

平成22年5月10日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360174
 研究課題名（和文） ソフトウェア無線ネットワークに関する研究
 研究課題名（英文） Study on Software Definable Radio Networks
 研究代表者
 小牧 省三（KOMAKI SHOZO）
 大阪大学・工学研究科・教授
 研究者番号：10243164

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ユーザセントリックに無線サービスをヘテロジニアス無線アクセスによって提供する汎用ワイヤレス基盤として、ソフトウェア無線ネットワークを提案し、その実現のための次の3つの要素技術について研究した。

- (1) 電波空間構成システム、
- (2) 電波空間転送ネットワークシステム、
- (3) ユーザセントリック電波空間制御エージェントシステム

研究成果の概要（英文）：

In this research, Software Definable Radio Networks (SFDRN) have been studied as a universal wireless access networks for heterogeneous radio and services. In order to realize SFDRN, following three technologies have been studied:

- (1) Radio space construction systems.
- (2) Radio space transparent transporting systems for heterogeneous radio spaces.
- (3) User centric radio agents for effective frequency use.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2008年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009年度	3,900,000	900,000	4,800,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	3,990,000	18,190,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：5104

キーワード：エージェント、ヘテロジニアスワイヤレス、SLA、効用関数、マイクロ波フォトニクス、光ファイバ無線、漏えい同軸ケーブル

1. 研究開始当初の背景

無線アクセスでは電波利用の柔軟化、ブロードバンド化の趨勢にあり、また固定料金接続サービスの登場や MVNO の参入があり、サービス競争が進展している。さらに無線アク

セスは、オープン化と高度利用が先行する固定系ブロードバンドアクセスと融合することで一層の高機能化、高度化が期待されている。固定系ブロードバンドネットワークと異種無線（ヘテロジニアスワイヤレス）の融合、

ならびに有線・無線を通じたフル IP 化が進み、ネットワークのオープン化、垂直ハンドオーバ技術が進展すると、膨大な人・モノへの非常に自由度の高い情報通信サービスが提供可能となる一方、電波・ネットワークリソースを最大限に有効利用する技術、ユーザの環境・プレゼンス・意思に応じた QoE を満足するユーザセントリックサービス提供技術がより一層重要となってくる。

標準化され導入が進むブロードバンド無線アクセスは多彩であり、その使用周波数、伝搬特性、適用先も様々である。そしてこれらの無線アクセスはいずれも低コストで広域に利用できる IP ネットワークに接続され、利用者がどこにいても、またどのような状況にあっても提供可能とするユビキタスサービスの実現を目指している。

同時に無線アクセスの広帯域化に伴って高周波化、セルサイズの狭小化が進む一方、周波数利用効率への要求はさらに強く、MIMO-SDMA の適用や、ピコ/ナノ/フェムトセル化への移行を加速している。これらは場所に依らないユビキタスネットワークサービスを安価にかつ速やかに浸透させていく上で障害も作り出す。つまり、電波の届きにくい閉域空間が増え、そこに多数の低コストな基地局を増設する必要が生じ、それに伴い、多彩な電波形式毎の基地局増設、次々と登場する新しい電波形式への対応が必要となってくる。また、これらの課題は大都市では電波資源の欠如として、条件不利地域（低需要地域）ではインフラ整備、サービス提供の遅延というようにその性格が異なってくる。さらに、ユーザの視点からユビキタスサービスを見るとき、従来の QoS 保証だけではなく、ユーザによって異なる満足度や環境、状態（プレゼンス）を考慮したユーザセントリックな QoE 保証の実現が課題になってくる。

本研究では、このような課題を解決し、異なった周波数基盤をうまく使える基盤としてソフトウェア無線ネットワーク (SDRN: Software Definable Radio Network) を提案し、その実現のための要素技術の研究に取り組む。

2. 研究の目的

ユビキタスネットワークでは、ユーザは、インターネットで提供されるあらゆるサービスの多彩さと快適さがワイヤレスでも全く損なわれないことを要求するであろうし、そのようなフル IP サービスを提供できるユビキタスワイヤレスインフラが提供されなくてはならない。一方で、このような多彩さは次々と登場するワイヤレスアクセス手段の種類にも現れており、今後ユーザは、ますます多種多様なワイヤレスアクセスへの接続を強いられていく状況にある。

既存技術の NGN や IMS は IP 技術を用いて下位レイヤのワイヤレスアクセスのヘテロジニアス性を上位レイヤのサービスアプリケーションから隠蔽し、異種ワイヤレスアクセスをシームレスに接続するわけであるが、ヘテロジニアスワイヤレスに対応できるマルチモード無線端末を前提としてしまい、レガシー端末には対応できない、あるいは依然としてワイヤレスアクセスの種類毎にアクセスポイントの用意が余儀なくされ、インフラ整備には冗長構成と多大なコストと時間が費やされる構造となっている。また、今後の新しい高速無線アクセス方式は、電波の高周波化、セルサイズの縮小化が必須であり、これは真にいかなる時間、場所でのユーザのユビキタスサービス享受にとって最も重要な安価で迅速なインフラの整備に対して重大な障害となる。

以上のようにオープンな IP ネットワークとヘテロジニアスワイヤレスアクセスの融合によるユビキタスサービスの提供には、IP ネットワーク-無線基地局間のエントランスネットワークや基地局を異種無線に対して汎用化した次のような特徴をもつプラットフォームが必要となる。

- (1) 種々の通信・放送サービスが融合でき、各オペレータが汎用的に使用でき、また各種サービス間ハンドオーバを実現し易いクロスレイヤプラットフォーム
- (2) 種々の電波形式が汎用的に使用できる基地局とエントランスネットワーク
- (3) 電波周波数の時間、空間、周波数領域での有効利用
- (4) ユーザスタイル、オペレーションスタイルを整合させるエージェント機能

本研究では、ユーザセントリックにヘテロジニアス電波空間を提供するユニバーサルワイヤレスインフラストラクチャ構成理論を確立し、ならびに先述の 4 つの特徴を具備することによって、異なった周波数基盤をうまく使える基盤としてソフトウェア無線ネットワーク (SDRN: Software Definable Radio Network) を提案し、その実現のための要素技術の研究に取り組む。ソフトウェア無線ネットワークの概念を図 1 に示す。本ネットワークは、

- (1) 様々な場所に存在する多数のユーザ毎の周囲に適切なプライベート電波空間を生成・収集する電波空間構成システム、
- (2) それらの種々の電波空間を互いに干渉せずに転送する電波空間転送ネットワークシステム、
- (3) (1), (2) で生成/収集・転送される電波空間をユーザセントリックに制御する電波エージェントシステム

で構成される。SDRN の実現により、ワイヤレスネットワークそのものがユーザセントリ

ックでダイナミックな可変性を具備することができるので、ソフトウェア無線になぞらえて、ソフトウェア無線ネットワークと呼んでいる。

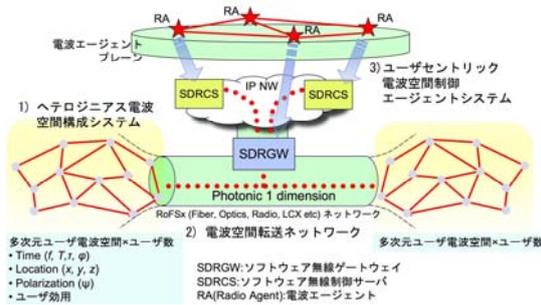


図1 ソフトウェア無線ネットワーク

3. 研究の方法

(1) 電波空間構成システム：

RoFSx (Radio on Free Space Fiber / Optics / Radio)技術によって分散配置された汎用アクセスポイント(AP), すなわち遍在 AP を用いて周波数, 時間, 位相, ユーザの位置などの多次元物理量で規定される電波空間を各ユーザに生成, あるいは各ユーザが発した電波空間を収集するシステムについて検討する. すなわち無線区間のフェージング, シャドウイング, ユーザ移動などを考慮した電波空間モデルの構築, 複数ユーザの電波空間間与干渉性, 被干渉性を考慮した MIMO 空間多重理論を応用した RoF 遍在 AP システムを提案し, 実験とシミュレーションにより評価を行う.

また, キーデバイスとなる広帯域アンテナとして, パッシブかつ広帯域分散アンテナと見なせる漏洩同軸ケーブル(LCX)の利用を提案し, シミュレーションにより実現できる電波空間の大きさについて検討すると共に, 電波空間を構成する多次元パラメータの中で重要なパラメータであるユーザの位置情報について, LCXを用いた新しい位置同定法を提案し, 実験的, 理論的な評価を行う.

(2) 電波空間転送ネットワーク：

(1) で生成・収集する多数のユーザの多次元電波空間を RoFSx ネットワークを用いて 1次元に変換して転送する. 本研究では, RoF 遍在 AP システムに光符号分割多重方式を適用した電波空間転送ネットワークについてシミュレーションによる実証を行う.

さらに, RoF エントランスと IP ネットワークを接続し, 各種無線アクセスと IP ネットワーク間のゲートウェイ機能も持つ SDRGW の構成技術を検討する. すなわち, 光に閉じこめられて運ばれてきた種々の電波空間をそのまま IP パケット化し, 宛先ユーザにとって適切な形式の電波空間に変換するソフト

ウェア無線制御局へ IP 転送する機能を具備させるため, 電波空間の AD 変換ならびに DRoF システムを提案し, シミュレーションと実験により評価を行う.

(3) ユーザセントリック電波空間制御エージェントシステム：

ユーザにとってアクセス手段の選択, サービスに対する満足度は, あらかじめ決められるべきものではなく, ユーザスタイル (満足度, 意思, 場所, 時間, プレゼンス) とワイヤレスアクセスのオペレーションスタイル (電波形式などの物理パラメータ), 電波法などレギュレーションスタイルを協調させて柔軟に提供される必要がある. すなわち, ユーザに負担をかけることなくネットワークが判断して自動かつ最適にユーザセントリックにワイヤレスサービスを提供していくアーキテクチャを創成しなければならない. ユーザセントリックエージェントはユーザ効用関数に基づき, ユーザスタイル, オペレーションスタイル, レギュレーションスタイルを協調させてユーザの満足度を維持しつつリソースの有効利用を図るサービスレベルエージェント (SeLA) である. またユーザのサービス選考規範として多次元効用関数をユーザエージェントが規定するが, その導出に主観評価評価実験や階層化意思決定手法 (AHP) を用いる.

① SIP プロトコルを活用した電波空間のシームレスハンドオーバ

ユーザに提供される電波空間をユーザのプレゼンス, 移動, 意思, 満足度充足のために切り替える電波空間シームレスハンドオーバを SIP プロトコルのマルチホーミングによってマルチ電波空間に対してセッションを張り, それを用いたユーザのシームレスハンドオーバについて検討する. また, ユーザのプレゼンスと QoE に基づく AP 選択アルゴリズムを提案し, シミュレーションにより評価する.

② 電波空間制御に用いる多次元ユーザ満足度モデル構築

ユーザのプレゼンス (場所, 状況など) とユーザの意思, ならびにサービスを受けたときの品質や待ち時間, 料金に対する様々なユーザの効用を統計処理, 数値化した多次元効用関数を導出する. ワイヤレス web ダウンロード, ワイヤレス動画ストリーミング, 無線 IP 電話などの具体的なアプリケーションを対象にして, 待ち時間と品質に対するユーザの満足度の主観評価実験や AHP を行い, 実験結果を統計処理することで多次元効用関数モデルの構築を行う.

4. 研究成果

(1) 電波空間構成システム：

RoF 遍在 AP による同一周波数電波空間の MIMO 多重方式について、シミュレーションと実験により評価した結果、図 2 に示すようにアンテナ分離によって無線 LAN のスループットが約 2 倍になるという MIMO 多重度改善効果を実験的に明らかにした[6, 11, 16]. さらに多数の遍在 AP から SNR 基準で選択するアルゴリズムを新たに提案した[山上 RCS].

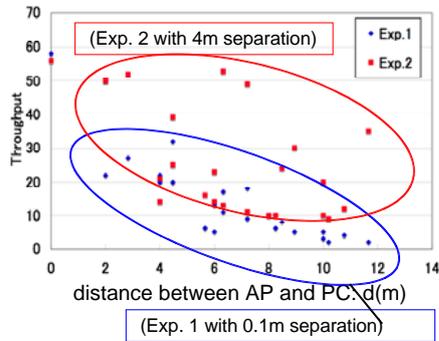


図 2 遍在アンテナによるスループット改善

一方、広帯域 LCX を広帯域分散アンテナとして用いるシステムについては、LCX の放射指向特性を利用した新たな無線サービス選択配信システムの提案[10], さらに LCX の放射スロットを時間拡散器として利用するエリア多重システムの提案を行った. マルチユーザ空間多重法の検討に着手した[8].

さらに、LCX から空間に放射される進行波と反射波を用いた新たな端末位置検出法を提案し、実験とシミュレーションで位置検出原理と誤差を評価した結果、図 3 に示すように誤差 2m 以内の位置検出が LCX の周囲で実現できることを明らかにした[4, 6, 7].

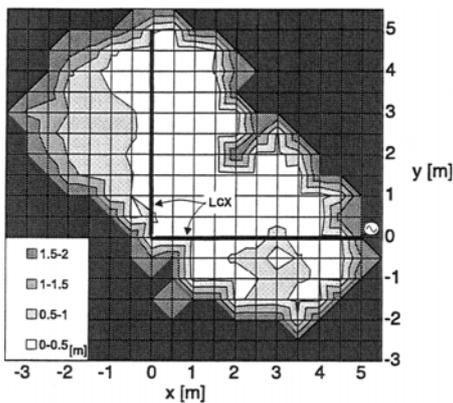


図 3 10m の屈曲 LCX を用いた位置検出システムの検出誤差分布 (誤差 1m 以内の位置検出領域: 約 13m²)

(2) 電波空間転送ネットワーク :

RoF 遍在 AP エントランス NW に光符号分割多重方式の適用を提案し、図 4 に示すように拡散符号設計により無線区間におけるビット誤り率を改善することで空間多重効果を

改善できることを明らかにした[14]

また、ヘテロダイマルチホップ RoR (Radio on Radio) 中継によって電波空間を転送するミリ波メッシュネットワークの提案を行い、車車間通信適用時のルート数、パスダイバシティ効果をシミュレーション評価した. [9]

更に、ソフトウェア無線ゲートウェイを介してヘテロジニアス電波空間をそのままデジタル信号に変換し、IP パケット転送する SDRGW の実現技術として電波空間の AD/DA 変換基礎実験[12]を行うと共に、電波空間の高品質 IP 転送技術としてターボ符号の適用手法を新たに提案し、シミュレーションにより UDP パケット化された電波信号の伝送品質へのパケットロスの影響を評価した結果、図 5 に示すようにターボ符号とインタリーブの適用によって、許容パケットロスを大きく改善できることを明らかにした[12].

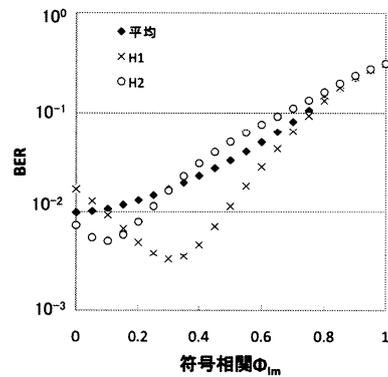


図 4 光符号分割多重伝送される無線信号の復調誤り率を最小化する拡散符号相関係数

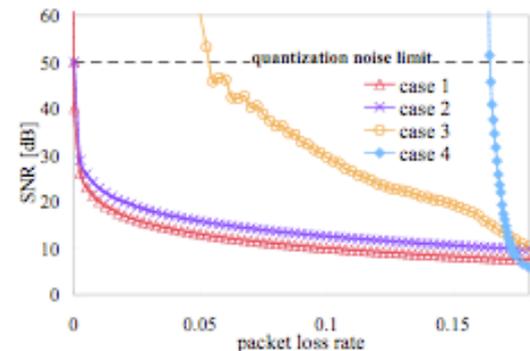


図 5 IP 伝送される無線信号の UDP パケットロス対復調 SN 比特性, ターボ符号とインタリーブ(case4)により 15%以上のパケットロスまで量子化雑音限界の SN 比を達成できる.

(3) ユーザセントリック電波空間制御エージェントシステム :

①SIP プロトコルを活用した電波空間のシームレスハンドオーバ

電波エージェントとして、SIP モビリティを用いて異種電波空間間シームレスハンドオーバを実現するエージェントを提案し、そ

の低遅延性能をシミュレーションで示した [17].

また, QoE 保証とトラフィック分散を両立させる QoS 保証/非保証 AP を選択するエージェント, ならびに即時系サービス (VoIP など) と待時系サービス (FTP など) を区別して, 同時にサービスの所要 QoS, AP の収容端末数, AP の利用率に応じて接続先 AP を選択するエージェントを提案し, シミュレーションによりスループットと遅延特性の改善効果を評価した結果, 図 6 に示すように従来方式に対する改善効果が得られることを示した [2, 3, 5].

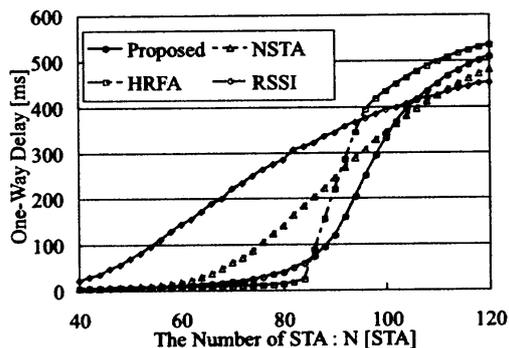


図 6 3個の11e-APで収容された一様分布する端末の数対 VoIP パケット遅延特性, 提案方式により従来方式に比べ, 約 100 端末まで最も低い遅延特性を示している [3]

②電波空間制御に用いる多次元ユーザ満足度モデル構築

電波空間制御を行う SLA エージェントに用いる多次元ユーザ満足度モデルとして, 無線サービスの待ち時間, 品質, 料金を考慮した多次元ユーザ効用関数を階層化意思決定法 (AHP) を用いて導出し, それらを同じサービスに同様な価値を見いだすユーザ群で構成されるいくつかのグループに分類し, そこからユーザセントリックな効用関数を導出した. 具体的には AHP によってサービス料金と許容できるダウンロード待ち時間の 2 次元効用関数を導出し, 更に料金と待ち時間のどちらにも価値を見出すかによって 3 つのグループ (料金重視, 待ち時間重視, 同等に重視) に分類し, それぞれについて 3 つの効用関数を導出した. 図 7 はその結果を示しており, 図中の 3 つのラインそれぞれより左側の領域が 3 つのグループそれぞれが満足する (サービス価値 1 以上) 料金と待ち時間の組み合わせを表す. この結果をユーザセントリック無線サービスを提供する SLA エージェントの行動規範に用いれば, ユーザの嗜好性をあらかじめ把握しておき, 該当するグループに対応したサービスプランを提供することが可能になると共に, 電波周波数やネットワークリソースを有効利用する周波数エージェントの行

動規範の規範にも利用することができる [15].

また, 本研究では社会規範エージェントの検討にも着手でき, 人口集中地域における地域間格差の是正方を提言した. 大都市に人口集中し, 発生トラフィックが増加する中, 周波数資源の有限性によりトラフィックに見合った基地局増設には膨大なコストが発生し, 今後, 人口集中地域で急激な品質劣化の発生が懸念される. これに対して既存システムへのマイクロセル (無線 LAN) オーバレイという形態が, その解決策となりうることを示した. すなわち, 人口集中地域においても地域間格差 (不利条件) が発生する可能性がある中, 人口集中地域を中心にした周波数割当の増加は不要なものであり, 無線 LAN 環境の併用という手段を用いることで, この地域間格差を是正可能であることを定量的に指摘できた [1, 13].

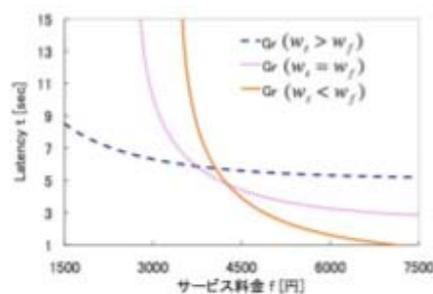


図 7 AHP を用いて導出した効用関数に基づいたサービス料金とダウンロード待ち時間の組み合わせ. 3 つのグループ (料金重視, 待ち時間重視, 同等に重視) のサービス価値 1 (満足度境界) をあらわすラインが示されている [15].

以上のように, RoFSx ネットワークと IP ネットワークでつながれたソフトウェア無線ネットワークにおいて離れた場所の電波空間間をユーザセントリックに透明に接続する基本技術に関する研究成果を得ることができた. 紙面の関係で主要な成果のみを示したが, 詳細は主な発表論文を参照されたい.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

[1] 塚本勝俊, 出雲伸幸, 東野武史, 小牧省三: 『人口集中地域におけるワイヤレス・ブロードバンドの地域間格差とその是正方策』, 情報通信学会誌 No. 90, Vol. 27, No. 1, pp. 1-10, (May 2009). (査読有)

[2] Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozho Komaki: 『VoIP Session Capacity Expansion with Packet Transmission Suppression Control in Wireless LAN』, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. E92-B, No. 4, pp. 1144-1152, (April 2009). (査読有)

[3] 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' 異種サービス混在環境における無線 LAN アクセスポイント選択アルゴリズム'', 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 2, pp. 750-764, (February 2009). (査読有)

[4] 西川健一, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' 漏えい同軸ケーブルを用いた TDOA による端末位置検出方式'', 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J92-B, No. 1, pp. 320-327, (January 2009). (査読有)

[5] Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki :'' AP Selection Algorithm for Real-Time Communications through Mixed WLAN Environment'', 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. E91-B, No. 10, pp. 3077-3084, (October 2008). (査読有)

[6] Luong Hong Hai, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki :'' Grouping methods for orthogonal frequency- and space-division multiple access in a radio-on-fiber radio space-transmission system'', Optical Engineering, Vol. 46, No. 9, pp. 095006-1-9, (September 2007). (査読有)

[7] Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki :'' A new position detection method using leaky coaxial cable'', IEICE Electronics Express, Vol. 5, No. 8, pp. 285-290, (April 2008). (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

[1] 田崎秀典, 西川健一, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' 漏洩同軸ケーブルを用いた時間拡散方式の提案'', 電子情報通信学会 2010 年総合大会, Vol. 1, No. A-5-18, p. 120, (2010 年 3 月 16 日 東北大学).

[2] 堀哲理, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' ミリ波車車間中継を利用する Radio-on-Radio ネットワークにおける空間分割多重化方式の適用'', 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. MoMuC2009, No. 51, pp. 1-6, (2010 年 1 月 21 日 浜松アクトシティ研究交流センター).

[3] Atsushi Ono, Ken-ichi Nishikawa, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki :'' Proposal of spatially selective delivery of wireless service utilizing Leaky Coaxial Cable'', Proc. of EDIS2009, Vol. 1, No. 1, pp. 121-122, (2009 年 12 月 7 日 大阪大学).

[4] 山上拓也, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' RoF 遍在アンテナシステムにおける MIMO アンテナ選択手法'', 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. RCS2009, No. 204, pp. 219-224, (2009 年 12 月 17 日 機会振興会間(東京)).

[5] Bo Hu, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki :'' Proposal of an RF Transmission over the IP Based Network and its SNR Performance Evaluation'', Proc. of Aisa-Pacific Microwave Photonic Conference 2009, Vol. 1, No. 63, pp. 1-4, (2009 年 4 月 22 日 北京国際会議場 (Beijing International Conventional Center), 中国).

[6] 村中裕太, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' 異種無線オーバーレイネットワークにおけるユーザ位置制御エージェントの提案'', 平成 21 年電気関係学会関西支部連合大会, Vol. 1, No. G8-11, p. G212, (2009 年 11 月 7 日 大阪大学).

[7] 西海達也, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' 光符号分割多重方式を適用した RoF-MIMO 遍在アンテナシステムにおけるスループット最大化のための最適光符号の検討'', 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. MWP09, No. MWP09-03, pp. 11-16, (2009 年 11 月 13 日 東京工業大学).

[8] 貝谷昌城, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' 階層化意思決定法を用いる携帯インターネット接続のサービス価値評価'', 第 26 回情報通信学会大会, Vol. 1, No. 1, pp. 1-4, (2009 年 6 月 27 日 桜美林大学).

[9] Takuya Yamakami, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki :'' An Experimental Investigation of Applying MIMO to RoF Ubiquitous Antenna System'', Proc. of Topical Meeting on MWP2008/APMP2008, Vol. 1, No. 1, pp. 201-204, (2008 年 10 月 1 日 ゴールドコースト員ターナショナルホテル(オーストラリア)).

[10] 三浦剛, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三 :'' 異種無線ネットワークにおけるトラフィック負荷を考慮した垂直ハンドオーバー方式の提案'', 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. MoMuC2008, No. 44, pp. 7-12, (2008 年 9 月 25 日 東北大学).

[図書] (計 1 件)

[1] 塚本勝俊(著), 小牧省三(編)(著) :'' ワイヤレスエージェント技術'', 丸善株式会社, (July 2008).

6. 研究組織

(1) 研究代表者
小牧 省三 (KOMAKI SHOZO)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 10243164

(2) 研究分担者
塚本 勝俊 (TSUKAMOTO KATSUTOSHI)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 10207342
東野 武史 (HIGASHINO TAKESHI)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号 : 20419469