Genetic Algorithm を用いたアレイアンテナの給電系の簡略化

Simplification of Feed System of the Array Antenna using Genetic Algorithm

正会員 大久保 茂[†]

Shigeru Okubo[†]

Abstract An array antenna, which has a large number of radiating element, is divided into subarrays. The current distribution of the antenna is approximated as a Taylor distribution using the genetic algorithm to combine subarrays having the same current distribution. Doing this simplifies the feed systems. By considering the array antenna as an aggregate of subarrays, designs, production, inspection, and maintenance are simplified, which in turn reduces costs.

キーワード: Genetic Algorithm, アレイアンテナ, サブアレイ, 波源分布, 遠方界指向性

1. ま え が き

無線通信において所望の放射指向性, ビーム幅, サイドロープレベル, 指向性の零点の位置, 利得等の制御は, アレイアンテナの指向性合成を行うことにより容易に実現できる. また, メインビームを立体的に動かすビーム走査では, 電子的に給電波源を変化させることにより可能となるが, 機械的に行う方法もある. しかし, 走査速度, 操作性および機能性を考慮すると, 電子的に走査するのが一般的である¹⁾²⁾.

アレイアンテナでは, 多数の放射素子を配列するため自由度も高く, 配列方法も1次元から3次元まであらゆる配列が可能である. それで, 所望の指向性や利得等が得られ易い反面, 制御対象が多く存在し複雑化する. そのため, アレイアンテナはサブアレイの集合体として取り扱うことができ, アンテナ素子の振幅係数を A とし, それが属するサブアレイの振幅係数を W とすると, 最終的にはそのアンテナ素子には $A \times W$ の値が給電されることになる. また, サブアレイ化することにより自由度は減少するが, 設計, 製作, 検査および保守が簡単になり, コストの軽減が図ることができる.

パラメータが多い問題において, 比較的短時間で最適解に近い実用解を得られる方法に遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以後 GA) がある. これは John. H. Holland により 1975 年に導入された, 解の探索と最適化

の有力な学習アルゴリズムであり, 選択・淘汰・交叉・突然変異などによる生物進化の原理を用いているのが特徴である. その枠組みは適用分野にあまり依存せず, 汎用的な最適化アルゴリズムであることや, 厳密な最適解を求められない問題においては, 従来のアルゴリズムに比べて非常に短時間で実用解を得られることなどから, 応用研究が盛んに行われている. GA は従来の探索手法では困難な問題, 特に制約付き組合せ問題において効果的に解の探索を行うことができる手法である.

本論文では, リニアアレイアンテナをサブアレイ化し, サブアレイを構成するアンテナ素子数をパラメータとして, 同一の波源値分布のサブアレイを組合せることにより, アレイアンテナの波源分布がテラー分布になるよう GA を用いてサブアレイへの給電振幅を求める給電方法の簡略化が図られることを示している.

2. アレイアンテナの構成

本論文で用いるアレイアンテナの概略の一例を図1に示す. サブアレイ7個でメインアレイを構成し, そのサブアレイは5本のアンテナ素子で構成されている. このメインアレイを左右対称に配置し, 計70本のアンテナ素子を用いている. また, アンテナ素子はすべて無指向性であり, 間隔は半波長になるよう等間隔に配置されている. ここで, サブアレイに与える係数をウェイト: W とし, サブアレイ内の各アンテナ素子に給電される波源の値を波源値: A とすると, メインアレイの各アンテナ素子の最終的な波源は, $A \times W$ で与えられる³⁾.

理想的な波源分布としては, 遠方界指向性のサイドロープレベルが -30 dB 以下になるテラー分布を用いて,

2000年11月10日受付, 2000年9月12日最終受付, 2000年10月13日採録

[†] 福井工業高等専門学校

(〒916-8507 鯖江市下司町, TEL 0778-62-1111)

[†] Fukui National College of Technology

(Geshi-cho, Sabae-shi, Fukui 916-8507, Japan)

図 1 アレイアンテナの概略図
Array antenna.

図 2 理想的な波源分布(テーラー分布)
Ideal current distribution (Taylor distribution).

図 3 理想的な遠方界指向性
Ideal far field pattern.

サブアレイの中心にあたる素子(図1中では、E3、E8、
…、E33)の最終的な波源： $A \times W$ を真値とし、さらにそ
の値をサブアレイのウェイト(W)とする。よって中心の
素子の波源値： A は1となる。

このようにしてサブアレイ内の中心素子以外の素子の波
源値： A をGAにより算出し、同一のサブアレイの波源
値分布とウェイト： W でテーラー分布の波源分布を近似
する。上述のことで、各サブアレイのウェイトはそれ
ぞれ異なるが、各サブアレイの波源値分布がすべて同一な
ので、給電系の簡略化が図られる。

アンテナ素子ごとに異なる波源を供給するのではなく、
サブアレイごとに同一の波源値分布を実現するメリットと
して、

- ・給電波源の制御が簡単になる
- ・保守や検査の簡略化が図れる
- ・同一の部品が使える

などがあげられる。

また本論文では、サブアレイのアンテナ素子数を7本、
5本および3本としたときにおいて、サブアレイに与える
波源値分布を1～3種類用いてテーラー分布に近づける場
合について検討している。

図2は、理想的な波源分布(テーラー分布)であり、横軸
はアンテナ素子の位置番号、縦軸は振幅を表している。図
3は、そのときの遠方界指向性および座標系を示している。

3. Genetic Algorithm

Genetic Algorithm は、設計問題、スケジューリング問
題、組合せ最適化問題などの大域的最適解を求めることが

比較的容易にでき、作業の高効率化を図ることが可能な手
法である。

このGAは、これまで知られている最適化手法とくら
べ、以下の点で大きく異なる特徴を有している⁴⁾⁵⁾。

- ① 解の検索には、変数を2進数などにコード化した遺
伝子および染色体を用いる。
- ② 設計空間内の1点からの探索ではなく、多数の点か
らの同時検索を行う。
- ③ 解の評価には評価関数値のみを用い、その微分値は
用いない。
- ④ 確定的ではなく、確率的方法である。

以上からGAは、与えられた問題が数理的に明確に記
述できないものであっても解くことができ、また多数の点
での同時検索法であるので、多峰性の強い問題(組合せ最
適化問題など)であっても、最適解とそれに近い解候補を
いくつか見出すことができる。

なお、本論文で用いたGAの流れ図を図4に示し、各
操作について下記に説明する。図中の各Stepに対応する
操作について文末にStep A～Step Iで表示する。

・遺伝子(Gene)はサブアレイのアンテナ素子の給電波
源値： A とし、8ビットの2進数で表示する。これによ
り、最大で $1 \pm 2^8/1000$ の範囲の波源値を表現できる。

〔例〕 遺伝子： $A : (01011101)_2 = (93)_{10}$ $93/1000 = 0.093$
この遺伝子で表現できる波源値 $1 \pm 0.093 = 0.907, 1.093$
である。(Step A)

・染色体(Chromosome)は(サブアレイ内のアンテナ素
子数-1)個の波源値： A を連続して並べて構成する。例
えば、アンテナ素子3本のサブアレイで1種類の波源値分

図 4 Genetic Algorithm の流れ図
Flow chart of Genetic Algorithm.

表 1 8 個の染色体とコスト

A list of 8 random chromosomes and their associated costs.

No	Chromosome	Cost
1	1111111100000000	0.18
2	1011011110101010	0.12
3	1111000011001100	0.16
4	1111111110001000	0.13
5	1100110011001100	1.25
6	1010101000100010	0.15
7	1010101010101010	0.17
8	1010101010101011	0.65

表 2 波源分布の種類とアンテナ素子数による固体群の大きさ

Size of population by group of current distributions and number of antenna elements.

サブアレイの素子数	1 種類の波源分布	2 種類の波源分布	3 種類の波源分布
アンテナ素子 3 本	$(8, 8 \times 2) \times 1$	$(8, 8 \times 2) \times 2$	$(8, 8 \times 2) \times 3$
アンテナ素子 5 本	$(8, 8 \times 4) \times 1$	$(8, 8 \times 4) \times 2$	$(8, 8 \times 4) \times 3$
アンテナ素子 7 本	$(8, 8 \times 6) \times 1$	$(8, 8 \times 6) \times 2$	$(8, 8 \times 6) \times 3$

布の場合、中央のアンテナ素子の波源値： $A_2=1$ にするため残り 2 本のアンテナ素子の波源値で染色体を構成する。染色体あたり 2 個の遺伝子を連続して

〔例〕 染色体： (1111100101100010)

$A_1 \quad A_3$

のように並べ (8×2) ビットで表す(表 1)。(Step ③)

・個体群(Population)の大きさはサブアレイの波源分布 1 種類あたり 8 個の染色体で構成するので、サブアレイの波源値分布の種類が n で、アンテナ素子数が m の時、 $(8, 8 \text{ ビット} \times (m-1)) \times n$ となる(表 2 参照)。

・評価関数(Cost)はテラー分布の波源分布との GA で求めた波源分布との偏差とし、各染色体に対して計算する。その一例として、サブアレイ数 12 個、サブアレイ内のアンテナ素子が 3 本で 1 種類の波源値分布の場合は各染色体の Cost は次のようになる。

表 3 染色体の序列と選択
Chromosomes are ranked and selected.

No	Chromosome	Cost	Keep half
2	1011011110101010	0.12	Keep
4	1111111110001000	0.13	Keep
6	1010101000100010	0.15	Keep
3	1111000011001100	0.16	Keep
7	1010101010101010	0.17	Discard
1	1111111100000000	0.18	Discard
8	1010101010101011	0.65	Discard
5	1100110011001100	1.25	Discard

表 4 固体群の再構築
Reconstruction of population.

No	Chromosome	Cost
2	1011011110101010	0.12
4	1111111110001000	0.13
6	1010101000100010	0.15
3	1111000011001100	0.16
9	1011011110001000	—
10	1111111110101010	—
11	1010101011001100	—
12	1111000000100010	—

$$\text{評価関数} = \sum_{m=1}^{12} \sum_{n=1}^3 (W_m A_n - T_i)^2 \quad (1)$$

ただし、 W_m は m 番目のサブアレイのウェイト、 A_n はサブアレイ内の n 番目の GA で求めた波源値、 i は $3 \times (m-1) + n$ 、 T_i はテラー分布の各素子での波源を示す(表 1)。(Step ③)

・評価関数の数値(Cost)の小さい順に個体群の各染色体をランク付けする(表 3)。(Step ④)

・下位 4 個を劣性染色体として排除する(表 3)。(Step ⑤)

・残った上位 4 個の優性染色体から、染色体の組替えを行う。この染色体の組替えは、GA を最も特徴づける過程で、優性染色体である親世代の染色体同士がお互い染色体の一部を交換して、新しい子世代の染色体を作製し、元の大きさの個体群を再構築する。表 3 の No. 2 と No. 4 の染色体を親として子の染色体 No. 9 と No. 10 を下記のように作製する。同様に、No. 6 と No. 3 の染色体から子の染色体 No. 11 と No. 12 を作製して表 4 のように元の大きさの個体群を再構築する。(Step ⑥)

〔例〕 親 #1(染色体 No. 2) 1011011110101010

親 #2(染色体 No. 4) 1111111110001000

↓

子 #1(染色体 No. 9) 1011011110001000

子 #2(染色体 No. 10) 1111111110101010

・終了判定の条件(5000 回)を満たしていれば計算を終

表 5 Genetic Algorithm で求めた 30 dB テーラー分布の波源値(サブアレイが 7 本のアンテナ素子で構成される場合)
Calculated element weights for a 30 dB Taylor amplitude taper by GA. (Subarray having 7 antenna elements)

Subarray No.	Element No.	Subarray Weight	Exact Element Amplitude		Approximation With All Identical Subarrays [1 to 5]		Approximation with 2 Groups of Identical Subarrays [1, 2, 3 & 4, 5]		Approximation with 3 Groups of Identical Subarrays [1, 2, 3 & 4 & 5]	
			Element	Result	Element	Result	Element	Result	Element	Result
1	1	0.2920	0.9120	0.2663	0.872	0.2546	0.848	0.2476	0.873	0.2549
	2		0.9280	0.2715	0.936	0.2733	0.872	0.2546	0.905	0.2643
	3		0.9592	0.2801	0.972	0.2838	0.949	0.2770	0.949	0.2771
	4		1	0.2920	1	0.2920	1	0.2920	1	0.2920
	5		1.0517	0.3071	1.028	0.3002	1.064	0.3107	1.053	0.3075
	6		1.1137	0.3252	1.064	0.3107	1.112	0.3247	1.101	0.3215
	7		1.1853	0.3461	1.063	0.3104	1.192	0.3481	1.159	0.3384
2	8	0.4530	0.8159	0.3701	0.872	0.3950	0.848	0.3841	0.873	0.3955
	9		0.8728	0.3954	0.936	0.4240	0.872	0.3950	0.905	0.4100
	10		0.9344	0.4233	0.972	0.4403	0.949	0.4299	0.949	0.4299
	11		1	0.4531	1	0.4530	1	0.4530	1	0.4530
	12		1.0689	0.4842	1.028	0.4657	1.064	0.4820	1.053	0.4770
	13		1.1402	0.5165	1.064	0.4820	1.112	0.5037	1.101	0.4988
	14		1.2132	0.5496	1.063	0.4815	1.192	0.5400	1.159	0.5250
3	15	0.6841	0.8527	0.5833	0.872	0.5966	0.848	0.5802	0.873	0.5973
	16		0.9021	0.6171	0.936	0.6404	0.872	0.5966	0.905	0.6192
	17		0.9513	0.6508	0.972	0.6650	0.949	0.6493	0.949	0.6493
	18		1	0.6841	1	0.6841	1	0.6841	1	0.6841
	19		1.0477	0.7167	1.028	0.7033	1.064	0.7279	1.053	0.7204
	20		1.0940	0.7484	1.064	0.7279	1.112	0.7608	1.101	0.7532
	21		1.1384	0.7788	1.063	0.7272	1.192	0.8155	1.159	0.7929
4	22	0.8844	0.9134	0.8078	0.872	0.7712	0.936	0.8278	0.912	0.8066
	23		0.9443	0.8351	0.936	0.8278	0.965	0.8535	0.936	0.8278
	24		0.9732	0.8607	0.972	0.8597	0.984	0.8703	0.972	0.8597
	25		1	0.8844	1	0.8844	1	0.8844	1	0.8844
	26		1.0245	0.9061	1.028	0.9092	1.016	0.8986	1.023	0.9048
	27		1.0466	0.9256	1.064	0.9410	1.023	0.9048	1.048	0.9269
	28		1.0661	0.9429	1.063	0.9401	1.036	0.9163	1.063	0.9401
5	29	0.9895	0.9682	0.9581	0.872	0.8629	0.936	0.9626	0.968	0.9579
	30		0.9811	0.9708	0.936	0.9262	0.965	0.9549	0.980	0.9697
	31		0.9917	0.9813	0.972	0.9618	0.984	0.9737	0.992	0.9816
	32		1	0.9895	1	0.9895	1	0.9895	1	0.9895
	33		1.0060	0.9954	1.028	1.0172	1.016	1.0054	1.006	0.9955
	34		1.0095	0.9989	1.064	1.0528	1.023	1.0123	1.010	0.9994
	35		1.0106	1.0000	1.063	1.0519	1.036	1.0251	1.016	1.0054
GA による Exact Amplitude との偏差						0.0329	0.0075	0.0027		
逐次探索法による Exact Amplitude との偏差						0.0412	0.0096	0.0039		

了する。これは、計算時間が 10 分程度、3000 回くらいで収束するが、余裕をもって 5000 回としている。ランクの最上位の染色体よりアンテナ素子の給電波源値を求める。(Step ㉔)

・終了判定条件を満たしていなければ突然変異を発生(発生率:0.25%)させ、計算を繰返すことになる。この突然変異は、1 つの染色体において単独で生ずる過程で、任意に選ばれた染色体の任意の符号を強制的に反転させることにより、突然変異を発生させている。

〔例〕 染色体:1111111111001100 → 1111111111001110

この突然変異を発生させることにより、ある程度の評価を持つ解の集団(極値)に収束していた染色体を、より良い解の集団の染色体へ受け継ぐことができるが、突然変異の発生率を大きくし過ぎると、最適解を持つ解の集団に収束

しなくなってしまうため、本論文では 1 回のループで 1 ヶ所(0.25%の発生率)発生させている。(Step ㉕)

35 本の各アンテナ素子にテーラー分布の波源値を正確に給電するには、波源値は 35 種類の数値が必要である。8 ビットで波源値を表現した場合には、1 個の波源値は $2^8=256$ 通りあるが、サブアレイのアンテナ素子数が 5 本で 1 種類の波源値分布にした場合では、 $256^4(4.295 \times 10^9)$ 通りの組合せが存在する。しかし、GA を用いると 3000 回程度の計算回数で収束するので、短時間で解を見出すことができる。

4. 計算結果

4.1 サブアレイをアンテナ素子 7 本で構成する場合

サブアレイを構成するアンテナ素子の数を 7 本にし、そ

のサブアレイを5個にしたものをアレイアンテナとして用いる。また、GAによって、サブアレイに給電する1~3種類の波源値分布を求めた結果と真値(テーラー分布)との偏差は表5で与えられる。さらに、最下段にそれぞれ同じ条件で逐次探索法で計算したテーラー分布の波源分布との偏差を示している。どの場合もGAによる偏差が小さくなっており、この種の問題にはGAを用いた方が有効であることを表している。

サブアレイを1種類の波源値分布を用いてテーラー分布に近似した場合の、波源分布と遠方界指向性のグラフが図5である。これ以降は、波源分布の実線はテーラー分布の理論値を示し、波源分布の+印と遠方界指向性の実線はGAによって求めた計算値を示す。真値との偏差が0.0329と一番大きくなっているため、サイドローブも設計値である-30 dBを約1 dB 超えており、 $90^\circ \pm 15^\circ$ の付近にグレーティングローブが発生している。

図6は、サブアレイの波源分布を2種類の波源値分布[1,2,3], [4,5]のサブアレイを用いた場合の計算結果で

ある。ただし、[]の中の数字はサブアレイの番号を表し、それらのサブアレイは同一の波源値分布を有するものとする。1種類にしたものと比較すると、真値との偏差が0.0075と約1/4にまで向上し、遠方界指向性もなだらかな包絡線を描くようになった。 $90^\circ \pm 40^\circ$ と $90^\circ \pm 60^\circ$ の付近からテーラー分布の遠方界指向性より若干大きいグレーティングローブが生じている。

図7は、3種類の波源値分布[1,2,3], [4], [5]のサブアレイを用いた場合の計算結果である。真値との偏差は0.0027と小さくなっているが、2種類の波源値分布にした場合と比較すると、遠方界指向性はほとんど変わらない。

サブアレイ内のアンテナ素子を7本で構成し、波源値分布を2種類、3種類と種類分けするにしたがって、遠方界指向性もなだらかな包絡線を描くようになるが、全体的に見ると $90^\circ \pm 40^\circ$ と $90^\circ \pm 60^\circ$ の付近からテーラー分布の遠方界指向性より若干大きいグレーティングローブが生じている。

評価関数は各サブアレイの素子の波源分布とテーラー分

(a) 波源分布

(b) 遠方界指向性

図5 アンテナ素子7本で構成されたサブアレイを用いてすべて同一の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with all identical subarrays having 7 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

(a) 波源分布

(b) 遠方界指向性

図6 アンテナ素子7本で構成されたサブアレイを用いて2種類の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with 2 groups of identical subarrays having 7 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

図 7 アンテナ素子 7 本で構成されたサブアレイを用いて 3 種類の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with 3 groups of identical subarrays having 7 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

表 6 Genetic Algorithm で求めた 30 dB テーラー分布の波源値(サブアレイが 5 本のアンテナ素子で構成される場合)
Calculated element weights for a 30 dB Taylor amplitude taper by GA. (Subarray having 5 antenna elements)

Subarray No.	Element No.	Subarray Weight	Exact Element Amplitude		Approximation With All Identical Subarrays [1 to 7]		Approximation with 2 Groups of Identical Subarrays [1, 2, 3, 4 & 5, 6, 7]		Approximation with 3 Groups of Identical Subarrays [1, 4, 5 & 2, 3 & 6, 7]		
			Element	Result	Element	Result	Element	Result	Element	Result	
1	1	0.2801	0.9507	0.2663	0.940	0.2633	0.896	0.2510	0.929	0.2602	
	2		0.9693	0.2715	0.954	0.2672	0.947	0.2653	0.963	0.2695	
	3		1	0.2801	1	0.2801	1	0.2801	1	0.2801	
	4		1.0425	0.2920	1.032	0.2891	1.055	0.2955	1.040	0.2913	
	5		1.0964	0.3071	1.045	0.2927	1.128	0.3160	1.083	0.3033	
2	6	0.3701	0.8787	0.3252	0.940	0.3479	0.896	0.3311	0.877	0.3246	
	7		0.9352	0.3461	0.954	0.3531	0.947	0.3500	0.935	0.3460	
	8		1	0.3701	1	0.3701	1	0.3696	1	0.3701	
	9		1.0684	0.3954	1.032	0.3819	1.055	0.3899	1.065	0.3942	
	10		1.1437	0.4233	1.045	0.3868	1.128	0.4169	1.136	0.4204	
3	11	0.5165	0.8773	0.4531	0.940	0.4855	0.896	0.4628	0.877	0.4529	
	12		0.9375	0.4842	0.954	0.4927	0.947	0.4891	0.935	0.4831	
	13		1	0.5165	1	0.5165	1	0.5165	1	0.5165	
	14		1.0641	0.5496	1.032	0.5330	1.055	0.5449	1.065	0.5501	
	15		1.1293	0.5833	1.045	0.5397	1.128	0.5826	1.136	0.5867	
4	16	0.6841	0.9021	0.6171	0.940	0.6431	0.896	0.6130	0.929	0.6355	
	17		0.9513	0.6508	0.954	0.6526	0.947	0.6479	0.963	0.6587	
	18		1	0.6841	1	0.6841	1	0.6841	1	0.6841	
	19		1.0477	0.7167	1.032	0.7060	1.055	0.7218	1.040	0.7115	
	20		1.0940	0.7484	1.045	0.7149	1.128	0.7717	1.083	0.7408	
5	21	0.8351	0.9326	0.7788	0.940	0.7850	0.962	0.8034	0.929	0.7758	
	22		0.9673	0.8078	0.954	0.7967	0.985	0.8226	0.963	0.8042	
	23		1	0.8351	1	0.8351	1	0.8351	1	0.8351	
	24		1.0307	0.8607	1.032	0.8618	1.016	0.8485	1.040	0.8685	
	25		1.0590	0.8844	1.045	0.8727	1.027	0.8577	1.083	0.9044	
6	26	0.9429	0.9610	0.9061	0.940	0.8863	0.962	0.9071	0.973	0.9174	
	27		0.9817	0.9256	0.954	0.8995	0.985	0.9288	0.988	0.9316	
	28		1	0.9429	1	0.9429	1	0.9429	1	0.9429	
	29		1.0161	0.9581	1.032	0.9731	1.016	0.9580	1.010	0.9523	
	30		1.0296	0.9708	1.045	0.9853	1.027	0.9684	1.017	0.9589	
7	31	0.9954	0.9858	0.9813	0.940	0.9357	0.962	0.9575	0.973	0.9685	
	32		0.9941	0.9895	0.954	0.9496	0.985	0.9804	0.988	0.9834	
	33		1	0.9954	1	0.9954	1	0.9954	1	0.9954	
	34		1.0035	0.9989	1.032	1.0273	1.016	1.0113	1.010	1.0054	
	35		1.0046	1.0000	1.045	1.0402	1.027	1.0222	1.017	1.0123	
GA による Exact Amplitude との偏差						0.0146		0.0042		0.0018	

布の偏差を用いているが、同じ条件で評価関数をテーラー分布の遠方界指向性との偏差(1° おき)とした場合、波源分布との偏差を評価関数とした場合の約 6 倍の計算時間を要した。また、遠方界指向性は図 5 と比べメインローブおよびファーストサイドローブレベルはほとんど変化が見られないが、グレーティングローブレベルは $90^\circ \pm 15^\circ$ 付近で 1~2 dB 低くなった程度で、顕著な遠方界指向性の改善が見られなかったため、計算の効率化を図るために評価関数は波源分布との偏差とする方が有効であると判断した。

4.2 サブアレイをアンテナ素子 5 本で構成する場合

サブアレイを構成するアンテナ素子の数を 5 本に変更し、そのサブアレイを 7 個組合せてアレイアンテナとして用いる。その結果と真値との偏差を表 6 に示す。

サブアレイを 1 種類の波源値分布を用いてテーラー分布

に近似した場合の結果が図 8 である。真値との偏差が 0.0146 となっているが、 $90^\circ \pm 60^\circ$ の付近でグレーティングローブが発生している。

図 9 は、2 種類の波源値分布 [1,2,3,4], [5,6,7] のサブアレイを用いた場合の結果である、1 種類の波源値分布にしたものと比較すると、真値との偏差が 0.0042 と約 1/3 にまで向上した。さらに遠方界指向性もグレーティングローブの影響がかなり減り、なだらかな包絡線を描いている。

図 10 は、3 種類の波源値分布 [1,4,5], [2,3], [6,7] のサブアレイを用いた場合の計算結果である。真値との偏差は 0.0018 と小さくなっており、真値であるテーラー分布の遠方界指向性とほぼ一致している。組合せを考えると、[1,2,3], [4,5], [6,7] の順にした方が良いように推測されるが、実際には良い結果が得られなかった。これは

図 8 アンテナ素子 5 本で構成されたサブアレイを用いてすべて同一の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with all identical subarrays having 5 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

図 9 アンテナ素子 5 本で構成されたサブアレイを用いて 2 種類の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with 2 groups of identical subarrays having 5 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

図 10 アンテナ素子 5 本で構成されたサブアレイを用いて 3 種類の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with 3 groups of identical subarrays having 5 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

表 7 Genetic Algorithm で求めた 30 dB テーラー分布の波源値(サブアレイが 3 本のアンテナ素子で構成される場合)
Calculated element weights for a 30 dB Taylor amplitude taper by GA. (Subarray having 3 antenna elements)

Subarray No.	Element No.	Subarray Weight	Exact Element Amplitude		Approximation With All Identical Subarrays [1 to 12]		Approximation with 2 Groups of Identical Subarrays [1 to 9 & 10 to 12]		Approximation with 3 Groups of Identical Subarrays [1 to 8 & 9, 10 & 11, 12]	
			Element	Result	Element	Result	Element	Result	Element	Result
1	1	0.2711	0.9819	0.2662	0.977	0.2649	0.961	0.2606	0.952	0.2581
	2		1	0.2711	1	0.2711	1	0.2711	1	0.2711
	3		1.0302	0.2793	1.025	0.2779	1.031	0.2795	1.047	0.2839
2	4	0.3048	0.9531	0.2905	0.977	0.2978	0.961	0.2929	0.952	0.2902
	5		1	0.3048	1	0.3048	1	0.3048	1	0.3048
	6		1.0561	0.3219	1.025	0.3124	1.031	0.3142	1.047	0.3191
3	7	0.3641	0.9388	0.3418	0.977	0.3557	0.961	0.3499	0.952	0.3466
	8		1	0.3641	1	0.3641	1	0.3641	1	0.3641
	9		1.0676	0.3887	1.025	0.3732	1.031	0.3754	1.047	0.3812
4	10	0.4438	0.9360	0.4151	0.977	0.4336	0.961	0.4265	0.952	0.4225
	11		1	0.4438	1	0.4438	1	0.4438	1	0.4438
	12		1.0671	0.4736	1.025	0.4549	1.031	0.4575	1.047	0.4646
5	13	0.5367	0.9404	0.5047	0.977	0.5243	0.961	0.5157	0.952	0.5109
	14		1	0.5367	1	0.5367	1	0.5367	1	0.5367
	15		1.0606	0.5692	1.025	0.5501	1.031	0.5533	1.047	0.5619
6	16	0.635	0.9482	0.6021	0.977	0.6204	0.961	0.6102	0.952	0.6045
	17		1	0.6350	1	0.6350	1	0.6350	1	0.6350
	18		1.0513	0.6676	1.025	0.6508	1.031	0.6546	1.047	0.6648
7	19	0.7309	0.9572	0.6996	0.977	0.7141	0.961	0.7024	0.952	0.6958
	20		1	0.7309	1	0.7309	1	0.7309	1	0.7309
	21		1.0415	0.7612	1.025	0.7492	1.031	0.7536	1.047	0.7653
8	22	0.8178	0.9663	0.7902	0.977	0.7990	0.961	0.7859	0.952	0.7786
	23		1	0.8178	1	0.8178	1	0.8178	1	0.8178
	24		1.0319	0.8439	1.025	0.8383	1.031	0.8432	1.047	0.8563
9	25	0.8906	0.9748	0.8682	0.977	0.8072	0.961	0.8559	0.979	0.8719
	26		1	0.8906	1	0.8906	1	0.8906	1	0.8906
	27		1.0231	0.9112	1.025	0.9129	1.031	0.9182	1.019	0.9076
10	28	0.9460	0.9827	0.9296	0.977	0.9243	0.990	0.9366	0.979	0.9262
	29		1	0.9460	1	0.9460	1	0.9460	1	0.9460
	30		1.0151	0.9603	1.025	0.9697	1.008	0.9536	1.019	0.9640
11	31	0.9824	0.9898	0.9724	0.977	0.9598	0.990	0.9725	0.993	0.9755
	32		1	0.9824	1	0.9824	1	0.9824	1	0.9824
	33		1.0078	0.9901	1.025	1.0069	1.008	0.9902	1.004	0.9863
12	34	0.9989	0.9967	0.9956	0.977	0.9760	0.990	0.9890	0.993	0.9919
	35		1	0.9989	1	0.9989	1	0.9989	1	0.9989
	36		1.0011	1.0000	1.025	1.0239	1.008	1.0069	1.004	1.0029
GA による Exact Amplitude との偏差						0.0046		0.0018		0.000

図 11 アンテナ素子 3 本で構成されたサブアレイを用いてすべて同一の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with all identical subarrays having 3 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

図 12 アンテナ素子 3 本で構成されたサブアレイを用いて 2 種類の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with 2 groups of identical subarrays having 3 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

真値である波源値の同一サブアレイ内の変動幅(例: 変動幅 $= A_5 - A_1$, $A_5 = 1.0964$, $A_1 = 0.9507$, 表 6 参照)の大きい順にサブアレイを並べると $[2, 3, 4, 1, 5, 6, 7]$ となる. これを変動幅の度合いに応じて 3 グループに分け, $[2, 3]$, $[4, 1, 5]$, $[6, 7]$ の組合せの時, 偏差が小さくなるからである.

サブアレイ内のアンテナ素子を 5 本で構成すると, 真値にあたるアンテナ素子(サブアレイの中心に位置するアンテナ素子)の数が, 7 本で構成した場合より多くなるので, 遠方界指向性はよりなだらかな包絡線を描くようになる. 全体的に見ると, テーラー分布の理想的な遠方界指向性に近い結果になっている. また 2, 3 種類の波源値分布を用いた場合では, メインローブ付近ではグレーティングローブの影響は見られなくなった. さらに 3 種類にした場合では, グレーティングローブの影響がほとんどなくなっている.

4.3 サブアレイをアンテナ素子 3 本で構成する場合

サブアレイを構成するアンテナ素子の数を 3 本に変更し, そのサブアレイを 12 個にしたものをアレイアンテナとして用いる. その結果と真値との偏差を表 7 に示す. サブアレイのアンテナ素子の数が 7 本と 5 本の場合では, メインアレイの全アンテナ素子数が 35 本であったが, アンテナ素子の数を 3 本に変更した場合では, 便宜上メインアレイの全アンテナ素子数を 36 本とする.

サブアレイを 1 種類の波源値分布を用いてテーラー分布に近似した場合の結果が図 11 である. 真値との偏差は 0.0046 と小さくなっているが, $90^\circ \pm 40^\circ$ の付近からグレーティングローブが生じている.

図 12 は, 2 種類の波源値分布 $[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]$, $[10, 11, 12]$ のサブアレイを用いた場合の計算結果である. 真値との偏差は 0.0018 と小さくなっているが, 1 種類の波源値分布にした場合と同じ $90^\circ \pm 40^\circ$ の付近からグレー

図 13 アンテナ素子 3 本で構成されたサブアレイを用いて 3 種類の波源分布で近似されたテーラー分布
Approximated Taylor distribution with 3 groups of identical subarrays having 3 antenna elements.
(a) Current distribution, (b) Far field pattern.

ティングローブが生じている。

図 13 は、3 種類の波源値分布 [1,2,3,4,5,6,7,8], [9,10], [11,12] のサブアレイを用いた場合の計算結果である。真値との偏差も 0.0008 と、これまでの中で一番小さくなっており、遠方界指向性も真値であるテーラー分布の遠方界指向性と、ほぼ一致している。

サブアレイ内のアンテナ素子を 3 本で構成すると、真値にあたるアンテナ素子の数がさらに多くなるので、真値であるテーラー分布の遠方界指向性のような包絡線を描いている。90°±40°の付近から生じているグレーティングローブだけを無視すると、1 種類の波源値分布にした場合でも設計が簡略化される。

5. む す び

アンテナ素子を等間隔配置し、サブアレイで構成されるアレイアンテナにサイドローブレベル-30 dB のテーラー分布を用いてサブアレイのアンテナ素子数と波源値分布の種類をパラメータとして GA により波源値を算出し、給電系の簡略化を図ることを提案した。

本論文では、波源値分布が 3 種類でサブアレイが 3 本のアンテナ素子で構成する場合がテーラー分布との偏差 (0.0008) が一番小さくなり、ほぼ理想的なテーラー分布の遠方界指向性になった。この場合、ウェイトが 12 種類、波源値が 7 種類、合計 19 種類でアンテナ素子個別 (36 本) に給電する場合に比べ約 1/2 となる。サブアレイに供給する波源値分布の種類を多く用い、サブアレイ内のアンテナ素子数を少なくすると、テーラー分布との偏差が小さくなった。これは、多種類の波源値分布を用いることにより、テーラー分布の波源の変動に対して柔軟に対応できるためで、極端な場合、サブアレイの数だけ波源値分布の種類を用いれば偏差は 0 になる。また、サブアレイ内の素子数が少なければ真値を給電する中心素子が増加するため偏差が小さくなったと考えられる。サブアレイのアンテナ素子を

少なくした時、偏差が小さくなったが、近似しようとするアレイアンテナの波源分布によっては、サブアレイの波源値分布の種類数と素子数の最適組合せが存在する場合がありますと推測される。今回の結果を用いると、多少偏差の大きい場合 (0.0146) である 1 種類の波源値分布でサブアレイを 5 本のアンテナ素子で構成した時でも、サイドローブレベルが -30 dB と、ほぼ設計値どおりになっている。グレーティングローブを考慮しなければ、ウェイトは 7 種類、波源値は 5 種類、合計 12 種類で、35 本のアンテナ素子に個別に 35 種類の波源値を給電する場合に比べ約 1/3 になる。

アレイアンテナをサブアレイの集合体として扱うことにより、設計、製作および保守を容易にし、さらにサブアレイに与える波源値分布を同一化することにより生じる膨大な数のパラメータとその組合せ最適化問題を、GA を用いることによって、短時間で波源分布をテーラー分布に近似することができた。それによってアレイアンテナの給電系の簡略化を図るとともに、この方法がリニアアレイアンテナにとどまらず、平面アレイアンテナや立体アレイアンテナにも応用できることが予想される。

〔文 献〕

- 1) 電子通信学会編：“アンテナ工学ハンドブック”，オーム社 (1980)
- 2) 安達三郎，佐藤太一：“電波工学”，森北出版 (1998)
- 3) Randy L. Haupt：“Reducing Grating Lobes Due to Subarray Amplitude Tapering”，IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-33, 8 (Aug. 1985)
- 4) 坂和正敏，田中雅博：“遺伝的アルゴリズム”，日本ファジィ学会，朝倉書店 (1995)
- 5) 日本機械学会：“工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法”，技報堂出版 (1996)

おおく しげる
大久保 茂 1985 年，慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了。同年，郵政省電波研究所入所。1989 年，福井高専講師，1990 年，助教授，現在に至る。アレイアンテナおよび近傍界測定法の研究に従事。工学博士。正会員。