

Estimation of Propagation Properties at a Remote Location Using MUSIC Method in a 3-Dimensional Space

Shunsuke ABE*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received March 16, 2018)

In a wireless communication environment, radio waves are reflected, diffracted and scattered by buildings and obstacles. Because radio waves propagate through the environment, mutual interference of the radio waves occurs and radio propagation properties, such as the amplitude and the phase of the received signal, vary significantly. It is called multipath fading. In addition, radio propagation properties fluctuate widely and spatially. In other words, the propagation properties are local information which can be obtained only at a certain location. In general, we cannot estimate the propagation properties at a remote location over the locality range of the multipath fading. Therefore we study a method to estimate the radio propagation properties at a remote location from a receiving point. An estimation method for such purpose has been studied. In the method, the multipath environment is analyzed by estimating the directions of arrival (DOAs) by the Multiple Signal Classification (MUSIC) method and the complex amplitudes by the least square method, respectively. Using the estimated DOAs and the complex amplitudes of the arriving waves, the propagation properties at the target point are estimated based on the plane wave assumption for each arriving wave. The estimation method has so far been studied assuming a 2-dimensional space. However, an estimation method of a 3-dimensional space has not been yet established. This paper discusses a new estimation method for adapting the method to a 3-dimensional space by using a planar array antenna.

Key words : estimation of propagation properties, MUSIC method, multipath environment, 3-dimensional space

キーワード : 伝搬特性推定, MUSIC 法, マルチパス環境, 3次元空間

3次元環境における MUSIC 法を用いた他地点伝搬特性推定法

阿部 俊輔, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. まえがき

移動通信や室内の無線通信システムにおいて、電波は建物やビル、障害物や壁により反射や回折、散乱を起し、複数の異なった伝搬経路、マルチパスを経て受信点に到達する。このマルチパス環境では

電波は互いに複雑に干渉し合い、電波の伝搬特性は空間的に大きく変動する。これは伝搬特性の局所性と呼ばれ、その局所性の範囲を超えた地点、つまり受信点からフェージングの相関距離以上離れた地点のフェージング変動は、基準となる受信点のもの

* Faculty of Science and Engineering, Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

とは異なるものになる^{1,2)}. 先行研究において, このフェージングの相関距離以上離れた地点の伝搬特性を推定する他地点伝搬特性推定方式が検討されている³⁻⁶⁾. この方式ではまず MUSIC(Multiple Signal Classification)法^{7,8)}による到来方向推定を利用して, マルチパス波を構成する各到来波の到来方向を求める. 次に各到来波の複素振幅を最小二乗法により求め, 最後に得られたマルチパス各波の到来方向および複素振幅を用いて, 推定対象点での伝搬特性を得る.

この他地点伝搬特性推定技術は, さまざまな電波伝搬特性を利用した技術に応用が可能である. 例えば, 電波伝搬特性を利用した秘密鍵共有方式⁹⁻¹⁴⁾では, 盗聴可能性が大きくなり^{15,16)}, 新たな盗聴耐性の評価ができる. また, 位置指紋による端末位置推定方式¹⁷⁻²⁰⁾に対しては, 事前測定で必要な大量のデータベースが不要になる可能性がある.

文献^{5,6)}では, 2次元環境を対象として方式を提案し, 基本的な推定特性の分析が行われている. しかしながら, 3次元環境に適応した方式はまだ確立されていない. そこで筆者らは, まず3次元環境を対象として, 直交する2つのリニアアレーアンテナを用いた推定方式を検討し, その推定性能について評価した^{21,22)}. これに対して本稿では, より占有面積の小さいアンテナシステムにすることを目的として, アンテナ配置を平面アレーアンテナに変更した方式と, その推定性能を示している.

2. 2次元環境における他地点伝搬特性推定

他地点伝搬特性推定を3次元に拡張するにあたって, 従来法である2次元における他地点伝搬特性推定^{5,6)}を基に, 本稿と共通する推定手順について説明する. なお, 従来手法および本稿での3次元環境における推定の両者を含めて, 「他地点伝搬特性の推定」とは, 受信アンテナから離れた推定対象点における無線電波信号の複素振幅を推定することとする. Fig. 1は2次元他地点伝搬特性推定における到来波モデルおよび推定システムを示している. 前提として, 到来するマルチパス波は平面波とし, 到来 L 波のうち $l(l=1\sim L)$ 番目の到来波の到来方向を

θ_l とする. アンテナ配置は Fig. 1に示すように, アンテナ素子を一次元上に等間隔に並べたリニアアレーアンテナ(アンテナ間隔 d)を用いる. この手法では, 各到来波を個々に分解してその伝搬特性を推定しているが, その推定にあたり, 位相を規定する基準地点を定める必要がある. 本稿ではその地点を推定の基準点と呼び座標軸の原点としている. なお, 各アンテナ素子の位置, 推定対象点の位置(Fig. 1において極座標で (r, θ) とする), 基準点位置の相対的な位置関係は正確に得られているものとする.

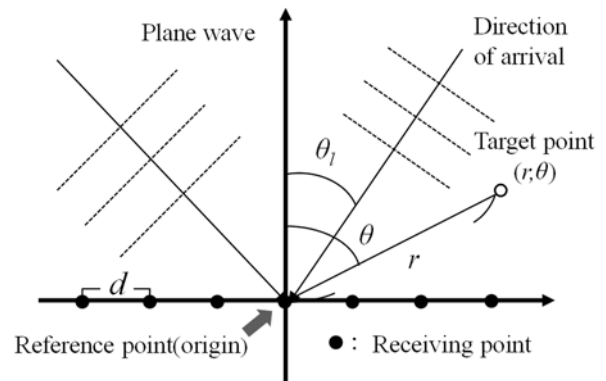


Fig. 1. Arriving wave model and estimation system in a 2-dimensional space.

2次元環境における伝搬特性の推定手順を以下に示す.

- (1) 各アンテナ素子の受信信号を用いて MUSIC 法の到来方向推定により, 到来方向 θ_l を推定する.
- (2) 各アンテナ素子の受信信号と MUSIC 法によって推定した到来方向を利用して, 基準点における各到来波の複素振幅を最小二乗法で求める.
- (3) 各到来波について, 基準点から推定対象点までの位相差を考慮して推定対象点における複素振幅を求め, これを全到来波に対して加えることにより推定対象点での伝搬特性を得る.

上記推定手順は, 3次元環境においてもほぼ共通している. 詳細は次章で示す.

3. 3次元環境における他地点伝搬特性推定

3.1. 想定する到来波モデルおよび推定システム

Fig. 2 に MUSIC 法に基づく 3 次元他地点伝搬特性推定における到来波モデルおよび推定システムを概念的に示す. 3 次元環境を対象にした検討は文献^{21,22)}においても, 2 次元環境における推定システムの拡張として, 直交する 2 つのリニアアレーアンテナを用いて行なっている. 本稿では同図に示すように, $N(=N_x \times N_y)$ 個のアンテナ素子を等間隔格子点上に配置(アンテナ間隔 d)した正方形平面アレーアンテナを用いる. 各アンテナ素子の受信信号は $c_{n_x n_y}(n_x=1 \sim N_x, n_y=1 \sim N_y)$ と表す. また 2 次元環境同様, 到来するマルチパス波は平面波とし, 各アンテナ素子の位置, 推定対象点の位置(Fig. 2 において 3 次元極座標で (r, θ, φ) とする), 基準点位置(本稿では原点)の座標は正確に得られているものとする. 到来 L 波のうち $l(l=1 \sim L)$ 番目の到来波の到来方向は, 天頂角を θ_l , 方位角を φ_l で表す.

3 次元他地点伝搬特性推定では到来方向推定により天頂角 θ_l と方位角 φ_l を推定する必要がある. この θ_l と φ_l を推定する 3 次元空間における到来方向推定は, MUSIC 法の中でも平面アレーアンテナを用いた手法としてすでに確立されている²³⁾. 本稿ではこの手法を半球に限定して用いる. 推定された値をそれぞれ $\hat{\theta}_l$, $\hat{\varphi}_l$ とする.

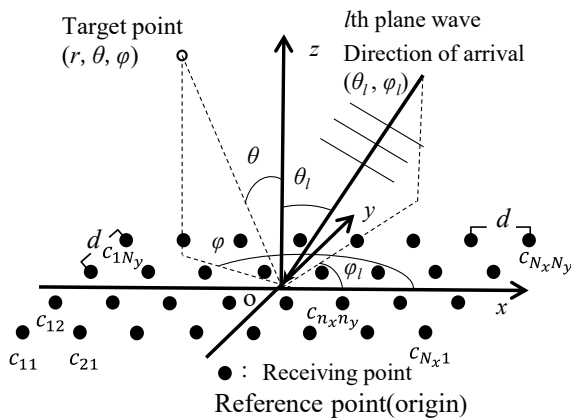


Fig. 2. Arriving wave model and estimation system in a 3-dimensional space.

3.2. 各到来波の複素振幅推定と推定対象点における伝搬特性の推定

前章で示した推定手順(2)および(3)について 3 次元環境における具体的計算法を以下に示す.

推定手順(2)において, l 番目の到来波の基準点における複素振幅の推定値を仮に \hat{F}_l とおくと, 各アンテナ素子における受信信号の推定値 $\hat{c}_{n_x n_y}$ は, \hat{F}_l を用いて複素平面波の和として次式で表せる.

$$\hat{c}_{n_x n_y} = \sum_{l=1}^L \hat{F}_l \exp \left\{ -2\pi j \left(\frac{(2n_x - N_x - 1)d}{2} \sin \hat{\theta}_l \cos \hat{\varphi}_l + \frac{(2n_y - N_y - 1)d}{2} \sin \hat{\theta}_l \sin \hat{\varphi}_l \right) \right\} \quad (1)$$

よって, 推定受信信号 $\hat{c}_{n_x n_y}$ と, 実際の受信信号 $c_{n_x n_y}$ との間の二乗誤差和 ε は

$$\varepsilon = \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{n_y=1}^{N_y} |\hat{c}_{n_x n_y} - c_{n_x n_y}|^2 \quad (2)$$

となる. 推定手順(2)では, この ε を最小化して, \hat{F}_l の最適値を求める.

次に, 推定手順(3)における推定対象点での伝搬特性 \hat{s} は, 1 つの到来波について基準点から推定対象点までの位相差を考慮して対象点における複素振幅を求め, これを全到来波に対して加えることにより合成された信号を推定する. MUSIC 法で求めた各到来波の方向ベクトルと基準点から推定対象点への方向ベクトルのなす角を γ_l と表すと. \hat{s} は複素振幅の推定値 \hat{F}_l を用いて,

$$\hat{s} = \sum_{l=1}^L \hat{F}_l \exp \left(-2\pi j \frac{r}{\lambda} \cos \gamma_l \right) \quad (3)$$

と表せる.

4. シミュレーションによる推定精度の検討

4.1. 到来波モデルおよび推定システム諸元

3 章で示した 3 次元環境を対象とした方式について, 計算機シミュレーションにより推定精度を調べた. Table 1 に到来波モデルおよび推定システムのパラメータを示す. 本稿では到来波は全て相関波とし, 到来波数は 5 波とした. 相関波の到来方向を推定するには相関抑圧が必要であるが, 本稿では空間平均法を用いる⁸⁾. アンテナ素子数が 36(6×6) 個の

平面アレーから 16(4×4)個のサブアレーを取り出して空間平均法を 9 回行う。また、到来方向は全て固定し、アンテナ間隔 d は半波長、MUSIC 法による到来方向推定におけるスナップショット数は 40 とした。

なお、パラメータの変化に対する推定精度の特性を示すために、アンテナ素子数、SNR(Signal to Noise power Ratio)、および到来波数を適宜変化させた。

Table 1. Condition of arriving waves and specifications of estimation system.

Multipath environment	
Number of arriving waves	$L = 5$ (Correlated waves)
Direction of arrival	$(\theta_i, \varphi_i) = (30^\circ, 310^\circ), (10^\circ, 10^\circ), (55^\circ, 50^\circ), (45^\circ, 170^\circ), (20^\circ, 210^\circ)$
Amplitude of arriving waves	Rayleigh distributed
Phase of arriving waves	Random ($0^\circ \sim 360^\circ$)
SNR	40dB
Estimation system	
Antenna separation	$d = \text{Half wavelength}$
Number of antenna elements	$N(N_x \times N_y) = 36 (6 \times 6)$
Number of sub-array antenna elements	16 (4×4)
Snapshots of MUSIC	40

4.2. 推定結果の例

Table 1 の条件における推定結果の一例を示す。ここでは、推定伝搬特性と実際の伝搬特性の振幅比と位相差を用いて推定精度を表す。振幅比および位相差は以下の式で定義する。 s は実際の受信信号である。

$$\text{Amplitude ratio} : 20 \log \left| \hat{s} / s \right| \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

$$\text{Phase difference} : \arg \{ \hat{s} \} - \arg \{ s \} \quad [^\circ]. \quad (5)$$

推定対象点は、Fig. 3 に示すように角度を $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$ で一定とし、基準点(原点)からの距離を 1 波長, 50 波長, 100 波長と変化させた位置を仮定する。

推定対象点の位置は、以降の検討においても全て同様である。上式(4), (5)で定義された、振幅比および位相差の推定結果をそれぞれ Fig. 4, 5 に示す。両図の横軸の Trial は、到来波位相および雑音をランダムに変化させた試行回数である。

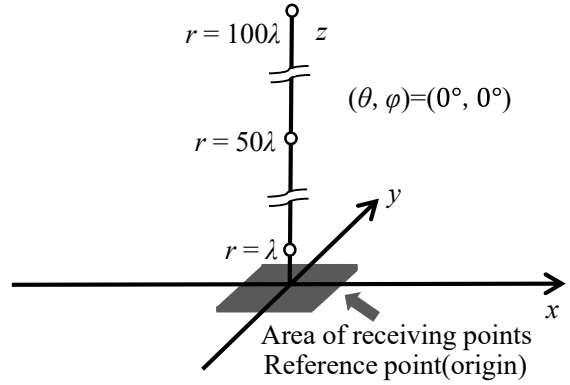


Fig. 3. Position of target points.

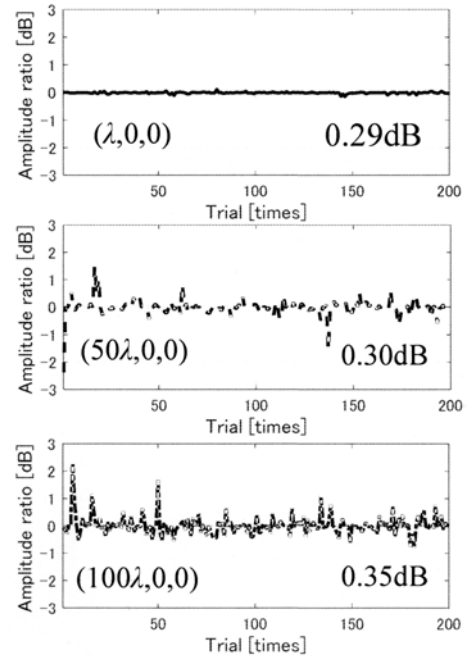


Fig. 4. Example of estimation of amplitude ratio.

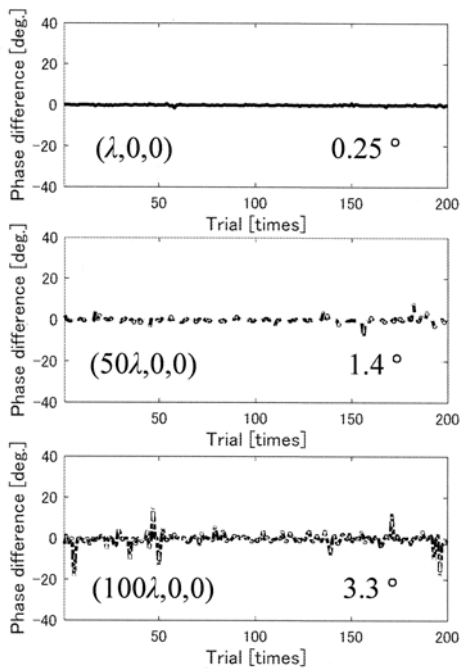


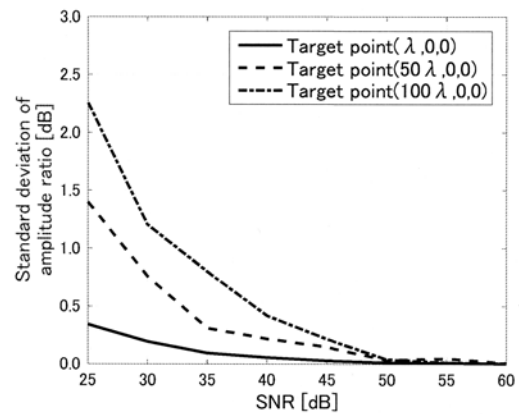
Fig. 5. Example of estimation of phase difference.

両図より、基準点から距離が遠い推定対象点では、わずかに推定精度が劣化していることがわかる。その劣化の範囲は、振幅比でおおよそ 2dB 以内、位相差で 20° 以内である。また Fig. 4 中の値は、異なる試行に対する振幅比の標準偏差(dB 値の標準偏差)を示しており、1 波長、50 波長、100 波長の距離の推定対象点それぞれで 0.029dB, 0.30dB, 0.35dB となった。同様に Fig. 5 中の値も、位相差の標準偏差を示している。ここから、振幅比および位相差の標準偏差が 3 地点とも 0dB および 0° に限りなく近く、Table 1 で示した比較的単純なマルチパス環境では、良好な推定精度が得られていることがわかる。Fig. 4 で示した振幅比の標準偏差を、本稿では振幅比標準偏差と呼び、以降の検討でも推定精度の指標として用いる。

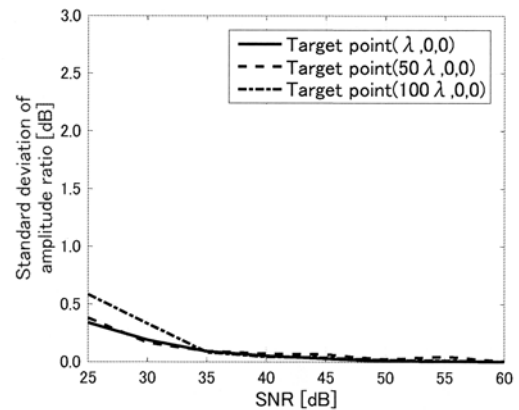
4. 3. SNR 変化の推定精度への影響

まず、Table 1 の条件から SNR を変化させた場合の振幅比標準偏差を Fig. 6 に示す。同図(a)では実際に MUSIC 法で推定した到来方向を、(b)では推定値ではなく到来方向の真値を、それぞれ用いて伝搬特性の推定を行っている。同図(a)の振幅比標準偏差は (b)に比べて大きい。特に低 SNR 領域においてこの

傾向が顕著である。この結果から、低 SNR 領域では MUSIC 法の推定精度が劣化して推定される到来方向に誤差が生じ、それが対象点における伝搬特性の推定に影響を与えていると考えられる。推定対象点の距離が基準点から遠いほど、この影響が大きくなることは、式(3)からも推測できる。以上のように MUSIC 法の到来方向推定誤差は推定対象点が基準点近傍にある場合にはその影響は小さいが、遠方にある場合には、推定精度に影響を与えることがわかる。



(a) Estimated angles by MUSIC method.



(b) Actual angles.

Fig. 6. Standard deviation of amplitude ratio for variation of SNR.

4. 4. アンテナ素子数変化の推定精度への影響

次に、Table 1 の条件からアンテナ素子数のみ変化させた場合の結果を Fig. 7 に示す。アンテナ素子数は、25(5×5)、36(6×6)、49(7×7)、64(8×8)と変化さ

せた. なお, サブアレーの素子数も $9(3 \times 3)$, $16(4 \times 4)$, $25(5 \times 5)$, $36(6 \times 6)$ と同時に変化させ, 空間平均法を 9 回適応できるよう調節した.

同図から, わずかではあるがアンテナ素子数が増加するほど推定精度は改善されていることがわかる. ただし, どのアンテナ数に対しても振幅比標準偏差は 0dB に限りなく近く, Table 1 の条件下ではアンテナ素子数は推定精度に大きな影響を与えないことがわかった.

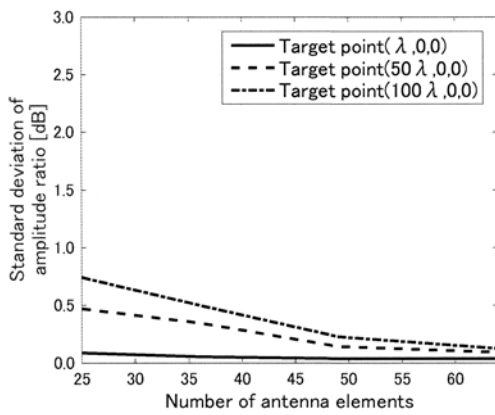
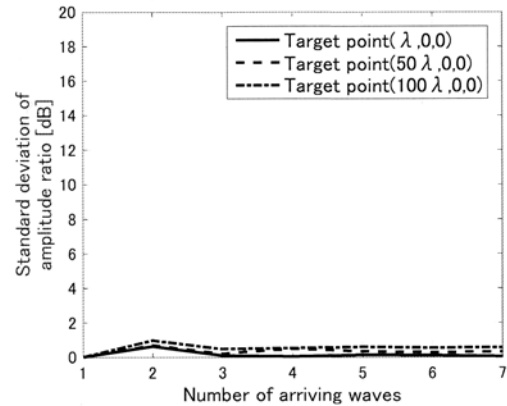


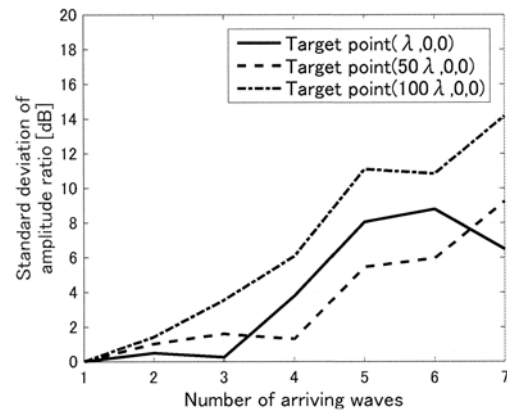
Fig. 7. Standard deviation of amplitude ratio for variation of antenna elements.

4. 5. 到来波数変化の推定精度への影響

最後に, 到来波数を変化させた場合の振幅比標準偏差の結果を Fig. 8 に示す. 同図(a)は複数波の到来方向をそれぞれの角度間隔が 25° 以上となるように固定した場合, (b)は到来方向を $0^\circ \leq \theta_l \leq 60^\circ$, $0^\circ \leq \varphi_l \leq 360^\circ$ の範囲でランダムに変化させた場合の結果である. 同図(a)では, 到来波数を増加させても振幅比標準偏差は極めて小さく, 到来波数変化の推定精度への影響は小さいことがわかる. 一方, 同図(b)では, 到来波数が増加するにつれ振幅比標準偏差も増加している. これは, 到来方向をランダムにすると到来波が近接するが発生し, MUSIC 法がそれらを分離不能⁸⁾となり到来方向推定誤差が増加するためであると考えられる. 到来方向がさらに多くなると, このような現象が発生する割合が高くなり, 到来方向, さらにはその結果である伝搬特性の推定精度が劣化するものと考えられる.



(a) Fixed direction of arrival.



(b) Randomized direction of arrival.

Fig. 8. Standard deviation of amplitude ratio for variation of number of arriving waves.

5. まとめ

本稿では, これまで 2 次元環境で検討されていた他地点伝搬特性推定を, 平面アレーアンテナを用いて 3 次元環境へ拡張した. 関連のある到来波を仮定した上で, 比較的簡易なマルチパス環境下での推定精度を調べ, 2 次元環境同様, 良好な推定精度が得られることを示した. また, 到来波モデルおよび推定システムの各種パラメータを変化させ, 3 次元環境における本方式の推定精度について示し, MUSIC 法の到来方向推定誤差との関係を調べた. 結果的に, 到来方向が MUSIC 法により十分推定可能な SNR やアンテナ素子数においては, 概ね良好な推定精度が得られた. 一方で到来波数が増加し, 到来方向が近接するような, MUSIC 法の到来方向推定精度が大きく劣化する条件下においては, 他地点伝搬特性

推定の精度も大幅に劣化することがわかった。さらに、MUSIC法の到来方向推定誤差の影響は低SNRであるほど大きくなった。このようにMUSIC法を用いた手法では、MUSIC法の到来方向推定の精度が直接的に、他地点伝搬特性推定の精度に影響することがわかった。今後の課題としては、球面波への応用や、MUSIC法の到来方向推定精度が大きく劣化する条件下での対応が挙げられる。

参考文献

- 1) 岩井誠人, 移動通信における電波伝搬 - 無線通信シミュレーションのための基礎知識 -, (コロナ社, 東京, 2012), pp.36-39.
- 2) 唐沢好男, デジタル移動通信の電波伝搬基礎 改訂版, (コロナ社, 東京, 2016), pp.6-9.
- 3) 井上恵輔, 丹後俊宏, 岩井誠人, 笹岡秀一, “他地点観測信号情報に基づく伝搬路特性推定法の特性解析”, 信学技報, **107**[210], AP2007-74, 1-6 (2007).
- 4) 井上恵輔, 岩井誠人, 笹岡秀一, “複数地点観測信号に基づく他地点伝搬路特性の推定”, 同志社大学理工学研究報告, **50**[4], 25-34 (2010).
- 5) 田中誠, 岩井誠人, 笹岡秀一, “MUSIC法に基づく任意地点受信信号の推定”, 信学技報, **114**[5], AP2014-16, 83-88 (2014).
- 6) M. Tanaka, H. Iwai, H. Sasaoka, “Estimation of Received Signal at an Arbitrary Remote Location Using MUSIC Method”, *IEICE Trans. Commun.*, **E98-B**[5], 806-813 (2015).
- 7) R. O. Schmidt, “Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **34**[3], 276-280 (1986).
- 8) 菊間信良, アダプティブアンテナ技術, (オーム社, 東京, 2003), pp.137-145.
- 9) A. A. Hassan, W. E. Stark, J. E. Hershey, S. Chennakeshu, “Cryptographic Key Agreement for Mobile Radio”, *Digital Signal Processing*, **6**, 207-212 (1996).
- 10) 笹岡秀一, “電波伝搬特性を活用した情報理論的に安全な暗号方式”, 信学技報, **107**[3], AP2007-12, 65-70 (2007).
- 11) 岩井誠人, 笹岡秀一, “電波伝搬特性を活用した秘密情報の伝送・共有技術”, 信学論 B, **J90-B**[9], 770-783 (2007).
- 12) 笹岡秀一, “電波伝搬を活用した無線通信セキュリティ”, 信学技報, **108**[158], IT2008-15, 39-44 (2008).
- 13) 笹岡秀一, “電波を用いた物理層における無線通信セキュリティ”, 信学技報, **111**[12], RCS2011-10, 53-58 (2011).
- 14) 樋口拓己, 笹岡秀一, 岩井誠人, “電波伝搬特性の事前測定に基づく複数アンテナを用いた秘密鍵共有方式”, 信学論 B, **J99-B**[9], 675-683 (2016).
- 15) 馬健, 岩井誠人, 笹岡秀一, “任意地点受信信号推定方式による秘密鍵共有方式の盗聴特性”, 信学総大, B-1-182, (2015).
- 16) J. Ma, M. Tanaka, H. Iwai, H. Sasaoka, “Evaluation of Eavesdropping Performance against Secret Key Agreement Technique Using a Received Signal Estimation Method”, *Proceedings of International Workshop on Electromagnetics 2015 (iWEM2015)*, 1-2 (2015).
- 17) 辻宏之, “アレーアンテナを用いた屋内外の無線局位置推定の実験的検証”, 信学論 B, **J90-B**[9], 784-796 (2007).
- 18) M. Ohtani, H. Iwai, H. Sasaoka, “Evaluation of Terminal Position Estimation by Position Fingerprinting Technique Using Array Antenna”, *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2013 (APMC 2013)*, 392-394 (2013).
- 19) 黒崎雄太, 山田寛喜, 山内芳雄, “近似信号部分空間を用いた屋内無線端末位置推定に関する検討”, 信学技報, **109**[35], AP2009-35, 141-146 (2009).
- 20) 山田遼, 岩井誠人, 笹岡秀一, “指向性アンテナを用いた位置指紋に基づく端末位置推定方式の室内環境モデルにおける推定精度の評価”, 信学技報, **115**[286], AP2015-142, 185-188 (2015).
- 21) 阿部俊輔, 岩井誠人, 笹岡秀一, “MUSIC法を用いた他地点伝搬特性推定方式の3次元環境への拡張”, 信学総大, B-1-193, (2016).
- 22) S. Abe, H. Iwai, H. Sasaoka, “Extension of a Received Signal Estimation Method at a Remote Location to a 3-dimensional Space”, *Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation 2016 (ISAP2016)*, 1022-1023 (2016).
- 23) 堀田浩之, 手嶋正雄, 天野隆, “到来波の到来方位角および到来仰角推定に関する一検討”, 信学技報, **105**[126], AP2005-31, 7-12 (2005).