

# 他地点観測信号に基づく伝搬路特性推定法の特性解析

井上 恵輔 丹後 俊宏 岩井 誠人 笹岡 秀一

同志社大学大学院 工学研究科 〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3  
E-mail: {dth0116@mail4, dtg0175@mail4, iwai@mail, hsasaoka@mail}.doshisha.ac.jp

## An analysis on estimation characteristics of propagation channel based on received signals at different locations

Keisuke INOUE Toshihiro TANGO Hisato IWAI Hideichi Sasaoka

Graduate School of Engineering, Doshisha University Kyotanabe, Kyoto, 610-0321 Japan

E-mail: {dth0116@mail4, dtg0175@mail4, iwai@mail, hsasaoka@mail}.doshisha.ac.jp

### 1. はじめに

近年、ユビキタスネットワークに代表されるような場所や時間にとらわれない無線通信が広く普及し、種々の新しい無線システムが提案、検討されている。しかし、無線通信は電波を利用しているため、不特定多数の第三者(盗聴局)が傍受可能という問題があり、セキュリティの確保が課題となる。これに対し無線通信のセキュリティ向上技術の一つとして、マルチパス伝搬路の特性を活用した秘密鍵共有方式が検討されている[1]-[3]。この方式は、マルチパスフェージングの場所依存性、および、電波伝搬の可逆性により伝搬路特性は送受信局間でのみ共有でき、ある程度の距離が離れた他地点ではその情報を得ることができないという原理、に基づいている[4][5]。したがって、この方式は情報理論的安全性を有しており、耐盗聴性は盗聴局の計算資源に依存しないという特徴がある。しかし、盗聴局が何らかの方法によって正規局間の伝搬路特性を推定できるとすれば、この方式によって得られた秘密鍵の安全性が失われる[6]。したがって、盗聴局による伝搬路特性の推定の可能性を明らかにすることは、秘密鍵共有方式の安全性検討のうえで重要な課題となる。

そこで本稿では、秘密鍵共有方式の安全性検討に資することを目的とし、伝搬の観点からの他地点の伝搬路特性を推定する方法について検討する。その手法は、複数観測点の受信情報を用い、仮想的にパスを想定する(これを仮想パスと呼ぶ)ことにより到来パスの方向を検出し、目的地点の伝搬路特性を推定するものである。今回は、この手法について簡単に紹介するとともに、その推定特性について解析する。この解析の結果として、この手法による推定成功可否を決定する条件やそのメカニズムを明らかにする。

### 2. 他地点伝搬路特性の推定法[7]

#### 2.1. 仮想パスを用いた推定法

一般に、フェージングの相関距離以上に受信点が離れると、他地点と同じフェージング特性(伝搬路特性)を得ることは困難である。ただし、これは単一アンテナを用いている場合であり、例えば、推定局が複数アンテナや指向性アンテナを用いている場合等、正規の受信局に比べてより性能・機能の高い受信システムを有している場合には、他局の伝搬路特性の推定(これは秘密鍵共有方式では「盗聴」という行為にあたる)の可能性があると考えられる。そこで、今回は盗聴者が複数地点の受信信号情報を同時に受信する場合を考え、電波干渉計の原理[8]に類似した到来パスの方向検出(=仮想パス)およびその合成によって目的地点の伝搬特性を推定する方式を考える。この推定方式の概念を図 1 に示す。なお、本稿では二次元の問題を考える。推定を行う前提条件として、推定対象である正規受信局を中心とした半径  $R$  の円周(これを観測円と呼ぶ)を考え、その円周上に複数の観測点  $P_i(i=1, \dots, N; N$  は観測点数)を等角度間隔(推定対象局からの  $P_i$  の角度方向を  $\theta_i$  と表す)で配置するものとし、 $P_i$  において観測される受信信号  $Z_i$  は既知であるとする。また、これらの観測信号は推定対象局が受信するタイミングと同時に受信するものとする。

推定方法は以下の通りである。まず、パスの到来方向を  $\varphi_j$  とする仮想的なパス  $A_j(j=1, \dots, M; M$  は仮想パス数)を考え、観測信号  $Z_i$  を用いて推定対象局における仮想パス  $A_j$  の振幅・位相を推定する。本稿では  $\varphi_j$  は  $2\pi j/M$  と等間隔に設定する。到来仮想パスを平面波と仮定すると、 $Z_i$  から推定される推定対象局における信号は  $Z_i \exp(-j k R \cos(\theta_i - \varphi_j))$  となる。ここで  $k$  は波数である。さらに全ての観測点についてこの値を平均することにより、仮想パス  $A_j$  に対する推定対象局における推定信号  $\hat{Y}_j$  は以下のように得られる。

$$\hat{Y}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \exp(-jkR \cos(\theta_i - \varphi_j)) \quad (1)$$

ここで、 $\hat{Y}_j$  の値は、実際のパスの到来角度が仮想的な角度  $\varphi_j$  と一致する場合は、 $i$  に対する各項がそれぞれ同位相となりその和の絶対値は大きくなる。それに対して一致しない場合は、各項の位相はランダムになりその和は、位相が一致する場合に比べて小さくなる。ここで、計算を行った  $\hat{Y}_j$  をすべての  $j$  について全周方向で平均し、推定対象局における推定受信信号  $\hat{Y}$  を得る。

$$\hat{Y} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \hat{Y}_j \quad (2)$$

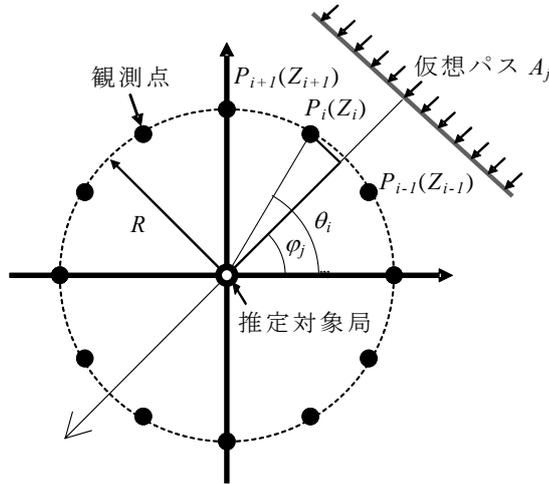


図 1 仮想パスを用いた推定方式

## 2.2. 信号強度変動の相関特性を用いた推定精度の定量化

本推定方式の特性解析を行うにあたり、観測点数や観測円半径などの推定パラメータや伝搬環境モデルを変化させ、推定精度に対する影響を評価する必要がある。そのためには、推定精度を何らかの方法で定量的に示さなければならない。伝搬路特性に基づく秘密鍵共有方式[1][2]では、正規局間の共有情報として信号強度を用い、その信号強度に対してしきい値を設定し、信号強度情報をそのしきい値により相対的に 2 値化する処理を行って秘密鍵を生成している。つまり、秘密鍵の推定においては、信号強度の絶対値の情報は必要ではなく、相対的な信号強度変動が重要となる。そこで本稿では、信号強度の変動特性の推定に焦点を絞るものとし、正しい受信信号の信号強度変動と、推定された信号強度変動の相互相関値を求め、これを推定精度の指標とし評価を行う。すなわち、推定が正確に行われた場合には相関値は 1 に近い値をとり、推定が正確に行われなかった場合には 0 に近い値をとる。次章以降におけるシミュレーションでは、この相関を用いて推定方式の推定性能を評価する。

## 3. シミュレーションによる推定特性の評価

### 3.1. 仮定する伝搬環境モデル

本章では、前章で説明した方式の推定特性をシミュレーションにより定量的に評価する。シミュレーションを行うためには伝搬環境のモデルが必要となる。本稿では、複数の平面波が周囲一様の方向から到来する Jakes モデル[9]に類似する伝搬環境を仮定する。その概念を図 2 に示す。

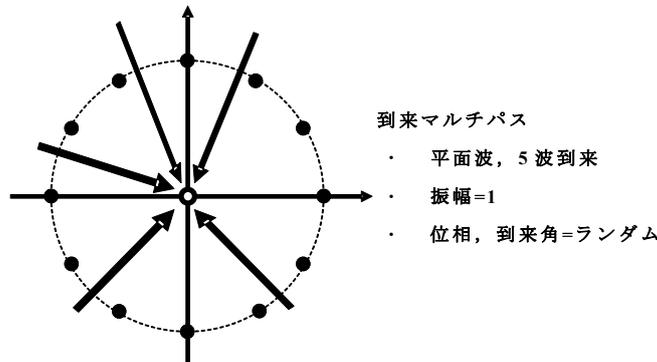


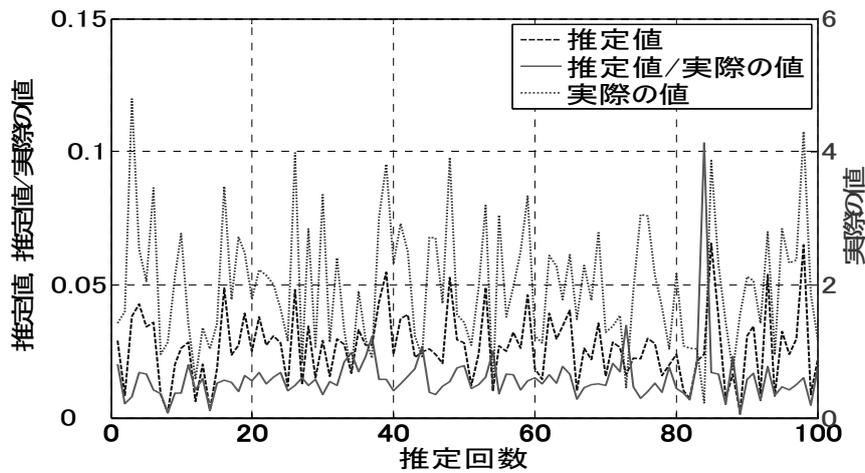
図 2 仮定する伝搬環境モデル

ここでは到来マルチパス数は 5 波とし、簡単化のため、全てのマルチパスは等しい振幅(=1)をもつものとし、推定対象局における各パスの到来方向、受信位相は $[0, 2\pi)$ の範囲で一様分布に従うランダム値であるとする。また、より推定(盗聴)に有利な環境を想定するため、観測点の受信信号には雑音は付加しないものとする。

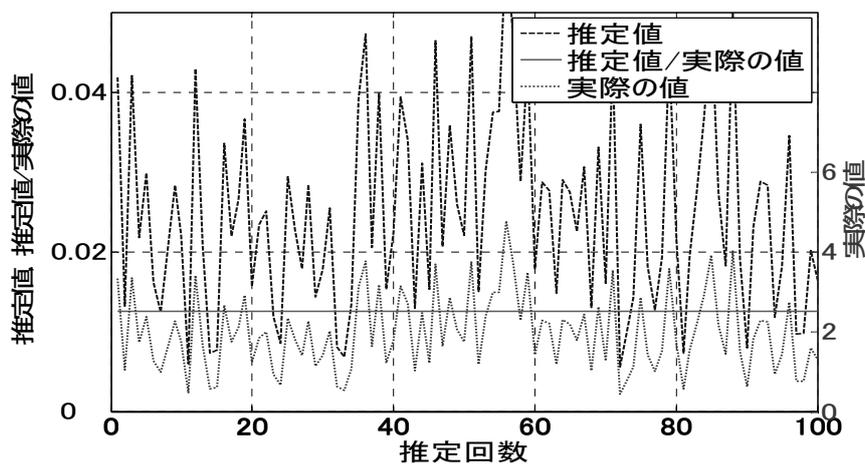
### 3.2. シミュレーションによる信号強度推定

仮定する伝搬環境モデルにおける推定結果を示す。図 3 は観測円半径  $R=4$  波長、仮想パス数  $M=1000$  とした場合における、(a)観測点数  $N=20$  と (b) $N=40$  の信号強度の推定結果を示している。

図 3 の横軸は、フェージング環境(到来方向および各到来波の位相)を変化させて異なるフェージング環境とした場合の試行回数を示している。また同図には、実際の受信信号強度、推定信号強度に加えて、これらの比を併せて示している。(a)では実際の値と推定値の比がフェージング環境を変化させるごとに変動しているが、(b)ではこの値が一定となっている。すなわち、フェージングによる信号強度変動を正確に推定できていることがわかる。これらの特性から、正しい強度変動の推定を行うためには、観測点数として一定値以上の値が必要であることが推測される。この特性については後で詳しく述べる。



(a)  $N=20$



(b)  $N=40$

図 3 信号強度変動推定結果

### 3.3. 観測円半径の変化に対する推定特性

次に、信号強度変動の相関値を用いて推定特性を定量的に評価する。ここでは、2.2 に示した相関を推定精度の指標として用いる。図 3(b)のような状況ではこの相関の値はほぼ 1 となり、図 3(a)では相関値は 1 よりも小さくなる。

図 4 は観測円半径に対する相関特性の変化を示している。ここでは観測点数  $N=100$ 、仮想パス数  $M=1000$  としている。相関値の計算には、異なる 100 回のフェージング環境を発生させ計算を行っている。同図より、観測円

半径が 14.5 波長まではほぼ正確な推定(相関の値がほぼ 1 となる)が実現されているが、それ以上に観測円半径が大きくなると急に推定が不可能となる特性となる。このような特性が得られるメカニズムについては理解が容易でないと考えられるため、この現象についての詳しい解析を行った。その結果を以下に示す。

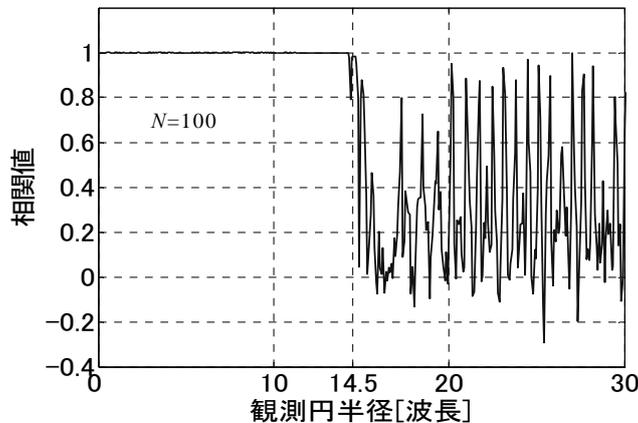


図 4 観測円半径の変化に対する相関特性

### 1) 仮想パスの到来方向に対する推定値の変化

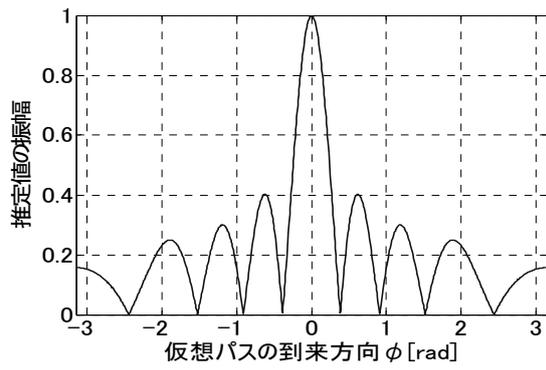
ここでは、推定状況を詳しく解析するために図 2 に示すモデルよりもさらに簡易なモデルを考える。すなわち、ただ一つの平面波が図 1 の 0[rad]から到来する環境を考える。観測点は 0[rad]から配置しているの、観測点の推定対象局との角度方向 $\theta_1$ と平面波の到来方向との角度差は生じない場合となる。この環境に対して、仮想パスの到来方向 $\varphi_j$ を変化させた結果を示す。なお、この到来波の推定対象局での受信位相を $\pi/2$ とする。

図 5 は、 $N=100$ ,  $M=1000$  とし、観測半径  $R$  を 1 波長, 10 波長, 15 波長とした場合における、仮想パスの到来方向に対する式(1)で得られる推定値  $\hat{Y}_j$  の振幅と位相の変化を示している。ここでは、この振幅特性がアンテナパターンに類似することから、 $\varphi_j$  が $\pm 0.4$ [rad]の範囲内の特性をメインローブ、その一つ外側の特性を第一サイドローブ、そのさらに外側を第二サイドローブなどここでは便宜的に呼ぶことにする。

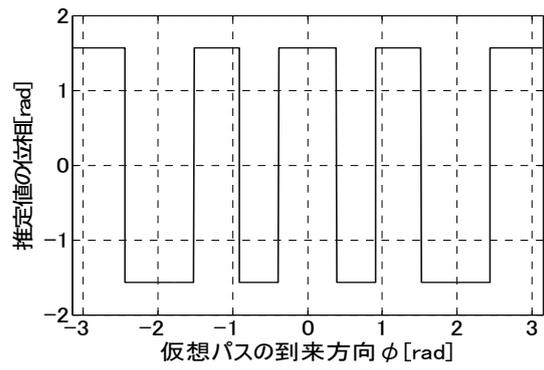
それぞれの位相特性から、推定位相は正しい位相と、それが反転した位相、の二つの場合しか存在し得ないことがわかる。これは、観測点の配置が推定対象局の周りに対称な配置になっているためと考えられる。式(2)より、最終的な推定値は全ての仮想パスに対して  $\hat{Y}_j$  を平均することによって得られる。位相特性がメインローブに対して奇数サイドローブが逆相、偶数サイドローブが同相であることから、その平均値は観測円半径の変化に対して振動的に変化することが予想される。また、観測円半径が大きくなるに伴い、平均値である推定値に対するメインローブ部分の寄与が小さくなり、平均値の振幅が小さくなる、または、平均値が逆相になる場合も発生する可能性があると考えられる。

次に、 $\theta_1(0$ [rad]方向)と実際に到来する平面波との間に角度差がある場合を考える。平面波の到来方向をそれぞれ観測点間角度の  $1/4(0.0157$ [rad]),  $1/2(0.0314$ [rad])とした図 5 と同様の特性を、図 6, 図 7 に示す。ここでも、 $N=100$ ,  $M=1000$  とし、観測半径  $R$  を 1 波長, 10 波長, 15 波長の場合を考える。これらの図から、角度差がある場合にも、角度差がない場合と同様に推定位相は正しい位相とそれが反転した位相、の二つしか存在し得なく、観測円半径が大きくなるに伴い、平均値である推定値に対するメインローブ部分の寄与が小さくなることがわかる。ただし、図 6 の場合にはパターンはわずかに非対称になっている。また、 $1/6(0.0105$ [rad]),  $1/3(0.0209$ [rad])についても計算を行ったが同様の特性が得られた。

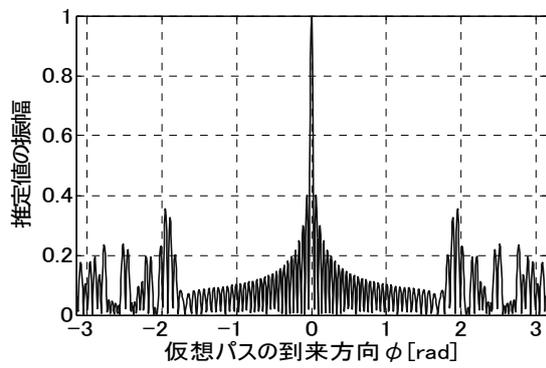
これらの特性より、観測点の推定対象局との角度方向 $\theta_1$ と平面波の到来方向との角度差がある場合でも振幅特性、位相特性とともに、角度差がない場合とほぼ同様の特性を示すことがわかった。ここで得られた結果より、パスがランダムに到来する伝搬環境においても、角度差がある場合によって現象を説明することが可能と考えられ、今後行う解析を簡易化することができる。



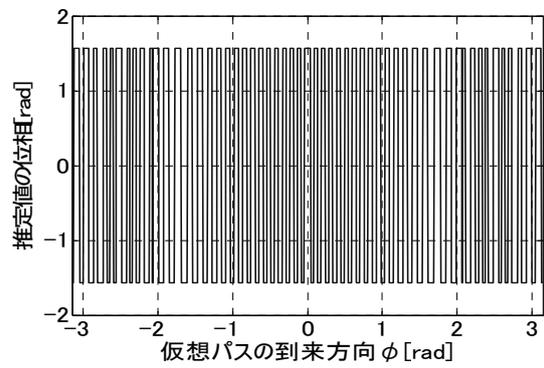
(a) 観測円半径=1 波長,  $|\hat{Y}_j|$



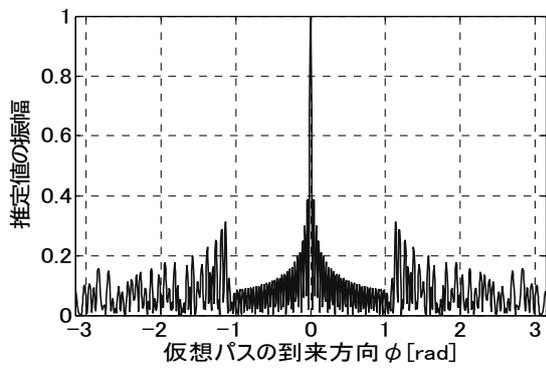
(b) 観測円半径=1 波長,  $\angle \hat{Y}_j$



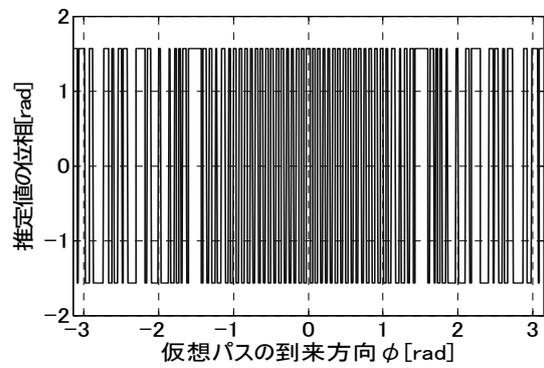
(c) 観測円半径=10 波長,  $|\hat{Y}_j|$



(d) 観測円半径=10 波長,  $\angle \hat{Y}_j$

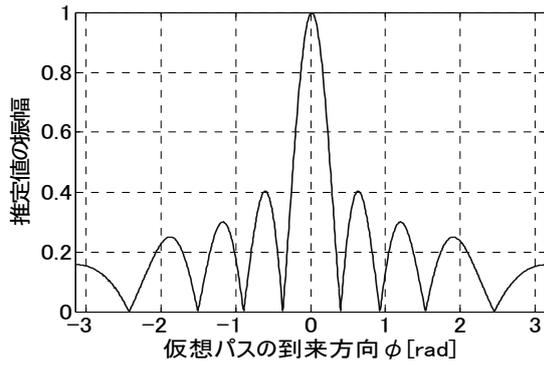


(e) 観測円半径=15 波長,  $|\hat{Y}_j|$

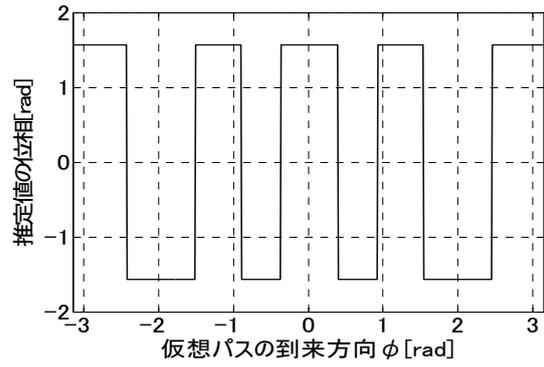


(f) 観測円半径=15 波長,  $\angle \hat{Y}_j$

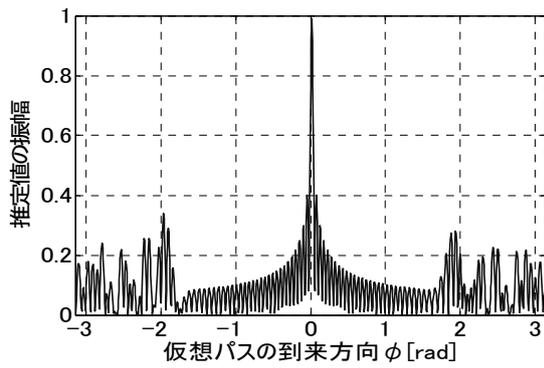
図 5 到来方向が 0[rad] の場合における仮想パスの到来方向に対する推定値の変化



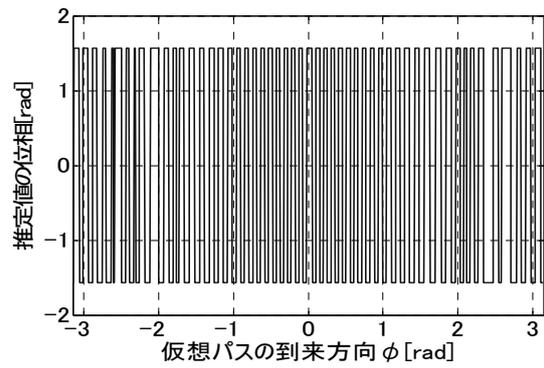
(a) 観測円半径=1 波長,  $|\hat{Y}_j|$



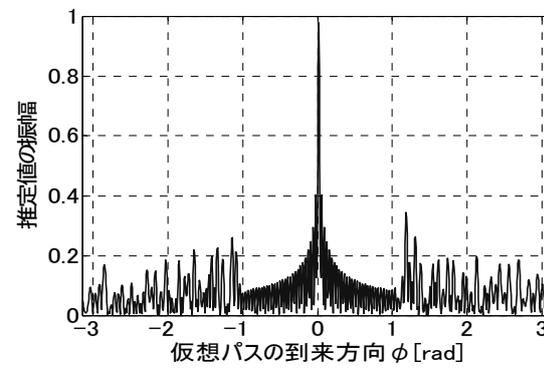
(b) 観測円半径=1 波長,  $\angle \hat{Y}_j$



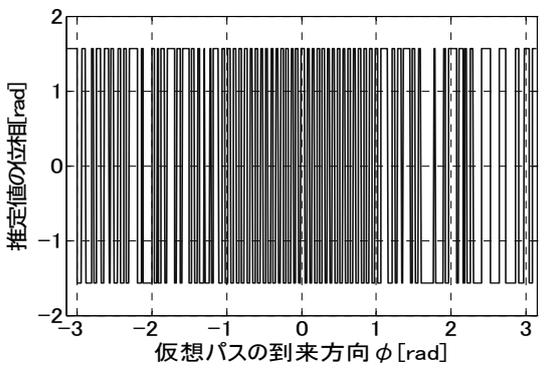
(c) 観測円半径=10 波長,  $|\hat{Y}_j|$



(d) 観測円半径=10 波長,  $\angle \hat{Y}_j$

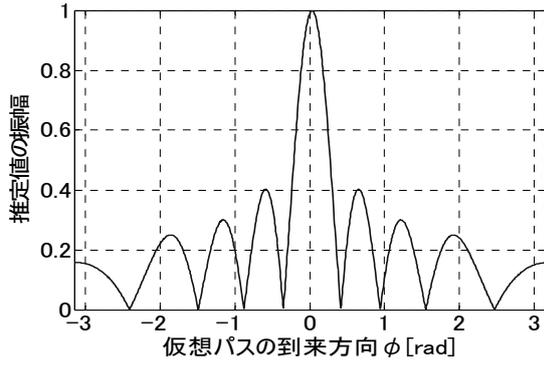


(e) 観測円半径=15 波長,  $|\hat{Y}_j|$

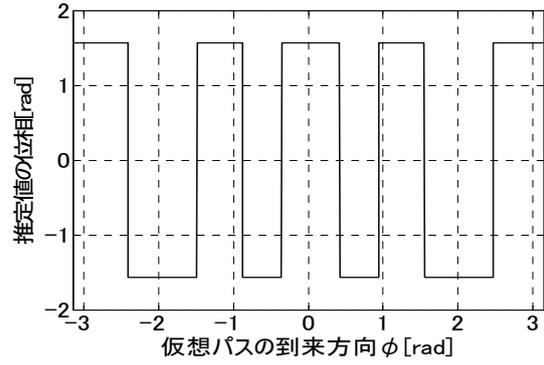


(f) 観測円半径=15 波長,  $\angle \hat{Y}_j$

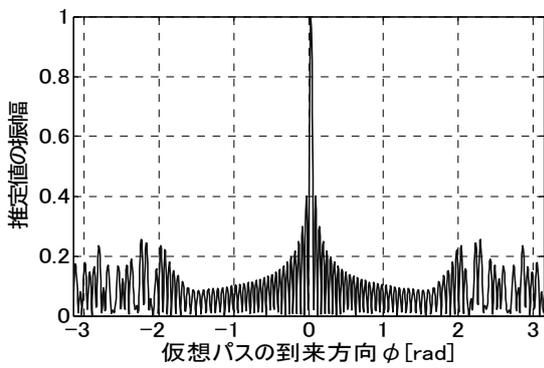
図 6 到来方向が 0.0157[rad]の場合における仮想パスの到来方向に対する推定値の変化



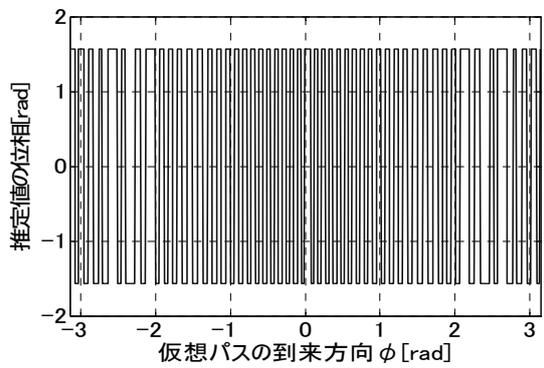
(a) 観測円半径=1 波長,  $|\hat{Y}_j|$



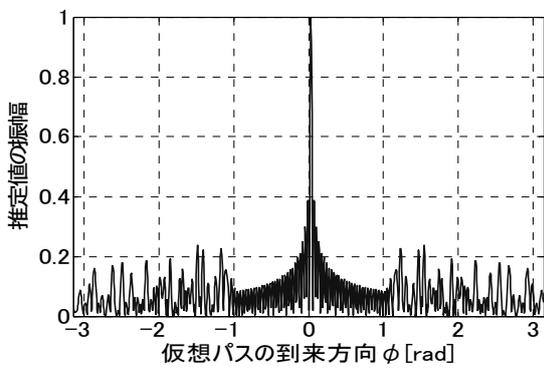
(b) 観測円半径=1 波長,  $\angle \hat{Y}_j$



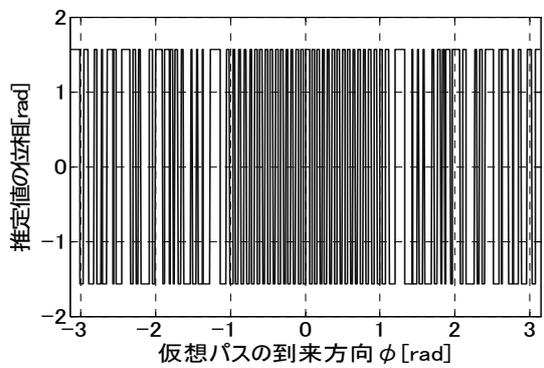
(c) 観測円半径=10 波長,  $|\hat{Y}_j|$



(d) 観測円半径=10 波長,  $\angle \hat{Y}_j$



(e) 観測円半径=15 波長,  $|\hat{Y}_j|$



(f) 観測円半径=15 波長,  $\angle \hat{Y}_j$

図 7 到来方向が 0.0314[rad] の場合における仮想パスの到来方向に対する推定値の変化

## 2) 観測円半径に対する振幅及び位相推定確率の変化

次に、前節の結果を踏まえ、観測円半径に対する最終的な推定値  $\hat{Y}$  の振幅及び位相推定確率の変化を図 8 に示す。前述のように、これは図 5～図 7 の特性を周方向に積分した値となる。ただ一つの平面波が  $[0, 2\pi)$  の範囲でランダムに到来する伝搬環境において 100 回試行した。ここで、(a) は振幅の 100 回の試行に対する平均値であり、(b) は位相推定確率である。前節示したように推定位相は正しい位相と逆相のみであることを考慮して、位相推定の指標として正しい推定位相値を得た確率を用いている。同図から、前節の結果から推測されたように、振幅は観測円半径の増加に伴って振動的に減少していくことがわかる。ただし、観測円半径が 15 波長程度までは振幅がかなり小さくても位相は正しく推定されていることがわかる。しかし、図 4 と同様に観測円半径が 15 波長程度を超えると、位相が逆転する可能性が生じ正確に推定できない場合が生じる。これは、メインローブ部分の角度幅が極めて小さく反転した位相に対して相対的に小さくなり、逆相部分を十分に補うだけの大きさを得ることができなくなったことによるものと考えられる。

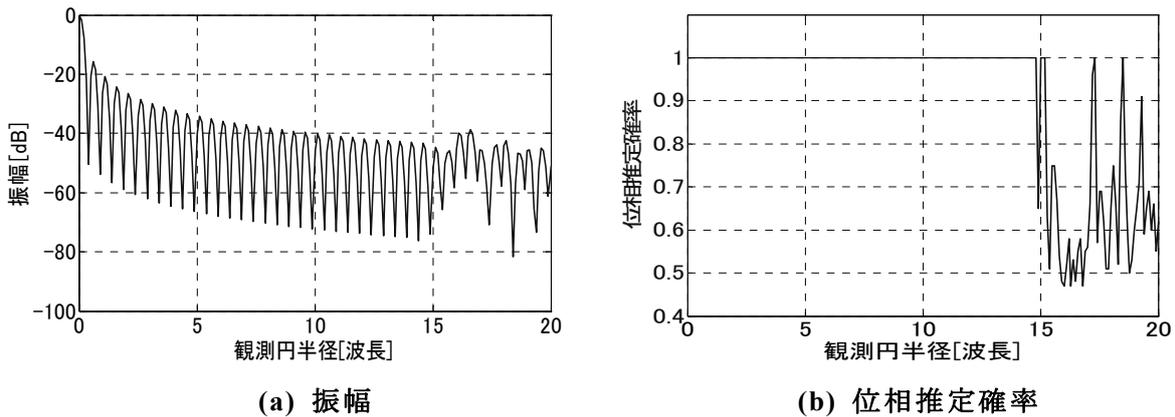


図 8 観測円半径に対する振幅及び位相推定確率の変化

## 3.4. 雑音が存在する場合の観測円半径の変化に対する推定特性

次に、図 2 に仮定する伝搬環境モデルにおいて、雑音が存在する環境を想定する。図 8(a) より推定値の振幅は観測円半径の変化に対して大きく振動しているため、雑音が存在する環境では推定特性は図 4 よりも劣ることが考えられる。ここでは、現実的な環境を考慮した推定特性を評価するため雑音が存在する環境での推定特性の評価を行う。

図 9 は、SNR=0dB, 20dB, 40dB とした場合における、図 4 と同様に観測円半径の変動に対する相関特性を示している。ここでは観測点数  $N=100$ 、仮想パス数  $M=1000$  としている。図 4 ではフラットであった半径が 14.5 波長以下の部分においても、推定値の振動に伴って相関特性が大きく変動していることがわかる。また、SNR=0dB の場合に、観測円半径の増加に伴って徐々に推定特性が劣化することがわかる。ただし、SNR=40dB という SNR が大きい環境では、図 4 の推定特性との差は大きくないこともわかる。

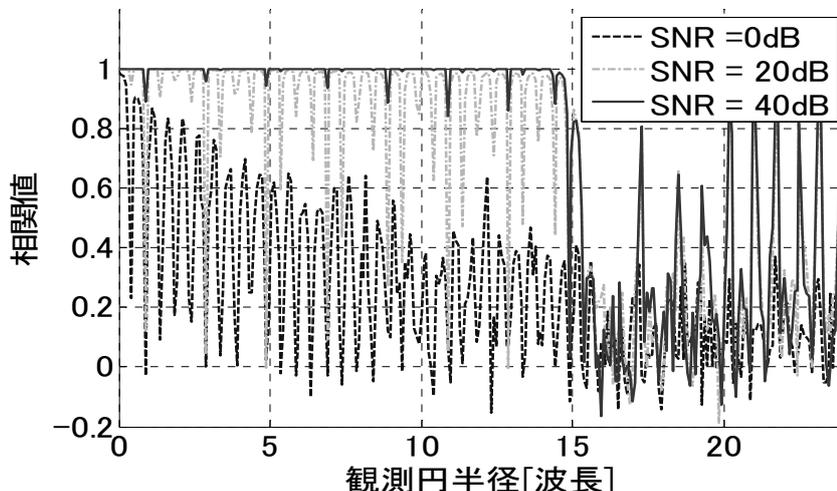


図 9 雑音が存在する場合の推定特性

#### 4. まとめ

秘密鍵共有方式の安全性検討に資するために、複数観測点の受信情報を用いて他の受信点の伝搬路特性を推定する方式について検討した。この方式の推定特性について、そのような特性が得られるメカニズムを解析し、その結果を示した。

また、今回の解析の中で観測円半径の増加に伴って、推定値の振幅が振動的に変化することが明らかとなった。そこで、雑音が存在する場合の特性についても結果を示した。この結果から、雑音が存在するより現実的な伝搬環境においては、ある程度以上離れた他地点受信信号状況の推定精度は劣化することがわかった。したがって、この方法による秘密鍵の盗聴は現実的には実現しにくいことが予想される。

本研究に関する今後の課題としては、観測円半径・観測点数・仮想パス数の推定可能条件とその関係、三次元などのさらに現実的な伝搬環境を対象とした推定特性の解析を行うこと、相互情報量を用いて秘密情報の共有特性・耐盗聴特性に関する情報量的な定量的検討を行うなどがあげられる。

#### 5. 参考文献

- [1] 北浦明人, 笹岡秀一, “陸上移動通信における OFDM の伝搬路特性に基づく秘密鍵共有方式,” 信学論(A), vol. J87-A, no. 10, pp. 1320-1328, Oct., 2004.
- [2] T.Aono, K.Higuchi, T.Ohira, B.Komiyama and H.Sasaoka, “Wireless secret key generation exploiting reactance-domain scalar response of multipath fading channels,” *IEEE Trans. Antennas & Propagat.*, vol. 53, no. 11, pp. 3776-3784, Nov. 2005.
- [3] 北浦明人, 岩井誠人, 笹岡秀一, “陸上移動通信におけるアンテナ切替による受信信号強度変化を利用した秘密鍵共有方式,” 信学論(B), Vol.J90-B, No.3, pp. 315-317, 2007.
- [4] 唐沢好男, デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2003.
- [5] 藤井輝也, “陸上移動通信の伝搬,” 電波伝搬ハンドブック第 15 章, pp. 234-245, リアライズ社, 1999.
- [6] 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), 2007 年 9 月掲載予定.
- [7] 井上恵輔, 丹後俊宏, 岩井誠人, 笹岡秀一, “他地点受信信号情報に基づく伝搬路特性推定のシミュレーションによる特性評価,” 信学技報, AP2006-112, Jan, 2007.
- [8] 井口, 川口, “超長基線干渉計(VLBI)における最適フィルタリング,” 信学論(B), Vol.J82-B, No.3, pp. 420-426, Mar, 1999.
- [9] W.C.Jakes, “Microwave Mobile Communications,” *Wiley-IEEE Press*, 1994.