

到来方向推定のためのアレーアンテナの校正法の研究

平 山 裕 名古屋工業大学工学部助教

1 はじめに

GPS受信装置の小型化により、今日では、携帯電話のような小型端末においても、どこにいても自分の居場所が分かる利便性を享受できるようになった。しかしながら、GPSによる測位は、GPS衛星が見通しにある場合しか行えず、部屋の中での位置推定や、屋外であってもビルに囲まれて衛星が見通せないような場所では行うことができない。現在、市場が急成長しているRFIDタグや、将来の成長が期待される家庭内ロボットでは、部屋の中において、無線装置の場所を高精度に推定することが望まれている。

UHF帯を用いたRFIDタグは、タグの内容を読み書きするだけでなく、その位置を知ることができれば、例えば図書館において希望の本が棚のどの位置にあるのか、学生の出席管理システムにおいてどの学生がどこに着席しているかを知ることができ、大変有用である。また、家庭内ロボットを実用化するためには、ロボットが自分の位置を高精度に知る必要がある。

このようなシステムを実現するためには、アレーアンテナを用いて無線装置が発する電波の到来方向、および距離を推定することが必要である。これまでの多くのアレーアンテナのアプリケーションでは、電波の発信源は十分遠方にあり、到来波が平面波とみなせる環境にあったため、到来波の到来方向のみが推定可能であった。一方、室内における電波源の位置推定の場合、電波源までの距離がアレーアンテナの開口長に対して十分大きいとは言えず、到来波を球面波と見なすことができる。この場合、波源の方向のみならず、球面波の曲率半径を元にして、波源までの距離をも推定することができる。しかしながら、アンテナ間のわずかな位相差をもとにして距離を推定するため、高精度な位相測定が必要となる。

MUSICアルゴリズムなどの高分解能到来方向推定アルゴリズムを用いれば、理論的には十分な推定精度が得られるはずである。しかしながら実際には、アレーアンテナの製作誤差、アンテナ間の相互結合、室内の反射物による多重伝搬などにより、理論的な推定精度を得ることは難しい。そのため、これらの誤差をモデル化し、ソフトウェアにより誤差を取り除くための手法が必要となる。

誤差をソフトウェアで除去するためには、既知の到来方向の電波を測定することにより校正をすることが必要となる。室内の多重伝搬の影響も含めた誤差を取り除くためには、アンテナが設置された現場で測定を行い、校正することが必要である。このため、校正法は簡便であることが重要である。

誤差の原因として素子間相互結合によるもの、アンテナ素子の位置誤差によるものを考慮した、シミュレーションをベースとした研究が多数発表されている。しかしながら、実際の装置では、受信系の位相・振幅誤差、アンテナのグラウンド板による影響など多くの誤差要因があり、これら全てをシミュレーションに組み込むことは困難である。したがって、実測に基づきシミュレーションの正当性を検証し、これまでシミュレーションに考慮されてこなかった誤差原因を発見することは大変重要である。

本研究の目的は、アレーアンテナシステムを実際に構築し、シミュレーション結果と比較することによって、より高精度なアレーアンテナの校正法を提案することである。

2 アレーアンテナシステムの構築

2-1 全体の構成

構築したアレーアンテナシステム全体のブロック図を図1に示す。送信系では、デジタル変調された高周波信号を出力する。受信系は、アレーアンテナ装置、受信装置、局部発振器、サンプル及記憶装置から構成される。

実際の装置では、受信側で位相同期とシンボル同期を確立する必要があるが、本システムでは、送信システムから位相同期信号とシンボル同期信号を取り出して受信側でこれらを使用することにより、同期がとれた状態を模擬している。

RX System

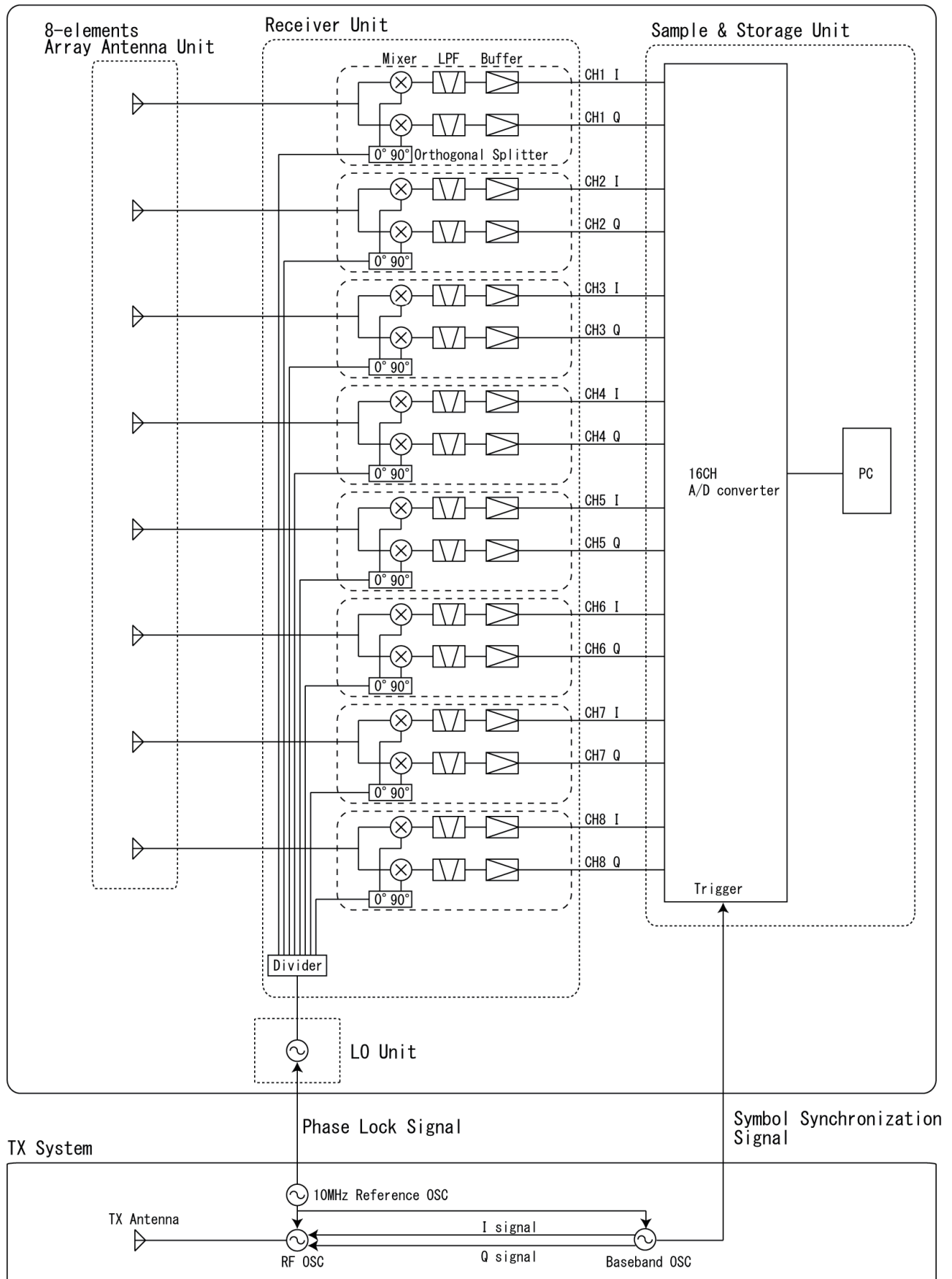


図1 構築したアレーアンテナシステムのブロック図

表 1 構築したアレーアンテナシステムの諸元

アンテナ部	
使用周波数	2.45GHz
素子形式	1 / 4 波長モノポールアンテナ
アレー素子数	8 素子
アレー間隔	1 / 2 波長
受信部	
受信周波数範囲	800MHz～2.7GHz
受信方式	ダイレクトコンバージョン 直交復調器
第3次インターセプトポイント	11.5dBm
直交検波器位相誤差	最大±3°
直交検波器振幅誤差	最大0.3dB
ベースバンド帯域幅	3MHz
サンプリング部	
サンプリングレート	500kHz
電圧分解能	12bit

2-2 送信部

ベースバンド信号発生器により、デジタル変調された I チャネル、Q チャネルのベースバンド信号を発生させる。同時に、トリガ信号を受信系のサンプリング装置に供給することにより、シンボル同期を模擬する。発生されたベースバンド信号は、高周波発振器から出力された信号を変調させ、アンテナから発射される。これらの機器は 10MHz の基準発振器に同期されている。さらに、受信側の局部発振器にもこの基準信号を供給することにより、位相同期を模擬している。また、実験は電波暗室内で行った。

2-3 受信部

構築したシステムの諸元を表 1 に示す。

(1) アレーアンテナ

図 2 に、構築したアレーアンテナの写真を示す。グラウンド板としてアルミ板、エレメントとして真鍮パイプを用いた。特別なマッチング回路やバランは持たず、2.45GHz で反射が最小になるように調整してある。

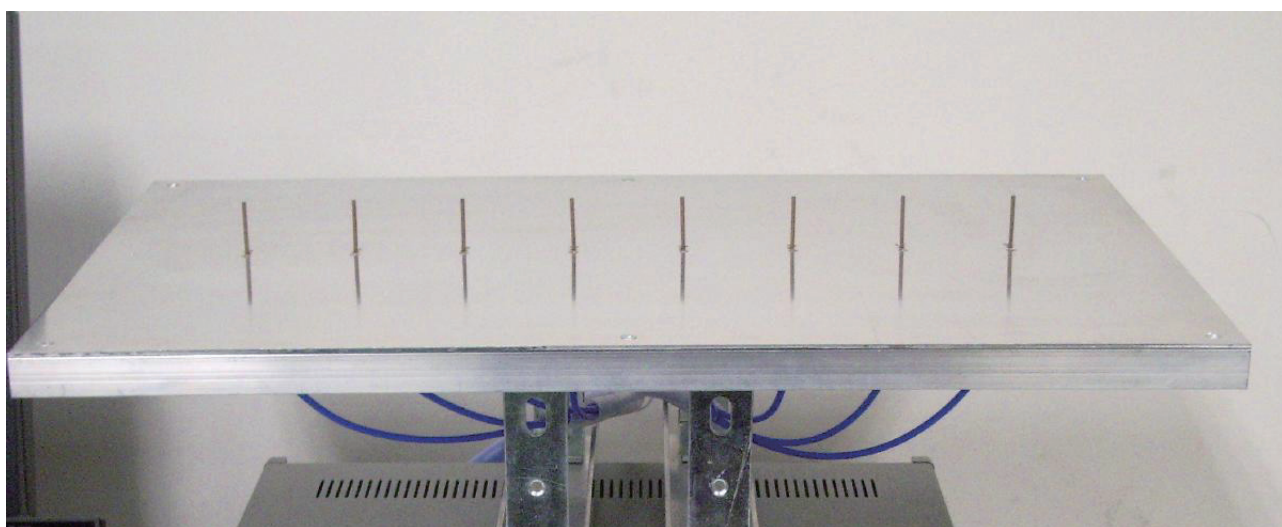


図 2 構築したアレーアンテナ

アレーアンテナの誤差要因の大きなものとして、アンテナ素子間の相互結合によるものが考えられる。表 2 に、ネットワークアナライザを用いてアンテナ素子間の相互結合量を測定した結果を示す。表の対角成分はアンテナの反射係数であり、それ以外は結合係数である。この表より、隣接素子では最大-15.83dB の相互結合があることが分かる。また、アンテナの反射係数も-30.48dB から-23.54dB と、7dB ほどのばらつきがあることが分かる。

表 2 構築したアレーアンテナの結合係数および反射係数

		TX antenna							
		1	2	3	4	5	6	7	8
R X a n t e n n a	1	-23.54dB/ 133.4°	-15.83dB/-179.9°	-23.74dB/- 4.2°	-27.47dB/ 165.8°	-29.56dB/- 15.7°	-32.03dB/ 163.0°	-35.00dB/ 1.7°	-38.90dB/ 171.5°
	2	-15.83dB/-179.9°	-27.61dB/ 142.8°	-16.16dB/-179.5°	-23.52dB/- 22.7°	-25.1dB/ 164.3°	-30.86dB/- 11.9°	-33.41dB/ 162.4°	-37.05dB/- 17.6°
	3	-23.74dB/ -4.2°	-16.16dB/-179.5°	-26.64dB/ 152.1°	-16.08dB/-174.5°	-24.64dB/- 6.5°	-26.27dB/ 160.8°	-30.43dB/- 7.8°	-32.60dB/-167.9°
	4	-27.47dB/ 165.8°	-23.52dB/- 22.7°	-16.08dB/-174.5°	-24.05dB/ 167.2°	-16.14dB/-172.5°	-23.83dB/- 19.9°	-26.85dB/ 174.0°	-29.83dB/- 12.4°
	5	-29.56dB/- 15.7°	-25.1dB/ 164.3°	-24.64dB/- 6.5°	-16.14dB/-172.5°	-27.30dB/ 159.6°	-16.13dB/-178.2°	-23.35dB/- 7.4°	-27.45dB/ 173.5°
	6	-32.03dB/ 163.0°	-30.86dB/- 11.9°	-26.27dB/ 160.8°	-23.83dB/- 19.9°	-16.13dB/-178.2°	-26.38dB/ 148.9°	-16.63dB/ 177.5°	-22.51dB/- 13.4°
	7	-35.00dB/ 1.7°	-33.41dB/ 162.4°	-30.43dB/- 7.8°	-26.85dB/ 174.0°	-23.35dB/- 7.4°	-16.63dB/ 177.5°	-30.48dB/ 155.0°	-16.21dB/-169.3°
	8	-38.90dB/ 171.5°	-37.05dB/- 17.6°	-32.60dB/-167.9°	-29.83dB/- 12.4°	-27.45dB/ 173.5°	-22.51dB/- 13.4°	-16.21dB/-169.3°	-24.10dB/ 134.1°

(2) 復調部

アレーアンテナの出力は、受信機に入力され、ベースバンド信号が復調される。構築したアレー受信機の内部の写真を図 3 に示す。8 個のアンテナに対してそれぞれ I 信号と Q 信号を復調するため、16 チャンネルのベースバンド信号が出力される。8 個の受信回路の特性のばらつきや、受信機までの配線での振幅・位相のばらつきが、受信信号の誤差の原因として考えられる。

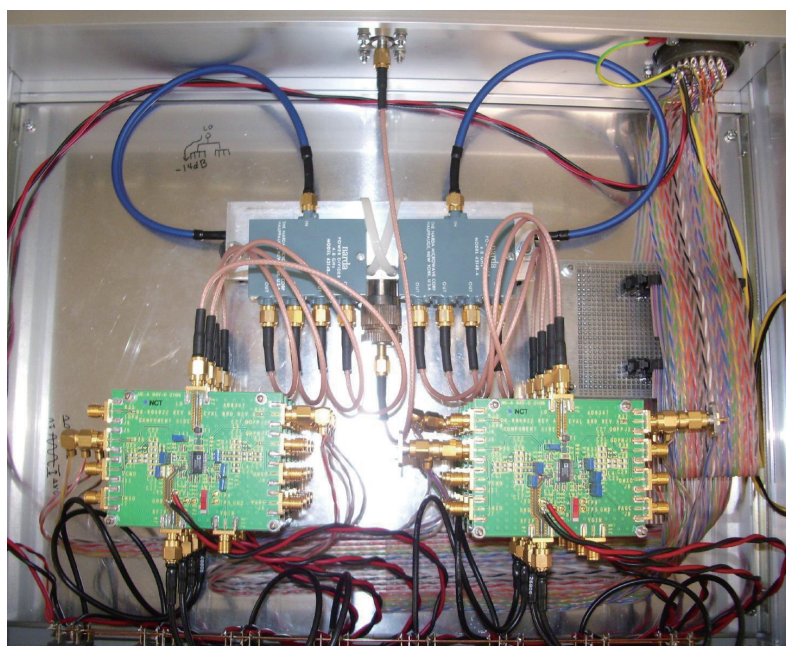


図 3 構築したアレー受信機の内部

(3) サンプリング部

受信部から出力された、計 16 チャンネルのベースバンド信号は、サンプラーによりサンプリングされて、計算機に取り込まれる。第 k 番目のアンテナで、時刻 t におけるスナップショットで観測された I 成分、Q 成分の電圧をそれぞれ $v_k^I(t)$, $v_k^Q(t)$ とすると、受信信号ベクトル $\mathbf{x}(t)$ は、次のように表される。

$$\mathbf{x}(t) = [v_1^I(t) + jv_1^Q(t), \dots, v_k^I(t) + jv_k^Q(t), \dots, v_8^I(t) + jv_8^Q(t)]^T \quad (1)$$

相関行列 \mathbf{R}_{xx} は次のように表され、この行列をもとに、到来方向推定が行われる。

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] \quad (2)$$

ここで、 $E[\]$ はアンサンブル平均を表す。

アレーアンテナの素子位置誤差、相互結合、グラウンド板による影響、受信系の誤差が無ければ、測定により得られた相関行列は真の相関行列となる。しかしながら、実際にはこれらの影響が無視できないため、測定された受信信号から、真の受信信号を推定する手法が必要となる。

(4) 信号処理部

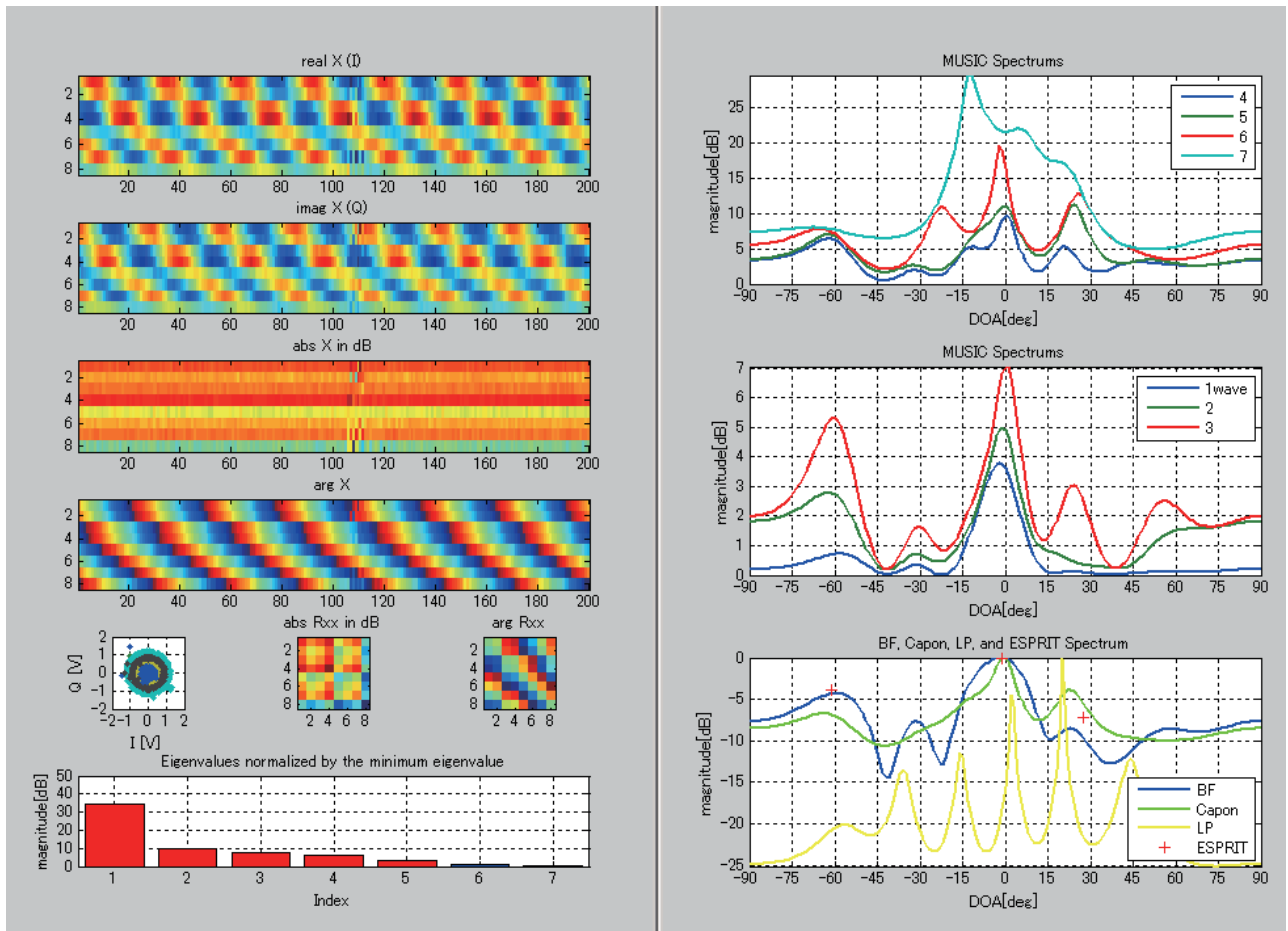


図4 構築した受信信号取り込み・解析ソフトウェア

電子計算機上で動作するソフトウェアにより、受信信号は取り込まれ、解析される。構築したソフトウェアの画面を図4に示す。受信した受信信号ベクトル、コンスタレーション、相関行列、相関行列の固有値分布、および Beamformer 法、Capon 法、LP 法、MUSIC 法、ESPRIT 法による到来方向推定結果を表示する能力を

持つ。受信された信号はファイルに保存され、オフラインで校正法のアルゴリズムの開発に使用することができる。

3 校正法の原理

3-1 受信信号モデル

構築した装置により得られた受信信号ベクトル $\mathbf{x}(t)$ は、次のようにモデル化することができる。

アレーアンテナに L 波の電波が入射しているものとする。第 l 波の到来角、モードベクトル、時刻 t における複素振幅をそれぞれ θ_l , $\mathbf{a}(\theta_l)$, $s_l(t)$ とすると、

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{l=1}^L \mathbf{M}\mathbf{a}(\theta_l)s_l(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

ただし、

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_L)] \quad (4)$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_L(t)]^T \quad (5)$$

であり、 $\mathbf{n}(t)$ は雑音信号ベクトルである。また、行列 \mathbf{M} は、アレーの誤差を表すアレー誤差行列である。行列 \mathbf{M} が分かれば、実際に得られた受信信号ベクトルから真の受信信号ベクトルが求まるため、アレー誤差の校正が行える。ただし、 \mathbf{M} は受信信号の到来方向によって異なるため、到来方向ごとの \mathbf{M} を用意しておく必要がある。

3-2 重み付き校正法

実際のアレーアンテナを用いて、到来方向が既知である N 波の参照信号を、個別に受信する。第 i 番目の参照信号を受信したときに得られる受信信号ベクトル $\mathbf{x}_i(t)$ は次のように表現される。

$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{M}\mathbf{a}(\hat{\theta}_i)\hat{s}_i(t) + \mathbf{n}_i(t) \quad (6)$$

また、このときの相関行列は

$$\mathbf{R}_i = E[\mathbf{x}_i(t)\mathbf{x}_i^H(t)] \quad (7)$$

となる。次に、合計 N 個の \mathbf{R}_i から、誤差行列 \mathbf{M} を推定する。 \mathbf{a}_{ei} を、 \mathbf{R}_i の最大固有値に対する正規化固有ベクトルとすると、

$$\mathbf{M}\mathbf{a}(\theta_i) = c_i\mathbf{a}_{ei} \quad (8)$$

となる。ここで、 c_i は複素定数である。評価関数 J を、

$$J = \sum_{i=1}^N \omega_i \left\| \mathbf{M}\mathbf{a}(\hat{\theta}_i) - c_i\mathbf{a}_{ei} \right\|^2 = \left\| (\mathbf{M}\mathbf{A} - \mathbf{A}_e\Lambda)\mathbf{W}^{1/2} \right\|_F^2 \quad (9)$$

として、 J を \mathbf{M} と Λ について最小化することにより、 \mathbf{M} が推定できる。ただし、

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\hat{\theta}_1), \dots, \mathbf{a}(\hat{\theta}_N)] \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_e = [\mathbf{a}_{e1}, \dots, \mathbf{a}_{eN}] \quad (11)$$

$$\Lambda = \text{diag}\{c_1, \dots, c_N\} \quad (12)$$

$$\mathbf{W} = \text{diag}\{\omega_1, \dots, \omega_N\} \quad (13)$$

であり、 ω_i は、到来方向に対する重み付けである。アレーの校正を実行する前に、あらかじめ Beamformer

法により、到来方向のおおよその見積もりをしておき、その方向に重みをつけて \mathbf{M} を推定することが、本手法の特徴である。

\mathbf{M} の推定値 $\hat{\mathbf{M}}$ は、次式により求められる。

$$\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{A}_e \Lambda \mathbf{W} \mathbf{A}^H (\mathbf{A} \mathbf{W} \mathbf{A}^H)^{-1} \quad (10)$$

3-3 数値例

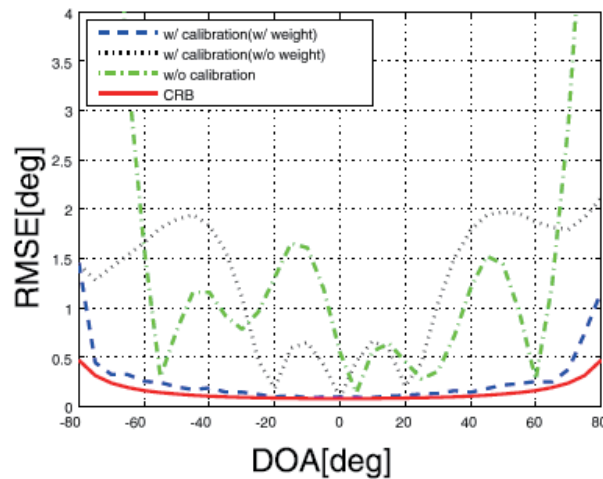


図4 校正前、校正後の到来方向推定誤差

前節で述べた校正法を用いた場合の数値例を、図4に示す。横軸は到来方向であり、縦軸は推定誤差である。赤線は推定誤差の理論限界を示す Cramér–Rao Bound、緑線は校正を行わない場合の推定誤差、黒線は重みづけなしで校正を行った場合の推定誤差、青線は重み付けを行い校正した場合の推定誤差である。重み付けを行った校正法により、到来方向推定誤差が大幅に減少していることが分かる。

4 むすび

当該年度の研究では、8素子アレーアンテナシステムを構築し、ハードウェア、ソフトウェアともに動作することを確認した。また、重み付け校正法によるアレー校正法を提案し、従来の重み付けなし校正法より誤差が減少したことを確認した。

引き続き、構築したアレーアンテナシステムを使用して、シミュレーションと実測の比較を行いながら、新しい校正アルゴリズムの検討を行っていく予定である。

【参考文献】

- [1] C.M.S. See "Sensor array calibration in the presence of mutual coupling and unknown sensor gains and phases", IEEE Electronics Letters, vol.30, No.5, pp.373-374, March 1994.
- [2] Hiroshi Hirayama, Atsushi Hayashi, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "An experimental consideration on spatial correlation and minimum eigenvalue for MIMO system using polarizatoion," Proc. of EuCAP2007, Nov. 2007

[3] Yasuhiro Ishiguro, Nobuyoshi Kikuma, Hiroshi Hirayama, Kunio Sakakibara, “, Improvement of Array Calibration Method for DOA Estimation by Using Weighted Reference Signals,” Proc. Of ISAP2007, Sep. 2007

[4] 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 DOA 推定のためのアレーアンテナ校正法,” 電子情報通信学会 信学技報, AP2007-188, pp.89-94, 2008 年3月

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Improvement of Array Calibration Method for DOA Estimation by Using Weighted Reference Signals	Proceedings of ISAP2007	2007年8月
An experimental consideration on spatial correlation and minimum eigenvalue for MIMO system using polarizatoin,	Proceeding of EuCAP 2007	2007年11月
SAGE アルゴリズムを用いた DOA 推定のためのアレーアンテナ校正法	電子情報通信学会 信学技報	2008年3月