

モバイルWiMAXのMAC層による 低消費電力化技術

Power Consumption Control Technology in Mobile WiMAX MAC Layer

あらまし

移動端末の低消費電力化は、ワイヤレスブロードバンドシステムを普及させるための最重要課題の一つである。このため、モバイルWiMAX標準仕様では、アイドルモードとスリープモードを規定している。移動端末はこれらのモードに移行することで動作を一時的に停止することができる。また、モバイルWiMAX標準仕様では、移動端末の送信電力を基地局から制御するための電力制御も規定している。本制御により、基地局は電波を受信するための必要最小限の電力を移動端末に指定することができる。ただし、標準で規定されているのはプロトコルまでであり、そのプロトコルをどうやって使うかについては実装に委ねられている。

本稿では、移動端末の低消費電力化を実現するために、MAC (Media Access Control) 層の機能を用いて、移動局のアイドルモードとスリープモードを実現するメカニズムについて論じる。また、省電力を可能にする新たな送信電力制御アルゴリズムについても説明する。

Abstract

Reducing the power consumption of mobile terminals (MTs) is one of the major issues for wireless broadband systems. The Mobile WiMAX standard defines Idle and Sleep modes to reduce MT power consumption by suspending the operation of the MT. In addition, this standard defines a protocol that enables the MT's transmitting power to be controlled from the base station. However, manufacturers should consider how to implement these modes and a protocol for using them. In this paper, we describe mechanisms for implementing the Idle and Sleep modes in an MT using the functionality of the media access control (MAC) layer. We also describe a novel transmission power control algorithm that can reduce power consumption.



伊勢田 衛平 (いせだ こうへい)
(株)富士通総研 フィールド・イノベーション推進本部 所属
音声符号化、ネットワーク管理、セキュリティ管理、WiMAXシステムの研究開発を経て、現在、フィールドイノベーションに従事。



鶴岡 哲明 (つるおか てつめい)
NGWプロジェクト部 所属
主に企業内通信網向けの通信機器開発やネットワークシステムの研究開発を経て、現在、WiMAXを中心に次世代ネットワークシステム、ワイヤレスシステムの研究開発に従事。



加藤 次雄 (かとう つぐお)
NGWプロジェクト部 所属
現在、次世代ネットワークシステム、ワイヤレスシステムの研究開発に従事。

ま え が き

ワイヤレスシステムの高速化とインテリジェント化が急速に進んでいる。すでに、音声通信だけでなく電子メール、Web閲覧、音楽ダウンロード、電子決済などに、広くワイヤレスシステムが使用されている。ワイヤレスアクセスを使った通信は、さらなる高速化・インテリジェント化によって、今後10年間で有線アクセスよりもはるかに便利になると予想される。しかし、高速化とインテリジェント化は、消費電力増加を伴うという問題を抱えている。とくに、携帯型の移動端末に大容量のバッテリーが必要になったり、あるいはバッテリーの寿命が短くなったりしては、ユーザの利便性が損なわれてしまう。このため、移動端末の低消費電力化は、ワイヤレスシステムの更なる高速化・インテリジェント化に向けて最重要課題の一つになっている。

省電化実現のためには半導体プロセスの改善が必須であるが、一方でMAC (Media Access Control) 層の機能を用いて、システムのにも大幅に消費電力を低減することができる。例えば、モバイルWiMAXの仕様であるIEEE 802.16e-2005⁽¹⁾では、アイドルモードとスリープモードを規定している。端末はこれらのモードに移行することで一時的に動作を停止することが可能となる。また、IEEE 802.16e-2005では移動端末の送信電力を基地局から制御するためのプロトコルも規定している。このプロトコルを用いることで、基地局は電波を受信するための必要最小限の電力を移動端末に指定することができる。ただし、標準で規定されているのはプロトコルまでであり、そのプロトコルをどうやって使うかについては実装に委ねられている。

本稿では、MAC層の機能を用いて、上記実装依存の機能での省電力を実現するメカニズムについて論じる。まず、アイドルモードとスリープモードを実現のために移動端末に実装する2種類の省電力メカニズムについて述べ、つぎに基地局に実装される新しい送信電力制御アルゴリズムについて述べる。これらのメカニズムによって、ワイヤレス接続の安定性やスループットを損なうことなく、移動端末の消費電力を低減できる。

移動端末用MAC層制御における省電力機能

本章では、MAC層におけるソフトウェア制御による省電力処理、とくにWiMAXのプロトコルで規定されるアイドルモードとスリープモードに対応した省電力処理について述べる。

● 移動端末用MAC処理の概要

移動端末におけるMAC層のハードウェア構成を図-1に、ソフトウェア構成を図-2に示す。

WiMAXプロトコルは新しく制定された規格であるため、今後のプロトコルの改良や、相互接続性の改善など、柔軟な対応ができることが求められる。そこで、今回採用したアーキテクチャでは、下位MAC層 (LMAC) をハードウェア+ソフトウェアで、また上位MAC層 (UMAC) をソフトウェアで実現する。

LMACのハードウェア処理は、受信したバーストからPDU (Protocol Data Unit) を組み立てる。また送信PDUから送信バーストを構築する。データの暗号化・復号化もLMACで行う。残るMAC層

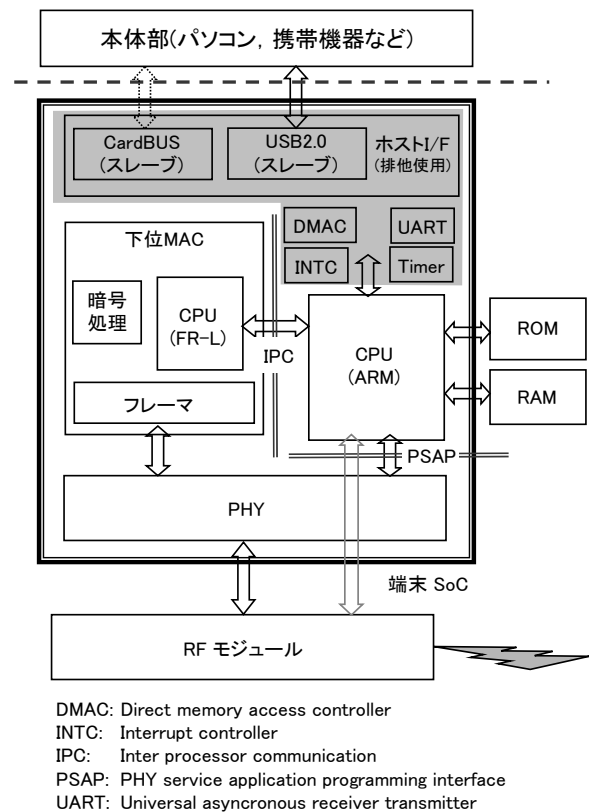


図-1 移動端末MAC層のハードウェア構成
Fig.1 Hardware architecture of mobile station.

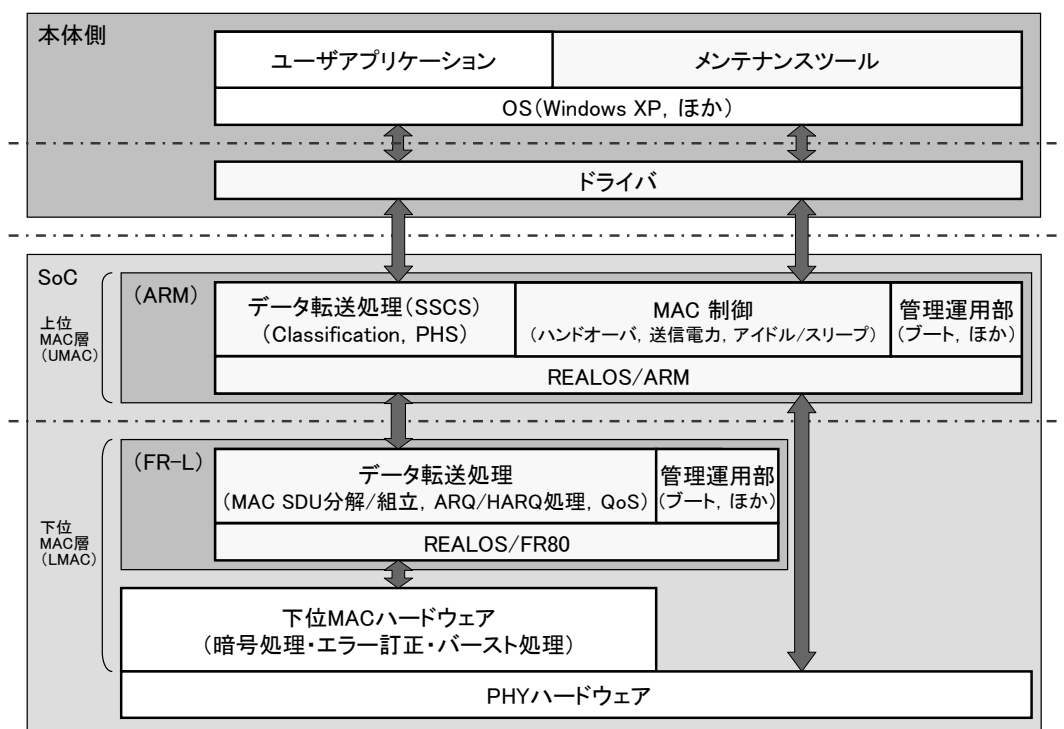


図-2 移動端末MAC処理ソフトウェア構成
Fig.2-Software architecture of mobile station.

の処理は、二つのプロセッサコアを使ってソフトウェアで処理される。具体的には、LMACのソフトウェア処理部分を担うFR-80コア (FR-L部)、UMACの処理を実行するARM946コア (ARM部) である。FR-Lは主にMAC-SDU (Service Data Unit) の分解と組立て、さらにトラフィック管理を行う。ARMは主に制御プロトコルの処理と移動端末の状態管理を行う。データはWiMAXのフレームタイミングに従って送受信されるため、実時間性の高い処理が要求される。一方、制御処理は複数の処理を並行して実行可能な構成が適している。両者の特性が異なることから、それぞれを別々のプロセッサで実行する構成となっている。また、制御処理を実行するプロセッサは、将来的にアプリケーション層ソフトウェアの実行も行わせる可能性が考えられるため、組込み用途として広く使われていることも考慮しARMコアを選択した。

● MAC処理の電力管理メカニズム

移動端末の低消費電力化のため、今回開発したMAC処理ソフトウェアでは、以下に示す2種類の省電力制御メカニズムを実装している。

(1) プロセッサ個別の省電力制御

(2) インタフェース部全体の動作の停止

この二つの制御は独立かつ補完的に機能する。

【プロセッサ個別の省電力制御】

この省電力制御は、プロセッサが命令を実行していないとき (実行すべき処理がないとき) に、プロセッサコアに実装されているコア停止状態に入ることによってプロセッサコアが消費する電力を抑制するもので、二つのプロセッサがそれぞれ独立にこの省電力制御を実施する。このコア停止状態は、各プロセッサコアが有する省電力モードを利用するもので、OS (オペレーティングシステム) がアイドル状態 (実行タスクがない状態) に移行することでプロセッサが実行する命令がない状態であることを検出し、コア停止に入る制御を行い、また通常動作への復帰はプロセッサに対する非同期イベント (ハードウェア割り込み) の発生でコア停止状態が自動的に解除されるため、ほかのファームウェア処理において本制御のことを特に考慮する必要はない。

【インタフェース部全体の動作の停止】

この省電力制御は、移動端末がデータの送受信を全く行わない状態のときに各回路ブロックに供給するクロックを止めることで電力消費を抑制する。通

常動作ではインタフェースの各ブロックがパイプライン的に処理をするため、省電力動作に入るために、一度にすべてのブロックを停止することはできない。そのため、WiMAXの1フレーム期間内の省電力動作はハードウェア自律の省電力動作として、LMAC/PHY部がフレーム周期内の各処理フェーズに応じた省電力制御を実装しているが、プロトコルレベルでフレーム単位に送受信を行う必要がないことが分かる場合については、インタフェース部全体を動作停止させる制御を行うことによって、省電力動作を実現する。WiMAXでは、プロトコルレベルで移動端末が動作しなくてよい期間を制御する仕組みとして、「アイドルモード」および「スリープモード」が用意されている(図-3)。これらのモードに入り、送受信動作を止められる期間、インタフェース部全体を停止する省電力制御を実施する。

(1) アイドルモードとスリープモード

アイドルモードとは、移動端末が接続先の基地局(SBS : Serving BS)との接続を一時的に切り、ページング機能を有する基地局(PBS : Paging BS)との間で限定的な通信を行うモードである。ここで、SBSとPBSは論理的な機能であり、実際は一つの装置に両機能が入っていてもよい。この

モードでは、PBSが定期的に流すブロードキャストメッセージを受信(リスニング期間)し、自分宛の新規メッセージが基地局にあるか確認する。PBSは移動端末のコンテキスト(接続情報)を保持しているため、移動端末は自分宛のメッセージがある場合、直ちに基地局との接続を再開することができる。アイドルモードにおいては、前記リスニング期間のみ受信動作が必要となるが、それ以外の期間は送受信動作の必要がない。

一方、スリープモードは、移動端末と基地局とがデータを間欠的に送受信するモードである。この間欠動作は“Power Saving Class”ごとに定義し、移動端末と基地局との間で確立する接続がどのPower Saving Classに属するかで実際の間欠動作を規定する。そのため、異なるPower Saving Classでは送受信がない期間(停止期間)は必ずしも一致しない。したがって、すべての接続が停止している期間中が、移動端末が送受信動作を停止できる期間で、これを「通信停止(Unavailable)期間」と呼ぶ。通信停止期間、移動端末は送受信回路を停止によって省電力動作できる一方、基地局はその移動端末に関する処理が大幅に減る分、処理負荷を低減できる。このように、ス

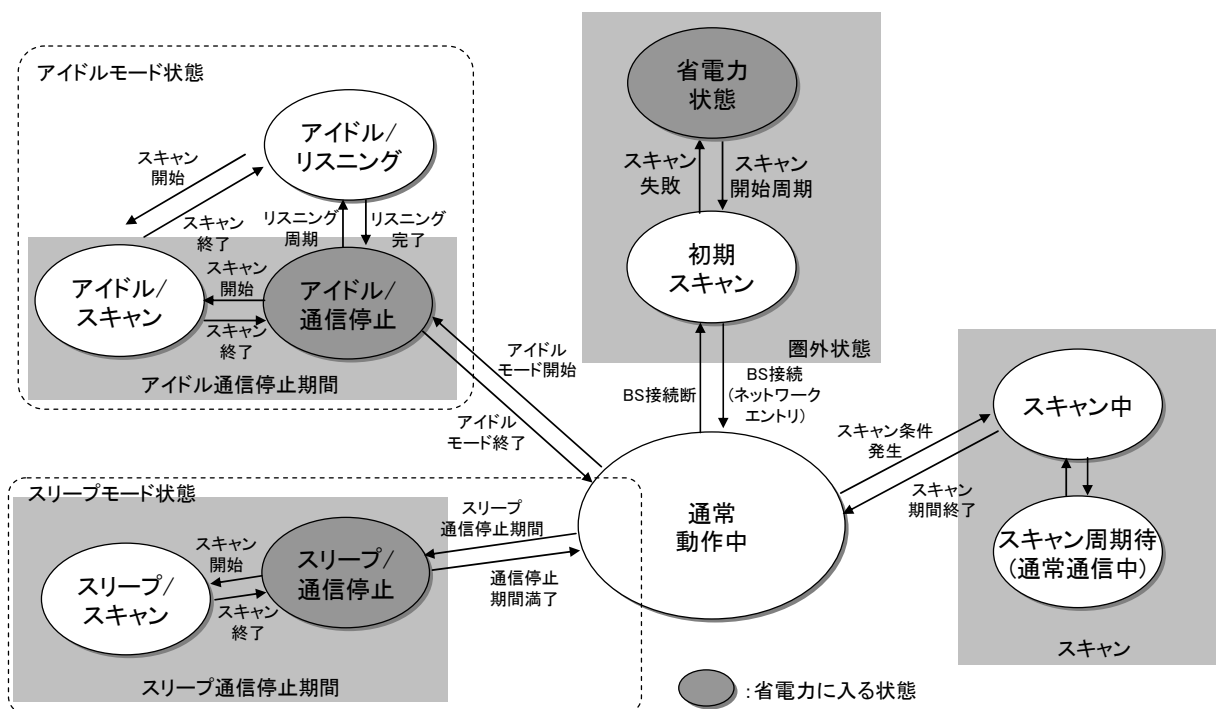


図-3 移動端末MAC部状態
Fig.3-Mobile station MAC state machine.

リープモードはワンセグ放送程度の小さい画面サイズのビデオストリーミングなど、遅延が許される低ビットレートの連続データ通信に適している。

(2) 移動端末のMAC層の状態

図-3において、圏外状態の移動端末は、定期的にスキャンを実行して基地局を探す。スキャン中、移動端末は受信状態になる必要があるが、それ以外の期間は通信を行わないため、送受信に必要な回路動作を停止することができる。移動端末がスキャンで基地局を発見し、ネットワーク接続に成功すると、移動端末は基地局との接続状態である通常動作中に移行する。移動端末が基地局とのネゴシエーションを行いアイドルモードに入っている場合、ブロードキャストメッセージを受信するためのリスニング期間と、アイドルモードにおける通信停止期間とを交互に繰り返す。一方、移動端末が基地局とのネゴシエーションによりスリープモードに入っている場合、すべてのコネクションが停止期間中であればスリープモードにおける通信停止期間になり、そうでない場合は通常動作中にとどまる。ただし、スリープモードにおける通信停止期間中もアイドルモードにおける通信停止期間中も、移動端末が受信動作を行う場合がある。基地局からの受信信号レベルが低いと、移動端末は基地局探索スキャンングをして、ハンドオーバーできる基地局の候補を探す処理を行う。そのため、送受信動作を完全に停止できる期間は、通信停止期間中のうちの、移動端末がスキャンをしていない期間になる。図中、「省電力状態」「アイドル/通信停止」「スリープ/通信停止」と記されている状態がこれに該当し、このとき、移動端末はインタフェース部全体の動作を停止する省電力状態となる。

(3) 省電力モードの手順

本移動端末では、送受信処理を各ブロックがパイプライン的に動作しているため、インタフェース部全体の動作の停止は下記のような手順を踏んで実施する。

- ・ARMがFR-Lに対して送信処理の停止指示を出す。これは、通信停止期間中に動かないリソース（回路ブロック）を使用することを回避するためである。
- ・フレームシーケンス番号が通信停止するターゲット時間に達したら、ARMはPHY部とLMAC部の

クロック供給を止めることで停止する。

- ・ARMはFR-Lに対してプロセッサコアの停止指示を出し、外部メモリをスタンバイモードに設定した後、ウェイクアップタイマ（一種の目覚まし時計）を設定する。続いて、自身に対するクロックを含め残るクロック供給を停止（除くウェイクアップタイマ）し、ARM自身を含む停止状態に入る。

インタフェース部全体の動作停止状態から復帰する要因として、ウェイクアップタイマのタイムアウトと本体部（PCやPDA本体）からのウェイクアップ要求がある。ウェイクアップ回路は、これら復帰の要因となる事象を検出するとARMへのクロック供給を再開する。続いて、ARMはほかのクロック供給を再開し、外部メモリを通常動作に戻し、FR-Lに対して再開指示を出す。

ARMの動作再開から実際に基地局からのメッセージの受信が行えるようになるまでに要する時間は、PHY部のフレーム同期状態に依存するので、もし停止しようとする期間が復帰に要する時間によって決めるしきい値より短い場合、移動端末は受信同期状態を維持するのに最低限必要な回路を稼働状態にして復帰に要する時間が短い（その代わり電力削減効果は低い）停止状態に入る。

第1世代のSoCでは、アイドルモードへ移行することでモジュールの消費電力を30%以下に下げられる見込みであり、さらに次世代のSoCではインタフェース部全体の動作停止状態での消費電力が大幅に下げられる見通しである。また、省電力状態への遷移・復帰時間の短縮も見込めるため、WiMAXを搭載する携帯機器の稼働時間を大幅に延ばすことができる。

移動端末の送信電力制御

本章では、送信電力制御の概要、移動端末TPCアルゴリズム、およびアルゴリズムを評価するためのシミュレーションについて述べる。

WiMAXシステムでも、CDMA（Code Division Multiple Access）システムと同様に、基地局が移動端末の送信電力の制御を行う。CDMAシステムでは、複数の移動端末の信号をCDMA復号化によって分離するために、移動端末の送信電力を基地局が厳密に調節し、基地局での受信電力を等しくす

る送信電力制御（TPC）が行われる。²⁰ 一方、WiMAXシステムでは、アンテナから基地局が受け取る受信電力の総和が上限を超えないようにすることだけが、WiMAX規格²⁰で規定されている（上りリンクのTPCアルゴリズムはベンダごとに異なる）。

WiMAXシステムはAMC（適応変調符号化）をサポートしている。これは、QPSK（Quadrature Phase Shift Keying）やQAM（Quadrature Amplitude Modulation）などの変調方式や、誤り訂正符号化率を、ワイヤレスチャネルの品質に応じて変える方式である。上りリンクのAMCでは、基地局は受信信号の信号対干渉雑音比（SINR：Signal to Interference plus Noise Ratio）を観察することで、移動端末の変調方式と符号化率の組合せ（MCS：Modulation and Coding Scheme）を決定する。基地局はMCS情報を各移動端末に伝え、移動端末はこのMCS情報に従った変調、符号化の後、送信を行う。SINRが良好であれば、移動端末は高速の変調方式と小さい誤り訂正符号化率を使用できるため、高い伝送速度が実現できる。SINRを改善するための一つの方法は、移動端末が高い出力で送信する（信号強度を高める）ことであるが、送信電力を高めると消費電力が増え、バッテリーの寿命が短くなる。またWiMAXシステムは、基地局が配下の各移動端末に、移動端末の送信信号の干渉が起こらないように無線リソースを割り当てるが、ほかの基地局配下の移動端末を考慮しない場合、移動端末の送信電力が高まると、ほかの基地局配下の移動端末との間で干渉が発生する恐れがある。移動端末の送

信信号に干渉が生じると、干渉を受けた移動端末は送信電力を上げて伝送速度を維持するが、これはバッテリーの寿命を更に縮めることになる。移動端末では、バッテリー寿命を延ばすことが必要なため、伝送速度とバッテリー寿命を考慮した移動端末の送信電力の制御が極めて重要になる。

● 移動端末TPCアルゴリズム

開発した、バッテリー寿命を延ばす移動端末の（送信電力制御）TPCアルゴリズムの動作を図-4に示す。アルゴリズムは、送信電力が最小となる、最も伝送速度の低い（最も干渉を受けにくい）MCSをできる限り使用することを基本とする。ある基地局配下の、すべての移動端末から送信されるデータ量の総和が、最も伝送速度の低い（最も干渉を受けにくい）MCS（例えば、変調方式＝QPSK、誤り訂正符号化率＝1/2）を用いて送信することが可能な場合（図-4のノットビジーの状態）、基地局は各移動端末に対してそのMCSを指定し、各移動端末の送信電力も、そのMCSでの伝送が保証されるSINRを達成できる、最小の大きさが指定される。すべての移動端末から送信されるデータ量の総和がそのMCSでの伝送容量を超える場合（図-4のビジーの状態）、基地局は、ほかの基地局の配下にある移動端末の送信信号に最も干渉を与えない（すなわち、ほかの基地局配下の移動端末の送信電力の増加が最も少ない）移動端末を抽出する。基地局はその移動端末に対して、より伝送速度の速いMCSを指定し、その新しいMCSを使った伝送が保証されるSINRを達成できる、より大きい送信電力を指定する

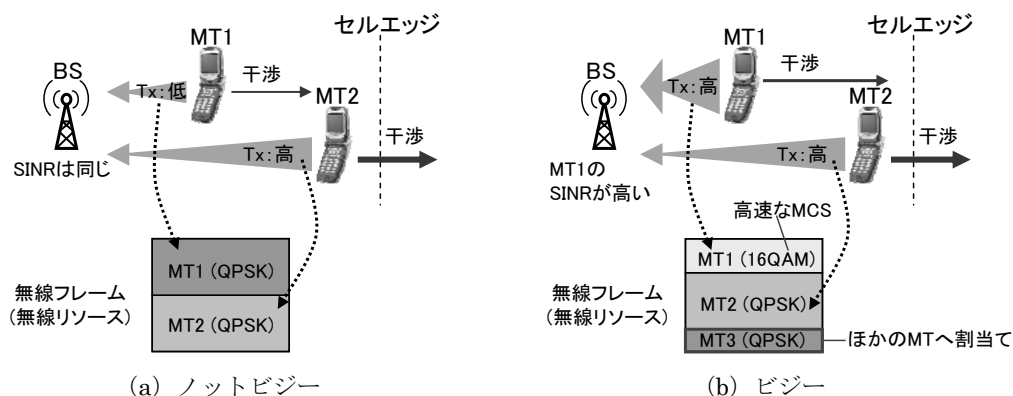


図-4 送信電力制御アルゴリズム概要
Fig.4-TPC algorithm overview.

(SINRを高める)。伝送速度の速いMCSを使用することで、その移動端末に対して必要な無線リソースが減少し、基地局は解放した無線リソースを別の移動端末に割り当てることが可能となる。ほかの基地局の配下にある移動端末の送信信号に、最も干渉を与えない移動端末は、移動端末の送信電力を指標に抽出される。すべての移動端末のMCSが同じ場合、必要なSINRは同じであるから、ほかの基地局の配下にある移動端末からの、送信信号への干渉が最も小さい移動端末は、送信電力が最小となる。干渉は対称的なため、送信信号に受ける干渉が最も小さい移動端末（すなわち、送信電力が最も小さい移動端末）が、ほかの基地局配下の移動端末の送信信号に与える干渉が最も小さい移動端末となり、最小の電力で送信する移動端末が、伝送速度の速いMCSおよびより大きい送信電力を用いる移動端末に選ばれる。

● シミュレーション

アルゴリズムを評価するため、移動端末の上りリンクについて基地局の受信信号のSINRを計算するシミュレータを開発した。シミュレータはこのSINRから、各MCSに必要なSINRに基づき、最大伝送速度を計算する。シミュレーション方法を図-5に示す。BS1がMT1から受信する信号を受信信号とし、BS1における電力を計算する。ほかの基地局（BS2）の配下にある移動端末（MT2-0～MT2-5）から受信する信号を干渉として扱い、BS1における

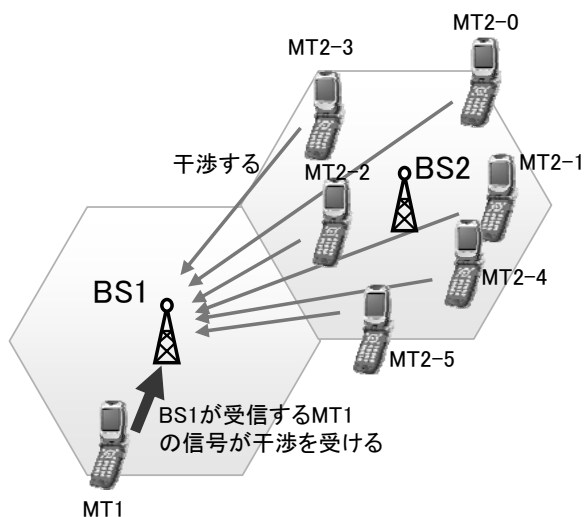


図-5 シミュレーション方法
Fig.5-Simulation method.

その電力を計算して合算する。この干渉電力に特定量のランダムノイズ電力を付加し、MT1のSINRを計算する。シミュレーションでは、隣接する六つのセルに含まれる移動端末を干渉源として扱った。シミュレーション条件を表-1に示す。

平均送信電力と接続本数（移動端末の台数）の関係を図-6に示す。下の線が、提案アルゴリズムによるもので、上の線が、移動端末が置かれた干渉・雑音環境下で、最高速度のMCSによる伝送を保証する送信電力を選択する、従来型アルゴリズムによるものである。提案アルゴリズムでは、接続本数の少ない領域で移動端末の送信電力が低く抑えられてい

表-1 シミュレーション条件

	項目	値
ネットワーク構成	セル構造	オムニ
	セル数	7セル
	セル半径	1 km
	移動端末台数（接続数）	28, 32, 36, 40, 44
スケジューラ	アルゴリズム	ラウンドロビン
	MCS	QPSK (1/2), QPSK (2/3), QPSK (3/4) 16QAM (1/2), 16QAM (2/3), 16QAM (3/4)
送信電力制御	必要 SINR (QPSK)	3 dB (1/2), 6 dB (2/3), 9 dB (3/4)
	必要 SINR (16QAM)	11 dB (1/2), 14 dB (2/3), 17 dB (3/4)
	移動端末送信電力	23 dBm
チャネルモデル	パスロス	ITU-Tビーキュラ

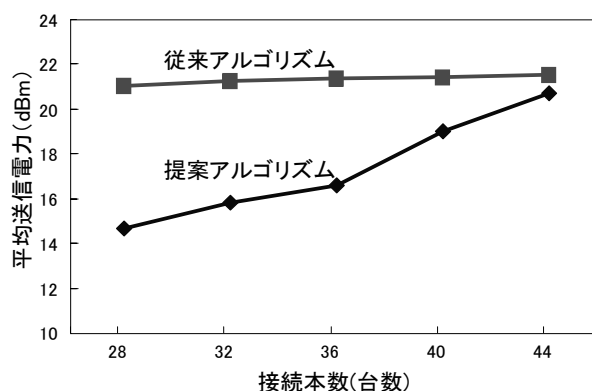


図-6 シミュレーション結果
Fig.6-Simulation results.

る。セル設計では、移動端末が基地局に接続できないことによる話中の発生を減らすため、接続可能な移動端末の台数を多めに設計する。多くの場合、セル内には接続可能な台数よりも少ない移動端末しか存在しないため、提案アルゴリズムによる移動端末の消費電力の削減効果が大きい。

む す び

WiMAXシステムにおいて、移動端末の低消費電力化を実現するために、端末のMAC層に実装されるアイドルモード・スリープモードの実現技術について述べた。また、基地局のMAC層に実装される移動端末の送信電力制御アルゴリズムについて論じた。移動端末の低消費電力化は、ワイヤレスブロードバンドシステムを普及させるための最重要課題の一つである。IEEEでは更なる高速化を目指した次世代のシステム(802.16m)の検討も始まっている。

引き続きこれらのメカニズムの評価を実施するとともに、さらに効率の高い方法について研究を推進していく。

参 考 文 献

- (1) IEEE Std 802.16e-2005, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16 : Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2 : Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, Feb. 2006.
- (2) R. Kohno, et al. : Spread Spectrum Access Methods for Wireless Communications . *IEEE Communications Magazine*, Vol.33, No.1, p.58-67 (1995).

