

自装置から送信した参照信号を用いる アレー素子間 RF 誤差および配置誤差キャリブレーション方式

江頭 直人[†] 雨澤 泰治[†]

[†] 株式会社モバイルテクノ 〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい 4-4-5

E-mail: [†] {egashira.naoto, amezawa.yasu}@jp.fujitsu.com

あらまし アレーアンテナを用いた MUSIC (multiple signal classification) 法などの高分解能の到来方向推定技術が注目されている。しかしながら、アンテナ素子間の位相、振幅誤差や、アンテナ素子の配置誤差により、到来方向推定の精度が劣化するため、アンテナ素子間の回路特性差や配置誤差の影響を補正するキャリブレーションが必要となる。本稿では、自装置がもつアンテナ素子から送信した参照信号を、自身のアンテナ素子で受信することで、アンテナ素子間の位相、振幅誤差、アンテナ素子の配置誤差をキャリブレーションする方式を提案する。提案方式が、外部参照信号、専用回路を用いることなく到来方向推定の劣化を抑えられることを計算機シミュレーションにより示す。

キーワード キャリブレーション, RF 誤差, 配置誤差, 到来方向推定

RF and Array Geometry Calibration Scheme Using Reference Signal Transmitted by Itself

Naoto EGASHIRA[†] and Yasuharu AMEZAWA[†]

[†] Mobile Techno Corporation 4-4-5 Minatomirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa, 220-0012 Japan

E-mail: [†] {egashira.naoto, amezawa.yasu}@jp.fujitsu.com

Abstract Multiple signal classification (MUSIC) scheme which is a high resolution estimation technique of direction-of-arrival (DOA) attracts considerable attention for array antenna systems. However, the mismatch of amplitude and phase between RF chains of array antenna degrades the accuracy of DOA estimation. Moreover, the mismatch of geometry of array antenna between actual and theoretical geometry also causes its degradation. Hence the calibration of array antenna is required to compensate these degradation factors. In this paper, we propose an RF and geometry calibration scheme using reference signals transmitted by each of own antennas. Simulation result indicates that the proposed calibration scheme mitigates the degradation of DOA accuracy without external reference signal and additional calibration circuit.

Keywords Calibration, Array RF chain Error, Array Geometry Error, DOA Estimation

1. はじめに

高速無線通信規格である LTE-Advanced や IEEE 802.11ac/ad/ah では、通信距離の延長、干渉制御の観点から、アレーアンテナを用いたビームフォーミング技術が導入されている[1]。また、ビームを向ける角度を把握するために、MUSIC (multiple signal classification) 法などの高分解能の到来方向推定技術も併せて注目されている[2]。

アレーアンテナを用いたビームフォーミング技術や到来方向推定技術は、アレーアンテナの各アンテナにおける条件が理想的な環境において定式化されている。そのため、各アンテナ素子のアナログ回路 (RF 回路) における振幅、位相特性の不一致や、アンテナ素子の配置誤差により、到来方向推定の精度やビーム形成に誤差が生じてしまう。したがって、素子間のア

ナログ回路の振幅、位相特性のキャリブレーション (RF キャリブレーション)、および素子配置の誤差のキャリブレーション (配置キャリブレーション) が必要となる。

これまで、多くのキャリブレーション技術が提案されている[3]-[6]。文献[3]では、到来方向が既知である外部参照信号を用いることで RF キャリブレーションや、配置キャリブレーションを行う方式が提案されている。文献[4]では、アンテナ素子端における送信参照信号を、キャリブレーション用の内部回路へフィードバックすることによって、RF キャリブレーションを実施する方式が提案されている。文献[5]、[6]では、自装置のアンテナ素子から送信した参照信号を、自装置のアンテナ素子で受信し、RF キャリブレーションを実施する方式が提案されている。

しかし、文献[3]の方式では、RF キャリブレーションだけでなく、配置キャリブレーションも行うことができるが、キャリブレーションのために到来方向既知の外部参照信号が必要となる。文献[4]の方式では、キャリブレーションのための専用回路を持つことになり、装置の規模、コストを増大させてしまう。文献[5]、[6]の方式はデジタル処理により実施可能であるため専用回路は不要であるが、ビームフォーミングと組み合わせる必要があり、受信処理だけではキャリブレーションが不完全のため、到来方向推定技術と親和性がない。また、文献[4]-[6]の方式では、RF キャリブレーションは実施できるが、配置キャリブレーションは実施できていない。

本稿では、外部参照信号および専用回路を用いず実施可能な RF キャリブレーションおよび配置キャリブレーション方式を提案する。提案方式では、自装置がもつアンテナ素子から送信した参照信号を、自身のアンテナ素子で受信し、各アンテナ素子の送信、受信 RF 係数を含んだ伝搬路推定値を推定する。伝搬モデルに基づき伝搬路ゲインを推定し、伝搬路推定値から伝搬路ゲインのキャンセルを行い、RF キャリブレーションの係数を算出する。また、伝搬路ゲインのキャンセル結果から、アンテナ素子間の距離を算出し、距離に基づきアンテナ素子の配置を推定することで配置キャリブレーションを行う。

提案するキャリブレーション方式の有効性を示すため、計算機シミュレーションを行った。シミュレーションにより、アンテナ素子間の位相、振幅誤差が存在し、さらに配置誤差が存在する環境においても、到来方向の推定精度 1 度程度を達成可能なことを示す。

2. 提案するキャリブレーション方式

提案するキャリブレーション方式を実施する装置の構成を図 1 に示す。自装置は N 個のアンテナ素子を持つ。また、各アンテナ素子は送信 RF 回路、受信 RF 回路を持ち、スイッチを介して送信あるいは受信を行うものとする。アンテナ素子 m ($0 \leq m \leq N-1$) における送信 RF 回路、受信 RF 回路での振幅、位相変動量を、それぞれ複素係数 t_m 、 r_m で表す。各アンテナ素子の送信 RF 回路係数、受信 RF 回路係数を同一にするためにキャリブレーションが必要となる。

提案するキャリブレーション方式のフローチャートを図 2 に示す。キャリブレーション係数を求めるため、自装置から送信した参照信号を、自装置のアンテナ素子で受信し、伝搬路推定結果をメモリに保持しておく。全てのアンテナ素子について参照信号の送信、受信が完了したら、キャリブレーション係数算出部にて、送信キャリブレーション係数、受信キャリブレーション

係数の算出を行う。その後、アンテナ素子の配置推定を行い、アンテナ素子の配置位置を更新する。ただし、各アンテナ素子の配置位置の初期位置は、アレー構成の理想的な配置とする。参照信号の送受信、キャリブレーション係数算出、配置誤差推定を設定した回数分繰り返す。

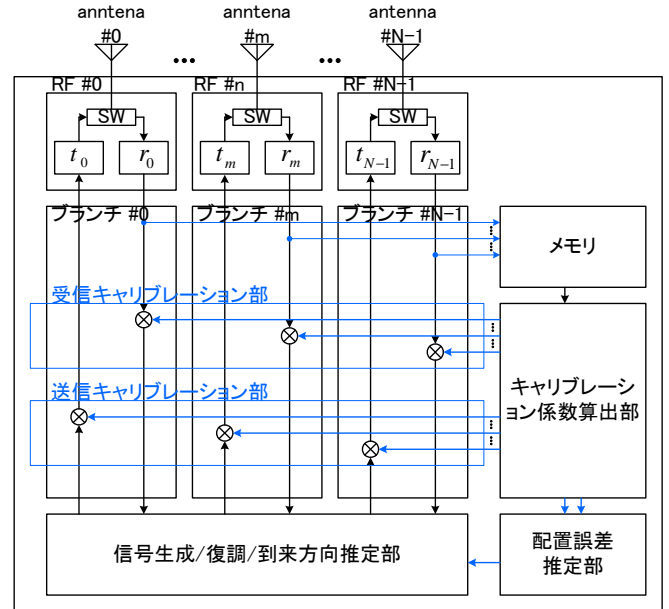


図 1 提案方式を持つ装置の構成

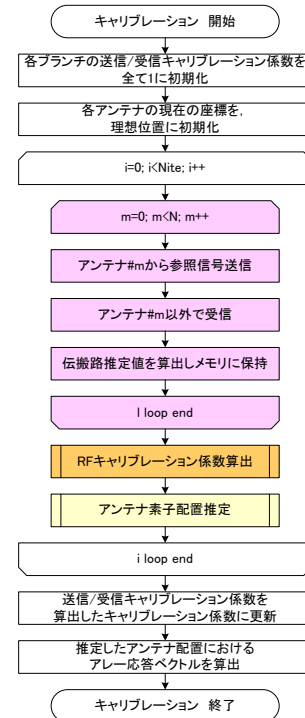


図 2 提案方式のフローチャート

2.1 節で送信キャリブレーション係数、受信キャリブレーション係数の算出(RF キャリブレーション)、2.2 節でアンテナ素子の配置推定(配置キャリブレーション)

ン), 2.3 節で, RF キャリブレーションと配置キャリブレーションの連動について説明する. ただし, 議論の簡単化のため, 雑音項および雑音に起因する推定誤差の項は無視する.

2.1. RF キャリブレーション

アンテナ素子 m から n ($0 \leq n \leq N-1$) への伝搬路における伝搬路ゲインを \hat{h}_{nm} とする. このとき, アンテナ素子 m から送信され, n で受信された参照信号から得られる伝搬路推定値 \hat{h}_{nm} は式(1)で表される.

$$\hat{h}_{nm} = r_n \cdot \tilde{h}_{nm} \cdot t_m. \quad (1)$$

ここで, アレーアンテナの素子間の伝搬であるため, アンテナ素子 m から n の伝搬路は見通し内であり, かつ, 直接波が支配的な伝搬環境であると考えられる. したがって, アンテナ素子 m から n の伝搬路ゲイン \hat{h}_{nm} を, 自由空間伝搬モデルの理論式[7]を用いて式(2)のように推定する. なお, 本稿では自由空間伝搬モデルを仮定するが, アンテナ素子間の近傍伝搬における伝搬モデルは今後実験により明らかにする.

$$\hat{h}_{nm} = \frac{\lambda}{4\pi d_{nm}} \exp\left[-j \frac{2\pi d_{nm}}{\lambda}\right], \quad (2)$$

ただし, d_{nm} は現在のアンテナ素子推定位置から算出されるアンテナ素子 m と n の距離 (単位: m) であり, λ は波長 (単位: m) である. (d_{nm} は後述する配置キャリブレーション処理においてアンテナ素子位置の推定値の更新に伴って更新される.)

\tilde{h}_{nm} が式(2)で推定した伝搬路ゲインと一致する場合, 式(1)の \hat{h}_{nm} から, 式(2)で算出される伝搬路ゲイン \hat{h}_{nm} を打ち消すことにより, 式(3)のように $z_{nm} = r_n \cdot t_m$ を得る.

$$z_{nm} = \frac{\hat{h}_{nm}}{\hat{h}_{nm}} = r_n \cdot t_m. \quad (3)$$

z_{nm} の比をとることで, 送信 RF 回路係数, あるいは受信 RF 回路係数のアンテナ素子間の比 (相対差) を式(4), (5)のように求めることができる. ただし, $n \neq m, m \neq l, l \neq n$ ($0 \leq l \leq N-1$) である.

$$\frac{z_{ln}}{z_{lm}} = \frac{r_l \cdot t_n}{r_l \cdot t_m} = \frac{t_n}{t_m}, \quad (4)$$

$$\frac{z_{nl}}{z_{ml}} = \frac{r_n \cdot t_l}{r_m \cdot t_l} = \frac{r_n}{r_m}. \quad (5)$$

ここで, アレーアンテナのあるアンテナ素子を基準アンテナ素子と設定する (本稿ではアンテナ素子 #0 を

基準として説明する). 各アンテナ素子における送信, 受信 RF 係数と, 基準アンテナ素子の送信, 受信 RF 係数との相対差を打ち消すことで, アンテナ素子間の振幅, 位相係数を同一とするようにキャリブレーションを行う. すなわち, アンテナ素子 m において, $n=0$ で式(4), (5)で算出される送信, 受信キャリブレーション係数 t_0/t_m , r_0/r_m を送信, 受信信号に乗算することで, 各アンテナ素子の送信 RF 係数, 受信 RF 係数を t_0 , r_0 に変換する.

アンテナ素子 l, m の組み合わせによっては, 複数の t_0/t_m , r_0/r_m の結果を得ることができる. そのため, これらを平均化した結果を, 最終的な送信, 受信キャリブレーション係数 c_m^{Tx} , c_m^{Rx} として用いる.

2.2. 配置キャリブレーション

配置誤差のキャリブレーションは, アンテナ素子の配置を推定し, 推定した配置に基づいてアレー応答ベクトルを再計算することで行う. 配置誤差によって生じるアンテナ素子間距離誤差を, 自装置から送信した参照信号によって検出し, アンテナ素子間距離を用いてアンテナ素子配置を推定する. 以降ではアンテナ素子の配置推定方法について述べる. アレー応答ベクトルの計算方法は, アレー構成 (例: 一様線形アレー, 一様円形アレーなど) によって異なるため割愛する.

実配置におけるアンテナ素子 m と n の距離を d'_{nm} すると, d_{nm} と d'_{nm} は式(6)のように表せる.

$$d'_{nm} = d_{nm} + \Delta d_{nm}, \quad (6)$$

ただし, Δd_{nm} は配置誤差に起因するアンテナ素子間距離の誤差である.

アンテナ素子 m から n の電波伝搬について, 2.1 節と同様に自由空間伝搬と仮定する. 配置誤差が無いものとして伝搬路ゲインを式(2)によって求め, 式(3)と同様に伝搬路ゲインのキャンセルを行うと, 式(7)のようにアンテナ素子間距離誤差 Δd_{nm} に起因した位相回転が残る.

$$\begin{aligned} z'_{nm} &= \frac{\tilde{h}'_{nm}}{\hat{h}_{nm}} = \frac{d'_{nm}}{d_{nm}} \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda}(d'_{nm} - d_{nm})\right) \\ &= \frac{d'_{nm}}{d_{nm}} \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d_{nm}\right) \end{aligned}, \quad (7)$$

したがって, z'_{nm} の位相から Δd_{nm} を式(8)のように求めることができる.

$$\Delta d_{nm} = -\frac{\arg(z'_{nm})}{2\pi} \lambda, \quad (8)$$

ただし, $\arg(x)$ は複素数 x の位相を表す. また, Δd_{nm} から式(6)によって d'_{nm} を推定することができる.

算出したアンテナ素子間距離を用いて、アンテナ素子配置の推定を行う。にアンテナ素子配置推定の概要を示す。例えば、アンテナ素子 $m=1$ の配置を推定する場合、アンテナ素子 $n=0$ の現在のアンテナ素子位置（座標）を中心として、半径 d'_{nm} の円を描く。同様にアンテナ素子 $l=2$ についても同様にして半径 d'_{lm} の円を描く。この二つの円の交点座標 (x_{nl}, y_{nl}) を求める。円の交点は最大 2 点求まるが、現在座標からのユークリッド距離が近い方の座標を交点として採用する。

アンテナ素子 n, l ($n \neq m, m \neq l, l \neq n$) の組み合わせを変えながら、アンテナ素子 m について複数の交点を算出する。算出した交点座標について平均化を行い、アンテナ素子 m の座標 (\bar{x}_m, \bar{y}_m) を推定する。交点が存在しない場合は、平均化の対象としない。

推定した座標は誤差を含む可能性があるため、現在の座標と推定した座標の差分にステップ係数 α を乗算して、アンテナ素子座標の更新値を算出する。

$$(\hat{x}_m, \hat{y}_m) = (x_m, y_m) + \alpha((x_m, y_m) - (\bar{x}_m, \bar{y}_m)), \quad (9)$$

全ての m について (\hat{x}_m, \hat{y}_m) を算出した後、 $(x_m, y_m) = (\hat{x}_m, \hat{y}_m)$ として現在座標を更新する。更新された座標を用いて、式(6)から式(9)のアンテナ素子配置推定を繰り返し行い、徐々にアンテナ素子座標を更新してゆく。

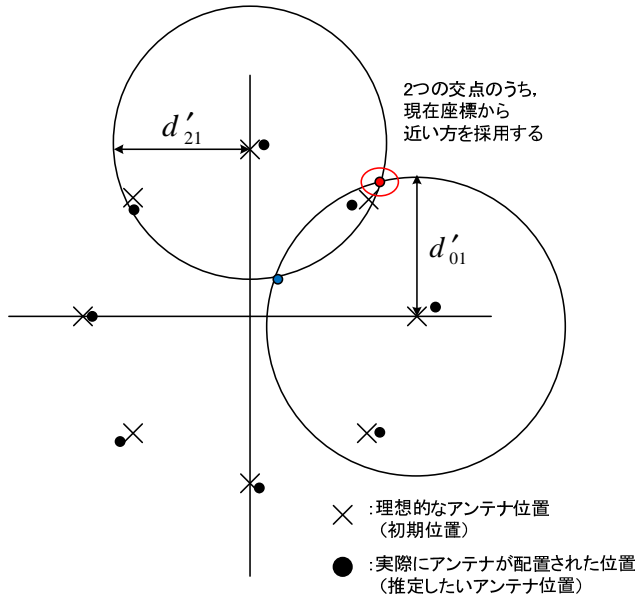


図 3 配置推定方法

2.3. RF キャリブレーションと配置キャリブレーションの連動

2.2 節では RF 誤差が無いものとして説明を行った。送信、受信 RF 係数を考慮すると、式、(7)は式

(10)のように書き直される。

$$z'_{nm} = \frac{r_n \cdot \tilde{h}'_{nm} \cdot t_m}{\hat{h}_{nm}}, \quad (10)$$

送信、受信 RF 係数については 2.1 節にて前述した、送信、受信キャリブレーション係数を乗算することでキャリブレーションできる。しかし、式(11)のように係数 $r_0 \cdot t_0$ が残留してしまう。

$$\begin{aligned} z'_{nm} &= \frac{r_n \cdot \tilde{h}'_{nm} \cdot t_m}{\hat{h}_{nm}} \cdot c_n^{Rx} \cdot c_m^{Tx} \\ &= \frac{r_n \cdot \tilde{h}'_{nm} \cdot t_m}{\hat{h}_{nm}} \cdot \frac{t_0}{t_m} \cdot \frac{r_0}{r_n} = \frac{\tilde{h}'_{nm}}{\hat{h}_{nm}} \cdot r_0 \cdot t_0 \end{aligned}, \quad (11)$$

$r_0 \cdot t_0$ の係数が残留すると、この係数の位相回転量によって式(8)においてアンテナ素子距離誤差量を正しく推定できなくなる。そのため、 $r_0 \cdot t_0$ を推定してキャンセルする必要がある。

ここで、式(12)によって $r_0 \cdot t_0$ の推定値 \hat{C}_0 を推定する。

$$\hat{C}_0 = \frac{1}{2(N-1)} \left(\sum_{m=1}^{N-1} z'_{0m} \cdot c_m^{Tx} + \sum_{n=1}^{N-1} z'_{n0} \cdot c_n^{Rx} \right), \quad (12)$$

$\tilde{h}_{nm}/\hat{h}_{nm}$ は $r_0 \cdot t_0$ を推定するための誤差要因となる。 m あるいは n を変えることで複数の $r_0 \cdot t_0$ を含む結果を得ることができるため、平均化によって誤差要因を抑圧し、 $r_0 \cdot t_0$ を推定している。

送信、受信キャリブレーションに加え、式(12)で算出した \hat{C}_0 により補正を行うことで、式(13)のように、式、(7)と等価な結果を得ることができる。

$$\begin{aligned} z'_{nm} &= \frac{r_n \cdot \tilde{h}'_{nm} \cdot t_m}{\hat{h}_{nm}} \cdot c_n^{Rx} \cdot c_m^{Tx} \cdot \frac{1}{\hat{C}_0} \\ &= \frac{d'_{nm}}{d_{nm}} \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda} \Delta d_{nm}\right) \end{aligned}, \quad (13)$$

式(13)によって求めた値を使って、式(8)、式(9)を行うことで、RF 誤差を含む場合にも配置キャリブレーションが可能となる。

RF キャリブレーションは、式(2)についてアンテナ素子間距離誤差の影響を受け、推定精度が劣化する。一方、配置キャリブレーションは、残留する RF 誤差の影響を受け、推定精度が劣化する。したがって、RF キャリブレーションと、配置キャリブレーションを繰り返し行うことによって、互いの処理の精度を徐々に向上させてゆく。

3. 性能評価

提案するキャリブレーション方式の有効性を確認

するため、計算機シミュレーションを行った。キャリブレーション実施後の到来方向推定精度によってキャリブレーションの効果の評価した。なお、到来方向推定の目標精度を1度として評価を行った。

表1に共通シミュレーション緒元を示す。なお、各アンテナ素子は無指向性とし、キャリブレーションのための参照信号は送信電力-45 dBmとした。雑音電力はボルツマン定数 1.38×10^{-23} 、帯域幅20 MHz、温度290 K、雑音指数6 dBとして算出した。各アンテナ素子の送信、受信RF係数は文献[6]と同様に、振幅の標準偏差 $\varepsilon = 0.1$ の1様分布、位相は $0 \sim 2\pi$ の間で1様分布となる乱数に従い設定した。また、10000回の試行それぞれにおいてランダムに設定した。

アンテナ素子間における電波伝搬が式(2)の通りであり、配置誤差も存在しない条件におけるシミュレーション結果を図4に示す。横軸は到来信号電力と雑音電力の比(SNR)であり、縦軸は到来方向推定のRMSE (root mean square error)である。従来技術は文献[5]のキャリブレーション方式の特性であり、理想はRF誤差なしの場合の特性である。図4より、提案技術の特性は、理想条件の特性とほぼ一致しており、キャリブレーションが精度良く実施されていることがわかる。

図4では、アンテナ素子間の電波伝搬が式(2)の通りとしたが、アンテナ素子間の近傍の通信でも、アンテナ素子を支えるアーム等からの反射波が存在することも考えられる。そこで、アンテナ素子間の電波伝搬を、直接波と反射波の2波から構成される大地反射2波モデルにおける特性評価を行った。シミュレーション結果を図5に示す。アンテナ高は0.1 mとし、反射面の複素相対屈折率を、比較的強い反射が生じる5-0.1j, 5-1.0j, と反射は弱い、反射時に位相が大きく回転する、2.5+1.0j, 2.5+1.5j, 2.5+2.0jについて評価を行った。また、電波の電界方向に対し、反射面が水平であると、仰角俯角方向の指向性は無いものとして評価を行った。

表 1 共通シミュレーション緒元

アンテナ素子数	8
アレー構成	一様円形アレー (半径 0.5λ)
到来方向推定方式	MUSIC
角度分解能	0.1 度
スナップショット数	100
到来波数	1 (波数はカンニング)
到来波周波数	2GHz
キャリブレーション用 参照信号電力	-45dB

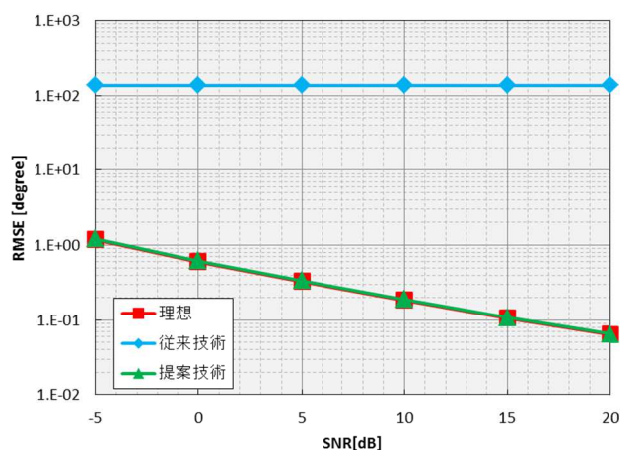


図 4 到来方向推定精度
(伝搬モデル誤差なし、配置誤差なし)

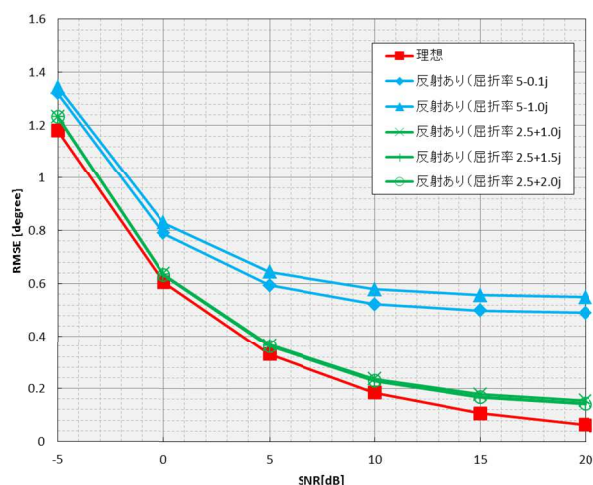


図 5 到来方向推定精度
(伝搬モデル誤差あり、配置誤差なし)

図5より、反射波が存在し、伝搬モデルに想定と誤差がある場合、理想条件の特性と比較すると、到来方向推定の推定精度が劣化していることがわかる。しかし、SNR=0 dB以上では、到来方向推定精度1度以下は達成できている。したがって、実伝搬環境が想定するモデルと異なるとしても、考案技術によりRFキャリブレーションは可能であると考えられる。

次に、配置キャリブレーションの基礎評価のため、RF誤差が存在せず、配置誤差が存在する条件において、キャリブレーションの効果を計算機シミュレーションにより確認した。シミュレーション結果を図6に示す。横軸はアンテナ誤差であり、縦軸は到来方向推定のRMSEである。なお、伝搬路モデルの誤差も含んでおり、相対複素屈折率は5.0-1.0jとした。アンテナ配置誤差は、波長 λ に対する割合で配置誤差の半径を求め、その半径内に99.7%収まるような正規分布に従い、ラ

ンダムに配置誤差を決定した．またキャリブレーションの繰り返し数は5回，ステップ係数 α は0.5とした．

図 6 より，アンテナ配置誤差 10%において，推定精度が約 30%改善していることがわかる．また到来方向推定精度も 1 度以内を達成している．したがって，アンテナ配置誤差の影響を考案した配置キャリブレーションにより軽減できているといえる．

最後に，RF 誤差，配置誤差の両方ともが存在する条件における，キャリブレーション効果の確認を行った．RF 誤差が存在する他は，配置キャリブレーションの効果確認時と同じ条件とした．シミュレーション結果を図 7 に示す．配置キャリブレーションまで実施することによって，アンテナ配置誤差約 3%以上の場合に推定精度が改善しており，アンテナ配置誤差に対するロバスト性が向上していることがわかる．RF キャリブレーション+配置キャリブレーションまで行うことで，アンテナ配置誤差 6%でも，到来方向推定精度 1 度以下を達成できる．

4. まとめ

本稿では，自装置がもつアンテナ素子から送信した参照信号を，自身のアンテナ素子で受信することで，アンテナ素子間の位相，振幅誤差，アンテナ素子の配置誤差をキャリブレーションする方式を提案した．提案方式は，伝搬モデルに基づき伝搬路ゲインを推定し，各アンテナ素子の送信，受信 RF 係数を含んだ伝搬路推定値から伝搬路ゲインのキャンセルを行い，RF キャリブレーションを行う．また，伝搬路ゲインのキャンセル結果から，アンテナ素子間の距離を算出し，距離に基づきアンテナ素子の配置を推定することで配置キャリブレーションを行う．シミュレーション結果より，提案方式はアンテナ素子間の位相，振幅誤差が存在し，さらに配置誤差が 6%程度存在しても，到来方向推定精度 1 度以下は達成できることを示した．

本稿ではアンテナ素子間の近傍電波伝搬について自由空間伝搬モデルを仮定し評価を行った．アンテナ素子間の近傍電波伝搬における伝搬モデルを実験より明らかにすることが今後の課題である．

文 献

- [1] 鷹取泰司，西森健太郎，“次世代高速無線アクセスシステムへの下りリンクマルチユーザ MIMO 技術の適用，” 信学論 (B), vol.J93-B, No.9, pp.1127-1139, Sep. 2010.
- [2] 菊間信良，アダプティブアンテナ技術，オーム社，2003.
- [3] 石黒靖博，菊間信良，平山裕，榊原久二男，“SAGE アルゴリズムを用いた高分解能電波到来方向推定のための方形重み付きアレーアンテナ校正法，” 信学論 (B), vol.J93-B, No.2, pp.303-311, Feb. 2010.
- [4] 天野良晃，井上隆，川本謙悟，中野雅之，要海敏

和，“空間分割多元接続を実装するセルラー基地局用送信オンラインキャリブレーション方式，” 信学論 (B), vol.J89-B, No.12, pp.2216-2225, Dec. 2006.

- [5] C.Shepard, H. Yu, N. Anand, L. E. Li, T. Marzetta, R. Yang and L. Zhong, “Argos: Practical Many-Antenna Base Stations,” Mobicom2012.
- [6] J. Vieira, F. Rusek and F. Tufvesson, “Reciprocity calibration methods for Massive MIMO based on antenna coupling,” IEEE Globecom 2014 Workshop, Dec., 2014.
- [7] 高田潤一，“電波伝搬の基礎理論，” Microwave Workshop and Exhibition 2005, Nov. 2005.

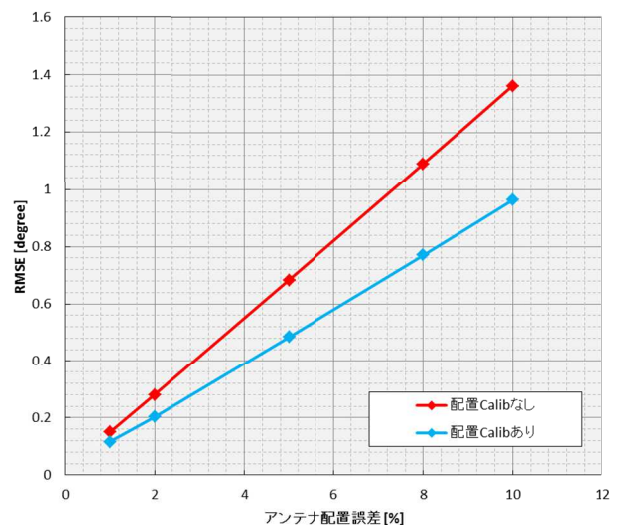


図 6 到来方向推定精度
(RF 誤差なし，配置誤差あり)

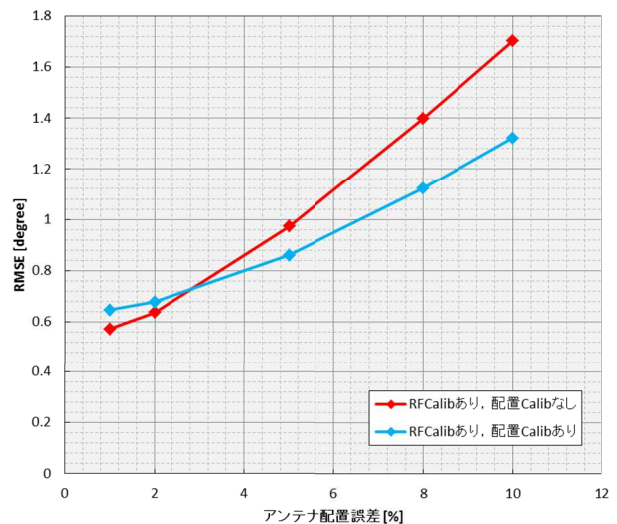


図 7 到来方向推定精度
(RF 誤差あり，配置誤差あり)