

コグニティブ無線における協調センシングのためのセカンダリ・ユーザ間グループ形成手法

Group Formation of Secondary Users for Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks



笠原 正治 (Shoji KASAHARA, Dr. Eng.)

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科
情報科学領域 教授

(Professor, Division of Information Science, Graduate School of
Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology)

IEEE 電子情報通信学会 日本オペレーションズ・リサーチ学会
情報処理学会 システム制御情報学会

受賞: 第22回電気通信普及財団賞 (テレコムシステム技術賞) (2007年)

KDDI 財団優秀研究賞 (2010年度)

研究専門分野: 待ち行列理論 マルコフ解析 性能評価モデリング
情報通信工学

あらまし コグニティブ無線では、プライマリ・ユーザ (PU : Primary User) の周波数利用状況をセカンダリ・ユーザ (SU : Secondary User) が正しく検出できる必要がある。各 SU が自身のみでセンシングを行う非協調センシングと比べて、SU 間で協調センシングを行うことで PU の信号の検出確率を向上することができる。本稿では、複数 PU 型コグニティブ無線における協調センシングのための SU 間グループ形成手法を提案する。2 PU 環境を想定したシミュレーション評価により、提案手法を用いることで、非協調センシングと比べて PU のチャンネルを利用できる SU (Winning SU) の割合を改善できること、また、Winning SU の総スループットを迅速に理論値付近まで達成できることを示す。

1. 序論

近年のスマートフォンの普及に加え、あらゆるモノがインターネットに接続される Internet of Things (IoT) 時代の到来により、無線通信に関する需要は急速に増加している。一方で、無線資源は有限であることから、周波数帯域の利用効率を向上させる技術としてコグニティブ無線が注目されている[1]。コグニテ

ィブ無線では、ある周波数帯域の利用を正規に許可されたプライマリ・ユーザ (PU : Primary User) と空き状況に応じてその周波数の利用を試みるセカンダリ・ユーザ (SU : Secondary User) が存在する。各 SU は、センシングによって PU の所有する周波数帯域の利用状況を認識し、周波数帯域が空いていると判断したときにのみ通信を試みる。したがって、SU によるセンシングの精度が PU の通信への干渉に影響する。

SU によるセンシング結果は、PU の信号の減衰やフェージング、ノイズの影響によって誤る場合がある。センシングの誤りは、誤検知と誤警報の2種類に分類される。誤検知とは、実際には PU が自身の周波数帯域を利用中 (ビジー状態) にも関わらず、SU が PU の周波数帯域が空き状態 (アイドル状態) と判定する誤りである。したがって、PU にとっては自身の通信を SU によって妨げられないために、誤検知の発生確率 (誤検知率) の抑制が重要となる。一方、誤警報とは、実際には PU の周波数帯域がアイドル状態にも関わらず、SU がビジー状態と判定する誤りである。そのため、SU にとっては、自身の通信機会を逃さないために、誤警報の発生確率 (誤警報率) の抑制が重要となる。

文献[2]では、センシング精度を向上させる方策として、複数の SU によるセンシング結果を統合して一つのセンシング結果とする協調センシング (CSS : Cooperative Spectrum Sensing) を提案している。協調センシングの実現には、SU 間でグループを形成するための手法が必要となるが、全 SU を対象として集中型制御により最適なグループ形成を行う場合、SU 数の増加に対して計算量が膨大となるため現実的ではない。この問題に対し、一つの PU を対象としたコグニティブ無線においては、ゲーム理論的アプローチを用いた自律分散的な SU 間グループ形成手法が提案されている[3]。ただし、実システムでは二つ以上の PU が存在する可能性がある。

そこで本稿では、複数の PU が存在する環境における自律分散的な SU 間グループ形成手法を提案する。SU の目的は、自身の通信機会を増やすことであるが、一方で、利用を試みる周波数帯域の所有者である PU

コグニティブ無線における協調センシングのためのセカンダリ・ユーザ間グループ形成手法

Group Formation of Secondary Users for Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks

に対しては、その通信を妨げてはならないという制約が存在する。ここで制約に関しては、誤検知率に関して PU が上限を設定する状況を想定する。各 SU は、単独でセンシングもしくは他の SU と協調センシングを行うことで、誤検知率に関する制約を満たすことを目指す。さらに、誤検知率に関する制約を満たすことのできる SU は、自身の通信機会が最大となるような PU を選択する。以上のような提案手法の有効性をシミュレーションにより評価する。なお、本稿の内容は研究成果[4]に依っている。

2. 研究の背景

コグニティブ無線における CSS は、空間ダイバーシティを利用することで PU の信号の検出確率を向上させる有効な方式であり、様々な研究がなされている[5]。まず、CSS における複数の SU のセンシング結果の統合方式として、OR ルール、AND ルール、K-out-of-N ルール、多数決ルールが検討されている[5]。文献[2]では、OR ルールの採用により、SU 数の増加に対して誤警報率は増加するものの、誤検知率を抑制できることを示している。また、文献[6]では、センシング結果の共有時のフェージングによる通信路誤りを抑制する手法として、送信ダイバーシティを考慮した CSS が提案されている。

このように CSS では、SU 間でセンシング結果を収集・統合するとともに、その結果をそれらの SU 間で共有する必要があるため、SU 数の増加に伴い、制御のための通信オーバーヘッドが増加する問題がある。そこで、多数の SU が存在する環境においては、SU 間でグループを形成し、そのグループ内で CSS を行うセンシング方式が検討されている。このようなグループ形成手法は、集中管理型と自律分散型に分類される。

集中管理型グループ形成手法では、ネットワーク内の SU を管理するサーバが全 SU を対象に形成可能なグループのパターンを計算し、最適なグループ形成を行う。文献[7]では、特定の PU の周波数帯域を希望する全 SU に対して、全ての形成可能なグループのパターンを計算し、グループの効用値が最大となるグループを形成する。以降、グループを未形成の SU を対象

に同様の計算を行い、順にグループを形成するアルゴリズムが提案されている。文献[3]では、全探索による最適なグループ形成の計算量について、SU 数が 8 以上では計算量が膨大になるため処理できないことが示されている。

一方、自律分散型グループ形成手法では、協調する動機を基に、SU 自身が周囲の SU とグループを形成する。文献[3]では、SU 間グループ形成問題をゲーム理論における提携形成問題 (CF-game : Coalition Formation game) として定式化しており、協調センシングによる誤検知率の抑制と誤警報率の増加のトレードオフを表現した効用関数を用いて、自律分散的に SU 間でグループを形成する手法を提案している。ここで CF-game は、プレイヤーが提携 (協力関係) によって得られる利益を基に、どのような提携を形成するかを扱う協力ゲームの一種であり、プレイヤー間の利益を譲渡不可 (NTU : Non-Transferable Utility) [8][9]としたゲームである。文献[10]では、SU 間グループ形成問題をプレイヤーの提携間の重複を許容する提携形成問題 (OCF-game : Overlapping CF game) として定式化し、有限な SU の送信電力と通信帯域幅を考慮したグループ形成手法を提案している。文献[3][10]は、一つの PU を対象としたコグニティブ無線における自律分散的なグループ形成手法を提案しているが、実システムでは、二つ以上の PU が存在する可能性がある。

複数の PU を対象としたコグニティブ無線におけるグループ形成手法についても、いくつか提案されている[7][11][12]。文献[7]では、複数の PU が存在する環境における協調周波数帯域予測のためのグループ形成手法を提案している。各 SU は、PU による周波数帯域利用の予測を行い、複数の PU から予測精度が最高となる PU を選択し、PU 毎にその PU を選択した全 SU を対象に、集中管理型を用いて SU のグループを形成する。文献[11]では、複数の PU が存在する環境で、センシングの精度とエネルギー効率を考慮したグループ形成手法を提案している。SU のセンシング精度とセンシングや通信に要する電力を考慮した効用関数により、自律分散的なグループ形成を行う。文献[12]では、複数の PU が存在する環境におけるマルチチャ

コグニティブ無線における協調センシングのためのセカンダリ・ユーザ間グループ形成手法

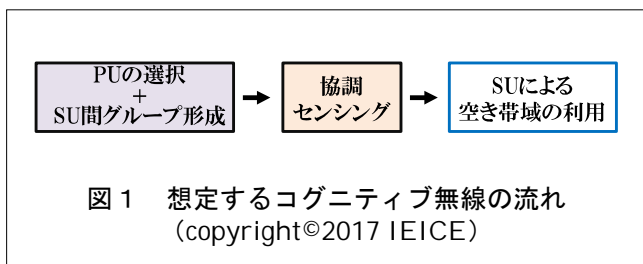
Group Formation of Secondary Users for Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks

ネル CSS が提案されている。各 SU は、SNR (Signal-to-Noise Ratio) が高い順にチャンネルを選択し、同じチャンネルを選択している SU 間でグループを形成する。本稿では、[7][11][12]と同様に、複数の PU を対象としたコグニティブ無線を想定するが、各 SU が自身の通信機会を最大化できるようにグループを形成する方式を提案する。

3. 研究の方法・結果

複数の PU を対象としたコグニティブ無線を想定する場合、SU の各 PU に対する誤検知率や PU によるチャンネル利用頻度は一般に異なる。そこで各 SU では、PU の通信を妨げることなく、自身の通信可能なレートが最大となるように、検知対象の PU を決定するとともに、他の SU と適切にグループを形成することが求められる。

図 1 に、本稿で想定するコグニティブ無線の流れを示す。まず、SU は PU の選択とグループの形成を行い、その後協調センシングを行う。センシングにより、PU の周波数帯域の空きを確認できた SU は空き帯域の利用を試みる。一定の時間サイクルでこの流れを繰り返す。



3.1 システムモデル

領域内には、 L 個の PU ($S_{PU} = \{1, \dots, L\}$) と N 個の SU ($S_{SU} = \{1, \dots, N\}$) が存在するものとする。全 SU 集合 $S_{PU} = \{1, \dots, L\}$ 、全 PU 集合 $S_{SU} = \{1, \dots, N\}$ で構成されるコグニティブ無線を考える。各 PU からは、各 SU に対して誤検知率の上限 $\chi (0 \leq \chi \leq 1)$ を設定するものとする[13]。各 SU は、センシングによって信号を検出した場合、PU の周波数帯域がビジュー状態だと判定するが、このときの誤検知率が χ 以下を満たせる場合に限り、各 SU は通信機会を得ることができる。無線環

境のモデルとしては、レイリーフェージングを想定し、SU $i \in S_{SU}$ の PU $l \in S_{PU}$ に対する誤検知率 P_{il}^{miss} と誤警報率 P_i^{false} は、[14]で与えられるものと仮定する。

SU i が PU l に対して達成可能な誤検知率 P_{il}^{miss} が、PU l からの誤検知率に関する要求上限 χ を超える場合、SU i は他の SU とグループを形成し、協調センシングを行うことで誤検知率の低下を目指す必要がある。ここで、各グループ $S \in 2^N$ では、一つの SU がグループ内の各 SU のセンシング結果を統合し、グループとしてのセンシング結果を求めるものとする。なお、グループ内でセンシング結果を統合する役割の SU をヘッド、グループ内のヘッド以外の SU をメンバと呼ぶ。センシング結果の統合方法としては、誤検知率の抑制に効果的であることが知られている OR ルールを用いる。

ヘッド $k \in S$ のグループ $S \subseteq 2^N$ における、PU $l \in S_{PU}$ に対する誤検知率 $Q_{S,l}^{miss}$ と誤警報率 Q_S^{false} は、[3]で与えられているものを使用する。グループ内でセンシング結果を共有する際、誤検知率が低い、すなわち信頼度が高い SU のセンシング結果が送信時に誤る可能性をできる限り減らすために、グループ内で PU l に対する誤検知率が最小となる SU をヘッドとして選択する。

グループ形成のためには、各 SU i はグループを形成する候補となる周囲の SU を発見する必要があるが、これら SU の集合 N_i は、文献[10]で与えられている通信可能距離 \bar{d} により決まるものとする。

3.2 通信機会を考慮した PU 選択・グループ形成

SU が PU のチャンネルを利用するためには、自身もしくは自身の属するグループの誤検知率が PU の設定した誤検知率の上限 χ 以下となる必要がある。本稿では、グループ S の誤検知率が $Q_{S,l}^{miss} \leq \chi$ を満たし、チャンネルを利用することができるグループに属する SU を Winning、それ以外の SU を Losing と呼ぶ。グループは一つ以上の SU で構成されるが、グループが一つの SU のみで構成される場合を単独 SU と呼ぶものとする。

提案手法では、SU i はまず誤検知率に関する制約を満たす必要がある。次に、誤検知率に関する制約を

コグニティブ無線における協調センシングのためのセカンダリ・ユーザ間グループ形成手法

Group Formation of Secondary Users for Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks

満たすことのできる SU i は、自身の通信機会が最大となる PU を選択する。これは、以下のような目的関数と制約条件により表現できる。

$$\max_{l \in L_{S_i, \chi}} (1 - R_l^{use, PU}) (1 - Q_{S_i, l}^{false}) r_{l, S_i} \quad (1)$$

$$L_{S_i, \chi} = \{l \in L | Q_{S_i, l}^{miss} \leq \chi\} \quad (2)$$

ここで、 $L_{S_i, \chi}$ は SU i が属するグループ S_i の誤検知率が PU l の要求する誤検知率の上限 χ 以下となる PU の集合を示す。また、 $R_l^{use, PU}$ は PU l によるチャンネルの利用率を、 r_{l, S_i} は PU l を選択したグループ S_i に属する一つの SU が通信可能なレートを表す。

提案手法による PU の選択と SU 間グループ形成を説明する。まず、各 SU $i \in N$ は自身のみからなるグループを形成し、通信可能距離 \bar{d} 内の近隣 SU の集合 N_i を発見する。その後、各 SU i は、まず、協調センシングを行わずに誤検知率の制約を満たすことができるかどうかを確認する。SU i が自身のみで、いずれかの PU からの誤検知率の制約を満たすことができる。すなわち、Winning の場合は、(1)に基づき、通信レートの期待値が最大となる PU を選択する。そうではなく Losing の場合は、誤検知率が最小となるように PU を選択する。

Losing となった SU i は協調センシングを試みる。まず、SU i は協調できる可能性のある近隣のグループを探索する。なお、対象となるグループも Losing となっている必要があることに注意する。協調できるグループが見つかった、すなわち Winning となる SU i は、(1)に基づき、通信レートの期待値が最大となるように PU の選択とグループ形成を行う。そうではなく Losing となる場合は、誤検知率が最小となるようにグループを形成する。なお、グループ形成の試みは、Losing となるグループ集合が変化しなくなるまで行われる。したがって、PU と SU の位置関係によっては、一部の SU が Losing となる可能性がある。

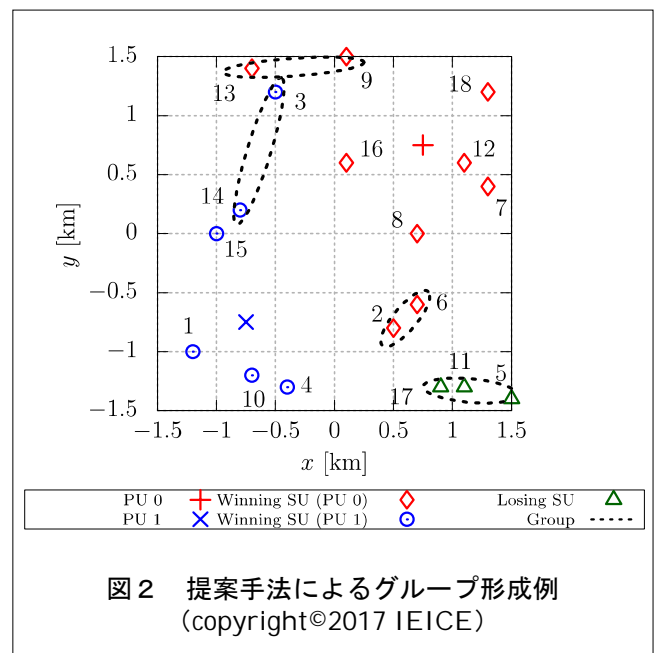
3.3 シミュレーション評価

提案手法の有効性を評価するため、計算機シミュレーションを行った。シミュレータには Netlogo[15]を使用し、以下の仮定の下で評価を行った。

- PU l のチャンネル利用率 $R_l^{use, PU}$ は既知かつ固定
- PU l を選択する Winning である SU 数 N_l は全 SU が常に認識可能
- PU l を選択したグループ S に属する SU の通信可能レート $r_{l, S}$ は $1/N_l$ 。

評価指標としては、Winning となる SU の割合、および総スループットを用いる。なお、Winning となる SU の割合は、PU のチャンネルを利用できる SU の割合に等しい。また、総スループットは、Winning となる SU に対する目的関数値の総和で表される。比較対象には、各 SU が単独でセンシングを行う場合（非協調センシング）を用いる。

図 2 に、SU 数を $N = 18$ とした場合の提案手法による PU 選択とグループ形成の例を示す。



図より、PU からの距離が近い SU i は、単独で PU からの誤検知率に対する制約を満たすことのできるため、グループを形成せず、単独 SU となっていることがわかる ($i = 1, 4, 7, 8, 10, 12, 15, 16, 18$)。一方、正方領域全体を左上から右下への対角線を軸に二分するように PU が配置されていることから、この対角線付近に存在する SU の誤検知率は低くなる傾向にあり、その結果、これらの SU 間でグループを形成しやすくなる ($\{2, 6\}, \{3, 14\}, \{5, 11, 17\}, \{9, 13\}$)。また、この実験

コグニティブ無線における協調センシングのためのセカンダリ・ユーザ間グループ形成手法

Group Formation of Secondary Users for Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks

では、PU 0の方がPU 1よりもPUによるチャンネル利用率が低く設定されているため、空き帯域の利用の観点から、PU 1よりもPU 0を選択するSUの数が多くなっている。なお、一部のSUは、グループを形成したとしても誤検知率の制約を満たすことができず、Losingとなっていることに注意する（{5, 11, 17}）。

提案手法の性能は、PU, SUの配置や数に依存して決まる。以降では、PUの個数は $L = 2$ 、配置は図2のように固定し、SUの配置と個数を変更することで5000回の独立した試行を行い、評価指標の平均値を算出して提案手法の基本特性を明らかにする。

図3に、提案手法と非協調センシングにおいて、SU数を変化させた場合のWinningとなるSUの割合の推移を示す。この図より、SU数によらず、非協調センシングと比較して、提案手法を用いることでWinningとなるSUの割合を大幅に改善できることがわかる。特に、SUが多くなるほど改善の度合いは大きくなり、SU数50では、非協調センシングと比較して45%の改善が見られる。

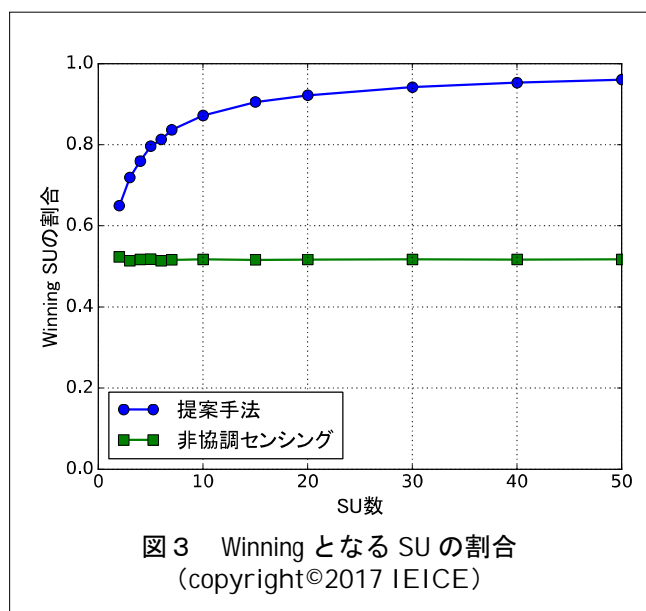


図3 WinningとなるSUの割合
(copyright©2017 IEICE)

以上のことから、提案手法を用いることで、単独センシングではPUのチャンネルを利用できないSUがチャンネル利用できる可能性が高くなる効果があり、SU数が多くなるほど、その効果が大きいことが分かる。

図4に、提案手法におけるSU数を変化させた場合の総スループットを示す。ここでのPU 0のチャンネル利用率は $R_0^{use,PU} = 0.3$ 、PU 1のチャンネル利用率は $R_1^{use,PU} = 0.5$ であるため、SUは理論的には、確率 $1 - R_0^{use,PU} = 0.7$ でPU 0のチャンネルを、確率 $1 - R_1^{use,PU} = 0.5$ でPU 1のチャンネルをそれぞれ利用できる。図より、選択するPUによらず、総スループットはこれらの理論値より少し低い値をとることがわかる。また、SU数が10まではSU数の増加に伴って総スループットが低下し、SU数が10以上では安定している。総スループットの減少は、(1)における誤警報率の項の影響と考えられる。

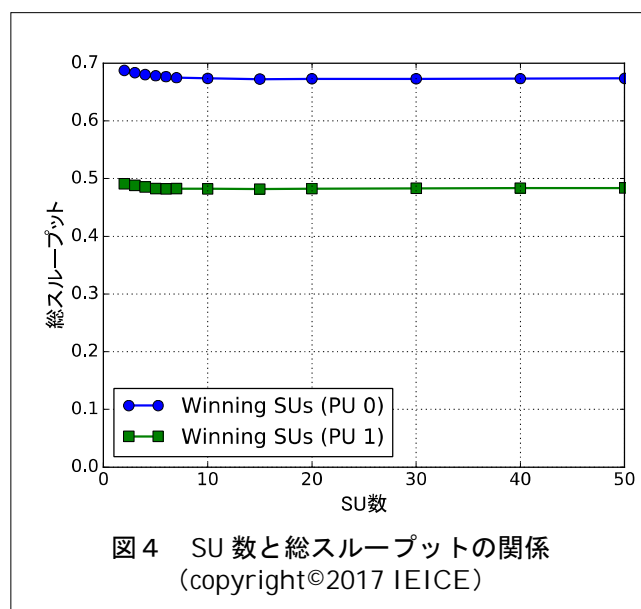
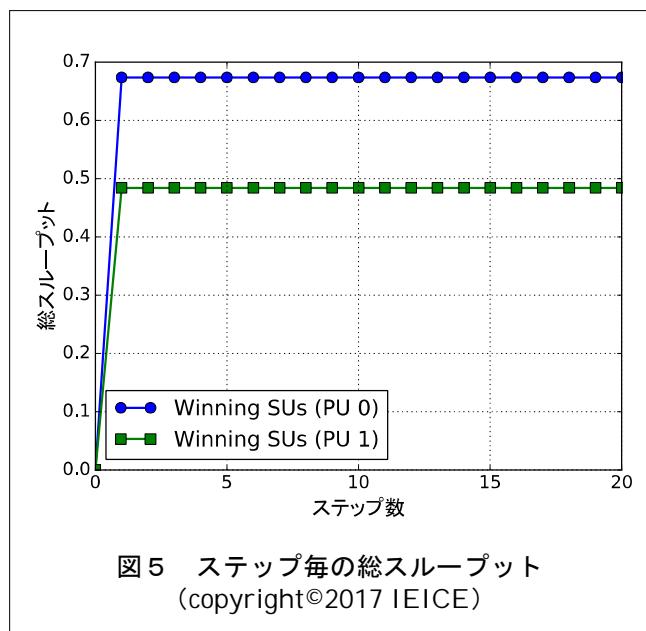


図4 SU数と総スループットの関係
(copyright©2017 IEICE)

図5は、SU数が50のときのステップ毎の総スループットの推移を表している。ここでのステップ数は、PU選択・グループ形成において、LosingとなるSUが新たなグループ形成を試みた回数である。図より、ステップ1では、グループ形成とPUの選択による変化が見られるが、その後は、総スループットが変化していないことから、高い収束性が確認できる。ただし、今回のシナリオでは、SUの移動、新規参入・離脱が生じないことを仮定しているため、今後の課題として、このような動的な環境下における提案手法の有効性について検証する必要がある。



4. まとめ

本稿では、複数の PU が存在する環境における自律分散的な SU 間グループ形成手法を提案した。まず、PU が設定する誤検知率の上限に関する制約条件と、SU による自身の通信機会が最大となる PU 選択のための目的関数を定義した。提案手法では、単独のセンシングで制約条件を満たす SU は、制約条件を満たす PU 集合から目的関数が最大となる PU を選択する。単独のセンシングで制約条件を満たせない SU は、制約条件を満たし、かつ目的関数が最大となる他の SU とグループを形成する。これにより、自律分散的なグループ形成を行う。

シミュレーション評価により、各 SU が単独でセンシングを行う場合に比べて、提案手法は、PU のチャネルを利用できる SU の割合を改善できることを示した。また、提案手法を用いることで、Winning となる SU の総スループットを迅速に理論値付近まで達成できることを示した。

今後の課題としては、SU の移動や新規参入・離脱といった動的な環境における提案手法の有効性についての検証が挙げられる。

参考文献

- [1] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, 2005.
- [2] A. Ghasemi and E.S. Sousa, "Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environments," *Proc. of 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 131-136, 2005.
- [3] W. Saad, Z. Han, T. Başar, M. Debbah, and A. Hjorungnes, "Coalition Formation Games for Collaborative Spectrum Sensing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 276-297, 2011.
- [4] 西田 知弘, 笹部 昌弘, 笠原 正治, "複数プライマリ・ユーザ型コグニティブ無線における協調センシングのための通信機会を考慮したセカンダリ・ユーザ間グループ形成手法," *電子情報通信学会技術研究報告 (NS2016-244)*, pp. 499-504, 2017.3.2-3.
- [5] I.F. Akyildiz, B.F. Lo, and R. Balakrishnan, "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: A Survey," *Physical Communication*, vol. 4, no. 1, pp. 40-62, 2011.
- [6] W. Zhang and K. Letaief, "Cooperative Spectrum Sensing with Transmit and Relay Diversity in Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 4671-4766, 2008.
- [7] T. Jing, X. Xing, W. Cheng, Y. Huo, T. Znati, "Cooperative Spectrum Prediction in Multi-PU Multi-SU Cognitive Radio Networks," *Proc. of 8th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, pp. 25-30, 2013.
- [8] R.B. Myerson, *Game Theory, Analysis of Conflict*, Harvard University Press, 1991.

- [9] D. Ray, A Game-Theoretic Perspective on Coalition Formation, Oxford University Press, 2007.
- [10] T. Wang, L. Song, Z. Han, W. Saad, "Distributed Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks: An Overlapping Coalition Formation Approach," IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 9, pp. 3144-3160, 2014.
- [11] H. Xiaolei, C.M Hon, V.W.S Wong, V.C.M Leung, "A Coalition Formation Game for Energy-Efficient Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks with Multiple Channels," Proc. of IEEE GLOBECOM 2011, pp. 1-6, 2011.
- [12] W. Wang, B. Kasiri, J. Cai, A.S Alfa, "Distributed Cooperative Multi-Channel Spectrum Sensing Based on Dynamic Coalitional Game," Proc. of IEEE GLOBECOM 2010, pp. 1-5, 2010.
- [13] E. Hossain, D. Niyato, and Z. Han, Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks, Cambridge University Press, 2009.
- [14] F.F. Digham, M.S. Alouini, and M.K. Simon, "On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels," IEEE Transactions on Communications, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, 2007.
- [15] S. Tisue, U. Wilensky, "NetLogo: Design and Implementation of a Multi-Agent Modeling Environment," Proc. of Agent, pp. 7-9, 2004.

この研究は、平成26年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成27～29年度に実施されたものです。