

TV ホワイトスペースを利用したコグニティブメッシュネットワークにおける無線リソース割当て及び経路最適化手法の検討

高相一輝^{†1} 長谷川幹雄^{†1†2} 石津健太郎^{†2} 村上誉^{†2} 原田博司^{†2}

無線通信に用いられる周波数帯域が逼迫しており、時間的・空間的に空いている周波数帯域（ホワイトスペース）を利用する技術の実用化が検討されている。特に、地上デジタルテレビジョン放送の開始に伴い、TV ホワイトスペース周波数帯域の無線ブロードバンドへの利用が期待されている。米国 FCC や英国 Ofcom において、TV ホワイトスペースを利用するためには、一次利用者に対し干渉が発生しないようにデータベースにおける利用周波数管理システムが必要とされている。日本においても NICT においても実証実験が行われ、TV ホワイトスペースを用いて一次利用者に影響を与えずに自動的に周波数を選択し通信を行うことが可能であることが示された。TV ホワイトスペースを用いて構築されるメッシュネットワークにおいて特定のリンクに対するトラフィックの集中や、割り当てられた二次利用者同士の干渉により通信のパフォーマンスが低下する問題が発生することが考えられる。本稿は実証実験において用いられたシステムを基に、経路及び無線リソース割り当てを組合せ最適化問題として定式化を行う。この組合せ最適化問題に対し厳密解法を適用することで厳密解が求めることが可能であることを示した。

A Study on Optimization of Routing and Radio Resource Allocation in Cognitive Mesh Networks Using TV White Space

KAZUKI TAKASO^{†1} MIKIO HASEGAWA^{†1†2}
KENTARO ISHIZU^{†2} HOMARE MURAKAMI^{†2} HIROSHI HARADA^{†2}

There is a risk of the frequency band used in wireless communication is depleted. Commercialization of technology use (white space) has been studied vacant spectrum band in temporally or spatially. With the start of digital terrestrial television broadcasting, the use of TV white spaces to wireless broadband is expected. In FCC and Ofcom, to use TV white space, it is necessary to use database system to manage unused spectrum band. Experiment is carried out in NICT, it is indicated that the communication frequency is selected automatically without affecting the next one user using the TV white space.. It is considered that the problem of communication performance is reduced due to concentration traffic for a particular link, or interference between the secondary user assigned in the TV white space mesh networks. Based the experiment system, we formulate in combinatorial optimization problems. And it can optimize the radio resource and routing in rigorous solution.

1. はじめに

無線通信技術の進歩により、3G や WiMAX, Wi-Fi をはじめ、様々な無線アクセスネットワーク（Radio access network）が実用化されている。また、スマートフォンなどの移動体無線通信端末の普及に伴い、通信量の爆発的な増加が懸念されている。その結果、無線通信に利用する周波数資源の枯渇が問題となっている。このような問題を打開する技術として、コグニティブ無線技術 1)-3) の適用が期待されている。コグニティブ無線技術は、周囲の無線環境を認識し、その結果に応じて周波数資源の効率的な割り当てや選択を行う技術である。

周波数共用型のコグニティブ無線では、周囲の環境を認識し、一次利用者に対して割り当てられている周波数帯に影響を与えず、二次利用者が時間的・空間的に空いている周波数（ホワイトスペース）を無線通信に利用する技術の実現を目的としている。特にホワイトスペースを無線通信に利用

する際に対象とする周波数帯として、UHF 帯地上デジタルテレビジョン放送用の周波数帯（TV ホワイトスペース）が注目されている。TV ホワイトスペースの利用技術については、IEEE において技術仕様の国際標準化が進められており、一部はすでに完了し、一部地域において実用化されている 4)。

ホワイトスペースを二次利用者が利用するためには、一次利用者に対して電波干渉が発生しないことが大前提となるため、干渉を防ぐための技術が必要となる。TV ホワイトスペースの帯域は、無線 LAN などの数 GHz 帯を利用した場合と比較して周波数が低く、電波が回折しやすい特性を持つ。そのため、アメリカの FCC やイギリスの Ofcom においては、一次利用者の周波数利用情報を提供するホワイトスペースのデータベースを利用し、二次利用者が利用可能な周波数帯を管理し干渉を回避する方法が採用されている。日本国内においては独立行政法人 情報通信研究機構（NICT）により、一次利用者情報を管理する TV ホワイトスペースのデータベースと、この帯域を利用する基地局及び端末を用い、一次利用者に影響を与えない周波数の自動選択をするシステムの実証実験が行われている 5)。

^{†1} 東京理科大学大学院 工学研究科 電気工学専攻
Tokyo University of Science

^{†2} 独立行政法人 情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク研究所
スマートワイヤレス研究室

National Institute of Information and Communication Technology

文献 5) のシステムでは、基地局が TV ホワイトスペースを利用したメッシュネットワークを構築し、メッシュマネージャによって経路決定及び周波数帯割り当てが行われる。このようなシステムにおいては、経路及び周波数割り当てを周囲状況に応じて最適化を行うことで、より効率的な周波数利用が可能となる。本研究では、文献 5) の TV ホワイトスペースを利用したメッシュネットワークシステムにおいて、無線リソース及び経路を最適化する組合せ最適化問題を定式化し、最適化アルゴリズムを適用する手法を検討する。

2. コグニティブ無線技術

コグニティブ無線技術 1) とは、周辺の無線環境を認識し、無線資源、ネットワーク資源を最も効率よく利用することによって、周波数の有効利用及び、通信品質の向上を図るものである 2)。利用可能な周波数帯域が逼迫している問題を解決するために有効な手段と考えられており、IEEE においても標準化が進められている 6)-10)。文献 3) において、ヘテロジーニアス型とスペクトラムシェアリング型の 2 種類のコグニティブ無線システムが定義されている。

ヘテロジーニアス型コグニティブ無線とは、端末が既存の通信システムを認識し、その結果に基づき利用者が必要とする帯域を提供する RAN を選択するシステムである。ある RAN のトラフィック負荷が高くなることによって、通信品質が低下した場合には、最適な RAN 選択させることを可能にする。

スペクトラムシェアリング型コグニティブ無線は、時間的・空間的に利用されていない周波数帯域を認識し、その周波数から帯域を利用することで周波数利用効率を改善するシステムである。既に、無線通信に有効であるとされる 6GHz 以下の周波数帯域は既存のシステムに割り当てられており、周波数帯域を新規のシステムに割り当てることは困難である。そこで、ホワイトスペースを利用するスペクトラムシェアリング型コグニティブ無線が重要となっている。

時間的、または空間的に一次利用者が使用していない周波数帯域を利用するため、二次利用者は一次利用者に干渉などの影響が発生しないように利用することが利用のための条件となる。そのため、スペクトラムシェアリング型コグニティブ無線を利用するためには、周囲の利用状況を正確に認識するための技術が必要である。現在、スペクトラムシェアリング型コグニティブ無線において、地上デジタルテレビジョン放送周波数帯域 (TV ホワイトスペース) が注目されている。



図 1 テレビジョン放送周波数帯域

周波数帯の効率的な利用のために、地上デジタルテレビジョン放送が開始され、日本においても 2012 年 3 月 31 日にアナログテレビジョン放送が完全停波された。地上波デジタルテレビジョン放送は図 1 に示すように、UHF 帯の 470MHz~710MHz の 13~52ch (1ch あたり 6MHz) で運用しており、地上デジタル放送に移行することでより効率的な周波数利用が可能となった。地上波デジタルテレビジョン放送に用いられる周波数帯のうち、実際に一次利用者に利用されるのは 12ch 程度であり、利用されていないホワイトスペースが存在する。また、一次利用者が利用する ch は場所や時間によって異なる。TV ホワイトスペースを二次利用者が無線通信に利用するにあたり、一次利用者に対し干渉が発生しないように慎重に利用する ch 選択を行う必要がある。

TV ホワイトスペースを利用する方式は既に IEEE において国際標準化が進められている。IEEE802.22 は、無線地域ネットワークを実現するための MAC 層・物理層を含む無線通信方式の標準仕様を策定し、低人口密度エリアに対するブロードバンドアクセスに用いられる。IEEE802.11af は、TV ホワイトスペース周波数帯を利用およ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 802.11 の物理層及び MAC 層の改正を行っており、無線 LAN 規格の TV ホワイトスペース帯域での運用が期待される。IEEE802.15.4m は、センサネットワークなどの近距離無線に関する規格である IEEE802.15.4 システムを、TV ホワイトスペース周波数帯で運用できるようにするための物理層・MAC 層に関する改定を行う。

一次利用者に対する干渉対策として、FCC はデータベースを利用した管理を行うこととしている。TV ホワイトスペース二次利用者は通信端末がデータベースにアクセスし登録を行うことによって、一次利用者及び必要免許のワイヤレスマイクの情報を取得することで免許不要で利用することが可能となる。米国においては 2012 年 1 月からノースカロライナ州の一部地域において、実際に TV ホワイトスペースを利用したサービスの運用が開始されている。英国における通信、放送等の規律・監督を行う機関である Ofcom においても同様に、一次利用者に対する干渉対策としてデータベースを利用する。二次利用者は位置情報を持ち、データベースへアクセスすることで、TV ホワイトスペースの利用のために周囲のセンシングを行う必要がない。英国

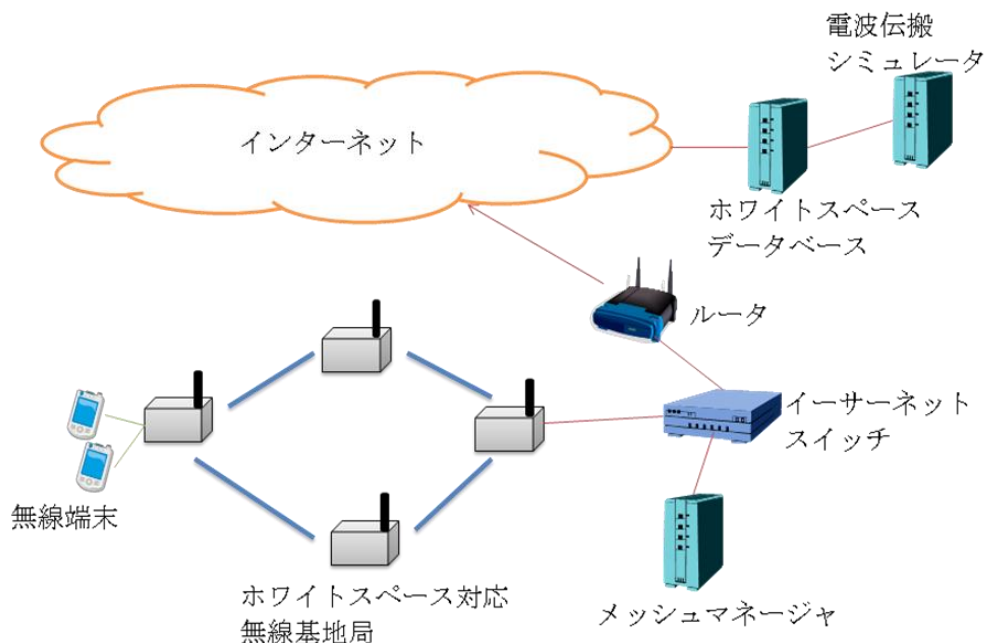


図2 TV ホワイトスペースを利用するメッシュネットワーク 5)

においても主な利用方法としてブロードバンド対策が考えられており、農村地域でのブロードバンド提供などが検討されている。TV ホワイトスペースを利用した、要免許のワイヤレスマイクについては英国においても既に運用が開始されている。

一方、日本における TV ホワイトスペースの活用方法は、地域コミュニティ向け情報や観光情報、また防災情報などを提供するエリア放送型システム、ワイヤレスマイク、センサネットワーク、災害時向け通信システムなどが挙げられている。米国や英国と比較して特定地域における一方向サービスが主流となっている。日本は国土が狭く、都市部における電波密度が極めて高い特徴があり、米国や英国におけるデータベースにおけるホワイトスペースを利用可能であるかを判定する境界線を計算する計算方式が実際の電波伝搬に対応して日本においても適切であるかは評価されていない。

文献 5)において、TV ホワイトスペースの二次利用に必要なデータベースと、メッシュネットワーク技術を応用してそのデータベースと連携した通信インフラが構築可能な無線機が提案されており、その試作システムを用いた動作試験について述べられている。本稿では、この文献 5)のシステムに基づいた無線資源利用効率の最適化アルゴリズムについて検討を行う。

3. ホワイトスペースデータベースを用いた実証実験システム[文献 5)]

文献 5)で開発された、TV ホワイトスペースを利用する無線ネットワークシステムを図 2 に示す。ホワイトスペー

スデータベース及び無線基地局、メッシュマネージャによって構成される 11)。ホワイトスペースデータベースは複数の利用可能チャンネル計算方式を持つ。FCC が公表している計算方式規格の他に、NICT が不足しているアルゴリズムを提案し加えている。無線基地局からの利用可能チャンネル問い合わせに対し、IETF Protocol Access White Space Database(PAWS)で議論されているドラフト仕様に準拠したプロトコルを用いて応答する。それにより、様々な端末から同一のデータベースに対し問い合わせを行うことが可能となる。

文献 5)で開発された無線基地局は、無線システムを 3 種持った設計である。無線システム 1 として、IEEE802.11a/b/g/n のデータ通信デバイスを持ち、無線基地局が無線 LAN アクセスポイントとして動作する際に利用される。無線システム 2 及び 3 は表 1 に示す仕様を持つ再構築可能デバイスで構成されており、この再構築可能デバイスによってメッシュネットワークを構築する。

表 1 無線基地局の再構築可能デバイスの仕様

周波数	470-770MHz/2.4GHz
通信帯域幅	5/10/20MHz
通信ビットレート	最大 54Mbps
送信出力	20dBm
物理層変調	OFDM
サブキャリア変調	BPSK/QPSK/16QAM/64QAM
MAC 方式	IEEE 802.11a 準拠
アンテナ利得	UHF 帯 : 0dBi 2.4GHz 帯:2dBi

メッシュマネージャは無線基地局によって構成されたメッシュネットワークの状態監視と制御を行う。一定時間ごとに無線基地局が作成した現在のルーティングテーブル、と ETX 値を取得する。また、データベースへ問い合わせして利用可能チャンネル一覧を取得する。利用可能チャンネルから各無線リンクで用いるチャンネルを指示することができる。また、メッシュマネージャは特定の無線リンクを使用禁止に設定することや、使用周波数帯の変更が可能である。

文献5)の実証実験は総務省から無線局免許が与えられた場所において実施され、470~710MHz の地上デジタルテレビジョン放送帯の3チャンネルにおいて最大送信電力 10mW の範囲で通信が行われた。この実証実験において、地上波テレビジョン放送周波数帯において一次利用者に影響を与えない周波数を自動的に選択し、無線通信を行うことが可能であることが示された。文献5)では、経路は OLSR を用いて自動的に作成された。しかし、ネットワークサイズの増加に伴い特定のリンクに対しトラフィックが集中し、ボトルネックとなることで結果としてメッシュネットワークにおける通信のパフォーマンスが低下することが考えられる。また、割り当てを行うリンクが増加するにつれて、二次利用者に対し割り当てたチャンネル同士で干渉が発生してしまう問題が生じることが考えられる。そのため、それらの問題を解決し、より効率的な周波数利用を行うために、各基地局のトラフィック量を考慮し適切な経路を作成するアルゴリズムと、その経路のそれぞれに対し干渉が発生しないように適切なチャンネル割り当てを行う必要がある。そこで本稿では、経路とホワイトスペースのチャンネル割り当てを、最適化問題として定式化し、これを最適化アルゴリズムによって解く方式について検討する。

4. TV ホワイトスペースを用いる無線メッシュネットワークにおける経路と無線リソース割り当ての最適化問題定式化

文献5)のホワイトスペースデータベースを用いたメッシュネットワークに基づき、経路及びチャンネル割り当てを最適化する、組合せ最適化問題として定式化を行う。構成されるメッシュネットワーク内において、各基地局はインターネットに接続されているゲートウェイ (GW) 基地局への経路を作成する。本稿では、各基地局が GW に対し最適な経路を選択し、接続された各基地局間のリンクに最も効率の高いチャンネル割り当てを行うことによって各基地局に発生するトラフィックの送信にかかる時間を最小化する最適化問題を定式化する。

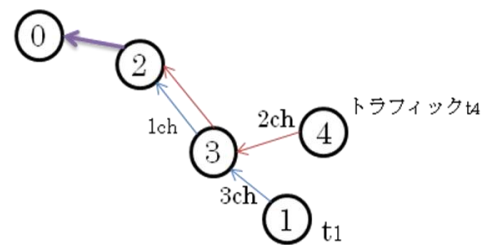


図3 メッシュネットワーク接続構成の例

パラメータとして、ネットワークを構成している基地局数を N 、基地局 k の持つトラフィック量を t_k 、TV ホワイトスペースの利用可能チャンネル数 C 、利用するチャンネル l における TV ホワイトスペース無線システムの通信容量を c_l とする。TV ホワイトスペース及び 2.4GHz 帯無線 LAN を想定するため、 c_l は 2 種類の通信容量を持つこととする。任意の 2 つの基地局 i, j における接続可否情報として a_{ij} を定義する。 ij が接続可能である場合 $a_{ij} = 1$ 、接続不可であるとき $a_{ij} = 0$ とする。また、自身に対してのリンクは持たない

ので、 $a_{ii} = 0$ である。最適化問題として求める状態変数として、送信元基地局 k が持つ経路情報およびチャンネル利用情報 x_{ijkl} を定義する。 k が ij 間を経路として利用し、その ij 間にチャンネル l を利用した場合 $x_{ijkl} = 1$ 、それ以外の場合において $x_{ijkl} = 0$ とする。たとえば、図3において、

$$x_{1313} = x_{4342} = x_{3211} = x_{3241} = 1 \text{ である。}$$

この x_{ijkl} の制約条件として、任意の 2 基地局 ij において、 x_{ijkl} は接続可能な 2 基地局間へのみリンクを持つ必要がある。従って、

$$x_{ijkl} \leq a_{ij}, \quad i, j, k \in N, l \in C, \quad (1)$$

となる。また、それぞれの基地局間のリンクに対し割り当てられるチャンネルは 1 つであるとし、

$$\sum_{l=1}^C x_{ijkl} \leq 1, \quad i, j, k \in N, \quad (2)$$

を満たさなければならない。

ネットワークを構成する任意の基地局 k は GW に対し必ず 1 本の経路を持たなければならない。まず、すべての k において、 k から経路を 1 つ以上持つ必要があるので、

$$\sum_j \sum_{l=1}^C x_{kjl} = 1, \quad k \in N, \quad (3)$$

を満たす必要がある。同様に、すべての送信元基地局 k が

GW 基地局に経路を持つので、

$$\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^C x_{i0kl} = 1 \quad k \in N, \quad (4)$$

を満たさなければならないただし、本稿では、0 を GW 基地局とする。次に、各経路は全て 1 本で繋がっていないといけないので、経路の入力を受けた GW 以外の基地局は入力の本数に等しい経路の出力が必要となる。よって以下の 2 条件を満たす必要がある。

$$\sum_{l=1}^C x_{ijkl} + \sum_{m=1}^N \sum_{l_2=1}^C x_{jmk_{l_2}} \neq 1,$$

$$\sum_{l=1}^C x_{ijkl} + \sum_{m=1}^N \sum_{l_2=1}^C x_{jmk_{l_2}} \leq 2,$$

$$i, j, k \in N, i \neq j, j \neq k, \quad (5),(6)$$

以上の制約条件の元で、各基地局のトラフィック t_k を最短の時間で送信する x_{ijkl} の状態を求めていく。

次に、目的関数の定式化を行う。ここでは、 ij 間においてチャンネル l を割り当てて通信を行われている状況について考える。本システムは、CSMA/CA を用いて衝突回避を行うことを基本としているため、複数のトラフィックが同時に同一のリンクを利用した場合は衝突が発生し、また、同一チャンネルを複数基地局が利用し、干渉が発生した場合においてもスループットが低下してしまう要因となる。ここでは、受信側基地局 j が、 ij 間で利用しているチャンネル l と同一チャンネルの電波を受信できる状況である場合において、干渉が発生するとし、受信基地局 j がチャンネル l を用いて通信を行なっている場合において、上記の衝突および干渉によるスループットの低下を表す係数を I_{jl} とする。

I_{jl} を x_{ijkl} を用いて書くと、

$$I_{jl} = \sum_{i=1}^N \sum_{m=0}^N \sum_{k=1}^C x_{imkl} \cdot a_{im}, \quad (7)$$

のように定義できる。 I_{jl} は受信可能範囲内に同一チャンネルを用いて通信を行った回数に等しい。ここで、 ij 間における、チャンネル l を用いた場合のスループット T_{jl} は、このチャンネルを用いて通信するシステムの通信容量 c_l を用いて

$$T_{jl} = \frac{c_l}{I_{jl}}, \quad (8)$$

と表すことができる。この T_{jl} を用いて基地局 k が持つトラフィック量 t_k の送信に必要な時間を表現する。送信元基地局 k が ij 間においてチャンネル l を用いて送信したときの送信時間 τ_{jkl} は

$$\tau_{jkl} = \frac{t_k}{T_{jl}}, \quad (9)$$

で示される。

ネットワーク内に存在するすべての経路の中で最も送信時間が大きいものを最小化したい。以上から、求める目的関数は

$$\begin{aligned} f(x) &= \max_{j,k,l} \{ \tau_{jkl} \} \\ &= \max_{j,k,l} \left\{ \frac{1}{c_l} \cdot t_k \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{m=0}^N \sum_{k=1}^N (x_{imkl} \cdot a_{im}) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

以上の制約条件と目的関数より、最適化問題を以下のように定義することができる。

$$\text{minimize}_x \left[\max_{j,k,l} \left\{ \frac{1}{c_l} \cdot t_k \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{m=0}^N \sum_{k=1}^N (x_{imkl} \cdot a_{im}) \right\} \right]$$

subject to

$$x_{ijkl} \leq a_{ij},$$

$$\sum_{l=1}^C x_{ijkl} \leq 1,$$

$$\sum_j \sum_{l=1}^C x_{kjkl} = 1,$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^C x_{i0kl} = 1,$$

$$\sum_{l=1}^C x_{ijkl} + \sum_{m=1}^N \sum_{l_2=1}^C x_{jmk_{l_2}} \neq 1, \quad i \neq j, j \neq k,$$

$$\sum_{l=1}^C x_{ijkl} + \sum_{m=1}^N \sum_{l_2=1}^C x_{jmk_{l_2}} \leq 2, \quad i \neq j, j \neq k,$$

where

$$x_{ijkl}, a_{ij} = \{0,1\}.$$

これは、目的関数を最小化する x_{ijkl} を求める組合せ最適化問題となっている。様々な組合せ最適化問題の解法が存在するが、本稿では、branch-and-cut アルゴリズム [12] を用いて厳密解を求めた。

ネットワークを構成する端末数 $N=6$ 、チャンネル数として 2.4GHz 帯無線 LAN を 2 チャンネル、TV ホワイトスペース 3 チャンネル、2.4GHz 帯通信容量 c_l として、IEEE802.11g の最大通信速度である 54Mbps、TV ホワイトスペース帯の

通信容量 c_2 として、ここでは 1.5Mbps とした。また、各基地局が持つトラフィック量として 1GB 及び 100MB のいずれかを各基地局が持ち、それぞれが各リンクを送信終了までにかかる時間の中で最も大きいものを最小化する。

上記の経路及び周波数割り当て最適化問題とパラメータを用いて解を求めることにより、解として $f(x)$ の最小値 $f(x)=38.89(s)$ を得た。また、同様のトポロジーにおいて TV ホワイトスペース周波数帯を利用せず、2.4GHz 帯 2ch のみを用いた場合、 $f(x)=40.74(s)$ を得た。今回の定式化および最適化アルゴリズムを文献 5) におけるメッシュマネージャにおいて、各基地局が利用する経路の作成および利用チャンネル割り当ての最適化に利用することで、より効率的な周波数利用効率が期待できる。

5. まとめ

本稿では、文献 5) の TV ホワイトスペースを利用したメッシュネットワークシステムを対象とした、経路及び利用可能なチャンネル割り当ての最適化手法を検討した。経路及び TV ホワイトスペースのチャンネル割り当て問題を定式化し、この組合せ最適化問題に対して厳密解法を適用することで、厳密解を求めることが可能であることを示した。

本稿で適用した厳密解法は、大規模なネットワークにおいては、結果を得るために膨大な時間が必要である。よって、大規模なネットワークシステムにおいても短時間に良い周波数割り当て及び経路の近似解を求めるアルゴリズムの適用を今後の課題とする。また、各基地局に対し接続される端末の接続先や、それらが利用するチャンネルも考慮した最適化も今後の課題である。様々なネットワークトポロジーにおいてコグニティブ無線ネットワーク最適化の有効性の評価を行っていく。

参考文献

- 1) J.Mitora,III, "Cognitive Radio for flexible mobile multimedia communications," MoMuC'99,pp.3-10, Nov.1999.
- 2) H.Harada, "Software defined radio prototype toward cognitive radio communication systems," Proc.IEEE DySPAN, vol.1, pp.539-547, Nov.2005.
- 3) H. Harada, H. Murakami, K. Ishizu, S. Filin, G. Miyamoto, H.N.Tran, Y.D.Alemseged, and C. Sun, "Research and development on heterogeneous type and spectrum sharing type cognitive radio system," Proc.IEEE CROWNCOM 2009.
- 4) 原田博司,村上誉, Yohannes D. Alemseged, Shen 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関する検討状況," 電子情報通信学会 ソフトウェア無線研究会, Vol.111, No.152, pp.25-32,Mar.2012.
- 5) 石津健太郎, 村上 誉, 藍 洲, チャン ハグエン, 原田博司, "技術展示)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," 電子情報通信学会 技術報告, vol. 112, no. 55, pp. 23-30, 2012 年 5 月.
- 6) IEEE P802.11af, "Wireless LAN in the TV white space," http://www.ieee802.org/11/Reports/tgaf_update.htm

7) IEEE Std 802.16h-2010, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Improved Coexistence Mechanisms for License-Exempt Operation," July 2010.

8) IEEE Std 802.22.1-2010, "IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 22.1: Standard to Enhance Harmful Interference Protection for Low-Power Licensed Devices Operating in TV Broadcast Bands," Nov. 2010.

9) IEEE Std 1900.4-2009, "IEEE Standard for Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks," Feb. 2009.

10) IEEE Std 1900.4a-2011, "IEEE Standard for Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks - Amendment: Architecture and Interfaces for Dynamic Spectrum Access Networks in White Space Frequency Bands," July 2011.

11) <http://www.nict.go.jp/press/2012/05/24-1.html#4>

12) A. Lucena and J. E. Beasley, "Branch and cut algorithms," in Advanced in Linear and Integer Programming, J. E. Beasley, Ed. Oxford University Press, 1996.