

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630158

研究課題名(和文)電波高密度利用に資する無線信号高度分布モデルの確立

研究課題名(英文)Height pattern model of radio signal for high dense spectrum sharing

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、高密度に複数システムが共用可能な環境を創成するため、上空の面的な無線信号観測結果から、地上までの電波の高度分布を推定可能な高度分布モデルの構築を目指して研究を進めた。ここでは、アドバルーンを用いた観測実験と周囲の構造物情報を統合した無線信号高度分布モデルの構築を行った。高度分布のモデル化により、地上および上空の実観測値を活用することで3次元の無線信号状態を推定する技術の基礎を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：This research was proceeded to generate dense spectrum sharing environment among multiple systems by establishing a radio signal power model of height pattern from the measurement results at the surface of land and the upper air. Here, high dense height pattern model of the radio signal is derived by using experimental measurement results using measurement device on a balloon. By using height pattern modeling, we can confirm that measurement results at the surface of land and the upper air can establish the prediction of the radio signal of different attitude targeting 3 dimensional wireless signal status.

研究分野：移動通信

キーワード：コグニティブ無線 電波環境マップ 無線信号分布測定 電波伝搬モデル

1. 研究開始当初の背景

無線資源の不足から、電波のすき間の活用に期待が集まっている。電波のすき間を高密度に利用するには、既存システム信号の電波強度を正確に推定することが重要であり、極限までの周波数共用に可能性が生まれる。電波強度の予測には、チャンネルモデルを使う方式が通常使われるが、本研究代表者は実測による電波強度予測による電波資源拡大の可能性に着目してきた。無線信号を実測・データベース化することであらゆる場所の無線資源の利用状況を可視化でき、それを活用した周波数共用は飛躍的に高密度な利用が可能となる。これまで、車載無線機による道路上の電波観測結果に基づくデータベース構築で有用性を検証しているが、これでは面的な無線信号分布の把握はできなく応用範囲が限定的であった。そこで、本研究課題では、上空での無線信号観測と地上での無線信号推定を結びつけるため、無線信号の高度分布のモデル化を行う。モデルの精度を高めるため、高度分布を実観測により取得し、それを周囲の建物などの空間情報を加味したモデルとすることで、上空での実測に基づく面的な無線環境マップから任意の高度での無線環境の予測を可能とする。

2. 研究の目的

本研究課題では、システム間の相互干渉を極限まで減らし、高密度に複数システムが共用可能な環境を創成するため、上空の面的な無線信号観測結果から、地上までの電波の高度分布を推定可能な高度分布モデルの構築を目指し、無線資源の高密度利用に資する無線電波伝搬の高度分布モデル化、アドバルーンを用いた観測実験と周囲の構造物情報を統合した無線信号モデルの構築を行い、面的な無線信号分布の把握を基に、高度分布のモデル化により上空から地上までの無線信号状態を推定することで、3次元の無線信号状態を推定する技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、信号強度の高さ方向でのモデル化を目的に、[a]観測実験、[b]実験結果に基づく信号強度の効率的なモデル化手法の検討の2つを行なった。ここでは、[a]の観測実験内容について述べる。[b]の詳細なモデル化手法については、次章で述べる。

(1) 高さ方向の信号強度測定実験

実環境での高さ方向の信号電力分布データを取得するため、バルーンを用いた信号電力の高度測定実験を行った。測定対象は東京スカイツリーの地上波デジタル放送の信号とした。受信点は送信点からおよそ 25km 離れた地点で、市街地環境に相当する電気通信大学キャンパスで行った。図 1 に観測地点の俯瞰図を示す。測定は送受信局間に存在する高層建造物の影響評価を主目的とし、図中に示す 2 地点で行なった。地点 A は観測地点から放



図 1 観測地点の俯瞰図

送局方向 81m の位置に高さ 30m の建造物が存在し、建造物屋上から送信局は見通し環境となっている。加えて、周囲に 25m 程度の建造物が密集している。一方、地点 B では観測地点から放送局方向 102m の位置に高さ 16m の建造物が存在し、地点 A と同様に、本建造物の屋上と送信局は見通し環境にある。また、地点 B では周囲に高さ 10m 程度の建造物が疎らに存在する。

(2) 観測機器

高さ方向の測定を実現するため、直径 2.3m、ペイロード 3kg のバルーンを使用した。図 2 に観測機器を示す。受信機には、無指向性アンテナを装着したソフトウェア無線機 USRP E110 を使用した。USRP は軽量な発泡スチロール製ボックス内に固定し、発泡スチロールに別途、気圧高度計 i-gotU GT820 pro を取り付けた。本高度計は USRP と独立して動作し、1 秒毎に地上からの高度を記録できる。また、USRP には GPS モジュール Garmin USB 18x を接続した。GPS モジュールより取得した観測時刻を USRP での観測値と対応付け、実験後に高度計に蓄積された時刻ごとの高度と比較することで、観測値と高度情報の同期が可能となる。なお、USRP は 6V 鉛蓄電池により屋外駆動を実現している。これらの機器が搭載された発泡スチロール

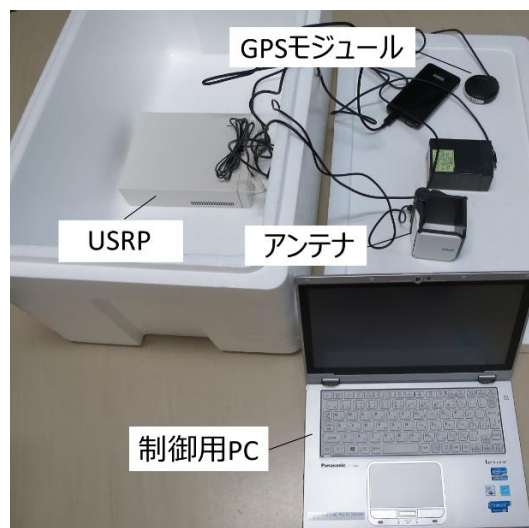


図 2 観測機器



図 3 実験システム

製ボックスをバルーンに搭載し、制御用のロープを取り付けた。本実験系によって、任意の高さの観測を実現する。バルーンと測定機器を組み合わせた実験システムを図 3 に示す。

(3) 測定方法

今回測定を行ったチャンネルと中心周波数を表 1 に示す。制御用の PC から、USRP で自律的に動作する測定プログラムを実行し、制御用の PC と切り離れた状態で測定を行った。測定機器で地上 0m から 50m までの高度を、マルチパスフェージングの影響を除くためにサンプリングレート 200kHz で 1024 サンプルを高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT) を行ない、これを 1 回の観測受信電力として連続的に記録した。実験中、バルーンは風の影響により空中において測定地点から水平方向に 10m 程度の移動が生じた。また、地上での受信電力値は実観測電波環境データベースから取得することを想定して、データベース構築時に、局所的な電力変動を取り除く処理を行うことを想定し、測定地点付近の 5 点の受信電力を 5 分間ずつ観測した結果を平均化した。

表 1 観測対象のチャンネル

Channel	Center Frequency [MHz]
16	491.142857
21	521.142857
22	527.142857
23	533.142857
24	539.142857
25	545.142857

4. 研究成果

(1) 高さ方向信号推定法

図 4、5 に全観測値と高さ 1m 刻みの平均受

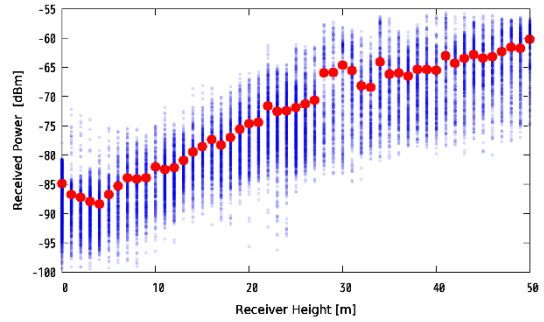


図 4 地点 A の観測値

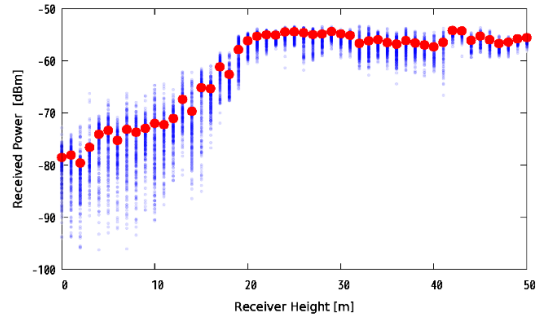


図 5 地点 B の観測値

信電力を示す。本結果に基づいて、市街地環境における受信機の高さ方向での詳細なモデル化手法を検討する。

本研究では、送信局は対象エリア内の建物よりも十分高い位置に設置されているものとし、送信局の位置と高さは既知とする。加えて、地図情報により受信機周辺の建造物の位置と高さが明らかになっているものとする。また、地上 0m では見通し外環境であると仮定する。図 4、5 の結果を踏まえると、見通し環境の高度では受信電力が安定的であり、0m から見通し環境の高度までの高さでは、高さの変化に伴って受信電力が変化すると考えられる。また、送信点から受信点へ屋上を超えて到達する伝搬では、経路の最終の建造物となる受信機近傍の建造物の影響が支配的であることが知られている。そこで、受信機近傍で送信機と直線状に存在する建造物による受信機のアンテナ高に基づく回折損失を考慮した推定手法を提案する。受信機のアンテナ高が見通しとなる高さになったとき、建造物による回折損失は無視できる。上空の観測値は見通し環境の電力であると考えられるため、高さ h の受信機の受信電力は dBm ドメインでは式(1)で推定できる。

$$P_p(h) = P_{ubh} - L(h) \quad (1)$$

ここで、 P_{ubh} は無人航空機などによる観測で構築された上空の電波環境データベースから得た電力値である。また、建物の角の遮蔽による回折損失はナイフエッジ回折モデルによって計算可能である。奥村-秦モデルを代表とする電波伝搬モデルは、送受信点間の全経路の伝搬損失をモデル化するものである。一方、本提案手法では、推定点における地上と上空の観測値、および周囲建造物の情報を利用することで、送受信点間の全経路の伝搬モ

デルは用いない。推測を行なう地点の上空の見通し環境と比較した各高度の高さに依存した損失のみを計算することで信号電力の高さ方向での推定を実現できる。本研究では、 $L(h)$ の推定について、ナイフエッジモデルによる推定、マルチパスを考慮した推定（周辺建造物を考慮した推定および直線補間による推定）手法を検討する。詳細を以下に記す。

①ナイフエッジモデルによる推定

送受信点間の最短経路に対し、経路差が $\lambda/2$ 以内となる経路の軌跡から作られる空間を第一フレネルゾーンという。無線通信では電力は主に第一フレネルゾーン内で伝送されることが知られており、第一フレネルゾーン内に障害物がない場合は見通し環境とみなせる。第一フレネルゾーン内に障害物が存在する場合でも、電力の一部は回折によって回りこんで伝送される。障害物がナイフの刃のような形状である場合、回折損失の計算が可能となり、次のように表される。まず、送受信点間の複数の地形パラメータから、遮蔽の度合いを単一の無次元のパラメータで表すクリアランス係数 v を定義する。

$$v = h_o \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2)$$

ここで、 h_o は送受信点を結ぶ直線からの遮蔽物の高さ、 d_1 は送信点から遮蔽物の距離、 d_2 は受信点から遮蔽物の距離である。ナイフエッジ回折による損失は v を使って式(3)で表される。

$$J(v) = -20 \log \left(\frac{\sqrt{\{1 - C(v) - S(v)\}^2 + \{C(v) - S(v)\}^2}}{2} \right) \quad (3)$$

ここで、 $C(v)$ 、 $S(v)$ はフレネル積分を表す。式(2)により計算した損失を式(1)中の $L(h)$ に代入し、受信電力値を推定する。

②マルチパスを考慮した推定手法

ナイフエッジモデルによる推定では、受信機周辺に存在する建造物によるマルチパスの影響を考慮していない。そのため、地点Aのように周囲に建造物が多く存在する地点ではマルチパスによって高い推定誤差が生じると考えられる。市街地伝搬では、屋上を越えて到来する伝搬路の他にマルチパスによる到来が考えられるため、受信機周囲の環境からマルチパスの影響を考慮する必要がある。そこで、ナイフエッジ回折モデルに加えて、受信局と周辺の構造物の位置関係を考慮したマルチパスの推定法、および直線補間による推定の2つを検討する。

(a) 周辺建造物を検出する推定モデル

受信機周囲の環境の建物を検出し、マルチパスによる受信電力変動を評価することで受信電力を推定する。受信電力は式(1)の $L(h)$ について、ナイフエッジ回折モデルに加えて、マルチパスによる利得を考慮し、式(4)で表す。

$$L(h) = J(v) - G(h) \quad (4)$$

高度に依存した回折損失に加えて、市街地環境でのマルチパス波による利得 $G(h)$ を以下のように考える。まず、ナイフエッジモデルによる地上0mでの推定値と電波環境データベースの地上の受信電力値 P_{red} との差分 $diff_{ground}$ をマルチパスによる利得の補正の基準として、式(5)を得る。

$$diff_{ground} = P_{ubh} - L_{knifeedge}(0) - P_{red} \quad (5)$$

次に、マルチパスによる利得を考慮するため、次の手順に従って受信機周囲の環境を評価する。

- 1) 受信点を中心に一定の半径内を放射レイ状に周囲を探索して、建造物との交点を検出する。
- 2) 交点について、レイごとに受信点からの距離順に並べ替え、レイ内で、ある交点の建造物の高さが、より受信機に近い交点の建造物の高さを下回る場合は交点を無視する。

以上より抽出したN個の交点 $i = 1 \dots N$ について、以下の評価値を計算する。

$$X_i(h) = \begin{cases} diff_{ground}, & h_i \geq h \\ 0, & h_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 h_i は交点における建造物の高さで、 h は受信機の高さである。追加損失は重み付き平均によって式(7)で得る。

$$G(h) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i X_i(h)}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad (7)$$

重み ω_i は建物の高さで生成し、 $\omega_i = h_i$ で得る。

(b) 直線補間モデル

先行する文献による結果から、全観測値から高さ方向に補間することにより、高精度となる結果が得られている。そこで、上空と地上の観測値の間の受信電力値を対数軸で直線補間する推定手法についても検討する。

直線補間モデルでは、電波環境データベースより得た地上の受信電力値と上空の受信電力値を高さの関数として直線補間する。

補間する点は地上0mと、クリアランス係数 $v = \alpha$ (α : 定数)となる高さとする。

(2) 評価結果

図6、7に地上波デジタル放送チャンネル 23

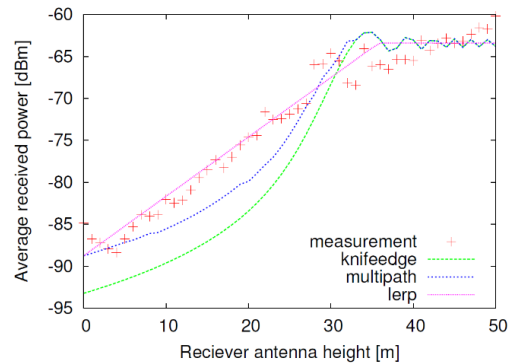


図6 地点Aの各手法による推定

表 2 観測対象のチャンネル

Channel	地点AのRMSE [dB]			地点BのRMSE [dB]		
	knifeedge	multipath	lerp	knifeedge	multipath	lerp
16	3.73	5.21	2.2	4.73	3.66	3.15
21	5.25	3.74	1.83	3.31	2.55	2.2
22	6.11	4.31	2.34	3.37	3.28	2.79
23	5.35	2.99	1.82	2.95	2.62	2.09
24	4.91	3.04	1.7	2.71	2.27	1.67
25	6.03	3.84	1.87	3.51	3.02	2.47

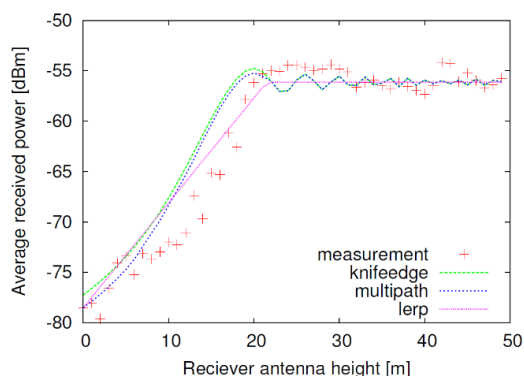


図 7 地点 B の各手法による推定

の観測実験による実測値の平均受信電力についてナイフエッジ回折モデルを knifeedge、周辺の建造物を検出する推定モデルを multipath、直線補間モデルを lerp として示す。また、表 2 に観測した全チャンネルの各推定手法による RMSE (Root Mean Square Error) を示す。ナイフエッジモデルによる回折のみを考慮した推定手法と比較して、マルチパスを考慮したモデルおよび線形補間による推定手法により推定精度が向上することを確認した。特にマルチパスにより受信電力変動が大きいと考えられる地点 A において、4[dB]程度の RMSE の改善を確認した。

次に、線形補間によって推定を行う手法において、横軸に補間を行う点のクリアランス係数をとった時の RMSE を図 8、9 に示す。見通しの定義はクリアランス係数が-1.0 のときであったが、線形補間を行う場合には-1.0 が必ずしも最適ではないことが明らかになった。また、チャンネル毎に最小の RMSE となるクリアランス係数は異なっているものの、最適なクリアランス係数を選択して線形補間を行った場合、RMSE は 1.5~3[dB]程度の制度になることが明らかになった。

特に、地点 A ではナイフエッジ回折モデルによるカーブよりも線形に近い分布となっている。マルチパスが多く到来する環境では、ナイフエッジ回折の成分が相対的に少なくなり、受信電力分布が線形に近づくと予測される。

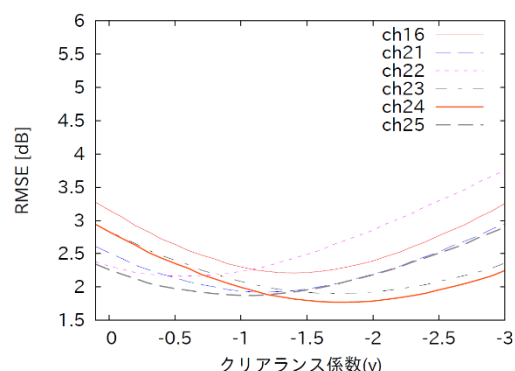


図 8 地点 A のクリアランス係数対 RMSE

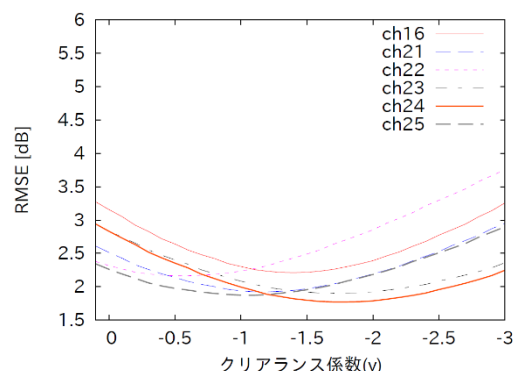


図 9 地点 B のクリアランス係数対 RMSE

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 市川浩次、王昊、藤井威生、” 電波環境データベース連携による市街地環境の高さ方向信号電力分布推定,” 電子情報通信学会スマート無線研究会、2015 年 5 月 28 日、明石市立産業交流センター (兵庫県明石市)
- ② Koya Sato, Takeo Fujii, “Average Interference Power Constraint with Measurement-based Spectrum Database,” IEEE WCNC Workshop on Smart Spectrum 2015, 2015 年 3 月 9 日、ニューオーリンズ (米国)

- ③ 池島祐介、北村優行、藤井威生、” 地上波デジタル放送信号高度分布の測定実験,” 電子情報通信学会総合大会、2014年3月19日、新潟大学（新潟県新潟市）

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