

# 仲上-ライスフェージング環境における アダプティブアレーの収束特性

藤元 美俊    山本 洋一    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収束特性が極端に劣化する場合がある。その対策として筆者らは、1) 重み係数を定期的のリセットする“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、レイリーフェージング環境ではいずれの手法も、大きな SINR 改善効果があることを報告している。本報告では、仲上 ライスフェージング環境における両方式の動作特性について検討している。シミュレーションを通して、直接波がほとんど到来しない場合はリセット法が優れており、直接波が支配的となる環境においては収縮法が優れていることを明らかにした。

**キーワード** アダプティブアレー、仲上-ライスフェージング、連続制御、LMS

## Convergence Properties of LMS Adaptive Array in Nakagami-Rice Fading Environment

Mitoshi FUJIMOTO    Youichi YAMAMOTO    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** The convergence property of the Least Mean Squares adaptive array may degrade in mobile communication environments. To avoid this degradation, the authors have proposed two types of new methods. One is “Resetting” in which the weight coefficients are reset periodically and the other is “Bracing” in which the coefficients are slightly shortened at every iteration. It has been already confirmed that both of the proposed methods are fundamentally effective in Rayleigh fading environment. In this paper, the performance of the both methods in Nakagami-Rice fading environment are evaluated. The results of computer simulations show that the Bracing is superior to Resetting in Nakagami-Rice fading environment.

**Keyword** Adaptive Array, Nakagami-Rice Fading, 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[2]．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や到来波の強度比が大きい場合など，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[4]．特に，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[5]には，従来のLMSではその効果が大きく半減してしまう[6]．この問題を解決する手法として筆者らは，“リセット法”と“収縮法”と呼ばれる2つの手法を提案し，いずれの手法も直接波が到

来しないレイリーフェージング環境においては有効であることを報告している[7][8]．

本報告では，送信点からの直接波が支配的となる室内無線LANおよび郊外におけるセルラーシステムを想定し，仰上-ライスフェージング環境における提案方式の動作特性について検討した結果を報告する．以下，2章では，移動通信環境におけるLMSアダプティブアレーの問題点およびそれを解決するために提案した2つの手法について説明する．3章では，仰上-ライスフェージング環境におけるSINR改善効果について計算機シミュレーションを通して検討した結果を示す．

## 2. MMSEアダプティブアレーと連続制御用の改良手法

### 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 $M$ とし，第 $m$ 番目のアンテナ素子で受信した信号を $x_m$ ，それぞれの信号に対する重み係数を $w_m$ とする．それぞれをベクトル表記すると，

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

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

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[3]，RLS[9]およびSMIが挙げられる．LMSおよびRLSによる重み係数の更新式は，それぞれ，

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

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

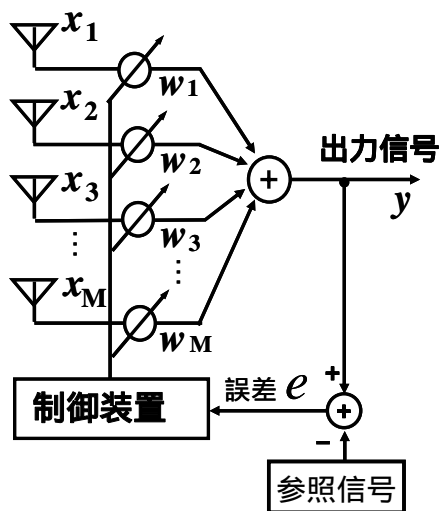


図1 MMSE アダプティブアレーの基本構成

と表される。ここで、 $R_{xx}$  は受信信号の相関行列である。 $\mu$ と $\gamma$ 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。

式(5)から分かるように、RLS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。このことは、重み係数の決定に相関行列 $R_{xx}$ の逆行列を直接用いるSMIについても同様である。一方、LMSの場合は逆行列演算が必要ないことから、RLSやSMIの場合に比べ演算量は格段に少ない。しかし、1)到来方向が接近している、2)到来波強度比が大きい、という特定の到来波環境において収束速度が極端に低下するという問題がある[4]。そこで筆者らは、演算量が少ないというLMSの特徴を生かしつつ、アルゴリズムの収束速度を向上させる手法として、2つの手法を既に提案した[7][8]。それぞれの手法の概要を以下に示す。

## 2.2 リセット法:重み係数を定期的のリセットする

従来のLMSアダプティブアレーでは到来波の到来方向が接近した時点で重み係数が異常に大きくなり、その後、収束が非常に遅くなってしまふ[7]。ただし、収束が遅くなる到来波環境であっても無指向性からイタレーションを

開始すれば、重み係数が異常に大きくなることはない。そこで“リセット法”では、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ふ。そこで、2組の重み係数 $W1$ および $W2$ を用意し、図2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。

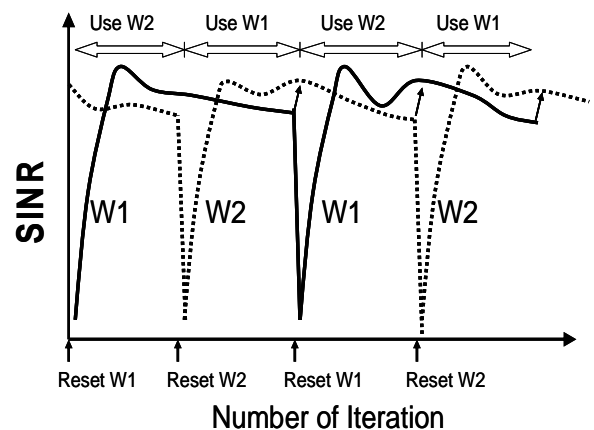


図2 2組の重み係数を切り替えながら使用するリセット法の概念図

## 2.3 収縮法:重み係数に縮む力を与える

アレーアンテナの指向性により特定の到来波を選択的に受信する場合、到来波の到来方向の角度差が小さいと重み係数が大きくなることは避けられない。しかしその後、到来方向の角度差が大きくなった時に重み係数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重み係数も小さくなる。しかし、LMSアルゴリズムは方向性を持たない雑音に対して非常に鈍感であり、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“収縮法”では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。

$$\mathbf{W}_{LMS}(n+1) = \beta \cdot \mathbf{W}_{LMS}(n) + \mu \mathbf{X}(n) e^*(n) \quad (6)$$

ここで、 $\beta$  は1.0よりわずかに小さい値とし、これを収縮率と呼ぶ。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。

ノルム拘束[10]などによっても同様の効果を期待できるが、本手法は従来のLMSの特徴である“演算量が少ない”という特徴を維持している。

### 3. 仲上-ライスフェージング環境における SINR改善効果

#### 3.1 シミュレーションの条件

ここでは前述の各手法の仲上 ライスフェージング環境における動作特性についてシミュレーションを通して評価した結果を示す。

表1にシミュレーションの条件を示す。到来波は相関のない所望波と不要波の2波とし、不要波のフェージングは素子ごとに相関のないレイリーフェージングとした。一方所望波については、素子ごとに相関のないレイリーフェージングに直接波1波を加えた。その強度は直接波の電力に対する反射波や回折波などその他の所望波成分(以下、散乱波と呼ぶ)の電力との比 $K$ で与えた[11]。

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、移動体の移動速度が約50km/hに相当する。最適化手法としては、Normalized LMS[12]を従来法とし、リセット法、収縮法およびRLSについて、到来波環境の変化に対する収束特性を調べた。

#### 3.2 従来法における直接波抑圧の問題

まず、従来のLMSアダプティブアレーを用いた場合の問題点を具体的に示す。

LMSアダプティブアレーでは出力信号の振幅を参照信号に合わせようとするため、直接波があまりにも強力であると重み係数が小さく

なってしまう。重み係数が小さくなくても直接波方向にビームを形成できていれば十分なSINRが確保される。しかし、直接波の強度が突発的に大きくなる、あるいは方向が急激に変化する場合、到来波強度比が大きく変化し収束速度が低下してしまうことになる。

この状態をシミュレーションにより確認した例を図3に示す。図3は、仲上 ライスフェージング環境におけるSINRの変動例であり、パラメータ $K$ は直接波の電力に対する散乱波の電力比(dB)である。 $K=-\infty$ がレイリーフェージングの場合であり、これに比べ直接波が散乱波の電力と同程度( $K=0$ dB)の場合は比較的良好なSINRが得られている。しかし、さらに直接波が強力となると、これにヌルを向けてしまうようになり、結果としてSINRが低下してしまうことが分かる。

表1 計算機シミュレーションの条件

到来波数	2波(無相関)
アンテナ素子数	4素子
フェージング	仲上-ライス
最大ドップラーシフト	$fdT=4.88 \times 10^{-4}$
初期重み係数	1.0, 0.0, 0.0, 0.0

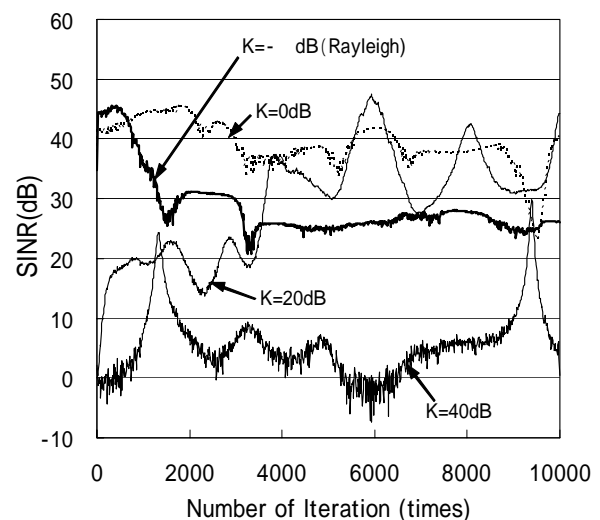


図3 仲上-ライスフェージング環境においてLMSアルゴリズムを用いた場合のSINRの収束特性

### 3.3 リセット法および収縮法によるSINR特性

リセット法および収縮法を用いた場合のSINRの変動特性を図4および図5に示す。それぞれ、図4はリセット法を用いた場合、図5は収縮法を用いた場合であり、パラメータは図3と同様、直接波に対する散乱波の電力比である。図4より、到来波の強度が非常に強い場合 ( $K=20\text{dB}$  および  $K=40\text{dB}$ )、リセット法ではSINR改善効果が得られないことが分かる。これは、リセット法の収束速度は基本的に従来のLMSと同じであり、リセット後アルゴリズムが収束する前に重み係数が切り替わるためである。一方、収縮法では、イタレーション初期の収束が若干遅くなるものの、その後は常に高いSINRが得られ、直接波が強くて良好に動作することが分かる。

さらに、直接波の影響を詳細に把握するために、直接波強度を様々に変化させ、収束後のSINRの平均値を評価した。その結果を図6に示す。図6の横軸は到来波の電力比  $K(\text{dB})$  であり、縦軸は2000イタレーションから10000イタレーションまでの平均SINRである。図6より、電力比  $K$  が  $10\text{dB}$  程度以下であればリセット法、収縮法ともに比較的良好なSINRを期待できるが、電力比  $K$  が  $10\text{dB}$  程度以上となるとリセット法では従来のLMSよりさらにSINRが低下することが分かる。

送受信局間が見通してない場合は電力比が  $10\text{dB}$  以上となることは希であり、到来波の到来方向が接近した場合の特性を考慮するとリセット法を選択するメリットも十分ある。一方、収縮法においては、直接波が弱い領域では、RLSとほぼ同等の性能が得られているが、直接波が強くなるとRLSに比べて平均SINRが低下している。従って、伝送路のSINRによって変調方式を変える適応変調方式を採用する場合においては、収縮法とRLSとで伝送速度の差が生じることも考えられるが、一般の固定の変調方式であれば収縮法で十分な通信品質が得られると期待できる。

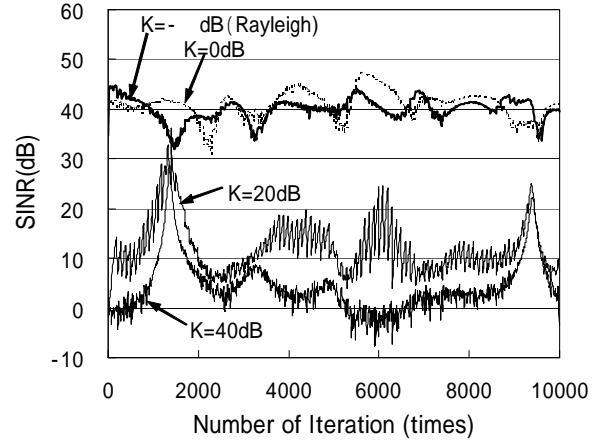


図4 仲上 ライスフェージングにおけるリセット法の収束特性

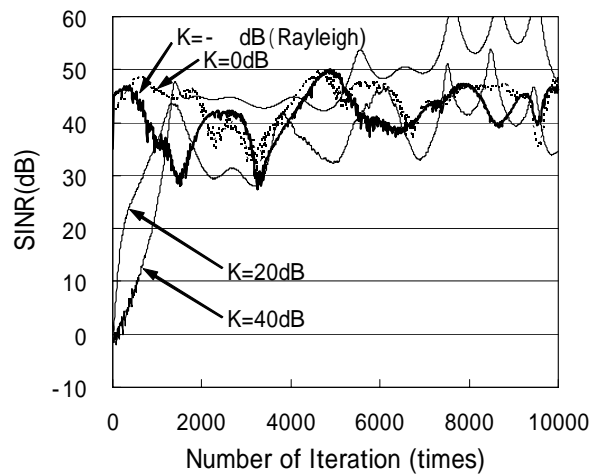


図5 仲上 ライスフェージング環境における収縮法の収束特性

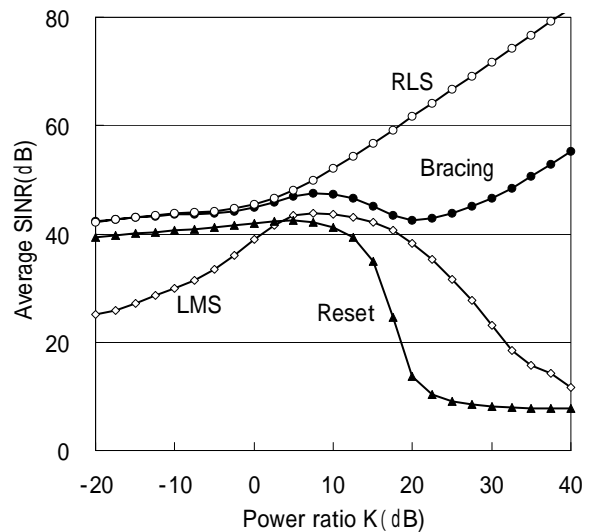


図6 仲上 ライスフェージングにおけるSINR特性

#### 4. むすび

仲上-ライスフェージング環境におけるリセット法と収縮法の動作特性について評価した結果を示した。シミュレーションを通して、反射波や回折波の電力に対して直接波の電力が10dB程度以下の場合には、リセット法、収縮法いずれも有効であるが、直接波がそれ以上強い場合はリセット法ではSINR改善効果が得られないことが分かった。一方、収縮法では直接波の強度にかかわらず高いSINRが得られ、従来のLMSに見られる直接波抑圧の現象を回避できることが分かった。

以上のことから、直接波が支配的となる室内伝搬環境や建物がまばらに存在する郊外地においては収縮法が適していると言える。収縮法は、到来波の状況を判断することなく、常に固定のアルゴリズムを用いて長時間連続的な制御を可能にするものであり、アダプティブアレーの実用化に向けて広く応用できるものと期待できる。

#### 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 Trans. Aerosp. and Electron. Syst., vol.AES-23, no.1, pp.17-23, Jan. 1987.
- [4] N.Kikuma and K.Takao, "Effect of Initial Values of Adaptive Arrays," IEEE Trans. Aerosp. & Electron. Syst., vol. AES-22, no.6, pp.688-694, Nov. 1986.
- [5] J.Imai, M.Fujimoto, T.Shibata, N.Itoh, N.Suzuki and K.Mizutani, "Experimental Results of Diversity Reception for Terrestrial Digital Broadcasting," IEICE Trans. Commun., vol.E85-B, no.11, pp.2527-2530, Nov. 2002.
- [6] 市毛弘一, 清水寛史, 新井宏之, "Combination of Optimization Algorithms for MMSE/CMA Adaptive Antenna Array," 信学技報, AP2003-61, July 2003.
- [7] 藤元美俊, 堀俊和, "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," 信学技報, AP2003-199, Nov. 2003.
- [8] 藤元美俊, 堀俊和: 移動通信環境におけるアダプティブアレー連続制御時の特性改善, 2003年信学ソ大, B-1-229, sept., 2003.
- [9] R.T.Compton, Jr. : Adaptive antennas - Concept and performance, Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [10] N.Kikuma N.Tsukamoto and N.Inagaki, "Improved Signal Capture of CMA Adaptive Array using weight norm control," IEE Conf. Publication, no.436, ICAP'97, vol.1, pp.502-505, Edinburgh. UK, April 1997.
- [11] 唐沢好男: デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2003.
- [12] Simon Haykin: Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, Inc., Third Edition, 1996.