

コグニティブ無線のための高度電波利用データベース構築に関する研究

代表研究者 藤井 威生 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 准教授

1 はじめに

近年、不足する周波数資源に対する抜本的な解決策として、既存システム（プライマリシステム）との周波数共用を行うことで、周波数の空間的な利用効率を改善するコグニティブ無線技術に注目が集まっている[1]。コグニティブ無線では、周波数共用時に二次利用システム（セカンダリシステム）がプライマリシステムに影響を与えないことが求められる。結果として、コグニティブ無線技術の活用により、周辺環境を認識した適応的な無線機能の再構築を行うことで、潜在的な周波数資源の二次利用が可能となる。現在のコグニティブ無線技術の研究は時間・周波数軸上の未使用資源を利用する Opportunistic 型と、空間上の未使用資源を利用する Geographical 型が主流である。これらの方式は比較的簡易に既存システムの保護が可能であるが、完全な未使用帯域・エリアが存在しないと二次利用ができないため、利用可能な周波数資源が限定されてしまう。

一方、プライマリシステムに与える干渉を一定値以下に制限することでプライマリシステムが利用している間でも周波数共用を行う Underlay 型の周波数共用技術も検討されている[2]。このタイプの周波数共用では、プライマリシステムの干渉を確実に制限するため、セカンダリシステムが電力制御を行いプライマリシステムでの影響を一定以下に抑える必要がある。そのためにはプライマリ受信機でのセカンダリ送信機からの受信信号レベルや、プライマリ信号の受信信号レベルを把握し、影響が出ないような制御を行うこととなる。そのためには、周囲の無線環境を正確に把握し、電力や送信タイミングを適切に設計する必要がある。そこで、本研究では電波環境を記録しておく電波利用データベースを、通信のパラメータ決定時に補助的に利用し、プライマリ信号の状態や電波環境など、周波数共用に必要な情報を取得することで効率的な周波数共用を行う。この電波利用データベースの活用により、周波数利用効率の大きな改善効果が期待される。

本研究では初めに電波利用データベースのコンセプトを紹介し、観測データに基づきどのようにデータベースを構築するのかを述べる。また、この際に電波利用データベースの提供範囲に応じて階層型のデータベース構造を提案する。次に、実際の観測装置としてソフトウェア無線機を準備し、ソフトウェア無線機に無線環境観測機能を実装することで、実電波の観測ができる環境を作り、無線信号の観測実験を行う。最後に計算機シミュレーションにより構築するデータベースの有効性を示す。これらを通して電波利用データベースの有効性を確認する。

2 高度電波利用データベース

2-1 コグニティブ無線技術における電波伝搬予測の重要性

コグニティブ無線は周波数共用の方法から2つのタイプに分類することが可能である。一つ目はプロテクティブ型のコグニティブ無線（アンダーレイ型、ホワイトスペースとも呼ばれる）であり、プライマリシステムの通信保護領域を地理的にあらかじめ決定し、保護領域以外ではプライマリシステムに干渉を与えないことをあらかじめ干渉保護設計により確認したうえで、プライマリシステムへの影響を回避して、セカンダリシステムの周波数共用を行う方式である。現在日本で検討されているテレビ放送帯域を利用したホワイトスペースの活用はこのプロテクティブ型の周波数共用手法を採用しており、Geolocation 型と呼ばれる送信機の位置によるセカンダリ送信可否判断によりプライマリシステムの保護が可能となる方式である[3]。本方式は確実なプライマリシステム保護のため、大きなマージンを取った周波数共用設計が必要となるなど周波数利用効率の向上に対する寄与は限定的である。一方、二つ目の周波数共用方式としてアグレッシブ型のコグニティブ無線（オーバーレイ型、グレースペースとも呼ばれる）がある。この方式は、プライマリシステムが存在している場合でも、そのプライマリシステムに与干渉を与えないようにセカンダリシステムの送信電力制御などで干渉設計することで、周波数共用を可能とする方式である。プライマリ受信機への干渉量を正確に見積もることができればプライマリシステムのエリア内でも周波数共用を実現することが可能となり、周波数利用効率を大幅に改善させることができる。一方で、厳密な干渉設計を行わないと、プライマリ保護

条件を満足できなくなる恐れがある。

このように周波数共有にはより保守的なプロテクティブ型の周波数共有と、進歩的なアグレッシブ型の周波数共有があるが、これらの実現にはプライマリシステムおよびセカンダリシステムの相互干渉量を正確に見積もる必要がある。特に電力制御による周波数共有を考えるアグレッシブ型の周波数共有手法では、プライマリシステムの与干渉を一定レベル以下に抑えるために、図1に示すようなリンクの受信電力の見積もりが重要となる。セカンダリシステムからの干渉の直接的な影響を考慮するため、プライマリ送信機からプライマリ受信機への到達信号電力およびセカンダリ送信機からプライマリ受信機への到達干渉電力を正確に見積もって電力設計する必要がある[4]。さらに、プライマリ信号を検出してその存在を元にセカンダリシステムの送受信を制御するようなセカンダリシステムを想定した場合には、プライマリ送信機からセカンダリ送信機への到達信号電力も正確に見積もる必要がある。これらの伝搬予測の正確さを考慮したセカンダリ送信電力設計を行わないと意図しない干渉によりプライマリシステムの保護ができなくなる可能性がある。

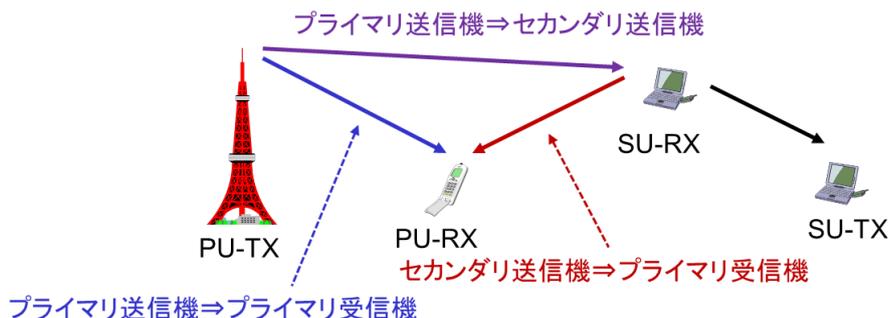


図1 電波伝搬予測が必要となるリンク

実際に、距離の n 乗に反比例して信号電力が弱まる n 乗則と呼ばれる簡易な伝搬モデルを考え、減衰量を決定する伝搬減衰定数 n が異なる場合の距離による特性差をグラフ化すると図2のように表現できる。

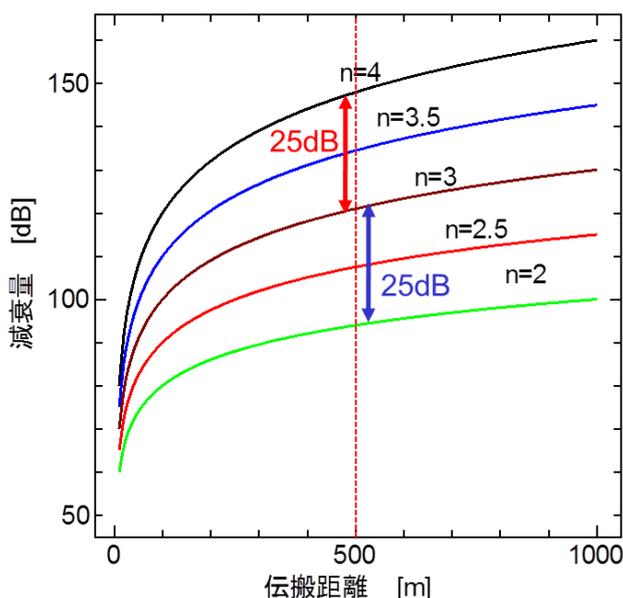


図2 2.4GHz 帯の伝搬距離に対する減衰量

ここでは、2.4GHz 帯を用いて伝搬減衰定数を $n=2$ から 4 まで変化させている。このグラフより伝搬距離 500m の地点で、 n を 4 から 3 に変化しただけで 25dB の信号電力の差、 n を 3 から 2 に変化した場合で、さらに 25dB の受信電力差が生まれることが確認できる。これを最悪値設計してマージンを決めてセカンダリシステムの送信電力を決定した場合、送信電力が非常に小さく制限されてしまい、セカンダリシステムの通信を確保できない恐れがある。

これらのことから、コグニティブ無線において高効率の周波数共有を実現するためには、電波伝搬の正確な見積もりが必要であることが分かる。このような正確な電波伝搬予測を実現するための手法として本研究

では電波環境を表す高度電波利用データベースを実観測信号から生成する研究を行う。

2-2 高度電波利用データベース

正確な電波伝搬予測を実現する方法として、本研究では、移動するセカンダリノードが観測する無線周波数の観測結果をデータベースに集約し、実際に観測したデータを元に伝搬統計値を作成し、端末の観測位置と共に蓄積し、周波数共用のパラメータを決定する際に活用することが可能となる高度電波利用データベースを検討する。本手法は、実際の電波伝搬環境で観測された実観測値を元に電波伝搬モデルを構築するため、より高い精度の電波伝搬状況の把握が可能となる利点を持つ。実際にセカンダリノードが観測できる値は、受信電力の瞬時値となるため、電波伝搬の平均値とその統計的な分布情報を高度電波利用データベースに蓄積することで、プライマリシステムに対する与干渉を確率的に保護する手法を考える。

データベースを活用して周波数共用の性能を高める検討は米国の FCC が主導となって、テレビ放送用周波数の周波数共用を実現する一手法として検討が進められている [5]。このデータベースはあらかじめ特定の電波伝搬モデルを定め、そのモデルに従って計算されたプライマリのサービスエリアを保護するように利用可能周波数とその位置情報をデータベースに記録して提供するものであり、より保守的な干渉設計による周波数共用を行うものである。そのため、干渉マージンが大きくとられており、周波数利用効率の向上には限界がある。

一方で、今回検討を行っている高度電波利用データベースは周囲のセカンダリノードを用いて観測したプライマリ信号を元にして構築されるものであり、プライマリ情報、電波伝搬モデル、推定誤差、統計的な信号分布なども含み、加えてプライマリの受信機の位置情報なども合わせることで、プライマリ受信機に影響を与えない送信電力を適応的にセカンダリ送信機が決定して通信を行うものであり、より高速な通信の実現が期待できる。また、周波数を最大限まで密に利用できることから、このようなデータベースの構築により潜在的に存在する周波数資源を掘り起こすことが可能となる。FCC 型データベースと高度電波利用データベースを図 3 に示す。前述のように FCC 型のデータベースはあらかじめプライマリシステムのサービスエリアを決め、その境界に存在する可能性のある端末に干渉を与えないように、セカンダリシステムの利用可否を干渉マージンも含めて計算し、利用可能エリアとセカンダリの送信電力制限を行うため、利用可能なエリアが限定され、かつ比較的小さな送信電力でのみ適用可能な周波数共用方法である。一方で、高度電波利用データベースは、プライマリシステムの信号について、データベース化が完全になされていれば任意の位置で、その電力を知ることが可能であり、プライマリの受信機の現在の位置情報と合わせることで、プライマリシステムの品質 (信号対干渉電力費など) を考慮したセカンダリシステムの送信電力制御や、送信タイミング制御が可能となる。そのため、プライマリシステムのエリア内での周波数共用や、干渉を与えない範囲での端末の送信電力の増加が期待でき、セカンダリシステムの通信品質改善を図ることが可能となる。現在のホワイトスペースの利用はテレビ周波数利用の議論が中心となっているが高度電波利用データベースの活用により、他の無線システム利用帯域にも周波数共用の適用範囲を拡大することが期待される。

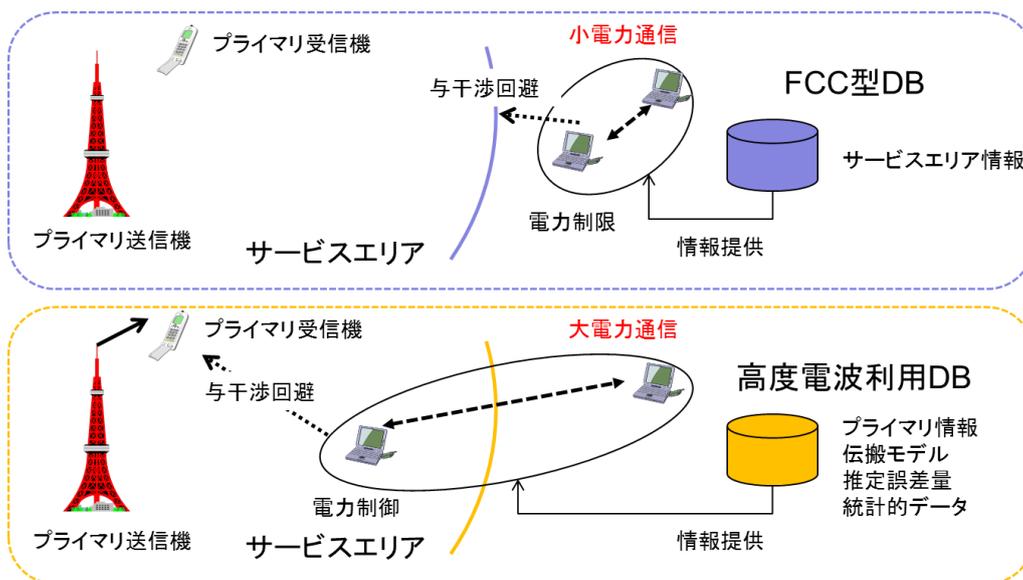


図3 FCC型データベースと高度電波利用データベース

このように高度電波利用データベースは、より密な周波数利用の可能性を持っているが、実観測値を元にデータベースを構築していくため、全ての地域の情報を持つデータベースを構築してしまうと、そのデータは膨大な量となり、データベースを有効に活用することが難しくなってしまう問題がある。そこで、本研究では、階層型のデータベース構造を考えた。図4に階層型高度電波利用データベースのアーキテクチャを示す。階層型データベースはセカンダリノードが観測した情報をまずローカルのデータベースに格納する。ローカルなデータベースには、オリジナルの観測データを元に、細かい粒度での情報を記録することになる。しかし、この粒度で広い地域のデータベースを構築するとその膨大なデータ量により、有効なデータとしての活用が難しくなる。そこで、データベースを階層構造とし、一つ上の階層に保存するデータは、統計的に処理されたデータとし、その代り適用の範囲を広げること考える。最下位のデータベースはノード自身を持つデータベースとなっているのに対して、一つ上位のデータベースは、複数の端末から構成される狭いエリア（携帯電話の基地局がサポートするエリア程度）の情報を集約し、たとえば観測信号の平均値と分散値を周波数毎に持つデータベースとする。データベースのサポートする範囲の拡大と共に、情報の粒度を下げることで、セカンダリシステムが、利用する周波数帯域の選択とその送信電力を現実的な時間で探索できる形をとっている。最も上の階層に位置するデータベースは、FCC や総務省といった電波を管理する組織によって構築される電波規則や電波利用ポリシーを定義するものであり、規制機関はこの上位のデータベースを管理することで、周波数の秩序を保つことができるアーキテクチャとなっている。今回の研究ではこの電波利用データベースのうち、実際に電波環境を観測して保存する機能をソフトウェア無線機に実装し、その収集したデータの精度について確認を行った。また、高度電波利用データベースの適用効果の確認のため、観測したデータが集約されて、その信号の平均値と観測数が分かることによるプライマリ信号電力の精度を計算機シミュレーションにより求めた。これらの結果を次章以降で説明する。

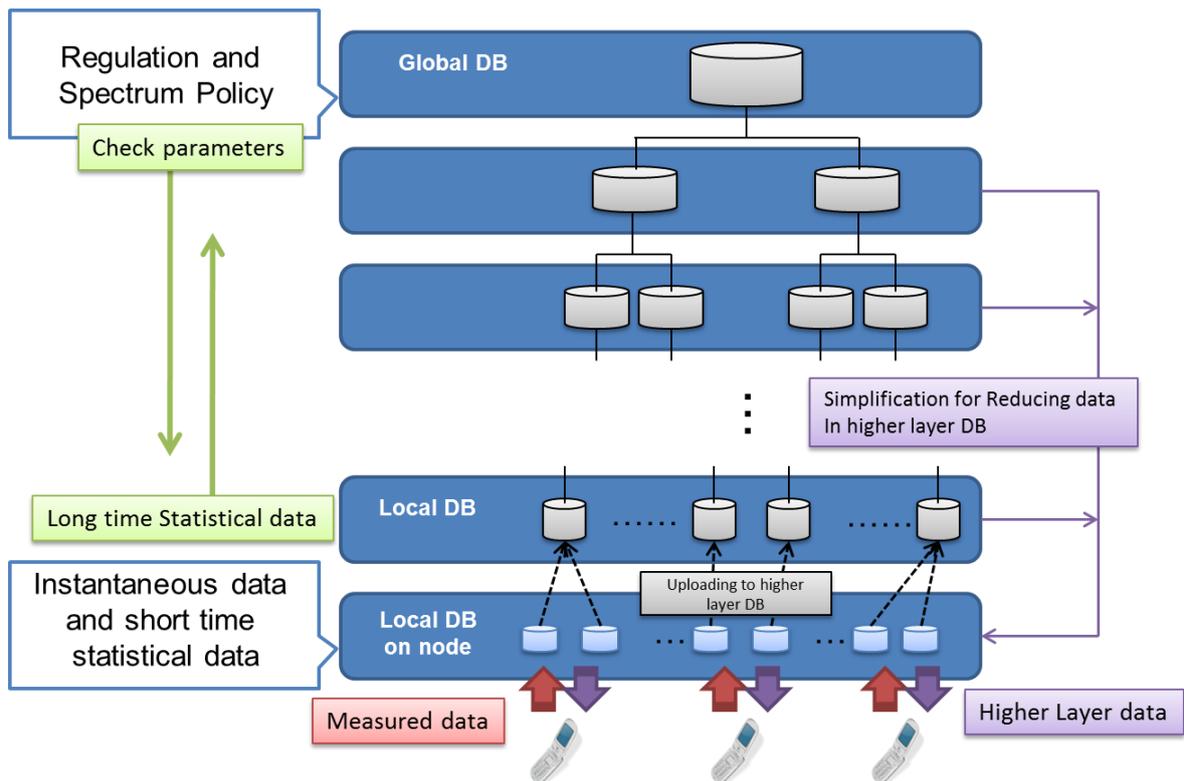


図4 階層型高度電波利用データベース

3 電波環境観測装置の実装

高度電波利用データベースは実観測値に基づき、プライマリシステムが空間的にどのようにその周波数を利用しているかを把握し、その情報をセカンダリシステムに提供することになる。本研究では実際の電波を観測するための装置をソフトウェア無線機により実装しその性能の評価を行った。今回利用したソフトウェア無線機は米国 Ettus 社製の USRP N210 と呼ばれる汎用のソフトウェア無線プラットフォームであり、WBX と呼ばれる UHF 帯の RF 送受信機能を持つドータボードを載せたものを利用した。このソフトウェア無線機に指定した周波数の信号の電力平均値を記録する機能を実装した。図5に利用した USRP N210 の写真を示す。



図5 汎用ソフトウェア無線機 USRP N210

ここでは、中心周波数に対して信号を 200Ksample/s でサンプリングし、2048 サンプル分を平均化した値を取得するように実装を行った。この実装したソフトウェア無線機の性能を確認するために雑音レベルの測定、および信号検出能力の評価を実施した。今回測定には信号発生器(SG: Signal Generator)としてローデシュワルツ社製の SMU200A を利用し、図6に示すような実験構成を構築した。

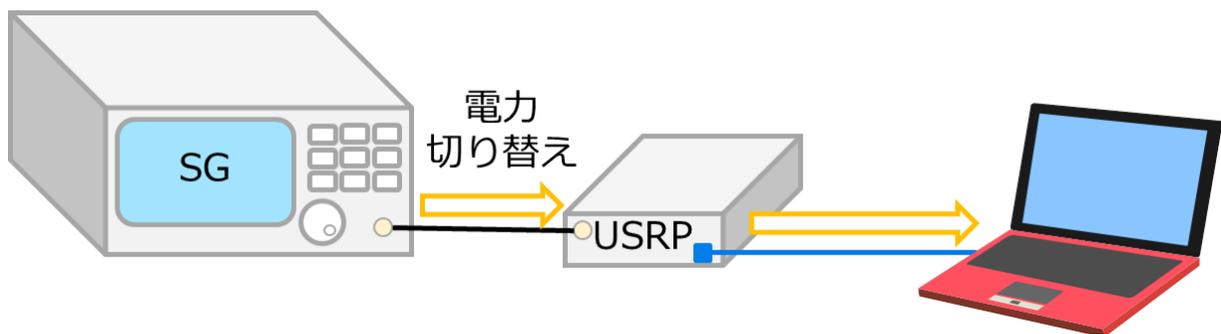


図6 観測装置性能確認のための実験構成

中心周波数をテレビ放送信号に割り当てられている 412.5MHz に設定し、はじめに雑音レベルの観測を行った。雑音レベルの観測では SG の送信を停止して、USRP 内部で発生する雑音のみを観測することとした。100000 回の試行を行った結果の観測頻度を統計化し、確率密度分布としたものを図7に示す。ここでは横軸を雑音電力、縦軸に発生確率を示している。この図より、本観測装置の雑音レベルは-125dBm~-124dBm に分布しており、非常に小さい信号以外は十分に観測可能な性能を持っていることを確認した。

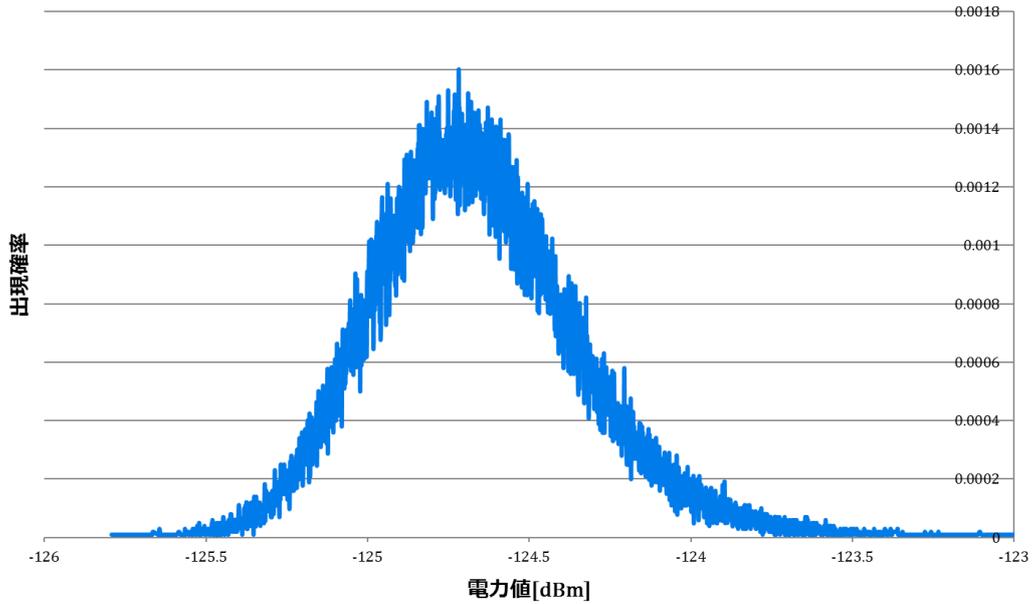


図7 実装した USRP N210 の雑音電力分布

次に信号の検出性能を確認するため、SG からの出力信号電力を変化させ、その時に出力電力の検出精度の測定を行った。ここでは、雑音電力のみが観測される環境で信号が誤って検出される確率（誤警報確率）が 0.1 および 0.01 となるように判定閾値を決定し、その時に入力信号電力が変化した場合に正しく信号が存在すると判定された確率を求めた。図 8 に信号検出性能を求めた。ここでは、雑音信号の平均値を雑音レベルとして、入力信号と雑音電力の比(SNR: Signal to Noise power Ratio)を横軸として、その時の検出確率を縦軸に示す。

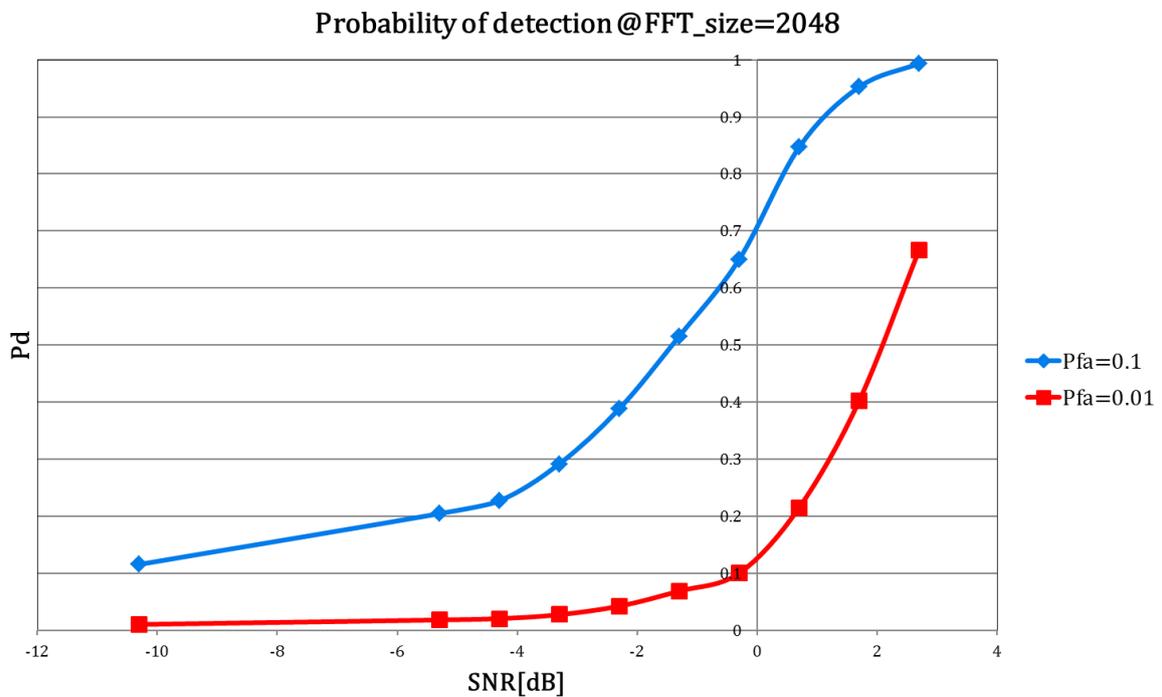


図8 プライマリ信号検出成功確率 (Pd)

図から確認できるように誤警報確率を低く設定するほど検出性能は劣化するものの雑音レベルと比較して、3dB程度信号受信電力レベルが大きければ約70%の確率でプライマリ信号の存在が検出できることが確認できた。これにより、データベース構築のための実用的な観測装置を構築できることが確認できた。

4 高度電波利用データベースによる周波数共用に関する計算機シミュレーション

本研究で検討している高度電波利用データベースを参照することで、精度の高いセカンダリ送信電力制御を可能とし、周波数共用性能を向上させることが期待される。そこで、計算機シミュレーションにより周波数共用性能の評価を実施した。ここでは、実観測で取得しデータベースに登録したデータによるセカンダリ送信電力制御とプライマリ信号の平均受信電力が理想的に取得できた場合との比較を行う。ここで想定するデータベースは図9に示すようにその観測位置に対応したプライマリ信号の電力値をデータベースに登録し、データベースは過去の観測値と合わせてその平均値を観測レコード数と共に保存し、必要に応じて提供できるものとする。

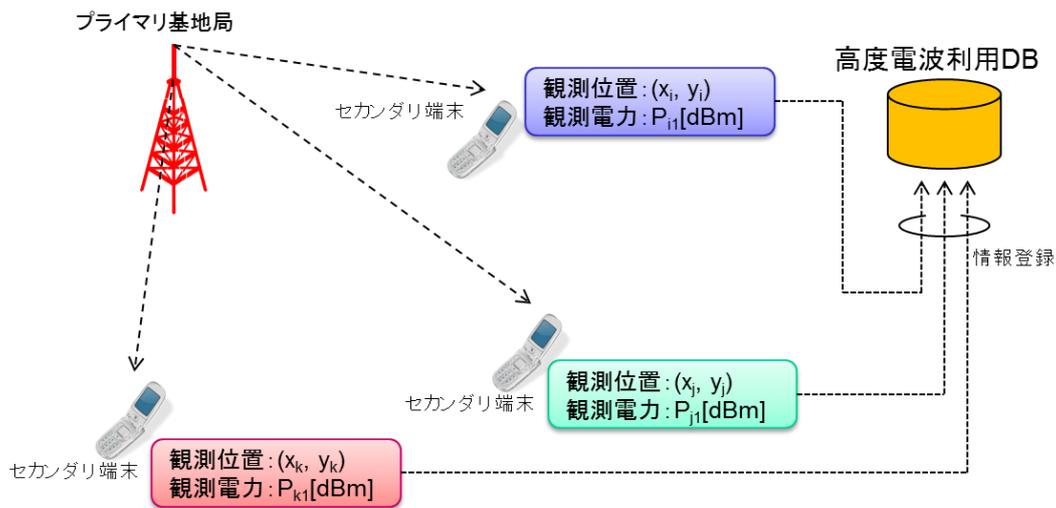


図9 セカンダリ端末に高度電波利用データベース構築

この時、セカンダリ端末は、プライマリ信号の瞬時電力を観測し、観測位置情報と合わせてデータベースに情報登録を行う。データベースは位置毎に観測情報を管理し、各位置における平均観測値と平均化レコード数を蓄積することとする。このように観測電力情報をセカンダリ端末からデータベースに提供することで、プライマリ信号の電波環境のマップをデータベース上に構築することが可能となる。

一方、無線通信では端末の移動や周囲の環境の変化により、信号電力がフェージングと呼ばれる確率変動を起こす。そのため、単純に平均電力を獲得し、その値を用いて相互干渉が発生しないように、セカンダリシステムのパラメータを決定しても、瞬時的なフェージングの影響で過大な干渉がプライマリシステムに与えられる可能性がある。そこで、本研究では干渉確率に基づく確率的なプライマリシステムの保護を考えた。ここでは、プライマリに許容できる干渉確率を設定し、干渉の発生確率をその許容干渉確率以下に抑えることで、プライマリを保護する考えである。本研究では、SIR=10dBのアウテージ確率が5%および10%となるように干渉確率の閾値を定義し、セカンダリシステムがその閾値を超えないように送信電力を制御する。図10に示本研究で想定する周波数共用モデルを示す。ここでは、セカンダリ端末は、プライマリシステムの受信機の存在する地点での受信電力を電波利用データベースに問い合わせ、プライマリ受信機で得られる希望信号電力を得る。さらにフェージングのマーヅンを考慮して、プライマリシステム受信機が SIR=10dBのアウテージ確率が5%もしくは10%以下となるように送信電力を設計することとする。

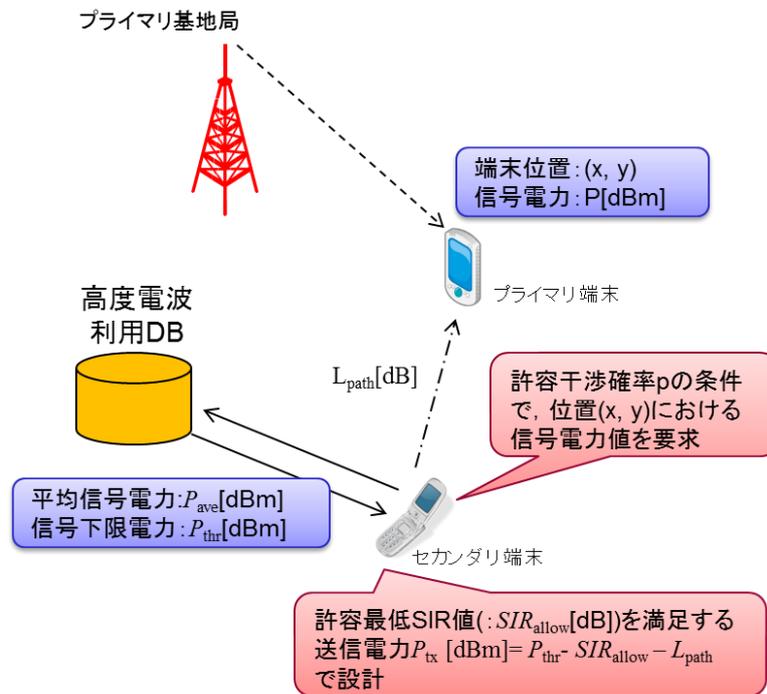


図10 高度電波利用データベースを活用した送信電力制御

本手法の有効性を確認するために計算機シミュレーションにより、高度電波利用データベースに記録されているサンプル数（データレコード数）に応じたプライマリシステム受信機の保護性能およびセカンダリシステムの可能送信電力を求める。ここでは、理想的にセカンダリ送信端末が、プライマリ受信機での希望信号電力が推定できたとした場合に送信可能となる電力を理想送信電力として計算し、性能の比較を行う。

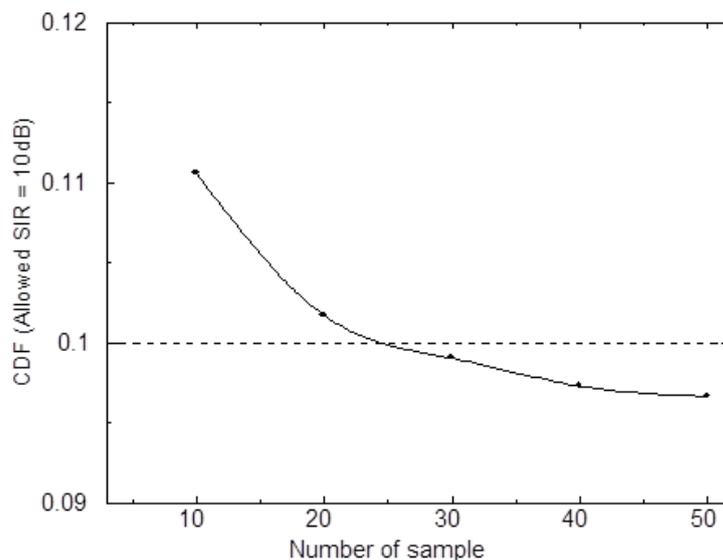


図11 SIR=10dB以下となるアウトエージ確率

図11はSIR=10dB以下となるアウトエージ確率を求めたものである。横軸はデータベースにセカンダリシステムからの報告によって記録されたサンプルの数を示している。本研究では、データベースとしてセカンダリシステムから報告された信号の平均電力を記録しているため、平均化するサンプル数が大きいほどより正確なプライマリ受信機位置での受信電力を推定することが可能となり、結果としてプライマリシステムを保護することができる。図より、セカンダリ端末が収集して記録するサンプル数（レコード数）が25個程度あれば十分にプライマリシステムを保護する送信電力設計が可能であることが確認できた。

一方、セカンダリシステムが、プライマリシステムの受信機を妨害せずにどこまで送信電力を増加させることができるかは、プライマリシステム受信機での信号電力を正確に見積もり、セカンダリシステムの正確な送信電力制御が可能となることで実現できる。図 1 2 には SIR=10dB 以下になるアウトージ確率を 0.05 以下とすることのできるセカンダリシステムの許容送信電力を求めている。グラフの点線は、正確にプライマリシステムの受信電力が高度電波利用データベースから提供されたと仮定した場合に与干渉を与えないセカンダリの最大送信電力を求めている。

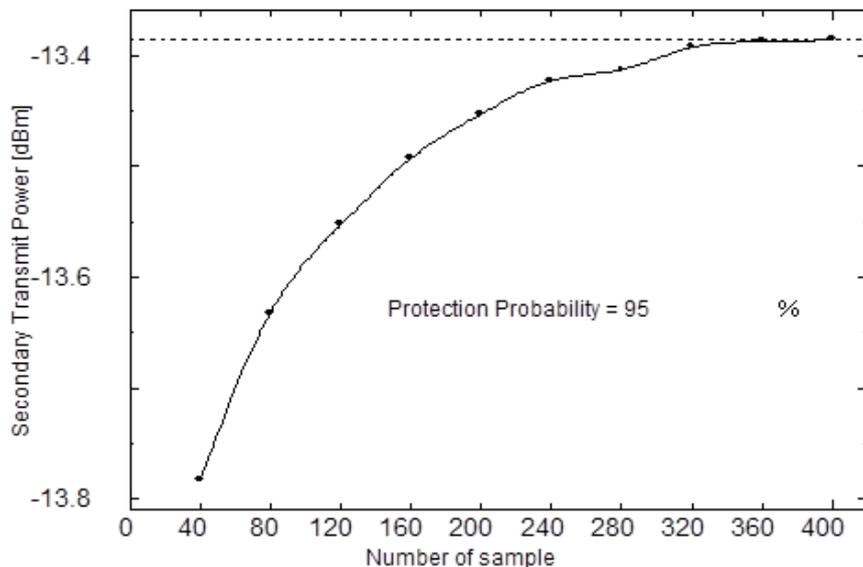


図 1 2 セカンダリ送信機送信可能電力

一方、実線は、高度電波利用データベースから過去の観測に基づき推定したプライマリ受信機の受信電力を利用して、セカンダリ端末の送信電力を導出した結果である。ここでグラフの横軸はセカンダリシステムが観測、登録したこの位置でのサンプル数（レコード数）であり、この数を大きくするほどプライマリ受信機での送信電力が、理想的な環境での結果である点線に近づいていることが確認できる。この結果から、高度電波利用データベースに 350 サンプル程度の情報が登録されることで、理想的な電力設計とほぼ同等の送信電力設計が可能となることが確認できる。一方で、サンプル数が減少した場合は、送信可能電力が若干低下するもののその差は 0.4dB 程度であり、十分に高度電波利用データベースがプライマリシステムを保護した上でのセカンダリシステムの送信電力設計に利用可能なことが確認できた。

5 おわりに

本研究では、セカンダリ端末の観測データをデータベースに集約し、統計処理したものを高度電波利用データベースとして構築するコンセプトを提示し、観測装置の実装および計算機シミュレーションによる評価を実施した。高度電波利用データベースは、セカンダリ端末の実観測データを登録および統計処理して、セカンダリシステムに提供することで、セカンダリシステムの正確なパラメータ設計を可能とし、周波数共用性能を大幅に向上させることが可能となる。本研究助成では、高度電波利用データベースの簡単な設計、観測装置の実装および評価を行ったが、今後の研究でより実用的なデータベースの構築をめざし、広範囲な観測データの登録および実証実験を行っていきたいと考えている。

【参考文献】

- [1] J. Mitola, G.Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," IEEE Personal Communications, vol.6, no. 4, pp.13-18, Aug. 2002.
- [2] L. B. Le, E. Hossain. "Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks," IEEE Transactions on Wireless Commun., vol.7, no.12, pp. 5306-5315, Dec. 2008.

- [3] 総務省ホワイトスペース推進会議, 「ホワイトスペース利用システムの運用調整の仕組み 最終とりまとめ」, 2013年1月.
- [4] T.Fujii, “Effect of sensing ability for spectrum shared cognitive radio -Power control or CSMA-,” Proc. IEEE ICUFN 2011, Dalian, China, June 2011.
- [5] FCC Commission's Part 15 rules, Radio Frequency Devices, Subpart H: Television Band Devices

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Hierarchical Radio Environment Database for Efficient Spectrum Sharing	IEEE APWCS 2012	2012年8月
Control Channel Selection for Expanding White Space Length using Channel Statistic Information with Observation Error	NCSP2013	2013年3月
マルコフ連鎖モデルに基づくチャンネル選択に対する観測誤差の影響	電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会	2012年7月