

次世代ワイヤレス通信を指向するオペレーティングシステムの提案

毛利 公一 前田 忠彦 大久保 英嗣

立命館大学工学部情報学科

ワイヤレス技術の発展により、ワイヤレス通信の速度が向上し、利用場所も屋内外を問わず広がっている。今後も、利便性の高さから、利用するユーザ数の増加と利用範囲の拡大が予想される。適用場面も、動画のストリーミング、音声通信、電子政府、電子商取引、ユビキタスコンピューティングなど、広がりを見せようとしている。しかし、周波数などのワイヤレス資源の枯渇、複数端末による同時通信が不可能なことに起因するリアルタイム性とQoS(Quality of Service)の保証性の低下、電波の漏洩によるセキュリティの低下といった問題がある。我々は、これらの問題をアンテナサブシステムからシステムソフトウェアまでを総合的に捉えることにより解決し、かつ端末群全体としてのスループットを向上可能な次世代ワイヤレス通信システムの構想を立ち上げた。本論文では、全体構想と、指向性が高く周波数などのワイヤレスパラメータの制御が可能なアンテナサブシステムと協調し、時間、周波数、空間をスケジューリングする適応型ワイヤレス指向オペレーティングシステムについて述べる。

キーワード: オペレーティングシステム, 無線通信, QoS制御, 適応型アンテナ, リアルタイム

A Proposal of Operating System for Next Generation Wireless Communication

KOICHI MOURI, TADAHIKO MAEDA and EIJI OKUBO

Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

During the progressive evolution of wireless communication technologies, transmission speed and capacity become high, and coverage areas are expanded. Number of users and usage will continue to grow because wireless system is very useful. Its application fields are also expanding to streaming, voice communication, electronic government, electronic commerce, ubiquitous computing and so on. However, there are problems: shortage of wireless resources such as frequency spectrum; real-time responsiveness and QoS(Quality of Service) decrease because only a terminal can transmit radio signal at the moment; security degradation because of leakage of radio wave. We proposed the next generation wireless communication system to solve these problems. The system is designed from antenna subsystem to system software, and can improve communication throughput of terminals. The antenna subsystem has high directivity and software-controllability. The operating system has time, frequency and space domain-based real-time scheduling method. In this paper, concept of the whole system, and adaptive wireless-oriented operating system which cooperates with the antenna subsystem are described.

Keywords: Operating system, Wireless communication, QoS control, Adaptive antenna, Real-time

1 はじめに

ワイヤレス技術の発展は、2.4GHz帯や5GHz帯の周波数を用いた高速通信を実現し、IEEE802.11a規格の無線LANでは54Mbpsでのワイヤレス通信が可能となっている。無線LANが利用される場所は、オフィスや大学のキャンパスに加え、店舗や駅などまで広がっている。今後もその利便性の高さから、利用するユーザ数は増加し、利用頻度も高くなることが予想される。ワイヤレス通信の適用場面

も、メールのやり取りやWWWの閲覧だけでなく、VoD(Video on Demand)などの動画のストリーミング、VoIP(Voice over Internet Protocol)などの音声通信、e-Japan戦略で推進されている電子政府や電子商取引、ユビキタスコンピューティングなど、大きな広がりを見せようとしている。しかし、このようなコンテンツの増加と大容量化、リアルタイム性やQoS(Quality of Service)の保証、セキュリティの確保などの視点から、次世代ワイヤレス技術が解決

しなければならぬ課題は多い。

特に、周波数などのワイヤレス資源は有限であるため、基地局の設置密度の上限が低いことや、帯域幅の確保が難しくなってしまうといった課題がある。また、無線LANシステムで使われている装置の多くは、ほぼ全方向性を持つ電波が送出されるため、1台の端末が信号を送出している間は、その電波の到達範囲内に位置するすべての基地局と端末から信号を送出することができない。すなわち、リアルタイム性の確保やQoSの保証が困難となる。さらに、必要以上の端末が電波を受信するため、セキュリティ確保の観点からも好ましくないといった課題もある。これらの課題を解決するために、システムソフトウェア分野、ワイヤレス分野、ネットワーク分野の各方面で研究が行われている。しかし、いずれも特定の分野内の視点によるものであり、上記の課題の一部を対象としたものとなっている。

以上の背景から、我々は、ワイヤレスシステムからシステムソフトウェアまでを総合的に捉え、リアルタイム性やQoSの保証といったアプリケーションの要求を満たし、ワイヤレス資源を有効活用し、かつシステム全体としてのスループットを向上することが可能な次世代ワイヤレス通信システムの構想を立ち上げた[1]。本論文では、特に、超高速ワイヤレス通信環境に適用可能なワイヤレス指向オペレーティングシステム(以下、OS)について述べる。ワイヤレス指向OSは、指向性が高く周波数などのワイヤレスパラメータの制御が可能なアンテナサブシステムと協調し、時間、周波数、空間をスケジューリングすることによって、次世代ワイヤレスシステムの構築を目指すものである。

以下、本論文では、2章でワイヤレスシステムとシステムソフトウェアの関連研究について述べる。3章では、次世代ワイヤレス通信システムの概要について述べ、4章で周波数共用型アンテナサブシステム、5章で環境適応型ワイヤレス指向OSについて述べる。最後に、6章で本論文のまとめを述べる。

2 関連研究

2.1 IEEE 802.11

IEEE 802.11方式を用いた無線LANでは、基本的なアクセス手順としてCSMA/CA¹方式が採用され

¹Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, 搬送波感知多重アクセス/衝突回避。

ている[2]。この方式では、端末が信号を送信する前に、他の端末がチャンネルを使用中か否かを調べる。未使用であれば送信し、使用中であれば未使用になるのを待って送信をする。

このとき、使用中か否かを判断する基準として、IFS(Inter Frame Space)が規定されている。この期間だけ信号が検出されなかった場合に、未使用と判断するようになっている。このIFSには、主としてSIFS(Short IFS)とDIFS(Distributed IFS)が定義されている。SIFSは優先順位の高いデータやACK(Acknowledgement)などの通信に適用され、DIFSは優先順位の低い一般の通信に適用される。そのため、SIFSの方がDIFSよりも短い時間が定義されている。さらに、未使用と判断されたときに、複数の無線局が一斉に送信を開始することを避けるために、乱数で決定されるバックオフタイムというものが設定されている。

このように、IEEE 802.11では、衝突回避のための仕組みを導入するため、優先順位の低い一般の通信については、パケット送信が終了してから次のパケット送信を開始するまでの間隔がDIFSとバックオフタイムの和となる。したがって、IEEE 802.11bによる実際の転送効率は、1対1の通信で2.5Mbps程度[5]と、理論値の11Mbpsと比較すると大幅に低くなる。さらに、電波の到達範囲内に位置する端末数が増えるに従ってバックオフタイムも大きくなるため、リアルタイム性を要求するようなアプリケーションへの適用が難しい。

2.2 無線LAN統合アクセスシステム

無線LANでは、2.1節で述べたように、電波の到達範囲内に位置する端末数が多くなるに従って通信速度が遅くなる。これを解決するためのシステムとして、無線LAN統合アクセスシステム[3]~[7]が提案されている。このシステムでは次のような手法を適用している。

(1) 電波干渉の軽減

基地局側に、送信する電波の到達範囲を限定するための機構を追加し、基地局同士の電波干渉が発生しないようにしている。したがって、基地局を密に配置することが可能となり、同時に、密に配置された基地局から、それぞれ異なるデータを端末へ送信可能となる。これによって従来よりもスループットが向上する。また、それぞ

れが同じ周波帯でデータを送信可能となるため、ワイヤレス資源の再利用が可能となるメリットも持つ。

(2) ダウンリンクとアップリンクの分離

ダウンリンク(基地局から端末への通信)は、(1)の手法を用いることで効率の良いデータ送信を実現している。しかし、アップリンク(端末から基地局への通信)は端末の無線装置の制約から、電波の到達範囲を限定することができない。したがって、1台の端末からデータ送信が開始されると、周辺の基地局と端末に対して電波干渉を引き起こすという問題を持っている。そのため、ダウンリンクの送信のための時間とアップリンクの送信のための時間を分割し、アップリンク送信がダウンリンク送信を妨げないようにしている。

(3) ACKパケットの衝突回避

MAC (Medium Access Control) レイヤでは、データパケットを受信すると直ちにACKパケットを返信する。無線LAN統合アクセスシステムでは、アップリンク送信として頻りに発生するACKパケットをまとめて返信する手法を取り入れることによって、アップリンク送信を削減している。

無線LAN統合アクセスシステムでは、以上の手法によって、システム全体としてのスループット、特にダウンリンクのスループットを向上し、ワイヤレス資源の再利用も実現している。現在、シミュレーションによって、ダウンリンク比率が0.8のときに1.5倍程度の速度向上が見込まれている [6]。

しかし、この手法では、端末側が送信する電波の到達範囲を限定していない。そのため、アップリンク送信が行われているときはダウンリンク送信ができない。また、セキュリティに関しても、アップリンク送信が周囲の端末から盗聴可能であるなど、さらに解決すべき課題を持っている。

2.3 ソフトウェア無線

ワイヤレス技術の視点で、ワイヤレス資源を動的かつ有機的に管理し、割り付ける技術としてソフトウェア無線 [8][9] が提案されている。

従来のアナログ技術をベースとしたワイヤレスシステムでは、アンテナからの入力を、バンドパス

フィルタ、RF²アンプ、ダウンコンバータ、IF³アンプ、A/Dコンバータを組み合わせることによって、特定の周波帯の信号を取り出していた。この場合、多数のハードウェアコンポーネントが必要であり、コストが高く、システムが複雑になる。

ソフトウェア無線では、RFアンプの出力を直接A/Dコンバータに入力⁴、デジタル信号を得る。そして、デジタル信号となった後に、必要な周波帯の信号を取り出す。ソフトウェア無線は、DSP(Digital Signal Processor)チップやFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて、これらの処理をソフトウェアで行う。

この技術は、携帯電話で、PHS、PDC、GPSなどの複数の無線標準方式を同時に実装する場合などに適用でき、部品削減によるコスト軽減が可能となる。しかし、ソフトウェア無線単体では、アプリケーションが送受信するデータの性質に応じて適切な制御をするといった、OSやアプリケーションとの協調が十分であるとは言えない。

2.4 Mobile IPとソフトハンドオフ

ワイヤレス通信システムでは、端末が移動することを考慮する必要がある。端末が移動しても、IPレベルで継続的に利用できる技術として、モバイルIP [10] が提案されている。このモバイルIPは、IP上でIPパケットをトンネリングすることで実現している。しかし、ホームエージェントの設置が必要なこと、通信の遅延が大きくなること、移動時のパケットロスといった問題がある。

一方で、端末の移動を透過的に扱うことのできるものにソフトハンドオフ機能がある。この手法は携帯電話システムなどでも用いられている。しかし、携帯電話システムの場合は、無線基地局同士を結ぶバックボーンネットワークは、そのリアルタイム性を保証するために、専用線で結ばれている。今後バックボーンネットワークがIP網で置き換えられることが予測され、その場合のリアルタイム性の確保の手法についてその音声通信やストリーミングといった通信内容によって処理の方式を変える必要がある [11]。このような環境では、一般的に、ソフトハンドオフ処理における無線基地局側でのバッファリン

²RF: Radio Frequency, 無線周波数。

³IF: Intermediate Frequency, 中間周波数。

⁴実際には、A/Dコンバータの性能上の問題で、ダウンコンバートしてIFへ落とし、その後A/Dコンバータへ入力する必要がある。

グや基地局間のアナログ信号の伝達における優先処理といった処理を適切に行うことが難しい。

2.5 資源管理システム『堤』

アプリケーションが実際に通信されるデータの性質に基づいて、最適な通信を行うためのシステムとしては、OSやミドルウェアとして実装されるQoS管理システムがある。資源管理システム『堤』(以下、堤)[12]は、マルチメディア通信を対象として、(1)ユーザが要求するサービス品質を保証する、(2)アプリケーションの追加や削除、資源量の変動、ユーザが要求するサービス品質の変更があった場合に動的にQoSを制御する、(3)資源量が十分でない場合は、市場モデルに基づいて他のアプリケーションと交渉して資源を獲得する、といった機能を提供している。

堤は、資源としてCPU、メモリ、ネットワークを対象としている。ユーザは、通信の優先度、またはフレームレート、フレームサイズ、色数などのパラメータを指定できる。これらのパラメータは、QoSパラメータ変換機構によって、CPU利用率、メモリサイズ、ネットワークの帯域幅などのシステムQoSパラメータへ変換される。堤は、特にネットワークの資源管理に注目した場合、帯域幅のパラメータを基に、CBQ(Class-Based Queueing)[13]方式を用いてパケットスケジューリングを行い、QoSの保証を実現している。

堤によって、ユーザの求めるQoSの保証が可能となる。しかし、ネットワークにおいては、有線による通信のみを対象としており、端末間での協調が必要なワイヤレス通信は考慮されていない。

3 次世代ワイヤレス通信システムの概要

3.1 目的と意義

ワイヤレス通信においては、2.1節で述べたMACレイヤの規格化と高速化、2.2節で述べた無線LANにおける通信の効率化の研究が行われている。また、2.3節で述べたような、ワイヤレスシステムのソフトウェア化に関する研究が行われている。また、2.4節で述べたように、端末の透過的な移動に関する研究も行われている。

一方で、システムソフトウェアにおいては、従来のOSは、ベストエフォート型であり、計算機資源の予約や保証をしていなかった。リアルタイムOSで

は、アプリケーションに時間に対する保証をし、排他制御による計算機資源の確保を中心に管理を行っている。しかし、アプリケーションの起動や終了、計算機資源の動的な変化に応じてQoSを管理することはできなかった。このような背景から、種々のQoS管理システムの研究が行われている[14]。

我々は、ワイヤレスシステムから、ミドルウェアやOSといったシステムソフトウェアまですべてを研究の対象とし、個々に対する研究では実現できなかった課題の解決を目的とする。具体的には次の4点について実現する。

- (1) 電波資源を有効利用し、電波・周波数資源枯渇という問題に対して直接対応可能な新技術を開発する。
- (2) 次世代インターネットのための超高速ワイヤレス通信環境を実現する。
- (3) ワイヤレスシステムのハンドオフ機能を用いて複数のアンテナサブシステム間の移動を可能とするネットワーク機構を開発する。
- (4) ワイヤレス環境において、アプリケーションに対するQoSを保証する。

本研究は、以上で述べたように、電波と周波数資源の有効利用、超高速ワイヤレス通信環境、環境適応と品質保証が可能な通信機能を成果として、次世代インターネットの中核を担う意義を持つものである。

3.2 全体構成

本研究で開発する次世代ワイヤレス通信システムの全体構成を図1に示す。ハードウェアは、周波数共用型アンテナサブシステムと計算機から構成される。アンテナサブシステムは、ワイヤレス資源である周波数の再利用を可能とするものを開発する。計算機上で動作するソフトウェアとして、ワイヤレス環境で端末が透過的に移動可能とし、かつ周波数を通信内容に応じて積極的に切り替えるアクティブネットワークスケジューラを内蔵した、環境適応型ワイヤレス指向OSを開発する。そして、その上でアプリケーションが動作する。

4 周波数共用型アンテナサブシステム

OSと協調してソフトウェアから電波の周波数、放射特性、干渉制御法の切替えを可能とすることによって、複数のシステム間で周波数の共有と超高速通信を実現する、新しい周波数共用型アンテナサブシ

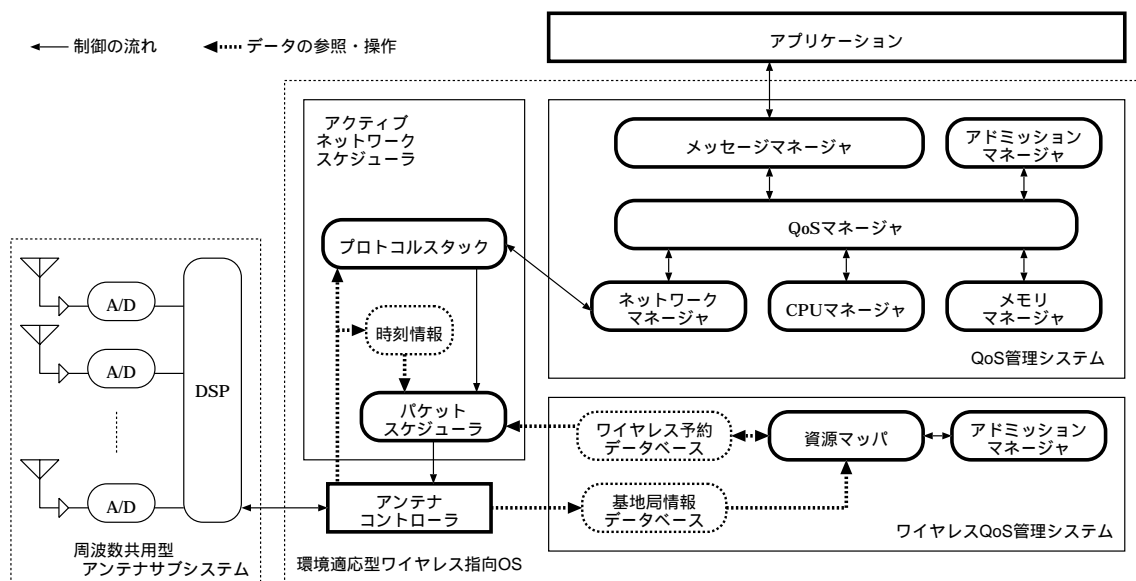


図 1 次世代ワイヤレス通信システムの全体構成

テムを提案する。

電波は、それを送出するアンテナ素子の数や形状、周波数などによって、その放射特性が変化する。例えば、素子の数が1であるダイポールアンテナ(図2)と素子の数が5である5素子配列アンテナ(図3)では、その指向性は大きく異なる。また、図4、図5、図6は、いずれも素子の数が1で、筐体に取り付けられたアンテナから放射される電波の指向性であるが、それぞれの周波数が f_1, f_2, f_3 ($f_1 < f_2 < f_3$)と異なっている。このように、素子の数が同じであってもその周波数が異なれば指向性が変化する。

上記のように、ワイヤレスパラメータによって指向性が変化するため、これをOSと協調することによって適切に制御を行う。周波数共用型アンテナサブシステムの制御アルゴリズムに関しては、特に周囲の電波環境に応じて指向性などのワイヤレスパラメータを制御する方式を用いる。アンテナサブシステムが置かれる電波的环境は、周囲の基地局、近傍の端末から放射される電波をモニタすることによって、どのような指向性制御が適切であるか判定する。また、OSと協調する際の最適化を図るための評価関数も導入する。

さらに、通信範囲の冗長性を持たせた基地局を製作し、分散ワイヤレスネットワークシステムを実現し、次世代インターネットにおける超高速ワイヤレ

ス通信システムのハンドオフ・アダプティブ制御を実現する。

5 環境適応型ワイヤレス指向OS

環境適応型ワイヤレス指向OSは、リアルタイムOS Easel[15]をベースとし、QoS管理システム、ワイヤレスQoS管理システム、アクティブネットワークスケジューラを追加する形で構築する。以下、それぞれについて述べる。

5.1 QoS管理システム

QoS管理システムは、2.5章で述べた堤をベースとして構築を行い、次の各マネージャから構成される。

- QoS マネージャ
市場モデルに基づくQoS交渉機能を持ち、計算機の負荷の監視やQoS管理システムの各機能との連携によって、動的QoS制御を行う。QoS管理システムの中心的な役割を果たす。
- アドミッションマネージャ
CPU、メモリ、ネットワークマネージャが持つ資源の残量の情報を蓄積し、資源の割当ての要求があった場合に、使用可能かどうかの判定を行う。
- メッセージマネージャ
アプリケーションとの双方向インタフェースとなる。アプリケーションからのQoSパラメータ

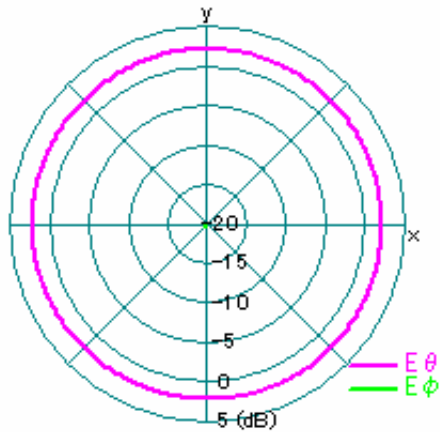


図 2 ダイポールアンテナの指向性

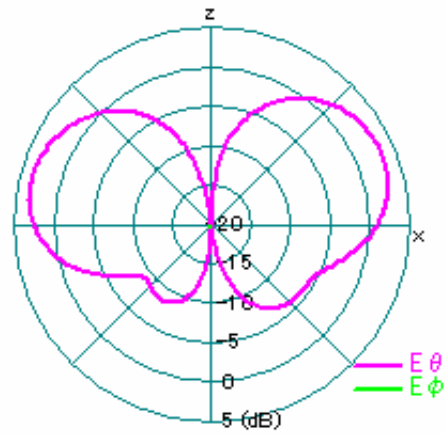


図 4 筐体に取り付けられたアンテナの指向性(周波数 f_1)

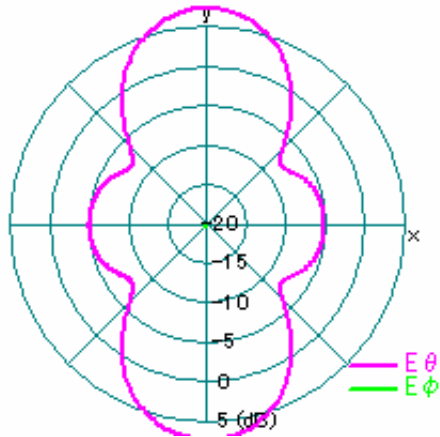


図 3 5素子配列アンテナの指向性

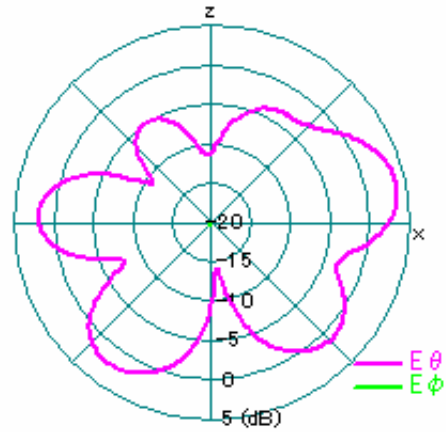


図 5 筐体に取り付けられたアンテナの指向性(周波数 f_2)

の指定, QoS パラメータの変更など QoS 管理システムからの通知, 送受信するデータの授受などの機能を持つ.

- CPU, メモリ, ネットワークマネージャ
資源予約, 割当て, 解放といった処理に関して,
各資源に特有の部分を実現する.

5.2 ワイヤレス QoS 管理システム

ワイヤレスシステムでは, データを送信する際に必要なパラメータとして次のものが挙げられる.

- 時刻: 電波を送出するタイミング
- 周波数: 送出手電波の周波数
- 放射特性: 送出手電波の指向性などの特性
- 占有空間: 周囲の基地局や端末の位置情報

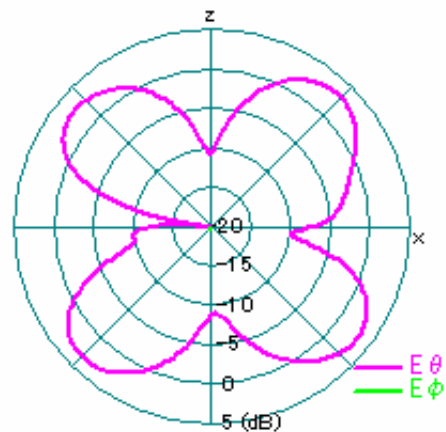


図 6 筐体に取り付けられたアンテナの指向性(周波数 f_3)

これらは、ワイヤレスシステム特有のQoSパラメータで、アプリケーションで指定される帯域幅、遅延、ジッタ、優先度といったパラメータと、アンテナコントローラが提供する基地局や端末の位置情報をもとに算出される。

資源マップは、上記のパラメータを基に、時刻、使用するアンテナ素子、DSPの使用率の3つの下位のワイヤレスQoSパラメータに変換する。この下位のワイヤレスQoSパラメータを用いて、アンテナコントローラが実際に周波数共用型アンテナサブシステムに対して電波の送出の指令を出す。

5.3 アクティブネットワークスケジューラ

アクティブネットワークスケジューラは、QoS管理システムとワイヤレスQoS管理システムから指定されたパラメータに基づいて、送信するデータの順序やタイミングを決定する役割を持つ。時分割で送信するデータとワイヤレス資源を積極的に切り替えることによって、効率的にQoSを保証するようなネットワークスケジューリング方式を実現するとともに、ハンドオフ機能の実現に必要なリアルタイム性も提供する。

QoSの保証とリアルタイム性の実現のために、パケットスケジューラによって、送信するデータのスケジューリングを行う。そのスケジューリングの手法として、レートモニタリングスケジューリング方式[16]をパケットのスケジューリングに適用する。動画のストリーミングやVoIPなどの音声通信といった、時間制約があり、かつ周期的にデータの送受信が行われるものは、あらかじめ周期と情報量を見積もることができる。これは、CPUスケジューリングにおける周期タスクに相当する。

一方、電子商取引やユビキタスコンピューティングにおける個人情報の送受信など、時間制約がなく、イベント的に発生する非周期的な通信は、スボラディックサーバ[17]の手法を用いて、レートモニタリングスケジューリングへ組込む。

このように、周期的なリアルタイム通信を中心として、非リアルタイム通信を可能とする方式を採用する。

5.4 アンテナコントローラ

アンテナコントローラは、イーサネットなどのネットワークインタフェースカードのデバイスドライバに相当する。データを送信する場合は、アンテナコ

ントローラは、ワイヤレスQoS管理システムで指定された資源を用いて、ネットワークスケジューラから指定されたデータを送出するように、周波数共用型アンテナサブシステムを制御する。

データを受信する場合は、周辺の基地局や端末に関する情報はワイヤレスQoS管理システムへ、基地局等との時刻同期に関する情報と一般のデータはアクティブネットワークスケジューラへ渡される。

6 おわりに

本論文では、次世代ワイヤレス通信システムを視野に入れた周波数共用型アンテナサブシステムと適応型ワイヤレス指向OSについて、その構想を述べた。本システムによって、周波数などの電波資源の有効利用を実現し、端末が透過的に移動可能となる環境を提供することが可能となる。さらに、アプリケーションに対して、ワイヤレス環境においてもQoSの保証が可能となる。また、電波が人体へ及ぼす影響を軽減する技術へも展開が可能となる。

今後、さらに詳細な設計を進める。特に、ハードウェアとソフトウェアの機能分担、および両者のインタフェース、QoS管理システムが管理するQoSパラメータからアンテナサブシステムの制御パラメータまでの具体的な変換手法についての検討を進める予定である。

参考文献

- [1] Tadahiko Maeda, Koichi Mouri and Eiji Okubo, "Multi-Wireless Standards and Wireless-Oriented Operating System for Antenna Subsystem Based on Space Domain Wireless Resource Scheduling," Proceedings of the 2002 Interim International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2002), pp. 362-365, 2002.
- [2] 阪田 徹, "ワイヤレスネットワーク技術の現況," インタフェース, 2003年2月号, pp. 28-47, CQ出版社, 2002.
- [3] 矢野 隆, 玉木 剛, 荻野 敦, 石藤 智昭, 加藤 猛, "無線LAN統合アクセスシステム(1)-システムコンセプト-, " 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-5-186, pp. 483, 2002.
- [4] 玉木 剛, 雅樂 隆基, 下川 功, 矢野 隆, "無線LAN統合アクセスシステム(2)-統合パケット管

- 理方式の検討-, ” 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-5-187, pp. 484, 2002 .
- [5] 雅樂 隆基, 玉木 剛, 下川 功, 矢野 隆, “無線 LAN 統合アクセスシステム (3) -ACK パケット衝突回避方法の検討-, ” 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-5-188, pp. 485, 2002 .
- [6] 下川 功, 林 信幸, 三品 政和, 玉木 剛, 雅樂 隆基, 矢野 隆, “無線 LAN 統合アクセスシステム (4) -統合パケット管理の評価-, ” 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-5-189, pp. 486, 2002 .
- [7] 山崎 良太, 荻野 敦, 志田 雅昭, 渡辺 晃司, 鈴木 秀哉, 土居 信教, “無線 LAN 統合アクセスシステム (5) -位置検出方式の精度評価-, ” 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-5-190, pp. 487, 2002 .
- [8] Joseph Mitola III, “Software Radios, ” IEEE Communications Magazine, pp. 24-25, 1995.
- [9] 春山 真一郎, “ソフトウェア無線: リコンフィギュアが可能な無線システム, ” 情報処理, Vol. 40, No. 3, pp. 333-336, 1999 .
- [10] C. Perkins, “IP Mobility Support, ” RFC2002, 1996.
- [11] Yoshihiro Ohba, Tadahiko Maeda, Shinichi Baba and Tao Zhang, “Issues on Handoff and Security in IP-based Broadband Wireless Networks, ” Proceedings of the 2002 Interim International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2002), pp. 370-374, 2002.
- [12] 田中 大介, 芝 公仁, 大久保 英嗣, “動的 QoS 制御に基づく資源管理システム『堤』の設計と実装, ” 第 60 回 (平成 12 年前期) 情報処理学会全国大会講演論文集 (1), pp. 141-142, 2000 .
- [13] S. Floyd and V. Jacobson, “Link-sharing and resource management models for packet networks, ” IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3, No. 4, pp. 365-386, 1995.
- [14] Dan Chalmers and Morris Sloman, “A Survey of Quality of Service in Mobile Computing Environments, ” IEEE Communications Surveys, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, Second Quarter, 1999.
- [15] 谷出 新, 芝 公仁, 大久保 英嗣, “リアルタイムオペレーティングシステム Easel におけるメモリ管理機構, ” 情報処理学会研究報告 2001-OS-86, Vol. 2001, No. 21, pp. 91-98, 2001 .
- [16] C. L. Liu and J. W. Layland, “Scheduling Algorithm for multiprogramming in a Hard Real Time Environment, ” Journal of the ACM, Vol. 20, No. 1, pp. 46-61, 1973.
- [17] Andre van Tilborg and Gray Knoob, “Foundation of Real-Time Computing, ” Kluwer Academic Publishers, 1991.