

[招待講演] 電波資源有効利用に向けた分散スペクトラムセンシング

猿渡 俊介[†] 長縄 潤一[†]

[†] 東京大学先端科学技術研究センター 〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1

E-mail: †{saru,naga}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 電波の効率的な利用に向けては、政府による適切な電波政策の運用が求められる。我が国では電波政策の方針としてコマンドアンドコントロール方式が採用されているが、政策決定に時間を要するという課題がある。コマンドアンドコントロール方式を高速化するには、政策決定の基礎となる電波の利用状況に関するデータを迅速かつ詳細に収集できることが必要不可欠である。本稿では、電波の利用状況を多地点で測定する分散スペクトラムセンシングシステムについて述べる。本システムは、多地点への展開を実現するために、多様な無線機や測定器を包含できるアーキテクチャを持つ。その結果、既存の無線機や測定器をセンシングノードとして利用することができ、測定範囲の迅速な拡大を実現する。

キーワード 電波政策, 電波の利用状況, 周波数帯域利用率

[Invited Paper] Distributed Spectrum Sensing for Effective Radio Resource Management

Shunsuke SARUWATARI[†] and Junichi NAGANAWA[†]

[†] Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

E-mail: †{saru,naga}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract Suitable management of spectrum policy is essential towards efficient use of spectrum. Most common spectrum policy regime is Command and Control (C&C), but C&C is needed to speed up in its political procedure. The first step is to establish the measurement system that provides spectrum utilization data, which is the basis of political decision, from all over the nation in real-time manner. This paper describes a distributed spectrum sensing system, which measures spectrum utilization at multiple locations. The distributed spectrum sensing have the architecture to include various type of RF devices and measurement equipments, thus, existing devices or measurement equipments can be turned into sensing nodes.

Key words Spectrum Policy, Spectrum Utilization, Spectrum Occupancy

1. はじめに

電波は有限の資源である。土地に例えられることも多い。電波は情報通信サービスの核となる資源であるものの、これまでの電波政策では特定のサービスに対して固定的に周波数を割り当て、その後の変更は必要に応じて行うというスタイルであった。情報通信技術が発展するにしたがって、ユーザの生活スタイルと利用する情報通信サービスが多様化の一途を辿っている。その中で、これまでの電波の割り当て方と電波を利用した情報通信サービスの間にギャップが生まれ、実際には使われていない帯域が多いにも関わらず電波が不足する事態が発生している。電波は自由財から希少な資源になったと言える [1]。今後の情報通信サービスの発展には限られた電波資源をいかに効率的に扱うかが重要である。

電波の効率的な利用の問題の一例としてテレビのブロード

キャストイングが挙げられる。テレビのブロードキャストイングは、強い電波を1本のアンテナから出すことで、低コストで多くの家庭に映像コンテンツを配信する。例えば東京タワーからは半径100km圏に映像コンテンツが配信される。ブロードキャストイングは多くのユーザが同じ映像コンテンツを同じタイミングで必要としている場合には有効であるが、多くのユーザが異なる映像コンテンツを異なるタイミングで必要としている場合には有効ではない。むしろ携帯電話や無線LANのようにセルを小さく抑えて同じ周波数帯を別の場所で再利用し、データ通信として多様なサービスを提供する技術が有効である。しかしながら、現在テレビで使用している帯域を携帯電話や無線LANで使用可能とするためには現在の電波政策のままでは難しい。

現在の電波政策では、新しい無線システムへの帯域の割り当てや回収などの政策決定に時間を要するという問題がある。現

在、我が国では電波の利用状況を、免許人による調査票の提出で把握しているものの[9]~[11]、調査頻度が3年に1回と少ない。また、より現実に近いデータを得るために、実環境における電波の利用状況の測定が各国で実施されているが[12]~[30]、これらの測定では地点数が限られており、空間的な電波の利用状況は十分に明らかになっていない。

電波政策を迅速に行うにあたっては、通常は見えない電波の利用状況を見える化することが必須である。このような観点から、本稿では、すでに展開されている無線機や測定器を測定端末として利用可能とすることで空間的な利用状況を詳細かつ迅速に収集する分散スペクトラムセンシング[33]について述べる。現在の電波の利用状況を誰でも知ることができ環境を提供することで、電波政策の迅速化への貢献を目指す。

本稿の構成は以下の通りである。2.では現在の電波政策の問題点と既存のアプローチを概観し、本研究で分散スペクトラムセンシングに着目した理由を明らかにする。3.では分散スペクトラムセンシングの全体像と各機構の詳細について述べ、4.で実装を示す。5.では、実環境における測定を通して実装した分散スペクトラムセンシングシステムの評価を示す。最後に6.でまとめとする。

2. 電波の有効利用

2.1 電波政策

近年の無線通信技術の急激な進展に伴い、電波は自由財から希少な資源となった。一方で、近年の測定によって、周波数帯域の中には割り当て済みに関わらず、時間や場所によって未使用の帯域が存在することが明らかとなった[17]。そのため、電波の効率的な利用が強く求められるようになってきている。

現在、我が国では、電波は政府の管理下にあり、電波政策が電波の利用に強い影響力を持っている。電波政策の枠組みとしては、政府による周波数帯域の割り当ての決定と、割り当てられた周波数帯域の排他的な利用の2つを原則とするコマンドアンドコントロールが採用されている。

コマンドアンドコントロールでは、周波数帯域の利用方法の決定や事業者の選定といった電波政策上の決定を行う際に、公平性を期すために長期間の検討を要する。そのため、無線通信技術の発展に従って次々に登場する新しいタイプの無線機に対して、迅速に周波数帯域を分配することが困難である。また、既に使用されなくなった周波数帯域の回収にも時間を要し、周波数帯域の非効率的な運用に繋がっている。

周波数帯域の運用をより迅速にするために、次の2つの新しい方式の電波政策が提案されている。1つ目は、市場原理の導入である[2]。市場原理の導入の例としてオークションが挙げられる。オークションでは、政府により周波数帯域の新規割り当てが公示され、事業者が入札を行い、最高価格を示した事業者が周波数帯域の利用権を獲得する。オークション導入により、最も資金的な競争力があり、かつ事業化の意欲のある事業者に周波数帯域の利用を認めることができる。その結果、周波数帯域のより効率的な利用が期待できる[2]。

また、周波数帯域の二次取引を認めるといった市場原理の導

入も考えられる。[3], [4]。現在、我が国では周波数帯域の譲渡は禁じられているため、周波数帯域の流動性が低い状態となっている。二次取引を許可することで、より競争力のある事業者への周波数帯域の移譲の促進が期待されている[5]。

しかしながら、全ての周波数帯域に市場原理を導入した場合には電波が金融商品化することによる弊害が発生することが想定される。例えば、落札価格の高騰した場合には事業者の負担が増加する。資金力のある事業者が帯域を買い占めることで市場の寡占化も生じうる。また、既に帯域を持つ事業者が新規事業者に比べて極めて有利となる。さらに、利益が上がないような防災・救急・警察・軍事等の公共無線システムや、アマチュア無線や電波天文等での利用のための帯域確保が困難になる。

2つ目の電波政策の方式として、周波数帯域の公共財化(周波数コモンズ)が挙げられる[6]。周波数帯域の公共財化とは、周波数の利用に関わる免許制度を廃止し、誰でも自由に周波数帯域を利用できるようにするものである。これにより、無線通信事業への新規参入が容易になる。また、近距離のウルトラワイドバンドなどを組み込んだAV機器の販売などを認無して販売できるようになるため、技術革新の促進が期待できる。電波資源の利用が促進されることで、周波数が効率的に利用される。

しかしながら、公共財化では、周波数帯域の利己的な利用が無秩序な状態を引き起こす「コモンズの悲劇」[8]が懸念される。事業者やメーカーといった帯域の利用者による自主的な規制の導入も提案されている[7]が、救急、警察、消防、軍事といった重要度の高い公共の無線システムは、完全な周波数帯域の政府による保証のもとに運用されるのが望ましい。

このように、新しい電波政策の方向性として、市場原理の導入と周波数帯域の公共財化が存在するものの、従来のコマンドアンドコントロールを完全に代替するものではない。仮に市場原理と周波数帯域の公共財化を導入するにしても、従来のコマンドアンドコントロール方式と併用するのが現実的である。すなわち、周波数帯域の効率的な利用を実現するには、コマンドアンドコントロールの迅速化が必須となる。

コマンドアンドコントロールを迅速に行うためには、まずは、政策決定の基礎となる電波の利用状況のデータを詳細かつ迅速に取得可能な仕組みが必要となる。現在、我が国では、総務省によって電波の利用状況調査が実施されている[9]~[11]。利用状況調査では、総務省に届出された各免許人に調査票の記入を要請する。各免許人は調査票に対して、無線局の種類、数、運用可能時間、実運用時間帯(30分刻み)、通信量などを記入する。しかしながら、調査票方式では、3年毎にしか調査を実施できていないことから、迅速さという点では不十分である。

2.2 従来研究

電波の利用状況を迅速かつ詳細に知るためには、実環境における電波の強度を測定することで、周波数帯域の占有の有無を直接判断することが必要となる。実環境での測定により、調査票の配布と集計に関わる手間を削減し、迅速な調査を実施できるようになる。また、周波数帯域の占有の有無を直接判断するため、散発的な通信が行われる場合や受信待機の場合でも、周波数帯域が占有されていない時間を明らかにできる。さらに、

届出の無い無線システムに関しても、電波の利用状況を調査することができる。

これまでに、一般的な電波環境を代表する1地点に、1台の測定システムを設置することによる電波の利用状況の測定が広く行われてきた[12]~[15]。測定システムは主にアンテナ、スペクトラムアナライザやレシーバ、データ記録用のPCで構成される。例えば、[15]では、繁華街を見渡すビルの屋上にアンテナ、スペクトラムアナライザ、ラジオスキャナ、PCを設置して、陸上移動無線と公共無線の利用状況を測定している。測定データから、平日、年末年始、クリスマス休暇といった時間的な電波の利用状況の変化を明らかにしている。

しかしながら、電波の利用状況は場所毎に異なるため、必ずしも1地点での測定が他地点の電波の利用状況を代表しない。例えば、屋内や地下において微小電力で通信する無線端末は、屋外に設置した測定システムでは検出できない可能性がある。また、発信された電波が建物や山により遮られることで、測定システムまで届かない場合も考えられる。

より正確に電波の利用状況を把握するには、複数地点での測定と測定地点間の比較が重要となる。複数地点での測定を行う方法としては、測定システムを様々な測定地点へ持ち運ぶ方法などが挙げられる[16]~[22]。例えば[17]では、主にスペクトラムアナライザ、PCで構成される測定システムをアメリカ国内の6地点へ順次持ち運び、測定を行っている。測定の結果、30MHzから2.9GHzの周波数帯域利用率は、最大の地点で13.1%、最低の地点で1%、平均して5.2%のみであることを明らかにしている。

しかしながら、[16]~[22]は、測定システムが1台で、時間的な測定と空間的な測定を両立することができない。すなわち、多地点での測定を実施すれば、1地点あたりの測定時間を短くしなければならず、測定時間を延ばすには地点数を減らさなければならない。また、同時に1地点しか測定できないことから、同時刻における地点間の比較を行うことができないという課題がある。

時間的かつ空間的な測定の両立と地点間の比較を行うために、複数台の測定システムによる複数地点の同時測定が行われている[23]~[30]。例えば、[23]は市街地の4地点に測定システムを設置して、周波数帯域の占有率が測定地点によって4%から15%までの幅があること明らかにしている。周波数帯域の占有率の時間的な変動は、4地点で似た傾向を示した一方で、ジャミング信号といった測定地点固有のイベントも観測されている。

しかしながら、[23]~[30]で用いられたシステムでは、測定システムの調達コストによって測定地点を十分に拡大を実現できないと考えられる。測定システムは主にアンテナ、スペクトラムアナライザ、PCで構成されるが、価格の大部分を占めると考えられるのがスペクトラムアナライザである。一般に、スペクトラムアナライザは数十万円~数千万円ほどの価格となる。

電波の利用状況の測定という点では、スペクトラムアナライザの性能は過剰な部分が存在する。例えば、スペクトラムアナライザには、回路の線形性の確保と出力の校正がなされている。また、近年の無線機器は符号化利得の獲得や変調方式の改善を

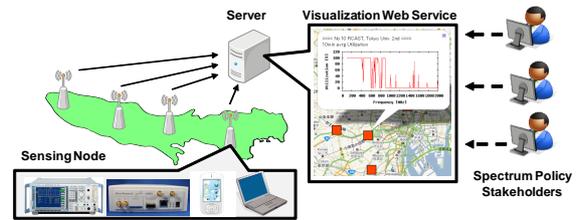


図1 システム全体像と利用イメージ

うけて、より低レベルの電力まで受信した信号を正しく復号可能となった。すなわち、周波数帯域が占有されているとみなされる電力レベルは非常に低い。そのため、受信した信号の強度のみで周波数帯域の占有を判断する場合、より高感度なスペクトラムアナライザの購入が必要になる。

3. 分散スペクトラムセンシングシステム

既存の研究では、電波の利用状況として、スペクトラムの測定を行っているが、本研究の目的に鑑みると、周波数帯域が使われているか、使われていないかという2値情報が収集できれば良い。電波政策上で最も重要な決定は周波数帯域の配分であり、周波数帯域の利用率やデューティサイクルといった統計量が参考になる。例えば、これらの統計量からは、周波数帯域が未使用のままではないか、周波数帯域が混雑しており新たな割り当てが必要ではないか、複数の無線システムを1つの帯域で共存して運用できないか、といった事がらを判断をすることができる。これらの統計量は2値情報だけで計算することが可能である。

2値情報はスペクトラムアナライザ以外の様々な無線機や測定器からも取得することができる。例えば、ノートPCに付随する無線LANモジュールを活用すれば、2.4GHz帯や5.1GHz帯の測定が可能である。地上デジタル放送のチューナーを活用すれば、TV放送帯域の測定が可能である。そのため、本システムでは、スペクトラムアナライザに限らず、様々な無線機・測定器を測定システムに組み込めるようにする。

多様な無線機・測定器を用いて測定システムを構成できれば、研究機関、企業や個人が所有する既存の測定器や無線デバイスを測定システムに転用することが可能になる。そのため、コスト負担の大きいスペクトラムアナライザを新たに購入する数を減らすことができる。また、ユーザが日常生活において端末型の無線機を持ち運ぶことで、様々な地点からのデータの収集も可能となる。

図1にシステム全体像を示す。本システムは多数のセンシングノードとサーバによって構成される。センシングノードとしては多様な無線機や測定器を利用する。各センシングノードは電波の利用状況を測定し、測定結果をインターネットを通じてサーバへと送信する。本システムの詳細に関しては[33]を参照されたい。

図2に本システムのソフトウェアアーキテクチャを示す。サーバはセンシングノードに対する制御用のコマンドの送信と、センシングノードからの測定データの受信を行う。また、サーバ

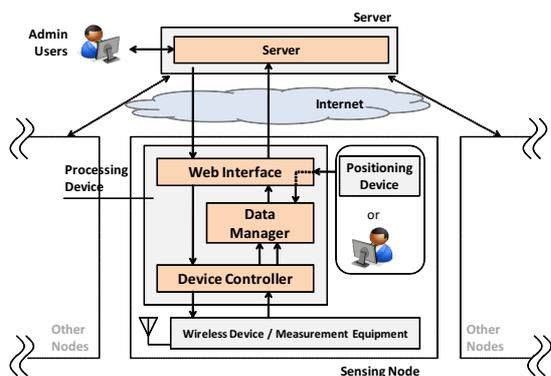


図 2 アーキテクチャ

はユーザに対して測定データの検索と可視化の機能を提供する。

センシングノードはウェブインタフェース、データマネージャ、デバイスコントローラの3つのソフトウェアコンポーネントから成る。各コンポーネントのインタフェースを設計するにあたっては、電波の利用状況が分布する位置、時間、周波数の3軸、および電波の利用状況そのものの抽象化が鍵となる。

ウェブインタフェースはサーバからコマンドを受信して、デバイスコントローラに通知する。また、データマネージャの保存した測定データファイルをサーバへアップロードする。その一方で、位置取得デバイス等により取得したセンシングノード位置を保持し、データマネージャに通知することで、物理的な位置を物理的な形を持たない位置情報だけに抽象化する。

データマネージャはデバイスコントローラの入力とウェブインタフェースの出力を受け取り、ファイルとして保存する。ファイル形式としては、新たに提案するTSF(Tiny Spectrum Format)を採用する。TSFは電波の利用状況がデバイスコントローラによって2値情報として抽象化されることを活かして、高圧縮率を実現する。

デバイスコントローラは時間軸、周波数軸、電波の利用状況に関する抽象化を行う。時間軸と周波数軸に関する抽象化は、無線機・測定器を制御するための共通のコマンドを提供することで実現する。電波の利用状況の抽象化は、無線機・測定器から得られる情報をもとに2値情報を生成し、データマネージャへ出力することで実現する。

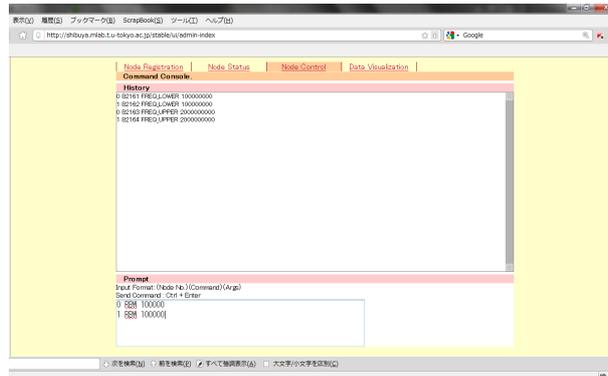


図 3 管理者インタフェース

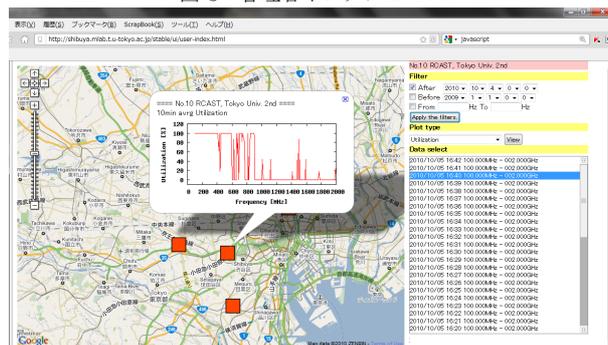


図 4 可視化ウェブサービス

4. 実装

4.1 可視化ウェブサービス

サーバのハードウェアには HP Proliant G5 を利用し、ソフトウェアは Cent OS 上で MySQL, PHP 5, HTML, CSS, JavaScript, Gnuplot, Google Maps API を利用して実装した。図 3 に実装した管理者インタフェースのスクリーンショットを示す。図 3 はコマンドプロンプトを表示している。図 4 に実装した可視化ウェブサービスのスクリーンショットを示す。各センシングノードはアイコンで表現されており、クリックすれば測定データの一覧が表示される。測定データを選択すると、周波数帯域の利用率のプロットが表示される。

4.2 センシングノードハードウェア

提案したアーキテクチャにおいて、多様な無線機・測定器を利用できることを検証するために、Lenovo X200 附属の無線

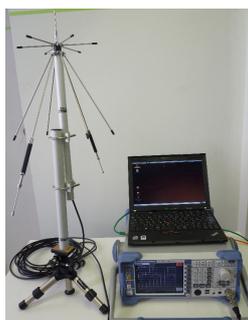


図 5 掃引式スペクトラムアナライザ R&S FSL6



図 6 無線 LAN モジュール Intel 5300(X200 に内蔵)

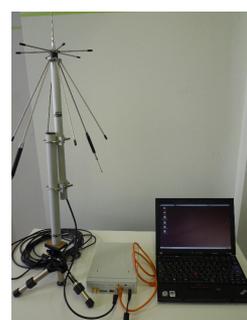


図 7 ソフトウェア無線フロントエンド USRP2

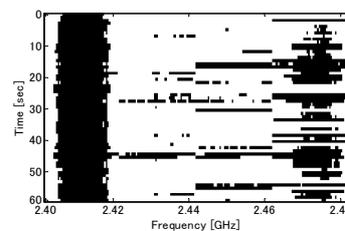
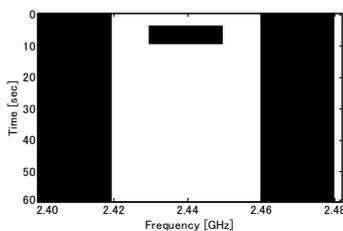
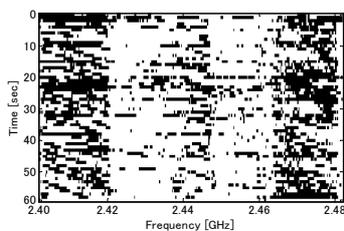


図 8 スペクトラムアナライザによる測定結果 図 9 無線 LAN モジュールによる測定結果 図 10 SDR フロントエンドによる測定結果

LAN モジュール Intel 5300, 掃引式スペクトラムアナライザ Rohde & Schwartz FSL6, ソフトウェア無線フロントエンドの USRP2 [31], [32] を用いた 3 種類のセンシングノードの実装を行った。図 5, 図 6, 図 7 に各センシングノードの写真を示す。全ての実装において、無線機・測定器の制御およびデータ処理のためにノート PC の Lenovo X200 を利用した。掃引式スペクトラムアナライザおよびソフトウェア無線フロントエンドにおいては、アンテナとしてディスコーンアンテナ DS-3100 を利用した。

5. 測定

5.1 3 種ノードによる屋内 2.4GHz 帯の測定

多様な無線機・測定器を用いて電波の利用状況が測定できることを検証するために、実装した 3 種類のセンシングノードによって研究室における 2.4GHz 帯の利用状況を測定した。

スペクトラムアナライザ, 無線 LAN モジュール, SDR フロントエンドの測定した 1 分間のスナップショットをそれぞれ図 8, 図 9, 図 10 に示す。IEEE 802.11 における 1 チャンネル (2.402 GHz~2.422 GHz) および 11 チャンネル (2.452 MHz~2.472 MHz) が集中的に利用されていることが確認できる。1 チャンネルおよび 11 チャンネル以外については、無線 LAN モジュールが 4 秒から 10 秒の間にのみ 7 チャンネル (2.432 GHz~2.452 GHz) の利用を検出している。一方で、スペクトラムアナライザ, SDR フロントエンドは測定時間全体にわたって散発的な利用を検出している。無線 LAN モジュールでは、チャンネル品質の情報を用いて帯域の利用の有無を判定しているため、低 SNR の信号は検出ができなかったためだと考えられる。測定結果から、周波数帯域の利用率を計算したところ、スペクトラムアナライザでは 31.2%, USRP2 は 32.6%, 無線 LAN モジュールは 49.4% となった。

5.2 複数地点における測定

広範囲からのネットワークを越した測定データが収集可能であることを検証するために、東京都内の 4 箇所に USRP2 を用いたセンシングノードを設置して電波の利用状況を測定した。測定地点は 1. 東京大学 (駒場), 2. 東京大学 (本郷), 3. 東京工業大学, 4. 祖師谷である。図 11 に各測定地点の位置を示す。

測定期間は 2010 年 10 月 4 日 16:00 から 2010 年 10 月 5 日 16:00 までの 24 時間である。測定周波数帯域は 100MHz~2.0GHz である。周波数分解能は 390kHz である。時間分解能は 20 秒である。

図 12 には 24 時間平均の周波数帯域の利用率を示す。地上波



図 11 センシングノードの設置位置

テレビ放送の使用する 100MHz 帯, 200MHz 帯, 500MHz 帯, 携帯電話の使用する 800MHz 帯の利用率が高いことが分かる。900MHz 以上での利用は 900MHz 以下と比較して少ないことが分かる。4 地点は東京都 23 区内なので、地理的条件は似ており、全体として同一の傾向を示したと考えられる。

全体として似たような傾向を示す一方で、東京大学 (駒場) のみが突出した 900MHz 帯の利用を検出することができているほか、1400MHz 帯や 1500MHz 帯で祖師谷における利用率が低くなっているなど、地点間の差異が確認できる。

5.3 移動測定

センシングノードを移動することによる空間的な測定が可能であることを確認するために、Lenovo X200 付属の無線 LAN モジュールによる移動測定を実施した。測定経路を図 13 に示す。測定経路は東京都目黒区駒場から東京都世田谷区祖師谷までの小田急電鉄沿線の 7.8km である。測定する周波数帯域は無線 LAN モジュールで測定可能な 2.402 GHz から 2.478 GHz である。

経路に沿って得られた電波の利用状況を図 14 に示す。チャンネル間の干渉を避けるように、1 チャンネル (2.402 GHz~2.422GHz), 6 チャンネル (2.427 GHz~2.447 GHz), 11 チャンネル (2.452 GHz~2.472 GHz) が多く利用されていることが分かる。測定経路は住宅地であったため、家庭内ネットワークの利用であると考えられる。また、2.402GHz から 2.478GHz 全体でのチャンネルの利用率を計算した結果は 73.6% となった。

6. おわりに

本稿では、貴重な資源である電波の効率的利用に向けた、電

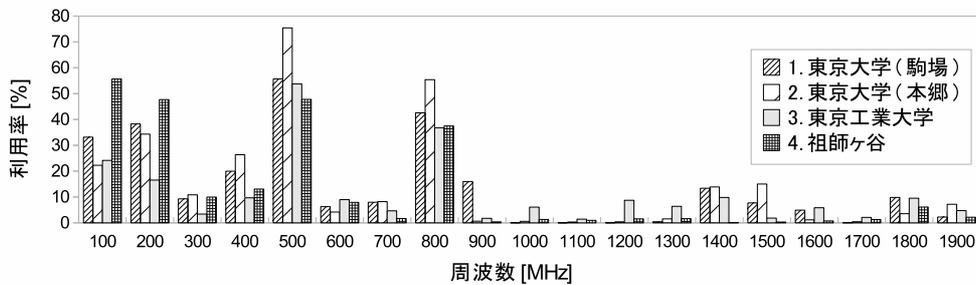


図 12 4 地点における周波数帯域の利用率



図 13 移動測定の経路

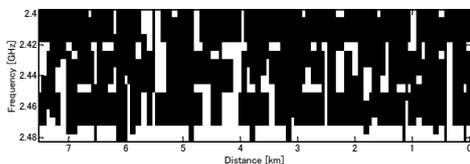


図 14 経路に沿って得られた利用状況

波の利用状況を広範囲・高密度にわたって測定する分散スペクトラムセンシングシステムについて述べた。本システムのさらなる詳細に関しては [33] を参照されたい。現在、電波の計測地点の拡大を進めている。

文 献

- [1] 総務省, “中長期における電波利用の展望と行政が果たすべき役割—電波政策ビジョン,” 2003.
- [2] R. Coase, “The Federal Communications Commission,” *Journal of Law and Economics*, 2(1), 1-40, 1959.
- [3] H. Yoon, J. Hwang, and M.B.H. Weiss, “Research on secondary spectrum trading mechanisms based on technical and market changes,” *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2010)*, Singapore, Apr. 2010.
- [4] C.E. Caicedo and M.B.H. Weiss, “The viability of spectrum trading markets,” *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2010)*, Singapore, Apr. 2010.
- [5] J. M. Peha, “Spectrum management policy options,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.1, Issue 1, 1998.
- [6] M. Cooper, “The economics of collaborative production in the spectrum commons,” *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005)*, Baltimore, MD, U.S., Nov. 2005.
- [7] W. Lehr and J. Crowcroft, “Managing shared access to a spectrum commons,” *DySPAN 2005, First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005)*, Baltimore, MD, U.S., Nov. 2005.
- [8] G. Hardin, “The Tragedy of the Commons,” *Science*, Vol. 162, pp. 1243-1248, 1968.
- [9] 総務省, “平成20年度電波の利用状況調査 (770MHz 以下の周波数帯) の調査結果及び評価結果の概要,” 2008.
- [10] 総務省, “平成19年度電波の利用状況調査 (770MHz を超え 3.4GHz 以下の周波数帯) の調査結果及び評価結果の概要,” 2007.
- [11] 総務省, “平成18年度電波の利用状況調査 (3.4GHz を超える周波数帯) の調査結果及び評価結果の概要,” 2006.
- [12] M. Lopez-Benitez, A. Umberto, and F. Casadevall, “Evaluation of spectrum occupancy in Spain for cognitive radio applications,” *IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2009)*, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [13] V. Valenta, Z. Fedra, R. Marsalek, G. Baudoin, and M. Villegas, “Towards cognitive radio networks: spectrum utilization measurements in suburb environment,” *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS '09)*, San Diego, California, Jan. 2009.
- [14] R.B. Bacchus, A.J. Fertner, C.S. Hood, and D.A. Roberson, “Long-term, wide-band spectral monitoring in support of dynamic spectrum access networks at the IIT spectrum observatory,” *3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2008)*, Chicago, Illinois, Oct. 2008.
- [15] R. Bacchus, T. Taher, K. Zdunek, and D. Roberson, “Spectrum utilization study in support of dynamic spectrum access for public safety,” *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2010)*, Singapore, Apr. 2010.
- [16] O. Holland, P. Cordier, M. Muck, L. Mazet, C. Klock, and T. Renk, “Spectrum power measurements in 2G and 3G cellular phone bands during the 2006 football world cup in Germany,” *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007)*, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [17] M.A. McHenry, “NSF spectrum occupancy measurements project summary,” Shared Spectrum Company Report, Aug. 2005.
- [18] R.I.C. Chiang, G.B. Rowe, and K.W. Sowerby, “A quantitative analysis of spectral occupancy measurements for cognitive radio,” *IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2007)*, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [19] M. Wellens, J. Riihijarvi, M. Gordziel, and P. Mahonen, “Spatial statistics of spectrum usage: from measurements to spectrum models,” *IEEE International Conference on Communications (ICC '09)*, Dresden, Germany, Jun. 2009.
- [20] M. Biggs, A. Henley, and T. Clarkson, “Occupancy analysis of the 2.4 GHz ISM band,” *IEE Proc. Communications*, Vol. 151, Issue 5, pp.481-488, Oct. 2004.
- [21] S. Pagadarai, A.M. Wyglinski, and R. Vuyyuru, “Characterization of vacant UHF TV channels for vehicular dynamic spectrum access,” *First IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2009)*, Tokyo, Japan, Oct. 2009.
- [22] Y. Li, T.T. Quang, Y. Kawahara, T. Asami, and M. Kusunoki, “Building a spectrum map for future cognitive radio technology,” *ACM workshop on Cognitive radio networks (CoRoNet '09)*.
- [23] K.A. Qaraqe, H. Celebi, A. Gorcin, A. El-Saigh, H. Arslan, and M.-s. Alouini, “Empirical results for wideband multidimensional spectrum usage,” *IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2009)*, Tokyo, Japan, Jul. 2009.
- [24] J. Riihijarvi, P. Mahonen, M. Wellens, and M. Gordziel, “Characterization and modelling of spectrum for dynamic spectrum access with spatial statistics and random fields” *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008)*, Cannes, France, Sep. 2008.
- [25] D. Chen, S. Yin, Q. Zhang, M. Liu, and S. Li, “Mining spectrum usage data: a large-scale spectrum measurement study,” *15th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom 2009)*, Beijing, China, Sep. 2009.
- [26] S.W. Ellingson, “Spectral occupancy at VHF: Implications for frequency-agile cognitive radios,” *IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2005)*, Dallas, Texas, Sep. 2005.
- [27] S.D. Jones, E. Jung, X. Liu, N. Merheb, and I. Wang, “Characterization of spectrum activities in the U.S. public safety band for opportunistic spectrum access,” *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007)*, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [28] 総務省, “電波利用状況の実地調査結果について,” 2010.
- [29] D. Datla, A.M. Wyglinski, and G.J. Minden, “A spectrum surveying framework for dynamic spectrum access networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, Issue 8, pp.4158-4168, Oct. 2009.
- [30] F. Weidling, D. Datla, V. Petty, P. Krishnan, and G.J. Minden, “A framework for R.F. spectrum measurements and analysis,” *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005)*, Baltimore, Maryland, Nov. 2005.
- [31] Ettus Research LLC, <http://www.ettus.com/>
- [32] GNU Radio, <http://gnuradio.org/>
- [33] J. Naganawa, H. Kim, S. Saruwatari, H. Onaga, and H. Morikawa, “Distributed Spectrum Sensing Utilizing Heterogeneous Wireless Devices and Measurement Equipment,” *5th IEEE International Dynamic Spectrum Access Networks Symposium (DySPAN 2010)*, Aachen, Germany, May. 2011.