

東海大学大学院平成 25 年度博士論文

モバイル通信におけるスループット向上に向けた
マルチポイント協調通信に関する研究

湯 田 泰 明

目次

1. 緒言	1
1.1. 研究の背景.....	1
1.1.1. 無線伝送方式の変遷.....	2
1.1.2. 周波数利用効率の変遷	3
1.1.3. 携帯電話システムにおける標準化動向.....	4
1.2. 研究の目的および内容	6
1.2.1. 研究の目的.....	6
1.2.2. 研究の内容.....	7
1.3. 本論文の構成	9
2. MIMO 通信システムにおける協調通信に関する研究.....	12
2.1. はじめに	12
2.2. MIMO 通信システム.....	13
2.2.1. MIMO 通信システムにおける適応制御方法.....	13
2.2.2. ストリーム間干渉抑圧技術	15
2.3. MCW と SCW の性能評価	17
2.3.1. シミュレーション方法	21
2.3.2. シミュレーション条件	22
2.3.3. シミュレーション評価結果	24
2.4. CW あたり 2 ストリームを割り当てる MCW の提案	28
2.4.1. シミュレーション評価結果	30
2.5. まとめ.....	33
参考文献.....	34
3. 無線中継通信システムにおける協調通信に関する研究	35
3.1. はじめに	35
3.2. 無線中継通信システム	37
3.2.1. 無線中継通信システムの構成.....	37
3.2.2. バックホール回線の送信方法.....	38
3.3. 無線伝送中継システムにおけるセル間干渉およびその抑圧方法	40
3.3.1. 無線中継通信システムにおけるセル間干渉.....	40
3.3.2. セル間干渉抑圧方法の提案	41
3.4. シミュレーション評価	47
3.4.1. シミュレーション方法	47
3.4.2. シミュレーション条件	49

3.4.3.	シミュレーション結果	51
3.5.	まとめ	57
	参考文献	58
4.	基地局間協調通信システムに関する研究	59
4.1.	はじめに	59
4.2.	基地局間協調通信システム	60
4.2.1.	基地局間協調通信方式	60
4.2.2.	基地局間協調通信システムの構成	61
4.2.3.	チャネル状態の報告方法	63
4.2.4.	チャネル状態の報告情報	64
4.2.5.	複数 CSI 報告に関する課題	65
4.3.	スケジューリングアルゴリズム	67
4.3.1.	従来方式	67
4.3.2.	提案方式	67
4.4.	シミュレーション評価	69
4.4.1.	シミュレーション方法および条件	69
4.4.2.	シミュレーション評価結果	72
4.5.	まとめ	78
	参考文献	79
5.	結言	81
	謝辞	85

1. 緒言

1.1. 研究の背景

現在，スマートフォンに代表される高機能携帯端末が急速に普及しつつある．このような携帯端末に対して，インターネットサービス，高品質な動画や音楽のコンテンツ配信サービス，同時双方向性を活かしたゲームサービスなど，さまざまなサービスが提供されている．しかも，このような携帯端末が普及期に入ったいまでは，これらのサービスは『何時でも，何処でも，誰とでも』に提供できることが要請されている．このようなサービスを安定的に提供するためには，高速伝送を実現する通信インフラが必要不可欠である．

高速伝送の要請に対して，これまでにモバイル通信システムでは技術を向上させることで伝送速度の高速化を図ってきた．2001年には，第3世代の携帯電話システムとして，符号分割多重方式 (CDMA : Code Division Multiple Access) を基盤とした Wideband-CDMA 方式が運用開始され，最高 2Mbps の伝送速度を実現した．2006年には，第3.5世代の携帯電話システムとして，W-CDMA にパケット通信を導入した HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) 方式が運用開始され，最高 14.4Mbps の高速伝送を実現した．そして，2010年には，第3.9世代の携帯電話システムとして，直交周波数分割多重方式 (OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を基盤とした LTE (Long Term Evolution) が商用運用され，最高 100Mbps 伝送が現実的なものになってきた．さらに，次世代である第4世代の携帯電話システムとして，LTE を踏襲しつつ性能を向上した LTE-Advanced が開発され，最高 1Gbps 伝送を目標に技術革新がなされてきた．この LTE-Advanced は，2015年ごろの運用開始が予定されている．

前述したスマートフォンの急速な普及により，モバイル通信システムにおいて通信されるトラフィック量が急激に増大している．このトラフィック量の増大に対して，携帯電話システムには，システム全体の伝送速度である平均スループットの向上が強く求められている．第4世代の携帯電話システムでは，周波数あたりの平均スループットに相当する周波数利用効率を第3世代携帯電話システムより改善することがその要求条件の1つとして挙げられており，その要求条件を達成するべく開発が進められてきた．

1.1.1. 無線伝送方式の変遷

モバイル通信システムでは、その通信技術を向上させることで伝送速度の高速化を図ってきた。図 1-1 に移動度に対する伝送速度の関係を表した携帯電話システムの変遷を示す。

第 1 世代の携帯電話システムは、1980 年代にアナログ FM 伝送方式を用いて音声通話のサービスを提供するシステムとして導入された。この第 1 世代では、周波数帯域を細かく区切り、その 1 つの帯域に 1 つの通話を割り当てる周波数分割多重方式(FDMA: Frequency Division Multiple Access) 方式が採用された。次に 1990 年代に、デジタル伝送方式を用いた第 2 世代の携帯電話システムが導入され、音声通話に加えて数十 kbps のデータ通信サービスが提供された。この第 2 世代携帯電話システムでは、同一周波数の電波を複数の時間スロットに分割し、その時間スロットに端末を割り当てる時間分割多重方式 (TDMA : Time Division Multiple Access) 方式が採用されている。この世代では世界の地域により伝送方式が異なり、日本では PDC(Personal Digital Cellular) 方式が、欧州では GSM(Global System for Mobile cellular) 方式が標準方式として用いられている。

そして、2000 年代になると、第 3 世代の携帯電話システムとして世界で統一された標準方式である IMT-2000 が導入され、数百～数 Mbps 伝送のデータ通信を実現することで高速化が図られてきた。この IMT-2000 のうちの代表的な方式の 1 つが符号分割多重方式 (CDMA : Code Division Multiple Access) を基盤とした Wideband-CDMA (W-CDMA) 方式である。この W-CDMA では、端末数の増大やデータ通信の高速化に対応するために、同一の周波数および時間スロットにおいて端末毎に異なる拡散符号を使って多重する CDMA 方式が採用されている。

さらに、2000 年代半ばには、IMT-2000 を改良した方式として第 3.5 世代携帯電話システムが導入され、十数 Mbps 伝送となるデータ通信サービスの高速化が図られた。この第 3.5 世代携帯電話システムの 1 つが W-CDMA を改良した HSPA(High Speed Packet Access) 方式であり、最高 14.4Mbps の高速データ通信が実現できる。この HSPA では、W-CDMA を基盤技術としてパケット通信の概念を導入し、誤り訂正符号化と再送技術を組み合わせた誤り制御技術や、伝送品質の高速フィードバックに基づく適応変調および無線リソース割当制御技術 (スケジューリング) などにより高速伝送を実現している。

そして、2010 年代初頭に、第 3 世代携帯電話システムを更に進化させた LTE(Long Term Evolution) が導入され、さらなる高速伝送が図られてきた。この LTE は、第 4 世代携帯電話システムへのスムーズな移行を目的に新たに開発された方式であり、第 3.9 世代の携帯電話システムと呼ばれている。この LTE では、CDMA 方式より効率的な伝送が可能な直交周波数分割多重方式(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が採用され、HSPA 同様パケット通信技術などを用いることにより、最高 100Mbps 伝送が現実的なものとなってきた。さらに、第 4 世代携帯電話システムでは、この LTE を踏襲しつつ更に性能向上した LTE-Advanced が開発され、最高 1Gbps 伝送を目標に技術開発がなされてきた。この LTE-Advanced は 2015 年ごろの運用開始が予定されている。

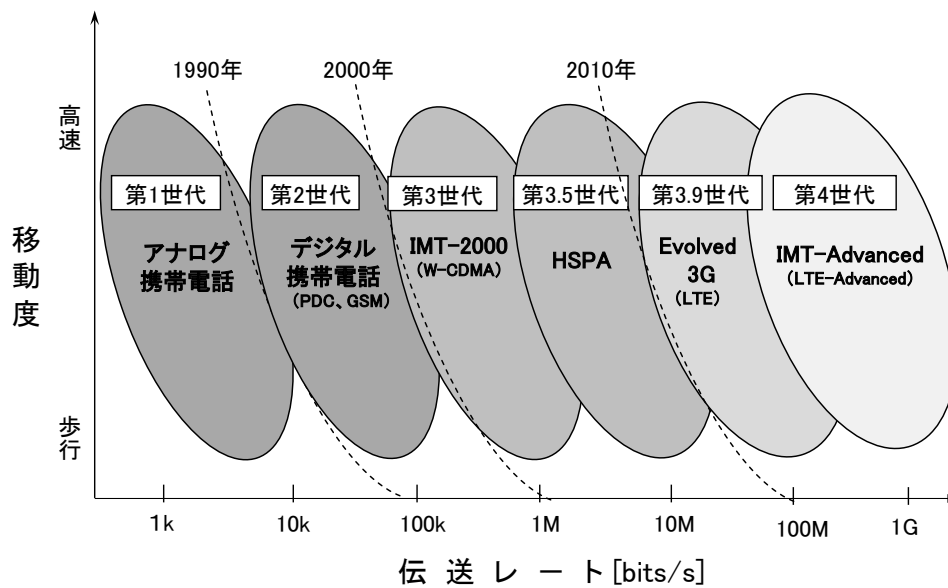


図 1-1 携帯電話システムの変遷

1.1.2. 周波数利用効率の変遷

携帯電話システムでは、その伝送方式を進化させることで伝送速度の高速化を実現してきた。さらに現在、スマートフォンなどの高機能端末の急速な普及に伴い、モバイル通信全体におけるトラフィック量（通信されるデータ量）が急激に増大している。このようなトラフィック量の急激な増大に対して通信システム全体の伝送速度である平均スループットの向上が必要となる。また、周波数は有限な資源であるため効率的に利用することが要求されている。つまり、平均スループットの向上には、周波数あたりの平均スループットである周波数利用効率の向上が強く要求されている。図 1-2 に各携帯電話システムの周波数利用効率（周波数あたりのスループット）の変遷を示す。この図 1-2 に示すように、第 4 世代携帯電話システムでは、第 3 世代携帯電話システムに対して周波数利用効率の 3 倍以上の性能向上を目指して開発が推進されている。

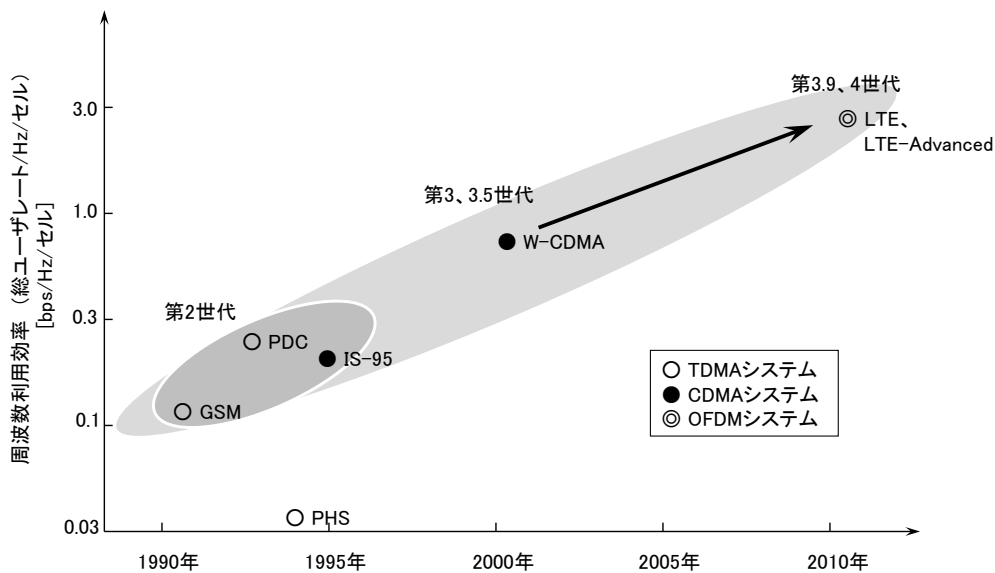


図 1-2 周波数利用効率の変遷

1.1.3. 携帯電話システムにおける標準化動向

第 3 世代以降の携帯電話システムは、世界で統一された規格標準化がなされている。携帯電話システムの国際的な標準化団体である 3GPP (3rd Generation Partnership Project) において、第 3 世代以降の携帯電話システムの標準化活動が行われている。この 3GPP では、第 3 世代の携帯電話システムとして W-CDMA を、第 3.5 世代として HSPA の規格標準化が行われてきた。この 3GPP において標準化された W-CDMA は、国際電気通信連合 無線通信部門 ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication sections) が定める第 3 世代携帯電話システムである IMT-2000 の 1 方式として採用されている。

そして 3GPP では、第 3 世代携帯電話システムから第 4 世代へのスムーズに移行を実現するために、第 3.9 世代携帯電話システムとして第 3 世代を進化させた LTE を 2005 年から開発し、規格標準化が行われてきた。

そして、2008 年に ITU-R から第 4 世代携帯電話システムの策定に向けた要求条件が提示され、この第 4 世代携帯電話システム策定に応じるために 3GPP では、LTE を拡張することで高速・大容量化を実現する LTE-Advanced の開発、標準化が進められてきた。3GPP では、2008 年から LTE-Advanced のシステム全体の検討が開始され、2009 年から本格的な技術開発がなされてきた。そして、この LTE-Advanced は ITU-R の定める第 4 世代携帯電話システムである IMT-Advanced の要求条件を満たしていることからその規格の 1 つとして採用が承認されている。

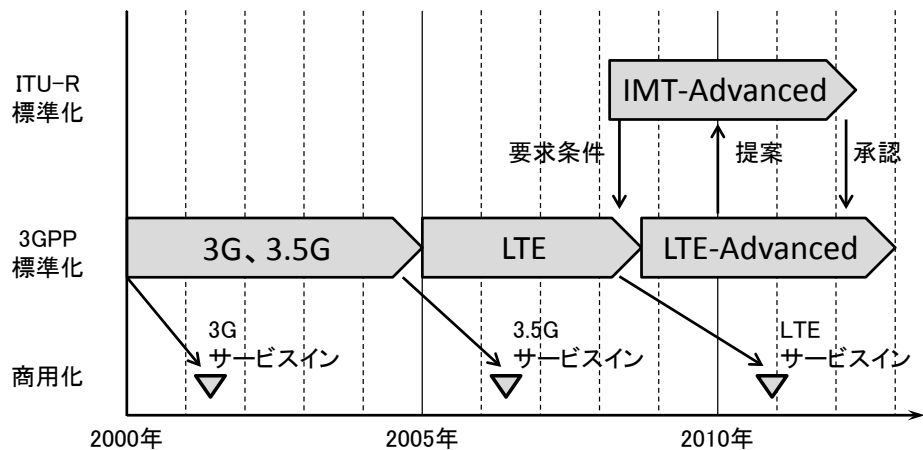


図 1-3 携帯電話システムの標準化動向

また、これらの標準化活動では、提案される技術に対して計算機シミュレーションによる数値解析により性能評価を行っている。携帯電話システムの開発では、システム全体を構築し実験することが困難であるため、このような計算機シミュレーションによる評価が一般的に用いられている。この計算機シミュレーション評価の妥当性を担保するために、ITU-R や 3GPP などの標準化団体では実験データに基づいて作成された評価モデルを定めている。例えば、無線伝搬モデルやシステム構成（セル配置構成）モデルなどが定められている。これらの評価モデルを用いることで複数の機関・企業から提案される異なる技術に対して公平かつ妥当性がある性能評価およびその比較評価が可能となる。本研究では、提案技術について計算機シミュレーションによる数値解析評価を行う。この計算機シミュレーションでは、ITU-R、3GPP が定める評価モデルを用いているため、その評価結果は十分に妥当性があるものである。なお計算機シミュレーションに関する詳細については、各章において説明する。

1.2. 研究の目的および内容

1.2.1. 研究の目的

LTE および LTE-Advanced システムでは、基地局から端末への基本伝送方式として第 3 世代携帯電話システムで用いられている W-CDMA 方式より周波数利用効率の高い OFDM 方式が用いられ、適応制御や無線リソース割当制御（スケジューリング）などの技術を付加することで平均スループットの向上を図っている。図 1-4 に基地局から端末への通信における基本伝送方式の構成を示す。図 1-4 において、送信側である基地局装置における処理としては、送信データをターボ符号による誤り訂正符号化、その符号化データを QPSK, 16QAM, 64QAM へのデータ変調処理、変調データを IFFT 処理し、Cyclic prefix を挿入することで OFDM 信号を生成し、アンテナから送信する。受信側の処理としては、アンテナで受信した信号から Cyclic prefix を除去してから FFT 処理を行い、復調処理を行い、復号化処理を行い、受信データを得る。また、端末側において伝送品質の測定を行い、その情報を送信側である基地局に通知して、その伝送品質情報に基づいて誤り訂正符号化の符号化率と変調方式を制御することで適応変調を実現する。このようにこの基本伝送方式では、多重アクセス方式、適応変調制御、誤り制御、無線リソース割当制御（スケジューリング）などを適用することでスループットの向上を図れる。しかし、このような技術を用いても基本伝送方式の送受信が 1 対 1 の構成では、これ以上のスループットの大きな向上は望めない。

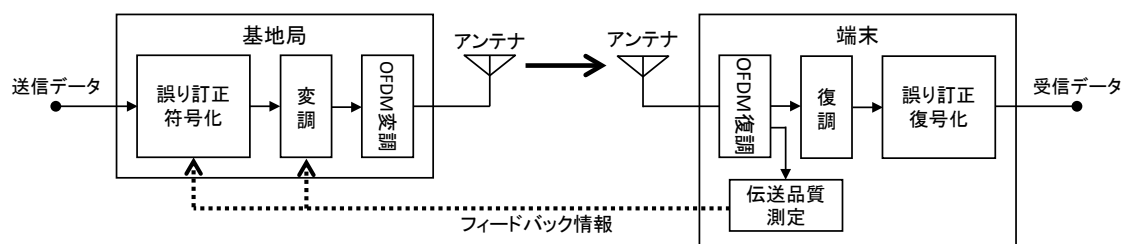


図 1-4 基本伝送方式 (OFDM の場合)

そこで本研究は、スループット向上に限界のあるこの基本伝送方式について、送信部と受信部を複数組み合わせ協調動作させることにより、更なる平均スループットの向上を図る「マルチポイント協調通信方式」を着想して検討する。このマルチポイント協調通信では端末側と基地局側の送受信部の設け方によりいくつかのバリエーションが考えられる。本研究では、基地局から端末へのマルチポイント協調通信における基本的な構成として、(1) 端末側と基地局側の送受信部をそれぞれ複数設ける、(2) 端末と基地局の送受信部の間に中継送受信機を複数配置する、(3) 端末は一つで基地局を複数設ける、の 3 つの構成について平均スループット性能の向上方法を研究する。

1.2.2. 研究の内容

本研究では、携帯電話システムにおける平均スループットの向上を目的として、マルチポイント協調通信における 3 つの構成について論じる。具体的には、第 1 の研究では送受信双方に複数アンテナを備える MIMO (Multiple Input Multiple Output) 通信、第 2 の研究では複数の無線中継局が配置された無線中継通信、第 3 の研究では一つの端末に対して複数の基地局を使って通信する基地局間協調通信について、新しい手法による平均スループットの向上方法を提案する。ここで図 1-5 に携帯電話システムにおけるこれら提案のマルチポイント協調通信の概念図を示す。図 1-5 では、BS は基地局 (Base Station)、MT は端末 (Mobile Terminal)、RS は中継局 (Relay Station) を示し、各基地局 BS は有線によりネットワーク側と通信し、端末 MT および中継局 RS は無線伝送により基地局 BS と通信し、また端末 MT と中継局 RS 間も無線伝送により通信する。次に、これら提案するマルチポイント協調通信である MIMO 通信、無線中継通信、基地局間協調通信について説明する。

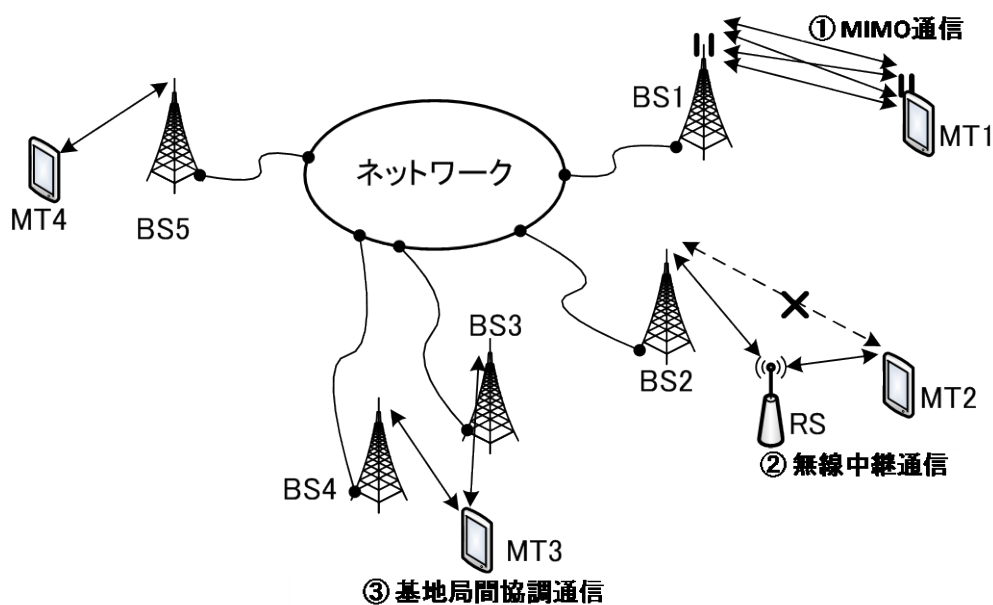


図 1-5 携帯電話システムにおけるマルチポイント協調通信

(1) MIMO 通信

MIMO 通信は、送受信双方に複数のアンテナを備えるマルチポイント通信である。モバイル通信では、マルチパス干渉により受信信号波形に歪が生じるためスループットが低下してしまう。MIMO 通信では、送受信双方に複数アンテナを用いることで空間ダイバーシティを利用でき、複数アンテナから異なるデータを送信することでスループットを向上することができる。携帯電話システムにおいて、この MIMO 通信を適用して伝搬路状況に応じた適応制御を導入することで更なるスループットの向上が図れる。しかしながら、その導入に伴う制御信号が必要となり伝送効率の低下を引き起こす。第 1 の研究では、適応制御を行う対象を複数まとめて処理することで効率の改善とスループット向上の両立を図る新しい方法を提案する。

(2) 無線中継通信

無線中継通信は、基地局から遠い場所や建物内など基地局からの電波状況が悪い端末に対して、基地局からの信号を中継通信することでスループットを向上することができる。端末では基地局からの経路と中継局からの経路といった複数の経路を利用できるため、無線中継通信はマルチポイント通信である。そして、中継局を複数設置することで多くの端末において恩恵が得られるため平均スループットの向上が図れる。しかしながら、中継局を複数設置することで中継局間が相互に干渉を与えてしまいスループットの低下を引き起こしてしまう。第 2 の研究では、中継局が基地局からの信号を受信しているタイミングではその送信を停止している点に着目して、基地局から中継局に信号送信するタイミングを制御する新しい構成により基地局間干渉を低減しスループットの向上を図る方法を提案する。

(3) 基地局間協調通信

基地局間協調通信は、MIMO 通信における送信点の概念を基地局に拡大したマルチポイント通信である。1つの端末に対して複数の基地局が協調して送信することでスループットを向上できる。特に、各基地局がカバーする領域（セル）の境界では、従来では干渉であった信号を所望信号として受けられるためスループットが向上する。このような協調送信を制御するために、複数の基地局に関するチャネル状態を端末側で測定し、基地局側に報告する必要がある。この時、複数のチャネル状態を報告する端末は、そうでない端末に比べて、基地局における送信割当処理で扱われる機会が増えるため、過剰に割り当てられてしまう可能性がある。第 3 の研究では、複数の基地局による協調通信において、チャネル状態を報告する数を考慮して、信号の送信割当を制御する新しい方法により効率を低下させずにセル境界のスループットの向上を図る方法を提案する。

1.3. 本論文の構成

本論文の構成を説明する。まず本章（第 1 章）において，研究の背景および目的を述べる。そして，第 2 章から第 4 章において本論文が提案するマルチポイントの協調通信に関してそれぞれ異なる手法によるスループットの向上法について述べる。そして，第 5 章において，それら各提案技術を総合的に評価し結論を述べる。図 1-6 に本論文の構成の概要を示す。本章の第 1.2 節で述べたように，本論文の目的は携帯電話システムにおける平均スループットの向上である。この目的に対してマルチポイント協調通信の 3 つの構成である MIMO 通信，無線中継通信，基地局間協調通信について第 2 章から第 4 章においてそれぞれ論じる。これらの各マルチポイント協調通信における課題とその解決方法によるスループット向上について述べる。以下では，第 2 章，第 3 章，第 4 章の構成を示す。

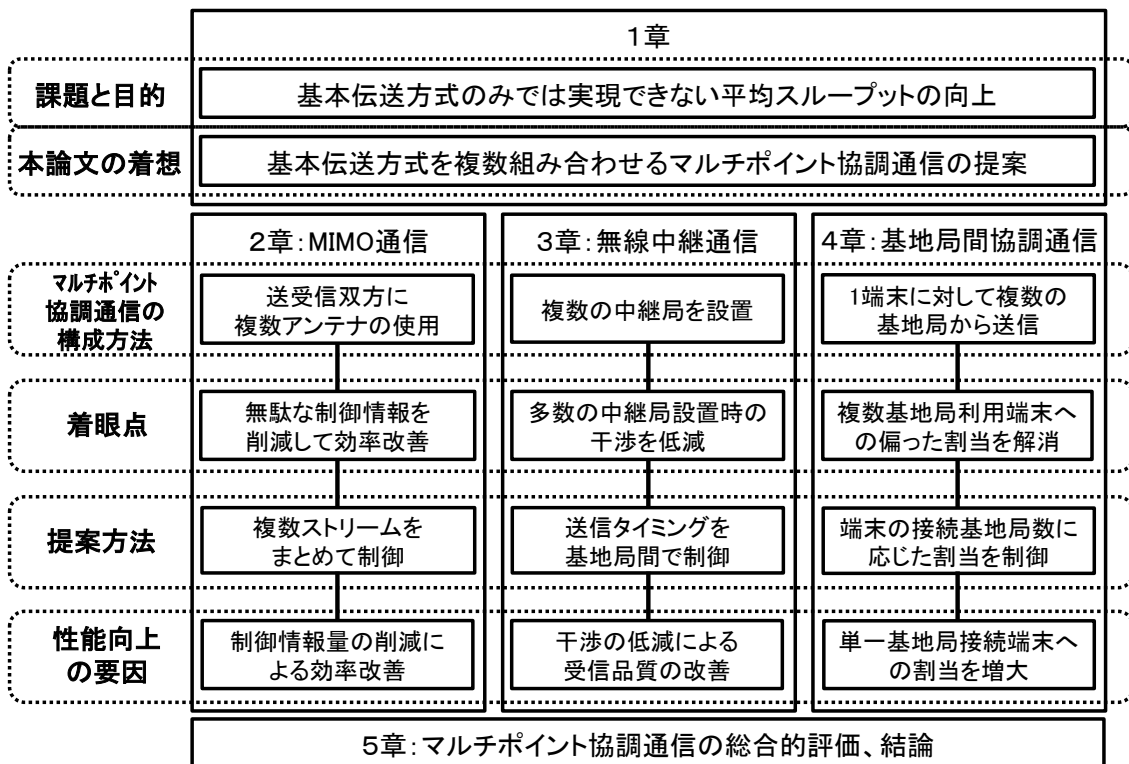


図 1-6 本論文の構成の概要

第 2 章では，協調制御を用いた MIMO 通信におけるスループット向上について述べる。MIMO 通信は，基地局と端末の双方に複数アンテナを備えることで送信点と受信点が複数存在するマルチポイント通信であり，受信側の信号処理によって分離できる複数の経路（ストリーム）を使って別々のデータを送信することでスループットの向上を実現する技術である。また，送信側と受信側を協調させることで更なる高速化が達成できる。MIMO 通信

におけるチャンネル状態に応じた適応制御方法には、ストリーム独立制御 (MCW : Multiple Code Word) とストリーム共通制御 (SCW : Single Code Word) がある。また、MIMO 通信ではストリーム間の干渉を抑圧する必要があり、送信側の技術にプリコーディング送信、受信側の技術に干渉キャンセラ受信 SIC (Successive Interference Canceller) がある。第 2 章では、この MIMO 通信の適応制御である MCW と SCW について、その性能を最大限に引き出すために MCW には SIC を組み合わせ、SCW にはプリコーディングを組み合わせ、さらに制御情報を含めたスループット性能の評価手法を提案して評価する。その結果、MCW では高 SINR 環境において MIMO チャンネルを最大限活用できるが、一方で低 SINR 環境における性能劣化と適応制御に要するオーバーヘッドの増加が課題である。そこで、4 アンテナ送信 4 アンテナ受信の MIMO 通信において、2 ストリームに 1 つの CW を割り当て、CW 数を減らした MCW を提案する。さらに、ストリーム間の品質差を考慮して 1CW を最適な 2 ストリームに割り当てることで、制御オーバーヘッドをほとんど上昇させずに性能を向上させる方法を提案する。この提案方式を、LTE の通信フォーマットを用いて定量的な評価を行い、その有効性を示す。

第 3 章では、協調制御を用いた無線中継通信システムにおけるスループットの向上について述べる。無線中継通信は、基地局と端末間の通信を、無線中継基地局 (以下中継局と省略) を介して無線中継する通信技術である。送受信間を複数の経路で接続されるマルチポイント通信であり、品質の良い経路を選択して通信することで、スループットの向上を図ることができる。また、ワイヤー敷設など設置費用が高い基地局に比べて、安価な中継局を複数設置することで、伝送性能を増大させることが検討されている。しかし、中継局を複数設置することで中継局間が相互に干渉を与えスループット低下を引き起こす問題が発生する。本章ではこの問題を解決するために、基地局から中継局にデータ送信するタイミングを中継局間で制御する 2 つの方式を提案し、中継局間の干渉を抑えてスループットの向上を図る。これは、中継局が基地局からのデータを受信しているタイミングでは、その中継局はデータ送信を停止していることに着目したものである。提案方式 1 では、基地局から中継局に信号を送信するタイミングを基地局間で異なったタイミングに設定し、同一基地局から信号を受信する複数の中継局において同じタイミングで送信を停止することで、基地局に接続する端末において高い干渉低減効果が得られる。また提案方式 2 では、基地局から中継局に信号を送信するタイミングを中継局間で異なったタイミングに設定し、中継局間で異なったタイミングで送信を停止することで、中継局に接続する端末において高い干渉低減効果が得られる。この提案方式について複数のセルを用いたマルチセル環境でのシステムシミュレーションにより受信 SINR を定量的に評価する。その結果、基地局間干渉の低減効果を大きく得ることができ、受信 SINR を改善できる。また、受信 SINR が改善することで、スループットが向上することを合わせて示す。これにより、基地局に接続する端末における干渉低減効果が大きい提案方式 1 がスループット向上に有効である

ことを示す。ここでは、**LTE-Advanced** で検討された中継システムの緒元を用いて定量的な評価を行っている。

第 4 章では、基地局間協調通信におけるスループット向上について述べる。基地局間協調通信は、**MIMO** 通信における基地局の複数アンテナを複数の基地局に拡大したマルチポイント通信である。1つの端末に対して複数の基地局が協調してデータ送信することでスループットを向上できる。特に、基地局エリア境界の端末において基地局間で発生する干渉が抑えられるため、スループットの向上が期待される。このような協調送信では、複数の基地局に関するチャネル状態を端末側で測定して、基地局側に報告する必要がある。この時、複数のチャネル状態を報告する端末は単一のチャネル状態を報告する端末に比べて基地局の送信割当処理において割り当てられる割合が大きくなり、端末間の公平性が保たれなくなりセル平均のスループットの向上が制限されてしまう。本章では、端末の割当機会の公平性を確保し、かつ平均スループットを向上させるスケジューリングアルゴリズムの提案を行う。提案アルゴリズムでは、チャネル状態の報告数を用いた重みづけを導入することで、複数基地局のチャネル状態を報告する端末への過剰な割当を抑制し、他の端末における割当不足による平均スループットの低下を改善する。この提案アルゴリズムをマルチセル環境でのシステムシミュレーションにより定量的に評価する。この結果、セル境界のスループットを向上できることを明らかにする。ここでは、**LTE-Advanced** で検討された基地局間協調通信システムの緒元を用いて定量的な評価を行っている。

なお本研究は、**3GPP** において 2005 年から検討が開始された **LTE**、および 2008 年から検討が開始された **LTE-Advanced** の標準化活動に際して行われた技術開発に関する研究である。第 1 の **MIMO** 通信に関する提案は **LTE** 開発におけるもので、その当時には移動通信システムに **MIMO** 通信技術を導入することは最新技術であったため先行技術がない状況であった。また第 2 の無線中継通信に関する提案と第 3 の基地局間協調通信に関する提案は **LTE-Advanced** 開発におけるものであり、無線通信システムにこれらの技術を導入する際にシステム全体の観点から検討された先行技術がない状況であった。このように本研究は、**LTE** および **LTE-Advanced** といった新しい無線通信システムを構築していく際において、その通信システムに新しい技術を導入する最新の技術検討に関する研究である。

2. MIMO 通信システムにおける協調通信に関する研究

2.1. はじめに

第 1 章で述べたように、モバイル通信システムではスループットの向上が求められている。スループットとは伝送速度を示すものであり、周波数効率と使用する周波数帯域幅の乗算により算出される。つまり、スループットの向上は、周波数効率の向上もしくは周波数帯域幅の拡大により実現が可能である。しかしながら、周波数は有限の資源であるため、容易に帯域幅を拡大することは難しい。そこで、効率的な伝送による周波数効率の向上が求められている。本研究では、周波数効率の観点からスループットの向上について述べる。

基地局と端末の各無線回線のスループットの改善手法の 1 つに MIMO 通信[2-1][2-2]がある。MIMO 通信は、送受信双方において複数アンテナを用いた無線伝送方法である。送受信双方の複数アンテナ間には、複数の入出力ポイントからなる MIMO チャネルが形成される。この MIMO チャネルを使い、受信側の信号処理により分離可能な複数の経路（ストリーム）に異なるデータを伝送することでスループットを向上することができる。

モバイル通信システムにおいてこの MIMO 通信を適用することでスループットの向上が期待できるが、チャネル（伝搬路）状況が時々刻々変化する通信環境のため、その状況に応じた送信パラメータの適応制御がスループット向上のために必要不可欠である。しかしながら、MIMO 通信における適応制御では、受信側で測定したチャネル状態に関する報告信号や、送信データを受信する際に必要となる制御信号により、伝送効率の低下を引き起こすことが懸念される。

本研究では、モバイル通信システムにおいて MIMO 通信の適応制御によるスループット向上を図る。まず、MIMO 通信の適応制御方法としてストリーム独立制御とストリーム共通制御について、その性能を最大限に引き出すためにストリーム独立制御には受信側のストリーム間干渉抑圧技術である干渉キャンセラ受信を組み合わせ、ストリーム共通制御には送信側のストリーム間干渉抑圧技術であるプリコーディング送信を組み合わせ、さらに制御情報を含めたスループット性能の評価手法を提案して評価する。その評価結果をもとに 4 アンテナ送信 4 アンテナ受信の MIMO 通信において 2 ストリームをまとめて制御する方法を提案するとともに、最適な 2 ストリームをまとめて制御する方法を提案する。スループットの定量的な評価には、3GPP LTE システムの緒元を用いる[2-3]。なお、本研究は著者の論文[2-4](copyright©2007 IEICE)をまとめたものである。

2.2. MIMO 通信システム

MIMO 通信は送信側および受信側の双方に複数のアンテナを備えたマルチポイント通信である。送受信の複数アンテナ間には MIMO チャンネルが形成される。この MIMO チャンネルは受信側の信号処理によって複数の仮想的な経路に分離することができる。この経路はストリームと呼ばれている。そして、複数のストリームにおいてそれぞれ異なるデータを同時に送信することで、周波数帯域を拡大することなくスループットを向上できる。つまり、MIMO 通信は周波数効率を向上できる伝送方法である。

従来のモバイル通信システムではチャンネル状態に応じて送信パラメータを制御する適応制御技術を用いることでスループットの向上が図られる。MIMO 通信においてもこの適応制御技術を適用することで、更なるスループットの向上が期待できる。従来の適応制御では、回線品質に応じて送信データを効率的に伝送できる送信パラメータの制御が行われている。例えば、受信データが所要誤り率を満たすように回線品質に応じた送信データの誤り耐性能力を制御、つまり、送信データの変調方式と誤り訂正符号化（チャンネル符号化）の符号化率の組合せである MCS (Modulation and Coding Scheme) の制御がある。MIMO 通信における適応制御では、この送信データに関するパラメータ制御に加えてチャンネル状態に応じた MIMO チャンネルの空間的な制御が可能となる。基本的な MIMO チャンネルの制御方法は次のようになる。まず、受信側において MIMO チャンネルのチャンネル状態を測定して、その測定結果を送信側に報告する。送信側では報告されたチャンネル状態に基づいて適応制御を行う。例えば、MIMO チャンネルによる伝送効率が最大となるように送信アンテナのビーム形成の制御などが該当する。ここで、適応制御において同一の MCS により制御される送信データの単位をコードワード CW (Code Word) と呼ぶ。

2.2.1. MIMO 通信システムにおける適応制御方法

MIMO 通信システムにおける適応制御は、複数の CW を有するか、単一の CW を有するかにより 2 種類に大別できる。複数 CW を有する適応制御方法が MCW (Multiple CW) であり、単一 CW を有する制御方法が SCW (Single CW) である。MCW では、複数 CW をそれぞれストリームに対応づけることにより、ストリーム毎独立に MCS を制御できる。一方で、SCW では、全ストリームに 1 つの CW を割り当てることで、ストリーム共通に MCS を制御する。

MCW

MCW では、複数ストリームにおいてそれぞれ個別の CW を送信する。送信情報データ系列を送信ストリーム数に分割し、分割した各データ系列に対して、送信するストリームの状況に応じて送信処理を行うことで複数 CW を生成する。MCW は各ストリームの状況に応じて MCS を柔軟に制御できるため、高いスループット特性を実現できる[2-5][2-6]。

図 2-1 は MCW における基地局の送信側のブロック図である。まず始めに、送信情報データ系列を直列/並列 (S/P) 変換により送信ストリーム数に分割する。分割されたデータ系列は各ストリームで送信する CW のデータ系列に相当する。適応制御部は端末から報告されたストリーム毎の品質情報 (SINR) に基づいて各 CW の MCS を選択する。分割された各データ系列に対して、適応制御部で選択された MCS を適用して各 CW を生成する。CW 生成には、受信側で誤り検出を行う CRC の付加、ターボ符号によるチャネル符号化処理、レートマッチング処理による符号化率の制御、変調処理が含まれる。適応制御部で選択された MCS には、チャネル符号化の符号化率と変調方式が含まれている。この選択された符号化率により、符号化率制御の処理においてレートマッチング処理による符号化率の制御を行い、選択された変調方式により変調処理を行う。最終的に変調されたシンボル数は各 CW で同一とする。このため、S/P 変換で分割するデータ数は、各 CW に対して適用される MCS、CRC ビット数などを考慮して導出されている。各 CW は、IFFT 処理により OFDM 変調され、各アンテナから送信される。

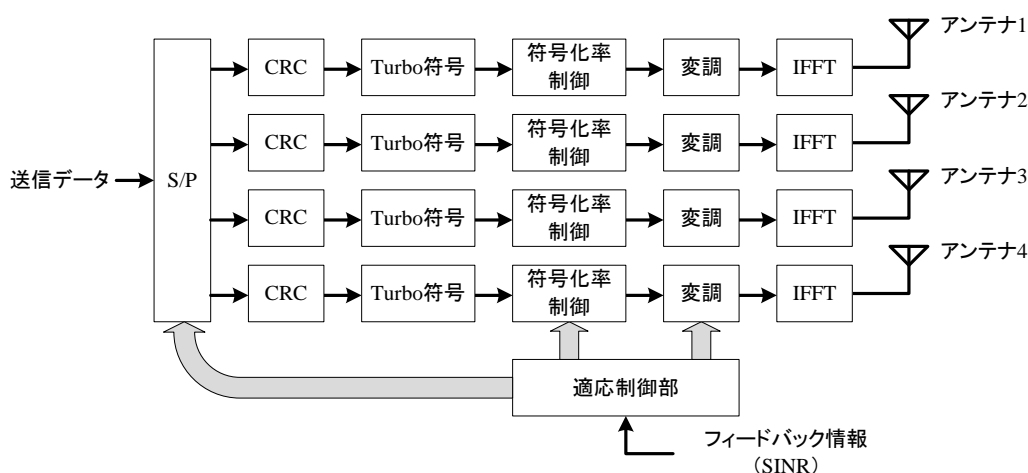


図 2-1 MCW における送信ブロック図

SCW

SCW では、単一 CW を複数ストリームに分散配置して送信する。送信情報データ系列に対して、ストリームの平均的な品質に応じた送信処理を行うことで単一の CW を生成する。その CW を送信ストリーム数に分割し、各ストリームに配置して送信する。単一の CW に対して適応制御を行うため、ストリーム間で共通の適応制御を行うことと等価である。SCW は、全ストリームを用いて単一 CW の受信処理を行うので、受信側では空間ダイバーシティが得られる。また、MCW に比べて CW あたりの符号長が長くなるので、高い符号化利得も得られる。

図 2-2 は SCW における基地局の送信側のブロック図である。適応制御部は端末から報

告された全ストリーム平均の品質情報（SINR）に基づいて CW の MCS を選択する。送信情報データ系列に対して、適応制御部で選択された MCS を適用して CW を生成する。CW 生成では、MCW における各 CW 生成と同様に処理を行う。SCW では、1 回の送信で生成される CW は 1 つである。その CW を S/P 変換により送信ストリーム数に分割する。分割された変調シンボル数は、各ストリームで同一である。各分割シンボル列は IFFT 処理により OFDM 変調され各アンテナから送信される。

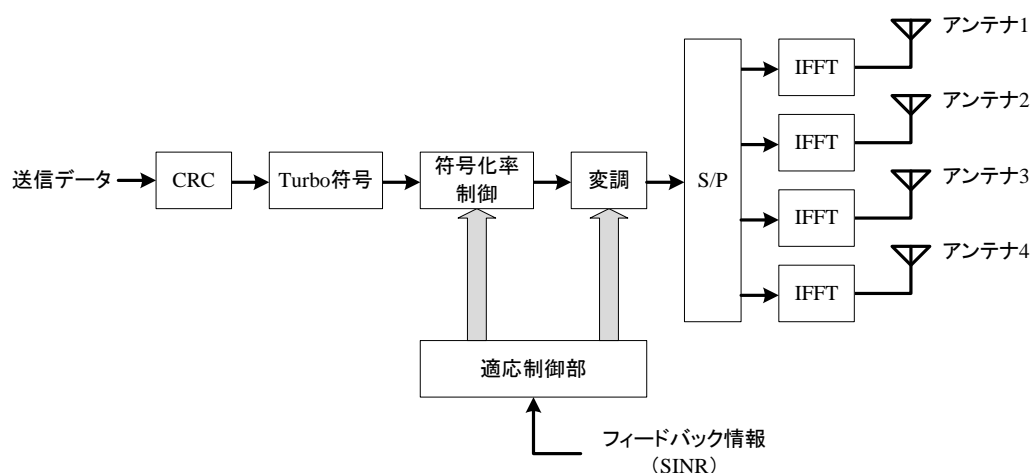


図 2-2 SCW における送信ブロック図

2.2.2. ストリーム間干渉抑圧技術

MIMO 通信では、一般に各ストリームが相互に干渉する。このため、各送信ストリームをそれぞれ精度良く受信するためには、何かしらの方法によりストリーム間干渉を抑圧する必要がある。一般的に、Zero Forcing や MMSE などの線形フィルタを用いた MIMO 受信処理によってストリーム間干渉を抑圧し、ストリームを分離する。しかし、これらの受信処理ではストリーム間干渉の抑圧効果が十分でなく、他にストリーム間干渉抑圧技術を適用することで受信特性の改善が期待できる。例えば、送信側の技術としてプリコーディング送信があり、受信側の技術として干渉キャンセラ受信などがある。

プリコーディング送信

MIMO 通信システムにおけるプリコーディング送信では、変調シンボルに対してプリコーディング行列により重み付け送信を行う。プリコーディング送信された信号が MIMO チャネルを通過することで空間的なビームを形成できる。この送信処理により空間的に直交するチャネルもしくは直交チャネルに近いチャネルを使って送信することが可能となる。ここで、直交チャネルとはストリームが相互に直交するチャネルを示していて、この直交

チャンネルに近づけることはストリーム間干渉を抑圧することに相当する。プリコーディング行列は、端末で MIMO チャンネルの状況に応じて最適なものを選択する。その選択した行列は、端末から基地局に報告される。このプリコーディング送信を適用することにより、直交チャンネルに近いチャンネルで送信でき、MMSE などの線形フィルタを用いた MIMO 受信処理を用いて容易にストリームを分離できる。

干渉キャンセラ (SIC) 受信

干渉キャンセラ受信は、受信処理において、受信処理したストリームを受信信号から除去する処理を順次繰り返していく受信方法である。このように干渉成分を順次除去する干渉キャンセル受信は、SIC (Successive Interference Cancellation) 受信と呼ばれている。まず端末は、各ストリームの受信 SINR を推定し、その推定 SINR に基づいてストリームの品質の順番を決める。次に、受信 SINR が最良となるストリームを検出し、受信処理を行う。そして、その最良ストリームのレプリカを生成して、受信信号から取り除く。このストリーム検出とストリーム除去を、最悪ストリームを検出するまで繰り返す。これにより、SIC では、上位ストリームを除去することで、下位ストリームの検出において高いダイバーシティ利得が得られ受信特性を改善できる。

2.3. MCW と SCW の性能評価

MIMO 通信の適応制御における制御方法である MCW と SCW について性能評価を行う。ここでは MCW と SCW の各方式についてその性能を最大限引き出すためにそれぞれに適したストリーム間干渉抑圧技術を適用する。MCW には SIC 受信方式を SCW にはプリコーディング送信をそれぞれ適用する。性能評価では、制御情報も含めたスループット性能の評価手法も提案し評価する。

SIC 受信を適用した MCW (MCW + SIC)

この MIMO 通信方式は、ストリーム独立に適応制御を適用する MCW において、受信側のストリーム間干渉抑圧技術である SIC 受信を組み合わせた方式である。図 2-3 はこの SIC を適用した MCW における端末側の受信ブロック図である。なお、この方式における基地局側の送信ブロック図は、図 2-1 と同じである。端末側では、まず MMSE 受信におけるストリーム毎の SINR に基づいてストリームの順位付けを行う。次に、MMSE 受信出力の SINR が最良のストリームを検出し、そのストリームで送信された CW の復号処理を行い、CRC 判定により誤り検出を行う。CRC 判定で誤りがないと判定された場合には、SIC 受信は、復号後データを再符号化して送信データのレプリカを生成し、受信信号からそのレプリカを減算することで干渉成分の除去を行う。このように誤り判定後にレプリカ生成を行うことにより、後段ストリームの受信処理への誤り伝搬を阻止できる。

この構成では、複数 CW に対して適応制御を行うため、SCW に比べて制御情報のオーバーヘッドが増大する。これ以上制御情報のオーバーヘッドを増加させずに良好な特性を得るためには受信側での干渉抑圧技術が適切である。また、CW 毎に誤り判定を行うため SIC 受信を容易に適用できる利点もある。このため、MCW は SIC 受信と組み合わせるのが適している。

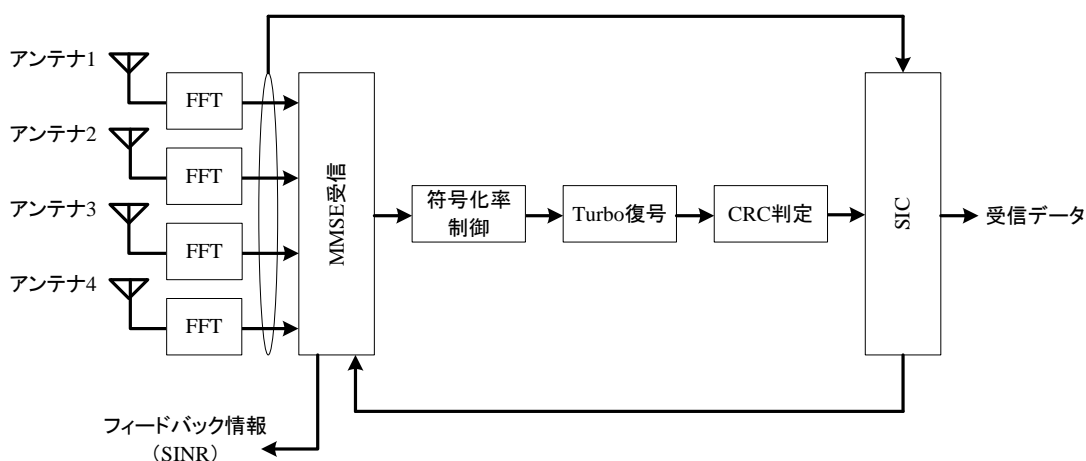


図 2-3 SIC 受信を適用した MCW における端末ブロック図

プリコーディング送信を適用した SCW (SCW + Precoding)

この MIMO 通信方式は、ストリーム共通に適応制御を適用する SCW において、送信側のストリーム間干渉抑圧技術であるプリコーディング送信を取り込んだ方式である。この方式における基地局送信および端末受信のブロック図を図 2-4 および図 2-5 に示す。制御情報のオーバーヘッドを抑えるため、プリコーディング行列は有限数の行列候補の中から選択する方法を用いる。この行列候補はコードブックと呼ばれ、あらかじめ基地局と端末間で共有しておく。このようなコードブックを用いる方法では、送受信間で行列候補の識別子 (ID) だけを通知することでプリコーディング行列を通知できる。プリコーディング送信の手順は以下とする。まず、基地局の各アンテナからプリコーディング送信を適用しない参照信号を送信する。端末では、この参照信号を用いてプリコーディング送信を適用しない場合の伝搬路状況を測定する。その測定結果を用いて各プリコーディング行列候補に対してプリコーディング送信した場合の伝搬路状況を推定し、その伝搬路状況が直交チャネルに近くなるプリコーディング行列の ID を選択する。その際、該当のプリコーディング行列を適用した場合の受信 SINR をあわせて推定しておく。端末は、このように選択したプリコーディング行列 ID と測定 SINR を基地局に報告する。基地局の適応制御部は、報告されたプリコーディング行列 ID に基づいて図 2-4 のビーム形成部を制御して、各ストリームをビーム送信する。

この構成では、適応制御のための制御情報が MCW に比べて少ないことから、スループット性能向上に向けて制御情報の追加をいくらか許容できる。先に述べたように、SCW は空間ダイバーシティ利得が得られ、また、SCW では MIMO プリコーディングはストリーム間干渉を抑圧する効果がある [2-7][2-8]。反面、SCW ではストリーム毎に誤り判定ができないために SIC 受信を適用することが難しい。これは、SIC 受信において誤った干渉レプリカを生成して除去してしまうと、下位ストリームに誤りが伝播してしまうためである。このように、SIC が適用できない SCW にはプリコーディング送信が適している。

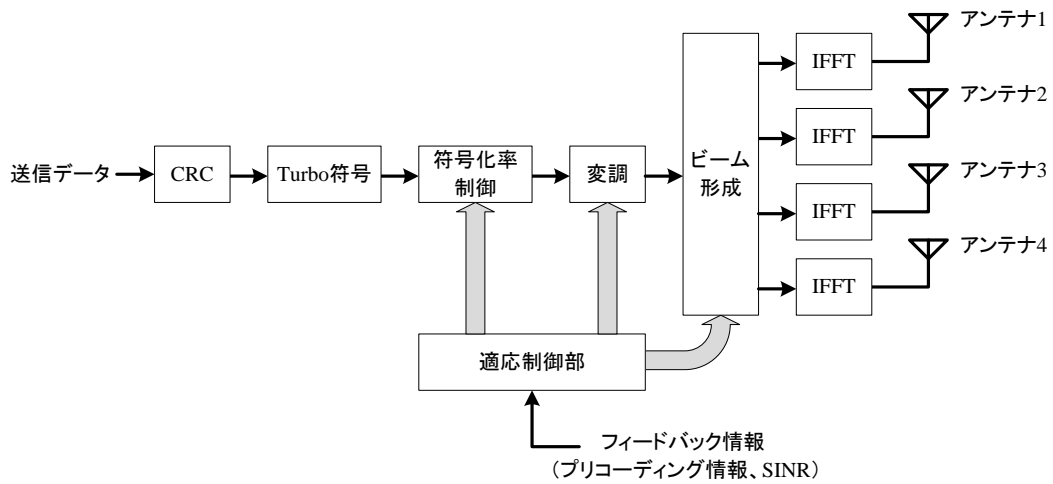


図 2-4 プリコーディング送信を適用した SCW の基地局ブロック図

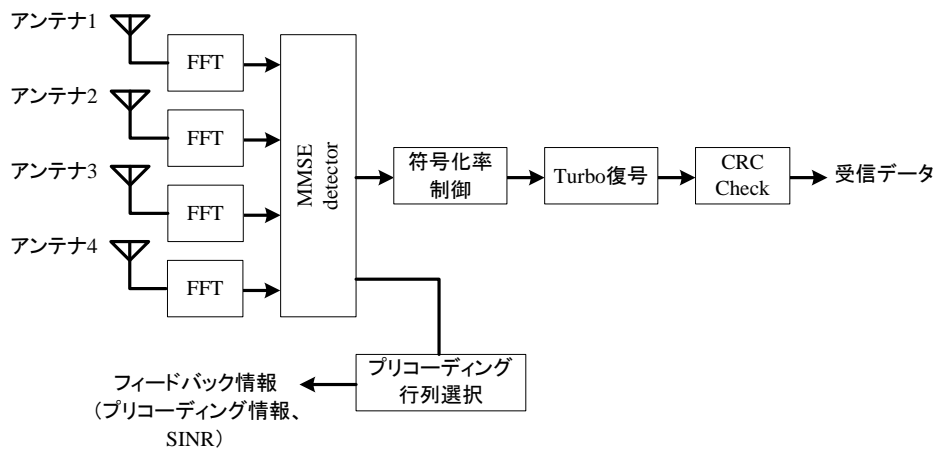


図 2-5 プリコーディング送信を適用した SCW の端末ブロック図

適応制御のためのオーバーヘッド

適応制御を行うためには、送信側と受信側は互いに制御情報をやり取りする必要がある。例えば、受信側で測定した SINR やプリコーディング行列などを送信側に報告するフィードバック情報や、送信したデータを受信処理するために必要となる制御情報などがある。この制御情報を送信するためには、送信データとは別に無線リソースを必要とする。この制御情報のリソースは、送信データに対してオーバーヘッドとなるため、可能な限り少ない方が望ましい。ここでは、MIMO 通信の適応制御のためのオーバーヘッドとして、下り回線の送信データに関する制御情報と、上り回線のフィードバック情報について検討する。

下り回線の制御情報には、送信データに関する付帯情報、再送処理 (HARQ : Hybrid Automatic Repeat reQuest) に関する情報、プリコーディング行列 ID が含まれる。また、

この送信データに関する付帯情報には、データの送信先の端末を識別する端末 ID、データが送信されている周波数リソースを示す割り当てリソース情報、MCS が含まれる。端末 ID と割り当てリソース情報は、端末あたりそれぞれ 1 つ設定されるが、MCS は CW 毎に設定される。つまり、MCW では、MCS を通知する情報量（ビット数）は CW 数に比例して増加する。また、CW 毎に再送処理を行うことから HARQ 情報も MCS 同様に CW 毎に設定される。プリコーディング行列 ID は、プリコーディング適用時にのみ通知されるもので、ここでは SCW にのみ適用される。表 2-1 に各 MIMO 適応制御における下り回線の制御情報の種類とその組合せ数を示す。

フィードバック情報についても説明する。フィードバック情報には、端末で測定した SINR、再送処理のための各 CW の伝送成否応答 ACK/NACK (Acknowledgement/Negative Acknowledgement)、プリコーディング行列 ID が含まれる。SINR と ACK/NACK は下り回線の制御情報と同様に、CW 毎に通知する。表 2-2 にフィードバック情報の種類とその組合せ数を示す。

表 2-1 MIMO 適応制御における下り回線の制御情報の種類と組合せ数

項目	MCW+SIC	SCW+Precoding
端末 ID		1
割り当てリソース情報		1
MCS	CW 数	1
HARQ 情報	CW 数	1
プリコーディング行列 ID	0	1

表 2-2 MIMO 適応制御における上り回線のフィードバック情報の種類と組合せ数

項目	MCW+SIC	SCW+Precoding
SINR	CW 数	1
ACK/NACK	CW 数	1
プリコーディング行列 ID	0	1

2.3.1. シミュレーション方法

本研究では、伝送シミュレーションを用いてスループット（周波数効率）特性を評価する。伝送シミュレーションとは実際の通信回線における動作や作用を模擬するシミュレーションである。例えば、送信動作にはチャンネル符号化処理、変調処理、OFDM 信号における周波数リソースへのデータ配置などの送信処理、伝搬路の作用にはフェージングチャンネルの伝搬、受信動作には復調処理、チャンネル復号化処理などの受信処理などが含まれる。また、適応制御や再送処理といった送受信双方に関連する動作についても含まれる。適応制御で用いる MCS は SINR のレベルに対応して 10 段階に設定する。受信側で測定した SINR に基づいて送信側の MCS を制御する。各 MCS に対応する SINR 範囲は、その MCS におけるターゲットパケット誤り率（PER : Packet Error Rate）が 20%となるように設定する。本評価では、適応制御は再送処理単位である HARQ プロセス[2-12] ごとに適用する。HARQ の初回送信時には、端末で測定した SINR に基づいて MCS を選択して、その MCS を適用して送信する。HARQ の再送時には、再送方法として Incremental Redundancy (IR) を適用する。HARQ プロセスあたりの最大再送回数は 3 回とする。

周波数効率の評価は受信 SINR を評価パラメータとする。受信 SINR は、受信側における所望信号の受信電力に対する他セルからの干渉信号電力と熱雑音電力の電力比率である。例えば 受信 SINR = 0dB は、所望信号電力と、干渉と雑音の合計電力が同じことを示している。また、セル境界付近の受信 SINR は 0dB より低くなる可能性がある。これはセル境界付近では所望信号と同等レベルの干渉が存在するためである。本研究では、端末は複数の隣接セルからの干渉が存在する環境を想定する。これは、3GPP の標準化で一般的に用いられる評価環境である。各隣接セルからの干渉はそれぞれ相関のないフェージングを受けることから、本評価では干渉信号をガウス雑音として仮定する[2-13]。

評価パラメータである受信 SINR の設定方法について説明する。まず、基地局において、送信電力を設定して信号を送信する。次に、送信信号に対してフェージングを付加する。ここでのフェージングは平均利得 1 と設定し電力の損失がないものとする。端末側では、フェージングを付加した送信信号に対して受信 SINR に応じた電力のガウス雑音（干渉と熱雑音）を付加する。

評価結果はスループットを正規化した周波数効率を示す。ここで、端末側で観測されたスループットに対して、方式毎に異なる制御情報のオーバーヘッドをスループットに換算し送信帯域幅で正規化したものを周波数効率とする。各受信 SINR の評価ポイントに対して、40 sec（40000 TTI（transmission timing interval））相当の評価を実施する。

2.3.2. シミュレーション条件

次にシミュレーション条件を示す。OFDM 関連のパラメータを表 2-3 に示す。これらのパラメータは基本的には LTE システムの下り回線のパラメータに準拠している。まず周波数軸に関するパラメータを示す。サブキャリア数は 600, サブキャリア間隔は 15kHz である。これは LTE 規格における送信帯域幅 10MHz の条件に相当する。FFT サイズは 1024 とする。次に時間軸に関するパラメータを示す。送信フレームは、14 OFDM シンボルから構成される TTI から構成される。TTI 長は 1.0 msec である。この 1.0 msec の TTI 構成により適応制御や HARQ などの送信制御において性能劣化を許容できる十分に短い制御遅延を実現できる。また、各 OFDM シンボルには、4.75 usec の Cyclic prefix を付加する。

表 2-4 に OFDM パラメータ以外のシミュレーション条件を示す。送信する CW は 1.0 msec の TTI で連続する 60 サブキャリアから構成される時間-周波数リソースに配置される。評価するアンテナ構成は 2x2 と 4x4 とする。端末におけるチャンネル推定には MMSE チャンネル推定[2-9]を用いる。チャンネル(伝搬路)モデルには Typical Urban モデル[2-10]を用い、端末の移動速度は 3 km/h とする。MIMO チャンネルにおけるアンテナ間空間相関には、Kronecker モデル[2-11]を用い、送信側のアンテナ間相関の相関係数を 0.5, 受信側のアンテナ間相関は無相関(相関係数は 0) とする。本評価では、SINR の約 3dB に対して 1 つの MCS を割当て SINR -5~25dB を 10 段階の MCS に分割して割り当てる。受信側からの SINR 報告の遅延時間は 2TTI とする。また、SINR 報告では誤りは発生しないものとする。

表 2-3 OFDM 関連のパラメータ

パラメータ	条件
送信帯域幅	10 MHz
サブキャリア間隔	15 kHz
サブキャリア数	601 (DC サブキャリアは Null)
1 パケットあたりのサブキャリア数	60 (900 kHz)
FFT サイズ	1024
1 パケット間隔 (TTI)	1 msec
1 パケットあたりの OFDM シンボル数	14
Cyclic prefix 長	4.75 usec
参照信号オーバーヘッド	2 アンテナ送信時: 9.5% 4 アンテナ送信時: 14.3%

表 2-4 シミュレーション条件

パラメータ	条件
1 パケットあたりのサブキャリア数	60 (900kHz)
アンテナ構成	2x2, 4x4
誤り訂正符号化	Turbo 符号 (R=1/3)
MCS セット	QPSK : R=1/8, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3 16QAM : R=1/2, 2/3, 3/4 64QAM : R=2/3, 3/4
チャンネルモデル	Typical Urban (移動速度 3km/h)
アンテナ相関	送信側相関係数 : 0.5 受信側相関係数 : 0.0
チャンネル推定方式	MMSE 推定
MIMO 受信方式	SCW : MMSE MCW : MMSE, MMSE-SIC
フィードバック遅延	2 TTI
再送処理	再送間隔 : 6 TTI, 再送回数 : 4 回

送信方式を比較する際には 2.3 節で述べた適応制御のためのオーバーヘッドを考慮する。本評価では、適応制御のためのオーバーヘッドを次のように設定して算出する。端末のユーザ ID は 16 ビット、割り当りソース情報は 24 ビット、MCS 情報は 8 ビット、HARQ 関連情報は 6 ビット、プリコーディング行列 ID は 2 送信アンテナ時には 3 ビット、4 送信アンテナ時には 4 ビットとする。そして、下り回線においてこれらの情報を送信する際には、誤り訂正符号化(符号化率 1/3)を行い、QPSK 変調で、周波数-空間ブロック符号化を施す。この条件における、各送信方式に対する制御情報のオーバーヘッドを表 2-5 に示す。

表 2-5 下り回線制御情報のオーバーヘッド

アンテナ構成	送信方式	オーバーヘッド
2x2	SCW+Precoding	10.2%
	MCW+SIC	12.1%
4x4	SCW+Precoding	10.4%
	MCW+SIC	17.1%

図 2-6 に、60 サブキャリアから成る下り回線参照信号の送信シンボル配置を示す。参照信号はデータシンボル内に配置される。参照信号は端末側において MIMO チャンネルのチャネル推定に用いられる。このシンボル配置は、4 受信アンテナ端末と 2 受信アンテナ端末が共存することを前提に設計されている。4 受信アンテナ端末は 2 受信アンテナ端末に比べて高機能で複雑度が高いことから、システム全体では 4 受信アンテナ端末より 2 受信アンテナ端末の数の方が多いことを想定している。このため、第 3 と第 4 参照信号のオーバーヘッドを少なくなるように設計されている。参照信号のオーバーヘッドは、2 アンテナ送信時には 9.5%、4 アンテナ送信時には 14.3% である。2 アンテナ送信時には、第 3、第 4 参照信号のシンボルは、データに置き換えられる。

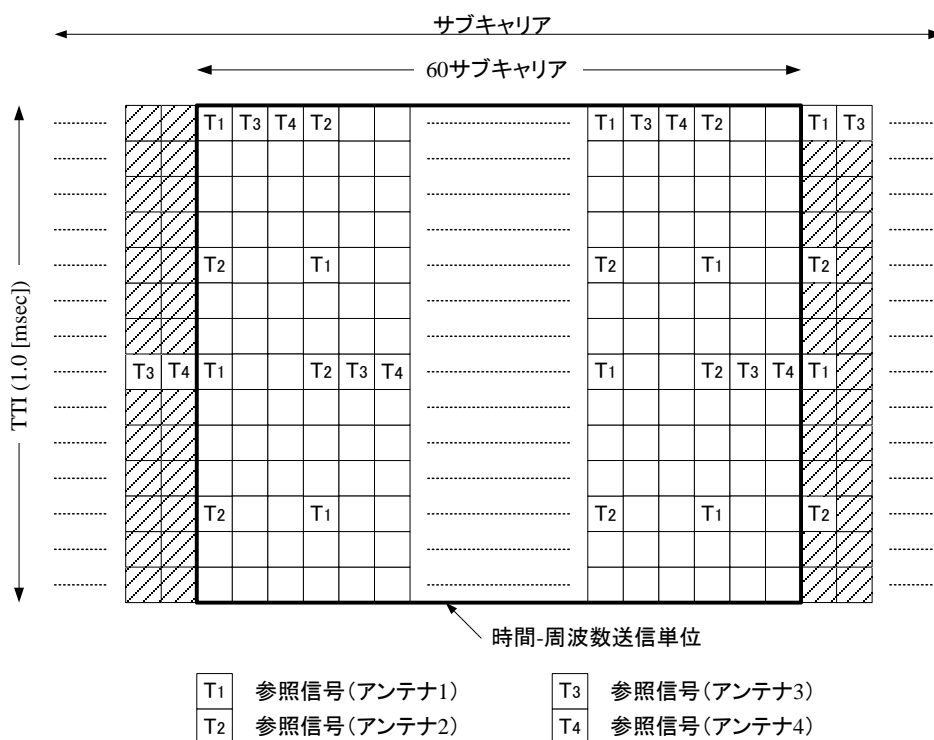


図 2-6 下り回線参照信号の送信シンボル配置

2.3.3. シミュレーション評価結果

スループット比較

MCW+SIC と SCW+Precoding について前述したシミュレーションにより評価したスループット特性を比較する。ここではスループット特性としてスループットを正規化した周波数効率特性を用いる。図 2-7 と図 2-8 に、2x2 アンテナ構成と 4x4 アンテナ構成における周波数効率特性をそれぞれ示す。また、比較対象として MMSE 受信を適用した MCW (以

下 MCW) とプリコーディング送信を適用しない SCW (以下 SCW) の周波数効率特性をあわせて示す。両図では横軸に受信 SINR を、縦軸に周波数効率を示す。

図 2-7 と図 2-8 の結果から、MCW と SCW の双方において、2.2.2 節で述べたストリーム間干渉抑圧技術の効果を確認できる。MCW+SIC は MCW に比べて最大約 20% の高い性能改善が得られている。しかし、SCW+Precoding では、SCW に比べて中～高 SINR 領域において 3-5% の改善しか得られていない。これは、文献[2-14]で示されているように、1 つの CW の中で品質差が発生し、ターボ復号における復号特性に影響してしまうため、大きな効果が得られないものと考えられる。

次に MCW+SIC と SCW+Precoding の比較を行う。図 2-7 の評価結果から、2x2 アンテナ構成では、MCW+SIC は SCW+Precoding より高い周波数効率特性を示している。受信 SINR ≥ 6 dB の領域において、MCW+SIC は SCW+Precoding より 10-15% 程度高い周波数効率を有する。また、図 2-8 の結果から、4x4 アンテナ構成では中～高 SINR 領域において、MCW+SIC は SCW+Precoding より良好な周波数効率特性を示している。受信 SINR=25 dB では、MCW+SIC は SCW+Precoding より約 15% 高い性能が得られる。一方で低 SINR 領域では、SCW+Precoding の方が MCW+SIC より良い特性が得られる。

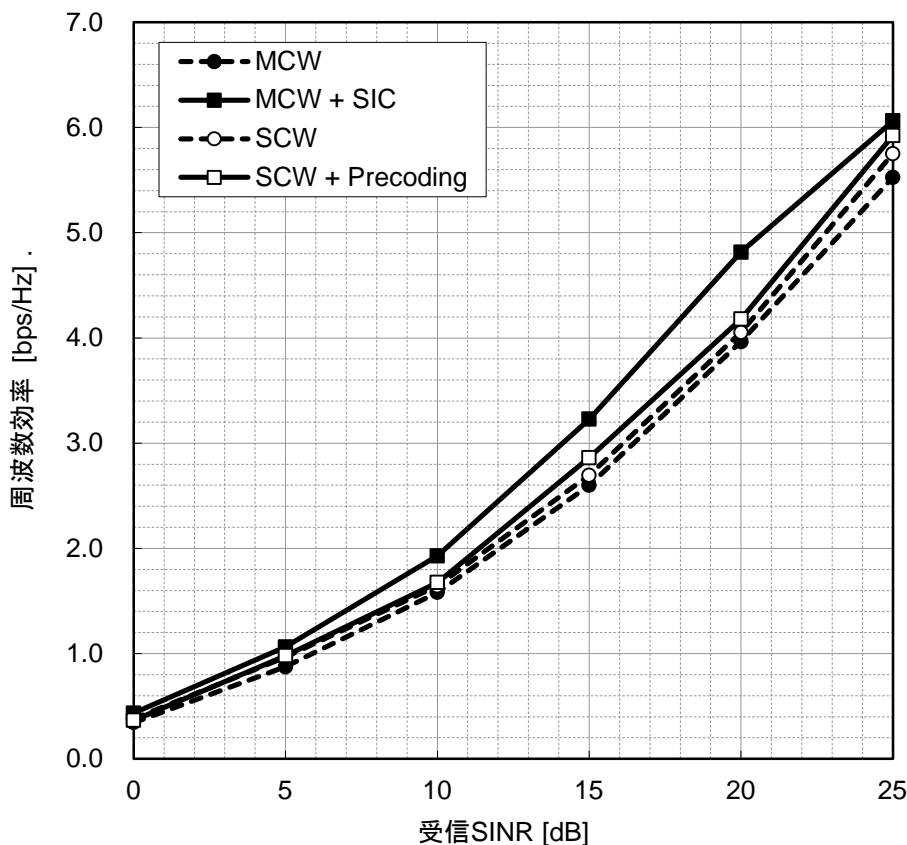


図 2-7 MCW と SCW のスループット特性 (2x2 アンテナ構成)

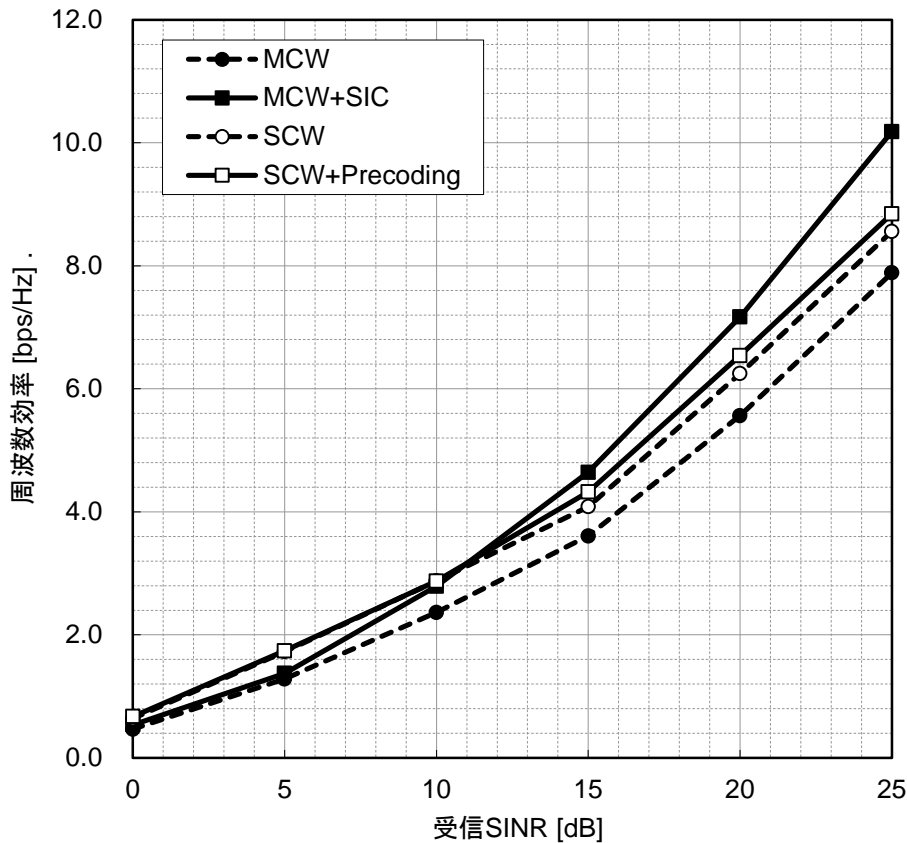


図 2-8 MCW と SCW のスループット特性 (4x4 アンテナ構成時)

MCW+SIC は、アンテナ構成にかかわらず中～高 SINR 領域において高い周波数効率が得られる。これは MCW における次の 2 つの理由によるものと考えられる。第 1 の理由は、MCW では CW 毎に適応制御をおこなうことで各ストリームを最大限活用できる点である。第 2 の理由は、干渉キャンセラを適用することにより上位ストリームを順次除去することで下位ストリームの検出において高いダイバーシティ利得が得られる点である。このため、2x2 アンテナ構成および 4x4 アンテナ構成では、中～高 SINR 領域において MCW+SIC は SCW+Precoding より優れている。

一方で、低 SINR 領域では、MCW+SIC は SCW+Precoding に対して大きな優位性はない。逆に、図 2-8 から 4x4 アンテナ構成では、SCW+Precoding の方が高い周波数効率を示している。受信 SINR=5dB のポイントでは、SCW+Precoding の方が MCW+SIC より周波数効率が 30%程度高い。

この低 SINR 領域における MCW+SIC の劣化について以下の 2 つの要因が考えられる。1 つ目の要因は SCW に比べて MCW では符号化利得が低いことである。これは MCW における 1CW あたりの符号長 (データ数) が SCW の符号長に比べて短いからである。4x4 アンテナ構成時では、SCW の符号長は MCW の符号長の約 4 倍になる。

2つ目の要因は、低 SINR 領域における MCS 選択精度の影響であり、低 SINR 領域では、MCW より SCW の方が高い MCS 選択精度が得られている。2.2.1 節で述べたように、MCW では MCS 選択のために端末において各ストリームの SINR を測定する。一方で、SCW では全ストリームの平均 SINR を測定する。SCW ではこのストリーム間の平均化効果が寄与して、測定 SINR の分散が MCW に比べて小さくなる。図 2-9 は受信 SINR=2dB と設定した場合の SCW と MCW における各 CW における測定 SINR の分布を示している。この測定 SINR の標準偏差は、MCW では 2.28、SCW では 0.68 である。また、図 2-9 には選択される各 MCS レベルに対応する SINR 範囲をあわせて示す。例えば、SINR の範囲が $0 \leq \text{SINR} \leq 3$ であれば MCS レベル 3 に対応することを示している。MCW における測定 SINR の分布は、SCW の分布に比べて広いことが確認できる。これは、MCW では SCW に比べて誤った MCS を選択する可能性が高いことを示している。

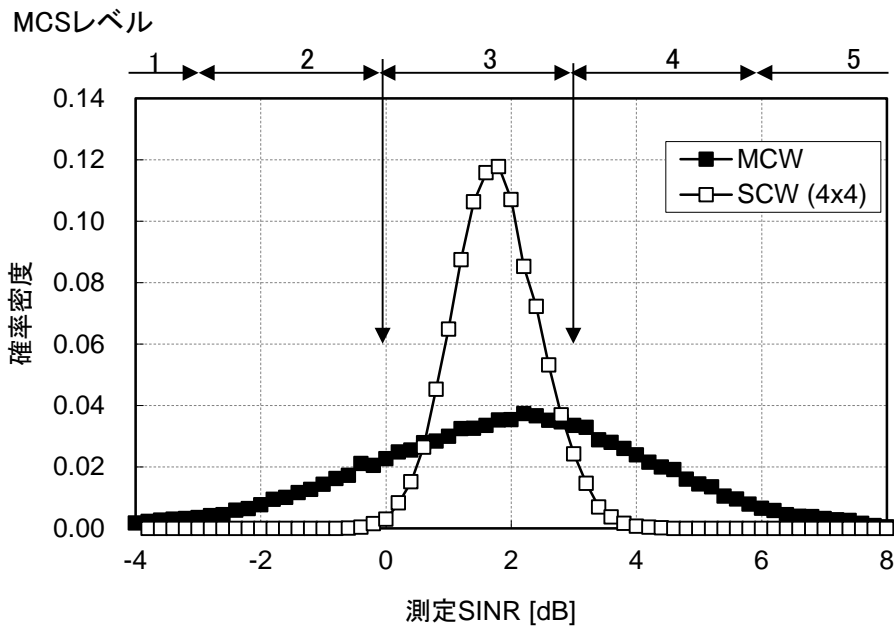


図 2-9 端末における測定 SINR の分布 (設定値 SINR=2dB)

2.4. CW あたり 2 ストリームを割り当てる MCW の提案

2.3 節で示す 4x4 アンテナ構成における MCW の低 SINR 領域における特性劣化を解決するために、2CW 毎まとめて送信する 2CW-MCW 方式を提案する。つまり、2CW を 4 ストリーム使って送信するため、CW あたり 2 ストリームを使って送信する方式である。この方式では MCW の 2 つの劣化要因について次のような効果を期待できる。まず、CW あたりの符号長については、4CW の MCW に比べて CW あたりに割り当てるストリーム数が増加するので符号長が長くなり符号化利得を向上することができる。また、受信側の SINR 測定精度については、CW あたりに 2 ストリームを割り当てることで、それら 2 ストリームの平均化効果が得られるため、SINR 測定精度の向上が見込まれる。上記 2 点に加えて、この方式は 4CW の MCW に対して適応制御のためのオーバーヘッドを削減することができる。MCW(4CW)のオーバーヘッドは 17%であったが、CW 数を半減できるので、提案方式のオーバーヘッドは 12%に削減できる。これは、2x2 アンテナ構成の MCW における適応制御のためのオーバーヘッドと同等である。

本提案方式では、2CW を 4 ストリームに割り当てるため 2CW をどのように 4 ストリームに割り当てるかを検討する必要がある。本研究では、次の 2 つの割当方法について検討する。

固定割当方法

CW を割り当てるストリームをあらかじめ決定しておき、その固定割当方法にしたがい CW をストリームに割り当てる。ここでは、CW1 はストリーム 1 と 2 に、CW2 はストリーム 3 と 4 に固定して割り当て、基地局と端末ではこの固定割当方法に基づいてそれぞれ送信処理および受信処理を行う。この方法では、CW をどのストリームに割り当てるかを基地局と端末ともに既知であるため、ストリーム割当に関する情報を制御情報として通知する必要はない。

適応割当方法

受信状況に応じて適応的に CW をストリームに割り当てる。端末における SINR 測定結果に基づいて CW を割り当てるストリームを選択する。ここでは、CW1 には SINR の上位 2 ストリームを割り当て、CW2 には SINR の下位 2 ストリームを割り当てる方法を適用する。この割当方法では、ストリームの組合せ情報を制御情報として通知する必要がある。4 ストリームを 2 ストリームずつの 2 組に組合せる 3 つの候補があるので、制御情報の情報量としては 2 ビットとなる。この増加による適応制御のためのオーバーヘッドの増加量は 0.4%とわずかである。

提案の 2CW-MCW 方式について詳細を説明する。図 2-10 は本方式の基地局側の送信ブロック図、図 2-11 は端末側の受信ブロック図である。基地局は送信データを 2CW に分割する。各 CW は SCW と同様に送信処理を行う。端末には SIC を用いる。SIC では、MMSE 出力の SINR によってストリームの順位付けを行い、検出したストリーム 2 組を 1 つの CW に結合する。CW はターボ復号を行い CRC により誤り判定を行う。CRC 判定で誤りがないと判定されたら、復号後データから送信データのレプリカを生成し受信信号からレプリカを除去する。

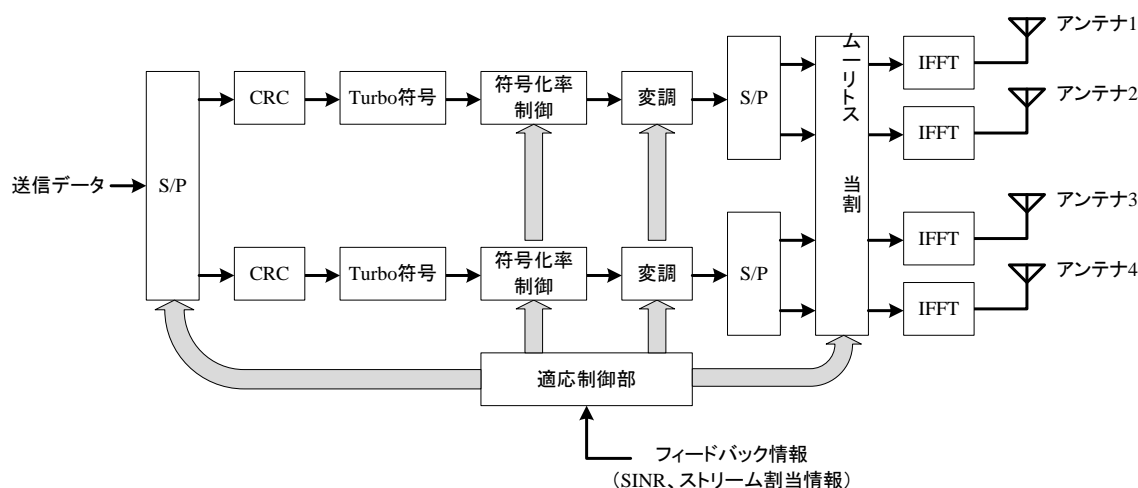


図 2-10 2 ストリームグループ化 MCW の送信ブロック図

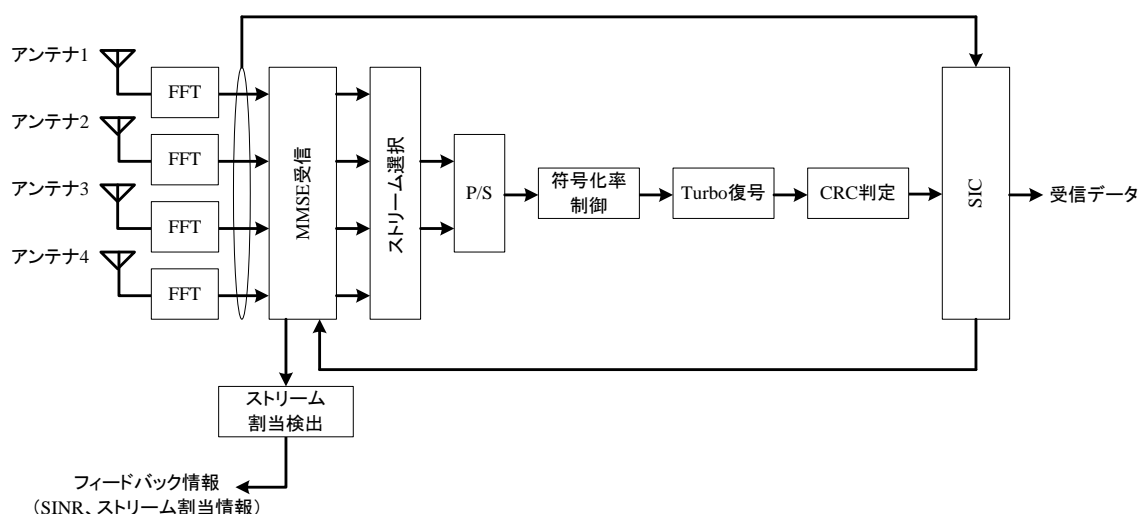


図 2-11 2 ストリームグループ化 MCW の受信ブロック図

2.4.1. シミュレーション評価結果

提案方式 2CW-MCW のシミュレーション評価結果を示す。図 2-12 は、2CW-MCW における CW-ストリーム割当方法の比較結果を示す。この提案方式は低 SINR 領域における MCW の特性劣化を解決することが目的であるため、低 SINR 領域 ($0 \leq \text{SINR} \leq 10\text{dB}$) についての結果を示す。図 2-12 の結果から、適応割当のほうが固定割当より良好な特性を得ていることがわかる。これは、適応割当では受信 SINR の高い順にストリーム干渉を除去できる効果である。固定割当ではストリームの受信 SINR によらず CW のストリームへの割当が決まっているため、必ずしも受信 SINR が高いストリームから順に干渉除去されるわけではなく、干渉除去効果が低下するためである。

また、図 2-13 に適応割当を用いた 2CW-MCW における測定 SINR の分布を示している。図 2-13 では、比較のために図 2-9 で示した MCW(4CW) および SCW における測定 SINR の分布もあわせて示す。2CW-MCW における測定 SINR の標準偏差は 0.99 であり、MCW(4CW) の 2.28 より小さくなり、SCW の 0.68 に近づいている。これは 2CW-MCW における各 CW の SINR 算出において 2 つのストリームの SINR を平均化した効果によるものである。これにより、MCW(4CW) に比べて 2CW-MCW は MCS 選択の精度が改善するものとする。

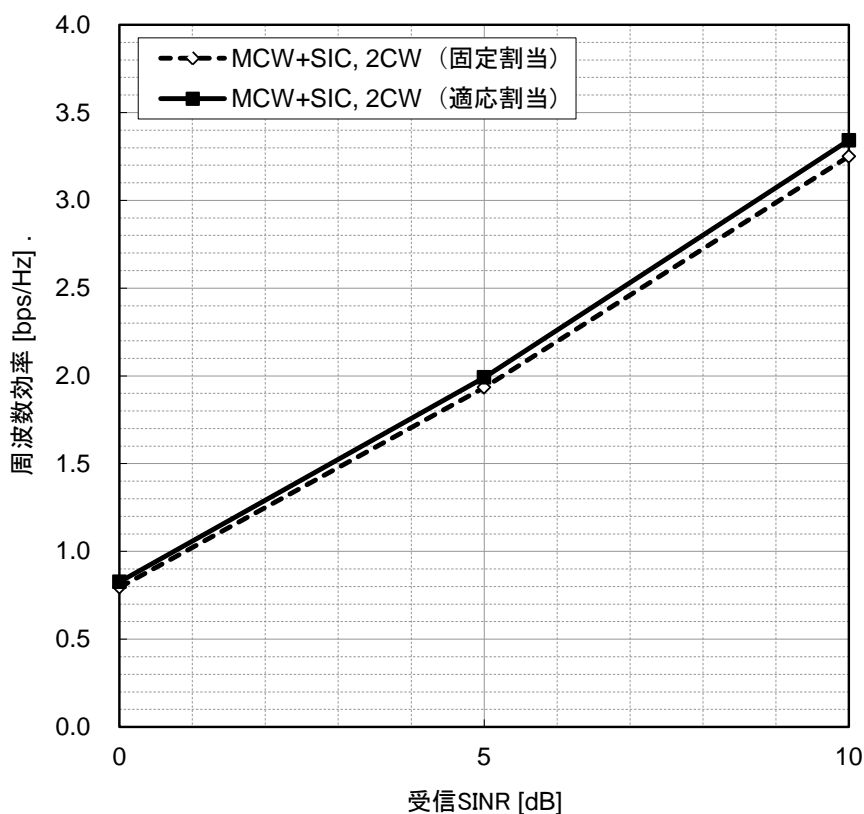


図 2-12 2CW-MCW における CW-ストリーム割当方法の比較

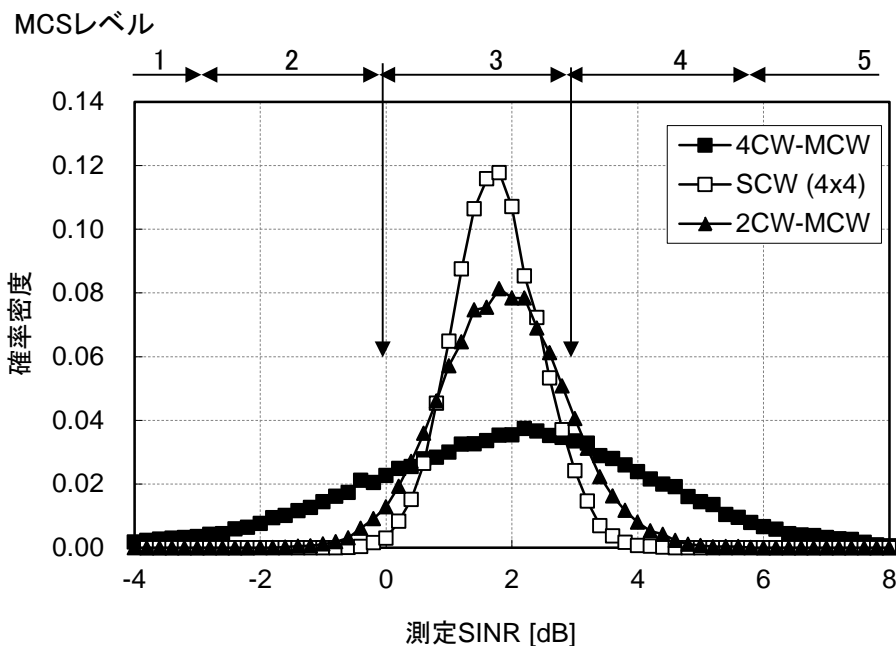


図 2-13 端末における測定 SINR の分布 (2CW-MCW)

次に、提案方式 2CW-MCW の周波数効率特性を図 2-14 に示す。図 2-14 では 2.3 節で検討した MCW+SIC および SCW+Precoding の周波数効率特性も同時に示す。この評価結果について低 SINR 領域および高 SINR 領域についてそれぞれ考察する。

低 SINR 領域

図 2-14 から、低 SINR 領域では、提案方式 2CW-MCW は MCW(4CW)より高い周波数効率特性であり SCW に近い特性が得られていることがわかる。受信 SINR=5dB のポイントでは、2CW-MCW の周波数効率特性は MCW(4CW)比べて 20%改善している。これは、2CW-MCW が MCW(4CW)に比べて高い符号化利得が得られる効果と、MCS を高い精度で選択できる効果が寄与したものである。

高 SINR 領域

図 2-14 から、高 SINR 領域では、提案方式 2CW-MCW は MCW(4CW)より高い周波数効率特性が得られていることがわかる。受信 SINR=25dB のポイントでは、2CW-MCW は MCW(4CW)より 3%ほど高い周波数効率特性が得られている。この MCW(4CW)に対する 2CW-MCW の改善量は、主に適応制御のためのオーバーヘッドの削減によるものである。高 SINR 領域では、2CW-MCW および MCW(4CW)ともに各 CW の SINR 測定精度が高いため適応制御における MCS 選択を精度よく行うことができる。このためストリーム独立に適応制御が可能な MCW(4CW)の方が 2CW-MCW より高いスループット特性が得られるこ

とが予想される。一方で、適応制御のためのオーバーヘッドに関して、2CW-MCW は MCW(4CW)に比べて約 30%の削減が可能となる。この削減効果が SINR 測定精度による低下を補い 2CW-MCW は MCW(4CW)より高い周波数効率特性を得られている。

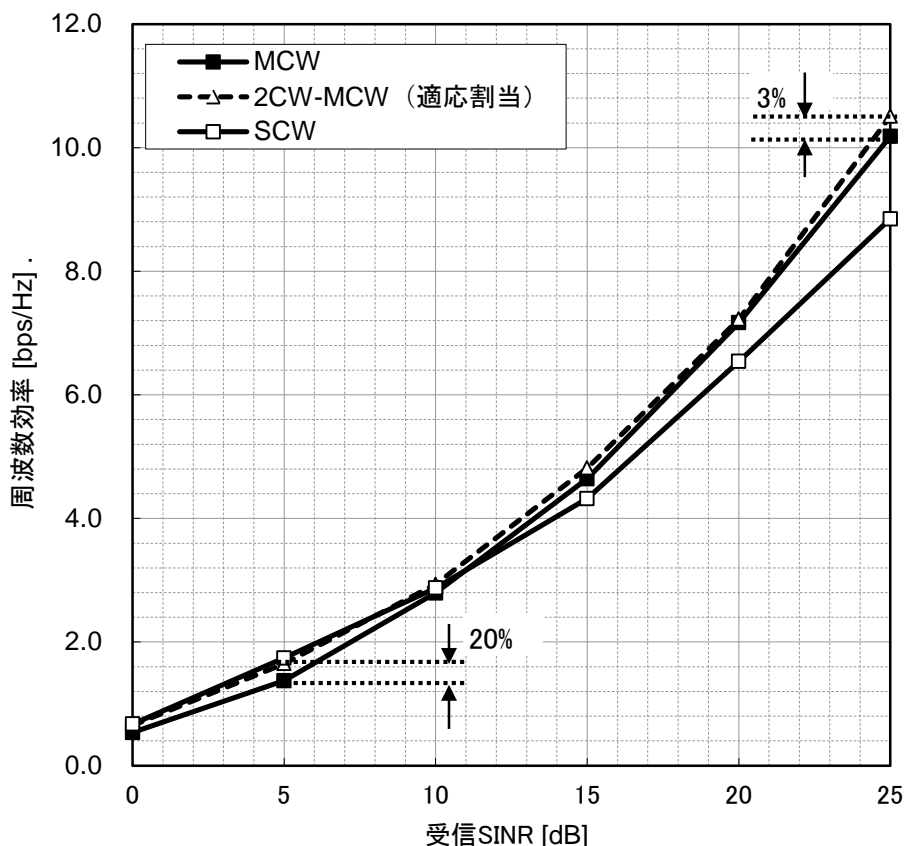


図 2-14 2CW-MCW のスループット特性 (4x4 アンテナ構成)

次に、通信システムにおける動作領域について考える。通信システムは、通常トラフィックにある程度余裕がある状態で運用がなされている。通信システムにおいてトラフィックに余裕がある場合には隣接セルからの干渉が小さくなるので高い SINR 領域で動作することが予想される。このため高 SINR 領域における特性が重要であり、高い周波数効率特性を示す 2CW-MCW は他の方式に比べて良好な方式である。

以上の考察結果より、適応ストリーム割当てを適用した 2CW-MCW は、4x4 アンテナ構成において低 SINR から高 SINR の広い SINR 領域に渡り良好な周波数効率特性となる。特に、通信システムで通常用いられる高 SINR 領域において、2CW-MCW は MCW(4CW)や SCW に比べて高い周波数効率特性を示すことがわかる。

2.5. まとめ

本章では、移動通信システムにおける MIMO 通信の適応制御によるスループット（周波数効率）の向上について述べた。

はじめに、MIMO 通信の適応制御方法としてストリーム独立制御の MCW とストリーム共通制御の SCW についての性能評価を行った。その際に各制御方法に適した干渉抑圧方式として MCW では干渉キャンセラ（SIC）受信を、SCW ではプリコーディング送信をそれぞれ適用した。その結果、MCW は各 CW において適応制御をおこなうことで MIMO チャネルを最大限活用できるため高い周波数効率が得られることがわかった。さらに MCW に SIC 受信を適用することで、受信処理における干渉を抑圧した後段の処理において高いダイバーシティ利得が得られることがわかった。次に、これらの方式について適応制御のためのオーバーヘッドを考慮して、実運用を想定した適応制御を実装したシミュレーションによる定量的な評価を行った。その結果、4x4 アンテナ構成時の高 SINR 領域において、MCW+SIC が SCW+Precoding に比べて 15%程度高い周波数効率が得られることを確認した。しかしながら、4x4 アンテナ構成時の MCW では、セル端のような低 SINR 環境において周波数効率が低下することがわかった。解析の結果、受信 SINR の測定誤差が MCS 選択の精度が低下させていることがわかった。そこで、この低 SINR 領域における MCS 選択精度を改善するために、CW あたり 2 ストリーム割り当てる 2CW-MCW を提案した。更なる性能改善を図るために、各ストリームの品質に応じて適応的にストリームを割り当てる方法を提案した。この提案方式 2CW-MCW では、低 SINR 領域において、MCW(4CW) より 20%程度周波数効率が改善できることを確認した。これは、SCW+Precoding に近い特性である。また、高受信 SINR 領域では、2CW-MCW は MCW(4CW)より約 3%周波数効率特性が改善した。これは、CW 数が半減したことで、適応制御のためのオーバーヘッドが 4CW では 17%であったものが 2CW では 12%に減ったことが寄与したものである。

以上のように、提案方式である 2CW-MCW により、低から高受信 SINR 領域までにわたって周波数効率の向上（平均で 11.5%の改善）を実現できた。これにより、提案方式は基地局近傍からセル境界付近に至るシステム全体の範囲にわたって有効な方式であると結論づけられる。また、通信システムにおいて通常運用される状況において重要となる高 SINR 領域において、提案方式は高い周波数効率特性を示す有効な方式であることも確認した。

参考文献

- [2-1] Ezio Biglieri, “MIMO wireless Communications”, Cambridge University Press, 2007.
- [2-2] George Tsoulos, “MIMO System Technology for Wireless Communications”, CRC press, 2006.
- [2-3] 3GPP TR25.814 v7.0.0, “Physical Layer Aspects for Evolved UTRA”
- [2-4] Yasuaki Yuda, Katsuhiko Hiramatsu, Masayuki Hoshino and Koichi Homma, “A Study on Link Adaptation Scheme with Multiple Code Words for Spectral Efficiency Improvement on OFDM-MIMO Systems”, IEICE Trans. Fundamentals. Vol. E90-A, No.11, pp.2413-2422, 2007.
- [2-5] Seong Taek Chung, A.Lozano and H.C.Huang, “Approaching eigenmode BLAST channel capacity using V-BLAST with rate and power feedback”, Proc. IEEE VTC 2001 Fall, October. 2001.
- [2-6] Howard Huang, Sivarama Venkatesan, Achilles Kogiantis and Nearesh Sharma, “Increasing the peak data rate of 3G downlink packet data systems using multiple antennas”, Proc. IEEE VTC 2003 Spring, April, 2003.
- [2-7] Q. Li and X. E. Lin, “Compact Feedback for MIMO-OFDM System over Frequency Selective Channels”, Proc. IEEE VTC 2005 Spring, May, 2005.
- [2-8] D. J. Love and R. W. Heath, “Limited Feedback Unitary Precoding for Spatial Multiplexing Systems”, IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, no. 8, pp.2967–2976, August, 2005.
- [2-9] M. Morelli and U. Mengali, “A Comparison of Pilot-Aided Channel Estimation Methods for OFDM Systems”, IEEE Trans. On Signal Processing, Vol.49, December, 2001.
- [2-10] 3GPP TR25.943 v6.0.0, “Deployment aspects”
- [2-11] Kai Yu, M.Bengtsson, B.Ottersten, D.McNamara, P.Karlsson and M.Beach, “Modeling of wide-band MIMO radio channels based on NLoS indoor measurements”, IEEE Trans. On Vehicular Technology, Vol.53, May, 2004.
- [2-12] 3GPP TR25.858 v5.0.0, “HSDPA Physical Layer Aspects”
- [2-13] 3GPP R1-062831, October, 2006
- [2-14] 3GPP R1-061125, May, 2006

3. 無線中継通信システムにおける協調通信に関する研究

3.1. はじめに

無線中継通信システムは基地局からの信号を中継局により無線中継して、端末に信号を送送する無線通信方式である。これにより、基地局から遠い場所や建物内など基地局からの電波状況が悪いセル端の端末に対して、中継局から信号を送信することでスループットを向上することができる。また、セル内において基地局からの直接回線の品質に比べて基地局から中継局を介した回線の品質が良好な端末においてもスループットの向上が見込まれる。このように、無線中継通信システムでは、電波状況の悪い場所に限らずシステムの全範囲にわたってスループットの向上が期待されている。端末では基地局からの経路と中継局からの経路といった複数の経路を利用できるため無線中継通信はマルチポイント通信となる。

このように、無線中継通信システムは電波状況の悪い場所の解消やカバレッジの拡大、スループットの向上といった効果が期待できることから、次世代のモバイル通信における必須技術として注目されている。このため第 4 世代のモバイル通信システムである 3GPP LTE-Advanced においても主要機能の 1 つとして検討されている[3-1][3-2]。

中継局は基地局を介して無線回線でネットワーク側と接続される。このため、中継局の設置の際には基地局設置のようなワイヤー敷設を必要としないため、設置コストが安価に抑えられる特徴がある。また、基地局に比べてカバーエリアを絞って運用する場合には、中継局装置自体も基地局装置に比べて規模を縮小できるため、装置コストを抑えることもできる。このように、中継局は基地局に比べて設置容易性が高いため、多数の中継局を展開し、その恩恵を増大させることが可能である。しかしながら、中継局を多数設置すると中継局間では相互に干渉が生じてしまいスループットの低下を引き起こす問題が発生する。

本研究ではこの問題を解決するために、中継局間の送信タイミングを制御することで中継局が他セルに与える干渉を低減してスループットの向上を図る。中継局は送受信同一の周波数を用いるので基地局からの信号を受信するタイミングにおいて自身の送信信号が受信信号に回り込まないように信号の送信を停止する。この中継局が送信停止するタイミングでは他セルに対して干渉を与えないことに着目し、中継局間でこの送信停止タイミングを制御することによる干渉低減方法を 2 方式提案する。提案方式 1 では、基地局から中継局に信号を送信するタイミングを基地局間で異なったタイミングに設定する。この方式により、同一基地局から信号を受信する複数の中継局において同じタイミングで送信を停止するので基地局に接続する端末において高い干渉低減効果が得られる。また提案方式 2 では、基地局から中継局に信号を送信するタイミングを中継局間で異なったタイミングに設定する。この方式により、中継局間で異なったタイミングで送信を停止するので中継局に接続する端末において高い干渉低減効果が得られる。そして、これらの提案方式によるセ

ル間干渉低減効果によりスループットの向上を図る．この提案方式について，3GPP LTE-Advanced の規格標準化で用いられている評価条件に基づいて構成するシステムシミュレーションによりシステム性能を評価する．なお，本研究は著者論文[3-3] (copyright©2011 IEEE)をまとめたものである．

3.2. 無線中継通信システム

3.2.1. 無線中継通信システムの構成

本研究における無線中継通信システム（以下、リレーシステムと記載する）の基本構成を図 3-1 に示す。ここではこのリレーシステムにおける下り回線について検討を行う。このリレーシステムでは、基地局 BS (Base Station) は有線でネットワークに接続し、中継局 RS (Relay Station) は無線で基地局と接続して、この基地局を介してネットワークに接続する構成をとる。そして端末 MT (Mobile Terminal) は基地局もしくは中継局のうちの 1 つに接続して通信を行う。ここで、基地局と中継局の間の通信回線をバックホール回線、基地局もしくは中継局と端末の間の通信回線をアクセス回線と呼ぶ。下り回線におけるデータの流れは次のようになる。基地局はバックホール回線において中継局に対してデータを送信し、中継局はそのデータを受信し一時的に蓄積する。そして中継局はアクセス回線において配下の端末に対して蓄積したデータを送信する。このとき中継局の配下の端末にデータ送信する手順は、基地局におけるデータ送信手順と同じとする。基地局には個別のセル識別子 (ID) が付与されて独立したセルを形成する。また中継局も同様に個別のセル ID が付与されて独立したセルを形成する。ここで基地局が形成するセルをマクロセル、中継局が形成するセルをリレーセルと呼ぶ。このようなシステム構成を用いることで、端末からみると中継局を 1 つの基地局として認識することができる。

この無線中継通信システムは、第 4 世代の移動通信システムとして規格標準化されている 3GPP LTE-Advanced におけるリレーシステムとして採用されている構成である。この LTE-Advanced は第 3.9 世代の移動通信システムである 3GPP LTE (Long Term Evolution) と互換性を維持しつつ、LTE に比べて最大伝送速度の向上やシステム全体のスループットの向上を実現する移動通信システムである。このため LTE-Advanced では、先行システムである LTE の端末をサポートする必要がある。そこで、このような無線中継通信システムの構成を適用することで、先行システムの LTE の端末であっても LTE-Advanced から新規に導入された中継局に接続できるため、LTE-Advanced のリレーシステムの恩恵を享受することが可能となる。

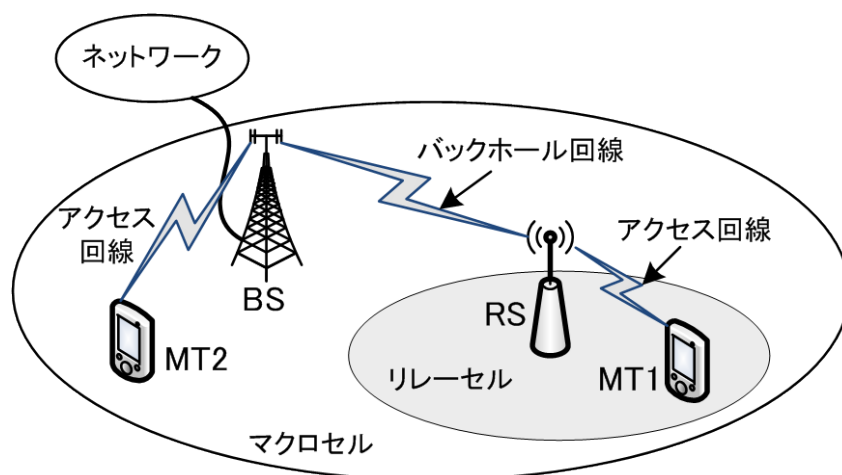


図 3-1 無線中継通信(リレー)システムの基本構成

3.2.2. バックホール回線の送信方法

3.2.1 節で示したリレーシステムにおいてバックホール回線とリレーセルのアクセス回線を同じ周波数帯域で運用する。このようなリレーシステムでは、中継局において基地局からの信号を受信する周波数帯域と端末への信号を送信する帯域が同じとなる。この場合、中継局において基地局からの信号の受信と端末への信号の送信を同時に行うと、送信信号が受信信号に回り込む自己干渉が発生してしまう。この自己干渉では、受信信号電力に対して大きな電力の送信信号が干渉となるため受信性能の低下を招いてしまう。そこでこの自己干渉を回避する必要がある。この自己干渉を回避するために、ここでは中継局における信号送信と信号受信を同時に行うことを禁止する。これを実現するために、バックホール回線とリレーセルのアクセス回線を時間軸で分割し、中継局では基地局からの信号の受信時間と端末への信号の送信時間のオーバーラップを避ける構成とする。この切り替え時間に、LTE-Advanced の無線サブフレームの間隔を用いる。そのサブフレームの間隔は 1 msec である。

図 3-2 にリレーシステムのマクロセルの下りアクセス回線におけるサブフレーム構成を示す。また、同図にあわせてバックホール回線とリレーセルのアクセス回線におけるサブフレーム割当例を示す。図中のボックスは、下り回線における 1 つのサブフレームを示している。ボックス列は、上段から基地局 BS (マクロセル) のサブフレーム、マクロセル端末のサブフレーム、中継局 RS (リレーセル) のサブフレーム、リレーセル端末のサブフレームをそれぞれ示している。ここで、サブフレーム $\{n+1, n+4\}$ に、バックホール回線が割り当てられているとする。このサブフレームをバックホールサブフレームと呼ぶ。このバックホールサブフレームでは、基地局はマクロセル端末に向けたデータ送信とあわせて中継局にもデータを送信する。このとき中継局は基地局からのデータを受信し、リレーセル

端末へのデータ送信は停止する。バックホールサブフレーム以外のサブフレームでは、中継局も基地局同様に、リレーセル端末に向けてデータを送信する。マクロセル端末は全サブフレームでデータを受信できるが、リレーセル端末はバックホールサブフレーム以外のサブフレームに限定してデータを受信する。

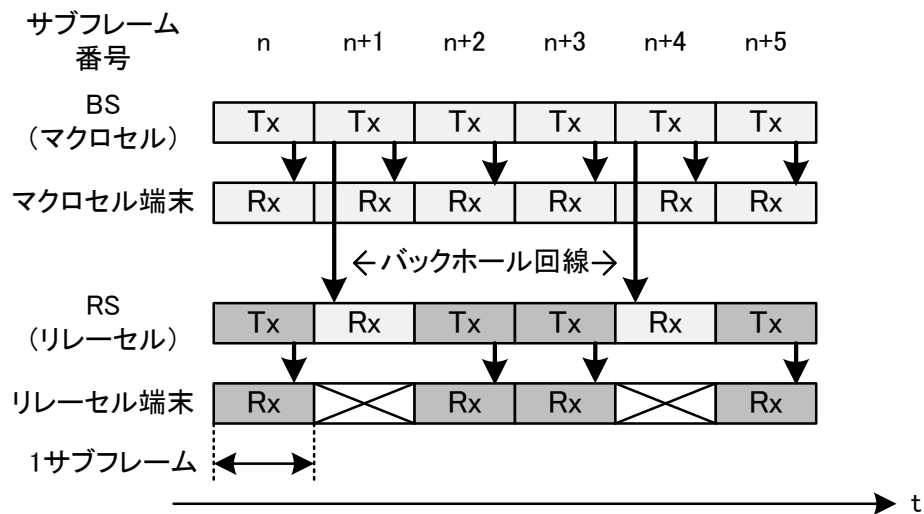


図 3-2 リレーシステムにおける下り回線サブフレーム構成

3.3. 無線伝送中継システムにおけるセル間干渉およびその抑圧方法

3.3.1. 無線中継通信システムにおけるセル間干渉

3.1節で述べたように中継局を複数設置すると、中継局の恩恵を享受できる端末の数が増えるためシステム全体のスループットを改善することが期待される。一方で、中継局を多数設置すると、基地局が形成するマクロセルに対してや中継局が形成するリレーセル間でセル間干渉が増大してしまうためシステム全体のスループット改善を低下させる。

ここでは端末における受信 SINR (信号対干渉および雑音電力比) について解析する。\$M\$ はマクロセル番号の集合 (\$M = \{m | 1 \leq m \leq M\}\$), \$M_{\bar{h}}\$ は第 \$h\$ 番目のマクロセルを除いたマクロセルの番号の集合 (\$M_{\bar{h}} = \{m | m \in M \cap m \neq h\}\$) を示す。\$R_m\$ は第 \$m\$ 番目のマクロセル内のリレーセル番号の集合 (\$R_m = \{r | 1 \leq r \leq R_m\}\$), \$R_{m,\bar{k}}\$ は第 \$m\$ 番目のマクロセル内の第 \$k\$ 番目のリレーセルを除いたリレーセル番号の集合 (\$R_{m,\bar{k}} = \{r | r \in R_m \cap r \neq k\}\$) を示す。第 \$h\$ 番目のマクロセルに接続するマクロセル端末の受信 SINR \$SINR_{mMT}\$ と、そのマクロセル内の第 \$k\$ 番目のリレーセルに接続するリレーセル端末における受信 SINR \$SINR_{rMT}\$ は、それぞれ次の式のように表せる。

$$SINR_{mMT} = \frac{S_{M(h)}}{\sum_{m \in M_{\bar{h}}} I_{M(m)} + \sum_{r \in R_k} I_{R(h,r)} + \sum_{m \in M_{\bar{h}}} \sum_{r \in R_m} I_{R(m,r)} + N} \quad (3-1)$$

$$SINR_{rMT} = \frac{S_{R(h,k)}}{\sum_{m \in M} I_{M(m)} + \sum_{r \in R_{h,\bar{k}}} I_{R(h,r)} + \sum_{m \in M_{\bar{h}}} \sum_{r \in R_m} I_{R(m,r)} + N} \quad (3-2)$$

ここで、\$S_{M(h)}\$ および \$S_{R(h,k)}\$ はマクロセル端末およびリレーセル端末におけるそれぞれの接続セルからの所望信号受信電力を示す。また、\$I_{M(m)}\$ は \$m\$ 番目のマクロセルからの干渉電力、\$I_{R(h,r)}\$ は \$h\$ 番目のマクロセル内の \$r\$ 番目のリレーセルからの干渉電力、そして \$I_{R(m,r)}\$ は \$m\$ 番目のマクロセル内の \$r\$ 番目のリレーセルからの干渉電力をそれぞれ示す。\$N\$ は端末における熱雑音電力である。式(3-1)は中継局における受信 SINR としても適用できる。

式(3-1)および(3-2)における分母の第 1 項はマクロセルからの干渉電力を示し、第 2 項は第 \$h\$ 番目のマクロセル内のリレーセルからの干渉電力を示している。そして、第 3 項は他のマクロセルに属するリレーセルからの干渉電力を示している。これらの式から分母に含まれる干渉電力を低減することで SINR が改善することを期待できる。基地局は全サブフレームにわたって信号を送信するため、基地局が他セルに与える干渉はサブフレーム間でほとんど変動しない。一方で、中継局はバックホールサブフレームにおいて送信を停止するため、中継局が他セルに与える干渉はサブフレーム毎に変動することになる。

3.3.2. セル間干渉抑圧方法の提案

中継局はバックホールサブフレームにおいて信号送信を停止するため、このサブフレームでは他セルに干渉を与えない。この現象に着目してバックホールサブフレームのタイミングを制御することでリレーシステムにおける中継局の与干渉を低減する方法を提案する。ここでは、図 3-3 に示すリレーシステムにおける下り回線信号の様子を用いて説明する。図 3-3 では、基地局が 2 つあり、各基地局にはそれぞれ 2 つの中継局が接続しているシステムを示している。各基地局にはそれぞれマクロセル端末が接続し、各中継局にもそれぞれリレーセル端末が接続している。図 3-3 中の①～④はそれぞれ各中継局に対するバックホール回線を示している。

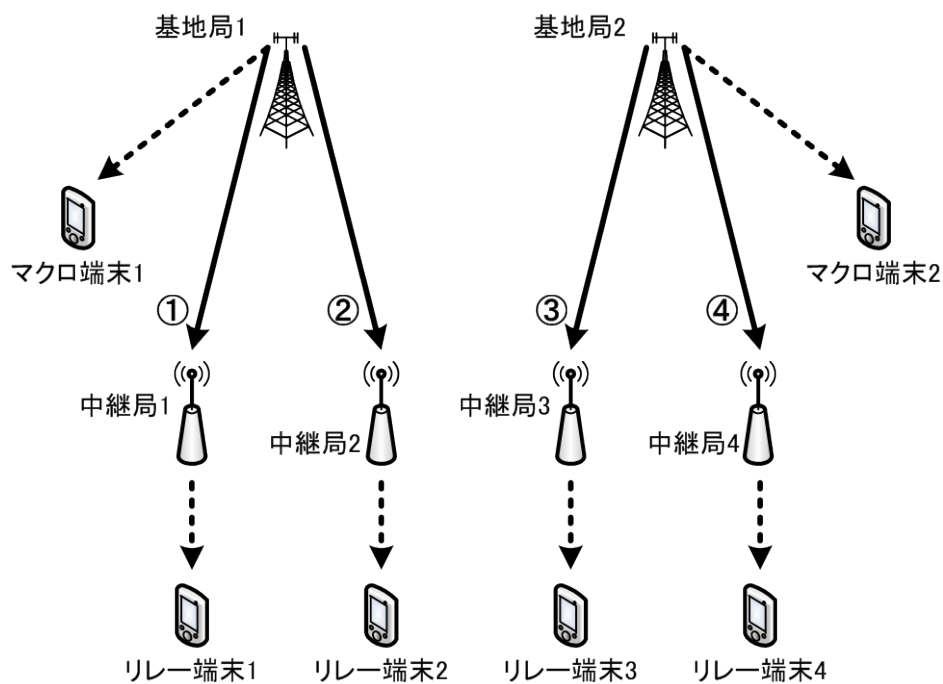


図 3-3 無線中継通信システムにおける下り回線信号

従来方式

バックホールサブフレームのタイミングについて特に制御を行わない場合を従来方式とする。この従来方式では、全ての基地局においてバックホールサブフレームを同じタイミングとする。つまり、図 3-3 における回線①～④のバックホールサブフレームのタイミングを同一に設定する。この方式におけるサブフレーム構成を図 3-4 に示す。この方式では、基地局 1 および基地局 2 に接続するマクロセル端末は、バックホールサブフレームにおいて中継局からの干渉を受けない。このサブフレームにおけるマクロセル端末の受信 SINR は、次式のように表せる。

$$SINR_{mMT} = \frac{S_{M(h)}}{\sum_{m \in M_{\bar{h}}} I_{M(m)} + N} \quad (3-3)$$

バックホールサブフレームでは全ての中継局が送信停止するので、各マクロセル端末における受信 SINR は改善する。しかし、このバックホールサブフレームでは、基地局は送信リソースの多くを中継局向けに割り当ててしまう。これは、中継局が接続するリレーセル端末に送信するデータをバックホールサブフレームにおいて基地局から中継局に全て送信しなければならないうえに、1つのバックホールサブフレームを複数の中継局で共有しなければならないためである。このためこの受信 SINR の改善の恩恵を受けるマクロセル端末は少数に限定されてしまう。バックホールサブフレーム以外における受信 SINR は、マクロセル端末とリレーセル端末それぞれ式(3-1)と(3-2)により表せる。

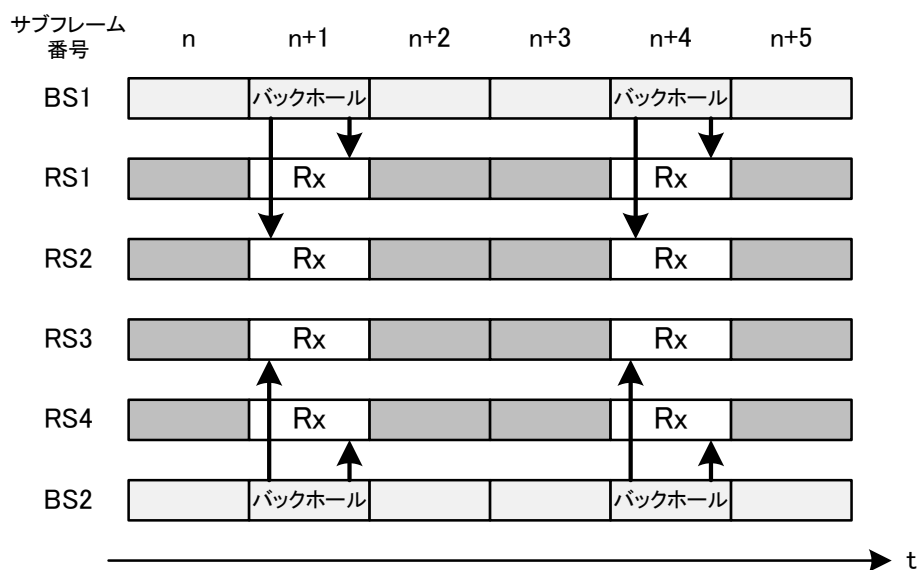


図 3-4 従来方式におけるバックホールサブフレームの設定方法

提案方式 1： 基地局個別バックホールサブフレームタイミング設定方式

提案方式 1 では、各基地局において異なったバックホールサブフレームのタイミングを設定する。図 3-3 において、基地局 1 に関する回線①と②におけるそれぞれのバックホールサブフレームのタイミングを同一に設定する。基地局 2 に関する回線③と④についても同様にバックホールサブフレームのタイミングを同一に設定する。そして、回線①と②のバックホールサブフレームと、回線③と④のバックホールサブフレームのタイミングは重ならないように設定する。この提案方式におけるサブフレーム構成を図 3-5 に示す。この提案方式では、サブフレーム $\{n+1, n+4\}$ において、基地局 1 に接続するマクロセル端末は中継局 1 と中継局 2 から干渉を受けない。このサブフレームにおける h 番目のマクロセルに接続するマクロセル端末の受信 SINR は次式により表せる。

$$SINR_{mMT} = \frac{S_{M(h)}}{\sum_{m \in M_{\bar{h}}} I_{M(m)} + \sum_{m \in \eta_{\bar{h}}(n+1)} \sum_{r \in R_m} I_{R(m,r)} + N} \quad (3-4)$$

ここで、 $\eta_{\bar{h}}(n+1)$ は $M_{\bar{h}}$ のサブセットである。 $\eta_{\bar{h}}(n+i)$ は、第 $(n+i)$ サブフレームにおいてデータ送信している中継局が接続する基地局の番号のセットを示している。式(3-4)における全干渉量は、干渉源となる中継局の数が減少しているので式(3-1)における全干渉量より小さい。しかしながら、従来方式と同じ理由により、この干渉低減の恩恵を受けられるマクロセル端末の数は少数に限られる。

サブフレーム $\{n+2, n+5\}$ では、隣接する基地局 2 がバックホールサブフレームを設定している。このサブフレームでは、基地局 1 に接続するマクロセル端末 1 および中継局 1 と中継局 2 に接続するリレーセル端末 1 と 2 において、基地局 2 に接続する中継局 3 と 4 からの干渉を受けない。このサブフレームにおける、 h 番目のマクロセルに接続するマクロセル端末と h 番目のマクロセル内の k 番目のリレーセルに接続するリレーセル端末における受信 SINR は、それぞれ次式のように表せる。

$$SINR_{mMT} = \frac{S_{M(h)}}{\sum_{m \in M_{\bar{h}}} I_{M(m)} + \sum_{r \in R_k} I_{R(h,r)} + \sum_{m \in \eta_{\bar{h}}(n+2)} \sum_{r \in R_m} I_{R(m,r)} + N} \quad (3-5)$$

$$SINR_{rMT} = \frac{S_{R(h,k)}}{\sum_{m \in M} I_{M(m)} + \sum_{r \in R_{h,\bar{k}}} I_{R(h,r)} + \sum_{m \in \eta_{\bar{h}}(n+2)} \sum_{r \in R_m} I_{R(m,r)} + N} \quad (3-6)$$

ここで、 $\eta_{\bar{h}}(n+2)$ は $M_{\bar{h}}$ のサブセットである。式(3-5)と(3-6)における全干渉量は、式(3-1)と(3-2)における全干渉量に比べて小さくなっている。このように、隣接マクロセル内の中継局が送信停止しているサブフレームでは、マクロセル端末とリレーセル端末ともに SINR の改善が得られる。

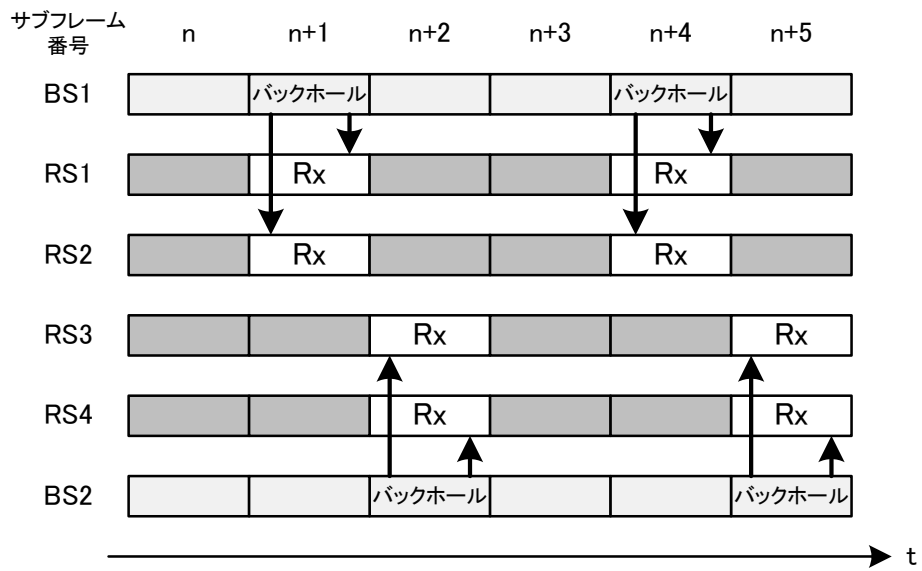


図 3-5 提案方式 1 におけるバックホールサブフレームの設定方法

提案方式 2 中継局個別バックホールサブフレームタイミング割当方法

提案方式 2 では、同一基地局に接続する各中継局において異なったバックホールサブフレームのタイミングを設定する。図 3-3 において、基地局 1 に接続する中継局 1 と中継局 2 に関する回線①と②におけるそれぞれのバックホールサブフレームのタイミングが重ならないように設定する。回線③と④についても同様に設定する。そして、回線①と②のバックホールサブフレームと、回線③と④のバックホールサブフレームのタイミングは同一に設定する。この提案方式 2 におけるサブフレーム構成を図 3-6 に示す。この提案方式では、バックホールサブフレームが複数サブフレームに渡って分散している。このため、マクロセル端末とリレーセル端末の双方において、式(3-1)の状況に比べて全サブフレームに渡り干渉が低減される。サブフレーム $\{n+1, n+4\}$ において、マクロセル端末とリレーセル端末は中継局 2 からの干渉を受けるものの、中継局 1 からの干渉は受けない。この場合の、マクロセル端末とリレーセル端末の受信 SINR は、次式のように表せる。

$$SINR_{mMT} = \frac{S_{M(h)}}{\sum_{m \in M_{\bar{h}}} I_{M(m)} + \sum_{r \in \zeta_k(n+1)} I_{R(h,r)} + \sum_{m \in M_{\bar{h}}} \sum_{r \in \zeta_m(n+1)} I_{R(m,r)} + N} \quad (3-7)$$

$$SINR_{rMT} = \frac{S_{R(h,k)}}{\sum_{m \in M} I_{M(m)} + \sum_{r \in \zeta_{h,\bar{k}}(n+1)} I_{R(h,r)} + \sum_{m \in M_{\bar{h}}} \sum_{r \in \zeta_m(n+1)} I_{R(m,r)} + N} \quad (3-8)$$

ここで、 $\zeta_m(n)$ は R_m のサブセットである。 $\zeta_m(n+i)$ は、サブフレーム $\{n+i\}$ において、 m 番目のマクロセルのデータ送信している中継局の番号のセットを示している。また、 $\zeta_{h,\bar{k}}(n)$ は $R_{m,\bar{k}}$ のサブセットである。 $\zeta_{h,\bar{k}}(n+i)$ は、サブフレーム $\{n+i\}$ において、 m 番目のマクロセルにおいてデータ送信している中継局の番号のセットを示している。式(3-7)と(3-8)における全干渉量は、式(3-1)と(3-2)における全干渉量より小さくなる。

バックホールサブフレームが分散することによって、基地局 1 において中継局に対して割り当てる無線リソースは、複数サブフレームに渡って分散される。これにより、マクロセル端末は、従来方式に比べて隣接中継局からの干渉が低減されたサブフレームにおいて割り当てられる機会が増えるので、干渉低減効果の恩恵を受けることができる。

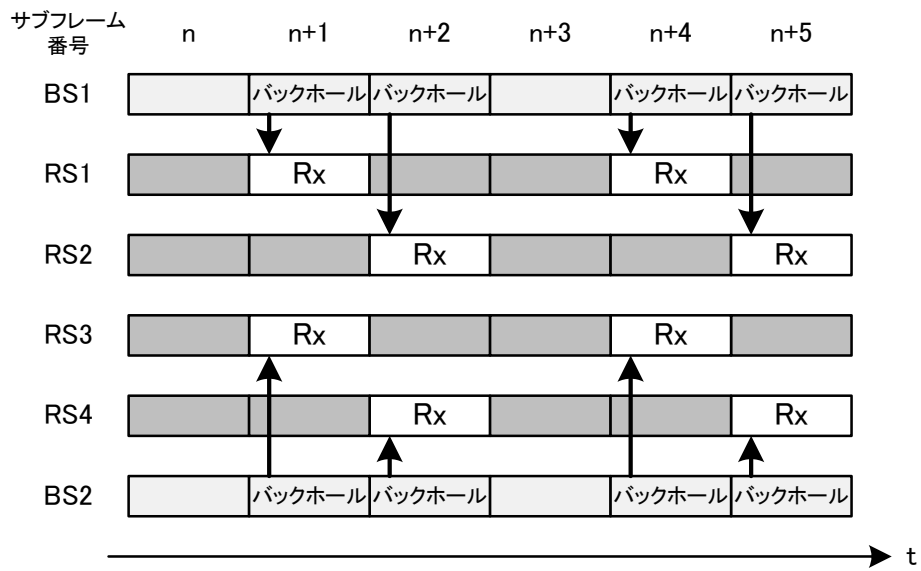


図 3-6 提案方式 2 におけるバックホールサブフレームの設定方法

3.4. シミュレーション評価

3.3.2 節で提案したセル間干渉低減方法を、システム全体を模擬してその性能を評価するシステムシミュレーションを用いて評価を行う。システムシミュレーションは 3GPP LTE-Advanced の規格標準化において定められている文献[3-9]に記載の評価条件に基づいて構成している。この評価条件ではシステム構成、伝搬路のパラメータ、データの生成方法など細部にわたってモデル化されているためシステム全体の性能を高い精度で評価できることから、規格標準化においてシステム性能を評価する手法として用いられている。ここでは、システムシミュレーション方法および条件を説明し、続いて評価結果を示す。

3.4.1. シミュレーション方法

本研究では、システムシミュレーションを用いてシステム性能を評価する。システムシミュレーションは、複数の基地局、中継局、端末が存在する複数セル環境の通信システムを模擬してスループット特性などのシステム性能を評価するものである。

本研究で用いるシステムシミュレーションの手順を簡単に説明する。

1. 基地局、中継局、端末を配置してシステムを構成する。本研究のシステムシミュレーションで用いるシステム構成を図 3-7に示す。図 3-7において1つの六角形をサイトと呼び、19サイトでシステムを構成する。1サイトの中心に基地局を配置して、1つのサイトを3等分したエリアをマクロセルとする。中継局と端末はマクロセル内に所定の数をランダムに配置する。また、このシステム構成では、19サイトのを繰り返し配置することで、システム内のどの場所であっても同じ干渉状況を作り出している。また、異なる方式を評価する場合には、配置の違いによる特性への影響を排除するために同一の配置を用いる。
2. 手順1で構成したシステムでシミュレーションを開始する。まず、端末の接続先を決定する。各端末において各基地局および中継局からの平均受信電力レベルを測定し、その平均受信電力レベルが最大となる局をその端末の接続先として選択する。各局から端末までの伝搬路において距離減衰やシャドーイングをモデル化して平均受信電力を測定する。
3. 端末にデータ送信を行う接続先（基地局/中継局）において必要となる瞬時の伝搬路情報を端末側で測定して接続先に報告する。伝搬路には端末の移動速度を考慮した時間変動があるマルチパス周波数選択性フェージング伝搬路を用いる。
4. 接続先（基地局/中継局）では、端末から報告された伝搬路情報を使ってデータ送信する無線リソースの割当を行う。この無線リソースの割当機能をスケジューリングと呼ぶ。このスケジューリング結果に基づいて、基地局/中継局は各端末に対してデ

- ータを送信する.
5. 端末側においてデータ受信を行う. システムシミュレーションでは端末側における受信SINRを測定して, この受信SINRに基づいて受信データの受信可否の判定を行う. 受信SINRの測定では, 接続先からの所望信号および干渉局からの干渉信号はマルチパスフェージングの影響を受ける.
 6. 手順3から5を複数サブフレームにわたって繰り返し行う. その結果, システム全域における受信SINR特性やスループット特性を評価する.

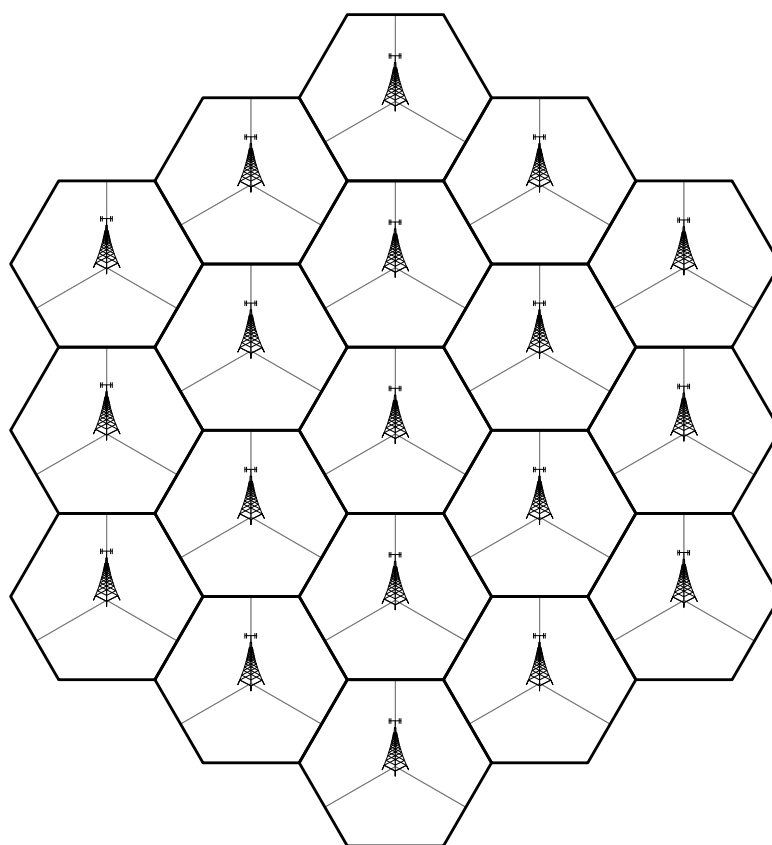


図 3-7 シミュレーションにおける 19 サイトシステムの構成

3.4.2. シミュレーション条件

主なシミュレーション条件を表 3-1に示す。このシミュレーション条件はLTE-Advancedのリレー評価条件に基づいている[3-9]。システム構成は19サイト-57マクロセル（1サイトあたり3マクロセルから構成）のマルチセル環境とする。基地局は各サイトの中央に配置してサイトを3等分した領域をマクロセル領域とする。中継局は各マクロセル領域に一様分布に4台配置する。端末は同様に25台配置する。中継局に関する伝搬路モデルには、文献[3-9]に記載のモデルを適用する。

本評価では、各端末は下り回線の平均受信電力レベルが最大のセル（マクロセル/リレーセル）に接続する。マクロセル端末とリレーセル端末の比率はそれぞれ約60%および40%であった。各回線では、伝搬路の品質を示すCQI（Channel Quality Indicator）報告に基づいて、送信データの符号化率と変調方式（MCS：Modulation and Coding Schemes）を適用的に制御する。本評価では、ターゲットパケット誤り率を10%として適応制御を行う。各基地局は10サブフレーム中の4サブフレームをバックホールサブフレームに設定する。つまり、この4サブフレームにおいて中継局は基地局からのデータを受信する。しかし、基地局では、このバックホールサブフレームにおいて中継局へのデータ送信だけでなく、マクロセル端末へのデータ送信も行うことができるものとする。この基地局が送信するバックホールサブフレームにおける中継局に対して割り当てるリソースは、次式により算出する[3-8]。

$$R_{\text{Backhaul}} = \frac{N_{\text{RelayCell}}}{N_{\text{Total}}} \quad (3-9)$$

ここで、 $N_{\text{RelayCell}}$ はターゲットの中継局に接続する端末の数であり、 N_{Total} は送信側となるその基地局がデータを供給する全て端末の数とする。また、1つの基地局において複数の中継局に対してデータを割り当てる場合、リソースの割り当てではPFスケジューラで決定する。この場合、1つの基地局に2つの中継局が接続し、それらの中継局が同等の品質（SINR）であれば同等のスループットになる。

表 3-1 シミュレーション条件

パラメータ	条件
キャリア周波数	2.0 GHz (10MHz 帯域)
サブキャリア間隔	15 kHz
サブキャリア数	600
サイト間距離	500 m
セル配置	Hexagonal grid, 19 サイト, 3 マクロセル/サイト
送信電力	BS : 46dBm, RN : 36dBm
チャンネルモデル	Relay チャンネルモデル[3-9]
アンテナ構成	Tx:1, Rx:2
周波数リソース割当単位	180 kHz (12 サブキャリア)
トラフィックモデル	Full buffer モデル
スケジューリング	PF (Proportional Fairness) スケジューラ
CQI フィードバック遅延	10 サブフレーム
中継局数	マクロセルあたり 4 中継局
端末数	マクロセルあたり 25 端末
バックホールサブフレーム数	4 サブフレーム (10 サブフレームあたり)

3.4.3. シミュレーション結果

シミュレーション結果を示す。まず受信 SINR 特性の結果を示して、次にスループット特性を示す。

受信 SINR 特性

図 3-8 と図 3-9 では、各干渉抑圧方式におけるマクロセル端末とリレーセル端末の受信 SINR の累積分布関数 (Cumulative Distribution Function : CDF) 特性をそれぞれ示す。これらの図では、横軸は受信 SINR を、縦軸は受信 SINR の累積分布をそれぞれ示している。この受信 SINR の CDF 特性のグラフについて簡単に説明する。このグラフでは、横軸で示す受信 SINR 以下となる端末がシステム全体の中にどの程度の割合で存在するかを示している。例えば、図 3-8 のグラフでは、受信 SINR=10dB となる CDF が約 60%である。これは、受信 SINR が 10dB 以下となる端末がシステム全体の中で約 60%存在していることを示している。そして、同一の受信 SINR において異なる CDF の値を比較する場合、より小さな値の方が良好な特性である。また、同一の CDF の値において受信 SINR を比較する場合、より高い SINR の方が良好な特性である。このことから、2つの CDF 特性のグラフを比較する場合には、右側にあるグラフの方が良好な特性となる。

図 3-8 と図 3-9 の結果から、提案方式 1 と提案方式 2 の受信 SINR 特性は従来方式の受信 SINR 特性より改善していることがわかる。図中に CDF 50%のポイントにおける従来方式に対する提案方式 1 および 2 の受信 SINR の改善量を示す。図 3-8 のマクロセル端末の受信 SINR 特性から、マクロセル端末では従来方式に比べて提案方式 1 および提案方式 2 における受信 SINR 特性がわずかに改善していることがわかる。一方で、図 3-9 のリレーセル端末の受信 SINR 特性から、リレーセル端末では従来方式に比べて提案方式 1 および提案方式 2 において受信 SINR 特性がマクロセル端末に比べて大きく改善していることがわかる。これについて以下の理由が考えられる。まず、従来方式では中継局が同じタイミングで送信停止しているためリレーセル端末に対して干渉低減効果がない。これに対して、提案方式 1 および提案方式 2 では、中継局が送信停止しているサブフレームのタイミングがずれている。このため、特にリレーセル端末において中継局が送信停止しているタイミングにおいてその中継局からの干渉低減効果が得られるため受信 SINR が改善したものと考えられる。

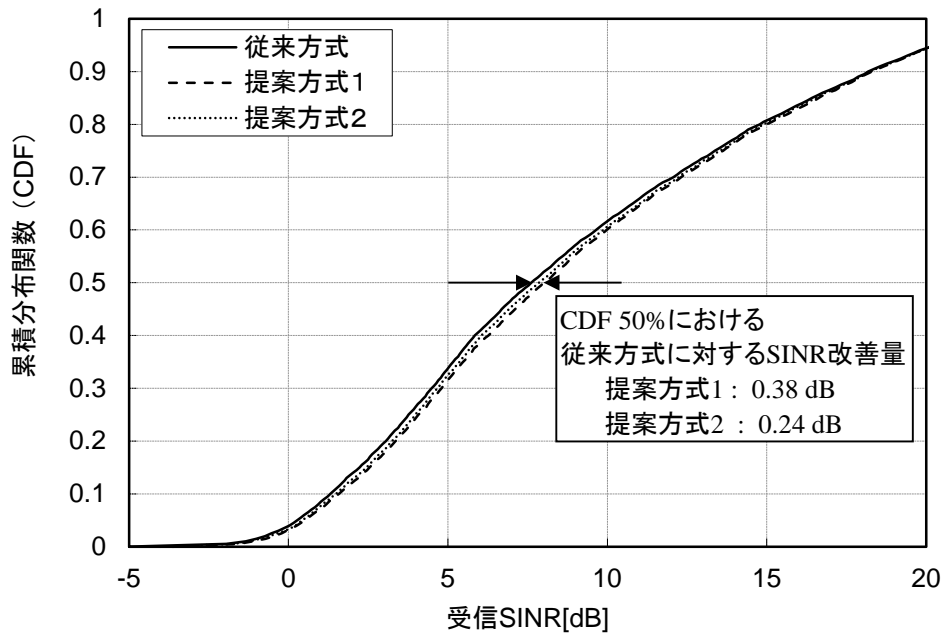


図 3-8 マクロセル端末における受信 SINR の CDF 特性

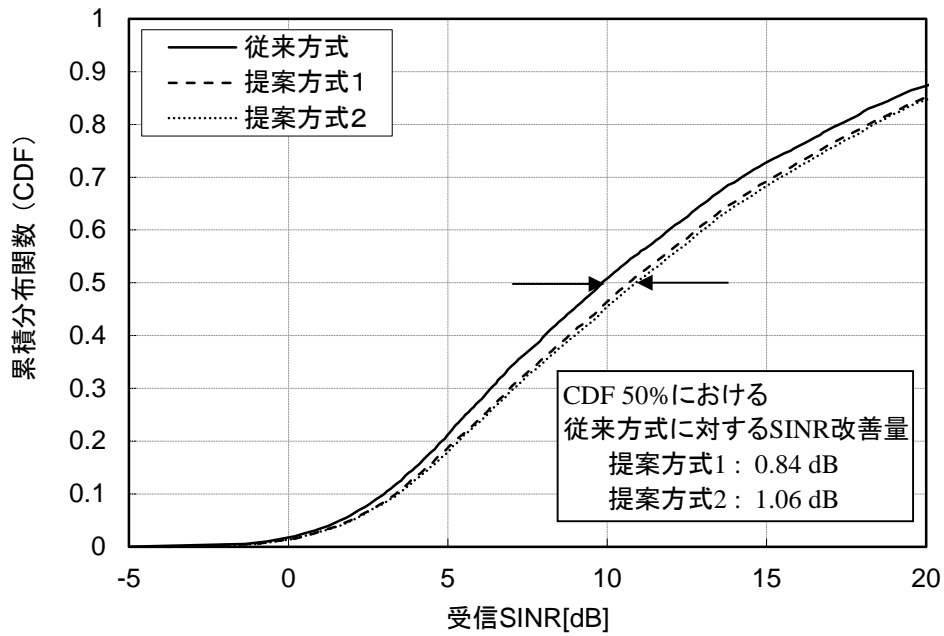


図 3-9 リレーセル端末における受信 SINR の CDF 特性

各方式の評価において、基地局、中継局、端末を同じ位置に配置し、かつシステム構成を同じ条件としている。これは配置位置の違いによるスループットへの影響を排除するためである。同じ場所に配置された端末における受信 SINR 特性の差異は、バックホールサブフレームのタイミング制御に起因する特性差である。そこで、同じ場所に配置された端末における従来方式に対する提案方式 1 および提案方式 2 の受信 SINR の改善量について詳細な分析を行う。マクロセル端末とリレーセル端末における従来方式に対する提案方式 1 および提案方式 2 の受信 SINR の改善量を算出し、その SINR の改善量の累積確率分布特性を図 3-10 と図 3-11 に示す。図 3-10 にはマクロセル端末における受信 SINR の改善量を、図 3-11 にはリレーセル端末における受信 SINR の改善量をそれぞれ示す。

図 3-8 と図 3-10 の結果から、マクロセル端末では、提案方式 2 に比べて提案方式 1 において SINR の改善が得られていることがわかる。図 3-10 から、提案方式 1 では 0.1dB 以上の SINR の改善が得られている端末の割合は約 30% である。一方で、提案方式 2 では約 20% である。これは、提案方式 2 では、マクロセル端末はどのサブフレームでも同じマクロセル内のリレーセルからの干渉を何かしら受けるからである。提案方式 1 では、同じマクロセル内の全てのリレーセルから干渉を受けないサブフレームが存在するので、この恩恵を受けた端末において SINR が改善したものである。

図 3-9 と図 3-11 の結果から、リレーセル端末では、提案方式 1 に比べて提案方式 2 の方がより高い改善が得られていることがわかる。図 3-11 から、提案方式 1 では、0.1dB 以上の改善が得られる端末の割合は約 40% であるが、提案方式 2 では約 50% であることがわかる。これは、リレーセル端末は隣接するリレーセルがバックホールサブフレームにおいて、その隣接リレーセルの近くにいると、その隣接リレーセルからの支配的な干渉を低減できるからである。

以上の結果から、提案方式 1 はマクロセル端末に対して効果的な方法であり、提案方式 2 はリレーセル端末に対して効果的な方法であることがわかる。

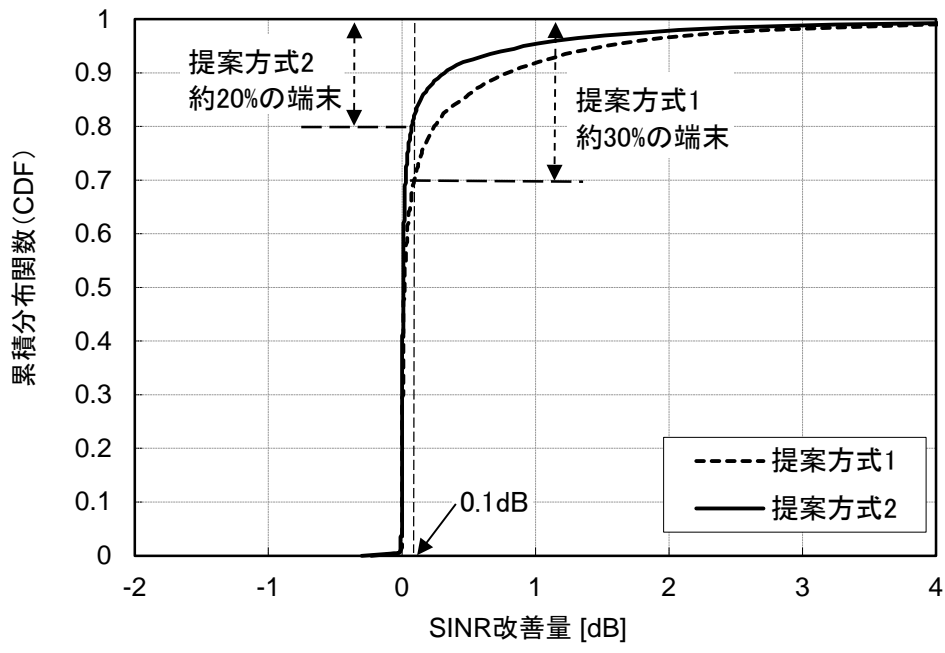


図 3-10 マクロセル端末における受信 SINR の改善量

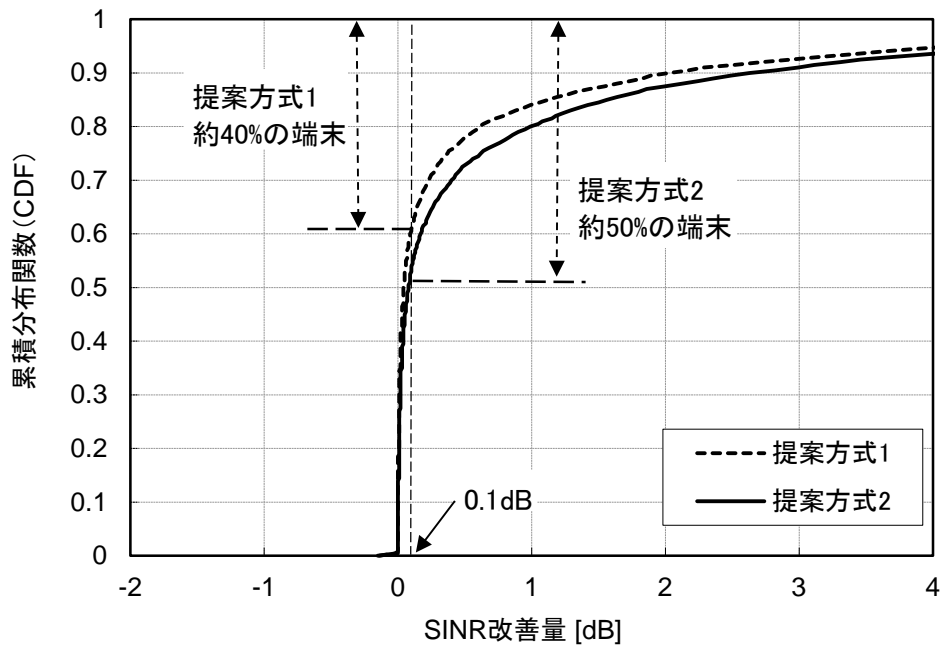


図 3-11 リレーセル端末における受信 SINR の改善量

スループット特性

次に、各干渉低減方法についてスループット特性を比較する。表 3-2 にセル端スループットと平均スループットを示す。セル端スループットは、各端末のスループットの累積分布の下位 5%のスループットとする。また、合計スループット、マクロセルのスループット、リレーセルのスループット、バックホールのスループットの各平均スループットを示す。合計スループットは、マクロセルのスループットとリレーセルのスループットを合計したものである。また、バックホールのスループットは、バックホールサブフレームにおける基地局から中継局へのスループットを示している。比較対象として中継局を配置しないシステム、つまり基地局のみ配置したシステムにおけるセル端スループットとセルスループットをあわせて示す。各評価の際には端末の配置位置の違いによるスループットへの影響を排除するために、端末の配置は同一にする。

表 3-2 の結果から、提案方式 1 と提案方式 2 では従来方式よりセル端スループットにおいて高い改善量が得られている。これは前節において解析した SINR の改善量により得られた効果である。表 3-2 の合計セルスループットの結果から、中継局を用いることで、基地局のみの場合に対して 15%以上のスループットの改善が得られる。また、干渉低減方式について提案方式 1、提案方式 2、従来方式の順に合計セルスループットが高いことがわかる。これは先に述べた干渉低減効果がセルスループットの改善に寄与したためである。

また、リレーセルのスループットが、バックホールのサブフレームに制限されていることがわかる。これは、リレーセルではバックホール回線で受信したデータを送信するのに十分なリソースがあることを示している。リレーセルでは送信するリソースに余裕があることから CQI 報告に基づいて選択される MCS より誤り耐性が強い MCS を選択して送信することが可能である。これは、リレーセルスループットには干渉低減効果は寄与していないことを示している。

リレーセルスループットにおいて干渉低減効果を引き出すためには、バックホールサブフレームにおけるスループットの改善が必要である。本評価では、各中継局に対するバックホールに割り当てられる無線リソース量は、接続する端末数によって決定しているが、バックホール回線に対してより多くの無線リソースを割り当てることで、バックホールのスループットを改善することができる。しかしながら、この手法では、マクロセル端末に対して割り当てる無線リソース量が減ってしまうので、セル端スループットの劣化を引き起こしてしまう可能性がある。

以上の結果から、提案方式 1 ではマクロセル端末の SINR が改善することから、これが寄与してセルスループットが向上する。一方で、提案方式 2 ではリレーセル端末の SINR が改善するが、セルスループットに対する効果は限定的である。以上から、提案方式 1 である基地局個別バックホールサブフレームタイミング方法が、最適なセル間干渉抑圧方法と結論づけられる。

表 3-2 スループット比較

方式	セル端スループット[kbps]	平均スループット [Mbps]			
		合計	マクロセル	リレーセル	バックホール
マクロのみ	216	16.38	-	-	-
従来方式	218	18.97	11.01	7.97	8.18
	+0.9%	+15.8%	-	-	-
提案方式 1	221	19.16	11.12	8.03	8.18
	+2.3%	+17.0%	-	-	-
提案方式 2	220	19.04	10.14	8.90	8.99
	+1.9%	+16.2%	-	-	-

3.5. まとめ

本章では、無線中継通信システムにおいて、協調制御を用いた無線中継通信システムにおけるスループットの向上について述べた。

無線中継通信システムでは、中継局を複数設置することでシステム全体のスループットを向上させることが検討されている。しかしながら、中継局を複数設置することで中継局間が相互に干渉を与えスループット低下を引き起こしてしまう課題がある。

そこで、各基地局から中継局にデータ送信するタイミングを制御する方法を提案して、中継局間の干渉を抑えてスループットの向上を図った。これは、中継局が基地局からのデータを受信しているタイミングでは、その中継局はデータ送信を停止していることに着目したものである。提案方式はバックホールサブフレームを割り当てるタイミングを制御する方法で、基地局毎に異なるタイミングを割り当てる提案方式 1、中継局毎に異なるタイミングを割り当てる提案方式 2 の 2 方式を提案した。

これらの提案方式について、複数セル環境のシステムシミュレーションにより定量評価を行った。受信 SINR 特性の評価の結果から、提案方式 1 はマクロセル端末における受信 SINR の改善が大きくセル間干渉の抑圧効果が高いことが分かった。また、提案方式 2 はリレーセル端末においてセル間干渉の抑圧効果が高いことが分かった。そして、スループット評価による結果より、中継局を用いないシステムに比べて平均スループットでは 15.8%、セル端スループットでは 0.9%の改善が見られた。これに対し提案方式 1 では、平均スループットの改善量は 17.0%、セル端スループットの改善量は 2.3%が得られた。これらの結果から提案方式 1 は効果的なセル間干渉抑圧方法であることがわかった。

参考文献

- [3-1] 3GPP TR36.913 v9.0.0(2009-12), “Requirements for further advancements for E-UTRA(LTE-Advanced)”
- [3-2] 3GPP TR36.912 v9.3.0(2010-06), “Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA(LTE-Advanced)”
- [3-3] Yasuaki Yuda, Ayako Iwata, Daichi Imamira, “Interference Mitigation Using Coordinated Backhaul Timing Allocation for LTE-Advanced Relay Systems,” in Proc. IEEE ICC, June 2011.
- [3-4] W. Lee, M. Nguyen and H. Lee, “A Resource Allocation Algorithm and System Architecture to Extend the Cell Coverage and Alleviate the Inter-Cell Interference,” in Proc. IEEE ISCC, pp.222-227, July 2008.
- [3-5] Y. Zhao, X. Fang, X. Hu, Z. Zhao and Y. Long, “Fractional Frequency Reuse Schemes and Performance Evaluation for OFDMA Multi-hop Cellular Networks,” in Proc. TridentCom, pp.1-5, April 2009.
- [3-6] H. Tian, F. Jiang, X. Wang, X. Tang and J. Zhang, “An Inter-Cell Interference Coordination Scheme for Relay Based Cellular Networks,” in Proc. WiCOM, pp.1-4, Sep. 2009.
- [3-7] M. Liang, F.Liu, Z. Chen, Y. Wang and D. Yang, “A Novel Frequency Reuse Scheme for OFDMA Based Relay Enhanced Cellular Networks,” in Proc. IEEE VTC2009-Spring, pp.1-5, April 2009.
- [3-8] 3GPP R1-101273, February, 2010
- [3-9] 3GPP TR36.814 v9.0.0(2010-03), “Further advancements for E-UTRA physical aspects”

4. 基地局間協調通信システムに関する研究

4.1. はじめに

基地局間協調通信は 1 つの端末に対して複数の基地局が協調して通信を行う通信方式である。これは第 2 章において検討した MIMO 通信における複数送受信点の概念を、離れた場所に設置されている基地局に拡大したマルチポイント通信である。複数の基地局が同じ周波数帯域を用いる通信システムでは、各基地局が端末に干渉を及ぼしあう。特に、基地局のカバーエリアであるセルの境界付近では、隣接セルからの干渉が強いために受信品質が劣化しスループットの低下を引き起こす。このようなセル境界付近における劣悪な通信環境に対して、基地局間協調通信は複数の基地局から協調して送信することで、良好な通信環境を提供することができる。例えば端末がセル境界にいる場合、隣接セルからの信号はこの端末にとって干渉となるが、基地局間協調通信を適用することで隣接セルからの干渉をこの端末に対する所望信号として用いることができる。このためセル境界における端末の受信品質を改善しスループットを向上することができる[4-1][4-2]。このように基地局間協調通信システムはセル境界付近で通信を行う端末のスループット向上が期待できることから、次世代のモバイル通信において必須技術として注目されている。実際に第 4 世代モバイル通信システムである 3GPP LTE-Advanced の規格標準化においても主要機能の 1 つとして検討されてきた[4-3][4-4][4-5][4-6]。LTE-Advanced ではこの基地局間協調通信は CoMP (Coordinated Multi Point transmission and reception) と呼ばれている。

基地局間協調通信では、複数の基地局から協調して送信する際に端末の各基地局に関するチャンネル状態に基づいて制御を行う。このため、協調送信する各基地局に関するチャンネル状態を端末が測定して基地局に報告する必要がある。例えば、2 つの基地局から送信される可能性がある端末は、その 2 つの基地局に関するチャンネル状態を測定して基地局に報告する。一方で、全ての端末において複数の基地局から送信するわけではない。つまり、基地局間協調送信を適用する端末と適用しない端末が混在することになる。基地局間協調送信を適用しない端末では、接続先の基地局 (サービング基地局) に関するチャンネル状態だけを測定し報告する。このように、端末毎にチャンネル状態の報告の数が異なると、基地局における割当処理 (スケジューリング) において各端末が割り当てられる割合に違いが発生する。基地局間協調通信を適用して複数基地局のチャンネル状態を報告する端末のほうが割り当てられる割合が大きくなり端末間の公平性が保たれなくなり平均スループット向上も制限される。

本研究では、端末の割当機会の公平性を確保し、かつ平均スループットを向上させるスケジューリングアルゴリズムの提案を行う。提案アルゴリズムでは、チャンネル状態の報告数を用いた重みづけを導入する。これにより、複数基地局のチャンネル状態を報告する端末への過剰な割当を抑制し、他の端末における割当不足による平均スループットの低下が改

善する。なお、本研究は著者論文[4-7] (copyright©2013 IEICE)をまとめたものである。

4.2. 基地局間協調通信システム

本節では LTE-Advanced における基地局間協調通信システムを例に説明する[4-4]。

4.2.1. 基地局間協調通信方式

基地局間協調通信は、第 2 章において検討した MIMO 通信における複数送受信点の概念を、空間的に異なる場所に設置されている基地局に拡大したマルチポイント通信である。1 つの端末に対して複数の基地局から協調して送信することで干渉制御や回線品質の改善を実現することでスループットを向上できる。この基地局間協調通信は大きく 2 種類の方式に分類できる。1 つは **Joint Processing (JP)** であり、もう 1 つは **Coordinated Beamforming (CB)** である。以下ではこの 2 種類の基地局間協調通信方式について説明する。

Joint Processing (JP)

Joint Processing (JP) では、1 つの端末に送信するデータを複数の基地局で共有しておき、各基地局からデータを送信することができる。基地局間協調通信を用いない従来の通信システム（以下、従来システムと記す）では接続基地局（サービング基地局）以外の基地局から送信される信号は干渉となるが、この基地局間協調通信ではその干渉信号が所望信号となる。このため、受信側において他セル干渉を低減できることから受信品質を改善できる。

この JP はさらに 2 種類の方式に分類できる。**Joint Transmission (JT)** と **Dynamic Point Selection (DPS)** である。JT は 1 つの端末に対して複数基地局から同時にデータを送信する基地局間協調通信方式である。従来システムでは隣接セルから強い干渉を受けるが、JT ではこの干渉が所望信号となるので受信品質を改善できる。また、DPS は端末に対して伝搬路状況が最も良好な基地局を選択して送信する基地局間協調通信方式である。JT では、1 つの端末に対して複数の基地局から同時に同じデータを送信するため送信の効率が低下してしまう。一方で、DPS では、複数の基地局から 1 つの基地局を選択してデータを送信するので JT のような効率の低下は発生しない。

Coordinated Beamforming (CB)

Coordinated Beamforming (CB) では各基地局で協調したアンテナのビーム送信を行う。このビーム送信により隣接セルへの与干渉を低減することで、端末における受信品質を改善することができる。基地局間で協調するビーム形成方法にはさまざまなアルゴリズムがある。しかしながら、所望信号の強度を強めると他セルへの与干渉を高める可能性があり、反対に与干渉を抑えようとするると所望信号も弱める可能性がある、といった様に所望のビ

ム形成が困難である。このような理由もあり、CBはデータを送信する無線リソースの割当を基地局間で協調させる Coordinated Scheduling (CS)と併用することがよく用いられる。

一般にCBに比べてJPの方が良好な特性を示す。それは、JPでは複数の基地局から送信することができるため、基地局間(サイト)ダイバーシティの効果が得られるためである。また、JP方式の中で比較するとDPSに比べてJTの方が複雑度の観点で課題がある。それは、JTでは複数の基地局から同時に送信するため、その同時送信する複数基地局の選択方法や、複数基地局の同時送信時におけるチャネル状態のフィードバック方法などが複雑になるためである。例えば、2つの基地局からJTを行う場合、端末側では、①2つの基地局から送信した合成したチャネルに関する情報、②それぞれの基地局が単独で送信したチャネルに関する情報、といったようにフィードバック方法が複雑になる。また、複数基地局から同じ信号を送信することに起因する受信側における周波数選択性フェージングの発生を抑えるために、基地局間の送信タイミングを調整する必要があるといった課題もある。

以上から、本研究では基地局間協調通信方式として性能と実現性の観点からDPSに限定して検討を行う。

4.2.2. 基地局間協調通信システムの構成

基地局間協調通信システムの構成について説明する。図4-1に基地局間協調通信システムの構成図を示す。基地局間協調通信システムでは、基地局間の協調通信を実現するために複数の基地局を1つの制御装置で集中的に制御するシステム構成を用いる。基地局と制御装置は光ファイバーで接続することを想定して、この間の遅延時間は制御に影響しないものとする。ここで1つの制御装置が制御する範囲を協調エリアと定義する。この協調エリアが協調通信に参加できる基地局を限定するエリアとする。協調エリアを跨ぐ基地局間では協調制御は行わない。

基地局間協調通信システムでは、端末は複数の基地局と通信するがフィードバック情報などの制御情報をやり取りする基地局は1つに限定する。この制御情報を通信する基地局をサービング基地局とする。また、協調通信に参加できる基地局は端末毎にそれぞれ選択される。この協調通信に参加できる基地局を協調基地局とする。この協調基地局の集合を協調セットとする。この協調セットは協調エリア内に含まれる全ての基地局からなる集合のサブセットとなる。また、サービング基地局はこの協調セット内の1つの基地局となる。

図4-1では、端末MT(Mobile Terminal)のサービング基地局はBS1(Base Station)となり、協調セットは集合{BS1, BS2}となる。

次に、このサービング基地局と協調セットの選択方法について説明する。各基地局はそれぞれ個別の参照信号CRS(Cell specific Reference Signal)を送信する。このCRSは端末側で既知の信号であるため端末において基地局から送信された信号の受信電力測定に使うことができる。端末は各基地局から送信されるCRSの受信電力RSRP(Reference Signal

Received Power) を測定する。そして、端末は測定した RSRP をネットワーク側に報告する。端末から報告された RSRP の値に基づいて、その受信電力レベルが最大となる基地局を、その端末のサービング基地局に設定する。ネットワーク側と各端末は、このサービング基地局を経由して送受信データの制御情報を通信する。

そして、ネットワーク側は報告された RSRP の値に基づいて各端末における協調セットを設定する。協調基地局には、協調通信を適用した際に効果が見込める基地局を選択して設定する。このため、協調基地局の選択に時間平均化された RSRP の値を用いる。図 4-2 に協調セットの選択方法を示す。端末から報告された各基地局の RSRP 値がサービング基地局の RSRP 値に対してあらかじめ設定しておいた協調セット選択閾値の範囲内にある場合、その報告 RSRP 値に対応する基地局を協調基地局として選択する。図 4-2 では、BS1 がサービング基地局であり、その RSRP 値を基準として協調セット選択閾値範囲内に含まれる BS2 が協調基地局と選択される。この場合、この端末 MT における協調セットは BS1 と BS2 からなる集合である。

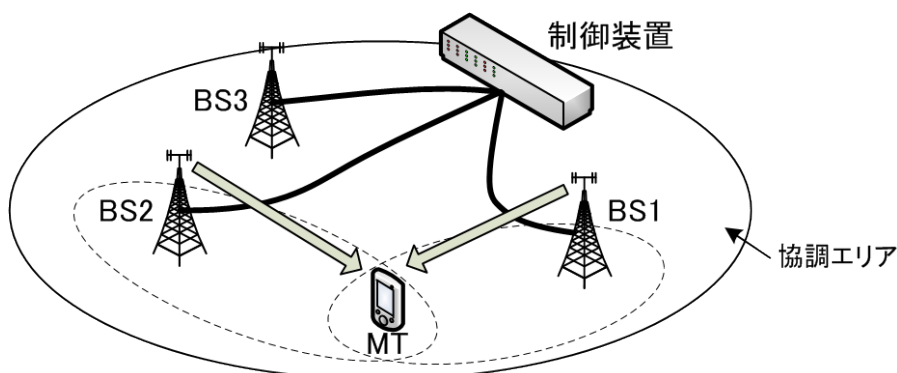


図 4-1 基地局間協調通信システムの構成図

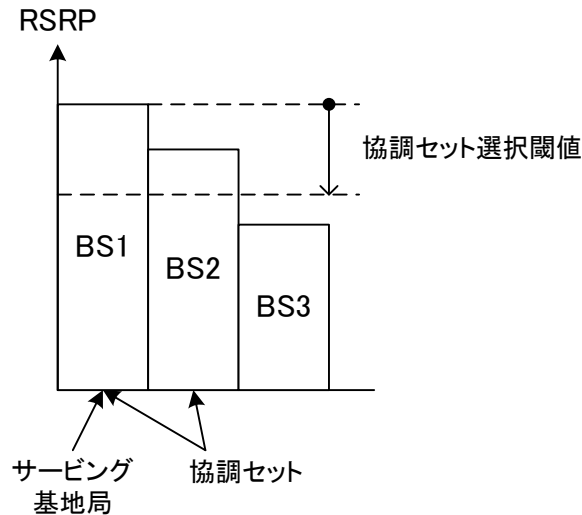


図 4-2 協調セットの選択方法

4.2.3. チャネル状態の報告方法

基地局間協調通信では、協調通信を行うために端末側で測定したチャネル状態情報 CSI (Channel State Information) をネットワーク側に報告する必要がある。ここでは、この CSI の報告方法について説明する。基地局間協調通信では、端末において 4.2.2 節で述べた協調セット内の各基地局に関するチャネル状態を測定する。そして、その測定結果もしくは測定結果に基づいて端末側で選択した送信パラメータをネットワーク側に報告する。LTE-Advanced では、チャネル状態の測定には、チャネル状態測定用の参照信号である CSI-RS (Channel State Information - Reference Signal)を用いる。端末側におけるチャネル状態の測定および報告方法について以下で手順を示す。

手順 1： チャネル状態測定用参照信号 (CSI-RS) の設定

各基地局は CRS に加えてチャネル状態測定用の参照信号 CSI-RS を送信する。この CSI-RS を送信するリソース (OFDM の周波数-時間リソースの一部) は、基地局毎に所定の場所が定められている。ここで、この CSI-RS を送信するリソースを CSI-RS リソースと呼ぶ。協調エリア内の各基地局が送信する CSI-RS は相互に直交している。つまり、各基地局間では異なるリソースを用いて CSI-RS を送信し、ある基地局が CSI-RS を送信する CSI-RS リソースでは、協調エリア内のほかの基地局は送信を停止する。このような CSI-RS の送信方法により、協調エリア内の基地局間では CSI-RS に対して干渉を与えることがないので、端末における CSI-RS 受信で高い SINR を維持できる。端末では、このような CSI-RS を用いることでチャネル状態を高精度に測定できる。

手順 2： CSI 報告の設定

ネットワーク側は各端末に対して協調セットに関する情報とその協調セットに対して測定対象となる CSI-RS リソースを設定する。この CSI-RS リソースの設定では、協調セット中の特定の CSI-RS リソースを、①希望信号測定用リソースとする希望信号成分と、②干渉測定用リソースとする干渉成分に設定することができる。これらの希望信号成分と干渉成分を組み合わせることで一組の CSI 報告を設定することができる。例えば、着目する基地局に対応する CSI-RS リソースを希望信号成分とし、それ以外の CSI-RS リソースを干渉成分として組み合わせて CSI 報告を設定することで、着目した基地局からデータ送信する際のチャネル状態を測定することができる。そして、複数の基地局に対してそれぞれ CSI 報告を設定することで、各基地局のチャネル状態を測定することが可能となる。DPS では、各端末の協調セットに含まれる基地局に対してそれぞれ個別の CSI 報告を設定する。このように複数の CSI 報告を行うことで、ネットワーク側のスケジューラにおいてチャネル状態に応じて最適となる基地局から送信することが可能となる。

手順 3： CSI 測定とその測定結果の報告

上記のようにネットワーク側から通知された CSI 測定に関する情報に従い端末は CSI 測定を行う。そして、端末は測定した CSI 情報をネットワーク側に報告する。CSI の詳細については次節で説明する。

4.2.4. チャネル状態の報告情報

基地局毎の CSI 報告には次の情報が含まれる。

a) ランク情報 RI (Rank Indicator)

MIMO 通信における空間多重数を示す情報である。この RI に基づいて送信側は送信多重数を制御する。

b) プリコーディング行列情報 PMI (Precoding Matrix Indicator)

プリコーディング送信に用いる行列情報である。この PMI に基づいて送信側はプリコーディング送信を行う。プリコーディング行列はあらかじめ複数の候補を定義しておき基地局と端末間で共有しておく。そのプリコーディング行列の集合をプリコーディングコードブックと呼ぶ。PMI はコードブックのうちの特定の行列を指し示す。

c) チャネル品質情報 CQI (Channel Quality Indicator)

通信路の品質を示す情報である。この CQI に基づいて送信側は変調方式と符号化率の組み合わせである MCS (Modulation and Coding Scheme) を制御する。

これらの CSI 報告する情報は、各基地局から送信される CSI-RS を用いて端末側で推定したチャンネル推定値に基づいて導出される。そして、これらの情報はサービング基地局に対して端末から上り回線を用いて報告される。ここで、PMI のコードブックには LTE システムで用いられているもののうち 2 アンテナ送信時のものを用いる。この 2 アンテナ送信時に用いられるプリコーディングコードブックを表 4-1 に示す。表 4-1 のランクは CSI 報告のランク情報 RI に対応しており、ランク 1 のコードブックは 4 つのベクトルから構成され、ランク 2 のコードブックは 2 つの行列から構成される。各ベクトルおよび行列の要素は各送信アンテナにおける送信ウエイトを示している。本研究では、RI と PMI については 10MHz 帯域で一括した制御を適用し、CQI については 1.06MHz に相当する帯域 (LTE システムの 6 リソースブロック) での制御を適用する。

表 4-1 2 アンテナ送信時におけるプリコーディングコードブック

ランク	コードブック
1	$\mathbf{W} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \right\}$
2	$\mathbf{W} = \left\{ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix} \right\}$

4.2.5. 複数 CSI 報告に関する課題

4.2.2 節で述べたように、協調セットに含まれる協調基地局の数は、サービング基地局の受信電力値を基準にした協調セットの選択閾値により決定される。これは、端末側において基地局からの CSI-RS を測定する際にある程度の受信品質 (SINR) を確保するためである。受信電力が低い基地局から送信された CSI-RS は端末における受信品質が低い。このような受信品質が低い CSI-RS を使ってチャンネル推定を行った場合、その推定精度が低いためにその推定結果を使って導出する CSI 報告の精度も低くなる。このような精度の低い CSI 報告を使って協調制御を行うとその影響により特性劣化が生じてしまう。上記のような協調セット選択閾値を用いて協調基地局を選択することで、CSI 報告の精度低下による特性劣化を回避することが可能となる。

このように協調セット選択閾値を用いて協調基地局を選択することで、各端末における協調基地局数が異なるため、端末毎に CSI 報告の数が異なることになる。このように CSI 報告数が端末毎に異なるため、ネットワーク側のスケジューリングアルゴリズムにおける影響や、CSI 報告に含まれるチャンネル推定精度の影響を考慮する必要がある。例えば、CSI 報告数が異なる 2 つの端末について考える。端末 a は単一の CSI 報告を設定され、端末 b

は2つのCSI報告を設定されたとする。ここで、端末bにおける2つのCSI報告は同等の受信品質(SINR)となる2つのCSI報告が設定されたものと仮定する。この場合、通常基地局で用いられているProportional Fairness(PF)スケジューラでは、端末bが割り当てられる確率は端末aに比べて増大する。これは、端末bが測定する2つの基地局に関するチャンネル状態はそれぞれ独立に変動するため、受信品質が良好となる状況が端末aに比べて増えるためである。このように複数CSI報告を設定された端末はPFスケジューラにおいて割り当てられる確率が増大する。また、CSI報告におけるチャンネル推定精度の劣化がさらに悪い影響を及ぼす。推定誤差のない理想的なCSIが得られる場合では、スケジューラによる割当確率の上昇は各端末におけるチャンネル状態をそのまま反映するので、ユーザスループットを改善できる。しかしながら、実環境では理想的なCSI測定が実現できないため誤差を含んだCSIを測定することになる。このような誤差を含んだCSI報告に基づく割当確率が上昇するとユーザスループットが低下するという課題が発生する。

4.3. スケジューリングアルゴリズム

4.3.1. 従来方式

ここでは、従来用いられている PF スケジューリングのアルゴリズムを説明する。PF スケジューラでは、各端末に対してサブフレーム毎に PF メトリックを算出し、その PF メトリックが大きな値となる端末から順番に割り当てを行う。第 n サブフレーム、第 i 番目の端末に対する PF メトリック $PFmetric_i[n]$ は式(4-1)のように計算される[4-8]。

$$PFmetric_i[n] = \frac{(instantTP_i)^\alpha}{(AveTP_i)^\beta}, \quad (\alpha, \beta \geq 0) \quad (4-1)$$

ここで、分子項 $instantTP_i$ は第 i 番目の端末から報告された CQI により推定される瞬時スループットを示している。分母項 $AveTP_i$ は同じ端末における平均スループットを示している。この式は文献[4-9]における Weighted PF スケジューリングの概念に基づいており、分母と分子それぞれに重み付け係数 α および β がついている。この Weighted PF スケジューリングでは、 α/β が 0 に近いほど結果の公平性を確保でき、 α/β が大きいほどシステムの平均スループットの最大化を狙ったスケジューリングが可能となる。また、 $\alpha = \beta = 1$ のとき、Proportional Fair Scheduling となり機会の公平性を確保できる。

4.3.2. 提案方式

次に、複数 CSI 報告の影響を考慮したスケジューリングアルゴリズムを提案する。提案方式では、従来の PF メトリックの算出式(4-1)において CSI 報告の数に応じた重み付けを新たに導入する。提案方式における PF メトリック $PFmetric'_i[n]$ を式(4-3)に示す。

$$PFmetric'_i[n] = \frac{1}{(numCSIfeedback_i)^\phi} \times \frac{(instantTP_i)^\alpha}{(AveTP_i)^\beta}, \quad (0 \leq \phi) \quad (4-2)$$

この式では、 $numCSIfeedback_i$ は第 i 番目の端末に設定された CSI 報告の数を示している。そして、 ϕ はこの CSI 報告数に対する重み付け係数である。このように CSI 報告数による重み付けを導入することで PF スケジューラにおいて以下のように作用する。CSI 報告数が複数の端末では、CSI 報告数による重み付けにより算出される PF メトリックが小さな値となる。このため、PF メトリックの大きな端末から順に選択する PF スケジューラにおいてこの端末が選択される確率が低くなる。

通常，チャンネル推定精度は基地局から送信される CSI-RS の端末側における受信 SINR に依存する．基地局間協調通信が最も効果を発揮するセル境界ほど，チャンネル推定精度の劣化が懸念される．それゆえ，特に複数 CSI 報告が効果的な低 SINR 環境ほどチャンネル推定誤差の影響を受けやすい．このため，CSI 報告数による直接的な重み付けに対して重み付け係数 ϕ を適用することによりチャンネル推定誤差の影響を柔軟に軽減できるものと期待される．本研究では，この ϕ による重み付け効果に集中した議論とするため α および β を 1 とした Proportional Fair Scheduling の動作を前提とし， ϕ をパラメータとして評価を行う．

4.4. シミュレーション評価

4.4.1. シミュレーション方法および条件

ここでは、提案のスケジューリングアルゴリズムの性能を検証するためにシステムシミュレーションによる定量的評価を行う。システムシミュレーションは第 3 章の評価に用いたものと同様に、複数の基地局と端末が存在する複数セル環境の通信システムを模擬して、スループット特性などのシステム性能を評価するものである。基本的なシミュレーションの手順は 3.4.1 節で述べたものと同じである。

シミュレーション方法および条件を説明する。シミュレーション環境は図 4-3 に示す 19 セルサイト構成のマルチセル環境[4-4]とする。図 4-3 において六角形の 1 つが 1 サイトを表し、システム全体は 19 サイトから構成される。各サイトを 3 分割したエリアを 1 つの基地局がカバーするマクロセルとする。基地局は各サイトの中心に配置して各マクロセルをカバーする。つまり、各サイトの中心にはカバーするエリアが異なる 3 つの基地局が配置されている。また、シミュレーションの構成を簡易にするために協調エリアはあらかじめ固定とし、図 4-3 において同一のパターンで分割されたエリアを協調エリアとする。協調エリアは、3 サイト 9 基地局もしくは 2 サイト 6 基地局から構成される。シミュレーションでは、この 3 サイト 9 基地局間もしくは 2 サイト 6 基地局間で協調送信を行う。協調エリア内の基地局間は低遅延・大容量の通信が可能な光ファイバーで接続することを想定して、基地局間の通信では遅延が発生しないものとする。基地局の送信アンテナ数は 2 本、端末の受信アンテナ数も 2 本とする。そのほかの主なシミュレーション条件を表 4-2 に示す。評価環境は 3GPP LTE-Advanced の評価で用いられる評価条件である[4-4]。

基地局間協調通信方式には DPS を用いる。協調セットの選択閾値はサービング基地局の電力を基準に -10dB とし、端末あたりの協調基地局の最大数は 3 とする。これらの条件では協調送信による協調の効果と協調数増加に伴う複雑度の増大を考慮して文献[4-14]で示される設定を用いている。例えば、協調セットの選択閾値を小さく設定すると基地局間協調送信の効果は限定されてしまう。一方で、協調セットの選択閾値を大きく設定すると端末において多数の基地局に対する CSI 測定が必要となり処理量が増大してしまう。

そして、実環境を想定して CSI 測定時および復調時におけるチャネル推定において推定誤差を与えるために、推定誤差モデルを適用する。CSI 測定時の誤差モデルには文献[4-10]のモデルを用いる。この誤差モデルでは、推定誤差をガウス雑音により模擬する。推定誤差を与える雑音の分散 σ^2 に CSI-RS の受信 SINR を用いる。具体的には $\sigma^2 = 1/(SINR * \Delta_{MSE})$ により推定誤差を発生させる。ここで、 Δ_{MSE} は端末側における CSI-RS 推定処理の処理利得である。ここでは $\Delta_{MSE} = 4 \text{ dB}$ とした。一方で、復調時のチャネル推定の誤差モデルに文献[4-11]のモデルを用いる。

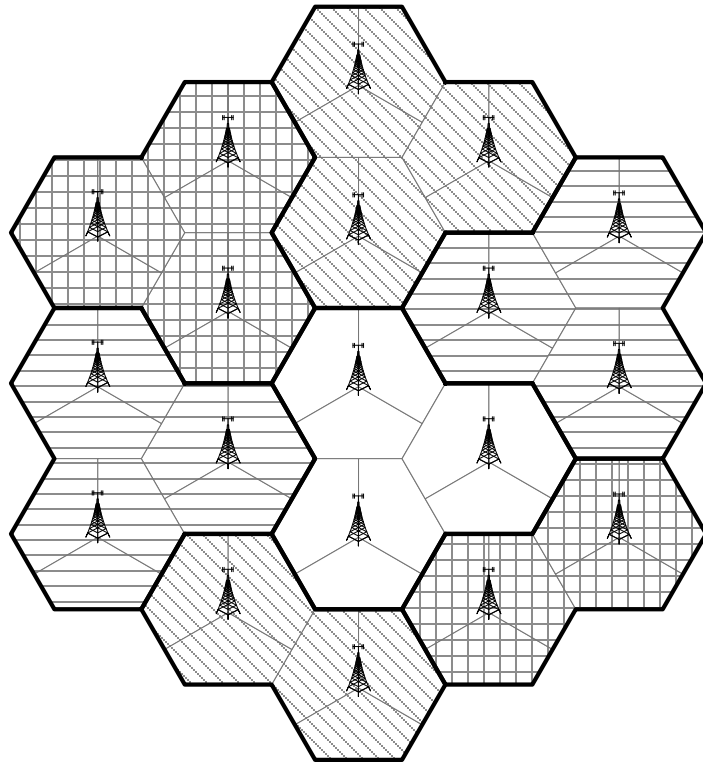


図 4-3 19 サイトシステムの構成および協調エリアの設定

表 4-2 シミュレーション条件

パラメータ	条件
セル配置	Hexagonal grid 19 サイト配置, 3 マクロセル/サイト
サイト間距離	500m
建物挿入損失	20dB
シャドーイング相関	サイト間 : 0.5, サイト内マクロセル間 : 1.0
チャンネルモデル	SCM-UMa[4-12]
基地局送信電力	46dBm
アンテナパターン	3D パターン $A(\varphi, \theta) = -\min[-\{A_v(\theta) + A_H(\varphi)\}, A_m]$ 垂直パターン : $A_v(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta - \theta_{ilt}}{\theta_{3dB}}\right)^2, SLA_v\right]$ $\theta_{3dB} = 10^\circ, \theta_{ilt} = 15^\circ, SLA_v = 25dB$ 水平パターン : $A_H(\varphi) = -\min\left[12\left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}}\right)^2, A_m\right]$ $\varphi_{3dB} = 70^\circ, A_m = 25dB$
アンテナ構成	送信アンテナ : 2, 受信アンテナ : 2
基地局アンテナ高	25m
端末アンテナ高	1.5m
端末数	マクロセルあたり 10 端末
MCS セット	QPSK (R=0.076, 0.117, 0.188, 0.301, 0.438, 0.588) 16QAM (R=0.369, 0.479, 0.602) 64QAM (R=0.455, 0.554, 0.65, 0.754, 0.853, 0.926)
ターゲット BLER	20% (初回送信時)
再送方法	Asynchronous adaptive, Incremental redundancy
トラフィックモデル	Full buffer モデル
基地局間協調送信方式	DPS (Dynamic Point Selection)
最大協調基地局数	3
協調セットの選択閾値	サービング基地局を基準に -10dB
CSI 報告周期	10 msec
CSI 報告遅延	4 msec
チャンネル推定	実チャンネル推定 (CSI 推定用[4-10], 復調用[4-11])
受信方式	MMSE 受信

4.4.2. シミュレーション評価結果

複数 CSI 報告を行う端末の割合

シミュレーションの結果の全端末の中で複数 CSI 報告を行う端末の比率を表 4-3 に示す。この結果から 36.6%の端末において複数 CSI 報告が設定されている。その内訳は、2 CSI 報告端末が 19.2%で、3 CSI 報告端末が 17.4%である。また、残りの 63.4%の端末が単一 CSI 報告端末である。このように、40%弱の端末が複数 CSI を報告する端末に該当することが確認できる。

表 4-3 複数 CSI 設定の端末の比率

端末の種類	端末の割合
1CSI 報告端末	63.4%
2CSI 報告端末	19.2%
3CSI 報告端末	17.4%

協調セット内の CSI-RS における SINR 分布

協調セット内の基地局から送信される CSI-RS の端末において観測される SINR の累積分布関数 CDF (Cumulative Distribution Function) を図 4-4 に示す。図 4-4 では、協調セット内で最も高い品質となる協調基地局 (サービング基地局に相当)、2 番目および 3 番目の品質となる協調基地局における CSI-RS の SINR の CDF グラフをそれぞれ示す。図 4-4 の結果から、サービング基地局の CSI-RS は高い SINR を確保できていることがわかる。これは、協調エリア内の基地局は他の基地局が CSI-RS を送信するリソースにおいて送信を停止することで、それぞれに干渉を与えない効果である。一方で、3 番目の協調基地局からの CSI-RS は比較的悪い SINR となり、 $\text{SINR} \leq 0\text{dB}$ 以下となる割合が 64%であった。こうした低 SINR の基地局においては、チャンネル推定精度劣化から CSI 報告値に誤差が多く含まれることになる。

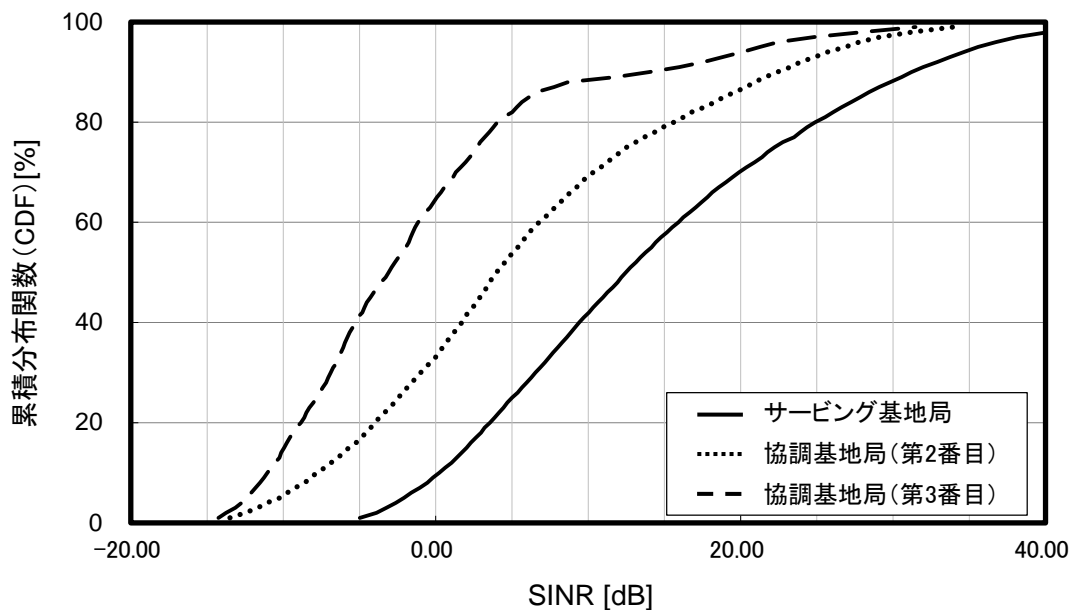


図 4-4 協調セット内基地局の CSI-RS の SINR 分布

複数 CSI 報告に対する重み付け係数 ϕ の効果

次に、重み付け係数 ϕ に対するスループット特性の評価結果を示す。図 4-5 では、提案アルゴリズムを適用した DPS の平均スループットとセル端スループットにおける、協調送信を適用しないシステム（以下、非協調送信システムと記す）に対する改善量を示す。ここで、平均スループットは各端末のスループットの平均であり、端末数を乗算することでセル全体のスループットに相当する。また、セル端スループットは各端末のスループットの下位 5% に相当するスループットとする。また、重み付け係数 $\phi=0.0$ は複数 CSI 報告に対する重み付けを適用していないものと同様であり、つまり、従来のスケジューリングアルゴリズムによる結果に相当する。

図 4-5 の結果から、セル端スループットでは、重み付け係数 ϕ の増加に応じて非協調送信システムに対する DPS の改善効果が低下する。これは提案アルゴリズムにおける複数 CSI 報告数に対する重み付けを行うことで、複数 CSI 報告を行う端末、つまりセル端付近に位置する端末に対して無線リソースを割り当てる確率が低下したためである。重み付け係数 $\phi \geq 0.47$ と設定すると、セル端スループットにおいて DPS の適用効果がなくなり、従来システムよりセル端スループットが低下することがわかる。一方で、重み付け係数 ϕ の増加に対して平均スループットが増加するのがわかる。これは、重み付け係数 ϕ が大きくなるに従い、単一 CSI を報告する端末、つまりセル中心付近に位置する端末に対して無線リソースを割り当てる確率が高くなるため平均スループットが増加するからである。このように重み付け係数 ϕ に対して、セル端スループットと平均スループットの間にはトレード

オフの関係があることがわかる。

このセル境界スループットと平均スループットの間の特レードオフに対して、重み付け係数 ϕ の最適値を求めるために、公平性の目安となる PF utility を用いる[4-13]. PF utility は、次式により示され、各端末のスループットの対数領域の平均により定義される。

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N 10 \log_{10} R_i \quad (4-3)$$

ここで、 R_i は i 番目の端末のスループットを示している。また、 N は端末数を示している。この PF utility は各端末のスループットの幾何平均を表している。各端末のスループットはセル中心からセル端までの広い範囲に分布する。算術平均である平均スループットでは、セル端の低いスループットに比べてセル中心の高いスループットがより大きく影響する。これに対してこの PF utility は、このような広範囲のスループットにおいてセル端のような低いスループットの影響も考慮した評価指標である。図 4-6 は重み付け係数 ϕ に対するこの PF utility を示したものである。図 4-6 の結果から、重みづけ係数 ϕ が 0.1~0.2 において PF utility が最大となり、この範囲内であれば公平性の尺度はほぼ一定であることがわかる。この範囲において、セル端スループットは協調通信を適用しないシステムに対して 10%以上の改善が確保できている。以上の結果より、重み付け係数 ϕ は公平性を確保し、かつその中で平均スループットが最大となる 0.2 が最適値となる。

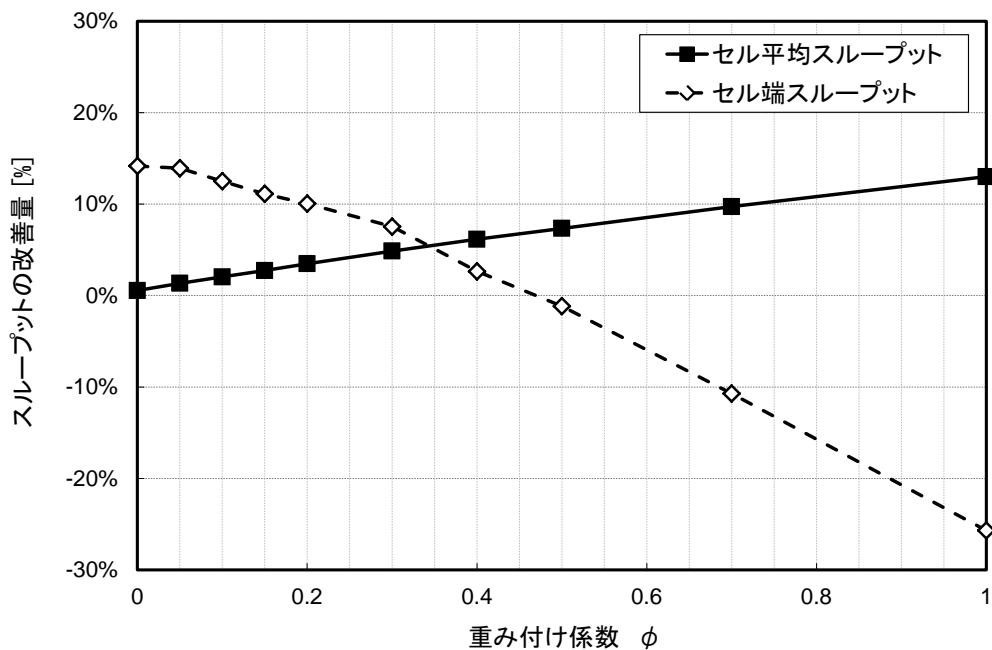


図 4-5 重み付け係数 ϕ に対するスループットの改善量

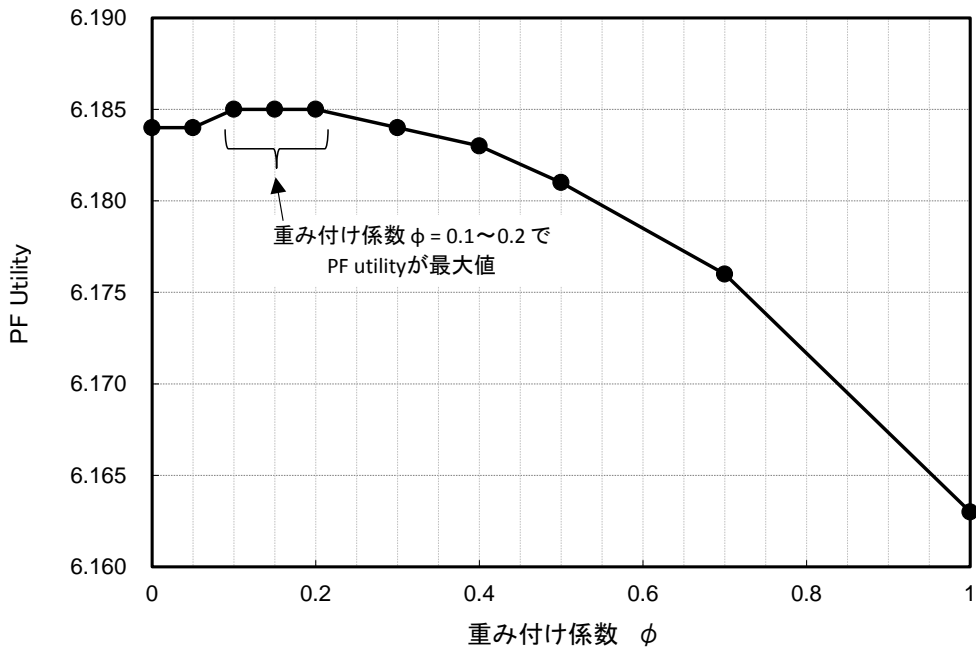


図 4-6 重み付け係数 ϕ に対する PF utility

また、図 4-5 の結果は、セル端スループットの改善量を下げることが許容できる場合であれば、平均スループットを向上できることを示している。例えば、重み付け係数 $\phi=0.47$ とすると、セル端スループットにおいて改善は図れないが、平均スループットは 7.2%改善できる。これは DPS を適用することで従来のセル端スループットと同程度のスループットを達成するために割り当てる無線リソース量は少なくすむために、従来ではセル端の端末に対して割り当てられていた無線リソースを他の端末に対して割り当てることで平均スループットの改善が得られることになる。これは重み付け係数 ϕ により、システムにおいて重視する項目がセル端スループットなのか平均スループットなのかを柔軟に制御できることを示している。このように柔軟な制御が行えることも提案アルゴリズムの特徴である。

最適化した重み付け係数 ϕ におけるユーザスループット特性

重み付け係数 ϕ の効果をさらに確認するために、ユーザスループットの累積分布関数 CDF を用いて検証する。図 4-7 に最適化した重み付け係数 $\phi=0.2$ におけるユーザスループットの CDF 特性を示す。図 4-7 には、DPS を適用しない場合（非協調送信システム）の結果と従来アルゴリズムを用いた DPS を適用した場合の結果も同時に示す。この結果から、従来アルゴリズムの DPS では、スループットが低い領域において良好な特性を示していることがわかる。一方で、提案アルゴリズムの DPS では、DPS を適用しない場合に対してスループット全域にわたって改善がみられ、従来アルゴリズムの DPS に対しては中～高スループット領域において改善がみられる。この結果を詳細に分析するために、DPS を適用しない場合のスループットに対する改善量を求め図 4-8 に示す。図 4-8 では、図 4-7 における CDF の各ポイントを横軸に示し、その CDF ポイントにおける改善量を縦軸に示す。図 4-8 の縦軸における 0% は DPS を適用しない場合のスループットに相当し、従来アルゴリズムの DPS と提案アルゴリズムの DPS における改善量をそれぞれ示す。図 4-8 から、提案アルゴリズムの DPS では、ユーザスループットの CDF の低い領域（低スループット領域に相当）において、従来アルゴリズムの DPS のような過度なスループットの改善が抑えられていることがわかる。それでも約 10% の改善を確保できている。そして、ユーザスループット CDF が高い領域（高スループット領域に相当）において、従来アルゴリズムの DPS は DPS を適用しない場合と同等もしくは劣化しているのに対して、提案アルゴリズムの DPS では約 4% のスループットの改善が得られることがわかる。

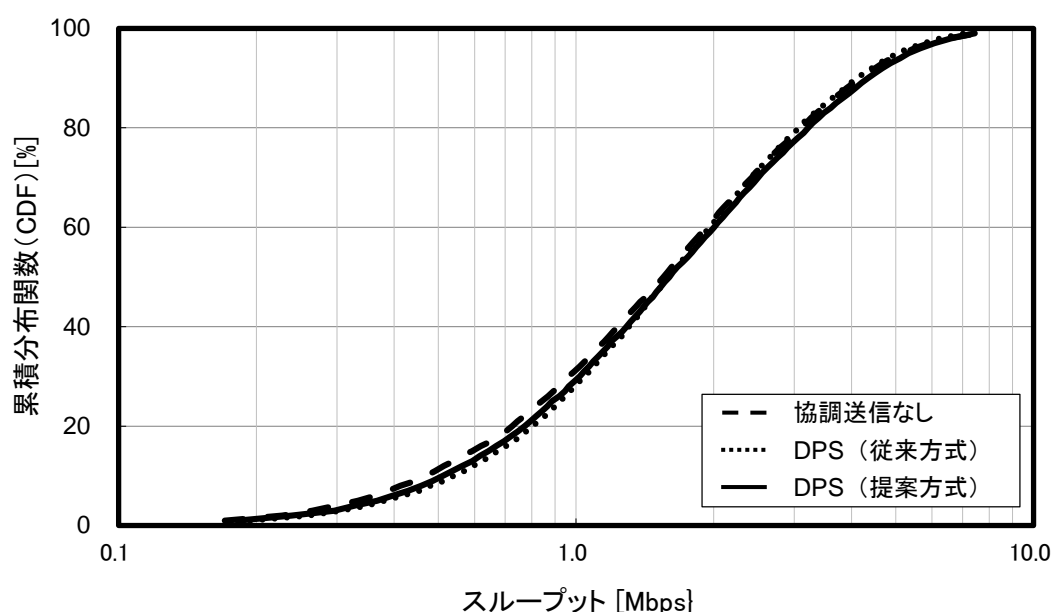


図 4-7 ユーザスループット CDF

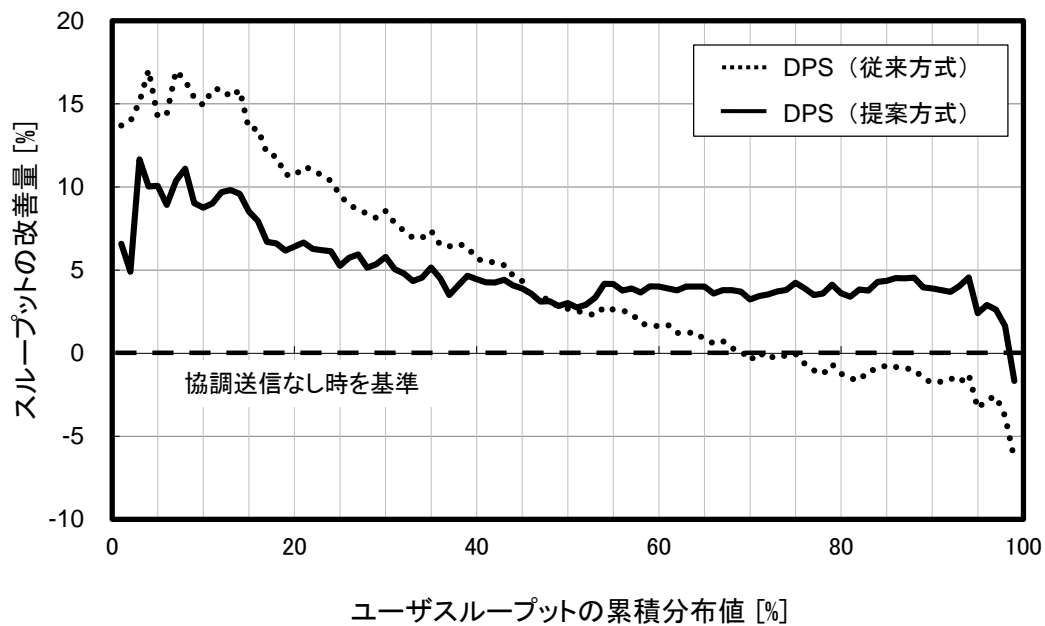


図 4-8 ユーザスループットの改善量

最後に、前述した PF utility を用いて最適化した重み付け係数 $\phi=0.2$ を適用した際の、スループットを表 4-4 に示す。この表では、DPS を適用しない場合、従来アルゴリズムの DPS および提案アルゴリズムの DPS について平均セルスループットおよびセル端スループットをそれぞれ示し、加えて DPS を適用しない場合に対する改善量をそれぞれ示す。

表 4-4 の結果から、提案アルゴリズムの DPS を適用した場合、DPS を適用しない場合に対してセル端スループットでは 10.05% の改善を確保でき、平均スループットでは 3.47% の改善が得られる。また、従来アルゴリズムの DPS に対しては平均スループットが 2.92% 改善した。

表 4-4 スループット比較

方式	平均セルスループット		セル端スループット	
	スループット [Mbps]	改善量 [%]	スループット [Mbps]	改善量 [%]
DPS なし	15.67	-	0.260	-
従来の DPS	15.75	0.55	0.297	14.16
提案の DPS	16.43	3.47	0.286	10.05

4.5. まとめ

本章では，基地局間協調通信システムにおけるスループットの向上について述べた．

基地局間協調通信システムは MIMO 通信における基地局の複数アンテナの概念を複数基地局に拡大したもので，1つの端末に対して複数の基地局が協調してデータ送信することでスループットを向上することができる．特に，セル境界の端末において基地局間で発生する干渉が抑えられるためスループットの向上が期待される．

協調送信のうち良好な基地局を選択して送信する DPS では，基地局を選択するために複数の基地局に関するチャネル状態 (CSI) を端末側で測定して，基地局側に報告する必要がある．従来のスケジューリングでは，複数 CSI を報告する端末は単一 CSI を報告する端末に比べて優先的に割り当てられてしまい，この複数 CSI 報告端末が過度に割り当てられることでセル平均スループットの低下を引き起こしてしまう．

本章では，基地局のスケジューリングにおける基地局選定の基準となる PF メトリック算出において CSI 報告数を考慮した重み付け係数を導入するスケジューリングアルゴリズムを提案した．この提案アルゴリズムにより，協調送信を適用する端末 (複数 CSI 報告端末) と適用しない端末 (単一 CSI 報告端末) が混在する状況において，複数 CSI を報告する協調通信端末が過剰に割り当てられるのを防ぎ平均スループットの向上が図れる．この提案アルゴリズムについて複数セルを模擬したシステムシミュレーションによりその効果を検証した．提案アルゴリズムにより，協調通信を適用しないシステムに対して平均セルスループットでは 3.47% の改善が得られ，セル端スループットでは 10.05% の改善が得られた．また従来の協調通信を用いたシステムに対しても平均スループットを 2.92% 改善できた．したがって，基地局間協調通信システムにおいて，提案アルゴリズムはセル端スループットの高い改善を確保しつつセル平均スループットを改善できることを示した．

また，この提案アルゴリズムのパラメータを設定し直すことにより，セル端スループットの改善を抑えることを許容すると平均スループットをさらに向上できることがわかった．セル端スループットの改善を 0% に抑えた場合，平均スループットの改善量を 7.2% にまで向上できることをあわせて確認した．

参考文献

- [4-1] D.Gesbert, S.G.Kiani, A.Gjendemsj and G.E.Oien, “Adaptation, Coordination, and Distributed Resource Allocation in Interference-Limited Wireless Networks,” Proc. of the IEEE, vol. 95, no. 5, pp. 2393–2409, December 2007.
- [4-2] D.Gesbert, S.Hanly, H.Huang, S.Shamai, O.Simeone and W.Yu, “Multi-cell MIMO cooperative networks: a new look at interference,” IEEE J.Select.Areas Commun., vol. 28, no. 9, pp. 1380–1408, December 2010.
- [4-3] K.Hiramatsu, S.Nakao, M.Hoshino and D.Imamura, “Technology Evolutions in LTE/LTE-Advanced and Its Applications,” Proc. of ICCS2010, November 2010.
- [4-4] 3GPP TR 36.819 V11.1.0 (2011-12), “Coordinated Multipoint Operation for LTE physical layer aspects (Release 11).”
- [4-5] <http://www.3gpp.org/>
- [4-6] M.Hoshino, T.Yoshida and D.Imamura, “Reference Signal Transmission Schemes for Coordinated Multi-Point Transmission for 3GPP LTE-Advanced,” IEICE Trans. on Commun., vol. E94-B, no. 12, pp. 3346–3353, December 2011.
- [4-7] Masayuki Hoshino, Yasuaki Yuda, Tomohumi Takata, Akihiko Nishio, “Scheduling Algorithm with Multiple Feedbacks for Supporting Coordinated Multipoint Operation for LTE-Advanced Systems”, IEICE Trans. on Commun., vol.E96-B, no.11, November 2013.
- [4-8] H.J.Kushner, P.A.Whiting, “Convergence of Proportional-Fair Sharing Algorithms under General Conditions,” IEEE Trans. Wireless Communications, vol. 3, no. 4, pp. 1250–1259, July2004.
- [4-9] R.Agrawal, A.Bedekar, R.J.La and V.Subramanian, “Class and Channel Condition Based Weighted Proportional Fair Scheduler,” Proc. of ITC 2001, pp. 553–565, September 2001.
- [4-10] CMCC, “Simulation results for CoMP Phase I evaluation in homogeneous network,” 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #65, R1-111301, Valencia, Spain, May 9–13, 2011.
- [4-11] 3GPP2 C.R1002-A V1.0, “Cdma2000 Evaluation Methodology Revision A,” Appendix T, May 2009.
- [4-12] 3GPP TR 25.996 V6.1.0 (2003–09), “Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations (Release 6).”
- [4-13] F.Kelly, A.Maulloo and D.K.Tan., “Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability,” J. of the Operational Research Society, vol. 49, pp. 237–252, April 1998.

[4-14] NTT DOCOMO, NEC group, “Size of CoMP Measurement Set for Rel-11 CoMP,”
3GPP TSG RAN WG1 Meeting #69, R1-121932, Prague, Czech Republic, May 21–
25, 2012.

5. 結言

モバイル通信は、生活、経済、文化などあらゆる面において重要な社会基盤の1つに位置づけられている。そして、スマートフォンなど高機能な端末が出現しその急速な普及に伴い、通信速度の高速化が強く求められている。また、モバイル通信は電波を利用した通信技術のため、有線通信に比べて高速伝送を実現するための障害が数多く存在する。例えば、電波のマルチパス遅延波による受信信号の歪、伝搬路上の障害物や通信距離による電界強度の減衰、複数基地局を配置することによる隣接基地局からの干渉などが挙げられる。このような高速伝送を阻む無線通信環境であっても、モバイル通信に求められる社会基盤としての側面を考慮すると、安定的に高速伝送を実現する技術が必要不可欠である。

本論文は、このモバイル通信システムにおける平均スループットの向上に関するものであり、送受信間の基本伝送方式を複数組み合わせるマルチポイント通信に着目して、その複数の送受信ポイントが相互に協調することによりスループットの向上を図る技術について述べた。本論文では、このマルチポイントの協調通信について、MIMO 通信技術、無線中継通信、基地局間協調通信の3方式について論じた。

第1章では、本論文についての技術的背景と目的および論文の構成について述べた。

第2章では、送受信双方に複数アンテナを備えるマルチポイント通信である MIMO 通信におけるスループット向上技術を提案し、その有効性を確認した。

MIMO 通信は、基地局と端末の双方に複数アンテナを備え、受信側の信号処理によって分離できる複数の経路（ストリーム）を使って別々のデータを送信することでスループットを向上できる技術である。そして、この MIMO 通信において適応制御を用いることで更なる高速化を実現できる。MIMO 通信におけるチャネル状態に応じた適応制御方法には、ストリーム独立制御（MCW : Multiple Code Word）とストリーム共通制御（SCW : Single Code Word）がある。第2章では、これらの MIMO 通信の適応制御に対してその性能を最大限引き出すために、最適な干渉抑圧技術として MCW には干渉キャンセラである SIC（Successive Interference Canceller）を、SCW にはプリコーディングを組み合わせ、さらに制御情報を含めたスループット性能の評価手法を提案して評価した。その結果、MCW では、高 SINR 環境においては各 CW に対して適応制御を行えるため MIMO チャネルを最大限活用でき高い周波数効率を実現できることを明らかにした。一方で、低 SINR 環境においては SINR 測定精度の劣化と適応制御に要するオーバーヘッドが増加する課題を明らかにした。次に、この課題に対して、4 アンテナ送信、4 アンテナ受信の MIMO 通信において、2 ストリームに 1CW を割り当てることで CW 数を減らした MCW (2CW-MCW) を提案した。さらにストリーム間の品質差を考慮して 1CW を最適な 2 ストリームに割り当てることで、制御情報のオーバーヘッドの上昇なしに性能の向上ができることを示した。この 2CW-MCW では、低 SINR 領域において、MCW より 20.0%周波数効率を改善でき、SCW に近い性能であった。また、高 SINR 領域では、2CW-MCW は MCW より 3.0%の周波数

効率が改善できた。これは、CW 数が半減したことで制御情報のオーバーヘッドの減少が寄与したものである。このように、提案方式である 2CW-MCW は、低 SINR 領域から高 SINR 領域に渡って高いスループット（平均で 11.5%の改善）を実現し、基地局近傍からセル境界付近に至るシステム全体の範囲にわたって有効な方式であることを示した。また、通信システムにおいて通常運用される状況において重要となる高 SINR 領域において、提案方式は特に高い周波数利用効率を示す有効な方式である。

第 3 章では、基地局と端末間の通信を無線中継する無線中継通信におけるスループット向上技術を提案し、その有効性を確認した。

無線中継通信は、基地局から遠い場所や建物内など基地局からの電波状況が悪い端末に対して、基地局からの信号を中継通信することでスループットを向上することができる。端末では基地局からの経路と中継局からの経路といった複数の経路を利用できる観点から、無線中継通信はマルチポイント通信となる。また、中継局を複数設置することで多くの端末において恩恵が得られる一方で、中継局間が相互に干渉を与えてしまいスループット低下を引き起こしてしまう。そこで、この第 3 章では、中継局を複数設置した場合に発生するセル間干渉を低減する制御方法を提案した。中継局は、基地局からのデータを受信するバックホールサブフレームの区間において端末に対するデータ送信を停止する。提案方式はこの中継局が送信停止するバックホールサブフレームに着目したもので、このバックホールサブフレームのタイミングを制御することで中継局が他セルに与える干渉を低減する。本論文ではこのセル間干渉低減方式について 2 つの方式を提案した。提案方式 1 は基地局が個別にバックホールサブフレームのタイミングを設定する方式であり、提案方式 2 は中継局が個別にバックホールサブフレームのタイミングを設定する方式である。これらの提案方式について、複数セル環境を模擬したシステムシミュレーションにより定量的評価を行った。その結果、基地局間でバックホールサブフレームを同じタイミングに設定する従来方式と比較して、提案方式 1 はマクロセル端末におけるセル間干渉の低減効果が高く、このマクロセル端末における受信 SINR を大きく改善できることがわかった。また、提案方式 2 はリレーセル端末におけるセル間干渉の低減効果が高いことがわかった。そして、スループットによる評価を行った結果、中継局を適用しないシステムに比べて中継局を適用することでシステムの平均スループットが 15.0%以上、セル端のスループットでは 0.9%以上改善できることを明らかにした。さらに、提案方式 1 では平均スループットの改善は 17.0%、セル端スループットの改善は 2.3%であり、この方式が効果的なセル間干渉抑圧方法であることを示した。

第 4 章では、基地局間協調通信におけるスループット向上技術を提案し、その有効性を確認した。

基地局間協調通信は、MIMO 通信における送信点の概念を基地局に拡大したマルチポイント通信で、1 つの端末に対して複数の基地局が協調して送信することでスループットを向上することができる。特にセル境界の端末において、基地局間で発生する干渉が抑えられ

するためスループットの向上が期待される。このような協調送信では、複数の基地局に関するチャンネル状態 (CSI : Channel State Information) を端末側で測定し、基地局側に報告する必要がある。この時、従来のスケジューリングでは、複数 CSI を報告する端末は単一 CSI を報告する端末に比べて優先的に割り当てられてしまい、この複数 CSI 報告端末が過度に割り当てられることでセル平均スループットの低下を引き起こしてしまう。この第 4 章では、下り回線の基地局間協調通信において、スケジューリングにおける Proportional Fairness (PF) メトリック算出において CSI 報告数を考慮した重みづけ係数を導入するスケジューリングアルゴリズムを提案した。この提案アルゴリズムにより、複数基地局の協調送信を適用する端末と適用しない端末が混在する状況において、複数 CSI を報告する協調通信端末への過剰な割り当てを抑制することでセル平均スループットを向上できることを示した。この提案アルゴリズムについて、複数セル環境を模擬したシステムシミュレーションを用いてその効果を評価した。提案アルゴリズムにより、協調通信を適用しないシステムに対して平均セルスループットでは 3.47%の改善が得られ、セル端スループットでは 10.05%の改善が得られた。また従来アルゴリズムを用いたシステムに対しても平均スループットを 2.92%改善できた。したがって、基地局間協調通信システムにおいて、提案アルゴリズムはセル端スループットの高い改善を確保しつつセル平均スループットを改善できることを示した。また、この提案アルゴリズムのパラメータを設定し直すことにより、セル端スループットの改善を抑えることを許容すると平均スループットをさらに向上できることがわかった。セル端スループットの改善を 0%に抑えた場合、平均スループットの改善量を 7.2%にまで向上できることをあわせて確認した。

本論文では、マルチポイント協調通信における基本的な 3 つの構成である MIMO 通信、無線中継通信、基地局間協調通信において、これまでにない新しい構成による協調通信により平均スループットの向上を実現する技術の提案を行った。これら 3 つの提案技術は各々が独立な技術であるため、それぞれを組み合わせることも可能である。例えば、MIMO 通信の提案技術は、無線中継通信や基地局間協調通信における基地局、中継局、端末の間の個々の通信に用いることができる。また、無線中継通信システムにおいて基地局と中継局の間の協調通信や中継局間の協調通信として用いることも可能である。これら 3 方式を統合して用いることで平均スループットは 35.7%の改善が得られる。次に 3 つの提案技術についてスループット向上における効果の観点と、実装の観点について比較する。効果の観点では、第 2 の無線中継通信における提案技術が最も高い性能が得られる。また 3 つの提案技術ではそれぞれが特徴的な効果を有している。MIMO 通信技術における提案技術は、基地局と端末の個々の通信におけるスループット向上に効果があり、通信システムの基盤となる要素技術における効果である。また、無線中継通信における提案技術では、無線中継を用いた通信システムにおけるスループット向上に効果があり、通信システムの更なる改善を目指した拡張システムにおける効果である。そして、基地局間協調通信にお

ける提案技術も、同様に拡張システムにおける効果である。さらにこの基地局間協調通信における提案技術では、各端末への無線リソース割当の平準化の効果も得られる。次に実装の観点について比較する。これら 3 つの提案方式はいずれもハードウェアの変更なしにソフトウェアの変更のみで実装が可能である。第 1 の技術では端末のソフトウェア変更で、第 2 の技術では中継局と基地局のソフトウェア変更で、第 3 の技術では基地局のソフトウェア変更により提案技術の実装が可能である。基地局と中継局は端末に比べ局数が限定されかつ管理も容易であるために各技術の実装は第 3 の技術、第 2 の技術、第 1 の技術の順で容易である。また、第 1 の技術では、その技術を搭載した端末自体がその処理を行うのみであり、その技術を搭載していない端末に対して悪影響を与えることはない。つまり第 1 の技術を搭載した端末と搭載しない端末は共存が可能であり、新規に投入される端末が第 1 の技術を搭載した端末となり順次搭載しない端末から置き換わることでスムーズな移行が可能となる。

また、本論文の提案技術により平均スループットの 35.7%の向上が得られるが、これは携帯電話システムにおける接続端末数の 35.7%の増加となる。これは携帯電話オペレータにおけるシステム展開の投資コストを圧縮することができ、これによりユーザの通信コストを低減することが可能となる。このように本提案技術は産業界においてインフラ投資の観点および消費者の観点から携帯電話におけるコスト低減に大きく貢献できるものである。さらに、本論文の提案技術は、国際標準の移動通信システムである LTE およびその後継システムである LTE-Advanced において検討したものである。MIMO 通信の提案技術における 2CW-MCW の固定割当方式が LTE の MIMO 通信方式として定められている。また、無線中継通信と基地局間協調通信における提案方式は、2015 年ごろに運用開始が予定されている LTE-Advanced において実用化に向けた検討が進められている。また、本論文の提案技術であるマルチポイント協調通信に関して関連特許を 10 件出願している。このように本論文の提案技術は、携帯電話システムにおける技術の発展に貢献してきており、また今後の貢献も期待できる。

以上のように、携帯電話システムにおいて平均スループットの最大化を目指した複数の基本伝送方式を組み合わせたマルチポイント協調通信が性能および実装容易性において高い有効性を有していることから、本論文は携帯電話システムの発展において 1 対 1 の通信から脱却して新しいマルチポイント協調通信のシステム構成を開拓し平均スループットの更なる向上を達成した。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，東海大学情報通信学部通信ネットワーク工学科本間光一教授には，多大なご指導，ご鞭撻をいただきました．ここに深く感謝し，こころからお礼申し上げます．

東海大学総合理工学研究科総合理工学専攻の石井啓之教授をはじめ審査委員の先生方，専門分科会委員の諸先生方には本論文の審査にあたり数多くの貴重なご助言，ご討論をいただきました．ここに深く感謝し，こころからお礼申し上げます．

また，パナソニック株式会社 新規事業開発センター 事業開発推進室 平松勝彦室長，同社 AVC ネットワークス社 AVC コア技術開発センター 星野正幸氏には，貴重なご教示をいただき，この場を借りてお礼申し上げます．

パナソニック株式会社 今村大地氏，岩田綾子氏，西尾昭彦氏，パナソニックシステムネットワークス開発研究所高田智史氏には，研究を進めるにあたり，多くの貴重なご意見，ご助言をいただきました．ここに深く感謝いたします．