

コグニティブ無線における高効率・高速スペクトルセンシング法に関する研究

金 ミンソク

東京工業大学大学院理工学研究科助教

1 まえがき

近年、急増する無線システムの周波数に対する需要により、周波数資源の枯渇状態が深刻な問題となっている。最近、周波数の固定的な割当てをせず動的に周波数を割当てるという新しい概念が提案されつつあり、盛んに研究が行われている。動的な周波数割当てとは、既に特定の業務に割当てられている全ての周波数を開放し、フレキシブルな無線端末を用いて常に最適な通信路を介して通信を行うことであり、今までの独占的な周波数利用に反する発想である。これはもっとも理想的な利用形態であるが、既に割当てられた周波数を占有するシステムとの両立性を考慮する必要があるため、既存システムへ干渉を与えないことを前提とした周波数共有の概念が注目を集めている。これが、コグニティブ無線システム(Cognitive radio system)と呼ばれているものである。

コグニティブ無線の基本的な考え方は、周波数割当てを動的に行うことで既存システムと共存することである。これは、既存システムを優先とし、ある時間・ある場所において既存システムが通信を行わない場合に限り周波数の二次利用を許可する仕組みである。周波数の二次利用を行うコグニティブ無線ユーザ(セカンダリユーザと呼ぶ)は、既存システムユーザ(プライマリユーザと呼ぶ)に干渉を発生してはならない。このため、一次利用システムに対する高信頼性の信号検出(スペクトルセンシング)技術が核心課題となる。また、広帯域にわたって未使用のスペクトルを常にモニターし、使用している周波数が使用不可となった場合、速やかな周波数切り替えを行う技術が、実用にむけて重要であると考えられる。

本調査研究では、コグニティブ無線の実現に向けたスペクトルセンシング法について、次の三つの課題：①スペクトル検出の信頼性を高める手法として信号の周期定常性検出器の性能評価、②効率的な広帯域スペクトル検出機構としてポリフェーズ DFT フィルタバンクを利用した複数チャネルセンシング法の開発、③簡易な実験系の構築による評価、を取り上げ、個別テーマについて得られた結果を報告する。

2 周期定常性 信号検出法の評価

周期定常性を用いる信号検出器は、プライマリユーザ信号の変調方式とシンボルレートなどに関する情報の他に雑音の統計値を事前情報として必要としないため、コグニティブ無線システムにおける有効な手法として考えられる。ここで信号検出は、プライマリ信号の有(H1)・無(H0)に関するバイナリ仮説検定問題である。H0 と H1 における検定統計値は、一般尤度比検定(GLRT)法により確立されている[1]。周期定常性は、その周期性により複数の周期周波数(Cyclic 周波数)を有し、その周期自己相関関数が漸近的にお互いに無相関であることから、複数の周期自己相関関数を合成し検出性能を向上することが可能である。本章では、IEEE802.22 で標準化が進められているデジタル TV 放送信号に対するコグニティブ無線システムを想定し、日本のデジタル TV の信号形式(ISDB-T)の OFDM 方式における周期定常性検出器の性能を評価する。

2-1 一般尤度比検定(GLRT)法の原理

周期定常性信号検出器における検出ルールは図1のようになる。ある cyclic 周波数(α_k)における検定統計値(T^{α_k})が、閾値(γ)より大きい場合は信号あり(H1)と判断され、そうでない場合は信号なし(H0)と判断される。

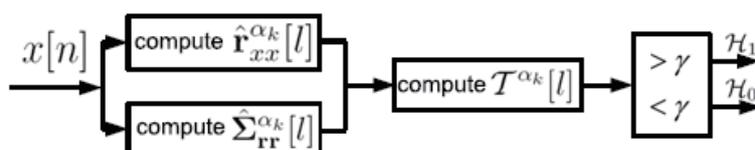


図1 GLRT 信号検出器

周期自己相関関数の mean square sense consistency と asymptotic complex normality 性質を用いて, GLRT 周期定常性信号検出法が開発された. ここで, 検定統計値は信号のない場合 (H0), 以下の χ 二乗分布に従い,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} T^{\alpha_k} [l] \stackrel{D}{=} \chi_2^2,$$

信号が存在する場合 (H1) には

$$\lim_{N \rightarrow \infty} T^{\alpha_k} [l] \stackrel{D}{=} \chi_2^2(N \cdot \mathbf{r}_{xx}^{\alpha_k} [l] \cdot \Sigma_{rr}^{\alpha_k} [l]^{-1} \cdot \mathbf{r}_{xx}^{\alpha_k} [l]^T)$$

分布となることが知られている. ここで, $\hat{\mathbf{r}}_{xx}^{\alpha_k}$ は相関ベクトルで, $\hat{\Sigma}_{rr}^{\alpha_k}$ は周期自己相関関数の共分散行列を表す. この統計的な性質を用いて誤警報確率 (Pfa) と検出確率 (Pd) を解析的に求めることが可能である. 周期自己相関関数が有効シンボル長の遅延のみに現れる OFDM 信号の特徴と各周期自己相関関数がお互いに無相関であることから, 共分散行列の対角成分のみを計算することで, Dandawate らにより提案された手法 [1] より, 計算量を大幅低減することができる.

2-2 OFDM 信号における複数の周期自己相関関数を用いる手法

OFDM 信号の自己相関関数は, 有効シンボル周期分の遅延において複数の cyclic 周波数が現れる. 複数の cyclic 周波数における周期自己相関関数はお互いに無相関であることから, 複数の周期自己相関関数を合成することで信号検出性能においてダイバーシティ利得が得られる [2]. その合成法としては, 選択合成 (SC), 等利得合成 (EGC), 最大比合成 (MRC) などのダイバーシティ理論が適用可能である. 最大比合成法においては, 各ブランチの SNR が既知である必要があるが, 周期定常性検出器の場合, 送信信号の cyclic prefix とデータ長の比から, 複数の周期自己相関関数の相対的な大きさが決定されるため, 周期自己相関関数の相対的な大きさを重み付けし合成することで送信信号に基づいた最大比合成が実現される [3].

図 2 と図 3 に計算機解析により評価した検出性能を示している. 解析条件は, ISDB-T mode3 の 10 OFDM シンボル (11.34 ms) が用いられた. まず, 最大比合成に用いる周期自己相関関数の数と検出性能の関係を図 2 に示す. ここで周期自己相関関数の数は, 送信信号の窓 (シンボル長) によって決定される. 図 2 により使用する周期自己相関関数の数の増加によって検出性能が向上されることが分かる. 図 3 には, 各合成法における性能の比較を示している. リファレンスとしてエネルギー検出器の性能も表記しているが, 理想的な場合には性能が非常に優れているが, 実運用上の弱点とされる雑音の不確実性が存在する場合には, 大きく性能が劣化してしまうことが分かる. 周期定常性検出器の場合, 単一の周期自己相関関数を用いるより, 複数の周期自己相関関数を用いた合成検出器 (SC, EGC, MRC) の性能が優れている. 合成には 13 個の周期自己相関関数を用いられた. 図 3 の結果から分かるように, 本研究で提案する最大比合成 (MRC) 検出器が, 最も優れた性能であることが確認できる.

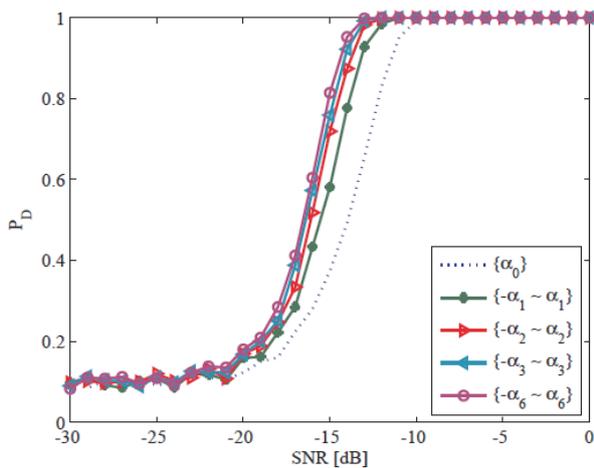


図 2 最大比合成に用いる周期自己相関関数の数と性能改善の関係

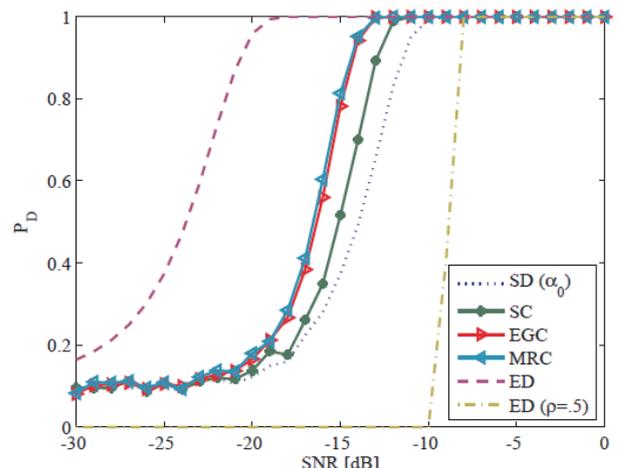


図 3 各手法における Pd 特性

2-3 まとめ

本章では, 周期自己相関関数が有効シンボル長の遅延のみに現れる OFDM 信号の特徴と各周期自己相関関数

がお互いに無相関であることから、Dandawate らにより提案された手法[1]の計算量を大幅低減できる手法を提案した。また、複数の周期自己相関関数の合成による検出性能改善方法として、送信信号の特性に基づいた最大比合成法を提案し、選択合成、等利得合成との性能比較を行った。検出確率性能の評価結果から、最大比合成法が最も優れていることが分かった。10 OFDM シンボルで信号検出を行う場合、提案手法では SNR=-14dB まで Pd=90% (Pfa=10%の条件下) を満たすことを確認した。

3 効率的な広帯域スペクトル検出機構の開発

コグニティブ無線は、既存システム(プライマリユーザ)を優先とし、プライマリユーザが瞬時的に通信を行わない場合に限り周波数の二次利用を許可する仕組みであるため、高信頼性の信号検出(スペクトルセンシング)技術が非常に重要な課題である。また、広帯域にわたって空いているスペクトルを常にモニターし、使用している周波数が使用不可となった場合、速やかな周波数スイッチングを行う技術が、実用に向けて非常に重要である。本章では、効率的な広帯域スペクトルセンシング法について検討する。具体的には、アナログ制御型アレーアンテナを用いて電力の強い入力信号を取り除き、信号検出の対象である微弱信号のみを AD 変換することで、AD 変換器の分解能を十分に活用する方法を提案する(図4, 図5) [4]。また、並列処理が可能であるポリフェースフィルタバンクを用いる方法を提案する。これは広帯域信号に対して帯域分割を行い複数の周波数領域分割(FDM)信号を同時に処理することが期待できる[5]。

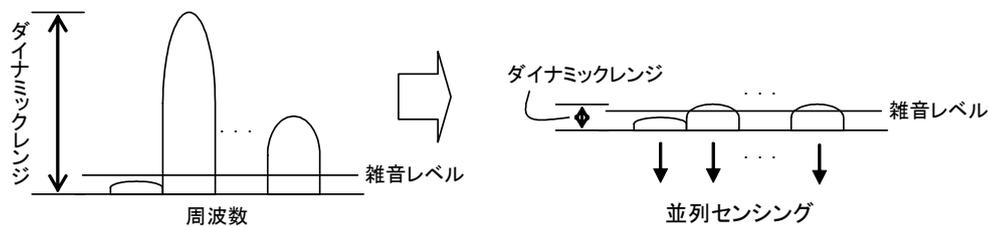


図4 提案手法の概念

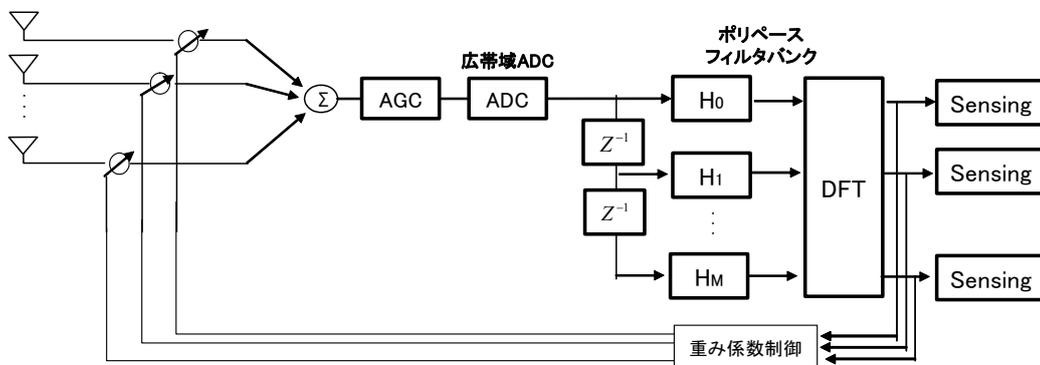


図5 提案システム構成

3-1 結果と考察

提案手法の有効性を確認するため、地域無線ネットワーク (IEEE802. 22) で利用が検討されているデジタル TV 信号を保護すべき既存システムとして想定し、雑音チャンネルにおける特性を計算機シミュレーションにより確認した。図6は、既存信号が存在する場合にそれを正しく検出する確率(Pd)であり、図7は、既存信号が存在しないのに関わらず信号があるとして誤警報する確率(Pfa)を示している。凡例のベクトルVはチャンネル状態を示しており、チャンネルが空いていれば0、チャンネルが使用中ならば1の値をとる。図7は、隣のチャンネル状態に対してチャンネル1におけるPfaを表している。どちらの特性も提案手法であるポリフェースフィルタバンク (FB) を用いる方法が、フィルタバンクのプロトタイプフィルタの特性により優れていることが確認できる。これは、周波数分解能を犠牲せずサイドローブを低く抑えることができるため、マルチチャンネル処理における隣接チャンネルからの干渉を抑圧することが可能であるからである。このため、その性能は従来の離散フーリエ変換に基づくピリオドグラム法(PSE)より優れていることと考えられる。また、提案手法では、プロトタイプフィルタにかかる演算が必要であり、計算量が増加すると考えられるが、同等の性能で

比較した場合には、従来法と比べて逆に演算量を半分以下に抑えることが可能である[4].

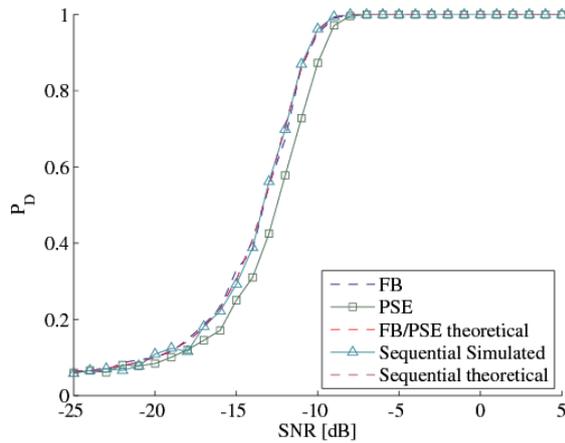


図6 信号検出確率

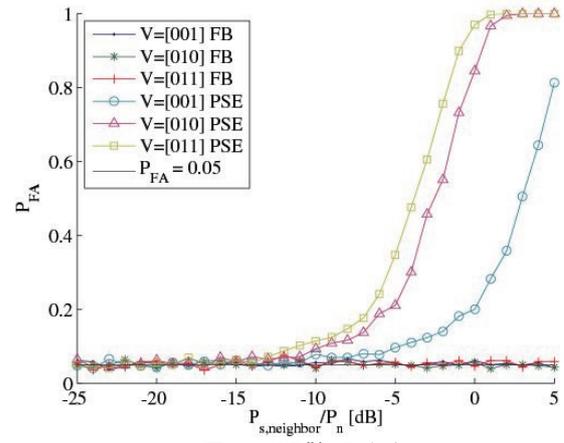


図7 誤警報確率

3-2 まとめ

本章では、フィルタバンクとエネルギー検出機を従属させたマルチチャネル同時スペクトルセンシング法を提案した。フィルタバンクを導入することで、効率的なサブバンド化やバンドパスフィルタの最適化が行われ、隣接チャネル干渉を抑えることで、従来法より優れた性能を持つことが計算機解析で確認できた。手案手法の広帯域に渡るマルチチャネル信号処理技術は、ホワイトスペース型のコグニティブ無線の実現に向けた欠かせない要素技術として期待される。

4 実験系の構築による評価

本章では、実験系の構築によるスペクトルセンシングの評価を行いその有効性を示す。ここでは、特に災害現場において救急無線システム(レスキューチーム)間の干渉を防ぐために、災害現場における周波数割り当てを管理し、ユーザが周波数使用状況の把握できるデータベース管理システムの開発を目的としたコグニティブセンサネットワーク評価システムを構築した[6].

4-1 システムの概要

全体のシステム構成は、図8のように、クラスターベースに分散されたセンサノードが、個別にプライマリユーザ(ここでは、救急無線システム)の検出を行い、その結果あるいは波形データをヘッドノードに転送する。ヘッドノードは複数のセンサノードからの検出結果をもとに最終判定を行う。ヘッドノードは判定結果をデータベースに転送し、それが属するクラスターの周波数使用状況を更新する。救急システムはこのデータベースを用いて周波数利用状況の把握の上、干渉の起こさない周波数にて通信を行うことが可能である。本章では、センサノードとヘッドノードにおける協力センシングシステムを GNU Radio/USRP(Universal Software Radio Peripheral)を用いて構築し、エネルギー検出器における性能を確認した。

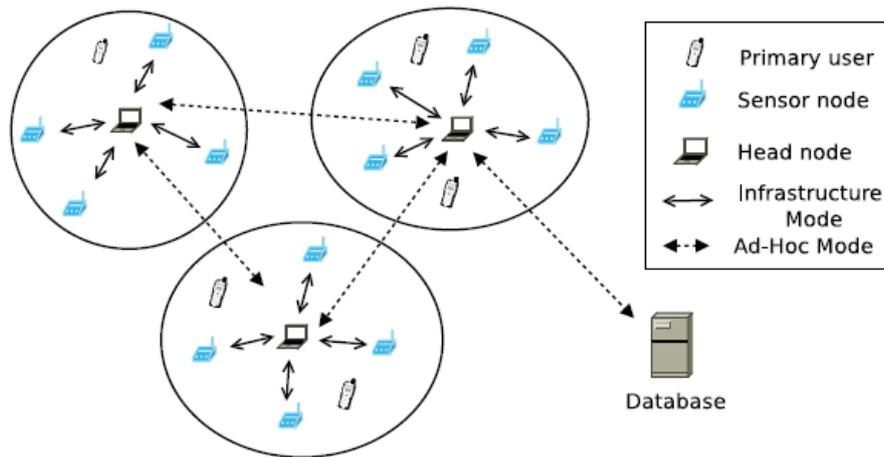


図8 災害コグニティブ無線ネットワーク

4-2 協力センシング (cooperative sensing)

マルチパスや遮蔽による隠れ端末問題を防ぐために、複数のセンサノードが協力しあい信号検出を行うことを協力センシングと呼ぶ[7]。協力センシングでは、複数のセンサがスペクトル情報を共有するため、センサノードが空間的相関の十分低いエリアに分布されている場合には、ダイバーシティ効果が期待でき、より高信頼性の信号検出やセンシング時間の短縮につながる。

協力センシング法は、軟判定(soft detection)と硬判定(hard detection)の2種類と分けられる。軟判定法では、各センサノードから転送された波形データを合成し、ヘッドノードで判定を行う。合成法には、様々なアルゴリズムが提案されており、前章で説明した選択合成、等利得合成、最大比合成などが適用できる[8]。本章では、協力センシングの基本性能を実験的に確かめるために、軟判定法として等利得合成法を用いており、硬判定法はORルールが用いられた。軟判定におけるヘッドノードの閾値(γ)は、簡単のため、各センサノードにおける雑音の分散の和により計算された。この場合、検出確率は

$$P_{D,\text{coop(soft)}} = Q \left(\frac{\gamma - \sum_{j=0}^{J-1} (\sigma_{s,j}^2 + \sigma_{n,j}^2)}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=0}^{J-1} (\sigma_{s,j}^2 + \sigma_{n,j}^2)^2}} \right),$$

$$\gamma = Q^{-1}(P_{\text{FA}}) \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=0}^{J-1} \sigma_{n,j}^4 + \sum_{j=0}^{J-1} \sigma_{n,j}^2},$$

となる。ここで、 σ_s は信号の分散、 σ_n は雑音の分散、 J はノード数、 M はサンプル数である。硬判定の場合に検出確率は

$$P_{D,\text{coop(hard)}} = 1 - \prod_{j=0}^{J-1} (1 - P_{D,j})$$

となる。図9に各手法における検出性能を示している。ここで、プライマリユーザ信号は帯域幅20 kHzのAMとBPSKの2種類が用いられた。センシング時間は1msとし、センサノードの数はシステムの制約のため3つとして想定した。各センサノードとヘッドノードはGNU Radio/USRPを用いて実装された。センサノードとプライマリユーザ間はケーブルで直接接続、つまりAWGNチャネルでの評価を行った。ここでは、Pdの理論値と測定値を比較しているが、まず、それぞれのセンサノードにおけるPdの実験値は理論値と非常によく一致することが確認できた。協力センシング法については単一センサの性能よりSNRで約3dBの改善効果があることが確認できる。また、硬判定法が軟判定法より低SNR領域で性能が優れているが、Pfaも同様に増加されることに注意されたい。このため、システム仕様に応じて適切な協力センシング法を選択しなければならない。

図10には、試作システムの動作の様子を示しており、安価なGNU Radio/USRPを用いた実験系の構築による

スペクトルセンシングだけでなく、コグニティブ無線における様々なPHY/MAC層のアルゴリズムの評価を予定している。

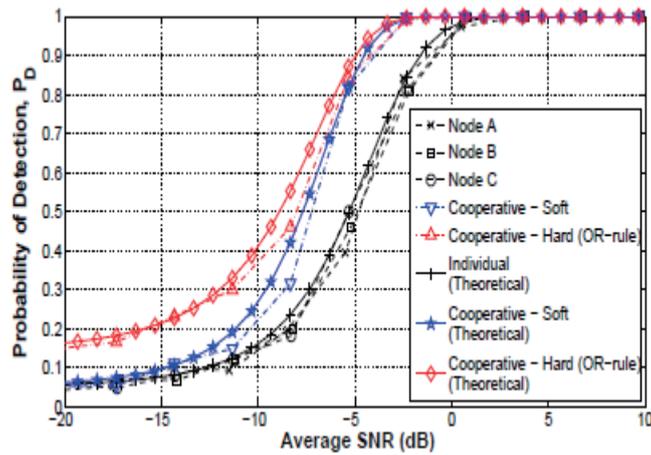


図9 AWGN チャネルにおける Pd 性能(実験値)

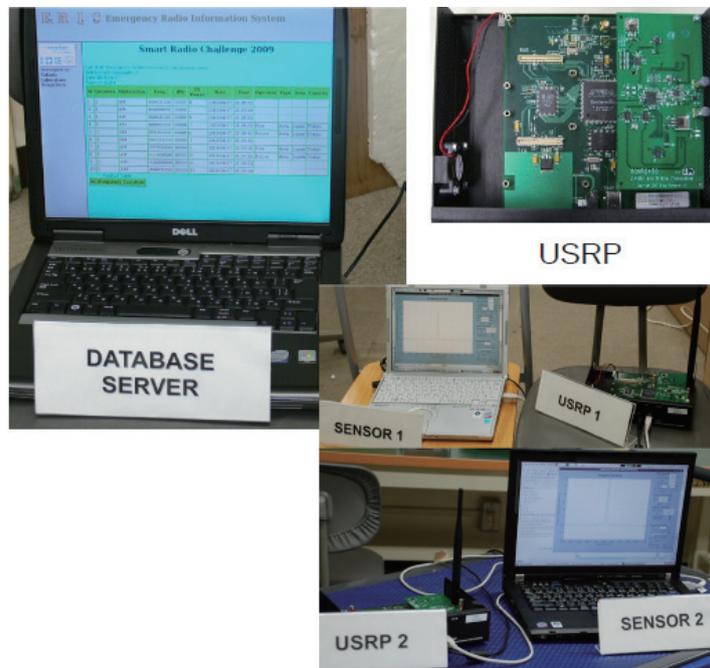


図10 試作システムの様子

5 むすび

本調査研究では、コグニティブ無線の実現に向けたスペクトルセンシング法について、

- ①スペクトル検出の信頼性を高める手法として信号の周期定常性検出器の性能評価、
 - ②効率的な広帯域スペクトル検出機構としてポリフェーズ DFT フィルタバンクを利用した複数チャネルセンシング法の開発、
 - ③簡易な実験系の構築による評価、
- を取り上げ、個別テーマについて得られた結果を報告した。

【参考文献】

- [1] V. Dandawate, B. Giannakis, "Statistical Tests for Presence of Cyclostationarity," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 42, no. 9, pp. 2355–2369, Sept. 1994.
- [2] J. Lunden, V. Koivunen, A. Huttunen, H. Poor, "Collaborative Cyclostationary Spectrum Sensing for Cognitive Radio Systems," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 57, no. 11, pp. 4182–4195, Nov. 2009.
- [3] M. Kim, K. Po, J. Takada, "Performance Enhancement of Cyclostationarity Detector by Utilizing Multiple Cyclic Frequencies of OFDM signals," in proc. IEEE DySPAN 2010, Apr. 2010.
- [4] M. Kim and J. Takada, "Efficient Multi-channel Wideband Spectrum Sensing Technique Using Filter Bank," in Proc. IEEE PIMRC 2009, 2009.
- [5] B. F. Boroujeny, "Filter Bank Spectrum Sensing for Cognitive Radios," IEEE Trans. Signal Processing, Vol.56, Issue 5, pp.1801–1811, 2008.
- [6] Azril Haniz, Md. Abdur Rahman, Minseok Kim and Jun-ichi Takada, "Implementation of a Cooperative Spectrum Sensing System using GNU Radio and USRP," 2010 IEICE General Conf., B-17-18, JAPAN, Mar. 2010.
- [7] A. Ghasemi, E. S. Sousa, "Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks : Requirements, Challenges and Design Trade-offs," IEEE Commun. Mag., Vol. 46, No. 4, Apr. 2008.
- [8] J. Ma, Y. Li, "Soft Combination and Detection for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 7, No. 11, Part 2, Nov. 2008.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Multichannel Spectrum Sensing using Polyphase DFT Filter Bank for Opportunistic Cognitive Radios	電子情報通信学会 信学技報 SR2009-19	2009年5月
Design and implementation of a Cognitive Radio Based Emergency Sensor Network in Disaster Area	電子情報通信学会 信学技報 SR2009-27	2009年7月
Efficient Multi-channel Wideband Spectrum Sensing Technique Using Filter Bank	IEEE International Symposium On Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)	2009年9月
Development of Spectrum Sensing System with GNU Radio and USRP to Detect Emergency Radios	電子情報通信学会 信学技報 SR2009-57	2009年10月
Spectrum Sensing Techniques for Cognitive Radios	電子情報通信学会 信学技報 SR2009-92	2010年3月
Performance Enhancement of Cyclostationarity Detector by Utilizing Multiple Cyclic Frequencies of OFDM signals	Proc. IEEE DySpan 2010	2010年4月