

移動通信環境におけるアダプティブアレーの追従性の改善

藤元 美俊 堀 俊和

福井大学 工学部 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

E-mail: {fujimoto, hori}@fuis.fuis.fukui-u.ac.jp

あらまし 移動通信環境においてLMSアダプティブアレーの追従性が極端に劣化する場合があることを示し、長時間連続制御を行う場合には追従性の劣化がシステムの性能に致命傷を与えることを示す。また、これ回避する手段として、1) 重み係数を定期的リセットするリセット法、および、2) 重み係数に縮む力を与える収縮法の、2つの手法を提案し、さらにシミュレーションを通していずれの手法も RLS と同程度の性能を持つことを示す。

キーワード アダプティブアレー, 移動通信環境, 連続制御, LMS

Improvement of Continuous Control of Adaptive Array under Mobile Environment

Mitoshi FUJIMOTO Toshikazu HORI

Faculty of Engineering, University of Fukui, 3-9-1, Bunkyo, Fukui-city, 910-8507 Japan

E-mail: {fujimoto, hori}@fuis.fuis.fukui-u.ac.jp

Abstract Tracking performance of the LMS adaptive array might become worse under mobile communication environments. In this paper, it is indicated that the degradation of the performance deal a deathblow the system. To avoid the degradation, two types of new methods are proposed. One is Resetting which reset the weight coefficients periodically and the other is Bracing which slightly shorten the weight coefficients at every iteration. Results of computer simulations show that both proposed methods have comparable performance to the RLS algorithm.

Keyword Adaptive Array, Mobile Environment, Continuous Control, LMS

1. まえがき

陸上移動通信においては多重波干渉、同一チャネル干渉等による通信品質の低下が懸念されることから、その対策の一手法としてアダプティブアレーの適用が検討されている[1]。アダプティブアレーは複数のアンテナ素子で受信した信号に対して適応的に重み付けを行い合成するものであり、その制御アルゴリズムとして、これまで数多くのアルゴリズムが提案されている[2]。陸上移動通信環境では、到来波の到来方向や到来波数を正確に把握することが困難であるため、これらの情報を必要としないMMSE (Minimum Mean Square Error)が移動通信に適していると考えられている[3]。このMMSEでは参照信号が必要であるが、近年の移動通信システムのデジタル化にともない、パイロット信号や同期信号など参照信号として利用可能な情報が送信信号に組み込まれる

ようになったことから、MMSEは以前にもまして移動通信に好適なアルゴリズムであると言える。

MMSEは、受信信号の波形と参照信号の波形の誤差の自乗を最小化することにより、受信信号から所望波成分のみを抽出する手法である。その最適化手法としてはLMS (Least Mean Square), SMI (Sampled Matrix Inversion)およびRLS (Recursive Least-Squares)などが代表的である。SMIおよびRLSは収束特性に優れているものの、最適解を求めるために逆行列演算が必要であり、アンテナ素子数が多い場合にはその演算量が膨大となる。一方、LMSは演算量は少ないものの、到来波の到来方向が近い場合など、特定の条件において収束が極めて遅くなるという問題がある。この問題を解決する手法として、複数の最適化手法を組み合わせた手法が提案され、これにより両者の欠点を補い合うことができる

ことが示されている[4]. パケット伝送方式の場合のように、バースト的に伝送を行い、その期間内は到来波環境が変動しないとみなせる場合には、各バーストの先頭で重み係数を初期化することにより不要波抑圧に関して一定の効果を期待できる. しかし、連続的な通信にアダプティブアレーを適用する場合や、あるいは放送波を受信しながら連続的に指向性を制御する場合には、従来の LMS では収束が格段に遅くなってしまふ場合が生じる. 特にアルゴリズムが収束した後に到来波環境が変化すると、複数のアルゴリズムを組み合わせるイタレーション初期の収束速度を向上させた手法のみでは十分な効果を得ることは困難と考えられる.

本報告では、移動通信環境において LMS アダプティブアレーの追従性が極端に劣化する場合があることを示し、長時間連続制御を行う場合には追従性の劣化がシステムの性能に致命傷を与えることを示す. また、これを回避する手段として、2つの手法を提案し、さらにシミュレーションを通してそれぞれの手法の効果を検証する.

以下、2章では、本報告で扱う MMSE アダプティブアレーの定式化と、移動通信環境において LMS に基づいて連続制御した場合の問題点を明確にする. 3章では、問題を解決するための2つの手法、リセット法と収縮法を提案する. 提案した手法の有効性について、4章にて計算機シミュレーションを通して検証する.

2. MMSE アダプティブアレーと連続制御時の問題点

2.1 MMSE アダプティブアレーと最適化手法

図1に MMSE アダプティブアレーの基本構成を示す. アンテナ素子数を K とし、第 k 番目のアンテナ素子で受信した信号を x_k 、それぞれの信号に対する重み係数を w_k とする. それぞれをベクトル表記すると、

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_K]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{W} = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_K]^T \quad (2)$$

となり、アレーアンテナの合成出力信号 y は

$$y = \mathbf{X}^T \mathbf{W}^* \quad (3)$$

と表される. ここで添え字*および T は、それぞれ複素共役および行列の転置を表す. MMSE アダプティブアレーでは、出力信号 y と参照信号 r との誤差 e の自乗が最小となるように重み係数を制御する. 自乗誤差を最小と

する代表的な最適化手法として、LMS, RLS および SMI が挙げられる[2]. LMS および RLS による重み係数の更新式は、それぞれ、

$$\mathbf{W}_{LMS}(n+1) = \mathbf{W}_{LMS}(n) + \mu \mathbf{X}(n) e^*(n) \quad (4)$$

$$\mathbf{W}_{RLS}(n+1) = \mathbf{W}_{RLS}(n) + \gamma R_{xx}^{-1}(n) \mathbf{X}(n+1) e^*(n+1) \quad (5)$$

と表される. ここで、 R_{xx} は受信信号の相関行列である. μ と γ は重み係数の更新量を制御する定数であり、ステップサイズと呼ばれる. また、SMI においては次式に基づいて重み係数を算出する.

$$\mathbf{W}_{SMI}(n) = R_{xx}^{-1}(n) r_{xd}(n) \quad (6)$$

ここで $r_{xd}(n)$ は相関ベクトルと呼ばれ、次式で与えられる.

$$r_{xd}(n) = E[X(n)r^*(n)] \quad (7)$$

式(4)、式(5)および式(6)から分かるように、RLS や SMI では、重み係数を更新するたびに逆行列演算が必要であり、アンテナ素子数が多い場合には演算量が膨大となる. 一方、LMS の場合は、RLS や SMI の場合に比べ演算量は格段に少ない. しかし、所望波と不要波の到来方向が接近している場合には、収束速度が極端に低下してしまうという問題がある.

2.2 連続制御時におけるノルム肥大化の問題

近年の移動通信システムでは、パケット伝送方式が主であり、各パケットには同期信号や固体識別信号など受信側であらかじめ既知の信号が含まれている. これらを MMSE の参照信号として利用することにより重み係数を決定することが可能である. パケットの長さは移動体の

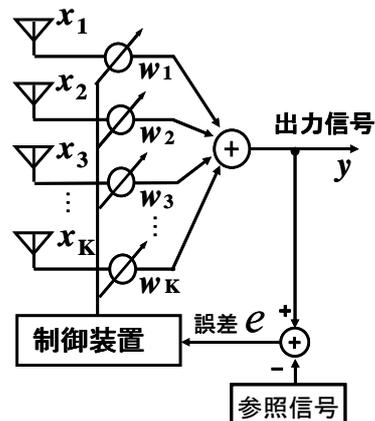


図1 MMSE アダプティブアレーの構成

移動に伴う電波環境の変動よりも遥かに短いことから、1つのパケットの期間内では電波環境は変化しないとみなすことができる。そこで、これまでの検討においては、パケットの期間内では電波環境は変化しない、いわゆる準静的電波環境としている場合が多い。また、各パケットにおいて、重み係数は常に初期状態から制御を開始するのが一般的であり、過去の電波状況の影響を受けることは少ない。

これに対し、常に重み係数を制御し、連続的に指向性を制御する必要がある場合も考えられる。たとえば、放送を受信する場合などがこれに相当する。1イタレーションあたりの電波状況の変化はごくわずかであるが、イタレーションを長期間重ねていくと、いつしか初期状態とは大きく異なる電波状況となる。従って、確率的には少ないものの、受信すべき到来波と抑圧すべき到来波のアレー伝搬ベクトルの方向が近接してしまい、不要波を十分に抑圧できない状況が発生してしまう。これは、アレー信号処理では原理上対処できない状況といえるが、さらに到来波環境が変化し、アレー伝搬ベクトルの方向が離れると、理想的には所望波以外を抑圧するように動作するはずである。しかし、最適化手法によっては必ずしも到来波環境の変化に追従できるとは限らない。この状況をシミュレーション結果の一例を利用して説明する。

アレーアンテナの素子数を4素子、到来波は所望波と不要波をそれぞれ1波ずつとし、それぞれの素子における受信信号の振幅がレイリー分布、位相がランダムに変化するとした場合のシミュレーション結果を図2に示す。図2(a)は2つの到来波のアレー伝搬ベクトルの角度差の余弦 $\cos\theta$ の変化を、図2(b)はLMSおよびRLSに基づいて制御を行った場合のSINRの変化を、図2(c)はLMSに基づいて制御を行った場合の重み係数のノルムの変化を、それぞれ表している。図2(a)および図2(b)よりLMS、RLSともに、イタレーションを開始してしばらくは良好なSINRが得られるが、角度差が狭くなると($\cos\theta$ が1に近づく)SINRが低下していることが分かる。また、この時点では重み係数(LMS制御時)のノルムが急激に大きくなっていることが図2(c)より分かる。このことから、到来方向が接近した場合には、図3(a)にその概念図を示すように、不要波の到来方向にヌルを向けつつ所望波を指向性ビームの腹で受けている状態にあると推察され

る。ただ、この状態は空間軸上の自由度のみを利用するアダプティブアレーでは対処しきれない状態であるといえる。その後 $\cos\theta$ が小さくなれば不要波に対する抑圧度が大きくなりSINRは回復するはずである。実際、図2(b)に示されるようにRLSに基づいて制御した場合にはSINRが回復している。しかし、LMSの場合は、伝搬ベクトルがほとんど直交している時点(6000イタレーション付近)であってもSINRは回復していない。このとき、重み係数のノルムは、相変わらず非常に大きくなっていることが図2(c)よりわかる。このことから、6000イタレーション付近の状況は、図3(b)に概念図を示すように、不要波に対しては深いヌルを形成し、かつ所望波に対しても浅いヌルを形成していると推察される。重み係数が全体的に大き

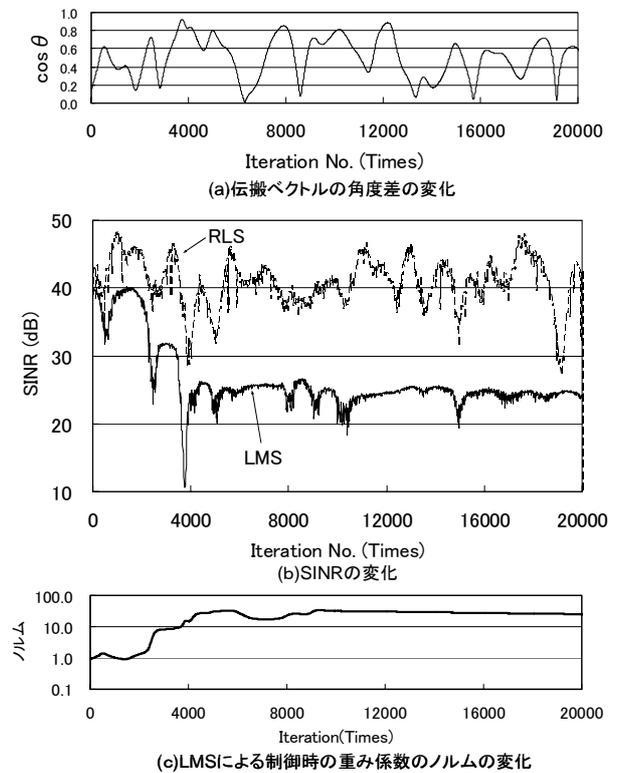


図2 長時間制御時の問題

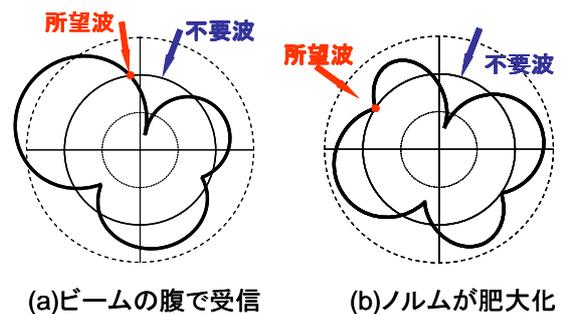


図3 指向性の概念図

くなりながらも所望波方向に浅いヌルを形成することで、出力信号中の所望波成分の振幅を参照信号の振幅に合わせているものと予想される。ただし、重み係数が全体的に大きいことから雑音成分が大きく、結果として SINR が回復しない。この状態で出力信号に含まれている所望波成分以外の成分としては、不要波成分(方向性雑音)よりも方向性を持たない雑音が支配的となるため、これを LMS に基づいて制御したのでは収束が非常に遅くなる。そのため、SINR がなかなか回復しないと推察される。

3. 連続制御に適した制御方式の提案

演算量が少ないという LMS の特徴を生かしつつ、アルゴリズムの追従性を向上させる手法として、2 つの手法を以下に提案する。

提案手法 1: 定期的リセットする(リセット法)

無指向性からイタレーションを開始すれば、電波環境が大きく変化しない限り LMS であっても重み係数のノルムが異常に大きくなることはない。そこで、重み係数を定期的に初期状態にリセットする。しかし、ただ単にリセットしたのではアルゴリズムが収束するまで不要波も受信されてしまう。そこで、2 組の重み係数 W1 および W2 を用意し、図 4 に示すように定期的に片方の重み係数をリセットするとともに、その直前にもう片方に切り替えながら利用する。これにより、電波環境が大きく変化した場合でもノルムが肥大化することを防ぐことが可能となるとともに、リセットによる不要波抑圧度の低下を避けることができる。以下この手法を“リセット法”と呼ぶ。

提案手法 2: 重み係数に縮む力を与える(収縮法)

2 つの到来波の伝搬ベクトルの角度差が小さい場合に重み係数のノルムが大きくなることは避けられないとしても、その後角度差が大きくなった時にノルムが迅速に小さくなればよい。通常、LMS アダプティブアレーの場合、出力信号の雑音成分を最小化する効果もあることからイタレーションを重ねるといつかはノルムも小さくなる。しかし、方向性を持たない雑音に対しては非常に鈍感であり、これを抑圧するためにはイタレーションを長期間続ける必要がある。

この期間を短縮するために重み係数に縮む力を与える。具体的には、通常重み係数の更新式(式(4))の代わりに次式に基づいて重み係数を更新する。

$$W_{LMS}(n+1) = \beta \cdot W_{LMS}(n) + \mu X(n)e^*(n) \quad (8)$$

ここで、 β は 1.0 よりわずかに小さい値とし、これを収縮率と呼ぶことにする。すなわち、重み係数を更新する度に重み係数をわずかに小さい方向に修正する。通常、アルゴリズムの収束速度を議論する際は、ステップサイズ μ が議論の対象となるが、ここでは μ ではなく、 β を調整することによりノルムの肥大化を防止する。これにより、指向性の相対的な形状に影響を与えることなく重み係数が小さくなり、雑音の抑圧が加速されるものと期待できる。以下、この手法を“収縮法”と呼ぶ。

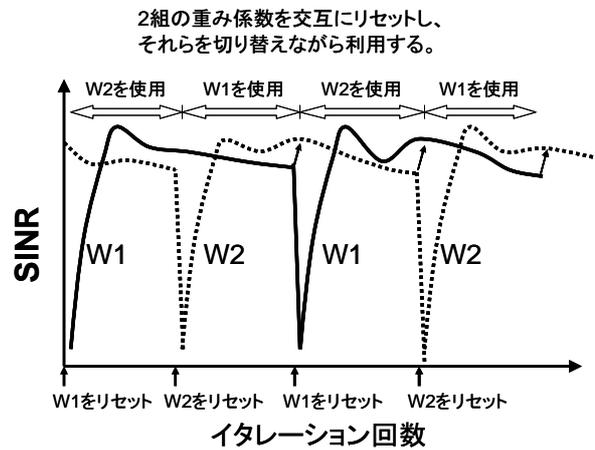


図 4 2 組の重み係数を用いるリセット法

4. 計算機シミュレーションによる効果の確認

前節で提案した 2 つの手法の効果を確認するために、計算機シミュレーションを実施した。到来波は所望波と不要波の 2 波とし、アンテナ素子は 4 素子とした。フェーリングは素子毎に無相関とし、最大ドップラー周波数は $fdT=4.88 \times 10^{-4}$ とした。これは、シンボルレート 192ksymbol/sec, キャリア周波数 2GHz としたとき、移動体の移動速度は約 50km/h に相当する。

最適化手法としては、Normalized LMS を従来法とし、提案したリセット法、収縮法および RLS について、電波環境の変化に対する追従性を調べた。図 5 に、2 つの到来波の伝搬ベクトルの角度差 $\cos\theta$, および出力信号の SINR の時間的変化を示す。ここで、Tr および β はそれぞれ 200 イタレーション, および 0.995 としている。図 5 よ

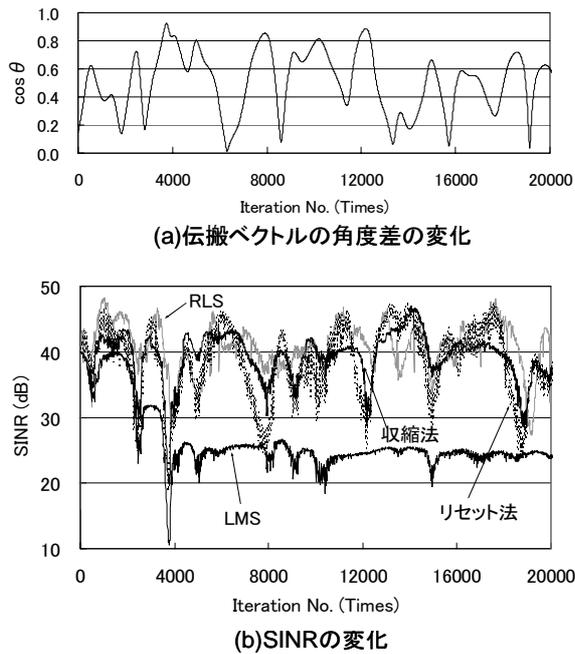


図5 提案手法の効果

り、以下のことが言える。

- 1)イタレーション開始時にはいずれの方式であっても 40dB 程度の SINR が得られている。
- 2) $\cos\theta$ が大きくなる 4000 イタレーション付近ではいずれの方式においても SINR が大きく低下する。これは、到来波の方向が接近している状況であり、アレーアンテナの原理上避けられない状況である。
- 3)その後、 $\cos\theta$ が小さくなると、従来の LMS 以外の手法では速やかに SINR が回復している。

以上のことから、提案したリセット法、収縮法ともに、ノルムの肥大化による追従性の劣化を回避する手法として基本的に有効であると言える。

リセット法においては重み係数のリセット周期 Tr が、また、収縮法においては収縮率 β がシステムの挙動に大きく影響することは明白である。そこで次に、SINR に対する Tr および β の影響について調べた。ここでは、 $\cos\theta$ と SINR の相関図(図6に一例を示す)を描き、 Tr および β による近似曲線の変化を把握することでのパラメータ影響を明らかにすることとした。

図7にリセット周期 Tr を変化させた場合の SINR の近似曲線の変化を示す。図中の横軸は重み係数のリセット周期 Tr を、奥行きは $\cos\theta$ を、また、高さは期待される SINR を示している。当然であるが、あまり頻繁にリセット

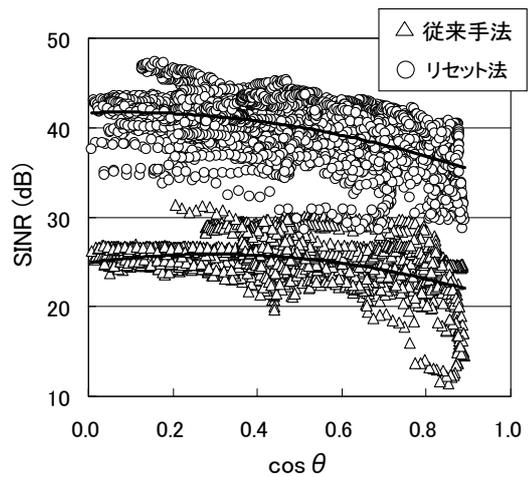


図6 角度差と SINR の相関図

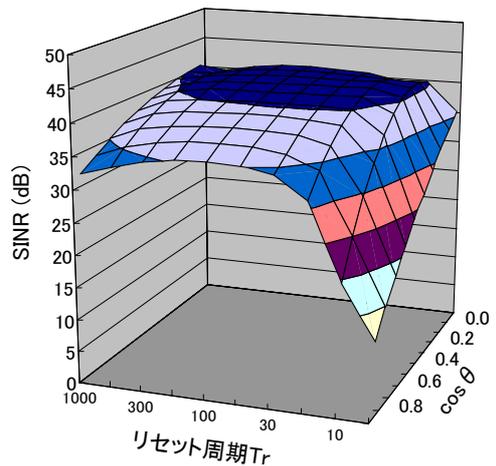


図7 リセット周期 Tr の影響

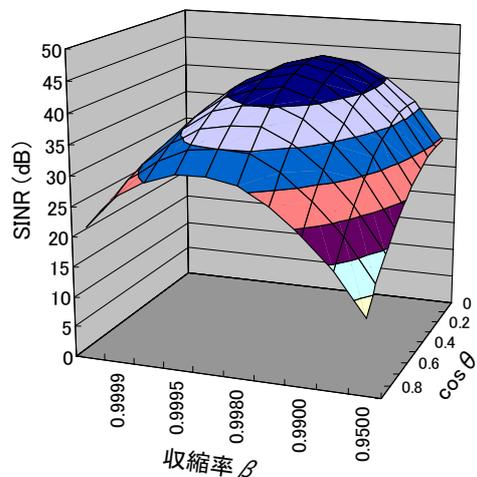


図8 収縮率 β の影響

すると返って SINR は低下すると同時に、リセット間隔が開きすぎるとノルム肥大化の影響が徐々に現れる。図 7 より、最適な重み更新周期は 50~100 イタレーション程度であることが分かる。

次に、収縮法における収縮率 β の影響について調べた結果を図 8 に示す。図の横軸は収縮率を示しており、その他は図 7 と同様である。収縮率が 1 に近い場合は従来の LMS に近づきノルム肥大化の影響を大きく受ける。逆に収縮率が小さすぎると重み係数が小さく縮みすぎて出力信号が弱くなってしまふため返って SINR は低下してしまう。図 8 より、最適な収縮率 β は 0.998 程度であることが分かる。

図 7 と図 8 を比較すると、リセット法の方が安定して高い SINR が得られ、性能としては優れているといえる。しかし、リセット法では常に 2 組の重み係数を更新していく必要があり、演算量は従来法の約 2 倍である。一方、収縮法の演算量は従来の LMS とほぼ同じでありながら、従来法に比べると格段に性能が向上される。リセット法、収縮法のいずれの手法でも RLS より演算量が少なくなかつ RLS に近い性能が得られる。ただ、アンテナ素子数が少なければ RLS を使用してもそれほど演算量は多くないことから、いずれの方式が適当であるかはアンテナ素子数、移動体の移動速度、キャリア周波数などを考慮して総合的に判断する必要がある。

5. むすび

陸上移動通信における通信品質改善技術として提案されている LMS アダプティブアレーにおいて、長時間連続的に動作させると到来波環境の変化に対する追従性が大きく劣化する問題がある。本報告でははじめに、LMS アダプティブアレーを長時間動作させた場合に、重み係数のノルムが肥大化し、その後追従性が極端に劣化する問題点を指摘した。次に、これを解決する手段として以下の 2 つの手法を提案した。

- 1) 2 組の重み係数を用意し、交互に定期的リセットする“リセット法”。
 - 2) イタレーション毎に重み係数が小さくなるように修正を加えることにより追従性が極端に低下することを回避する“収縮法”。
- 計算機シミュレーションによる検討の結果、リセット法、

収縮法ともに、ノルムの肥大化による追従性の劣化を回避する手法として基本的に有効であることが分かった。さらに、リセット法における適切なリセット周期、および、収縮法における適切な収縮率について検討した。その結果、最適な重みリセット周期は 50~100 イタレーション程度、収縮法における適切な収縮率は 0.998 程度であることが分かった。

提案方式の性能としてはリセット法の方が優れていると言えるが、リセット法では常に 2 組の重み係数を更新していく必要があり、演算量は収縮法の約 2 倍である。いずれの手法も従来法に比べると格段に性能が向上され、RLS に近い性能が得られる。ただ、アンテナ素子数が少なければ RLS を使用してもそれほど演算量は多くないことから、いずれの方式が適当であるかはアンテナ素子数、移動体の移動速度、キャリア周波数などを考慮して総合的に判断する必要がある。

今回の検討では、各アンテナ素子におけるフェージングは無相関であるとし、アダプティブアレーにとって最も厳しい条件下で比較評価を行った。ただ、最大ドップラー周波数については一つの条件のみでの評価に過ぎない。アンテナ素子間の相関やドップラー周波数によって、ノルム肥大化の問題の深刻さおよび提案方式の最適パラメータは異なると予想される。今後、より広範な条件での性能評価を進め、提案方式の適用領域を見極めていく。

参考文献

- [1] “Special Issue on Adaptive Array Antenna Techniques for Advanced Wireless Communications Signal Processing Technology in Antennas,” IEICE Trans. Commun., vol.E84, no.7, pp.1703-1875, July. 2001.
- [2] 菊間信良, アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, 1998.
- [3] Y. Ogawa, M. Ohmiya, and K. Itoh, “An LMS Adaptive Array for Multipath Fading Reduction,” IEEE Tans. Aerosp. & Electron. Syst., vol. 23, pp.17-23, Jan. 1987.
- [4] 市毛弘一, 清水覚史, 新井宏之, “Combination of Optimization Algorithms for MMSE/CMA Adaptive Antenna Array, 信学技報 AP2003-61, pp121-126.