

干渉分布に基づく事前空き周波数割り当て法

チャルーンスックブンパシット† 安達 宏一†

† 電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
E-mail: †{bounpasith, adachi}@awcc.uec.ac.jp

あらまし 近年、無線通信トラフィックの増加に伴い周波数資源枯渇問題が顕著になっており、周波数資源の有効活用が課題となっている。この課題を解決するための技術として周波数共用技術がある。周波数共用技術は、一次利用者 (PU) の通信品質を時間的かつ空間的に保護しつつ、二次利用者 (SU) にも PU と同一の周波数帯を割り当てる。周波数共用技術は、SU の移動先で瞬時的に PU の通信の有無を判断するために SU が一時的に共用を停止する必要がある。そのため、SU は継続的に通信を行うことが困難である。従来研究では、スペクトラムデータベース (SD) に蓄積された受信信号強度の情報を使用し、空き周波数を事前に探知するアルゴリズムが提案された。しかし、従来研究の手法は、干渉発生の原因となる、SD に蓄積された情報と実際の情報とのシャドウイング誤差や、フェージングの変動を考慮していない。そのため、SU は PU への与干渉確率の高い周波数を利用してしまいう問題がある。そこで、本研究では、SD を用いて事前に空き周波数を探知し、モデル化した干渉分布に基づいて周波数を割り当てるアルゴリズムを提案する。計算機シミュレーションにより、提案手法は従来手法と比較して周波数共用確率が 50% 程度低下するものの、SU から PU への与干渉確率を 90% 以上軽減可能であることを示す。

キーワード 周波数共用, 干渉分布, 空き周波数探知, 周波数割り当て

Prior Frequency Band Allocation for Spectrum Sharing based on Interference Distribution

Bounpasith CHALEUNSOUK† and Koichi ADACHI†

† Advanced Wireless & Communications Research Center, The University of Electro-Communications
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan
E-mail: †{bounpasith, adachi}@awcc.uec.ac.jp

Abstract Spectrum sharing allows multiple users, i.e., a primary user (PU) to a secondary user (SU), to share the same frequency band while protecting the communication quality of PU temporally and spatially. In the conventional spectrum sharing, SU has to temporarily stop the sharing to determine the presence or absence of PU communication at the moving destination. Therefore, it is difficult for SU to use frequency continuously. In conventional research, an algorithm was proposed to detect vacant frequency in advance using the received signal strength information stored in the spectrum database (SD). However, the conventional research does not consider the shadowing error, which is between the information stored in the SD and the practical information, and the fluctuation of fading. Thus, SU may use the frequency with a high probability to interfere with the PU. Hence, in this study, we propose an algorithm that detects vacant frequencies using SD and allocates frequencies based on the modeled interference distribution in advance. Simulation result shows that the proposed method can reduce the probability of interference from SU to PU by more than 90% compared to the conventional method.

Key words Spectrum Sharing, Interference Distribution, Vacant Frequency, Spectrum Allocation

1. はじめに

近年、無線通信トラフィックの増加に伴い周波数資源枯渇問題が顕著になっており、周波数資源の有効活用が課題となっている [1]. この課題を解決するための技術のひとつに周波数共用技術がある [2] [3]. 周波数共用技術は、既存ユーザである一次利用者 (PU: Primary User) の通信品質の保護が絶対条件となっている. 周波数を共用する側である二次利用者 (SU: Secondary User) は、PU への干渉を与えないようにしつつ、PU と同一の周波数帯を共用する. 既存研究では、SU が PU の通信有無を誤りなく検出する方法 [4] や、PU と SU の間に空間的に一定の間隔を取ることで PU の通信を保護する方法が検討されている. 前者では周波数利用効率の向上が期待できるが、実際の伝搬環境には不規則に変動するシャドウイングやフェージングの影響を受けるため、PU の通信有無の確実な検知が極めて困難である. 後者では、SU の通信が PU の通信品質に影響を与える地理的な位置を PU に対する保護エリアと定義する. PU の通信保護のために設置された保護エリア内では、PU の通信有無に関係なく、SU の周波数共用が禁止されている. しかしながら、無線伝搬路のもつ不確定性を考慮するために保護エリアを広く設計する必要があるため、周波数共用可能なエリアが狭くなる問題が存在する. この保護エリアの再設計方法に関しては、機械学習を用いた保護エリアの設計方法 [6] や回路設計情報の適用による設計方法 [7] などが検討されている.

また、周波数共有法では、SU が PU へ干渉を与えないようにするために、周波数共用を行う SU は常に空き周波数リソースの監視を行う必要がある. しかしながら、SU が移動する場合には、移動先での周波数リソースの利用状況を逐次検知することができない. それにより、SU は周波数共用を一時的に中断して、移動先で空き周波数リソースを把握し、再度利用する共用周波数を変更する必要がある. そのため、SU が継続的な通信を行うことが困難となる.

そこで、SU が移動先の空き周波数リソースを事前に把握することが可能であれば、前述した課題を解決できると考えられる. 周波数共用技術における一つのソリューションとして Spectrum Database (SD) がある. 受信電力値を決定する主要素である距離減衰、シャドウイング、マルチパスフェージングのうち、前者 2 つは PU および SU 間に存在する構造物や距離の静的な物体に影響されるものである. そのため、無線通信を行った際に得られた受信電力の情報を送受信位置と対応づけた情報が蓄積されている SD を活用することで SU の移動先での空き周波数リソースを事前に探知することが期待できる.

文献 [8] では、PU からの受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) に代表されるチャンネル情報が蓄積されている SD、および通信エリアに分散的に配置されたセンサから得られる情報を用いて、SU の移動先の空き周波数帯を事前に探知し周波数割り当てを行うアルゴリズムが提案されている. 当アルゴリズムは、設定した探知時間ごとに空き周波数リソースの探知を行っている. しかし、探知時間内に一部でも SD に蓄積された RSSI が設定した閾値を超えた場合は、その時間帯において周波数は共用不可能と判断する. そのため、SU が周波数を共用可能な確率が低下してしまう. また、干渉の発生の原因である次の二つの問題を考慮していない. 一つ目は、

SD に蓄積されたシャドウイングの値と実際に SU の移動先でのシャドウイング値が異なる場合 (以降はシャドウイング誤差と呼ぶ) が存在する. 二つ目は、マルチパスフェージングによる受信信号電力への瞬時的な影響を考慮した追従は困難であるため、SD に蓄積可能な情報は距離減衰とシャドウイングのみとなる. そのため、空き周波数の探知を行うために SD に蓄積された RSSI と SU から PU への実際の干渉電力に誤差が生じてしまい、SU から PU へ干渉が発生する可能性がある. そのため、SU から PU への干渉が発生する可能性が高くなり、PU の通信品質の保護が困難となる.

そこで、本研究では、SU の周波数共用確率の低減を抑えつつ SU から PU への干渉確率を軽減する目的で、シャドウイングの誤差とフェージングの変動を考慮した事前空き周波数割り当て法を提案する. 提案手法では、干渉の原因となるシャドウイング誤差及びフェージングの変動によるそれぞれの分布 (干渉分布と呼ぶ) を事前にモデル化する. そして、干渉分布を用いて各周波数帯に対する干渉発生確率を推定することで、各周波数帯に対する干渉がどれだけ発生する可能性があるのかを推定することを図る. そのため、SU から PU への与干渉確率が低い周波数を SU に割り当てることができると期待できる.

2. システムモデル

本稿では、図 1 に示すように通信エリアが $x_{\text{mesh}} \times x_{\text{mesh}}$ [m²] の排他的なメッシュに分割されているものとする. さらに、通信エリア内には、 N_p 個の固定配置された PU と、 N_s 個の移動可能な SU が存在する環境と仮定した. 以降は無線環境の設定、PU 及び SU の設定と伝搬路モデルについて記述する.

2.1 無線環境の設定

図 1 に示すように、各メッシュに 1 つの電波センサーが配置されているものとする. なお電波センサーは電波環境を理想的に観測できるものとする. 本稿では、全ての電波センサーは、SD と通信を行うと仮定し、各電波センサーで観測されたチャンネル情報は SD に収集され蓄積される. この蓄積情報を統計処理することにより、各メッシュにおける平均受信信号電力を算出する. 本稿では、統計処理後の平均受信信号電力に関する情報が SD に格納されているものと仮定する. その状態から、電波環境マップ (REM: Radio Environment Map) を構築することが可能となる. また、全センサーはどの PU から信号を受信したのか識別が可能であるものとし、SD には各 PU に対する REM 情報が保持されているものとする.

2.2 PU および SU の設定

PU が使用する周波数帯を $(f_1, f_2, \dots, f_{N_p})$ と表記する. PU の保護エリアは特定閾値 $P_{i,\text{th}}$ [dBm] (以下干渉閾値と呼ぶ) により設計される. SU から PU への RSSI ($P_{\text{SU} \rightarrow \text{PU}}$) が干渉閾値を上回った場合、PU に干渉を与えるものとする [9]. つまり $P_{\text{SU} \rightarrow \text{PU}}$ が干渉閾値を下回っている限り、PU の通信が保護できているということになる. また、SU への周波数割り当ては割り当て閾値 $P_{a,\text{th}}$ [dBm] に基づくものとする. PU の通信保護可能な仮定の下で、割り当て閾値 $P_{a,\text{th}}$ に基づいて SU に PU と同じ周波数帯が割り当ててを可能とする. また、チャンネル状態の相互関係により、 $P_{\text{SU} \rightarrow \text{PU}}$ は PU から SU への $P_{\text{PU} \rightarrow \text{SU}}$ とみなすことが可能となる. そのため、 $P_{\text{SU} \rightarrow \text{PU}}$ は PU から SU が配置されているメッシュへの受信信号強度とし

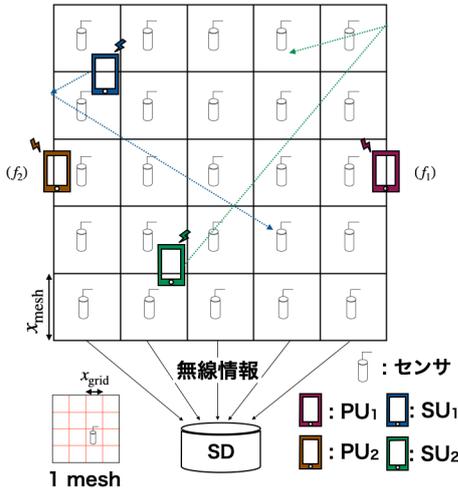


図1 無線環境設定の状況

て計算される。

全てのSUは通信エリア内で T_{move} [sec] の間、速度 v [km/h] で直進移動するものとする。各SUの移動開始地点と移動方向はランダムに決定され、エリア端に達した場合には移動方向を再びランダムに決定する。本稿では、SUの移動経路が理想的に把握できるものと仮定した。空き周波数リソース探知は予測時間 T_{alloc} [sec] 毎に行われ、時刻 $mT_{\text{alloc}} < t \leq (m+1)T_{\text{alloc}}$ (m は正の整数) の間に共用可能と判定した周波数帯をSUに割り当てる。この際、全てのSUに同じ周波数帯を割り当てるものとした。そのため、考慮すべきSUからPUへの干渉電力は、全SUの合成干渉となり、式(1)のように示される。

$$I = \sum_{i=0}^{N_s-1} P_{r_i} \quad (1)$$

ここで、 P_{r_i} は、SU $_i$ からPUへの受信電力の単位 [mW]。

2.3 伝搬路モデル

本稿では伝搬路モデルとして、伝搬距離に依存するパスロス及びシャドウイングとマルチパスフェージングを考慮する。受信信号電力は式(2)のように表される。

$$P_r [\text{dBm}] = P_{t_x} + G_{BS} + G_{UE} - P_L + P_S + P_F \quad (2)$$

ここで、 P_{t_x} はPUの送信電力 [dBm]、 G_{BS} は基地局アンテナ利得 [dBi]、 G_{UE} はユーザ端末アンテナ利得 [dBi] を表す。また、 P_L はパスロス [dBm]、 P_S シャドウイング [dBm]、 P_F はフェージング [dBm] を表している。

2.3.1 SDに蓄積されるRSSIモデル

SDに蓄積され統計処理が完了している受信信号強度の情報は以下の式のように示す。

$$P_{r_{SD}} [\text{dBm}] = P_{t_x} + G_{BS} + G_{UE} - P_{L_{SD}} + P_{S_{SD}}$$

$$P_{REM} = E[10^{P_{r_{SD}}/10}] \quad (3)$$

ここで、 $P_{L_{SD}}$ はメッシュ内の平均パスロス [dBm]、 $P_{S_{SD}}$ はメッシュ内の平均シャドウイング [dBm] を表す。

3. 提案手法

本節では、シャドウイングの誤差及びフェージングの変動に

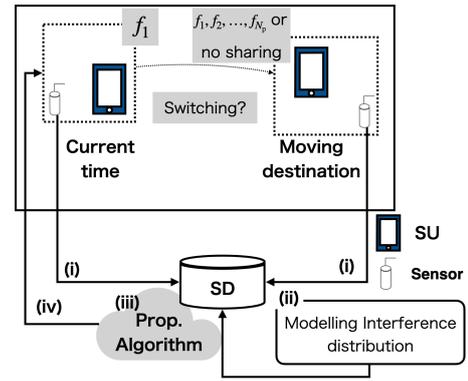


図2 事前空き周波数の割り当て法の概要図

よる干渉分布に基づく空き周波数割り当て法の概要と空き周波数の探知アルゴリズムに関して説明する。

3.1 事前周波数割り当て法の概要

図2にSDと干渉分布を用いてSUの利用可能周波数帯を事前探知しSUに周波数割り当てる提案手法の概要図を示す。事前探知法では、このSDの情報を活用する。図2に示すように、現在でSUが f_1 で共用している場合、SUは移動先で f_1 あるいは他の周波数 (f_2, f_3, \dots, f_{N_p}) が共用可能かどうか検出する必要がある。

図2の(i)では、各電波センサーからSDに情報を定期的に送信する処理が行われる。(ii)では、干渉発生の原因となるシャドウイングの誤差とフェージングの変動によるそれぞれの分布(干渉分布)を事前にモデル化する。モデル化した干渉分布を用いて、探知する周波数帯に対して干渉がどのぐらいの確率で発生するかを推定する。干渉分布のモデル化及び干渉推定に関しては次項で述べる。(iii)では、時刻 T_{alloc} 毎に探索アルゴリズムが実行される。探索アルゴリズムでは、電波センサーから得られるマルチパスフェージングの影響も受けた受信信号強度情報 $P_{SS} = \sum_{i=0}^{N_s-1} P_{r_i}$ (式(1)と同様で、再定義する)、およびSDに蓄積され統計処理が完了している受信信号強度情報 P_{REM} を用いる。探索アルゴリズムの詳細は次項で述べる。(iv)では、探索アルゴリズムにより得られた結果を基に、SUに利用可能な周波数を事前に割り当てる処理が行われる。探索アルゴリズムの結果によっては、SUは移動中に周波数切り替えを実行する。

3.2 干渉分布

3.2.1 干渉分布のモデル化

本検討では、このシャドウイングの誤差分布とフェージングの変動分布を事前にモデル化し、それぞれの分布を用いて干渉発生の確率を推定する。

- フェージングの変動分布作成：本検討では、文献[10]のレイリー分布に従うJakesのフェージングモデルを用いるため、到来方向または位相をランダムな値に基づいてレイリー分布に従うフェージングの変動が作成できる。つまり、時不変なフェージングの変動分布が作成可能となる。

- シャドウイングの誤差分布作成：本検討では空間相関を持つシャドウイングを用いるため、各グリッドの値は8近傍空間相関によりモデル化されたものとなる[11]。シャドウイング誤差を各メッシュ内の最大値をもつグリッドと最小値をもつグリッドの差と定義する。事前に全メッシュにおいてシャドウイング誤差を計算し、時不変なシャドウイング誤差分布を作成

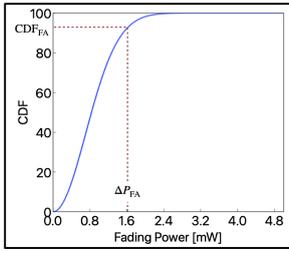


図3 フェージングの変動分布

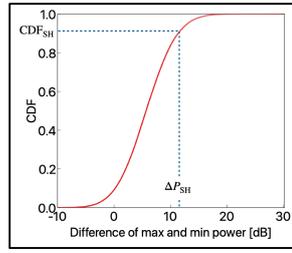


図4 シャドウイングの誤差分布

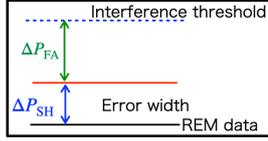


図5 電力情報から誤差幅の概略図

する。

3.2.2 干渉発生確率の推定

3.2.1節で記述した求め方に基づいてフェージング変動分布とシャドウイング誤差分布が求まる。それぞれを図3と図4に示す。ここで、 ΔP_{FA} はフェージングの影響を受けて干渉電力が変動したとしても、干渉を越えない電力変動幅、 CDF_{FA} はフェージングの変動による干渉発生しない確率、 ΔP_{SH} はシャドウイングの誤差影響を受けて干渉にならない誤差幅、 CDF_{SH} はシャドウイングの誤差幅による干渉発生しない確率を表す。

また、図5は本稿で干渉発生確率の推定に用いる概要図を示す。ここで、黒い直線はSDに蓄積されたRSSI (REM情報と呼ぶ)、赤い直線はシャドウイング誤差の影響によるREM情報より高くなった電力 (誤差情報と呼ぶ)、青い点線は干渉閾値を表す。図5に示すように、シャドウイング誤差の影響を受ける時に、REM情報より電力が大きくなり、さらに、フェージング変動の影響を受けると、干渉閾値以下になるもしくは閾値を上回る可能性があると考えられる。干渉閾値と等しくなる (SUがPUに干渉を与えない程度) 場合は、

$$P_{i,th} = P_{REM} + \Delta P_{FA} + \Delta P_{SH} \quad (4)$$

となる。本稿では、図3と図4の干渉分布と上記の式(4)を用いて各周波数帯に対する干渉の発生確率を推定する。推定の手順を以下に記述する。

- (1) まず、 CDF_{FA} を固定する。それによって、図3のフェージングの変動分布からフェージングの変動幅 ΔP_{FA} を求められる。
- (2) (1) で求めた ΔP_{FA} を用いて、干渉を与えない場合の式(4)からシャドウイング誤差幅 ΔP_{SH} を求めることができる。つまり、干渉発生の条件は、 ΔP_{SH} を上回るようなシャドウイングの誤差電力 P_{SH} が発生した場合となる。そのため、図4のシャドウイングの誤差分布に基づいて ΔP_{SH} より高いシャドウイング誤差の電力の確率 $p(P_{SH} > \Delta P_{SH}) = 100 - CDF_{SH}$ が干渉発生確率として扱うことが可能となる。

3.3 提案アルゴリズム

本項では、同一の周波数帯を継続的に使用できるようにするため、探知時間 T_{alloc} を細かくして N_{slot} の探知スロットに分

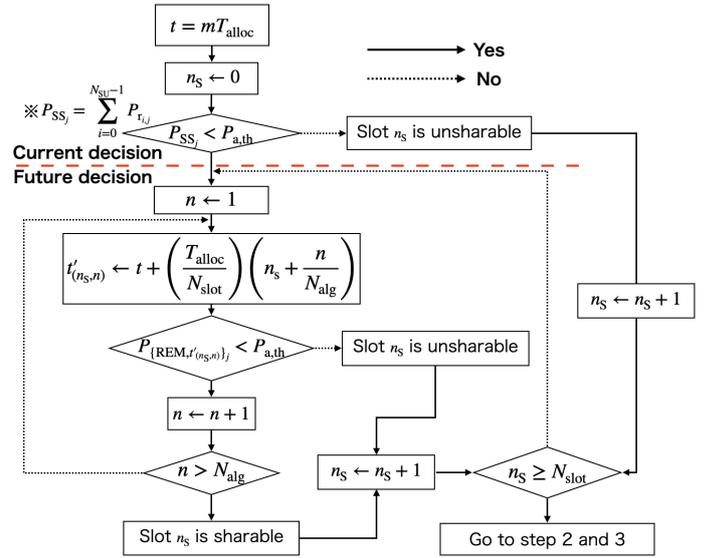


図6 空き周波数の探知アルゴリズム

割する。提案アルゴリズムは、空き周波数探知および周波数割り当てを T_{alloc} [sec] 毎に実行し、各周波数帯に対して、各探知スロットの空きを探知し、周波数切り替えの回数の計算し、推定した干渉発生確率を用いて割り当てる周波数を決定するという3つのステップに分ける。

Step 1. 空き周波数探知のアルゴリズム

図6に空き周波数を探知するアルゴリズムを示す。時刻 $t = mT_{alloc}$ でアルゴリズムの実行を開始する。SUの共用可能周波数帯域数はPUの数 N_P に依存する。PUの数だけ利用可能な帯域があり、現時刻の判定 (Current decision) 及び将来の判定 (Future decision) でどの周波数帯が周波数共用可能か判定を行う。最初のスロット ($n_S = 0$) では、現時刻の判定と将来の判定が行われ、それ以降のスロット ($n_S = 1, 2, \dots, N_{slot} - 1$) は将来の判定のみが行われる。ここで n_S はスロット番号を表す。全てのスロットの判定終了後、ステップ2に移行する。

- 現時刻の判定：この判定では、 PU_j ($j = 1, 2, \dots, N_P$) に対するSUからの受信信号強度 $P_{SS_j} = \sum_{i=0}^{N_S-1} P_{r_{i,j}}$ を用いて判定する。ここで、 $P_{r_{i,j}}$ は PU_j から SU_i への干渉電力を表す。 P_{SS_j} が割り当て閾値 $P_{a,th}$ を超える場合は最初のスロット ($n_S = 0$) が共用不可能と判断する。一方、 P_{SS_j} が割り当て閾値を超えない場合は最初のスロットは共用可能と判断する。そして、次のスロットの空きを判定する。
- 将来の判定：各スロット間を観測ポイント N_{alg} に分割し、各ポイントを n , $n \in N_{alg}$ (正の整数) として表す。各観測ポイント n において、REMの情報 $P_{\{REM, t'(n_S, n)\}_j}$ を参照し閾値判定を行う。ここで $t'(n_S, n)$ は、現時刻 t から離れた探知スロット n_S の観測ポイント n の時刻、 $P_{\{REM, t'(n_S, n)\}_j}$ は固定局 PU_j に対するSDに蓄積された平均受信信号電力を表す。全ての観測ポイントにおいてREM情報 $P_{\{REM, t'(n_S, n)\}_j}$ が閾値を下回った場合のみ、 n_S スロット目は共用可能と判断する。そうでなければ、スロット n_S は共用不可と判断する。

Step 2. 周波数切り替え回数の計算

周波数切り替えの回数は、ステップ1で求めた各周波数帯に対する探知スロットが共用可能なスロットと共用不可なスロット

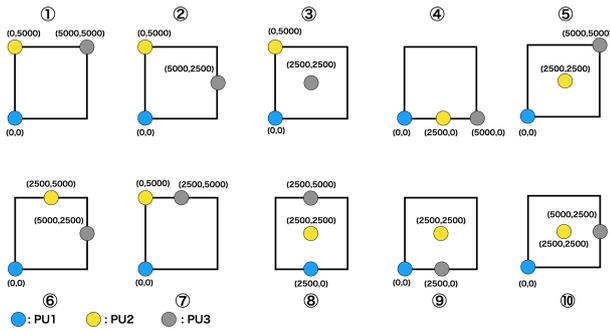


図7 PUの配置パターン

表1 シミュレーションパラメータ

シミュレーションエリア	5 × 5 [km ²]
メッシュサイズ x_{mesh}	20 [m]
搬送波周波数 f_c	2 [GHz]
基地局アンテナ高	30 [m]
移動局アンテナ高	1 [m]
建物高, 建物幅	(20, 40) [m]
道路幅, 道路角	20 [m], 90°
シャドウイング偏差	6 [dB]
素波数	128
試行回数	1000

トから計算する. 時刻 $t = mT_{\text{alloc}}$ における切り替え回数を計算する方法として, 以下に説明する.

- 最初のスロット ($n_s = 0$) の時, 直前のスロットで共用した周波数帯に対しては, 直前のスロットで共用可能もしくは共用不可の共用状況を参照する. 共用状況が変化しない場合は切り替えはしないが, 共用状況が変化する場合に切り替えることになる. しかし, 直前のスロットで共用しなかった周波数帯に対しては, 共用状況問わず切り替えることになる.
- 探知スロット $n_s \neq 0$ の時は, 前の探知スロット ($n_s - 1$) を参照する. 共用状況が変化しない場合は切り替えない. 一方, 共用状況が変化する場合に切り替えることになる.

Step 3. 干渉分布に基づく周波数割り当て

ステップ1とステップ2で各周波数帯に対する共用状況と切り替え回数が求まる. 干渉発生確率の推定は3.2.2節で述べた推定方法に基づいて, 周波数共用可能なスロットのみで行う. 各周波数帯に対する「共用状況」と「周波数切り替え回数」と「干渉発生確率」の3つ情報を使用し, 以下の2つの条件を満たした周波数帯をSUに割り当てる.

- (1) SUの周波数共用時間を可能な限り長くし, また周波数切り替え回数を可能な限り少なくするために, 周波数切り替え回数が「0回」あるいは「1回」のどちらかを満たした周波数帯のみを共用する.
- (2) PUへの与干渉を最小限にするために, 推定した干渉発生確率が最小である周波数帯を共用する.

4. シミュレーション評価

提案手法の有効性を示すため, 計算機シミュレーションにより, 従来手法との比較を行う. 提案手法は, 現時刻における電

表2 PUのシミュレーションパラメータ

台数 N_p	3
利用周波数	f_1, f_2, f_3
PU ₁ の通信平均間隔	0.4 [sec]
PU ₂ の通信平均間隔	0.7 [sec]
PU ₃ の通信平均間隔	0.6 [sec]
送信電力 P_t	40 [dBm]
干渉閾値 $P_{i,\text{th}}$	-110 [dBm]

表3 SUのシミュレーションパラメータ

台数 N_s	1
移動速度	4 [km/h]
移動開始位置および移動方向	ランダム
移動時間 T_{move}	60 [min]
探知時間 T_{alloc}	360 [sec]
探知スロット数 N_{slot}	10
観測間隔 T_{alg}	1 [sec]
観測ポイント N_{alg}	$T_{\text{alloc}} / (N_{\text{slot}} \times T_{\text{alg}})$
周波数割り当て閾値 $P_{a,\text{th}}$	-110 [dBm]

波センサーからのRSSI情報 P_{SS} とSDに蓄積されたRSSI情報 P_{REM} 及び干渉分布に基づく移動先までの空き周波数を事前に探知し, 周波数割り当て法を行う. 従来手法は, P_{SS} のみを使用し, 探知時間 T_{alloc} ごとに周波数割り当て法である.

また, G_{BS} 及び G_{UE} の一般的な値はそれぞれ 15 [dBi] 及び 0 [dBi] として [12] で与えられる. また, パスロスモデルは Walfisch-池上モデルを用いる [13].

評価指標として, SUの共用確率, SUからPUへの与干渉確率およびSUの平均周波数切り替え回数の3つを用いた. SUの共用確率は, SUがPUと同じ周波数帯を利用して通信を行う確率である. SUからPUへの与干渉確率は, SUがPUと同じ周波数帯を利用して通信を行った際に, 受信信号強度が干渉閾値 $P_{i,\text{th}}$ [dBm] を超過した確率を表す. SUの平均周波数切り替え数は, SUが f_1, f_2, f_3 および共用なしに切り替えた際にカウントされる. また, 周波数共用に対する与干渉によるSUからPUへの総干渉は

$$(\text{「共用確率」} \times \text{「与干渉確率」} \times T_{\text{move}} \times \text{「試行回数」}) \quad (5)$$

において評価を行う. 本稿で用いたパラメータを表1, 表2および表3に示す. PUの通信時間は平均間隔 $T_{\text{ave},1,2,\dots,N_p}$ の指数分布に従う乱数によって決定される.

また, 異なるPUの位置により空き周波数に影響があるため, 本項では, 図7に示すように10パターンのPUの位置でシミュレーションを行った.

4.1 シミュレーション結果

図8のSUの共用確率より, 提案手法はSUの移動時間の約48.7%で共用が可能であることがわかる. 周波数共用確率において, 提案手法は従来手法から49.8%減少した. 従来手法の方が提案手法より積極的に共用することが可能であることがわかる. しかし, 図9のSUからPUへの与干渉確率では, 従来手法は約4.72%となっている. 提案手法により与干渉確率は約

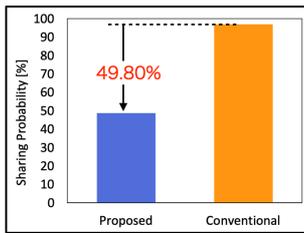


図 8 共用確率

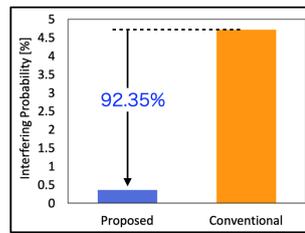


図 9 与干渉確率

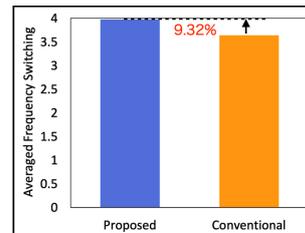


図 10 平均切り替え数

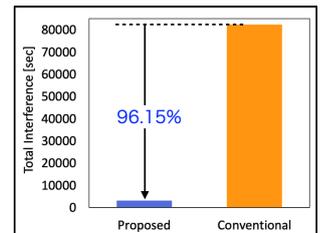


図 11 総干渉

0.4% 以下となり、従来手法から 92.35% 低減可能であることがわかる。また、PU の通信の保護が前提となっている周波数共用においては、与干渉確率が 0% であることが理想であり、従来手法より提案手法の方が理想の与干渉確率に近いことが言える。また、図 10 の SU の平均周波数切り替え回数では、提案手法が平均 3.98 回、従来手法が平均 3.64 回という結果となった。提案手法は、従来手法から約 9.32% 増加していることがわかる。これは、提案手法は PU へ干渉を与える可能性が極めて小さい周波数帯が優先するため、切り替え回数が 1 回である周波数帯を SU に割り当てることで周波数切り替え回数が増加することがわかる。

さらに、総干渉の評価は式 (5) により、図 11 に示すように提案手法は従来手法と比較して与干渉率を 5% 以下に抑制できていることがわかる。これらの結果から、提案手法は、SU の切り替え回数を従来手法から大きく増加させることなく、SU が共用をしながらも PU の通信保護が可能であることがわかる。

5. 終わりに

本稿では、周波数共用に干渉分布と SD を活用した事前に空き周波数帯を探知し周波数割り当てを行う手法およびアルゴリズムを提案した。現時刻の判定のみを利用して周波数割り当てを行う従来手法とは異なり、提案手法では、SD を用いて移動先の周波数利用状況を予測する。また、事前にモデル化した干渉分布を用いて各周波数帯に対する干渉発生確率を推定する。それらの予測した周波数利用状況と干渉発生確率を用いて事前に周波数割り当てを実行する手法であることを示した。計算機シミュレーションにより、提案手法は従来手法より SU の共用確率が 50% 程度低下するものの、10% 程度の周波数切り替え回数の増加で抑制しつつ既存システムへの与干渉を 92% 低減可能である。これらの結果より、周波数共用に対する与干渉による総干渉の評価において、提案手法は従来手法と比較して与干渉率を 5% 以下に抑制することが確認できた。

謝辞 本研究は、総務省「異システム間の周波数共用技術の高度化に関する研究開発」(JPJ000254) における受託研究の一環として実施されたものである。

文 献

- [1] Ministry of Internal Affairs and Communications in Japan, "Results of counting traffic on the Internet in Japan," [Online]. Available: <http://www.soumu.go.jp/main-content/000644015.pdf>. Accessed on 5 Apr. 2020.
- [2] L. M. Lopez-Ramos, Antonio G. Marques, and J. Ramos, "Jointly Optimal Sensing and Resource Allocation for Multiuser Interweave Cognitive Radios," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 13, no. 11, pp. 5954-5967, Nov. 2014.
- [3] T. Doumi, M. F. Dolan, S. Tatesh, A. Casati, G. Tsirtsis,

- K. Anchan, and D. Flore, "LTE for public safety networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 2, pp. 106-112, Feb. 2013.
- [4] T. Fujii, "スペクトラムデータベースによるダイナミック周波数割り当て," [Online]. Available: http://www.ituaj.jp/wp-content/uploads/2015/09/2015_09-07-spot1.pdf. Accessed on 27 May 2020.
- [5] M. Vu, N. Devroye, and V. Tarokh, "On the primary exclusive region of cognitive networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3380-3385, Jul. 2009.
- [6] 山田 仰, 西尾 理志, 守倉 正博, 山本 高至, "[ポスター講演] 周波数共用に向けた不均衡データに対する一次利用者排他領域更新方式", 電子情報通信学会 信学技報, vol. 118, no. 126, pp. 107-108, 2018 年 7 月.
- [7] 吉岡 達哉, 鈴木 信雄, 狐塚 正樹, 國弘 和明, 山下 翔大, 山本 高至, 小泉 佑揮, 長谷川 亨, "[技術展示] 都市部伝搬環境における動的周波数共用システムの性能評価", 電子情報通信学会 信学技報, vol. 118, no. 57, pp. 81-86, 2018 年 5 月.
- [8] M. Musashi and K. Adachi, "Spectrum Database Aided Prior Vacant Frequency Band Detection for Spectrum Sharing," in *Proc. 2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*, pp. 262-266, Fukuoka, Feb. 2020.
- [9] T. Clancy, "Achievable capacity under the interference temperature model," in *Proc. IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 794-802, May 2007.
- [10] P. Dent, G.E. Bottomley, and T. Croft, "Jakes fading model revisited," *Electronics Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1162-1163, Jun. 1993.
- [11] H. Clausen, "Efficient modelling of channel maps with correlated shadow fading in mobile radio systems," in *Proc. 2005 IEEE 16th Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, pp. 512-516, Berlin, Sept. 2005.
- [12] 3GPP, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) requirements for LTE Pico Node B (3GPP TR 36.931 version 9.0.0 Release 9)," [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136931/09.00.00_60/tr_136931v090000p.pdf. Accessed on 5 Apr. 2020.
- [13] COST Action 231, "Digital mobile radio towards future generation systems, final report," Brussels, tech rep., European Communities, EUR 18957, 1999.