48 TR-O-0063 ビームスペースCMAアダプティブアレー 千葉 勇

5.

1994.3.9

ATR光電波通信研究所

ATRテクニカルレポート

「ビームスペースCMAアダプティブアレー」

ATR光電波通信研究所 無線通信第一研究室

千葉 勇

1. はじめに

自動車電話,携帯電話の需要の増大に応えるために,マイクロセルを用いた陸上 移動通信,低周回軌道を用いた移動体衛星通信などが提案されている.こうした移 動通信システムが普及されるに伴い,我々の周りには様々な電波が飛び交って,通 信における環境は複雑になっていく一方,伝達される情報は音声から画像さらには データという具合に高度化されている.厳しい電波環境で高度な情報を通信するに は,必要な信号のみを受信して不要な干渉信号を除去する必要があるが,このよう な信号の取捨選択を自動的に行う「知能を持ったアンテナ」の研究をATR光電波 通信研究所で行っている.

このアンテナはアダプティブアレーアンテナと呼ばれて,「所望信号の到来方向 にアンテナの主ビームを向けて,干渉波の到来方向に指向性の零点を形成」して信 号の取捨選択をするものとして定義される.これは人間の動作にたとえれば,駅の ホームや居酒屋で電話をかけるとき,受話器にしっかり耳を押し当てて,かつ反対 の耳を手で塞いで通話をすることに相当する.これは,受話器に耳を押し当てるこ とで所望信号の到来方向の指向性を上げて,反対の耳を塞ぐことで干渉信号の到来 方向の指向性を零にしていることになる.もちろん移動通信では居酒屋でかける電 話のように,所望信号も干渉信号もその到来方向を特定することができないので, 信号を分離するアルゴリズムおよびそれを実現するハードウェアに工夫が必要とな る.

アダプティブアレーの中で文献(1)~(4)等で報告されているCMA(Constant Modulus Algorithm) アダプティブアレーは,所望波と相関のある不要波(遅延波)の除去に有効であり,移動体通信に用いられるアダプティブアンテナの指導原理として着目されている.しかし,CMAアダプティブアレーでは最適ウェイトは陽な形で表すことができず何らかのフィードバックループを必要とする.したがって,素子アンテナ(以下,素子)の個数が多い場合,素子毎の出力にフィードバックループを設ける方式ではハードウェア規模,演算時間が多大となる.また,移動体衛星通信等では個々の素

- 1 -

子で受信する信号のSN比が低いため、収束特性が雑音の影響を受け易いという課題も ある.

一方、ディジタル信号処理技術を用いてアンテナのビーム制御を行うディジタル ビームフォーミング (Digital Beam Forming,以下DBF) アンテナが移動体衛星通信用 としても検討されている⁽⁵⁾.DBFアンテナでは、ビーム合成をディジタル信号領域で 行うのでFFTあるいはDFTによって容易にマルチビームが形成できる^(4.6).したがって 所望波を捕捉する機能はこのマルチビームを用いる事により短時間に効率良く行うと ができる、マルチビームを用いる場合に、複数の信号波が到来している電波環境で は、各到来波の方向に主ビームのあるビーム出力が大きくなる、従って、マルチビー ムシステムにおいて出力の大きいビームを選択してアダプティブ処理を行うことによ り、到来波の個数に対応した自由度で効率良く、干渉波の影響が除去できる、このこ とを、利用して鷹尾らは、所望波の到来方向が既知であるという条件のもとで、指導 原理として方向拘束付出力電力最小化法を用いたビームスペースアダプティプアレー の提案を行っている^{(8), (9)}.しかし通信では、一般に信号波の到来方向は未知であ り、かつ所望波と相関のある干渉波の除去を行う必要があるため方向拘束付出力電プ フ最小化法は適用できない、このことから、移動体通信においては所望波の到来方向 の情報を前提条件とせずに干渉波の除去が可能なビームスペースアダプティプアレー の検討が必要であった.

ATRでは、ビームスペースアダプティプアレーを移動通信に適用する方式とし て、指導原理にCMAを採用したビームスペースCMAアダプティブアレー(Beam Soace CMA Adaptive Array:以下,BSCMA)を提案する.BSCMAでは、DBFを用いることを 想定し、FFTあるいはDFTで形成されたマルチビームの中で、出力の大きいものを選択 して、選択されたビーム出力のみについてCMAアダプテイブ処理を行う.これによっ て、到来波の個数に対応した素子数以下の自由度でアダプティプ処理が行える.ま た、SN比の高い出力信号でフィードバックループ系を構成するので、内部雑音の影響 を軽減することができる.また、BSCMAのCMAループを複数個設け、それぞれの処

- 2 -

理の初期値を調整することによって,ビーム間アイソレーションを高く取って複数個 の所望波を同時に受信するマルチビーム通信系が構築できる.この通信系は同一周波 数で実現できるので通信周波数が有効に利用できる.

本レポートでは、BSCMAの構成を示すとともに、数値シミュレーションによって得た特性を報告する.さらに、上記のBSCMAを使用するマルチビーム通信系の基本概念を示す.

2. BSCMAの構成

2.1 アンテナ構成

DBFシステムを想定したBSCMAの構成を図1に示す.



図1 BSCMAの構成

まず,素子で受信されたマイクロ波信号はA/D変換器によって,ディジタル信号に変換される. Multibeam Formerでは,FFTあるいはDFTによってマルチビームが形成され

- 4 -

る.素子が等間隔に配列された平面アレーアンテナのマルチビーム形成にはFFTの適用 が可能になる.FFTを用いた場合,N本のマルチビーム形成に必要な複素積和演算回数 はN²ではなく,Nlog,Nまで削減することができる.

複数の信号波が到来している電波環境で、マルチビームシステムを用いた場合、各 到来波の方向に主ビームのあるビーム出力が大きくなる.従って出力電力の大きい ビームを選択してアダプティブ処理を行えば到来波の個数に対応した自由度で効率良 く干渉波の影響を除去できる^{(8).(9)}.このことからBeam Selectorでは、形成されたマル チビームの中で出力電力の大きいもののみを選択する.Beam Selectorの動作として

(1) 出力電力の閾値を決めておき, 閾値を超えたビームを選択する方式.

(2)予め,選択するビームの本数を決めておき,電力の大きい順に選択する方式.な どが考えられる.

2.2 CMAアダプテイブ処理の原理

CMAアダプティブ処理について原理を簡単に述べる⁽¹⁾. パラメータを次のように設定する.

N : 選択されたビーム数

 X
 n番目ビームによる受信電界

W。 : Wnn番目ビームに与える複素ウェイトy

y : ビーム合成電界

ここで、入力ベクトル、ウェイトベクトルを

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \cdots & X_N \end{bmatrix}^T$$
$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_1 & W_2 & \cdots & W_N \end{bmatrix}^T$$

(1)

とすると, ビーム合成電界は

となる.ここで,Tは転置を表す.CMAはアンテナ合成出力の包絡線が所望の一定値 になるようにウエイトを制御するアルゴリズムである.したがって,つぎの式で表さ れる評価関数を最小にすることで最適ウェイトが得られる.

$$J = \frac{1}{4} E \left[\left(|y|^2 - \sigma^2 \right)^2 \right]$$
(3)

ここで, σは所望の包絡線値, E[] は期待値を表す. 評価関数 J を最小にするWの 解は, 解析的に求めることができないため非線形最適化法による繰り返し演算が必要 となる. 演算アルゴリズムとして最急降下法を用いた場合, ウェイトの更新は次式に 従う.

$$W(m+1) = W(m) - \mu X^{*}(m)y(m) \{ |y(m)|^{2} - \sigma^{2} \}$$
(4)

ここで、*は複素共役を、µは定数でありフィードバックのステップサイズを、mは ウェイトの更新回数を表す.

従来のエレメントスペースCMAアダプティブアレー (Element Space CMA Adaptive Array : 以下, ESCMA) は個々の素子からの信号のウェイトを最適化していた. BSCMAでは, 制御の白由度すなわちXあるいはWの要素数が干渉波の到来波数に応じて削減できる. したがって, このアダプテイプアンテナ方式は移動体衛星通信などに用いられる比較的素子数の多い (10素子以上) アレーアンテナへの適用が有効である. 3 数値計写シミュレーション

数値計算によってBSCMAの基本特性を検討する. ミユレーションにおいてはアンテ ナとして, 図2に示すように半波長間隔の正方格子上に素子 (Element antenna) を配列 した16素子平面アレーアンテナ (Planar array antenna) を考える.



図2 4×4平面アレーの構成

素子パターンとしては、 $\cos(\theta)$ の指向性を仮定した.ここで、式(5)で表される x方向、y方向の方向余弦角 θ_x 、 θ_y をそれぞれ水平方向角、垂直方向角として定義する.

$$\sin\theta_x = \sin\theta\cos\phi \tag{5}$$
$$\sin\theta_y = \sin\theta\sin\phi$$

この構成のアレーアンテナにおいてはMultibeam FormerでFFTによってマルチビームが 形成できる.図3にX - Z面に主ビーム方向がある4本のマルチビーム放射パターンを示 す.



図3 FFTによって形成されるマルチビーム放射パターン

また, 到来信号に関しては次の性質を仮定した.

・変調方式はQPSKとして、帯域制限の影響は考慮しない。

・データのサンプリングは1タイムスロット当たり8回とする.

・熱雑音はアンテナ素子の出力端で定義する.

3.1 ESCMAとの比較

表lに示す電波環境でのBSCMAとESCMAとの特性を比較する.尚,表lにおける到来 方向角は水平方向角 (θ_x)を意味し,垂直方向角 (θ_y)は0°である.

	電力(dB)	到来方向 角*(deg)	遅延 (time slot)
第1波	0	20	0
第2波	-3	-45	1.6
内部雑音	-20		·

表1 シミュレーションに用いる電波環境

*:水平方向角(*θ*_x)を表す(垂直方向(*θ*_y)は0deg).

BSCMAのBeam Selectorでは素子パターンによる利得低下を考慮して最大ビーム出力から10dBに閾値を設定してビーム選択を行うものとする.

表1に示す電波環境下では、4本のビームが選択された.また、CMAループの初期値 としては、BSCMAでは最大電力を有するビームのみにウェイト1.0を与え、ESCMAで は1素子のみにウェイト1.0を与え、残りは零とした.式(4)における最急降下法のス

- 10 -

テップサイズμはそれぞれ一定とし、収束後の所望波の変動が0.2dB以内になるように 数値シミュレーションで求めた.即ち、この検討では信号の安定性を同一にした条件 で両方式の収束速度の比較を行ったことになる.各信号波の収束特性を図4に示す. 図4より信号の安定性を同一にした条件下では所望信号(Desired signal)の捕捉、ま



図4 各信号波の収束特性

- 11 -

た干渉信号(Interfernce signal)の抑圧の両方に関してBSCMAの収束はESCMAの収束 よりも速い.このとき,BSCMAにおけるCMAフィードバックループの自由度は ESCMAの1/4である.このことよりBSCMAでは少ない演算量で効率良くアダプティ プ処理が行えることが判る.

BSCMAの収束が速い理由については次のように考察する.

[1] 初期値として,所望信号をビーム幅内で受信した状態でアダプティブ処理が開始される.このことによって所望波に関する収束が速くなる.

[2] BSCMAでは,各信号波は対応するビームのビーム幅内で受信されるので,所 望信号と干渉信号が分離されて処理される.すなわち,近似的に所望波の到来方向に 主ビームを持つ放射パターンと干渉波の到来方向に主ビームを持つパターンの重畳が 早い段階で行われる.

[3] 最急降下法の一回あたりの更新量が大きく取れるためlステップ当たりのアダプ ティプ化の効果が大きい.ここで更新係数 μ は、CMA μ ープへの平均入力電力を P_{av} とすると、 $\mu = \alpha / P_{av}$ (α は定数) として決定されるので⁽³⁾、 α (= μP_{av}) によっ てそのフィードバックループの更新量の大きさが評価できる.ESCMAを基準 (α = 1.0) にしたBSCMAの α は3.74であり、1回当たりの更新量が3倍以上取れている.この ことについては次の内部雑音の影響についての検討でさらに詳しく述べる.

図5にBSCMAの500イタレーション後の放射パターンを示す(以後,放射パターンは 全て500イタレーション後の放射パターンとする). 図中, Initial PatternはMultibeam Formnerで形成されたマルチビームの内, 30°方向に主ビームを持つビームの放射パ ターンを示している. 図5より所望波の到来方向に主ビームが向けられ,干渉波の到来 方向に零点を持つ放射パターンが形成されている.



図5 収束後の放射パターン

3.2 内部雑音の影響

フィードバック処理をおこなうアダプティブアレーアンテナにおいては、受信信号 データを用いて、ウェイトが更新される.3.1で述べた更新量αは内部雑音が収束 特性および収束後の信与の変動に影響を及ばさないように決定されねばならない.こ こで、ESCMAの収束係数μを大きくして、両方式においてαを等しく(BSCMAでの 値に)した場合の内部雑音レベル(Noise level)と収束特性の関係を図6に示す.図6よ り、ESCMAでは収束を速めるためにステップサイズを大きくすると内部雑音の影響で 応答が不安定になるとが判る.同じαでBSCMAの収束特性が安定している理由は、 BSCMAでは一度受信信号をビーム合成してSN比を上げているため、内部雑音の影響 が軽減されるためと考えられる.また、図6(c)に示す様に内部雑音が0dBのレベルにな るとESCMAでは信号の応答が発散するが、BSCMAでは所望波と干渉波の分離が行わ れている.以上のようにBSCMAは内部雑音の影響を受け難いので到来信号の受信SN 比が劣化した場合にも安定した信号処理が行えるという効果が期待できる.





図 6 B S C M A と E S C M A の内部雑音の影響を等しくした場合 の各信号波の収束特性











図 6, BSCMAとESCMAの内部雑音の影響を等しくした場合 の各信号波の収束特性

3.3 干渉波が無い環坊下でのBSCMAの動作

干渉波が無い環境下でのBSCMAの動作について検討する.アダプティブ処理を行わ ず,単にマルチビームの中の最大電力を有するビームによって所望波を捕捉する場合 (の,ビームが交差する方向から所望波が到来すると,利得の低下が最も大きくなる.こ の様な状態でBSCMAを動作させた場合の放射パターンを図7に示す.



図7 干渉波がない状態でのBSCMAの放射パターン

図7より所望波到来方向の利得は、1.66dB上昇している.これは、BSCMAを動作させ ることにより複数のビームを重畳して所望波到来方向の利得を上昇させる処理が行わ れるためである.ここで、図7に示す0°と30°の方向の2ビームを選択した場合は3dB 相当の利得上昇が得られるが、ここでは前述のように閾値を-10dBとしてビーム選択を 行ったため、4ビームの重畳が行われ利得上昇が1.66dBになった.図8にのときの収束 特性を示す.ほぼ10回程度の少ない繰り返しで収束している.



図8 干渉波がない状態でのBSCMAの収束特性

以上のように、干渉波が無い環境下では、単にマルチビームを利用して通信を行う 場合にくらべてBSCMAを用いることにより利得の上昇が実現できる.

3. 4 所望波と干渉波の到来方向が近接している場合の特性

方向拘束付出力電力最小化法を指導原理とするビームスペースアダプティプアレー では,所望波と干渉波の到来方向が近接している場合に零点が形成出来ないという欠 点が文献(8)で指摘されていた.ここで,文献(8)で指摘された場合と同じアレー形状お よび到来波方向の条件でBSCMAの特性を検討する.表2にこのときの電波環境を示 す.また,シミュレーションに用いたアンテナは半波長間隔の4素子リニアアレーで,

	電力(dB)	到来方向 角*(deg)	遅延 (time slot)
所望波	0	0	0
干渉波1	-3	20	1.6
干涉波2	-3	45	2.6
内部雑音	-20		-

表2 シミュレーションに用いる電波環境

*:水平方向角(*θ*_x)を表す(垂直方向(*θ*_v)は0deg).

素子パターンは無指向性とした.

図9に収束後の放射パターンを、図10に3波の収束特性を示す.図9よりBSCMAで は、最も電力の大きい信号波の到来方向に主ビームが向けられ、他の2波の到来方向 には、若干の零深度の上昇は見られるが零点が形成されている.この理由については CMAと方向拘束付電力最小化法の動作原理の相違(CMAでは方向拘束付電力最小化法 のように特定の方向の受信電力を拘束ベクトルなどの形で定式的に拘束せずに、包絡

- 20 -



Ĩ

図 9 所望波と干渉波の到来方向が接近している場合のBSCMAの放 射パターン

図10 所望波と干渉波の到来方向が近接している場合のBSCMAの収束 特性

線を一定値にするようにウェイトが調整される),またCMAと方向拘束付電力最小化 法の不要波に対する前提条件の相違(所望波とのレベル差や所望波との相関性の相 違)が主要なものとして考えられる.

一方,図10に示される収束特性は例えば図4で示した場合に比べて遅くなっている. これは、このように到来波の方向が近接している場合には入力の相関行列の固有値が 分散する傾向にあり⁽³⁾,最急降下法の収束が遅くなったことに起因している.これを改 善するには非線形最適化のアルゴリズムを最急降下法からマルカート法に変えること などが必要である. 4 マルチビーム通信への適用

これまでは、所望波が1波のみの場合を考えてきた.ところで、近年、複数の相手 と同時に通信を行ういわゆるマルチビーム通信の必要性が高まっている.マルチビー ム通信においては高いビーム間アイソレーションが要求される.従来、低サイドロー プパターンの形成や使用周波数を若干変える等の方法によって所定のビーム間アイソ レーションが実現されていた.これらの方法では、信号の到来方向が逐次変 化する移動体通信などには対応が難しく、周波数の有効利用という点でも間題があっ た.ここでは、BSCMAによって同一周波数で、適応的にマルチビームのビーム問アイ ソレーションが高められることを示す.

ここでは、2方向から信号波1 (Signal1), 信号波2 (Signal2) が到来するものと して検討を進める.この信号波においては、同一の周波数で、PSKなどのCMAアルゴ リズムが適用できる包絡線が一定あるいは既知となる方式で変調が行われているもの とする. 図11にBSCMAを用いたマルチビームシステムの構成を示す. 図11の Multibeam Formerで形成されたビームの中で主ビーム方向が信号波1,信号波2の到来方 向に対応するビームをそれぞれビームBl, B2とする. 図11のCMA Loopl, CMALoop2 ではそれぞれビームBI, B2のみに初期値lを与え,残りを零としてCMAによる最適化 を実行する.CMAアルゴリズムは初期状態で最大電力を有する信号を所望信号として 捕捉し残りを干渉波として除去するので、CMAloopl、CMALoop2からは信号間の相互 干渉が除去されて信号波1,信与波2が出力される.で,BSCMAマルチビームシステム についてシミュレーション計算を行う.表3に示す電波環境で所望波が2波到来した場 合を想定する.今までの検討と同様に変調方式はQPSKとし,帯域制限の影響は考慮し ていない.ただし,信号波1と信号波2のデータ間には乱数を用いて相関を無くしてい る.図12にCMALooplとCMA Loop2における各信号波の収東特性を示す.図12から明 らかなように、CMA Looplにおいては、信号波Iが所望波として信号波2が干渉波とし て処理されていることが判る. これは, CMALooplでは信号波lを主ビーム近傍で受信 しているビームのみに初期ウェイトを与えているからである. 逆に, CMALoop2では

- 24 -

図11 BSCMAマルチビームシステムの構成

	電力(dB)	到来方向 角*(deg)
信号波1	0	20
信号波2	0	-45
内部雑音	-20	

表4.3 シミュレーションに用いる電波環境

*:水平方向角(*θ*_x)を表す(垂直方向(*θ*_v)は0deg).

同じ理由で信号波2が所望波として信号波1が干渉波として処理されている.

図13にCMALoop1, CMALoop2から出力される収束後の放射パターンを示す. CMALoop1から出力される放射パターンは信号波lの到来方向に主ビームが向き, 信号 波2の到来方向には零点が形成されている. また, CMALoop2から出力される放射パ ターンは信号波2の到来方向に主ビームが向き, 信号波lの到来方向には零点が形成さ れている.

以上よりこのBSCMAマルチビームシステムにおいては,同一周波数でアイソレー ションを高く保ちながら方向の変化する複数の信号が受信できることが判る.従っ て,このマルチビームシステムにおいては周波数を有効に利用することができる.ま た,このシステムはディジタル処理装置を追加するだけで受信信号の個数を増加させ る事ができ,小形,低価格の特長も有している.

(a) Convergence characteristics of CMA Loop1

図12 マルチビームBSCMAの収束特性

図13 マルチビームBSCMAの放射パターン

5 むすび

移動体衛星通信等に用いられる比較的素子数の多いアレーアンテナに適用するアダ プテイブアレーの方式として、マルチビームの出力の一部を選択してCMAループを形 成するビームスペースCMAアダプティプアレーアンテナ(BSCMA)を提案し、その 特性を数値シミュレーションによって検討した.

ビームスペースアダプテイブアレーには、到来波の個数に対応した自由度で効率良 く所望波の捕捉と干渉波の除去が行える利点があるが、BSCMAにはさらに次の特徴が あることが明らかになった.

[1]フィードバックされる信号のSN比が高いので,内部雑音の影響を受け難い.又, このために繰り返し演算のステップサイズが大きく取れるので,収束が速くなる.

[2]干渉波が無い環境下では、単にマルチビームを利用して通信を行う場合にくらべて利得の上昇が実現できる。

[3]所望波と干渉波の到来方向がビーム幅程度に接近している場合,方向拘束付き出 力電力最小化法では不可能であった干渉波の到来方向の零点形成ができる.

[4]複数の所望波を同一周波数,高アイソレーションで同時に受信するマルチビーム通信を可能にする.

以上,本レポートにおけるBSCMAの検討によって所望波の到来方向の情報を前提条 件としないビームスペースアダプティブアレーが移動通信を想定した干渉波除去に有 効であることを示した.

参考文献

 (1) Treichler J.R. and Agee B.G. : "A New Appoach to Multiputh Correction of Constant Modulus Signals", IEEE Trans. Acoust., Speech & Signal Process., ASSP-31, 2, pp.459-472 (April 1983).

(2) 大鐘武雄: "陸上移動体通信におけるCMAアダプィブアレーの選択性フェージ ング補償特性", 信学論(B-II), J73-B-II, 10, pp.489-497(1990-10).

(3)藤元美俊,菊間信良,稲垣直樹: "マルカート法を用いたCMAアダプティプアレーの多重波抑圧特性",信学論(B-II),J74-B-II, II, pp.599-607(1991-II).
(4)高原幸一,鷹尾和昭: "多重波抑圧用アダプティブアレイ",信学技報,CS87-

12 (1987) .

(5) 大滝幸夫, 中條渉, 上原清彦, 藤瀬雅行 "移動体衛星通信用DBFアンテナの試作", 信学技報, AP92-32 (1992).

(6) 大滝幸夫, 中條渉, 千葉勇, 藤瀬雅行: "マルチビームを用いた移動体衛星通信 用DBFアンテナにおける初期捕捉方式", 信学'92春大, B-39, (1992).

(7) 伊藤礼, 竹内紀雄, 大岡秀一, 溝渕哲史, 藤坂貴彦, 大橋由昌, 近藤倫正 "DBF アンテナの試作", 信学技報, SANE88-54 (1989).

(8) 富岡洋光, 鷹尾和昭: "DBFアンテナのアダプティブアレーへの応用", 信学技報, AP90-96 (1990).

(9) 内田堅二, 鷹尾和昭: "ビームスペース・パーシャリーアダプティブアレイに関 する検討", 信学技報, AP88-52 (1988).

(10) 千葉勇, 中條渉, 藤瀬雅行: "ビームスペースCMAアダプティブアレーアンテナ", 信学論(B-II), 信学論(B-II), (1994年3月掲載予定).

- 30 -