

4B-5 エスパアンテナを用いたビーム切り替え型アダプティブアレーに関する検討

森下 雅透¹ 山田 寛喜^{1,2} 太郎丸 真² 大平 孝² 山口 芳雄¹¹ 新潟大学工学部² ATR 波動工学研究所

1 まえがき

近年の無線通信分野では、携帯端末等の普及にとともに大容量通信や通信速度の高速化が望まれている。多重波環境において、所望波と通信品質の劣化を招く干渉波を、通信環境によって指向性を制御することにより空間的に分離する機能を持ったアダプティブアレーアンテナが注目されている。

エスパ (ESPAR : Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) アンテナは、中心に1本の入出力ポートとその近傍に配置された無給電素子から構成され、小型・低コスト・低消費電力を利点とする可変指向性アンテナである。エスパアンテナによる受信アダプティブアレーには、様々なものが提案されている。そのほとんどが、エスパアンテナの特徴である可変リアクタンス値を最適化し、所望の指向性を実現すると言うアナログRF的なアプローチである [1]。この手法では最適リアクタンス値の探索が困難であり収束が遅く、可変パラメータが寄生素子数分のリアクタンス値 (純虚数) であるため、同形の DBF アレー (可変パラメータは素子数分の複素数) に比べ、干渉波抑圧性能が劣るという問題点がある。

本稿では、その問題点を解決する一手法として、エスパアンテナにおいて形成したビームを高速回転 (寄生素子数分のオーバーサンプリング) して得られる受信データをデジタル処理する、ビーム切り替え型のアダプティブ信号処理を提案し、提案手法により、従来の DBF アレー相当の干渉波抑圧性能が実現されることを示す。

2 ビーム切り替え型アダプティブアレー

ビーム切り替え型アダプティブアレーのコンセプトは、素子切り替え型アダプティブアレー (switched parasitic adaptive array) [2] を拡張したものと考えることが出来る。シンボルレートの N 倍のオーバーサンプリングでスイッチングした素子切り替え型円アレー (図1では $N=6$) において ϕ 方向から d 個の入射波が到来している環境を考える。各々が第 l 素子 ($l=1, \dots, L$) に ϕ_k 方向 ($k=1, \dots, d$) から複素振幅 $s_k(m)$ で到来する場合、受信データベクトル $r(m)$ は、

$$\begin{aligned} r(m) &= [r_1(m), r_2(m), \dots, r_N(m)]^T \\ &= g_o \sum_{k=1}^d a(\phi_k) s_k(m) + n(m) \end{aligned} \quad (1)$$

の形で与えられる。ここでは水平面内無指向性 (利得 g_o) の素子を仮定している。 $n(m)$ は雑音ベクトルである。 r は転置を表す。また、 $a(\phi_k)$ は入射波の到来方向を示すステアリングベクトルであり、次式のように定義される。

$$\begin{aligned} a(\phi_k) &= [e^{j\alpha_1}, e^{j\alpha_2}, \dots, e^{j\alpha_N}]^T \\ \alpha_j &= \frac{2\pi}{\lambda} r_o \sin \theta \cos \{ \phi_k - \frac{2\pi}{N} (j-1) \} \end{aligned}$$

r_o は中心からの半径である。同一素子で構成された場合、モードベクトルは、素子位置と到来方向により決定される。

提案するビーム切り替え型アダプティブアレーは、エスパアンテナを用いたものである。中心に給電素子を設けた $N+1$ 素子エスパアンテナ (図2) において、あるリアクタンスセットにより形成されるビームを N 倍のオーバーサンプリングで切り替えた場合、その受信データベクトル $r(m)$ は、

$$r(m) = \sum_{k=1}^d g(\phi_k) s_k(m) + n(m) \quad (2)$$

$$g(\phi_k) = g_o(\phi_k - \frac{2\pi}{N} (j-1)) \quad (3)$$

$g_o(\phi_k)$: エスパアンテナで形成したビームパターン (図2)

で与えられる。 $g(\phi_k)$ は回転ビームにより形成されるモードベクトルであり、式 (3) に示すように、その j 番目の要素は、ビームの形状を $g_o(\phi)$ として、 $g_o(\phi_k) = g_o(\phi_k - 2\pi(j-1)/N)$ で表される。ペンシルビームのような単峰性の指向性を回転させた場合、 $g(\phi_k)$ は異なる ϕ_k で互いに独立となり、このデータに対しデジタルアダプティブ制御を施すことにより、式 (1) と同等の自由度が実現可能となる。

この検討では、次節に示す MMSE 規範に基づくアダプティブアレーである LMS アダプティブアレーに関して検討する。

3 最適化手法

MMSE (Minimum Mean Square Error) は参照信号と受信信号との差 (誤差信号) を最小にすることによって最適なウェイトを決定するシステムである。最小化の対象となる誤差信号 $e(m)$ は、参照信号 $y(m)$ と受信信号 $r(m)$ との差で表され、次式で与えられる。

$$e(m) = y(m) - r(m) = y(m) - w^H r(m) \quad (4)$$

$r(m)$ は受信信号ベクトルであり、 U は複素共役転置である。ウェイトベクトル w を適切に選ぶことによって平均2乗誤差 $E[|e(m)|^2]$ は最小になる。2乗誤差を最小とする代表的な最適化手法である LMS のウェイトベクトルの更新式は、

$$w(m+1) = w(m) + \mu r(m)e^*(m) \quad (5)$$

と表される。 μ はステップサイズでウェイト更新の割合を調節する。

4 計算機シミュレーション

ここでは2節の定式化に基づき、 $N = 6$ とした円アレー (図1, 半径 $\lambda/2$) および $6 + 1$ 素子円形エスパアンテナ (図2, 半径 $\lambda/4$), それぞれによる素子切り替え, ビーム切り替えアダプティブアレーの計算機シミュレーション結果を示す。アレー素子は半波長ダイポールとし, エスパアンテナのビーム形状は表1に示すリアクタンス値を用いた。図3が, 到来波を所望波1波, 干渉波5波とした場合の (等価) 指向性パターンの収束結果であり, その時の2乗誤差の期待値の変化の様子を図4に示す。ここでは, 素子切り替えアレーにおいて $SNR=20$ dB, $SIR=0$ dB (干渉波電力は全て同一) となる伝搬環境で評価した。図3の太矢印, 細矢印はそれぞれ所望波と干渉波の到来方向を表す。この結果より, エスパアンテナによるビーム切り替えアダプティブアレーが, 素子切り替えアダプティブアレーと同等の性能を有しており, 5波の干渉波除去が実現されることが分かる。

表1 リアクタンスセット

j	#1	#2	#3	#4	#5	#6
1	L	H	H	H	H	H
2	H	L	H	H	H	H
3	H	H	L	H	H	H
4	H	H	H	L	H	H
5	H	H	H	H	L	H
6	H	H	H	H	H	L

H:High = $-4.8[\Omega]$ L:Low = $-90.0[\Omega]$

5 まとめ

エスパアンテナを用いたビーム切り替え型アダプティブアレーを提案し, 数値計算により, その有効性を確認した。本稿の結果より, さらに高速な最適化手法である SMI や RLS の適用も可能であると考えられる。一般にオーバーサンプリングを行なう切り替え型のアダプティブアレーでは, 隣接チャンネルの干渉が問題となる [3]。また, ビーム切り替え方式では最適なビーム形状の選択も問題となる。それらの検討が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は NICT からの委託研究によるものである。

参考文献

- [1] 大平, 飯草, “電子走査導波器アレーアンテナ”, 信学論 C, vol.J87-C, no.1, pp.12-31, 2004年1月.
- [2] J.D.Fredrick, et. al., IEEE Trans. Antennas and Propagat, vol.52, no.1, pp.106-114, Jan. 2004.
- [3] 太郎丸, 大平, 相野, “高速アンテナ切り換えによる単一受信回路を用いたダイバーシチ受信と適応指向性制御に関する一検討,” 信学技報, RCS, Oct. 2005. (発表予定)

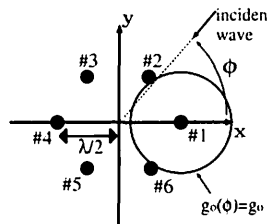


図1 6素子円アレー

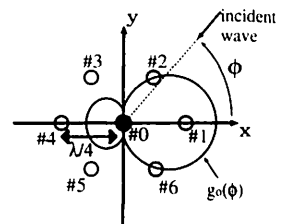


図2 7素子エスパ

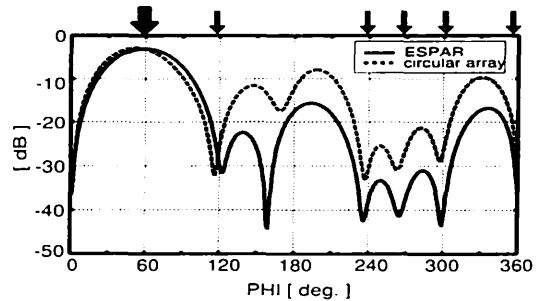


図3 LMSによる指向性パターン

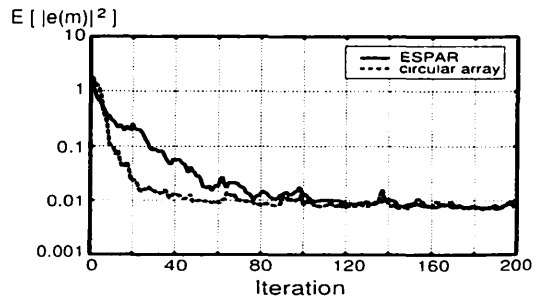


図4 収束の様子