

修士論文

CDMA/FDD セルラシステムにおける 非対称トラフィック収容のための マルチホップ協調通信に関する研究

平成 21 年度修了

三重大学大学院工学研究科博士前期課程

電気電子工学専攻通信工学研究室

嵯峨 毅郎



目次

第一章 序論	1
1.1 移動無線通信システムの変遷	1
1.2 マルチメディア通信におけるトラヒック特性	4
1.3 非対称トラヒックの対策	5
1.4 本研究の目的	6
1.5 本論文の構成	7
第二章 移動無線通信における構成技術	8
2.1 セルラ方式	8
2.2 CDMA 方式	10
2.2.1 多元接続方式	10
2.2.2 スペクトル拡散通信	13
2.2.3 CDMA セルラシステム	14
2.2.4 送信電力制御	15
2.3 複信方式	17
2.4 マルチホップ伝送	19
2.5 協調通信方式	20
第三章 非対称トラヒック	21
3.1 非対称トラヒックの発生要因	21
3.2 時変動する非対称トラヒック	22
3.3 非対称トラヒックにより発生する問題点	23
3.4 複信方式と非対称トラヒック	24
3.5 非対称トラヒック収容法の現状	25
3.5.1 TDD システムを対象とした非対称トラヒック収容法	25
3.5.2 FDD システムを対象とした非対称トラヒック収容法	25
3.6 マルチホップ伝送を用いた非対称トラヒック収容法	27
3.6.1 概要	27
3.6.2 下りマルチホップ伝送の適用条件	28
3.6.3 中継ルート選択	28
3.6.4 システム特性と問題点	29
第四章 マルチホップ協調通信を用いた非対称トラヒックの収容法	32
4.1 概要	32
4.2 信号合成後の SIR	34
4.3 中継送信電力の削減	35
4.3.1 固定量送信電力削減	35

4.3.2	動的送信電力削減	35
第五章 計算機シミュレーションによる特性評価		37
5.1	システムモデル	37
5.1.1	伝搬モデル	37
5.1.2	受信 SIR と信号伝送誤り率	38
5.1.3	トラヒックモデル	39
5.2	シミュレーション諸言	40
5.3	特性評価	41
5.3.1	下りマルチホップ伝送における受信 SIR 分布 (固定量中継送信電力削減)	41
5.3.2	下りマルチホップ伝送における受信 SIR 分布 (固定量中継送信電力削減)	44
5.3.3	下りマルチホップ伝送におけるパケット受信率	47
5.3.4	下り回線のスループット特性 (固定量中継送信電力削減)	49
5.3.5	上り回線のスループット特性 (固定量中継送信電力削減)	51
5.3.6	総合スループット特性 (固定量中継送信電力削減)	53
5.3.7	下り回線のスループット特性 (動的の中継送信電力削減)	55
5.3.8	上り回線のスループット特性 (固定量中継送信電力削減)	57
5.3.9	総合スループット特性 (固定量中継送信電力削減)	59
第六章 総括		61
謝辞		62
参考文献		63

第一章

序論

近年、移動無線通信はその技術的進展により、そのサービス形態も変化している。1990年以降、国内で急速に普及した携帯電話・PHSの世帯別普及率は現在90%を上回り[1]、通信サービスは多様化が進んでいる。本章ではまず移動無線通信の生い立ちとその技術及び提供されるサービスの進歩について述べる。次に現在広く普及した無線マルチメディア通信サービスによって発生する非対称トラフィックに着眼しその影響について述べる。その後、本論文の目的、本論文の構成について述べる。

1.1 移動無線通信システムの変遷

無線通信はG.マルコーニ(1874-1937)により1895年に発明されたと言われている。当時発明された無線機は火花放電を用いたものであり、船舶に広く利用された。特に有名な出来事は、1912年のタイタニック号の遭難時に、SOS信号を送信したことである。その後、国際的に大型船舶の無線機の設置が義務付けられるようになった。当時の無線通信の大きな役割の一つは安全の確保であり、タイタニック号においても、SOS信号の発信だけでなく、事故の前には他の船舶からの氷山の情報、天候の情報などが寄せられた[2]。

その後、1906年に真空管を用いた信号増幅が発明され、1920年に米国でAM(Amplitude Modulation: 振幅変調)方式によるラジオ放送が開始された。従来の火花放電式無線機ではモールス符号による変調しかできず、一般の人間が情報を解読できなかったのに対し、この方式は音声を変調し、伝達することが可能であることから一般の人も伝送情報を解読することが可能となった。また、複数の放送局の同時放送も可能となった。AM方式は船舶通信に加え、相次ぐ世界大戦で発達した航空機にも利用された。米国のモトローラ社はそうした放送信号を車両で受信する装置を考案し、実用化に成功した。当時の無線通信は軍用や警察、消防等、特殊用途にとどまっていたため、その後の一般利用の無線通信の基礎を築いたモトローラ社の功績は大きい。

第二次世界大戦の軍用船舶、航空機、車両の著しい発達に伴いそれらに搭載される無線通信技術も同様に発展した。AMよりも雑音に強いFM(Frequency Modulation: 周波数変調)方式が開発され、戦後、無線通信にも利用されることになった。1979年に、世界に先駆けて日本の電電公社が自動車電話サービスをFM方式で開始した。その後、この自動車電話を持ち歩けるように改良したものが第一世代(1G)携帯電話である。移動局は移動しながら、トランシーバーを利用し、電波を送受する。セルと呼ばれるエリアを範囲として、中心に基地局において移動局と基地局を接続し、無線通信を行う方式をセルラ方式(Cellular System)と呼ぶ。送信側と受信側の接続には、FDMA(Frequency

Division Multiple Access:周波数分割多元接続)方式を採用し、複数の移動局が同時に基地局と接続するために異なる周波数チャンネルを用いて通信を行う。

アナログ方式の雑音や干渉に弱い特性と秘話性のなさを克服したのがデジタル方式である。さらに、音声の情報圧縮が1980年代に発達し、デジタル伝送に必要な周波数帯域を大きく狭めることができ、アナログ方式より周波数利用効率も改善された。1990年には欧州においてGSM(Global System for Mobile communications)による第二世代(2G)携帯電話によるサービスが始まった。アクセス方式はTDMA(Time Division Multiple Access:時分割多元接続)を採用した。他の第二世代携帯電話の通信規格としてPDC(Personal Digital Cellular)が挙げられる。1993年にNTTドコモがPDCによる携帯電話サービスである「mova」を開始している。デジタル方式を採用した携帯電話、PHS(Personal Handy-phone System)は従来の携帯電話における音声通信サービスに加え、ショートメールサービス(SMS)などのデータ通信が追加された。また、2Gの中で最も話題になったのがCDMA(Code Division Multiple Access:符号分割多元接続)であった。米国で提案されたIS-95標準がCDMAを採用した。CDMAによるサービスは1993年から開始され、情報帯域よりもはるかに広い帯域へと拡散符号を用いて干渉に強くすることで、隣接セルに同じ周波数帯域を利用でき、周波数効率を高くできる。更に、1999年にNTTドコモが開始した「iモード」によって携帯電話はメールやウェブ対応などの高機能化が実現した。また、移動局の小型化、軽量化も進み、携帯電話は1990年後半から爆発的に普及することとなった。

2000年代になると、第三世代(3G)携帯電話による通信サービスが始まった。アクセス方式はCDMAが採用された。2Gで成功をおさめたIS-95よりも帯域を広くしたものが標準化された。主なるものは、WCDMA(Wideband CDMA)である。WCDMAの周波数帯域は約3.8MHzであり、上下回線の複信方式は、上下回線を異なる周波数で接続するFDD(Frequency Division Duplex)と上下回線を異なる時間区間で接続するTDD(Time Division Duplex)が採用された。TDDを採用したWCDMAはTD-CDMA(Time Division CDMA)とも呼ばれる。屋外におけるWCDMAの最大伝送速度は384Kbpsであり、屋内では2Mbpsである。WCDMAは従来の音声通信に加え、データ通信や画像伝送も可能なマルチメディアタイプの通信を可能にした。その後、WCDMAを拡張し、10Mbps以上の高速伝送を実現したHSDPA(High Speed Downlink Packet Access)、HSUPA(High Speed Uplink Packet Access)が提案、導入された。これを第3.5世代携帯電話と呼び、テレビ電話、動画配信、音楽配信などの更に大容量なデータ通信サービスを可能とした。

今後、携帯電話は第四世代へ移行する。第四世代携帯電話は50Mbps~1Gbps程度の超高速大容量通信を実現し、IPv6に対応し、無線LANやWiMAX、Bluetoothなどと連携し固定通信網と移動通信網をシームレスに利用するFMC(Fix Mobile Convergence)が実現すると言われている。この様な次世代技術により、トリプルプレイ(Triple Play)

と呼ばれる電話，データ通信，ストリーミング配信の融合したマルチメディアサービスが実現されると言われている．具体的なサービスとしては遠隔医療，遠隔教育，テレワーク（Telework）などが期待されている．

第四世代携帯電話における次世代サービスの実現にはいくつかの課題を抱えている．第三世代携帯電話で使用している 2GHz 帯より高い周波数帯を用いる予定であるため，電波伝搬特性により，サービスエリアが狭くなってしまうことや，電波の直進性が高いことにより屋内への電波が届きにくいことなどが予想されている．

1.2 マルチメディア通信におけるトラヒック特性

現在の携帯電話では、電子メールの送受信、画像、音楽、ゲーム、動画等の配信、ウェブページの閲覧等、多様なサービスが展開されるようになった。従来の携帯電話で提供されるサービスは音声通信のみであったが、現在では大容量のデータ配信が可能となり、様々な情報を伝送するマルチメディア通信が提供されるようになった。このような携帯電話における通信サービスの変化により、現在の携帯電話通信システムにおけるトラヒック特性も大きく変化している。

従来の音声通信サービスにおいて、移動局は基地局へ移動局の音声情報を送信する。基地局もまた受信局へ音声情報を送信する。このような音声通信サービスにおいて、移動局→基地局間（上り回線）と基地局→移動局間（下り回線）で伝送されている情報量はほぼ等しく、音声通信におけるトラヒック量は上下回線で対称となっていると言える。これに対しマルチメディア通信サービスでは、移動局は基地局に対し各種サービスの要求を行う。基地局は要求されたサービスに対応した情報を移動局へ配信する。この時のトラヒック特性は、上り回線におけるサービス要求に必要な情報量は小さいものとなるのに対し、下り回線における情報量は非常に大きなものとなる。よってマルチメディア通信サービスは上下回線で非対称なトラヒック特性を有することとなる。マルチメディア通信は今後さらに進展していくと予想されているため、今後の携帯電話通信システムはトラヒックの非対称性がより顕著なものになっていくと予想される。

現システムにおいて非対称トラヒックが発生した場合、下り回線チャンネル容量の不足、上り回線チャンネル容量の余剰が発生する。無線通信に用いる周波数資源は有限であることから、上下チャンネル容量の過不足は、限りある周波数資源の無駄を生む。また、マルチメディア通信サービスと既存の音声通信サービスで上下回線に発生するトラヒックの比率が異なることから、それらの需要が時間帯で変化することによって、上下トラヒック比率が時間変動する。上下トラヒック比率の時間変動は上下回線のチャンネル容量の過不足にも時間変動を引き起こすこととなり、通信サービスの安定供給が困難なものになってしまう。ところが、将来的に遠隔医療などの日常生活に根付く高度な携帯電話サービスを提供するためには時間的、地理的条件に関わらず一定品質の通信サービスが提供可能であることが重要である。そこで、非対称トラヒック収容は今後、生活に根付く更に高度な通信サービスを実現していく上で非常に重要な課題であると言える。

1.3 非対称トラヒックの対策

非対称トラヒックを効率的に收容するためには、時間的、地理的条件によって変動する非対称トラヒックに対し、上下回線に対して適応的にチャンネル割当を行うことが必要となる。非対称トラヒック收容に関しては、これまでに様々な研究が行われている[3]~[10]。しかしながら、TDD（時間分割複信）システムを対象とした研究例[3]~[7]は多く存在するが、FDD（周波数分割複信）システムを対象とした研究例[8][9]は非常に少ない。これは、TDD システムでは、上下トラヒック比率に応じて上下回線のチャンネルを時間軸上で動的に割り当てることが可能であり、時間変動する非対称トラヒックに柔軟に対応できるためである。一方、FDD 方式は、上下回線へのチャンネル割当をシステム構築時に決定する方式であるため、システム構築後の上下トラヒック比に応じた動的無線資源割当は困難である。よってFDD 方式を採用したシステムは非対称トラヒック環境においてチャンネル利用率の低下を招く事態が予想される。FDD 方式は第三代携帯電話システムなど現在の携帯電話システムで主に採用されている複信方式であるため、今後更に顕著になると予想される非対称トラヒックに対して、FDD システムを主に採用している現在の携帯電話システムは今後チャンネル利用率の低下を招く事態が予想される。よってFDD システムにおける非対称トラヒックの効率的な收容法を確立することは非常に重要な検討課題となっている。

FDD システムにおける非対称トラヒック收容法として、本研究室においてこれまでにマルチホップ伝送を用いた手法を提案してきた[8]。本方式では、CDMA/FDD システムで非対称トラヒック環境において、下り回線伝送にいくつかの中継局を介して通信を行うマルチホップ伝送を適用することで下り回線のチャンネル容量の増大を図っている。更に、中継局→中継局間及び中継局→宛先移動局間伝送(“2 ホップ目以降伝送”，あるいは，“中継伝送”と呼ぶ)に上り回線のチャンネルを利用することで余剰な上り回線のチャンネルを下り回線伝送に有効利用する。これにより FDD システムにおける非対称トラヒックの効率的收容を可能にしている。しかし、チャンネル間で干渉が発生する CDMA 方式では、本方式を導入した場合、下りマルチホップ伝送の中継伝送信号が上り回線伝送への干渉となり、上り回線のチャンネル容量が減少するという欠点がある。

1.4 本論文の目的

本論文では、CDMA/FDD システムにおいてマルチホップ伝送を用いた非対称トラフィック収容法の欠点であった上り回線の品質劣化を軽減し、更に高効率な非対称トラフィック収容法を確立することを目的とする。

CDMA/FDD システムにおける上り回線のチャンネル容量減少は従来法の下りマルチホップ伝送時の中継伝送が上り回線伝送への干渉となり、それにより上り回線の受信品質が低下することによって引き起こされる。よって、従来法の下りマルチホップ伝送における中継伝送時の送信電力(中継送信電力)を削減すれば上り回線への干渉が減少し、上り回線のチャンネル容量減少は軽減される。しかし、中継送信電力の削減は従来法の下り回線の受信品質を低下させ、従来法の利点である下り回線のチャンネル容量増大効果が得られなくなる恐れがある。

そこで、本論文では、下りマルチホップ伝送の受信品質を確保した上で中継送信電力を削減する方法を検討し、当該方式の確立を目的とする。これにより上り回線への干渉を減少させ、上り回線品質の低下を軽減させることで上り回線のチャンネル容量減少の軽減が期待できる。

本目的を達成するために、下りマルチホップ伝送における受信品質確保が求められる。そこで、本論文では従来法の下りマルチホップ伝送に協調通信を導入する。これによって下り回線伝送の受信品質を更に向上でき、中継送信電力削減後も従来法の下り回線のチャンネル容量増大効果を得ることが可能になる。

次に、上り回線の干渉を減少させるために中継伝送における送信電力削減法を提案する。これによって下り回線の受信品質を確保した上で中継送信電力が削減可能となり、上り回線の受信品質改善及びチャンネル容量減少の軽減が期待できる。

このような協調通信及び送信電力制御の導入により、本論文では更に効率的な非対称トラフィック収容法を実現する。

1.5 本論文の構成

本論文は次のように構成される。第二章では本論文の基礎的事項となるセルラシステムにおけるシステム構成技術について説明する。ここでは、本論文の対象システムである CDMA セルラシステムの構成技術について述べた後、従来法において導入されたマルチホップ伝送と、提案法で導入される協調通信方式について述べる。第三章では、本論文において問題としているセルラシステムにおける非対称トラヒックとその対策の現状について説明する。ここでは、まず非対称トラヒックの発生要因、特性、通信システムに与える影響、そして対応策の現状について述べる。その後、本研究室において提案されたマルチホップ伝送を用いた非対称トラヒック収容法とその特性、問題点に関して述べる。第四章では本論文において提案するマルチホップ協調通信を用いた非対称トラヒック収容法について説明する。ここでは、まず提案法の詳細を述べ、その後、2つの中継送信電力削減法に関して述べる。第五章では提案方式の有効性を計算機シミュレーションにより実証する。まずシステムモデルについて述べ、その後、特性評価と考察を述べる。第六章では本論文のまとめを行う。

第二章

移動無線通信におけるシステム構成技術

本章は移動無線通信に関する基礎的事項であり、本論文の研究対象システムである CDMA セルラシステムの諸技術と、近年注目されており、本論文で用いるマルチホップ伝送方式、協調通信方式について述べる。2.1 節ではセルラシステムについて述べる。2.2 節で CDMA セルラシステムについて述べる。2.3 節では上下非対称トラヒックについて述べる上で必須となる上下回線の複信方式について述べる。2.4 節では従来の非対称トラヒック収容法で導入されたマルチホップ伝送について述べる。2.5 節では本論文において導入する協調通信方式について述べる。

2.1 セルラ方式

セルラ方式ではサービスを提供するエリアをいくつかのセルに分割する。セルの中心には基地局を設置され、移動局は基地局を経由して通信を行う。一つのセルがカバーするエリアの広さをセルサイズと呼び、セルサイズは移動局の送信電力、伝搬路状況、所望の信号受信品質、そのセル内で実施されるサービス内容等を考慮して決定される。また、セルサイズによりセルの呼び名は異なる。セルの半径が 1Km 以上のものをマクロセルと呼び、それ未満のサイズでは、マイクロセル、ピコセルなどがあるが、そのサイズの規格は厳密に定められてはいない。このようなセル分割によってセルラシステムは、セルの組み合わせにより限りなく広いサービスエリアを生成する事が可能となる。また、全ての通信が基地局を経由して行われることから課金や認証などが容易であるという利点もある。

また、セルラシステムでは一つのセル内に複数の移動局が存在する。セル内で一つの基地局が複数の移動局と同時通信を行うため、セルラシステムではシステムに与えられた信号空間（周波数、時間、符号）を複数のチャンネルに分割し、それらを各移動局に割り当て、基地局と接続し、複数の移動局と同時通信を行う。このような方式を多元接続と呼ぶ。多元接続については次節で詳しく述べる。

多元接続を行う際、隣接するセル間で同じチャンネルを用いて通信を行うと信号の干渉が発生する。しかし、電波は距離に比例して減衰していくため、同じ周波数チャンネルを用いる基地局間の距離を大きくすれば干渉による影響を小さくすることができる。そのため、セルラシステムにおいて基地局は、電波干渉の影響が許容できる程度の距離においてチャンネルの再利用を行う。これによりチャンネル数に対し必要な周波数帯域を減らすことができ、周波数利用効率が向上する。

地形、地物などの地理的な影響を無視すればセルの形は円状になる。これら円形のカ

オーバーエリアは、隣接するセルとオーバーラップする部分を持ち、このエリアで基地局間の無線チャンネルの切り替え（ハンドオーバー）を行う。オーバーラップするエリアで自セルとそれに隣接するセルの電波の強さが等しくなる位置をセルの境界と定義し、隙間無くセルを配置するとセルの形状は正三角形、正方形及び正六角形の三種のうちどれかとなる。現システムでは基本的には図 2.1 のような正六角形セルを採用している。

一つの基地局で収容できるユーザ数はセル内で使用可能なチャンネル数によって決まる。そのためセルサイズを縮小し、サービスエリア内をより多くのセルで分割した方がサービスエリア内でより多くの移動局の通信が可能となる点で有利である。しかし、ハンドオーバーの機会が増えてしまうなど、移動局の位置登録や移動局との接続制御といった回線制御が複雑になる。また設備面でのコストも増大する。

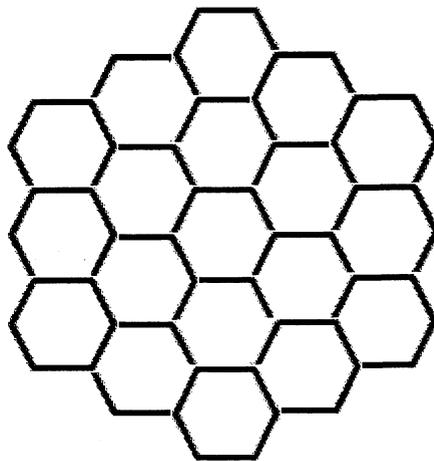
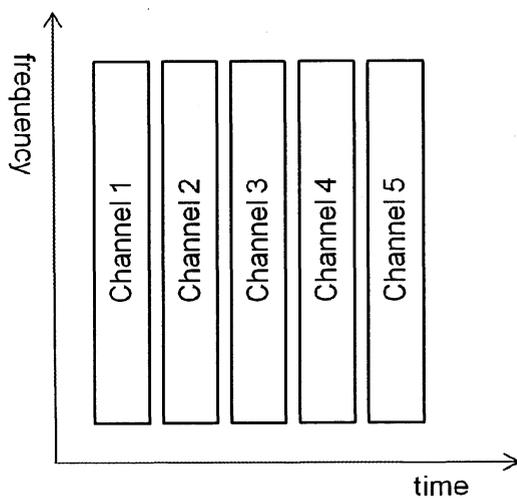


図 2.1 : 正六角形セルによるサービスエリアの構成図

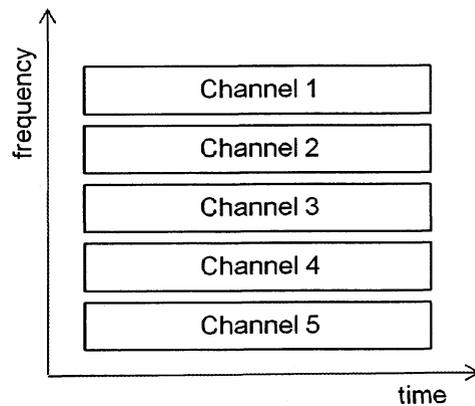
2.2 CDMA 方式

2.2.1 多元接続方式

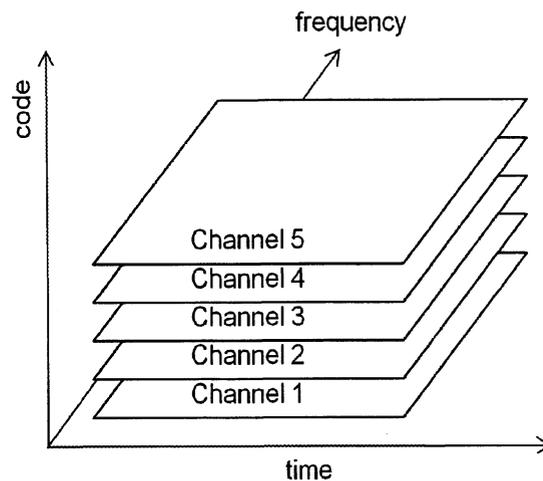
移動通信では、一般的にひとつの基地局に対し複数の移動局が接続する形態をとる。これを実現するために、セルラシステムでは、システム内で信号空間（周波数、時間、符号）を分割し複数のチャンネルを設定する。基地局は各移動局にこのチャンネルを割り当てることで通信を行う。これを実現する技術を多元接続（Multiple Access）技術と呼ぶ。多元接続方式の主なものとして FDMA(Frequency Division Multiple Access:周波数分割多元接続)方式, TDMA(Frequency Division Multiple Access:時間分割多元接続)方式, CDMA(Code Division Multiple Access, 符号分割多元接続)方式が挙げられる。それぞれの接続方式の信号空間をチャンネル分割する際のイメージを図 2.2~2.4 に示す。



FDMA システムのチャンネル構成



TDMA システムのチャンネル構成



CDMA システムのチャンネル構成

図 2.2 : 多元接続方式の比較

FDMA 方式では、システムに与えられた信号空間を周波数軸上で分割して各周波数帯域をチャンネルとし、一つのチャンネルを一つの移動局に割り当てる方式である。信号は狭帯域で伝送される。信号は時間的に連続であるので、送信にあたって時間的な同期を必要としない。また受信の際も、信号の復調において高速な同期は必要としない。このように実用化の際に技術的困難の少ない方式であったことから、FDMA は第一世代の携帯電話システムなどで用いられてきた。しかし、FDMA は信号の干渉を防ぐため、隣接するセルでは同じ周波数を使うことができない。そのため、他の基地局へハンドオーバーを行う場合、必ず別の周波数帯域に切り替えることになることからハンドオーバーを的確に行う事は困難となる。

TDMA 方式では、システムに与えられた信号空間を時間軸上で分割し、分割した各時間（タイムスロット）を各移動局に割り当てる。各局は、信号を断続的かつ周期的に送信する。このため、受信の際各局からの信号の同期が必要となる。高速で通信を行う

際はこの同期が特に難しい問題となる。通常、移動局の位置の変化などに伴う同期のずれに対応できるように、ガードタイムが設定されているが、このガードタイムは効率の悪化に繋がる。また、信号を断続的に送信するため、各移動局の信号電力を高くしなければ信号対雑音比 (SNR) を維持する事が出来ない。TDMA は第二世代の携帯電話システムである PDC (Personal Digital Cellular) などに用いられている。

CDMA 方式は、システムに与えられた信号空間を複数の符号系列によって分割し、それら各符号を移動局に割り当てる。そのためにスペクトル拡散 (Spread Spectrum : SS) 技術が用いられる。基地局は各信号にそれぞれ違う符号を乗算する拡散処理を行い、信号を伝送する。CDMA は FDMA, TDMA のような周波数、時間といった物理的な空間をチャンネル化しないため、同一の時間、周波数において複数の信号が伝送される。そのため符号チャンネル間で信号の干渉が発生する。しかし受信局ではそれらの受信信号に希望チャンネルに対応した符号を乗算する逆拡散処理を行うことで希望の符号チャンネルのみが正しく復調され、信号の抽出が可能となる。しかし、他チャンネルからの干渉が増大すると逆拡散処理による復調で希望信号が抽出できなくなるため、CDMA 方式におけるチャンネル数は通信品質によって決まり、他の符号チャンネルからの干渉が大きくなるほど通信品質は低下することとなる。スペクトル拡散については 2.2.2 節で詳しく述べる。

CDMA 方式は隣接するセルにおいても同一の周波数を利用できることから、周波数利用効率が高い、拡散処理による秘話性、秘匿性がある、周波数管理が容易である、多種類のデータ速度に容易に対応できる、過負荷に対して品質が急激に劣化しない、ソフトハンドオーバーが可能であること等、多くの利点がある。CDMA は、移動通信の第二世代の一部、第三世代の主力として採用されている多元接続方式であり、第三世代においては採用された方式には WCDMA や cdma2000 がある。

2.2.2 スペクトル拡散通信

スペクトル拡散通信とは、情報帯域よりも広い周波数帯域に拡散符号を利用して伝送させる通信方式である。スペクトル拡散には DS (Direct Sequence : 直接拡散) 方式, FH(Frequency Hopping : 周波数ホッピング)方式, これらを組み合わせたハイブリッド方式がある。DS 方式は伝送データの信号スペクトルを搬送波信号の速度よりも高速な速度の拡散符号と呼ばれる疑似ランダム・データ列を使ってスペクトル拡散を実現する方式である。FH 方式では伝送データの信号スペクトルの周波数を高速に切り替えて伝送することでスペクトル拡散を実現する方式である。FH 方式では周波数の切り替えに一定の時間がかかってしまう欠点があるため、CDMA 方式では DS 方式を使用するのが一般的である。本節では DS 方式によるスペクトル拡散について述べる。

図 2.3 は DS 方式の変調、復調のブロック図である。DS 方式では、送信側でデータをデジタル変調した後、更に拡散符号を用いて拡散変調する。このとき、信号の帯域は拡散変調によって数十～数千倍となる。受信側では送信側と同じ拡散符号により逆拡散を行った後、情報の復元を行う。復調の際、受信側に加わった干渉、雑音などは拡散符号との相関が無いいため、逆拡散を行った際に広帯域に拡散されることとなる。

この様なスペクトル拡散方式を用いることにより CDMA 方式は、情報伝送時の他の通信に与える干渉電力及び他のシステムから受ける干渉電力を小さくすることができる。また強力な秘匿性を得ることができる。



拡散変調器 (送信側)



拡散復調器 (受信側)

図 2.3 : DS 方式の変復調のブロック図

2.2.3 CDMA セルラシステム

CDMA 方式を移動通信に対し適用する場合、各移動局はそれぞれ異なる符号チャンネルが割り当てられ、信号の分離、抽出が行われる。そのため FDMA, TDMA と異なり、同じ、時間、周波数で多数の移動局を通信させることが可能となる。図 2.5 は、CDMA セルラシステムにおいて複数の信号の中から希望の信号 channel 1 を取り出す場合の周波数スペクトル図である。希望信号は、この狭帯域に対応したバンドパスフィルタによって他の信号と分離し、信号を取り出す。その後 Channel 1 に関する逆拡散処理を行うと channel 1 の信号のみが復調され、他のチャンネルはチャンネル相関が低いため復調されず、狭い周波数帯域の信号となる。

シングルセル構成の通信システムでは、CDMA 方式は FDMA 方式に対し利用効率で劣るが、マルチセル構成の通信システムにおいては、CDMA は FDMA に比べ周波数効率が高くなる。それは CDMA が干渉に強い性質であるために、隣接セルで同一周波数の利用が可能になるからである。六角形セルによるマルチセル環境において、FDMA では干渉を避けるために 7 セルが異なる周波数帯域を利用しなければならないのに対し、CDMA は同一周波数帯域を利用できるため、システム全体でみた際周波数利用効率は FDMA のそれより高いものとなる。

CDMA では同時通信を行うチャンネル数が増えるに従って徐々に通信品質が劣化する特徴がある。この特徴を利用し、CDMA セルラシステムの音声通信では有音時に送信し、無音時には信号送信を停止する送信制御を行う。これをボイスアクティベーションと呼ぶ。音声通信においては、一方が話す時、他方は聞くことになり、回線が常時音声で占有されることはない。統計的には 3/8 が有音で、残りが無音であると言われている。よって移動局 A と移動局 B が同じセル内で通信している際、ある瞬間においてどちらか一方の移動局のみ有音となっている状況が発生する。このときボイスアクティベーションを適用すると、互いのチャンネルに与える干渉を削減し、一つのセル内で同時通信できる移動局数を増加させることが可能となる。FDMA, TDMA ではチャンネルを全て割り当ててしまうとそれ以上に通信ができないため、CDMA の様に無音時のチャンネルの無駄を有効利用することはできない。よってボイスアクティベーションは同一の時間、周波数を用いる CDMA でのみチャンネル容量を増加させることができる。

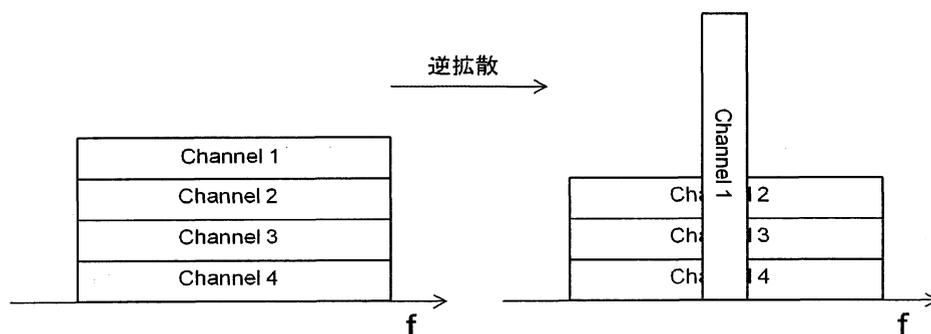


図 2.5 : 複数の CDMA 多元接続信号から一つの信号 channel 1 を取り出す図

2.2.4 送信電力制御

CDMA セルラシステムにおいては、受信局での受信信号品質が一定となるように送信電力を制御する送信電力制御 (Transmission Power Control : TPC) が必須となる。

上り回線において、移動局が同じ電力で信号を送信した場合、伝搬距離の違いによって基地局での受信電力に差が発生する。これは、移動局→基地局の距離が長いほど電力の減衰幅が大きくなるためである。そのため、基地局から遠い移動局の信号品質が劣化する。この問題を遠近問題という。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。

一方、CDMA の下り回線では希望信号と干渉信号が同じ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。しかし、基地局から同じ電力で信号を送信した場合、セル境界付近の移動局では他セルからの干渉の影響が大きいため通信品質が劣化する問題が生じる。この問題は、上り回線と同様に下り回線においてもシステム全体で伝送効率の劣化を招くこととなる。送信電力制御では、受信局における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いため、送信電力は基地局から遠い移動局ほど大きくなる。セルラシステムにおいて、送信電力制御を効率よく利用するには、移動局は最も受信電力が高い信号を送信した基地局（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種類の方法がある。

開ループ送信電力制御

開ループ送信電力制御では、上り回線と下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などの下り回線信号の伝搬損失を計測または推測し、その値に基づいた上り方向の送信電力決定を行う。FDD 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が発生する。通常、目標受信電力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

開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_o) を測定する。

平均 E_b/I_o は受信信号の誤り率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_o が所望値に対し低いか高いかによって、基地局は移動局の送信電力の増減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]程度が一般的である。

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受信品質を測定して、その結果により E_b/I_o の所望値を移動局毎に制御するアウトー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]) とほぼ一致している。

2.3 複信方式

セルラシステムにおいては、上り回線と下り回線が同時に通信を行うことが必要となる。しかし上下回線が同じチャネルを用いて伝送を行った場合、上下回線間での干渉が発生する。上下回線の信号が干渉しないための方式を複信方式と呼ぶ。複信方式には現在、時分割複信 (Time Division Duplex : TDD) 方式と周波数分割複信 (Frequency Division Duplex : FDD) 方式がある。図 2.6, 2.7 に両複信方式の概念を示す。

TDD 方式は、通信時間をタイムスロットによって細かく区分し、送信と受信を高速に切り替えることで擬似的に上下回線の同時送受信を実現する方法である。TDD 方式では実際には同時に送受信が行われることは無いので送受信信号間で干渉が発生しないのが特徴である。TDD 方式ではスロット幅は数 $100\mu\text{s}$ 程度であり、タイムスロット間にはガードタイムが設けられ、上下回線の信号が干渉することを防ぐ。このガードタイムは移動局⇄基地局間の伝搬時間により決定される。タイムスロット分割はアナログ通信では不可能であることから、アナログ無線通信は TDD 方式を利用することができず、後述する FDD でのみ利用が可能である。TDD 方式を使用する規格としては具体例として PHS と TD-CDMA (Time division-CDMA) が挙げられる。

FDD 方式はアナログ無線通信時代から利用されてきた方法であり、上下回線に異なる周波数帯域を固定的に割り当てることで同時送受信を実現する方式である。移動局では送受信ともに同じアンテナを利用するなど設備の面で共用する箇所があるため、送信信号が受信器に回り込むことを防ぐために、ガードバンドが必要である。受信信号は基地局から数十 dB 以上も減衰して到着することから、送受信間の電力差は大きく、フィルタで十分に送信信号を減衰させるのが困難であるため、中心周波数の 5% 以上の幅のガードバンドが必要と言われる。例として 800MHz 帯の PDC は 50MHz のガードバンドを設けている。第三代携帯電話における W-CDMA や CDMA2000 では FDD 方式が採用されており、今後も FDD 方式がセルラシステムにおいて主要な複信方式となると考えられる。

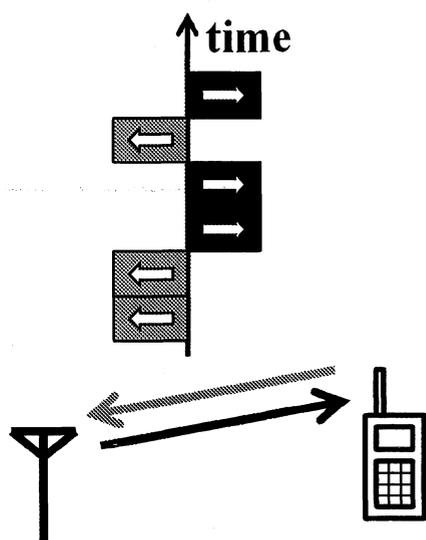


図 2.6 : TDD 方式におけるタイムスロット割当

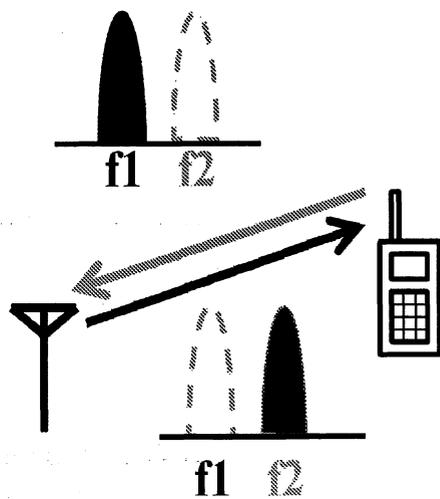


図 2.7 : FDD 方式における周波数割当

2.4 マルチホップ伝送

マルチホップ伝送とは、一つまたは複数の中継局を介して送信局から受信局へ信号を送信する方法である。マルチホップ伝送に対して通常の送信局→受信局間直接通信をシングルホップと呼ぶ。

マルチホップ伝送を CDMA セルラシステムに適用する場合、総送信電力の削減が可能である。総送信電力の削減がされれば他チャンネルへの干渉が減少するため信号の受信品質向上が期待できる。これによって伝送誤り率の向上、周波数利用効率の改善などが可能となる[11][12]。また、シングルホップ伝送では通信できないエリアの通信も可能となる。しかし、伝送遅延の発生、中継局選択等が必要であるため制御が複雑になる等の欠点が挙げられる。また、1ホップ目（基地局→中継局間）と2ホップ目以降（中継局→中継局間及び中継局→移動局間）の伝送を同じ周波数帯域で実施した場合、これらの通信の間で干渉問題が発生するため、適用方法によっては中継伝送によって干渉量が増大し、伝送誤り率が悪化することで周波数利用効率がかえって低下する可能性も指摘されている[13]。しかし、これらの通信を異なる帯域で実施すると干渉問題は発生しない。マルチホップ伝送をセルラシステムへ適用する場合、中継局には、専用中継局を設けるか、他の移動局がその役割を担う。

図 2.8 に、マルチホップ伝送のシステム構成例を示す。セルラシステムの下り回線においてマルチホップ伝送を適用した場合、マルチホップ伝送は、基地局から中継局への伝送、中継局から次の送信先の中継局への伝送、中継局から移動局への伝送にて行われる。中継局で、基地局、または別の中継局からの信号を一度復調し、その復調信号を再び変調して次の中継局または移動局に送信する DF (Decode and Forward) 方式と、中継局で復調せず、送信局からの信号を増幅し受信局へ送信する AF (Amplitude and Forward) 方式がある。

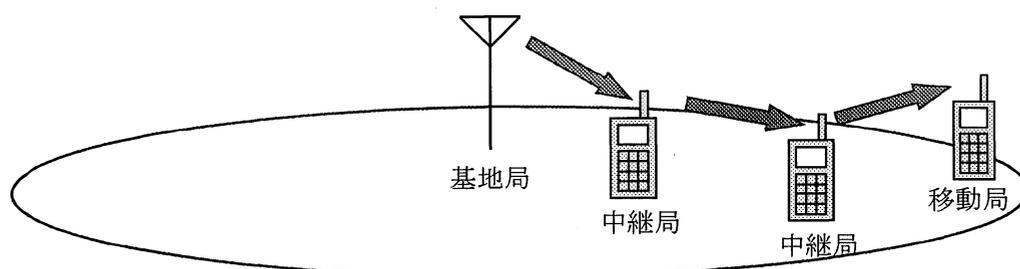


図 2.8 : マルチホップ伝送のシステム構成例 (下り伝送)

2.5 協調通信方式

一般に基本的なマルチホップ伝送においては、ホップ数の増加に伴う伝送誤りが伝搬し End-to-End の信号品質の劣化が生じる。しかし、多段中継を行う際に複数の中継局を協力させることにより、多ホップ時の特性劣化が軽減できる。また、急に一つの中継局が中継送信を出来なくなっても、他の中継局が受信局と通信できれば通信が中断されないという利点が生まれる。このような方は協調通信方式と呼ばれ、近年注目されている技術である[14]~[17]。

図 2.9 に協調通信のイメージを示す。各中継は複数の中継局を用いて行われる。送信局がある中継局へ送信した信号は電波伝搬の特性により、周辺の他の中継局へも到達し、信号受信が可能である。一般的に中継局同士は十分離れていると仮定できるため、同一情報を受信した複数の中継局が宛先受信局へそれぞれ信号を送信し、受信局でそれらの信号を合成受信すれば、複数のアンテナを利用して信号送信する場合と同等の空間ダイバーシチ効果を得ることが可能となる。

協調通信方式は複数の送受信機を用いる MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 等と等価なダイバーシチ効果を得ることができる。また、協調通信では送受信機が MIMO の様な複雑な機構を持たないでよいいため、受信機の負担が軽減される。また、簡易な線形処理によってダイバーシチ合成が可能となる。特に、センサネットワークや移動通信に用いられる移動局はコストやサイズに限界があることから、アレイアンテナを利用した高度な信号処理技術や、高い線形性を有する高出力の増幅器を使うことが難しい。協調通信方式はその様な移動局を用いた多段のマルチホップ伝送において有効な方式であると言える。

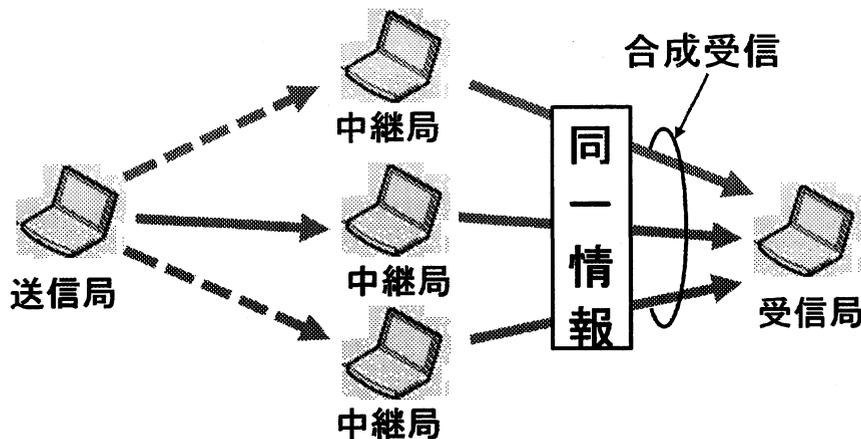


図2.9 : 協調通信のシステム構成例

第三章

非対称トラヒック

非対称トラヒックとは、下り回線で伝送されるトラヒック量と上り回線のトラヒック量に偏りが生じることである。近年顕著になった非対称トラヒックは現行のセルラシステムにいくつかの問題を発生させる。本章では、セルラシステムにおいて問題となる非対称トラヒックについて説明する。3.1 節では非対称トラヒックの発生要因について述べる。3.2 節では非対称トラヒックの変動特性について述べる。3.3 節では非対称トラヒックによって発生する諸問題について述べる。3.4 節では複信方式による非対称トラヒック対応の相違について述べる。3.5 節では非対称トラヒック収容法の現状について述べる。3.6 節では本論文で着目したマルチホップ伝送を用いた非対称トラヒック収容法について述べる。

3.1 非対称トラヒックの発生要因

非対称トラヒックの発生要因としては、近年セルラシステムにおいて行われるようになった大容量データ配信が挙げられる。

これまでのセルラシステムにおける通信サービスは音声通信がその需要の大半を占めていた。音声通信サービスでは上り回線、下り回線ともに音声情報が伝送されることとなる。そのため、上り回線と下り回線のトラヒック量は均衡が取れた、上下回線対称のトラヒック特性を有している。

しかし、現在では通信サービスの多様化が進展し、音声通信だけでなく音楽、画像、動画などの配信、web ページの閲覧等、様々な情報が伝送されるようになった。このようなマルチメディア通信は、上り回線と下り回線で伝送される情報の種別が異なる。音声通信サービスでは上下回線共に音声情報であったのに対し、マルチメディア通信では下り回線では音楽、動画等の大容量データを、上り回線ではサービス要求のための位置情報、要求するサービス内容等が伝送されることとなる。この様なサービスをトラヒックの上下対称性の観点で考察すると、下り回線トラヒックは上り回線トラヒックよりも大きく、そのトラヒック量は上下回線で非対称である事が一般的である。これによりシステム内の下り回線のトラヒック量が増加し、上下回線のトラヒック量が下り回線に偏る非対称なトラヒック特性を有することになる。

3.2 変動する非対称トラヒック

このような非対称トラヒック環境において、トラヒックの上下非対称性は、時間帯や地理的状况において変動する事が考えられる。例えば、上下対称なトラヒック特性を有する音声通信の需要と、上下非対称なトラヒック特性を有するマルチメディア通信の需要の割合が変化することでトラヒックの偏りは変化し、それによって上下回線のトラヒック比率は変動することとなる。

時間的変動は時間帯による各種サービスの需要の変化により発生する。日中は音声通信の需要がマルチメディア通信の需要を上回るが、夜間では音声通信の需要は少なく、マルチメディア通信の需要が高くなる。このため、音声通信サービスの需要が高い昼間はトラヒックの偏りは小さくなり、マルチメディア通信サービスの需要が高くなる夜間は上下トラヒック比の偏りは大きくなると言える。

空間的変動は、特定のサービスを利用するユーザが特定の場所に密集することで発生する。繁華街等ではマルチメディア通信を利用する頻度が高い若年層のユーザが集まるため、非対称トラヒックは顕著なものとなる。また、イベント会場などのマルチメディア通信を用いるユーザが多く集まる場所では、非対称トラヒックはより顕著なものとなる。

3.3 非対称トラヒックにより発生する問題点

現在のセルラシステムは、上り回線と下り回線のチャンネル容量が等しい対称型システムとなっている。それは、従来のセルラシステムにおいて伝送されるトラヒックの大部分は音声情報であり、音声情報の収容に適したチャンネル割当となっているためである。このような上下対称なチャンネル割当が行われたシステム環境において非対称トラヒックが発生した場合、上下回線のチャンネルの過不足の偏りが発生する。下り回線ではチャンネルの不足が発生し、上り回線ではチャンネルの余剰が発生する。この問題を解決するためには、上下回線のチャンネル割当を上下回線のトラヒック比率に応じて割り当てる必要がある。現システムにおいて、下りに偏った非対称トラヒックが発生した場合は、下り回線のチャンネルの増大、余剰となっている上り回線のチャンネルの下り回線への割当変更が必要となる。

また、非対称トラヒックは空間的、時間的変動を有するため、セルラシステムに割当られたチャンネルを、上下回線における平均トラヒック量の比で上下回線に割り当てることだけでは、効率の良い上下非対称トラヒックの収容を実現することは不可能である。高効率な非対称トラヒックの収容を実現するためには、地理的条件、時間的条件によって変化する上下回線のトラヒック量に応じた柔軟なチャンネル割り当てが可能な高度な上下回線チャンネル割当制御が必要となってくる。

3.4 複信方式と非対称トラヒック

上下回線の複信方式によって非対称トラヒック，特にトラヒック比率の時間変動特性に対する対応は異なるものとなる。

TDD システムは上下回線をタイムスロットによって分割するシステムであった。そのため，下り回線に偏った非対称トラヒックが発生した場合，そのトラヒック比率に応じてタイムスロットを上下回線に振り分けることで上下回線のトラヒック特性に応じたチャンネル割当が容易に実現できる。このような利点から，非対称トラヒックの収容法の研究は，TDD システムを対象に行われてきた。

FDD システムは，上下回線に個別に周波数帯域を割り当てることで上下回線の伝送を分割するシステムであった。このシステムでは，システム構築時に上下トラヒック比に応じて上下回線の周波数帯域の配分を決定することで上下回線のチャンネル割当を非対称にすることはできるが，一度システムが構築されてしまうと，その後上下回線のチャンネル割当を再変更するためには，通信システムを再構築する以外の対応はできない。つまり，非対称トラヒックは時間帯によってその比率を変化させるが，この時間変動に応じた動的な上下回線のチャンネル割当は非常に困難である。そのような背景から FDD システムにおける非対称トラヒック収容法の研究例は非常に少ないのが現状である。一方，現在用いられている通信サービスにおいては FDD 方式が主要な複信方式であるため，FDD システムにおける非対称トラヒックの効率的な収容法を確立することは非常に重要な研究課題となっている。

3.5 非対称トラヒック収容法の現状

3.5.1 TDD システムを対象とした非対称トラヒック収容法

非対称トラヒック収容に関しては、これまでに様々な研究が行われている[3]~[10]. TDD システムを対象とした研究例[3]~[7]の代表的なものとして Shared-TDD[4]方式が挙げられる. 本方式において, 上下回線のチャンネル割り当て配分を決定する指標として TDD 境界を用いる. 本方式では上下回線に一括して割り振られたタイムスロットを TDD 境界で上り伝送用のスロットと下り伝送用のスロットに分割, 分配する. この TDD 境界をセル内の上下回線のトラヒック比に応じて変動させることで上下回線への適応的リソース割当を実現する. システム内において非対称トラヒックが発生した場合は, この TDD 境界を変化させ, 下り回線伝送に用いるタイムスロットの割合を増やすことで下り回線で増大したトラヒックを収容し, 上り回線の余剰チャンネルも有効に活用できる.

バーチャル二重交差リング (VDSR) 手法[7]も挙げられる. 本方式は上下回線に割り当てるチャンネルを一括して管理し, 更に各ユーザの下りチャンネルの packets 到達情報バッファおよび各上りチャンネルの送信報知信号による上り送信状況バッファをリング状に配置する. スケジューリングによって仮想的に全てのユーザが平等に利用できるノーマル (N) リングと動画, 音楽配信の様な大容量データ配信が必要な特殊なユーザのみ利用可能な (S) リングからなる VDSR リングを作成し, N リングと S リングを交互に巡回させ, 送信待ちの packets にチャンネルを割り当てる. この様なチャンネル割当を行うことによって, 各チャンネルの送信状況及び QoS 状況に応じて公平かつ効率的にチャンネルを割り当てることができ, 上り/下りを区別せずに公平にチャンネルを割り当てることができる. よって非対称トラヒック環境におけるチャンネルの過不足の偏りの解消が可能となる.

3.5.2 FDD システムを対象とした非対称トラヒック収容法

FDD システムでは, 上下トラヒック比に応じて隣接するセル同士のセルサイズを変更する適応セル制御[8]などが提案されている. この方式は, 各基地局がセル領域の大きさを決定するパイロット信号送信電力と, 送信電力制御の目標受信電力を自律的に制御することによってセルサイズを変更する. この様なセルサイズ変更により, トラヒック量の大きいセルのセルサイズは縮小し, 近隣のトラヒック量の小さいセルのセルサイズを拡大する. この様にしてセル内のトラヒック量の均一化を実現する. 適応セル制御を非対称トラヒック環境において適用した場合, 下り回線と上り回線のセルサイズをトラヒック量に応じて個別に変更することで非対称トラヒック収容が可能になる. トラヒック量が増大した下り回線ではセルサイズを縮小し, 増大した下り回線伝送のトラヒックをサービスエリア内の他セルと均一化する. また, 上り回線帯域で収容できるトラヒ

ックに余力があるためセルサイズを拡大し、他のサービスエリアのトラヒックを収容する。このような制御によってセル内における上下回線のトラヒック量の偏りを緩和し、その影響を緩和することが可能である。

また、FDD 方式において、セル内の通信状況に応じて複信方式を TDD 方式に切り替えることによって非対称トラヒックの収容を実現する FDD・TDD システム[10]も提案されている。これはセル内の下りのトラヒック量が少ない時は低い時は既存のシステム同様に無線チャンネルを FDD で使用する。しかし、下り回線のトラヒック量が増大し、トラヒック比が大きくなった場合、上りの無線チャンネルをタイムスロットで分割し、上り回線のみを TDD 方式に切り替える。そして上り回線のタイムスロットの一部を下り回線に割り当てることで下り回線のチャンネル容量を増加させる。

さらに、本研究室においては、下り伝送にマルチホップ伝送を適用して下り回線の受信品質を向上させチャンネル容量の増大を図り、かつ下りマルチホップ伝送における中継伝送に上り回線の余剰となったチャンネルを利用することで余剰となった上り回線のチャンネルを有効利用する、非対称トラヒックの効率的な収容法が提案されている。本方式は本論文で着目した収容方式である。次節で詳しく述べる。

3.6 マルチホップ伝送を用いた非対称トラフィック収容法

3.6.1 概要

非対称トラフィックの高効率収容を実現するためには、下り回線のチャンネル容量の増大、上り回線で余剰となるチャンネルを下り回線において有効活用することが求められる。また、これらが時変動する非対称トラフィック特性に応じて動的に行われることも求められる。

本方式ではマルチホップ伝送が、チャンネル容量の増大に効果的であるということから、下り回線伝送にマルチホップ伝送を適用する。これにより、非対称トラフィック環境で必要な下りチャンネル容量の増大を実現する。また、非対称トラフィック環境で余剰となっている上り回線のチャンネルは下り回線伝送に利用可能であることから、マルチホップ伝送における基地局→中継局間(1 ホップ目)の伝送は従来通り下り回線のチャンネルを利用し、中継伝送には上り回線のチャンネルを利用する。これにより、上り回線の余剰となったチャンネルの有効利用が可能となり、下りチャンネル容量を向上させることも可能となる。図 3.1 に、上り回線のチャンネルを用いた下りマルチホップ伝送方式のシステム構成例を示す。

しかし、本方式は下りチャンネル容量が増大する反面、上り回線の干渉量を増大する結果となり、上り回線のチャンネル容量減少を招く。この容量劣化を抑制するために、マルチホップ伝送に適用条件を付加する必要がある。

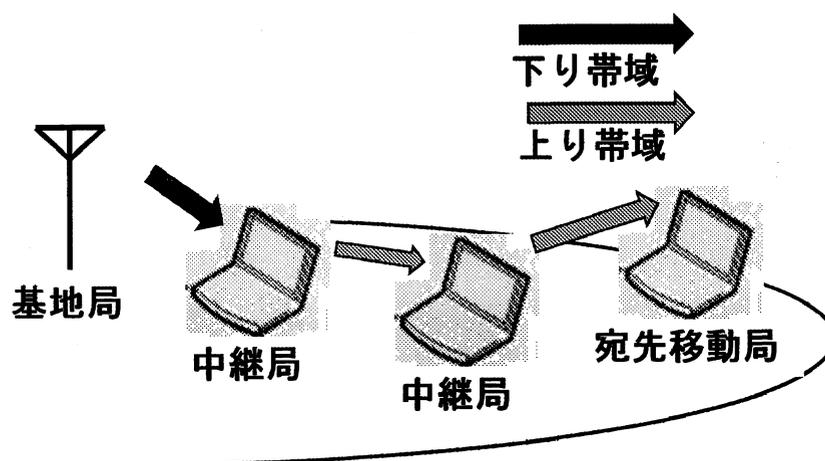


図 3.1 : 上り帯域を用いたマルチホップ伝送

3.6.2 下りマルチホップ伝送の適用条件

マルチホップ伝送を用いた非対称トラフィック収容法は下りチャンネル容量増加を可能にするが、上り回線のチャンネル容量減少を招く可能性がある。そこで、マルチホップ伝送を適用する際に、2つの適用条件を付加し、その両方を満たした場合のみ下り回線伝送にマルチホップ伝送が適用される。

本方式では、以下の条件 (i) (ii) を同時に満たすときにマルチホップ伝送が適用され、満たされないときはシングルホップ伝送となる。

- (i) $p_{\text{rec}}^d < Th_{\text{rec}}^d$ かつ $p_{\text{rec}}^u > Th_{\text{rec}}^u$
- (ii) $P_{\text{BSsg1}} > Th_{\text{pw}}$ かつ $P_{\text{BSsg1}} > P_{\text{mlt}}$

(i) はチャンネルの品質に対する条件であり下り回線品質が一定値 (Th_{rec}^d) よりも低下し、かつ、上り回線伝送品質が一定値 (Th_{rec}^u) よりも良好な場合にマルチホップ伝送が適用されることを意味している。(ii) は送信電力に対する条件であり、シングルホップ時の送信電力が一定値 (Th_{pw}) とマルチホップ伝送時の総送信電力の両方を上回る場合にマルチホップ伝送が適用されることを意味している。

各基地局は、一定の観測期間ごとに回線品質の指標として両回線のパケット受信率 p_{rec}^d , p_{rec}^u を測定し、予め設定したパケット受信率閾値(下り回線: Th_{rec}^d , 上り回線: Th_{rec}^u) と比較する。更に、シングルホップ伝送時の送信電力 P_{BSsg1} を予め設定した電力閾値 Th_{pw} , 及びマルチホップ伝送時の総送信電力 P_{mlt} と比較する。これらの比較により、基地局は下りパケットの伝送方法を決定する。ここで、 P_{mlt} は次式で定義される。

$$P_{\text{mlt}} = P_{\text{BSmit}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{rly}}} P_{\text{RS}_i} \quad (3.1)$$

上式において P_{BSmit} と P_{RS_i} は、マルチホップ時の基地局送信電力、マルチホップルート上の各中継局での送信電力であり、 N_{rly} はルート上の中継局数である。

3.6.3 中継ルート選択

中継ルート選択は文献[13]で提案されている方式に従う。マルチホップ伝送における中継ルートは、中継ルートにおける総送信電力が最小となるような中継局を選択することにより決定される。基地局はサービスエリア内に存在する移動局の位置情報、信号の減衰量を移動局から知ることができる。基地局は自信に接続している移動局に対し、中継ルート構築を目的としたルート選択信号を送信する。ルート選択信号を受信した移動局は、伝搬路情報を基地局へ返信する。その信号によって基地局では、各移動局の位置情報、信号の減衰量を把握する。これらの情報から、基地局は基地局から宛先移動局までの総送信電力が最小となる中継ルートを信号伝送に採用する。

3.6.4 システム特性と問題点

図 3.2~3.4 に、マルチホップ伝送を用いた非対称トラヒック収容法のスループット特性を示す。スループットとは、単位時間内に送信成功したパケット数で定義する。ここではスロット当たりのパケット送信成功数で表わされる。図の縦軸がスループット、横軸がスロット当たりの負荷量である。負荷量はスロット当たりにセル内で発生するパケット数で表わされる。比較対象として、マルチホップを行わない、シングルホップ の場合も評価した。図中の“conv”がマルチホップ伝送を用いた非対称トラヒック収容法による特性、“single”がマルチホップ伝送を行わないシングルホップによる特性である。

下り回線では、本方式はシングルホップに比べてスループットが増大している。これはマルチホップ伝送の導入により下り回線のチャネル容量が増大したこと、マルチホップ伝送の一部に上り回線を利用したことにより、下り回線のトラヒックの一部を上り回線が収容しているためである。よって本方式は、下り回線においてチャネル容量の増大が可能であると言える。上り回線では本方式のスループットは低下している。これは、下りマルチホップ伝送において、上り帯域を用いているため、上り回線における干渉電力が増大するためである。総合特性では本方式の特性はシングルホップ伝送を上回っている。これはマルチホップ伝送を導入したことによる下り回線のチャネル容量の増大が要因である。

以上をまとめると、本方式は非対称トラヒック環境において、下りチャネル容量の増大を可能とする。しかし、マルチホップ伝送の適用条件を設定したにも関わらず、依然として上り回線の干渉量増大に伴う上り回線のチャネル容量減少を招くという問題がある。この問題を解決するためには更なる上り回線劣化の抑制方法を考案しなければならない。そこで、本論文ではマルチホップ協調通信方式を用いた非対称トラヒック収容法を提案する。詳細は 4 章で述べる。

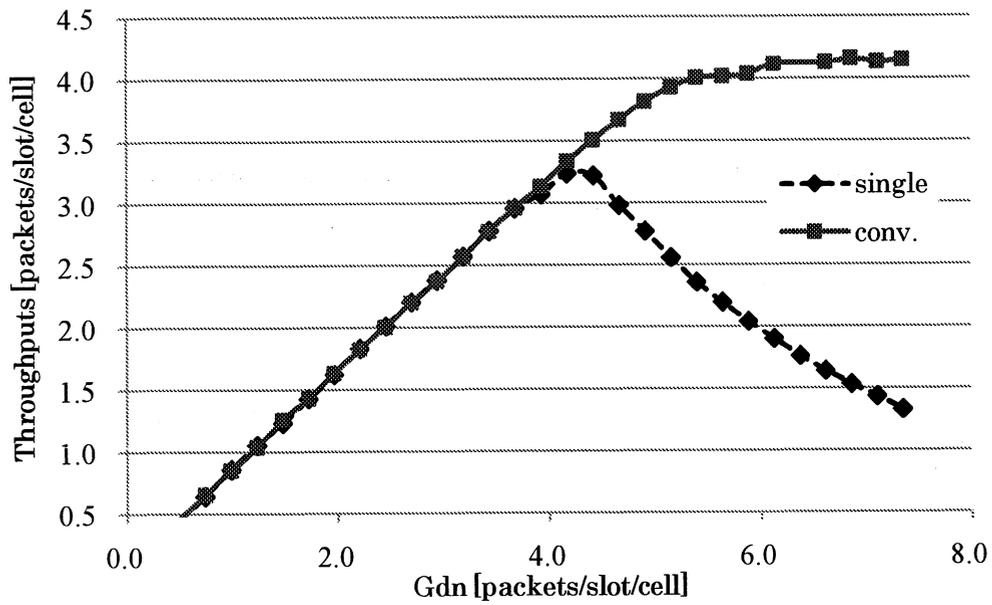


図 3.2 : 下り回線のスループット特性

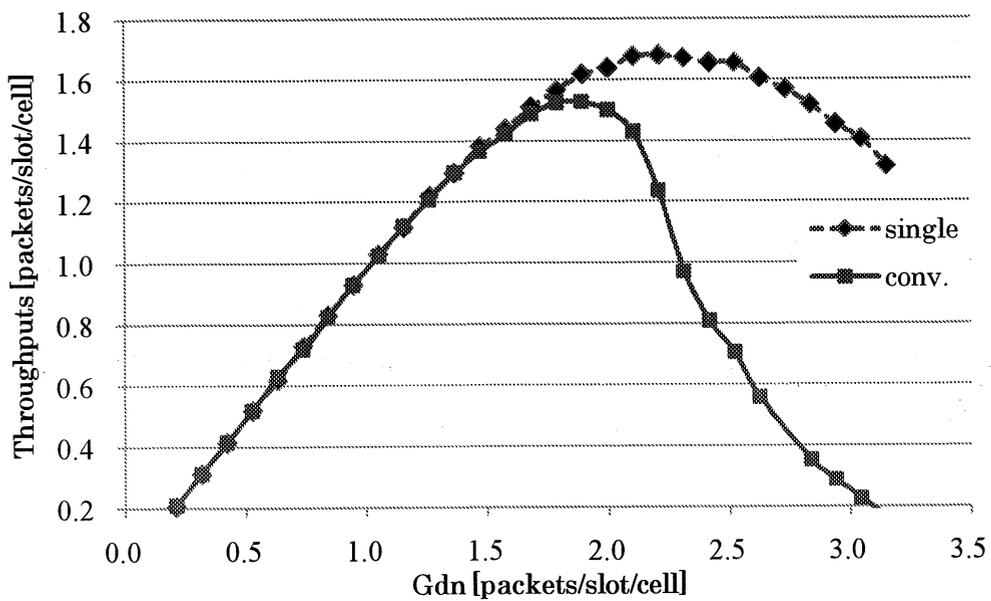


図 3.3 : 上り回線のスループット特性

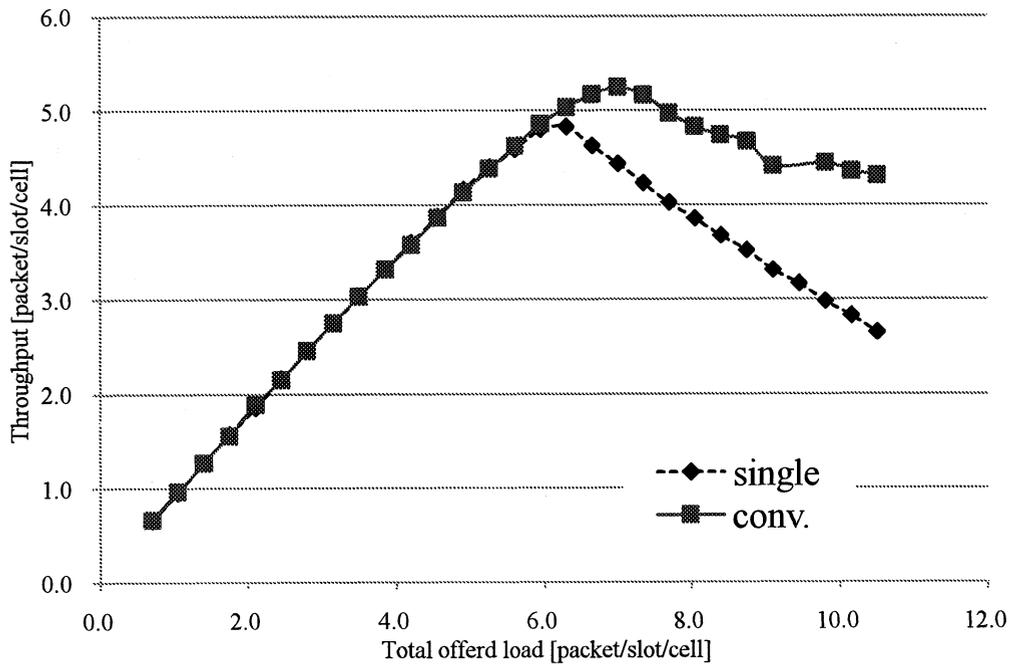


図 3.4 : 総合特性

第四章

マルチホップ協調通信方式を用いた 非対称トラヒック収容法の提案

本章では本論文の提案法である，マルチホップ協調通信を用いた非対称トラヒック収容法について述べる．提案方式では，マルチホップ伝送を用いた従来の非対称トラヒック収容法の欠点であった上り回線の品質劣化を軽減するため協調通信方式を導入する．4.1 節では提案法の概要について述べる．4.2 節では協調通信による信号合成後の信号品質計算に関して述べる．4.3 節では提案法における二種類の中継送信電力削減手法を述べる．

4.1 概要

従来法の上り回線のチャンネル容量減少を軽減させるためには，下りマルチホップ伝送の中継伝送時の上り回線への負担を軽減することが求められる．下りマルチホップ伝送時の中継伝送における送信電力を削減することで，上り回線帯域への干渉電力が減少し，上り回線のチャンネル容量減少の軽減が期待できる．しかし，現状のままで中継送信電力の削減を行った場合，下りマルチホップ伝送の packets 受信率を下げ，従来法の利点であった下り回線品質が低下してしまう．従来法の下り回線における品質向上を確保しつつ，上り回線品質を向上させるためには，従来法による，下り回線のチャンネル容量を維持できる，マルチホップ伝送における中継送信電力の削減手法が求められる．

従来法では下り回線伝送にマルチホップ伝送を適用していた．このマルチホップ伝送において，基地局→中継局間の伝送，中継局→中継局間のそれぞれの伝送信号は無線通信の電波伝搬特性から宛先移動局に到達している場合がある．これらの“漏れ聞こえる”伝送信号を宛先移動局で受信し利用することによって，宛先移動局における受信信号の品質を向上させることが可能となる．この様に下りマルチホップ通信の受信品質をさらに向上することができれば，中継送信電力を削減して上り回線への干渉を軽減しても，従来法と同程度の下り回線の受信品質を確保することが可能である．以上の様な制御を実現する手段に協調通信方式がある．

そこで，提案法では従来法の下りマルチホップ伝送において協調通信方式を導入する．協調通信は，送信局と宛先移動局の間に複数の中継局を配置し，送信局からの伝送信号を一旦中継局で受信し，複数の中継局から同一信号を宛先移動局に送信して，空間ダイバーシチ利得を得て信号品質を改善する技術である[18]．提案法では従来法の下りマルチホップ伝送における中継ルートに関して，基地局→中継局間，中継局→中継局間の伝送から“漏れ聞こえる”信号を宛先移動局で合成受信する．これによって協調通信の複数の中継局からの同一信号伝送と同様の空間ダイバーシチ効果を得ることができる．こ

の様な協調通信を適用することによって受信信号電力が増大し、宛先移動局における下り回線の受信信号品質の向上を図る。

協調通信による下り回線の受信信号品質の向上が実現すれば、中継送信電力を削減した場合にも宛先移動局において所望の受信信号品質を確保することが可能となる。そこで中継局では協調通信による受信信号品質の改善に応じた送信電力削減を実施する。中継局では宛先移動局における協調通信による合成受信後の受信信号品質が所望の受信信号品質となるような送信電力制御を実施する。これによって下りマルチホップ伝送の受信信号品質は確保され、受信信号品質が過剰となる伝送に対しては受信品質が調整され、それに伴い中継送信電力は削減される。このような送信電力制御が行われることによって従来法の下り回線のチャンネル容量を確保しつつ、上り回線に与える干渉を軽減し、上り回線帯域のチャンネル容量減少が軽減されることが期待できる。

図 4.1 に、提案方式における協調通信のシステム構成例を示す。宛先移動局では、マルチホップ伝送における基地局→中継局間、中継局→中継局間の信号を受信して、これらと中継局→宛先移動局間の信号を合成することにより、宛先移動局での受信信号品質 SIR (信号対干渉電力比) を改善する。この効果により中継伝送の送信電力を削減しても宛先移動局では所望の SIR が得られる。そこで、協調通信による受信 SIR 改善度合いに応じて中継送信電力を削減する。

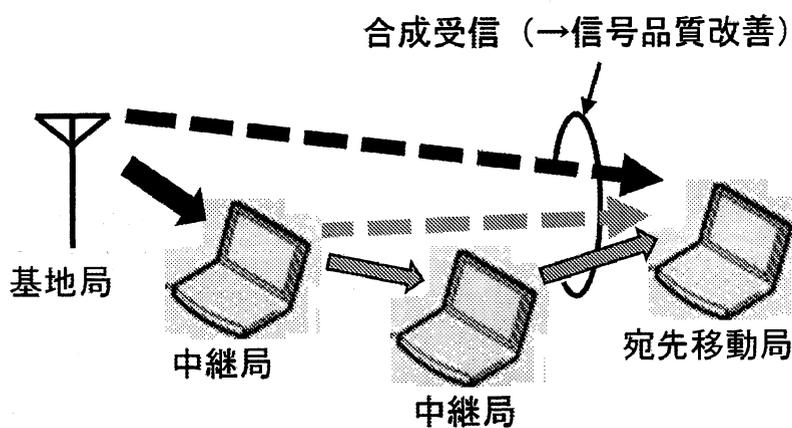


図 4.1 : マルチホップ協調通信(提案方式)

4.2 信号合成後の SIR

提案方式では宛先移動局の合成に最大比合成を用いる。最大比合成は各受信信号にそれらの受信信号の受信品質に従った重みづけを行い合成することにより、信号合成後の受信品質を向上させる合成方式である[18][19]。

信号の重みづけの指標とする受信品質には信号対雑音電力比 (SNR) を基準とするのが一般的である。 m 個の信号について最大比合成を適用する場合、信号合成後の SNR γ は次のように表わされる[20]。

$$\gamma = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=0}^m (R_i)^2}{\sum_{i=0}^m R_i^2 N} = \sum_{i=0}^m P_{r_i} / N = \sum_{i=0}^m \gamma_i \quad (4.1)$$

R_i は i 番目の信号の包絡線であり、 P_{r_i} は i 番目の信号における受信電力である。 N は宛先移動局における雑音電力である。よって SNR を受信品質の基準とし重みづけを行った場合の最大比合成後の SNR は各径路から送信される信号に対する SNR の和となる。

提案法では信号の重みづけの指標として SIR を基調とする。宛先移動局における m をマルチホップ伝送におけるホップ数、 SIR_i を基地局送信信号 ($i=0$) あるいは各中継送信信号の受信 SIR とすると、宛先移動局における信号合成後の SIR SIR_{div} は各中継送信信号の受信 SIR の和となり、次式によって表わされる。

$$SIR_{div} = \sum_{i=0}^m P_{r_i} / I = \sum_{i=0}^m SIR_i \quad (4.2)$$

4.3 中継送信電力の削減

CDMA システムでは、一般に SIR 基準の送信電力制御 (TPC) が利用されるが、この場合、送信局の送信電力は受信局での目標受信 SIR で決定される。提案方式では、宛先移動局において各受信信号を最大比合成するため受信 SIR の向上が見込まれる。したがって中継伝送における目標受信 SIR を削減して、その送信電力を小さくしても宛先移動局において所望の SIR を達成することが可能となる。そこで、提案方式では、協調通信による受信 SIR の改善に応じて中継送信電力を低減することで、上り回線の干渉が低減され上り回線における品質劣化の抑制を可能とする。本論文では固定量中継送信電力削減と動的な中継送信電力削減の2つの送信電力削減方式を提案する。

4.3.1 固定量中継送信電力削減

本方式では、協調通信による SIR 改善を見込んだ、一定量の中継伝送送信電力の削減を行う。中継伝送における目標受信 SIR を一定値だけ低く設定し、当該中継伝送における送信電力を削減することで上り回線の劣化の抑制を目指す。中継伝送送信電力削減前の中継伝送の目標受信 SIR を SIR_{tgt} [dB]、目標受信 SIR 削減値を α [dB] とすると、協調通信導入後の目標受信 SIR SIR_{tgtdiv} [dB] は次式で与えられる。

$$SIR_{tgtdiv} = SIR_{tgt} - \alpha \quad (4.3)$$

ここで、SIR 基準 TPC を実施すると、協調通信導入後の目標受信電力 P_{tgtdiv} [dB] および中継伝送送信電力 P_{txdiv} [dB] は次式となる。

$$P_{tgtdiv} = SIR_{tgtdiv} + I - PG \quad (4.4)$$

$$P_{txdiv} = P_{tgtdiv} + loss \quad (4.5)$$

上式において、 PG は拡散率、 I [dB] は干渉電力推定値、 $loss$ [dB] は伝搬路の減衰量推定値を示す。

以上のような協調通信を利用することにより、提案方式は従来法と同等程度の下り回線におけるチャンネル容量の向上を確保しつつ、上り回線の品質劣化を抑制することを可能にする。

4.3.2 動的な中継送信電力削減

協調通信による受信 SIR 改善度合いには各々の通信によって違いが生じる。そのため、前述の固定量中継送信電力削減では、SIR 改善度合いが少ない伝送では受信電力の不足が発生し、受信品質が所望の品質を下回ってしまうことがある。また、SIR 改善度合いが大きい通信においては、受信品質が過剰となることになり、上り回線帯域に余分な負担を強いることになる。そこで本方式は、宛先移動局における協調通信による SIR 改善

度合いに応じた中継送信電力の削減を行う。宛先移動局は、中継送信信号の送信に先立ち、基地局→中継局間の信号が宛先移動局に到達した際の受信 SIR を中継局に通達する。中継局は協調通信による信号合成後の SIR が所望 SIR となるよう中継送信電力を決定し、パケットを送信する。マルチホップ伝送の最大ホップ数を m 、 i をマルチホップ伝送のホップ数、 i ホップ目の中継信号を宛先移動局で受信した際の SIR を SIR_{adpt_i} としたとき、本方式におけるマルチホップ伝送において、中継局における目標受信 SIR 削減量 α_{adpt} 、中継送信電力削減後の中継送信における目標受信 SIR $SIR_{\text{tgt_adpt}}$ [dB] は、次式となる。

$$\alpha_{\text{adpt}} = \sum_{i=0}^m SIR_{\text{adpt}_i} \quad (4.6)$$

$$SIR_{\text{tgt_adpt}} = SIR_{\text{tgt}} - \alpha_{\text{adpt}} \quad (4.7)$$

ここで、 α_{adpt} は宛先移動局における、協調通信による受信 SIR の改善量である。ここで、固定量中継送信電力削減と同様に、SIR 基準 TPC を実施すると、協調通信における目標受信電力 $P_{\text{tgt_dym}}$ [dB] および中継伝送送信電力 $P_{\text{tx_dym}}$ [dB] は次式となる。

$$P_{\text{tgt_adpt}} = SIR_{\text{tgt_adpt}} + I - PG \quad (4.8)$$

$$P_{\text{tx_adpt}} = P_{\text{tgt_adpt}} + \text{loss} \quad (4.9)$$

以上のような中継送信電力削減を行うことにより、提案法は、下りマルチホップ伝送の受信品質を適切に維持しつつ、上り回線のチャンネル容量減少の軽減することが期待できる。

第五章

計算機シミュレーションによる特性評価

本章では、計算機シミュレーションを用いて提案方式のシステム特性を調査する。

5.1 システムモデル

提案方式の有効性を実証するために、以下のような CDMA/FDD セルラケット通信システムを想定して計算機シミュレーションを行った。

- ・ サービスエリアは 19 個の正六角形セルで構成され、基地局は各セルの中心に配置される。
- ・ 移動局は各セル内で一様に分布し、セル当りの移動局数は N_{ms} 個とする。
- ・ 上り回線のチャンネルアクセス方式は slotted ALOHA 方式であり、下り回線でもチャンネルはスロット構造を有する。セル間のスロット同期は両回線において完全とする。
- ・ 各パケットは拡散符号で拡散されており、受信局での符号の衝突は発生しない。
- ・ 送信電力は受信局における SIR が一定となるように制御し、その制御誤差は無い。

5.1.1 伝搬モデル

各無線チャンネルは、距離減衰とシャドーイング変動を伴う伝搬損失を受ける。基地局と移動局(中継局)間の伝搬はマクロセル伝搬に分類されると仮定し、距離減衰係数 α_{BM} 、シャドーイング変動は、平均 0 で、標準偏差 $\sigma_{BM}[\text{dB}]$ の対数正規分布に従う。この時の送信電力を P_{tx} としたときの移動局(中継局)における受信電力 P_{rxBM} は以下のように表わされる。

$$P_{rxBM} = P_{tx} \cdot 10^{\sigma_{BM}/10} / d^{\alpha_{BM}} \quad (5.1)$$

中継局と宛先移動局(中継局)間の伝搬はマイクロセル伝搬に分類されると仮定し、直接波と対地反射波の 2 波モデルの伝搬モデルを仮定する。したがって、ブレイクポイント $d_{bk}[\text{m}]$ までの伝搬では距離減衰係数が α_{RM1} 、ブレイクポイント後ではそれが α_{RM2} であり、そのシャドーイング変動は平均 0、標準偏差 $\sigma_{RM}[\text{dB}]$ の対数正規分布に従うとする。中継局→宛先移動局間の距離がブレイクポイントより短いときの宛先移動局における受信電力 P_{rx}^d と、ブレイクポイントを超える場合の受信電力 P_{rxbk}^d は以下のように表わされる。

$$P_{rx}^d = P_{tx} \cdot 10^{\sigma_{RM}/10} / d^{\alpha_{RM1}} \quad (5.2)$$

$$P_{rx_{bk}}^d = P_{tx} \cdot 10^{\sigma/10} / \{ d^{\alpha_{RM1}} + (d / d_{bk})^{\alpha_{RM2}} \} \quad (5.3)$$

5.1.2 受信 SIR と信号伝送誤り率

CDMA システムでは、各パケットはサービスエリア内から到来する同一回線の他のパケットと互いに干渉する。更に、提案システムでは下りパケットのマルチホップ伝送時に、中継伝送パケットは上り回線帯域を用いて伝送されるため、上り回線パケットと下り回線中継パケットが互いに干渉する。

上り回線のパケット i の SIR $SIR^u(i)$ は次式で求められる。受信局は所望 SIR SIR_{req} を満たすパケットを正しく受信できるものとする。

$$SIR^u(i) = PG \cdot P_{rx}(i) / \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{K_u} P_{rx}(k) + \sum_{k=1}^{K_{rm}} P_{rx}(k) \right) \quad (5.4)$$

ここで、PG は拡散利得、 $P_{rx}(k)$ はパケット k の受信電力である。 $P_{rx}(k)$ は 5.1.1 節の伝搬モデルにより計算される。 K_u は同一スロットにおいてサービスエリア内で送信された上り回線パケットの総数であり、 K_{rm} は同様に送信された下り回線の中継パケットの総数である。

シングルホップ伝送時とマルチホップ伝送における基地局→中継局間伝送時の下り回線パケット i の SIR $SIR_{BM}^d(i)$ は次の式で求められる。

$$SIR_{BM}^d(i) = PG \cdot P_{rx}(i) / \left\{ (1 - F_0) \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{K_{di}} P_{rx}(k) + \sum_{k=1}^{K_{de}} P_{rx}(k) \right\} \quad (5.5)$$

ここで、 K_{di} は受信移動局（中継局）に所望パケット i を送信した基地局と同じ基地局により同一スロットで送信された下りパケットの総数で、 K_{de} は他の基地局によりそのスロットで送信された下りパケットの総数である。 F_0 は直交率であり、同一基地局から送信された信号の受信電力がマルチパス伝搬によりセル内干渉として現れる比率を表している。

マルチホップ伝送における中継局→中継局間および中継局→移動局間伝送時の下り回線パケット i の SIR $SIR_{RM}^d(i)$ は次の式で計算される。

$$SIR_{RM}^d(i) = PG \cdot P_{rx}(i) / \left\{ \sum_{k=1}^{K_u} P_{rx}(k) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{K_{rm}} P_{rx}(k) \right\} \quad (5.6)$$

受信信号の SIR が SIR_{req} を上回ったパケットは信号伝送が成功し、 SIR_{req} を下回ったパケットは信号伝送誤りが発生すると仮定する。信号伝送誤りが発生した場合の信号伝送誤り率 P_{bl} は 1 となり、信号伝送が成功した際の信号伝送誤り率は 0 となると仮定する。よって受信信号の SIR を SIR_{rec} としたとき、その信号伝送誤り率 P_{bl} は以下で与えられる。

$$P_{bl} = \begin{cases} 0; & SIR_{rec} \geq SIR_{req} \\ 1; & SIR_{rec} \leq SIR_{req} \end{cases} \quad (5.7)$$

5.1.3 トラヒックモデル

各セルでのトラヒックの非対称性を模擬するために、トラヒック非対称率 R_{asym} を導入する。 R_{asym} は総トラヒック量 G_{to} に対する下り回線のトラヒック量の比で定義される。総トラヒック量 G_{to} は、平均下りトラヒック量 G_{dn} と平均上りトラヒック量の和で定義される。また、トラヒック量 G_{to} , G_{dn} , G_{up} は、セルあたりのスロット期間における平均発生パケット数で与え、本稿では G_{to} と R_{asym} は総てのセルで同一であると仮定した。またパケット発生は平均総トラヒック量 G_{to} のポアソン分布に従うと仮定する。

5.2 シミュレーション諸元

計算機シミュレーションで用いた主要な伝送パラメータを表 5.1 に示す. シミュレーションにおいては, 2.2 節のマルチホップ適用条件で用いられる電力閾値 Th_{pw} の代わりに距離閾値 $Th_{dist}[\text{m}]$ を用いた. Th_{dist} はシャドーイング変動を考慮しない基地局・移動局間伝搬モデルを用いて送信電力を距離に変換したものである. また, 上下回線の周波数割当は 1:1 とし, マルチホップ伝送の最大ホップ数は 2 とした.

表 5.1 : シミュレーション諸元

セル半径 R	500 [m]
距離減衰係数 $\alpha_{BM}, \alpha_{RM1}, \alpha_{RM2}$	3.5, 2.0, 4.0
シャドーイング標準偏差 $\sigma_{BM}, \sigma_{RM1}, \sigma_{RM2}$	7.0 [dB]
拡散率 PG	16
ブレイクポイント d_{bk}	45 [m]
直行率 F_0	0.6
上りパケット受信率閾値 Th_{REC}^U	0.0
下りパケット受信率閾値 Th_{REC}^D	0.8
距離閾値 Th_{dist}	300 [m]
所要 SIR SIR_{req}	5.0 [dB]
目標受信 SIR SIR_{tgt}	6.0 [dB]
移動局数 (セルあたり) N_{MS}	100
中継ルート上の中継局数 N_{rly}	1
トラヒック非対称率 R_{asym}	0.7

5.3 特性評価

提案方式の特性評価は、宛先移動局における信号受信後の SIR の分布、パケット受信率、スループット特性の比較により実施した。

5.3.1 下りマルチホップ伝送における受信 SIR 分布 (固定量中継送信電力削減)

図 5.1, 図 5.2 に、平均パケット発生数 $G_{to}=7.0$ [packets/slot/cell] における宛先移動局における受信 SIR の確率分布と累積分布を示す。グラフにおいて、図 5.1, 図 5.2 において、横軸は宛先移動局における受信 SIR を表わす。また、図 5.1 の縦軸はその受信 SIR を得たパケットの確率分布を表わす。図 5.2 においては、縦軸は宛先移動局における受信 SIR の $-\infty$ [dB] からその受信 SIR までの累積分布を示す。図中の 'conv' はマルチホップ伝送を用いた従来法の特徴、'prop_const.' は協調通信を導入し、固定量中継送信電力削減を導入した提案方式を示し、0 内は固定量中継送信電力削減における目標受信 SIR 削減量 a [dB] である。

まず、従来法に協調通信を適用し、中継送信電力削減を行わない提案法 prop_const. ($\alpha=0$ [dB]) と、従来法の特徴を比較する。図 5.2 において、協調通信を導入した提案法は、伝送パケットの受信 SIR が従来法に比べ大きく向上していることが分かる。また、従来法では所望 SIR である 5 [dB] に達せず、伝送失敗するパケットが 40% 以上あるのに対し、提案法を導入した場合は伝送失敗するパケットはその半分未満の 20% まで減少している。これは、協調通信によって宛先移動局における受信 SIR が改善したためである。また、図 5.1 を見ると提案法は所望受信 SIR を大きく上回る伝送パケットがかなりの割合を占めていることが分かる。これは送信電力の過剰であり、中継送信電力の大幅な削減が可能であることを表わしている。

ここで固定量中継送信電力削減を行った提案法を比較対象に加える。図 5.2 において、目標受信 SIR 削減量 a を大きくすると、その伝送パケットの受信 SIR は、中継送信電力削減を行わない提案法のそれと比べ、低い受信 SIR 値において分布のピークを持つようになる。これは、中継伝送における目標受信 SIR を削減して下り中継送信電力が小さくなったことで、宛先移動局における受信 SIR が低下したためである。しかし、 $\alpha=6$ [dB] とした場合においても、提案法において伝送されるパケットは従来法のそれ以上の受信品質を確保している。しかし $\alpha=9$ [dB] とした場合では、送信失敗するパケットの量が従来法を上回ってしまう。よって、固定量中継送信電力削減において従来法の下り回線の受信品質向上を確保しつつ中継送信電力を削減する場合、 $\alpha=6$ [dB] が最も適切

であると言える。

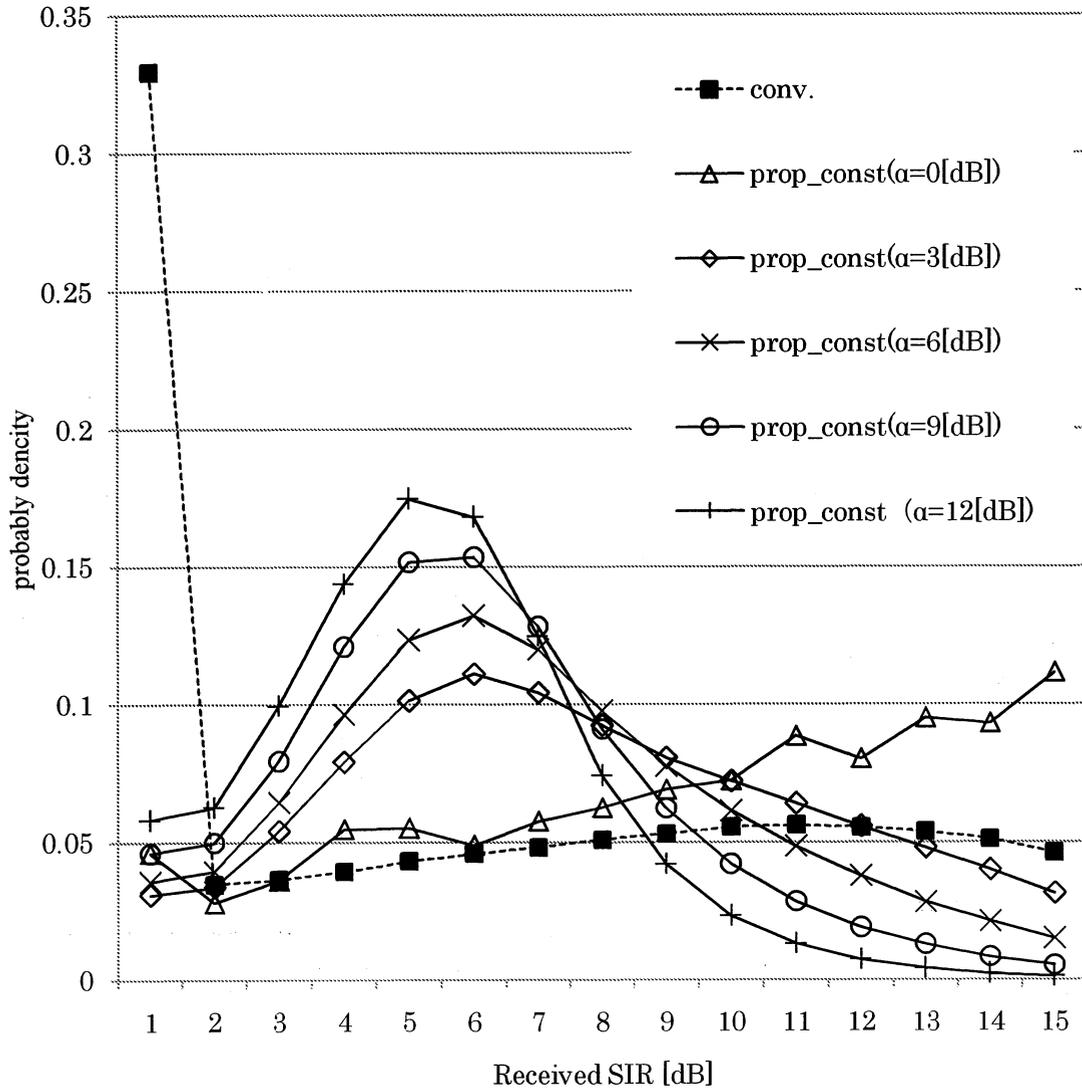


図 5.1 : 受信 SIR の確率分布 (固定量中継送信電力削減)

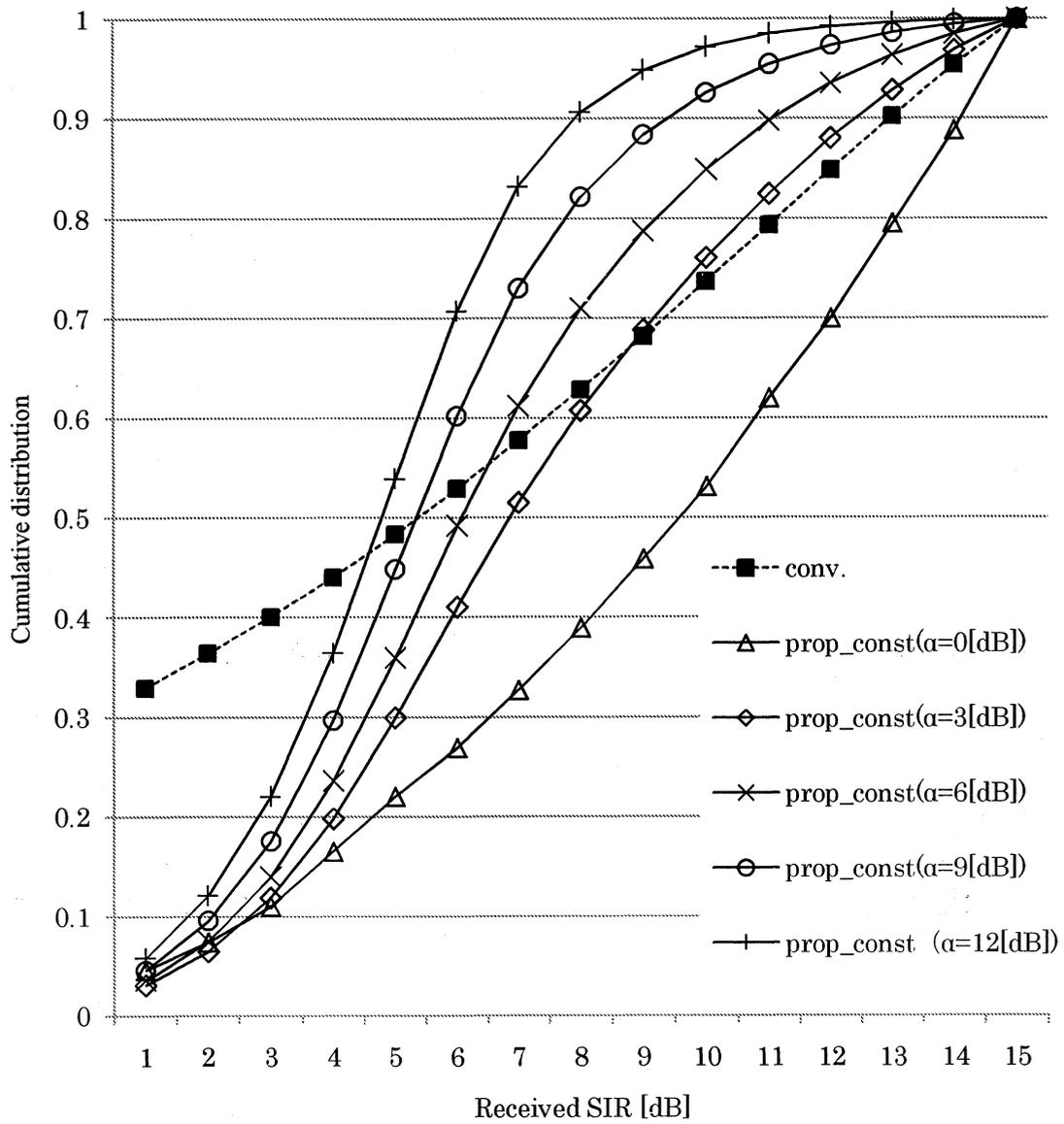


図 5.2 : 受信 SIR の累積分布 (固定量中継送信電力削減)

5.3.2 下りマルチホップ伝送における受信 SIR 分布（動的中継送信電力削減）

図 5.3, 図 5.4 に, 平均パケット発生数 $G_{to}=7.0$ [packets/slot/cell] における宛先移動局における受信 SIR の確率分布と累積分布を示す. 'prop_adapt' は協調通信を導入し, 動的中継送信電力削減を導入した提案方式である. 比較対象として, 従来法と固定量中継送信電力削減を適用した場合の最適値 prop_const. ($\alpha=6$ [dB]) を加える.

動的中継送信電力削減を適用した場合においても固定量中継送信電力削減と同様に協調通信適用による受信 SIR 改善が成される. しかし, 図 5.2 において, 固定量中継送信電力削減を用いて $\alpha=6$ [dB] とした場合の提案法と比べ, 動的中継送信電力削減を用いた提案法は目標受信 SIR を達成するパケットが多く, 全方式の中で最も高い比率となっている. また, 目標受信 SIR を大きく上回る過剰な受信品質を持つパケットも少ない. これは, 全てのパケット送信において固定的に中継送信電力削減値を決定する固定量中継送信電力削減に対し, 動的中継送信電力削減は, 宛先移動局における協調通信適用後の受信 SIR が目標受信 SIR となるよう中継送信電力削減量を決定するためである. この様なことから, 全方式の中で, 最も送信電力を効果的に削減できているのは動的中継送信電力制御を導入した提案法であると言える.

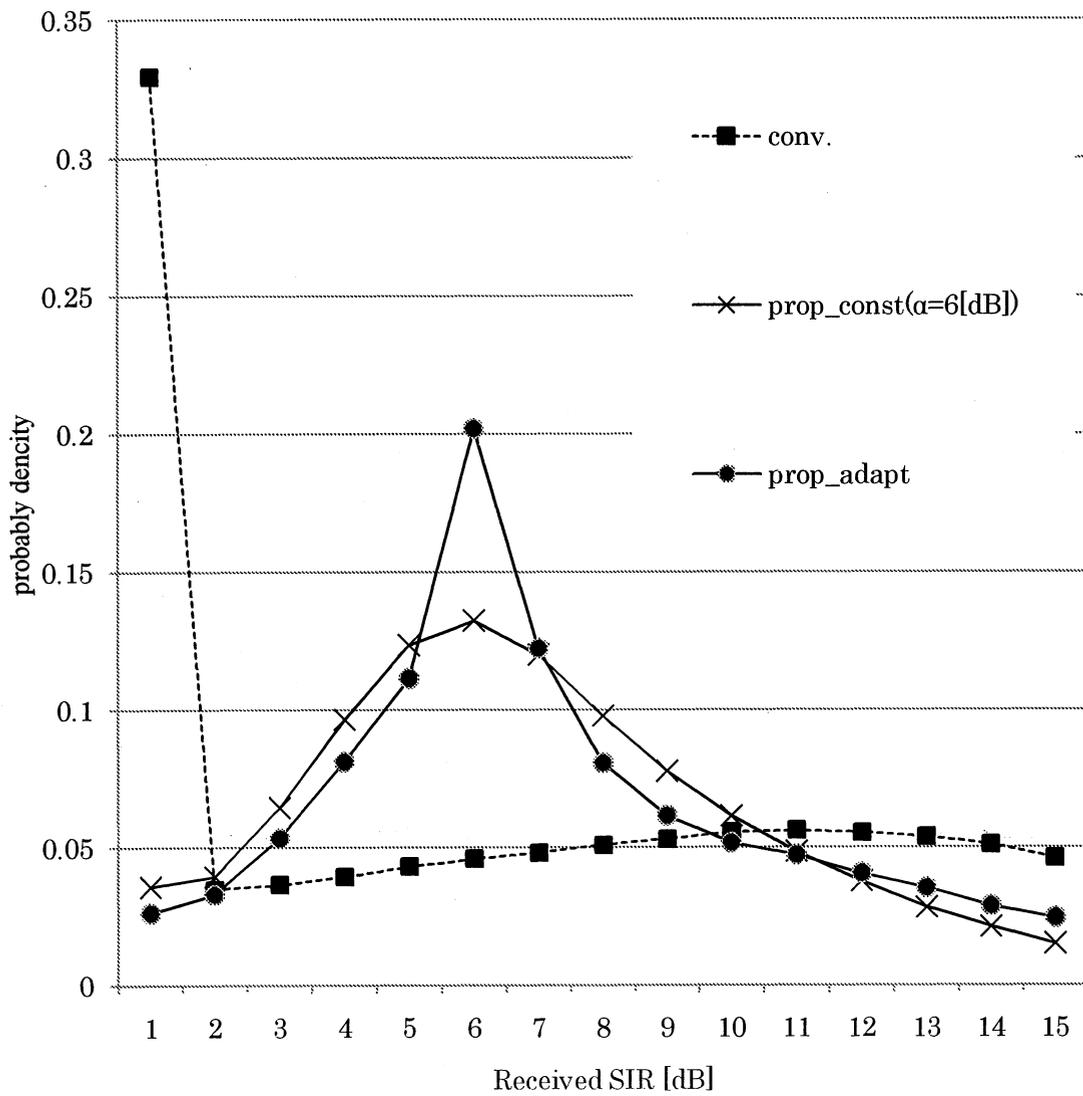


図 5.3 : 受信 SIR の確率分布(動的中継送信電力削減)

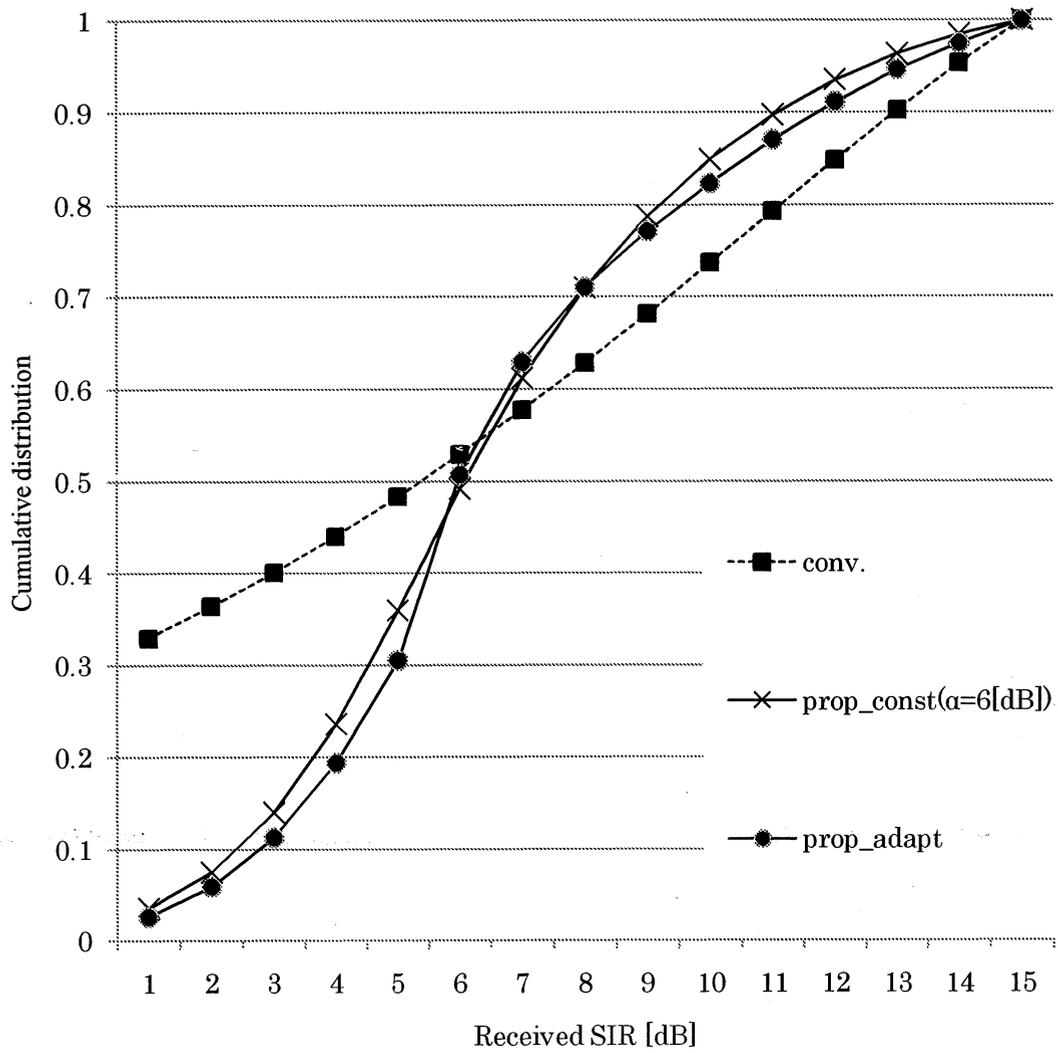


図 5.4 : 受信 SIR の累積分布 (動的中継送信電力削減)

5.3.3 下りマルチホップ伝送におけるパケット受信率

図 5.3 に宛先移動局における，下りマルチホップ伝送の中継局→宛先移動局間の伝送でのパケット受信率を示す．横軸は 5.1.3 節で述べた下り回線における各セル辺りの平均トラヒック発生量 G_{dn} ，縦軸は宛先移動局におけるパケット受信率を表わす．

まず，従来法に協調通信を適用し，中継送信電力削減を行わない提案法 (prop_const $\alpha=0$ [dB]) と，従来法の特性を比較する．従来法に協調通信を導入すると，宛先移動局におけるパケット受信率が大きく向上する．5.3.1 節で，協調通信によって宛先移動局における受信 SIR が大きく改善され，所望 SIR を大きく上回ることが示されている．これによって受信成功するパケット数が増大したためと考えられる．

ここで固定量中継送信電力削減を行う提案法も比較対象に加える．固定量中継送信電力削減を適用し，目標 SIR 削減量 α を大きくしていくと，宛先移動局におけるパケット受信率は低下する．これは，中継送信電力を削減したことにより宛先移動局における受信 SIR が低下したことによって受信失敗するパケットが増大したためである． $\alpha=6$ [dB] とした場合では，提案法は従来法に比べ，低負荷域で品質の劣化が見られる．しかし，高負荷域で従来法に比べパケット受信率は依然大きく改善されている．しかし $\alpha=9$ [dB] とした場合では従来法のパケット受信率を大きく下回る領域が多くなり， $\alpha=12$ [dB] とした場合は更に大きくパケット受信率は減少する．したがって，パケット受信率の観点から見て，固定量中継送信電力削減を適用した場合は $\alpha=6$ [dB] を超える中継送信電力の削減の削減は，従来法の下り回線の受信品質改善が得られなくなるため，不適であると言える．

動的中継送信電力削減を適用した場合においても固定量中継送信電力削減を適用した提案法と同様に従来法と比べ，宛先移動局におけるパケット受信率に大きな改善がみられる．また，動的中継送信電力削減を適用した提案法は，固定量中継送信電力削減において $\alpha=3$ [dB] とした場合と同等の特性を示している．これは，図 5.1 において，所望 SIR の 5 [dB] を下回るパケットの比率がほぼ等しいためであると言える．

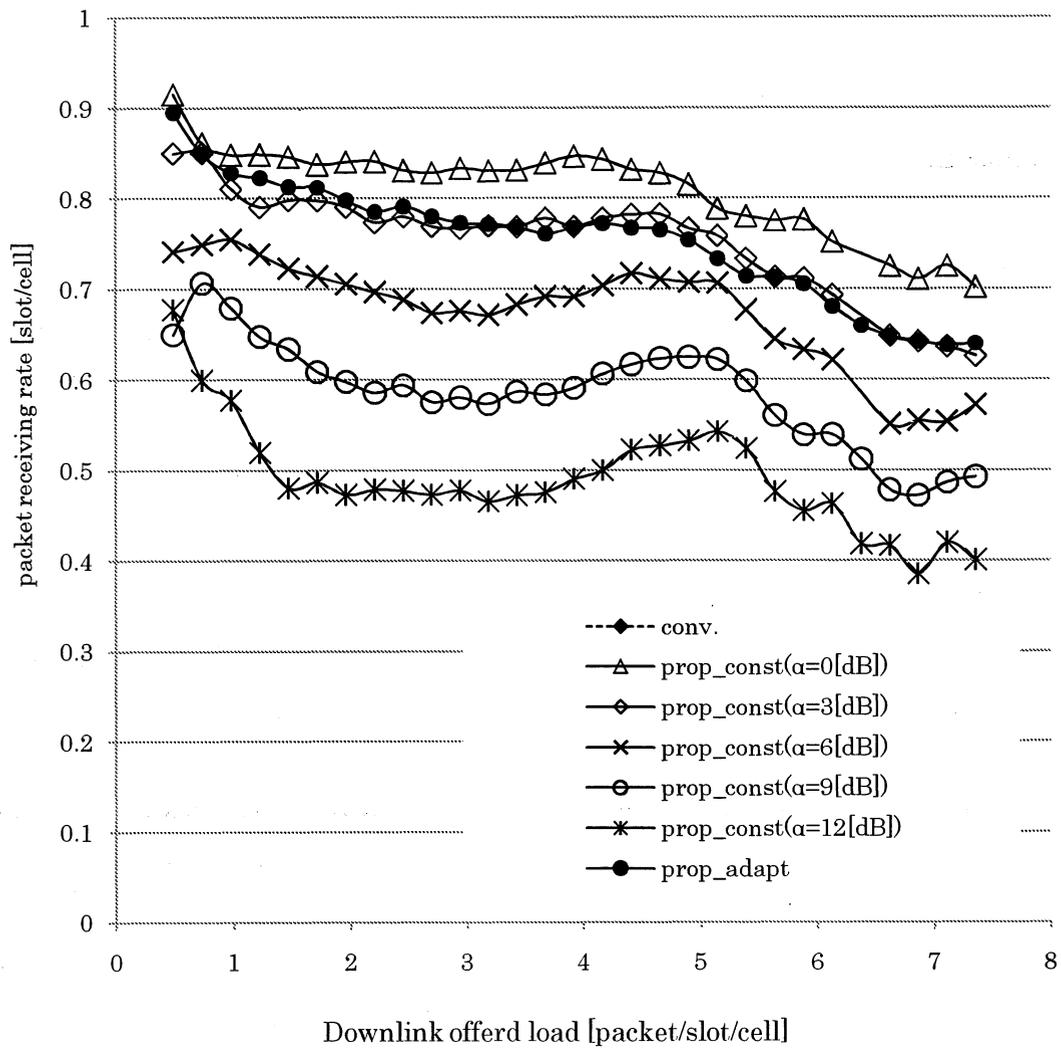


図 5.5 : 下りマルチホップ伝送のパケット受信率

5.3.4 下り回線のスループット特性（固定量中継送信電力削減）

図 5.4 に、下り回線のスループット特性を示す。図中の 'single' はシングルホップ伝送時の特性を示す。

まず、従来法に協調通信を適用し、中継送信電力削減を行わない提案法 $\text{prop_const}(\alpha = 0 \text{ [dB]})$ と、従来法、シングルホップ伝送時の特性を比較する。従来法に協調通信方式を導入した提案法は、シングルホップ伝送時、従来法と比べ、スループット特性に改善がみられる。これは協調通信によって下り回線のパケット受信率が向上したためである。

ここで固定量中継送信電力削減を行う提案法も比較対象に加える。固定量中継送信電力削減を適用し、目標 SIR 削減量 α を大きくするとスループット特性は劣化していく。これは、中継伝送における目標受信 SIR を削減すると下り回線におけるパケット受信率が低下するためである。そして $\alpha = 9 \text{ [dB]}$ とした場合ではシングルホップ伝送及び、従来法よりスループット特性が劣化してしまう。また、 $\alpha = 12 \text{ [dB]}$ とした場合では更に大きい劣化がみられる。これは、 $\alpha = 9 \text{ [dB]}$ 以降では、中継送信電力が過剰に削減され、従来法よりも下りマルチホップ伝送のパケット受信率が低下しているためである。

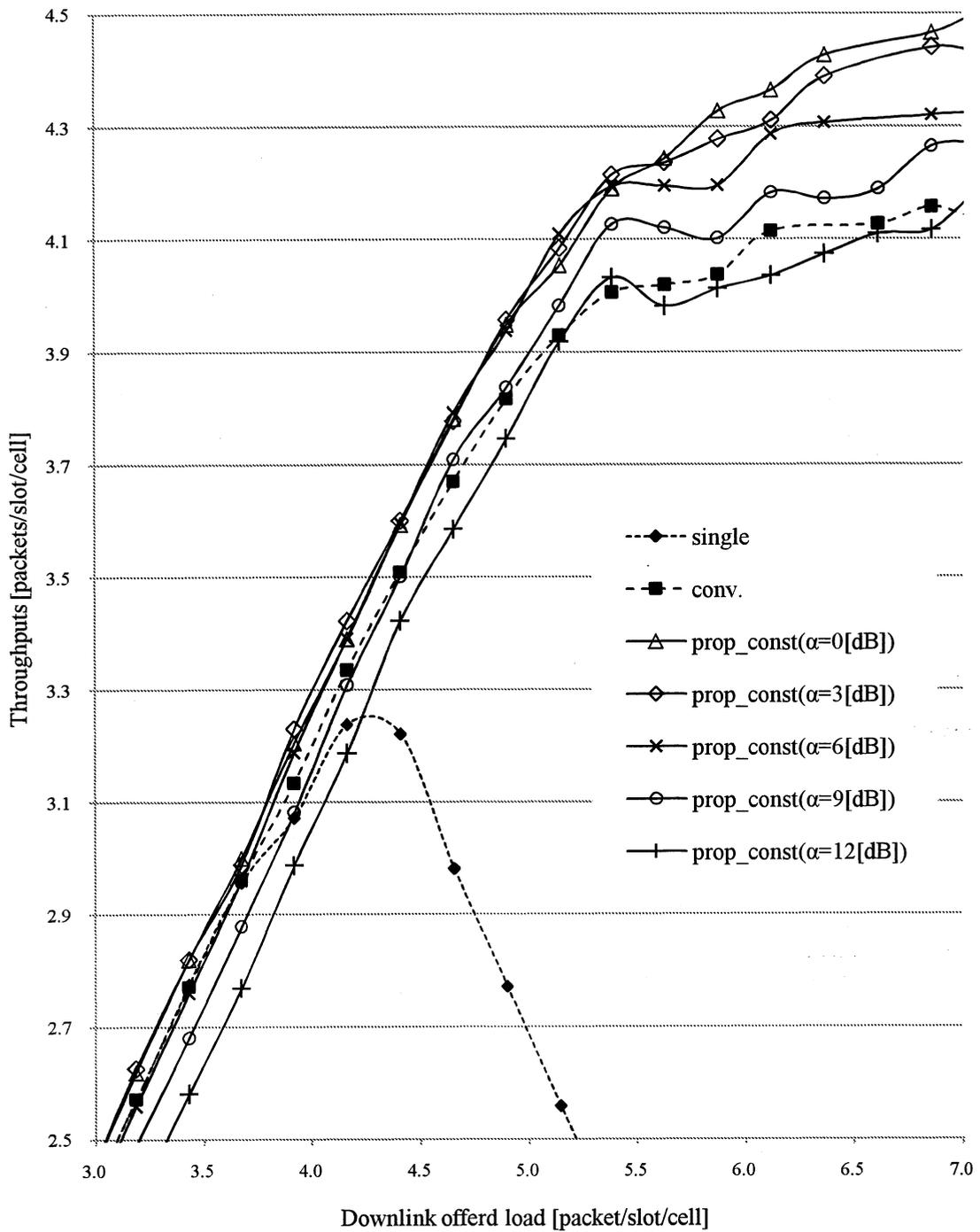


図 5.6: 下り回線のスループット特性 (固定量中継送信電力削減)

5.3.5 上り回線のスループット特性（固定量中継送信電力削減）

図 5.4 に、上り回線のスループット特性を示す。横軸は 5.1.3 節で述べた上り回線における各セル辺りの平均トラフィック発生量 G_{up} である。まず中継送信電力削減を行わない提案法 $prop_const(\alpha=0$ [dB]) と、シングルホップ伝送及び従来法の特性を比較する。シングルホップ伝送時に比べ、従来法、提案法はスループット特性が劣化している。これは上り回線帯域を下りマルチホップ伝送に使用しているため、その信号が上り回線伝送における干渉となり、上り伝送における SIR が低下してしまうためである。

ここで固定量中継送信電力削減を行う提案法も比較対象に加える。固定量中継送信電力削減を適用し、目標受信 SIR 削減量 α を大きくしていくとスループット特性の劣化が緩和されるのが分かる。これは、下りマルチホップ伝送における中継送信電力が小さくなったことで、上り回線における干渉電力が削減され、上り回線の SIR が改善されるためである。

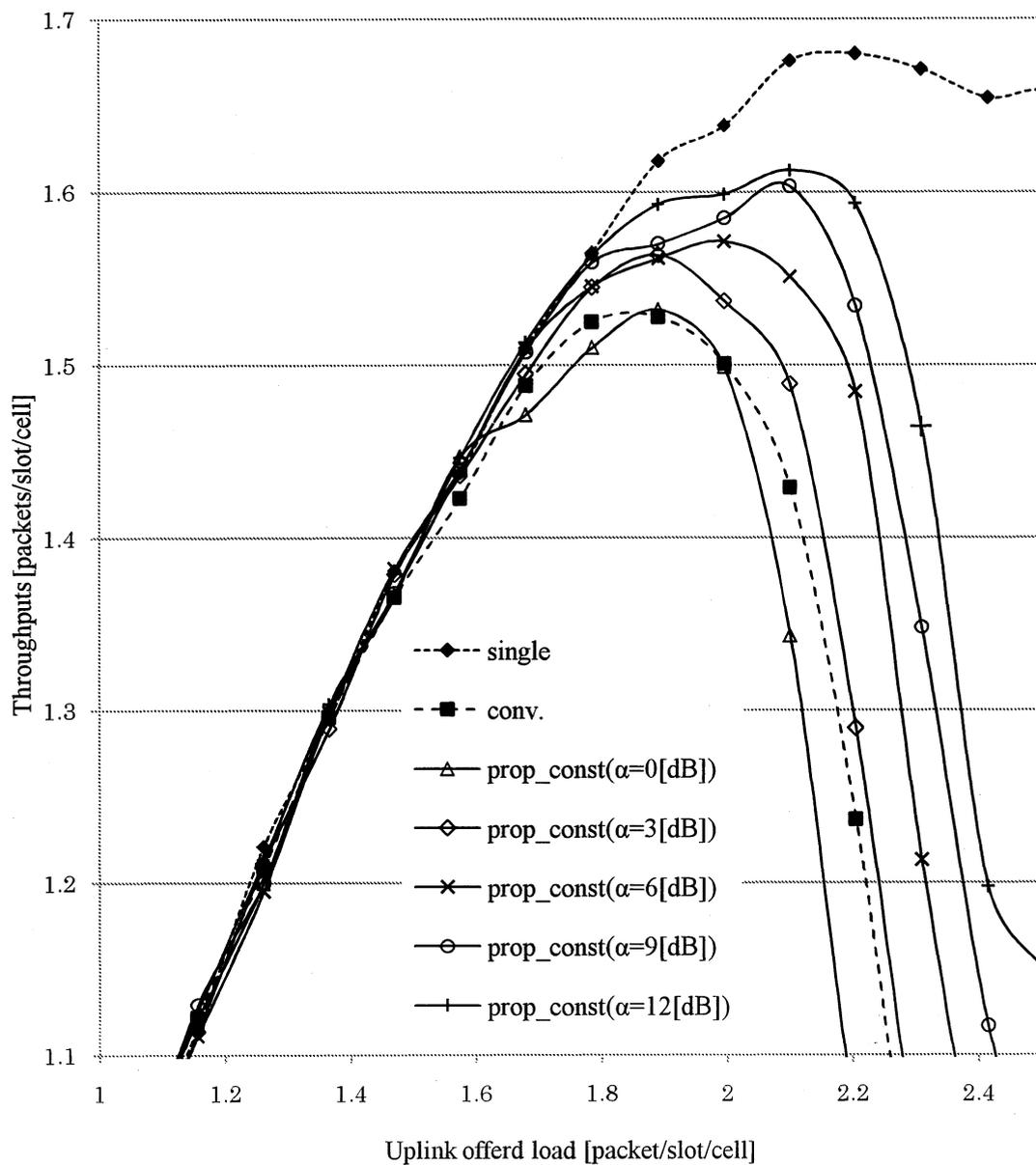


図 5.7 : 上り回線のスループット特性

5.3.6 総合スループット特性（固定量中継送信電力削減）

図 5.6 に、総合スループット特性を示す。まず、 $\text{prop_const}(\alpha=0 \text{ [dB]})$ と、シングルホップ伝送及び従来法の特性を比較する。協調通信を行い、中継送信電力を削減しない提案方式 $\alpha=0\text{[dB]}$ は、シングルホップ及び従来法に比べ特性が向上している。これは、協調通信の導入によって、下り回線の受信品質が改善されたためである。

ここで固定量中継送信電力削減を導入した提案法も評価に加える。固定量中継送信電力削減を適用し、目標受信 SIR 削減量 α を 3[dB] 、 6[dB] と大きくすると特性に更なる向上がみられる。これは中継送信電力を引き下げることで上り回線の干渉電力が削減され、上り回線の受信品質が向上したためである。更に、下り回線では過剰な中継送信電力削減が削減されたが、所望の受信 SIR を確保できているため下り回線のスループット特性はあまり劣化していないため総合特性は向上する。しかし $\alpha=9\text{[dB]}$ とした場合から徐々にスループット特性は劣化する。中継送信電力を削減したことにより、上り回線のスループットは向上しているが、中継送信電力を過剰に削減してしまったことにより下り回線のスループットが劣化していくためである。この結果から、固定量中継送信電力削減における目標受信 SIR 削減量 α の最適値は 6[dB] 前後が適切といえる。

これらの特性評価から、固定量中継送信電力削減を適用した提案法は、従来法の欠点である上り回線品質の劣化を軽減し、更に下り回線の受信品質を改善することによってチャンネル容量を増大することが可能であると言える。

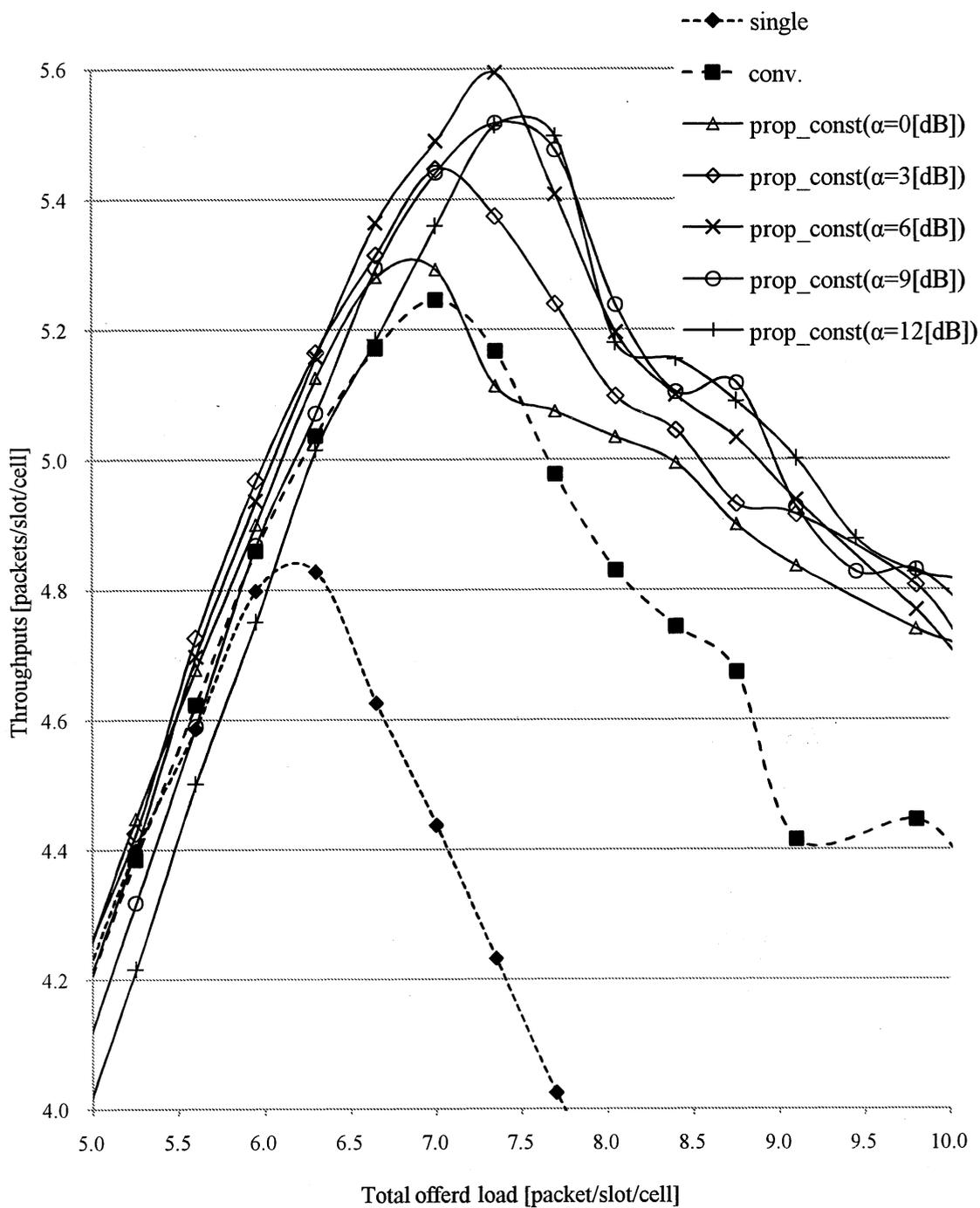


図 5.8 : 総合スループット特性(固定量中継送信電力削減)

5.3.7 下り回線のスループット特性 (動的中継送信電力削減)

図 5.7 に、動的中継送信電力削減を導入した場合の下り回線におけるスループット特性を示す。比較対象として、従来法と固定量中継送信電力削減を適用した場合の最適値 $\text{prop_const.}(\alpha=6 \text{ [dB]})$ を加える。提案法は従来法、シングルホップ伝送に比べ、スループットが向上している。これは、協調通信の導入によって下り回線のパケット受信率が增大したためである。また、固定量中継送信電力削減における最適値の特性と比較しても動的中継送信電力削減は良好な特性を示している。これは、固定量中継送信電力削減においては下りマルチホップ伝送の通信品質が劣悪な場合にも中継送信電力を固定的に削減してしまうのに対し、動的中継送信電力削減は、通信品質に余剰がある場合のみ中継送信電力を削減するため、中継送信電力を削減した際に下り伝送パケットが所望受信信号品質を下回ることが少なくなるためだと考えられる。そのため、下り回線の受信品質が劣悪になる過負荷領域で動的中継送信電力削減は固定量中継送信電力削減の特性を上回るが、低負荷領域では特性にほとんど変化が無い。

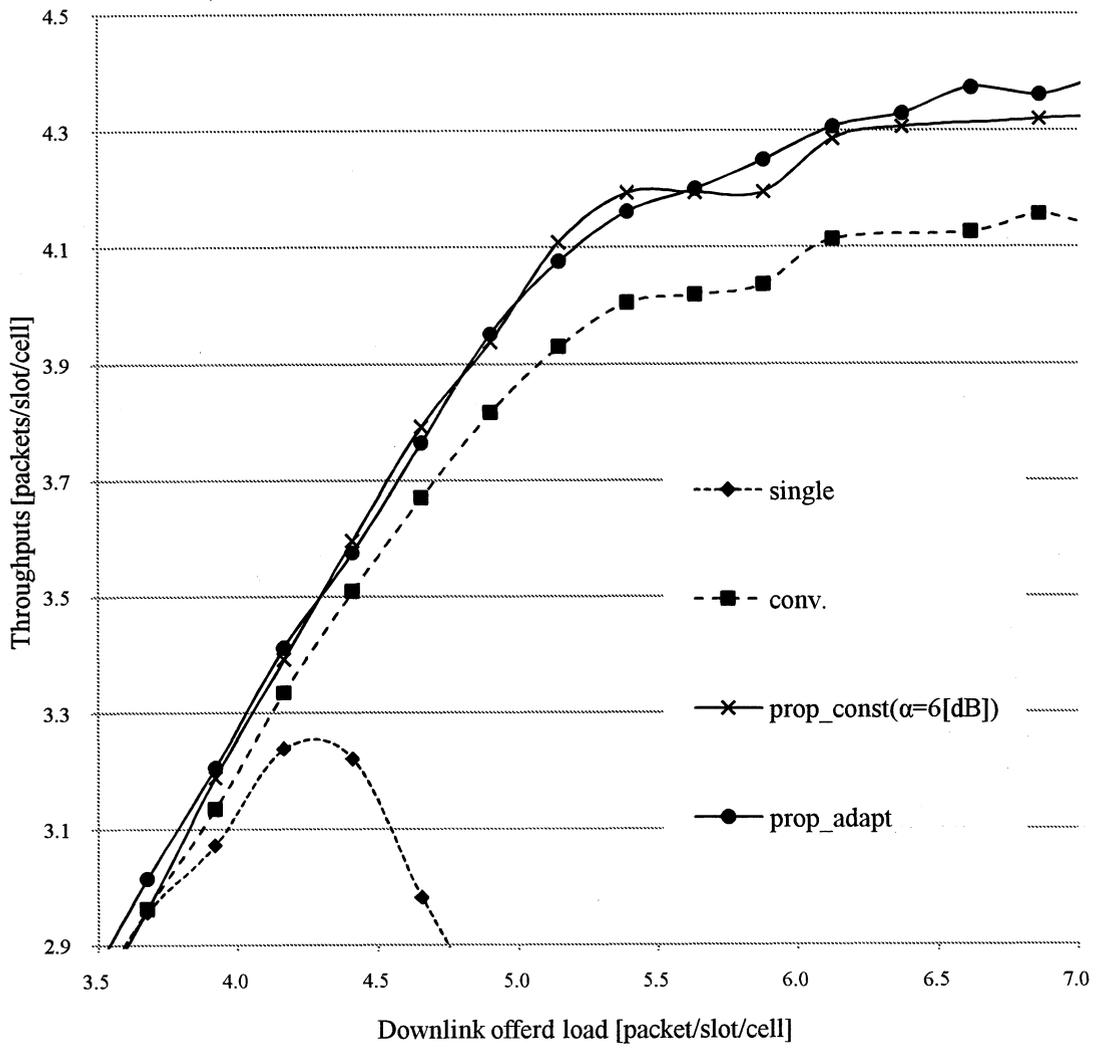


図 5.9 : 下り回線のスループット特性 (動的中継送信電力削減)

5.3.8 上り回線の総合スループット特性（動的中継送信電力削減）

図 5.8 に、動的中継送信電力削減を導入した場合の下り回線におけるスループット特性を示す。提案法及び従来法は、シングルホップ伝送に比べ、スループット特性が劣化している。これは、下りマルチホップ伝送に上り回線帯域を利用していることによって、上り回線伝送において干渉が発生し、上り回線のパケット受信率が低下してしまうためである。しかし、提案法は、従来法に比べ、上り回線のスループット特性の劣化が軽減されていることが分かる。これは、動的中継送信電力削減によって、協調通信による下りマルチホップ伝送での受信 SIR 改善に応じた中継送信電力削減がなされ、上り回線に及ぼす干渉が減少し、上り回線のパケット受信率の低下が軽減されるためである。また、固定量中継送信電力削減を適用した特性と比較した場合、最大値では殆ど変化が無く、その後はスループット特性が低下する。これは、動的中継送信電力削減は、下りマルチホップ伝送の品質を確保した上で中継送信電力を削減するため、下り回線も劣悪な環境となる過負荷領域では中継送信電力が殆ど削減されなくなるためであると考えられる。固定量中継送信電力削減では、過負荷領域においても一律に中継送信電力を削減するため、上り回線のスループットは動的中継送信電力削減よりも向上する。しかしその結果として、5.3.3 節の下り回線のスループット特性では固定量中継送信電力削減の方が動的中継送信電力削減の特性を下回る結果となっている。

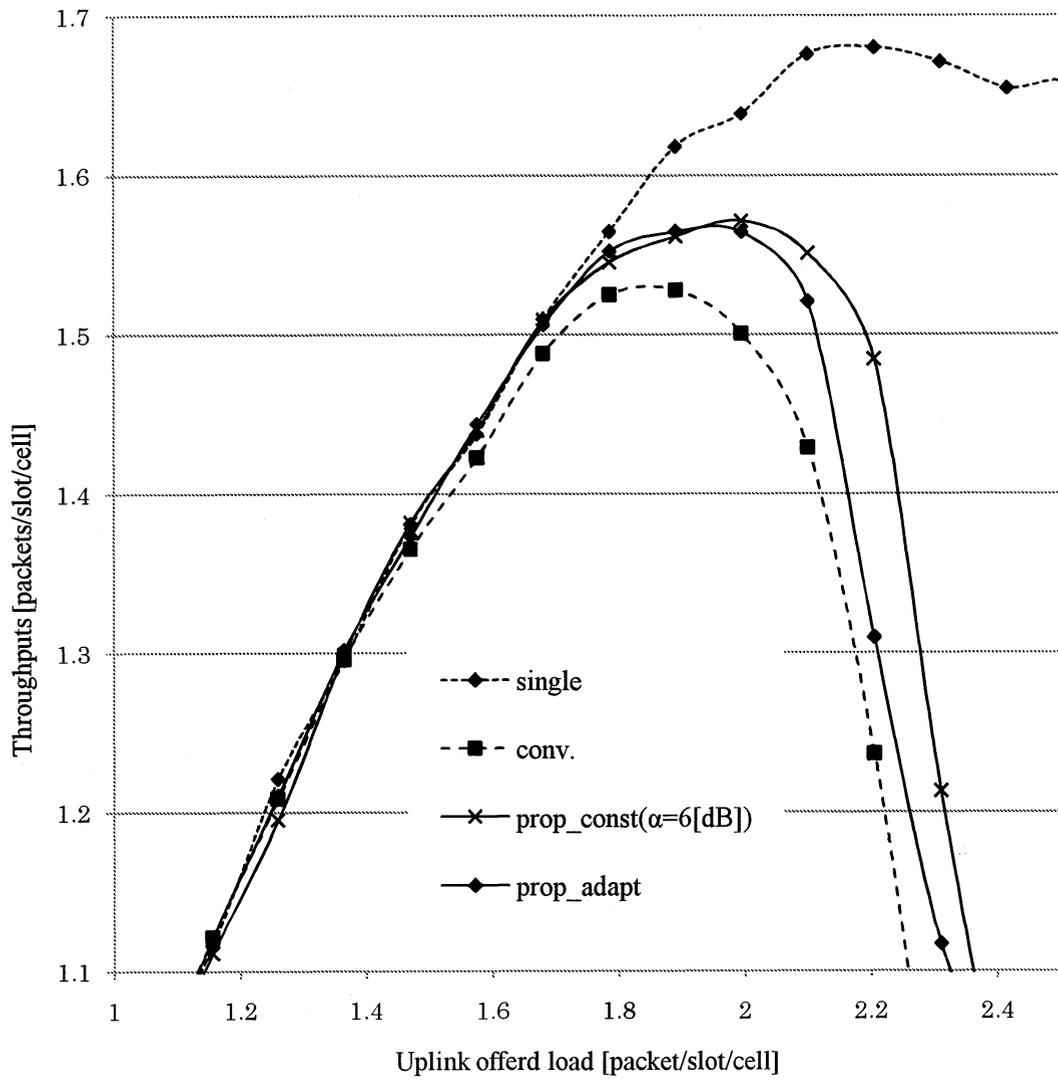


図 5.10 : 上り回線のスループット特性(動的中継送信電力削減)

5.3.9 総合スループット特性（動的中継送信電力削減）

図 5.9 に、動的中継送信電力削減を導入した場合の下り回線におけるスループット特性を示す。提案法は従来法に比べスループット特性に向上がみられる。これは、協調通信導入により下り回線のスループット特性が向上したことがあげられる。また動的中継送信電力削減を導入したことによって上り回線のスループット特性も従来法に比べ改善されたためである。固定量中継送信電力削減と比べた場合、スループットの最大値が下回る。これは、この区間において上り回線のスループットに大きな差があるためである。しかし、動的中継送信電力削減を用いた提案法も従来法の特徴から大きな改善がみられるため、協調通信及び動的中継送信電力削減を導入した提案法は、非対称トラフィック環境において従来法の欠点である上り回線品質の劣化を軽減し、更に下り回線の受信品質を改善することによるチャンネル容量の増大が可能であると言える。

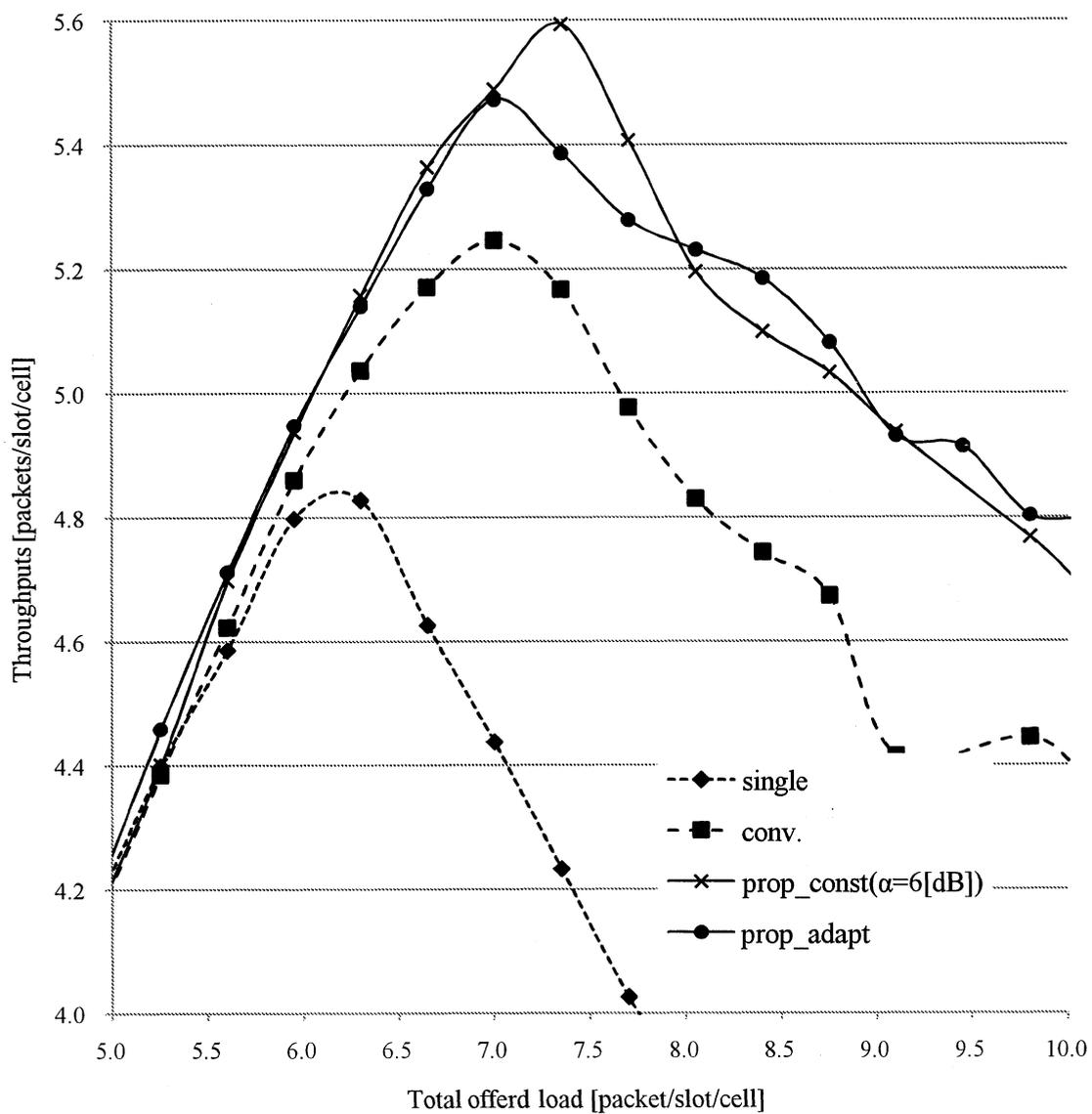


図 5.11 : 総合スループット特性 (動的中継送信電力削減)

第六章

総括

近年のセルラシステムにおけるマルチメディア通信サービスの進展に伴い、上下回線非対称トラヒックが顕著なものとなってきている。この非対称トラヒックにより、セルラシステムは周波数利用率の低下、通信サービスの不安定化等の問題を招くおそれがある。この問題に対し、これまでTDDシステムにおいては対策技術の研究が多くなされてきたが、FDDシステムにおける対策法の研究はほんの数例しか存在しないのが現状である。CDMA/FDDシステムにおける非対称トラヒック収容法の一つとして、マルチホップ伝送を利用した手法が提案されている。この手法は、下り回線伝送にマルチホップ伝送を適用することによって下り回線のチャンネル容量を増大させ、余剰となった上り回線帯域を下り伝送に使用することで、非対称トラヒックの効率的収容を可能にしている。しかしその反面、上り回線のチャンネル容量が減少してしまう欠点がある。そこで本論文では、従来法における上り回線のチャンネル容量の減少を軽減し、さらに高効率な非対称トラヒックの収容法を確立することを目的とし、マルチホップ協調通信を利用した非対称トラヒック収容方式を提案した。

提案方式は従来法の下り回線伝送におけるマルチホップ伝送に協調通信を導入し、下り回線の受信品質向上を図る。その受信品質向上に応じてマルチホップ伝送時の中継送信電力を削減することで、従来法の利点であった下り回線のチャンネル容量増大効果を維持しつつ、その欠点であった上り回線品質劣化を抑制することを可能とする。中継送信電力削減方式としては協調通信による受信品質向上を見込んで中継送信電力削減量を決定する固定量中継送信電力削減と、各パケットの調通信による受信品質改善に応じて中継送信電力を適応的に削減する動的な中継送信電力削減の2つの電力制御方式を提案した。計算機シミュレーションにより、提案方式の性能評価を行った。スループット特性による比較によって、提案方式のシステム容量を従来方式と比較した。シミュレーション結果より、提案方式を適用したことによって、従来方式の下り回線のチャンネル容量増大を確保しつつ、上り回線の品質劣化を緩和でき、提案方式が非対称トラヒックの収容に効果的であることを明らかにした。

本論文の提案方式は、現在商用化されている主要なセルラシステムとして採用しているFDD方式を対象としている。そのため、提案方式を現行システムに適用する場合大幅なシステム構成の変更を必要としない。したがって、提案方式は、今後さらに顕著となり益々問題視されると予想される非対称トラヒックに対し、低コストで高効率な対策が実現可能である。ゆえに、本論文は今後のマルチメディア通信サービスの更なる進展を促進するための可能性を示したと言える。

謝辞

本研究を遂行するに当たり，多大なご指導並びに御助言を下さいました三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻小林英雄教授，森香津夫准教授，内藤克浩助教に深く感謝いたします。また，研究室の設備等で支えて下さった山本好弘技術職員，並びに多忙な研究の合間を縫って御助言下さった通信工学研究室大学院生，学部生に深く感謝いたします。そして，貴重な時間を割いて御査読していただいた三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻の高瀬治彦准教授に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 社会実情データ図録より 図録▽携帯電話の普及率の推移
<http://www2.ttcn.ne.jp/honkawa/6350.html>
- [2] 中川正雄,大槻知明,モバイルコミュニケーション,コロナ社.March 2009.
- [3] H.Yomo and S.Hara,"An Up-link/Down-link Asymmetric Slot Allocation Algorithm in CDMA/TDD-Based Wireless Multimedia Communications Systems," Proc.of IEEE VTC2001-Fall, pp.797-801, Oct. 2001.
- [4] K.Mori and T.Kobayashi, "Downlink Transmission Power Control for CDMA/Shared-TDD Packet Communications in Cellular Environments ,"IEICE Trans. Commun, vol. E84-B, no. 6,pp. 1622-1630, June 2001.
- [5] T.Saeki, K.Yamamoto, H.Murata, and S.Yoshida, "Study of Optimal Relay Position of Bi-directional Cooperative Relaying under Asymmetric Conditions," IEICE Technical Report,USN, pp.33-37,Oct. 2009.
- [6] Yunjian Jia, Yoshitaka Hara and Shinsuke Hara, "Performance of TDD-SDMA/TDMA System with multi-slot Assignment in Asymmetric Traffic Wireless Network," Proc. of IEEE PIMRC 2002, Lisbon, Portugal, Sept. 2002
- [7] 石貴増,加藤修,上杉充,本間光一,"非対称トラフィックを考慮した無線リソース割り当て方法," 電子情報通信学会技術研究報告RCS, pp.37-42 June.1999.
- [8] 竹内良太, 森香津夫, 内藤克浩, 小林英雄, "適応セル制御を用いた非対称トラフィック収容法の移動局移動環境での評価",電子情報通信学会技術研究報告RCS,pp. 37-42, June 2008.
- [9] K. Mori, K. Naito and H. Kobayashi, "Downlink Multihop Transmission Technique for Asymmetric Traffic Accommodation in DS-CDMA/FDD Cellular Communications," IEICE Trans. Commun.,vol.E91-B,No 10, pp-3122-3131,Oct. 2008.
- [10] 大崎邦倫,南平大介,古川浩,"非対称トラフィックを考慮した FDD-TDD システム," 電子情報通信学会技術研究報告. CQ, pp.15-20 20020412
- [11] 山本高至,村田英一,吉田進,藤原淳,大津徹,山尾泰, "移動局間中継導入による DS-CDMAセルラシステムの容量および送信電力に関する検討," 電子情報通信学会技術研究報告A・P, pp.119-123, February.2005.
- [12] 工藤栄亮,安達文幸, "マルチホップバーチャルセルラネットワークのスループットとチャンネル容量に関する検討," 電子情報通信学会技術研究報告RCS, pp. 307-312, March,2009.
- [13] 藤原淳, 武田真二, 吉野仁, 大津徹, 山尾泰, "ブロードバンド CDMA セルラシステムにおけるマルチホップアクセス法のシステム容量増大効果," 電子情報通信学会論文誌, vol.J85-B No12 pp 2073-2079 Dec.2002.

- [14] 鈴木麻由美, 多久修, 野田洋太郎, “再生誤りに伴う中継中止による電力損失を考慮した協力無線通信の一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告 RCS, pp.55-60, June 2009.
- [15] 岩田綾子, 三好憲一, 森野博章, “回線品質に応じて中継局を選択するマルチホップシステム”, 電子情報通信学会技術研究報告 RCS, pp.121-126, Oct. 2005.
- [16] 宮野剛, 村田英一, 荒木純道, “時空符号化協力マルチホップ通信における再送同期制御方式” 電子情報通信学会論文誌. B, 通信 J89-B(6) pp.920-925, June 2006.
- [17] H.Murata, Y.Oishi, K.Yamamoto, and S.Yoshida, 多久修, 野田洋太郎, “再生誤りに伴う中継中止による電力損失を考慮した協力無線通信の一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS, pp.55-60, June 2009.
- [18] T.Miyano, H.Murata, and K. Araki, “Cooperative relaying scheme with space-time code for multihop communications among single antenna terminals,” Proc. of IEEE Globecom, Dallas, Texas USA, Vol.6 pp.3763-3767, Oct. 2004.
- [19] E.Kudoh and F.Adachi, “Transmit Power Efficiency of Multi-Hop MRC diversity for a Virtual Cellular Network” IEICE Trans. Commun., vol. E88-B, no. 4, pp.3643-3648, Sep. 2005.
- [20] 小西良弘, 横山光雄, 移動通信技術の基礎, コロナ社. December 1994.