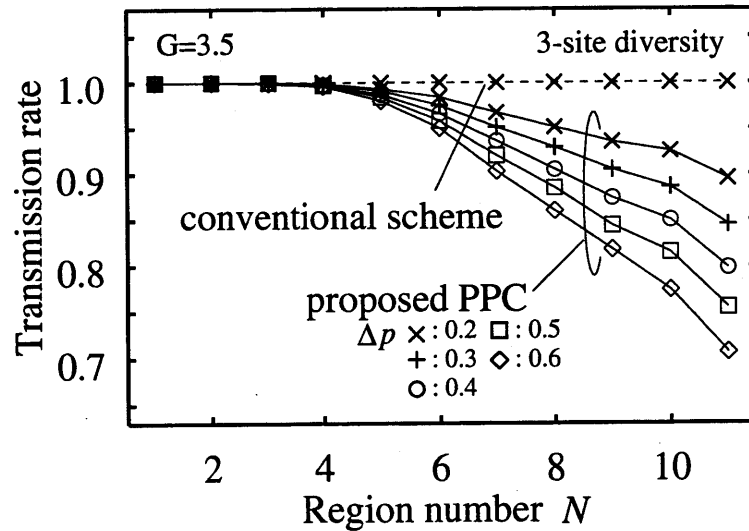


図 5.14: Δp の変化に対する PPCF 方式の送信レートの変化 ($\sigma_{pe} = 3$ dB, $G = 3.5$).

チャンネルに送信されて packet 数の比で示している。 p_{rec} 特性の変動は、図 5.14 に示されるように、基地局から遠方に位置する移動局の送信レートが Δp の増加により減少することに起因する。 Δp が大きい時、セル周辺部の p_{rec} は小さくなる。一方、セル中心部の p_{rec} は大きくなる。適切な ΔP_{tgt} を選択することにより、提案送信許可確率制御方式では packet 受信率 p_{rec} の領域間の変動を著しく減少させることが可能となる。

図 5.15 は 図 5.13 と同条件の場合の公平性係数を示している。提案送信許可確率制

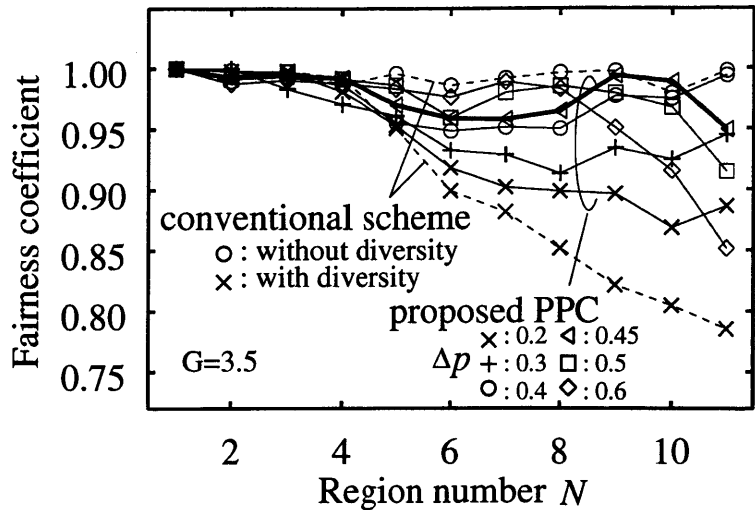


図 5.15: Δp の変化に対する PPCF 方式の公平性係数 ($\sigma_{pe} = 3$ dB, $G = 3.5$).

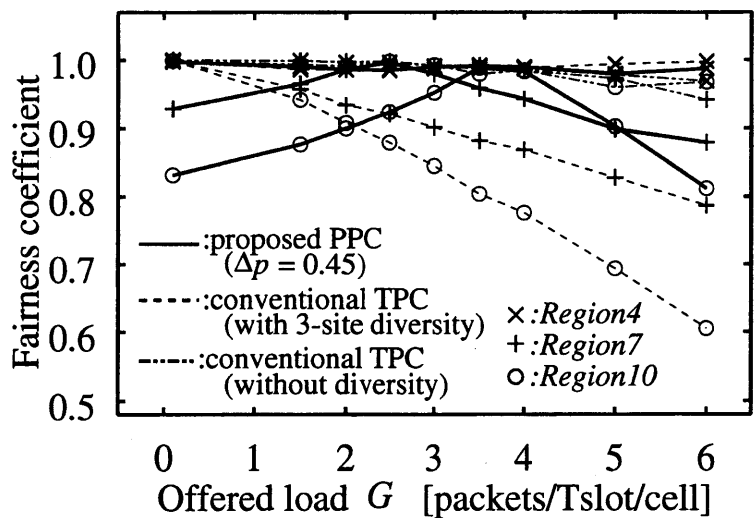


図 5.16: チャンネル負荷 G の変化に対する PPCF 方式の公平性係数 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

御方式の公平性係数は、 Δp が 0.4, 0.45 あるいは 0.5 の場合に全ての領域で 1 に近づいている。 $\Delta p = 0.4, 0.45$ の場合の公平性係数は、ほぼ全領域で 0.95 以上であり、 $G = 3.5$ のときの最適な Δp は 0.4 あるいは 0.45 である。

チャンネル負荷 G を 0 から 6 に変化させた場合の Region 4, 7 および 10 の公平性係数を図 5.16 に示す。 提案送信許可確率制御方式の公平性係数は、チャンネル負荷 $G = 3.5$ 付近で全領域でほぼ 1 であるが、他のチャンネル負荷においては 1 にならない。 これは、 $G = 3.5$ に対する最適 Δp ($= 0.4$ あるいは 0.45) が他のチャンネル負荷では最適値にならないためである。 それにもかかわらず、低チャンネル負荷領域 ($G < 2.0$) 以外におい

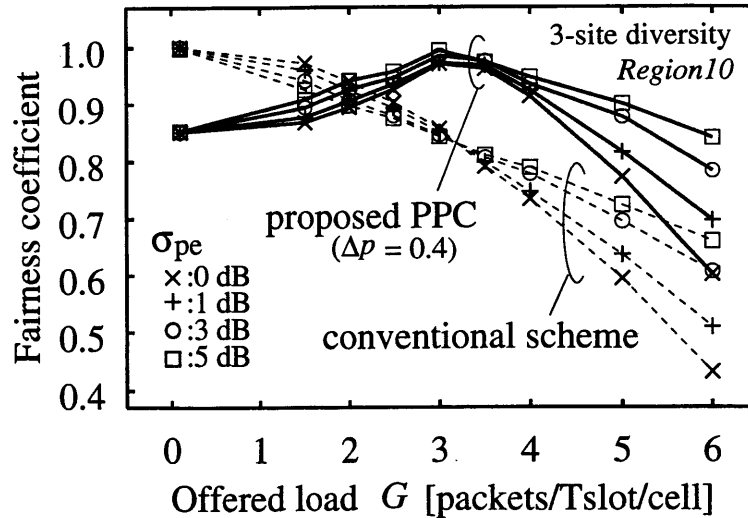


図 5.17: 送信電力制御誤差の PPCF 方式の公平性係数への影響 (Region10)

ては従来方式と比較して良い公平性係数を示している。

送信電力誤差の影響

図 5.17は、送信電力制御の制御誤差が提案送信許可確率制御方式の公平性係数に与える影響を示す。提案送信許可確率制御方式の公平性係数は、制御誤差 σ_{pe} の変化に対して、送信電力制御方式と同様に σ_{pe} が大きい時に 1 に近づく。その変動量は高チャネル負荷領域において大きい。従来方式との比較においては、低チャネル負荷領域 ($G < 2.0$) 以外で特性の改善が見られるが、その改善度は制御誤差 σ_{pe} が大きい時に大きくなっている。実システムではある程度の制御誤差があると思われるため、提案送信許可確率制御方式は従来方式より有効に機能すると考えられる。

スループット特性

提案送信許可確率制御方式を用いた場合のスループット特性 S を図 5.18 に示す。提案送信許可確率制御方式のスループット特性は特に高チャネル負荷時に改善されている。これは、セル周辺部の移動局のパケットの送信頻度が減少し、隣接セルへの干渉量が抑制されることに起因する。送信電力制御法と同様に、サイトダイバーシチなしの従来方式に比較して、最大スループット値において約 10% の改善が見られる。しかしながら、低チャネル負荷状態でスループット特性は僅かに劣化する結果となった。

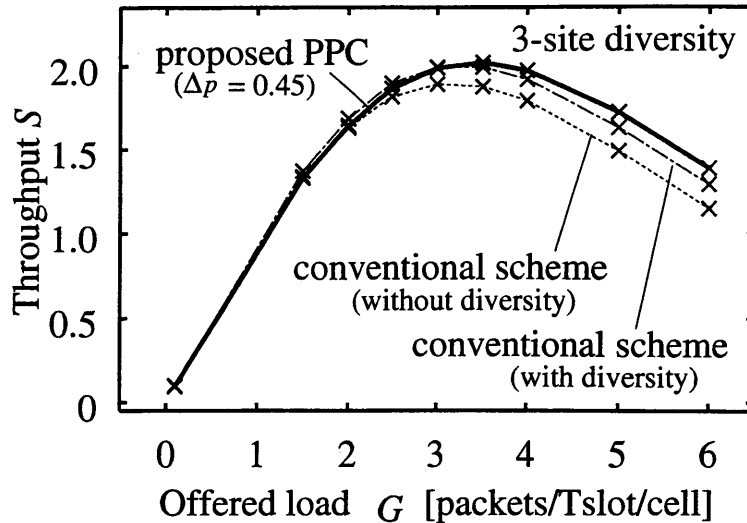


図 5.18: チャンネル負荷 G の変化に対する PPCF 方式のスループット S 特性 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

5.6 性能比較

本章で提案した2方式は、チャンネル負荷が3.5の場合、最適な ΔP_{tgt} あるいは Δp を用いればセル内の全領域において良好な公平性係数 (> 0.95) を示す (図 5.9, 5.15)。この結果は、 $G = 3.5$ の場合においては両者の公平性係数特性に殆んど差がないことを意味している。図 5.10が示すように提案送信電力制御方式の公平性係数はチャンネル負荷や領域番号の変化に対してほぼ1を示している。したがって、提案送信電力制御方式の ΔP_{tgt} の最適値は、チャンネル負荷や領域番号によらず一定 (= 2.5 dB) である。しかしながら提案送信許可確率制御方式においては、公平性係数はチャンネル負荷の変化で変化する (図 5.16)。これは、 $G = 3.5$ の場合の Δp の最適値が他のチャンネル負荷では最適にならないことを示している。提案送信許可確率制御で送信電力制御方式と同様の特性を得るためには、 Δp のチャンネル負荷による適応制御が必要である。

図 5.19は両提案方式のスループット特性の比較を示している。送信電力制御方式は、低チャンネル負荷領域において送信許可確率制御方式の特性を上回っている。送信電力制御方式のスループット特性は、低チャンネル負荷領域において従来方式の特性と同等であるのに対し、送信許可確率制御方式では従来方式より若干劣化している。ゆえに、公平性を維持する制御方式としては、送信電力制御方式の方が優れていると言える。

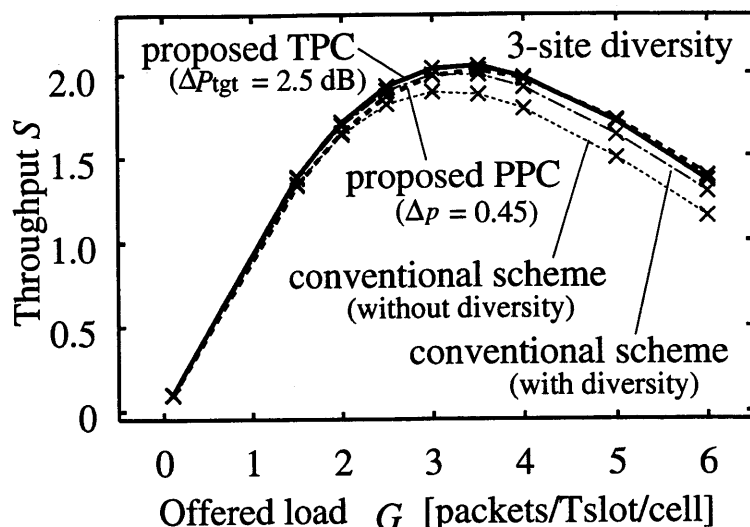


図 5.19: スループット S 特性の比較 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

5.7 まとめ

本章では、サイトダイバーシチを適用した CDMA セルラパケットシステムの上り回線のサービス提供の公平性について、パケット受信率の観点から検証した。サイトダイバーシチを適用することにより、セル周辺部のパケット受信率が向上し、サービス提供に不公平性が存在することを指摘した。このようなシステムのパケット受信における公平性を維持するために、パイロット受信電力差に基づいた送信電力制御法および送信許可確率制御法を提案し、その伝送特性を評価した。

その結果、提案方式では従来方式に比べ、パケット受信率の公平性が改善することがわかった。また、これらの方式では、サービスの公平性の改善を考えることにより、ある条件下でスループット特性が向上することもわかった。ゆえに、提案方式はサイトダイバーシチのある上り回線において効率的でかつ公平なサービスが提供できると言える。また、2つの方式の性能について比較検討した。送信許可確率制御方式に比較して、送信電力制御方式は全ての条件下でスループット特性の劣化なしに公平性を改善できる方式として優れていることがわかった。

参考文献

- [1] W. C. Y. Lee, "Overview of cellular CDMA", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.2, pp.291–302, May 1991.
- [2] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley III, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.2, pp.303–312, May 1991.
- [3] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, K. S. Gilhousen, and E. Zehavi, "Soft handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.12, no.8, pp.1281–1288, Oct. 1994
- [4] K. Sakakibara and M. Serizawa, "A slotted ALOHA with multiple common receivers over AWGN Rayleigh- fading channels," in *Proc. IEEE GLOBECOM '89*, 12.1, vol.1, pp.418–422, Dallas, Nov. 1989
- [5] 武尾 幸次, 佐藤 慎一, "CDMA マイクロセル移動体通信システムにおける不均一トラヒックを考慮したダイナミックセル構成法の効果," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-B-II, No.7, pp.565–577, 1997年7月
- [6] K. Takeo and S. Sato, "Evaluation of a CDMA cell design algorithm considering non-uniformity of traffic and base station locations," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E81-A, No.7, pp.1367–1377, July 1998.
- [7] Y. Takiyasu and E. Amada, "High-performance, fair access control method for wireless LANs," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E77-B, no.7, pp.855–861, July 1994
- [8] X. Lagrange and B. Jabbari, "Fairness in wireless microcellular networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.47, no.2, pp.472–479, May 1998

- [9] S. Papavassiliou, L. Tassiulas, and P. Tandon, "Meeting QOS requirements in a cellular network with reuse partitioning," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.12, no.8, pp.1389–1400, Oct. 1994
- [10] T. S. Eugene Ng, I. Stoica, and H. Zhang, "Packet fair queueing algorithms for wireless networks with location-dependent errors," in *Proc. IEEE INFOCOM '98*, vol.3, pp.1103–1111, San Francisco, March 1998
- [11] M. Kang and S. Wilbur, "A fair guaranteed down-link sharing scheme for cellular packet switched networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM '97*, vol.2, pp.472–479, Phoenix, Nov. 1997
- [12] 森 香津夫, 小林 岳彦, "CDMA セルラ slotted-ALOHA 通信におけるサービス公平性に関する検討," 電子情報通信学技術研究報告, DSP99-155, SAT98-75, RCS98-177, Jan. 1999.
- [13] K. Mori and T. Kobayashi, "Permission probability control for service fairness in CDMA slotted-ALOHA systems," in *Proc. IEEE VTC '99–Fall*, P.2.20, pp.1170–1174, Amsterdam, Sept. 1999.
- [14] K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, and A. Ogawa, "Service fairness in CDMA cellular slotted-ALOHA packet systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM '99*, WM-GC20.4, pp.655–660, Rio de Janeiro, Dec. 1999.
- [15] K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, and A. Ogawa, "Service fairness in CDMA cellular packet systems with site diversity reception," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E82-B, no.12, pp.1964–1973, Dec. 1999.
- [16] R. Prasad, M. G. Jansen, and A. Kegel, "Capacity of analysis of a cellular direct sequence code division multiple access system with imperfect power control," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E76–B, no.8, pp.894–905, Aug. 1993
- [17] R. Padovani, "Reverse link performance of IS–95 based cellular systems," *IEEE Personal Communications*, vol.1, no.3, pp.28–34, Third Quarter 1994.

第 6 章

公平性維持可能な送信許可確率制御における性能改善

6.1 はじめに

サービスエリア内の全ユーザに対して同等のサービスを提供することは、ユニバーサルサービスの観点から重要な事項であると考えられており、これまで様々なシステムにおいてサービスの公平性に関する検討がなされている [1]–[5]。セルラシステムにおいても公平なサービスの提供はサービス提供者にとって重要な役務となっており、電波の不感地域を可能な限り小さくする様々な努力が払われている。

第 5 章では、サイトダイバーシチを適用した CDMA セルラパケットシステムにおけるサービス提供の公平性について検討し、地理的な不公平性が存在することを指摘した。また、この不公平性を緩和する目的で、周辺基地局からのパイロット信号受信電力によりパケットの送信レートを制御する送信許可確率制御法 (PPCF) の提案を行なった [6],[7]。

第 5 章に示した送信許可確率制御方式は、ある条件下ではサービス提供の公平性を改善するが、一方で、その公平性はシステム条件の変動とともに変化することがわかった。つまり、第 5 章での方式には、全ての負荷領域で公平なサービス提供が不能となるという問題が存在する。これは、この従来方式においてはチャネル負荷の変化を考慮せず、固定の制御パラメータを用いて送信許可確率の制御を実施しているためである。さらに、低チャネル負荷領域でスループット特性が劣化する問題も存在する。公平性を維持するためにスループット特性を犠牲にすることは望ましいことではないため、従来法にはさらなる特性改善が望まれる。

本章では、上記の従来方式の問題を改善する適応型送信許可確率制御法 (APPCF: Adaptive transmit Permission Probability Control for Fairness) の提案を行なう [8]–[10]。提案方式では、送信許可確率をチャネル負荷と周辺基地局からのパイロット信

号受信電力により適応的に制御する。提案方式の packets 受信率, 公平性係数, およびスループット特性を, 送信電力制御誤差のあるセルラ環境において計算機シミュレーションにより評価した。その結果, サービス提供の公平性およびスループット特性が全チャンネル負荷領域で改善することを示す。

6.2 従来の送信許可確率制御法の問題点

パケットの送信位置に関するパケット受信の不公平性を軽減する目的で, 送信許可確率制御法 (FPPC) を第 5 章で提案した [6],[7]。

この従来方式を用いることにより, パケット受信における公平性および高負荷領域でのスループット特性が改善する。しかしながら, 従来方式での公平性は, チャンネル負荷の変化とともに変動する。その結果, 従来方式は全ての負荷領域において全移動局に公平なサービスの提供が不可能となる。これは, 従来方式においてはチャンネル負荷が変化した場合にも送信許可確率を求める時に使用する制御関数 (図 6.1) のパラメータ Δp が固定値に設定されているためである。

また, 従来方式には低チャンネル負荷領域でスループット特性が劣化する問題も存在する。最大スループットが得られるまでの低チャンネル負荷領域は, 実システムにおいては最も多く使用されるチャンネル負荷領域であるため, ここでのスループット劣化はたとえ僅かであっても問題となる。したがって, 全ての条件下においてスループットの劣化なしに公平なサービスの提供を可能とするためには, チャンネル負荷に応じた送信許可確率の適応制御が必要である。

6.3 適応送信許可確率制御

上記の従来方式の問題点を解決するために, 適応型送信許可確率制御法 (APPCF: Adaptive transmist Permission Probability Control for Fairness) を提案する。

提案方式では, 第 5 章に記述した従来方式での制御に加え, 図 6.1 に示したような Δp の適応制御を実施する。送信許可確率 p は, 従来方式と同様の方法で式 (5.1), (5.5), (5.7) により算出される。提案方式は, 各々のチャンネル負荷に対して最適な Δp を自律的に求め, 全チャンネル負荷にわたって最適な送信許可確率制御を提供する。基地局において, 自セル内のある領域からのパケットの受信率を推定し, 領域間の推定パケット受信率 \hat{p}_{rec} の差分をできるだけ小さくするように Δp を更新することで, 最適な Δp を得る。

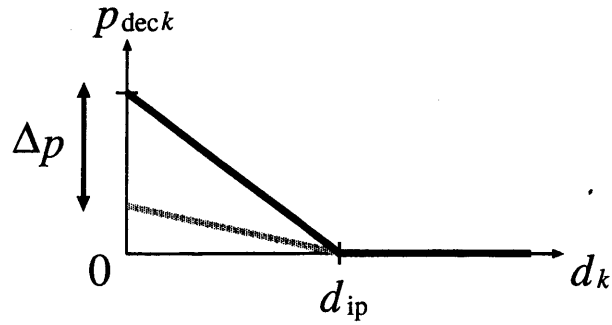


図 6.1: Δp の適応制御

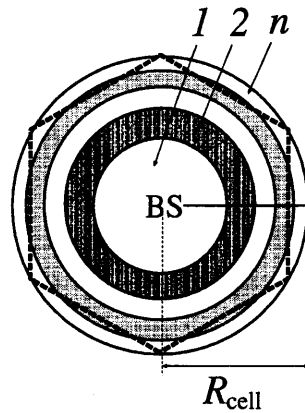


図 6.2: セルの分割 (n 等面積 Zones)

6.3.1 パケット受信率の推定

図 6.2 に示すように、セルを等面積の同心円状の n 個の領域に分割する。Zone₁ が基地局近傍の領域、Zone _{n} が最遠の領域である。基地局は、各々の領域からのパケットの受信率 \hat{p}_{rec} を推定する。基地局での \hat{p}_{rec} 推定は、受信パケットに含まれる再送に関する情報に基づいて行なわれる。まず、パケット送信時に移動局が送信パケットに、接続基地局のパイロット信号受信電力 P_{rx1} とその送信パケットの再送回数 N_{rtx} を挿入する。基地局は、受信パケットに含まれるこれらの情報 (P_{rx1} と N_{rtx}) から、領域毎に N_{rtxk} の平均値を算出する。各領域の推定パケット受信率 \hat{p}_{reck} は次式により求めることができる。

$$\hat{p}_{\text{reck}} = \frac{1}{N_{\text{rtxk}} + 1}, \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (6.1)$$

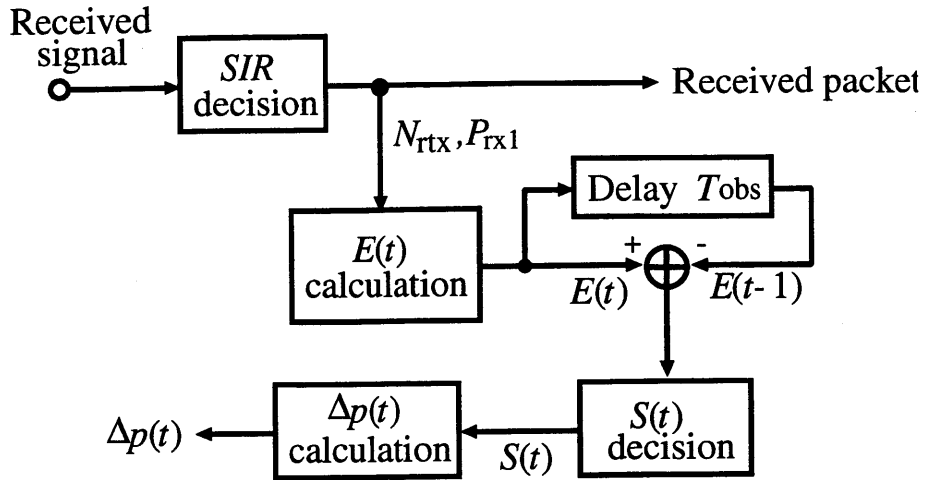


図 6.3: Δp 制御のブロック図

ここで, $\overline{N_{rtxk}}$ は, $Zone_k$ から到来するパケットの N_{rtx} の平均値を示す.

6.3.2 パケット受信率における誤差の最小化

提案方式では, \hat{p}_{reck} における領域間の差を最小にする Δp を探索する. 誤差 e_k を \hat{p}_{reck} における差を評価するために定義する. 誤差 e_k は, 基地局近傍領域の推定パケット受信率 \hat{p}_{rec1} とその他の領域の \hat{p}_{reck} の差として, 次のように定義する.

$$e_k = \frac{\hat{p}_{reck} - \hat{p}_{rec1}}{\hat{p}_{rec1}} = \frac{\hat{p}_{reck}}{\hat{p}_{rec1}} - 1. \quad (6.2)$$

提案方式は, 上述の誤差 e_k の 2 乗和 E を最小にする Δp を導き出す.

$$E = \sum_{k=2}^n e_k^2. \quad (6.3)$$

図 6.3 は, Δp の制御アルゴリズムのブロック図を示す. 基地局は, 単位時間 T_{obs} 毎に E を計算し, 現在の E と前回の E を比較することにより, Δp の更新を行なう. $E(t)$ を時刻 t の誤差 e_k の 2 乗和とすると, Δp 制御は次式により実施される.

$$\Delta p(t) = 1 - \{1 - \Delta p(t-1)\} / \beta^{S(t)}, \quad (6.4)$$

ここで,

$$S(t) = \begin{cases} S(t-1) & ; E(t) < E(t-1) \\ (-1) \cdot S(t-1) & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.5)$$

式(6.4), (6.5)において, $\Delta p(t)$ は時刻 t の Δp の値, $\Delta p(t-1)$ はその前の Δp の値であり, β は更新定数 ($\beta > 1.0$), $S(t)$ は更新の方向を示す符号関数 ($S(t) = 1$ あるいは -1 , and $S(0) = 1$) である.

上述のアルゴリズムによれば, E が増加した場合に $S(t)$ は前回の値の反転値となり, Δp は前回の更新と逆方向に更新される. したがって, Δp は常に E を小さくする方向に更新される.

Δp の制御方式として, E がある値に達した場合に Δp の更新を終結する方式が考えられる. しかしながら, このような方式ではチャネル負荷の変化による E の変動に対応できない. よって, チャネル負荷の変化に対応するために, 提案方式では Δp を常に更新する方式を採用する.

6.4 システムモデル

検討の対象とするシステムとして, 低速フェージングのあるセルラシステムを考える. 第4.4章に述べたシステムと同様の前提条件や DS/CDMA チャネルを仮定する. また, サイトダイバーシチに関しては, 第5.2.1章に述べたモデルを仮定する.

6.4.1 トラヒックモデル

一般に, 実システムにおけるチャネル負荷は時間的に変動すると考えられる. 本章では, 固定負荷モデルと時変負荷モデルの2つのモデルを仮定する. 固定負荷モデルのチャネル負荷は, シミュレーション期間中固定値で与えられる. 時変負荷モデルは, 図6.4に示すような正弦波形に従うチャネル負荷の変動を持つ.

固定負荷モデルと時変負荷モデルのいずれのモデルにおいても, 平均チャネル負荷 G をパラメータとして第4.4章で述べた基本評価モデルに従いパケットが発生する.

6.5 特性評価

提案方式の性能評価を計算機シミュレーションにより実施した. 評価項目は, スループット S , パケット受信率 p_{rec} と公平性係数とし, それぞれの定義は第5.3.1に示したとおりである. 統計量は, $M \times M$ のサービスエリアの中心セルから収集した. 表6.1に,

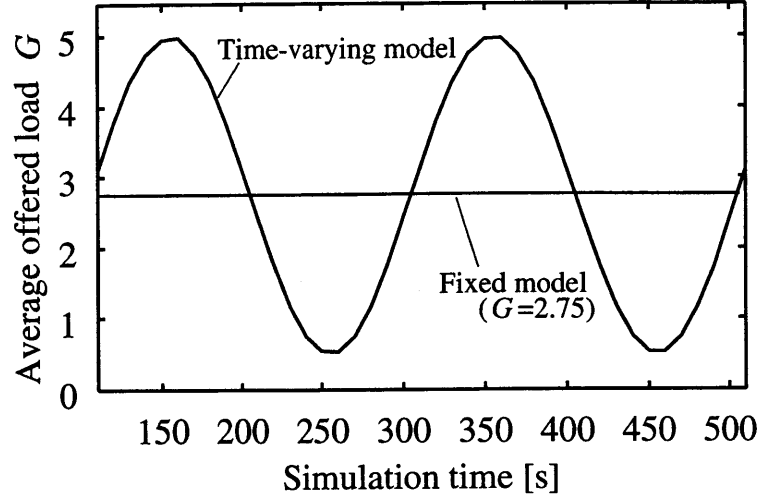


図 6.4: 固定負荷モデルと時変負荷モデルにおける平均チャネル負荷 G の変化

表 6.1: シミュレーション諸元

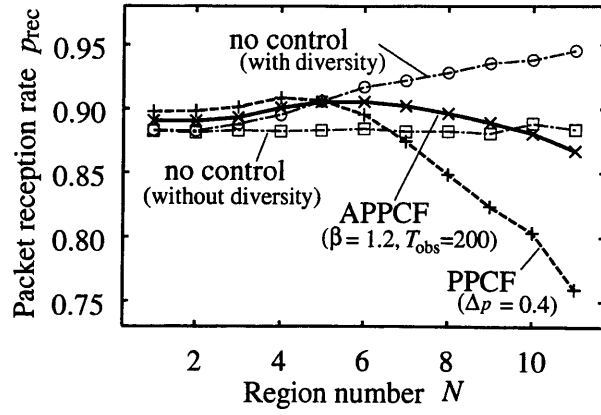
	Symbol	Value
Service area	$M \times M$	5×5 [cells]
Cell radius	R_{cell}	230 [m]
Propagation loss coefficient	α	3.5
Standard deviation of shadowing	σ_s	7.0 [dB]
Processing gain	G_p	16
Required SIR	SIR_{req}	5.0 [dB]
Standard deviation of TPC errors [11], [12]	σ_{pe}	3.0 [dB]
Number of base stations for site diversity	M_{SD}	3
Number of zones for Δp control	n	5
Observing duration of the sum E	T_{obs}	100, 200 [slots]

シミュレーション諸元を示す。

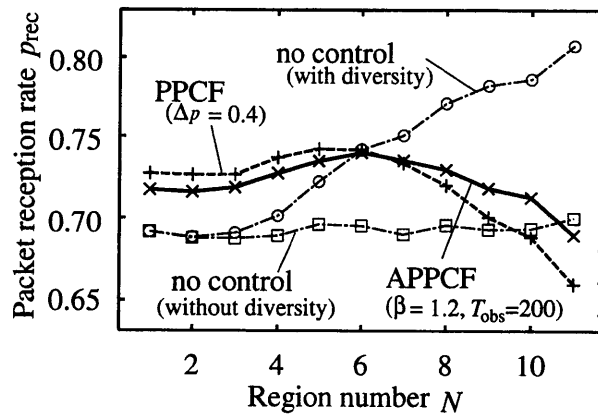
本シミュレーションにおいては、推定パケット受信率 \hat{p}_{reck} を収集統計データ (N_{suc} と N_{gen}) より直接計算した。したがって、 \hat{p}_{reck} の推定は誤差なく実施される。

6.5.1 サービス公平性

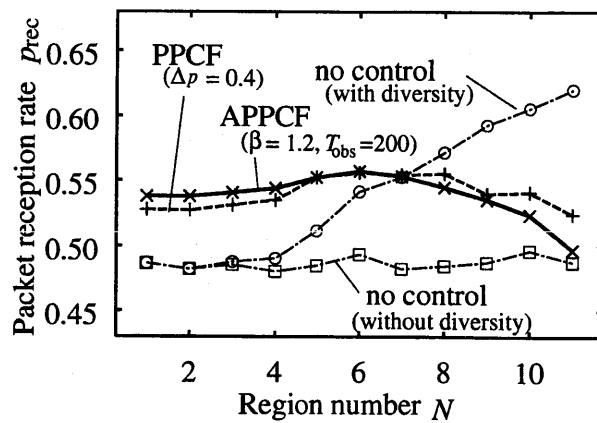
図 6.5は、 $d_{\text{ip}} = 2.5$ [dB] の場合に、固定負荷モデルで異なるチャネル負荷 G に対する各領域のパケット受信率 p_{rec} を示す。従来方式 (PPCF) の p_{rec} 特性は、 $G = 3.5$ の場合に最適である $\Delta p = 0.4$ [6] を用いた場合の特性を示している。従来方式の p_{rec} 特性は、 $G = 3.5$ の場合に各領域で一定であるのに対し、 $G = 2.5$ や 1.5 の場合は、



(a) $G = 1.5$



(b) $G = 2.5$



(c) $G = 3.5$

図 6.5: 領域番号 N に対するパケット受信率 p_{rec} 特性 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

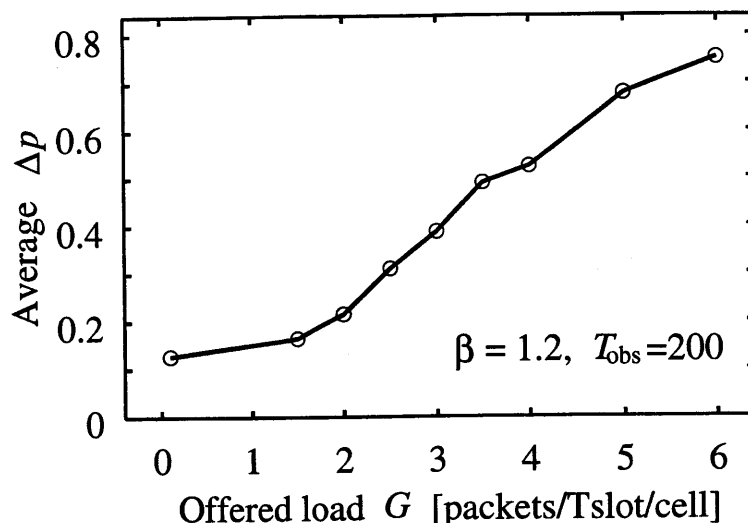


図 6.6: チャンネル負荷 G に対する平均 Δp 特性 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

領域により変化している。この領域間の違いは、チャンネル負荷が小さい時に大きい。一方、提案方式 (APPCF) では、 p_{rec} はチャンネル負荷に関係なく全ての領域で一定である。これは、提案方式が各チャンネル負荷に対して最適な Δp を自律的に探索しているからである。

図 6.6は、提案方式での Δp の平均値を、固定負荷モデルにおけるチャンネル負荷の関数として示している。 Δp は、チャンネル負荷に従い増加している。 p_{rec} の領域間の変動がチャンネル負荷に従い大きくなるため、この変動を小さくするために Δp を大きくする方向に制御が働いているためである。

図 6.7は、固定負荷モデルでチャンネル負荷を 0 から 6 まで変化させた時の *Region4*, *7* および *10* の公平性係数を示す。従来方式の公平性係数は $G = 3.5$ 付近において全領域でほぼ 1 であるが、他のチャンネル負荷では、特に *Region7* と *10* で大幅に劣化している。これに対し、提案方式の公平性係数はチャンネル負荷に関係なしに全領域で 0.95 以上となっている。この結果は、提案方式は全負荷領域にわたりセル内の全ての移動局に対して公平なサービス提供が可能であることを示している。

6.5.2 スループット特性

図 6.8に示されているように、提案方式のスループット特性 S は、従来方式の特性と比較して全負荷領域で改善している。提案方式では、送信許可確率制御を行わない場合の特性と比較しても、低負荷領域でのスループット劣化はほとんどない。これは、各チャンネル負荷に対して最適な Δp で、パケットの送信レートの制御が実施され

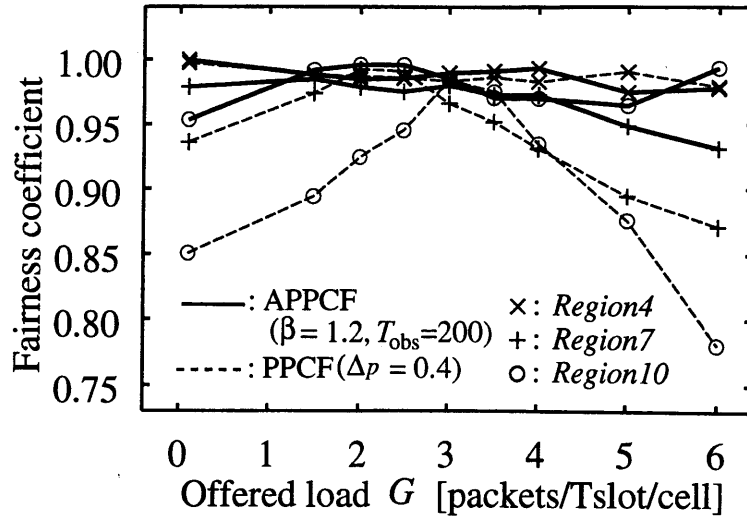


図 6.7: チャンネル負荷 G に対する公平性係数 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

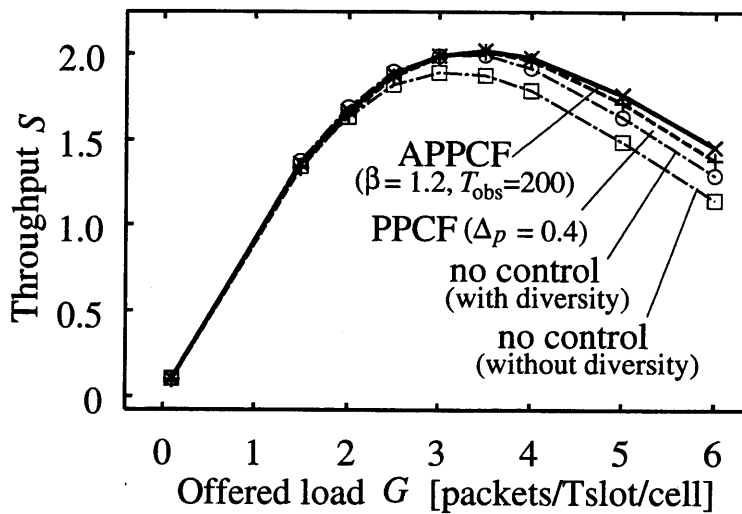


図 6.8: チャンネル負荷 G に対するスループット特性 S ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

ていることに起因する。したがって、提案方式は全負荷領域でスループット特性を劣化させることなく、公平なサービスの提供が可能である。

6.5.3 チャンネル負荷変動の影響

本節では、チャンネル負荷変動が提案方式の特性に与える影響について考察する。

図 6.9は、チャンネル負荷を図 6.4に示すように 0.5 から 5.0 まで時間的に変化させた時の *Region1*, 7 および 10 の p_{rec} 特性を示している。従来方式や送信許可確率制御を行わない場合は、 p_{rec} に領域間の差が見られる。従来方式の p_{rec} は、チャンネル負荷

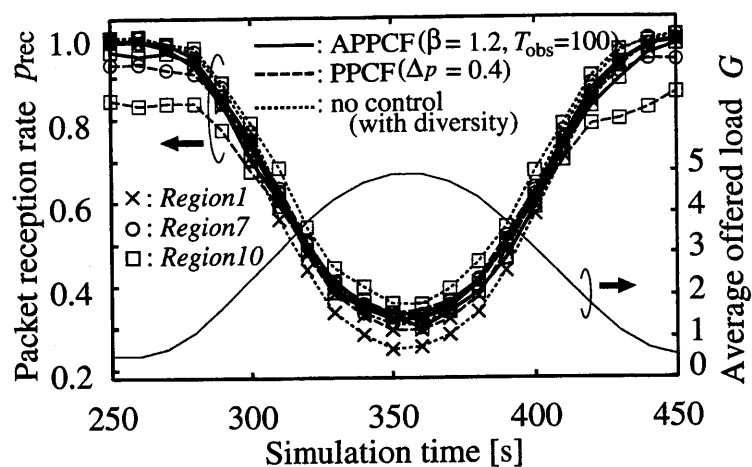


図 6.9: 時変チャネル負荷に対するパケット受信率特性 p_{rec} ($\sigma_{\text{pe}} = 3$ dB)

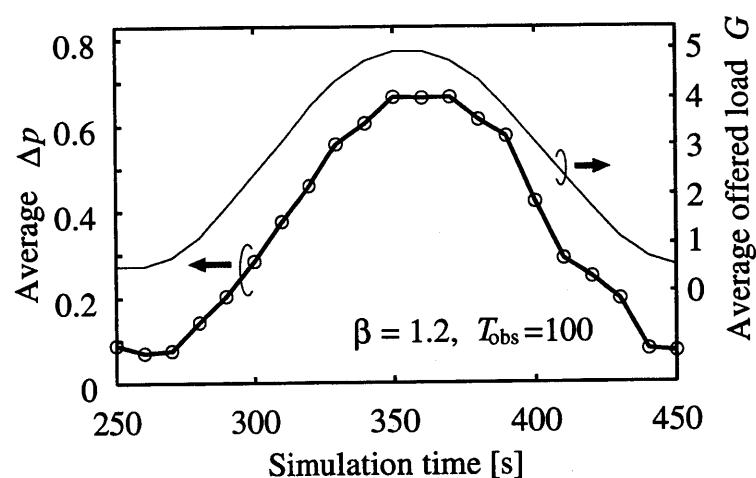


図 6.10: 時変チャネル負荷に対する平均 Δp 特性 ($\sigma_{\text{pe}} = 3$ dB)

が小さい時に、送信許可確率制御を行わない場合の p_{rec} は、チャネル負荷が大きい時に領域間の差が大きくなる。一方、提案方式の p_{rec} は、チャネル負荷が大きい時も小さい時もほぼ同じ値を示している。提案方式は、図 6.10 に示すようにチャネル負荷の変化に対応して Δp を変化させることで、常に最適な Δp で送信許可確率の制御を実施しているためである。

図 6.11 は、図 6.9 と同条件の場合の公平性係数を示している。提案方式の公平性係数は、領域番号 N に係わらず常にほぼ 1 を示す。他方、従来方式では、時間あるいは領域番号 N のいずれの変化において公平性係数が変化する。

図 6.12 に、時間的に負荷が変動する場合のスループット特性を示す。提案方式は、負荷が変動する場合においても、 $G = 3.5$ で最大スループット 2.0 を得ている。この

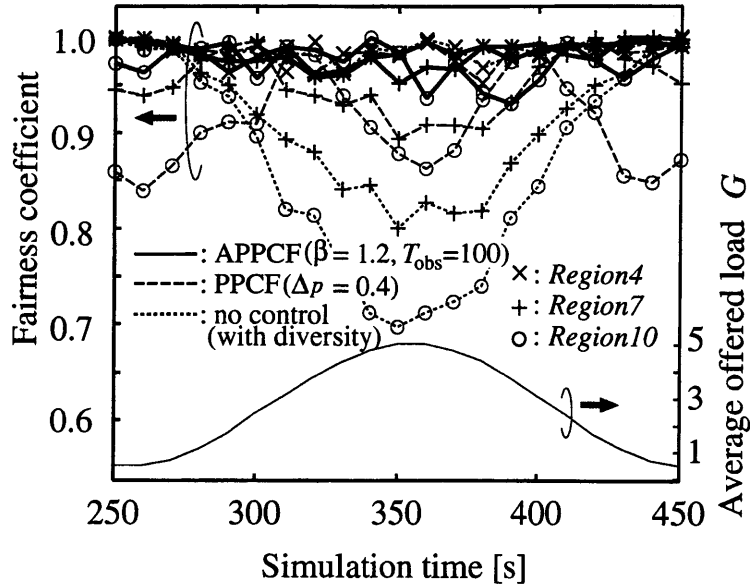


図 6.11: 時変チャネル負荷に対する公平性係数 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

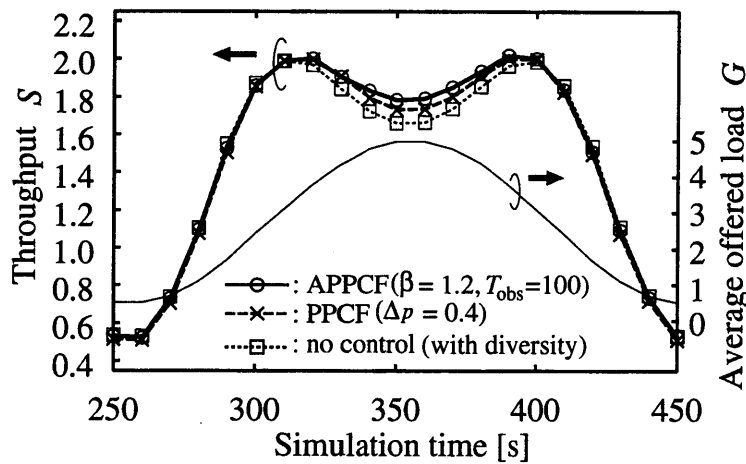


図 6.12: 時変チャネル負荷に対するスループット S 特性 ($\sigma_{pe} = 3$ dB)

最大スループット値は、負荷の変動しない場合の特性に等しい(図 6.8)。さらに、常に従来方式のスループット特性を上回っている。以上から、提案方式はチャネル負荷が時間的に変動するシステムで十分に機能することがわかる。

6.6 まとめ

送信許可確率をチャネル負荷と周辺基地局からのパイロット信号受信電力により適応的に制御する適応型送信許可確率制御は、サイトダイバーシチを備えた CDMA セ

ルラパケットシステムの上り回線における地理的およびチャネル負荷による不公平性を緩和できることを示した。提案方式の伝送特性を固定負荷システムおよび時間的に負荷の変動するシステムで評価した。その結果、従来方式に比べて、全てのチャネル負荷に対してサービスの公平性を改善できることがわかった。また、低チャネル負荷領域でのスループット特性が改善し、送信許可確率制御を実施しない場合と同等の特性を得ることがわかった。さらに、提案方式はチャネル負荷が時間的に変動するシステムで十分に機能することもわかった。したがって、提案方式は、従来方式に比較して、サイトダイバーシチを備えた上り回線でより公平でかつ効率的なサービスが提供可能である。

参考文献

- [1] Y. Takiyasu and E. Amada, "High-performance, fair access control method for wireless LANs," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E77-B, no. 7, pp. 855–861, July 1994
- [2] X. Lagrange and B. Jabbari, "Fairness in wireless microcellular networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 47, no. 2, pp. 472–479, May 1998
- [3] S. Papavassiliou, L. Tassiulas, and P. Tandon, "Meeting QOS requirements in a cellular network with reuse partitioning," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 1389–1400, Oct. 1994
- [4] T. S. Eugene Ng, I. Stoica, and H. Zhang, "Packet fair queueing algorithms for wireless networks with location-dependent errors," in *Proc. IEEE INFOCOM '98*, vol. 3, pp. 1103–1111, San Francisco, March 1998
- [5] M. Kang and S. Wilbur, "A fair guaranteed down-link sharing scheme for cellular packet switched networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM '97*, vol. 2, pp. 472–479, Phoenix, Nov. 1997
- [6] K. Mori and T. Kobayashi, "Permission probability control for service fairness in CDMA slotted-ALOHA systems," in *Proc. IEEE VTC '99-Fall*, P.2.20, pp.1170–1174, Amsterdam, Sept. 1999.
- [7] K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, and A. Ogawa, "Service fairness in CDMA cellular packet systems with site diversity reception," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E82-B, no.12, pp.1964–1973, Dec. 1999.
- [8] 森 香津夫, 小林 岳彦, 山里 敬也, 小川 明, "CDMA セルラパケット通信における送信許可確率制御によるサービス公平性の改善," 電子情報通信学技術研究報告, RCS99-91, Aug. 1999.

- [9] K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, and A. Ogawa, "Control of transmit permission probability to improve service fairness in CDMA service fairness in CDMA cellular packet communications," in *Proc. IEEE MOMUC '99*, pp.35–42, San Diego, Nov. 1999.
- [10] K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, and A. Ogawa, "Adaptive transmit permission probability control in CDMA cellular packet communications with site diversity," *IEICE Trans. Commun.* (条件付採録)
- [11] R. Prasad, M. G. Jansen, and A. Kegel, "Capacity of analysis of a cellular direct sequence code division multiple access system with imperfect power control," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E76-B, no.8, pp.894–905, Aug. 1993
- [12] R. Padovani, "Reverse link performance of IS-95 based cellular systems," *IEEE Personal Communications*, vol.1, no.3, pp.28–34, Third Quarter 1994.

第 7 章

音声 / データ統合 CDMA パケット通信における送信許可確率制御

7.1 はじめに

これまでの章では，トラヒック源として簡単なデータモデルを仮定して CDMA セルラパケットシステムの検討を行なってきた．第 3 章で述べたように，パケット通信は元来データ伝送を目的に開発された通信方式である．セルラシステムの基本アーキテクチャを CDMA パケット通信 [1]-[4] とした場合，音声のような即時性を要求するトラヒックを如何に收容し音声 / データ (さらには画像) の統合伝送を実現するかが大きな課題となる．

音声とデータの統合伝送が可能な移動通信システムの上り回線プロトコルとして，これまで PRMA (Packet Reservation Multiple Access) 方式が盛んに研究されている [5]-[8]．最近では PRMA 方式と CDMA 方式を組み合わせた CDMA/PRMA 型アクセス制御方式が検討されている [9]-[11]．

PRMA 方式を DS/CDMA 環境に適用する場合，狭帯域 (FDMA や TDMA) 系のシステムには存在しなかった同一時刻 (スロット) でのパケット集中に起因する性能劣化が新たな問題となる．そこで本章では，まず最初に PRMA 方式を DS/CDMA 環境に適用した場合の音声伝送システムのパケット廃棄率特性をマルコフ解析より解析的に導出する [12]．CDMA/PRMA 方式の特性解析は，文献 [11] で行われているが，最終的な評価項目であるパケット廃棄率は，シミュレーション結果を用いた近似式で導出している．ここでは，解析手法によりパケット廃棄率まで導出する．

その後，CDMA/PRMA 方式のシステム性能向上手法として，送信許可確率制御方式 [12]-[16] を提案する．これまでの CDMA パケット通信でのマルチメディア統合伝送方式の検討は，単一セル環境で実施されているものが大部分であった．ここでは，隣接セルからの干渉のあるセルラ環境で効率良く動作する方式を提案する．提案方式

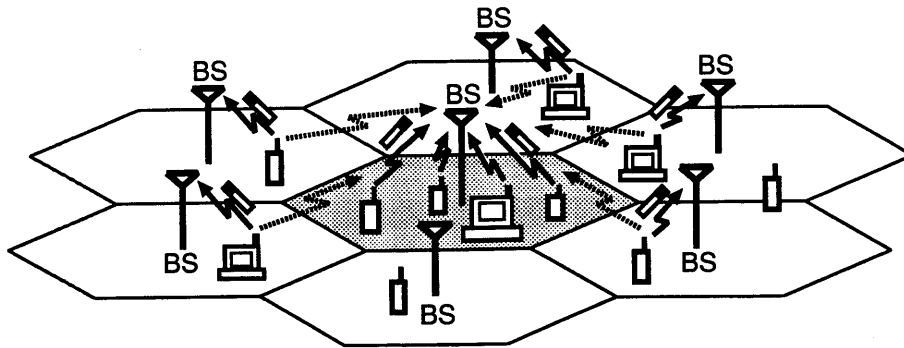


図 7.1: セルモデル

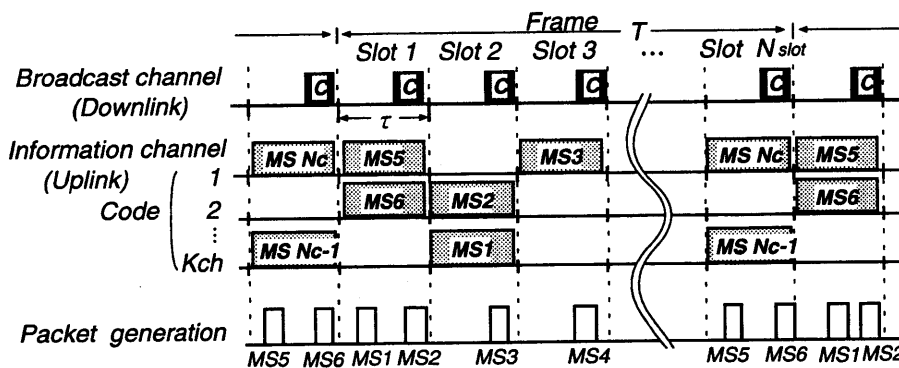


図 7.2: チャネル構造

は、移動局の packets 送信の確率を接続移動局数や隣接セルからの干渉量に基づいて適切に制御し、基地局での packets 衝突確率を低減する方式である。また、end-of-use フラグを使用して R-ALOHA (Reservation ALOHA) プロトコル [17],[18] における予約解放を明示的に行なうことにより、多元接続干渉に起因する予約の途中解除を回避する方式である。提案方式の伝送特性を、計算機シミュレーションにより求め、従来方式と比較検討することで評価する。伝送特性評価は、単一セル環境および疑似的なセルラ環境において、音声のみおよび音声 / データ統合伝送の場合について行なう。特性評価の結果、提案方式は良好な伝送特性が得られたことを示す。

7.2 CDMA/PRMA アクセス方式

CDMA/PRMA アクセス方式は、PRMA 方式を CDMA 環境で動作させる伝送方式である。CDMA 方式に適用可能とするために従来の PRMA 方式を拡張したものである。したがって、基本的なプロトコルは従来の PRMA 方式 [5],[6] と同様である。

トラヒック源には、音声とデータを仮定する。

7.2.1 チャンネル構成とアクセスプロトコル

図 7.1 に本章で検討対象とするセルモデルを、図 7.2 に CDMA/PRMA アクセス方式のチャンネル構成を示す。チャンネルの時間軸はスロット化されており、複数スロット (N_{slot} スロット) でフレームを構成する。上り回線には複数の符号チャンネルが存在し、互いに拡散符号で分離されている。下り回線では、上りパケットの応答 (ACK) 信号や制御信号が伝送される。この制御信号には、スロット (符号) 予約状態 ('reserved' あるいは 'available') や送信許可確率 p_v, p_d が含まれる。送信許可確率は、従来の PRMA 方式と異なりスロット毎に変化する。

全てのパケットは固定長で、スロットの先頭に同期して伝送される。音声パケットは R-ALOHA 方式 [17],[18] に類似した予約伝送 (発生からある時間以上経過しても送信できなかったパケットが端末により廃棄される点で R-ALOHA 方式と異なる)、データパケットはランダムアクセス (Slotted ALOHA) で伝送される。

7.2.2 CDMA/PRMA アクセス方式の問題点

CDMA 方式では 1 つの周波数帯域を利用して多元接続通信を行なっているため、図 7.3 に示すように同一スロットに多くのパケットが集中して送信されると、多元接続干渉が原因でそのスロットに送信されている全てのパケット (ランダムアクセスパケットだけでなく、予約アクセスパケットまでも) の品質が劣化し、最悪の場合全てのパケットが受信不能となる。その結果、予約の途中解除が発生し、移動局は再度予約取得を行なう必要性が生じる。これにより、予約要求のためのランダムアクセスパケットの数が増大するために、予約要求時のパケット集中が多発して音声パケットの伝送効率が低下する。このことは、チャンネル (周波数帯域) 間で多元接続干渉が発生しない狭帯域システムでの PRMA には存在しない CDMA/PRMA アクセス方式特有の問題である。

伝送効率の向上を目指し、チャンネルアクセス関数で移動局のパケット送信時の送信許可確率を制御する方式が検討されている [9],[10]。チャンネルアクセス関数は図 7.4 に示したような関数であり、スロットの予約伝送パケット数と音声の送信許可確率を関係づける関数である。従来方式では要求されるサービス品質やチャンネル負荷に係わらず、音声とデータの送信許可確率の比が一定に制御されている。このため、チャンネル負荷が大きくなると音声、データのいずれのパケットも伝送遅延が増大し、音声伝送に要求されるリアルタイム性が損なわれる。さらに、チャンネルアクセス関数はシステ

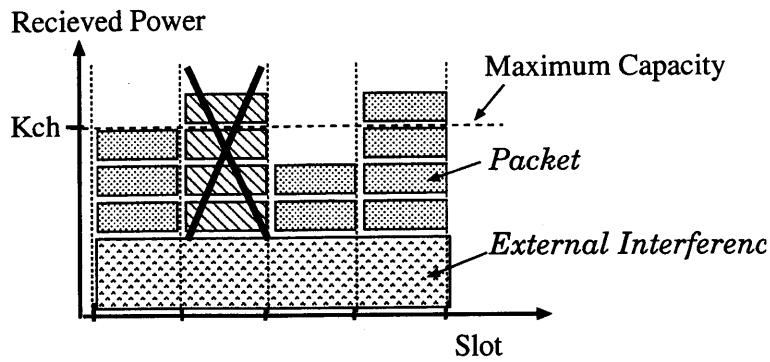


図 7.3: パケットの衝突

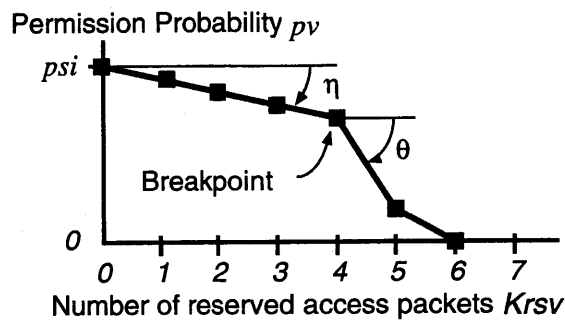


図 7.4: チャネルアクセス関数

ム性能に直接的な影響を与えるため、良好なシステム性能を得るためには、システム環境に合った最適なパラメータ (η , θ , p_{si} および breakpoint) を選択する必要がある。しかしながら、実際のセルラ環境では伝搬環境がセル毎に異なることが予想されるため、実環境において最適なチャネルアクセス関数を選択することは事実上困難と考えられる。

本章では、このような従来の CDMA/PRMA アクセス方式の持つ問題点に焦点をあて、これらの問題点を改善する送信制御方式を検討し、その伝送特性の評価を行なう。

7.3 システムモデル

各移動局は、基地局の保持する符号チャネルに対応する拡散符号を用いてパケットを直接拡散し伝送する。予約を持たない音声移動局およびデータ移動局は、基地局より報知されるスロット (符号) 予約状態情報より 'available' な符号チャネルをランダム

に選択し、音声移動局は送信許可確率 p_v に、データ移動局は p_d に従いパケット伝送する。予約方式には、R-ALOHA プロトコル [17],[18] を採用する。

本章では、前提条件として次のような仮定を行う。

- パケットは、 L ビットの固定長で、FEC などの誤り訂正符号は用いない。音声 / データパケットはいずれも同様の構造をもつ。
- 伝送チャネルは、雑音、フェージング、シャドーイングやマルチパス等の影響を受けない理想的なものである。また、下り回線の情報は、全ての移動局で誤りなく受信できる。
- 理想的な電力制御が行なわれおり、基地局でのセル内から到来するパケットは全て同じ電力で受信される。
- 接続中の移動局数は、呼接続制御等により予め基地局でわかるシステムである。

7.3.1 DS/CDMA チャンネルモデル

DS/CDMA チャンネルのビット誤り率 (BER) 特性は、ガウス近似した近似法が広く用いられている。 $R+1$ 個の負荷の等しいセルから構成されるセルラ環境を考えた時、多元接続干渉をガウス近似すると、完全な電力制御が行われている場合のビットエラー確率 $P_e(K)$ は、次式で表すことができる [19]。この場合、白色ガウス雑音 (AWGN) は、無視している。

$$P_e(K) = Q \left(\sqrt{\frac{3 \cdot G_p \cdot P_0}{(K-1) \cdot P_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^R P_{(k,i)_0}}} \right) \quad (7.1)$$

ここで、 $Q(x)$ は Q 関数であり、 G_p は拡散率、 K は各セルの同時到着パケット数である。また、 P_0 はセル内のユーザからのパケットの着目基地局での受信電力、 $P_{(k,i)_0}$ はセル外のユーザからのパケットの着目基地局での受信電力である。

パケット長が L でビットエラー確率 $P_e(K)$ の伝送路を通過した場合のパケット受信成功確率 $P_s(K)$ は、次式で与えられる。

$$P_s(K) = \{1 - P_e(K)\}^L \quad (7.2)$$

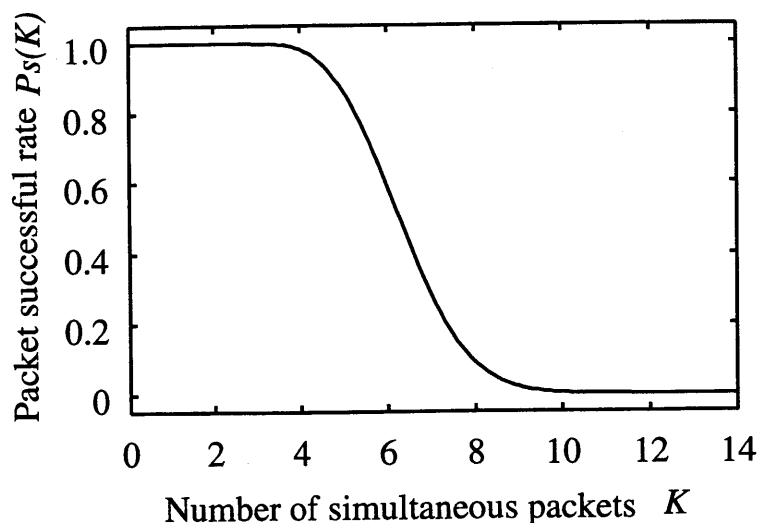


図 7.5: パケット受信成功確率 $P_s(K)$ (拡散率 G_p : 16, パケット長 L : 544 [bits])

単一セル環境

単一セル環境では、セル外干渉は存在しないので、式 (7.1) は、

$$P_{ei}(K) = Q\left(\sqrt{\frac{3 \cdot G_p}{K-1}}\right) \quad (7.3)$$

となる。例えば、拡散率 $G_p=16$ 、パケット長 $L=544$ (ヘッダー: 32 bits, 情報: 512 bits) を考えた場合、 $P_s(K)$ 特性は、図 7.5 に示す結果となる。本章では CDMA/PRMA アクセス方式の伝送特性を明らかにすることが目的であるため、単一セル環境のパケット受信成功確率 $P'_{si}(K)$ を次式の簡単な関数で近似することとする。

$$P'_{si}(K) = \begin{cases} 1; & K \leq K_{ch} \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7.4)$$

ここで K_{ch} は最大同時受信可能パケット数 (最大チャネル数) である。本検討においては、 K_{ch} として図 7.5 においてパケット受信成功確率 $P_s(K) \geq 0.5$ を満たす $K_{ch}=6$ を選択した。式 (7.4) の正当性については、既に第 4.4.2 で述べたとおりである。

セルラ環境

セルラ環境として、基地局がセルの中心に存在する 6 角形セルの正則配置を考える。この場合の平均のセル外干渉は、文献 [1] で求められている。伝搬条件として α 乗の距離減衰、一様分布の移動局、セル内移動局の電力制御が理想的であると考える場合、

正規化セル外干渉電力 I_{ext} (単位は traffic/cell) は α のみに依存する。 $\alpha=3$, $\alpha=4$ に対して, I_{ext} は各々 0.749, 0.37 と見積ることができる [20].

本章のセルラ環境の性能評価において, セル外干渉は平均セル外干渉量で計算するものとする。したがって, 式 (7.1) は次式のように置き換えることが可能である [10].

$$\begin{aligned} P_{\text{ec}}(K) &= Q \left(\sqrt{\frac{3 \cdot G_p \cdot P_0}{(K-1) \cdot P_0 + I_{\text{ext}} \cdot \frac{M \cdot V_a}{N_{\text{slot}}} \cdot P_0}} \right) \\ &= Q \left(\sqrt{\frac{3 \cdot G_p}{(K-1) + I_{\text{ext}} \cdot \frac{M \cdot V_a}{N_{\text{slot}}}}} \right) \end{aligned} \quad (7.5)$$

ここで, M は同時通信 (音声) 移動局数であり, V_a は音声有音率ある。

単一環境の場合と同じように, セルラ環境の packets 受信成功確率 $P'_{\text{sc}}(K)$ を次式の簡単な関数で近似することとする。

$$P'_{\text{sc}}(K) = \begin{cases} 1; & K \leq K_{\text{ch}} - I_{\text{ext}} \cdot \frac{M \cdot V_a}{N_{\text{slot}}} \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7.6)$$

7.3.2 移動局 (MS) モデル

音声モデル

図 7.6-(a) のような有音 / 無音の 2 状態からなるモデルを考える [5]. 無音から有音状態, 有音から無音状態へのスロット単位の遷移確率 ρ_1, ρ_2 を次式で与える。

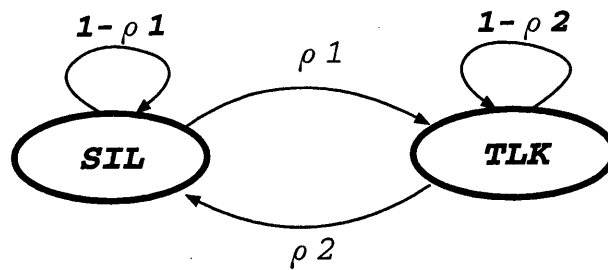
$$\rho_1 = 1 - \exp(-\tau/t_{\text{SIL}}) \quad (7.7)$$

$$\rho_2 = 1 - \exp(-\tau/t_{\text{TLK}}) \quad (7.8)$$

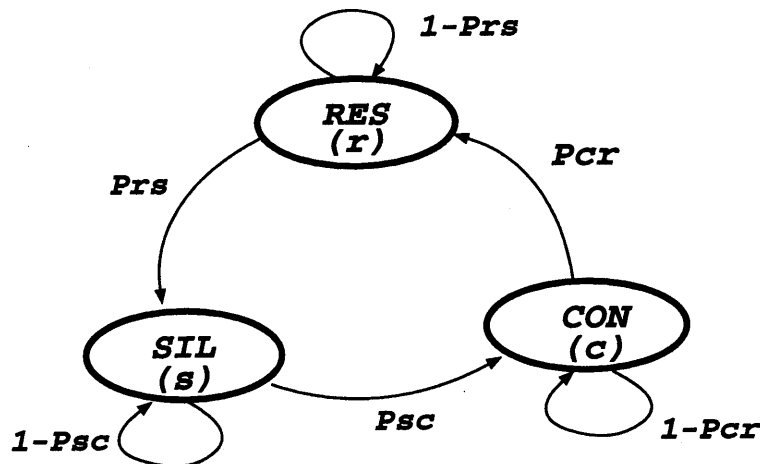
ここで, $\tau, t_{\text{SIL}}, t_{\text{TLK}}$ は, スロット長, 無音状態および有音状態の平均保留時間である。また, 有音率 V_a は, $V_a = t_{\text{TLK}} / (t_{\text{TLK}} + t_{\text{SIL}})$ となる。音声符号化レートは 32kbps で, packets は有音状態に 1 packet / フレームで周期的に生起する。予約の保持は有音状態のみで, 無音状態では解放する。音声は即時性が重要であるため, 許容遅延時間 D_{max} を経過した packets は移動局内で廃棄する。

データモデル

バースト性情報を生成するモデルとする。アプリケーションとして比較的データ量の少ない電子メールを仮定する。電子メールの packets 発生は, 平均バースト長が約



(a) Speech Model



(b) Markcov Model

図 7.6: 音声モデル

2K バイトの 6-Erlang 分布に従う [21]. バースト発生間隔は平均 t_{BST} 秒の指数分布とする. データ移動局内のバッファ長は L_{BUF} パケットとする.

7.4 音声システムのマルコフ解析

CDMA/PRMA アクセス方式の音声システムにおける最も重要な性能評価項目はパケット廃棄率 p_{drop} である. ここでは, 第 7.3 節で示した単一セル環境のモデルにおいて送信許可確率を固定とした場合の音声パケット伝送時のパケット廃棄率 p_{drop} を, マルコフ連鎖でモデル化して定常点解析を行なうことで解析的に導出し, シミュレーション結果と比較検討する.

7.4.1 定常状態解析

CDMA/PRMA アクセス方式における音声パケット送信時の移動局状態として, 無音 (SIL), 予約競合 (CON), 予約 (RES) の 3 状態を定義する. これらのある状態から他

の状態への遷移は、スロット毎に行なわれる。 $n + 1$ スロットの状態は n スロットの状態のみに依存するので、図 7.6-(b) のようなマルコフ連鎖でモデル化することができる。また、図 7.6-(b) に示されるマルコフ連鎖はエルゴール的であるため、定常状態が存在する。図 7.6-(b) では、解析を簡単にするために、定常状態においては予約競合状態に留まる時間が小さいと考え、予約取得以前に有音区間が終了する確率を無視している。また、有音区間の最終パケットの誤る確率も無視し；有音区間の終了で予約 (RES) から無音 (SIL) 状態に必ず遷移すると仮定している。

図 7.6-(b) のマルコフ連鎖モデルの状態遷移行列 P は、

$$P = \begin{pmatrix} 1 - P_{sc} & P_{sc} & 0 \\ 0 & 1 - P_{cr} & P_{cr} \\ P_{rs} & 0 & 1 - P_{rs} \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

であり、 P_{sc}, P_{cr}, P_{rs} は次式で与えられる。

$$P_{sc} = \rho 1 \quad (7.10)$$

$$P_{cr} = \sum_{j=1}^{K_{ch}} \sum_{k=1}^j P_{sp}(j) P_{tx}(k) \quad (7.11)$$

$$P_{rs} = \rho 2 \quad (7.12)$$

ここで、 $P_{sp}(j)$ は空きチャネルが j 個存在する確率、 $P_{tx}(k)$ は予約競合状態にある移動局のうち k 局がパケットを送信する確率である。定常状態における無音、予約競合、予約状態に分布する移動局数を S, C, R とすると、 $P_{sp}(j), P_{tx}(k)$ は次式で与えられる。

$$P_{sp}(j) = \binom{K_{ch}}{j} (1 - R/K_{ch}N_{slot})^j \cdot (R/K_{ch}N_{slot})^{K_{ch}-j} \quad (7.13)$$

$$P_{tx}(k) = \binom{C}{k} p_v^k \cdot (1 - p_v)^{C-k} \quad (7.14)$$

したがって、システム内に存在する音声移動局数を M_v 、定常状態の移動局分布ベクトルを $\pi = (S, C, R)$ とすると、 π は次式を解くことで求めることができる。

$$\pi = \pi \cdot P \quad (7.15)$$

$$\pi \cdot e = M_v \quad (7.16)$$

7.4.2 パケット廃棄率の導出

CDMA/PRMA アクセス方式でのパケット廃棄は次の場合に発生し、各々の場合の1つの有音区間中の平均廃棄パケット数を $E[n1_{\text{drop}}]$, $E[n2_{\text{drop}}]$ とする.

- (1) 予約競合状態で D_{max} を経過した場合: $E[n1_{\text{drop}}]$
- (2) 予約状態で多元接続干渉により基地局で受信されず再送までに D_{max} を経過した場合: $E[n2_{\text{drop}}]$

競合状態での廃棄パケット数: $E[n1_{\text{drop}}]$

文献 [6] によれば、有音区間に L 個のパケットが存在する確率 $P_r(L)$ および L パケットからなる有音区間の平均廃棄パケット数 $E[n1_{\text{drop}}|L]$ は

$$P_r(L) = \rho 2_f (1 - \rho 2_f)^{L-1} \quad (7.17)$$

$$E[n1_{\text{drop}}|L] = v^D \frac{1 - v^{N_{\text{slot}} L}}{1 - v^{N_{\text{slot}}}} \quad (7.18)$$

で与えられる。ここで、 v は競合状態に留まる確率で定常状態では $v = 1 - P_{\text{cr}}$ であり、 $\rho 2_f$ は $\rho 2_f = N_{\text{slot}} \cdot \rho 2$ 、 D は $D = \lceil D_{\text{max}}/\tau \rceil$ である ($\lceil x \rceil$ は、 x 以上の最小の整数を表す)。よって、競合状態での平均廃棄パケット数は次式となる。

$$\begin{aligned} E[n1_{\text{drop}}] &= \sum_{L=1}^{\infty} E[n1_{\text{drop}}|L] P_r(L) \\ &= \frac{v^D}{1 - (1 - \rho 2_f) v^{N_{\text{slot}}}} \end{aligned} \quad (7.19)$$

予約状態での廃棄パケット数: $E[n2_{\text{drop}}]$

予約伝送中の移動局の L パケットからなる有音区間内に多元接続干渉で受信不可となるパケット数 $n(L)$ は、

$$n(L) = \sum_{i=0}^L i \cdot \binom{L}{i} P_{\text{nrx}}^i (1 - P_{\text{nrx}})^{L-i} \quad (7.20)$$

$$P_{\text{nrx}} = \sum_{j=0}^{K_{\text{ch}}} \sum_{k=j+1}^C P_{\text{sp}}(j) P_{\text{tx}}(k) \quad (7.21)$$

である。一方、予約取得までに l スロット待つ確率は、

$$P_w(l) = (1 - v) v^{l-1}, \quad l = 1, 2, \dots \quad (7.22)$$

である。予約取得に $D - N_{\text{slot}}$ を越えるスロットを要した ($l > D - N_{\text{slot}}$) 場合、多元接続干渉で受信できなかったパケットは、再送までに D_{max} に達するため全て廃棄される。一方、 $l \leq D - N_{\text{slot}}$ の場合は再送が可能で、その回数は l に依存する。したがって、多元接続干渉で廃棄されるパケット数は、待ちスロット数 l の関数として次式のように示される。但し、再送パケットは必ず受信できるものとする。

$$n_{2\text{drop}}(l) = \begin{cases} n(L) - k ; D - (k-1)N_{\text{slot}} + 1 \leq l \leq D - kN_{\text{slot}} \\ \quad (1 \leq k \leq D/N_{\text{slot}} - 1; k \text{ は整数}) \\ n(L) ; D - N_{\text{slot}} + 1 \leq l \leq D + (L-1)N_{\text{slot}} \\ 0 ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (7.23)$$

L パケットからなる有音区間中に $n(L) - k$ または $n(L)$ 個のパケットが廃棄される確率は、

$$\begin{aligned} Pr(n_{2\text{drop}} = n(L) - k | L) \\ = \sum_{l=D-(k-1)N_{\text{slot}}+1}^{D-kN_{\text{slot}}} Pw(l) &= v^{D-(k-1)N_{\text{slot}}} - v^{D-kN_{\text{slot}}} \\ &\quad (1 \leq k \leq D/N_{\text{slot}} - 1; k \text{ は整数}) \end{aligned} \quad (7.24)$$

$$\begin{aligned} Pr(n_{2\text{drop}} = n(L) | L) \\ = \sum_{l=D-N_{\text{slot}}+1}^{D+(L-1)N_{\text{slot}}} Pw(l) &= v^{D-N_{\text{slot}}} - v^{D+(L-1)N_{\text{slot}}} \end{aligned}$$

である。式 (7.20), (7.24) より L パケットからなる有音区間の多元接続干渉による平均廃棄パケット数 $E[n_{2\text{drop}} | L]$ は

$$\begin{aligned} E[n_{2\text{drop}} | L] = \sum_{k=1}^{D/N_{\text{slot}}-1} (n(L) - k)(v^{D-(k-1)N_{\text{slot}}} - v^{D-kN_{\text{slot}}}) \\ + n(L)(v^{D-N_{\text{slot}}} - v^{D+(L-1)N_{\text{slot}}}) \end{aligned} \quad (7.25)$$

となり、多元接続干渉による平均廃棄パケット数 $E[n_{2\text{drop}}]$ は次式で与えられる。

$$E[n_{2\text{drop}}] = \sum_{L=1}^{\infty} E[n_{2\text{drop}} | L - E[n_{1\text{drop}} | L]] P_r(L) \quad (7.26)$$

以上より、パケット廃棄率 p_{drop} は、 $E[n_{1\text{drop}}]$ と $E[n_{2\text{drop}}]$ の和と有音区間の平均パ

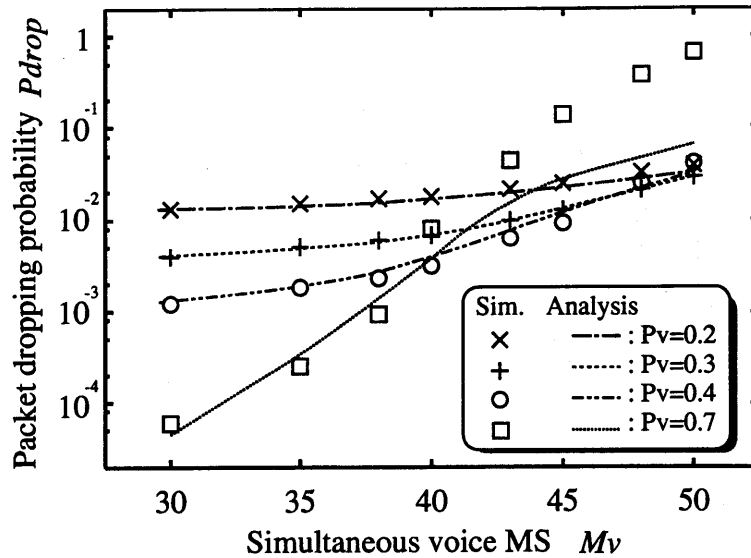


図 7.7: 音声パケット廃棄率特性 p_{drop} (送信許可確率一定)

ケット数 $1/\rho 2_f$ の比であるので,

$$p_{\text{drop}} = (E[n_{1\text{drop}}] + E[n_{2\text{drop}}]) \cdot \rho 2_f \quad (7.27)$$

となる。

数値計算例

送信許可確率 p_v を $p_v = 0.2, 0.3, 0.4, 0.7$ とした場合のパケット廃棄率特性 p_{drop} を図 7.7 に示す。図 7.7 は、システムパラメータを表 7.1 に示される値に設定した場合の計算結果である。図 7.7 における横軸は同時通信局数であり、解析結果(曲線)とシミュレーション結果($\times, +, \circ, \square$)を示している。解析での仮定条件に合致しない一部を除きいずれの場合も解析値とシミュレーション値が良く一致しており、この範囲内での解析方法の妥当性が示された。 $p_v = 0.7$ の高負荷時に両者の不一致が見られるが、有音区間の最終パケットが誤る確率が無視できるという解析における仮定が成立しないためだと考えられる。

また、図 7.7 から、固定の p_v で全チャネル負荷領域において最小のパケット廃棄率を得ることは困難であることがわかる。したがって、送信許可確率をチャネル負荷に応じて適応的に制御することで、性能向上が期待できる。

7.5 送信許可確率適応制御

送信許可確率適応制御は、パケット集中に起因するシステム性能劣化を低減し、全負荷領域で良好なパケット廃棄率を得ることが期待できる。また、音声 / データ伝送時の音声パケットの伝送特性の劣化を最小限に抑えることが可能となる。提案方式では、チャンネル状況に応じて音声送信許可確率 p_v にデータ送信許可確率 p_d より高い優先度を与え、両者を適切に算出して基地局から報知する。これにより、移動局のパケット送信は要求品質に応じて制御される。同時に、基地局に到来するパケット数が適切に保たれ、システム性能が向上する。

提案方式の目的は、end-of-use フラグの導入することで多元接続干渉に起因する予約解除を防止すること、および、音声パケットをデータパケットに比べて優先伝送することで音声のリアルタイム伝送を保障することである。また、チャンネルアクセス関数を用いずにシステムを効率良く運用することも目的である。

7.5.1 end-of-use フラグの導入

送信許可確率適応制御では、音声パケットの予約伝送プロトコルに end-of-use フラグ付きの R-ALOHA プロトコル [18] を導入する。移動局は、end-of-use フラグを含むパケットを送信することで、予約の解放を明示的に行なう。基地局は、受信パケットにおいて end-of-use フラグを検出することで予約の解除を行ない、他の原因による予約解除は行なわない。これにより、予約の途中解除が回避され、パケットの集中が緩和されることが期待できる。

7.5.2 送信許可確率適応制御の詳細

送信許可確率適応制御では、送信許可確率 p_v, p_d をスロット毎に制御する。送信許可確率 p_v, p_d は、チャンネル負荷が大きい程、音声パケットが優先伝送されるように制御される。チャンネル負荷が軽くチャンネルリソースに余裕がある場合はデータパケットの伝送を許可する。一方、チャンネル負荷が重い場合は、データパケットの伝送を待機させる。音声パケットとデータパケットの優先度比は、チャンネル負荷に応じて適切に制御され、送信許可確率 p は、チャンネル状態を監視して適応的に求める。こうして、全チャンネル負荷領域でデータパケットの影響を最小限に抑えながら音声パケットの伝送を行う。

セルラシステムは、位置登録制御や呼接続制御が必須であるため、これらの上位レイヤ制御により、基地局は接続中移動局数を容易に知ることが可能である。提案方式

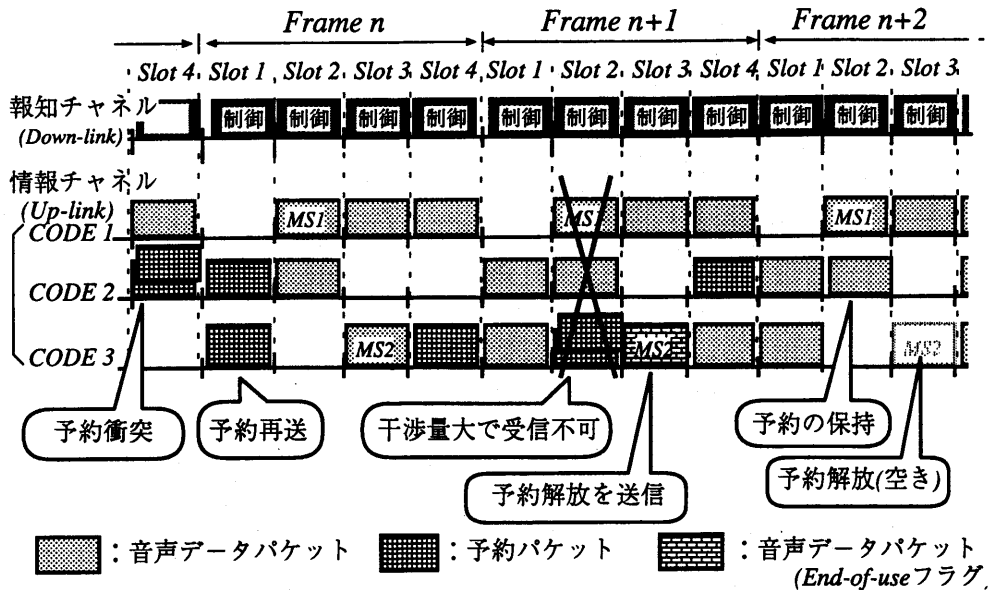


図 7.8: 改良型 R-ALOHA プロトコル

は、接続中移動局数、予約付与移動局数から予約競合中の移動局数を推定し、適切な送信許可確率を導出する。

あるスロットの送信許可確率の最適値は、利用可能チャンネルリソース K_{sp} (ランダムアクセス伝送のために利用可能なチャンネルリソース) とそこに印加されるチャンネル負荷によって次のように与えられる。

$$p = \frac{(\text{利用可能チャンネルリソース } K_{sp})}{(\text{チャンネル負荷})} \quad (7.28)$$

あるスロットの予約伝送用に割り当てられているチャンネルリソース K_{rsv} は、基地局で既知であるので、受信電力 P_0 で正規化したセル外干渉量を K_{ext} と仮定すると、与えられたスロットの利用可能チャンネルリソース K_{sp} は、図 7.9 に示したように次式で得ることができる。

$$K_{sp} = K_{ch} - (K_{ext} + K_{rsv}) \quad (7.29)$$

基地局は、利用可能チャンネルリソース K_{sp} を予約要求する音声パケット伝送用リソース K_{sp-v} とデータパケット伝送用リソース K_{sp-d} に分割する。

セル内移動局の電力制御は理想的であると仮定しているため、利用可能チャンネルリソース K_{sp} にかかるチャンネル負荷は K_{sp} を競合する移動局数に置き換えることが可能

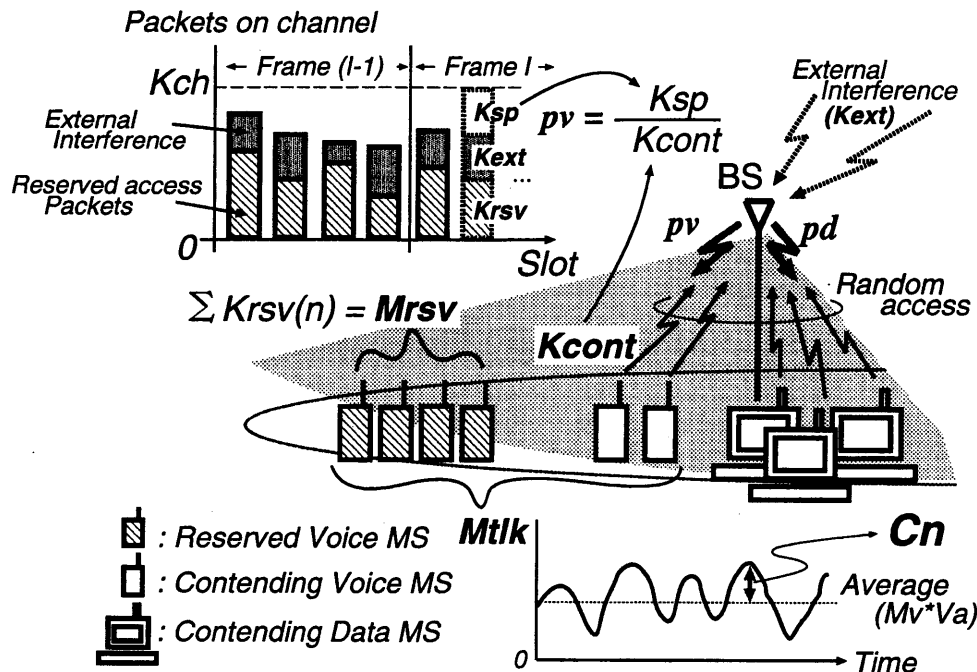


図 7.9: 送信許可確率適応制御

である。音声とデータの競合する移動局数を各々 $K_{\text{cont-v}}, K_{\text{cont-d}}$ とすると，送信許可確率 p_v, p_d はそれぞれ次のように与えられる。

$$p_v = \frac{K_{\text{sp-v}}}{K_{\text{cont-v}}} \quad (7.30)$$

$$p_d = \frac{K_{\text{sp-d}}}{K_{\text{cont-d}}} \quad (7.31)$$

セル外干渉量の測定

セルラ型 CDMA/PRMA システムでは，一般的にセル外干渉が存在しその量がスロット毎に異なることが予想されるため，各々のスロットで使用可能なチャンネルリソースが異なる。したがって，基地局は，使用可能チャンネルリソース K_{sp} を把握するために，各スロットのセル外干渉量 K_{ext} を測定（あるいは，推定）する必要がある。CDMA/PRMA アクセス方式を採用したシステムでは，音声パケットは予約伝送されており，またパケットを保持しているデータ移動局数は大きく変動しないため，短期間（数フレーム）内のフレーム毎の同一スロットにおける使用可能チャンネルリソース K_{sp} はほぼ一定であると考えられる。

提案方式では，各スロットの K_{ext} の測定を N_{mea} フレーム毎に実施する。測定スロット数は 1 スロット / フレームとする。送信許可確率 p_v, p_d を共に 0 に設定して基地局

より放送することで、ランダムアクセスパケットの送信を抑制して、 K_{ext} の測定を可能とする。 K_{ext} の測定の手順は以下のとおりである。

【Step1】 基地局が測定スロットの p_v, p_d を 0 に設定して放送する。

【Step2】 自セルと他セルに存在する全ての移動局からの到来パケットの総受信電力 P_{rxtotal} を基地局で測定する。

【Step3】 自セルに存在する移動局から到来する予約伝送パケットの受信電力の和 P_{rxrsv} を基地局で計算する。

【Step4】 セル外干渉量 K_{ext} を $(P_{\text{rxtotal}} - P_{\text{rxrsv}})/P_0$ により算出する。

なお、【Step2】において P_{rxtotal} が最大チャネル容量 K_{ch} を超えた場合、基地局は多大な多元接続干渉が発生しないように、そのスロットで付与している幾つかの予約を解放する。

利用可能チャネルリソースの割当て

音声パケットの優先伝送のため、基地局は最初に全ての使用可能チャネルリソース K_{sp} を優先的に音声パケット伝送用に割り当てる。したがって、 $K_{\text{sp-v}}$ は次式で与えられる。

$$K_{\text{sp-v}} = \begin{cases} K_{\text{cont-v}} & ; K_{\text{sp}} \geq K_{\text{cont-v}} \\ K_{\text{sp}} & ; \text{otherwise} . \end{cases} \quad (7.32)$$

競合音声移動局数が使用可能チャネルリソース K_{sp} より小さい場合は K_{sp} に余剰部分が存在するので、その余剰部分をデータパケット伝送用に割り当てる。つまり、 $K_{\text{sp-d}}$ は次式のように表すことができる。

$$K_{\text{sp-d}} = \begin{cases} K_{\text{sp}} - K_{\text{sp-v}} & ; K_{\text{sp}} \geq K_{\text{cont-v}} \\ 0 & ; \text{otherwise} . \end{cases} \quad (7.33)$$

競合移動局の推定

音声競合移動局 $K_{\text{cont-v}}$ 音声は有音区間と無音区間から構成されており、音声移動局は有音区間のみパケットを生成する。したがって、音声競合移動局数 $K_{\text{cont-v}}$ は次式で与えられる。

$$K_{\text{cont-v}} = M_{\text{tlk}} - M_{\text{rsv}} \quad (7.34)$$

ここで、 M_{tlk} は有音区間である音声移動局数の推定値、 M_{rsv} は既に予約スロットを取得している音声移動局の総数である。 M_{rsv} は基地局で既知であるため、 M_{tlk} を推定することにより、音声競合移動局数 $K_{\text{cont-v}}$ を求めることが可能となる。提案方式では M_{tlk} を次式により推定する。

$$M_{\text{tlk}} = M_v \cdot V_a + C_n \quad (7.35)$$

図 7.9 に示すように、平均の有音区間音声移動局数は、 M_v と V_a で与えられるが、実際の有音区間音声移動局数は時間とともに変化する。よって、提案方式では、より正確な有音区間音声移動局数を得るために、変数 C_n を導入して時間的変動に追従する。 C_n は、スロット毎にチャンネル状態を監視して、次のような仮定により制御される。

【仮定 1】 いくらかの音声移動局に予約を付与したスロットにおいて、パケットを受信しなかった場合、

M_{tlk} が実際の有音移動局数より小さい。

$\Rightarrow C_n$ を加算し M_{tlk} を大きくする。 $\Rightarrow p_v$ が小さくなる。

【仮定 2】 M_{rsv} が増加しなかった場合、 M_{tlk} が実際の有音移動局数より大きい。

$\Rightarrow C_n$ を減算し M_{tlk} を小さくする。 $\Rightarrow p_v$ が大きくなる。

C_n の更新制御は、以下のアルゴリズムに従う。

【Step1】 M_{rsv} が増加した場合: $C_n = C_{n-1} + \Delta M_{\text{rsv}}$.

【Step2】 M_{rsv} が増加しなかった場合:

予約を付与したスロットにおいてパケットを受信しなかった場合:

$$C_n = C_{n-1} + \lambda_2 \quad (C_n = 0 \text{ when } C_{n-1} < 0).$$

その他: $C_n = C_{n-1} - \lambda_1$.

ここで、 ΔM_{rsv} は M_{rsv} における増加分、 λ_1, λ_2 は定数である。ただし、 C_n は式 (7.34) で $1 \leq K_{\text{cont-v}} \leq M_v$ となるように上下限を設定する。

データ競合移動局 $K_{\text{cont-d}}$

データ競合移動局 $K_{\text{cont-d}}$ を音声移動局と同様の方式で推定することは困難である。そこで、本方式では接続データ移動局数 M_d を $K_{\text{cont-d}}$ として使用することとする。

$$K_{\text{cont-d}} = M_d \quad (7.36)$$

表 7.1: シミュレーション諸元

CDMA channel rate	(R_c)	2,304 (kb/s)
PRMA channel rate	(R_p)	144 (kb/s)
Processing gain	(G_p)	16
Channel capacity (N of code channels)	(K_{ch})	6
Frame duration	(T)	0.016 (sec.)
Slot duration	(τ)	0.004 (sec.)
N of slots/frame	(N_{slot})	4
Voice source rate	(R_{v_s})	32.000 (kb/s)
Voice average rate	(R_{v_a})	11.232 (kb/s)
Data average rate	(R_{d_a})	1.587 (kb/s)
Maximum delay	(D_{max})	0.032 (sec.)
Mobile users	(M_v, M_d)	variable
Permission probability	(p_v, p_d)	variable

7.6 性能評価

性能評価は計算機シミュレーションで行なった。第 7.4 節に示したような解析的手法での性能評価を試みたが、提案方式ではチャネル状態により可変に送信許可確率を求めているため、伝送特性を解析的に導出するには大変複雑になるためである。

本性能評価では、移動局の移動は考慮していない。

7.6.1 評価パラメータ

文献 [5],[6] および [9] に基づいて、システムパラメータを選択した。例えば、音声源レートを 32 kb/s、フレーム周期を 16 ms とした。パケットは 512bit の情報に 64bit のヘッダを付加され、4slot からフレームを構成すると、PRMA チャネルレート R_p は 144kb/s になる。拡散率を 16 にすれば CDMA チャネルレート R_c は 2,304kb/s となる。音声とデータの平均レートは各々 11.232, 1.587 kb/s である。音声パケットのリアルタイム性を確保するため、最大許容遅延時間 D_{max} を 32ms(2 フレーム周期) に設定する。

また、計算機シミュレーションを通じて良い伝送特性を得た $\lambda_1=0.5$, $\lambda_2=0.1 \times M_v$ を選択する。各スロットの K_{ext} の測定間隔 (N_{mea}) を 8 フレーム毎とする。 K_{ext} は、誤りなく正確に測定できるものと仮定した。

主なシミュレーションパラメータを表 7.1 に示す。

7.6.2 評価項目

評価項目は、音声パケットの廃棄率 p_{drop} 、音声移動局の最大同時通信可能数 $M_{v|x}$ 、パケット受信率 $P_{\text{rx-t}}$ 、スループット S_t, S_d 、伝送遅延時間 D_d, D_v とし、次のように定義する。

- 最大同時通信可能数 $M_{v|x}$: $p_{\text{drop}} \leq x$ を満たす音声移動局の最大同時通信数。
- パケット受信率 $P_{\text{rx-t}}$: $P_{\text{rx-t}} = N_{\text{rx-t}} / N_t$,
 $N_{\text{rx-t}}$ は基地局で受信できた全パケット数, N_t は全移動局で発生したパケット数。
- スループット S_t, S_d : $S_t = N_{\text{rx-t}} / C_{\text{ch}}$, $S_d = N_{\text{rx-d}} / C_{\text{ch}}$,
 $N_{\text{rx-d}}$ は基地局で受信できたデータパケット数, C_{ch} はチャンネル容量。
- 伝送遅延時間 D_d, D_v : 各々のデータバーストおよび音声パケットを送信完了するために要した平均時間。

7.6.3 比較対象

性能評価は、次の方式との比較で行なった。

- 送信許可確率固定方式 (PFIX)
送信許可確率を固定 ($p_v = 0.4$) に設定した場合である。送信許可確率に関しては何ら制御を行なわない。
- 従来方式 (CAF)
従来方式は、音声の送信許可確率 p_v を図 7.4 に示したようなチャンネルアクセス関数によって求める。チャンネルアクセス関数に用いたパラメータは、文献 [9],[10] を参照して表 7.2 に示したような値を使用した。表 7.2 において、CAF1, CAF2, CAF3 は、各々単一セル, $\alpha = 3$ および $\alpha = 4$ のセルラ環境に対して音声のみ伝送の場合に、最も効率的なチャンネルアクセス関数である。データの送信許可確率 p_d は $p_d = C_p \cdot p_v$ とする。ここで、 C_p は定数であり本章では 0.1 とした。

表 7.2: チャネルアクセス関数のパラメータ

関数名	環境	η	θ	p_{si}	breakpoint
CAF1	Isolated cell	0.021	0.3	0.6	4
CAF2	Cellular, $\alpha = 4$	0.024	0.3	0.6	2.7
CAF3	Cellular, $\alpha = 3$	0.027	0.36	0.6	2

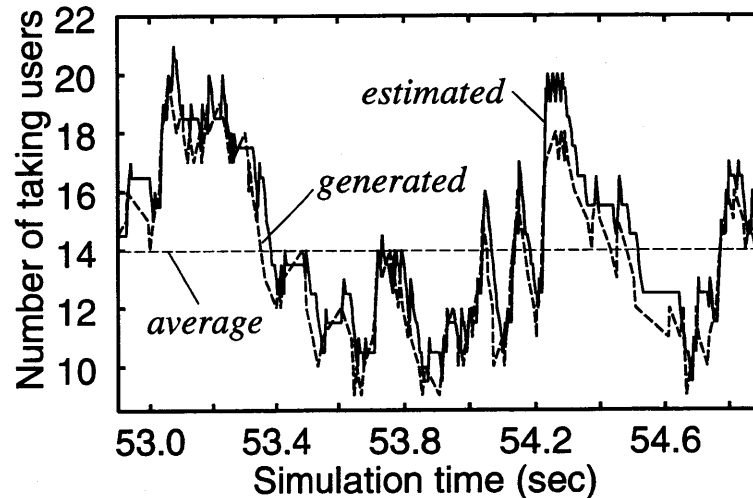


図 7.10: M_{tik} の推定性能 ($M_v=40$, 音声のみ伝送, 単一セル構成)

7.7 評価結果

7.7.1 単一セル環境

音声のみの伝送 (単一セル環境)

図 7.10に、単一セル環境で音声のみ伝送の場合の、有音移動局数 M_{tik} の推定性能を示す。図 7.10に示す結果は、シミュレーション結果の一部である。点線および実線がそれぞれ同時通信移動局数 M_v が 40 の場合の実発生数と推定数を示している。推定数は、ほぼ実発生数に一致する結果となった。

各方式の同時送信パケット数の様子を図 7.11と 7.12に示す。同時通信移動局数 M_v は 50 であり、図 7.11は end-of-use フラグを使用しない従来方式 (CAF1) の特性であり、図 7.12は提案方式の特性である。図 7.11と 7.12を比較することで、提案方式の有効性がわかる。図 7.11と 7.12の性能差は、主に end-of-use フラグの使用によるものである。end-of-use フラグを使用することで予約の途中解除が防止できるため、ランダムアクセスパケットの増加を低減している。

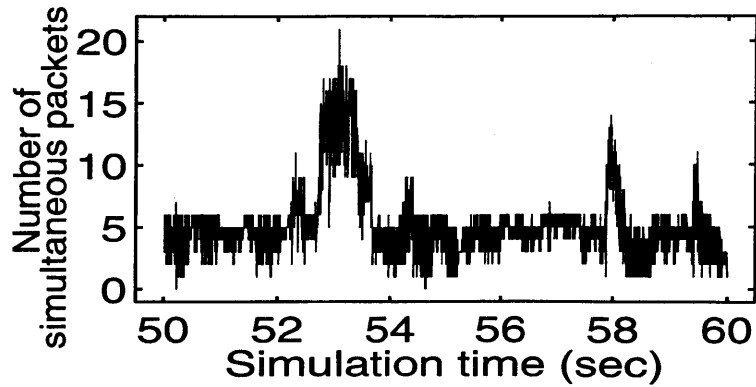


図 7.11: $M_v = 50$ の場合の同時送信パケット数 (従来方式, end-of-use フラグなし, 音声のみ伝送, 単一セル構成)

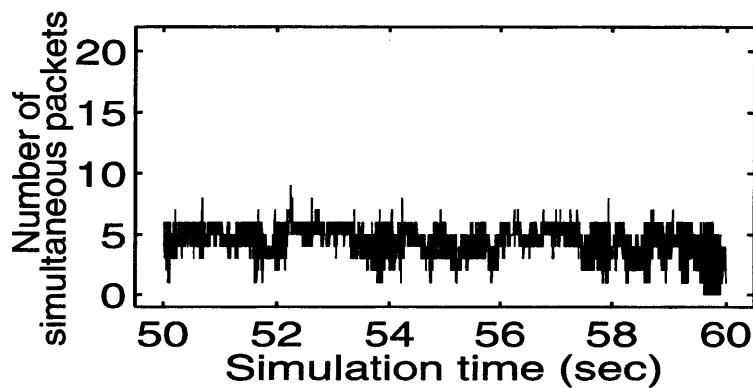


図 7.12: $M_v = 50$ の場合の同時送信パケット数 (提案方式, 音声のみ伝送, 単一セル構成)

音声パケット廃棄率 p_{drop} を図 7.13 に示す。横軸は、同時通信移動局数 M_v を示している。図 7.13 には、end-of-use フラグを不使用 / 使用の送信許可確率固定法 (PFIX)、従来方式 (CAF1) および提案方式 (APPC) の p_{drop} 特性を示した。いずれの方式においても、同時通信局数が増加することで p_{drop} の増大を招く。end-of-use を導入することで、送信許可確率固定法 (PFIX)、従来方式 (CAF1) のいずれの方式も p_{drop} 特性を改善することができる。送信許可確率固定法 (PFIX) との比較において、提案方式は全ての領域において優れた特性を示す。また、end-of-use を導入した従来方式 (CAF1) と比較しても同等以上の特性を示している。音声品質 ($p_{\text{drop}} \leq 0.01$) [22], [23] を満たす同時通信可能局数 $M_{v|0.01}$ は、提案方式では 47 であり、end-of-use フラグを使用しない従来方式 ($M_{v|0.01} = 37$ for CAF1) に比較して 25% の改善がみられる。また、end-of-use フラグを使用した従来方式 ($M_{v|0.01} = 47$ for CAF1) と同等の性能を示

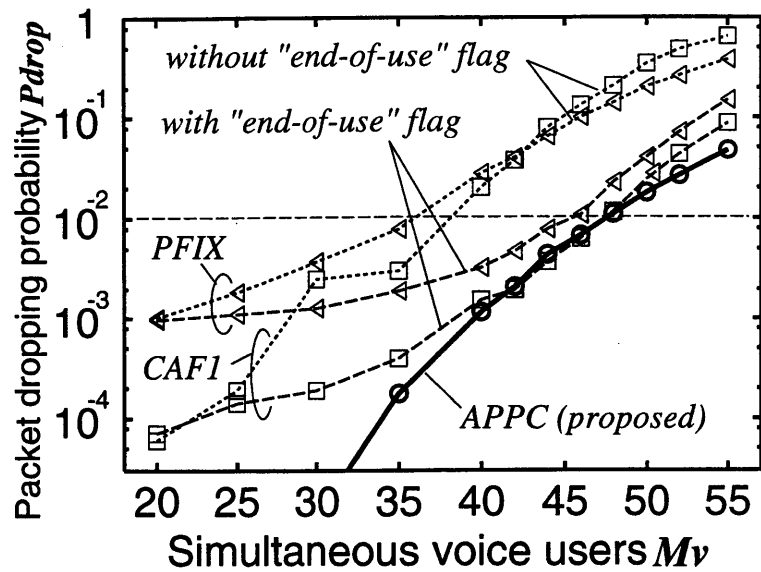


図 7.13: パケット廃棄率 p_{drop} (音声のみ伝送, 単一セル構成)

している。これは、end-of-use フラグを導入することで、予約の途中解除が回避できるため、ランダムアクセスパケットが増加しないことに起因すると考えられる。

さらに、提案方式の場合は、従来方式のように予め最適なアクセス関数を用意することは不要となるため、容易に様々なシステムへの適用が可能と考えられる。

音声 / データ統合伝送 (単一セル環境)

図 7.14 に単一セル環境における音声 / データ統合伝送時の音声パケット廃棄率 p_{drop} を示す。end-of-use フラグを使用した従来方式 (CAFI) および提案方式 (APPC) の p_{drop} 特性を点線および実線で示した。これらは、データ移動局数 M_d が 0, 30, 50, 80 の場合である。図 7.14 においてはデータ移動局内のバッファがオーバーフローしない範囲のみをプロットした。図 7.14 は、データ移動局の数に係わりなく、提案方式が従来方式より優れていることを表している。表 7.3 に、 $p_{\text{drop}} = 0.01, 0.001$ に対する従来方式と提案方式の $M_{v|x}$ を示す。提案方式では、 $M_{v|0.01}$ が $M_d=30$ において約 10%, $M_d=50$ において約 15%, $M_d=80$ において約 30% 改善されている。表 7.3 で () 付きで表した数字は、音声のみ伝送 ($M_d=0$) と比較した場合の $M_{v|x}$ の比を示している。データ移動局が増加すると音声のみ伝送に対する $M_{v|x}$ の比は両方式とも減少するが、その減少幅が提案方式では小さい。 $M_{v|0.01}$ で約 10 ポイント、 $M_{v|0.001}$ で約 20 ポイントの改善がみられる。この結果は、提案方式ではデータパケット伝送の影響が小さく

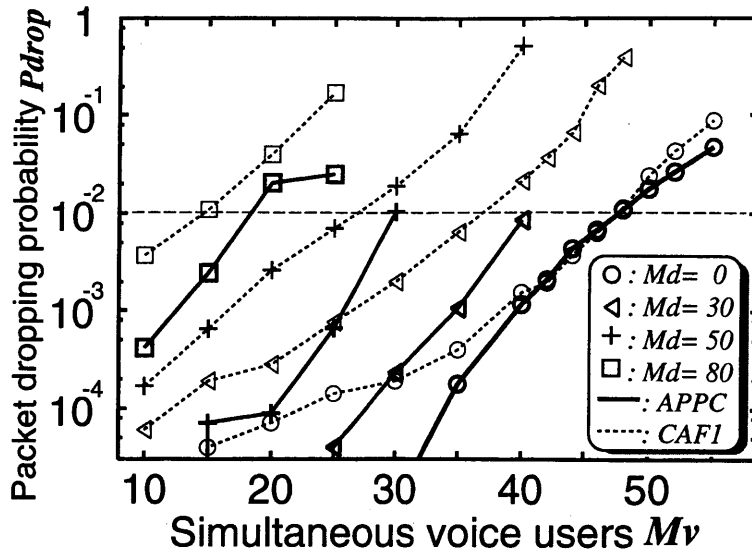


図 7.14: パケット廃棄率 p_{drop} (音声 / データ伝送, 単一セル構成)

表 7.3: $M_{v|x}$ の比較 ($p_{drop} \leq 0.01, 0.001$)

$M_{v x}$	Method	M_d			
		0	30	50	80
$M_{v 0.01}$	CAF1	48	36(75%)	26(54%)	14(29%)
	APPC	48	40(83%)	30(63%)	18(38%)
$M_{v 0.001}$	CAF1	38	26(68%)	16(42%)	- (-%)
	APPC	40	35(88%)	25(63%)	12(30%)

抑えられていることを示している。このように、提案方式では高負荷領域で音声パケットが優先伝送されるため、音声パケットの伝送特性が著しく改善する。

図 7.15は、データ移動局 M_d が 10, 30, 50, 80 の時のデータバースト伝送遅延時間特性 D_d を示している。提案方式の D_d は、 $M_d=30, 50, 80$ において大きくなっている。その量は、音声移動局数が多い程大きい。これは、提案方式での音声パケットの優先伝送に起因していると考えられる。音声移動局数が多くチャネル負荷が大きい時に、データパケット伝送が抑制されるからである。さらに、 M_d が大きい場合、実際にパケットを保持しているデータ移動局数は提案方式での推定値 K_{cont-d} より小さいと考えられるためである。一方、音声移動局数が小さくチャネル負荷が軽い領域では、提案方式の特性は従来方式とほぼ同等である。

図 7.16は全パケットの受信率特性 P_{rx-t} を示す。提案方式の P_{rx-t} は、 M_v または

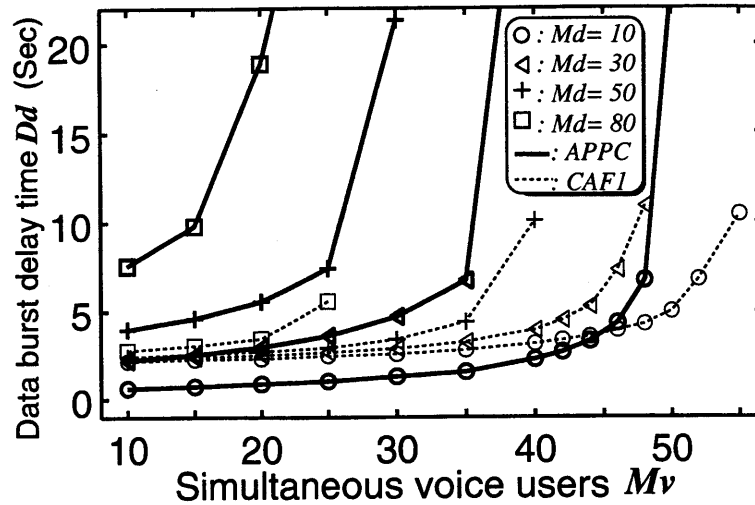


図 7.15: データバーストの伝送遅延時間 D_d (音声 / データ伝送, 単一セル構成)

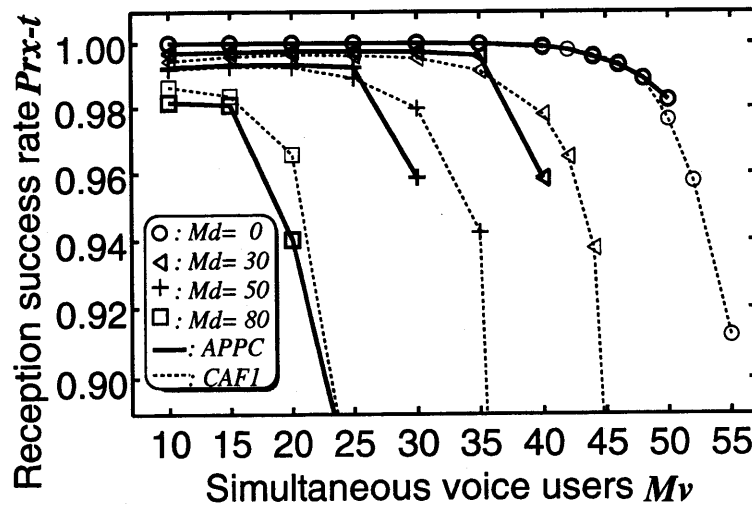


図 7.16: 全パケットの受信率特性 P_{rx-t} (音声 / データ伝送, 単一セル構成)

M_d の大きい領域で若干の特性劣化がみられる。これは、音声パケットの優先伝送に起因していると考えられる。しかしながら、その劣化率は極小である。図 7.14 で示した音声パケットの伝送特性改善が著しいため、提案方式は従来方式に比較して音声 / データ統合伝送の場合にはより効率的であると言える。

移動局数時変システム (単一セル環境)

図 7.17 に移動局数を時間的に変化させた場合の packet 廃棄率特性を示す。横軸は時間で、従来方式 (CAF) および提案方式 (APPC) の特性を点線および実線で示して

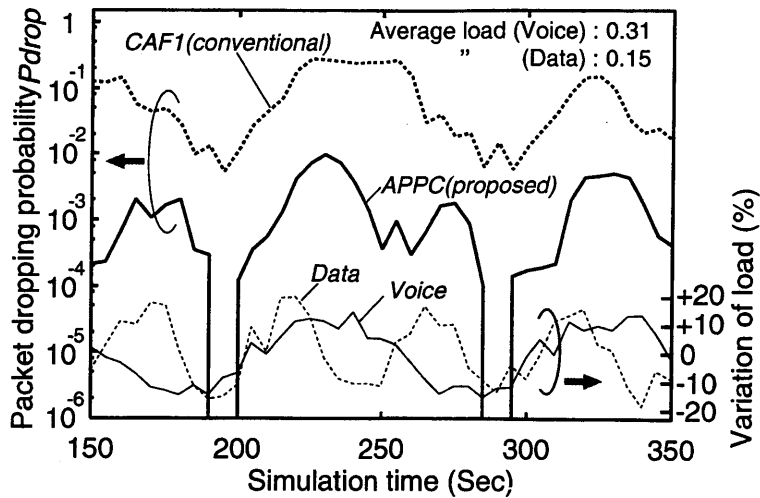


図 7.17: 音声 packets 廃棄率 p_{drop} (移動局数可変)

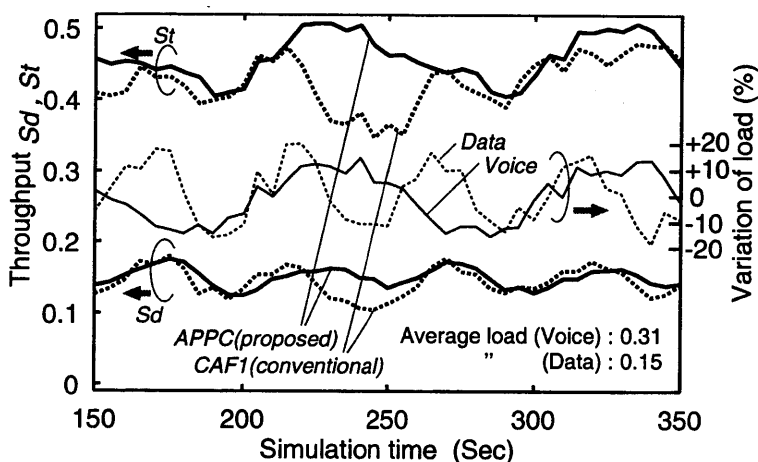


図 7.18: スループット S_d, S_t (移動局数可変)

いる。平均の印加トラフィック比は (音声: データ) = 約 2:1 で、トラフィック量の変化は移動局数を \sin 関数で変化させることで行なった。図 7.17 にはトラフィック量として、実際の印加チャネル負荷を測定しその平均に対する変化量を示した。図 7.17 より、音声品質を満たす領域が従来方式では殆んどないが、提案方式ではほぼ全領域でその品質を満たすことがわかり、提案方式の有効性が示されている。

図 7.18 はスループット特性 S_d, S_t を示す。提案方式の S_d 特性は、音声 / データの両トラフィック量が大きい時に従来方式に比べ劣化しているが、音声トラフィック量が小さい領域で従来方式を上回る。これは、チャネル負荷が大きい時にデータパケットの送信が待たされることによる。両方式の平均 S_d は、ほぼ同等の結果となった。一方、

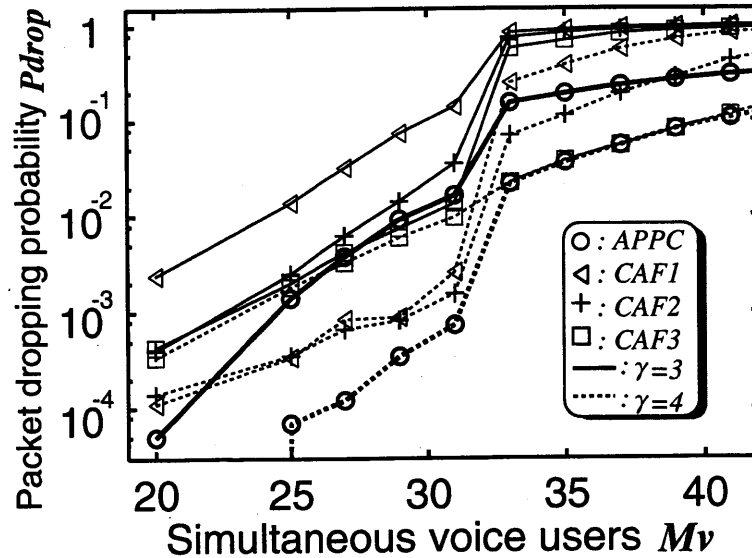


図 7.19: パケット廃棄率特性 p_{drop} (音声のみ伝送, セルラ環境)

S_t 特性では, 音声トラフィック量が大きい領域で提案方式が従来方式を大幅に上回っている. 従来方式は, この領域でパケット衝突が多発し音声パケットの廃棄などにより S_t が急激に低下する. 提案方式では, パケット衝突が少なくなるように制御するため, S_t の急激な低下は見られない. 平均 S_t においても, 提案方式はわずかながら優れた特性を示す結果となった. 以上の結果から, 提案方式は従来方式に比べて, トラフィック量が時間的に変化する環境においてより効果的に動作することが明らかとなった.

7.7.2 セルラ環境

音声のみの伝送 (セルラ環境)

図 7.19 にセルラ環境において音声のみ伝送を行なった時の音声パケット廃棄率 p_{drop} を示す. 実線および点線で $\alpha=3$ および $\alpha=4$ のセルラ環境での廃棄率特性を示す. ○が提案方式の p_{drop} を, □, ×, △がそれぞれ従来方式 (CAF1, CAF2, CAF3) の p_{drop} を示す. 提案方式の p_{drop} 特性は, $\alpha=3$ および $\alpha=4$ のいずれの環境でも, ほぼ全域で従来方式の特性より優れている. $M_{v|0.01}$ での比較において, 提案方式の特性は, 各々のセルラ環境で最も効率的な CAF を用いた時の特性にほぼ等しい.

図 7.20 は, 音声パケットの伝送遅延特性 D_v を示している. 図 7.19 と同様に実線および点線で $\alpha=3$ および $\alpha=4$ のセルラ環境での D_v 特性を示す. 提案方式の D_v は従来方式の特性に比較して全ての領域で優れている.

以上の結果は, 提案方式では送信許可確率がセル外干渉の測定値に基づいて算出さ

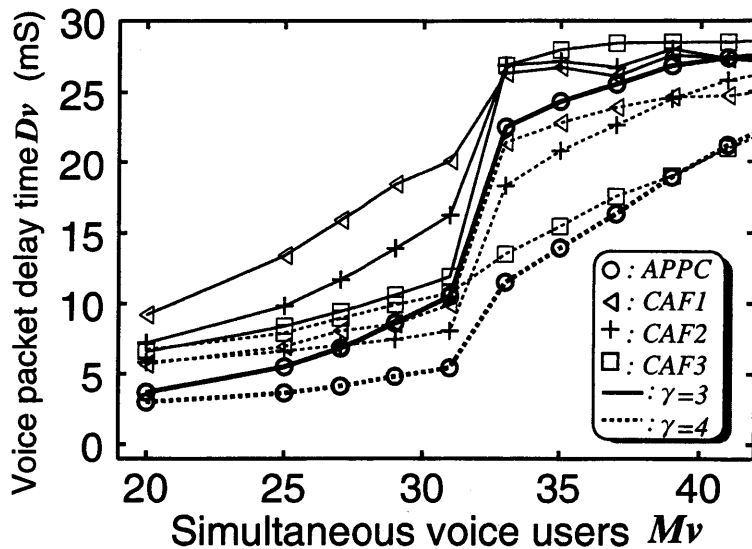


図 7.20: 音声パケットの伝送遅延時間特性 D_v (音声のみ伝送, セルラ環境)

れているため, 様々な伝搬環境に柔軟に対応できることに起因すると考えられる.

移動局数時変システム (セルラ環境)

図 7.21,7.22に, セルラ環境で音声移動局数を時間的に可変にした場合の音声パケット廃棄率 p_{drop} 特性を示す. 図 7.19と同様に, 図 7.21,7.22は, 提案方式と従来方式 (CAF1, CAF2, CAF3) の p_{drop} 特性を示している. 図 7.21,7.22のいずれの場合も提案方式の p_{drop} 特性は従来方式の特性より優れているか同等である. 提案方式では, ほぼ全区間で音声品質を満足しているが, 従来方式では満足できない領域が存在する. これらの図からトラヒック量の変動するセルラ環境でも提案方式はより効率的に動作することがわかる.

実システムの伝搬環境は一般的にセル毎に異なるため, 最適なチャネルアクセス関数を選択することは事実上困難であると考えられる. したがって, チャネルアクセス関数を必要とせず良い特性を得る提案方式は, セルラ環境においてより実用的であると言える.

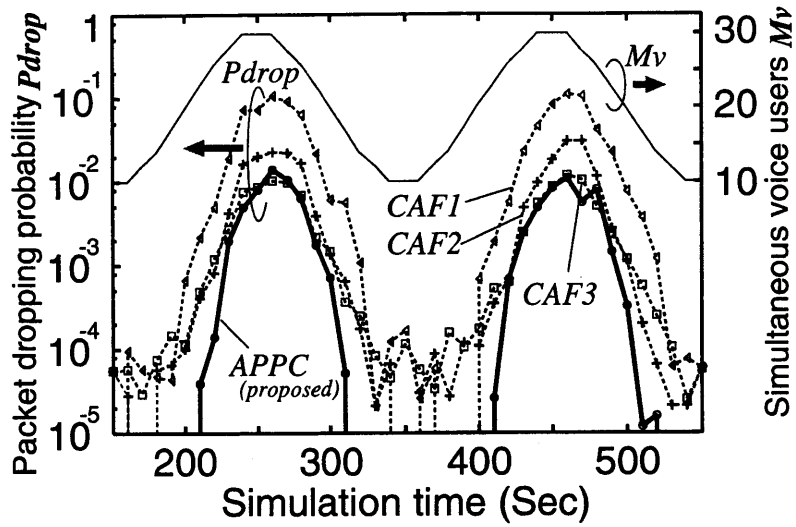


図 7.21: 移動局数変動 ($M_v = 10 \sim 30$) 時のパケット廃棄率特性 p_{drop} (音声のみ伝送, $\alpha=3$ のセルラ環境)

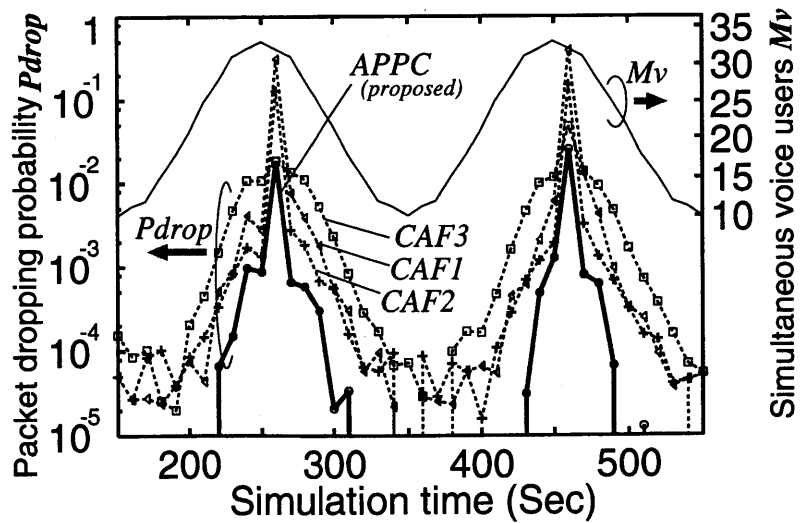


図 7.22: 移動局数変動 ($M_v = 10 \sim 33$) 時のパケット廃棄率特性 p_{drop} (音声のみ伝送, $\alpha=4$ のセルラ環境)

7.8 まとめ

移動通信においてマルチメディアの統合伝送を可能とする方式として、PRMA方式をDS/CDMA環境に適用したCDMA/PRMA方式を検討した。この場合の音声パケットの廃棄率特性を解析的に求めた。セルラ環境において性能向上が可能な方式として、音声パケットを優先伝送する新しい送信許可確率適応制御法を提案し、その評価を計算機シミュレーションにより行なった。

チャンネルアクセス関数を使用する従来法に比べ、単一セル環境の音声 / データ統合伝送時に提案方式の音声パケット伝送特性は大幅に改善した。提案方式を使用すれば、高負荷領域の音声のリアルタイム伝送が可能となる。しかしながら、音声伝送に高い優先度を与えているため、データの伝送特性が劣化する領域がいくらか存在した。また、セルラ環境においても提案方式は最適なチャンネルアクセス関数を用いた従来方式と同等の性能を得ることができた。セルラ環境では一般的に伝搬環境はセル毎に異なるため、最適なチャンネルアクセス関数を選択することは事実上困難である。提案方式はチャンネルアクセス関数を使用せず良い特性を得ることができることから、セルラ環境においてより実用的であり、また容易に様々なシステムへの適用が可能であると言える。

今回の検討は、主として単一セル環境で、しかも、伝搬条件は理想的なものを仮定して行なった基礎的検討であるといえる。セルラシステムのような移動通信を考えた場合、セル構成や伝搬環境等はかなり複雑になると予想される。今後さらに、セルラシステムを念頭においた検討が必要になると考えられる。

参考文献

- [1] N. D. Wilson, R. Ganesh, K. Joseph, and D. Raychaudhuri, "Packet CDMA versus dynamic TDMA for multiple access in an integrated voice/data PCN", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.11, No.6, pp870–884, August 1993.
- [2] 上林 真司, 丹野 元博, 趙 輝, "移動パケット通信における CDMA と TDMA の効率比較," 電子情報通信学会 総合大会, B-375, 1996.
- [3] Ahmed H, Abdelmonen and Tarek N. Saadawi, "Performance analysis of spread spectrum packet radio network with channel load sensing," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.7, No.1, pp.161–166, Jan. 1989.
- [4] K. Toshimitsu, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "A novel spread slotted ALOHA system with channel load sensing protocol," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.12, No.4, pp.665–672, May 1994.
- [5] David J. Goodman and Sherry X. Wei, "Efficiency of packet reservation multiple access," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, No.1, pp.170–176, Feb. 1991.
- [6] S. Nanda, David J. Goodman, and Uzi Timor, "Performance of PRMA: a packet voice protocol for cellular systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, No.3, pp.584–598, Aug. 1991.
- [7] Gang Wu, Kaiji Mukumoto, and Akira Fukuda, "A PRMA integrated voice and data system with data steal into voice(DSV) technique," in *Proc. IEEE ICC'94*, pp.580–586, 1994.
- [8] Wai-Choong Wong and David J. Goodman, "Integrated data speech transmission using packet reservation multiple access," in *Proc. IEEE ICC'93*, pp.172–176, 1993.

- [9] A. E. Brand and A. H. Aghvami, "Performance of the CDMA/PRMA protocol for voice transmission in a cellular environment," in *Proc. IEEE ICC'96*, pp.621–625, July 1996.
- [10] A. E. Brand and A. H. Aghvami, "Performance of a joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.14, No.9, pp.1698–1707, Dec. 1996.
- [11] Xiao-feng Dong and Le-min Li, "A spread spectrum PRMA protocol with randomized arrival time over fading channels for microcellular networks," in *Proc. IEEE VTC'97*, pp.1336–1340, May 1997.
- [12] 森 香津夫, 小倉 浩嗣, "音声 / データ統合 CDMA パケット通信における送信許可確率制御の一検討", 電子情報通信学会技術研究報告, RCS97-52, 1997 年 7 月.
- [13] 森 香津夫, 小倉 浩嗣, "予約型 CDMA パケット通信における音声パケットの伝送特性", 電子情報通信学会 第 1 回 UPC 研究会予稿, pp.96–102, 1996 年 10 月.
- [14] 森 香津夫, 小倉 浩嗣, "予約型 CDMA パケット通信における送信許可確率制御の一検討", 電子情報通信学会 総合大会, B-5-38, 1997.
- [15] K. Mori and K. Ogura, "An investigation of permission probability control in reserved/random CDMA packet radio communications," in *Proc. IEEE PIMRC'97*, pp.933–937, Sep. 1997.
- [16] K. Mori and K. Ogura, "An adaptive permission probability control method for integrated voice/data CDMA packet communications," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E81-A, No.7, pp.1339–1348, July 1998.
- [17] S. S. Lam, "Packet broadcast networks - A performance analysis of the R-ALOHA," *IEEE Trans. Comput.*, Vol.C-29, pp.596–603, July 1980.
- [18] S. Tasaka, "Stability and performance of the R-ALOHA packet broadcast system," *IEEE Trans. Comput.*, vol.C-32, No.8, pp.717–726, Aug. 1983.
- [19] R. K. Morrow and J. S. Lehnert, "Packet throughput in slotted ALOHA DS/SSMA radio systems with random signature sequences," *IEEE Trans. Commun.*, vol.40, No.7, pp.1223–1230, Jul. 1992.

- [20] R. Ganesh, K. Joseph, N. D. Wilson, and D. Raychaumri, "Performance of cellular packet CDMA in an integrated voice/data network," *Int. J. Wireless Inform. Networks*, vol.1, no.3, pp.199-221, 1994.
- [21] 井上 真杉, 小野田 , 森川 博之, 水町 守志, "無線 ATM におけるバースト長情報を用いる非即時データのリソース管理手法," 電子情報通信学会技術研究報告, RCS95-167, 1996 年 2 月.
- [22] J. Gruber and L. Strawczynski, "Subjective effects of variable delay and speech clipping in dynamically managed voice systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-33, no.8, pp.801-808, Aug. 1985.
- [23] O. J. Wasen, D. J. Goodman, C. A. Dvorak, and H. G. Page, "The effect of waveform substitution on the quality of PCM packet communications," *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing*, vol.36, no.3, pp.342-348, Mar. 1988.

第 8 章

総括

8.1 本研究のまとめ

本研究では、今後ますます重要視されるセルラ移動通信システムでの CDMA パケット通信についての検討を行なった。特に本研究では、CDMA セルラパケットシステムの構築技術に重点をおき、主としてその上り回線においてチャンネル利用効率を損なうことなくサービスの安定性、公平性および品質保証を向上することが可能なチャンネルアクセス制御方式に関する検討を行ない、送信電力制御および送信許可確率制御によるいくつかの制御方式を提案した。

CDMA パケット通信では、従来から単一(シングル)セルでの検討は多く行なわれており、そのようなシステムでのスループット特性やビット誤り率などは様々な場合において解明されている。しかし、現在の移動通信システムの多くはセルラ方式を採用しており、今後もこれは継続するものと考えられる。このため、CDMA パケット通信においてもセルラ環境での検討は不可欠である。セルラシステム、つまり、マルチセルシステムにおいては、単一セルシステムには存在しなかった他セルからの干渉(セル外干渉)が存在する。そこで、本研究では、CDMA パケット通信をセルラ移動通信システムに適用した場合のシステム性能向上手法に関して検討した。本研究ではいくつかの上り回線における送信制御方式を提案したが、いずれの方式においてもセル内干渉を抑制することは勿論のこと、セル外干渉を最大限に抑制することに配慮した方式である。これは、セルラ移動通信システムを構築する上で非常に重要な項目である。

また、本研究では、マルチメディア通信を念頭におき、音声とデータの統合伝送時の送信制御方式についても検討した。近い将来、無線マルチメディア通信が実現されることが見込まれている。このような通信システムは、パケット交換技術を基本に構

築されることが予想され、音声のような即時性の要求されるトラヒックの収容が重要課題となる。本研究では、この観点で検討を進め音声のサービス品質を最大限に維持できる方式を示した。

以下、本研究で得られた成果の要点について述べる。

第2章および第3章において、本研究の基礎となるCDMAセルラ移動通信方式およびCDMAパケット通信について概説した。

第4章では、CDMAセルラパケット通信システムの高チャネル負荷状態での特性を改善しシステムの安定性を向上する方式について検討した。基地局での受信電力差による捕捉効果を利用した送信電力制御方式を提案し、低負荷から高負荷状態までの全ての負荷領域で良好な特性が得られることを示した。また、提案方式の持つパケットの送信位置の違いによるパケット受信時の不公平性を改善するために、送信電力制御と共に送信パケットの拡散利得の制御を実施する送信方式についても検討し、その効果を示した。

次に第5章では、CDMAセルラパケット通信にサイトダイバーシチ受信を適用したシステムのサービス提供の公平性について検討した。基地局でのパケット受信率の観点から検証し、一般的な送信電力制御を行なった場合にはサービス提供に地理的な不公平性が存在することを指摘した。その後、この地理的な不公平性を改善する手法として、周辺基地局からのパイロット信号受信電力差を利用した送信電力制御法および送信許可確率制御法を提案した。これらの伝送特性をサービスの公平性とシステム効率(スループット特性)の観点から評価した。送信電力制御法においては、システム効率を損なうことなくサービス公平性が改善することを示した。しかしながら、送信許可確率制御法のサービス公平性はチャネル負荷に依存すること、および低負荷領域でのスループット特性が劣化することがわかった。したがって、両方式の性能比較により、送信電力制御法の方が優れた特性を持っていることを示した。

この結果をもとに、第6章では、公平性維持のための送信許可確率制御法のさらなる特性改善に関する検討を進めた。第5章で示した劣化の要因を、チャネル負荷に係わらず固定のパラメータで制御しているためであると同定し、各チャネル負荷に適した制御パラメータを自律的に求め、送信許可確率を適応的に制御する方式を提案した。これにより、チャネル負荷が変動した場合の特性劣化を回避することが可能となることを示した。

さらに第7章では、CDMAセルラパケットシステムにおいて、マルチメディア呼の収容の観点での検討を行なった。ここでは、音声トラヒックの効率的収容を目的と

し、CDMA/PRMA方式での音声パケット伝送時のパケット廃棄率特性を解析的に導出した。また、CDMA/PRMA方式のシステム性能向上手法として、チャネル負荷に応じて適応的に送信許可確率を制御する送信許可確率制御方式等の高効率チャネル利用法を提案し、音声伝送品質の向上およびチャネル利用率の向上を達成することができた。

以上に示したように、周波数の逼迫しているセルラ移動通信において周波数利用効率を損なうことなくパケット通信サービスのサービス性能の向上が可能なことを本論文で示すことにより、本研究の成果は今後のマルチメディアセルラパケット通信システムの実現にむけて重要な役割を果たすものと期待できるとともに、将来の陸上移動通信サービスの高度化のための基礎となるであろう。

8.2 今後の課題, 展開

本研究においては、特性評価に際してパケット誤り率をある信号対干渉比(あるいは同時通信ユーザ数)で特性が離散的に変化する階段関数で近似した。しかし、実際のCDMAシステムのパケット誤り率は階段関数的な特性ではなく、干渉量(同時通信ユーザ数)の増加に伴って誤り率が緩やかに劣化する特性、いわゆる graceful degradation の特性を示す。本研究では、CDMAの持つ graceful degradation 特性が十分に反映されているとは言えず、この観点での評価を実施することは今後の課題となる。

また、本研究では、CDMAセルラパケットシステムの上り回線での高効率伝送方式の提案および評価に首尾一環してきた。しかし、実際のシステム構築においては、下り回線での高効率伝送方式も求められる。CDMA方式の下り回線では、一般に直交符号を用いることによりチャネルの直交性が維持できるため、上り回線に比べ容易に高効率化が達成できると言われている。ところが、移動通信環境では、マルチパスなど下り回線の直交性を劣化させる要因が存在する。また、マルチメディア通信のトラフィック量は、上り回線に比較して下り回線のそれが大幅に増大すると言われている。このような要因から、下り回線の高効率化の研究も今後重要になるであろう。

マルチメディアトラフィックの収容に関しては、第7章で音声およびデータトラフィックを取り扱ってきた。実際のマルチメディア通信では、この他に画像や上下非対称トラフィックなど様々なトラフィック源が存在する。マルチメディア移動通信システムでは、これら様々なトラフィックのQoSに柔軟に対応する必要がある。CDMAパケット通信は、マルチメディアの情報伝送に柔軟に対応できると言われているが、各トラフィック

の QoS を保証するチャネルアクセス制御法の研究も必要となる。また、第 7 章で検討は、主として単一セル環境で、しかも、伝搬条件は理想的なものを仮定して行なった基礎的検討であるといえる。セルラシステムのような移動通信を考えた場合、セル構成や伝搬環境等はかなり複雑になると予想される。今後は、実際のセルラ環境を念頭においた検討が必要になると考えられる。

さらに、本研究では、伝搬環境として低速フェージングまでを考慮した。しかし、実際の無線チャネルは高速フェージングの影響を受ける。信号伝送速度が高速になるに従い、フェージング速度は相対的に低速化されるが、マルチパスによるシンボル間干渉の観点から信号伝送速度を大幅に高速化することが困難であるため、瞬時のフェージング変動を考慮する必要があるであろう。また、送信制御における制御遅延の観点からの解析も今後の課題となる。

謝辞

本研究を行なうにあたり，多大なる御指導，御教示を賜りました名古屋大学大学院工学研究科教授 小川明先生に心より感謝致します。また，本論文を御査読下さり，御意見，御助言を頂きました名古屋大学大学院工学研究科教授 板倉文忠先生に深く感謝致します。

名古屋大学大学院工学研究科助教授 片山正昭先生，名古屋大学情報メディア教育センター助教授 山里敬也先生には研究を行なうにあたり数々の御指導，御助言を頂き深く感謝いたします。また，名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻 小川研究室の方々には有益な議論を頂いたことに感謝致します。

本研究は，株式会社ワイ・アール・ピー移動通信基盤技術研究所への出向期間中において行なわれたものであり，出向の機会を与えて下さった三洋電機株式会社の前ハイパーメディア研究所 鈴木治所長，前東京情報通信研究所 太田修所長および研究遂行，論文執筆の機会を与えて下さった株式会社ワイ・アール・ピー移動通信基盤技術研究所の専務取締役研究所長 石川嘉彦所長，前第二研究室 山田吉英室長に深く感謝致します。特に，本研究の着想や方法にとどまらず研究生活全般にわたり暖かい御指導，励ましを頂きました株式会社ワイ・アール・ピー移動通信基盤技術研究所第二研究室 小林岳彦室長には心から感謝致します。研究を進める過程で，株式会社ワイ・アール・ピー移動通信基盤技術研究所第二研究室 無線システム構成技術グループの小倉浩嗣前主任研究員，武尾幸次研究員，および山寄彰一郎主任研究員には日頃から有益な討議を頂き，数多くのご意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。また，株式会社ワイ・アール・ピー移動通信基盤技術研究所 第二研究室，第一研究室の研究員の方々には有益な議論，示唆を頂き感謝致します。さらに，研究を遂行する上で数多くの援助と励ましを頂いた株式会社ワイ・アール・ピー移動通信基盤技術研究所 企画室の方々に感謝致します。

最後に，今日まで私を育てて下さった両親ならびに多くの先生方，友人，および研究生活を内面から支えて下さった妻 森真貴と子供 森洋樹，森悠香梨に感謝します。

業績一覧

(○印は本論文に関係のある文献・発表を表している)

I. 学会誌等

論文題目	公表の方法および時期	著者
① An Adaptive Permission Probability Control Method for Voice/Data Integrated CDMA Packet Communications	IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E81-A, no.7, pp.1339-1348, July 1998.	K. Mori, K.Ogura
② CDMA Slotted-ALOHA パケット通信におけるチャネル負荷適応型送信電力制御法	電子情報通信学会論文誌 B, vol.J82-B, no.5, pp.1012-1021, 1999年5月.	森 香津夫
③ Load-Based Transmission Control for CDMA Cellular Packet Systems with Rayleigh Fading Channels	IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E82-A, no.7, pp.1151-1160, July 1999.	K. Mori, T. Kobayashi
④ Service Fairness in CDMA Cellular Packet Systems with Site Diversity Reception	IEICE Transactions on Communications, Vol.E82-B, no.12, pp.1964-1973, Dec. 1999.	K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, A. Ogawa
⑤ Adaptive Transmit Permission Probability Control in CDMA Cellular Packet Communications with Site Diversity	IEICE Transactions on Communications. (条件付採録)	K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, A. Ogawa

※ IEICE: 電子情報通信学会

II. 国際会議

論文題目	公表の方法および時期	著者
① An Investigation of Permission Probability Control in Reserved/Random CDMA Packet Radio Communications	The 8th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'97), Helsinki, J3.5, pp.933-937, Sept. 1997.	K. Mori, K.Ogura
② Adaptive Transmission Power Control in CDMA Slotted-ALOHA Radio Communications	IEEE 1998 International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC'98), Florence, 12C.2, pp.1137-1141, Oct. 1998.	K. Mori
③ Adaptive Transmission Power Control for CDMA Slotted-ALOHA System in a Slow Fading Environment	The First International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'98), Yokosuka, S14-4, pp.410-415, Nov. 1998.	K. Mori
④ Adaptive Transmission Control for CDMA Slotted-ALOHA Systems in a Rayleigh Fading Environment	1999 IEEE International Conference on Personal Wireless Communications (ICPWC'99), Jaipur, pp.174-178, Feb. 1999.	K. Mori, T. Kobayashi
⑤ Permission Probability Control for Service Fairness in CDMA Slotted-ALOHA Systems	IEEE Vehicular Technology Conference 1999 Fall (VTC'99-Fall), Amsterdam, P.2.20, pp.1170-1174, Sept. 1999.	K. Mori, T. Kobayashi

論文題目	公表の方法および時期	著者
⑥ Control of Transmit Permission Probability to Improve Service Fairness in CDMA Cellular Packet Communications	The 6th IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MOMUC'99), San Diego, pp.35-42, Nov. 1999.	K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, A. Ogawa
⑦ Service Fairness in CDMA Cellular Slotted-ALOHA Packet Systems	IEEE 1999 Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'99), Rio de Janeiro, WM-GC20.4, pp.655-660, Dec. 1999.	K. Mori, T. Kobayashi, T. Yamazato, A. Ogawa

※ IEEE: 米国電気電子学会

III. その他

論文題目	公表の方法および時期	著者
(電子情報通信学会研究会)		
① 予約型CDMAパケット通信における音声パケットの伝送特性	電子情報通信学会 ユニバーサル・パーソナル基礎研究会 技術研究報告, pp.96-102, 1996年10月.	森 香津夫, 小倉 浩嗣
② 音声/データ統合CDMAパケット通信における送信許可確率制御の一検討	電子情報通信学会 無線通信システム研究会 技術研究報告, RCS97-52, pp.35-42, 1997年7月.	森 香津夫, 小倉 浩嗣
③ CDMA Slotted-ALOHA パケット通信における送信電力制御の一検討	電子情報通信学会 無線通信システム研究会 技術研究報告, RCS98-49, pp.95-102, 1998年6月.	森 香津夫
④ CDMA セルラ slotted-ALOHA 通信におけるサービス公平性に関する検討	電子情報通信学会 無線通信システム研究会 技術研究報告, DSP98-155, SAT98-75, RCS98-177, pp.61-66, 1999年1月.	森 香津夫, 小林 岳彦
⑤ CDMA セルラパケット通信における送信許可確率制御によるサービス公平性の改善	電子情報通信学会 無線通信システム研究会 技術研究報告, RCS99-91, pp.29-36, 1999年8月.	森 香津夫, 小林 岳彦, 山里 敬也, 小川 明

論文題目	公表の方法および時期	著者
<p>(電子情報通信学会総合大会, ソサイエティ大会)</p> <p>6. 予約/ランダムCDMAパケット通信における送信タイミング制御の効果</p> <p>⑦ 予約型CDMAパケット通信における送信許可確率制御の一検討</p> <p>⑧ CDMA Slotted-ALOHA 通信における適応型送信電力制御方式</p>	<p>1996年 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-326, pp.325, 1996年9月.</p> <p>1997年 電子情報通信学会総合大会 B-5-38, pp.425, 1997年3月.</p> <p>1998年 電子情報通信学会総合大会 B-5-167, pp.531, 1998年3月.</p>	<p>森 香津夫, 小倉 浩嗣</p> <p>森 香津夫, 小倉 浩嗣</p> <p>森 香津夫</p>