

無線通信における不要電磁波の抑圧に関する研究

塩川 孝泰

東北学院大学工学部 電気工学科

〒983-8537 宮城県多賀城市中央1丁目13-1

E-mail: shiokawa@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

1. まえがき

近年、携帯電話で代表される陸上移動通信は急速な伸びを示しており、それと共にデータ伝送、高速伝送サービスへの要求も高まってきている。また、より高速、広帯域化を目指した次世代移動通信、次世代無線 LAN 等を対象とする検討も鋭意進められている。また、リモートセンシング、EMC関連、宇宙探査等における測定技術に関する研究も注目を集めている。さらに、通信、放送、電波監視等の機能を、受信機に搭載しているソフトウェアを切り替えることにより、一つの受信機で実現しようとするソフトウェアRadioも提案され、無線に係わる分野は著しい進展を遂げている。しかし、無線には“無”線ならではの利点に対して、必要としない周波数も受信しやすいという欠点が存在する。このような無線の性質を考慮すると、一層の高品質な通信、測定等を実現するためには、効果的な不要電磁波（干渉波）抑圧方式に関する研究や、必要な方向以外には電波を放射しない高性能かつ小型なアンテナの研究などは今後重要な位置づけになると考える。筆者らは、以上の背景の基に、

- (1) ニューラルネットワークによる干渉波の抑圧
- (2) 高性能/小型アンテナに関する検討

に関する研究を進めた。以下、得られた結果の一例を報告する。

2. ニューラルネットワークによる干渉波の抑圧

2.1 序

無線通信における干渉波抑圧技術に関しては、アダプティブアレーが効果的な抑圧技術として一般的に知られている。アダプティブアレーとは、アレーアンテナの各素子の励振振幅および位相を、アダプティブアルゴリズムにより独立に制御し、所望波方向にメインローブを、また、干渉波方向にヌル点を向けることにより干渉波を抑圧する、いわゆる空間領域適応信号処理である。このアダプティブアルゴリズムに関して、従来よりLMS(Least Mean Square) (1)、CMA(Constant Modulus Algorithm) (2)-(5)、カルマンフィルタを用いた方法(6)、(7)などが提案され、各種の検討が行われている。しかながらアダプティブアレーは所望波と干渉波の到来方向が近接している場合には両波の分離が難しく、干渉波抑圧効果が減少する問題がある。これを解決するためには素子数を増やし、ローブの幅を狭くすることにより干渉波を抑圧することが考えられるが、素子数の増加に伴うシステムの複雑化、大型化の問題が生じる。また、アダプティブアレーは原理的に素子数以上の干渉波の抑圧は不可能である。従って、高い通信品質を維持するためには、伝搬環境において想定される最大の干渉波数を考慮してシステムの設計を行う必要がある。一般に、陸上移動通信では数十波の波が到来すると考えられており、また所望波と干渉波の到来方向が近接する可能性も十分考えられるため、このような環境に対しても高い効果を持った干渉波抑圧技術の開発が望まれている。

これら問題に対する一解法として、筆者は主にパターン認識の分野で用いられているニューラルネットワークの一つであるP-RCE(Probability-Restricted Coulomb Energy) (8)を、伝送系の問題に適用する干渉波抑圧技術を考案し、先にその基本的な性能について報告した(9)。しかし、各種の無線通信における本手法の有効性を明確化するためには、伝送速度及び干渉波の遅延量と干渉波抑圧効果の関係について更なる定量的評価、検討が必要である。また、同一チャネル干渉を考慮した他セルからの干渉波に対する干渉波抑圧効果の検討も

重要な検討項目である。本研究では主にこれらの点に着目し研究を進めた。P-RCEは入力信号と参照信号を用いて学習を繰り返し行うことにより、環境に適応したネットワークが構築される。本手法では各アンテナ素子における受信信号と既知信号をそれぞれ入力信号と参照信号として用いることにより、伝搬環境に適応したネットワークを得る。ここでは既知信号としてパイロット信号を用いることが想定している。この学習により得られたネットワークを用いることによって干渉波抑圧が実現される。すなわち、所望波と干渉波を含む各アンテナ素子の受信信号をP-RCEに入力すると、すでに得られている学習結果により干渉波成分の少ない出力波が得ることが出来る。なお、この手法は空間領域と時間領域の信号処理の併用型と言える。

2. 2 P-RCE法の原理の概説

2. 2. 1 P-RCEネットワークの構成

P-RCEは、主にパターン認識の分野で用いられているニューラルネットワークの一つである。図1にP-RCEネットワークを示す。P-RCEネットワークは入力層、プロトタイプ層(隠れ層)、出力層の3層から構成される。プロトタイプ層はただ1層であり、学習を繰り返すにつれてプロトタイプ層のセル(プロトタイプセル)の数が増加する特徴を有す。図2にプロトタイプセルの内部表現を示す。各々のプロトタイプセルは、特徴ベクトル: W 、半径: λ 、プロトタイプ(プロトタイプセル内に入ったパターンの出力値): C 、プロトタイプセル内に入ったパターン数のカウンタ: κ 、および、セル内における確立分布 P によって表現される。また、図において σ はスムージングファクタ、 d はプロトタイプセルの中心からの距離である。

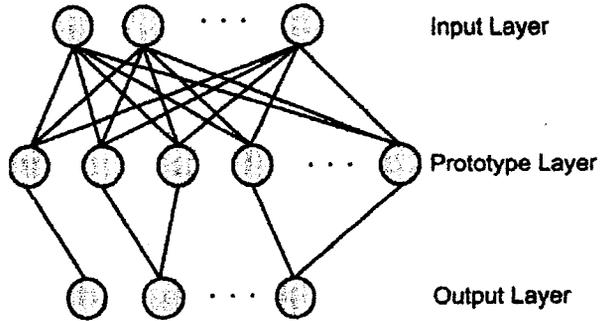


図1 P-RCE ネットワーク

2. 2. 2 学習プロセスと認識プロセス

学習用の入力データに基づき、複数のプロトタイプを作成することにより、学習する部分空間のクラス分け(マッピング)を行う。このプロセスを複数の入力データと参照データに対して繰り返し行うことにより、入力値と出力値の関係に基づいたP-RCEネットワークが構築される。このネットワークは、学習プロセスにより生成された多くプロトタイプセルを N 次元の特徴空間内にマッピングすることにより表現される。次に、認識プロセスは、この学習により作成されたマッピングを用いて、未知入力に対する出力を求めることで実現される。

2. 2. 3 干渉抑圧技術への適用

図3にP-RCEを用いた干渉波抑圧モデルの構成を示す。このモデルは N 素子のアレーアンテナと信号処理部により構成されている。まず、P-RCE法に用いる入力信号と参照信号について説明する。今、 $N a$ 波の波が到来しているとする。波長を λ 、素子間隔を d とし、各々の波の信号と到来方向をそれぞれ $S_i(t)$ 、 $\theta_i (i=1, \dots, N a)$ とすると、例として直線配列のアレーアンテナにおける、 $n (n=1, \dots, N)$ 番目のアンテナ素子の受信信号の瞬時電圧値 $X_n(t)$ は次式で与えられる。

$$X_n(t) = \sum \text{Re} [S_i(t) \exp \{j 2 \pi n d / \lambda \sin \theta_i\}]$$

ここでは簡略のため雑音成分の項は省略している。上式からわかるように、ある $S_i(t)$ と θ_i のもとで、各々のアンテナ素子における受信信号の瞬時電圧値が決定される。すなわち、伝搬環境と入力信号の間的一对一の

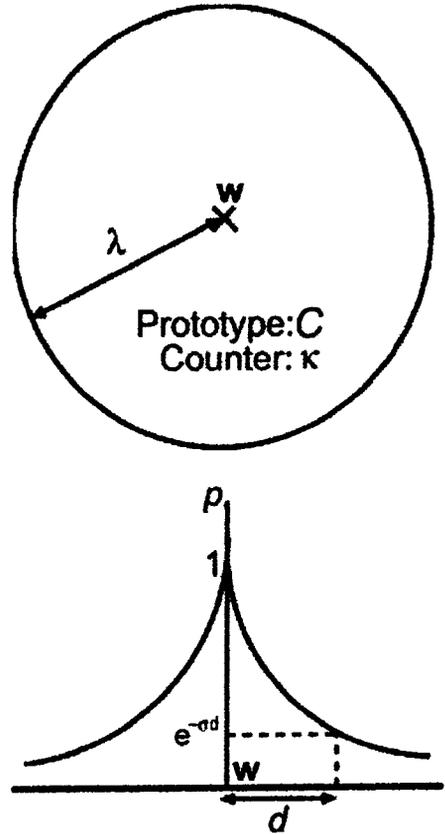


図2 プロトタイプセルの内部表現

対応付けがなされる。参照信号には既知信号の瞬時電圧値が用いる。既知信号には所望信号のレプリカが必要となるが、ここでは、受信側でビットパターン of 既知なパイロット信号やトレーニング信号の使用を想定している。従って、ある伝搬環境の基で、入力信号と参照信号の間に一対一の対応付けがなされることとなり、P-RCEによる学習が可能となる。学習プロセスにおいては、各々のアンテナ素子における受信信号の瞬時電圧値 $\mathbf{X}(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t), \dots, x_N(t)\}$ と既知信号の瞬時電圧値 $r(t)$ の関係に基づくP-RCEネットワークが構築される。アレーアンテナが未知信号 $\mathbf{X}(t)$ を受信すると、また認識プロセスにより出力 $y(t)$ を得ることができる。なお、出力 $y(t)$ を得るに当たっては、8ビット分の時系列データを受信後、これを1データブロックとして扱う処理している。すなわち、本手法は空間/時間領域信号処理であると言える。

2. 3 P-RCE 法による干渉波抑圧効果

2. 3. 1 狭域伝搬モデルによる検討

ここでは、伝搬環境を下記の基本的な4種類のCaseに限定し検討を進める。なお、干渉波については同一セル内からの遅延波を想定した場合、および同一周波数帯を使用する他セルからの別波源波を想定した場合について干渉波抑圧効果の検討を行う。

- Case 1 : 所望波と干渉波の到来方向が比較的離れている場合
- Case 2 : 所望波と干渉波の到来方向が近接している場合
- Case 3 : 素子数以下の干渉波が到来する場合
- Case 4 : 素子数以上の干渉波が到来する場合

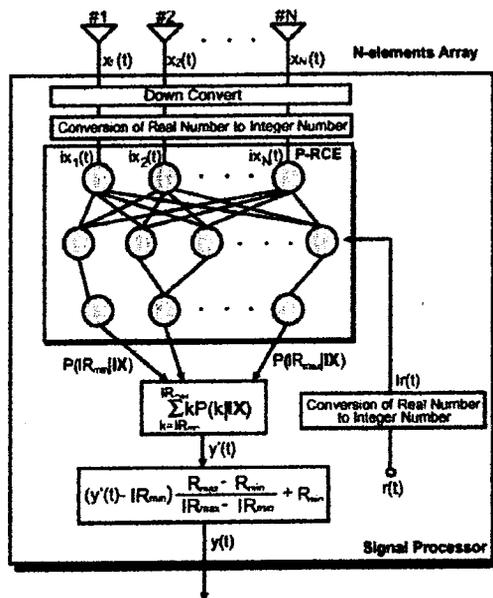


図3 P-RCE 法のモデル

本論文では、P-RCE法を移動局で使用することを想定し、アレーアンテナは移動局に取りつけられている。移動局は直線路を時速50km/hで走行しているとする。干渉波として、同一セル内の所望波源から到来する遅延波を想定したモデルと、同一周波数帯を使用する他セルから到来する別波源波を想定したモデルを考え、それぞれ、「所望波+遅延波モデル」、「所望波+別波源波モデル」と呼ぶ。アンテナの構成は4素子、半波長間隔

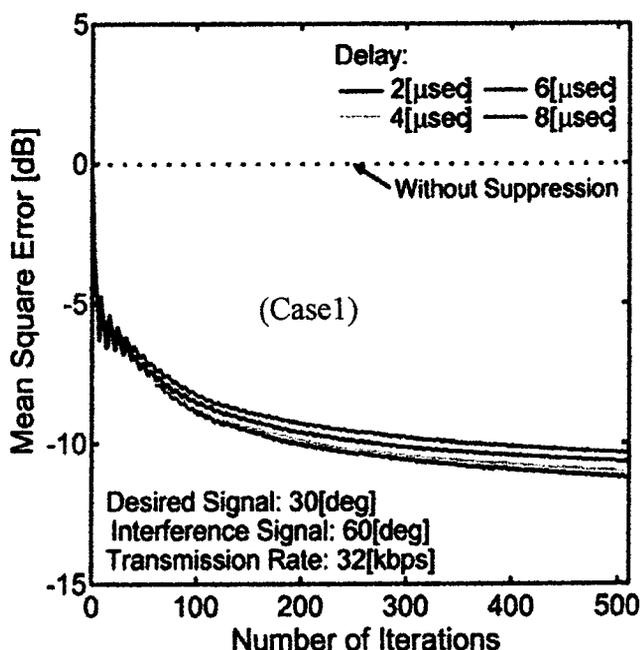


図4 平均二乗誤差特性

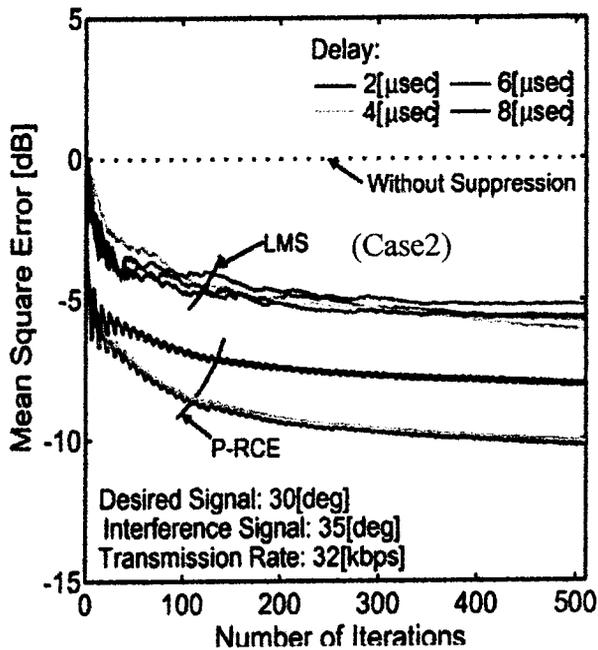


図5 平均二乗誤差特性

直線配列を用いる。所望波+遅延波モデルにおいては、遅延時間に対する干渉波電力の減衰を考慮する必要があるが、これに関しては素波の平均電力が指数関数的に減衰するモデルを用いる。すなわち、干渉波の電力： P_i を遅延時間： τ に対して次式で与える。

$$P_i = P_s \exp \{-\tau / 2 \sigma \tau\}$$

ここで、 P_s は所望波電力、 $\sigma \tau$ は遅延スプレッドである。本論文では P_s を0[dB]とし、 $\sigma \tau$ をマクロセルにおける $\sigma \tau$ が数[μ sec]であることを考慮して4.0[μ sec]とした。また学習、認識は毎イタレーションごとに行う。図4に、Case 1における平均二乗誤差特性を、所望波+遅延波モデル、伝送速度が32[kbps]の場合について示す。平均二乗誤差の値は、干渉波抑圧を行わなかった場合の値で規格化している。同図より、イタレーション数が増えるに従い、平均二乗誤差の値は小さくなり、400イタレーション程度で安定していることがわかる。また遅延時間が短いほど、伝送速度の増加による平均二乗誤差特性への影響は少ない傾向にあり、各伝送速度において遅延時間を遅延シンボル数で換算したとき、平均二乗誤差特性は類似の傾向を示すことがわかった。図5に、Case 2における平均二乗誤差特性を、所望波+遅延波モデル、伝送速度が32[kbps]の場合について示す。また、アダプティブアレーとの比較のために、伝送速度が32[kbps]の場合のLMSの結果を図5に併せて示す。図5よりLMSの場合は、いずれの遅延時間においても収束後の平均二乗誤差が約-5から-6[dB]と大きいことがわかる。アダプティブアレーは遅延時間に関わらず、所望波と異なる方向からの到来波を干渉波とみなして抑圧する。しかし、所望波と干渉波が近接して存在する場合には、所望波と干渉波とをメインビームで取り込むことになるため、干渉波抑圧効果は大きく減少していることがわかる。一方、P-RCE法の場合には、いずれの遅延時間に対してもLMSより高い干渉波抑圧効果が得られることがわかる。これは従来の指向パターンの制御により干渉波を抑圧するアダプティブアレーとは違なり、受信波と基準波の関係に基づき作成されたマップを用いる信号処理により干渉波抑圧を行っているためである。図6にCase 1, 3, 4における平均二乗誤差特性を、所望波+遅延波モデル、伝送速度が32[kbps]の場合について示す。干渉波が一波の場合には、LMS、P-RCE法共に、平均二乗誤差は約500イタレーション後で約-10.6[dB]と良好な干渉波抑圧効果が得られている。しかしLMSの場合には、干渉波数が増加するにつれて干渉波抑圧効果は減少し、特に素子数以上の干渉波が到来する場合には、収束速度が著しく遅くなり、約500イタレーション後の平均二乗誤差も約-8.5[dB]と大きく劣化していることがわかる。このことは、アダプティブアレーでは原理的に素子数以上の干渉波を完全に抑圧することは不可能であるためである。これに対して、P-RCE法の場合は、いずれのCaseにおいても平均二乗誤差の収束特性は安定しており、約500イタレーション後の平均二乗誤差の値も平均約-11.1[dB]と良好な干渉波抑圧効果が得られることがわかる。また同図より、伝送速度の増加に対しても収束特性は安定しており、500イタレーション後の平均二乗誤差は、伝送速度が32[kbps]、Case 3の場合で-11.5[dB]と良好で安定した干渉

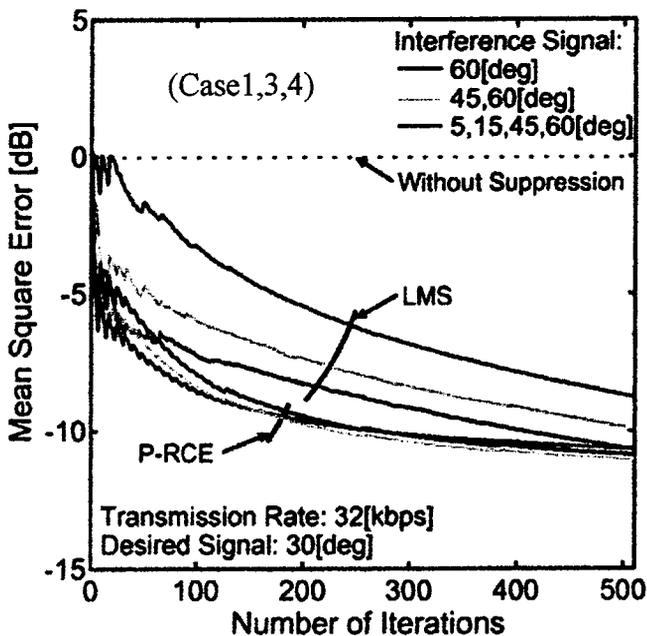


図6 平均二乗誤差

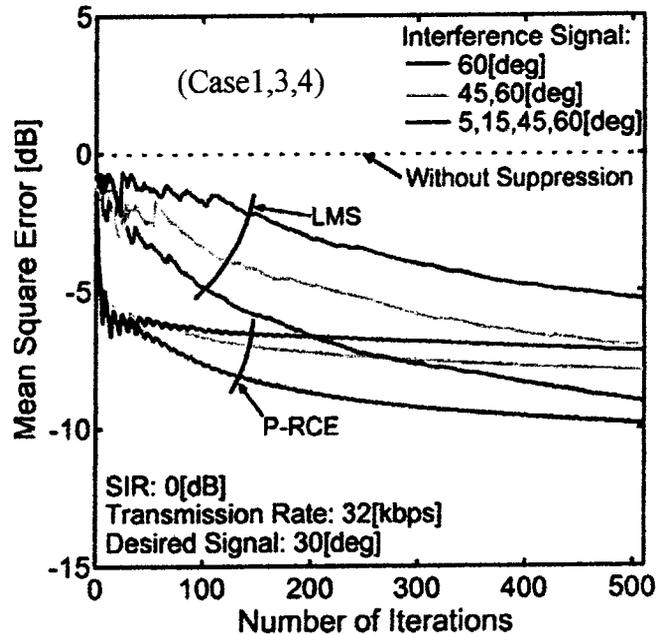


図7 平均二乗誤差

波抑圧効果が得られることがわかる。次に、図7にCase 1, 3, 4における平均二乗誤差特性を、所望波+別波源波モデル、SIRが0 [dB]の場合について示す。またアダプティブアレーとの比較のために、LMSの場合の結果を図8に併せて示した。なお、平均二乗誤差の値は干渉波抑圧を行わない場合の値で規格化している。同図より、LMSと比較してP-RCE法は500イタレーション後の平均二乗誤差が、Case 1, 3の場合で約1.2[dB]、また、Case 4の場合で約2.1[dB]程度抑圧効果が大きく、P-RCE法は、SIRが0[dB]と比較的低いSIR条件下でも、干渉波の抑圧に有効であることがわかった。

2.3.2 広域伝搬モデルによる検討

本節では、狭域伝搬モデルを拡張した広域伝搬モデルを用い、干渉波抑圧効果の検討を行う。広域伝搬モデルでは、干渉波は同一セル内からの遅延波と、同一周波数帯を使用する他セルからの別波源波が同時に両方存在するモデルとする。また、干渉波数、到来方向、遅延時間には、実際の移动通信の伝搬環境を考慮し、下記の統計量を導入する。

- ・ 干渉波数はある平均干渉波数のポアソン分布
- ・ 所望波、干渉波の到来方向は一様分布
- ・ 遅延プロファイルは市街地を想定した指数関数型プロファイル

また、所望波に関しては直接波の見える環境とした。このような伝搬環境は、低アンテナ高基地局の陸上移动通信や衛星移动通信におけるものである。平均干渉波数は5波としたが、これはマルチパス環境を表現するために必要な最小限の値であり、最大15波程度の干渉波が存在する環境に相当している。干渉波中に含まれている遅延波数と、別波源波数の割合については、ここでは狭域モデルの結果より、干渉波抑圧効果に影響の与えやすい別波源波が比較的多く到来する環境を想定し、遅延波数と別波源波数の割合を1:1とした。また、学習、認識は毎イタレーションごとに行う。次に評価方法について述べる。まずこれらシミュレーション条件に基づいて伝搬環境のスナップショット(一場面)を生成する。これにより一つの干渉波数、到来方向、遅延時間の組み合わせを持つ伝搬環境が決定される。次に、このスナップショットの生成とシミュレーションを十分な回数繰り返すことにより、統計量に基づいた様々な伝搬環境に対する干渉波抑圧効果について検討を行った。図8, 9にSNRが10.0[dB]、素子数が4, 8, 12, 16素子における平均二乗誤差特性を、伝送速度が32, 128[kbps]の場合について示す。なお、この平均二乗誤差特性は、繰り返し行うスナップショット生成とシミュレーションにより得られる複数の平均二乗誤差特性を平均することにより求めた。同図より、広域伝搬モデルにおいても、学習を繰り返すことによる干渉波抑圧効果が見られることがわかる。4素子では400イタレーション程度で平均二乗誤差特性がほぼ安定していることがわかる。また、図8, 9を比較すると、伝送速度が増加するにつれて抑圧効果が若干劣化していることもわかる。これは前節で検討したように、所望波と干渉波が近接して存在する場

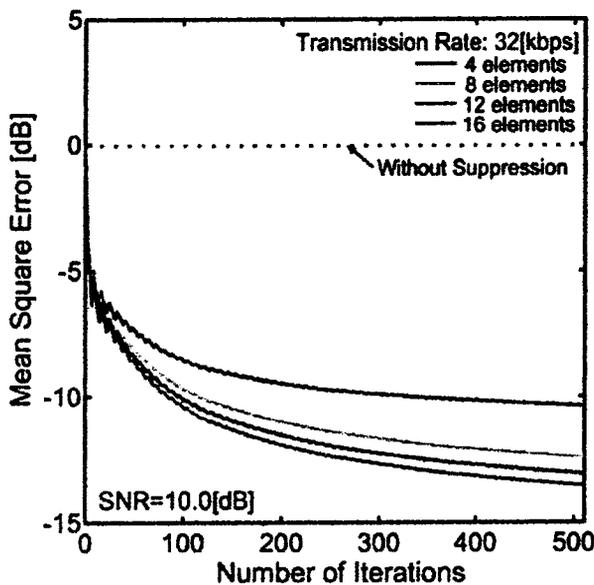


図8 平均二乗誤差

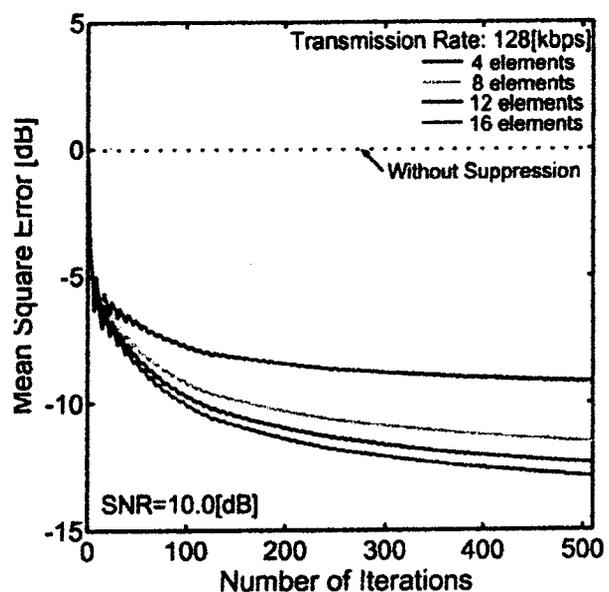


図9 平均二乗誤差

合、伝送速度の増加が干渉波抑圧効果に影響を与えているためと考えられる。500 イタレーション後の平均二乗誤差は、伝送速度が 32[kbps]の時-10.3[dB]であるのに対して、128[kbps]の時-9.15[dB]と約 1.2[dB]程度の減少である。このことは統計的見地からすればこのようなケースの発生頻度は少ないと考えられるが、P-RCE 法では良好で安定した干渉波抑圧効果を期待できることを示している。次に素子数に着目すると、素子数が多いほど平均二乗誤差特性が良くなるのがわかる。これは素子数が増えるほど P-RCE ネットワークの特徴空間の次元数が増え、より正確なクラス分けが可能となるからである。また特に 4 素子の 8 素子の差が大きくなっているが、これは平均干渉波数が素子数未満と素子数以上の場合に相当していると考えられるからである。従って、到来波 1 波に対して 1 次元の特徴空間を割り当てることが出来れば、よりクラス分けの精度がより高くなると考えられる。しかし、素子数の増加による特徴空間の次元数の増加は、計算量の増加を招く。一般的に干渉波抑圧技術には、なるべく少ない計算量での高い干渉波抑圧効果が望まれるため、素子数の増加は必ずしも好ましいことではない。

2. 4 結

以上、2. 2 で説明した P-RCE 法を用いて、まず 2. 3 では干渉波抑圧効果の定量的な評価、検討を行った。狭域伝搬モデルによる検討では、干渉波数、到来方向ともに様々である伝搬環境を基本的な 4 種類に大別し、また干渉波として、同一セル内からの遅延波を想定したモデルと、同一周波数帯を使用する他セルからの別波源波を想定したモデルを用いて干渉波抑圧効果の検討を行った。広域伝搬モデルによる検討では、遅延波と別波源波がともに存在し、干渉波数、到来方向、遅延時間に統計量を導入したモデルにより、統計的見地から干渉波抑圧効果を検討した。それらの結果より P-RCE 法の干渉波抑圧に対する有効性を確認した。

3. 高性能/小型アンテナに関する検討

3. 1 序

比較的小型な形状の BHA (Bifilar Helix Antenna) は、良好な円偏波特性を有することが知られ、移動体通信、EPIRB 等の半球指向性を必要とするシステムで用いられている。このアンテナに対して、筆者らは先に互いに逆向きに巻かれた二つの BHA を同軸上に組み合わせたアンテナ (Counter-Wound Bifilar Helix Antenna : CBHA) を提案した (16)。このアンテナは、われわれの基礎検討によれば給電の仕方により直線偏波や右旋、左旋の両円偏波の放射が可能であり、かつ、単方向指向性の特性を期待できるアンテナでもある。FB 比が良いため、不要な反射波の受信も少なく、また非常に小型であるため、周囲環境物との結合も小さいことが期待でき、例えば、測定用プローブや、加入者系通信用等の小型基地局アンテナ等への適用が期待できる。また、偏波の切り替えが容易であるため、偏波ダイバーシティによる不要波 (フェージング) の抑圧も期待でき、例えば、移動衛星通信端末局アンテナへの適用が考えられる。本稿ではこのアンテナの特性をさらに明らかにするため、モーメント法を用いて解析を進める。

3. 2 CBHA (Counter-Wound Bifilar Helix Antenna) の特性

RBHA と LBHA とを直交させた CBHA の構造を図 10 に示す。このアンテナについて、2 つの arm の一つを給電した場合 (他方は 50 Ω 終端; 一点給電 CBHA) と、2 つの arm ともに給電した場合 (二点給電) の特性について以下に示す。

3. 2. 1 一点給電 CBHA の放射特性

RBHA にのみ給電した場合の両 arm 上の電流分布を図 11 に示す。ここで、arm1 を RBHA, arm2 を LBHA としている。同図より RBHA に給電することによって、LBHA 上にもほぼ同じレベルの電流が誘起

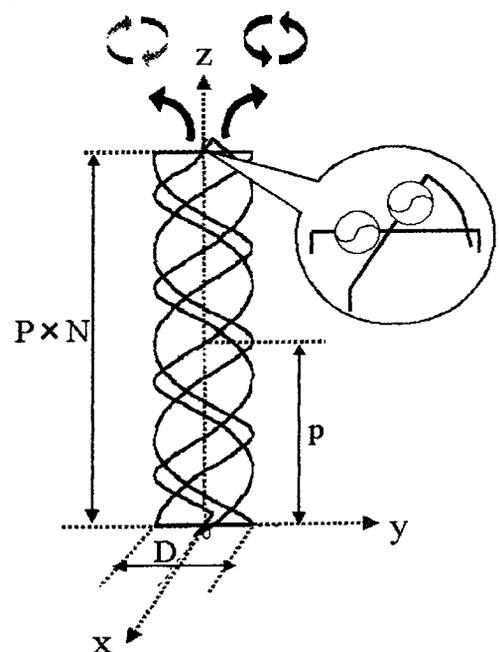


図 10 CBHA の構造と座標

され、二つの arm 間の結合が非常に強いことがわかる。このことより RBHA から放射された右旋偏波は、LBHA により直線偏波に近づくことが予測できる。そこで、FB 比、ビーム幅、交差偏波特性、利得について着目し、最も望ましい（前後比、広ビーム幅の点で）特性が得られる構造について、ピッチ： P 、ヘリカル径： D 、巻数： N をパラメータとして検討を進めた。結果として、現時点では $D=0.2\lambda$ 、 $P=0.2\lambda$ 、 $N=4$ の時に図12の放射特性が得られた。同図より、 E_x を主偏波成分、 E_y を交

差偏波成分とするほぼ直線偏波となっていることがわかる。なお、この時の主偏波成分の特性は、前後比は約14.4 dB、利得は約4.5 dBi、半値角は約11.3°である。また、直線偏波アンテナとしてのCBHAの利得特性を図13に示す。約27%の帯域で4 dB以上の特性が得られていることがわかる。さらにLBHAに給電した場合には、RBHAと同じ現象が90度ずれて起こることになるため、図14のハイブリッド回路を介することにより、同回路の出力ポートより、右旋円偏波、左旋円偏波を同時に取り出すことが出来る。このことは、建物、樹木等により偏波特性の劣化が問題となる、移動衛星通信のフェージング劣化対策（ダイバーシチ）に期待できる。なお、一層の交差偏波特性の改善が今後の課題である。

3. 2. 2 二点給電CBHAの放射特性

二点給電の場合について解析を進めたところ、一点給電CBHAの場合と同一のパラメータの基で、図15に示す放射

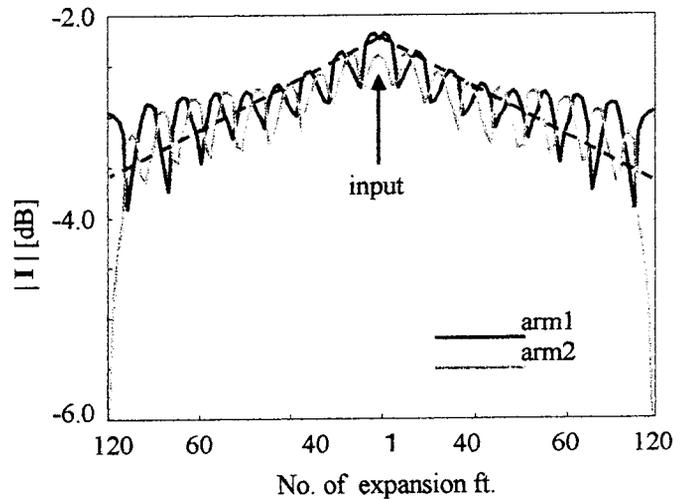


図11 CBHA上の電流分布

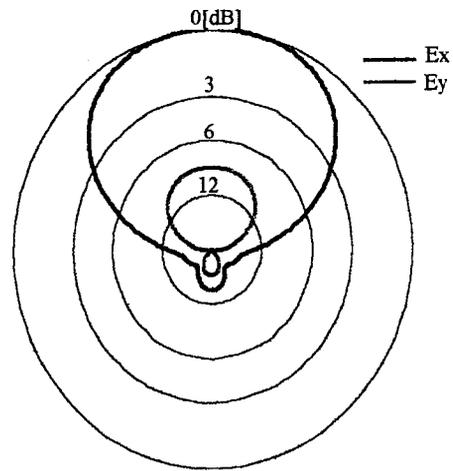


図12 CBHAの直線偏波特性

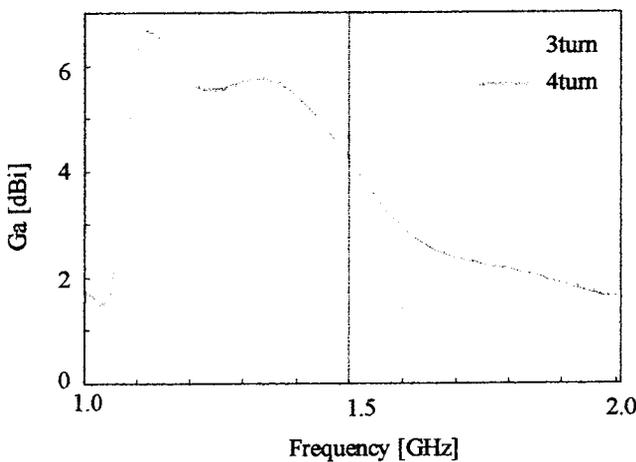


図13 CBHAの利得特性

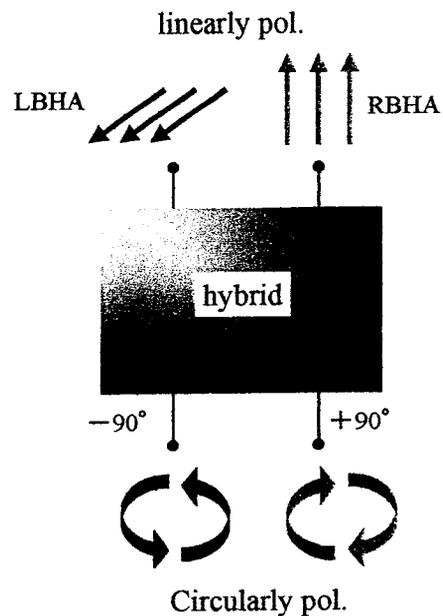


図14 ハイブリット回路

特性が得られた。 E_x 成分、 E_y 成分はほぼ同じであり、また、位相差は零である。つまり、偏波面が 45° 傾いた直線偏波であり、前後比は約17dB、利得は6.1dBi、半値角は 108° となっている。すなわち、反射板を用いること無しに、かなり小型な構造でありながら、前後比があり、かつ、ブロードなパターンの直線偏波を実現できることがわかった。このアンテナは、例えば、測定用アンテナや開口面アンテナの一次放射器等への適用が期待できる。

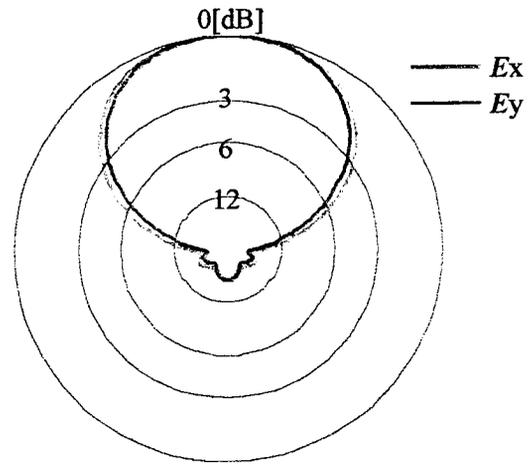


図15 二点給電CBHAの放射特性

3.3 結

以上、2通りのCBHAについて、モーメント法を用いて解析を行い、その特性を明らかにした。その結果、両アンテナとも、反射板無しの構造で、かなり良好な前後比、ブロードな放射特性を有していることがわかった。また、それぞれの場合、特徴のある偏波特性を有し、衛星移動通信端末局アンテナ、加入者系通信小型基地局アンテナ、開口面アンテナの一次放射器、測定用プローブ等への適用が期待できる。

4. むすび

以上、ニューラルネットワークによる干渉波の抑圧、および、高性能/小型アンテナに関する研究の成果について報告した。本研究により、P-RCE法による抑圧効果を確認することが出来たが、Ni1000等のニューロチップを用いての検討は今後の課題である。また、CBHAについても興味深い成果を得ることができた。一点給電の場合の交差偏波特性の改善に関する検討は今後進める予定である。

参考文献

- [1] J. Mitola: ``Software radios: Survey, critical evaluation and future directions'', IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol.8, no.4, pp.25-36, April 1993.
- [2] D.W. Bennett, P.B. Kenington and J.P. McGeehan: ``ACTS FIRST project and its approach to software radio design'', IEE Colloquium (Digest), no.406, IEE, Stevenage, Engl. pp.4/1-4/6, 1998.
- [3] Y. Ogawa, M. Ohmiya and K. Itoh: ``An LMS Adaptive Array for Multipath Fading Reduction'', IEEE Trans. Aerosp. & Electron. Syst., vol.AES-23, no.1, pp.17-23, Jan. 1987
- [4] J.R. Treichler and B.G. Agee: ``A New Approach to Multipath Correction of Constant Modulus Signals'', IEEE Trans. Acoust., Speech & Signal Process., vol.ASSP-31, no.2, pp.459-472, April 1983.
- [5] N. Kikuma, K. Hachitori and N. Inagaki: ``CMA Adaptive Array Antenna Using Transversal Filters for Spatial and Temporal Adaptability in Mobile Communications'', Proc. of Virginia Tech's Fourth Symposium on Wireless Personal Communications, pp.4.1-4.10, June 1994.
- [6] . Tanaka, R. Miura, I. Chaba and Y. Karasawa: ``An ASIC implementation scheme to realize a beam space CMA adaptive array antenna'', IEICE Trans. Commun., vol.E78-B, no.11, pp.1467-1473, 1995.

- [7] T. Tanaka, R. Miura and Y. Karasawa: "Interference cancellation characteristics of BSCMA adaptive array antenna in DBF configuration", Int. Symp. Antennas Propagat. (ISAP '96), Chiba, Japan, pp.773-776, Sep. 1996.
- [8] K. Krücker: "Rapid interference suppression using a Kalman filter technique", IEE Proc., F&H, vol.130, no.1, pp.36-40, Feb. 1983.
- [9] 汪 晋寬, 高野 忠, 荻野 剛二郎: "高速移動通信に適用できるカルマンフィルタ型アダプティブアンテナ", 電子情報通信学会論文誌, B-II, vol.J76-B-II, No.4, pp.277-285, Apr. 1993
- [10] Douglas L. Reilly: "The RCE Neural Network", Nestor Inc.
- [11] 塩川 孝泰: "学習機能を有するアダプティブアンテナの提案", 信学技報, A96-172, Feb. 1997.
- [12] H. IWAI and Y. KARASAWA: "Wideband Propagation Model for the Analysis of the Effect of the Multipath Fading on the Near-Far Problem in CDMA Mobile Radio Systems", IEICE Trans. Commun., vol.E76-B, no.2, pp.103-112, Feb. 1993
- [13] 唐沢好男: "広帯域移動通信の多重波伝搬理論とモデリング", アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ(第15/16回), 電子情報通信学会アンテナ・伝搬研究専門委員会, 無線通信システム研究専門委員会, Sep. 1999
- [14] "Ni1000", Nestor Inc. One Richmond Square Providence, RI
- [15] K. Ikeda, Y. Nemoto, T. Shiokawa: "An Interference Suppression Method for Wireless Communications by Applying P-RCE, IEICE Tran. On Comm. Vol. E83-B, No. 6, pp.1237-1245, June 2000
- [16] 大西、根元、塩川: Counter-Wound Bifilar Helix Antenna の放射特性に関する検討、電気関係学会東北支部連合大会、予稿集2B-13, Aug. 2000