

■4群 (モバイル・無線) - 6編 (コグニティブ無線)

4章 実例

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 4-1 ハードウェア USRP
- 4-2 コグニティブ無線機試作開発
 - 4-2-1 研究開発の概要
 - 4-2-2 無線機試作の課題
 - 4-2-3 試作機開発
- 4-3 コグニティブ無線/ソフトウェア無線向けソフトウェア
- 4-4 ホワイトスペースデータベースと通信実証試験
- 4-5 異種無線ネットワークシステム

■4群-6編-4章

4-1 ハードウェア USRP

(執筆者：瀧川和哉) [2019年2月 受領]

無線機が状況に応じて最適な通信方式に切り替えることができるコグニティブ無線の研究開発が盛んに行われている昨今、新しいアイデアや理論を計算機上でシミュレーションを行い、その有効性が確認された場合の次のステップは実際に無線機を用いた実験を行うことである。従来、無線機を開発するには専用の変復調処理を行う専用の IC が必要となるが、それには膨大な費用がかかるため、気軽に研究者が新しく考えたアイデアを実機の無線機として用意し実験をするのは容易ではなかった。そこで考え出されたのが「ソフトウェア無線」というアイデアである。

ここではソフトウェア無線をより身近なものにするため、米 Ettus Research 社 (現 米 National Instruments 社のブランド) の USRP (Universal Software Radio Peripheral) というソフトウェア無線機について、歴史、種類、構造について説明する。

4-1-1 USRP の開発元 Ettus Research

Ettus Research は米国西海岸に 2004 年に創設された会社で、当初からソフトウェア無線技術を利用したい研究者のためにソフトウェア無線機のハードウェアを開発してきた。最初の製品はその名も「USRPI」で、計算処理を行う PC とは USB 2.0 バスで接続し、最大 16 MHz の変調帯域幅の信号の送受信を行うことが可能な製品である。

その後、2010 年に米 National Instruments 社に吸収され製品が強化されている。PC との接続は USB 2.0 のほか、1 Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Ethernet, PCI Express, USB 3.0 も対応し、データ転送速度も向上している。その結果、無線部分も進化し、現在は最大で 160 MHz の変調帯域幅の信号の送受信に対応したソフトウェア無線機になっている。

現在 Ettus Research という法人は存在せず、米 National Instruments 社の一つのブランドとなっている。

4-1-2 USRP ソフトウェア無線機の種類

USRPI は 2018 年現在大きく分けて 3 つのシリーズがある。

1. USB 接続の B シリーズ
2. Ethernet 接続の N シリーズ
3. PCIe 接続対応の X シリーズ
4. 組込み (単独起動) 対応の E シリーズ

(1) B シリーズ

B シリーズは最も安価で手軽に利用できるシリーズである。現行モデルの B シリーズは USB 3.0 ケーブルによって PC と接続する。2 CH 対応の B 210 にて 2 CH 同時の信号送受信を行う場合を除き、USB 3.0 ケーブル経由で十分な電源を供給できるため、外部 AC 電源などがなくても動作する。B 200 シリーズはすべて RF 仕様が同じで、搬送波周波数は 70 MHz ~ 6 GHz に対応し、最大で 56 MHz の変調帯域幅の信号を扱うことが可能だ。扱う信号のアナログ帯域幅は 56 MHz まで対応しているが、連続して受信したデータを USRP から PC へ (またはその逆) 転

送する場合、USB 3.0 のデータ転送速度の制限から 16-bit サンプリングの場合は 50 M サンプル/秒 (以下 MS/s)、帯域幅としては約 40 MHz、8-bit または 12-bit サンプリングにすることで 61.44 MS/s が上限となる。また、これらの数値は 1 チャンネル当たりの上限値のため、B 210 など 2 チャンネルに対応したモデルで 2 チャンネル同時に扱う場合の最大値は上記の半分となる。

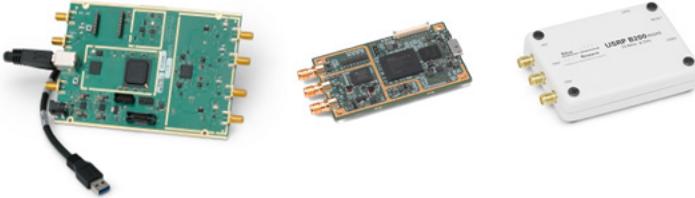


図 1・1 USRP B シリーズ (左から B 210, B 200 mini (board-only), B 200 mini)

無線信号の送信も可能な B シリーズだが、ユーザの多くは受信を目的とした利用をすることが多いのではないだろうか。ノート PC に USB 3.0 ケーブル一本で接続された B シリーズを屋外に持ち出してスペクトル監視をするアプリケーションは、この手軽に動作する USRP B シリーズの代表的な使用方法である。

(2) N シリーズ

N シリーズには大きく 2 つのシリーズが存在する。一つは N200 シリーズ。二つ目は 2018 年に発売が開始された新しい N310 シリーズだ。このシリーズは PC 本体との接続に Ethernet を用いる。

N200 シリーズは USRP が広まるきっかけになった USRP 2 というモデルの後継機にあたる。N200 シリーズはユーザが使用したい周波数帯に応じてドーターボードを差し替えることにより幅広い周波数に対応できる。N200 シリーズには 1 枚のドーターボードを組み込むことが可能で、1 組の送受信機を搭載可能だ。

N200 シリーズではほとんどのユーザは変復調などの信号処理を PC 上で行う。そのため、送受信する信号のサンプリングレートは 1 Gigabit Ethernet に制限され、本体自身での上限は 100 MS/s、8-bit サンプリングで 50 MS/s、16-bit サンプリングで 25 MS/s になる。受信した信号を連続して PC に転送する場合、分解能に応じてサンプリングレート、すなわち帯域幅が制限されることに注意する必要がある。

N310 シリーズは USRP 本体にユーザがプログラミング可能な Xilinx 社の FPGA (Field Programmable Gate Array) Zynq-7100 SoC を搭載している。そのため、PC 本体との接続が 1 Gigabit Ethernet を用いても、FPGA 上でリアルタイムに変調・復調処理を実行するための回路を実装することができるため、より広帯域の無線信号の送受信を行い、リアルタイムで変復調処理を実現可能である。このシリーズは 2018 年末現在、1 つのモデルのみを扱っており、N200 シリーズのようにドーターボードを載せ替えることができないが、より広い帯域 (10 MHz~6 GHz) に対応し、1 台で 4 つの送信機と 4 つの受信機を搭載しているという利点がある。また、背面には SFP+ 端子を 2 つ搭載しているため、そこに 10 Giga bit Ethernet ケーブルなどを接続し高速にデジタル化された IQ データを外部の機器に転送するなどの用途にも対応が可能である。



図 1・2 USRP N シリーズ (左 : N210, 右 : N310)

(3) X シリーズ

4G ワイヤレスで LTE が 20 MHz のシステム帯域幅から LTE-A に進化するに伴い、変調帯域幅が N210 シリーズを 16-bit で送受信する上限サンプリングレートの 25 MS/s では力不足になったため、次世代の USRP が必要になった。そこで発売されたのが USRP X シリーズである。X シリーズは Xilinx 社 Kintex 7410 T (X310) または 325 T (X300) FPGA を搭載し、リアルタイムに無線信号の変復調処理を行う機能を実装することも可能である。RF 部分は N210 と同様にドーターボードで対応する周波数を選択する。X シリーズには 2 組のドーターボードを差し込むことが可能で、送信機・受信機をそれぞれ 2 組まで搭載可能だ。その結果、1 台の X シリーズを 2×2 MIMO の送受信機として扱うことができる。また、N310 シリーズ同様、背面に SFP+ 端子を搭載しており、高速なデジタルデータの転送にも対応可能である。また、TwinRx というドーターボードでは、1 枚で 2 チャンネルの入力に対応している。このドーターボードを 2 枚搭載することで合計 4 チャンネルの同時受信が可能となる。この TwinRx は 2 段階で RF 信号から AD 変換する IF 信号まで周波数を変換するスーパーヘテロダイン方式を採用し、更に周波数を変換する際に使用する局部発振器 (Local Oscillator : LO) を入出力することができるため、複数のチャンネル間で共通の LO を利用する「位相同期」に対応する。その代わりに送信機能は搭載していない。



図 1・3 USRP X シリーズ (左 : X300, 右 : X シリーズ背面)

(4) E シリーズ

E シリーズは“Embedded”の頭文字で、組み込み用途に対応した USRP である。RF 部分のスペックは B200 シリーズと同等で 70 MHz から 6 GHz までの周波数範囲に対して最大 56 MHz の帯域幅の無線信号の送受信に対応している。B200 シリーズとの違いは“Embedded”であるということで、Xilinx 社の Zynq 7020 SoC を搭載し、ARM プロセッサ上で Linux OS が動作するためホスト PC が接続されていない環境でも単独で動作させることが可能である。また、Zynq

7020 SoC は FPGA も搭載しているため、リアルタイムに変復調処理などを行う機能を実装することも可能である。

現在販売されている E シリーズ USRP 製品は、E-310、E312、E313 の 3 種類である。3 つの E シリーズのモデルの差は以下の通りである。

- E310 ベースモデル (70 MHz~6 GHz, 56 MHz 帯域幅の信号の送受信)
- E312 E310 にバッテリーを搭載したモデル
- E313 E310 を IP 67 の防塵防滴仕様のケースに収めたモデル



図 1・4 USRP E シリーズ (左: E312, 中上: E312 の背面, 中下: E312 の前面, 右: E313)

E シリーズには micro SD カードスロットも搭載しているため、RF 信号を長時間記録する小型の RF レコーダとして使用したいというユーザの声がある。56 MHz 帯域幅の RF 信号を A/D 変換して Zynq SoC の FPGA 部分まで転送することは可能なのだが、FPGA 部分から ARM プロセッサに転送するデータ転送帯域幅が約 5 MB/s、周波数に換算すると約 2 MHz 程度に制約されるため、残念ながら RF 信号の長時間記録などの用途には FM ラジオや航空無線や業務用無線など狭帯域の信号にしか対応できないことに注意する必要がある。

4-1-3 USRP ソフトウェア無線機の構造—ハードウェア

USRP ソフトウェア無線機の大半のモデルは「ダイレクトコンバージョン」と呼ばれる構造で無線信号の送受信を行っている。図 1・5 は USRPB200 の RF 回路部分の概略図である。USRP のシリーズや組み合わせる daughter ボードによってはこの図と異なる構造の場合もあるが、多くのモデルはこの図と近い構造を持っている。

まずは送信部分から説明する。送信 (Tx) 部は図 1・5 の上部にあたる。最も右側に位置するのがこの図では USB で接続された PC で、この PC 上で変復調処理などを行う。送信したいメッセージ (ペイロード) データを変調処理 (アナログ変調, デジタル変調, OFDM などの二次変調など) は、この PC 上で行う。その結果、送信信号のベースバンド信号 (IQ データ) を USB 経由で USRP に転送する。この時点の IQ データは扱いたい変調信号の帯域幅に応じたサンプリングレートで生成して構わない。FM ラジオ信号を送信する想定では、日本国内では送信帯域幅が 200 kHz であるため IQ 信号のサンプリングレートは 250 kS/s 以上で再現が可能となる。プログラミングの説明については別途 GNURadio の章が参考になる。

USB ケーブルを通して送られてきた 250 kS/s の IQ データは、それぞれ直交した I データと Q データに分かれ、それぞれが DUC (Digital Up Converter) 部で D/A コンバータが動作するサ

サンプリングレートである 61.44 MS/s に変換 (アップサンプル) される。

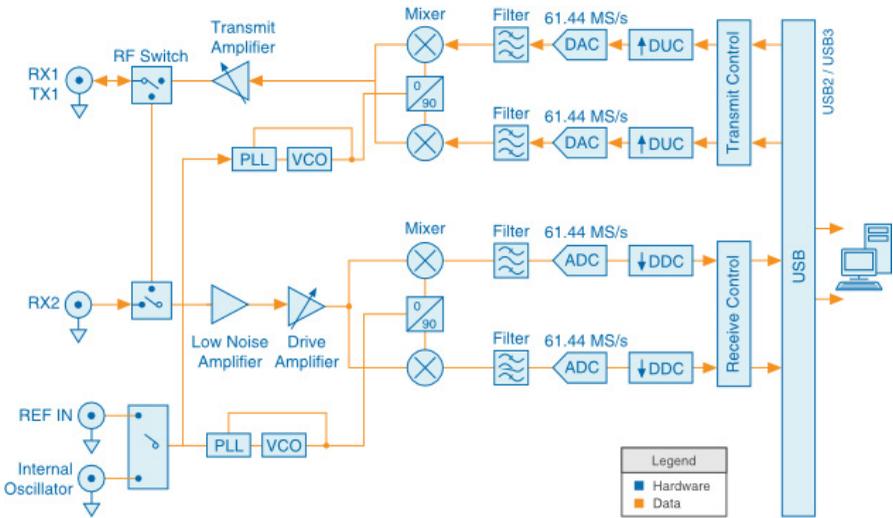


図 1・5 USRP B200 の RF 回路部の概略図

アップサンプルされた I データと Q データはそれぞれの D/A コンバータにより 2 組のアナログ信号 (ベースバンド信号 : I 波形, Q 波形) に変換され, ローパスフィルタを通過してミキサに投入される。VCO (Voltage Controlled Oscillator : 電圧制御発振器) で発生された搬送波信号を位相が 0° の信号と 90° の信号に分けられ, それぞれが I 波形と Q 波形に対してミキサで掛け合わされた後に足し合わされる。これが搬送波に乗った RF 変調信号となる。その RF 信号は送信前に Transmit Amplifier で増幅され TX1 送信端子から出力される。

USRP ソフトウェア無線機からは自由な周波数で無線信号を発生して送信することが可能だが, 無線信号の送信には総務省からの許可が必要である。無許可に無線信号を送信することは法律に違反することになるので注意が必要である。

次に受信部の説明をする。受信機能は図 1・5 の下側にある。RX1 または RX2 に接続されたアンテナからの RF 信号は通常微弱なので Low Noise Amplifier などの増幅器を介した後に 2 つに分配される。この時点では 2 つの経路に同一の信号として分配されるが, VCO で発信された搬送波と同じ周波数の正弦波を 0° と 90° の位相の信号に分配しそれらを 2 つのミキサに投入すると, それらがそれぞれアナログの I 波形と Q 波形の信号となる。この 2 つのアナログ信号はフィルタを介して 61.44 MS/s のサンプリングレートでサンプリングする A/D コンバータにてデジタル化される。I データと Q データは DDC (Digital Down Converter) で必要なサンプリングレートにダウンサンプルされる。サンプリングレートが低くなった IQ データは復調処理や記録, 解析や画面表示などの処理は USB ケーブルで接続された PC 上で行われ, 最終的に受信機として動作する。

4-1-4 USRP ソフトウェア無線機の構造—ソフトウェア

USRP の最も大きな利点は、ソフトウェア無線を利用した研究開発を希望する研究者が無線機のハードウェアの設計・製造スキルがなくても、安価に市販品を購入してソフトウェア開発環境を整えるだけですぐにソフトウェア無線機を作り始めることができることである。重要な役割を果たしているのが USRP Hardware Driver™ (UHD) と呼ばれるドライバソフトウェアである。このソフトウェアは無償で入手可能なおえ、GNU General Public License Version 3 (GPL v3) に準拠しているためソースコードも入手可能である。

UHD は主に以下のプログラミング開発環境に対応している。

- C++
- Python
- GNURadio
- RFNoC (RF Network on Chip)
- NI LabVIEW™
- MATLAB®/Simulink®

C/C++と Python は Ettus Research の Web サイトの以下の URL に UHD のマニュアルと API Reference が公開されている。

<http://files.ettus.com/manual/index.html>

GNURadio は無線通信で頻繁に用いられる信号処理関数をまとめたライブラリーで、C/C++または Python のプログラミング環境に対応している。更に、グラフィカルなプログラミング (Flowgraph) を行う GRC (GNURadio Companion) という環境も用意されている。

RFNoC は Ettus Research が開発した GRC 環境に追加する機能で、FPGA 上に実装するプログラムとホスト PC 上で動作させるプログラムを一つの Flowgraph 上で表現しデータの受け渡し方法などを管理しプログラミングする環境である。FFT などの一般的な信号処理は RFNoC で用意されている部品を用いて GRC 上に配置すれば、FPGA のプログラミング経験が無くても FFT 演算処理を X シリーズなどの FPGA に実装してリアルタイムに演算を実行することが可能になる。

NI LabVIEW™は National Instruments の商用ソフトウェアで、グラフィカルなプログラミング開発環境である。NI-USRP というドライバソフトウェア (無償配布) を追加インストールして USRP を制御することが可能である。ホスト PC 上での演算処理に加え、FPGA 上で行う演算も LabVIEW のグラフィカルな開発環境でプログラミングできるため、リアルタイム信号処理を実装する際にも利用できる開発環境となっている。

MATLAB®/Simulink®は MathWorks 社の商用ソフトウェアで、USRP 用の API は Communications System Toolbox を追加インストールすることで提供されている。USRP を使用するには SDRu を含む MATLAB 関数または Simulink ブロックを用いて行う。

上記のプログラミング環境にはサンプルプログラムも多数用意されている。例として Linux コンソール上に USRP が受信しているスペクトルを表示するプログラムなどもある。

コンソールのプロンプトから以下のコマンドを入力して Enter を押すと、画面のようなスペクトルが表示される。これで簡易スペアナとして利用できる。

```
rx_ascii_art_dft --args "addr=192.168.10.2" --freq 98e6 --rate 5e6 --gain  
20 --bw 5e6 --ref-lvl -50
```

(USRP の Address = 192.168.10.2, 中心周波数 = 98 MHz, サンプリングレート = 5 MS/s,
ゲイン = 20 dB, 帯域幅 = 5MHz, 基準レベル = -50 dBm)

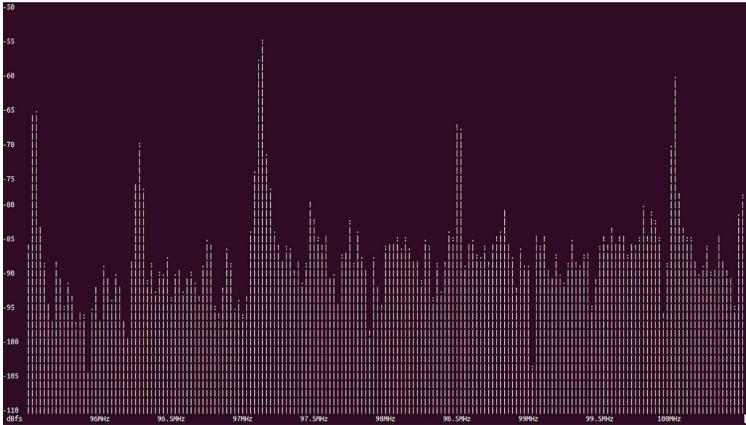


図 1・6 rx_ascii_art_dft の例

■4群-6編-4章

4-2 コグニティブ無線機試作開発

4-2-1 研究開発の概要

(執筆著者：亀田 卓) [2019年2月 受領]

Mitola や Prill, Antonesco によってソフトウェア無線の概念が発表されて以降、ソフトウェア無線機の研究開発が盛んになった。日本においてもソフトウェア無線機が 1997 年ごろから試作されるようになり、電波監視装置、マルチモード基地局装置、ITS 用車載装置などの試作機が開発された¹⁾。日本における試作機の研究開発の状況については文献 1) や 2) に詳しいが、本項ではそれ以降の研究開発、特にコグニティブ無線として発展した試作機の研究開発状況について述べる。

4-2-2 無線機試作の課題

(執筆著者：松村 武) [2019年2月 受領]

ヘテロジニアス型と周波数共用型のいずれのコグニティブ無線技術においても、理想的な無線機ハードウェアの開発という点では、ベースバンドにおいて複数の通信システムのベースバンド信号が処理でき、RF フロントエンドにおいて任意の周波数で送受信できればよい。しかし、それらの機能を小型で安価に実現するためには様々な課題がある。例えば、RF フロントエンドの小型化、高機能化には、1-3-1 節で示した高性能な広帯域アンプやミキサ、チューナブルフィルタなどの実現が不可欠である¹⁾。これらの課題に加え、特に周波数共用型コグニティブ無線機では、一次利用者である既存システムの存在を認識するためのセンシング機能もしくはデータベースアクセス機能が必須であり、更に既存システムへの与干渉を回避するための厳しいスペクトラムマスク制限が課される。

これらの要求仕様は各国の法規制に委ねられるが、一般的に非常に厳しい要件であるため、回路規模の増大に直結する。テレビ帯ホワイトスペース (TVWS) の二次利用を例に挙げると、前者のセンシング機能はノイズよりも小さいレベルの既存システムの信号を高精度に検出できる性能が求められる。その実現には高感度な RF フロントエンドと大規模な信号処理回路が必要となるため、安価で小型なセンシング用ハードウェアの開発が課題となる。また、後者のスペクトラム制限に関しては、テレビ放送帯の空きチャンネルを近隣のテレビ放送に影響を与えずに利用する必要があることから、隣接チャンネル漏洩電力 (ACLR) が非常に厳しく制限されている。具体的には、テレビ放送のチャンネル帯域幅は 6~8MHz であり、UHF 帯において 1~2% 程度の比帯域幅の非常に狭帯域で急峻な帯域制限が求められる。

これらの要求を満足するために、これまでに様々な工夫がなされたコグニティブ無線機が開発されてきた。次節では、コグニティブ無線機の具体的な試作開発事例について詳述する。

4-2-3 試作機開発

(執筆著者：松村 武, 亀田 卓) [2019年2月 受領]

(1) ヘテロジニアス型 (マルチモード型)

ヘテロジニアス型コグニティブ無線機には、複数の通信システムが処理可能なベースバンド

とそれぞれの周波数帯をサポートできる RF フロントエンドが必要である。ベースバンド回路については、通信システムごとに専用の IC が開発されており、比較的小規模で実現できる。しかし、RF フロントエンドについては通信システムごとに扱う周波数帯と性能要件が異なるため、通信システムごとに専用の無線回路を実装し、RF スイッチで切り替える構成が最も単純で実現しやすい。図 2・1 は、この構成で実現したヘテロジニアス型コグニティブ無線機である³⁾。ベースバンド信号処理部は FPGA 基板と CPU 基板で構成され、通信システムとして IEEE 802.11 a/b/g, IEEE 802.16 e, 地上波デジタルテレビ, W-CDMA, PHS に対応している。一方で、この構成の RF フロントエンドは一般的に対応する通信システムの数に比例して回路規模が増大するが、この試作機では送受信にスーパーヘテロダイン方式を採用し、共通の中間周波数 (IF) 帯を用いることで、信号帯域幅が同等のシステムで IF 回路を共用し、回路規模の削減を実現している。

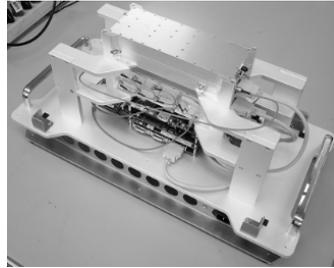
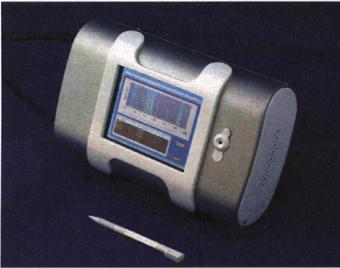


図 2・1 ヘテロジニアス型コグニティブ無線機³⁾ 図 2・2 アップコンバージョン型 RF ユニット⁴⁾

回路の共通化は RF フロントエンドの小型化に有効な手段の一つである。図 2・2 の RF ユニットは、帯域制限回路を信号帯域幅の異なる複数のシステムで共用化し、装置構成の簡略化を図っている⁴⁾。受信回路を例に説明すると、6 GHz 以下の周波数帯の受信信号は、共通帯域である 8 GHz 帯に一旦アップコンバートされ、帯域幅 100 MHz のバンドパスフィルタ (BPF) で粗く帯域制限をかける。その後、2段階のダウンコンバートを経て、IF 回路の 140 MHz 帯に周波数変換する。ここで 2 段の BPF を利用して狭域の帯域制限をかけるが、周波数コンバート時にローカル周波数を通信システムに合わせて調整することで、25 MHz 以下の範囲で所望の信号帯域幅に調整できる。ただし、8 GHz 帯における狭帯域フィルタに加え、帯域制限用に複数の BPF を実装していることから装置規模は大きい。

図 2・3 は、ソフトウェア無線技術によりマルチモード化を実現した衛星通信システム VSAT のインドアユニット (IDU) である⁵⁾。スカパーJSAT EsBird サービスと自治体衛星通信機構 (LASCOM) の衛星通信システムの 2 つのシステムに対して、ソフトウェアを切り替えることで接続できる機能を FPGA 及び CPU にて実現している。また、LTE, WiFi (IEEE 802.11 b/g/n), Ethernet (1000BASE-T) のなどの地上系通信システムのインタフェースも有している。災害時に



図 2・3 マルチモード SDR VSAT IDU⁵⁾

被災地で利用することを前提として、ディスプレイでシステムの切り替えやブラウザなどのアプリケーションの利用を可能としている。寸法 378 mm×250 mm×258.2 mm、重量 10 kg、消費電力 300 W である。

今後のヘテロジニアス型コグニティブ無線機の小型化に向けては、更なる回路の共通化を進めることが重要で、特にフィルタやアンプなどの共通化が難しいデバイスにおいて、先進的技術によるチューナブル化や集積化などの高機能化が求められる。

(2) 周波数共用型（ホワイトスペース型）

周波数共用型コグニティブ無線技術は、主にテレビ放送帯である UHF 帯の周波数を対象として研究開発が推進されてきた。本節では、特に TVWS の二次利用を目的とした無線機開発事例について概説する。

TVWS を二次利用するコグニティブ無線機は、テレビ放送などの一次利用者に割り当てられている周波数が WS であることを認識し、所望の通信システムで二次利用する。そのためには、利用可能チャンネルを認識もしくは判定する機能が必須で、その手法としては、2-6 節で述べるセンシング機能により自律的に実行する手法と、4-4 節で述べる WS データベースにアクセスし判定結果を取得する手法のいずれかが実装される。また、一次利用者への干渉を回避するために、厳しいスペクトラムマスクが課される。TVWS の二次利用では、例えば米国 FCC は ACLR の制限を、固定局の場合は $-42.8 \text{ dBm}/100 \text{ kHz}$ 、移動局の場合は $-52.8 \text{ dBm}/100 \text{ kHz}$ と絶対値で規定している⁶⁾。これに対し、英国 OfCom は ACLR の性能によって無線機をクラス分けし、ACLR 性能が高い無線機には通信機会をより多く与え、ACLR 性能が劣る無線機であっても限定された条件下において通信機会を与えられるように、柔軟な運用を目指している⁷⁾。ここでは、上述の要求を満たす周波数共用型コグニティブ無線機の開発事例として、TVWS の二次利用を目的とした初期の開発事例に加え、IEEE 802.11 af、IEEE 802.22 に準拠した試作機を紹介する。また、TVWS で LTE システムを利用する無線機や TVWS 以外の周波数帯を対象とした無線機の開発事例について述べる。

(a) 初期の開発事例

TVWS の二次利用を目的とした初期の無線機は、当時の米国 FCC の法規制がセンシング機能によるチャンネルの利用可否判定を必須機能としていたことから⁸⁾、センシング機能の実装を前提として開発されていた。また、当時は IEEE 802.11 af などの TVWS 通信システムが標準化作業の道半ばであったため、初期の開発事例は二次利用システムとして既存の通信システムや独自の通信システムを用いたものが多い。

例えば、図 2・4 の Shared Spectrum Company (SSC) が開発した XG 無線システムの無線機は、225~600 MHz の周波数帯を対象に既存システムをセンシングして利用可否を判定し、通信には WiMAX の物理層をベースと

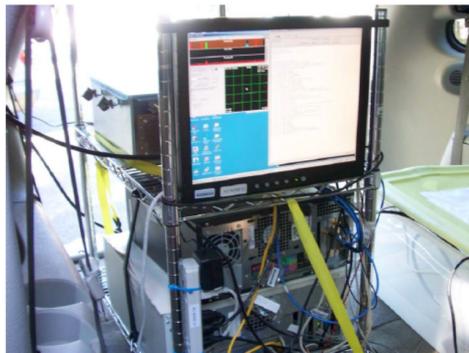


図 2・4 SSC が開発した XG 無線機⁹⁾

した通信システムを 1.75 MHz の帯域幅で使用する⁹⁾。

また、図 2・5 の Motorola が開発したセンシング機能搭載の無線機は、位置情報と併せて利用可能チャンネルの判定を行う機能が実装されており、通信システムは IEEE 802.11 a をベースとしていた¹⁰⁾。この装置のセンシング性能としては、FCC が規定するデジタルテレビ放送の検出性能要件である $-116 \text{ dBm}/6 \text{ MHz}$ を達成している。

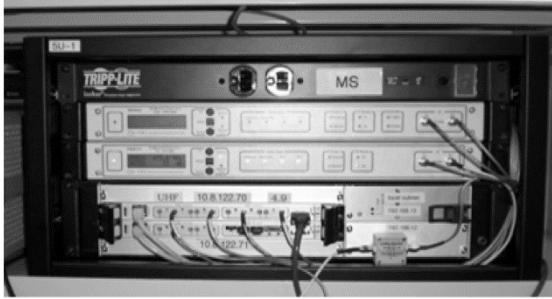


図 2・5 Motorola が開発した試作無線機¹⁰⁾

また、図 2・6 の NICT が開発した無線機は、シンガポールのデジタルテレビ放送の検出性能である $-120 \text{ dBm}/8 \text{ MHz}$ を概ね満足し、BPSK もしくは OFDM 信号による通信が可能である¹¹⁾。SSC が開発したセンシング機能の詳細は明かされていないが、Motorola と NICT が開発したセンシング機能はいずれも FPGA で実現しており、高感度なセンシング性能を達成するために、非常に大規模な装置構成となっている。

なお、2010年9月に FCC がセンシング機能を必須要件から削除したため⁶⁾、それ以降の TVWS を利用する無線機の多くはデータベースアクセスによってチャンネル利用可否を判定している。

(b) IEEE 802.11 af

NICT の主導のもと、様々な IEEE 802.11 af 準拠の無線機が開発されてきた。図 2・7(a) は世界初の IEEE 802.11 af 準拠の無線機である¹²⁾。この無線機は、RLSS を介して WS データベースにアクセスし、一次利用者に干渉を与えないチャンネルを自動的に選択するマネジメント機能が実装されている。初期試作機のため、送信出力は $+20 \text{ dBm}$ であり、FCC 及び Ofcom のスペクトラムマスクには準拠していないが、その後、改良を加えた様々な後継機が開発されている。例えば、図 2・7(b) は、出力を抑えて小型化し、FCC 及び Ofcom が要求するスペクトラムマスクを満足した無線機である¹³⁾。また、図 2・7(c) は高周波部を再設計し、 $+30 \text{ dBm}$ の高出力化を実

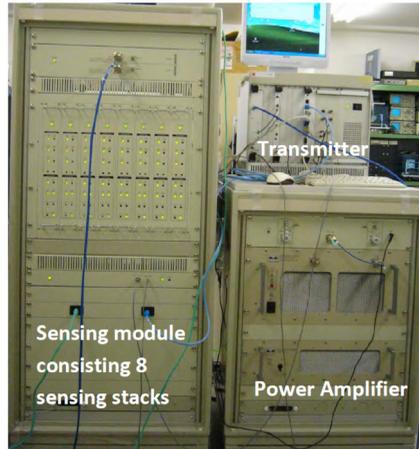


図 2・6 NICT が開発した試作無線機¹¹⁾

現しつつ Ofcom の要求するスペクトラムマスクを満足している¹⁴⁾。更に将来の商用化を目指し、IEEE 802.11 af 規格のベースバンド IC を独自に開発し、それを実装した図 2・7(d)のドングル型無線機を開発している¹⁵⁾。この無線機は、アンテナを筐体と一体化させることで、それまでの無線機と比較して大幅な小型化に成功している。最大送信電力は +20 dBm で、Ofcom の要求するスペクトラムマスクに準拠している。また、送信電力を +16 dBm に抑えれば、FCC の要求するスペクトラムマスクも満足する。

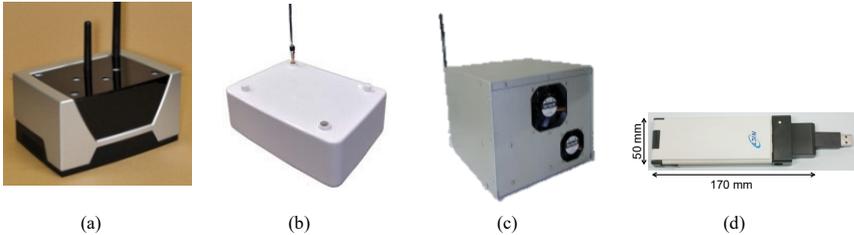


図 2・7 NICT が開発した IEEE 802.11af 準拠無線機^{12)~15)}

(c) IEEE 802. 22

IEEE 802.22 準拠の無線機は、耐災害などの広域ネットワークシステムの構築を目的として開発された事例がある¹⁶⁾。図 2・8 に日立国際電気が開発した無線機の外観を示す。この無線機は、5 つのトランシーバユニットを収容でき、最大 5 チャンネルを同時に運用できる。トランシーバユニットの出力は 0 dBm であるが、外付けパワーアンプを接続することで +30 dBm まで増幅できる。ただし、ベースバンド回路が FPGA で実装されており、また FCC が要求するスペクトラムマスクを満足するために形状の大きいフィルタを接続する必要があるため、装置規模は大きい。これに対し、1 チャンネルのみの運用に限定されるが、図 2・9 に示す小型無線機を京大が開発している¹⁷⁾。この無線機は、主な物理層を DSP に実装することで小型化及び低廉化を実現している。DAC/ADC、デジタルフィルタ、バッファメモリなど並列信号処理やリアルタイム信号処理に関する機能は FPGA を用いるが、規模の小さい安価な FPGA で実現できる。小型ながら最大送信出力は +30 dBm であり、Ofcom が要求するスペクトラムマスクに準拠している。また、送信出力を +24 dBm に抑えることで、FCC が要求するスペクトラムマ

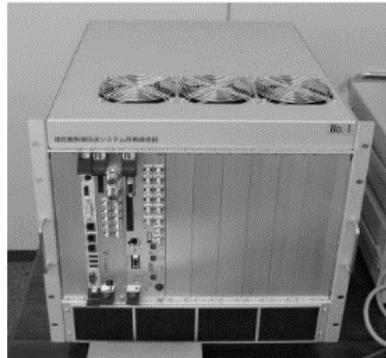


図 2・8 日立国際電気が開発した IEEE 802.22 準拠無線機¹⁶⁾



図 2・9 京大が開発した IEEE 802.22 準拠の小型無線機¹⁷⁾

スクを満足する。

(d) LTE

LTE システムのデュプレクス方式は TDD 方式と FDD 方式があるが、FDD 方式は複数のチャンネルを同時に利用する必要があるため、WS 通信システムとの相性が良くないとされている。また、利用可能なチャンネルが場所や時刻で異なることから送受信間のアイソレーションを常に確保する設計が難しく、TVWS LTE システムの検討例の多くは TD-LTE 方式を採用している。加えて、LTE システムでは基地局と端末で機能が異なるため、システム検証のためにはそれぞれを開発する必要がある。更に、基地局はコアネットワークと接続して運用する必要があり、システム構成が大規模となるため、実機の開発事例は多くはない。図 2・10 は Huawei が開発した TVWS TD-LTE システム¹⁸⁾である。このシステムは、Huawei 製のベースバンドユニットに独自に開発した UHF 帯の RF フロントエンドユニットを接続した基地局と、独自に開発した UE、コアネットワークで構成される。また、基地局にはスペクトラムマネジメント機能とセンシングユニットが実装されており、センシング結果とデータベースからの情報に基づいて利用可能チャンネルを判定し、最適なチャンネルを選択する。なお、文献 18) では無線機の詳細な性能については言及されていない。

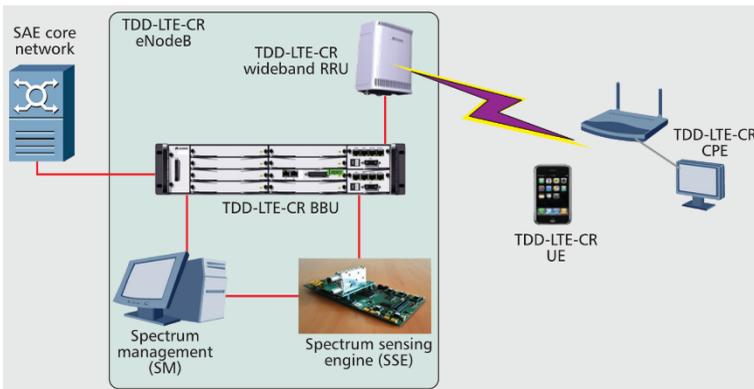


図 2・10 Huawei が開発した TVWS TD-LTE システム¹⁸⁾

FDD 方式には前述の課題があるが、利用可能チャンネルが基地局と端末の位置で異なる場合には、上りと下りで異なるチャンネルを利用する FDD 方式は非常に有効な手段となる。しかし、TVWS における FDD 方式の適用では、任意のチャンネルの組合せで送受信間のアイソレーションを十分に確保する回路を実装する必要がある。NICT は、これを解決するための技術として周波数可変デュプレクサを開発し、それを無線機の RF フロントエンドに実装することで TDD 及び FDD のデュアルモードに対応した LTE システムを開発している^{19)~21)}。

図 2・11 に基地局及び端末を示す。この無線機は、Band 7 及び Band 38 (それぞれ FDD 方式及び TDD 方式、いずれも 2.6 GHz 帯) で動作する既存のデュアルバンド LTE 基地局及び端末の信号を TV 帯に周波数変換する方式を採用している。周波数可変デュプレクサは、広帯域カプラとチューナブル BPF を表面実装部品で構成したもので、送信回路、受信回路の双方にチュ

ーナブル BPF を実装し、それぞれの周波数に合わせてパスバンドを調整する。更に、BPF の減衰極を対向する周波数に調整することで、送受信間で十分なアイソレーションを確保する。この技術により、送受信周波数間隔に 80 MHz 以上の制限があるものの、TVWS で運用する FD-LTE を実現している。なお、送受信回路双方のチューナブル BPF のパスバンドを同一周波数に設定することで、TD-LTE 方式の運用も可能である。最大送信電力は基地局が +30 dBm、端末が +20 dBm であり、Ofcom の要求するスペクトラムマスクを満足している。



図 2・11 NICT が開発した TDD/FDD デュアルモード対応 TVWS LTE 無線機 ²⁰⁾

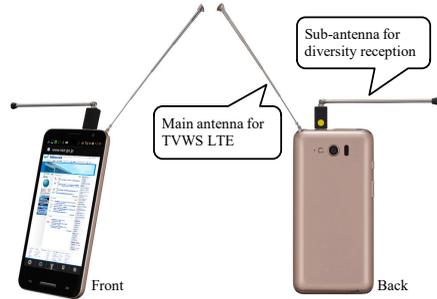


図 2・12 NICT が開発したスマートフォン型 TVWS LTE 無線機 ²²⁾

TVWS LTE 対応無線機の小型化を実証した事例としては、NICT が開発した TD-LTE で通信可能なスマートフォン型無線機が挙げられる ²²⁾。図 2・12 に外観を示す。この端末は商用 LTE ネットワークにも対応しており、状況に応じて商用バンドと TVWS を切り替えて使用できる。内蔵バッテリーのみで運用でき、サイズや重量を含む一般仕様は市販のスマートフォンと同等である。

(e) その他の開発事例

TVWS 以外の周波数帯において、センシングのみでなく信号の送受信をも含む開発事例としては、ダブリン大学トリニティ・カレッジが開発した 2.9 GHz まで対応可能な周期定常性に基づく信号認識を応用したシステムがあり、2.3 GHz 帯の WiMAX を念頭に置いた性能評価がなされている ²³⁾。

■参考文献

- 1) 鈴木, 荒木: “ソフトウェア無線機とその国内における開発の現状,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J84-B, no.7, pp.1120-1131, 2001.7.
- 2) 原田: “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, 2008.11.
- 3) H. Harada: “A small-size software defined cognitive radio prototype,” in Proc. IEEE PIMRC 2008, pp.1-5, Sep. 2008.
- 4) 深谷, 原田, 船田, 井家上: “共通周波数帯アップコンバージョンを利用したコグニティブ無線機用マルチバンド周波数ダウンコンバージョン方式,” 信学技報, vol.107, no.452, SR2007-79, pp.81-87, 2008.1.
- 5) S. Kameda, T. Okuguchi, S. Eguchi, and N Suematsu: “Development of satellite-terrestrial multi-mode VSAT using software defined radio technology,” in Proc. APMC 2014, pp.411-413, 2014.
- 6) FCC: “Second memorandum opinion and order,” FCC 10-174, Sep. 2010.

- 7) Ofcom : “Regulatory requirements white space devices in the UHF TV band,” Jul. 2012.
- 8) FCC : “Second report and order and memorandum opinion and order,” FCC 08-260, Nov. 2008.
- 9) M. McHenry, E. Livsics, T. Nguyen, and N. Majumdar : “XG dynamic spectrum sharing field test results,” in Proc. DySPAN 2007, pp.676-684, 2007.
- 10) R. Ahuja, R. Corke, and A. Bok : “Cognitive radio system using IEEE 802.11a over UHF TVWS,” in Proc. DySPAN 2008, pp.1-9, Oct. 2008.
- 11) M.A. Rahman, C. Song, and H. Harada : “Development of a TV white space cognitive radio prototype and its spectrum sensing performance,” in Proc. CROWCOM 2011, pp.231-235, Jun. 2011.
- 12) NICT : “テレビの周波数を利用した国際標準無線 LAN システムの実証実験に成功,” 2012.10.
<https://www.nict.go.jp/press/2012/10/16-1.html>
- 13) K. Mizutani, et al. : “IEEE 802.11af indoor experiment in UK Ofcom TVWS trial pilot program,” in Proc. IEEE VTC2015-Spring, pp.1-5, May 2015.
- 14) T. Matsumura, et al. : “Long-haul communication trial in London TV white-space with IEEE 802.11af-based high power prototype,” in Proc. WPMC 2015, pp.1-5, Dec. 2015.
- 15) T. Matsumura, et al. : “Prototype of IEEE 802.11af-based baseband IC enabling compact device for wireless local area network systems in TV white-spaces,” IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, vol.3, no.3, pp.450-463, 2017.
- 16) K. Hasegawa, et al. : “IEEE 802.22-based WRAN system for disaster-resistant network systems,” in Proc. R10-HTC, pp.264-269, Aug. 2013.
- 17) T. Matsumura, H. Ueno, K. Mizutani, and H. Harada : “Compact IEEE 802.22-based radio equipment enabling easy installation for regional area network system using TV white-spaces,” in Proc. IEEE LANMAN 2017, pp.1-6, Jun. 2017.
- 18) J. Xiao, R.Q. Hu, Y. Qian, L. Gong, and B. Wang : “Expanding LTE network spectrum with cognitive radios: concept to implementation,” IEEE Wireless Communications, vol.20, no.2, 2013.
- 19) 松村, 原田 : “テレビ帯ホワイトスペース対応周波数可変デュプレクサおよび広帯域小型アンテナに関する一検討,” 2014 信学総大, B-17-43, 2014.
- 20) T. Matsumura, K. Ibuka, K. Ishizu, H. Murakami, and H. Harada : “Prototype of FDD/TDD dual mode LTE base station and terminal adaptor utilizing TV white-spaces Dual-mode,” in Proc. CROWCOM 2014, pp.317-322, Jun. 2014.
- 21) K. Ibuka, et al. : “Development and field experiment of white-spaces LTE communication system in UK digital terrestrial TV band,” in Proc. VTC 2015-Spring, pp.1-5, May 2015.
- 22) T. Matsumura, et al. : “Prototype of smart phone supporting TV white-spaces LTE system,” in Proc. CROWCOM 2015, pp.562-575, 2015.
- 23) P.D. Sutton, K.E. Nolan, and L.E. Doyle : “Cyclostationary signatures in practical cognitive radio applications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.26, no.1, pp.13-24, 2008.

■4群-6編-4章

4-3 コグニティブ無線/ソフトウェア無線向けソフトウェア

(執筆著者：藤井威生) [2019年2月 受領]

4-3-1 コグニティブ無線を支えるソフトウェア

コグニティブ無線は周囲の環境に合わせて、無線システムの通信パラメータや通信機能を適応的に変更することで、周波数利用効率や通信効率の高い無線運用を行う。このように環境に適応したパラメータ・機能変更には、環境を検出するハードウェアの情報を集約し、判断するためのソフトウェアや、パラメータを変更するソフトウェア、ハードウェアの機能を再構成するためのソフトウェアなど様々なソフトウェアが必要となる。広い意味では、無線環境の観測や観測結果を集約するためのサーバやデータベースで利用するソフトウェアもコグニティブ無線を実現するためのソフトウェアということもできるが、このような汎用ソフトウェアは、本稿の対象外とする。また、無線パラメータを変更するソフトウェアは、従来の無線システムでも使われてきたような、無線チップを制御するためのマイコン用ソフトウェアや組み込みハードウェア向けのソフトウェアを利用することも可能である。

一方、ハードウェア自身をソフトウェアで制御するソフトウェア無線機は、そのソフトウェア無線機の構成によって、利用するソフトウェアが変わってくる。例えば、ハードウェアの回路をハードウェアに合わせて再構成するような FPGA (Field Programmable Gate Array) や DSP (Digital Signal Processor) のためのソフトウェアがある。FPGA はデジタル回路構成をプログラムで再構成できる集積回路であり、通常はハードウェア記述言語 (HDL: Hardware Description Language) でその回路構成を記述することで機能変更が可能となる。なかでも VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) は IEEE で標準化されたハードウェア記述言語として活用されている。DSP はデジタル信号処理に特化したマイクロプロセッサで、内部のプロセッサでデジタル信号処理を行うことができる。DSP は回路を再構成するだけでなく、中の信号処理アルゴリズムをプログラムで制御できる特徴がある。C や C++ などの高級言語を用いて信号処理アルゴリズムを記述するソフトウェアが準備されており、信号処理アルゴリズムの再構成が可能となる。このような FPGA や DSP を用いた機能の再構成は、製品開発時やソフトウェアアップデートに合わせて実施することになるが、無線通信の周辺環境に合わせてその機能を適応的に変化させる用途で利用するには再構成に時間がかかるなどの課題がある。

そこで、近年では、パラメータや機能の再構成は、接続された計算機の CPU を活用し、高周波での信号処理や増幅器など CPU 処理が難しいものを FPGA などで構成するように機能分担当したソフトウェア無線機が多数登場している。特に USRP などの汎用ソフトウェア無線機は、**図 3-1** に示すように PC などの汎用コンピュータと接続して、ベースバンド処理を PC の CPU を使い、CPU では処理しにくい無線高周波や増幅器などを FPGA や DSP を搭載した専用ハードウェア (本稿では汎用ソフトウェア無線プラットフォームと呼ぶ) で実現する構成となっている。このような構成とすることで、複雑な信号処理やベースバンド波形処理などは、汎用 CPU を用いて実行するため、高級言語である C++ や python などを用いて機能を実装することが可能となる。CPU で実行するベースバンド処理部を構築するためのソフトウェアには、専用ソフ

トウェア (GNURadio や SDR# など) や商用ソフトウェア (Labview や Matlab など) がある。これらのソフトウェアには重要な無線機能が既にモジュールとして、準備されているため、モジュールを組み合わせることで、簡単にベースバンド信号を生成することができる特徴を持つ。



図 3・1 汎用ソフトウェア無線機ハードウェア構成

本節では、コグニティブ無線向けソフトウェアのなかでも、ベースバンド処理を汎用 PC の CPU で、高周波は無線信号処理を汎用ソフトウェア無線プラットフォームに機能分担する構成について主に扱うこととする。なお、具体的なソフトウェアインストール方法や必要なハードウェアや PC のスペックの情報は、変化が激しいこともあり、各自調査いただければと思う。

4-3-2 ソフトウェア無線プラットフォーム

本節で取り扱うソフトウェア無線機は、PC が持つ汎用 CPU でベースバンド処理を実施する部分と、ベースバンド信号を D/A (Digital to Analog) 変換してアナログ信号に変換しアップコンバートして無線信号として送信するソフトウェア無線プラットフォーム部に分ける構成のものを取り扱う。

受信機におけるソフトウェア無線プラットフォーム部では、無線信号をダウンコンバートした後、A/D (Analog to Digital) 変換してデジタル信号に変換することで、ベースバンド信号に戻す機能も担う。ソフトウェア無線プラットフォームとしては、図 3・2(a) に示す米国 Ettus 社が開発している USRP (Universal Software Radio Peripheral) が知られており、販売は National Instruments 社でも取り扱っている。USRP はいくつかの種類があるが、ベースバンド信号処理を行う PC との間は、イーサネット、PCI Express、USB など接続する構成となっている。また、一部には筐体内に PC が組み込まれており、単体で動作する製品も準備されている。

USRP と同様のソフトウェア無線プラットフォームは他社からも様々な製品が販売されているが、少し変わったものとして図 3・2(b) に示す PC 向けのテレビ放送受信機 (主にワンセグなどの携帯向け放送の受信) で用いられる USB ドングルでも受信専用ながらソフトウェア無線機としての機能があることが知られている。これは、テレビ放送受信のための USB ドングルが、ハードウェアとしての映像再生機能を持たず、ベースバンド変換以降の処理を PC の CPUで行うところから、構造がソフトウェア無線プラットフォームと同じであることによるものである。受信機能のみではあるが、価格が安価であるため、簡易受信装置や無線観測装置としての応用が可能である。Realtek 社の RTL 2832 U というソフトウェア無線向け IC を搭載している USB ドングルで動作することから、RTL-SDR という名前でも広く知られており、後述のソフトウェア無線のオープンソースソフトウェアである GNURadio の利用が可能である。USRP が

10万円以上の価格であるのに対して RTL-SDR の端末は、1500円程度で入手可能なため、ソフトウェア無線機を試したいという入門者に人気がある。使い方や性能を紹介する多数のウェブサイトがあり、初心者でも簡単に受信機設計が可能である。



(a) USRP



(b) デジタル放送受信用 USB ドングル

図 3・2 汎用ソフトウェア無線プラットフォーム

従来の無線機設計は、職人芸に頼るところも多く、試作には多額の資金と経験が必要であったが、このような汎用的なソフトウェア無線プラットフォームの登場は、無線機試作に対するハードルを大きく下げることになった。特に、大学など大型の資金を投入しにくい機関や個人でもソフトウェア無線機的设计や実証ができるようになったことは一昔前では考えられないことである。また、企業や資金力のある研究機関でも短期間での実証ができるようになるなど、無線技術の研究を大きく変える潜在性を備えている。

4-3-3 オープンソースソフトウェア及びフリーウェア (GNURadio と SDR#)

このようなソフトウェア無線プラットフォームを使ってソフトウェア無線機を設計するには、変復調や多重化などベースバンド信号を生成するためのソフトウェアが必要となる。このようなソフトウェアにはオープンソースやフリーウェアとして誰でも無料で利用できるソフトウェアと、高機能な信号処理や高度なユーザインタフェースを持つ商用ソフトウェアがある。ここでは、まずオープンソフトウェアとして GNU プロジェクトをベースとしてボランティアによる開発が進められている GNURadio と、無線環境を観測する機能に特化して USB ドングルなど安価なソフトウェア受信機と共に利用する SDR#が知られている。GNURadio はオープンソースソフトウェア、SDR#は自由にインストールして利用できるフリーウェアのソフトウェアである。

GNURadio はソフトウェア無線を構成するための信号処理ブロックを提供する開発ソフトウェアであり、オープンソースとして無料で使えるところに特徴がある。Linux や Windows 向けのソフトウェアが公開されており、ベースバンド信号処理を PC 上で行うことができる。ただし、実際に無線通信として無線電波を扱うには、アナログ波形を生成して RF 信号をやり取りする必要があるため、D/A 変換、A/D 変換、フィルタ処理、RF 変換を行うためのハードウェア (ソフトウェア無線プラットフォーム) が別途必要になる。GNURadio とともに利用するハードウェアとしては USRP が有名であり、親和性が高い。GNURadio は Python 及び C++ で記述された各種機能を実現するモジュールで構成され、高度なベースバンド信号処理を実現することができる。USRP と PC の間は、イーサネット、PCI Express や USB で接続することで、PC 内

で生成されたデジタル信号を USRP 内でアナログ信号に変換しアップコンバートして無線信号とする仕組みになっている。

GNURadio では無線変復調に必要な機能がモジュール化されており、そのモジュールを接続することで、専門的な無線機設計の知識が少なくても無線機を設計できる特徴を持つ。各モジュールは通常 C++ で記述され、機能ごとにブロック化されている。これらのブロックを Python のプログラム上で、接続することで無線機を構成するのがシンプルな方法である。一方、GNURadio では、視覚的にモジュールの接続を確認しながら簡易に Python のプログラムを記述する支援ツールとして GNURadio Companion (GRC) と呼ばれるツールが準備されている。GRC はグラフィカルなインターフェースを持ち、準備されている機能ブロックを互いに接続することで無線機設計を行うことが可能である。完成したブロック図をもとに、Python のプログラムを生成し、プログラムを動作させることが可能となる。

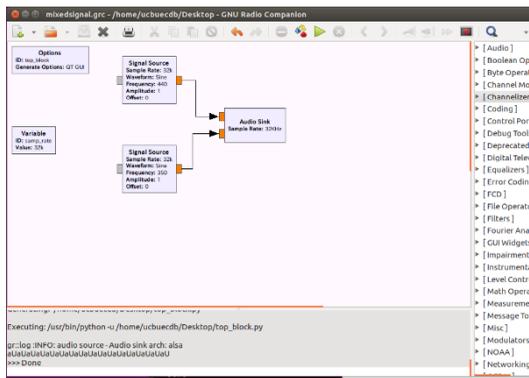


図 3・3 GRC (GNURadio Companion)

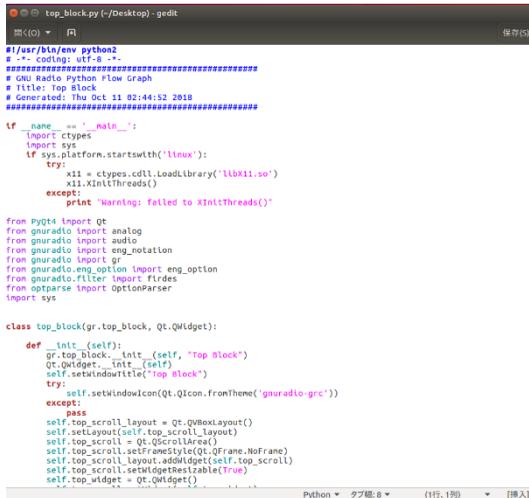


図 3・4 GRC から変換された Python コードの一部

GRCの画面を図3・3に、変換されたPythonソースコードの一部を図3・4に示す。GRCは信号の流れについてブロックを線で接続することで直感的な信号処理設計が可能となる利点がある。一方、Pythonは細かい処理順序の調整や、ブロック化されていない機能を追加する際などに利便性が高いが、ある程度のプログラミング経験がないと、無線機設計に対する難易度が高い。

一方、SDR#は、受信機能に特化したソフトウェア無線機のベースバンド信号処理を行うソフトウェアであり、ラジオ信号の復調機能や、スペクトラムアナライザ機能など、ソフトウェア無線機を受信機として利用する場合に便利な機能を備えている。特に、デジタルテレビ放送用のUSBドングルと組み合わせて利用することで、安価にソフトウェア無線の機能を試すことができる。無線信号のスペクトラムを観測する機能や、AMやFMラジオの音声を復調する機能なども備えており、無線を体感するための教材としての利用も可能である。図3・5にFMラジオを受信中のSDR#の画面を示す。

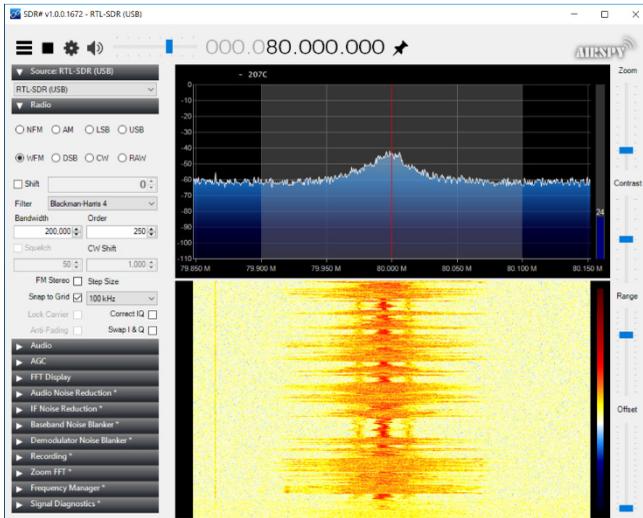


図3・5 SDR# (FMラジオ受信中)

4-3-4 商用ソフトウェア (LabVIEWとMatlab)

ここまで紹介してきたソフトウェアはオープンソースやフリーウェアなど、無料で使えるソフトウェアであったが、USRPと組み合わせて利用するソフトウェアには、ライセンス料を支払って利用する商用ソフトウェアも複数準備されている。まず、LabVIEWはUSRPの販売を行っているNational Instruments社が販売しているシステム開発ソフトウェアである。テスト、計測、制御が必要となるアプリケーション開発向けに作られており、計測器と連携する機能や、観測結果に対して信号処理を行う機能などを備えている。GRCと同様にグラフィカルなインタフェースを備えており、比較的簡単に高機能なアプリケーション開発を可能とするソフトウェアである。特にUSRPとの連携機能を強化したLabVIEW Communicationsが無線機のプロト

タイプ設計用の開発環境として準備されており、通信システムの試作が短時間で行うことが可能となる。

一方、MATLAB は数値解析ソフトウェアとして、米国の Math Works 社が開発しているソフトウェアであり、行列計算のような複雑な演算から、データ解析、信号処理を扱うことができる。無線通信分野で MATLAB は強力なシミュレーションツールとして名を知られているが、ハードウェアとの連携機能にも力を入れている。ソフトウェア無線関連では、FPGA の設計から実装までを分かりやすいユーザインタフェースで実行する機能も備えている。また、ソフトウェア無線プラットフォームと連携し、ベースバンド信号処理を実行する機能も備えている。MATLAB は行列演算を得意とするところから、複数アンテナによる信号処理が必要な MIMO の実装などが容易となることもあり、無線物理層の実験を中心に活用されている。

4-3-5 システム特化型ソフトウェアを利用した実用システムへの応用

ここまで、SDR を設計する汎用ソフトウェアについて、無料で利用できるものと、商用のソフトウェアについて説明してきた。一方、近年では汎用ソフトウェア無線プラットフォームを用いて実用システムを構築する試みが始まっている。代表的なものとして、携帯電話の基地局を汎用ソフトウェア無線プラットフォームで構築するオープンソースのプロジェクトが複数存在する。まず、GSM の基地局を汎用ソフトウェア無線プラットフォームにより、実現するものとして OpenBTS がある¹⁾。OpenBTS は Linux で動作するソフトウェアであり、ベースバンド処理を PC 上の CPU で実現し、D/A 変換から RF 処理までを USRP などのソフトウェア無線プラットフォームを利用するものである。第 2 世代の携帯電話規格である GSM をターゲットにして開発されたオープンソースであるが、第 3 世代の携帯電話規格である Wideband CDMA に拡張した OpenBTS-UMTS も開発されソースコードが公開されている。

第 4 世代移動通信である LTE (Long Term Evolution) では、更にソフトウェア無線利用の動きが加速しており、商用システムでも複数の無線規格を収納する基地局などに部分的にソフトウェア無線技術が利用されている例がある。更に、ソフトウェア無線のためのオープンソースのソフトウェアも複数開発が進められている。一つは、米国の IT 企業である Facebook が主導して、発展途上国でのセルラーシステム普及を目指した Telecom Infra Project (TIP) である。多数のオペレータやベンダがメンバとなりオープンソースのソフトウェア開発を行っている。ハードウェアとソフトウェア双方について、無線基地局からバックホールネットワークまでをオープン化する動きであり、ソフトウェア、回路図更に CAD データをオープンソース化して共有することで、費用対効果の高いセルラーネットワークを実現することを目的としたプロジェクトである。二つ目は欧州の大学が主導しオペレータ、ベンダ、大学などがメンバとなって開発されている OAI (Open Air Interface) と呼ばれるプロジェクトである^{2),3)}。こちらは USRP などの汎用ソフトウェア無線プラットフォームと PC の CPU によるベースバンド信号処理を組み合わせて LTE 基地局を構築するプロジェクトである。既に実証システムが構築され商用利用に向けた動きも活発である。第 5 世代移動通信や IoT 向けのソフトウェア開発も始まっている。

一方、汎用 CPU とソフトウェアプラットフォームの利用は、インタフェース部での処理遅延があり、無線 LAN などで行われているキャリアセンスを用いた多元接続方式である CSMA (Carrier Sense Multiple Access) の実装が難しいという課題もある。これは、周辺の無線信号を

観測し、周囲に他の無線機が通信していないことを確認して通信を始める手法であるが、観測後に PC で検出処理した後に、信号を送信するまでの遅延が大きく、リアルタイムでの動作が難しい。そのため、無線 LAN へのソフトウェア無線技術の応用には、汎用ソフトウェアプラットフォームを持つ FPGA にキャリアセンス機能を盛り込むなどの工夫が必要になる。

■参考文献

- 1) M. Iedema, Getting Started with OpenBTS : “Build Open Source Mobile Networks,” O'Reilly Media, Jan. 2014.
- 2) C.Y. Yeoh, M.H. Mokhtar, A.A.A. Rahman, and A.K. Samingan : “Performance study of LTE experimental testbed using OpenAirInterface,” Proc. ICACT 2016, Pyeongchang, South Korea, Jan. 2016.
- 3) H. Shen, X. Wei, H. Liu, Y. Liu, and K. Zheng : “Design and implementation of an LTE system with multi-thread parallel processing on OpenAirInterfacePlatform,” Proc. VTC 2016-Fall, Montreal, Canada, Sep. 2016.

■4群-6編-4章

4-4 ホワイトスペースデータベースと通信実証試験

(執筆著：石津健太郎) [2019年2月 受領]

4-4-1 ホワイトスペースデータベースの概要

ホワイトスペースデータベース (WSDB) は、テレビホワイトスペースを利用する際に、位置や時間に応じたテレビチャンネルの利用可否を判断する装置である。WSDB が扱う入力情報やその処理方法、出力情報は、各国の電波制度などに応じて求められる項目が異なる。入力方法は、IETF PAWS に代表されるように機器が通信するための通信インタフェースを設け、人間を介さずに情報のやり取りを可能にするものや、ウェブブラウザなどを介して人間が介在して情報の検索や機器の設定を行うものなど、様々な実装方法が考えられる。

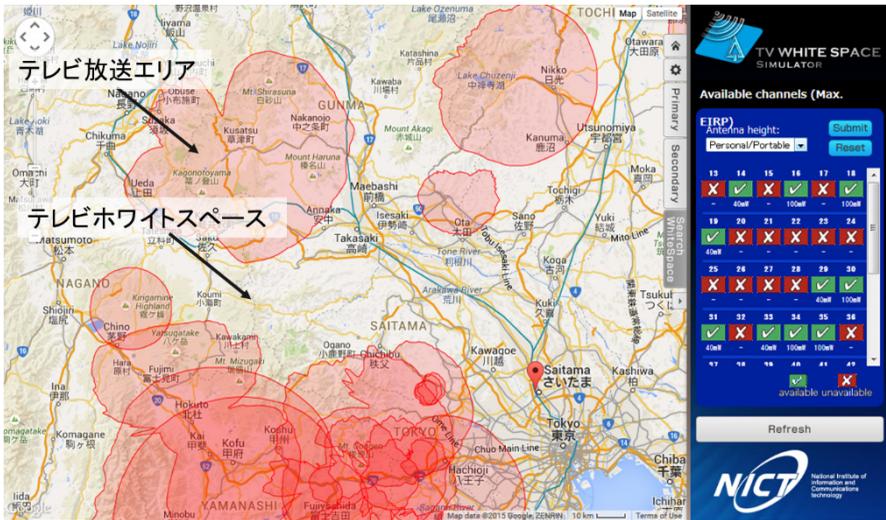


図 4-1 テレビホワイトスペースによる計算結果の表示例

(Google Maps を背景としてその上に情報を重ねて表示)

NICT が開発した WSDB の一例を図 4-1 に示す。これは、日本国内の地形を対象として、ウェブブラウザに表示された地図上でピンにより位置を指定してすることにより、各テレビチャンネルにおける無線通信の運用可能性を検索できるようにしたものである。画面左には、設定画面で指定した特定のチャンネルにおけるテレビ放送エリアが赤い図形により表示されている。図からも分かるように、山などの地形に応じて電波の伝搬が異なるため、テレビ放送エリアは必ずしも円ではない。この赤い図形の範囲外であれば、テレビ放送が視聴されていないと判断し、通信用の無線機を運用してもよいと考えることができる。また、画面右には、地図上で指定した位置における各テレビチャンネルの利用可否が一覧として表示される。緑の表示が利用可能、赤の表示が利用不可を示す。なお、利用可能の場合には、許容される送信電力も併

せて表示されている。この図ではさいたま市付近を指定しているため、その位置におけるチャンネル利用可否が表示されている。

なお、この WSDB では、米国 FCC が規定するテレビホワイトスペース向けの放送エリアの計算方法に従い、テレビ放送エリアの描画及び利用可否の判定を行っている。この際、標高は国土院が提供する「数値地図 50 m メッシュ (標高) I, II, III」に基づいている。また、送信所の位置や送信電力などテレビ放送に関する情報は、「2011 年全国デジタルテレビジョン・FM・ラジオ放送局一覧」(株式会社 NHK アイテック) に基づいている。

同一チャンネルにも関わらず複数の放送エリアが重複して表示されているのは、(1) 利用している電波伝搬の計算方法が自由空間損失に比較的近く実際の放送エリアより広い、(2) 電波干渉リスクを下げるための空間的マージンの概念が導入され計算に組み込まれている、(3) 地上波デジタル放送では垂直と水平の異なる偏波を利用して同一チャンネルの周波数を共用している、ことが主な原因である。

同じ WSDB を利用し、日本全国においてテレビチャンネル 13 と 52 において描画したテレビ放送エリアを図 4・2 に示す。図 4・2 から分かるように、チャンネルによりテレビ放送エリアが大きく異なることが分かる。これは、現在、日本における地上波デジタル放送は 13 チャンネルから 52 チャンネルの合計 40 チャンネル分を利用しているが、低い周波数は県域放送に利用されている場合が多く、送信電力が大きいため、送信電力が小さいことが原因である。高い周波数は、限定された地域を補完して放送している場合が多いため、送信電力が小さく、放送エリアが限定されている。このことから分かるように、各チャンネルの利用可否は地点により大きく異なり、WSDB を用いて計算しなければ正しく把握することが困難であると言える。

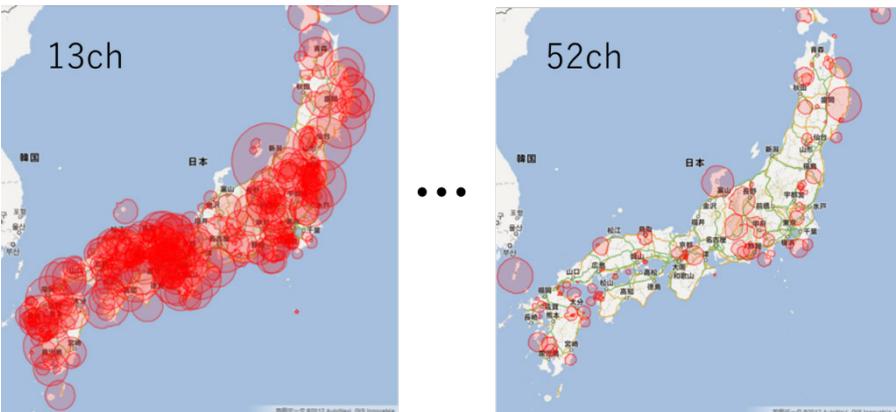


図 4・2 2つのテレビチャンネルにおけるテレビ放送エリアの違い

4-4-2 英国におけるテレビホワイトスペース試行

英国の電波規制当局である Office of Communications (Ofcom) は、ホワイトスペース利用の制度化に向け、その枠組みを試行して検証する TV White Spaces Pilot (以下、パイロット) と呼ばれるプロジェクトを企画し、2013 年にその参加者を公募した。Ofcom では、ホワイトスペー

スにおける利用可能チャンネルはホワイトスペースデータベース（以下、データベース）が管理し、Ofcom が提供する情報に基づき、通信を行う無線通信デバイス（以下、デバイス）の位置に応じた利用可能チャンネルを計算してデバイスに提供し、デバイスはその情報に基づいて運用するチャンネルを決定する、という枠組みが提案された。本パイロットでは、データベースの提供者とデバイスの運用者をそれぞれ公募してこの枠組みを検証することが目的である。NICT では、これまでにホワイトスペース用に研究開発したシステムの性能を確認して技術課題を明確にするため、本パイロットのデータベースとデバイスの両方について参加することとした。なお、本稿に記載する英国のホワイトスペースに関する内容はパイロット実施期間の情報に基づいたものであり、現在はパイロットの実施結果などに基づき更に検討を進め、フレームワークや条件などが修正されて制度化が完了している。

英国におけるテレビ放送には 470～790 MHz が割り当てられている。チャンネル当たりの帯域幅は 8MHz であって、チャンネル番号は 21 から 60 までの 40 チャンネルである。この周波数帯では、本来のテレビ放送 (Digital Terrestrial Television : DTT) の他に、Programme Making and Special Events (PMSE) と呼ぶ利用方法が既に始まっている。PMSE は、音響設備のワイヤレスマイクや収録設備のトークバックなど、番組制作などの目的で利用する音声伝送システムであり、ホワイトスペースにおいて DTT に影響を与えない範囲で許可される。PMSE を利用するためには事前に申請して費用を支払い、免許を受ける必要がある。ホワイトスペースにおける通信は、これらの DTT 及び PMSE に混信を与えずに行うこととされている。

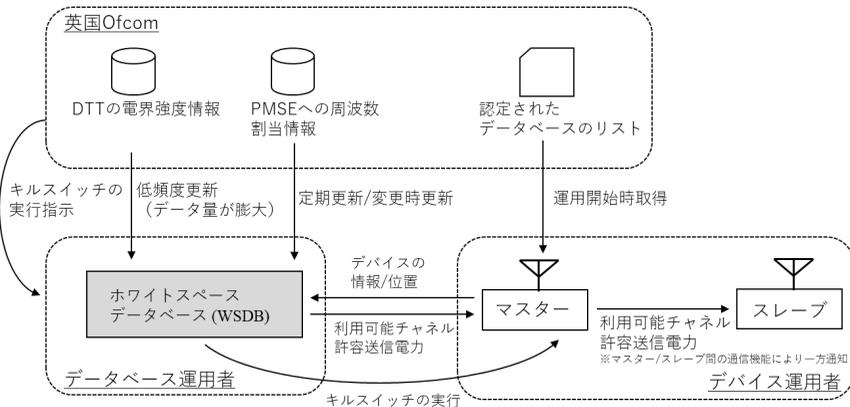


図 4・3 パイロットの実施体制と情報の流れ

パイロットの実施体制と情報の流れを図 4・3 に示す。体制は、パイロットの主権者である英国 Ofcom の他に、実験の主体者であるデータベース運用者とデバイス運用者から構成される。データベース運用者は、データベースを運用し、デバイス運用者からの問い合わせに対し、Ofcom から提供される情報に基づきホワイトスペースとして利用可能なチャンネルと許容送信電力を計算して返答する。データベース運用者は、DTT の電界強度情報と、PMSE のチャンネル割当情報を Ofcom から取得する。この DTT の電界強度情報は、100 m×100 m のメッシュ状に区切った地図上の各地点における DTT の電界強度を、各チャンネルについて記録した情

報である。この情報は数十 GB 程度と非常に大きいですが、テレビ局の放送諸元が変化しなければ変更されるものではないので更新頻度は低い。一方で、PMSE のチャンネル割当情報は、Ofcom が PMSE の利用者に対して割り当てた位置、チャンネル、利用期間などを記録した情報である。ホワイトスペースにおける通信は、データベース運用者は PMSE の情報を定期的な手段のほか、情報の変更時に随時 Ofcom から受け取り、PMSE の電波伝搬を計算して、デバイスが PMSE に影響を与えない許容電力を計算する。なお、データベースにおける PMSE の伝搬計算では秦モデルを利用するが、そのためにデータベースは計算に必要な地形情報とクラッタ情報を具備している。

このほかに Ofcom は、万一デバイス運用者による障害が判明した場合に備え、特定の地域あるいはデバイス固有の ID を指定することにより、対象とするデバイスの電波の発射を強制的に停止させる機能を持つことをデータベース運用者に求めている。この機能はキルスイッチ (Kill Switch) と呼ばれ、Ofcom がデータベース運用者に発行指示を出し、データベースが後述する Operational Parameter の情報を変更することによりデバイスの動作を停止させる。

デバイス運用者は、マスターとスレーブと呼ぶ 2 種類のカテゴリのデバイスを運用する。マスターデバイスはデータベースに接続し、デバイスの ID やアンテナ位置と、高度などに基づく Operational Parameter を要求する。Operational Parameter には、デバイスに許容されるチャンネル当たりの送信電力や、複数のチャンネルを同時に利用する際の最大合計帯域幅の情報が含まれている。一方で、スレーブデバイスは、データベースに接続する機能を持っておらず、マスターデバイスの周辺で運用することを想定し、マスターデバイスからそのシステムに独自の方式により Operational Parameter を取得して運用する。無線 LAN を例としてマスターとスレーブを説明すれば、有線ネットワークによりデータベースとの通信が可能なアクセスポイントがマスターであり、電波を発射してアクセスポイント経由で無線通信をしなければ通信手段がない端末がスレーブとなる。なお、IEEE 802.11 af では、Operational Parameter の情報をマスターからスレーブに通知する機能があり、そのための制御用 MAC フレームが定義されている。

Operational Parameter の要求には、Specific Request と Generic Request の 2 種類がある。Specific Request は、マスターデバイスがその位置における Operational Parameter を要求するものである。一方、Generic Request は、マスターからのビーコンなどの情報が到達する範囲に存在するすべてのスレーブを含むデバイスについて、Operational Parameter を要求するものである。このように Generic Request という手段により、スレーブデバイスがデータベースに直接問合せをすることなく電波を発射することを可能にしている。

データベース運用者は複数存在し、デバイスはその一つを選択して利用する。そのため、Ofcom は認定されたデータベース運用者のリストをデバイス運用者に対して直接提供している。デバイス運用者は、運用開始時にそのリストから 1 つのデータベースを選択して接続する。データベース運用者が Ofcom の認定データベースリストに掲載されるためには、Ofcom の検査を受けて、データベースがデバイスからの問合せに対して正しい結果を返答できる機能を持つことを示し、Ofcom から認定される必要がある。

本パイロットでは、利用するデバイスは表 4・1 に示す漏洩電力比を満たして免許を受ける必要がある。満たすべき漏洩電力比は、Device emission class と呼ぶクラスとチャンネルの隣接次数に応じて異なる。また、データベースとデバイスとの間の Specific/Generic Request や Operational Parameter の通信にはデータフォーマットの規定が必要であるが、Ofcom ではこれ

を規定せず、データベースとデバイスの運用組織や製造会社が業界として規定することが期待されている。

表 4・1 n 個離れたチャンネルにおける許容漏洩電力比

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
$n = \pm 1$	74	74	64	54	43
$n = \pm 2$	79	74	74	64	53
$n \geq +3$ or $n \leq -3$	84	74	84	74	64

4-4-3 開発したホワイトスペースデータベース

NICTでは、本パイロットに参加するために、Ofcomの要求を満たすWSDB及びデバイスを開発したが、本節ではWSDBについてのみ紹介する。WSDBには、無線機からIETF PAWSに基づき無線機から接続するための通信インタフェースを備えるが、利用者が視覚的に検索、あるいは、機器の設定を行うためにウェブブラウザによる操作も可能である。

The screenshot shows the 'OFCOM OPERATIONAL PARAMETERS INFORMATION SYSTEM' web interface. On the left, there is a 'GRAPHICAL INPUT' form with fields for Request Type (Specific), Start Time (0900), Device Category (Master), Device Type (Type A), Device Class (Default), Antenna Height (Above Ground Level), and Antenna Height Type. A red box highlights these fields, with a red arrow pointing to a list of parameters: Request type (Specific or Generic), Start time, Device category (Master or Slave), Device type (Type A or B), Device class (1-5), Antenna height, Antenna height type, Location (Latitude and Longitude), and Uncertainty. Below the form is a 'Request' button. On the right, a map of the UK is shown with a red pin on London. A red box highlights the map area with the text: '英国内の位置をピンで示す' and 'ピンの位置に基づき緯度と経度が自動で設定される'. At the bottom left, another red box contains the text: 'クリックすることにより利用可能なチャンネルを計算して表示する'. The NICT logo is visible in the top right corner.

図 4・4 WSDB のウェブ検索画面

無線機からは専用インタフェースを通じて通信するが、利用者が視覚的に確認するためにウェブブラウザから閲覧可能にしたもの。

Found 37 Available Channels

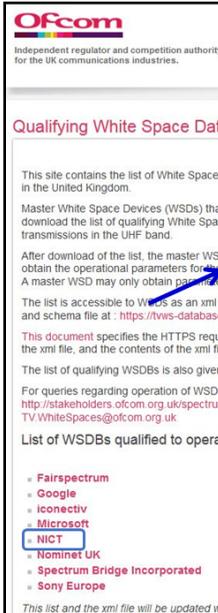
Channel	Start Frequency (MHz)	Stop Frequency (MHz)	Start Time (BST)	Stop Time (BST)	EIRP (dBm/8MHz)	Spectral Density EIRP (dBm/100kHz)
22	478	486	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	-8	-27.030899869919438
23	486	494	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	-9	-28.030899869919438
24	494	502	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	15	-4.030899869919438
25	502	510	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	-9	-28.030899869919438
26	510	518	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	-9	-28.030899869919438
27	518	526	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	12	-7.030899869919438
28	526	534	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	-10	-29.030899869919438
29	534	542	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	-18	-37.030899869919438
30	542	550	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	-10	-29.030899869919438
31	550	558	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	12	-7.030899869919438
32	558	566	30/07/2014 09:00:00	30/07/2014 09:00:00	5	-14.030899869919438

利用可能チャンネル

$P_1(F_j)$: 最大許容 EIRP/8MHz

$P_{WSD-PMSE}(F_j)$: 最大許容ブロック内 EIRPのスペクトル密度/100kHz

図 4・5 ある地点/時刻においてデータベースが表示した利用可能チャンネル情報



Ofcom
Independent regulator and competition authority for the UK communications industries.

Qualifying White Space Data

This site contains the list of White Spaces in the United Kingdom.

Master White Space Devices (WSDs) that download the list of qualifying White Space transmissions in the UHF band.

After download of the list, the master WSD obtain the operational parameters for the A master WSD may only obtain parameters.

The list is accessible to WSDs as an xml file and schema file at: <https://twws-databases.ofcom.org.uk>

This document specifies the HTTPS request and the contents of the xml file.

The list of qualifying WSDs is also given

For queries regarding operation of WSDs <http://stakeholders.ofcom.org.uk/spectrum/TV/WhiteSpaces@ofcom.org.uk>

List of WSDs qualified to operate

- Fairspectrum
- Google
- iconectiv
- Microsoft
- NICT
- Nominet UK
- Spectrum Bridge Incorporated
- Sony Europe

This list and the xml file will be updated w

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<ws_databases xsi:noNamespaceSchemaLocation="https://twws-databases
<last_update>2014-10-20T13:34:00</last_update>
<refresh_rate>1440</refresh_rate>
<db>
<url>https://twwsdb.broadbandappstestbed.com/json_rpc</url>
<db_provider_name>Spectrum Bridge Incorporated</db_provider_name>
<ws_db_id>1</ws_db_id>
</db>
<db>
<url>https://twwsdb-ofcom.nict.go.jp:4433</url>
<db_provider_name>NICT</db_provider_name>
<ws_db_id>2</ws_db_id>
</db>
<db>
<url>https://www.fswsdb.com/wsd/index.php</url>
<db_provider_name>Fairspectrum</db_provider_name>
<ws_db_id>3</ws_db_id>
</db>
<db>
<url>https://wsdb.org.uk:8081</url>
<db_provider_name>Nominet UK</db_provider_name>
<ws_db_id>4</ws_db_id>
</db>
<db>
<url>https://www.googleapis.com/rpc</url>
<db_provider_name>Google</db_provider_name>
<ws_db_id>5</ws_db_id>
</db>
<db>
<url>https://twws_wsdb.sony.co.uk/rpc</url>
<db_provider_name>Sony Europe</db_provider_name>
<ws_db_id>6</ws_db_id>
</db>
<db>
<url>https://spectrum.iconectiv.com/int/db/paws</url>
<db_provider_name>iconectiv</db_provider_name>
<ws_db_id>7</ws_db_id>
</db>
</ws_databases>
```

<https://twws-databases.ofcom.org.uk/>

図 4・6 Ofcom の TVWS 情報を提供するウェブサイトとリンクされた XML ファイル 表示内容は実証試験期間中のもの。

図4・4にブラウザによるホワイトスペースの検索の様子を示す。検索する位置をピンで示し、設定項目を入力して検索すると、図4・5に示すような結果が表示される。計算結果には、各チャンネルにおける許容電力密度（右の2列）が表示されているが、DTTに基づくもの（dBm/8 MHz）とPMSEに基づくもの（dBm/100 kHz）である。デバイスが運用する帯域幅に基づき計算し、値が小さい方を採用して判断する。このWSDBはOfcomからの厳密な検査を受け、2014年6月に正式認定を受けている。

図4・3で示した認定されたデータベースのリストは、図4・6(左)に示すようにOfcomのTVWS情報サイトに掲載された。このサイトでは、無線機が自動で読み込むことが容易になるように、図4・6(右)に示すようなXML形式によるファイルが提供された。このファイルには、認定されたデータベースが、その名称やURLなどとともに記載されている。

4-4-4 試験結果

開発したデバイスを用いた試験は、LTEシステムを利用したブロードバンド移動通信と、IEEE 802.11 afシステムを利用した固定地点間バックホール通信の2つを対象として実施した。試験期間は2014年7月7日～17日であり、場所は英国ロンドンの市街地にある複数のKing's College Londonのキャンパスを利用した。

まず、ブロードバンド移動通信について、Denmark Hillキャンパスにある建物の屋上にLTE基地局を設置し、LTE端末にキャンパス内で移動させて通信速度を測定した。このときのLTE基地局の設置状況を図4・7に、設定を表4・2に示す。測定の結果、下り方向のUDPによる最大通信速度は、FDD動作時で45.4 Mbps、TDD動作時で19.5 Mbpsであった。



図4・7 LTE基地局の設置状況

左が基地局で上部にアンテナを固定、右はシステムを制御するコアネットワーク装置

次に、固定地点間バックホール通信について、Denmark HillキャンパスとGuy'sキャンパスにそれぞれIEEE 802.11 afのアクセスポイントと端末を設置した。キャンパス間の直線距離は3.7 kmであり、見通しがある。アンテナは、利得が7.4 dBiの3素子リング八木アンテナを垂直偏波で使用した。実験中、データベースにより指示された最大送信電力は両地点で36 dBmであり、アンテナ利得に基づき無線機の送信電力は28 dBmに設定された。測定の結果、受信

信号強度は 51dBm 程度であったが、最も通信速度を得られるのは変調方式が QPSK (符号化率 1/2) の場合であり、そのときの通信速度は 2.2 Mbps であった。

表 4・2 LTE 基地局の設定

項目	内容
多重化方式	FDD/TDD
中心周波数	FDD 時: 714 MHz (DL), 626 MHz (UL) TDD 時: 682 MHz
チャンネル帯域	20 MHz
基地局送信電力	14.2 dBm (FDD), 16.2 dBm (TDD)
空間多重方式	SIMO
FDD 下りチャンネル (PDSCH) 変調方式	64 QAM
TDD サブフレーム比率	DL : UL = 4 : 4
アンテナ	無指向性アンテナ 3.2 dBi

位置関係と測定結果を図 4・8 に示す。実験室環境での評価では、この信号強度の場合にはより上位の変調方式が利用できたが、その性能を達成できなかった。この理由として、Denmark Hill キャンパスから 5 km の地点にテレビ放送の送信所があり、テレビ帯の合計送信電力 (EIRP) は 1.5 MW 以上であって、テレビ帯全体での強入力により受信回路の LNA 飽和や AGC 誤動作などの影響があったため、その対策が十分ではなく、通信性能が十分に得られなかったものと推測できる。

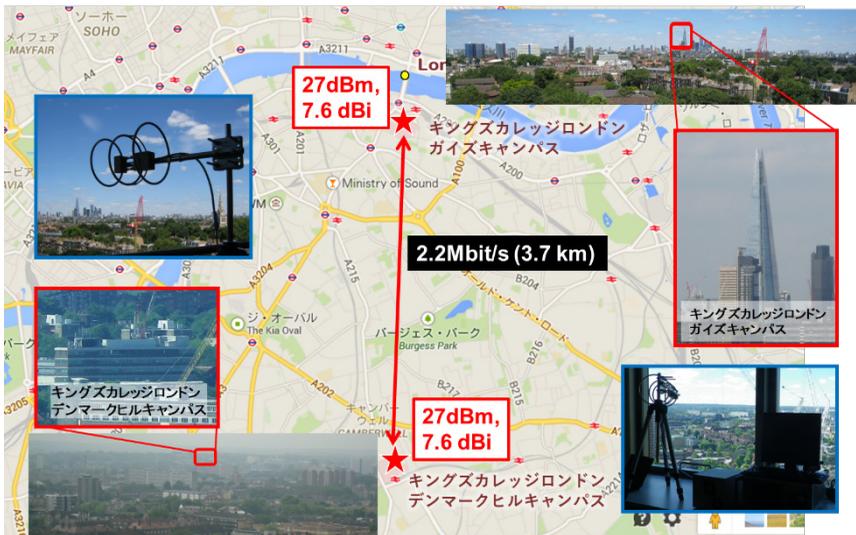


図 4・8 IEEE 802.11 af を利用した固定地点間バックホール通信の結果
背景の地図は Google Maps を利用。

テレビホワイトスペース利用の大きな課題の一つとして、このように大電力を扱う放送用無線機と小電力を扱う通信用無線機の共存における問題が顕著になることが挙げられ、ホワイトスペース用の無線機を開発する際には特に十分な対策が必要である。

■参考文献

- 1) K. Ishizu, K. Mizutani, T. Matsumura, H.-N. Tran, S. Filin, H. Sawada, and H. Harada : “Chapter 27: Developments and practical field trials of TVWS technologies,” in Wiley Book “Opportunistic Spectrum Sharing and White Space Access: The Practical Reality,” Wiley book, Apr. 2015.
- 2) K. Ishizu , K. Mizutani, T. Matsumura, Z. Lan, and H. Harada : “IEEE 802.11af Wi-Fi in TV White Space,” Handbook of Cognitive Radio, Springer, Jun. 2017.
- 3) 石津健太郎, 村上 誉, 藍 洲, チャン・ハグエン, 原田博司: “[技術展示] データベースと連携して TV ホワイトスペースで運用可能な無線ネットワークシステム,” 信学技報, 2012.5.
- 4) 石津健太郎, 村上 誉, 原田博司: “日本における TV ホワイトスペースの見積もり,” 信学技報, vol.112, no.240, SR2012-69, pp.195-202, 2012.10.
- 5) 石津健太郎, 村上 誉, 原田博司: “通信距離の観点から分析した日本の TV ホワイトスペース,” 信学技報, vol.112, no.444, SR2012-99, pp.95-102, 2013.2.
- 6) H.-N. Tran, K. Ishizu, and H. Harada : “Development and evaluation of a TVWS database for the UK Ofcom TVWS trial,” 信学技報, vol.114, no.165, SR2014-23, pp.21-26, 2014.7.
- 7) T. Matsumura, et al. : “Long-haul Communication Trial in London TV White-space with IEEE 802.11af-based High Power Prototype,” WPMC2015, Dec. 2013.
- 8) 伊深和雄, 松村 武, 石津健太郎, 村上 誉, 児島史秀, 原田博司: “英国テレビ帯ホワイトスペース対応 LTE システム(1)~WSDB と協調動作する WSD 運用環境の構築および屋外実験 ~,” 信学技報, vol.114, no.295, RCS2014-208, pp.67-72, 2014.11.
- 9) 松村 武, 伊深和雄, 石津健太郎, 村上 誉, 児島史秀, 原田博司: “英国テレビ帯ホワイトスペース対応 LTE システム(2)~干渉回避のための無線機要求仕様および性能評価 ~,” 信学技報, vol.114, no.295, RCS2014-209, pp.73-78, 2014.11.

■4群-6編-4章

4-5 異種無線ネットワークシステム

(執筆者：石津健太郎) [2019年2月 受領]

4-5-1 コグニティブ無線ルータシステム

コグニティブ無線技術を応用した異種無線ネットワークシステムの実現するための一つの手法として、複数の無線通信システムを統合して扱い、利用者にはその違いを隠蔽することで、従来の端末を改変することなしにその恩恵を受ける方法が考えられる。NICT では、この考えに基づき、コグニティブ無線ルータと呼ぶ装置が複数の市販されている無線通信デバイスを收容し、そのなかから最適と判断されたものを使用してインターネット接続を行う一方、ローカルネットワーク側に対しては NAT 機能及び DHCP 機能を用いてインターネットに接続可能な無線 LAN アクセスポイントとして動作するシステムを考案した。コグニティブ無線ルータシステムの構成を図 5・1 に示す。

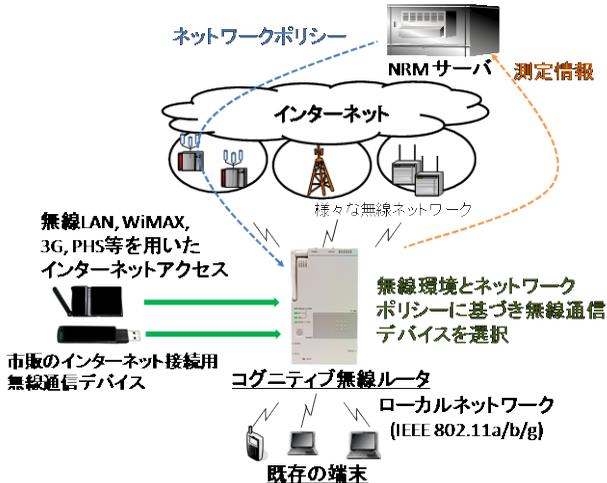


図 5・1 コグニティブ無線ルータシステムの構成

コグニティブ無線ルータは、ネットワーク上に設置された Network Reconfiguration Manager (NRM) サーバを利用し、NRM サーバに測定情報を報告する一方、NRM サーバは測定情報及びネットワーク運用ポリシーに基づいてネットワークポリシーを生成しコグニティブ無線ルータに送信する。これらの通信は IEEE 1900.4 規格のインタフェースに基づき行われる。ネットワークポリシーは、無線アクセスネットワークの負荷情報や優先度などの情報から構成されている。コグニティブ無線ルータに実装する Terminal Reconfiguration Manager (TRM) モジュールは、ネットワークポリシーとリアルタイムな測定情報により、所定のアルゴリズムに基づき、最適な無線通信デバイスを選択する。

このネットワークアーキテクチャを用いれば、多数のコグニティブ無線ルータが一定の地域

内で運用されている場合に、地域全体の通信効率を最適化するようにコグニティブ無線ルータを制御することが可能になる。

コグニティブ無線ルータの外観を図5・2に示す。コグニティブ無線ルータには、インターネットに接続するため、USB タイプもしくはCFタイプの無線通信デバイスを接続することができる。この際、コグニティブ無線ルータのUSBポートとCFポートはそれぞれ1つであるが、USBポートに関してはUSBハブを用いることにより2つ以上の無線通信デバイスを接続することができる。また、イーサネットポートを用いてインターネットに接続し、それをインターネットへの接続に用いることもできる。更に、ローカルネットワーク用の無線LANアンテナを内蔵し、各通信デバイスの接続状態を表示するためのLED、及び、最適な無線通信デバイスのスキャンを手動で開始するボタンを搭載している。コグニティブ無線ルータの電力は、外部より直流電源により供給される。



図5・2 コグニティブ無線ルータの外観

コグニティブ無線ルータは、表5・1に示す情報を定期的に取得しNRMサーバに報告する。一方で、NRMサーバからコグニティブ無線ルータに対して制御可能なものは、インターネット接続に使用される無線通信デバイス（アクティブリンク）の変更指示、無線通信デバイス切り替え閾値の変更、無線通信デバイスの有効化/無効化、測定値の報告条件の設定、測定値の報告要求、初期化、ファームウェア更新である。アクティブリンクを変更指示により、その時点で使用している無線通信デバイスとは別のものを利用してインターネットに接続することを指示できる。無線通信デバイス切り替え閾値の変更は、各無線通信デバイスに個別に設定されている切り替え閾値を任意の値に指定するものである。切り替え閾値とは、現在のアクティブリンクの使用を中止し、新たな無線通信デバイスへの接続の契機となる測定パラメータに対する閾値を指定するものである。

表5・1 コグニティブ無線ルータが取得する情報

パラメータ	内 容
RSSI	受信信号強度 [dBm]
RxTraffic	インターネット側からの受信トラフィック量 [bps]
TxTraffic	インターネット側への送信トラフィック量 [bps]
ConnectionNum	ローカルネットワークに接続している端末数
TxPower	送信電力 [dBm]
Sensitivity	無線通信デバイスが基地局との接続を維持する最低RSSI値 [dB]
LinkQuality	無線通信デバイスから取得するリンク品質値（無線通信デバイスの仕様に基づく）
CpuLoad	CPU使用率 [%]
UserMAC	ローカルネットワークに接続している端末のMACアドレスのリスト
NeighborAp	認識可能な周辺の802.11 a/b/g アクセスポイントそれぞれについてのMACアドレス、SSID、チャンネル、LinkQualityのリスト

測定値の報告条件とは、表 4・2 に示した任意のパラメータについて、それが閾値を上回った場合、あるいは、下回った場合に、その測定値を NRM サーバに報告する契機となる条件である。コグニティブ無線ルータは、前述のように定期的に表 5・1 の情報を NRM サーバに報告するが、NRM サーバが測定値の報告要求を行うことにより、任意の契機でコグニティブ無線ルータに報告させることができる。これは、報告間隔が長い場合に、NRM サーバがアルゴリズムなどの都合によりリアルタイムな情報が必要になった場合などに使用するものである。

NRM は、コグニティブ無線ルータの初期化とファームウェアの更新を指示することもできる。ファームウェアの更新により機能の追加や問題点の修正が可能である。したがって、NRM サーバの指示により、設置されたコグニティブ無線ルータに新規の機能を一斉に導入することも可能となる。ファームウェアは暗号化されて HTTP サーバ上に存在し、コグニティブ無線ルータがダウンロードしたのちバージョンの更新を行った後、ファームウェアに反映される。

4-5-2 神奈川県藤沢市における大規模実証

NICT では、コグニティブ無線ルータシステムの効果を検証するため、図 5・3 に示すように 500 台のコグニティブ無線ルータを複数の市町村にまたいで設置し、住民の利用が可能な広域テストベッドとして構築した。500 台のコグニティブ無線ルータは、藤沢市に 416 台、茅ヶ崎市に 73 台、横須賀市に 10 台、寒川町に 1 台を設置した。設置場所の選定にあたっては人口が多い場所や来客が多い、公民館、大学キャンパス、博物館、飲食店、公共運動施設、病院、ショッピングモールなどの施設が中心であり、全体の 1 平方キロメートル当たり 6 台程度の密度で設置した。また、500 台のうち、約 400 台は屋内、約 100 台は屋外に設置であった。コグニティブ無線ルータは NTT ドコモ、E-Mobile、Willcom (PHS) の各種通信事業者に接続する機能を持ち、NRM からの情報に基づき接続先を変更しながら、利用者にインターネット接続を提供する。

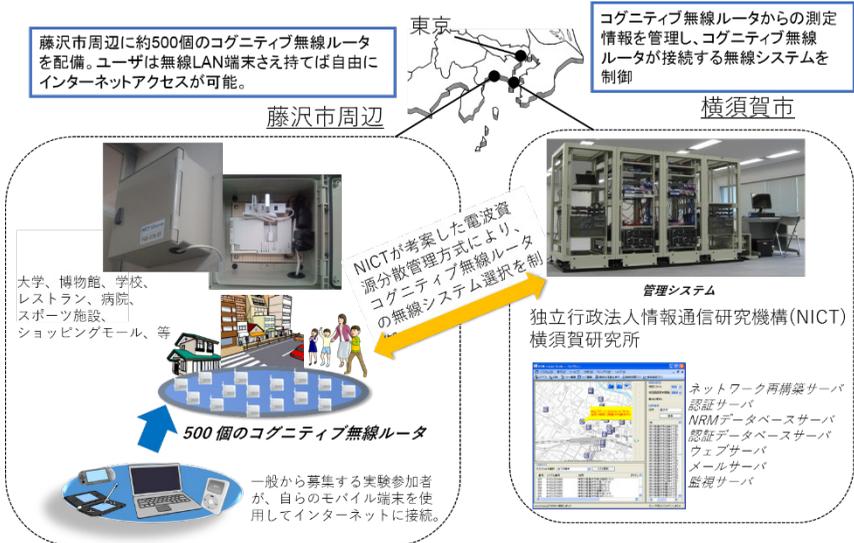


図 5・3 コグニティブ無線ルータシステムの大規模実証環境

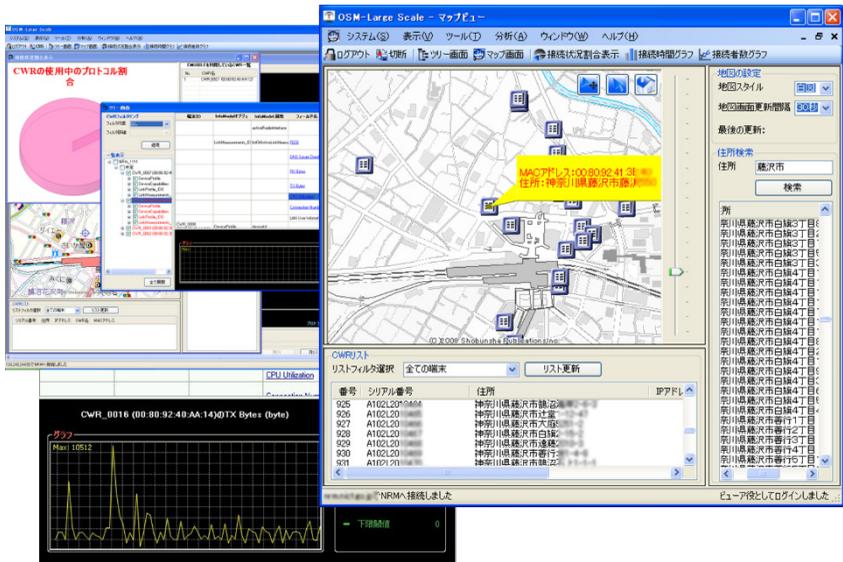


図 5・4 コグニティブ無線ルータの監視サーバの表示例

実証試験は、平成 22 年 9 月 1 日から平成 24 年 3 月 31 日の期間で実施し、参加者はウェブサイトから募集した。参加者は、参加規約に同意したうえ、ホームページからメールアドレスを登録して ID とパスワードを取得し、手持ちの無線 LAN 対応機器により接続を行うこととした。実証期間中、約 2100 名を超えるボランティア実験参加者の登録があった。期間中、藤沢市産業振興財団との共同により、海岸で開催した花火大会の動画中継イベントや江の島で開催した宝探しイベントに活用し、実用化試験と併せて移動式動画配信システムなどへの応用試験も行った。

この実証実験を通じて、コグニティブ無線ルータが長期間に渡り障害なく運用でき、通信トラヒックが増えた場合でも確実にオフロードができることを示すとともに、利用者登録や認証システムなどと連携すれば、コグニティブ無線ネットワークが地域ネットワークのインフラとして応用できることを示すこともできた。

4-5-3 東日本大震災後の災害復旧支援

2011 年 3 月に発生した東日本大震災被災地では、場所や時間により携帯電話やスマートフォン（移動通信システム）によるインターネット通信の接続性に違いがあった。これは、電源の確保や通信ケーブルの状態が不安定であり、更に各地で発生する余震による影響があったものと思われる。このような通信品質の違いは、通信事業者によっても異なり、ある場所では利用可能な通信事業者であっても、別の場所では利用できない場合もあった。したがって、どの場所でもどの通信事業者のネットワークが利用可能であるかが分からず、安定した通信を確保するためには、複数の通信事業者を選択しながら使用することが必要であった。しかし、一般的な通信端末を非専門家が切り替えながら利用することは現実的ではなく、コグニティブ無線

ルータシステムを利用することが有効であると思われた。このシステムは遠隔で状態を監視できるという観点からも、保守管理が困難な被災時においては有効であると思われた。そこでNICTでは、前節に述べた2010年9月から運用を開始していた広域テストベッドの機器を一部撤去し、被災地に展開することを決定した。

2011年4月5日に岩手県大槌町で機器の展開を開始した後も、被災自治体からの支援要請が届き、支援団体とも協力して合計68台のコグニティブ無線ルータを設置した。図5・5に示すように、その範囲は岩手県、宮城県、福島県にまたがり、設置場所は避難所や市町村の災害対策本部、病院、ボランティアセンターなど、多岐にわたり利用された。利用者は、被災者だけではなく、ボランティアや全国の公的機関から派遣された職員、医療関係者などであった。平成23年秋には被災者の生活基盤は避難所から仮設住宅に切り替わったが、コグニティブ無線ルータには仮設住宅に移設して使用を継続されているものもあり、平成24年3月まで利用された。

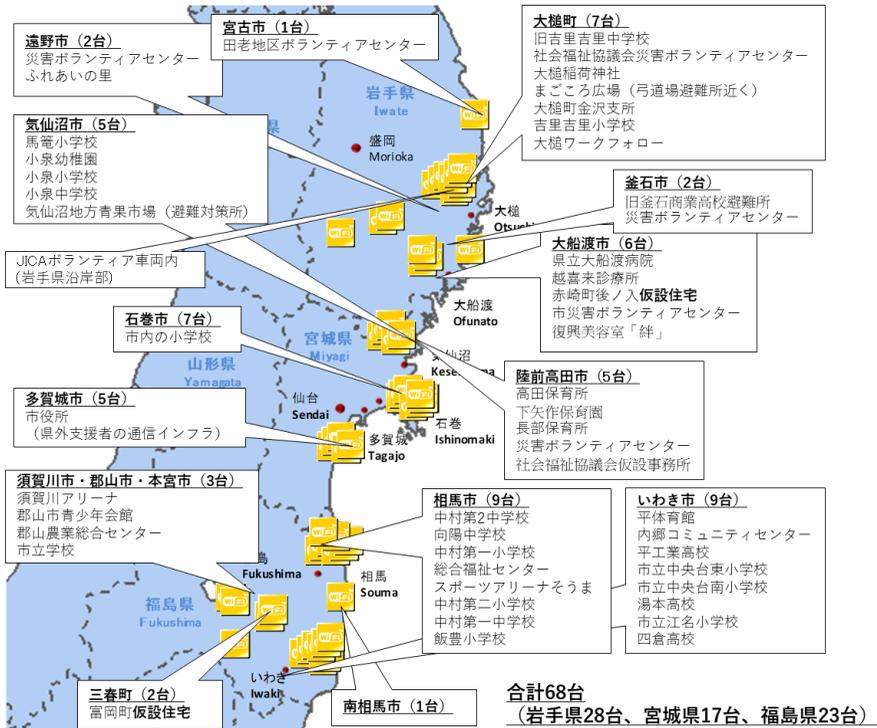


図5・5 東日本大震災後の復旧期間におけるコグニティブ無線ルータの設置場所

図5・6は、避難所に設置されたコグニティブ無線ルータと防水ケースに格納した様子、及び、それに接続して情報収集を行う様子を示す。端末が固定設置される場合、コグニティブ無線ルータにイーサネットケーブルを接続し、無線LANと併用した運用も可能である(図5・6左)。無線LANにより運用を行うことで電源ケーブル1本のみの単純なシステム構成となっており、

設置場所を柔軟に選定できる (図 5・6 中)。

図 5・7 は、釜石市のある避難所に設置したコグニティブ無線ルータから収集した情報に基づく、ピーク接続数、及び、平均通信速度の日計を示している。期間を通して最大で 5 端末の接続があり、一定量の継続した通信が認められる。なお、平均通信速度は 1 日間の通信量から求めたものであるから、ウェブアクセスなどの用途を考えれば比較的頻繁な通信が推測される。また、震災後に時間が経過するに従い利用端末や通信量が減少せず、むしろ通信量は増加していることも分かる。



図 5・6 避難所に設置されたコグニティブ無線ルータ
簡易設置 (左)、防水設置 (中) とそれを用いた情報収集の様子 (右)

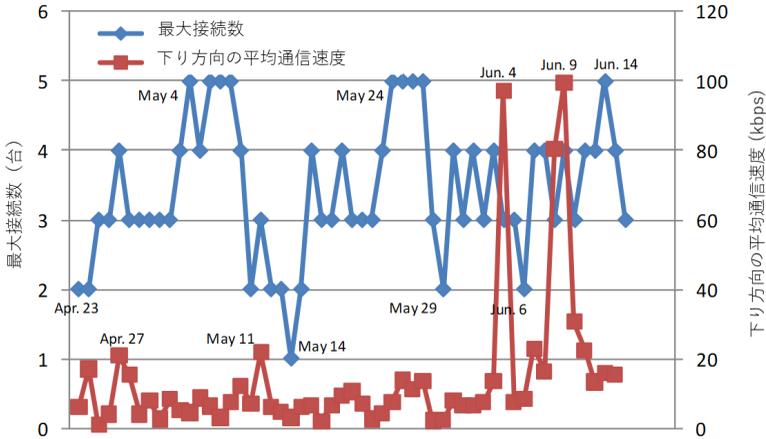


図 5・7 コグニティブ無線ルータの日毎の最大接続数、及び、
下り方向の平均通信速度の推移 (平成 23 年 4 月 23 日～6 月 16 日)

3 GPP などの標準化団体では、第 5 世代以降の移动通信システムに向けて異種無線ネットワーク、ネットワークシェアリング、周波数共用などに関連した機能の導入が議論されている。東日本大震災においてコグニティブ無線ルータシステムを使って実現したことは、将来的には移动通信システム本来の機能として徐々に追加されていく兆しがあり、長年にわたる無線通信

分野の研究者の成果が実用化に結びつつあると考えている。

■参考文献

- 1) K. Ishizu, H. Murakami, and H. Harada : “Cognitive Wireless Router system by distributed management of heterogeneous wireless networks,” IEICE Transactions on Communications, vol.E93-B, no.12, pp.3311-3322, Dec. 2010.
- 2) 石津健太郎, 村上 誉, 原田博司 : “市町村規模の最適無線選択制御を実証可能な広域コグニティブ無線テストベッドの構築,” 信学技報, vol.110, no.153, pp. 81-87, 2010.
- 3) 石津健太郎, 村上 誉, 原田博司 : “コグニティブ無線ルータを用いた被災地の通信環境復旧,” 電子情報通信学会総合大会, 2012.3.
- 4) 原田博司, 石津健太郎, 村上 誉 : “情報インフラ混乱時におけるコグニティブ無線ルータの有効活用,” 信学会誌, 平成 24 年 3 号.