

Cisco CleanAir Technology (無線 LAN 周波数帯向けのコグニティブ無線技術) を TV ホワイトスペース等で試行させた受信実験 - IEEE802.11af 草案も考慮しながら -

松戸 孝[†] 宇都宮 光之[†] 田中 政満[†] 中野 清隆[†] 丸田 竜一[†]

† ネットワンシステムズ株式会社 ビジネス推進グループ ビジネス推進本部
第 1 製品技術部 アクセスネットワークチーム
〒140-8621 東京都品川区東品川 2-2-8 スフィアタワー天王洲

あらまし 無線 LAN 周波数帯 (2.4GHz 帯及び 5GHz 帯) 向けのコグニティブ無線技術である Cisco CleanAir Technology を任意の周波数帯で試行するための受信用周波数コンバータと受信システムを試作し、それらを TV ホワイトスペース等で試行させた受信実験を実施した。Cisco CleanAir Technology の周波数センシング機能は、2.4GHz 帯無線 LAN の第 1 チャネル (2412MHz) に周波数変換された 2.6GHz 付近 (WiMAX の周波数帯) の受信波を WiMax Mobile という分類に、また同様に周波数変換された 550MHz 付近 (地上デジタルテレビ放送の周波数帯) の受信波を Continuous TX という分類にしたことを確認した。さらに、TV ホワイトスペースでの無線 LAN 利用を目指す IEEE802.11af 草案 1.03 で想定した TV の中心周波数と 11af システムの中心周波数が合わない状況を実験的に再現させてみて、基礎的な知見を得た。また、実験中に UHF 帯 (Ch31 と Ch34) の異常電波伝搬を観測したので、その状況概要も報告した。

キーワード Cisco CleanAir Technology, 無線 LAN, コグニティブ無線技術, TV ホワイトスペース, IEEE802.11af

Experiments of Receiving TV White Space and Another Frequency Band by Trying to Apply Cisco CleanAir Technology Implementing Cognitive Radio Technology for Wireless LAN Frequency Bands - Considering IEEE802.11af Draft -

Takashi MATSUDO[†] Mitsuyuki UTSUNOMIYA[†] Masamitsu TANAKA[†] Kiyotaka NAKANO[†]
and Ryuichi MARUTA[†]

† Access Network Team, Product Engineering Department 1, Business Development Division, Business Development Operations, Net One Systems Co., Ltd.
Sphere Tower Tennoz, 2-2-8 Higashi Shinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-8621 Japan

Abstract Cisco CleanAir technology is a cognitive radio technology in WLAN frequency bands of both 2.4GHz band and 5GHz band. In order to confirm performances of Cisco CleanAir technology in another frequency band, we prepared a receiving system using a frequency up-converter. The frequency up-converter can convert the receiving frequency from 37.8MHz of an IF output of a spectrum analyzer to 2412MHz of ch1 in 2.4GHz WLAN band which Cisco CleanAir technology can operate. By using the receiving system, we confirmed that Cisco CleanAir technology could operate, for example in both 2.6GHz band and TV white space. We could also obtain a basic knowledge of IEEE802.11af draft by trying to operate Cisco CleanAir technology in TV white space. Since we observed an abnormal radio propagation in UHF-TV band in an experimental period, we also reported its situation.

Keyword Cisco CleanAir Technology, Wireless LAN, Cognitive radio technology, TV white space, IEEE802.11af

1. はじめに

2011 年に無線 LAN 用送受信 IC の出荷数が世界市場で 10 億個を突破し、日本国内の法人向けの無線 LAN 機器市場も約 130 億円の規模に達している [1]-[3]。IEEE802.11 シリーズの無線 LAN は、免許不要の無線

局として誰でも自由に使えることから (また、電波利用料も、なし)、その利用は、法人向け、家庭向け、公衆向け等として急速に拡大している。そして急速な利用拡大に伴い、電波的な視点からの問題も顕在化してきている。

電波的な視点からの問題は、無線 LAN の周波数帯での電波干渉の増加により、無線 LAN の不安定な通信状況の発生が増加していることである。特に 2.4GHz 帯の無線 LAN (IEEE802.11g, 11n) では 20MHz の伝送帯域幅で混信 (干渉) しないで使える周波数チャンネルが 3 波という状況の中で、市場の急増に伴う無線 LAN 同士での電波干渉の増加に加えて、産業科学医療バンド (ISM バンド) のために無線 LAN 以外の様々な無線機器の電波 (例えば、コードレス電話、Bluetooth、電子レンジ等) 干渉も存在していて、かつ増加していて、2.4GHz 帯の無線 LAN は、かなり使いにくくなっている。

しかしながら、無線 LAN 技術も進歩してきており、電波干渉の解決の一案は、自ら運用する無線 LAN の複数のアクセスポイントの電波と、周囲から到来する別の無線 LAN の複数のアクセスポイントの電波を検知することで、極力、無線 LAN 同士の電波干渉を回避するように自ら運用する無線 LAN の各アクセスポイントの周波数チャンネルと送信電力を自動的に制御する機能 (RRM: Radio Resource Management) を活用することである [4]。

そして、より根本的な解決方法は 20MHz の伝送帯域幅で混信 (干渉) しないで使える周波数チャンネルが 19 波存在する 5GHz 帯の無線 LAN (IEEE802.11a, 11n) を、もっと活用することである。但し、他無線局との周波数共用条件が存在することは意識する必要がある (W52 帯の 4 波は屋内利用限定、W53 帯の 4 波も屋内利用限定であるが気象レーダの利用が優先される。W56 帯の 11 波は屋内も屋外も利用可能であるが気象レーダの利用が優先される)。

5GHz 帯の無線 LAN は、自ら運用する無線 LAN のアクセスポイント数が 1 拠点で多数になる法人向け利用では、上述の RRM も活用しながら既に多に活用されてきているが、周波数が高くなったことによる回折損失の増加や建材通過損失の増加等が新たな使いにくさとして、利用者から指摘されることも出てきている。もっとも 2.4GHz 帯の無線 LAN 利用でも、屋内の事務所や工場の環境で什器や設備の裏側まで、少ない無線 LAN アクセスポイント数で良好なサービスエリアにすることを要望へは、電波伝搬特性の困難さから対応を断念してきていることもある。

2.4GHz 帯と 5GHz 帯の無線 LAN の電波伝搬特性の困難さを意識するたびに、もしも、電波伝搬特性の良好な、より低い周波数帯で、IEEE802.11 シリーズの無線 LAN を使えたならば、法人向け、家庭向け、公衆向け等、すべての利用者としてはとても有益なことになるだろうと思ってきたところであるが、現在、IEEE802.11ah (1GHz 以下の周波数帯を用いた無線

LAN) と、IEEE802.11af (地上波 TV 放送周波数を用いた無線 LAN) の 2 つの新たな標準化が策定に向けて進行中である [5]-[7]。

特に、IEEE802.11af では、174MHz から 862MHz を想定した TV ホワイトスペース (TV 放送用に割り当てられているが、地理的条件や技術的条件によって他の目的にも利用可能な周波数帯) を IEEE802.11 シリーズの無線 LAN が利用及び共存するための検討を実施中であり、コグニティブ無線技術が要素技術となっている。コグニティブ無線技術は、端末や基地局が周囲の無線通信環境を「認識」し、利用する無線通信システムや周波数を動的に切り替えることで周波数利用の効率化を図る技術である [8],[9]。

コグニティブ無線技術は高度な技術であるが、これに相当すると理解できる Cisco CleanAir Technology と呼ばれる技術が 2.4GHz 帯と 5GHz 帯の無線 LAN 周波数帯向けの市販無線 LAN 製品に 2010 年から実装されていて、既に多くの法人向けの無線 LAN として導入されている [2],[10]。Cisco CleanAir Technology のコグニティブ無線技術の性能を、無線 LAN 周波数帯 (2.4GHz 帯及び 5GHz 帯) 以外の任意の周波数帯 (例えば TV ホワイトスペース) で動作させたときに、どのような挙動を示すか、また、どのような新たな知見が得られるかは興味深い。

本稿では、Cisco CleanAir Technology を任意の周波数帯で試行するための受信用周波数コンバータと受信システムの試作を行い、受信実験を実施した結果について述べる。

第 2 章では、Cisco CleanAir Technology がどのような技術であるかを解説する。第 3 章では、Cisco CleanAir Technology を任意の周波数帯で試行するために試作した受信用周波数コンバータと受信システムについて示す。第 4 章では、試作した受信用周波数コンバータと受信システムによる実験の実施とその結果を示し、考察する。第 5 章では、実験中に観測された UHF 帯 (Ch31 と Ch34) における異常電波伝搬についての状況を示し、考察する。

2. Cisco CleanAir Technology (無線 LAN 周波数帯向けのコグニティブ無線技術) について

2.1. Cisco CleanAir Technology

Cisco CleanAir Technology は、シスコシステムズ社製の無線 LAN 製品 (無線 LAN アクセスポイントの CAP3500 と CAP3600 の各シリーズとそれらを制御する無線 LAN コントローラ) に搭載されている無線 LAN 周波数帯 (2.4GHz 帯及び 5GHz 帯) における電波の監視と干渉回避の技術である [2],[10]。

その電波の監視は、無線 LAN 周波数帯 (2.4GHz 帯

電波干渉源	補足説明
802.11FH	IEEE802.11 Frequency-Hopping 方式の電波
Wi-Fi Inverted	IEEE802.11 方式であるが、変調時の IQ データが入れ替わっている電波
WiFi Invalid Channel	IEEE802.11 方式であるが、周波数チャンネルの中心周波数がズレている電波
802.15.4	IEEE802.15.4 方式の電波
Bluetooth Discovery	Bluetooth 機器を探索する電波
Bluetooth Link	Bluetooth ペアリング (機器登録) の電波
Canopy	Motorola Canopy 2.4GHz 無線ブリッジの電波
Continuous Transmitter	継続的に送信されている電波
DECT Phone	コードレス電話機 (DECT 相当) の電波
Jammer	通信妨害する電波
Microwave Oven	電子レンジの電波
SuperAG	SuperAG 方式 (Atheros Communications の IEEE802.11 方式向けの独自機能) の電波
TDD Transmitter	TDD 方式で送信されている電波
Video Camera	ビデオカメラの電波
WiMAX Fixed	WiMAX ブリッジの電波
WiMAX Mobile	モバイル WiMAX の電波
Xbox	マイクロソフトの家庭用ゲーム機の電波

表 1 Cisco CleanAir Technology が、推測認識して分類可能な電波干渉源[11]

及び 5GHz 帯)において周波数センシングを実施して無線 LAN (正しい使われ方をしている IEEE802.11 シリーズ) 以外の干渉源からの電波を検知し、その電波干渉源が何であるかを推測認識して分類(表 1 に記載の 17 種類)する[11]。

そして、その電波干渉による悪い電波環境状況があるしきい値を超えると、Cisco CleanAir Technology は、強制的に運用中の無線 LAN の周波数チャンネルを自動的に変更して干渉回避し、極力、良好な通信状況を継

続する (ED-RRM:Event Driven-Radio Resource Management) [12],[13]。電波環境の指標は、受信電力や、ある測定時間中にその電波干渉が継続していた時間の割合等をもとに Cisco CleanAir Technology が独自に定義しているが、電波干渉源が何であるかを推測認識して分類する方法とともに、詳細は非公開である。

なお、無線 LAN アクセスポイントとそれを制御する無線 LAN コントローラで構成されるシスコシステムズ社製の無線 LAN 製品は、自ら運用する無線 LAN の複数のアクセスポイントの電波と、周囲から到来する別の無線 LAN の複数のアクセスポイントの電波を検知することで、極力、無線 LAN 同士の電波干渉を回避するように自ら運用する無線 LAN の各アクセスポイントの周波数チャンネルと送信電力を自動的に制御する機能 (RRM:Radio Resource Management) も実装している[4]。

この RRM は、無線 LAN(IEEE802.11 シリーズ)の電波干渉によって反応すること、また、10 分間隔での必要に応じての動作であることが特徴であるが、一方、Cisco CleanAir Technology の ED-RRM は、無線 LAN(正しい使われ方をしている IEEE802.11 シリーズ)以外の電波干渉源によって反応すること、また、その電波干渉による悪い電波環境状況があるしきい値を超えたら 60 秒程度で動作することが特徴である。つまり、Cisco CleanAir Technology は、無線 LAN アクセスポイントとそれを制御する無線 LAN コントローラが周囲の無線通信環境を「認識」し、利用する周波数チャンネルを自動的に切り替えることで周波数利用の効率化を図っていると理解できる。

従って、Cisco CleanAir Technology は、無線 LAN 周波数帯 (2.4GHz 帯及び 5GHz 帯) においてコグニティブ無線技術を実現していると理解できる。

2.2. Cisco CleanAir Technology の仕様

Cisco CleanAir Technology は、1 台の無線 LAN アクセスポイントの筐体内に、無線 LAN 通信用とは別に専用の周波数スペクトラム解析エンジン (SAGE: Spectrum Analysis Engine) を搭載しており、無線 LAN 通信を中断することなく動作する。表 2 に、公開情報にもとづく Cisco CleanAir Technology の仕様を示す[13]。

表 2 や表 1 に示された Cisco CleanAir Technology のコグニティブ無線技術の性能を、無線 LAN 周波数帯 (2.4GHz 帯及び 5GHz 帯) 以外の任意の周波数帯で動作させたときに、どのような挙動を示すか、また、どのような新たな知見が得られるか興味深いので、Cisco CleanAir Technology を任意の周波数帯で試行するための受信周波数コンバータと受信システムの試作を行

項目	仕様	備考
周波数センシングする無線 LAN の周波数帯	2.4GHz 帯，及び 5GHz 帯	Dualband(2.4GHz 帯，及び 5GHz 帯) 対応の無線 LAN アクセスポイント利用時
周波数分解能 RBW(Resolution Band Width)	78kHz(20MHz 幅伝送時)，または 156kHz(40MHz 幅伝送時)	シスコシステムズ社の公開情報に記載違いがあり，左記が正しいことを同社へ確認済．
FFT のポイント数	256	
電波干渉検出時に必要となる SN 比	10dB 程度以上	
専用の周波数スペクトラム解析エンジン SAgE (Spectrum Analysis Engine) のスキャン	毎秒 1 回	
動作モード	2 種類 (Local Mode AP と Monitor Mode AP)	(1)Local Mode AP = ある無線 LAN アクセスポイントが無線 LAN 通信 (送受信) で運用する特定の 1 つの周波数チャンネル内だけを周波数センシングするモード．従って，もしも複数のアクセスポイントが異なる周波数チャンネルで運用しているときは，各アクセスポイントで周波数センシングする周波数チャンネルは異なる． (2)Monitor Mode AP = ある無線 LAN アクセスポイントが，受信専用のモニタモードになり，無線 LAN(2.4GHz 帯及び 5GHz 帯)のすべての周波数チャンネルを周波数センシングするモード，なお，この Monitor Mode AP は，40MHz 幅伝送相当で動作する．
電波干渉源の分類	17 種類	種類は，表 1 のとおり．
周波数チャンネルの強制変更に要する時間	60 秒程度	電波干渉による悪い電波環境状況が，あるしきい値を超えた後に動作する (ED-RRM:Event Driven-Radio Resource Management) ．

表 2 Cisco CleanAir Technology の仕様 (シスコシステムズ社の公開情報に基づく [13])

い，受信実験を実施した．

3. Cisco CleanAir Technology を任意の周波数帯で試行するために試作した受信用周波数コンバータと受信システム

3.1. 構成の概要

Cisco CleanAir Technology を任意の周波数帯で試行するために試作した受信用周波数コンバータは，入力周波数 37.8MHz の信号を，出力周波数 2412MHz(2.4GHz 帯無線 LAN の第 1 チャンネルの中心周波数)へアップコンバートする．なお，本受信用周波数コンバータにおける周波数変換損失は 7dB である．図 1 に試作した受信用周波数コンバータを用いた受信システムの構成を示す．また，図 2 に試作した受信用周

波数コンバータのブロック図を示す．

受信システムとしては，フロントエンドのプリセレクタであるスペクトラムアナライザ (アンリツ社製の MS2724B) へ入力した受信波が，その IF (中間周波数 37.8MHz) 出力を経由して，試作した受信用周波数コンバータへ入力されてアップコンバートされた出力 (周波数 2412MHz，2.4GHz 帯無線 LAN の第 1 チャンネル) となり，その出力が無線 LAN アクセスポイント (シスコシステムズ社製の CAP3500e) の 2.4GHz 帯の受信専用のアンテナコネクタへ導かれる．無線 LAN アクセスポイント (シスコシステムズ社製の CAP3500e) は，無線 LAN コントローラ (シスコシステムズ社製の CT2504) で制御されており，2.4GHz 帯無線 LAN の第

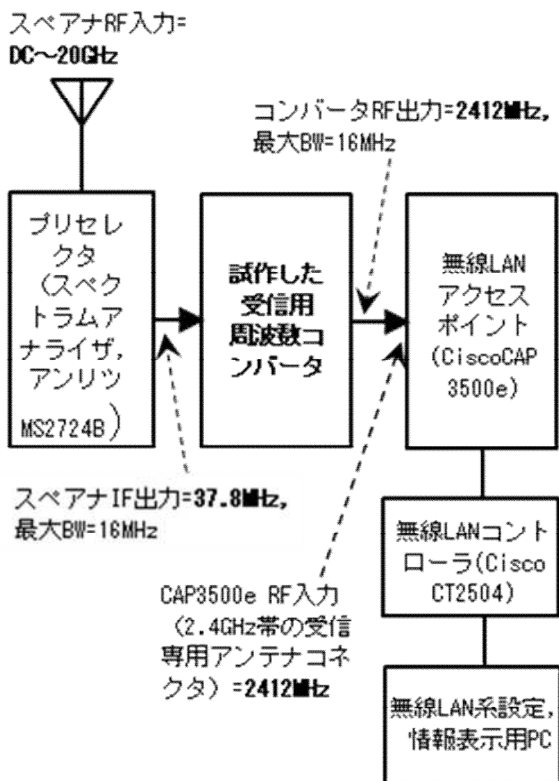


図 1 試作した受信周波数コンバータを用いた受信システムの構成

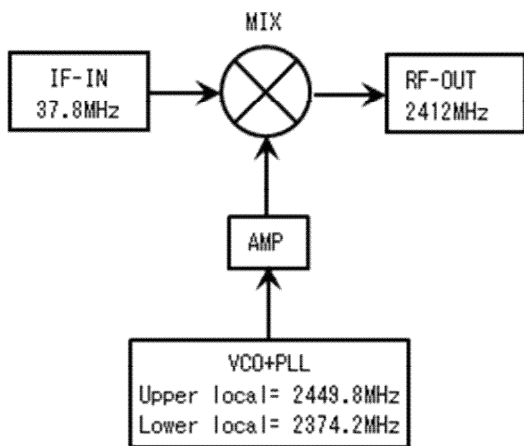


図 2 試作した受信周波数コンバータのブロック図

1 チャンネルに周波数変換された任意の周波数の受信波を 2.4GHz 帯における Cisco CleanAir Technology で反応させてみて、その挙動を、無線 LAN コントローラに接続したパーソナルコンピュータ(PC)にて把握する。

3.2. 構成の詳細

試作した受信周波数コンバータへの入力周波数 37.8MHz の信号は、アンリツ社製のスペクトラムアナライザ MS2724B のゼロスパン設定時の IF (中間周波

数)出力から入力する。MS2724B のゼロスパン設定時の IF 出力の周波数帯域幅は、広い帯域幅から、16MHz、10MHz、7MHz の 3 とおり及び、分解能帯域幅(RBW)の 1MHz、300kHz ~ 1Hz (3-1 シーケンス)が選択可能となっている。

また、試作した受信周波数コンバータの出力周波数 2412MHz の信号は、Cisco CleanAir Technology が実装されているシスコシステムズ社製の無線 LAN アクセスポイント CAP3500e (外付けアンテナ利用可能のコネクタ付)の 2.4GHz 帯の受信専用アンテナコネクタへ入力する。無線 LAN アクセスポイント CAP3500e は、IEEE802.11n 対応であり、2.4GHz 帯で 3 本のアンテナを用いて 2 ストリームの MIMO 伝送が可能となっている。3 本のアンテナの使われ方は、送信時利用アンテナ数は 2 本であり、受信時利用アンテナ数は 3 本となっているので、3 本のアンテナの内、1 本は、受信専用として動作する。従って、その受信専用のアンテナコネクタへ、今回試作した受信周波数コンバータを接続するには、好都合である。なお、今回利用した無線 LAN アクセスポイント CAP3500e は、2.4GHz 帯無線 LAN の送受回路の他、別途、5GHz 帯の無線 LAN の送受回路 (IEEE802.11n 対応、2 ストリームの MIMO 伝送が可能)も搭載しているが、5GHz 帯無線 LAN 機能は停止させて、2.4GHz 帯無線 LAN 機能だけを動作させた。

試作した受信周波数コンバータの局部発振周波数は、Upper local の $2412+37.8=2449.8\text{MHz}$ と Lower local の $2412-37.8=2374.2\text{MHz}$ の 2 波を選択可能とした。Lower local の場合は、入力波の周波数の高低の方向は、周波数変換後の出力波の周波数の高低の方向と同じである。一方、Upper local の場合は、入力波の周波数の高低の方向は、周波数変換後の出力波の周波数で高低の方向が反転する。変調波の周波数の高低の方向が反転すると一般的には受信機で復調できない場合もある。今回、フロントエンドのプリセクタとして利用しているアンリツ社製のスペクトラムアナライザ MS2724B の IF (中間周波数 37.8MHz)出力の周波数の高低の方向が同スペクトラムアナライザの入力の周波数の高低の方向と、どのような関係になっているかの仕様は、表 3 のとおりである。

IF 出力の周波数の高低の方向 (受信入力周波数の高低の方向に対して)が、反転の場合は、変調波の周波数の高低の方向が反転しているが、この場合は、試作した受信周波数コンバータの局部発振周波数を、Upper local の $2412+37.8=2449.8\text{MHz}$ に設定すると、コンバータの出力の変調波の周波数の高低の方向がさらに反転することになり、最終的に、無線 LAN アクセスポイント CAP3500e への入力周波数の高低の方向は、

受信入力周波数	IF出力の周波数の高低の方向 (受信入力周波数の高低の方向に対して)
0Hz ~ 9.2GHz	反転
9.2GHz ~ 13GHz	非反転(入力と同じ高低方向)
13GHz ~ 16.5GHz	反転
16.5GHz ~ 20GHz	非反転(入力と同じ高低方向)

表 3 アンリツ社製のスペクトラムアナライザ MS2724B の受信入力周波数の高低の方向に対する IF(中間周波数 37.8MHz)出力の周波数の高低の方向との関係の仕様

伝搬してきてアンテナで受信されてプリセクタへ入力された変調波の周波数の高低の方向と同じにすることが可能となる。なお、Upper local 時の局部発振周波数 2449.8MHz は、2.4GHz 帯の第 9 チャネル(2452MHz)付近になってしまうが承知しておく。

4. 試作した受信用周波数コンバータと受信システムによる実験

4.1. 2.6GHz 付近での受信実験

(1) 目的

Cisco CleanAir Technology は、無線 LAN 周波数帯(2.4GHz 帯及び 5GHz 帯)において、表 1 に示した 17 種類の電波干渉源を推測認識して分類することが可能であり、その分類の 1 つに WiMAX Mobile が存在している。日本では、無線 LAN 周波数帯で広帯域移動無線アクセスシステム(WiMAX)を受信できないので、試作した受信用周波数コンバータを用いた受信システムを使って 2.6GHz 付近の広帯域移動無線アクセスシステム(WiMAX)と推測される電波を受信して、Cisco CleanAir Technology が、どのような反応をするかを把握するために、2.6GHz 付近での受信実験を実施した。図 1 に示した受信システムを構成する各機器の設定について、次の項目(2)以降で述べる。

(2) 無線 LAN アクセスポイントと無線 LAN コントローラの設定

Cisco CleanAir Technology の動作モード：Monitor Mode AP

表 2 で示した Monitor Mode AP(無線 LAN アクセスポイントが、受信専用のモニターモードになる)に設定した。このモニターモードの場合、周波数分解能 RBW

は、156kHz である。

受信アンテナコネクタ：

今回の測定では、上記項目のように、Cisco CleanAir Technology の動作モードは、Monitor Mode AP に設定したので、無線 LAN アクセスポイントからの送信は「ない」状況になるので、送信受信兼用の 2 つのアンテナコネクタには、アンテナは未接続とした。そして、試作した受信用周波数コンバータの出力を、受信専用のアンテナコネクタへ入力するように接続した。**(3) プリセクタであるスペクトラムアナライザの設定**

受信アンテナ：

2.4GHz 帯用の利得 2dBi の水平面内無指向性のアンテナ(スペクトラムアナライザのオプション品のアンテナ)を、そのまま 2.6GHz 付近でも利用した。なお、スペクトラムアナライザとの接続には変換コネクタ(SMA 型と N 型)1 個を使った。なお、受信アンテナは、受信場所(東京都世田谷区内の住宅地)の屋内 2 階の窓際に設置した(地上高約 4m)。

受信周波数：2610MHz

スペクトラムアナライザで、2.6GHz 付近で受信できている受信波を確認したところ、受信波は、概ね 10MHz 幅にて、3 つの受信波(概ねの中心周波数が、2600MHz、2610MHz、及び 2620MHz)が存在している状況だったので、中央の受信波の中心周波数付近の 2610MHz を、設定した。

IF(中間周波数 37.8MHz)出力の帯域幅：10MHz

上記項目のとおり、1 つの受信波は、概ね 10MHz 幅と理解できたので、10MHz を設定した。

スペクトラムアナライザのプリアンプ：

動作させた。メーカーからの情報では、プリアンプの利得は 15dB から 20dB 程度である。

(4) 試作した受信用周波数コンバータの設定等

局部発振周波数：2449.8MHz

Upper local の $2412+37.8=2449.8\text{MHz}$ に設定した。

プリセクタであるスペクトラムアナライザとの接続：

長さ 80cm ケーブル(両端に SMA 型コネクタ付き)

1 本と、変換コネクタ(BNC 型と N 型)1 個を使った。

無線 LAN アクセスポイントとの接続：

長さ 50cm ケーブル(各端に N 型コネクタと RP-TNC 型コネクタ付き)1 本と、変換コネクタ(SMA 型と N 型)1 個を使った。

(5) 実験結果

図 3 に、Cisco CleanAir Technology が受信波を推

Active Interferers

Interferer Type	Affected Channel	Detected Time	Severity	Duty Cycle (%)	RSSI (dBm)
Continuous TX	7,8,9,10	Sat Jun 2 15:40:38 2012	100	100	-43
WiMax Mobile	unknown	Sat Jun 2 15:46:58 2012	2	9	-74
WiMax Mobile	1,2,3,4	Sat Jun 2 15:47:22 2012	10	10	-74

図 3 Cisco CleanAir Technology が受信波を推測認識して分類した表示画面

測認識して分類した表示画面を示す。Interferer Type に Affected Channel が 1,2,3,4 とし WiMax Mobile が表示されたことを確認できた。

なお、Detected Time Sat Jun2 15:47:22 2012 と表示されているが、プリセクタであるスペクトラムアナライザの IF 出力を試作した受信用周波数コンバータへ入力開始した時刻は概ね Sat Jun2 15:46:43 2012 であると電波時計（標準電波 JJY を受信利用する時計）を目視確認しているの、約 39 秒で、受信波は検知、そして、推測認識されて分類完了となったと理解できる。

また、図 3 での項目 RSSI(dBm)は Monitor Mode AP（周波数分解能 RBW：156kHz）で動作しているときの受信電力であり、項目 Duty Cycle(%)は測定時間長に対する受信波を検知した時間長の割合（但し、測定時間長の具体的な長さはメーカーから非公開）であり、項目 Severity は RSSI や DutyCycle 等を考慮してメーカーが独自に定義した干渉による悪さの指標である（100 が最大に悪い状況を示し、0 が最小値となり、数字が大きいほど、干渉によって悪い状況であることを意味する）。なお、受信電力は、本実験を実施する前の予備実験にて、周波数分解能 RBW の帯域幅内の受信電力ではなく、Cisco CleanAir Technology が検知、推測認識した受信波の占有周波数帯域幅内の受信電力になっていると推測できた（この受信電力の詳細は、メーカーから非公開）。

Affected Channel が unknown の WiMax Mobile と、Affected Channel が 7,8,9,10 の Continuous TX も検知、そして、推測認識されているが、下記項目（6）にて考察する。

（6）考察

総務省の電波の使用状況の詳細[14]からは、2610MHz 付近は、広帯域移動無線アクセスシステム (WiMAX)が運用されていると理解している。従って、今回の実験で得られた図 3 の結果は、妥当であると考えられる。

図 3 で、Affected Channel が 7,8,9,10 にて、

InterfererType が Continuous TX と表示されている受信波は、2.4GHz 帯の無線 LAN の第 8 チャンネルが 2447MHz、そして、第 9 チャンネルが 2452MHz なので、試作した受信用周波数コンバータの局部発振周波数 2449.8MHz の漏えい波が認識されていると理解できる。

今回の実験では、試作した受信用周波数コンバータへの入力信号の周波数帯域幅は、プリセクタで設定した 2412MHz(2.4GHz 帯の無線 LAN の第 1 チャンネル) +5MHz が想定した仕様であるが、一方、Cisco CleanAir Technology の動作モードは、Monitor Mode AP に設定したので表 2 で示したように、無線 LAN のすべての周波数チャンネルが周波数センシングされている。図 2 に示したように、試作した受信用周波数コンバータの出力側には共振回路（フィルタ）はないので、同コンバータ内部からの局部発振周波数 2449.8MHz の漏えい波は、Monitor Mode AP で動作する Cisco CleanAir Technology では検知されることになる。

なお、プリセクタであるスペクトラムアナライザの IF 出力を試作した受信用周波数コンバータへ入力開始した時刻は、先に述べたように概ね Sat Jun2 15:46:43 2012 であるが、図 3 で、Affected Channel が 7,8,9,10 での Detected Time Sat Jun2 15:40:38 2012 となっていて、約 6 分間前の時刻が表示されている。これは IF 出力を入力する前の準備段階での試作した受信用周波数コンバータの局部発振周波数 2449.8MHz の漏えい波の情報が、単に保持されているだけである。

図 3 で、Affected Channel が unknown にて、InterfererType が WiMax Mobile と表示されている受信波は、Affected Channel が 1,2,3,4 とし検知された WiMax Mobile の受信波のイメージ周波数の一部であると推測される。図 4 に Cisco CleanAir Technology が具備する簡易なスペクトラムアナライザ機能の表示 (Non-WiFi Channel Utilization)を示した。横軸の数字は 2.4GHz 帯の無線 LAN の 13 波の各周波数チャンネル (Channel)の番号を表している。縦軸は、Cisco CleanAir Technology によって検知、そして推測認識して分類された受信波 (Legend) の各周波数チャンネル(Channel)に

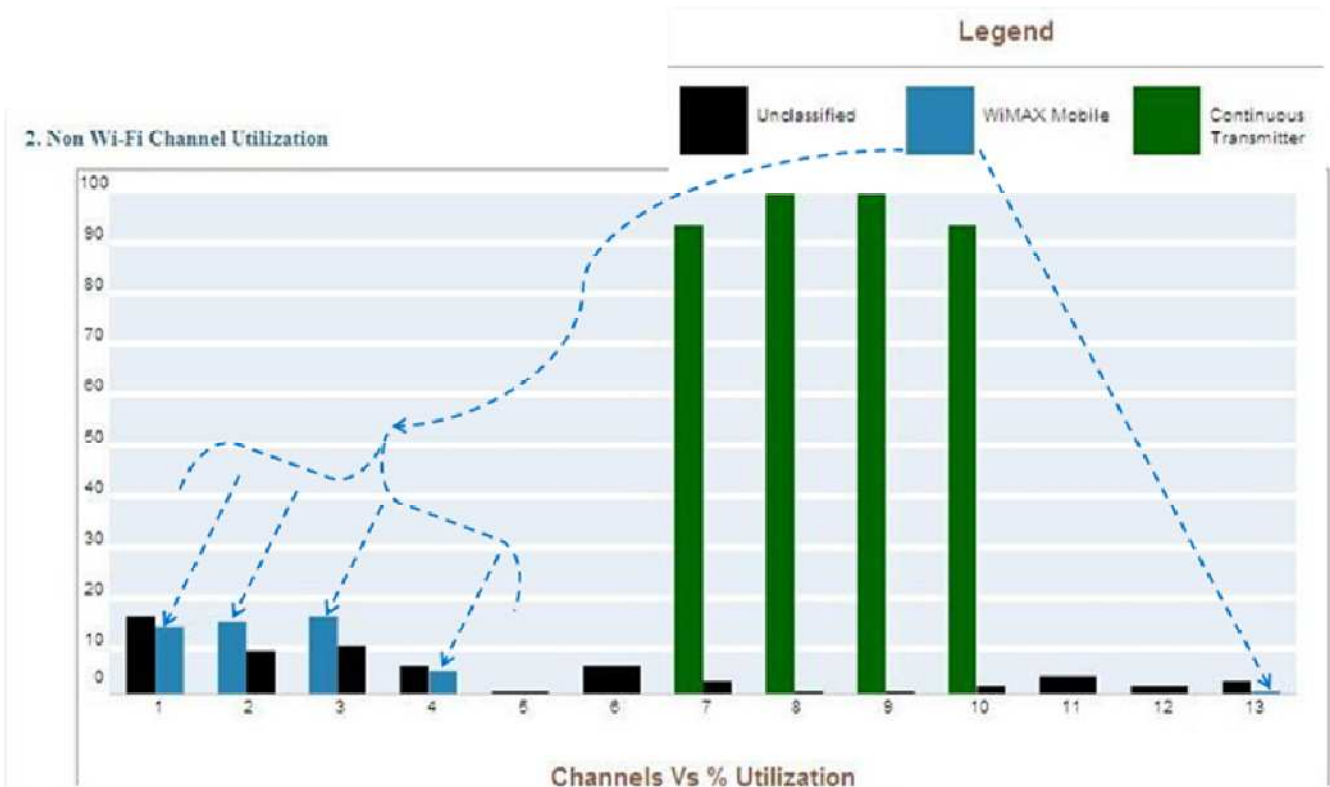


図 4 Cisco CleanAir Technology が具備する簡易なスペクトラムアナライザ機能の表示

おけるある測定時間中における利用率(%)である。Channel が 1,2,3,4 の他に, Channel が 13 (2472MHz) にも, WiMax Mobile がわずかに検知されている。試作した受信用周波数コンバータの局部発振周波数 2449.8MHz + 同コンバータへの入力周波数 37.8MHz = 2487.6MHz (イメージ周波数) は, 2.4GHz 帯の無線 LAN の第 13 チャンネル (2472MHz) の + 15.6MHz であるが, そのイメージ周波数の一部が検知されたと推測される。なお, 図 4 の Channel が 7,8,9,10 の利用率が 90%を越えている Continuous Transmitter は, 上記項目で述べた試作した受信用周波数コンバータの局部発振周波数 2449.8MHz の漏えい波が認識されていると理解できる。

4.2. 550MHz 付近での受信実験

(1) 目的

Cisco CleanAir Technology は, 無線 LAN 周波数帯 (2.4GHz 帯及び 5GHz 帯) において, 表 1 に示した 17 種類の電波干渉源を推測認識して分類することが可能であるが, その分類の中には, 地上デジタルテレビ放送 (ISDB-T: Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial (統合デジタル放送サービス-地上)) は存在していない。そこで, 試作した受信用周波数コンバータを用いた受信システムで, 550MHz 付近の地上デジタルテレビ放送 (ISDB-T) と推測される電波を受信して, Cisco CleanAir Technology が, どのような反応

をするかを把握するために, 550MHz 付近での受信実験を実施した。図 1 に示した受信システムを構成する各機器の設定について, 次の項目(2)以降で述べる。

(2) 無線 LAN アクセスポイントと無線 LAN コントローラの設定

上記項目 4.1 (2) と同じに設定をした。

(3) プリセクタであるスペクトラムアナライザの設定

受信アンテナ:

550MHz 付近の受信用に製作した 3 素子の指向性アンテナ (キュービカルクワッド: 1 波長のループアンテナに反射器用ループと導波器用ループを追加したアンテナ) を利用した。後述する Ch32(587.142857MHz): テレビ埼玉 (JOUS-DTV) の電波を利用して簡易的に測定した本アンテナの暫定的な性能は, 利得は約 7dBi, FB 比 (Front to Back Ratio) は約 4dB, 及び FS 比 (Front to Side Ratio) は約 12dB である。利得は, 3 素子の指向性アンテナと 1 波長のループアンテナで受信して比較したところ, 約 4dB だけ 3 素子の指向性アンテナの受信電力 (RBW10kHz で測定) が大きかった。1 波長のループアンテナの対ダイポールアンテナの利得は約 1dBd といわれているので [15], 約 4dB + 約 1dBd + 2.14dBi = 約 7dBi と推定した。なお, スペクトラムアナライザとの接続には変換コネクタ (BNC 型と N 型) 1 個を使った。

Active Interferers

Interferer Type	Affected Channel	Detected Time	Severity	Duty Cycle (%)	RSSI (dBm)
Continuous TX	7,8,9,10	Sat Jun 2 16:53:31 2012	100	100	-46
Continuous TX	1,2,3	Sat Jun 2 16:57:01 2012	54	100	-55
Continuous TX	unknown	Sat Jun 2 16:57:00 2012	2	100	-58

図 5 Cisco CleanAir Technology が受信波を推測認識して分類した表示画面

受信アンテナの方向は、下記項目の周波数での受信電力が最大になるように設定した。その方向は、受信場所（東京都世田谷区内の住宅地）から見て、東京タワー（東京都港区）の方向になった。なお、受信場所の受信アンテナは、屋内 2 階の窓際に設置したが（地上高約 4m）、東京タワーは目視できる状況ではなく、見通しは、「なし」であった。また、受信場所（東京都世田谷区内の住宅地）と東京タワー（東京都港区）間の地表大円距離は、約 9km である。

受信周波数：557.142857MHz

スペクトラムアナライザで、550MHz 付近で受信できている受信波を確認したところ、受信波は、概ね 6MHz 幅にて、9 つの受信波（概ねの中心周波数が、515MHz から 563MHz まで）が存在している様子だったので、1 つの受信波の中心周波数の 557.142857MHz を、設定した。

IF(中間周波数 37.8MHz)出力の帯域幅：7MHz

上記項目のとおり、1 つの受信波は、概ね 6MHz 幅と理解できたので、設定可能な一番近い値である 7MHz を設定した。

スペクトラムアナライザのプリアンブ：

動作させた。メーカーからの情報では、プリアンブの利得は 15dB から 20dB 程度である。

(4) 試作した受信用周波数コンバータの設定

上記項目 4.1(4)と同じに設定をした。

(5) 実験結果

図 5 に、Cisco CleanAir Technology が受信波を推測認識して分類した表示画面を示す。Interferer Type に Affected Channel が 1,2,3 として Continuous TX が表示されたことを確認できた。

なお、Detected Time Sat Jun2 16:57:01 2012 と表示されているが、プリセクタであるスペクトラムアナライザの IF 出力を試作した受信用周波数コンバータへ入力開始した時刻は概ね Sat Jun2 16:56:51 2012 であると電波時計（標準電波 JJY を受信利用する時計）を目視確認しているため、約 10 秒で、受信波は検知、そ

して、推測認識されて分類完了となった。また、図 5 での項目 RSSI(dBm)、項目 Duty Cycle(%), 及び、項目 Severity は、図 3 と同様の意味である。

Affected Channel が unknown の Continuous TX と、Affected Channel が 7,8,9,10 の Continuous TX も検知、そして、推測認識されているが、下記項目(6)にて考察する。

(6) 考察

総務省の電波の使用状況の詳細[16]からは、550MHz 付近は、地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)が運用されていると理解している。557.142857MHz は、チャンネル番号 27(Ch27)であるが、東京タワーからは、NHK(日本放送協会)総合テレビジョン(JOAK-DTV)が送信されている。従って、今回の実験で得られた図 5 の Interferer Type : Continuous TX という結果は、地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)であると理解できる。

Cisco CleanAir Technology は、無線 LAN 周波数帯(2.4GHz 帯及び 5GHz 帯)において、表 1 に示した 17 種類の電波干渉源を推測認識して分類することが可能であるが、その分類の中には、地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)は存在していない。従って、当然であるが地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)に特徴的な変調波の状況は推測認識されずに、消去法的に分類されて、最終的に、Interferer Type : Continuous TX に分類されるに至ったと推測される。

図 5 で、Affected Channel が 7,8,9,10 にて、InterfererType が Continuous TX と表示されている受信波は、上記項目 4.1(6)で考察したように、試作した受信用周波数コンバータの局部発振周波数 2449.8MHz の漏えい波が認識されていると理解できる。

図 5 で、Affected Channel が unknown にて、InterfererType が Continuous TX と表示されている受信波は、上記項目 4.1(6)で考察したように、Channel が 1,2,3 として検知された Continuous TX の受信波のイメージ周波数の一部であると推測される。本稿では記載を省略するが、Cisco CleanAir Technology が具備

する簡易なスペクトラムアナライザ機能の表示 (Non-WiFi Channel Utilization) で , Channel が 13 (2472MHz) にも , Continuous TX がわずかに検知されていることは確認した .

4.3. IEEE802.11af 草案 1.03 で想定した TV の中心周波数と 11af システムの中心周波数が合っている、または、合っていない状況 (Center on center, Center on lower, Center on higher の 3 種類)を確認する受信実験

(1) IEEE802.11af の概要

IEEE802.11af は , TV ホワイトスペース (TV 放送用に割り当てられているが , 地理的条件や技術的条件によって他の目的にも利用可能な周波数帯) を利用及び共存するために必要となる法的な必要条件に合致する IEEE802.11 の物理層及び MAC 層の改正に関する標準化である [5]-[7] . 2010 年 1 月から Task group による検討が開始され , 2011 年 9 月に草案 1.03(IEEE P802.11af/D1.03)が承認されていて , 現在も , さらに標準化作業が推進されている . IEEE802.11 シリーズの無線 LAN は , 2.4GHz 帯と 5GHz 帯で運用されてきているが , より電波伝搬特性が良好である低い周波数帯の TV ホワイトスペース (11af では 174MHz から 862MHz を想定)で IEEE802.11 シリーズの無線 LAN が , 将来 , 運用できることになれば , 多くの利用者にとって , 大変に有益である .

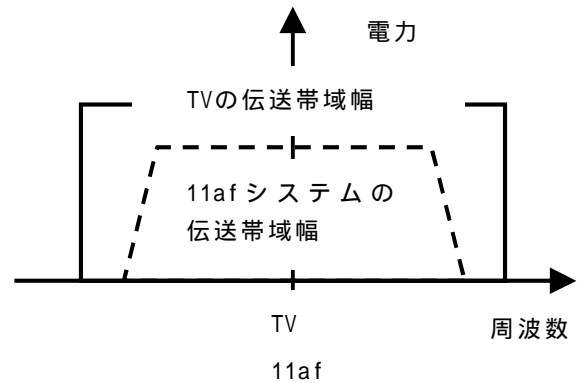
IEEE802.11af 草案 1.03 では , 1 チャンネルあたりの伝送帯域幅は , 現在 11n 等で実現されている 20MHz や 40MHz に加えて , 新たに 5MHz と 10MHz が追加されている (なお , 今後の標準化作業の中で , 変更される可能性はある) . そして図 6 のように , TV の中心周波数と 11af システムの中心周波数が合う、または、合わない状況も想定している [6],[7] . 即ち , 次の 3 種類の状況が想定されている .

図 6 の (a) Center on center : 11af システムの中心周波数が , TV の中心周波数と同じである状況 .

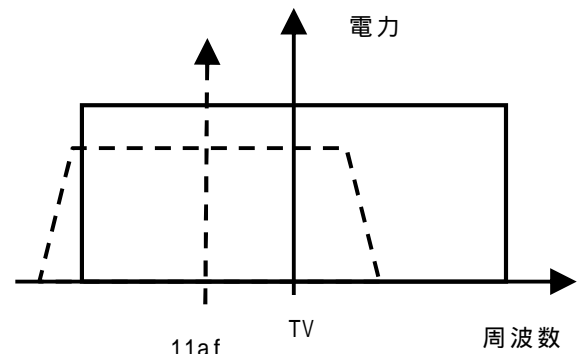
図 6 の (b) Center on lower : 11af システムの中心周波数が , TV の中心周波数より低い状況 .

図 6 の (c) Center on higher : 11af システムの中心周波数が , TV の中心周波数より高い状況 .

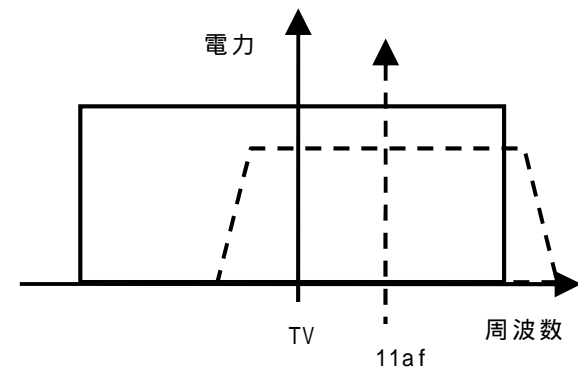
なお , IEEE802.11af 草案 1.03 では , 一次利用者 (TV 放送局) を保護する機能 (一次利用者に割り当てられた周波数の空き状況を把握する機能) は , 周波数センシングではなく , データベース (一次利用者の情報 : 送信所の場所 , 周波数 , 送信電力等) を参照することで実現する様子である . これは , 米国 FCC における技術基準により , データベースを参照できる場合には , 周波数センシングは不要という規程に基づいていると



(a) Center on center



(b) Center on lower



(c) Center on higher

図 6 TV の中心周波数と 11af システムの中心周波数が合う、または、合わない状況

理解できる [6],[7],[17] .

(2) 受信実験の目的

TV ホワイトスペースにおける周波数センシングは , センシングレベル (感度) , センシングの時間間隔や , 誤った検出しないこと等 , 一次利用者を実際に保護するためには , 実装へ向けた低コスト化も考慮すると , 課題は多いと思われる . しかしながら , 周波数センシ

ングは、米国 FCC における技術基準では、データベース（一次利用者の情報：送信所の場所、周波数、送信電力等）を参照できない場合は必須であり、また、シンガポール国 IDA の技術基準では、すべてのデバイスで必須となっている [6],[7] .

電波環境状況は動的に変化するものであるから、より柔軟に、より適切に、周波数の空き状況を把握するためには、静的なデータによるデータベースの参照に加えて、動的で実時間のデータを得る周波数センシング(電波監視)の方法も利用できることが理想である .

そこで、試作した受信周波数コンバータを用いた受信システムで地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)を受信する際に、IEEE802.11af 草案 1.03 で想定した TV の中心周波数と 11af システムの中心周波数が合っている状況(Center on center)や、合っていない状況(Center on lower ,Center on higher)を実験的に再現させてみて、Cisco CleanAir Technology が、どのような反応をするかを把握することで、基礎的な知見を得るための受信実験を実施した .

(3) 実験で受信した地上デジタルテレビ放送

図 1 に示した受信システムで、Ch32 (587.142857MHz):テレビ埼玉 (JOUS-DTV)を受信して、Cisco CleanAir Technology の反応を把握した . プリセクタであるスペクトラムアナライザの受信周波数を Ch32(587.142857MHz)を中心に高低 1MHz 間隔で変化させることで、Center on center ,Center on lower ,及び、Center on higher を想定した .

地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)の受信対象として、Ch32(587.142857MHz):テレビ埼玉 (JOUS-DTV)を採用した理由は、基礎的な知見を得るための最初の段階なので、隣接チャンネルの影響は、「なし」となれるシンプルな状況で受信実験を実施したかったからである . 図 7 は、Ch32(587.142857MHz): テレビ埼玉 (JOUS-DTV)を中心周波数に設定したプリセクタであるスペクトラムアナライザの受信表示画面の一例である(受信日時：2012年6月5日16時30分、受信場所：下記項目(5)で述べる東京都世田谷区内の住宅地). スパン設定は60MHz、RBW設定は10kHzである .

図 7 からは、次のことがわかる .

Ch32(587.142857MHz)より高い周波数側は、地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)と推測できる受信波がなく、空き周波数と見なせる .

Ch32(587.142857MHz)より低い周波数側は、Ch29(569.142857MHz：周波数範囲 566.142857MHz から 572.142857MHz)までは地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)と推測できる受信波がない . 即ち、587.142857-566.142857=21MHz の周波数幅は、空き周

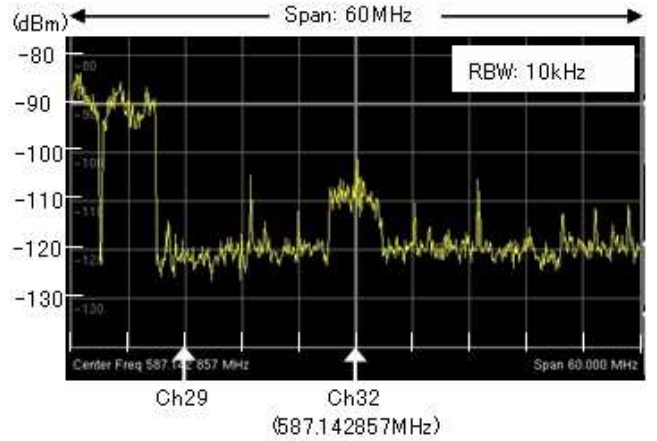


図 7 Ch32(587.142857MHz):テレビ埼玉 (JOUS-DTV)を中心周波数に設定したスペクトラムアナライザの受信表示画面

波数と見なせる .

受信場所（東京都世田谷区内の住宅地）では、本実験の準備を開始した本年の3月中旬から週末（土日）の昼間帯は、プリセクタであるスペクトラムアナライザを使って、最低でも1時間程度は、Ch32(587.142857MHz):テレビ埼玉 (JOUS-DTV)や、その上下の周波数チャンネルの状況を見ていたが、Ch32(587.142857MHz)の隣接チャンネルは、図 7 に示すように、空き周波数と見なせたので、本受信実験では、Ch32(587.142857MHz):テレビ埼玉 (JOUS-DTV)の受信波を採用した .

図 1 に示した受信システムを構成する各機器の設定について、次の項目(4)以降で述べる .

(4) 無線 LAN アクセスポイントと無線 LAN コントローラの設定

Cisco CleanAir Technology の動作モード：Local Mode AP

表 2 で示した Local Mode AP(無線 LAN アクセスポイント)が、無線 LAN 通信(送受信)で運用する特定の1つの周波数(チャンネル)内だけを電波監視するモード)に設定した . Local Mode AP は、表 2 に示したように、周波数分解能が 78kHz(20MHz 幅伝送時)が可能であり、Monitor Mode AP (40MHz 幅伝送相当で動作なので、周波数分解能が 156kHz)より周波数分解能が高いので、採用した .

なお、Local Mode AP の場合、無線 LAN アクセスポイントは、下記項目の 2.4GHz 帯の電波を送信するタイミングは存在するが(例：ビーコン波の送信)、今回の実験では、無線 LAN 通信のためのクライアント端末は、「なし」、であり、また、プリセクタでの受信波は 587.142857MHz 付近であり 2.4GHz 帯とは異なるので悪影響は、「なし」と判断して、周波数分解能の高

さを優先して Local Mode AP を採用した。

無線 LAN 通信 (送受信) の周波数: 2412MHz

(2.4GHz 帯の無線 LAN の第 1 チャネルの中心周波数)

ビーコン波の送信間隔: 600msec

通常の無線 LAN 通信ではビーコン波の送信間隔 100msec であるが、今回の実験では設定できる最長の 600msec まで延長して、無線 LAN 通信 (送受信) する Local Mode AP であっても、極力、受信に専念できる時間を確保した。

(5) プリセクタであるスペクトラムアナライザの設定。

受信アンテナ:

上記項目 4.2 (3) と同じである。受信アンテナの方向は、下記項目の周波数での受信電力が最大になるように設定した。その方向は、受信場所 (東京都世田谷区内の住宅地) から見て、テレビ埼玉・浦和テレビ送信所 (平野原送信所, 新開タワー) (埼玉県さいたま市桜区) の方向になった。なお、受信場所の受信アンテナは、屋内 2 階の窓際に設置したが (地上高約 4m)、テレビ埼玉・浦和テレビ送信所は目視できる状況ではなく、見通しは、「なし」であった。なお、受信場所 (東京都世田谷区内の住宅地) とテレビ埼玉・浦和テレビ送信所 (平野原送信所, 新開タワー) (埼玉県さいたま市桜区) 間の地表大円距離は、約 24km である。

受信周波数: 587.142857MHz を中心に高低 1MHz 間隔で設定した。即ち、Center on center (11af システムの中心周波数が、TV の中心周波数と合っている状況) を想定した受信実験をするためには、587.142857MHz を設定した。一方、Center on higher (11af システムの中心周波数が、TV の中心周波数より高い状況) を想定した受信実験をするためには、587.142857MHz から高い側へ 1MHz 間隔で設定し、Center on lower (11af システムの中心周波数が、TV の中心周波数より低い状況) を想定した受信実験をするためには、587.142857MHz から低い側へ 1MHz 間隔で設定した。より具体的な設定するタイミングは、下記項目 (6) 測定手順で述べる。

IF (中間周波数 37.8MHz) 出力の帯域幅: 16MHz

最大の 16MHz に設定して実験した。より具体的な設定するタイミングは、下記項目 (6) 測定手順で述べる。

スペクトラムアナライザのプリアンプ:

動作させた。メーカーからの情報では、プリアンプの利得は 15dB から 20dB 程度である。

試作した受信周波数コンバータの設定等
上記項目 4.1 (4) と同じに設定をした。

(6) 測定手順

Center on center と Center on higher の場合

(Step1) 無線 LAN コントローラ内部の時刻を、電波時計 (標準電波 JJY を受信利用する時計) を目視参照して、手動で、日本標準時に設定する。

(Step2) プリセクタであるスペクトラムアナライザの周波数を 587.142857+df MHz に設定し、Ch32 (587MHz) のテレビ埼玉 (JOUS-DTV) を受信する (スペクトラムアナライザの画面上で受信できていることを確認する)。ここで、df の初期値は 0 である。

なお、スペクトラムアナライザのスパン設定は 60MHz に設定する。

(Step3) プリセクタであるスペクトラムアナライザをゼロスパン設定に変更し、IF (中間周波数) の周波数帯域幅を 16MHz に設定して、IF (中間周波数) 出力信号を、試作した受信周波数コンバータへ入力する。この際の日本標準時の時刻 (時分秒) を電波時計 (標準電波 JJY を受信利用する時計) を目視参照して記録しておく。この時刻を、Cisco CleanAir Technology による電波監視 (周波数センシング) の開始時刻と定義する。

(Step4) Cisco CleanAir Technology が、受信波を推測認識して分類するか、否かを待つ。受信波を推測認識して分類した場合には、表示された Detected Time と受信電力を記録する。この Detected Time を、Cisco CleanAir Technology が、受信波を検知、推測認識して分類した時刻と定義する。一方、5 分間待っても、受信波を検知、推測認識して分類されないときは、今回の測定は、この (Step4) で終了とする。

(Step5) プリセクタであるスペクトラムアナライザのスパン設定を 60MHz に変更設定し、テレビ埼玉 (JOUS-DTV) を受信する (スペクトラムアナライザの画面上で受信できていることを確認する)。

なお、このスパン変更設定で、ゼロスパン設定ではなくなったので、自動的に IF (中間周波数) 出力信号は停止し、試作した受信周波数コンバータへの入力信号も、「なし」となる。

(Step6) 数分程度の時間の経過を待ち、Cisco CleanAir Technology の出力表示から、上記 (Step4) で検知、推測認識して分類された受信波の情報がなくなったことを確認する。

(Step7) (Step2) の df=1MHz として増加させた後、(Step3) から (Step6) を実施する。

(Step8) この後は、(Step7) を、df=3MHz から 13MHz まで、原則 1MHz ごとに増加させて実施する。なお、今回の実験では、測定の効率をあげて動作の全体像を早期に把握したいので、次の df は、未実施として、対応した。未実施の df (MHz)=2, 6, 7 及び、9。

Center on center と Center on lower の場合

上記項目の(Step1)から(Step6)を実施する。

次に、上記項目の(Step7)において、df=-1 MHzとして減少させて、実施する。

次に、上記項目の(Step8)において、df=-3MHzから-13MHzまで、原則1MHzごとに減少させて、実施する。なお、今回の実験では、測定の効率をあげて動作の全体像を早期に把握したいので、次のdfは、未実施として、対応した未実施のdf(MHz)=-2, -6, -7及び、-9。

(7) 実験結果

上記項目(6)測定手順を2回実施した。

測定日時は、2012年5月28日(月)0時から3時の間である。

図8には、縦軸にCisco CleanAir Technologyが、受信波を検知、推測認識して分類したときの受信電力(dBm)を、横軸に周波数変換された受信波(テレビ埼玉(JOUS-DTV))の中心周波数と想定した11afシステムの中心周波数の差(MHz)をとった場合の測定結果を示した。受信電力(dBm)は、各中心周波数の差(MHz)における2回測定の平均値である(但し中心周波数の差=0MHzは5回測定の平均値である、同差=+3MHzは3回測定の平均値である)。

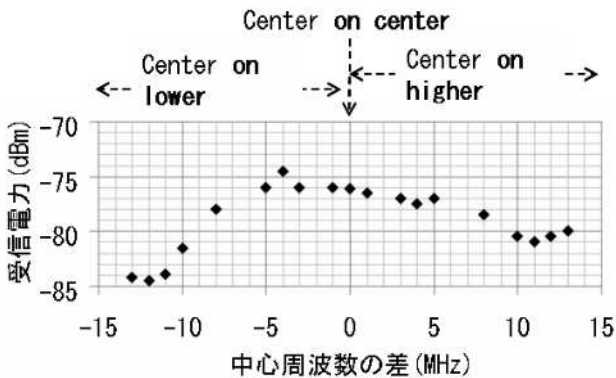


図8 中心周波数の差と受信電力の関係

横軸の右側方向が、Center on higher(11afシステムの中心周波数が、TVの中心周波数より高い状況)を想定した場合になり、反対の左側方向が、Center on lower(11afシステムの中心周波数が、TVの中心周波数より低い状況)を想定した場合になる。横軸が0MHzは、Center on center(11afシステムの中心周波数が、TVの中心周波数と合っている状況)を想定した場合になる。

図9は、縦軸にCleanAir Technologyによる電波監視(周波数センシング)の開始時刻と、受信波を検知、推測認識して分類した時刻との差、即ち、検出時間(秒)を、横軸に周波数変換された受信波(テレビ埼玉(JOUS-DTV))の中心周波数と想定した11afシステム

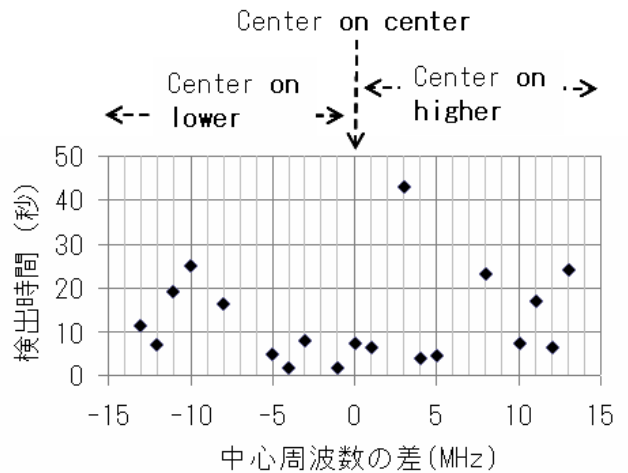


図9 中心周波数の差と検出時間の関係

の中心周波数の差(MHz)をとった場合の測定結果を表した。横軸の解釈は、上記項目に記載と同じである。検出時間(秒)は、各中心周波数の差(MHz)における2回測定の平均値である(但し中心周波数の差=0MHzは5回測定の平均値である、同差=+3MHzは3回測定の平均値である)。

(8) 考察

図8では、横軸の中心周波数の差が、約+8MHz以上の場合で、また、約-8MHz以下の場合で、CleanAir Technologyが示す受信電力は、最大値より約3dB以上の減少となる傾向がわかる。この傾向は、プリセクタであるスペクトラムアナライザのIF(中間周波数)の周波数帯域幅を16MHzに設定したときのことであるから、そのIF(中間周波数)出力のフィルタの周波数特性が表現されていると考えられる。

図9では、検出時間は、概ね2つのグループに分かれる傾向にあると理解できる。1つ目のグループは、横軸の中心周波数の差が+3MHzの場合を除くと、約+5MHz以下の場合で、検出時間は約8秒以内である。2つ目のグループは、横軸の中心周波数の差が+5MHzより大きい場合で、検出時間は約6秒から約25秒に分散している。

図10は、図8と図9の測定データを、受信電力を横軸に、検出時間を縦軸にとって表現した図であるが、検出時間が43秒のデータを除くと(このデータは図9での横軸の中心周波数の差が+3MHzの場合と同じ)、受信電力が概ね-78dBmを境に、2つのグループに分かれる傾向は、さらに理解できる。受信電力が概ね-78dBmより大きいグループは、図9での1つ目のグループ(横軸の中心周波数の差が約+5MHz以下の場合)であり、受信電力が概ね-78dBmより小さいグループは、図9での2つ目のグループ(横軸の中心周波数

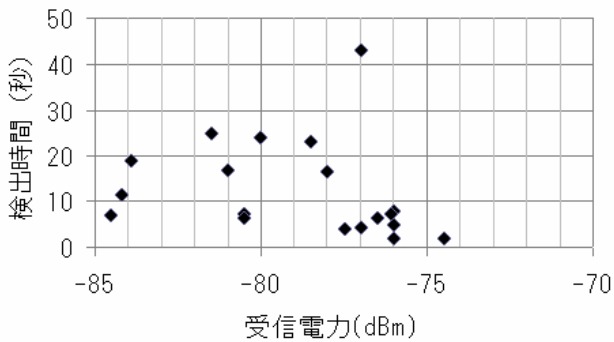


図 10 受信電力と検出時間の関係

の差が約+5MHz より大きい場合)である。

受信波(テレビ埼玉(JOUS-DTV))の周波数帯域幅は約6MHzであるが、本実験の受信システムの周波数帯域幅は16MHzなので、Center on higherやCenter on lowerを想定した測定の場合、受信波(テレビ埼玉(JOUS-DTV))の周波数帯域幅が、本実験の受信システムの周波数帯域幅の中にすべて入らない状況も発生する。図11は、中心周波数の差が+6MHzのCenter on higherのときに、受信波(TV)の周波数帯域幅が、5MHzだけ本実験の受信システムの周波数帯域幅内に存在する例を示した。

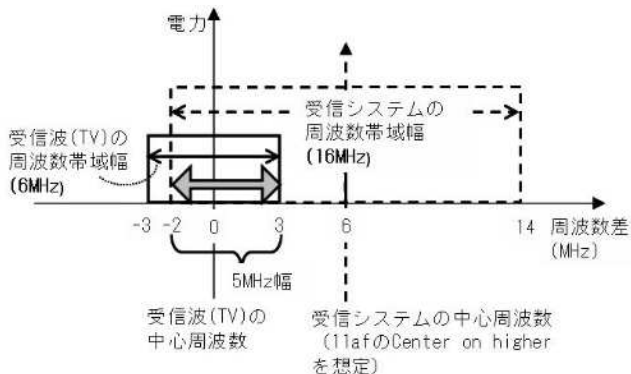


図 11 受信波(TV)の周波数帯域幅が5MHz幅だけ受信システムの周波数帯域幅内に存在する例

表4に、本実験における周波数変換された受信波(テレビ埼玉(JOUS-DTV))の中心周波数と11afシステムの中心周波数の差(MHz)と、受信システムの周波数帯域幅(16MHz幅)内に存在する受信波の周波数帯域幅を示す。中心周波数の差が+5MHz以下の場合、受信波の周波数帯域幅はすべて受信システムの周波数帯域幅内に存在する。一方、中心周波数の差が+5MHzより大きい場合は、その差が大きくなるに従い、受信波の周波数帯域幅は、受信システムの周波数帯域幅内から出ていくことになる。

そこで、図12には、横軸に受信システムの周波数帯域幅(16MHz幅)内に存在する受信波の周波数帯域

中心周波数の高低状況(11afがTVに対して)	中心周波数の差(MHz)	受信システムの周波数帯域幅(16MHz幅)内に存在する受信波の周波数帯域幅(MHz)
Center on lower	-13	0
	-12	0
	-11	0
	-10	1
	-8	3
	-5	6
	-4	6
	-3	6
Center on center	0	6
	1	6
Center on higher	3	6
	4	6
	5	6
	8	3
	10	1
	11	0
	12	0
	13	0

表 4 中心周波数の差と受信システムの周波数帯域幅(16MHz幅)内に存在する受信波の周波数帯域幅(MHz)

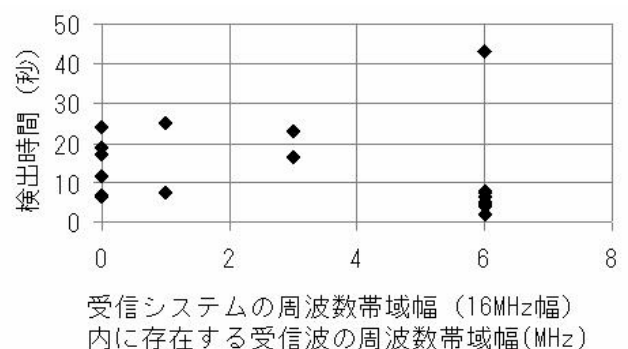


図 12 受信システムの周波数帯域幅(16MHz幅)内に存在する受信波の周波数帯域幅(MHz)と検出時間の関係

幅(MHz)を、縦軸には検出時間(秒)をとった場合の測定結果を示した。図12から、受信波の周波数帯域

幅が受信システムの周波数帯域幅(16MHz幅)の中に存在するときの検出時間の最大は8秒であるが(検出時間が1つだけ43秒と大きく外れているデータを不採用とした場合),受信波の周波数帯域幅が受信システムの周波数帯域幅(16MHz幅)から出ていくに従い検出時間は増加していき,最大25秒の検出時間となっていることがわかる。Cisco CleanAir Technologyの採用する周波数センシングの方法は非公開で詳細は不明ではあるが,今回の実験からの知見としては,TVの受信波の検出時間を短くしたい場合には,TVの受信波の周波数帯域幅のすべてが受信システムの周波数帯域幅の中に存在して周波数センシングされる必要があると推測される。

検出時間が1つだけ43秒と大きく外れている原因の検討は今後の課題である。これは図9では,横軸の中心周波数の差が+3MHzの場合であるが,何回測定しても同様な状況なので,例えば,周波数変換後のスプリアスの悪影響等がある可能性も想定される。

図9で,2つ目のグループに分類した横軸の中心周波数の差が+5MHzより大きい場合で,検出時間は約6秒から約25秒に分散している原因の検討も今後の課題である。この場合は,これまでの考察から受信電力が低下している状況であると理解できたので,例えば,受信電力の変化に伴うSN比の劣化がCisco CleanAir Technologyにおける周波数センシングの動作に何らかの影響を及ぼしていることも想定される。

5. 実験中に観測された UHF 帯(Ch31 と Ch34)における異常電波伝搬について

5.1. 状況概要

(1) 上記項目 4.3(7) 実験結果で述べたように,その受信実験における Ch32(587.142857MHz):テレビ埼玉(JOUS-DTV)の測定は,2012年5月28日(月)0時から3時の深夜に実施したが,最初は,前日の2012年5月27日(日)の14時頃から実施を試みた。ところが,空き周波数であると想定していた,下側の Ch31(581.142857MHz)と,上側の Ch34(599.142857MHz)に,地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)と推測できる受信波が存在していることを確認した。UHF帯(Ch31とCh34)における異常電波伝搬が発生したと理解した。

14時頃から17時頃まで目的とする実験を実施できる状況にならないか継続的にプリセクタであるスペクトラムアナライザの受信画面を見ていたが,継続して受信波が存在しており,実験実施の延期を決断して受信を中断した17時頃も到来の状況であった。

その後,同日の20時30分には,下側の Ch31(581.142857MHz)と,上側の Ch34(599.142857MHz)は,受信波は「なし」と判断でき,空き周波数の状況に戻

っていることを確認した。

(2) 本実験の準備を開始した本年の3月中旬から週末(土日)の昼間帯は,プリセクタであるスペクトラムアナライザを使って,最低でも1時間程度は,Ch32(587.142857MHz):テレビ埼玉(JOUS-DTV)や,その上下の周波数チャンネルの状況を見ていたが,Ch31(581.142857MHz)や Ch34(599.142857MHz)に受信波は「なし」と判定できる状況だった。なお,週末(土日)の夜間帯や,平日の昼夜間帯における状況は,不明である。

また,異常電波伝搬が発生した翌日の2012年5月28日(月),6月2日(土)から5日(火)も昼間帯に観測を実施したが,Ch31(581.142857MHz)や Ch34(599.142857MHz)に受信波は「なし」と判定できる状況だった。

(3) 受信場所(東京都世田谷区内の住宅地)における異常電波伝搬が観測された2012年5月27日(日)の14時頃から17時頃の気象状況は,晴天,風は弱く,気持ち良く過ごせる(やや,ひんやりとした感覚もあり)状況であった。

5.2. 各受信波の概ねの到来方向と受信電力

受信に使用した3素子の指向性アンテナの簡易的に測定した暫定的な性能は上記項目 4.2(3) に示したように,利得は約7dBi,FB比(Front to Back Ratio)は約4dB,及びFS比(Front to Side Ratio)は約12dBであり,FB比は小さめではあるが,その受信アンテナの方向を変化させ,プリセクタであるスペクトラムアナライザにより把握した概ねの受信状況は,次のとおりである。

(1) 所望波の Ch32(587.142857MHz):テレビ埼玉(JOUS-DTV)の受信波

受信場所(東京都世田谷区内の住宅地)から見て,概ね北方向から到来している。

受信電力(RBW:10kHz)は,図7と同様に,-105dBmから-110dBm程度である。

(2) 異常電波伝搬した Ch31(581.142857MHz)の受信波

受信場所(東京都世田谷区内の住宅地)から見て,概ね北西方向から到来していると思われる。但し,受信アンテナのFB比が4dBと小さめなので,180度反対方向の概ね南東方向の可能性もある。

受信電力(RBW:10kHz)は,変動はしているが-110dBm程度である。

(3) 異常電波伝搬した Ch34(599.142857MHz)の受信波

受信場所(東京都世田谷区内の住宅地)から見て,概ね東方向から到来していると思われる。但し,受信アンテナのFB比が4dBと小さめなので,180度反対

方向の概ね西方向の可能性もある。

受信電力 (RBW:10kHz) は、変動はしているが -105dBm 程度である。

5.3. 考察

(1) 文献[18],[19]によると Ch31(581.142857MHz)を運用する地上デジタル放送中継局は、受信場所 (東京都世田谷区内の住宅地) から見て、東京都西部内に概ね北西側に1局が、概ね西側にも1局が存在する。また、概ね南東側になる千葉県内にも、複数局が存在する。受信アンテナのFB比が4dBと小さめなので、上記項目5.2(2)の観測結果の送信局は、概ね北西側か、または、概ね南東側かは、明確には言えないと思われる。

(2) 文献[18],[19]によると Ch34(599.142857MHz)を運用する地上デジタル放送中継局は、受信場所 (東京都世田谷区内の住宅地) から見て、概ね東側から南東側になる千葉県内に、複数局が存在する。また、概ね南西側になる東京都西部にも、1局が存在する。受信アンテナのFB比が4dBと小さめなので、上記項目5.2(3)の観測結果の送信局は、概ね東側か、または、概ね南西側かは、明確には言えないと思われる。

(3) ある無線通信システムのサービスエリア内で、異常電波伝搬が発生する可能性がある場合には、電波環境状況が動的に変化する可能性があるということである。従って、より柔軟に、より適切に、周波数の空き状況を把握するためには、静的なデータによるデータベースの参照に加えて、動的で実時間のデータを得る周波数センシング(電波監視)の方法も利用できると望ましいと思われる。

(4) 2012年5月27日(日)の昼間帯に観測されたUHF帯(Ch31とCh34)での異常電波伝搬の発生原因は不明であるが、例えば、気象状況に起因して大気の屈折率が変化することによってラジオダクトが発生したために、通常ならばサービスエリア外になる遠方まで電波伝搬した可能性がある[20]。

6. まとめ

本稿では、無線LAN周波数帯(2.4GHz帯及び5GHz帯)向けのコグニティブ無線技術であるCisco CleanAir Technologyを任意の周波数帯で試行するための受信用周波数コンバータと受信システムを試作し、それらをTVホワイトスペース等で試行させた受信実験について述べた。

(1) 試作した受信用周波数コンバータと受信システムにより、Cisco CleanAir Technologyは、2.6GHz付近の受信波をWiMAX Mobileとして、検知、推測認識して分類できた。総務省の周波数割り当て表からは、2.6GHz付近は、広帯域移動無線アクセスシステム

(WiMAX)が運用されていると理解しているため、今回の実験結果は妥当であると考えられる。

(2) 試作した受信用周波数コンバータと受信システムにより、Cisco CleanAir Technologyは、550MHz付近の受信波をContinuous TXとして、検知、推測認識して分類できた。総務省の周波数割り当て表からは、550MHz付近は、地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)が運用されていると理解している。Cisco CleanAir Technologyは、無線LAN周波数帯(2.4GHz帯及び5GHz帯)において、17種類の電波干渉源を推測認識して分類することが可能であるが、その分類の中には、地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)は存在していない。従って、当然であるが地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)に特徴的な変調波の状況は推測認識されずに、消去法的に分類されて、最終的に、地上デジタルテレビ放送(ISDB-T)の受信波は、Continuous TXに分類されるに至ったと推測される。

(3) 試作した受信用周波数コンバータと受信システムにより、IEEE802.11af 草案 1.03で想定したTVの中心周波数と11afシステムの中心周波数が合っていない状況(Center on center, Center on lower, Center on higherの3種類)を実験的に再現させてみて、Cisco CleanAir Technologyが、どのような反応をするかを把握することで、基礎的な知見を得るための受信実験を実施した。Cisco CleanAir Technologyの採用する周波数センシングの方法は非公開で詳細は不明ではあるが、今回の実験からの知見としては、TVの受信波の検出時間を短くしたい場合には、TVの受信波の周波数帯域幅のすべてが受信システムの周波数帯域幅の中に存在して周波数センシングされる必要があると推測された。

(4) 受信電力が大きめなのに、検出時間が極端に長くなる場合についての原因の追求は、今後の課題である。

(5) 本受信システムは、プリセクタであるスペクトラムアナライザの受信可能な広い周波数範囲についてCisco CleanAir Technology(無線LAN周波数帯向けのコグニティブ無線技術)を試行させることが可能である。今後はいろいろな周波数帯で飛び交う電波を受信してCisco CleanAir Technologyを試行させて、各種無線局の効果的な周波数共用の方法の知見を深めながら、IEEE802.11シリーズの無線LANをより効果的に使える新たな周波数帯の探求をしていきたい。

(6) 実験中に異常電波伝搬を観測した。空き周波数と想定していたところへ電波が到来する状況が発生した。より柔軟に、より適切に、周波数の空き状況を把握するためには、静的なデータによるデータベースの参照に加えて、動的で実時間のデータを得る周波数セ

ンシング(電波監視)の方法も利用できることが望ましいと思われる。

謝 辞

Cisco CleanAir Technology について御指導をいただきましたシスコシステムズ合同会社の久保井様、久保井様、Cisco Systems, Inc. の Mr. Ghosh, Dr. Cheng, 元シスコシステムズ合同会社の篠崎様、原様に感謝いたします。受信周波数コンバータの試作に御尽力いただきましたマスキシステム有限会社の増木様に感謝いたします。スペクトラムアナライザについて御指導をいただきましたアンリツ株式会社の織井様、久米様に感謝いたします。最後に、本実験実施の機会を与えていただきましたネットワークシステムズ株式会社の延坂担当本部長(当時、技術本部長)、篠浦執行役員、岩本ビジネス推進本部長、飯田第1製品技術部長、大高アクセスネットワークチームリーダーに感謝いたします。

文 献

- [1] 蓬田宏樹, Phil Keys, "特集 無線 LAN 新たな挑戦," 日経エレクトロニクス 2011年9月5日号, 田野倉 保雄(編), pp.30-31, 日経 BP 社, 東京, 2011.
- [2] シスコシステムズ合同会社, "無線 LAN ビジネス研究会(第3回)資料 3-3 シスコシステムズ合同会社 提出資料," 総務省, http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/lan/02kiban04_03000070.html, Apr.24,2012.
- [3] BCN Bizline, "法人向け無線 LAN 機器(2011年12月)," "BCN," <http://biz.bcnranking.jp/map/corporationlan/>, Dec.26,2011.
- [4] Cisco systems, "Radio Resource Management under Unified Wireless Networks," Cisco systems, http://www.cisco.com/en/US/tech/tk722/tk809/technologies_tech_note09186a008072c759.shtml, May 17, 2010.
- [5] 浅井裕介, "第90回電波利用懇話会 「無線 LAN をめぐる最近の標準化動向について」," 電波産業会, <http://www.arib.or.jp/osirase/seminar/no90konwakai.pdf>, Nov.17,2011.
- [6] 原田博司, "ホワイトスペース推進会議 共用検討ワーキンググループ(第三回会合)資料 3-1 海外における TV ホワイトスペース利用システムに関する検討状況," 総務省, http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/whitepace/02kiban09_03000108.html, Oct.23,2011.
- [7] 原田博司, 村上 誉, Yohannes D. Alemseged, Chen Sun, Tuncer Baykas, "海外における TV ホワイトスペース利用システムにおける検討状況," 信学技報, SR2011-108, pp.25-32, Mar. 2012.
- [8] 松村 武, 原田博司, "TV ホワイトスペースの利用を目指した UHF コンバータの試作," 信学技報, SR2012-14, pp.87-92, May 2012.
- [9] 原田博司, "電波資源の有効利用を目指すコグニティブ無線技術," 信学誌, vol.94, no.1, pp.31-34, Jan. 2011.
- [10] シスコシステムズ合同会社, "無線 LAN ビジネス研究会(第5回)資料 5-5 追加質問に対する回答(第3回)," 総務省, http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/lan/02kiban04_03000078.html, May.29,2012.
- [11] D.Stiff, M.Rhoades, "Spectrum Analyzers are Not All Created Equal," Cisco systems, http://www.cisco.com/web/learning/le21/le39/docs/TDW_110_Prez0.pdf, Aug.3, 2011.
- [12] Cisco systems, "Cisco CleanAir Technology: Intelligence in Action," Cisco systems, http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns340/ns394/ns348/ns1070/white_paper_c11-599260.html, 参照 June 8, 2012.
- [13] Cisco systems, "Cisco CleanAir - Cisco Unified Wireless Network Design Guide," Cisco systems, http://www.cisco.com/en/US/products/ps10315/products_tech_note09186a0080b4bdc1.shtml, Sept. 28, 2010.
- [14] 総務省, "我が国の電波の使用状況 使用状況の詳細(平成24年4月現在) 960MHz~3000MHz," <http://www.tele.soumu.go.jp/resource/search/myuse/use/960m.pdf>, 総務省, Apr. 2012.
- [15] "1 波長ループアンテナ," アンテナ・ハンドブック, 角居洋司(編), 吉村裕光(編), pp.355-356, CQ 出版社, 東京, 1985.
- [16] 総務省, "我が国の電波の使用状況 使用状況の詳細(平成24年4月現在) 335.4MHz~960MHz," <http://www.tele.soumu.go.jp/resource/search/myuse/use/335m.pdf>, 総務省, Apr. 2012.
- [17] 石津健太郎, 村上 誉, 藍 洲, チャン ハグエン, 原田博司, "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, SR2012-4, pp.23-30, May 2012.
- [18] マスプロ電工, "地上デジタル放送 チャンネル一覧表 関東エリア(更新日 2012年3月21日現在)," マスプロ電工, <http://www.maspro.co.jp/contact/bro/kantou.html>, Mar.21, 2012.
- [19] 総務省関東総合通信局, "地上デジタル放送 デジタル中継局の放送エリア," 総務省関東総合通信局, <http://www.soumu.go.jp/soutsu/kanto/bc/dgindex.html>, 参照 June 8, 2012.
- [20] 明山哲, 伊藤泰宏, 井原俊夫, 小川英一, 唐沢好男, 河崎善一郎, 佐藤明雄, 塩川孝泰, 長野勇, 藤井輝也, 細矢良雄, 真鍋武嗣, 山口芳雄, 電波伝搬ハンドブック, 小川英一(編), 唐沢好男(編), 真鍋武嗣(編), リアライズ理工センター, 東京, 1994.