一般社団法人 電子情報通信学会 THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS 信学技報 IEICE Technical Report SR2018-17 (2018-05)

[技術展示] スマートスペクトラムアクセスのための周波数利用観測シス テムプロトタイプの開発

-周波数利用率の予測-

岩田 大輝† 梅林 健太† 佐藤 遼† 山田 健斗† 大川 航平†

笠原 芳樹[†] Janne Lehtomäki^{††} Miguel López-Benítez^{†††}

† 東京農工大学 工学府 電気電子工学専攻 〒 184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16
 †† University of Oulu P. O. BOX 4500 FIN-90014, University of Oulu, Finland
 ††† University of Liverpool Merseyside, L69 3GJ, United Kingdom
 E-mail: †iwa-hiro@st.go.tuat.ac.jp

あらまし Smart spectrum access (SSA) は,周波数利用率などの周波数利用に関する統計情報を活用することで高効率な周波数共用の実現を目指す.我々はこれまでに,高精度な観測を目的とした観測信号処理技術の開発,周波数利用率の効率的モデル化手法,そして高精度な周波数利用率の予測手法を提案してきた.本展示では,周波数利用観測システムのプロトタイプを展示する.具体的には、複数台の観測センサーが取得した観測データ(I/Q データ)の信号処理技術(周波数解析,信号検出 etc.)を紹介する。そして、処理結果から推定した周波数利用率等の統計データを見える化するともに,提案した周波数利用率の予測手法を用いて周波数利用率を予測する. **キーワード** ダイナミックスペクトラムアクセス,周波数観測,スマートスペクトラムアクセス

[Technical Exhibition] Development of Spectrum Usage Measurement System Prototype for Smart Spectrum Access

-Prediction of Spectrum Occupancy-

Hiroki IWATA[†], Kenta UMEBAYASHI[†], Ryo SATO[†], Kento YAMADA[†], Kohei OKAWA[†],

Yoshiki KASAHARA[†],

Janne LEHTOMÄKI^{††}, and Miguel LÓPEZ-BENÍTEZ^{†††}

† Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology 2–24–16, Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184–8588 Japan

†† University of Oulu, P. O. BOX 4500 FIN-90014, University of Oulu, Finland

 $\dagger\dagger\dagger$ University of Liverpool, Merseyside, L69 3GJ, United Kingdom

E-mail: †iwa-hiro@st.go.tuat.ac.jp

Abstract Smart spectrum access (SSA) can achieve a high-efficient spectrum sharing utilizing the prior information regarding spectrum usage. We proposed some techniques in terms of spectrum usage measurements including signal processing techniques for achieving high-accuracy measurement, high-efficient modeling method for spectrum occupancy and prediction method of spectrum occupancy. In this exhibition, we exhibit a spectrum measurement system prototype. Specifically, we introduce some digital signal processing techniques (spectrum analysis, signal detection, etc.) for measured data (I/Q samples) in which multiple measurement sensors acquire. Further, we visualize statistical information such as spectrum occupancy and predict spectrum occupancy by our proposed prediction method.

Key words Dynamic Spectrum access, Spectrum Measurement, Smart Spectrum Access

- 99 -

1. はじめに

高速・大容量通信の発展や無線通信サービスの多様化に伴い, 周波数資源の需要は増加の一途をたどっており,周波数資源は 非常に貴重なものとなっている [1]. このため,周波数資源の 効率的な割当て・利用が必要である.周波数割当はこれまで固 定かつ排他的に行われており,新規無線通信サービスに割当可 能な周波数資源は不足してきている.一方で,世界中の各機関 の周波数観測 [2] から,既存無線システムの周波数資源の利用 率は低いことが明らかにされている [3–5].

周波数資源不足や周波数資源の非効率的な利用の問題を解決 するために、コグニティブ無線技術を用いたダイナミックスペ クトラムアクセス (dynamic spectrum access: DSA) に関する 研究が盛んに行われている [6]. DSA では、既存の一次ユーザ (primary user: PU) に割当てられている周波数を、周波数が割 当てられていない新規の二次ユーザ (secondary user: SU) が 時間/空間的に利用されていな周波数 (ホワイトスペース) を二 次利用する 1 つの周波数共用技術である. 但し、SU は PU へ の有害な干渉を避ける必要がある. このため、スペクトラムセ ンシング [7] や地理情報データベース [8] のようなホワイトス ペースの発見技術が非常に重要となる.

地理情報データベースによるホワイトスペースの発見では, テレビホワイトスペースにおける周波数共用に代表されるよう に,PUの周波数利用の時間変化がほとんどなく,空間的にSU がPUへ有害な干渉を与えないエリアでの周波数共用に有効で ある.地理情報データベースは,SUとPU間の電波伝搬等を 考慮して周波数利用可能の有無を計算し,要求に応じてSUへ 周波数利用可能の有無を返す.このため,周波数利用の時間変 化がSUのデータベースへの要求から応答までの遅延に比べて 速い場合には地理情報データベースによるホワイトスペースの 発見は困難である.

一方,スペクトラムセンシングは瞬時の周波数利用の有無を 検出することから周波数利用の時間変化が速い PU との周波数 共用をターゲットとしたホワイトスペースの発見技術である. 但し,PU への与干渉に対する制約が非常に厳しいため,ホワイ トスペースの高精度な発見を低遅延で行うことが要求される. 更に,小型の無線端末にスペクトラムセンシング技術を実装す る場合は低実装/計算コストも要求される.しかし,これらの 要求を同時に実現することは困難である.

この課題に対し,スマートスペクトラムアクセス (smart spectrum access: SSA) と呼ばれる DSA を高度化した周波数 共用の検討が行われている [9]. SSA は,PU の周波数利用に 関する事前情報 (例:周波数利用の統計情報)を有効活用する ことでより効率的に時間,空間,周波数軸において DSA を実 現することを目指す.実際に,PU の周波数利用率を事前情報 として活用することで,スペクトラムセンシングの性能向上や チャネル選択の効率向上が実現可能であることが報告されてい る [10–14].

SSA における 1 つの重要な課題は,如何にして事前情報を 取得するかである.この課題に対して,2 階層型の SSA が検 討されている [9]. ここで,第1階層は DSA システム (DSA system: DSAS) に相当し,第2階層はスペクトラムアウェアネ スシステム (spectrum awareness system: SAS) である. SAS は,長期間,広帯域,広域に渡る周波数観測から有用な情報を モデル化や学習により抽出し,それらの情報を DSAS へ提供す る. DSAS は,受け取った情報を利用してスペクトラムセンシ ングやチャネル選択等を行い PU との周波数共用を実現する. この2階層構造により無線端末が独自に事前情報を取得する必 要が無くなる.

本展示では、事前情報を取得する周波数観測システムのプロ トタイプを紹介する. 我々は、これまでに SAS における要素 技術として、周波数利用観測信号処理の開発、周波数利用率の モデル化/予測法、そして DSAS における統計情報を用いたス ペクトラムセンシング技術の開発を行ってきた [15-25]. 特に 本プロトタイプでは、開発した観測信号処理を実装し、特に提 案した周波数利用率の時系列モデル化/予測法の妥当性を示す.

本論文の構成は次の通りである.2章では、2階層型SSAの コンセプトを説明し、3章で周波数観測システムのプロトタイ プを示す.4章では、我々がこれまでに検討してきたSSAのた めの諸技術 (SAS における周波数利用観測信号処理、周波数利 用率のモデル化、そして周波数利用率の予測の概要)を示す.5 章では、提案した周波数利用率予測法の実証実験結果を示す. 最後に、結論を6章に述べる.

2. 2階層型スマートスペクトラムアクセス



図 1 2 階層型 SSA の概念図

本稿で想定する 2 階層型 SSA の概念図を図 1 に示す.第1 階層に相当する DSAS では,SU が PU への与干渉を避けつつ ホワイトスペースを発見し利用することで PU との周波数共用 を実現する.一方で,第2 階層の SAS は,長期間,広帯域,広 域にわたる周波数観測及び事前情報のモデル化,推定そして学 習に基づいて周波数利用に関する統計情報のような事前情報を 取得し,必要に応じて DSAS へその情報を提供する.

SAS は、複数の周波数利用観測システム (spectrum measurement system) と、そこから得られた観測データを適切に 処理し蓄積を行う計算機サーバおよびデータサーバで構成され る.周波数利用観測システムは複数の観測機器,情報収集局, データベース,計算機サーバから構成される.それぞれの観測 機器では,時間-周波数-空間軸における周波数利用の判定情報 を取得し,それを情報収集局において融合・統合する.情報収 集局はローカルのデータサーバや計算機サーバを持つことがで き,必要に応じて統計情報を抽出することができる.これによ り,各周波数利用観測システムからデータサーバ (Data sever) へ情報送信に関する負担が軽減される.

周波数管理局 (Spectrum manager) は、Data sever に蓄積さ れた周波数利用に関する情報と、SUs の要求に応じて周波数の 割り当て、統計・事前情報の提供を行う. さらに、将来はソフ トウェア無線が普及した場合に利用する周波数帯に適した通信 方式であるソフトウェアの提供も行う.

本稿では特に、周波数利用観測システムに着目する.



3. 周波数利用観測システムプロトタイプ

⊠ 2 Spectrum usage measurement system prototype



 \boxtimes 3 $\,$ Measurement time flow

図2に実装した周波数利用観測システムプロトタイプを,図 3に観測タイムフローを示す.本プロトタイプでは,最大4台 までのスペクトラムアナライザのような観測機器 (sensor)が 図3のようなタイムフローに従って周波数観測を行う.ここで, 同期信号発生装置は図3の最下部に示すように,パルス信号を 用いて全観測機器の観測タイミングを制御し,各観測機器へ送 信されるパルス信号の周期及び遅延量を適切に制御することに より所望の観測タイミング生成を可能とする.但し,パルス信 号の周期及び遅延量はシステム制御 PC によって与えられる. 加えて,システム制御 PC は,観測周期 T 及び信号取り込み時 間 T_{aqu}.の設定も行う.各観測機器は,I/Q データとして観測 信号を取り込み,取得した I/Q データをネットワーク接続スト レージ (network attached storage: NAS) のような記憶デバイ スへ転送する.その後,信号処理 PC が第4章で述べる観測信 号処理及び周波数利用率のモデル化/予測を行う.取得された 情報は記憶デバイスへ蓄積され,必要に応じて DSAS へ提供さ れる.これにより,SUsは,提供された周波数利用に関する事 前情報を利用してスペクトラムセンシングなどの周波数共用に 必要な処理を効率的に行うことができる.

4. SAS のための諸技術

本章では、まず図1の観測機器における高精度な周波数観測 のために開発してきた信号処理技術を紹介する.次に、観測さ れた周波数利用判定結果を長期間データサーバに蓄積し、そこ から周波数利用率の時系列のモデル化手法及び周波数利用率の 時間軸に対する予測手法を紹介する.

4.1 観測機器の観測信号処理技術



図 4 観測信号処理のブロック図

図4は, 観測機器が行う信号処理(図4(0)-(5))と, 情報収 集局が行う処理図(図4(6))を示している. RF/IF 部の信号処 理(図4(0))の出力は離散のI/Qベースバンドデータである.

スペクトラム解析部 (図 4 (1)) 及び周波数利用判定部 (図 4 (3)) において, 掃引型の周波数利用観測に対して電力検出 (ED) を用いた場合, データの間欠がおきることから,本研究では Fourier transform (FFT) を用いた ED (FFT-ED) を用いる. ED は PU 信号に関して事前情報が不要で計算量が低いという 利点があるが,次の 2 つの課題が存在する.1 つ目は,検出能 力がさほど高くないことである.そこで,時間及び周波数分解 能を考慮したパワースペクトラムの平均化処理及び,ED 結果 に対する後処理を加えることで本問題の解決を試みた.特に, パワースペクトラムの平均化処理を行う時間長、周波数帯域幅 を周波数利用パラメータ (チャネル配置、信号長)の事前情報を 用いて適切に設定する手法を検討してきた [16,21,23].

2つ目の課題は,高精度な検出閾値設定が要求されることであ る.検出閾値は一般的に,Constant False Alarm Rate (CFAR) 基準に従い設定される.この基準は,ノイズフロアをパラメー タとして含むため高精度な推定が要求される.様々な観測機器 のノイズフロアを確認してみると,その形状はフラットではな く (ホワイトノイズではなく),またノイズレベルも時間的に変 動する.そこで,時間及び周波数依存性を考慮した高精度なノ イズフロア推定法を提案してきた.以下,提案手法の概要を順 番に示す.

時間及び周波数分解能を考慮したパワースペクトラムの

平均化処理: 図4(2)

FFT-EDの検出性能の課題に対して、スペクトラム解析部にお いてパワースペクトラムの平均化が非常に有効である [26,27]. パワースペクトラムの平均化を行うスペクトラム解析法は、 Bartlett 法や Welch FFT がある [28,29]. Bartlett 法や Welch FFT は、与えられた各 FFT フレームのセグメント化、各セグ メントのパワースペクトラムの計算、そして得られたセグメン ト数分のパワースペクトラムの平均化処理から成る [29].

複数の周波数ビンから構成される広帯域信号を観測する場合,パワースペクトルの平均化処理により,一般的に用いられる FFT (Welch FFT においてパワースペクトラムのセグメント化と平均化処理を行わない)よりもパワースペクトラムのバラつきが抑制されるため結果的に検出率が向上する.



(a) Segment size $= 2^3$



 \boxtimes 5 ED results (FFT size = 2^{11})

しかし,所望の時間分解能を満たす中で Welch FFT 処理を 行う場合,周波数分解能が低下するという問題がある.両分解 能(時間と周波数)は、周波数利用観測において非常に重要な パラメータである.時間分解能は、どれほど時間的に短い信号 を適切に認識できるかを決定づけるため、観測対象の PU 信号 の最小信号長(例:最小パケット長)より十分短い値に設定す ることが望ましい.一方,周波数分解能はどれほどの狭帯域信 号を適切に認識できるかを示す指標であり、周波数分解能が低 下すると推定した信号スペクトラムの広がりが生じ、結果的に 信号が存在しないにも関わらず信号が存在すると判定する誤警 報を生むことになる.そして、時間分解能一定の下で周波数分 解能とパワースペクトラムの平均化回数(検出率)はセグメン トサイズに関してトレードオフの関係にある(図 5).図5は、 周波数分解能と信号検出性能のトレードオフを示している.但

し、本結果は、周期 20msec, 信号長 5msec, 帯域幅 20MHz, 中心周波数 1GHz,送信電力 -60dBm の QPSK 信号を信号発 生器 (R&S SMBV100A) にて発生させ、観測機器 (RSA607A) へ入力した時のものである.また,FFT サイズ (時間分解能) は 2¹¹ に設定した. これは, 信号長 5msec の約 1/50 の時間分 解能に相当する.図より、検出率と周波数分解能の観点から最 も優れているのはセグメントサイズが 2⁶ の時である. セグメ ントサイズが 2¹¹ (図 5 (c)) の場合, 周波数分解能は良いが, 検 出率は非常に低い. 一方で, セグメントサイズが 2³ (図 5 (a)) の場合は検出率は良いが周波数分解能は低く, 信号スペクトル の広がりによって信号スペクトルのエッジ部分で誤警報が生 じていることが確認できる.以上のことから,我々は上記のト レードオフを踏まえ、セグメントサイズの設定法を2つ提案し た [16, 21, 23]. 2 つの提案法の違いは、PU の周波数利用パラ メータ (チャネル配置情報や信号長)を事前情報として持って いるか否かの違いである.

PU の周波数利用パラメータが未知の場合,ブラインドセグ メントサイズ設定法が必要となる.この要求に対して,PU の 周波数利用パラメータが未知の環境において動作する Forward Consecutive Mean Excision (FCME) アルゴリズム [30] の出 力 (ノイズフロアレベル推定値) のセグメントサイズに対する 特徴を用いた ([16] の図 3 を参照) セグメントサイズ設定法を 提案した.

具体的には、最適セグメントサイズより大きいセグメントサ イズを用いた FCME アルゴリズム出力と最適セグメントサイ ズ以下のセグメントサイズを用いた FCME アルゴリズム出力 間に有意な差が生じるという特徴を用いる. FCME アルゴリ ズムは、1FFT フレームのパワースペクトラムに対して、信号 成分と雑音成分を識別し, 識別した雑音成分の平均値をノイズ フロアレベル推定値とするものである. 最適セグメントサイズ 以下のセグメントサイズを用いた場合、パワースペクトラムの バラつきが十分に除去され、信号と雑音の識別精度が良いため 高精度なノイズフロアレベル推定が可能である.一方,最適セ グメントサイズより大きいセグメントサイズを用いた場合,パ ワースペクトルのバラつきが十分に除去されず信号と雑音の識 別精度が悪いためノイズフロアレベル推定値と真のノイズフロ アレベルの差は大きくなる. つまり, 最適セグメントサイズ以 下のセグメントサイズのノイズフロアレベル推定値と最適セグ メントサイズより大きいセグメントサイズのノイズフロアレベ ル推定値に有意差が出ることになる.提案法は、設定可能なセ グメントサイズのノイズフロアレベル推定値に有意差があるか 否かを効率的に判定することで低演算量なセグメントサイズ設 定を実現可能とした.

PUの周波数利用パラメータが既知の場合,チャネル配置情報及び信号長に従って適切な時間及び周波数分解能を達成する セグメントサイズの候補を得ることができる [23].そして,得られたセグメントサイズの候補の中から信号検出率を最大化するセグメントサイズを設定すればよい.つまり,ここでの最適 セグメントサイズは,所望の時間,周波数分解能を拘束条件とし,信号検出率を目的関数とする制約付き最適化問題の解とな る.また,チャネル配置情報が既知なため,時間方向の平均化 に加えて周波数方向のパワースペクトラムの平均化により更な る信号検出率の向上を実現した.しかし,信号検出率を解析的 に導出するために大きな計算量が必要となる.この問題に対し て,信号検出率の代わりに ED の検定統計量の平均と分散を用 いたより簡易に導出可能な目的関数に置き換えた制約付き最適 化問題とすることで,低演算量で本来の最適値に匹敵する精度 を実現した.

• 信号領域推定 & 誤警報除去: 図 4 (5)



FFT-ED の検出性能の向上を目的として,我々は ED 結果 の後処理法 (simple-signal area estimation: S-SA)を提案し た [15]. S-SA は,ディジタル無線通信システムで用いられる 信号が典型的に長方形であるという特徴を活かして,時間-周波 数軸における ED 結果 (2 値データ)から信号領域を推定し,長 方形に近似する.ここで,信号領域は時間-周波数平面において 1PU 信号が存在する領域として定義される.提案した信号領域 処理では,初めに帯域幅を推定し,その後信号の時間長を推定 することで信号領域推定が実現される ([15]の図 3-5 を参照).

しかし,提案した信号領域推定法は,その原理上信号領域推定 後の誤警報が ED 後よりも増加するという問題が存在する. こ の問題に対して,信号領域推定法に誤警報除去法 (false alarm cancellation: FC) を組み合わせた手法が提案された [15]. 具 体的には,信号領域とそれ以外の領域 (雑音領域)の密度差を用 いて誤警報除去を行う.一般的には,信号領域よりも雑音領域 の方が密度が低い,すなわちバースト的に誤警報が生じる同時 確率は非常に小さい.すなわち,ED 結果によって信号ありと 判定された時間-周波数ポイント ([15] では,タイルと定義され ている)周辺の密度から誤警報か否かを検出し,誤警報と判定 した場合はそのタイルを信号なしとする.更に,[15] で提案し た誤警報除去法よりも高効率に誤警報除去を行う手法として, L-shaped false alarm cancellation (L-FC) も提案した [18].

図6は、電力検出後の周波数利用判定結果(同図(a))及び電 力検出結果に対する後処理法である、S-SAとL-FCを行った後 の周波数利用判定結果である。但し、本結果は、周期20msec、 信号長5msec、帯域幅20MHz、中心周波数1GHz、送信電力 -60dBmのQPSK信号を信号発生器(R&S SMBV100A)に て発生させ、観測機器(RSA607A)へ入力した時のものである。 図より,信号領域推定及び誤警報除去による検出性能へのゲインが確認できる.

• ノイズフロア推定: 図4(4)



ここでは、FFT-EDの2つ目の課題である検出閾値設定に関す る研究成果を紹介する.検出閾値は、一般的に CFAR 基準に 基づいて決定されるため、ノイズフロアの推定が必須となる. ノイズフロアレベルは、観測機器周辺の気温等に応じて変動す る [31] ことから定期的に推定する必要がある.このことから、 ノイズフロアレベルの変化に適応可能なノイズフロア推定法 として、前述した FCME アルゴリズムを用いたノイズフロア 推定法が提案された [32,33].FCME アルゴリズムの特徴は、 Welch FFT セグメントサイズの設定法の節で紹介した動作原 理より、信号が存在する場合でも Welch FFT のセグメントサ イズを適切に設定することで比較的正確なノイズフロア推定値 が得られるということである [34].

しかし, FCME アルゴリズムの欠点として, 観測機器ごとに異 なるノイズフロアの周波数依存性を考慮できないことが問題で あった. 図7は, 2台の観測機器 (Tektronix 社製の RSA6114A と RSA607A) を終端した時の 2400 個の FFT フレームから得 られたパワースペクトルの平均値, すなわちノイズフロアの推 定値を示している. 図7から分かるように, ノイズフロアは観 測機器固有の周波数依存性を持つことが分かる.

ノイズフロアの周波数依存性を考慮したノイズフロア推定 法として,t-ED-mean 法及び Modified t-ED-mean 法を提案 した [22,35].t-ED-mean 法では,各観測機器のノイズフロア のスペクトルは長期間に渡って変化しないことから,1FFT フ レーム内のエネルギーを検定統計量として1FFT フレーム内 に信号が含まれているか否かを判定 (時間領域での ED: t-ED) し,信号が含まれていないと判定された複数の FFT フレーム のパワースペクトルの時間平均を計算することで周波数依存性 が保存されたノイズフロアの推定が可能となる.

図8にFCMEアルゴリズムを用いたノイズフロア推定法及び t-ED-mean法によって推定されたノイズフロアを基に設定され た検出閾値から得られた誤警報確率 PFA の結果を示す.但し, 本結果は,周期 20msec,信号長 5msec,帯域幅 20MHz,中心 周波数 1GHz の QPSK 信号を信号発生器 (R&S SMBV100A) にて発生させ,観測機器へ入力した時にノイズフロアを推定し



た結果である.また、目標誤警報確率 \dot{P}_{FA} は 0.1 に設定した. 同図より、t-ED-mean 法によって推定されたノイズフロアを基 に設定された検出閾値は、周波数に依らず $\dot{P}_{FA} = 0.1$ に非常に 近い値となっている.これは、t-ED-mean 法がノイズフロアの 周波数依存性を考慮してノイズフロアを推定できている、すな わちノイズフロアの推定精度が良いことを示している.一方で、 FCME アルゴリズムによって推定されたノイズフロアを基に 設定された検出閾値は、 $\dot{P}_{FA} = 0.1$ を満たすことができていな い.これは、FCME アルゴリズムはノイズフロアの周波数依存 性を考慮してノイズフロアを推定できないことを示している.

しかし,t-ED-mean 法には,信号が常時存在する周波数のノ イズフロアが適切に推定できないという課題があった.この問 題に対して,ノイズフロアに関する事前情報を用いたノイズフ ロア推定法 (Modified t-ED-mean 法)を提案した??.本手法 は、ノイズフロアの形状が予め分かっているため、ノイズフロ アレベルの推定問題を考えることと等価である.具体的には、 事前情報として持っているノイズフロアの基準値とある時刻で のノイズフロアの差を推定する.推定した差分が、基準値から のレベル変動量に相当する.これにより、信号が常時存在する か否かに関わらず高精度にノイズフロアの推定が可能となる.

4.2 周波数利用率の時系列モデル化/予測:図4(6)

短期間 (例:0.1 秒程度) の連続周波数利用観測に対する時 間軸方向に対する周波数利用率を DC (Duty Cycle) と定義す る [33]. DC は,周波数利用率に相当し,スペクトラムセンシ ングの性能を改善することができる [11].

DCは、人々の活動と相関があることが確認されている.例え ば、一般的に"人々が活動的になる日中は DC が高くなり、反対 に活動が休止する夜間は DC が低くなる"といったような特徴が 見られる.そのため、DC には比較的時間相関が高い状態と低い 状態の二つに分類されると考えられる.そこで、DC の相関の有 無を考慮した時系列モデル化手法を提案した [24].具体的には、 相関の高い状態と低い状態の分類を行い、時間と各状態に対す る平均の DC の変動を考慮して、自己回帰(Auto-Regressive: AR)モデルを用いて時系列モデル化する.そして、提案時系 列モデルと推定したモデルパラメータを用いた次時点の DC の 予測法の検討も行った.以下に詳細な DC の時系列モデル化/ 予測手法を示す.

DC の推定

観測は図3に示すタイムフローに従って行われる.この時, DC 推定は観測期間 T ごとに行われ, T_{aqu} . 秒連続で取り込まれ た I/Q データを用いる.連続取込み時間 T_{aqu} . は N_T 個の FFT フレームに分割され,各 FFT フレームは Welch FFT を 1 回 行う時間長に相当する.そして,Welch FFT により $N_T \times N_F$ 個のタイルからなるパワースペクトラム推定値を得る.但し, N_F は各 FFT フレームに周波数ビン数 (Welch FFT セグメン トサイズ)である.その後,電力検出,信号領域推定,そして誤 警報除去を行うことで高精度な周波数利用判定を実現する (図 4 (3)-(4)). n_T 番目の FFT フレーム・ n_F 番目の周波数ビンに おける周波数利用判定結果は次式で定義される.

$$D_{n_T,n_F} = \begin{cases} 1, & \text{Signal is detected} \\ 0, & \text{Signal is not detected} \end{cases}$$
(1)

但し,検出閾値は CFAR 基準に従って設定され,MED-tEDmean 法を用いてノイズフロアを推定する.この時,観測時刻 tにおける DC の推定値 $\hat{\Psi}(t)$ は次式で与えられる.

$$\hat{\Psi}(t) = \frac{1}{N_T} \sum_{n_T} (1 - \prod_{n_F} (1 - D_{n_T, n_F}))$$
(2)

DC の時系列モデル化

提案モデルでは, 観測時刻 *t* に対する DC の時系列モデルを以下の式で与える.

$$\Psi(t) = \begin{cases} c(t), & \mathcal{S}(t) = \mathcal{S}_0 \\ c(t) + \phi \Psi(t-1), & \mathcal{S}(t) = \mathcal{S}_1 \end{cases}$$
(3)

但し, c(t)は時刻 t における DC の定数項を表し,過去 $T_c - 1$ 個の DC 推定値と時刻 t の DC 推定値の平均値として推定される. すなわち,

$$\hat{c}(t) = \frac{1}{T_c} \sum_{t'=t-T_c+1}^{t} \hat{\Psi}(t')$$
(4)

 ϕ は1時点過去のDC 推定値に対するAR モデルの係数であり、Yule-Walker 法により推定する.結論として、提案モデルでは1次のAR モデルを考えることから ϕ の推定値 $\hat{\phi}$ は以下のとおり与えられる.

$$\hat{\phi} = \bar{\rho}_{\mathcal{S}_1}(1) \tag{5}$$

ここで, $\bar{\rho}_{S_1}(1)$ は長期間の観測で得られた DC 推定値の内,状態 S_1 と判定された DC 推定値のラグ 1 の自己相関値の平均である.

また,状態 S_0 , S_1 は DC 推定値が無相関,有相関である状態 をそれぞれ表し,S(t) は時刻 t における状態を表す. 但し,時 刻 t 状態判定は時刻 t, ラグ 1 の自己相関の推定値 $\hat{\rho}_t(1)$ を用 いて以下のように行われる.

$$\mathcal{S}(t) = \begin{cases} \mathcal{S}_1, & |\hat{\rho}_t(1)|^2 \geqq \tau \\ \mathcal{S}_0, & |\hat{\rho}_t(1)|^2 < \tau \end{cases}$$
(6)

ここで,時刻 t, ラグ1の自己相関値は以下で推定される.

表 1 周波数利用観測諸元
東京農工大学小金井キャンパス 5 号館 408 号室
2017/11/21, 22, 24, 27-30,
2017/12/1, 4-8, 12-14, 19-22, 26-29
$2,437 \mathrm{MHz}$
1.25MHz
0.25sec
5sec

$$\hat{\rho}_t(1) = \frac{\sum_{t=t-(T_M-1)}^t \left[\{\Psi(t) - \hat{\mu}_\Psi\} \{\Psi(t-1) - \hat{\mu}_\Psi\} \right]}{\hat{\mu}_\Psi^2} (7)$$

但し, T_M は相関を計算するウィンドウ長であり, $\hat{\mu}_{\Psi}$ と $\hat{\mu}_{\Psi}^2$ は $\Psi(t)$ の平均と分散を表している.

次時点の DC の予測

次時点の DC の予測とは, DC を予測したい時刻 *t* とした時に時 刻 *t* – 1 の DC 観測値 ($\hat{\Psi}(t - 1)$), 過去 *T*_a 個の DC 観測値の平 均 *c*(*t* – 1), そして長期間の DC 観測結果から推定した AR モ デルパラメータ $\hat{\phi}$ を用いて $\Psi(t)$ を予測することである. 但し, 提案法では相関の有無に応じてモデルが異なるため,予測時に も相関の状態判定を行い,次のように DC を予測する ($\tilde{\Psi}(t)$).

$$\tilde{\Psi}(t) = \begin{cases} \hat{c}(t-1), & \mathcal{S}(t-1) = \mathcal{S}_0 \\ \hat{c}(t-1) + \hat{\phi}\hat{\Psi}(t-1), & \mathcal{S}(t-1) = \mathcal{S}_1 \end{cases}$$
(8)

但し, 定数項 c(t-1) は下記で計算 (推定) される.

$$\hat{c}(t-1) = \frac{1}{T_a} \sum_{t'=t-T_a}^{t-1} \hat{\Psi}(t')$$
(9)

また,状態判定は式 (6) に従って行うものとするが,相関 $\hat{\rho}_t(1)$ は次式で推定するものとする.

$$\hat{\rho}_t(1) = \frac{\sum_{t=t-2}^{t-1} \left[\{\Psi(t) - \hat{\mu}_\Psi\} \{\Psi(t-1) - \hat{\mu}_\Psi\} \right]}{\hat{\sigma}_\Psi^2}, \quad (10)$$

つまり, $\hat{\rho}_t(1)$ は過去 2 時点の DC 観測値の相関値である.

5. 実証実験

周波数利用観測システムプロトタイプを用いた実験として, 2.4GHz 帯無線 LAN システムの DC 予測の妥当性の検証を行っ た.ここで,観測信号処理 (Welch FFT セグメント設定,ノイ ズフロア推定,信号領域推定,誤警報除去)の妥当性は昨年度 の5月 Smart Radio (SR)研究会で示してある [36].

5.1 モデルパラメーター推定のための観測諸元

モデルパラメータ (AR モデルの係数 $\hat{\phi}$) 推定のために用いた 観測諸元は表 1 の通りである [24]. 計 21 日分の観測データを 用いてモデルパラメータ $\hat{\phi}$ の推定を Yule-Walker 法を用いて 行った. 推定結果は, $\hat{\phi} = 0.482$ となった.

5.2 DC の予測実験

前章 4.2 説で説明した提案 DC 予測法を用いた DC の予測実 験結果 (2018/4/12-13) を示す. モデルパラメータは前節で推 定したものを用い,実験日及び観測帯域 (5MHz) 以外は表 1 と 同じパラメータを用いた.また,提案予測法において状態 S_1 と判定された際の,AR モデルの定数項推定に用いたウィンド ウサイズ T_a は, $T_a = 10$ とした.加えて,比較のためにAR モデルを用いた予測実験も併せて行った.ここで,AR モデル とは下式で与えられるモデルに従って予測を行う.

$$\Psi(t) = c_{\rm AR} + \phi_{\rm AR} \Psi(t-1) \tag{11}$$

但し、モデルパラメータ c_{AR} 及び ϕ_{AR} は前節で述べた計 21 日 分の観測データを用いて Yule-Walker 法により推定した.推定 結果は、 $\hat{c}_{AR} = 0.0245$ 、 $\hat{\phi}_{AR} = 0.877$ となった.



図9は,提案DC予測法とARモデルを用いてDCを予測 した方法の予測精度 (Root Mean Square Error: RMSE)を示 している.提案法の方がARモデルに比べて高い予測精度を達 成していることが分かる.これにより,相関の有無を考慮した DCのモデル化及び予測の妥当性が実証された.

6. おわりに

本稿では、2 階層型 smart spectrum access (SSA)の第2階 層に相当する spectrum awareness system (SAS)内の周波数 利用観測システムプロトタイプを開発し、その有効性を実証し た.我々は、SSA に関わる諸研究を行ってきており、本研究 ではそれらの一部を開発したプロトタイプに実装した。特に、 SAS における周波数利用観測信号処理をプロトタイプに実装 し、実証実験を行った。実証実験により、我々がこれまでに提 案してきた観測信号処理の有効性を示した。

謝 辞

本研究は科研費 (18K04124) の助成を受けたものである。

文

 J. Reed, M. Vassiliou, and S. Shah, "The role of new technologies in solving the spectrum shortage [point of view]," *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 6, pp. 1163–1168, June 2016.

献

[2] D. Das and S. Das, "A survey on spectrum occupancy measurement for cognitive radio," *Springer Wireless Pers. Commun.*, vol. 85, no. 4, pp. 2581–2598, 2015.

- [3] J. Naganawa, H. Kim, S. Saruwatari, H. Onaga, and H. Morikawa, "Distributed spectrum sensing utilizing heterogeneous wireless devices and measurement equipment," in *Proc. IEEE DySPAN*, May 2011, pp. 173–184.
- [4] T. M. Taher, R. B. Bacchus, K. J. Zdunek, and D. A. Roberson, "Long-term spectral occupancy findings in Chicago," in *Proc. IEEE DySPAN*, May 2011, pp. 100–107.
- [5] V. Valenta, R. Maršálek, G. Baudoin, M. Villegas, M. Suarez, and F. Robert, "Survey on spectrum utilization in Europe: Measurements, analyses and observations," in *Proc. IEEE CROWNCOM*, June 2010, pp. 1–5.
- [6] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 79– 89, May 2007.
- [7] T. Yücek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, First quarter 2009.
- [8] T. Baykas, M. Kasslin, M. Cummings, H. Kang, J. Kwak, R. Paine, A. Reznik, R. Saeed, and S. J. Shellhammr, "Developing a standard for TV white space coexistence: technical challenges and solution approaches," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 19, no. 1, pp. 10–22, Feb. 2012.
- [9] K. Umebayashi, S. Tiiro, and J. J. Lehtomäki, "Development of a measurement system for spectrum awareness," in *Proc. IEEE 5GU*, Nov. 2014, pp. 234–239.
- [10] N. Wang, Y. Gao, and X. Zhang, "Adaptive spectrum sensing algorithm under different primary user utilizations," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 9, pp. 1838–1841, Sept. 2013.
- [11] T. Nguyen, B. L. Mark, and Y. Ephraim, "Spectrum sensing using a hidden bivariate Markov model," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 9, pp. 4582–4591, Sept. 2013.
- [12] M. Wellens, J. Riihijarvi, and P. Mahonen, "Evaluation of adaptive MAC-layer sensing in realistic spectrum occupancy scenarios," in *Proc. IEEE DySPAN*), Apr. 2010, pp. 1–12.
- [13] K. Umebayashi, Y. Suzuki, and J. J. Lehtomäki, "Dynamic selection of CWmin in cognitive radio networks for protecting IEEE 802.11 primary users," in *Proc. IEEE CROWN-COM*, June 2011, pp. 266–270.
- [14] Y. Xu, A. Anpalagan, Q. Wu, L. Shen, Z. Gao, and J. Wang, "Decision-theoretic distributed channel selection for opportunistic spectrum access: Strategies, challenges and solutions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 4, pp. 1689–1713, Fourth quarter 2013.
- [15] K. Umebayashiand, K. Moriwaki, R. Mizuchi, H. Iwata, S. Tiiro, J. J. Lehtomäki, M. López-Benítez, and Y. Suzuki, "Simple primary user signal area estimation for spectrum measurement," *IEICE Trans. Commun*, vol. E99-B, no. 8, pp. 523–532, Feb. 2016.
- [16] H. Iwata, K. Umebayashi, S. Tiiro, M. López-Benítez, J. J. Lehtomäki, and Y. Suzuki, "Welch FFT segment size selection method for spectrum awareness system," *IEICE Trans. Commun*, vol. E99-B, no. 8, pp. 1813–1823, Aug. 2016.
- [17] H. Iwata, K. Umebayashi, S. Tiiro, J. J. Lehtomäki, and Y. Suzuki, "A study on Welch FFT segment size selection method for spectrum awareness," in *Proc. IEEE IWSS at WCNC*, Apr. 2016, pp. 252–257.
- [18] R. Mizuchi, K. Umebayashi, J. J. Lehtomäki, and M. López-Benítez, "A study on false alarm cancellation for spectrum usage measurements," in *Proc. IEEE IWSS at WCNC*, Mar. 2017, in press.
- [19] K. Umebayashi, M. Kobayashi, and M. López-Benítez, "Efficient time domain deterministic-stochastic model of spectrum usage," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 1518–1527, Mar. 2018.

- [20] K. Umebayashi, K. Hayashi, and J. J. Lehtomäki, "Threshold-setting for spectrum sensing based on statistical information," *IEEE Commun. Lett.*, Apr. 2017.
- [21] H. Iwata, K. Umebayashi, M. López-Benítez, and S. Narieda, "Welch FFT segment size selection method for FFT based wide band spectrum measurement," vol. E101-B, no. 7, Jul. 2018, in press.
- [22] H. Iwata, K. Umebayashi, J. J. Lehtomäki, and M. López-Benítez, "Time and frequency varying noise floor estimation for spectrum usage measurement," in *IEICE Tech. Rep.*, no. 410, Jun. 2018, pp. 43–50.
- [23] Y. Tamaki, K. Umebayashi, J. J. Lehtomäki, and M. López-Benítez, "A study on parameter setting of Welch FFTenergy detection in spectrum measurement," in *IEICE Tech. Rep.*, no. 410, Jun. 2018, pp. 35–42.
- [24] D. Cho, K. Umebayashi, S. Narieda, and M. López-Benítez, "A study on time series modeling of duty cycle for smart spectrum access," in *IEICE Tech. Rep.*, no. 457, Mar. 2018, pp. 1–7.
- [25] K. Yamada, K. Umebayashi, J. J. Lehtomäki, and K. B. Shashika Manosha, "Spectrum usage model for smart spectrum access," in *IEICE Tech. Rep.*, no. 457, Mar. 2018, pp. 109–116.
- [26] E. H. Gismalla and E. Alsusa, "On the performance of energy detection using Bartlett's estimate for spectrum sensing in cognitive radio systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 7, pp. 3394–3404, July 2012.
- [27] I. Harjula, A. Hekkala, M. Matinmikko, and M. Mustonen, "Performance evaluation of spectrum sensing using Welch periodogram for OFDM signals," in *Proc. IEEE VTC Spring*, May 2011, pp. 1–5.
- [28] M. S. Bartlett, "Smoothing periodograms from time series with continuous spectra," *Nature*, vol. 161, no. 4096, pp. 686–687, 1948.
- [29] P. D. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms," *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, vol. 15, no. 2, pp. 70–73, Jun. 1967.
- [30] H. Saarnisaari, P. Henttu, and M. Juntti, "Iterative multidimensional impulse detectors for communications based on the classical diagnostic methods," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 3, pp. 395–398, Mar. 2005.
- [31] D. Torrieri, "The radiometer and its practical implementation," in *Proc. IEEE MILCOM*, Oct. 2010, pp. 304–310.
- [32] J. J. Lehtomäki, R. Vuohtoniemi, K. Umebayashi, and J.-P. Mäkelä, "Energy detection based estimation of channel occupancy rate with adaptive noise estimation," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E95-B, no. 4, pp. 1076–1084, Apr. 2012.
- [33] J. J. Lehtomäki, R. Vuohtoniemi, and K. Umebayashi, "On the measurement of duty cycle and channel occupancy rate," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 11, pp. 2555–2565, Nov. 2013.
- [34] K. Umebayashi, R. Takagi, N. Ioroi, Y. Suzuki, and J. J. Lehtomäki, "Duty cycle and noise floor estimation with Welch FFT for spectrum usage measurements," in *Proc. IEEE CROWNCOM*, June 2014, pp. 73–78.
- [35] R. Mizuchi, K. Umebayashi, M. López-Benítez, and S. Narieda, "A study on noise floor estimation method for wideband spectrum measurement," in *Proc. IEICE Gen. Conf.*, Mar. 2017.
- [36] H. Iwata, K. Umebayashi, Y. Tamaki, D. Cho, R. Sato, and S. Narieda, "Development of smart spectrum access prototype," in *IEICE Tech. Rep.*, no. 56, May 2017, pp. 97–104.