

移動通信環境における 複合無線アクセスネットワークとその制御方式

野田 健太郎¹ 安達 直世² 滝沢 泰久^{2,a)}

受付日 2014年3月20日, 採録日 2014年11月10日

概要: 複数の無線インタフェース (以下, I/F) を装備したスマートフォンなどのモバイル端末が登場し, 移動通信の多様化が進んでいる. 一方で, 周波数帯の不足が顕在化している. その解決技術としてコグニティブ無線技術が提案され, 今後, 移動通信環境において各無線 I/F が複数の無線チャンネルを発見・利用可能となることが予想される. 以上のことから, 本論文では, 移動通信環境において, 複数の無線 I/F により発見し切替え利用される多様で離散した無線チャンネルを, 単一の広帯域無線チャンネルに仮想化してアプリケーションに提供する複合無線アクセスネットワークの構成方式とシームレスな広帯域通信を実現するその制御方式を提案する.

キーワード: コグニティブ無線, 階層型 MobileIP, トラフィック分配

Composite Wireless Access Networks in Mobile Communications Environment and Its Controls

KENTARO NODA¹ NAOTOSHI ADACHI² YASUHISA TAKIZAWA^{2,a)}

Received: March 20, 2014, Accepted: November 10, 2014

Abstract: In recent wireless communication environments, mobile terminals that have multiple wireless interfaces appear and a diversity of mobile communications is emerging. On the other hand, there is the increasing concern that the growing use of wireless system will exhaust finite radio resources. To solve this problem, cognitive radio, which aims to optimize the utilization of radio resources, has been proposed, and it can detect diverse available radio resources. Therefore the wireless access networks will be able to utilize diverse wireless channels. In this paper, assuming the utilization of diverse wireless channels, the composite wireless access networks consisting of diverse wireless channels is proposed. It is constructed based on HMIP, and provides the transparency of mobility and aggregating diverse wireless channels to applications. Furthermore its control that realizes a seamless and wide-band wireless communications is proposed.

Keywords: Cognitive radio, Hierarchical MobileIP, traffic distribution

1. はじめに

近年, 高機能なモバイル端末の登場により多様なアプリケーションが急増し, 周波数不足が懸念されている. 一方で移動通信環境は, 第3世代移動通信システム (3G) や無

線 LAN (WiFi), ワイマックス (WiMAX) など多様な無線システムの登場にともない, 複数の無線インタフェース (以降, I/F) を装備したモバイル端末や基地局が混在する環境になってきている. すなわち, 移動通信環境は多様な無線システムが混在し, それぞれの無線システムのチャンネル (以降, 無線チャンネル) は空間的に重なり, 周波数帯において離散している. このような移動通信環境において, 周波数の有効利用を図るためコグニティブ無線が提案されている [1]. コグニティブ無線は, 無線機が周囲の電波利用状況を認識し, 状況に応じて周波数帯を適宜使い分ける技

¹ 関西大学大学院理工学研究科
Graduate School of Engineering, Kansai University, Suita,
Osaka 564-8680, Japan

² 関西大学環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai
University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

a) takizawa@kansai-u.ac.jp

術であり、無線通信の利用拡大とその周波数帯の有効利用を目的とし、多様な周波数帯から最適な周波数帯を選択する研究が活発に行われている。

無線アクセスネットワークは、多様なアプリケーションが利用され、トランザクションシステムのようなスループット指向のトラフィックや、ソーシャルメディアのような遅延時間指向のトラフィックが混在し、これらトラフィックは将来において増加することが想定される。また、Internet of Things における M2M (Machine to Machine) [2] ネットワークの広がりにより、膨大な数のデバイスが無線アクセスネットワークを介してインターネットに取り込まれることが想定されている。このようなことから、無線アクセスネットワークの広帯域化が強く求められており、ITU (International Telecommunication Union) は 4G 移動無線システムの広帯域化として IMT-Advanced [3] を定義している。しかしながら、前述のコグニティブ無線により発見される多様かつ利用可能な無線チャネルは、周波数帯において離散している。したがって、既存の無線アクセスネットワークは単一无線チャネルにより構成されるにとどまる。無線アクセスネットワークにおいて、高スループットかつ低遅延とする広帯域な通信を実現するためには、移動通信環境における周波数帯において離散する多様な無線チャネルを集約して利用する必要があると考える。

以上のことから本論文では、移動端末 (以下、MN: Mobile Node) はコグニティブ無線の機能を有する複数の無線 I/F を装備することを想定し、複数のコグニティブ無線 I/F により発見される多様で離散した無線チャネルを単一の広帯域無線チャネルとして集約する複合無線アクセスネットワークを提案する。複合無線アクセスネットワークは移動通信環境において階層型 MobileIP (以下、HMIP: Hierarchical MobileIP) [4] に基づきネットワークを構成し、アプリケーションから移動と複数の離散した無線チャネルを集約を隠蔽する。さらに、構成された複合無線アクセスネットワークにおいて、以下の 2 段階のトラフィック制御方式により、シームレスかつ広帯域な通信を実現する。

- MN が装備する複数の無線 I/F それぞれが移動に応じて発見する新たな無線チャネルへ適時切り替え、アクセスネットワークの経路を更新し、多様で離散する無線チャネル間で最適にトラフィック移動を可能とする。
- MN が装備する複数の無線 I/F の上記処理により構成される経路間でパケット分配して、無線 I/F ごとに接続する多様な無線チャネル間で最適にトラフィックを分配する。

なお、本論文ではユーザの移動方法を徒歩と想定する。

2. 移動通信環境における無線アクセスネットワーク

本章では、移動環境における無線アクセスネットワーク

の構成技術を概説する。

2.1 MobileIP

移動通信環境では MN が移動することで接続するネットワークが切り替わり (以下、ハンドオーバー)、IP アドレスが変わる。トランスポートレイヤでは、通信の識別に IP アドレスを利用するため、ハンドオーバーごとに IP アドレスが変わると、通信が継続できない。MN がハンドオーバーを行った場合でも通信相手端末 (以下、CN: Correspondent Node) とシームレスな通信を提供する手法として、MobileIP [4] がある。MobileIP では、ネットワーク上に設置された HomeAgent (HA) と呼ばれるノードが、MN の識別子として割り当てられる、移動に応じて変化しない固定なアドレスである HomeAddress (HoA) と、MN が移動先のネットワークで一時的に利用する Care-of Address (CoA) との対応関係 (以下、バインディング) を管理する。MN のハンドオーバーにともない、CoA が変更した場合、MN は HA に対してバインディングの更新 (以下、BU: Binding Update) を行う。CN は、MN の接続する無線アクセスネットワークにかかわらず、つねに MN の宛先を HoA として送信する。HA がそれを受信して、バインディングによって HoA に対応している CoA を宛先として転送することにより、CN から MN の移動を隠蔽できるようになり、移動通信が実現できる。

2.2 MCoA

MobileIP では、HA は 1 つの HoA に対して 1 つの CoA しか登録できない。その結果、複数の無線 I/F で MN が BU を行った場合、最後に登録された CoA に紐づく無線 I/F のみで、MN は通信することになる。一方で、MCoA [5] は 1 つの HoA に対して複数の CoA を登録することができるため、複数の無線 I/F で MN は BU を行うことが可能になる。MCoA では個々のバインディングを識別するために、バインディング識別子 (BID) が定義されている。MN は BU を行う際に、HoA、CoA とともに BID を付与することで、HA は個々のバインディングを識別することができる。

2.3 HMIP

HMIP は複数のアクセスマルタ (以下、AR) を集約した Mobility Anchor Point (MAP) と呼ばれるノードを配置する。MAP は HA と同等の機能を持つ。HMIP では、HA-MAP の階層構造を構成し、MN は CoA として、AR 配下の On-link-Care-of Address (LCoA) と、MAP 配下の Regional Care-of Address (RCoA) を保持する。図 1 に LCoA と RCoA の関係を示す。

図 1 では、AR1、AR2 における LCoA がそれぞれ LCoA1、LCoA2、MAP の RCoA が RCoA1 である。MN が AR1 か

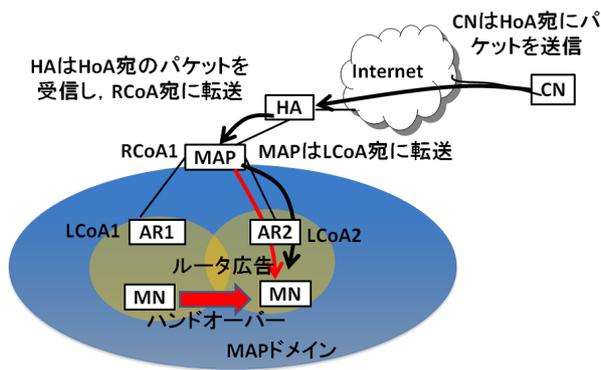


図 1 HMIP
Fig. 1 HMIP.

ら AR2 のネットワークへ移動し、AR2 からのルータ広告を受信する。そして AR1 から AR2 へチャンネルを切り替えた (ハンドオーバー) 場合、LCoA が LCoA1 から LCoA2 に変更される。一方、RCoA は MAP ドメイン内で変更しないアドレスである。そのため、MAP ドメイン内でのハンドオーバーは MAP に BU を行うだけで完了する。図 1 のように CN からの HoA 宛の packets は、まず HA で受信され、RCoA 宛に転送される。次に MAP により受信し、LCoA 宛に転送される。すなわち、HA では RCoA を MN の CoA と見なし、MAP では LCoA を MN の CoA と見なす。

3. 関連研究

3.1 ネットワークレイヤにおけるパス集約とトラフィック制御

OSPF (Open Shortest Path First) や BGP (Border Gateway Protocol) において複数パスを集約し、これら複数パスへトラフィックを分配して帯域拡大を図る負荷分散の研究が数多く行われている [6], [7], [8], [9]。これらの負荷分散は、経路を構成するリンクの帯域が既知であるかまたは帯域保証が可能であることを前提とし、またネットワーク構成が短時間に変動しないことを前提とする。しかし、移動通信環境では、移動により発見されるチャンネルの帯域は未知であり、また同一チャンネルのカバレッジ内においても、電波伝搬により通信するノードとの距離により通信速度が変動する。さらに、移動によりネットワーク構成は短時間に変動し、電波干渉要因となる隣接ノード数や位置が変動し、これにより通信速度は変動する。したがって、このような環境では、OSPF や BGP での負荷分散は適用困難である。

MIP においては、HA によるコアネットワークを介した複数のアクセスネットワークへのパスを集約し、これら複数パスへ負荷分散する研究が行われている [10], [11], [12]。これらの研究はインタードメインスケールの制御であるため、アクセスネットワークドメイン内の個々の MN の通信

特性をドメイン全体として平準化・平均化する、しかし、無線アクセスネットワーク内の個々の MN に応じた帯域集約とトラフィック分配とした場合、前述のように、MN の通信特性は移動による電波状況の変化からつねに変動するため、このようなドメイン内の方式としては不十分である。

HMIP における MAP に関する研究は Inter-MAP における MAP 選択の研究 [13], [14], [15] を数多く行われているが、これらはインタードメインのパス選択であり、帯域拡大の効果は少ない。

3.2 MAC レイヤにおけるチャンネル集約

チャンネルボンディングは MAC レイヤで複数のチャンネルを集約して広帯域チャンネルとして利用する技術である。有線システムでは、ATM などのスイッチの広帯域化を図るため、TDM (Time Division Multiplexing) [16], [17], [18] のチャンネルボンディングが用いられている。無線システムでは、IEEE802.11n において 2.4 GHz 帯または 5 GHz 帯のいずれかの 2 つの 20 MHz 幅のチャンネルを束ねて広帯域化を図るが、チャンネルは隣接する必要がある。LTE-A (LTE Rel.10, Rel.11) における Carrier Aggregation [19] は離散した 800 MHz 帯と 2 GHz 帯の 2 つのチャンネルを集約可能としている。無線システムのいずれも移動無線通信特性を考慮するが、MAC レイヤにより集約されるため、広帯域化は単一无線システムのチャンネルに限定され、かつ集約するチャンネルが固定である。

3.3 その他

コグニティブ無線は、有限な周波数帯を有効に移動通信で利用するため、従来無線システムの周波数割当てが固定的であったものを、周波数利用状況に応じて動的に最適な周波数帯を発見し利用可能とする技術である [20], [21]。コグニティブ無線は、無線チャンネルの帯域拡大を行う技術ではないが、多様な無線チャンネルを発見し、その利用状況が認識できることを可能とするため、動的な無線チャンネルの集約には重要な技術である。

4. 複合無線アクセスネットワーク

4.1 ネットワーク構成方式

HA によるコアネットワークを介したインタードメインの帯域集約とトラフィック分配は、インタードメインスケールの制御であるため、アクセスネットワークドメイン内の個々の MN の通信特性をドメイン全体として平準化・平均化する。しかし、無線アクセスネットワーク内の個々の MN に応じた帯域集約とトラフィック分配とした場合、MN の通信特性は移動による電波状況の変化からつねに変動するため、このようなドメイン内の方式としては不十分である。一方、IEEE802.11n や 3GPP の LTE-A (LTE Rel.10, Rel.11) における Carrier Aggregation は上記の移

動無線通信特性を考慮したチャンネル集約が行われているが、これは単一の無線システムのチャンネルに限定される。したがって、多様な無線システムにまたがって無線チャンネルを集約し、かつこれらの移動無線通信特性を考慮したトラフィック分配を行うためには、利用可能な多様な無線アクセスネットワークをコアネットワークを介さずに直接に集約するドメインを構成する必要がある。このために、HMIP を用いて複合無線アクセスネットワークを MAP ドメインとして構成し、MAP ドメイン内に HMIP と MAC レイヤ間にサブレイヤである Composite レイヤを用意する。以下、その詳細を説明する。

4.1.1 ネットワーク構成

複合無線アクセスネットワーク（以降、提案方式）は、HMIP に基づき以下のような構成とする（図 2 参照）。

- HA は 1 つの HoA に対し、1 つの CoA を持ち、またその CoA とは MAP が持つ RCoA とする。
- MAP は MCoA の機能を有し、1 つの HoA に対して複数の CoA、すなわち LCoA を持つ。
- MAP と AR は互いに経路を既知であるとする。MAP と AR は高速ネットワークで接続されている。
- 本論文では MAP は 1 つのみとし、MN の移動は MAP ドメイン内とする。
- AR は複数の無線 I/F を装備し、任意の無線チャンネルが設定されている。同一 AR および異なる AR において、それらの無線 I/F の通信範囲は相互に重なるエリアが存在する。また、各 AR の各無線 I/F にはそれぞれ異なるチャンネルが割り当てられる。
- MN が装備する各無線 I/F はコグニティブ無線の機能を有して、動的に利用可能なチャンネルを発見し切り替えることが可能である。

4.1.2 レイヤ構成

ネットワークを構成する各ノード（MAP, AR, MN）において、複数の I/F を集約する Composite レイヤを設け、

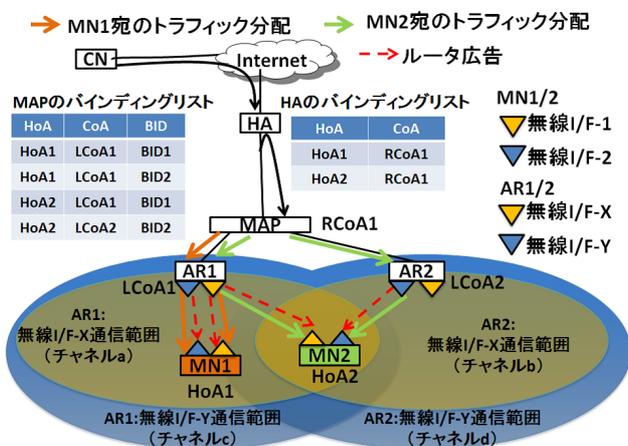


図 2 想定ネットワーク環境

Fig. 2 Assumption on network configuration.

これを HMIP (IP レイヤ) と I/F (MAC レイヤ) の間にサブレイヤとして構成する。

MAP における Composite レイヤは集約する AR との接続 I/F を集約し、これを HMIP から隠蔽する。AR における Composite レイヤは複数の無線 I/F を集約し、HMIP から複数の離散した無線チャンネルを隠蔽し、単一の広帯域無線チャンネルとして仮想化する。MN における Composite レイヤも複数の無線 I/F を集約し、MN の移動にともないそれぞれの無線 I/F が無線チャンネルを発見し切り替えることを隠蔽し、移動に応じて適時更新される離散した集約無線チャンネルを HMIP に継続的に単一の広帯域無線チャンネルとして仮想化する（図 3）。

以上のレイヤ構成により、提案方式はアプリケーションから MN の移動と複数の離散する無線チャンネルの集約および切替えを隠蔽する。

4.1.3 Composite レイヤにおける集約経路構成方式

既存の HMIP では MN は 1 つの無線 I/F により BU を行い無線アクセスネットワークを構成する。集約経路構成方式では HMIP が送信する 1 つのルータ広告を Composite レイヤが集約する無線 I/F へ拡散転送し、複数の無線 I/F の経路を集約する。その概念を図 4 を用いて説明する。

HMIP は無線 I/F として仮想広帯域無線 I/F である Composite レイヤしか見えない。したがって、AR1（図 2 の AR1 と同等）は HMIP で送信するルータ広告を Composite レイヤに渡す。Composite レイヤは渡されたルータ広告を複製して、チャンネル a が割り当てられている無線 I/F-X とチャンネル c が割り当てられている無線 I/F-Y にルータ広告を渡し拡散する。MN1（図 2 の MN1 と同等）は無線 I/F-1 によりスキャンしていたチャンネル a からルータ広告を受信し、無線 I/F-2 によりスキャンしていたチャンネル c からルータ広告を受信する。それら受信したルータ広告を Composite レイヤにおいて集約し HMIP に渡すことで、

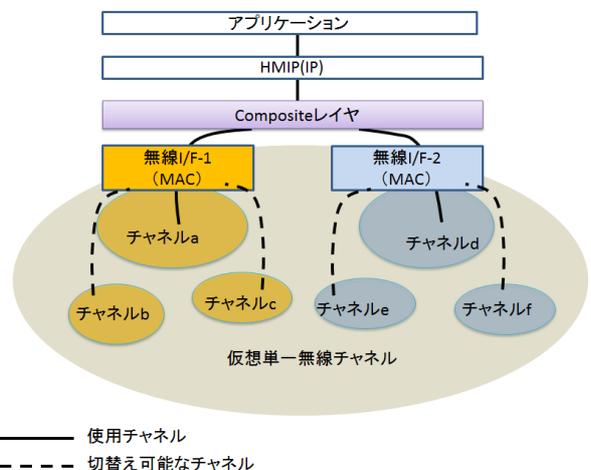


図 3 Composite レイヤによる複数無線 I/F の隠蔽

Fig. 3 Transparency for multiple interfaces on composite sub-layer.

で集約する多様な無線チャンネル間で遅延均等化を行う。以下、各無線 I/F により構成される複数経路のトラフィック分配を文献 [22], [23] に従ってパケット分配ポリシーとして概説する。

遅延時間は、無線リンクにパケットが到着してからパケット送信が完了するまでの時間とする。すなわち、遅延時間はキューにおける待機時間と電波状況を反映した伝送時間から構成され、物理レイヤからネットワークレイヤの状況を反映したメトリックである。リンクの負荷状態（リンクコスト）をリンク内の平均待機パケット数とする。端末 i におけるリンク x の平均待機パケット数 d_i^x は、平均パケット到着率を F_i^x 、平均遅延時間 T_i^x としリトルの定理を用いると次のように求まる。

$$d_i^x = F_i^x \times T_i^x \quad (1)$$

経路コストは経路を構成するリンク内の待機パケット数であることから、経路コストはその経路を構成するリンクコストの和となる。また、複数経路のコストは同様にそれら複数の経路コストの和である。したがって、複数の経路を集約した場合、そのコスト（以降、集約経路コスト）は集約経路を構成するリンクコストの和となり、ネットワーク全体で広帯域通信を実現する条件は次のように分析される。

- 経路コストの最小化はスループットの最大化、遅延の最小化、すなわち広帯域通信を可能とする。
- 各端末の集約経路コストの総和がネットワーク全体のコストであることから、各端末の集約経路コストを最小化することによりネットワーク全体で広帯域通信が可能となる。
- 集約経路コストの最小化は各経路の平均遅延時間を均等化することで可能となる。

4.2.2 ポリシに基づくトラフィック分配制御方式

本項では 4.2.1 項のトラフィック分配ポリシーを実現するための HMIP に基づいた制御方式を説明する。

(1) 経路切替制御

MN が移動することにより、装備するいくつかの無線 I/F が利用可能な AR を発見する。この新たに発見された AR が広帯域通信を維持および拡大する条件を満たす場合、MN の無線 I/F において新たに発見された AR へ経路を切り替える。この経路切替はチャンネル切替ポリシーに基づき、MN が発見した AR の遅延時間が、MN が集約する AR において遅延時間が最も高い AR よりも小さい場合、この高遅延の AR から新たな AR へ経路を切り替え、MAP が収容する (MAP ドメイン) AR 間の遅延均等化を図る。この経路切替制御を実施するため、MN は経路遅延時間が最も高い無線 I/F において全チャンネルをスキャンして複数の AR からのルータ広告を傍受する。ルータ広告には各 AR が収容する MN の「MAP-AR」および「AR-MN」の

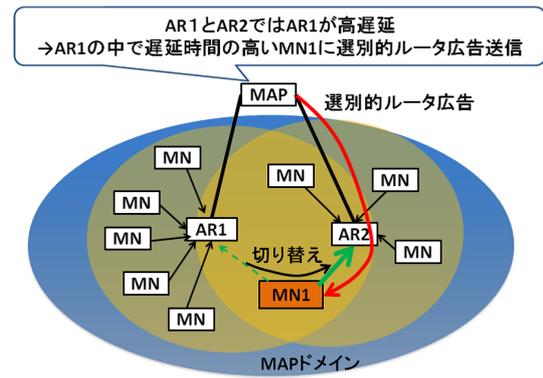


図 5 選別的ルータ広告による経路切替

Fig. 5 Path switch with selective router advertisement.

上下遅延時間の和（後述の (3) 参照）が付与され、当該 AR からのルータ広告の遅延時間は各 MN から同一の遅延時間（グローバルな遅延時間）としてスキャンされる。この遅延時間が当該無線 I/F の経路遅延時間より低くかつ最小の遅延時間となる AR へ経路を切り替える。しかしながら、MN 個々が独自に経路切替制御を実施すると、MN 間の経路切替えにおいて共振現象が発生する可能性が高い。このため、MN の経路切替えを MAP が制御する。4.2.1 項で示したように、ネットワーク全体で広帯域通信を実現するためには、構成される経路平均遅延時間を均等化することが必要になり、MAP ドメイン内で遅延時間を均等化する対象として一番大きな粒度は、各 AR のグローバルな遅延時間になる。したがって、初めに MAP は MAP ドメイン内で最も遅延時間の高い AR を探索する。次に探索された AR において最も高い経路遅延を持つ MN を選択し、この MN へ選別的にルータ広告を行い経路切替えを指示する。これを選別的ルータ広告と呼ぶ。選別的ルータ広告は通常のルータ広告と同様にブロードキャストで配信するが、広告内に経路切替えを指示する MN の HoA と BID を含む。選別された MN は前述の条件に基づき経路切替えを実施する（図 5 参照）。ただし、MN の経路を未確立（リンク切れなどにより）の無線 I/F は、選別の対象外として、通常のルータ広告と同様の制御を許容する。

これにより、経路切替えの共振を抑制しつつ、MN の複数の無線 I/F それぞれにおいて遅延時間の高い AR から遅延時間の低い AR へトラフィックを移動し、AR 間で遅延時間均等化を図る。次にその方式の詳細を説明する。

経路切替えは上下両方向のトラフィックが移動することから、上下両方向の遅延時間を用いる。任意の期間の上下の遅延時間の累積を T 、当該期間の上下のパケット送信数の累積を d とし、 T/d を当該期間の上下平均遅延時間とする。MAP において、アクセスルータ x (AR^x) と移動端末 i ($MN^i, MN^i \in AR^x$) 間の上下平均遅延時間および MAP と AR^x 間の上下平均遅延時間から、式 (2) のように MN^i と MAP 間の e2e 遅延時間 T^i を MN^i における無線

I/F ごとに算出する.

$$T^i = \frac{T_{AR-MN}^i}{d_{AR-MN}^i} + \frac{T_{MAP-AR}^i}{d_{MAP-AR}^i} \quad (2)$$

MAP において T^i を算出するために, MN^i は AR 間に発生した上りトラフィックの遅延時間とパケット送信数を接続している AR に周期的に転送する. それを受信した AR は, その情報と自身が計測していた MN^i と AR 間に発生した MN^i 宛の下りトラフィックの遅延時間とパケット送信数により式 (2) の右辺第 1 項の $\frac{T_{AR-MN}^i}{d_{AR-MN}^i}$ を算出する. AR は次に算出した $\frac{T_{AR-MN}^i}{d_{AR-MN}^i}$ と自身が計測していた AR と MAP 間で発生した MN^i 宛の上りトラフィックの遅延時間とパケット送信数の情報を MAP に周期的に転送する. それらの情報を受信した MAP はその情報と, 自身が計測していた MAP と AR 間に発生した MN^i 宛の下りトラフィックの遅延時間とパケット送信数を用いて式 (2) の右辺第 2 項の $\frac{T_{MAP-AR}^i}{d_{MAP-AR}^i}$ を算出し, その値と AR から受信した $\frac{T_{AR-MN}^i}{d_{AR-MN}^i}$ の和を算出することで T^i を得る. これらの処理を各 MN ごとに実施し, MAP は MN 宛ごとに MN と MAP 間の e2e 遅延時間を取得する.

MAP は AR^x が収容する MN の MAP- AR^x および AR^x - MN^i の上下遅延時間から式 (3) により AR^x におけるグローバル遅延時間 T^{AR^x} を算出する.

$$T^{AR^x} = \frac{\sum_{i \in x} T_{MAP-AR}^i}{\sum_{i \in x} d_{MAP-AR}^i} + \frac{\sum_{i \in x} T_{AR-MN}^i}{\sum_{i \in x} d_{AR-MN}^i} \quad (3)$$

MAP は, 式 (3) で算出したグローバル遅延時間が最も高い AR を探索する. 探索された AR において, 式 (2) で算出した遅延時間が最も高い MN を選別し, その MN の HoA と BID をルータ広告に付与する. 選別的ルータ広告を受信した MN は, 付与された HoA が自身の HoA であれば, 該当 BID を保持する無線 I/F において経路切替えを実施し, 遅延時間の高い AR から遅延時間の低い AR へトラフィックを移動し, AR 間で遅延時間均等化を図る.

以上, 選別的ルータ広告による経路切替えによって, 移動通信環境での発見・利用可能な AR が変動する状況において, 適時, 最も低遅延な経路へ切り替えて, 集約する AR を組み替えることにより, ネットワーク全体でシームレスな広帯域通信を維持する.

(2) 平均遅延時間を均等化するパケット分配制御 4.2.2 項

(1) で述べた経路切替え制御により構成された無線 I/F の各経路において, 4.2.1 項 (2) ポリシに基づき, 経路遅延時間の均等化を図るパケット分配を上下トラフィックそれぞれ独立に行う. パケット分配は任意の周期ごとに 4.2.2 項 (1) の式 (2) の片方向 (上りトラフィックは上り方向, 下りトラフィックは下り方向) の遅延時間を計測し, 複合無線アクセスネットワークを構成する各経路の遅延時間均等化へ向けて, 無線 I/F へのパケット分配割合を算出する. 初



図 6 パケット分配割合探索

Fig. 6 Search for packet distribution rate.

回パケット分配割合は各無線 I/F に均等に割り振り, 移動割合 a は無線 I/F 間でパケット分配割合を移動する割合であり, 移動割合減衰率 b は移動割合 a の減衰率である. パケット分配割合は周期ごとに更新し, 最適解を探索していく. その方法を, 図 6 を用いて説明する.

図 6 では, 初回パケット分配割合は 0.5, 初期移動割合 a は 0.1, 移動割合減衰率 b は 0.5 とする. 2 つの複数無線 I/F が装備された端末が周期ごとにそれぞれの平均遅延時間から, パケット分配割合を算出する.

[STEP1] 各無線 I/F の遅延時間を比較し, 遅延が最大となる無線 I/F-1, 最小となる無線 I/F-2 を選出する. 選出した最大遅延の無線 I/F-1 から最小遅延の無線 I/F-2 にパケットを移動するように移動割合 a (0.1) を用いてパケット分配割合を更新する (無線 I/F-1 は 0.4, 無線 I/F-2 は 0.6).

[STEP2] 更新されたパケット分配割合 (無線 I/F-1 が 0.4, 無線 I/F-2 が 0.6) に基づいてパケット分配を実施し, 各無線 I/F の遅延時間を計測する. STEP1 と同様に, 最大遅延の無線 I/F と最小遅延の無線 I/F を選出する.

A: 最大遅延の無線 I/F が前周期と同一無線 I/F であれば, 遅延均等化の解へ向かっていると判断して, 移動割合は前回と同様とし, パケット分配割合を決定する.

B: 最大遅延の無線 I/F が前周期と異なる無線 I/F であれば, パケット移動量が過多で遅延均等化の解を通り過ぎたと判断し, 移動割合を減らす. したがって移動割合 a に移動割合減衰率 b を掛けた値を移動割合 a としパケット分配割合を決定する.

このパケット分配割合の更新を繰り返す, 遅延が均等になる解を得る.

5. シミュレーション評価

5.1 シミュレーション条件

本節では, 複合無線アクセスネットワークの評価におけるシミュレーション条件について述べる. 評価空間を 300m x 350m の空間とし, 図 7 のように MN15 台, AR2

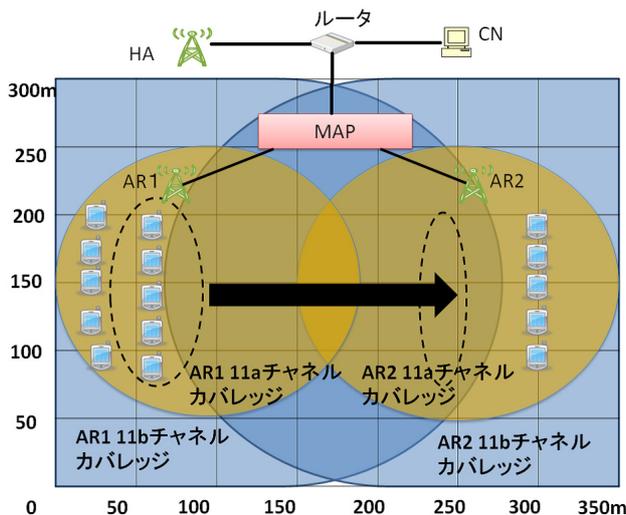


図 7 端末配置図

Fig. 7 Arrangement for mobile nodes.

台, MAP を 1 台配置する. 評価条件は以下のとおりである.

- 伝送速度 6 Mbps, 通信範囲が 100 m である 802.11a 無線 I/F (以降 11a), 伝送速度が 2 Mbps, 通信範囲が 200 m である 802.11b 無線 I/F (以降 11b) を MN, AR1, AR2 が装備する.
- 各 AR の 11a のチャンネルおよび 11b のチャンネルはそれぞれ異なるチャンネルが設定されて, MN は AR からルータ広告を全チャンネルからスキャンし, いずれかの AR に 11b, 11a で接続する.
- AR と MAP 間は高速有線接続とし, 無線通信と比較して十分な容量と通信速度があるとして, この間の遅延時間を無視することとする.
- 送信元は CN, 宛先は MN15 台.
- アプリケーショントラフィックは CBR, 送信間隔を 0.1 秒, 1 度の送信データ量を 8 Kbyte とする. 全 MN に同一の条件で CN は送信する.
- シミュレーション時間は 1,000 秒, 送信開始時刻は 50 秒.
- パケット分配割合更新周期は 5 秒, 初期のパケット移動割合 a は 0.1, パケット移動割合の減衰率 b は 0.9.
- ルータ広告の送信間隔は 5 秒~10 秒の間でランダム.
- 初めは AR1 の 11b カバレッジ内かつ 11a カバレッジ内かつ AR2 の 11b カバレッジ外に MN が 10 台配置される (図 7 参照). すなわち, AR1 における 11b, 11a のチャンネルからルータ広告は受信可能で, AR2 からのルータ広告は受信不可能な位置に配置される. 同様に残りの 5 台の MN は AR2 における 11b, 11a のチャンネルからルータ広告は受信可能で, AR1 からのルータ広告は受信不可能な位置に配置される. シミュレーション時間が 200 秒経過すると, AR1 の黒破線

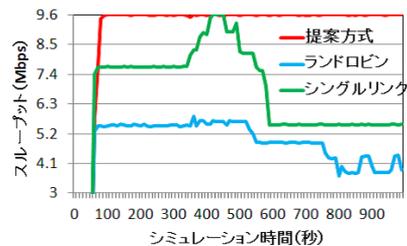


図 8 ネットワーク全体の CBR スループット
Fig. 8 CBR throughput on overall network.

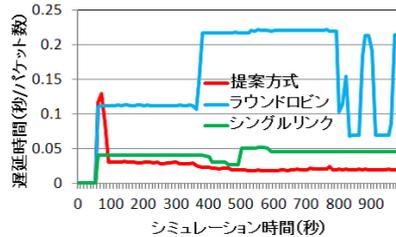


図 9 ネットワーク全体の CBR 遅延時間
Fig. 9 CBR delay on overall network.

楕円内にある 5 台の MN のうち 1 台が AR2 の黒破線楕円内のエリアに向かって移動を開始する. その後 50 秒間隔で AR1 の黒破線楕円内の MN が 1 台ずつ AR2 の黒破線楕円内のエリアに向かって移動を開始する. 移動速度は全 MN 1 m/秒でユーザの移動方法を徒歩と想定する. AR1 の黒破線楕円内から移動した MN は最終的に AR2 の黒破線楕円内に止まる. 黒破線楕円外の MN に関しては移動しない.

評価指標として, 10 秒周期でネットワーク全体のスループット, 遅延時間を計測する. 全 MN が全パケットを受信した際のネットワーク全体のスループットは 9.6 Mbps となる. また, 提案方式の有効性を示すために以下の方式と比較する.

- シングルリンク: 通信速度の速い 11a のみを利用する.
- ラウンドロビン: 提案方式と同等の複合無線アクセスネットワークを構成し, 複数の無線 I/F を用い, 11a, 11b 交互にパケット分配を行う.

5.2 シミュレーション結果

CBR のスループットの結果を図 8, 遅延時間の結果を図 9 に示す.

- シングルリンク

シングルリンクは, 11a のみを利用する. 移動前に関しては, MN の接続数が AR1 に偏っているため, AR1 の 11a においてパケットが過多になり, 帯域不足からオーバーフローが発生している (図 10). 結果, スループットが低下する. 5 台の MN が順次 150 m (図 7 参照) まで移動するにつれて, それぞれが AR2 の 11a を発見し経路を切り替えるため, 一時的 (約 400 秒から 500 秒の間) に AR1・AR2

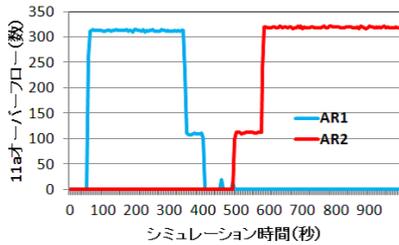


図 10 シングルリンクにおける各 AR の 11a オーバフロー
 Fig. 10 11a overflows of AR on single link case.

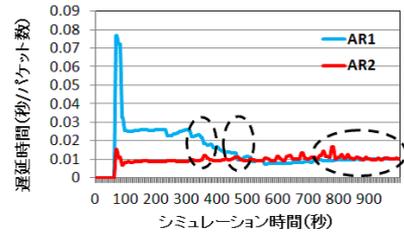


図 12 提案方式における AR 間の遅延均等化
 Fig. 12 Delay equalization between ARs on proposal.



図 11 ラウンドロビンにおける各 AR の 11b オーバフロー
 Fig. 11 11b overflows of AR on round robin case.

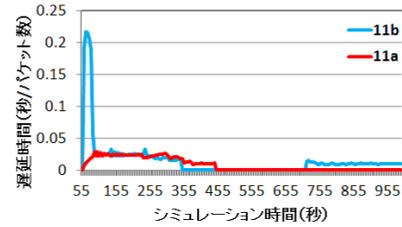


図 13 提案方式における AR1 無線 I/F の遅延時間 (MN3 宛)
 Fig. 13 Delay of AR1 wireless I/F for MN3 on proposal.

への MN の接続数が均等になり、AR1 のオーバーフローが減少し、スループットが増加する。しかし、5 台の MN が順次 AR1 の 11a 通信カバレッジ外である 200m まで移動すると、AR1 に接続していた MN のリンクが切断され、AR2 の 11a に再接続を行う MN がさらに増加する。したがって、500 秒以降には AR2 の 11a においてパケットが過剰になり、帯域不足からオーバーフローが発生し、スループットが急激に低下する。遅延時間では、低遅延を維持しているかのように見えるが、MN の接続数が偏っている AR の 11a において帯域不足からオーバーフローが発生し、多くのパケットを送信前に破棄している。すなわち、通信として機能していない。

● ラウンドロビン

ラウンドロビンは、複数の無線 I/F の通信特性を考慮せず、11a と 11b に交互にパケットを分配する。そのため、移動前に関して AR1 の 11a と比べて通信速度の遅い 11b においてパケットが過剰になり、11b の帯域不足からオーバーフローが発生する (図 11 参照)。MN が移動するにつれて、AR2 の 11b を発見し、AR1 の 11b から AR2 の 11b に経路切替えを行う MN が増加する。よって、AR1 のオーバーフローが減少する。しかし、AR2 の 11b の帯域不足によりオーバーフローが増加するため、通信の改善に至っていない。よって、つねに低スループット、高遅延となる。

● 提案方式

提案方式は、シングルリンク、ラウンドロビンに比べて圧倒的に高スループット、低遅延を維持している。またつねにスループットが 9.6Mbps であることから、全 MN で全パケットを受信している。2 つの AR それぞれの無線 I/F の送信速度が、11a は 6 Mbps、11b は 2 Mbps であることか

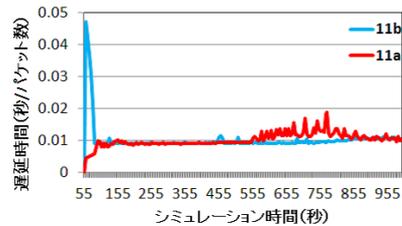


図 14 提案方式における AR2 無線 I/F の遅延時間 (移動しない MN 宛)
 Fig. 14 Delay of AR2 wireless I/F for stationary nodes on proposal.

ら、その通信速度の和は $(6 \text{ Mbps} + 2 \text{ Mbps}) \times 2 = 16 \text{ Mbps}$ である。MAC におけるアクセス制御時間、バックオフ待機時間および再送制御にともなう時間を考慮すると、スループットが 9.6Mbps となるのは、MN の移動に状況に応じて各無線 I/F へ最適にトラフィック分配し、各無線 I/F の帯域を相当有効に利用していると考えられる。移動 (200 秒) 前に関しては、AR1 の 11b、11a に MN が偏っているため、AR1 の遅延時間の方が、AR2 の遅延時間に比べて高い (図 12 参照)。しかし、提案方式は AR1 にトラフィックが偏っている場合でも、シングルリンク、ラウンドロビンに比べ、高スループットかつ低遅延である。この理由を AR1 において 3 番目に移動開始する端末 (以下、MN3) 宛、AR2 において移動しない MN 宛のパケット分配を用いて説明する。AR1 の MN3 宛、AR2 の移動しない MN 宛のパケット分配は移動前 (0~200 秒) においていずれも各 AR の 11a/b の平均遅延時間が均等化される。AR1 では、200 秒までは 10 台の MN を収容しているので、その負荷は 6.4Mbps である。11a 単独、11b 単独のいずれにおいても帯域不足となる。図 13、図 14 に示すように

11a/bの遅延均等化により11aのみだけでなく適切に11bにパケット分配し、AR1に收容される全MNで全パケットを受信可能としている。すなわち、提案方式のパケット分配が有用であることが分かる。次に移動開始後について、MN3を用いて説明する。

355秒において、MN3は移動にともないAR2の11bを発見し、さらに選別的ルータ広告を傍受する。MN3はこの傍受ルータ広告がAR2の11bが経路切替条件を満たすことから自身の11bの経路をAR1の11bチャンネルからAR2の11bチャンネルへ切り替える。経路切替が確立すると、MAPにおけるMN3宛のパケット分配AR1:AR2=1:0の見直しを開始され、その分配割合がAR1:AR2=0.5:0.5に初期化される(図15の355秒付近)。以降、AR1とAR2へパケットが分配され(図15の355~455秒)、AR1/2の遅延均等化が行われる(図16の355~455秒)。これにより、AR1の遅延時間(図12の355秒付近の破線円)と自身の遅延時間が減少し始める(図17の355~455秒)。特に自身の遅延時間は大幅に減少している。

455秒において、さらに移動したMN3はAR2の11aを発見し、選別的ルータ広告傍受により自身の11aの経路

をAR1の11aチャンネルからAR2の11aチャンネルへ切り替える。この経路切替えによって、MN3は11a, 11bともにAR2に接続され、MAPにおけるMN3宛のパケットがAR2に移動する。結果、AR間の遅延時間がさらに均等化に近づき(図12の455秒付近の破線円)、さらにネットワーク全体でも少しずつであるが確実に遅延が減少している(図9の455秒付近)。AR2のMN3宛のパケット分配は455秒付近から開始し、470秒付近でAR2の11b/11aの遅延を均等している(図18, 図19の455秒~700秒間)。つまり、15秒間で遅延均等していることから、徒歩移動(1m/秒)は15メートルの移動であり、新カバレッジ内(AR2の11aカバレッジは200m)の7.5パーセント程度である。また、その後のカバレッジ内の移動中はその移動に応じて遅延時間均等化を維持している。したがって、提案方式は徒歩の移動速度に十分に適応していると考えられる。

700秒後では、MN3は選別的ルータ広告により11bでAR2からAR1に経路切替えを実施している。これは他のMNが移動によりAR2の11bチャンネルへ経路切替えを実施したため、AR2の11bの遅延時間が増加し、一方、AR1の11bは接続MNの減少から遅延時間が減少する。これに従い、MN3はMAPから選別的ルータ広告を受信し、AR1の11bチャンネルへ再び経路切替えを行う。このようなチャンネル切替えポリシーに基づく経路切替えを実施し、各AR間の平均遅延時間をさらに均等化に近づけ(図12の700秒以降)、ネットワーク全体で高スループット・低遅延を実現している。また、経路切替え後はMAPがMN3宛のパケットをAR1, AR2に平均遅延が均等化されるようにパケット分配が実施されている(図15と図16の700秒以降)。

以上、提案方式は、経路切替えによりAR間の平均遅延

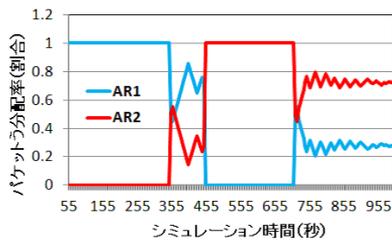


図15 提案方式におけるMAPのパケット分配割合(MN3宛)
Fig. 15 MAP packet distribution rate for MN3 on proposal.

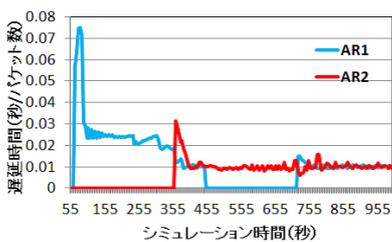


図16 提案方式におけるARの遅延時間(MN3宛)
Fig. 16 Delay of AR for MN3 on proposal.

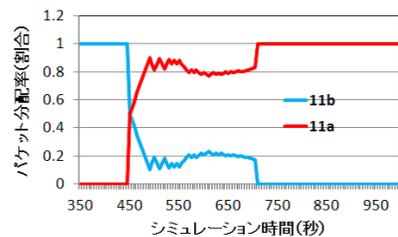


図18 提案方式におけるAR2のパケット分配割合(MN3宛)
Fig. 18 Packet distribution rate of AR2 for MN3 on proposal.

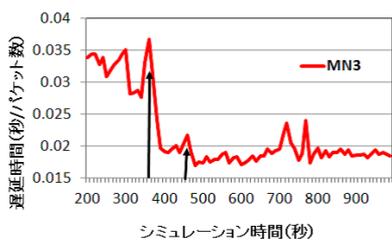


図17 提案方式におけるMN3の遅延時間
Fig. 17 Delay of MN3 on proposal.

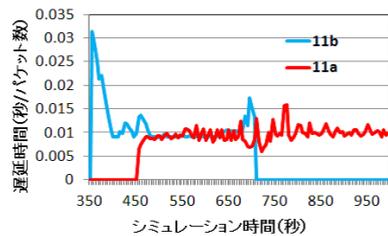


図19 提案方式におけるAR2無線I/Fの遅延時間(MN3宛)
Fig. 19 Delay of AR2 wireless I/F for MN3 on proposal.

時間均等化, パケット分配による各無線 I/F への平均遅延時間均等化を各端末が実施することで, 高スループットかつ低遅延を持続し, シングルリンク, ラウンドロビンと比較して圧倒的にシームレスかつ広帯域通信を実現していると考えられる.

6. まとめ

本論文では移動通信環境における複合無線アクセスネットワークとその制御方式を示した. さらにシミュレーション結果から従来方式に比べ, 提案方式は高スループットかつ低遅延でシームレスな広帯域通信を実現し, 移動通信環境における有効性を示した. 今後, 無線 I/F として WiMAX や LTE を加えて, より高速でかつ広域な移動通信環境へ適用を行う予定である. また, 複数の MAP の連携によるマルチ MAP ドメインの検討を行う予定である.

参考文献

- [1] 原田博司: コグニティブ無線機の実現に向けた要素技術の研究開発, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J91-B, No.11, pp.1320-1331 (2008).
- [2] oneM2M: Standards for M2M and the Internet of Things, oneM2M (online), available from <http://onem2m.org> (accessed 2014-08-20).
- [3] Report ITU-R M.2134.: Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s) (2008).
- [4] 阪田史郎: [知識ベース] 4 群 5 編モバイル IP アドホックネットワーク, 電子情報通信学会, Ver1, 2010-6-10 (2010).
- [5] 湧川隆次, 村井 純: モバイル IP 教科書, インプレス R&D (2009).
- [6] Retvari, G. and Cinkler, T.: Practical OSPF traffic engineering, *IEEE Communications Letters*, Vol.8, pp.689-691 (2004).
- [7] Fortz, B. and Thorup, M.: Internet Traffic Engineering by Optimizing OSPF Weights, *Proc. IEEE INFOCOM*, Vol.2, pp.519-528 (2000).
- [8] Sridharan, A., Diot, C. and Guerin, R.: Achieving near-optimal traffic engineering solutions for current OSPF/IS-IS networks, *Proc. INFOCOM 2003*, Vol.2, pp.1167-1177 (2003).
- [9] Xu, D., Chiang, M. and Rexford, J.: Link-state routing with hop-by-hop forwarding can achieve optimal traffic engineering, *IEEE/ACM Trans. Netw.*, Vol.19, No.6, pp.1717-1730 (2011).
- [10] Alpcan, T., Singh, J.P. and Basar, T.: Robust Rate Control for Heterogeneous Network Access in Multihomed Environments, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.8, No.1, pp.41-51 (2009).
- [11] Thompson, N., He, G. and Haiyun, L.: Flow Scheduling for End-Host Multihoming, *Proc. IEEE INFOCOM 2006*, pp.1-12 (2006).
- [12] Sharma, P., Sung-Ju, L., Brassil, J. and Shin, K.G.: Aggregating Bandwidth for Multihomed Mobile Collaborative Communities, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.6, No.3, pp.280-296 (2007).
- [13] Barkoosaraei, A.M. and Aghvami, A.H.: Intelligent overlapping MAP domain forming for mobility management in HMIPv6 access networks, *Proc. IEEE WCNC 2012*, pp.2677-2682 (Apr. 2012).
- [14] Taleb, T., Jamalipour, A., Nemoto, Y. and Kato, N.: DEMAPS: A Load-Transition-Based Mobility Management Scheme for an Efficient Selection of MAP in Mobile IPv6 Networks, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.58, No.2, pp.954-965 (2009).
- [15] WonSik, C. and SuKyoung, L.: Cost-Effective MAP Selection in HMIPv6 Networks, *Proc. IEEE ICC '07*, pp.6026-6031 (2007).
- [16] Duncanson, J.: Inverse Multiplexing, *IEEE Communications Magazine*, Vol.32, No.4, pp.34-41 (1994).
- [17] Fredette, P.H.: The Past, Present and Future of Inverse Multiplexing, *IEEE Communications Magazine*, Vol.32, No.4, pp.42-46 (1994).
- [18] Bandwidth ON Demand INteroperability Group.: Interoperability Requirements for Nx56/64 kbit/s Calls (1992).
- [19] 3GPP: RP-091440: Work Item Description: Carrier Aggregation for LTE (2009).
- [20] 金子尚史, 植田哲郎, 野村眞吾, 杉山敬三, 竹内和則: コグニティブ無線における無線環境認識についての一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.395, pp.153-158 (2006).
- [21] 太田真衣, Sean Rocke, Jingkai Su, Alexander M. Wyglinski, 藤井威生: チャネル利用率向上のためのコグニティブ無線システムにおける制御チャネル選択手法, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.417, pp.101-106 (2012).
- [22] Takizawa, Y.: Traffic Control for Composite Wireless Access Route of IEEE802.11/16 Links, *Recent Advances in Wireless Communications and Networks*, Lin, J.-C. (Ed.), ISBN: 978-953-307-274-6, InTech (2011).
- [23] 滝沢泰久, 植田哲郎, 小花貞夫: IEEE802.11 と IEEE802.16 を用いた複合アクセス経路のパケット分配制御方式, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.2, pp.543-557 (2011).



野田 健太郎 (学生会員)

2012 年関西大学環境都市工学部都市システム工学科卒業. 現在, 関西大学大学院理工学研究科において移動通信環境における複合無線アクセスネットワーク制御方式の研究に従事.



安達 直世 (正会員)

1996 年立命館大学理工学部電気電子工学科卒業. 1998 年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了. 同年三洋電機(株)入社. 2001 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了. 同年より同大学情報科学研究科助手. 2006 年関西大学工学部助手. 2007 年関西大学環境都市工学部助教. 情報通信システムのモデル化と性能評価に関する研究に従事. 博士(工学). 電子情報通信学会, システム制御情報学会, 土木学会各会員.



滝沢 泰久 (正会員)

1983年京都工芸繊維大学工学部機械工学科卒業。同年日本ユニシス(株)入社。1990年住友金属工業(株)入社。1998年ATR環境適応研究所出向。2002年ATR適応コミュニケーション研究所主任研究員。2008年同研究所上級主任研究員。2009年関西大学環境都市工学部准教授, ATR適応コミュニケーション研究所客員研究員。2014年関西大学環境都市工学部教授。現在, 無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会, IEEE, IEEE-CS各会員。