

マルチパス環境におけるアレーアンテナを用いた無線局の位置推定

Wireless Terminal Localization Using Array Antenna in Multipath Environments

80222040 菊池 祥平

指導教員 佐野 昭

1 まえがき

近年無線局の位置情報サービスや非常電話、違法局の取締りなどのために無線局の位置を正確に推定する必要性が高まっている．本研究は都市部などのマルチパス環境下で無線局の位置を高精度に推定することを目的として、アレーアンテナにより測定した屋外伝搬実験データを用いた解析を行う．まず実験で得られたデータから実験環境に適した受信信号モデルを示し、到来方向や角度広がりなどの空間パラメータを推定する手法を提案する．さらに実験地周辺の高精度な三次元地形データを用いたレイトレーシングによる伝搬解析と、提案した解析手法による実験結果を最適に組み合わせることで無線局の位置を高精度に推定する手法を提案する．

2 周辺散乱信号モデルと散乱パラメータ

図 1 に横須賀市庁舎周辺の実験地、および送受信点の場所を示す．受信点 (Rx) として 8 素子の直線アレーアンテナを高さ 15m のビルの屋上に設置した．送信点 (Tx) は高さ 1.5m であり、受信点から見通し内 (Tx1) および見通し外 (Tx2) の地点にそれぞれ設置され、搬送波周波数 2.335GHz, $\pi/4$ シフト QPSK 変調した信号を送信した．実験の詳細については文献 [1] を参照されたい．本研究では図 2 のような伝搬環境を想定して受信信号を複数の周辺散乱モデル [1],[2] による仮想信号の和とし、テイラー展開による一次近似を用いて次式のように表す．

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{L_k} \alpha_{kl} \mathbf{a}(\theta_k + \tilde{\theta}_{kl}) s_k(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1) \\ &= \sum_{k=1}^K [\gamma_k \mathbf{a}(\theta_k) + \phi_k \mathbf{d}(\theta_k)] s_k(t) + \mathbf{n}(t) \\ &\approx \sum_{k=1}^K [\mathbf{a}(\theta_k) + \rho_k \mathbf{d}(\theta_k)] \tilde{s}_k(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2) \end{aligned}$$

ここで $\mathbf{d}(\theta) = \partial \mathbf{a}(\theta) / \partial \theta$,

$$\gamma_k = \sum_{l=0}^{L_k} \alpha_{kl}, \quad \phi_k = \sum_{l=0}^{L_k} \alpha_{kl} \tilde{\theta}_{kl} \quad (3)$$

である．また、 $\rho_k = \phi_k / \gamma_k$, $\tilde{s}_k(t) = \gamma_k s_k(t)$ とした． K は図 2 の仮想信号の数、 $\mathbf{a}(\theta)$ は方向ベクトル、 α_{kl} は複

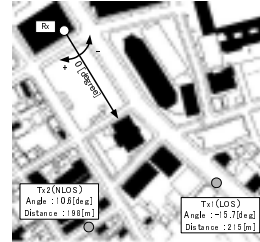


図 1: 実験地周辺の地図.

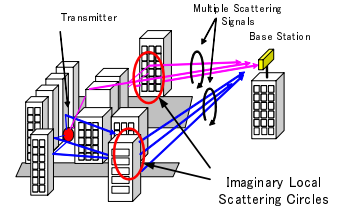


図 2: 複数周辺散乱モデル.

素振幅、 $\mathbf{n}(t)$ は雑音である． $\theta_k + \tilde{\theta}_{kl}$ は第 k 信号源の l 番目の信号の到来方向を表し、 $\tilde{\theta}_{kl}$ は θ_k を中心に正規分布と仮定する．本研究ではまず式 (2) で表される信号の到来方向 (DOA) θ_k 、散乱の度合いを示す散乱パラメータ (SP) ρ_k の推定値を求める．この SP は角度広がりや密接な関係があり、送信点周辺の環境により異なる．したがって、本研究では SP の絶対値 $|\rho_k|$ が信号の劣化度を表すとし、送信点周辺の伝搬環境を表すパラメータのひとつとして考える．次にレイトレーシング解析結果と比較するために、到来散乱波の角度広がり (AS) を推定する．

3 散乱パラメータ推定法の提案

散乱パラメータを推定するために、まずは信号源の数 K を Capon 法の波形より決定し、DOA $\hat{\theta}_k$ を MODE 法により推定する． ρ_k は次式の最小化問題により推定する．

$$[\hat{s}_k(t), \hat{\rho}_k] = \arg \min_{\tilde{s}_k(t), \rho_k} J(t) \quad (4)$$

ここで $J(t)$ は次の評価関数として定義する．

$$J(t) = \left| \mathbf{x}(t) - \sum_{k=1}^K [\mathbf{a}(\theta_k) + \rho_k \mathbf{d}(\theta_k)] \tilde{s}_k(t) \right|^2 \quad (5)$$

信号の推定値 $\hat{s}_k(t)$ の最尤推定値は次のように与えられる．

$$\hat{\mathbf{s}}(t) = (\hat{\mathbf{V}}^H \hat{\mathbf{V}})^{-1} \hat{\mathbf{V}} \mathbf{x}(t) \quad (6)$$

$\hat{\mathbf{s}}(t) = [\hat{s}_1(t), \dots, \hat{s}_K(t)]^T$, $\hat{\mathbf{v}}_k = \mathbf{a}(\theta_k) + \rho_k \mathbf{d}(\theta_k)$, $\hat{\mathbf{V}} = [\hat{\mathbf{v}}_1, \dots, \hat{\mathbf{v}}_K]^T$ とする．式 (6) を用いて ρ_k は MMSE アルゴリズムにより推定される．

4 角度広がり推定法の提案

次にレイトレーシング解析で得られる結果と比較するために、受信信号の角度広がり (AS) を推定する．ここ

で AS とは式 (1) における $\hat{\theta}_{kl}$ の角度分布の標準偏差を表す統計量である．この AS を求めるために文献 [2] で提案されている最尤推定法が有効とされているが，図 2 で表されるような従来の周辺散乱モデルが複数混在する場合は極小値問題や収束性の問題が生じる．そこで本研究では式 (6) を用いて空間的に受信信号を分割することでこれらの問題を解決する AS 推定法を提案する．まずは次式と SP を含む式 (2) により受信信号を空間的に分割して推定し，それぞれの共分散行列を求める．

$$\hat{\mathbf{x}}_k(t) = \hat{\mathbf{v}}_k \hat{s}_k(t) \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_k = \text{E} \left[\hat{\mathbf{x}}_k(t) \hat{\mathbf{x}}_k^H(t) \right] \quad (8)$$

文献 [2] の最尤推定法に式 (7), (8) を適用することで AS の推定値 $\hat{\sigma}_{\theta_k}$ は DOA $\hat{\theta}_k$ と共に次式のように与えられる．

$$[\hat{\theta}_k, \hat{\sigma}_{\theta_k}] = \arg \min_{\theta_k, \sigma_{\theta_k}} \text{Tr} \left[(\hat{S}_k \mathbf{R}_k(\theta, \sigma_{\theta}^2) + \hat{\sigma}_{n_k}^2 \mathbf{I}) \hat{\mathbf{R}}_k^{-1} - \mathbf{I} \right]^2 \quad (9)$$

ここで \mathbf{R}_k は信号共分散行列の理論値であり，第 (p, q) 成分が次のように表される [2]．

$$[\mathbf{R}_k(\theta, \sigma_{\theta}^2)]_{pq} = e^{j \frac{2\pi d}{\lambda} (p-q) \sin \theta} e^{-2 \left[\frac{\pi d}{\lambda} (p-q) \cos \theta \right]^2 \sigma_{\theta}^2} \quad (10)$$

以上より式 (4) と式 (9) から受信信号の到来方向 $\hat{\theta}_k$ ，散乱パラメータ $|\hat{\rho}_k|$ ，角度広がり $\hat{\sigma}_{\theta_k}$ がそれぞれ得られた．

また，位置推定をする際に送受信点間が見通し内と見通し外のどちらに位置するかを受信信号から識別することが重要である．これは電波伝搬の性質として，見通し内における受信信号の振幅分布がライス分布となり，見通し外においてはレイリー分布になるからである．本研究ではこの性質を利用して式 (7) を再び用いて Tx1, Tx2 がそれぞれ見通し内外のどちらにあるかを推定し，さらに見通し内の場合は直接波の方向も判定した．この結果を各パラメータの推定結果と共に表 1 に示す．

5 レイトレーシング解析を併用した位置推定法の提案

本研究における位置推定法は，実験地周辺の高精度な三次元の地形データを用いたレイトレーシング (RT) 解析を用いて送信点周辺の伝搬環境を特徴付けることにより，無線局の位置を正確に推定できる．RT シミュレータでは受信点を実験と同じ位置に設置し，得られた受信データから DOA や AS などの空間的なパラメータが解析できる．本研究ではこの RT 解析を用いて位置推定をするために，表 1 で得られた DOA や AS といった空間パラメータを用いておおよその無線局の推定範囲を決定し，シミュレータ内で推定範囲に置かれた複数の擬似送信点から伝搬解析を行い得られる空間パラメータを実験値解析結果と比較することで無線局の位置を特定する．見通し内の Tx1 では送信点が直接波方向に存在すると分かる

表 1: 各パラメータの推定値

Tx No.	Tx1(見通し内)		Tx2(見通し外)	
Path No.	Path1	Path2	Path1	Path2
$\hat{\theta}_k$ [deg]	-15.8	45.6	12.2	-31.2
$ \hat{\rho}_k $	0.0057	0.2935	0.0687	0.0732
$\hat{\sigma}_{\theta_k}$ [deg]	2.21	3.84	3.12	4.60
備考	直接波	間接波	間接波	間接波

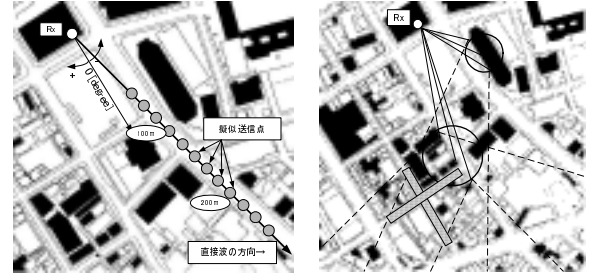


図 3: 無線局の推定範囲 (左:Tx1, 右:Tx2).

ので，図 3(左) のようにその方向沿いに等間隔に擬似送信点を設置して RT 解析を行い，得られる角度広がりを表 1 の結果と比較した．見通し外の Tx2 では得られた二つのパスの両方の情報を用いて図 3(右) の斜線部にように推定範囲を決定した．図 4(左) は Tx1 において，横軸に送受信点間の距離，縦軸に実験と RT 解析による角度広がりとの差の逆数を表している．最も値が大きい点が位置の推定値として得られ，前後 10m を区別して推定できることが分かる．図 4(右) は Tx2 における Path1 の角度広がりとの違いを表しており真値を原点に設定した．結果より見通し外においても周囲 10m の誤差範囲内で分離推定できた．以上より，本研究で提案した手法により無線局の位置が高精度に推定できることが確認された．

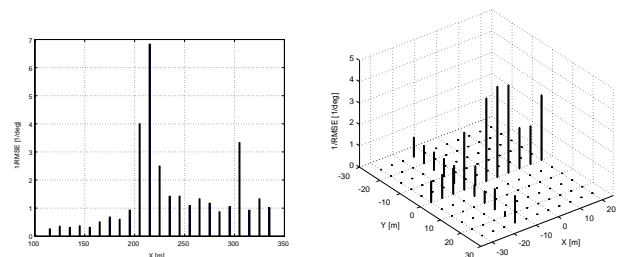


図 4: 実験値，RT 解析の角度広がり比較 (左:Tx1, 右:Tx2).

参考文献

- [1] H. Tsuji, et. al., "A new approach to array beamforming using local scattering modeling," *IEEE VTC 2001-Fall*, pp.1284-1288, 2001.
- [2] T. Trump, et. al., "Estimation of Nominal Direction of Arrival and Angular Spread Using an Array of Sensors," *Signal Processing*, vol.50, pp.57-69, 1996.