

## シームレス通信のためのソフトウェア無線端末の管理方式

前田 慎司<sup>†</sup> 栗原まり子<sup>†</sup> 岡田 英明<sup>†</sup> 宮内 直人<sup>†</sup>

寺島 美昭<sup>†</sup> 宮本 剛<sup>‡</sup> 清原 良三<sup>†</sup>

<sup>†</sup>三菱電機(株) 情報技術総合研究所

<sup>‡</sup>独立行政法人 情報通信研究機構

複数の無線通信方式が混在する環境において、ユーザがシームレスに通信品質の高い無線通信方式を利用する技術として、コグニティブ無線が注目されている。1 台で複数の無線通信方式に対応するマルチモード端末として、無線部をソフトウェアで実装し、端末上でソフトウェアを更新することにより、多様な無線通信方式に対応できるソフトウェア無線(SDR)端末が有効と考えられる。

本論文では、SDR 端末を利用したシームレス通信の実現を目的として、キャリア網側に基地局と SDR 端末の状態を管理する状態管理サーバを設置し、網主導で SDR 端末をハンドオーバーさせる方式を提案する。さらに、本方式による管理オーバーヘッドとスケーラビリティへの影響を評価する。

### Proposal of Software Defined Radio Terminal Management for Seamless Communication

Shinji MAEDA<sup>†</sup> Mariko KURIHARA<sup>†</sup> Hideaki OKADA<sup>†</sup> Naoto MIYAUCHI<sup>†</sup>

Yoshiaki TERASHIMA<sup>†</sup> Goh MIYAMOTO<sup>‡</sup> Ryozo KIYOHARA<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

<sup>‡</sup>National Institute of Information and Communications Technology

In the environment where wireless communication systems are connected mutually, cognitive radio is one of the key technologies for wireless service with high communication quality in the seamless manner. The SDR terminal is effective as a multimode terminal because wireless functions are implemented with software, and can use various communication methods by downloading and updating software.

This paper presents SDR terminal management method for seamless communication. The management server is arranged in the carrier networks and manages SDR terminals and base stations, and makes the SDR terminal handover by the network initiation. In addition, we examine the management overheads and scalability of this method.

#### 1. はじめに

2010 年頃の実現を目指す第 4 世代移動通信システムでは、携帯電話や無線 LAN 等の複数の無線通信サービスが相互に連携し、通信を継続しながら、ユーザが意識することなく最適な無線通信方式に切り替えるシームレス通信の環境が求められている[1]。

このような環境では、1 台で複数の無線通信方式に対応したマルチモード端末を利用し、異なる無線通信方式間で高速にハンドオーバーする技術が必要である。

一方、無線通信サービスを提供するキャリア網側で基地局と端末の状態を管理し、端末を混雑した基地局から空いている基地局に強制的にハンド

オーバーさせることにより、網全体の負荷分散を図る手法が研究されている[2]。

ソフトウェア無線(Software Defined Radio、以下 SDR)技術は無線部をソフトウェアで実装し、端末上でソフトウェアを更新することにより、複数の無線通信方式に対応する技術である。ソフトウェアをダウンロードして更新することにより、ハードウェアの交換なく新しい無線通信方式に対応できるため、マルチモード端末として非常に有効である。

本論文では SDR 端末を利用したシームレス通信の実現を目的とする SDR 端末の管理方式を提案する。本方式では網側で基地局と SDR 端末の状態を管理し、網主導で強制的に SDR 端末のハンドオーバーを行う。さらに、本方式による管理オーバーヘッドとスケーラビリティへの影響を評価する。

## 2. 関連研究

### 2.1 コグニティブ無線

複数の無線通信方式が混在する環境において、ユーザがシームレスに通信品質の高い無線通信方式を利用する技術として、コグニティブ無線が注目されている[3]。上記論文ではコグニティブ無線技術を「無線機が周囲の電波利用環境を認識し、その状況に応じて無線機が適宜学習等を取り入れつつ、ネットワーク側の協力を得ながらシステム内、システム間問わず複数の周波数帯域、タイムスロット、ユーザの所望の通信容量を所望の通信品質で周波数の有効利用をはかりつつ伝送を行う無線通信技術」と定義し、以下のように進化すると述べている。

- 第1世代コグニティブ無線  
複数の通信方式に対応した移動端末が、複数の異種の無線基地局との関係を認知し、その中でユーザが所望する通信容量と通信品質で周波数の有効利用を図りつつ伝送できる通信システムを利用して異なる通信システム間でもシームレスに通信を行う。
- 第2世代コグニティブ無線  
網側が知能を持ち、複数の異種無線通信システムが IP 網で接続され、網側の特定のサーバがユーザのプレゼンス情報(位置、移動速度、要求帯域、バッテリー、嗜好等)を蓄積し、その情報を元に、利用者に対して所望する通信容量と通信品質で周波数の有効利用を図りつつ異なる通信システム間でもシームレスに通信を行う。
- 第3世代コグニティブ無線  
移動端末だけでなく基地局の無線通信システムも自由に変更することが可能になり、網側の特定のサーバがユーザのプレゼンス情報を元に移動端末の機能(通信方式、使用周波数、使用時間)を必要に応じて変更させ、利用者に対して所望する通信容量と通信品質で周波数の有効利用を図りつつ異なる通信システム間でもシームレスに通信を行う。

第1世代コグニティブ無線では、異種無線通信方式間で端末をシームレスにハンドオーバーさせる必要であり、第2~3世代コグニティブ無線では、網側で基地局と端末の状態の情報を収集し、管理する必要がある。

また、コグニティブ無線の端末として、無線部のソフトウェア更新により多様な無線通信方式に対応可能な SDR 端末が非常に有効であると考えられている。SDR 端末を利用する場合、SDR 端末のソフトウェアを効率的に更新する技術が必要である。

### 2.2 IP ハンドオーバー

端末が携帯電話と無線 LAN のような異種ネットワーク間をハンドオーバーする際に、IP 通信を継続し、ユーザにハンドオーバーを意識させない技術として、以下の技術がある。

- IP モビリティ技術  
端末が異種ネットワーク間を移動する際に、IP 層での通信の継続性を確保し、上位のアプリケーションに影響を与えない技術として、MobileIPv4[4]、MobileIPv6[5]がある。MobileIP は端末が属するホームアドレスと移動先の気付けアドレスとの対応をホームエージェント(Home Agent、以下 HA)が管理し、両者間の通信を中継することにより、端末のハンドオーバーを上位アプリケーションから隠蔽する技術である。なお、MobileIPv4 を IPv6 に対応させた MobileIPv6 は HA を経由しない経路最適化の機構を標準で備えている。
- 高速ハンドオーバー技術  
動画配信や VoIP のようなリアルタイム性を必要とするアプリケーションを利用する場合、ハンドオーバーに時間が掛かるとパケット喪失が生じ、アプリケーションに影響を与えてしまう。この問題を解決する技術として、高速ハンドオーバー技術 Fast Handoff for Mobile IPv6(FMIPv6)[6]がある。FMIPv6 ではハンドオーバー時にハンドオーバー元からハンドオーバー先にパケット転送用トンネルを生成し、ハンドオーバー処理中にハンドオーバー先に届いたパケットをハンドオーバー先に転送する。さらに、IP 層で次のハンドオーバー先を事前に判断可能にするためにリンク層の情報(L2 ヒント)を IP 層に伝え、効率的なハンドオーバーを実現する L2 ヒントの定義の研究が進められている[7]。

### 2.3 基地局・端末管理

3G、無線 LAN、4G 等の異種無線ネットワークを統合し、マルチモード端末の位置管理、無線選択、端末の移動によるシームレスなハンドオーバーを実現する機能を備えたレイヤ 2 ネットワークとして Mobile Ethernet がある[8]。

さらに、網側に管理サーバを設置し、管理サーバが各基地局から定期的に送られてくる情報に基づき負荷の状態を監視し、基地局の負荷に応じて同一の地域をカバーする低負荷の基地局に強制的に端末をハンドオーバーさせることにより、ネットワークの負荷分散を図る研究が行われている[2]。

### 2.4 SDR 端末のソフトウェア更新

SDR 端末のソフトウェア更新に関する技術として、ソフトウェアの機能単位の部分的な更新や再

利用を実現するためにソフトウェアをオブジェクトとして機能分割し、オブジェクト間の相互接続とソフトウェアの更新を実現する分散オブジェクト技術がある[9]。

また、組み込みソフトウェアの更新のデータ転送量を少なくすることにより、ソフトウェアのダウンロード時間を短縮する技術として、差分抽出技術がある[10]。

以上の関連研究を踏まえると、SDR 端末を利用したシームレス通信を実現するための課題として、網側で基地局と SDR 端末の情報を収集し、管理する具体的な管理方式、及び管理することによる性能への影響を検討することが挙げられる。

本論文では、状態管理サーバを網側に設置し、状態管理サーバが基地局と SDR 端末から情報を収集し、網主導で SDR 端末をハンドオーバーさせる方を提案する。さらに、本方式による管理のオーバーヘッドとスケーラビリティへの影響を評価する。

### 3. シームレス通信のための SDR システムの機能要件

#### 3.1 SDR 端末によるシームレス通信の定義

本論文では、シームレス通信を「IP 層で通信中の端末が必要に応じて同種・異種無線通信間をハンドオーバーし、IP 通信が継続されること」と定義する。シームレス通信により、ユーザが移動して通信状態が変化しても、何も意識せずに適切な無線方式を選択し、通信の継続が可能になる。

SDR 端末がハンドオーバーする先の通信方式に対応する無線部のソフトウェアが端末内に存在しない場合、無線ダウンロード等の手段によりソフトウェアを取得し、更新した後、ハンドオーバーを行う。

#### 3.2 機能要件

シームレス通信のための SDR システムの機能要件として、SDR 端末と網側の要件を挙げる。

##### (1) SDR 端末の要件

- ハンドオーバー機能  
端末自身または網側の判断により、使用中の無線通信方式から別の無線通信方式にハンドオーバーする機能が必要である。通信の継続を実現するには MobileIPv6 等の IP 層ハンドオーバーをサポートする必要がある。
- 複数の通信方式を同時に利用する機能  
ハンドオーバー時に通信を継続するために、一時的にハンドオーバー元とハンドオーバー先の通信方式を同時に利用し、ハンドオーバー先の基地局と通信できることを確認した後、

ハンドオーバー元との通信を切断する機能が必要である。

##### • 無線部ソフトウェアの高速更新機能

端末内に無線部ソフトウェアが存在しない場合、無線によるダウンロード等の手段により、短時間で効率的に無線部ソフトウェアを取得し、更新する機能が必要である。なお、SDR 端末の普及が予想される 2010 年頃には、HDD や不揮発メモリの容量拡大により、複数の無線部ソフトウェアを端末内に容易に格納できると考えられる。

##### (2) 網側の要件

##### • ハンドオーバー機能

SDR 端末を基地局から別の基地局にハンドオーバーさせる機能が必要である。通信の継続を実現するには MobileIPv6 等の IP 層ハンドオーバーをサポートする必要がある。

##### • 基地局の混雑状況を管理する機能

システム全体の利用効率を高めるために、各基地局の混雑状況を管理し、混雑した基地局に接続中の SDR 端末を、空いている基地局にハンドオーバーさせ、ネットワークの負荷分散を行う機能が必要である。

##### • SDR 端末の状態を管理する機能

SDR 端末を適切にハンドオーバーさせるには、SDR 端末が接続している基地局、電波状況、ダウンロード済みの無線部ソフトウェア、SDR 端末を利用しているユーザの嗜好等、SDR 端末の状態を管理する機能が必要である。また、SDR 端末を円滑にハンドオーバーさせるために、ハンドオーバー前に SDR 端末に無線部のソフトウェアをダウンロードするように通知する機能が必要である。

### 4. SDR 端末の管理方式の提案

SDR 端末を利用したシームレス通信の実現を目的として、網側で基地局と SDR 端末の情報を管理する方を提案する。

#### 4.1 前提条件

##### (1) システム構成

前提とする SDR システムの構成要素を以下に挙げる。

##### • 状態管理サーバ

システム全体で最低 1 つ存在し、システム内の基地局と SDR 端末から状態の情報を収集し、その情報に基づき、SDR 端末のハンドオーバー実行を判断するサーバである。ハンドオーバーの際には、SDR 端末のハンドオーバー先として最適な基地局を選択し、SDR 端末にハンドオーバー先の基地局の情報を通

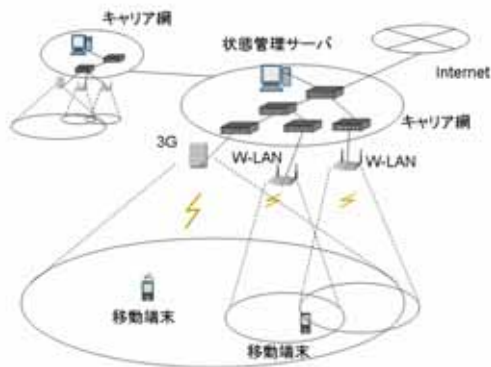


図 1: システム構成

知し、SDR 端末を強制的にハンドオーバーさせる。

- 基地局  
3G や無線 LAN 等の各種無線通信方式に対応した基地局である。基地局の無線通信方式に対応した無線部ソフトウェアを持つ SDR 端末と通信が可能である。
- SDR 端末  
ユーザが利用する移動端末である。通信しながら基地局から別の基地局にシームレスにハンドオーバーすることができる。

## (2) ハンドオーバーの方式

### a) ハンドオーバーの条件

SDR 端末をハンドオーバーさせる条件として以下の 2 つの判定基準がある。

- 基地局の使用中の通信帯域が大きい  
基地局の通信帯域の最大値に基づき、基地局毎に使用中の通信帯域の閾値を設定し、閾値を越えた基地局に関して、接続中の SDR 端末の中から別の基地局にハンドオーバーさせる SDR 端末を選択する。  
ハンドオーバー対象とする SDR 端末として、使用中の通信帯域が小さい別の基地局との電波状況が良い SDR 端末を選択する。
- SDR 端末の通信品質が悪い  
SDR 端末の通信品質に閾値を設定し、通信品質が閾値を下回った SDR 端末をハンドオーバーさせる。ハンドオーバー先の基地局として、ハンドオーバー対象の SDR 端末の通信圏内に存在する基地局の中から、電波強度が大きく、使用中の通信帯域が小さい基地局を選択する。

### b) ハンドオーバーの判定方式

ハンドオーバーの判定方式として、SDR 端末自身で通信状態に基づき判断する端末主導ハンドオーバーと、網側で各基地局や端末の状況から総合的に

表 1: ハンドオーバー先の基地局情報

	データ長
基地局 ID	3
キャリア ID	1
MAC	6
通信方式	1
ESSID	32
チャンネル	1
無線部ソフトウェアのバージョン	2

判断し、端末をハンドオーバーさせる網主導ハンドオーバーの 2 つがある。

前者は SDR 端末が自端末の状態に基づいて判断するが、後者は基地局の混雑状況を考慮した判定を行うことにより、システム全体の通信の負荷分散が可能である。従って、状態管理サーバがハンドオーバーを判定する後者の方式を採用する。

### c) ハンドオーバーの通知

状態管理サーバが SDR 端末をハンドオーバーさせる判定をした場合、ハンドオーバー先の基地局の情報(表 1 に示す)を SDR 端末に送る。

SDR 端末は、ハンドオーバーの通知を受けると、ハンドオーバー先の無線通信方式の無線部ソフトウェアが端末内に存在しない場合、ソフトウェアのダウンロード、書き換え、切り替え処理を行う。これらの処理は時間が掛かるが、SDR 端末の無線部ソフトウェアを格納できる領域は有限であり、全ての通信方式を端末内に持つことは不可能である。従って、ハンドオーバーをより円滑にするために、ハンドオーバーする時点で SDR 端末に無線部のソフトウェアをダウンロードするように指示するのではなく、状態管理サーバでハンドオーバーの発生を予測し、SDR 端末にハンドオーバーを通知し、事前に無線部のダウンロードを行う方式が有効であると考えられる。

## 4.2 提案する管理方式

本方式において、状態管理サーバが SDR 端末のハンドオーバーを判定するために基地局と SDR 端末から収集する情報を表 2~3 に示す。

### (1) 基地局の情報

- 基地局 ID  
システム内の基地局を一意に識別する ID である。携帯電話や PHS の基地局数が数 10 万局規模であるため、3 バイト(1600 万局規模)とする。
- MAC  
基地局の MAC アドレスである。

表 2: 基地局の情報

情報	固定/ 変動	データ長 (bytes)	情報収集する頻度
基地局 ID	固定	3	初回のみ
MAC	固定	6	初回のみ
キャリア ID	固定	1	初回のみ
通信方式	固定	1	初回のみ
ESSID	固定	32	初回のみ
チャンネル	固定	1	初回のみ
収容可能 端末数	固定	2	初回のみ
通信帯域の 最大値	固定	4	初回のみ
接続中の 端末数	変動	2	SDR 端末の接続、切 断、ハンドオーバー時
使用中の 通信帯域	変動	4	定期的

- **キャリア ID**  
無線サービスを提供する通信キャリアを識別する ID である。キャリア数は 256 社以下を想定し、1 バイトとする。
- **通信方式**  
基地局が対応する通信方式である。通信方式は 256 種以下を想定し、1 バイトとする。
- **ESSID(Extended Service Set ID)**  
無線 LAN(IEEE802.11)のグループ分けを行う ID である。現状の IEEE802.11 の仕様により、32 バイトとする。
- **チャンネル**  
通信に使用するチャンネルである。256 チャンネル以下を想定し、1 バイトとする。
- **収容可能端末数**  
1 つの基地局が収容可能な端末数である。2 バイトとする。
- **通信帯域の最大値**  
基地局の通信帯域の最大値である(単位は bps)。4 バイトとする。
- **接続中の端末数**  
基地局に接続中の端末数である。収容可能端末数と同じく 2 バイトとする。
- **使用中の通信帯域**  
基地局が現在使用中の通信帯域である(単位は bps)。通信帯域の最大値と同じく 4 バイトとする。通信帯域は基地局が端末との間で時間当たりに送受信したパケット数から算出する。例えば、基地局 An の時刻 t1 の送受信パケット数が Pn(t1)、時刻 t2 の送受信パケット数が Pn(t2)の場合、使用中の通信帯域は次式で得られる。

$$\text{使用中の通信帯域} = \frac{Pn(t2) - Pn(t1)}{t2 - t1}$$

基地局の情報のうち、基地局 ID、キャリア、通信方式、ESSID、チャンネル、収容可能端末数、通信帯域の最大値は固定値であり、状態管理サーバはこれらの値を初期設定時に取得すれば良い。また、接続中の端末数に関しては、SDR 端末が接続先の基地局 ID の情報を SDR 端末から状態管理サーバに送信する場合、基地局から取得する必要はない。従って、各基地局は状態管理サーバに対して、使用中の通信帯域の情報を定期的に送信すれば良い。

(2) SDR 端末の情報

- **端末 ID 固定**  
システム内で端末を一意に識別する ID である。4 バイトとする。
- **端末の状態**  
端末の状態(通信中、休眠中、ハンドオーバー中等)を表す値である。256 以下を想定し、1 バイトとする。
- **接続先の基地局 ID**  
端末が接続中の基地局 ID(3 バイト)である。
- **通信品質**  
端末と基地局間の通信品質である。0 ~ 100 の整数値で表現し、1 バイトとする。
- **位置**  
端末の位置(緯度、経度)である。1 軸当たり 360 度 60 分 60 秒で 21bit、2 軸で 6 バイト(実効 42bit)とする。
- **移動速度**  
端末の移動速度(2 軸)である。1 軸当たり 4 バイト、2 軸で 8 バイトとする。
- **ダウンロード済み通信方式とバージョン**  
通信方式は 1 バイト(256 方式まで)、バージョンは 2 バイト(65536 版まで)とする。ダウンロード済みの通信方式が n 個の場合、3\*n バイトである。

表 3: SDR 端末の情報

情報	固定/ 変動	データ長	情報収集する頻度
端末 ID	固定	4	初回のみ
端末の状態(通信中/休眠等)	変動	1	定期的
接続先の基地局 ID	変動	3	接続、切断、ハンドオーバー時
通信品質	変動	1	定期的
位置	変動	3*2	定期的
移動速度	変動	4*2	定期的
ダウンロード済み通信方式、バージョン	変動	(1+2)*n	ダウンロード完了、通信方式削除時
通信圏内の基地局との電波強度	変動	1*n	定期的
ユーザが所望する通信帯域	変動	4	ユーザ設定時
契約しているキャリア	固定	4	初回のみ
空きメモリ	変動	4	定期的

- 通信圏内の基地局との電波強度  
端末と基地局間の電波強度である。0~100の整数値で表現し、1バイトとする。圏内に存在する基地局数が n の場合、n バイトである。
- ユーザが所望する通信帯域  
ユーザが所望する通信帯域である(単位はbps)。端末上でユーザが設定する。4 バイトとする。
- 契約しているキャリア  
ユーザが契約しているキャリアである。32bitのフラグ表現で、4バイトとする。
- 空きメモリ  
端末の空きメモリである(単位はバイト)。4バイトとする。

SDR 端末の情報のうち、端末 ID、契約しているキャリアは固定値である。従って、各端末は状態管理サーバに以下の情報を定期的送信すればよい。

- 端末の状態(通信中、休眠中など)
- 使用中のキャリア
- 通信品質
- 位置
- 移動速度
- 無線部のソフトウェアをダウンロード済みの通信方式とそのバージョン
- 通信圏内に存在する基地局と電波強度
- ユーザが所望する通信帯域(通信コスト、動作中のアプリケーション)
- 端末の空きメモリ

本提案では、キャリア網内に状態管理サーバを設置し、SDR 端末と基地局の電波強度、SDR 端末の状態、基地局が使用中の通信帯域等の情報を収集し、ハンドオーバーの必要性を総合的に判断し、ハンドオーバー先を予測する方式を採用する。

本方式では、状態管理サーバに状態の情報を通知するための通信トラフィックが集中する点を考慮する必要がある。

## 5. 評価

状態管理サーバが基地局と SDR 端末の情報を管理するための管理コストとスケーラビリティに対する影響を評価する。

### 5.1 基地局の管理コスト

状態管理サーバが管理する基地局の情報は、使用中の通信帯域であり、以下の値に依存する。

- 基地局数 : m 局
- 通知頻度 : n 秒毎

基地局の管理に必要な通信帯域は次式で求められる。

基地局管理に必要な通信帯域(bps)

$$= < \text{通信帯域のデータ長} > \times < \text{基地局数} > / < \text{通知頻度} > \\ = 4 \times 8 \times m / n (\text{bps})$$

例えば、基地局数 1000 局、通知頻度 60 秒毎の場合、0.53kbps である。

### 5.2 SDR 端末の管理コスト

状態管理サーバが管理する SDR 端末の情報は、以下に分類される。

- 定期的(高頻度)  
SDR 端末の通信品質は、SDR 端末のハンドオーバー判定に必須の情報である。従って、高頻度で通知する必要がある。
- 定期的(低頻度)  
状態管理サーバが SDR 端末のハンドオーバーを予測する精度を高めるために SDR 端末が通知する付加的な情報である。
- 基地局への接続、切断、ハンドオーバー  
状態管理サーバが SDR 端末の接続状況を管理するために、SDR 端末が接続する基地局を変更した場合に状態管理サーバに通知する必要がある。
- 通信方式のダウンロード時  
状態管理サーバは、SDR 端末が保有する無線部ソフトウェアを管理する。
- ユーザが所望する通信帯域の変化  
状態管理サーバは、ユーザが利用するアプリケーションを変更する等により変化する SDR 端末が必要とする通信帯域を管理する。

表 4: SDR 端末から通知される情報

分類	通知する情報 とデータ長 (bytes)
定期的(高頻度)	端末の状態(1) 通信品質 (1)
定期的(低頻度)	端末の状態(1) 通信圏内の基地局との電波強度(n) 位置(6) 移動速度(8) 空きメモリ(4)
基地局への接続時	端末の状態(1) 接続先の基地局 ID(3) 通信品質(1)
基地局からの切断時	端末の状態(1)
ハンドオーバー開始時	端末の状態(1) ハンドオーバー先基地局 ID (3)
ハンドオーバー成功時	端末の状態(1)
ハンドオーバー失敗	端末の状態(1)
通信方式のダウンロード時	ダウンロード済みの通信方式(3*n)
ユーザが所望する通信帯域の変化	ユーザが所望する通信帯域 (4)

(1) 定期的(高頻度)の管理コスト

定期的(高頻度)な情報の管理に必要な通信帯域は、以下の値に依存する。

- 端末数：m 台
- 通知頻度：n 秒毎

定期的(高頻度)な情報の管理に必要な通信帯域は、次式で求められる。

$$\begin{aligned} & \text{SDR 端末の通信品質の管理に必要な通信帯域 (bps)} \\ & = \langle \text{データ長} \rangle \times \langle \text{SDR 端末数} \rangle / \langle \text{通知頻度} \rangle \\ & = (1+1) \times 8 \times m / n \text{ (bps)} \end{aligned}$$

例えば、端末数 1 万台、通知頻度 60 秒毎の場合、2.67kbps である。

(2) 定期的(低頻度)の管理コスト

定期的(低頻度)な情報の管理に必要な通信帯域は以下の値に依存する。

- 端末数：m 台
- 通知頻度：n 秒毎
- 通信圏内の基地局数：p

定期的(低頻度)な情報の管理に必要な通信帯域は、次式で求められる。

$$\begin{aligned} & \text{SDR 端末の付加的情報の管理に必要な通信帯域 (bps)} \\ & = \langle \text{データ長} \rangle \times \langle \text{SDR 端末数} \rangle / \langle \text{通知頻度} \rangle \\ & = (1+p+6+8+4) \times 8 \times m / n \text{ (bps)} \end{aligned}$$

例えば、端末数 1 万台、通知頻度 600 秒毎、通信圏内の基地局数 5 局の場合、3.20kbps である。

(3) 基地局への接続、切断、ハンドオーバーの管理コスト

ここでは基地局から基地局へのハンドオーバーの管理コストを求める。ハンドオーバーの管理コストは以下の値に依存する。

- SDR 端末数：m 台
- 1 時間当たりのハンドオーバー回数：p
- ハンドオーバー成功の確率：s
- ハンドオーバー失敗の確率：1-s

ハンドオーバー時に発生する通信帯域は次式で求められる。

$$\begin{aligned} & \text{基地局への接続} \\ & = \langle \text{データ長} \rangle \times m \times p \times s / 3600 \\ & = (1+3+1) \times 8 \times m \times p \times s / 3600 \text{ (bps)} \\ & \text{基地局からの切断} \\ & = \langle \text{データ長} \rangle \times m \times p \times (1-s) / 3600 \\ & = 1 \times 8 \times m \times p \times (1-s) / 3600 \text{ (bps)} \end{aligned}$$

ハンドオーバー開始

$$\begin{aligned} & = \langle \text{データ長} \rangle \times m \times p / 3600 \\ & = (1+3) \times 8 \times m \times p / 3600 \text{ (bps)} \end{aligned}$$

ハンドオーバー成功

$$\begin{aligned} & = \langle \text{データ長} \rangle \times m \times p \times s / 3600 \\ & = 1 \times 8 \times m \times p \times s / 3600 \text{ (bps)} \end{aligned}$$

ハンドオーバー失敗

$$\begin{aligned} & = \langle \text{データ長} \rangle \times m \times p \times (1-s) / 3600 \\ & = 1 \times 8 \times m \times p \times (1-s) / 3600 \text{ (bps)} \end{aligned}$$

合計：

$$\begin{aligned} & (1+3+1) \times 8 \times m \times p \times s / 3600 \\ & + 1 \times 8 \times m \times p \times s / 3600 \\ & + (1+3) \times 8 \times m \times p / 3600 \\ & + 1 \times 8 \times m \times p \times s / 3600 \\ & + 1 \times 8 \times m \times p \times (1-s) / 3600 \\ & = (6 \times s + 5) \times 8 \times m \times p / 3600 \text{ (bps)} \end{aligned}$$

例えば、m=1 万台、p=6 (10 分間に 1 回ハンドオーバーする)、s=0.8 の場合、1.31kbps である。

5.3 スケーラビリティ

状態管理サーバによる基地局と SDR 端末の管理に必要な通信帯域を表 5 に示す。

基地局数を SDR 端末数の 1/10 と想定した場合、基地局の管理コストは全体の 10% 以下、SDR 端末のハンドオーバーの管理コストは全体の 20% 程度であり、SDR 端末の通信品質、及び SDR 端末の付加情報の管理コストが全体の約 70% 以上を占めている。

端末数 1 万台、基地局数 1000 局の規模で、SDR 端末からの通知頻度 60 秒とした場合、状態管理サーバが基地局と SDR 端末を管理するために必要とする通信帯域は約 7.71kbps であり、本来の通信への影響は小さい。

しかし、この通信帯域は端末数 m のオーダで増加するため、図 2 に示すように端末数を 1 万 ~ 256 万台、通知頻度を 7.5 秒 ~ 480 秒で変化させた場合、数 kbps ~ 数 10Mbps の値を取り、特に端末数 256 万台、通知頻度 7.5 秒では 13.5Mbps の通信帯域を必要とする。

表 5: 管理コスト

	通信帯域 (kbps)	想定する規模、通知頻度
基地局	0.53	基地局数=1,000 通知頻度=60s
SDR 端末の通信品質	2.67	端末数=10,000 通知頻度=60s
SDR 端末の付加情報	3.20	端末数=10,000 通知頻度=600s
SDR 端末のハンドオーバー	1.31	端末数=10,000 通知頻度=600s
合計	7.71	

状態管理サーバが基地局と SDR 端末を管理する際に、スケーラビリティを確保するには、以下の方法が考えられる。

- 通知する情報量の削減

全ての SDR 端末が定期的に状態を通知した場合、情報量は SDR 端末数に比例してしまう。しかし、状態管理サーバが SDR 端末を管理する目的は、通信品質の悪い SDR 端末を通信品質の良い基地局にハンドオーバーさせることである。従って、大規模なシステムでは全ての SDR 端末が定期的に状態を通知するのではなく、状態が大きく変化し、ハンドオーバーが必要になる可能性のある SDR 端末だけが通知することにより、情報量を削減できる。状態を通知するか否かは、状態の変化率を閾値として設定することにより判定することができる。

- 複数の状態管理サーバによる負荷分散

全ての SDR 端末が 1 台の状態管理サーバに対して情報を通知する場合、状態管理サーバがボトルネックとなる。大規模なシステムでは、状態管理サーバを複数用意し、1 台の状態管理サーバが管理する基地局数を削減し、各状態管理サーバを相互接続することにより、システム全体を管理できるようにする。状態管理サーバの設置場所は、各基地局の収容可能端末数等に基づき、システム全体で均一化を図る。

## 6. おわりに

シームレス通信のための SDR システムの機能要件として、SDR 端末と網側の機能要件を検討した。SDR 端末を円滑にハンドオーバーさせることを目的として、網側に SDR 端末と基地局の情報を収集する状態管理サーバを設置し、状態管理サーバの判断により網主導で強制的に SDR 端末を異種無線方式間でハンドオーバーさせる方式を提案した。

本方式による管理オーバーヘッドは、管理対象とする SDR 端末数と状態の通知頻度に依存する。例えば、1 万台の SDR 端末が 1 分毎に状態管理サーバに状態を通知する場合の通信オーバーヘッドは 8kbps 程度で収まるが、SDR 端末数が 256 万台、通知頻度が 7.5 秒の場合には 13Mbps にも達する。従って、一般ユーザが利用することを想定したスケーラビリティを確保するには通知する情報量の削減、及び状態管理サーバの分散化が必要であることが分かった。

今後は本方式を試作と評価を行う予定である。

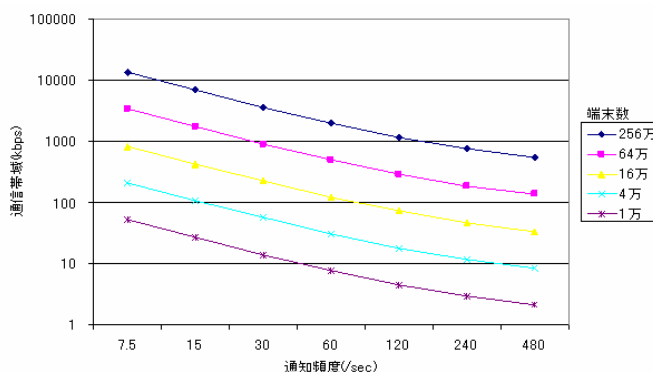


図 2: SDR 端末数、端末通知と通信帯域の関係

## 7. 謝辞

本研究内容は NICT 委託研究「第 4 世代移動通信システム実現のための研究開発」によるものである。本研究にあたり、議論いただいた NICT 黒田正博グループリーダー、井上大介氏、ならびに諸氏に深謝する。

## 参考文献

- [1] 総務省 新世代モバイル委員会, “新世代移動体通信システムの将来展望,” Jun. 2001.
- [2] 吉田他, “ネットワーク主導強制ハンドオーバーによる無線 LAN 負荷分散,” DICO2005, pp.137-140, Jul. 2005.
- [3] 原田博司, “コグニティブ無線を利用した通信システムに関する基礎検討,” 信学技報 SR2005-18, pp.117-124, Mar. 2005.
- [4] C. Perkins, “IP Mobility Support for IPv4,” RFC3344, Aug. 2002.
- [5] D. Johnson, “Mobility Support in IPv6,” RFC3775, Jun. 2004.
- [6] R. Koodli, “Fast Handovers for Mobile IPv6,” RFC4068, Jul. 2005.
- [7] 寺岡他, “シームレスなワイヤレスインターネットの実現に向けて,” 電子情報通信学会誌 Vol.88 No.3 pp.182-189, Mar. 2005.
- [8] M. Kuroda, et al., “Scalable Mobile Ethernet and Fast Vertical Handover,” IEEE WCNC, A27-3, Mar. 2004.
- [9] 寺島他, “差分更新を実現する分散オブジェクト再構成ミドルウェアの実装と検証,” 情処学会論文誌 Vol.46 No.9, Sep. 2005.
- [10] 清原他, “携帯電話ソフトウェアの更新方式,” 情処学会論文誌, Vol.46 No.6, Jun. 2005.