

移動通信用帯域分割型アダプティブアレーにおける ウェーブレット分解の有効性

間瀬 大祐[†] 市毛 弘一[†] 新井 宏之[†]

[†] 横浜国立大学 大学院 工学府/工学研究院

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

E-mail: mase@ichilab.dnj.ynu.ac.jp, {koichi,arai}@ynu.ac.jp

あらまし 適応信号処理技術により受信信号から所望波信号を抽出するアダプティブアレーアンテナ, 特にフェージング対策などに優れている時空間信号処理アダプティブアレーが注目されている. このアレー構成では, 適応的に制御される重み係数が多く計算量の増大が問題となる. この問題に対して, 受信信号を周波数領域に変換して帯域ごとに分割し, 各帯域ごとに並列に適応信号処理を行うことで, 全体の計算量を低減する帯域分割型アダプティブアレーが提案されている. 他方, 近年, 計算量を少なく保ったままで収束を早くした適応アルゴリズムが提案されており, アレー構成の時間-周波数領域変換に用いられる FFT/IFFT 処理の計算量が相対的に増大し, 無視できないものとなっている. 本稿では, 帯域分割型アダプティブアレーにおける FFT/IFFT 処理の代わりにウェーブレット変換・逆変換を用いることにより, 計算量の低減, 収束特性の改善が図れないか検討する. 基本ウェーブレットとしては, Haar および Daubechies ウェーブレットを用いた場合について考察する. これらのウェーブレット分解・再構成を行うフィルタバンクを用いてシステム構成し, 収束特性や計算量, 到来波分離システムとしての性能を検証する.

キーワード アダプティブアレーアンテナ, 帯域分割, フィルタバンク, ウェーブレット

An Adaptive Array Antenna System Using Wavelet-based Frequency Subband Decomposition

Daisuke MASE[†], Koichi ICHIGE[†], and Hiroyuki ARAI[†]

[†] Department of Electrical and Computer Engineering, Yokohama National University
Tokiwadai 79-5, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, 240-8501, Japan

E-mail: mase@ichilab.dnj.ynu.ac.jp, {koichi,arai}@ynu.ac.jp

Abstract Adaptive array antenna system extracts the target signal from received signals by adaptive signal processing technique, especially the spatiotemporal adaptive array are attracted due to their effectiveness for the phasing problems. The spatiotemporal array construction requires lots of weight parameters to be adaptively controlled, which causes the problem of the large computational cost. To reduce such computational cost, the received signals are first transformed into frequency subband components, and then they are adaptively processed in parallel. Frequency subband decomposition can reduce the computational cost. On the other hand, some adaptive algorithms are recently proposed that can realize fast convergence while preserving low computational cost. It means that the computational cost in FFT and IFFT used for spatiotemporal transformation cannot be ignored. In this report, we employ the wavelet transformation instead of FFT and IFFT for spatiotemporal transformation, and confirm if the wavelet transformation can reduce the computational cost or can improve the convergence property. We develop a spatiotemporal adaptive array antenna system with filterbanks, which implement Haar or Daubechies wavelet decomposition and reconstruction.

Key words adaptive array antenna, frequency subband decomposition, filterbank, wavelets

1. ま え が き

移動体通信応用を目的として、適応信号処理により受信信号から所望波信号を抽出するアダプティブアレーアンテナに関する研究が近年盛んであり、これまでに様々な到来波分離・識別アルゴリズムやその実装例が報告されている[1], [2]。なかでも、空間領域の信号処理だけでなく、時間領域の信号処理も同時に行う時空間信号処理アダプティブアレーは、移動体通信の高速化・広帯域化に必要なフェージング対策などに優れている性質がある。しかしながら、このような時空間信号処理アダプティブアレーでは、適応的に制御される重み係数が多く計算負荷が大きくなり、収束時間が長くなること、実装時の回路規模が膨大なものとなることなどの問題点を抱えている。

アダプティブアレーにおける適応信号処理全体の計算量を軽減するためには、帯域分割型のアダプティブアレーが有効であることが既に報告されている[3]。これは、受信信号を周波数領域に変換して帯域ごとに分割し、各帯域ごとに適応信号処理を行い、全体の計算量を大幅に軽減できる構成である。さらに、図1に示すようなダウンサンプリングを導入することにより信号の冗長性を省き、重み係数の更新速度を減少させ、計算負荷をさらに軽減させる構成も提案されている[3]。このように、周波数帯域分割処理型のアダプティブアレーでは、他のアレーに比べ、アダプティブ処理部の計算負荷を軽減させることが可能である。しかし、時間-周波数領域変換部であるFFT(高速フーリエ変換)部の処理は固定されており、それ自体の計算負荷を削減することは困難である。また、ダウンサンプリングを導入した場合、アダプティブ処理後の出力にIFFT(逆FFT)処理も必要であり、時間-周波数変換の計算負荷がより大きくなる。他方、近年、収束速度を早く保ったまま計算量を低減できる適応アルゴリズムが提案されており[4], [5]、アレー構成全体に占める時間-周波数領域変換の計算量が相対的に増大し、無視できないものとなってくる。

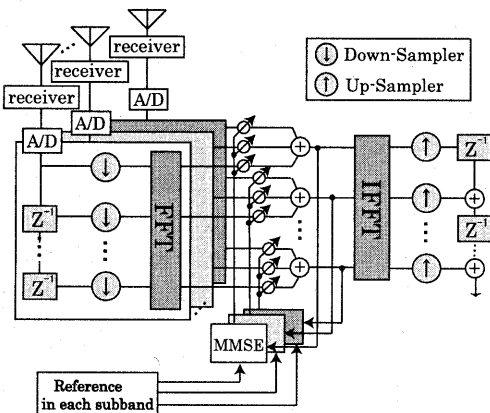


図1 FFTによる帯域分割型アダプティブアレー[3]

そこで本稿では、計算効率の向上を図ることを目的として、時間-周波数領域変換部にウェーブレット分解・再構成を用いたアダプティブアレーアンテナシステムについて検討を行う。基本

ウェーブレットにはHaarウェーブレット、Daubechiesウェーブレットを用いる。ウェーブレットを用いることで収束特性が改善されること[6]、また、Daubechiesウェーブレットによる周波数情報をもとにDOA推定を行うことで推定精度が改善されること[7]が既に報告されているように、帯域分割型アダプティブアレーにおいてもウェーブレット分解が有効に働くものと期待できる。ウェーブレット分解・再構成の実現にはフィルタバンクを用いて、さらに冗長な演算を削減する工夫を行うことにより、少ない計算量でウェーブレット分解が可能となる[8]。また、全帯域を均等分割した場合の他に、高周波領域もしくは低周波領域のみを分割した場合についてもそれぞれ検討を行う。

本稿の構成は次のとおりである。まず、2章において、ウェーブレット分解・再構成による帯域分割アダプティブアレーアンテナの構成とその動作原理を示す。次に、3章では、適応アルゴリズムについて概略を説明し、パラメータの設定方法を示す。4章では、2章で提案したシステムの特性をシミュレーションを通して検証する。FFT処理を行った場合との性能の比較・検討を行う。また、5章にて各処理に必要な計算量の比較も行う。最後に、6章にて本稿の結論を述べる。

2. 帯域分割アダプティブアレーアンテナの構成図

本稿で検討する K 素子半波長等間隔帯域分割型アダプティブアレーアンテナの構成を図2に示す。各アンテナ素子で受信された信号は各素子ごとにウェーブレットの意味で周波数サブバンドに分解される。ローパスフィルタとハイパスフィルタのフィルタ係数は、Haarウェーブレット分解とDaubechiesウェーブレット分解の場合でそれぞれ表1に示すように定められる。

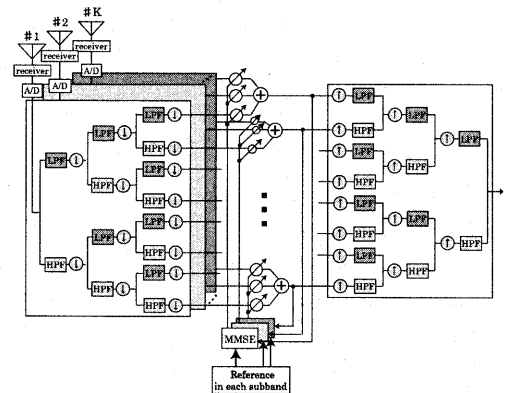


図2 フィルタバンクを用いた帯域分割型アダプティブアレー

この構成では、図1の場合と同様に、全信号を均等に周波数領域信号に変換している。しかし実際の信号は、低周波領域か高周波領域のどちらか一方に偏っていることが多い。フィルタバンクによるウェーブレット分解の利点のひとつとして、図3で示されるような片領域だけを重点的に分割していくフィルタバンクと、ほぼ等価的に置換することが可能であることが挙げ

表 1 フィルタ係数

	Haar	Daubechies
LPF	$1/2[1, 1]$	$1/4[1 + \sqrt{3}, 3 + \sqrt{3}, 3 - \sqrt{3}, 1 - \sqrt{3}]$
HPF	$1/2[1, -1]$	$1/4[-1 + \sqrt{3}, 3 - \sqrt{3}, -3 - \sqrt{3}, 1 + \sqrt{3}]$

られる。この置換により、ウェーブレットによる帯域分割部での計算量の軽減を期待できる。移動体通信における受信信号は低周波領域に偏っている場合が多いので、本稿では、図 3 で示される、低周波領域のみを分割した場合についても比較・検討を行う。

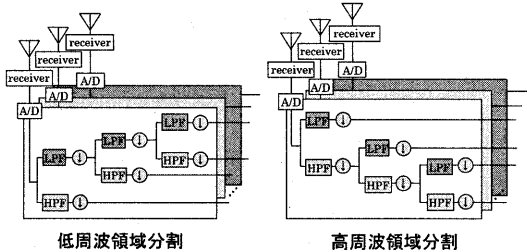


図 3 低周波領域・高周波領域 分割フィルタバンク

3. 重み係数更新アルゴリズムについて

本章では、アダプティブアレーアンテナで用いられる様々な適応アルゴリズムのうち、代表的なものについて概説する。また、LMS (Least Mean Square) アルゴリズムとその発展形である正規化 LMS (Normalized-LMS: N-MLS) [4], 改良正規化 LMS (Improved N-LMS: I-N-LMS) [5] のステップサイズの求め方を示す。

3.1 MMSE と CMA

アダプティブアレーアンテナの重み更新アルゴリズムとしては様々なものが提案されているが、参照信号が必要な MMSE (Minimum Mean Square Error) アダプティブアレーと、参照信号が不要な CMA (Constant Modulus Algorithm) アダプティブアレーの 2 種類に大別される。これらのアダプティブアレーの詳細は文献 [1], [9] を参照されたい。本稿では、MMSE アダプティブアレーについて考察することとし、LMS とその派生形、さらに RLS (Recursive Least Squares) アルゴリズムについて検討する。一般に、LMS は計算負荷は小さいが収束が遅く、RLS は逆に収束は早い計算負荷が大きいと言える [9]。

3.2 LMS 系アルゴリズムのステップサイズについて

LMS アルゴリズムは、ステップサイズが大きいほど収束は速いが、収束後の安定性は悪いといった特徴を持つ。つまり安定性と高速応答性は相反するものである。そこで適切なステップサイズを用いることが重要である。また重み係数を発散させないためには、LMS アルゴリズムにおけるステップサイズ μ を、以下の条件を満たすように定める。

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{max}} \quad (1)$$

ここで、 λ_{max} は入力波の相関行列の最大固有値である。

正規化 LMS アルゴリズム (N-LMS) のステップサイズパラメータ μ は、次式より導かれる。

$$\mu = \frac{\alpha}{X(n)^T X(n) + \beta} \quad (2)$$

ここで、 α は収束速度を決めるパラメータ、 β は安定化パラメータである。また $X(n)$ はアンテナ素子の入力ベクトルであり、上添字 T は転置を示す。

さらに、N-LMS の収束速度を改善した改良正規 LMS (I-N-LMS) アルゴリズムが提案されている [5]。このアルゴリズムにおけるステップサイズパラメータ μ は、次式より導かれる。

$$\mu = \frac{2}{X(n)^T X(n) + \frac{\gamma}{|e(n)| + \delta}} \quad (3)$$

ここで、 γ は調整可能なパラメータであり、LMS アルゴリズムや N-LMS アルゴリズムにおけるステップサイズパラメータのような役割を果たす。また δ は安定化パラメータであり、 $e(n)$ は参照信号と出力信号の差である誤差信号を示す。

4. シミュレーション

本章では、8 素子半波長等間隔リニアアレーアンテナに、ある入射角の到来波 1 波とその遅延波 1 波の計 2 波が入射した場合についてのシミュレーションを行う。ウェーブレット分解による帯域分割型アレーの性能が FFT 分解による場合とどの程度異なるのかを、ビームパターンや収束速度、BER を用いて比較・検討する。本シミュレーションでは遅延波を干渉波として扱い、同相合成は行わないものとする。ここで用いる適応アルゴリズムは RLS, LMS, N-LMS, I-N-LMS を用いる。

4.1 シミュレーションの諸元

シミュレーションの諸元を表 2 に示す。なお図 4 に示すように、アレーアンテナの並びに対して垂直の方向を $0[\text{deg}]$ としている。

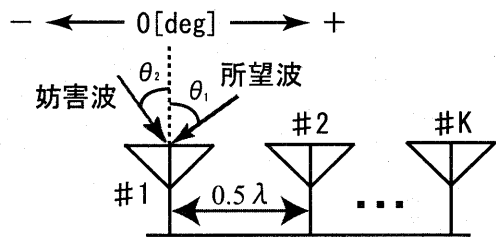


図 4 K 素子リニアアレー

4.2 ビームパターンと収束特性

アレーアンテナの角度依存性による影響を受けない最大到来角度と考えられる $60[\text{deg}]$ から所望波が到来するとき、RLS アルゴリズムによってアダプティブ処理をした場合の、重み係数更新を 1,000 回行った時点でのアンテナビームパターンを図 5 に示す。図 5 より、どの帯域分割方式においても所望波方向にビームを、遅延波方向にヌルを向けていて、アダプティブアレーアンテナとして正しく機能していることが確認できる。ピークサーチにより到来方向を推定し、あらかじめ与えた到来

表 2 シミュレーション諸元

	Case #1	Case #2	Case #3
DOA (Desired)	20 [deg]	60 [deg]	0 [deg]
DOA (Interference)	-10 [deg]	40 [deg]	-10 [deg]
Delay-time in Interference	25 [Sample]		
Number of array elements	8		
Array form	$\lambda/2$ uniform linear array		
Input SNR	7 [dB]		
IF	10 [MHz]		
Sampling Frequency	40 [MHz] (4sample/symbol)		
Roll-off Factor	0.5 (cosine roll-off filter)		
Modulation type	BaseBand $\pi/4$ shift-QPSK		
Frequency Subband Decomposition	FFT, Haar 等分割・低域分割, Daubechies 等分割・低域分割		
Adaptive algorithm	RLS, LMS, N-LMS, I-N-LMS		
Forgetting Factor in RLS	0.9~0.99		
Step size in LMS	0.1		
α in N-LMS	0.1		
β in N-LMS	0.0001		
γ in I-N-LMS	40		
δ in I-N-LMS	0.0001		

方向との推定誤差を求めたところ、試行 200 回分の推定誤差の平均二乗誤差は 1.0[deg] 以内に収まっていた。

このときの遅延波の収束特性を図 7 に示す。図 7 より、重み更新がおよそ 50 回までは急激に収束し、以後緩やかに -30[dB] 程度に収束していくことが確認できる。これら 2 図より、ウェーブレット分解において低周波領域のみを分割していったときも、帯域を均等に分割したときと同程度のアンテナ性能であることが確認できる。またそれらは、FFT によって帯域分割した場合とも同程度である。

さらに、RLS アルゴリズムと I-N-LMS アルゴリズムとのビームパターンの比較結果を図 6 に、遅延波の収束特性の比較結果を図 8 に示す。ウェーブレット分解については、低周波領域分割のみについて示している。図 6 も図 5 と同じく、重み係数更新を 1,000 回行った時点でのアンテナビームパターンである。図 6 より、I-N-LMS アルゴリズムにおいても帯域分割方式によらず、ほぼ等しいアンテナ性能が得られることが確認できる。また図 8 より、I-N-LMS アルゴリズムにおいても、分割方式による収束特性の大きな変化は認められない。他の重み係数更新アルゴリズム場合についても、同様であることを確認した。また LMS アルゴリズムは、RLS アルゴリズムに比べ収束が遅いといった特徴を持つ。しかし図 8 より、収束後の値はおおよそ -25[dB] と、両者とも十分な収束を得ていることが確認できる。同様な傾向を、他の重み係数更新アルゴリズムの場合でも確認した。

4.3 BER 特性

図 9 に、Case #1 の場合についての BER(Bit Error Rate) 特性を示す。送信シンボル数は 10,000 シンボルである。実際の伝搬環境を想定した SNR の範囲内では、入力 SNR の増加にしたがって BER は減少していくが、どの帯域分割方式も同

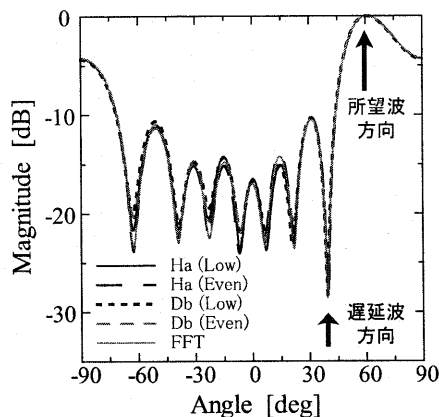


図 5 ビームパターン Case#2 (RLS)

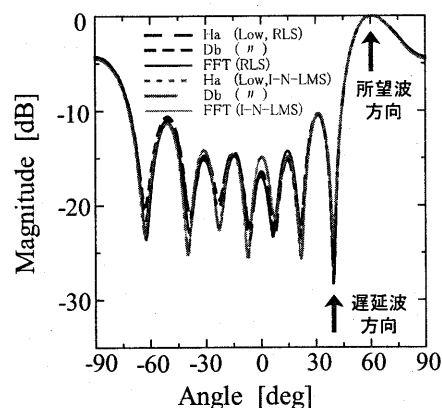


図 6 ビームパターン Case #2 (RLS, I-N-LMS)

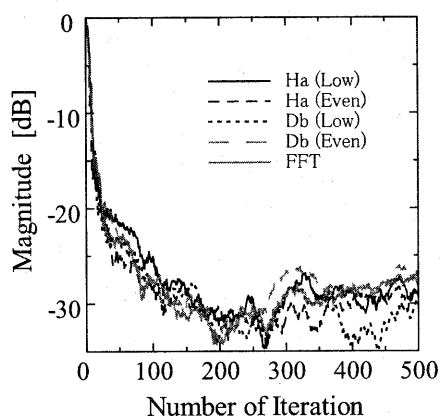


図 7 妨害波の収束特性 Case #2 (RLS)

じアダプティブアルゴリズム内については、ほぼ等しい BER 特性を持つことが確認できる。図 9 では、FFT による帯域分割と Haar ウェーブレットによる帯域分割を行った場合のみを示しているが、Daubechies ウェーブレットの場合も同様の特性を確認した。またその BER の値も、Haar とほぼ等しい結果

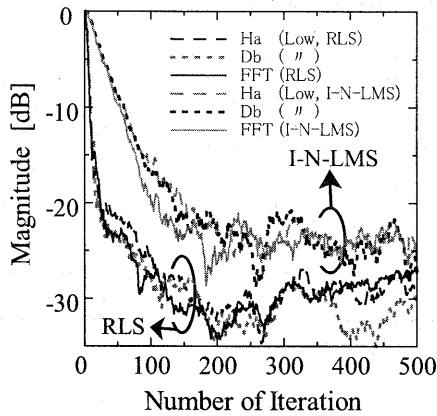


図8 妨害波の収束特性 Case #2 (RLS, I-N-LMS)

を得た。

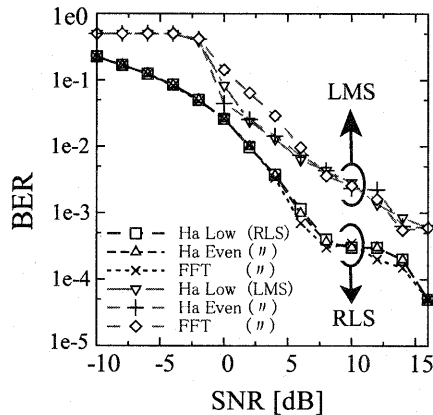


図9 Haar ウェーブレットの BER 特性 (Case # 1)

5. 計算量

本章では、各適応アルゴリズム、時間-周波数領域変換アルゴリズムの計算量について検討する。

表3に、図1、図2で示される8素子帯域分割型リニアアレーアンテナにおいて、重み係数更新を1回行うために必要な加算と乗算の回数を示す。各重み係数更新アルゴリズムは、ある1つの更新処理部で更新1回に必要な回数に全更新回路数をかけた回数であり、時間-周波数領域変換アルゴリズムは逆フィルタ過程分まで含めた回数である。また、()内は領域変換アルゴリズムの基本構成に忠実に処理した場合の値であり、処理回路の簡略化・計算手順の簡略化などにより()外の値に軽減できることを示す。なおRLSの乗算数[10]、FFTの加算数と乗算数は以下に示す式より導く。

RLSの乗算数： $3k^2 + 3k$ (k は求める重み係数の数)

FFTの加算数： $N \log_2 N$ (N は入力信号数)

FFTの乗算数： $\frac{N}{2} \log_2 N$ (")

表3より、Haar ウェーブレットはFFTに比べ、特に乗算数を大きく削減できることが確認できる。これはFPGAに実装する上で大きな利点となる。また、Haar ウェーブレットを用いた場合、乗算の係数は1/2などの2の倍数のみであり、デジタル演算ではシフト演算に置き換えられることから非常に都合が良い。これに対して、FFTでの乗算係数は必ずしも2の倍数とは限らず、一般には複素数である。よって実際の計算量は、表3で示される差以上があるものと考えられる。これは、Haar ウェーブレットによる分割の利点になると考えられる。一方、Daubechies ウェーブレットを用いた場合の計算量は大きなものとなり、計算量の面での利点はあまりないことも確認される。

RLSの乗算数： $3k^2 + 3k$ (k は求める重み係数の数)

FFTの加算数： $N \log_2 N$ (N は入力信号数)

FFTの乗算数： $\frac{N}{2} \log_2 N$ (")

表3 計算量

	8 信号出力の場合		16 信号出力の場合	
	加算	乗算	加算	乗算
RLS	1208	1728	2416	3456
LMS	128	136	256	264
N-LMS	192	208	384	400
I-N-LMS	264	280	528	560
FFT+IFFT	216	108	576	288
Haar 等分割	216 (432)	8 (432)	576 (1152)	16 (1152)
Haar 低域分割	126 (252)	8 (252)	270 (540)	16 (540)
Daubechies 等分割	648 (1296)	864 (1728)	1728 (3456)	2304 (4608)
Daubechies 低域分割	378 (756)	504 (1008)	810 (1620)	1080 (2160)

6. まとめと今後の課題

ウェーブレット分解を用いて帯域分割を行うアダプティブアレーアンテナについて、システム解析・検討を行った。Haar ウェーブレットの低周波領域分割を用いた場合、計算負荷がFFTよりも少なく、かつFFTの場合と同程度のアンテナ性能を持つことを確認し、Haar ウェーブレットの有効性を確認した。Daubechies ウェーブレットを用いた場合も性能は同等であったが、こちらは計算量が多く有効性を見出すには至らなかった。

今後の課題としては、ウェーブレット分解を用いた場合の計算量以外の利点の探求、送信波に実験値を用いた場合のアンテナ性能評価、またFPGAやDSPへの実装による検証などがあげられる。また、Daubechies ウェーブレットは、そのアンテナ性能はHaar ウェーブレットやFFTと同等であっても、計算量

の面で不利であった。しかし Daubechies ウェーブレットの基本形は Haar ウェーブレットのそれに比べ複雑であるため、アダプティブアンテナの挙動において Haar ウェーブレットを用いた場合より何らかの利点がある可能性が期待できる。こうした点が今後の研究課題となる。

文 献

- [1] 菊間, “アレーアンテナによる適応信号処理,” 科学技術出版, 1998.
- [2] 唐沢, “広帯域ワイヤレス通信のソフトウェアアンテナ技術,” トリケップス, 1999.
- [3] 神谷, 唐沢, “時間及び周波数領域信号処理を行う適応型アレーアンテナの種々の構成における特徴比較と収束特性改善,” 信学論 (A), vol.J82-A, no.6, pp.867-874, 1999.
- [4] J. Nagumo, A. Noda, “A learning method for system identification,” IEEE Trans. Automatic Control, vol.12, pp.282-287, June 1967.
- [5] 津田, 島村, “通信路等化のための改良正規化 LMS アルゴリズム,” 信学技報, DSP2002-11, Apr. 2002.
- [6] I. Journy, “Application of Wavelet Subband Decomposition in Adaptive array,” IEEE AP-S International Symposium, vol.1, pp.16-19, June 1994.
- [7] 福江, 浜田, “直交ミラーフィルタバンクの出力を利用した MUSIC 法による高速移動目標の測角方式,” 信学技報, AP2002-95, Oct. 2002.
- [8] G. Strang and T. Nguyen, “Wavelets and Filter Banks,” Wellesley-Cambridge, MA, USA, 1996.
- [9] K. Ichige, S. Shimizu and H. Arai, “Combination of Optimization Algorithms for MMSE/CMA Adaptive Antenna Array,” IEICE Tech. Report, AP2003-61, July 2003.
- [10] J. Wang, 高野, “カルマンフィルタを用いたアダプティブアンテナの検討,” 信学論 (B-II), vol.J75-B-II, no.11, pp.835-842, Nov. 1996.