

論文の内容の要旨

| | |
|-------|--|
| 論文題目 | Measurement-based Spectrum Database for Spatial Spectrum Sharing (和訳：実観測に基づく電波環境データベースを用いた空間的周波数共有に関する研究) |
| 学位申請者 | 佐藤 光哉 |

スマートフォンやモノのインターネット (Internet of Things: IoT) といった近年の無線通信に対する需要の爆発的増加により、新規無線通信システムに割り当てる周波数資源の不足が深刻化している。一方で既存の割り当て済み帯域内には時間的・空間的に使われていない領域が多数存在することが知られており、これらを二次的に活用することで新たな周波数資源の開拓を目指す周波数共有が注目されている。周波数共有環境において、既存の周波数利用ユーザ (PU: Primary User) の通信品質の保護要件を満たしつつ二次利用機会を確保するためには、電波環境を正確に推定した上で二次利用者 (SU: Secondary User) の通信パラメータを適切に設計する必要がある。これに対し、近年は実用的な周波数共有に向け、予め推定した電波環境情報を蓄積し、周波数共有に活用する電波環境データベースが注目されている。このようなデータベースを用いることでSUは簡易に周辺の電波環境を推定でき、かつデータベース側で複数のSUを集中的に制御できるという利点を持つ。一方、現在実用検討が進められている電波環境データベースにおいてPUの電波伝搬特性は距離減衰モデルに基づいて推定されており、その精度の問題からSUの送信電力に保守的な干渉マージンを設定する必要がある。そこで、電波環境の推定精度の観点から周波数共有性能を飛躍的に改善するため、移動端末が観測した電波環境情報を外部サーバに蓄積し、統計化する手法を提案した。本論文では、本提案内容について理論、実装の両面から包括的に検討を行ない、その成果をまとめている。

はじめに提案するデータベースのコンセプトについて述べた後、その周波数共有性能への影響の机上検討を行なった。PUとSUが空間的に周波数共有を行なう環境を想定し、取得できる電波環境情報の差異に着目した評価を行なうことで、提案するデータベースが周波数共有効率を改善し得ることを示した。また、実際のテレビ帯域を対象とした電波観測を行ない、データベースを構築することで従来の距離減衰モデルに基づくデータベースと比較して精度よく電波環境が推定可能であることを実証した。

次に、観測値が得られないエリアの受信電力値の補間推定法、およびそのエリアに存在するPUの通信品質保護を実現するSUの送信電力設計法を提案した。本提案手法では、クリギング法を用いて受信電力値の補間推定を行なっている。クリギング法は観測値の空間相関構造に着目した上で、補間値の推定誤差の分散を最小化することで観測値群に対し最適な加重平均を行なう手法である。電波伝搬環境において補間値および最適化された分散値から推定誤差の確率分布を予測可能である点に着目し、PUの所望信号対干渉電力比(Signal-to-Interference power Ratio: SIR)を確率的に保護可能なSUの最大許容送信電力の推定法を提案した。計算機シミュレーションにより、観測地点の数が限られている環境においても設定した周波数共用規範を漸近的に達成でき、その数が増えるに従ってSUの周波数共用機会を確保できることを示した。

最後にこれらの発展的検討として、分散的に存在するSUを対象とした、電波伝搬特性のデータベース連携による推定手法を提案した。基本的に移動端末間の電波伝搬特性予測は距離減衰モデルに頼る必要があり、シャドウイングのような場所依存の受信電力変動特性の予測は困難であった。そのためPUに対する干渉電力値の推定精度を確保できず、高い干渉マージンを設定する必要があった。そこで、このような場所依存特性も加味した電波伝搬特性予測を実現するため、実観測値に基づく電波環境データベースの発展として、分散的に存在する端末が通信を行なった際に送受信位置及びその通信結果を蓄積するデータベースを提案した。送受信位置が異なる場合であっても、通信リンク間のシャドウイング特性が空間相関性を有することが知られている。これを活用し、クリギング法に基づく補間推定手法により、任意の送受信位置における受信電力値の推定手法を提案した。計算機シミュレーションにより距離減衰モデルに基づく手法と比較して精度良く電波環境を推定でき、かつその誤差特性の予測も実現できることを示した。

以上の検討を通し、実観測した電波環境情報を活用することで既存の割り当て済み帯域における周波数資源の新規開拓が可能であり、今後登場する新たな無線通信システムに無線周波数資源を提供し得ることを示した。また、本論文で得られた成果は周波数共用環境のみならず、自システム内の端末間の干渉マネジメントにも有効である。近年はセルラや無線LANなど、自システム内での端末の過密化が進んでおり、端末や基地局間の干渉マネジメントの重要性が増している。本論文で得られた成果を活用することで、このような環境における周波数利用率の改善も期待できる。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 佐藤 光哉

審査委員主査 藤井 威生

委員 山尾 泰

委員 石橋 功至

委員 小島 年春

委員 高田 潤一

委員

委員

本論文は、周波数資源の枯渇に対する解決策として、既存割り当て済み帯域の空き帯域を二次的に活用する周波数共用の性能改善のため、電波観測結果に基づく電波環境データベースの活用について検討を行っている。周波数共用では、既存の周波数利用ユーザ(PU: Primary User)の通信品質の保護要件を満たしつつ、二次利用機会を確保するために、電波環境を正確に推定した上で二次利用者(SU: Secondary User)の通信パラメータを適切に設計する必要がある。そこで、本論文では、移動端末が観測した電波環境情報を外部サーバに蓄積し、統計化する手法を提案している。ここでは、電波環境データベースを用いた周波数共用について、理論、実装の両面から包括的に検討を行ない、その成果をまとめている。まず、実際のテレビ帯域を対象に電波観測を行ない、データベースを構築することで従来手法と比較して精度よく電波環境が推定できることを示している。次に、観測値が得られないエリアの受信電力値の補間推定法、およびそのエリアに存在するPUの通信品質保護を実現するSUの送信電力設計法を提案している。最後にこれらの発展的検討として、分散的に存在するSU間の電波伝搬特性の、データベース連携による推定手法を提案している。以上の検討を通し、実観測した電波環境情報を活用することで周波数利用効率の向上が可能であることを示している。

第一章は、本論文の導入部として、周波数資源の逼迫の問題とその解決策としての周波数共用の有用性、さらに電波伝搬推定の精度が大きく周波数共用性能に影響することを示し、本論文が扱う課題を明確化している。続けて、本論文の目的を述べ、全6章で構成される本論文の構成について記述し、本論文の全体を俯瞰している。

第二章は、本論文で検討する電波環境データベースとして、端末での観測値を集約して高精度なデータベースを構築する実観測に基づく電波環境データベースに

ついて紹介している。また、このような高精度なデータベースが周波数共用に与える影響を、周波数共用のモデル化、観測誤差のモデル化により理論的に通信路容量と送信可能電力の導出を行うことで本研究の開始点と目標点を明確化している。

第三章は、このような電波環境データベースの有用性を検証するため、テレビ放送信号の実観測値を基に、実際にデータベースを構築し、その精度評価を行っている。ここでは、ソフトウェア無線機を活用した実験システムを構築し、埼玉県熊谷市での実験結果を基に、電波環境データの精度をモデルベースのデータベースと比較してその有用性を示している。

第四章では、電波環境データベースを活用した二次システム向けの電力制御手法の検討を行っている。ここでは、特に位置情報と共に記録される電波環境データベースの補間法について詳細な検討を行っており、データの観測数が十分得られなかったメッシュに対しても高い精度で電波伝搬状況が確認できる手法を提案し、その有効性の評価を行っている。加えて、補間を使って求めた電波伝搬状況を基に確実な周波数共用を行うための送信電力制御法について検討し、提案する送信電力制御法を用いることで、所望信号電力対干渉電力比 (Signal-to-Interference power Ratio: SIR) のアウテージ確率を保証しつつ送信電力を最大化することが可能となることを示している。

第五章では、第四章で提案した送信電力制御を送受信共に移動局となる無線分散ネットワークに環境に適用し、電波伝搬状況を推定したうえで、周波数共用が可能となる送信電力制御を実現する手法の検討を行っている。ここでは、送受信が移動する環境での無線観測値の空間補間を行うことで、適切な送信電力設計ができることを示し、送受信機が移動する環境でも周波数共用性能の向上につながることを示している。

最後に、第六章で、本論文全体のまとめを行い、今後の研究課題についての整理を行っている。

本論文について、平成30年2月7日に公聴会および最終審査会を開催して、学位授与の審査を行った。審査の結果、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。