

## ソフトウェア無線・コグニティブ無線技術の研究開発

上原 一浩<sup>†a)</sup>

## Research and Development of Software Defined Radio and Cognitive Radio Technologies

Kazuhiro UEHARA<sup>†a)</sup>

あらまし 1980年代、軍用通信への応用を目指してソフトウェア無線の研究開発がスタートし、DSPやFPGA等の急速な性能向上と低価格化も進み、民生機器への展開に向けた研究開発が本格化した。また、1990年代には、ソフトウェア無線機を適応的に制御し利用するためのコグニティブ無線の概念が提唱され、その応用として高度な電波利用の実現に向けた技術開発が加速した。無線装置及び無線ネットワークの機能や性能を動的かつ適応的に変更可能とするソフトウェア無線・コグニティブ無線を実現するためには、信号処理技術やシステム制御技術、ネットワーク技術、広帯域フロントエンド技術や無線機構成技術、スペクトルのセンシング・可視化・管理・共用技術、セキュリティ技術など、ベースバンド部からRF部に至るまで、ハードウェア・ソフトウェアの両面で、様々な基盤技術の開発が必要である。本論文では、このソフトウェア無線・コグニティブ無線技術の研究開発に関し、特に無線アクセスシステムへの応用を目指した我が国における基盤技術開発を中心に、これまでの主要な取り組みについて概説する。更に、主要な実用化事例と、2020年代のIoT時代に向けた将来展望についても述べる。

キーワード ソフトウェア無線 (SDR)、コグニティブ無線、マルチバンドRF、ヘテロジニアスネットワーク、周波数有効利用、周波数共用、ホワイトスペース、スペクトルセンシング、ダイナミックスペクトルアクセス (DSA)、ICT、IoT、M2M

## 1. ま え が き

Maxwellが電磁波の存在を理論的に指摘し、Hertが電波の存在を実証し、Marconiが無線電信を発明してから百数十年が経った現在、情報通信端末が広く世の中に普及し、無線の利用は増加の一途を辿っている。多種多様な無線の規格や方式、ネットワークが乱立する中、例えば、無線機の機能を動的に変更して単一のハードウェアを複数方式で共用可能にし、あるいはヘテロジニアスなネットワークを最適に使い分けデータレート的高速化や通信リソースの負荷分散を図るなど、ユーザにとってもオペレータにとっても、効率的かつ経済的な利用・運用を可能にすることが必要である。更にIMT-2020及びそれ以降(5G and

beyond) [1], [2]の世界に向けても、逼迫している周波数の一層の有効利用は、ICTの最重要課題の一つである。

これらを解決する技術として、無線機能を再構築可能 (reconfigurable)、プログラミング可能 (programmable)、ダウンロード可能 (downloadable) にするソフトウェア無線 (Software Defined Radio: SDR) 技術 [3]~[5] が、更にその無線機能を、例えばユーザの要求や電波利用状況等の外部環境を認識して動的に制御 (変更や学習) し、最適ナリソース利用を実現するコグニティブ無線 (Cognitive Radio: CR) 技術 [6] の研究開発が進められてきた [7]~[15]。現在、軍用通信、セルラ通信、業務用無線システム等の分野で実用化もされている。

米国では1980年代、軍用通信への応用を目指して、ソフトウェア無線の研究開発がスタートし、1990年代には、ソフトウェア無線機を適応的に制御し利用するためのコグニティブ無線の概念が提唱され、その応用として高度な電波利用の実現に向けた技術開発が加

<sup>†</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科, 岡山市  
Graduate School of Natural Science and Technology,  
Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku,  
Okayama-shi, 700-8530 Japan

a) E-mail: uehara@okayama-u.ac.jp

DOI:10.14923/transcomj.2016SH10009

速した。我が国では、1999年に無線分野とコンピュータ・サイエンス分野等との融合による新しい研究領域の開拓も視野に、ソフトウェア無線研究会が時限研究会として設立された。産学官が連携し、また欧米の研究機関や法制化機関とも密に連携し、本分野の研究開発が本格化した[16]。2005年から第一種研究会となり、2011年には本分野の主要国際会議の一つであるCROWNCOMを初めて日本に招致し、ダイナミックスペクトルアクセス(dynamic spectrum access: DSA)技術やコグニティブ・ネットワーク技術等について議論を交わした[17]。2014年には研究領域を異種無線融合型ネットワーク分野にまで拡大するとともに、スマート無線研究会と名称変更し、現在に至っている。これまでに本研究会を中心にソフトウェア無線・コグニティブ無線に関する11件の論文誌小特集号を企画・発行し、海外への情報発信を続けている[18]~[28]。また2014年から、Smart Wireless Communicationsに関する国際ワークショップSmartComを毎年開催し、海外との連携を一層強化している[29]~[31]。

無線装置及び無線ネットワークの機能や性能を動的かつ適応的に変更可能とするソフトウェア無線・コグニティブ無線を実現するためには、信号処理技術やシステム制御技術、ネットワーク技術、広帯域フロントエンド技術や無線構成技術、スペクトルのセンシング・可視化・管理・共用技術、セキュリティ技術など、ベースバンド部からRF部に至るまで、ハードウェア・ソフトウェアの両面で、様々な基盤技術の開発が必要である。

本論文では、ソフトウェア無線・コグニティブ無線技術に関し、**2.**においてそれらの概念と法制化・標準化について、**3.**においてそれらを実現するための基盤技術の研究開発、特に無線アクセスシステムへの応用を目指した我が国におけるこれまでの主要な取り組みについて概説する。**4.**では代表的な実用化例を示し、**5.**では2020年代に向けた将来展望について述べる。

## 2. ソフトウェア無線・コグニティブ無線の概念と法制化・標準化

### 2.1 ソフトウェア無線の概念と法制化・標準化

ソフトウェア無線とは、パソコンのように、単一のプラットフォーム上で、ソフトウェアを書き換えることにより、様々な周波数や通信方式の無線機に機能が変更でき、放送受信などの上位のサービスも含めて新しい機能も追加できる無線装置であるというの

が、一般的な考え方である。また、単なるソフトウェア信号処理を行う無線機ではなく、本質的には無線機の機能が再構築可能(reconfigurable)、プログラミング可能(programmable)、かつダウンロード可能(downloadable)である無線技術であると考えられている。更に広義には、再構築可能なネットワークまでを含めた概念としても検討されてきている。その構成要素には、ソフトウェアの書き換えだけでは機能変更ができないアンテナやRF部、A/D/A変換部、外部インタフェース部等のアナログ・ハードウェアも必然的に含まれる。

ソフトウェア無線技術のメリットとして、ユーザは一台の端末で、アクセス方式を意識せず、様々な環境でネットワークに接続し、所望のサービスを享受可能となり、更に通信環境やニーズ(速度、料金、通信品質等)に応じた最適な通信方式に自動的に切り替えて接続するシームレス通信が可能となる。通信事業者は、ソフトウェアの変更で、新しい方式への対応・移行(マイグレーション)が容易に可能となり、インフラの長寿命化が可能となる。実際、数年ごとに新しい無線方式が次々に規格化されてきている。トラヒック状況に応じた通信リソースの負荷分散も可能となる。また、ソフトウェアの変更で、新しいサービスを迅速に提供可能となり、更に、端末やインフラのバグフィクスやメンテナンスなどの維持管理が容易になる。製造メーカーは、共通プラットフォームの実現により、方式ごと、機種ごとにASICを開発する必要がなくなり、開発期間短縮とコスト削減が期待される。電波監理を司る法制化機関としては、周波数有効利用に資する最新の技術が迅速に導入可能となり、周波数資源枯渇問題解決の一手段となる。このように多くのメリットが期待されて研究開発が進められてきており、後述のコグニティブ無線技術の概念やメリットも包含されている。

ITU-Rにおいては、第4世代移動通信システムの標準化において、WP4F、WP8Fでソフトウェア無線の採用が検討された。2007年世界無線通信会議(WRC-07)において、次回WRC-12の議題1.19として「ソフトウェア無線システム(SDR)及びコグニティブ無線システム(CRS)の導入に伴う規制事項の検討」が設定され、検討が進められてきた[32]。ITU-RにおけるSDRの定義の骨子は、周波数、変調方式、または出力電力を含むRF動作パラメータが、ソフトウェアによって設定または変更可能な無線送受信機とされている[33]。

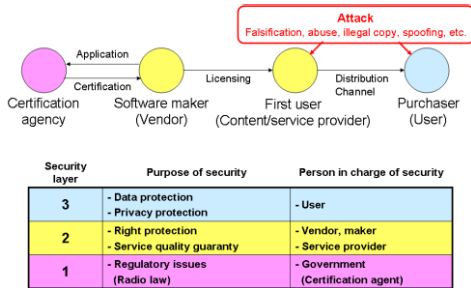


図1 SDR ソフトウェア配信モデルとセキュリティ・アーキテクチャの例 [14]

Fig. 1 An example of SDR software distribution model and security architecture [14].

電波法の観点からは、ソフトウェア無線設備は、上述のように電波法に基づく認証が行われた後に、ソフトウェアの書き換え等により、無線機能が変更・追加される可能性があるため、規制の見直しに関する検討も必要となる。2001年、逸早く米国では FCC がソフトウェア無線の普及に向けた機器認証の新基準の概要を発表し、ソフトウェアのダウンロードが許可され、電子ラベリングが導入された。同年我が国でも FCC を招いたワークショップが開催され、技術基準適合証明の在り方に関する議論が行われた [34]。ソフトウェアダウンロードに伴うプログラム配送法などに新たなセキュリティ対策も必要となる [14], [35]~[37]。図1に将来想定されるソフトウェアの配信モデルと、必要となるセキュリティ・アーキテクチャの検討例を示す。ソフトウェア無線が市場に導入されても正常な無線サービスが確保できるよう、法的な対応及びそれに基づく無線設備の試験方法並びに技術基準の適合性評価方法などの確立を目的とし、無線設備のソフトウェア技術に関する調査検討が行われた [38]~[40]。本検討の結果等も踏まえ、2005年5月に5GHz帯無線 LAN (IEEE 802.11a) へのソフトウェア無線技術の適用も考慮した、電波法施行規則の一部を改正する省令が発令された。

## 2.2 コグニティブ無線の概念と法制化・標準化

コグニティブ無線とは、例えばユーザの要求や電波利用状況等の外部環境を観測し、認知・判断学習・行動(機能変更)を繰り返すことにより、ソフトウェア無線機を一層高機能化しパーソナライズするものであるという考え方が最初に提唱された概念である [6]。ITU-R においては、コグニティブ無線システム (CRS) は、動作環境や地理位置環境、既定のポリシー、及びシス

テム内部状態に関する情報を取得し、取得した情報に基づき、あらかじめ定められた目的を達成するため、動作パラメータやプロトコルを動的・適応的に調整し、行った動作の結果を学習する技術を有する無線システムであると定義されている [33]。FCC では、2003年にコグニティブ無線技術を推進する立場を公表し、FCC Rule Part 15 を改正した。コグニティブ無線は、電力、周波数、変調方式などのパラメータを識別して、動的に周波数を再利用するものと定義している。このようにコグニティブ無線の定義や捉え方は様々であるが、本質的には、外部環境を認識し、適応制御することにより、最適な無線リソース利用を実現するものであると言える。

コグニティブ無線の実現形態として、ヘテロジニアス型と周波数共用型の二つが一般に考えられている。前者のヘテロジニアス型コグニティブ無線は、既存システム間のシームレス・ハンドオーバーが基本であり、ユーザ嗜好や通信状況に基づく無線システムの選択・併用、エンドツーエンド QoS のサポート、既に割り当てられている周波数の利用率準化や通信リソースの負荷分散等が可能となる。この実現形態は、既存無線システムという無線リソースを動的に有効利用・最適利用する技術であると言える。一方、後者の周波数共用型コグニティブ無線は、空間的・時間的・技術的に未利用の周波数(ホワイトスペース)や未割当周波数を、一次利用者(プライマリシステム)の随時優先利用を担保しつつ二次利用者(セカンダリシステム)が動的に二次利用するものであり、ダイナミックスペクトルアクセス(DSA)とも呼ばれる。二次利用者は一次利用者に干渉を与えないことが必須条件であり、スペクトルセンシングや地理位置情報データベースを用いる方法等により、干渉を与えないことを確認した上で二次利用を行う必要がある。周波数共用型コグニティブ無線に必要な機能は基本的にヘテロジニアス型と同じであるが、新たなスペクトル運用であり、電波政策や法規制にも関わってくる。異システム間周波数共用の実現や、利用率の低いスペクトルの二次利用による周波数資源の利用機会拡大や利用率の準化が期待される。前者の実現形態が既存無線システムという無線リソースを動的に利用していたのに対し、後者は周波数という無線リソースを動的に有効利用・最適利用する技術であると言える [41], [42]。

ITU-R においては、WRC-07 以降、WP5A, WP1B を中心に、コグニティブ無線の定義、導入に伴う技術

的特性や要求条件、アプリケーションと周波数管理に及ぼす影響、他システムとの共存を可能とする周波数共用技術、周波数資源の有効利用方策等の検討が進められてきた。その結果、WRC-12において、上述の議題 1.19 について、SDR・CRS は共に実現技術であり、無線通信規則 (Radio Regulations: RR) の改定は不要であり、周波数割当の議論は行わず、個々の問題は ITU-R で更に研究を行い、ITU-R 勧告またはレポートにまとめて解決を図るとの結論に至っている [43]。

標準化については、米国 IEEE においては、802.11, 802.22, 1900 ワーキンググループ等において、欧州では ETSI RRS 等においてコグニティブ無線に関連する標準化の議論が進められてきている。海外では既にコグニティブ無線技術を用いたホワイトスペースの二次利用が行われている国々もある。我が国では、2009 年に新たな電波の活用ビジョンに関する検討チームが発足し、2010 年にホワイトスペース活用の実現に向けた推進方策が策定された。制度化に向け、同年にホワイトスペース推進会議が開催され、ホワイトスペース特区先行モデルの公募・選定が行われ、2010 年から 11 件の研究開発や実証実験が開始された。同年、更にホワイトスペース特区 25 件が採択され、2013 年には TV ホワイトスペース利用システム運用調整連絡会が民間団体として設立され、技術の有効性検証や課題抽出が進められてきている [44], [45]。

### 3. 基盤技術の研究開発

#### 3.1 ソフトウェア無線機アーキテクチャ

ソフトウェア無線研究開発の黎明期には、無線機構成技術、無線ダウンロードを含む制御技術やネットワーク技術等の検討が盛んに進められた。無線機アーキテクチャの検討においては、当時は汎用の CPU, DSP, FPGA 等を組み合わせたマルチプロセッサ・アーキテクチャ (MPA) のソフトウェア無線機が試作され性能評価が行われた (図 2, 3)。MPA を用いたソフトウェア無線機では、各プロセッサに変復調処

理やプロトコル制御等の負荷をいかに機能配分するか、また各プロセッサ間の割込みを制御し、リアルタイム処理をいかに実現するか等が重要な課題となる。論文 [46]~[49] では、試作した MPA ソフトウェア無線機プラットフォームにおいて、全二重リアルタイム通信を実現するためのソフトウェアの設計手法と評価結果が示された。CPU-DSP 間の独自の API 及び DSP プログラムを用いた信号処理タスク管理方法により、実際に RCR-STD28 PHS 方式及び無線 LAN (IEEE 802.11) の基本機能を記述したプログラムを試作し、基地局-端末間通信を行い DSP の負荷特性を測定した結果、リアルタイム通信が実現されていることが示された。

柔軟性を最重視した汎用の信号処理プロセッサでは、全ての無線信号処理を行うには、処理速度と消費電力の観点で限界がある。そこで、柔軟性と高速性能の両立を目指したりコンフィギュラブルプロセッサの開発が進められてきた [50]~[52]。小型・低消費電力のソフトウェア無線携帯端末実現に向け、論文 [53], [54] では、3 種類の特性の異なる演算ノードを実装した開発段階のヘテロジニアス型リコンフィギュラブルプロセッサ (クロック速度 200 MHz) [52] を用いて、データ速度 54 Mbit/s の無線 LAN (IEEE 802.11a) プログラムの性能評価が行われた (図 4)。その結果、プロ

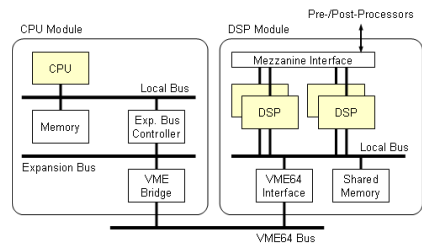


図 3 マルチプロセッサ・アーキテクチャ (MPA) の例 [47]  
Fig. 3 An example of Multiprocessor architecture (MPA) [47].

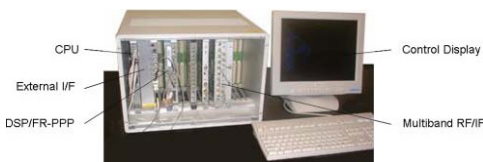


図 2 ソフトウェア無線機プロトタイプ例 [48]  
Fig. 2 An example of SDR prototype [48].

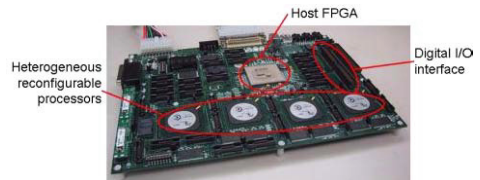


図 4 ヘテロジニアス型リコンフィギュラブルプロセッサを用いた SDR 端末プロトタイプ例 [14]  
Fig. 4 An example of SDR terminal prototype using heterogeneous reconfigurable processors [14].

セッサの更なる最適化は必要ではあものの、高速性能と低消費電力性能が両立できる可能性が示された [14].

これらの取り組みにより、セルラ方式や無線 LAN 等の高速・広帯域の実システムに対するソフトウェア無線技術のフィージビリティが世界で始めて示されるとともに、本研究領域の今後の課題や研究開発の方向性が示された。

### 3.2 ハードウェア技術

アナログ・ハードウェア技術もソフトウェア無線・コグニティブ無線システム実現の鍵となる。単体の無線機をマルチバンド（複数の周波数帯）、マルチモード（複数の無線方式）で動作させるためには、ベースバンド信号処理部だけでなく、電波の入出力や増幅・周波数変換等を司るアナログ・ハードウェアがマルチバンド・マルチモードに対応している必要がある。しかし、アナログ・ハードウェアの性能は物理法則に支配されているため、ベースバンド信号処理部を再構成可能とする技術とは全く異なる考え方や技術的アプローチが必要となる。例えば、アンテナについては、効率・利得・帯域の積は、アンテナの電気的体積に比例する。更に、これらの特性に加え、指向性パターンやインピーダンス特性についてもシステムの要求条件を同時に満たす必要がある。増幅器については、利得と帯域の積は一定であり、更にこれらの特性は効率や雑音指数とのトレードオフとなる。ソフトウェア無線機用アンテナの実現手法としては、アンテナ構造の工夫による広帯域化、アンテナ構造の工夫によるマルチバンド化（複数周波数共用化）、能動回路と組み合わせ、またはアンテナ電気長や整合回路の電子制御・機械制御による広帯域化・マルチバンド化、手動切替・差替方式、及び上記の組み合わせ等が考えられる [55]. 今後、例えばアンテナ素子に装荷した RF-MEMS スイッチ等を用いて、ベースバンド信号処理部の再構築と連動して特性を適応的に調整・切替ができるようなソフトウェア無線機用アンテナや可変フィルタが実用化されていくと思われる [56].

RF フロントエンド技術として、これまでに様々な研究開発成果が報告されてきている [57]. 論文 [58], [59] では、互いにトレードオフとなる広帯域・高線形・低雑音の三つの性能を両立した、UHF 帯からマイクロ波帯までをワンチップでカバーする高周波モジュールが提案された (図 5). ソフトウェア無線機に用いるため、低雑音性能を保ったまま、通常の高雑音増幅器 (LNA) よりも広帯域化し、更に飽和入力電力を高く

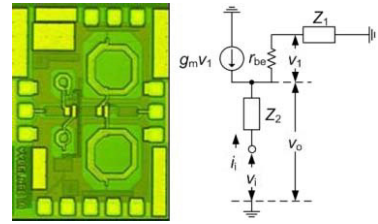


図 5 広帯域低雑音増幅器とバイアス回路の簡易等価回路の例 [58]

Fig. 5 An example of wideband LNA and simple equivalent circuit of its bias circuit [58].

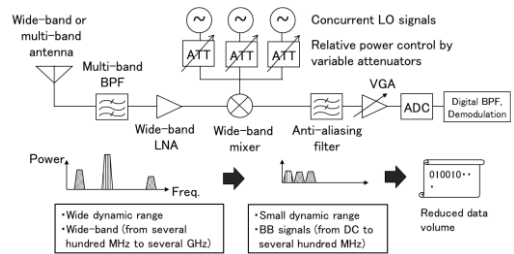


図 6 マルチバンド一括受信ミキサの構成例 [60]

Fig. 6 An example of concurrent multiband mixer [60].

(高線形化) したものである。トランジスタサイズを大きくして高線形化し、負帰還回路を用いて広帯域化を図っているが、これらの影響による入力インピーダンスの低下を補償するための、新しい構成のバイアス回路が考案されている。

論文 [60], [61] では、単一のミキサで複数バンド・複数信号の同時周波数変換を行うことが可能となるマルチバンド一括送受信ミキサが提案された。その原理は局部発信器 (LO) 信号の 3 次非線形成分を利用したものである。受信用ミキサ (図 6) については、周波数帯域及びレベルの異なる複数の受信信号に対し、周波数帯域別に利得を調整しダイナミックレンジを圧縮可能、また広帯域に分布する信号を所定の中間周波数帯 (IF 帯) に圧縮可能、更に信号の優先度等に応じて IF 帯の任意の周波数に配置可能という特長を有する。これらにより、IF 帯をそのままデジタル変換して伝送する場合の A/D/A 変換部等の負荷を低減することが可能となる。

マルチバンド同時送信を行う際の増幅器の非線形ひずみ補償技術の研究開発も進められてきている。論文 [62] では、2 バンド同時増幅時の非線形増幅特性を表現するモデル化手法が提案され、その手法による非線形モデルと複素ガウス分布の振幅変動特性に基づき

出力自己相関関数を導く複素 Mehler 展開により，調波関係の 2 バンド上の OFDM 信号の非線形同時増幅特性の理論解析が可能であることが示されている．更に論文 [63]～[66] 等では，4 次元ニュートン法や逆システム法を適用したプリディストーション技術によるマルチバンド同時送信を行う際の非線形ひずみ補償特性が示されている．これらの技術を上述のマルチバンド一括ミキサに適用した例も報告されている [67]．

### 3.3 ヘテロジニアスネットワーク技術

ソフトウェア無線・コグニティブ無線技術を無線アクセスシステムに応用したヘテロジニアスネットワークの研究開発も進められてきている．

論文 [68] では，システムダイバーシチ（方式ダイバーシチ）の概念が提案された．所定の QoS パラメータに基づき，無線方式自体を動的に切り替える手法について，具体的なモデルを用いたシミュレーションによりその効果が定量的に示されている．論文 [69] では，複数無線方式の複数チャネルを同時に収容可能な自律適応型ネットワークシステム構成技術が提案され，マルチリンク通信も可能な基地局プロトタイプを用いた評価が行われた．トラフィック状況及び周波数利用状況等の通信状況を正確に認識し，ネットワーク機器構成を自律適応的に変更することにより，通信リソース及び周波数リソースを有効に利用可能であることが示されている．協調型スペクトルセンシングを用いた干渉検出・回避技術 [70] についてもプロトタイプを用いた評価結果が示されている．

無線方式の多種多様化が急速に進む中で，ユーザが無線方式を全く意識せず，利用したいときにいつでも簡単にネットワークを利用できる，ユーザセントリック・ワイヤレスホームネットワークの実現を目指した研究開発も進められた．論文 [71]～[75] で提案されているフレキシブルワイヤレスシステム（図 7）は，ソフトウェア無線・コグニティブ無線の様々な基盤技術を結集し応用したものであり，多種多様な無線システムが混在する無線環境において，無線アクセスポイント（フレキシブル・アクセスポイント）が全ての無線通信方式に対応する専用の機器をもつことなく，受信した広帯域かつ広ダイナミックレンジの電波データを，光アクセス回線を介してそのままネットワーク上のサーバに伝送し，サーバ側（フレキシブル信号処理部）で一括信号処理を行う構成により，IoT を含め高度化・多様化する様々な無線システムに柔軟に即応可能な無線アクセス・プラットフォームの実現を目指している．

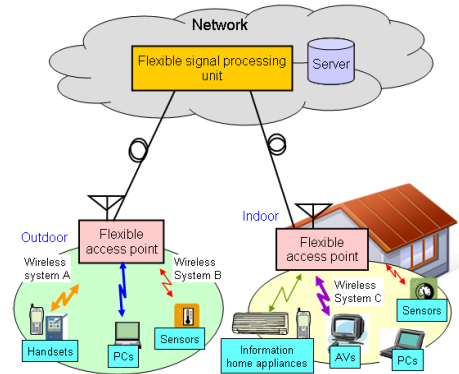


図 7 フレキシブルワイヤレスシステムの構成 [80]  
Fig. 7 Conceptual diagram of Flexible Wireless System [80].

フレキシブル・アクセスポイントには 3.2 で述べたアナログ・ハードウェア技術を応用し，V/UHF から 6 GHz 帯までの複数信号同時送受信機能を実現している．受信した膨大な電波データを光アクセス回線を介して高効率に伝送するために，周波数・時間領域のスパース性を利用した圧縮センシング技術 [76] の適用が検討されてきており，前述のマルチバンド一括受信ミキサとも組み合わせた選択的圧縮サンプリング技術，1 bit 圧縮センシング技術や分散圧縮センシング技術等を用いた，復調信号とスペクトルセンシング信号の両信号の高効率圧縮伝送技術の研究開発が進められている [73], [77], [78]．サーバに伝送された電波データは，電波の利用状況を場所毎，周波数ごとに“見える化”して有効に利用するための広帯域スペクトルセンシング及び分析にも用いられる．フレキシブル信号処理部では，複数信号が重畳した電波データから，例えば短時間フーリエ変換を用いて信号の電力・位相成分を抽出し原信号を復元するアルゴリズムを用い，所望信号を分離・復元する蓄積一括信号処理技術が検討されている [74], [79], [80]．

### 3.4 周波数共用技術

移動通信に利用しやすい V/UHF 帯から 6 GHz 帯までの周波数は既に稠密に利用されており，電波をより有効かつ効率的に活用するための一技術としてホワイトスペース通信技術の活用が期待されている．本技術をワイヤレスブロードバンドに適用し，既存業務への影響を回避しつつ柔軟かつ高度に周波数を活用するための技術を確立し，実用化に向けて技術基準を策定していく必要がある．総務省の電波資源拡大のための研究開発における，周波数の共同利用を促進する技術

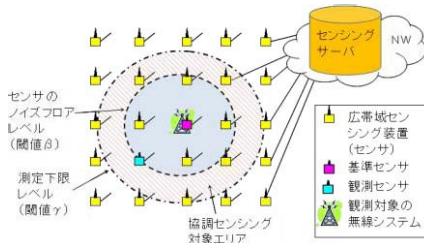


図 8 リアルタイム分散型広帯域協調周波数センシング技術 [84]

Fig. 8 Real-time distributed wideband cooperative spectrum sensing method [84].

として、2011 年度から 3 年程度、ホワイトスペースにおける新たなブロードバンドアクセスの実現に向けた周波数高度利用技術の研究開発が進められた [81]。ホワイトスペース利用に必要な三つの研究課題である、ア) リアルタイムセンシング技術、イ) 動的周波数管理技術、ウ) ダイナミックスペクトルアクセス (DSA) 技術について、複数の研究機関が協力・分担して研究開発が進められ、フィールド実証も行われた。

ア) リアルタイムセンシング技術については、高速・低演算量・低消費電力のセンシングアルゴリズムの検討が行われ [82], [83]。また、リアルタイムセンシングプラットフォームとして、極めて微弱の電波を検出するためのリアルタイム分散型広帯域協調周波数センシング技術が開発された (図 8)。このプラットフォームは、3.3 で述べたフレキシブルワイヤレスシステムを用いたものであり、複数の観測センサ (フレキシブル・アクセスポイント) で電波を受信し、受信レベルが所定のしきい値より高い基準波形データと、ノイズフロア以下の信号を含む波形データとの相関性に基づき、各観測センサに含まれる信号の受信レベルを推定する技術である。フィールド実験の結果、FCC が定める規定値である  $-114 \text{ dBm}/6 \text{ MHz}$  以下の、ノイズフロアより 25 dB 低い信号も検出可能であることが実証された [84]。

イ) 動的周波数管理技術については、FCC が定めるホワイトスペースの応答時間への要件である 10 秒を満足する必要があるが、地形遮蔽を考慮した電波伝搬シミュレーションによって、二次利用者から一次利用者のサービスエリアへの干渉と、二次利用者同士の干渉を推定し、高速に利用可否判断を行うホワイトスペースデータベースが構築された [85]。また、各種ホワイトスペース通信規格に対応するため、異方式デバイス間の相互情報管理方式が検討され、複数の二次利

用システムが共存するためのフレームワークが提案された。

ウ) DSA 技術については、ホワイトスペース WRAN (Wireless Regional Area Network), WLAN (Wireless Local Area Network), SUN (Smart Utility Network) の各装置が試作され、シンガポール等で海外のホワイトスペーストライアル参加を含むフィールド実証実験が行われた。これらの研究開発成果は、IEEE 802.11af (無線 LAN), 802.15.4m (無線センサネットワーク), 802.22 (無線地域ネットワーク) 等の標準化団体に提案され、標準規格として採用されている [45]。

#### 4. 実用化例

1990 年代から本格化した軍用通信への応用を目指した研究開発は、SPEAKEasy と呼ばれるシステムの開発や SDR フォーラム等での議論を経て、Software Communication Architecture (SCA) と呼ばれるフレームワークにまとめられ、ソフトウェア無線携帯端末や衛星通信用モデムが米国で開発された。様々な開発業者や製造業者が、ハードウェアとソフトウェアとを相互連携し、容易に一つの装置に統合できるようにするための CORBA をベースとしたオープンアーキテクチャである [86]。

セルラ通信への応用事例としては、ルーラルエリアにおいて高いイニシャル及び運用コストパフォーマンスを実現する目的で GSM/CDMA 基地局に、ソフトウェア無線技術が導入された。また、マイグレーションのための設備投資を削減する目的で、CDMA/LTE 基地局にソフトウェア無線技術が導入された。更に、トラフィックの爆発的増加に対し、オペレータの設備投資・運用コストを削減する目的で、共通プラットフォームで LTE/WCDMA/GSM 等に対応可能なソフトウェア無線ベースの小型・低消費電力基地局も開発された。携帯端末については、設計リスクを低減し早期製品開発を実現するとともに、高速化と低消費電力化を実現することを目的として、ベースバンド・プロセッサ LSI にカスタマイズ可能なプロセッサが採用された [87], [88]。

現在、外出先であるいは移動中に PC や情報携帯端末をインターネットに接続するためのコグニティブ無線ルータが一般に広く利用されているが、これもコグニティブ無線の概念を具現化した製品である。ルータの WAN 側は複数のブロードバンド・モバイルネット

ワークを利用できるようにし、利用環境や通信状況に応じ、例えば最も高速のダウンロードが可能なセルラ通信回線を選択したり、あるいは公衆無線 LAN が利用可能な場合には自動的に接続したりと、最適な通信環境を動的・適応的に提供する機能を実現している [89]。コグニティブ無線は災害時にも有用な技術であり、実際に東日本大震災の避難所にコグニティブ無線ルータが設置され、復旧までの通信手段を確保する役割を担った [90]。

業務用無線の分野では、近年、旧来のアナログ方式のデジタル化が進行中であるが、その移行期間中の対応として、マルチモード対応のソフトウェア無線機が用いられている。列車無線においては、マイグレーション対応に加え、鉄道事業者間で無線方式や仕様異なるため、列車の相互乗り入れにも柔軟に対応できるよう、かつ、搭載機器の設備費用削減や省スペース化にも有効なソフトウェア無線機が導入されている [91], [92]。

ソフトウェア無線機を開発するためのオープンソースの開発キットも提供されている [87]。GNU Radio は、開発言語に Python と C++ を用いた、汎用の RF 装置やプロセッサの利用を想定した開発キットである [93]。Universal Software Radio Peripheral (USRP) は、オープンソースのソフトウェア無線プラットフォームである [94]。RTL-SDR は、デコーダチップ RTL2832U を搭載したチューナーをソフトウェアで無線機能が記述できる USB ドングル型汎用受信機である [95]。これらを用い、ソフトウェア無線機的设计技術を教育に取り入れる動きも広がっている [55]。

## 5. 将来展望

近年、身の回りのほとんどの情報携帯端末、更には家電や車載機器などのデバイスに無線機能が搭載されつつあり、IoT 時代の到来が間近である。世界的にも ITU-R における第 5 世代移動通信システム (IMT-2020) の標準化において、新しい IoT/M2M サービスの実現が標榜されており、これを支える無線技術の実現が鍵である [96], [97]。しかし、一般的に IoT/M2M 端末は極端な低廉化、長寿命化のための低消費電力化が求められることから、セルラ通信や無線 LAN 等に比べて低機能な無線アクセス方式が用いられる場合が多い。更に現状では利用可能な周波数も限られている。近い将来、人口の 10~100 倍以上の多数の端末が世の中に偏在するようになると予測されており、これら極

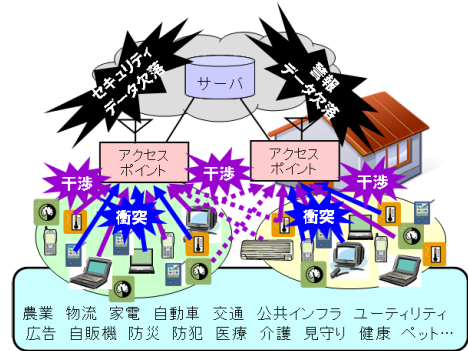


図 9 IoT 時代に想定される無線アクセスの課題  
Fig.9 Issues of wireless access assumed in the IoT era.

めて多数の低機能の端末が無秩序に信号を送信すると、衝突や干渉が頻発し、重要なデータが受信できず失われてしまうことが起こる。失われたデータが例えば災害や防災に関わるものであったり、あるいはセキュリティに関するものであったりした場合には、人々の暮らしの安心安全をも脅かす事態に陥ることになる (図 9)。また、もう一つの課題として、現状の IoT/M2M 無線システムでは、用途に応じた専用ハードウェアが必要であり、専用のアクセスポイントを開発・製造、導入・購入する必要があるため、IoT サービスの低廉化を阻害する要因となる。無線アクセスの共通化・共用化が実現できれば、サービスの相乗りも可能となり、IoT サービスの低廉化・経済化が実現でき、本分野の産業の発展を一層加速できる可能性がある。更に、IoT は段階的に発展していくと予想され、ユーザ数や収容端末数の増加に応じて、段階的に設備を増設していく必要がある。したがって、スケーラビリティの高い無線設備が求められる。

ソフトウェア無線技術は、これらの課題を解決するためのキー技術になると考えられる。例えばアクセスポイントに 3.3 で述べたフレキシブルワイヤレスシステムの構成を用いることにより、無線アクセスの共通化・共用化が可能となり、設備費用を低減できる。蓄積一括信号処理技術により、常に最新の高度な干渉補償、衝突回避技術が適用でき、従来の受信機を凌駕する性能が期待できる。信号処理リソースはスケラブルに増減可能であり、将来の端末数の増加に応じて設備を段階的に増設していけばよい。IoT/M2M 端末の信号分離技術を実現することにより、周波数有効利用にも大きく貢献できることになる。

更に IMT-2020 では、ユースケースに応じ、従来



の1~2桁以上の周波数利用効率, ピークデータ速度, ユーザ体感速度, 単位面積容量, 単位面積接続数, ネットワーク電力効率, また1桁以下の無線区間の低遅延化等の議論が進められている。これらを実現していく上で, 特に周波数の一層の有効利用の観点と, 今後更に多様化していく様々なユースケースに対し, 柔軟・適応的に対応可能でかつ経済的な無線設備の観点において, ソフトウェア無線・コグニティブ無線技術が重要な役割を担っていくと考えられる。

## 6. む す び

本論文では, ソフトウェア無線・コグニティブ無線技術の概念と法制化・標準化, 及び特に無線アクセスシステムへの応用を目指した無線機アーキテクチャ, ハードウェア技術, ヘテロジニアスネットワーク技術, 周波数共用技術等の我が国における基盤技術開発を中心に, 主要な取り組みについて概説した。

本技術は軍用通信, セルラ通信, 業務用無線システム等の各分野で既に実用化されているが, 将来に向けてのICTの課題として, 限られた周波数資源の中で, モバイルトラヒックは引き続き増加の一途を辿ると予測され, また膨大な数のIoT/M2M端末が世の中に偏在していく時代が間近に迫っている。したがってより高度な電波利用が可能となり, かつスケラブルでフレキシブルなモバイルネットワークシステムを実現するための技術開発が必須となる。特にIoT時代においては, 極めて多数の低機能の端末の衝突や干渉を回避する技術, アクセスポイントの共通化・共用化を実現するための技術, 及び端末数増大に応じてスケラブルに無線設備を増設可能とする技術が求められる。ソフトウェア無線・コグニティブ無線技術は, これらの課題を解決するキー技術として, 更なる展開が期待される。

**謝辞** 本分野の研究開発推進に尽力され, また本論文をまとめるにあたり貴重なご助言を賜った, 日本電信電話株式会社NTT未来ねっと研究所諸氏, 及び電子情報通信学会ソフトウェア無線(現スマート無線)研究専門委員会関係諸氏に深謝する。

## 文 献

- [1] Special Section on 5G Radio Access Networks—Part I: Radio Access Technologies and System Design, IEICE Trans. Commun., vol.E98-B, no.8, pp.1396–1517, Aug. 2015.
- [2] Special Section on 5G Radio Access Networks—Part II: Multi-RAT Heterogeneous Networks and Smart Radio Technologies, IEICE Trans. Commun., vol.E98-B, no.10, pp.1931–2013, Oct. 2015.
- [3] J. Mitola, “Software radios: Survey, critical evaluation and future directions,” Proc. IEEE National Telesystems Conf., pp.13.15–13.23, May 1992.
- [4] J. Mitola, “The software radio architecture,” IEEE Commun. Mag., vol.33, no.5, pp.26–38, May 1995.
- [5] J. Mitola, “Software radio architecture: A mathematical perspective,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.17, no.4, pp.514–538, April 1999.
- [6] J. Mitola and G.Q. Maguire, Jr., “Cognitive radio: making software radios more personal,” IEEE Pers. Commun., vol.6, pp.13–18, Aug. 1999.
- [7] S. Kubota, K. Uehara, and M. Nakatsugawa, “SDR applications for the next generation wireless access: prototype implementation,” in Software Radio: Technologies and Services, Part 4, ed. E.D. Re, pp.227–235, Springer-Verlag, London, 2001.
- [8] 上原一浩, 中津川征士, 久保田周治, 水野秀樹, “ソフトウェア無線技術の現状と動向,” NTT R&D, vol.50, no.1, pp.33–40, Jan. 2001.
- [9] 中津川征士, 杉田 誠, 上原一浩, “ソフトウェア無線システムの標準化動向,” NTT R&D, vol.50, no.1, pp.57–62, Jan. 2001.
- [10] 上原一浩, 荒木克彦, 梅比良正弘, “5.1 ソフトウェア無線技術の将来,” 最新モバイル・インターネット徹底解剖, 日経コミュニケーション/日経ニューメディア共編, pp.255–262, 日経 BP, 東京, 2002.
- [11] 上原一浩, “ソフトウェア無線,” モバイル総覧 2003, pp.196–206, シーメディア, 東京, 2002.
- [12] K. Uehara, K. Araki, and M. Umehira, “Trends in research and development of software defined radio,” NTT Technical Review, vol.1, no.4, pp.10–14, July 2003.
- [13] 上原一浩, 荒木克彦, “ソフトウェア無線,” 無線技術とその応用 4, 新世代ワイヤレス技術, 中嶋信生(編), pp.37–69, 丸善, 東京, 2004.
- [14] K. Uehara, “Trends in broadband wireless communication systems and software defined radios,” Interdisciplinary Inf. Sci. J., vol.12, no.2, pp.163–172, Sept. 2006.
- [15] 上原一浩, “ソフトウェア無線研究開発の現状,” (社)日本防衛装備工業会 月刊 JADI, no.713, pp.1–19, Oct. 2006.
- [16] ソフトウェア無線研究会研究成果報告書(平成11年–平成12年, 平成13年–平成14年, 平成15年–平成17年), 電子情報通信学会.
- [17] Proc. CROWNCOM’11, Osaka, Japan, June 2011.
- [18] ソフトウェア無線実現のための技術とその応用論文小特集, 信学論 (B), vol.J84-B, no.7, pp.1111–1238, July 2001.
- [19] Special Issue on Software Defined Radio Technology and Its Applications, IEICE Trans. Commun., vol.E85-B, no.12, pp.2563–2763, Dec. 2002.
- [20] Special Issue on Software Defined Radio Technol-

- ogy and Its Applications, IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.12, pp.3365–3529, Dec. 2003.
- [21] Special Issue on Software Defined Radio Technology and Its Applications, IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.11, pp.4147–4249, Nov. 2005.
- [22] Special Issue on Software Defined Radio Technology and Its Applications, IEICE Trans. Commun., vol.E89-B, no.12, pp.3167–3273, Dec. 2006.
- [23] Special Section on Cognitive Radio and Spectrum Sharing Technology, IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.1, pp.1–150, Jan. 2008.
- [24] ユビキタス社会に向けたコグニティブ無線技術論文特集, 信学論 (B), vol.J91-B, no.11, pp.1319–1404, Nov. 2008.
- [25] Special Section on Dynamic Spectrum Access, IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no.12, pp.3571–3725, Dec. 2009.
- [26] Special Section on Wireless Distributed Networks, IEICE Trans. Commun., vol.E93-B, no.12, pp.3217–3541, Dec. 2010.
- [27] Special Section on Cognitive Radio and Heterogeneous Wireless Networks in Conjunction with Main Topics of CrownCom2011, IEICE Trans. Commun., vol.E95-B, no.4, pp.1035–1299, April 2012.
- [28] Special Section on Technologies for Effective Utilization of Spectrum White Space, IEICE Trans. Commun., vol.E97-B, no.2, pp.241–374, Feb. 2014.
- [29] Proc. 2014 Singapore-Japan International Workshop on Smart Wireless Communications, SmartCom'14, Singapore, Oct. 2014.
- [30] Proc. 2015 International Workshop on Smart Wireless Communications, SmartCom'15, Tokyo, Japan, Oct. 2015.
- [31] Proc. 2016 International Workshop on Smart Wireless Communications, SmartCom'16, Oulu, Finland, May 2016.
- [32] H. Yoshino, "ITU-R standardization activities on cognitive radio," IEICE Trans. Commun., vol.E95-B, no.4, pp.1036–1043, April 2012.
- [33] ITU-R Report SM.2152, "Definition of software-defined radio (SDR) and cognitive radio system (CRS)," Sept. 2009.
- [34] Proc. Software Radio Study Group Workshop on Software Radio, Tokyo, Japan, Oct. 2001.
- [35] 杉田 誠, 山田知之, 芝 宏礼, 上原一浩, "ソフトウェア無線方式におけるセキュリティ技術," 1999 信学ソ大 (通信), B-5-98, Sept. 1999.
- [36] M. Sugita, K. Uehara, and S. Kubota, "Flexible security systems and the new construction of electric commerce on the software radio," Proc. IEEE VTC'00-Fall, pp.3033–3040, Boston, MA, Sept. 2000.
- [37] H. Shiba, K. Uehara, and K. Araki, "Proposal and evaluation of security schemes for software-defined radio," Proc. IEEE PIMRC'03, pp.114–118, Beijing, China, Sept. 2003.
- [38] Y. Suzuki, K. Oda, R. Hidaka, H. Harada, T. Hamai, and T. Yokoi, "Technical regulation conformity evaluation system for software defined radio," IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.12, pp.3392–3400, Dec. 2003.
- [39] Y. Suzuki, H. Harada, K. Uehara, T. Fujii, Y. Yokoyama, K. Oda, and R. Hidaka, "Adaptability check during software installation in software defined radio," IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.12, pp.3401–3407, Dec. 2003.
- [40] Y. Suzuki, T. Yokoi, Y. Iki, E. Kawaguchi, N. Nakajima, K. Oda, and R. Hidaka, "Development of experimental prototype system for SDR certification simulation," IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.12, pp.3408–3416, Dec. 2003.
- [41] M. Nekovee, "Dynamic spectrum access with cognitive radios: Future architectures and research challenges," Proc. CROWNCOM'06, pp.1–5, Mykonos Island, Greece, June 2006.
- [42] S. Sampei, K. Sakaguchi, S. Ibi, and K. Yamamoto, "Wireless distributed network: For flexible networking and radio resource management," IEICE Trans. Commun., vol.E93-B, no.12, pp.3218–3227, Dec. 2010.
- [43] "ITU-R WRC-12 (2012 年世界無線通信会議) の結果概要," 情報通信審議会情報通信技術分科会 ITU 部会地上業務委員会 (第 19 回), 総務省, April 2012.
- [44] 高田潤一, "日本における TV ホワイトスペースの利用の動向," 信学誌, vol.96, no.2, pp.111–116, Feb. 2013.
- [45] H. Harada, "White space communication systems: An overview of regulation, standardization and trial," IEICE Trans. Commun., vol.E97-B, no.2, pp.261–274, Feb. 2014.
- [46] Y. Suzuki, K. Uehara, M. Nakatsugawa, Y. Shirato, and S. Kubota, "Software radio base and personal station prototypes," IEICE Trans. Commun., vol.E83-B, no.6, pp.1261–1268, June 2000.
- [47] 上原一浩, 鈴木康夫, 芝 宏礼, 田中裕之, 浅井裕介, 庄納崇, 久保田周治, "マルチプロセッサ・アーキテクチャを用いたソフトウェア無線機における全二重リアルタイム通信を実現するためのソフトウェアの設計と評価," 信学論 (B), vol.J84-B, no.7, pp.1208–1215, July 2001.
- [48] H. Shiba, T. Shono, Y. Shirato, I. Toyoda, K. Uehara, and M. Umehira, "Software defined radio prototype for PHS and IEEE802.11 wireless LAN," IEICE Trans. Commun., vol.E85-B, no.12, pp.2694–2702, Dec. 2002.
- [49] T. Shono, Y. Shirato, H. Shiba, K. Uehara, K. Araki, and M. Umehira, "IEEE 802.11 wireless LAN implemented on software defined radio with hybrid programmable architecture," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol.4, no.5, pp.2299–2308, Sept. 2005.
- [50] H. Ito, R. Konishi, H. Nakada, H. Tsuboi, Y. Okuyama, and A. Nagoya, "Dynamically reconfigurable logic LSI: PCA-2," IEICE Trans. Inf.& Syst., vol.E87-D, no.8, pp.2011–2020, Aug. 2004.

- [51] T. Sugawara, K. Ide, and T. Sato, "Dynamically reconfigurable processor implemented with IPFlex's DAPDNA technology," IEICE Trans. Inf.& Syst., vol.E87-D, no.8, pp.1997-2003, Aug. 2004.
- [52] J. Watson, "Adaptive computing IC technology enables SDR and multifunctionality in next-generation wireless devices," Proc. SDR Forum Tech. Conf., pp.185-188, San Diego, CA, Nov. 2002.
- [53] K. Akabane, H. Shiba, M. Matsui, K. Kobayashi, and K. Araki, "Performance evaluation of an SDR signal processing board using a reconfigurable processor," Proc. SDR Forum Tech. Conf., no.2.2-1, pp.133-136, Phoenix, AZ, Nov. 2004.
- [54] H. Shiba, K. Akabane, M. Matsui, K. Kobayashi, and K. Araki, "Design and performance of IEEE 802.11a SDR software implemented on a reconfigurable processor," Proc. SDR Forum Tech. Conf., no.2.2-3, pp.141-145, Phoenix, AZ, Nov. 2004.
- [55] 太郎丸眞, 阪口 啓 (編), ソフトウェアで作る無線機的设计法, 科学情報出版, つくば市, 2016.
- [56] L. Larson, "RF Technology enablers for software-defined radios," IEICE Trans. Commun., vol.E89-B, no.12, pp.3174-3178, Dec. 2006.
- [57] 山口 陽, 川島宗也, 加保貴奈, 上原一浩, "ソフトウェア無線・コグニティブ無線実現に向けた高周波デバイスの研究開発動向," 信学技報, SR2007-9, May 2007.
- [58] 川島宗也, 山口 陽, 西川健二郎, 上原一浩, "ソフトウェア無線・コグニティブ無線実現に向けた広帯域低雑音増幅器の高線形化に関する検討," 信学技報, SR2007-14, May 2007.
- [59] M. Kawashima, Y. Yamaguchi, K. Nishikawa, and K. Uehara, "Broadband low noise amplifier with high linearity for software-defined radios," Proc. 2nd EuMIC, pp.243-246, Munich, Germany, Oct. 2007.
- [60] T. Kaho, Y. Yamaguchi, H. Shiba, K. Uehara, and K. Araki, "Concurrent multi-band mixer with independent and linear gain control," IEICE Trans. Electron., vol.E98-C, no.7, pp.659-668, July 2015.
- [61] 加保貴奈, 山口 陽, 芝 宏礼, 大島心平, 中川匡夫, 上原一浩, "ユーザセントリックな無線通信システム実現に向けたマルチバンド一括送受信フロントエンド," 信学論 (C), vol.J99-C, no.5, pp.258-265, May 2016.
- [62] I. Ando, G.K. Tran, K. Araki, T. Yamada, T. Kaho, Y. Yamaguchi, and K. Uehara, "Nonlinear modeling and analysis on concurrent amplification of dual-band Gaussian signals," IEICE Trans. Electron., vol.E96-C, no.10, pp.1254-1262, Oct. 2013.
- [63] I. Ando, G.K. Tran, K. Araki, T. Yamada, T. Kaho, and Y. Yamaguchi, "Design of multi-band predistorter and modeling for multi-band power amplifier," Proc. TJMW'12, no.FR1-5, Bangkok, Thailand, Aug. 2012.
- [64] 安藤生真, タン ザカン, 荒木純道, 山田貴之, 加保貴奈, 山口 陽, "マルチバンドの同時送信時の OFDM 信号に対する Predistorter 性能評価," 信学技報, MW2012-79, Sept. 2012.
- [65] 山田貴之, 安藤生真, タン ザカン, 荒木純道, 加保貴奈, 山口 陽, 赤羽和徳, 上原一浩, "フレキシブルワイヤレスシステムにおける複数バンド同時送信時のデジタルプリディストーション技術の検討," 信学技報, SR2012-20, July 2012.
- [66] 山田貴之, 安藤生真, タン ザカン, 荒木純道, 加保貴奈, 山口 陽, 上原一浩, "ユーザセントリックワイヤレスネットワークにおけるシングルキャリア信号の2バンド同時増幅時のデジタルプリディストーション技術の性能評価," 2013 信学総大, B-17-15, March 2013.
- [67] I. Ando, G.K. Tran, K. Araki, T. Yamada, T. Kaho, Y. Yamaguchi, and K. Uehara, "A new architecture for concurrent dual-band digital predistortion," Proc. APMC 2013, no.W2E-2, pp.152-154, Seoul, Korea, Nov. 2013.
- [68] T. Shono, K. Uehara, and S. Kubota, "Proposal for system diversity on software-defined radio," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E84-A, no.9, pp.2346-2358, Sept. 2001.
- [69] K. Akabane, H. Shiba, M. Matsui, and K. Uehara, "Performance evaluation of an autonomous adaptive base station that supports multiple wireless network systems," IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.1, pp.22-28, Jan. 2008.
- [70] M. Matsui, K. Akabane, H. Shiba, and K. Uehara, "Prototype of a cognitive radio system with cooperative sensing and interference alerting," Proc. CROWNCOM'08, no.FM3-2, Singapore, May 2008.
- [71] 芝 宏礼, 山口 陽, 赤羽和徳, 山田貴之, 上原一浩, "多種多様な無線端末を収容するフレキシブルワイヤレスシステムの提案," 信学技報, SR2009-23, July 2009.
- [72] 山口 陽, 芝 宏礼, 赤羽和徳, 山田貴之, 李 斗煥, 加保貴奈, 上原一浩, "フレキシブル・アクセスポイントとプロトコルフリー信号処理部からなるヘテロジニアスネットワークシステムの提案—Part1: システムアーキテクチャと RF 回路技術," 信学技報, SR2009-118, March 2010.
- [73] 李 斗煥, 山田貴之, 芝 宏礼, 山口 陽, 上原一浩, "フレキシブル・アクセスポイントとプロトコルフリー信号処理部からなるヘテロジニアスネットワークシステムの提案—Part2: 圧縮センシングを用いた無線環境伝送技術," 信学技報, SR2009-119, March 2010.
- [74] 山田貴之, 李 斗煥, 芝 宏礼, 山口 陽, 上原一浩, "フレキシブル・アクセスポイントとプロトコルフリー信号処理部からなるヘテロジニアスネットワークシステムの提案—Part3: 高精度受信のための信号処理技術," 信学技報, SR2009-120, March 2010.
- [75] D. Lee, T. Yamada, H. Shiba, Y. Yamaguchi, T. Kaho, and K. Uehara, "Flexible wireless system: unified wireless platform for a wide variety of wireless systems," Proc. CROWNCOM'11, no.WA1-1, Osaka, Japan, June 2011.
- [76] 特集 スパースモデリングの発展—原理から応用まで—, 信学誌, vol.99, no.5, pp.369-470, May 2016.
- [77] D. Lee, T. Yamada, H. Shiba, Y. Yamaguchi, and

- K. Uehara, "Combined Nyquist and compressed sampling method for radio wave data compression of a heterogeneous network system," IEICE Trans. Commun., vol.E93-B, no.12, pp.3238-3247, Dec. 2010.
- [78] 李 斗煥, 山田貴之, 芝 宏礼, 山口 陽, 中川匡夫, 上原一浩, "フレキシブルワイヤレスシステムに向けた圧縮センシングによる電波データ圧縮伝送技術," 信学誌, vol.99, no.5, pp.450-455, May 2016.
- [79] T. Yamada, D. Lee, H. Shiba, Y. Yamaguchi, and K. Uehara, "Signal separation and reconstruction method for simultaneously received multi-system signals in a unified wireless system," Proc. CROWNCOM'11, no.TB1-2, Osaka, Japan, June 2011.
- [80] T. Yamada, D. Lee, H. Shiba, Y. Yamaguchi, K. Akabane, and K. Uehara, "Signal separation and reconstruction method for simultaneously received multi-system signals in Flexible Wireless System," IEICE Trans. Commun., vol.E95-B, no.4, pp.1085-1092, April 2012.
- [81] 原田博司, 村上 誉, 石津健太郎, 佐々木重信, 山口 陽, 山田貴之, 上原一浩, 森川博之, 長谷良裕, 長谷川圭吾, 浅野勝洋, "ホワイトスペースにおける新たなブロードバンドアクセスの実現に向けた周波数高度利用技術の研究開発 (1)," 電波資源拡大のための研究開発第 7 回成果発表会予稿集, pp.1-12, Dec. 2014.
- [82] C. Song and H. Harada, "Proposal and hardware implementation of a partial bandwidth based feature detection method for sensing under adjacent channel interference," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol.12, no.11, pp.5444-5453, Nov. 2013.
- [83] B. Zhao and S. Sasaki, "Active spectrum sensing for cognitive radio networks," Transactions on Emerging Telecommunication Technologies, DOI: 10.1002/ett.2731 (Early View) (2013-10-28).
- [84] 芝 宏礼, 山口 陽, 山田貴之, 加保貴奈, 中川匡夫, 上原一浩, "ホワイトスペース利用実現に向けた広帯域周波数センシングシステムの提案と性能評価," 信学論 (B), vol.J97-B, no.12, pp.1224-1233, Dec. 2014.
- [85] 長谷良裕, 岩元 啓, 田代諭弘, 鈴木 誠, 森川博之, "地形を考慮した利用可否判断を行うホワイトスペースデータベース," 信学技報, SR2013-96, March 2014.
- [86] Proc. Joint SDR Forum and IEICE TCSR Workshop, Niigata, Japan, May 2009.
- [87] 芝 宏礼, 山口 陽, 赤羽和徳, 上原一浩, "ソフトウェア無線・コグニティブ無線の実装・実用化の動向," 信学技報, SR2009-95, March 2010.
- [88] 小島 浩, "ノキア シーメンス ネットワークスの SDR ベース LTE 基地局," 信学技報, SR2011-42, July 2011.
- [89] "NTTBP と共同開発, ポータブル Wi-Fi~販売開始の経緯と製品概要~, " パッファロープレスリリース, <http://buffalo.jp/products/new/2010/001148.html>, May 2010.
- [90] H. Harada, "Amphibia network—a dependable wireless and wired integrated social network infrastructure," Proc. CROWNCOM'11, Keynote Speech 1, Osaka, Japan, June 2011.
- [91] 藤岡 滋, 久保博嗣, 山崎 誠, 川本真紀夫, "東北・上越新幹線デジタル列車無線システム," 三菱電機技報, vol.78, no.2, p.36, Feb. 2004.
- [92] "NEC が小田急に新・列車無線システム複数仕様で 1 台で対応," 日本経済新聞, [http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1203E\\_S3A210C1000000/](http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1203E_S3A210C1000000/), Feb. 2013.
- [93] "GNU Radio: the free & open software radio ecosystem," <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>.
- [94] "Ettus Research," <http://www.ettus.com/>.
- [95] "RTL-SDR (RTL2832U) and software defined radio news and project," <http://www.rtl-sdr.com/>.
- [96] M. Katayama, H. Nakada, H. Hayashi, and M. Shimizu, "Survey of RFID and its application to international ocean/air container tracking," IEICE Trans. Commun., vol.E95-B, no.3, pp.773-793, March 2012.
- [97] K. Akabane, N. Mochizuki, S. Teruhi, M. Kobayashi, S. Yoshino, M. Shimizu, and K. Uehara, "High-capacity wireless access networks using 920 MHz band for wide-area IoT/M2M services," IEICE Trans. Commun., vol.E99-B, no.9, pp.1920-1929, Sept. 2016.
- (平成 28 年 12 月 14 日受付, 29 年 3 月 28 日再受付, 6 月 7 日早期公開)



上原 一浩 (正員:フェロー)

昭 62 東北大・工・電子卒。平 4 同大大学院博士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来,準ミリ波・ミリ波帯広帯域ワイヤレスアクセスシステム用アンテナ,アクティブアンテナ,アダプティブアンテナ,屋内電波伝搬,ソフトウェア無線・コグニティブ無線システム,ミリ波超高速ワイヤレスシステム,次世代無線 LAN システム, IoT/M2M 無線アクセスシステム等の研究開発及びマネジメントに従事。平 9~10 カリフォルニア工科大客員研究員。平 25~28 NTT 未来ねっと研究所ワイヤレスシステムイノベーション研究部長。平 15~22, 25 及び 27 東北大学工学部非常勤講師。平 21~23 東海大学開発工学部非常勤講師。現在,岡山大学大学院自然科学研究科教授。工博。平 7 本会学術奨励賞,平 9, 26, 及び 28 本会論文賞,平 14 YRP アワード及び電気通信普及財団賞(テレコムシステム技術賞),平 23 本会通信ソサイエティ功労顕彰状及び活動功労賞,平 24 及び 26 本会通信ソサイエティ論文賞,平 26 本会業績賞,等を受賞。本会ソフトウェア無線(現スマート無線)研究専門委員会委員長及び顧問,通信ソサイエティ英文論文誌小特集(WDN, CR, 及び NE)編集委員長,東京支部評議員及び庶務幹事, CrownCom'11 実行委員長, IEEE 広島支部副支部長, 等を歴任。IEEE シニア会員。