



ソフトウェア無線 (Software Defined Radio)

菅野 秀明
高呂 賢治

小田切 英昭

近年、携帯電話や無線LANに代表される 移動体通信システムでは、その普及とともにさまざまな規格やサービスが使用されている。たとえば、携帯電話の方式では、日本ではPDC (Personal Digital Cellular)、米国ではcdma One (code division multiple access One)、欧州ではGSM (Global System for Mobile communications) が採用されている。第3世代システムでは国際統一規格を目指したものの、日欧のW-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access)、米国のcdma2000と、複数仕様が存在しており、これらシステムには互換性がない。

また無線LANの分野では、IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers : 米国電気電子技術者協会) 委員会主導で標準化が進められており、互換性の点では整備されているが、IEEE802.11a/b/gなど複数の無線システムが存在する状態となっており、今後も高速化や品質制御技術を中心に、さらなる新規システムの規格化が進むものと考えられる。

さらに、これら移動体通信システムに加え、地上デジタル放送に代表される放送システムについても、多種多様なサービスが検討されており、加えて通信と放送を融合させたシステムやサービスも検討されている。このような中で、すべてを利用できる端末を持ち歩くことは困難であり、新しい機能やシステムが増えるたびにユーザは端末を交換または増設することになる。

またインフラ側も、より快適な環境を、提供するため、新しいシステムの導入を考えると、既存の設備を更新、あるいは交換するなど対応が必要となる。

このようなことから同じハードウェアで、さまざまな仕様や機能の追加、システムの変更が可能な、無線機器が求められており、このような無線機器を実現する手段の一つがSDR (ソフトウェア無線 : Software Defined Radio) である。

ここではSDRの概要、実現するための構成、課題および標準化動向について述べる。

ソフトウェア無線機の概要

SDRは、高周波増幅器、周波数変換器、プログラマブル発振器、A/D (Analog to Digital)、D/A (Digital to Analog) 変換器、およびデジタル信号処理部などの、ハードウェアを共通とし、フィルタ、変復調部、等化器、および同期機能などの無線機能をプログラマブル化することで、ソフトウェアの書き換えにより無線パラメータである変調方式、送受信周波数、帯域幅、伝送速度などのシステム固有の無線仕様を必要に応じて変更することを可能とするものである。

理想的なSDRは、図1に示す通り、アンテナに直結するA/D、D/A変換器とデジタル信号処理部の組み合わせとなる。

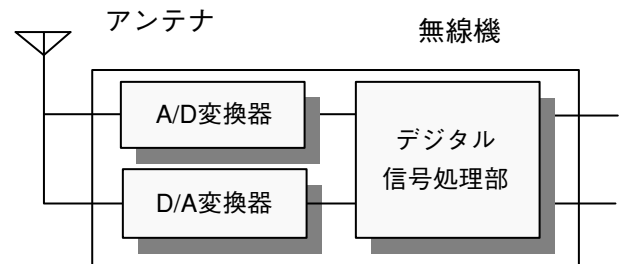


図1 理想的なソフトウェア無線

しかし、このような構成では、A/D、D/A変換器の動作速度や、分解能から見て現段階では現実的ではない。

理想のSDRに少しでも近づくためには、受信信号のA/D変換器、あるいは送信信号のD/A変換器をなるべく高周波側で行い、周波数変換やチャンネル選択など従来のアナログ部で実現されていた機能を、デジタル信号処理にて実現することが望ましい。

次に、SDRによるマルチモード化について図2に示す。従来の無線機では、チャンネル選択を高周波部 (アナログ部) で行い、その信号をA/D変換器した後、デジタル信

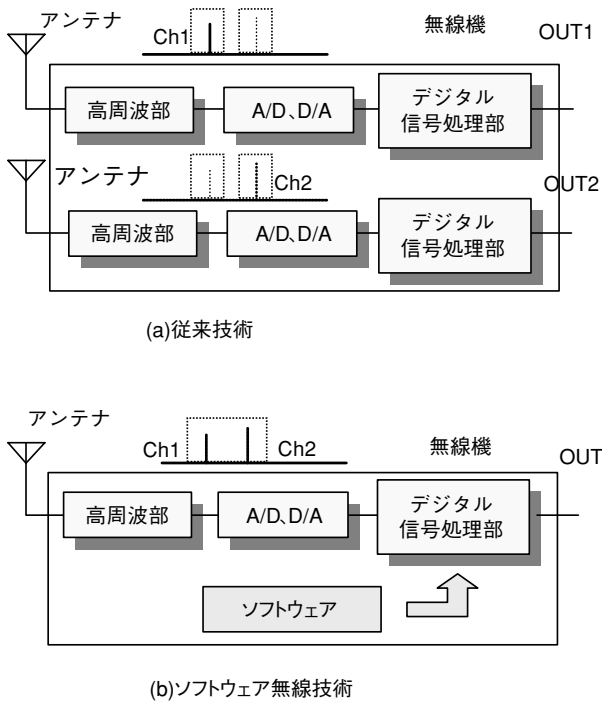


図2 無線機のマルチモード化

号処理によって受信信号を復調する。したがって複数システムへの対応は単純に複数の受信機を組み合わせることによって実現している。

これに対してSDRでは、広帯域の信号を一括してA/D変換し、チャンネル選択を含めた復調処理は、すべてデジタル信号処理部におけるソフトウェア的な信号処理によって実現している。

このように、SDRではソフトウェアの選択により無線機能を変更することが可能となり、ソフトウェアによるマルチモード化が実現できる。したがって、ハードウェアが対応できる限りどのような無線システムでも利用可能となる。

さらに無線によるソフトウェアのダウンロード機能を利用したソフトウェアのバージョン・アップやバグフィックスなどが容易となる。

また、その以外のSDRのメリットとして、以下の点が挙げられる。

- ① 1つの端末で複数の無線システムへの対応が可能
- ② システムごとの個別開発が不要
- ③ 新しいサービスの実施が容易

ソフトウェア無線機の構成

SDRに基づくソフトウェア無線機の構成を図3に示す。SDRでは、従来ハードウェアのコンフィグレーションによって実現していた機能を、ソフトウェア上で実現するものであり、その構成はアンテナを含む高周波部および信号処理部からなるハードウェアと、デバイスドライバ、リアルタイムOSおよび無線機能が記述されたライブラリからなる基本ソフトウェア、リアルタイムOS上で動作するアプリケーションによって構成され、アプリケーションを交換することで、無線機の変性を変更できるものである。またSDRの構成要素について、以下に概略を説明する。

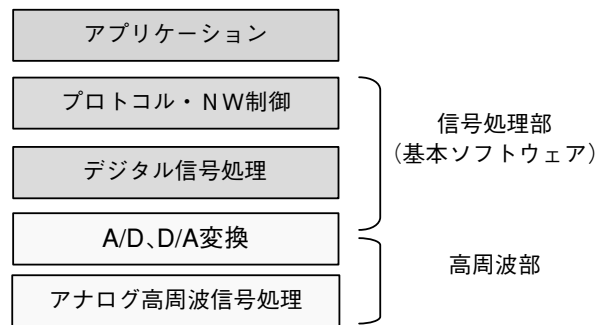


図3 ソフトウェア無線機の構成

(1) アナログ高周波信号処理

無線信号を受信して、デジタル信号処理を行いやすい周波数帯に変換する。また作られた送信信号を実際に送信する周波数に変換して、アンテナから送出する。

(2) A/D, D/A変換

受信したアナログ信号をデジタル信号に、送信するデジタル信号をアナログ信号に変換する。

(3) デジタル信号処理

基本的な無線機能を記述する関数群であり、変復調およびMAC (Media Access Control) 制御を行う。パラメータ変更で特性を変更することができる。

(4) プロトコル・NW制御

通信プロトコル処理を行う。アプリケーションプログラムからの命令に応じて動作する。

(5) アプリケーション

無線機の構成や機能が、ソフトウェアで記述され、ハー

ドウェアを意識すること無く、無線機を所望の特性で動作を実現させる。また無線機の仕様や機能は、アプリケーションプログラムを交換することで、変更できる。

SDRの動作イメージを図4に示す。SDRでは従来は個別のハードウェアで行っていた無線処理を汎用的なハードウェアを用いてソフトウェアによって行う。

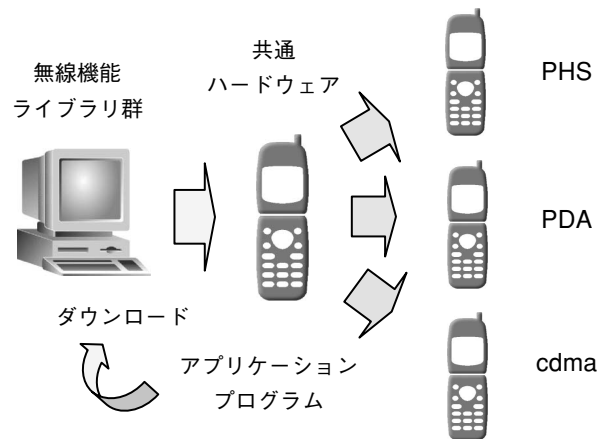


図4 ソフトウェア無線機の動作

SDRのソフトウェアは更新可能であり、新しい通信方式に対しても、新しいソフトウェア（アプリケーション・プログラム）を無線機能ライブラリ群から取得して無線機に、取り込む（ダウンロード）ことで実現できる。

ハードウェアを交換する必要はないため、基地局や端末など過去に投資したインフラを有効に活用することができる。また異なる方式に同時に対応することも容易になる。

ソフトウェア無線で広がる新たな可能性

SDRは、汎用ハードウェアをベースとし、その上に柔軟なソフトウェア・アーキテクチャを定義することであり、その考え方は1980年代前半から存在した。

しかし、実用的な試作機が登場したのは、ごく最近のことで、その背景には次のようないくつものテクノロジーの進歩がある。

- ① FPGA (Field-Programmable Gate Array) の大規模化、低価格化
- ② DSP (Digital Signal Processor) の高速化

③ RCP (Re-configurable Processor) /DRP (Dynamically Reconfigurable Processor) の実用化

④ A/D , D/Aコンバータ の高性能化

⑤ データ転送インターフェースの高速化

これら、テクノロジーの進歩によって、プログラミング可能なハードウェアを搭載、ソフトウェアによるアップグレードが可能な無線機を設計できるようになった。

SDRのベースとなるハードウェアは、プログラミング可能な部品や適切な周波数で信号を送受信する部品で構成され、これによって1つの基本的なモジュールで、さまざまな周波数バンドやリンク層プロトコルによる信号の送受信ができる。

SDRのモジュールは、アンテナ、アナログ・フロント・エンド (RF 信号を中間信号に変換) およびこれに対応したデジタル・ベースバンド・モジュールなどが含まれる。またこれらモジュールについて、あらかじめ認証を受けておき、これらを使って組み立て無線機を構築するという可能性も出てきた。

このように、汎用的なハードウェアを、ベースにしておけば異なる無線環境ごとに専用の無線機を開発する必要がなくなる。

また、ベースとなるハードウェアを、汎用的なものにすることで、これまで専用のハードウェアで処理されていた以下のような無線機能も汎用ハードウェアとソフトウェアの組合せで定義できるようになる。

- 信号の生成
- 変調と復調
- ベースバンドおよびデジタル信号処理機能
- 中間周波数の使用 (周波数ホッピングなど)
- 複数のリンク層プロトコルの使用
- セキュリティおよび暗号化

またSDRにはさまざまな利点があるが、その中で注目されている点が「柔軟性」である。SDRではプログラムを変更することにより無線機の構成を変更することが可能となる。この利点から、たとえば通常は連絡用に使用する無線機を災害時に緊急モードへ変更、救助活動に当たるなど、無線機の新たな利用、展開が期待できる。

標準化動向と課題

SDRのデファクト標準化が、SDRフォーラムで行われている。SDRフォーラムは、1996年3月にMMITS

(Modular Multifunction Information Transfer System) フォーラムとして設立され、その後名称が変更された。

SDRフォーラムは、ソフトウェア無線技術に基づく無線通信システムの普及、加速化を目的として設立された業界団体で、主に米国のサービスプロバイダとセットメーカーが登録メンバーに登録されている。

同フォーラムでは、主にアーキテクチャの要件、ソフトウェアのAPI (Application Programming Interface) およびソフトウェアダウンロードに関する標準化を行っている。また、同フォーラムではSDRを無線ネットワークや端末を再構成可能なシステムアーキテクチャに基づく、ハードウェアおよびソフトウェア技術の集合体であると定義している。

次に、SDRについて現状の技術動向と課題について、述べる。

(1) 規格化されたフレキシブルなアーキテクチャ

現在、SDRを実装するハードウェアとして、FPGA、DSP、MPU、RCPなどが注目されている。MPUは、特にMAC層より上位のプロトコルを実装するデバイスとして使用され、物理層以下のプロトコルの実装にはFPGA、DSP、RCPなどの適用が検討されている。

FPGAを用いた場合、従来のASIC (Application Specific Integrated Circuits) などと同様に、各々の無線通信プロトコルに特化してハードウェア記述言語を用いて設計したマッピングデータを用意し、マッピングデータを入れ換えることによってSDR機能を実現しようというものである。

DSPを用いた場合、各々の無線通信プロトコルに、特化した信号処理プログラムを用意し、DSPで処理するプログラムを入れ換えることによりソフトウェア無線機能を実現しようというものである。近年注目されているRCPは、FPGAとDSPの中間に位置づけられる。現時点では、無線ネットワークのプロードバンド化に伴い実用化されているスペクトラム拡散変復調 (DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum, FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum) やOFDM変復調を実現するためには、信号処理速度の面から見てFPGAによる実装がもっとも優位である。

一方、無線端末はバッテリー駆動を前提としており、低消費電力化の実現やコストの面で、FPGAやDSPは専用LSIと比較し劣る面が多く、今後の改善が期待されている。

また、半導体の微細化に伴うDSPなどの処理能力向上やRCPの実用化についても、引き続き注目していく必要

がある。

現時点では、各々のデバイスに固有の設計環境の下において開発が進められており、今後、SDRの実用化に向けて、デバイス依存のない設計環境を構築することが重要である。

また既存の設計環境下で開発された設計資産を如何に引き継いでいくか、関連業界全体で取り組む必要がある。

(2) 既に実用化された無線規格への機能拡張

SDR実現のため複数の無線規格に対応させるための機能を、無線ネットワークを介してあたかもソフトウェアのパッチ・プログラムのように、ダウンロード可能な機能を具備することが必須である。

これら機能を実現するには、特にこれらのサービスを提供する通信プロバイダの役割が、大きなウエイトを占めている。現在北米で実用化が進められているJTRS (Joint Tactical Radio System) は、US国防総省が中心となり、軍事利用を目的として構築されているSDRシステムである。

また、欧州では3Gを中心としたソフトウェア無線システムの構築を目的としたE2R (End-To-End Reconfigurability) プロジェクトが、産官共同プロジェクトとして進められている。

一方、IEEE802委員会を中心に無認可で使用可能な周波数帯 (ISM帯、UNII帯など) を用いた短距離無線システム (WLAN, WPANなど) の規格化が推進され、その普及が爆発的に進んでおりSDRで提供されるサービスの1つとして無視することができなくなりつつある。

(3) 周波数変換技術と広帯域化

SDRでは、複数のチャンネルが一つの広帯域無線部に入力される。入力されたすべてのチャンネルはA/D変換によってデジタル信号へ変換され、所望のチャンネルはデジタル信号処理部のプログラマブルチャンネルフィルタによって選択される。信号処理部のパラメータを変更することで、さまざまな帯域幅に対応可能となる。

この広帯域無線部では各システム受信帯域をA/D変換に出力する必要から、システムの受信帯域として利用されているすべての帯域幅を取り扱う必要がある。

図5 (次ページ) は、従来用いられているスーパーヘテロダイン方式による無線部の構成を示している。

この構成は受信信号を、IF (Intermediate Frequency) 信号へ周波数変換し、IF帯でシステム帯域を確保してA/D変換を行い、その後、デジタル信号処理によって、狭帯域の所望信号を切り出す。この構成では、イメージ抑圧

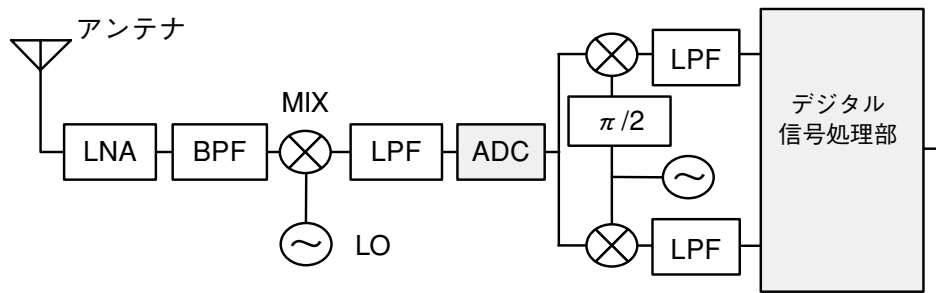


図5 ヘテロダイン方式による構成

のためにRF（Radio Frequency）段やIF段に誘電体フィルタやSAW（Surface Acoustic Wave）フィルタなどの受動部品が必要である。

このようなフィルタは中心周波数や通過帯域幅のプログラマブル化が困難であるため、仕様によって決まる固定的な周波数特性をもったものを個別に用いる必要がある。さらに通過帯域幅はフィルタのQ値（フィルタの急峻さを表す）によって制限されるため通常は広い帯域幅を実現することは困難となる。

さらにSDRでは利用する移動通信システムによって必要な中心周波数が異なるものとなる。

このような問題に対応するためには、フィルタ・バンクを用意して必要に応じて複数のフィルタを切り換える必要があるが、端末の小型化などには不向きとなる。同様な問題が受信系だけでなく、IF段をもつ送信部でも発生する。

これらの問題を解決する一つの手法がダイレクトコンバージョン方式である。

ダイレクトコンバージョン方式による構成を図6に示す。受信されたRF信号は、直交復調器でベースバンド信号へ

周波数変換される。

このIQ（複素数の実数部と虚数部）信号は、LPF（Low Pass Filter）によって必要な信号のみ取り出され、A/D変換器でデジタル信号に変換される。

この信号に対してデジタル部でチャンネル選択、波形整形フィルタリングなどの信号処理がなされる。

ダイレクトコンバージョン方式は原理的にイメージレスポンスが無いため、固定的なイメージ抑圧フィルタが不要となる。さらにA/D変換の折り返し除去のためのLPFは、スイッチドキャパシタフィルタのようなアクティブフィルタでの構成が可能であり、帯域幅を可変しやすく、またIC化に適している。

したがって、ダイレクトコンバージョン方式は、広帯域化を図りやすい上に、IC化に適したフィルタを用いるためワンチップ化、小型化に向けた方式であると言える。

しかし実際は送信側では信号処理部から送られたデジタル信号をアナログ信号に変換し、その信号を広帯域に渡って所望の無線周波数帯へアップコンバートする機能が必要であり、受信側では周波数変換部において、高いレベルの信号が所望の帯域内に複数入力された場合、ダイナミックレンジが低下する問題やミキサの非直線ひず

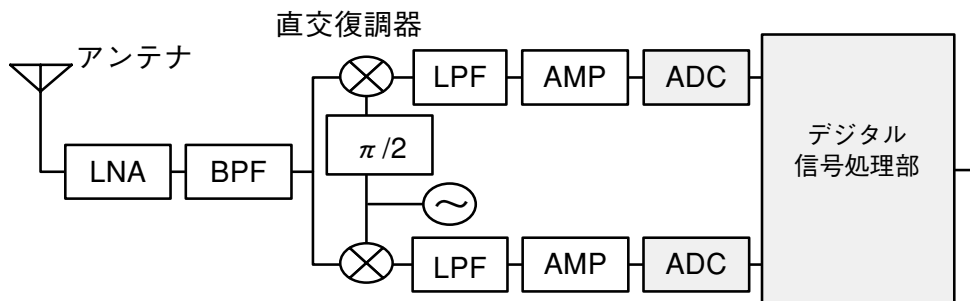


図6 ダイレクトコンバージョン方式による構成

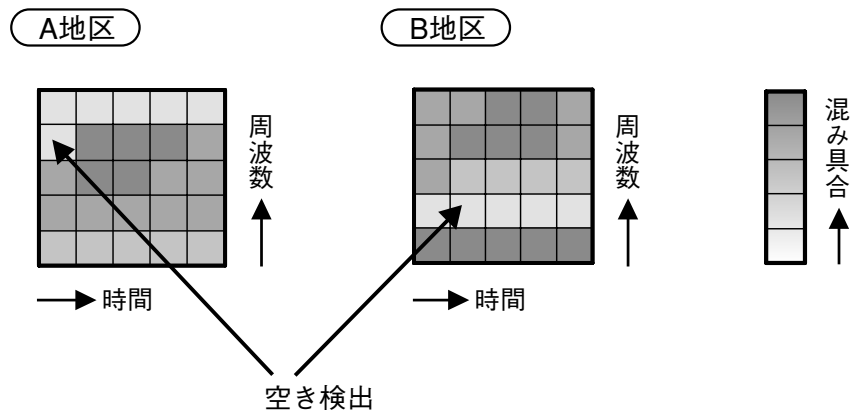


図7 コグニティブ無線

みが発生する問題があり、問題解決のための開発研究が行われている。

今後の展開

第4世代携帯端末など、移動体通信市場でのモバイル利用の拡大に伴う電波資源の需要拡大により、特に電波資源の逼迫は各国共通の課題であり、その解決案としてSDR技術を活用したコグニティブ無線（Cognitive Radio）^{1) 2)}の実現が期待されている。

コグニティブ無線とは、通信環境認知技術とも呼ばれ、図7に示す通り、地域性・周波数・時間ごとの使用効率を踏まえ、動的に電波資源を割り振ることにより、誰でも、いつでも、どんな場所でも、所望の通信速度で情報伝送を行える環境を構築しようとするもので、その実現手段としてSDR技術の適用が期待されている。

また無線ネットワークのブロードバンド化への対応として、周波数利用効率が高く、伝播距離が広くとれ、反射が多い都市の通信に強いOFDM変復調や周波数密度電力を雑音以下にし、周波数共用の向上を目指したUWB技術、複数システムに同一周波数帯の時空間再利用の道を開くMIMO技術などの物理層プロトコルに関する最新技術や無線区間を中継し、自動的に網を構成することにより、一時的な利用や災害時など配線が困難な地域での利用を可能とするアドホック・ネットワーキング技術をSDRとして実装する技術を確立することが必須である。

沖電気では、このような市場動向を睨んで、技術動向把握するとともに、新規技術開発に取り組んでいる。



参考文献

- 1) 原田博司：「ソフトウェア無線技術を用いた将来のアプリケーション」、電波高度利用シンポジウム2004、独立行政法人情報通信研究機構（NICT）、2004年12月
- 2) 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」、電子情報通信学会、独立行政法人情報通信研究機構（NICT）、2005年5月

筆者紹介

- 菅野秀明：Hideaki Kanno. 株式会社沖テクノクリエーション技術統括部
 小田切英昭：Hideaki Odagiri. 株式会社沖ネットワークエルエスアイ IPソリューション本部
 高呂賢治：Kenji Koro. 沖コンサルティングソリューションズ株式会社 情報ネットワークコンサルティング