

16. Kisel' V.N., Alpatova A.V., Kisel' N.N. Combined utilization of eigenfunctions and integral equations to calculate fields inside inhomogeneous dielectric bodies, *Conf. Proc. 2000 Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET2000), Kharkov, Ukraine, Sept. 11-15, 2000*, Vol. 2, pp. 459-461.
17. Kisel' N.N., Alpatova A.V., Kisel' V.N. Sochetanie metodov integral'nykh uravneniy i sobstvennykh funktsiy dlya rascheta vzbuzhdeniya krugovogo dielektricheskogo tsilindra s neodnorodnym vklucheniem [A combination of methods of integral equations and eigenfunctions to calculate the excitation of a circular dielectric cylinder with inhomogeneous inclusion], *Antenny [Antennas]*, 2001, Issue 4 (50), pp. 54-60.
18. Alpatova A.V., Kisel' N.N. Electromagnetic field calculation inside the dielectric sphere with inhomogeneous insertion, *2001 IEEE Antennas and Propagation Intern. Symp. Dig., Boston, July 2001*, Vol. 1, pp. 220-223.
19. Kisel' V.N., Alpatova A.V., Kisel' N.N. Effektivnyy algoritm rascheta elektromagnitnogo polya v neodnorodnom tsilindre [An efficient algorithm of calculation of electromagnetic fields in inhomogeneous cylinder], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2001, No. 1 (19), pp. 28-34.
20. Kisel' N.N., Alpatova A.V., Kisel' V.N. A New Effective Algorithm For Heterogeneous Dielectric, *EMC 2002, International Wroclaw Symposium And Exhibition On Electromagnetic*, Vol. 1, pp. 234-240.
21. Kisel' N.N., Alpatova A.V., Kisel' V.N. Vzbuzhdenie neodnorodnogo krugovogo dielektricheskogo tsilindra [Excitation of inhomogeneous circular dielectric cylinder], *Rasseyaniye elektromagnitnykh voln [Scattering of electromagnetic waves]*, ed. by B.M. Petrova. Taganrog: Radiotekhnicheskii un-t, 2002, Issue 12, pp. 5-8.
22. Kisel' N.N., Alpatova A.V., Kisel' V.N. Sochetanie metodov integral'nykh uravneniy i sobstvennykh funktsiy dlya rascheta vzbuzhdeniya krugovogo dielektricheskogo tsilindra s neodnorodnym vklucheniem [A combination of methods of integral equations and eigenfunctions to calculate the excitation of a circular dielectric cylinder with inhomogeneous inclusion], *Antenny [Antennas]*, 2001, Issue 4 (50), pp. 54-60.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Кисель Наталья Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Kisel Natalia Nikolayevna – Southern Federal University; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2016-8-5867

П.Н. Башлы, Ю.А. Кузнецов, Д.А. Безуглов, А.Э. Боярчук

О ВЫБОРЕ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Поиск оптимального решения задачи управления сложной многопараметрической системой требует больших вычислительных и временных затрат, в связи с чем актуальной является проблема оптимального управления параметрами таких систем. К сложным техническим системам относятся современные антенные решетки, в составе которой может быть несколько сотен или тысяч элементов с регулируемой амплитудой и фазой. В ряде прикладных задач для синтеза антенной решетки с заданными энергетическими параметрами достаточно управлять комплексными амплитудами токов в части элементов. Такие решения являются квазиоптимальными. Управление всеми этими элементами в реальном масштабе времени зачастую крайне затруднительно, а иногда просто нецелесообразно. Целью работы является проведение исследований, позволяющих обосновать выбор группы нерегулируемых элементов в составе АР при решении задачи матричного синтеза. Рассмотрен метод синтеза квазиоптимальных антенных решеток, основанный на максим-

мизации интегральных параметров антенной решетки при управлении комплексными амплитудами токов в части излучателей. Решение задачи оптимизации антенной решетки основано на приведении заданного интегрального энергетического параметра решетки к отношению эрмитовых форм и последующем применении теоремы об экстремальных свойствах характеристических чисел пучка эрмитовых форм для определения оптимального вектора комплексных амплитуд токов. Для преодоления недостатка известного метода синтеза квазиоптимальной антенной решетки выполнен статистический анализ распределения элементов антенной решетки по группам с регулируемыми и неизменяемыми комплексными амплитудами токов. По результатам исследований обоснован выбор расположения нерегулируемых элементов в составе антенной решетки, при котором минимизируется снижение энергетических показателей квазиоптимальной антенной решетки.

Антенная решетка; обобщенный энергетический функционал; матричный синтез; квазиоптимальный синтез; статистический анализ.

P.N. Bashly, Yu.A. Kuznetsov, D.A. Bezuglov, A.E Boyarchuk

REVISITING THE SELECTION OF UNREGULATED CELLS IN THE PROBLEM OF QUASIOPTIMAL ANTENNA ARRAY'S SYNTHESIS

Search of the optimal solution to problem of the control of a difficult multi-parameter system is very labor-intensive and time-consuming, thus the problem of such systems parameter's optimum control is very actual. The modern antenna arrays belong to difficult technical systems in which several hundreds or thousands of elements with adjusted control amplitude and phase can be included. In many applications for antenna array's synthesis with the given energetic parameters it is enough to control the complex amplitudes of currents regarding cells. Such kinds of solutions are quasioptimal. The control of all these elements in real time is often extremely difficult, and sometimes just unclaimed. The purpose of this paper is to carry out the studies which allow justifying a choice of group of nonadjustable elements in antenna arrays (AA) composition when solving the problem of matrix synthesis. This paper presents the synthesis method of quasioptimal AA, which is based on integral parameter's maximizing of antenna arrays in case of control of complex amplitudes of currents regarding radiators. The solution to the problem of antenna array's optimization is based on the coercion of the preset integral of energetic lattice parameter to the relation of Hermitian forms and the subsequent application of the theorem on extremal properties of characteristic numbers of a bundle of Hermitian forms for determination of an optimum vector of currents' complex amplitudes. Statistic analysis of distribution of antenna array's elements on the groups with adjustable and invariable complex amplitudes of currents is performed in order to overcome the problem of the known method of synthesis of a quasioptimal antenna array. On the basis of the research findings substantiated is the choice of position of nonadjustable elements as a part of an antenna array, in case of which lowering of energetic indices of a quasioptimal AA is minimized.

Antenna array; generalized energy functional; matrix synthesis; quasioptimal synthesis; statistical analysis.

Введение. Современные радиотехнические системы позволяют решать широкий спектр задач и обладают огромным количеством элементов и, соответственно, варьируемых параметров [1–6]. Управление всеми этими элементами в реальном масштабе времени зачастую крайне затруднительно, а иногда просто невозможно. Постоянно возникающая проблема поиска оптимального решения требует больших вычислительных и временных затрат, в связи с чем актуальной является проблема оптимального управления параметрами сложных технических систем. Примером подобной сложной технической системы является антенная решетка (АР), в составе которой может быть несколько сотен или тысяч элементов с регулируемой амплитудой и фазой.

Известные методы синтеза АР, как правило, основаны на решении задач [6–7], размерность которых пропорциональна количеству элементов в составе решетки, поэтому при большом числе элементов такие решения, чаще всего, мало-

пригодны для практики, поскольку основная проблема оптимального управления АР заключается в разработке алгоритмов, реализуемых в реальном масштабе времени, что особенно актуально в условиях информационного конфликта. Учитывая, что размеры используемых АР постоянно увеличиваются и, соответственно, возрастает число управляемых параметров, разработка подобных алгоритмов становится особенно актуальной.

Исследования в работах [8–11] показали, что в ряде прикладных задач для синтеза АР с заданными параметрами достаточно управлять комплексными амплитудами токов в части элементов. Такие решения являются квазиоптимальными. В работе [12] решена задача квазиоптимального управления АР, что позволило существенно снизить вычислительные затраты при определении комплексных амплитуд токов. Однако, в [12] не рассмотрен вопрос выбора регулируемых элементов из состава решетки, управление которыми бы обеспечивало наилучшее решение.

Постановка задачи. Таким образом, задача исследования состоит в разработке метода квазиоптимального синтеза многоэлементной антенной решетки, основанного на максимизации заданного энергетического параметра антенной решетки и проведении статистических исследований, результатом которых должны стать рекомендации по выбору группы нерегулируемых элементов в составе антенной решетки.

Метод квазиоптимального управления многоэлементной антенной решеткой. Рассмотрим плоскую $S=N \times M$ – элементную решетку, излучатели которой образуют прямоугольный раскрыв с числом элементов по каждой из координат, равным N и M . Диаграмму направленности АР представим как функцию от вектора комплексных амплитуд токов порядка S , т.е.:

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \sum_S J_s f_s(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \quad s(m, n) \in 1..S, \quad (1)$$

где $f_s(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ – ненормированные парциальные комплексные диаграммы направленности решетки при возбуждении s -го (s – общий индекс в нумерации элементов решетки) элемента волной единичной амплитуды и нулевой фазы; J_s – комплексная амплитуда тока в s -м элементе АР.

Обобщенный энергетический функционал, предложенный в [13] и используемый для решения задачи синтеза АР, представим выражением:

$$\chi(\mathbf{J}) = \frac{\int_{\Omega_1} \left| \sum_s f_s(\mathbf{u}, \mathbf{v}) J_s h_s \right|^2 g_1(\mathbf{u}, \mathbf{v}) d\Omega}{\int_{\Omega_2} \left| \sum_s f_s(\mathbf{u}, \mathbf{v}) J_s w_s \right|^2 g_2(\mathbf{u}, \mathbf{v}) d\Omega}, \quad (2)$$

где $g_{1,2}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ и h_s – весовые функции, определяющие конечный физический смысл энергетического функционала (например, отношение сигнал/помеха+шум или коэффициент направленного действия и др.).

Функционалу (2) соответствует эквивалентная матричная форма [13]:

$$\chi(\mathbf{J}) = \frac{\mathbf{J}^* \mathbf{H}^* \mathbf{A} \mathbf{H} \mathbf{J}}{\mathbf{J}^* \mathbf{W}^* \mathbf{B} \mathbf{W} \mathbf{J}}, \quad (3)$$

где элементы матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} представлены выражениями:

$$a_{mn} = f_m(\mathbf{u}_0, \mathbf{v}_0)^* f_n(\mathbf{u}_0, \mathbf{v}_0), \quad m, n = 1, 2, \dots, S;$$

$$b_{mn} = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} f_m(u, v)^* f_n(u, v) \cdot W(u, v) du dv;$$

\mathbf{H} и \mathbf{W} – некоторые матрицы преобразований S -го порядка, структура и значения которых зависят от постановки задачи синтеза и физического смысла функционала (2); u_0, v_0 – пара значений, определяющих пространственную ориентацию главного максимума АР.

Решением задачи синтеза с использованием функционала (3) будет вектор $\mathbf{J}^{\text{опт}}$, удовлетворяющий равенству [14–16]:

$$\left((\mathbf{W}^* \mathbf{B} \mathbf{W})^{-1} \mathbf{H}^* \mathbf{A} \mathbf{H} \right) \mathbf{J}^{\text{опт}} = \lambda^{\text{max}} \mathbf{J}^{\text{опт}}. \quad (4)$$

Для реализации метода синтеза квазиоптимальных АР все излучатели решетки условно делятся на две группы: в первую входят $|\mathfrak{R}^0|$ элементов множества \mathfrak{R}^0 регулируемые комплексными амплитудами токов, а во вторую – $|\mathfrak{R}^{\text{озп}}|$ элементов множества $\mathfrak{R}^{\text{озп}}$ с неизменяемыми комплексными амплитудами токов. Порядок разделения элементов может быть в общем случае произвольным ($\mathfrak{R}^0 \cap \mathfrak{R}^{\text{озп}} = \emptyset, \mathfrak{R}^0 \cup \mathfrak{R}^{\text{озп}} = \mathfrak{R}, \mathfrak{R}$ – множество номеров всех элементов АР $|\mathfrak{R}| = S$, где $|\mathfrak{R}|$ обозначает мощность множества \mathfrak{R}).

С учетом этого, ДН АР представим в следующем виде:

$$\mathbf{f}^{\text{к0}}(u, v) = \sum_{q \in \mathfrak{R}^0} f_q(u, v) \tilde{\mathbf{J}}_q + \left(\sum_{p \in \mathfrak{R}^{\text{озп}}} f_p(u, v) \mathbf{J}_p \right) \Gamma^{\text{общ}}, \quad (5)$$

где $\Gamma^{\text{общ}}$ – неизвестный комплексный ток, принимаемый равным для всех элементов, номера которых принимают значения $p \in \mathfrak{R}^{\text{озп}}$; $\tilde{\mathbf{J}}_q$ – неизвестный комплексный ток в излучателе с номером $q \in \mathfrak{R}^0$; \mathbf{J}_p комплексный ток p -го элемента, соответствующий исходному распределению, заданному на этапе постановки задачи синтеза.

Тогда, подставив (5) в (2) вместо (3), получим новое отношение эрмитовых форм порядка $|\mathfrak{R}^0| + 1$:

$$\chi'(\tilde{\mathbf{J}}) = \frac{\tilde{\mathbf{J}}^* \mathbf{Y}^* \mathbf{A} \mathbf{Y} \tilde{\mathbf{J}}}{\tilde{\mathbf{J}}^* \mathbf{Y}^* \mathbf{B} \mathbf{Y} \tilde{\mathbf{J}}}, \quad (6)$$

где \mathbf{Y} – прямоугольная матрица преобразований размера $S \times |\mathfrak{R}^0| + 1$ с элементами:

$$y_{qp} = \begin{cases} 1 \forall q = p \in \mathfrak{R}^0 \\ \mathbf{J}_q \forall q \notin \mathfrak{R}^0 \wedge p = |\mathfrak{R}^0| + 1 \\ 0 \forall q \notin \mathfrak{R}^0 \wedge p \in \mathfrak{R}^0 \end{cases}. \quad (7)$$

Очевидно, что (6) соответствует обобщенному энергетическому функционалу (3) с учетом равенства $\mathbf{W} = \mathbf{H} = \mathbf{Y}$, а квазиоптимальный $\tilde{\mathbf{J}}$ и оптимальный \mathbf{J} векторы токов связаны преобразованием

$$\mathbf{J} = \mathbf{Y} \tilde{\mathbf{J}}. \quad (8)$$

Для определения вектора токов $\tilde{\mathbf{J}}$ из (6) на основании теоремы об экстремальных свойствах характеристических чисел пучка эрмитовых форм принципиальной является положительная определенность матрицы $\mathbf{Y}^* \mathbf{B} \mathbf{Y}$ входящей в знаменатель. Доказательство невырожденности матрицы $\mathbf{Y}^* \mathbf{B} \mathbf{Y}$ приведено в [13].

С учетом этого, полагая, что $\text{rank}(\mathbf{Y}^* \mathbf{A} \mathbf{Y})=1$, получим выражение для квазиоптимального вектора токов $\tilde{\mathbf{J}}$ [14]:

$$\tilde{\mathbf{J}} = (\mathbf{Y}^* \mathbf{B} \mathbf{Y})^{-1} \hat{\mathbf{f}}(u_0, v_0)^* \quad (9)$$

где $\hat{\mathbf{f}}(u_0, v_0) = \mathbf{f}_{\mathbf{s}}(u, v)$ при $u=u_0, v=v_0$, а максимум функционала (6) при решении задачи квазиоптимального синтеза равен:

$$\max(\chi^I) = \hat{\mathbf{f}}(u_0, v_0)^* (\mathbf{Y}^* \mathbf{B} \mathbf{Y})^{-1} \hat{\mathbf{f}}(u_0, v_0). \quad (10)$$

В результате решения (9) определяется вектор комплексных амплитуд токов $\tilde{\mathbf{J}}_{\text{макс}}$ порядка $|\mathfrak{R}^0|+1$, обеспечивающий максимум функционала в соответствии с теоремой об экстремальных свойствах характеристических чисел пучка эрмитовых форм для заданной матрицы преобразований \mathbf{Y} , причем $|\mathfrak{R}^0|+1$ -й элемент вектора $\tilde{\mathbf{J}}_{\text{макс}}$ по условию задачи синтеза является общим для группы из $|\mathfrak{R}^{\text{огр}}|$ элементов.

Выполнив нормировку комплексных амплитуд токов:

$$\tilde{\mathbf{J}}_{\text{норм}} = \tilde{\mathbf{J}}_{\text{макс}} / \mathbf{I}^{\text{общ}} \quad (11)$$

получим новый вектор, в котором $|\mathfrak{R}^0|$ элементов определяют комплексные амплитуды токов в части регулируемых элементов АР и единицу (с учетом нормировки) для комплексной амплитуды общего тока $\mathbf{I}^{\text{общ}}$ нерегулируемой части элементов.

Множество вариантов определения матрицы преобразования \mathbf{Y} обуславливает множество комбинаций элементов, входящих в состав множеств \mathfrak{R}^0 и $\mathfrak{R}^{\text{огр}}$. Нахождение состава этих множеств номеров регулируемых и нерегулируемых элементов является вариационной задачей, требующей научно-обоснованного решения.

В [17] такая задача решена, где с применением теоремы Куранта-Фишера о минимаксном представлении собственных чисел отношения Релея доказано, что объединять в группу элементов с общим комплексным током необходимо те элементы АР, комплексные амплитуды токов которых отличаются минимально друг от друга, т.е.:

$$\Delta(\mathbf{J}) = \left| \frac{1}{|\mathfrak{R}^{\text{огр}}|} \sum_{s \in \mathfrak{R}^{\text{огр}}} \left(\frac{1}{|\mathfrak{R}^{\text{огр}}|} \sum_{s' \in \mathfrak{R}^{\text{огр}}} \mathbf{J}_{s'} - \mathbf{J}_s \right) \right|. \quad (12)$$

Недостаток этого решения заключается в том, что для его применения необходимо априорно знать оптимальный вектор комплексных амплитуд токов \mathbf{J} , что снижает привлекательность метода квазиоптимального синтеза с точки зрения времени решения задачи управления формой ДН.

Статистическое моделирование решения задачи квазиоптимального синтеза АР. Для преодоления недостатка известного метода синтеза квазиоптимальной АР и обеспечения эффективности функционирования многофункциональных АР, выполним статистический анализ распределения элементов АР по группам с регулируемыми и неизменяемыми комплексными амплитудами токов.

При проведении численного эксперимента используем плоскую АР, состоящую из изотропных элементов с параметрами: количество элементов $S=49$; количество элементов с общим комплексным током $|\mathfrak{R}^{o2p}|=20$; расстояние между элементами решетки по оси $x - x_0=0.5\lambda$; по оси $y - y_0=0.5\lambda$.

На первом этапе была решена $D=300$ раз задача квазиоптимального синтеза по критерию максимума функционала (6). Выбор элементов с общим комплексным током для каждого из D вариантов выполнялся по правилу (12).

Направление главного максимума для каждого варианта выбиралось случайно по равномерному закону в пределах $-0,1 \leq u_0, v_0 \leq 0,1$ по обобщенным координатам. Помеховая обстановка при решении задачи квазиоптимального синтеза задавалась функцией:

$$W(u, v) = \begin{cases} 10^5 & \text{при } u_{\min} \leq u_{\Pi} \leq u_{\max} \text{ и } v_{\min} \leq v_{\Pi} \leq v_{\max}, \\ 1 & \text{при других } u, v \end{cases}$$

в которой направления прихода помех (u_{Π}, v_{Π}) варьировались случайным образом в области первых боковых лепестков синтезируемой ДН $(u_{\min}, u_{\max} \text{ и } v_{\min}, v_{\max})$.

На рис. 1 показано распределение значений (u_0, v_0) для всех вариантов. При моделировании помех задавались, в том числе и пространственно протяженные помехи.

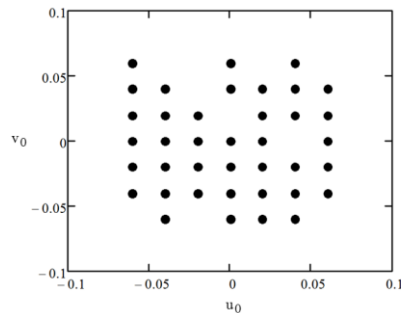


Рис. 1. Направления ориентации главного максимума ДН АР (u_0, v_0) при проведении статистического моделирования

На рис. 2 приведены результаты статистического моделирования, отражающие частоту попадания каждого из 49 элементов АР в группу нерегулируемых элементов, полученные для всех D испытаний (красный цвет – частота наибольшая; синий цвет – частота наименьшая).

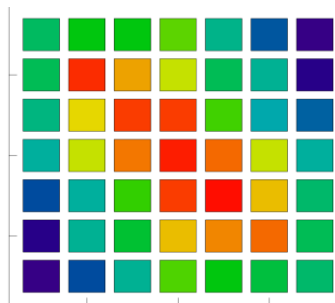


Рис. 2. Распределение элементов АР по результатам статистического моделирования

На рис. 3 приведены количественные значения частоты попадания каждого из 49 элементов АР в группу нерегулируемых элементов, из которой следует, что чаще всего в группу нерегулируемых элементов попадают элементы из центральной части АР, при этом треть элементов из 49 попадают в эту группу в более чем в 60 % испытаний.

| | | | | | | |
|----|----|-----|----|----|----|----|
| | 9 | 20 | 20 | 44 | 7 | 4 |
| 02 | 10 | 86 | 65 | 02 | 4 | 5 |
| 0 | 74 | 207 | 07 | 38 | 5 | 7 |
| 1 | 65 | 95 | 13 | 98 | 65 | 1 |
| 1 | 1 | 35 | 07 | 16 | 80 | 6 |
| 5 | 4 | 11 | 80 | 92 | 98 | 02 |
| | 1 | 4 | 41 | 20 | 08 | 6 |

Рис. 3. Количественные значения частоты попадания элементов АР в группу нерегулируемых элементов

Для подтверждения справедливости полученных оценок были проведены исследования эффективности квазиоптимального синтеза АР с распределением группы нерегулируемых элементов, показанным в таблице 1 (элементы выделены красным цветом). Для этого была сформирована матрица преобразований Y и D раз решена задача квазиоптимального синтеза АР со случайным выбором значений (u_0, v_0) и (u_{II}, v_{II}) .

Средние значения отношения сигнал/помеха+шум на выходе АР, полученные при различных способах формирования ДН, приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Способ формирования ДН | ОСПШ, дБ |
|--|----------|
| Равномерное амплитудное и линейное фазовое распределение (при воздействии помех) | -3.793 |
| Синтез оптимальной АР по критерию максимума ОСПШ (регулировка амплитуд и фаз токов во всех элементах) | 17.68 |
| Синтез квазиоптимальной АР с выбором элементов по правилу (12) | 17.63 |
| Синтез квазиоптимальной АР с учетом результатов статистического эксперимента (регулировка амплитуд и фаз токов в 32 элементах) | 17.42 |

Анализ табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что выбор элементов с общим комплексным током в соответствии с табл. 1, полученной по результатам статистического моделирования задачи квазиоптимального управления АР, позволяет синтезировать квазиоптимальную АР с энергетическими параметрами, отличающимися от параметров оптимальной АР синтезированной по критерию максимума интегрального энергетического параметра (ОСПШ) не более, чем на 0.1 дБ, при этом при объединении в группу нерегулируемых 17 из 49 элементов АР размерность задачи понижается до $S=33$, а вычислительные затраты на поиск квазиоптимального решения сокращаются примерно в 3 раза.

Вывод. Результаты статистического эксперимента подтверждают теоретические положения и результаты вычислительных экспериментов, изложенные в [17–20], где обосновывалось, что в группу элементов с общим комплексным током следует выбирать элементы центральной части раскрыва АР.

В целом анализ проведенных исследований позволяет сделать вывод о том, что проведение статистического моделирования в совокупности с методами синтеза, изложенными в [17–20], позволяет добиться снижения вычислительных затрат на решение задачи синтеза АР заданной геометрии, при этом сохранив значения энергетических параметров на уровне, отличающемся от оптимальных методов синтеза не более, чем на 5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активные фазированные решетки / под ред. Воскресенского Д.И. и Канащенкова А.И. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
2. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы первичной обработки радиолокационных сигналов / под ред. Канащенкова А.И. и Меркулова В.И. – М.: Радиотехника, 2006. – 656 с.
3. *Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф.* Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. – М.: ИПРЖР, 2002. – 176 с.
4. Применение фазированных антенных решеток в РЛС боевых самолетов: Обзор НТИ «Авиационные системы». – М.: НИЦ ГосНИИАС, 2002. – № 2.
5. Объективные предпосылки перехода к РЛС с АФАР в самолетах тактической авиации 5-го поколения: Обзор по материалам иностранной печати / под ред. Федосова Е.А. – М.: НИЦ ГосНИИАС, 2002.
6. Проблемы антенной техники / под ред. Бахраха Л.Д., Воскресенского Д.И. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.
7. *Зелкин Е.Г., Соколов В.Г.* Методы синтеза антенн. – М.: Сов. радио, 1980. – 348 с.
8. *Монзинго Р.А., Миллер Т.У.* Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
9. *Журавлев А.К., Лукошкин А.П., Поддубный С.С.* Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 240 с.
10. *Башлы П.Н., Мануилов Б.Д., Помысов А.С., Шерстобитов А.И.* Параметрический синтез широкополосных антенных решеток в условиях воздействия помех // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – № 9. – С. 46-50.
11. *Башлы П.Н.* Потенциальные возможности антенной решетки по формированию многолучевой диаграммы направленности с использованием классического функционала // Антенны. – 2007. – № 12. – С. 17-22.
12. *Башлы П.Н.* Квазиоптимальное управление антенной решеткой в задаче повышения помехоустойчивости информационной системы // Автометрия. – 2008. – № 4. – С. 52-59.
13. *Башлы П.Н.* Матричный синтез многофункциональных антенных систем с комплексным управлением // Антенны. – 2009. – № 2. – С. 3-9.
14. *Cheng David K.* Optimization techniques for antenna arrays // Proc. IEEE. – 1971. – Vol. 59, No. 12.
15. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. – М.: Наука, 1988.
16. *Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А.* Матрицы и вычисления. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 320 с.
17. *Башлы П.Н., Кузнецов Ю.А., Гладушенко С.Г.* Квазиоптимальное управление многоэлементными антенными решетками // Автометрия. – 2009. – № 6. – С. 15-21.
18. *Башлы П.Н., Мануилов Б.Д.* Новые приложения теоремы об экстремальных свойствах характеристических чисел пучка эрмитовых форм в задачах оптимизации многофункциональных АР // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 3. – С. 318-328.
19. *Башлы П.Н., Кузнецов Ю.А.* Модифицированный метод квазиоптимального управления антенными решетками информационных систем // Автометрия. – 2011. – № 1. – С. 67-73.
20. *Башлы П.Н., Кузнецов Ю.А., Ларин А.Ю.* Квазиоптимальное управление антенной решеткой в условиях отказа элементов // Антенны. – 2011. – № 12. – С. 7-15.

REFERENCES

1. Aktivnye fazirovannye reshetki [Active phased array], ed. by Voskresenskogo D.I. and Kanashchenkova A.I. Moscow: Radiotekhnika, 2004, 488 p.
2. Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktional'nykh samoletov [Radar system multifunctional aircraft]. Vol. 1. RLS – informatsionnaya osnova boevykh deystviy mnogofunktional'nykh samoletov. Sistemy pervichnoy obrabotki radiolokatsionnykh signalov [Radar – information-based fighting multifunctional aircraft. Primary processing of radar signals], ed. by Kanashchenkova A.I. i Merkulova V.I. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 656 p.
3. *Kanashchenkov A.I., Merkulov V.I., Samarin O.F.* Oblik perspektivnykh bortovykh radiolokatsionnykh sistem. Vozmozhnosti i ogranicheniya [Look promising airborne radar systems. Possibilities and limitations]. Moscow: IPRZhR, 2002, 176 p.
4. Primenenie fazirovannykh antennoykh reshetok v RLS boevykh samoletov: Obzor NTI «Aviatsionnye sistemy» [The use of phased array antennas in radar combat aircraft: a Review of the NTI "Air system"]. Moscow: NITs GosNIIAS, 2002, No. 2.
5. Ob'ektivnye predposylki perekhoda k RLS s AFAR v samoletakh takticheskoy aviatsii 5-go pokoleniya: Obzor po materialam inostrannoy pechati [Objective preconditions for the transition to AESA radar with the tactical aircraft of the 5th generation: the Review of foreign publications], ed. by Fedosova E.A. Moscow: NITs GosNIIAS, 2002.
6. Problemy antennoy tekhniki [Problems antenna technology], ed. by Bakhrakha L.D., Voskresenskogo D.I. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 368 p.
7. *Zelkin E.G., Sokolov V.G.* Metody sinteza antenn [Methods of synthesis of antennas]. Moscow: Sov. radio, 1980, 348 p.
8. *Monzingo R.A., Miller T.U.* Adaptivnye antennye reshetki: Vvedenie v teoriyu [Adaptive antenna arrays: Introduction to theory]: translated from English. Moscow: Radio i svyaz', 1986, 448 p.
9. *Zhuravlev A.K., Lukoshkin A.P., Poddubnyy S.S.* Obrabotka signalov v adaptivnykh antennoykh reshetkakh [Signal processing for adaptive antenna arrays]. Leningrad: Izd-vo Lenigr. un-ta, 1983, 240 p.
10. *Bashly P.N., Manuilov B.D., Pomysov A.S., Sherstobitov A.I.* Parametricheskyy sintez shirokopolosnykh antennoykh reshetok v usloviyakh vozdeystviya pomekh [Parametric synthesis of broadband antenna arrays in interference conditions], *Uspekhi sovremen-noy radioelektroniki* [Successes of Modern Radio Electronics], 2011, No. 9, pp. 46-50.
11. *Bashly P.N.* Potentsial'nye vozmozhnosti antennoy reshetki po formirovaniyu mnogoluchevoy diagrammy napravlenosti s ispol'zovaniem klassicheskogo funktsionala [The potential of the antenna array for forming multibeam directivity diagram using the classic functionality], *Antenny* [Antennas], 2007, No. 12, pp. 17-22.
12. *Bashly P.N.* Kvazioptimal'noe upravlenie antennoy reshetkoy v zadache povysheniya pomekhoustoychivosti informatsionnoy sistemy [Quasioptimal control of antenna array in the problem of noise immunity improvement of information system], *Avtometriya* [Autometry], 2008, No. 4, pp. 52-59.
13. *Bashly P.N.* Matrichnyy sintez mnogofunktional'nykh antennoykh sistem s kompleksnym upravleniem [Matrix synthesis of multifunctional antenna systems with integrated control], *Antenny* [Antennas], 2009, No. 2, pp. 3-9.
14. *Cheng David K.* Optimization techniques for antenna arrays, *Proc. IEEE*, 1971, Vol. 59, No. 12.
15. *Gantmakher F.R.* Teoriya matrits [The theory of matrices]. Moscow: Nauka, 1988.
16. *Voevodin V.V., Kuznetsov Yu.A.* Matritsy i vychisleniya [Matrix and calculations]. Moscow: Nauka, gl. red. fiz.-mat. lit., 1984, 320 p.
17. *Bashly P.N., Kuznetsov Yu.A., Gladushenko S.G.* Kvazioptimal'noe upravlenie mnogoelementnymi antennoykh reshetkami [Quasi-optimal control mnahole-cement antenna arrays], *Avtometriya* [Autometry], 2009, No. 6, pp. 15-21.
18. *Bashly P.N., Manuilov B.D.* Novye prilozheniya teoremy ob ekstremal'nykh svoystvakh kharakteristicheskikh chisel puchka ermitovykh form v zadachakh optimizatsii mnogofunktional'nykh AR [New applications of the theorem of extremal properties of the characteristic numbers of the beam Hermitian forms in optimization problems for multinational AR], *Radiotekhnika i elektronika* [Technology and Electronics], 2009, Vol. 54, No. 3, pp. 318-328.

19. *Bashly P.N., Kuznetsov Yu.A.* Modifitsirovannyu metod kvazioptimal'nogo upravleniya antennymi reshetkami informatsionnykh sistem [Modified method of quasi-optimal antenna arrays management information systems], *Avtometriya* [Autometry], 2011, No. 1, pp. 67-73.
20. *Bashly P.N., Kuznetsov Yu.A., Larin A.Yu.* Kvazioptimal'noe upravlenie antennoy reshetkoy v usloviyakh otказа elementov [Quasioptimal control of antenna array in conditions of failure of the elements], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 12, pp. 7-15.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Обуховец.

Башлы Петр Николаевич – Ростовский филиал государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Российская таможенная академия»; e-mail: rta-rostov@donrta.ru; 344002, г. Ростов-на-Дону, Буденновский проспект, 20; тел.: 88632623818; д.т.н.; доцент; проректор-директор.

Безуглов Дмитрий Анатольевич – д.т.н.; профессор; и.о. зам. директора по научной работе.

Боярчук Андрей Эдуардович – кафедра информационных таможенных технологий; к.т.н.; профессор.

Кузнецов Юрий Александрович – Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко"; e-mail: Ykyz@list.ru; 350035, г. Краснодар, ул. Красина, 4; тел.: 88612683509; к.т.н.; начальник научно-исследовательского отдела.

Bashly Pyotr Nikolayevich – Rostov branch of state fiscal educational institution of higher education "Russian Customs Academy»; e-mail: rta-rostov@donrta.ru; 20, Budennovsky avenue, Rostov-on-Don, 344002, Russia; phone: +78632623818; dr. of eng. sc.; associate professor; vice-rector, director.

Bezuglov Dmitriy Anatolyevich – dr. of eng. sc.; professor; acting deputy director for science.

Boyarchuk Andrey Edwardovich – the department of information technology customs; cand. of eng. sc.; professor.

Kuznetsov Yury Aleksandrovich – Federal State Military Educational Institution of Higher Education "Krasnodar Higher Military School named after Army General S.M. Shtemenko"; e-mail: Ykyz@list.ru; 4, Krasin street, Krasnodar, 350035, Russia; phone: +78612683509; cand. of eng. sc.; head of research division.