

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04004

研究課題名(和文)クラウドセンシングによる自己組織型電波伝搬モデル構築に関する研究

研究課題名(英文)Self Organized Radio Propagation Modeling using Crowd Sensing

研究代表者

藤井 威生(Fujii, Takeo)

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・教授

研究者番号：10327710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、世の中に存在する多数の無線端末を無線観測装置としてクラウド連携し、集約した情報を基に、周波数共用性能を飛躍的に改善させる自己組織的な電波伝搬モデル化構築技術の確立を目的として研究活動を行った。これらの研究を通して、多数の端末を用いた無線環境観測・統計化技術の検討、観測結果の集約による電波伝搬モデル化技術の検討、実証実験による精度評価を行い、将来の持続的な無線通信技術の発展のための周波数資源確保の基盤技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：In this research, self organized radio propagation modeling technologies are considered for improving spectrum sharing performance by using cloud cooperation of huge numbers of mobile terminals in the world. Here, we consider radio environment measurement techniques with distributed mobile terminals, statistical processing techniques and radio propagation modeling by using collected measurement data. We evaluate the accuracy performance by using field tests. Throughout of this research, we can establish the basic technologies for spectrum resource expansion to realize future sustainable wireless communication technologies.

研究分野：移動通信

キーワード：通信方式 コグニティブ無線 電波伝搬 クラウドセンシング 周波数共用

1. 研究開始当初の背景

電波がどのように伝搬するのかをモデル化する検討は古くからの研究分野であり、多様な電波伝搬モデルが無線通信の回線設計などで活用されている。しかし、観測データを基にした経験則によりモデル化されている従来の電波伝搬モデルは、実際の電波伝搬が周辺の構造物や地形に大きく影響を受けることが反映しきれておらず、必ずしも高い精度ではなかった。そこで、本研究課題では電波伝搬モデル構築の手法を抜本的に見直し、無線端末での観測値をデータベースに集約し統計解析するクラウドセンシング技術を活用することで、自己組織的にその環境に適合した電波伝搬モデルを構築する手法を検討する。

2. 研究の目的

本研究課題では、世の中に存在する多数の無線端末を無線観測装置としてクラウド連携し、集約した情報を基に、周波数共用性能を飛躍的に改善させる自己組織的な電波伝搬モデル構築技術の確立を目的とする。ここでは、以下の個別目標を目指して研究を進める。1. 多数の端末をクラウド連携することで実際の無線環境を精度よく把握する技術を確立する。2. 連携して得た無線環境情報を基に場所依存の電波伝搬モデルを自律的に高い精度で構築する。3. クラウドセンシングによる電波伝搬モデル化の実証実験により有効性と精度の確認を行う。このようにクラウドセンシングによる電波伝搬モデル化技術を確立し、実証実験によりその精度を検証することで、将来の持続的な無線通信技術の発展のための周波数資源確保に寄与する。

3. 研究の方法

本研究では、3つの課題を設定し、観測機能、統計化・電波伝搬モデル化といった要素技術を確立し、最終目標となる自己組織的電波伝搬モデル化技術を検証した。課題1. クラウドセンシングによる無線環境観測・統計化技術に関する研究、課題2. 自己組織的電波伝搬モデル化に関する研究、課題3. クラウドセンシングを用いた自己組織的電波伝搬モデル化実証実験。これらの課題を具体化した研究テーマを設定して研究を進めた。本研究報告では、これらの研究の内の代表的な成果である(1)クラウドセンシングによる電波環境データベース構築と伝搬伝搬予測に伴う周波数共用性能改善に関する研究。(2)電波伝搬の実観測結果に基づく周波数方向モデリングに関する研究。(3)観測端末誤差の自己キャリブレーション技術の研究。について、以下報告を行う。

4. 研究成果

(1)クラウドセンシングによる電波環境データベース構築と伝搬伝搬予測に伴う周波

数共用性能改善に関する研究

まず、クラウドセンシングの結果に基づいて任意の送受信位置における電波伝搬特性を推定する手法について、理論面からの検討を行なった。提案したデータベースの概要を図1に示す。本提案内容において、各端末は通信を行なった際にその送受信位置、信号の送受信電力強度、通信時間、通信周波数といったパラメータを自端末に記録する。外部データベースサーバはこれらを複数端末より収集することで、該当エリアにおける電波伝搬特性の推定を行なう。

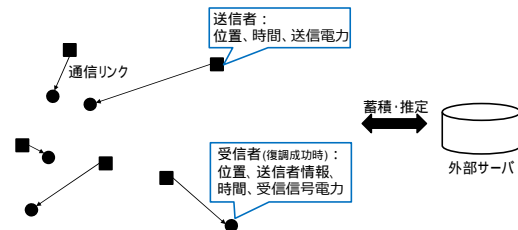


図1 提案したデータベースサーバ

ここでは、電波伝搬の平均的特性が送受信者の移動距離に対し相関性を有する点に着目し、空間統計学的手法に基づく観測データの解析手法を提案した。まず、該当エリアにおける観測値の確率分布を用いた最尤推定により、該当エリアにおける距離減衰係数、シャドウイングの分散値、および相関距離の3つを推定する。次に、クリギング法を用いて観測値に対し対数領域で加重平均を施すことで、任意の送受信位置における構造物依存の電波伝搬特性の最適な推定が実現できる。本提案手法は、計算機シミュレーションにより評価を行なった。ここではある二次元平面に一定数の観測端末がランダムな位置で通信を行なう環境を想定し、ある評価位置における伝搬特性の推定精度を評価した。図2に、観測データセット数に対する電波伝搬特性の推定結果の平均二乗誤差平方根(RMSE: Root mean squared error)特性を示す。これらを通して、本提案によって従来の距離減衰モデルに基づく手法と比較して精度良く電波伝搬特性の推定が実現できることを示した。

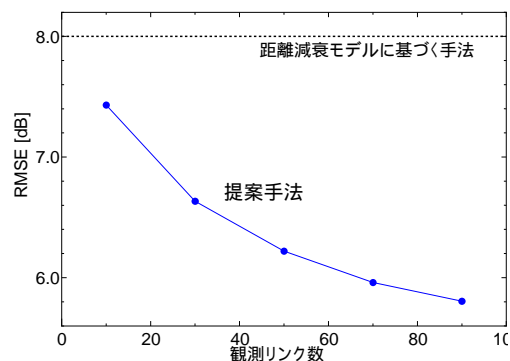


図2 提案手法を用いた伝搬推定の精度

また、本検討を通して得られた知見に基づいて提案するデータベースを用いた無線通信システムの数理モデル化を行ない、提案手法の周波数共用性能の改善効果を理論的に評価した。一般的な移動通信システムにおいて電波伝搬特性は空間相関を有する対数正規シャドウイングに従うが、このような環境においてクリギング法を用いた伝搬推定を行なった場合、その誤差特性は対数正規分布に従う。即ち、真の伝搬特性とその推定結果は二変量対数正規分布に従うため、両者がある相関係数により対応付けることができる。本誤差特性を考慮してプライマリリンク1つとセカンダリリンク1つからなる周波数共用のモデル化を行なうことで、任意の推定精度や電波伝搬パラメータにおける周波数共用効率の机上評価が可能となった。本モデルに基づいた評価により、データベースの精度が向上するほど周波数共用機会を向上でき、かつ、精度が低い場合でも従来の距離減衰モデルに基づく手法と比較して高い周波数共用効率が実現できることを示した。

また、屋外での観測実験を通して提案するデータベースを構築することで、その精度を評価した。ここでは、本データベースの主要な適用先の1つである車車間通信システムを用いた観測を行なった。IEEE 802.11p 準拠の車載機を搭載した車両3台を用意し、東京都調布市-三鷹市の公道で相互に通信を行ない、その結果を蓄積することで送受信者双方が移動する環境における電波環境のデータセットの取得を行なった。上記の机上検討において、観測値は距離減衰およびシャドウイングの影響を仮定した。実際にはこれらに加えてマルチパスフェージングによる瞬時変動が加わるが、構造物依存の影響を推定するためには本成分の除去が不可欠である。そこで、観測エリアを数m四方にメッシュ化し、観測位置をメッシュごとに平均化する手法をデータベースに実装した。3日間の移動観測を通して得られた結果を用いた評価を行なった。図3に示すように実環境においても、ITU-R P.1411や二波モデルといった主要な電波伝搬モデルと比較して精度良く伝搬特性が推定できることを実証した。

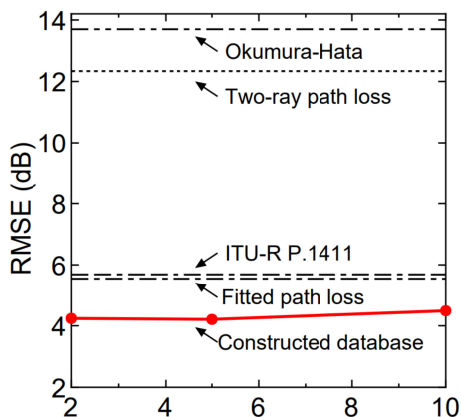


図3 データベースの精度の実証結果

(2) 電波伝搬の実観測結果に基づく周波数方向モデリングに関する研究

本検討では図4に示すように、クラウドセンシングを用いて取得した複数の帯域、場所での電波環境情報に基づいて、周波数の利用状況を推定する電波環境データベースに基づき、効率的な周波数共用を実現するシステムを想定する。このような電波環境データベースでは、対象となる帯域や空間全ての情報の取得は困難であり、現実的には観測情報に欠損が生じることが想定される。電波伝搬特性は空間や時間、周波数軸において相関性を有することが知られているため、クラウドセンシングによって得られた観測値を用いて電波環境データベースを構築する際、無線環境の統計情報を空間軸上や周波数軸上で補間することで、観測するデータ量を削減した上で複数チャンネルの高精度な無線環境認識が期待できる。

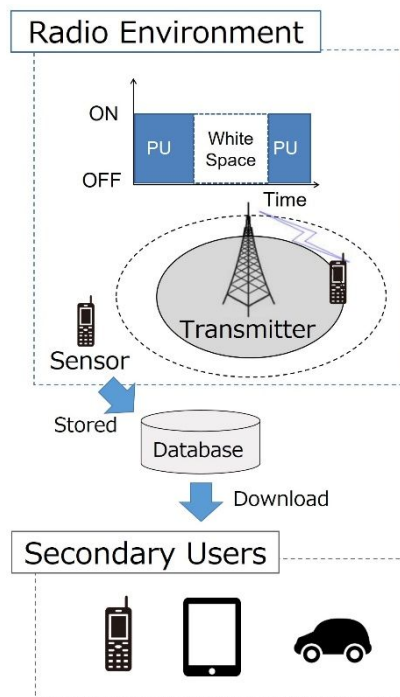


図4 実測に基づく電波環境データベース

しかし、周波数差に対する相関性変動の傾向のモデル化の検討はほとんど行われていない。そこで本研究では、シャドウイング成分の相関特性を評価するために、5GHz帯無線LANを用いた観測実験を実施した。大学キャンパス構内において、IEEE 802.11aを用いた観測実験を行なった。観測チャンネルは5GHz帯 W56バンドである CH120 (5600MHz), CH124 (5620MHz), CH128 (5640MHz), CH132 (5660MHz), CH136 (5680MHz), CH140 (5700MHz) とし、6chそれぞれの受信信号電力を観測した。送信機は高さ10mの位置に設置した無線LANアクセスポイント、受信機は無線LAN子機を具備したRaspberry Pi 3からなる観測装置を使用した。図5に、観測に用いた受信機系を示す。

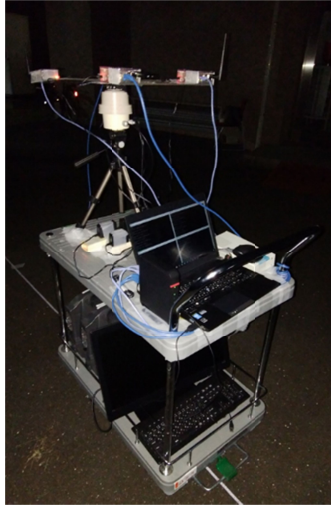


図5 観測に用いた受信機系

観測地点は送信機から 10-40m の地点までとし、50cm ごとに観測を行なった。受信機は高さ 1m、半径 15cm の回転台上に設置し、フェージングの影響を排除するため観測地点ごとに円周上に 1 周 90 秒の速度で回転させた。100ms 周期で送信されるビーコン信号の受信信号強度を各端末 3 分間観測し、受信信号強度を約 2000 回取得して平均化処理を行なった。

得られた情報を基に、シャドウイング成分の周波数相関特性の評価を行なった。マルチパス環境における受信信号電力は、距離依存伝搬損失 L [dB]、障害物によるシャドウイング S [dB]、多重波の干渉によるマルチパスフェージング F [dB]、および定数成分 C [dBm]を用いて、次式のようにモデル化することができる。

$$P(d)[dBm] = C - L(d) - F - S$$

ここで、 d [m]は送受信間の距離である。このうち、マルチパスフェージング F は、複数の測定値の平均を取ること、 0 [dB]とみなすことができる。 $C - L$ は対数軸上の近似直線としてモデル化し、受信信号強度との残差をシャドウイング成分 S とした。ここで、中心周波数の異なるそれぞれのチャンネルについて算出したシャドウイング成分を基に、周波数差に対する相関特性の平均値を dB 換算した対数領域において評価し、図 6 に示す結果を得た。図より、シャドウイング相関は基準周波数から離れるにしたがって指数関数的に減衰する傾向が確認できるものの全体としてその値は高く、周波数差 100MHz の範囲で 0.90-0.92 程度の相関が確認できる。

以上のように、本研究では、クラウドセンシングにおける統計情報の周波数補間の実現性検証のため、5GHz 帯無線 LAN における電波伝搬特性の周波数相関性の実測評価を行なった。評価結果より、観測帯域を用いた屋外環境において、シャドウイング成分の高い周波数相関を確認した。以上の性質を用いることで、受信信号電力の周波数軸上での補

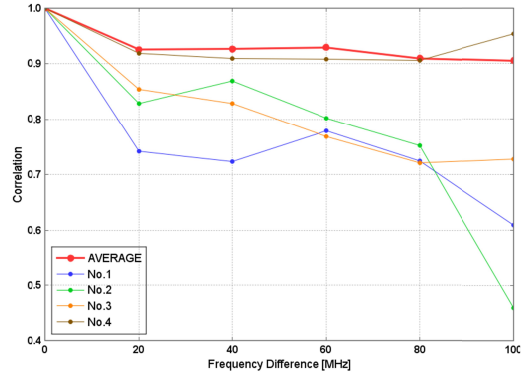


図 6 シャドウイングの周波数相関特性

間の実現が期待できる。また、安価なセンサを用いたクラウドセンシングでは、センサ端末としての個体差や精度の低さが懸念されていたが、複数の端末から得られた情報を束ねることで、高精度なスペクトラムアナライザなどに頼らない、データベースの利用場所ごとの周波数相関モデルの算出の実現が期待できる。

(3) 観測端末誤差の自己キャリブレーション技術の研究

クラウドセンシングを利用して、電波環境をモデリングするには電波環境の精度の高い観測が必要となる。しかし、高精度な無線センサはコストが高く、多数のユーザが持つことが難しいという課題がある。一方、スマートフォンなどの個人が持つ端末を利用できれば、安価にあらゆる場所の無線環境を得られる可能性を持つが、各スマートフォンが持つ観測誤差が大きく、観測精度が低いことが課題となる。

そこで、本研究では、スマートフォンの受信機能によるセンシングで収集した観測データをデータベースに集約する際に、観測値に含まれるオフセット成分を自動的に推定し補償するキャリブレーション手法を検討する。

図 7 にシステムモデルの概要を示す。観測対象となる送信機が 1 台、センサとなるスマートフォンが複数設置される環境を仮定する。各スマートフォンは、観測位置と受信信号電力をデータベースに報告する。ここで、スマートフォンは受信信号電力の測定を目的とした端末ではないため、センシング結果にオフセット誤差を含むものとする。

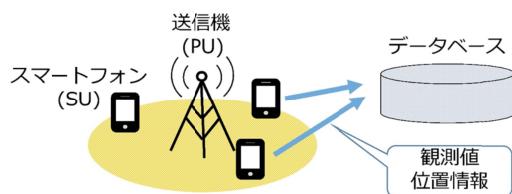


図 7 自己キャリブレーションシステムモデル

本研究では、端末のオフセット成分を推定する手法を検討した。はじめに無線環境の把握のため、多数のスマートフォンからの情報をデータベースに集約する。その後、これらのデータを用いて伝搬定数の推定を行なう。次に観測エリアをメッシュで分けし、メッシュ内の観測値を真値で平均することでフェージング変動の影響を除去する。フェージング変動の影響が除去された観測値をもとに送信電力の推定を行ない、伝搬定数の推定値と送信電力の推定値に基づいてオフセット成分を算出する手法を取る。以下それぞれの手順を説明する。

(A)最小二乗法による伝搬定数の推定

集約した全端末の観測データから、伝搬定数を推定する。推定には最小二乗法(Least Squares Method)を用いる。ここでは、受信信号電力値とスマートフォンと送信機の距離を対数スケールでとり回帰直線を描くことで、伝搬定数の推定を行っている。

(B)メッシュ化によるフェージング影響抑制
観測データを 5m メッシュで区切り、メッシュ抽出の基準値 r_{data} 個以上の観測データ量があるメッシュを抽出する。メッシュ内の観測値の真数を取り、その平均値を求め、フェージング変動の影響を抑制する。

(C)EM 法に基づく送信電力推定

EM(Expectation-Maximization) 法に基づく反復推定アルゴリズムを用いて、送信電力の推定とオフセット成分の分散の推定を反復して行う。

(D)各端末オフセット値推定

(A)~(C)までの推定値を用いて、各端末のオフセット成分を推定する。

本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なった。表1にシミュレーション諸元を示す。メッシュ抽出の基準値を変化させてシミュレーションを行った。精度評価指標には RMSE を用いた。図8に端末オフセットの推定を行いキャリブレーション前後で受信信号電力の RMSE を算出した結果を示す。キャリブレーション前と比較してキャリブレーション後の RMSE は低くなっている。すなわち、提案手法によってデータベースの蓄積情報の精度が向上したことが確認できる。

表1 シミュレーション諸元

チャンネル	距離減衰、フェージング
送信電力	10.0 ~ 15.0[dBm]
周波数	570[MHz]
エリアサイズ	100×100[m ²]
スマートフォンの数	50
オフセット成分	- 6.0 ~ 6.0[dB]
伝搬定数	3.0
メッシュサイズ	5×5[m ²]
報告回数	500

このように本研究では、無線環境データベースに報告された受信信号電力と位置情報

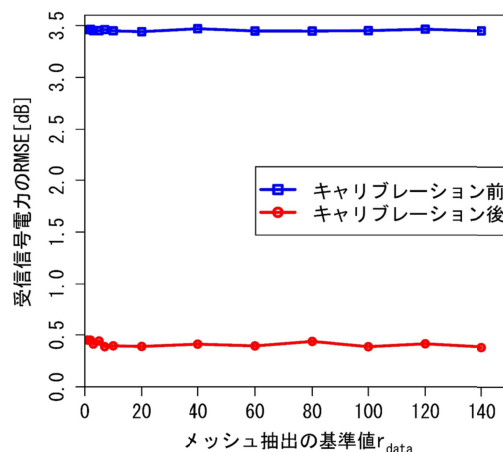


図8 受信信号電力観測精度

の実観測データに基づいて各スマートフォン端末のオフセット誤差を算出し、真の観測値を求めるキャリブレーション手法を提案し、計算機シミュレーションにより精度向上が実現できることを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

Rei Hasegawa, Keita Katagiri, Koya Sato, Takeo Fujii, “Low storage, but highly accurate measurement-based spectrum database via mesh clustering,” IEICE Trans. Commun., 査読有, vol.E101-B, 2018 (in press).

DOI: 10.1587/transcom.2017NEP0007

Koya Sato, Kei Inage, Takeo Fujii, “Frequency correlation of shadowing over TV bands in suburban area,” Electronics Letter, 査読有, vol.54, no.1, 2018, pp.6-8.

DOI: 10.1049/el.2017.2164

Koya Sato, Takeo Fujii, “Kriging-based interference power constraint: integrated design of the radio environment map and transmission power,” IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 査読有, vol.3, 2017, pp.13-25.

DOI: 10.1109/TCCN.2017.2653189

Takashi Kosugi, Takeo Fujii, “Efficient spectrum sharing with avoiding spatial fragmentation of white space,” ICT Express, 査読有, vol.1, 2015, pp.55-58.

DOI: 10.1016/j.ict.2015.09.002

[学会発表](計21件)

Koya Sato, Kei Inage, Takeo Fujii, “Compensation of survivorship bias in path loss modeling,” PIMRC2017, 2017.

Rei Hasegawa, Takeo Fujii, “Measurement-based spectrum database with mesh clustering,” ICUFN2017, 2017.

Koji Ichikawa, Takeo Fujii, “Radio environment map construction using

Hidden Markov Model in multiple primary user environment,” ICNC2017, 2017.

Koya Sato, Takeo Fujii, “Kriging-based interference power constraint for spectrum sharing based on radio environment map,” GLOBECOM Workshop, 2015.

他 17 件

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：通信信頼度管理サーバ、通信信頼度管理システムおよび通信信頼度管理方法

発明者：藤井 威生，佐藤 光哉，片桐 啓太

権利者：電気通信大学

種類：特許

番号：特願 2017-042823

出願年月日：2017 年 3 月 7 日

国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

藤井 威生 (FUJII, Takeo)

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・教授

研究者番号：10327710

(4)研究協力者

稲毛 契 (INAGE, Kei)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科電気電子工学コース・助教