

論 文

マルチパス伝送路におけるRAKE受信組込み型 UWB/CDMAアレーアンテナシステムの特性

太刀川信一¹・伊藤直敏²

¹ 電子制御工学科 (Department of Electronic Control Engineering, Nagaoka National College of Technology)

²長岡技術科学大学 (Nagaoka University of Technology)

CHARACTERISTICS OF UWB/CDMA ADAPTIVE ARRAY ANTENNA SYSTEM EMBEDDING RAKE RECEPTION IN A MULTI-PATH FADING ENVIRONMENT

Shin'ichi TACHIKAWA¹ and Naotoshi ITO²

Abstract

This paper proposes a novel adaptive UWB/CDMA array antenna system that makes the antenna pattern in the direction of the desired wave and does not make null in the direction of the undesired wave, and that employs RAKE reception. It is expected that the proposed system can make a more advantage directivity and can reduce the influence of multi-path fading. By computer simulations using two kinds of channel models, the effects of the RAKE reception and improvements of directivity by antenna patterns in multiple accesses are clarified on evaluation of D/U (Desired wave power / Undesired wave power).

Key Words : UWB, CDMA, array antenna, multi-path fading environment, RAKE reception

1. まえがき

近年、超広帯域無線(Ultra Wide Band radio: UWB)を用いた符号分割多元接続(Code Division Multiple Access: CDMA); UWB/CDMA が注目を集めている。これは、従来の直接拡散(Direct Sequence : DS)方式による CDMA; DS/CDMA を拡張し、さらに広帯域なインパルスを用いて、高速な伝送を実現する方式である。UWB/CDMA 方式の問題点として他局間干渉の影響が挙げられる。他局間干渉が増大すると自局信号の検出が困難になってしまい、ビット誤り率特性が劣化してしまう。これを改善する方法として、アレーアンテナ技術がある。これまでのアレーアンテナは、他局を抑圧

するような指向性をつくることで他局間干渉の影響を軽減してきた^{1),2)}。しかし、マルチパスフェージング伝送路のような複雑な伝送路においては、多くの不要波到来方向に正確にヌルを向けることが困難であることが知られている^{3)~7)}。本論文では、これらの問題の対処法として、マルチパス伝送路における UWB/CDMA 用にアレーアンテナの検討を行い、複数方向にヌルを形成せず希望波方向のみに指向性に向けるシステム、ならびに RAKE 受信を組み込んだ方式の提案を行う。

アレーアンテナに RAKE 受信を組み込むことでフェージング伝送路による周波数選択性の変動の影響を低減し、不要波に対して、さらに有利な指向性がつくれると考えられる。本論文では、計算機

シミュレーションにより，提案システムが期待通りの指向性パターンをつくれるのか明らかにする．さらに指向性パターンの様子より，RAKE 受信を加えることでの効果，多元接続数に対する指向性パターンの変化について比較評価を行い，希望波と不要波の比である D/U(Desired wave power/Undesired wave power)により提案方式の有効性を明らかにする．

2. DS/UWB方式

本章では，従来の DS 方式を拡張した UWB 方式，すなわち，DS/UWB 方式について述べる．

UWB 方式は，RF キャリアを用いて情報を伝送する従来の方式とは異なり，モノサイクルと呼ばれる 1ns 以下の非常に短い時間幅のパルスをベースバンド伝送する方式である．

UWB 方式には幾つかの変調方式が提案されている．例として時間ホッピングを用いた TH(Time Hopping)/UWB 方式，擬似雑音(Pseudo Noise: PN)系列を用いた DS/UWB 方式が挙げられる．本論文では，その中でも比較的シンプルな構成で高速伝送が可能な方式として知られている DS/UWB 方式について検討を行う．この方式ではユーザごとに異なる PN 系列を乗算することで，データを拡散する．異なった PN 系列を用いることで他局間干渉を軽減し，周波数の共用を図る．

本論文では，簡便化のため，**図-1**のように従来の DS 方式で用いる PN 系列のパルス時間幅を狭めた拡散系列を用いることで DS/UWB 方式を実現している．パルス時間幅を狭める割合をチップデューティ比といい，下式で表される．

$$Du = \frac{T_p}{T_c} \quad (1)$$

ここで， T_p はパルス時間幅， T_c は DS 方式に対応した基準のチップ時間幅である．

図-1 に受信波形に PN 系列を乗じた受信データ波形を示す．

3. CDMAアダプティブアレーアンテナ

CDMA 方式を用いたデジタル移動通信では，拡散符号が参照信号生成に利用できるため，LME(Least Mean Square)アルゴリズムによるアダプティブアレーは CDMA 方式に適していると言える．通常，Compton が提案したスペクトラム拡散通信方式用の参照信号発生方法が用いられる^{2),7)}．その生

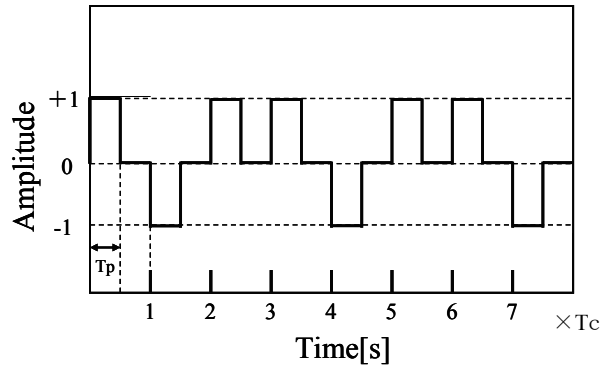


図-1 DS/UWB 方式(チップデューティ比=0.5)

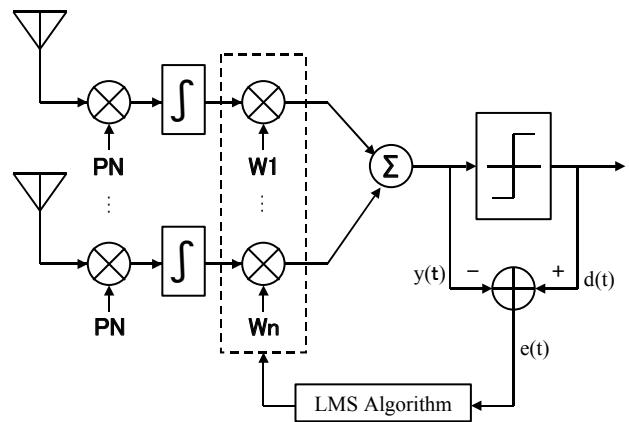


図-2 CDMA アレーアンテナ(従来法)

成ループをアレーアンテナに組み込んだシステムが CDMA アダプティブアレーアンテナである．

等方性 n 素子の CDMA アダプティブアレーアンテナのシステムを **図-2** に示す．CDMA アレーアンテナは，アレー出力信号 $y(t)$ とその判定信号(参照信号，希望信号) $d(t)$ の差である誤差信号 $e(t)$ を最小にするようウェイトを更新するシステムである．

最小化の対象となる誤差信号 $e(t)$ は次式で与えられる．

$$e(t) = d(t) - y(t) \quad (2)$$

LMS アルゴリズムに基づくウェイト更新式は次式のように表される．

$$W(t+1) = W(t) + \mu E[X(t)e^*(t)] \quad (3)$$

ここで t はウェイトの更新回数， $e^*(t)$ は $e(t)$ の複素共役， $E[\]$ は平均を示す． μ はウェイト更新の割合を調整するステップサイズである． $W(t)$ は更新回数 t における複素ウェイトベクトルのことで，次式のように表す．

$$W(t) = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \quad (4)$$

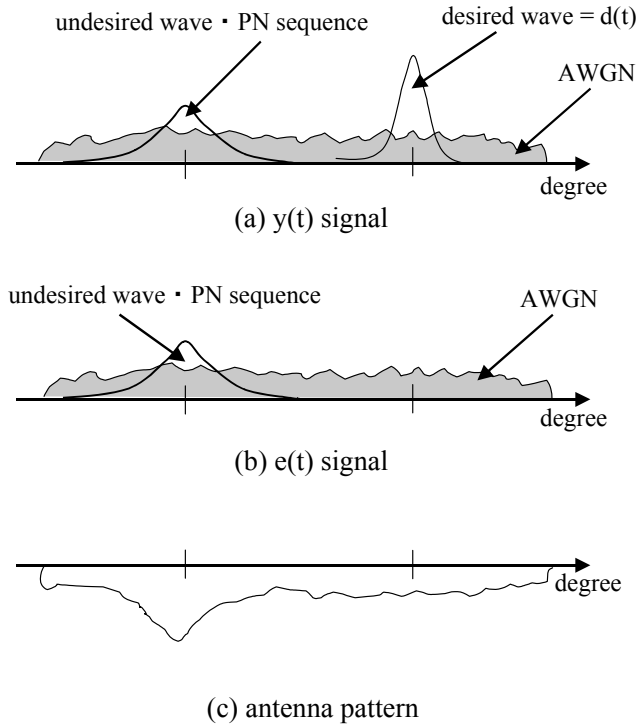


図-3 信号イメージ(従来法)

ここで $[]^T$ は転置行列, w_1, w_2, \dots, w_m は各ブランチのウェイトで, t の関数であるが, 簡便のため (t) を省略している.

同様に $X(t)$ は複素入力ベクトルで, 次式のように表す. x_1, x_2, \dots, x_m を各ブランチの入力信号である.

$$X(t) = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \quad (5)$$

図-3 に CDMA アレーアンテナを用いたときの各信号(アレー出力信号 $y(t)$, 誤差信号 $e(t)$, 指向性パターン)のイメージを示す. 従来法は, アンテナ出力 $y(t)$ と参照信号(希望信号) $d(t)$ の差を誤差信号 $e(t)$ としている. そのため誤差信号 $e(t)$ は, 図-3(b)に示すような信号になる. この誤差信号 $e(t)$ をゼロにするようにウェイトは働くので, 指向性は図-3(c)のようになると考えられる.

4. 単一指向性アダプティブアレーアンテナ

本論文で提案する単一指向性アダプティブアレーアンテナのシステム図を図-4 に示す. τ は遅延波の遅延時間, T_b はPN周期で, データ時間幅と等しい.

LMS アルゴリズムでは, 図に示すようにアレーアンテナ出力と自局信号の差(誤差信号)を入力とする. よって自局信号以外の信号(雑音や他局信号の相関成分)を抑圧するようにウェイトの更新が行わ

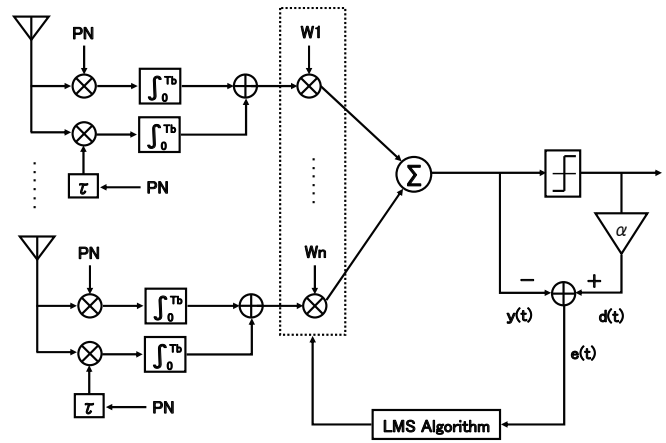


図-4 単一指向性アレーアンテナ(提案法)

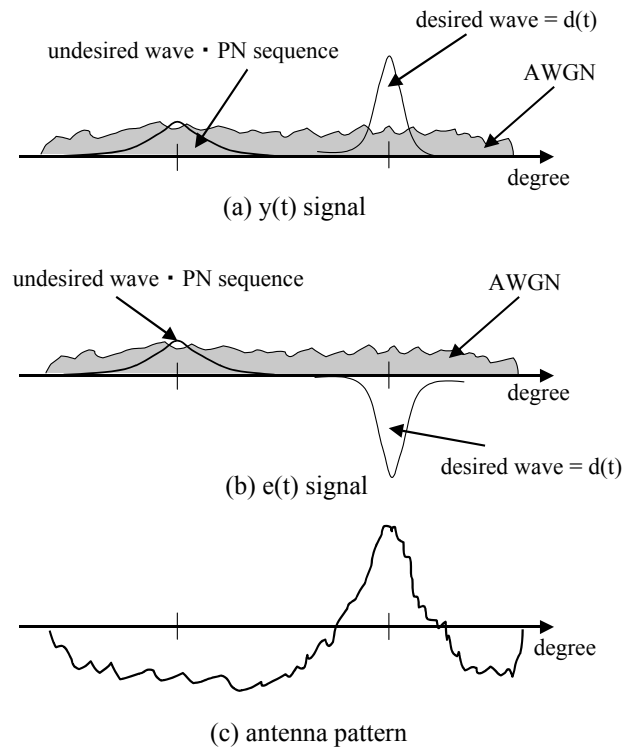


図-5 信号イメージ(提案法)

れる. このため, 他局信号と自局信号の相関が低い場合は, 不要波到来方向にヌルを正確に向けることが出来ない. しかし, 参照信号(自局信号)を α 倍することで自局信号を強調するような指向性をつくるのが可能となる. 提案法の誤差信号は次のように求められる.

$$e(t) = \alpha \cdot d(t) - y(t) \quad (6)$$

ここで α は, 参照信号(希望波)の比較量を決定するパラメータである.

提案方式の各信号イメージを図-5 に示す。提案法(式(6))は、従来法(式(2))よりも α 倍多くの参照信号との差を得ている。そのため誤差信号に含まれる図-5(b)のように参照信号成分が従来よりも小さくなる。LMS アルゴリズムは、参照信号成分を補うようにウェイトを更新する。よってアンテナの指向性は図-5(c)のように自局を強調するように指向性を作ると考えられる。

さらに、本論文で提案するシステムでは、RAKE 受信を行うことで直接波だけでなく遅延波の電力を活用し自局の信号レベルの改善効果が期待される。それにより、さらに D/U の改善が行えると考えられる。

5. シミュレーション

本章では、提案方式である単一指向性アレーアンテナの指向性パターンの様子を示し従来法との比較を行い提案法の有意性を明らかにする。シミュレーション諸元を表-1 示す。マルチパスモデルとしては、図-6 のように主波(Direct wave)と遅延波(Delay wave)の電力の等しい二波等利得モデルを用いる。まず、提案法で用いられる各パラメータの値を計算機シミュレーションにより決定する。その後、決定した各種パラメータを用いて、アンテナへの入射方法が異なる2つのマルチパスフェージング伝送路において、指向性パターンと二乗誤差特性の性能比較、評価を行う。また、定量的に提案法の有効性を明らかにするため希望波と不要波の比である D/U による評価を行う。

5. 1 パラメータの決定

提案法で用いる参照信号比較量 α の決定を行う。参照信号 α の決定は、ビットエネルギー/加法的白色ガウス雑音(AWGN)両側電力密度(E_b/N_0)=20dB の時に行うこととした。本研究ではマルチパスフェージング伝送路を対象としており、提案法ではRAKE 受信を用いている。この時、ユーザ数1のRAKE 受信を行った場合のビット誤り率(Bit Error Rate:BER)特性では E_b/N_0 が約 20dB で基準となる BER=1E-3 である。そこで、この E_b/N_0 の時に参照信号比較量 α を決定することとした。 α の基本的な効果を知るために AWGN 環境で α を 1~100 まで変化させた時の D/U を図-7 (LMS 回数=10000, $\mu = 1E-2$)に示す。

図を見ると、参照信号比較量 α を大きくしても D/U の値が変わらないことがわかる。これは、アン

表-1 シミュレーション諸元

Primary modulation	BPSK
Secondary modulation	DS/UWB
PN sequence	M sequence
Code length	31
Chip Duty	0.5
Number of users	2
Received bit timing	Synchronous
Received chip timing	Synchronous
E_b/N_0	20[dB]
SIR	0[dB]
Antenna	5-element linear array
Arrival directions(Model1)	Desired: 30[deg]
(user = 2)	Undesired: -60[deg]
Arrival directions(Model2)	Desired: 0, 30[deg]
(user = 2)	Undesired: -60, -30[deg]
Element space	$\lambda/2$
Initial antenna weight	[1,0,0,0,0]
Channel model	AWGN + Multipath Fading
Doppler frequency	50[Hz]
Delay time	3Tc
Traning time	30000
Step size parameter μ	0.001

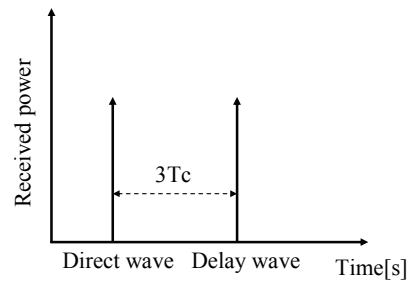


図-6 二波等利得モデル

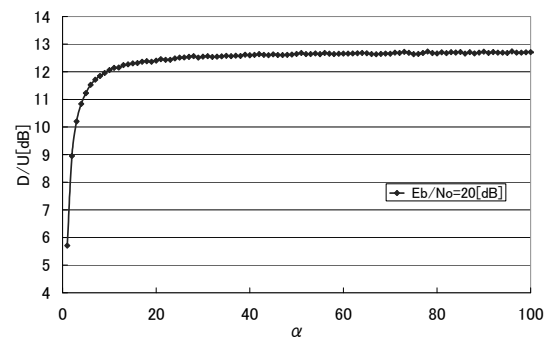


図-7 参照信号比較量 α の決定

テナの重み係数の二乗和がアンテナ本数 n となるよう正規化しているため、ある一定以上の値までしか希望波を強調することが出来なくなるためと考えられる。参照信号比較量 α を大きくしても D/U の値が

変わらないことから、ここでは、ほぼ飽和する $\alpha=30$ と決定する。

5. 2 マルチパスモデル1の結果

図-8 に示すマルチパスモデル 1 において提案法の性能比較および検討を行う。

図-9 に指向性パターンの様子を示す。定量的に性能を評価するため D/U を用いて評価を行う。図より希望波到来方向にピークは、提案法 (RAKE あり) が最もはっきりとあらわれ、次に提案法 (RAKE なし)、そして従来法が最も少ないことがわかる。これにより、参照信号パラメータ α を用いることで自局を強めるような単一指向性の実現が可能であることがわかる。

次に D/U の求め方について説明する。提案法の性能を定量的に評価をするため D/U において評価を行う。D/U は、希望波と不要波の電力比を表し、希望波到来方向のアレー出力と不要波到来方向のアレー出力を dB 表示で減算することで求まる。D/U は以下の式で求められる。

$$D_{power} = \text{Desired wave power [dB]} \quad (7)$$

$$U_{power} = \text{Undesired wave power [dB]} \quad (8)$$

$$D/U = D_{power} - U_{power} \quad [dB] \quad (9)$$

まず、従来法の D/U をもとめる。図-9 より従来法の D/U は希望波到来角 (30 度) のアレー出力は約 -5 [dB]、不要波到来角 (-60 度) では約 -13 [dB] である。式 (9) より、約 $(-5) - (-13) = 8$ [dB] となる。次に、提案法 (RAKE なし) の D/U を求めると同様に約 $0 - (-11) = 11$ [dB] となる。提案法 (RAKE あり) に対しては、約 $3 - (-11) = 14$ [dB] となる。

以上の結果より D/U において従来法と提案法 (RAKE なし) を比較すると提案法 (RAKE なし) は、従来法と比べて約 $11 - 8 = 3$ [dB] 有利となる。次に RAKE 受信の効果を知るため提案法 (RAKE なし) と提案法 (RAKE あり) を比較すると、提案法 (RAKE あり) は約 $14 - 11 = 3$ [dB] 有利となる。最後に従来法と提案法 (RAKE あり) を比較すると、提案法 (RAKE あり) は約 $3 + 3 = 6$ [dB] 有利となる。

RAKE 受信を用いることでアレーアンテナ性能が向上した理由については、図-10 に示す二乗誤差の収束の様子からよくわかる。図を見ると従来法、提案法 (RAKE なし)、提案法 (RAKE あり) の全ての特性で更新を 30000 回行うことで二乗誤差信号が十分収束していることがわかる。二乗誤差信号はウェイト

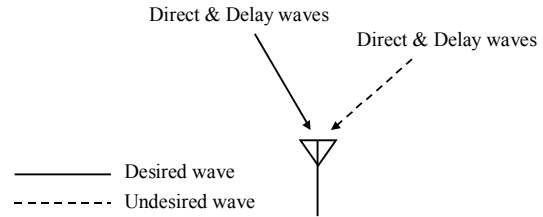


図-8 マルチパスモデル 1

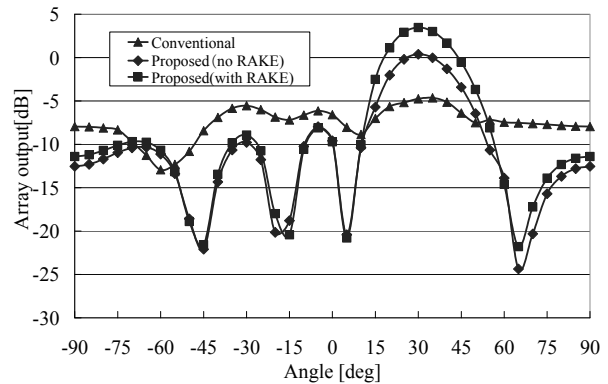


図-9 指向性パターンの様子 (モデル 1, ユーザ数 2)

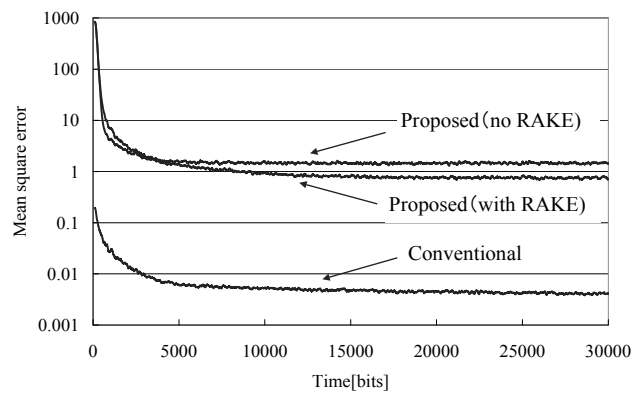


図-10 二乗誤差の様子 (モデル 1, ユーザ数 2)

に大きく関係するため十分に収束していることが重要となる。更に、図-10 より従来法に比べ提案法の方が二乗誤差の収束値が高いことがわかる。この理由は、提案法では参照信号を α 倍しているのに対して、アレー出力 $y(t)$ は一定 (ウェイトの正規化を行っているため) である。そのため大きな誤差信号が残ってしまったと考えられる。

次に、提案法 (RAKE あり) と提案法 (RAKE なし) の誤差信号の収束を比べると RAKE 受信を加えたほうが誤差信号の収束値を小さく出来ていることがわかる。これは、アレーアンテナの前段 (ウェイト制御を行う前) に RAKE 受信を加えることで受信信号の信号レベルが増加し、ウェイトを正確に更新すること

が出来たためである。そのため、自局信号が正確に得られ、より誤差信号の収束値が小さくなったと考えられる。

この結果、アレーアンテナに RAKE 受信を加えることで D/U において、有利となることを確認した。

5. 3 マルチパスモデル 2 の結果

次に、**図-11** に示すマルチパスモデル 2 において提案法の性能比較および検討を行う。遅延波の入射角が主波の入射角と異なっている場合である。

図-12 に指向性パターンの様子を示す。定量的に性能を評価するため、D/U を用いて評価を行う。しかし、マルチパスモデル 2 における D/U の求め方は、5.2 項のマルチパスモデル 1 とは少し異なるため改めて本項で説明を行う。

まず、**図-12** を見ると提案法(RAKE あり)と提案法(RAKE なし)では、自局信号のある 0 度または 30 度にピークが表われている。従来法ではそのようなピークはない。これにより、参照信号パラメータ α を用いることで自局を強めるような単一指向性の実現が可能であることがわかる。

また、提案法(RAKE あり)の結果では、2 つの希望波到来角である 0 度及び 30 度にピークを向けられていることがわかる。それに対して、提案法(RAKE なし)を見ると、30 度方向にピークを向けることはできるが 0 度方向には向けられていない。これは、直接波を 30 度とし遅延波を 0 度としたため、RAKE 受信なしの提案法では、遅延波の信号を得ることができず指向性をつくれなかったためである。この結果より、RAKE 受信を行うことで、入射される複数の希望波方向に指向性が生成できることがわかった。

次に D/U を用いて評価を行う。マルチパスモデル 2 における提案法の D/U は以下の式で求められる。

$$D_{power} = 20 \cdot \log_{10} (V_{desired_direct} + V_{desired_delay}) \quad [dB] \quad (10)$$

$$U_{power} = 10 \cdot \log_{10} (P_{undesired_direct} + P_{undesired_delay}) \quad [dB] \quad (11)$$

$$D/U = D_{power} - U_{power} \quad [dB] \quad (12)$$

ここで、 $V_{desired_direct}$ は希望波の直接波の電圧、 $V_{desired_delay}$ は希望波の遅延波の電圧、 $P_{undesired_direct}$ は不要波の直接波の電力、 $P_{undesired_delay}$ は不要波の遅延波の電力である。

マルチパスモデル 2 における D/U は、前節の式(9)と異なり希望波到来方向が 2 方向あり、RAKE 合

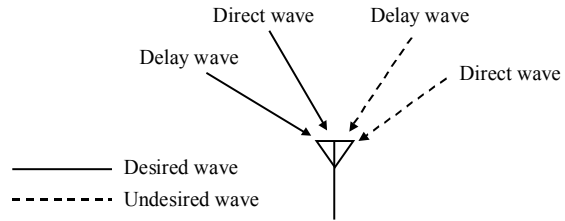


図-11 マルチパスモデル 2

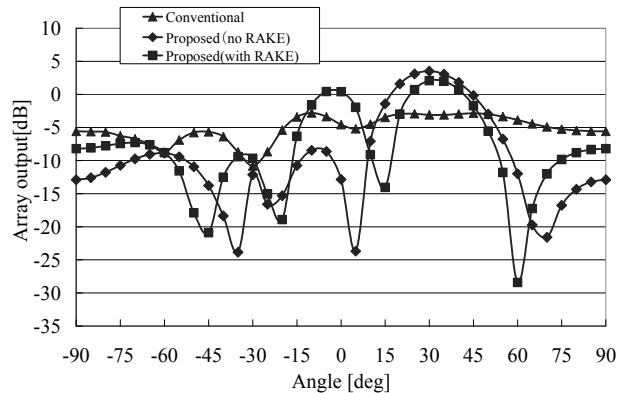


図-12 指向性パターンの様子 (モデル 2, ユーザ数 2)

成で電圧加算を行うためアレー出力は、式(10)に示すように一度電圧値に変換し、その加算後に dB 表示を行う。一方、不要波到来方向のアレー出力は直接波と遅延波の位相が合っているわけではないので、電力加算となり、電力を真値に変換し、その加算後、また dB 表示に変換するため、式(11)のようになる。なお、ここでは D/U で評価しているため、AWGN は少ないものとして、その増加量は考慮していない。

図-12 より従来法の希望波到来角のアレー出力は、到来角 30 度と 0 度で、大きい出力の 30 度を取り約 -3 [dB] となる。不要波は到来角 -30 度と -60 度で加わるので、約 -11 [dB] (-30 度)と約 -9 [dB] (-60 度)より、式(11)を用いて真値にしてから合成すると約 -7 [dB] となる。よって従来法の D/U は式(12)より、(-3) - (-7) = 4 [dB] となる。

次に提案法(RAKE なし)の D/U を求める。提案法(RAKE なし)の希望波到来角のアレー出力は到来角 30 度と 0 度で大きい出力の 30 度で約 3 [dB] である。不要波のアレー出力は、-30 度で約 -12 [dB]、-60 度で約 -9 [dB] となるので、式(11)を用いて電力加算すると約 -7 [dB] となる。よって提案法(RAKE なし)の D/U は式(12)より、3 - (-7) = 10 [dB] となる。

最後に提案法(RAKE あり)の D/U を求める。提案法(RAKE あり)の希望波到来角のアレー出力は、到来角 30 度で約 2 [dB]、もう一方の到来角 0 度で約

1[dB]となる, これを RAKE 合成するため式(10)で真値により電圧加算すると約 8[dB]となる. 不要波到来角のアレー出力は到来角-30 度で約-10[dB]と, -60 度で約-9[dB]となるので, 式(11)を用いて電力合成すると約-6[dB]となる. よって, 提案法(RAKE あり)の D/U は式(12)より, (8)-(-6)=14[dB]となる.

以上の結果より D/U において従来法と提案法(RAKE なし)を比較すると提案法(RAKE なし)は, 従来法と比べて約 10-4=6[dB]有利となる. 次に RAKE 受信の効果を知るため提案法(RAKE なし)と提案法(RAKE あり)を比較すると D/U において提案法(RAKE あり)は, 提案法(RAKE なし)と比べて約 14-10=4[dB]有利となる. これは, RAKE 受信により遅延波電力を得ることで遅延波方向にピークを向けることができたためである. そのため有利な D/U となった. 最後に従来法と提案法(RAKE あり)を比較すると D/U において提案法(RAKE あり)は, 従来法と比べて約 6+4=10[dB]有利となる.

次に二乗誤差の収束について検討を行う. 二乗誤差の収束の様子を図-13 に示す. 図を見ると従来法, 提案法(RAKE なし), 提案法(RAKE あり)の全ての特性で更新を 30000 回行うことで二乗誤差信号が十分収束していることがわかる. 更に, 従来法に比べ提案法の方が二乗誤差の収束値が高いことがわかる. この理由は, 5.2 項で述べた理由と同じである.

また, 提案法(RAKE あり)と提案法(RAKE なし)の誤差信号の収束を比べてみる. 前節のマルチパスモデル 1 の二乗誤差信号の収束(図-10)では, RAKE 受信を加えたほうが誤差信号の収束値を小さく出来るという結果であった. しかし, マルチパスモデル 2 の二乗誤差信号の収束(図-13)では, RAKE 受信のありなしに関わらず同じ収束値となっている. これは, マルチパスモデル 2 では, 直接波方向と遅延波方向が異なるため 2 つの方向にピークを向けるようにウ

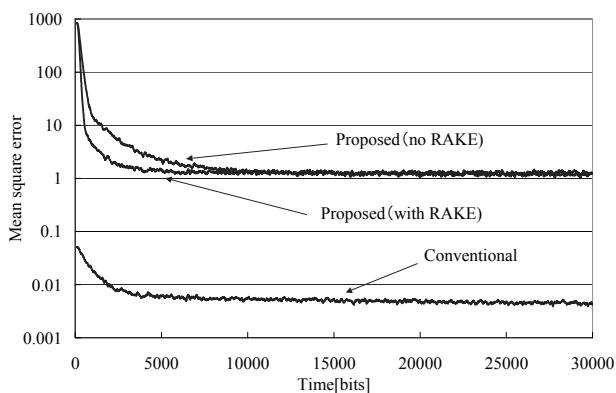


図-13 二乗誤差の様子(モデル 2, ユーザ数 2)

ェイトを制御しなければならず, その分ウェイトの制御が複雑になり RAKE 受信の有無による違いが表れなかったと考えられる.

これらの結果より, アレーアンテナに RAKE 受信を加えることで, 二乗誤差信号には違いは見られないものの, 指向性パターンにおいては, 遅延波方向にもピークを向けられ, D/U においてより有利となることを確認した.

6. むすび

本論文では, 高速な伝送速度を実現する UWB/CDMA 方式について, RAKE 受信を組み込んだアダプティブアレーアンテナシステムの提案を行い, マルチパス伝送路環境においての特性の評価を行った. 提案法では, 自局を強調するような指向性をつくるため参照信号比較量 α を導入した. さらにマルチパス波を有効に利用するためアンテナの前段(ウェイトの前に)RAKE 受信機を加えた. 計算機シミュレーションにより, アレーアンテナの指標となる指向性パターンの様子, 二乗誤差の様子を示し, 定量的に評価を行うため D/U(希望波と不要波の比)による評価, 比較を行った. 伝送路としては, アンテナへの入射方法が異なる 2 つのマルチパスモデルで検討を行った.

まず, 1 番目のマルチパスモデルとして直接波と遅延波の入射角が同じ場合について検討を行った. 多元接続数=2 に対する指向性パターンおよび二乗誤差信号について特性評価および D/U による比較を行った. その結果, 従来法に比べて提案法(RAKE なし)が約 3[dB]改善され, それに加えて提案法(RAKE あり)ではさらに約 3 [dB]改善される. 従って, 提案法(RAKE あり)は従来法に比べて約 6 [dB]有利となった.

次に, 2 番目のマルチパスモデルとして直接波と遅延波の入射角が異なる場合について同様の検討を行った. その結果, 従来法に比べて提案法(RAKE なし)が約 6[dB]改善され, それに加えて提案法(RAKE あり)ではさらに約 4[dB]改善される. 従って, 提案法(RAKE あり)は従来法に比べて約 10[dB]有利となった.

これらの結果より提案法は, マルチパスフェージング環境下において従来法より有利な D/U が得られるため優れた他局間干渉除去性能を示すことがわかった.

なお, 本論文では, AWGN は, 少ないものとして D/U のみで評価検討したが, これらを含めた場合の

BER による性能評価, さらに多元接続数が増加した場合の性能評価等が, 今後の課題である.

参考文献

- 1) 菊間信良: "アレーアンテナによる適用信号処理", 科学技術出版, 1988.
- 2) J.Litva and T.K.Lo: "*Digital Beamforming in Wireless Communications*", Artech House, Boston-London, 1996.
- 3) 神谷幸宏, 唐沢好男: "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と収束特性改善", 信学論 A Vol. J82-A No. 6 pp. 867-874, 1999.
- 4) 伊藤直敏, 太刀川信一: "アダプティブアレーアンテナにおけるD/U改善の一方法", 電子情報通信学会信越支部大会, P-1, p.339, Oct 2004.
- 5) 伊藤直敏, 太刀川信一: "マルチパス伝送路におけるUWB/CDMAアレーアンテナの検討", 電子情報通信学会信越支部大会, 3D-2, p.111, Oct 2005.
- 6) 佐藤正知, ジュゼッペアブレウ, 河野隆二: "UWB-IRの適した単一指向性を実現するアダプティブアレーアンテナの構成法に関する一検討", 電子情報通信学会総合大会, A-5-24, p.163, 2003.
- 7) W.E.Rodgers and R.T.Compton, JR.: "*Adaptive Array Bandwidth With Tapped Delay-Line Processing*", IEEE Trans. AES-15, pp.21-28, Jan. 1979.

(2009. 10. 2 受付)