

УДК 621.396.669.8

Алгоритмы адаптации многолучевых антенн, построенных на базе гибридно-зеркальных антенн

**В.Н. Тяпкин,
Д.Д. Дмитриев*, А.С. Першин**
*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

Received 25.12.2012, received in revised form 07.07.2013, accepted 21.09.2013

Рассмотрена адаптивная многолучевая антенна, построенная на базе гибридно-зеркальной антенны с облучателем в виде антенной решетки, в которой применен ускоренный алгоритм синтеза диаграммы направленности для подавления направленных помех, использующий в качестве критерия коэффициенты усиления антенны в заданных точках и позволяющий существенно ограничить размеры целевой функции и длительность синтеза. Проведено экспериментальное исследование предложенных алгоритмов, сделаны выводы о возможности применения адаптивных многолучевых гибридно-зеркальных антенн.

Ключевые слова: алгоритм адаптации к помехам, многолучевая антенна, гибридно-зеркальная антенна.

Введение

В настоящее время все более широкое распространение получают системы спутниковой связи (ССС). Основное назначение ССС заключается в предоставлении надежных, защищенных каналов для обмена информацией в зоне обслуживания (ЗО). Определены основные требования к перспективным ССС: существенное расширение пропускной способности каналов связи, освоение новых частотных диапазонов, возможность гибкого управления трафиком в зависимости от нагрузки на канал связи, подразумевающая формирование многолучевых диаграмм направленности (ДН) в пределах ЗО, высокая помехоустойчивость при воздействии как преднамеренных, так и промышленных помех.

Для реализации требований по формированию многолучевых ДН и повышению помехоустойчивости в спутниковом ретрансляторе могут быть использованы как фазированные антенные решетки (ФАР) со сканирующими лучами, так и многолучевые антенны (МЛА), построенные на базе гибридно-зеркальных антенн (ГЗА). ФАР с цифровым формированием ДН позволяет гибко управлять направлением главных максимумов каждой из парциальных ДН в широком диапазоне углов, создавать глубокие провалы в ДН в направлении на источник

помех. Однако ФАР имеет большие массогабаритные характеристики, достаточно сложную аппаратную реализацию, особенно диаграммообразующей схемы, и, как следствие, высокую стоимость [1]. Адаптивные ГЗА имеют меньшие углы сканирования, но для геостационарных космических аппаратов (КА) и КА с высокоэллиптическими орбитами данный недостаток не существен и перекрывается более простой конструкцией. Причем наиболее перспективным является применение антенной решетки (АР) со сравнительно небольшим числом элементов, используемой в качестве облучателя фокусирующего квазиоптического элемента зеркала. ГЗА сочетают в себе достоинства высокоэффективных зеркальных антенн и ФАР, позволяют формировать перестраиваемые многолучевые ДН и ДН специальной формы и обеспечивать пространственную фильтрацию сигналов и помех.

В данной статье исследуются методы адаптации к помеховой обстановке МЛА, построенных на базе ГЗА.

1. Построение многолучевой гибридно-зеркальной антенны и синтез алгоритма ее адаптации

В качестве варианта адаптивной многолучевой ГЗА можно предложить следующее построение антенны. АР облучателя строится из 19 облучателей по кластерному принципу, в котором каждый из 7 лучей антенны формируется набором облучателей (кластером) (рис. 1) [2]. Каждый кластер, состоящий из 7 облучателей, в исходном состоянии запитывается синфазно, 50 % – излучаемой мощности подается на центральный облучатель, 50 % – на периферийные облучатели. При таком построении антенной системы лучи ДН формируются на разных частотах, что исключает влияние лучей друг на друга.

Формирование провалов в ДН одного кластера в простейшем случае возможно при противофазном запитывании одного из облучателей (рис. 2). Однако такой способ имеет существенные недостатки: провал формируется на фиксированном направлении, происходит значительное уменьшение сигнала в 20 % – от номинальной ЗО, для подавления дополнительных помех

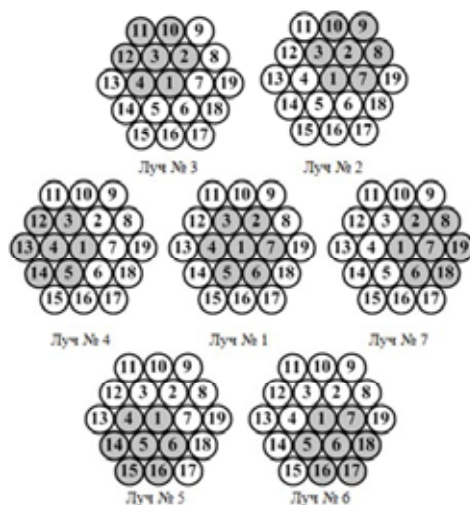


Рис. 1. Принцип формирования лучей по кластерной схеме облучающей решетки

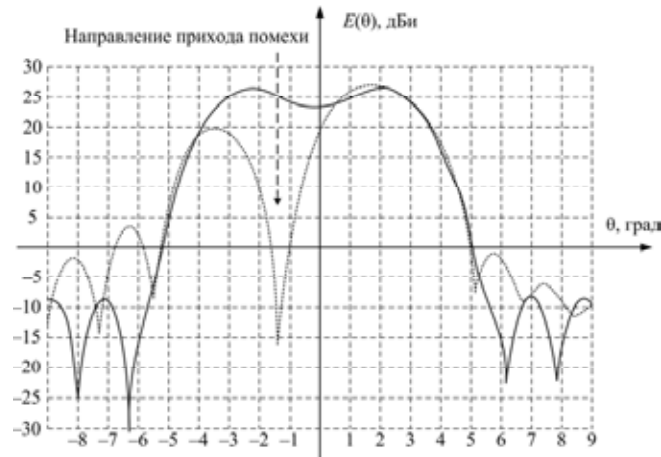


Рис. 2. Подавление в ГЗА помехи, действующей с направления главного лепестка ДН: сплошная линия – исходная ДН, прерывистая – ДН в результате противофазного запитывания одного из облучателей кластера

необходимо противофазно запитывать дополнительный облучатель, что приводит к еще большей деградации ДН антенны [3].

Формирование провалов в ДН в направлении боковых лепестков возможно при увеличении числа излучателей, формирующих ДН ГЗА. Однако это не всегда эффективно, поскольку приведет к усложнению схемы построения антенны и увеличению ее массогабаритных показателей.

Для повышения эффективности работы антенны разработан алгоритм синтеза амплитудно-фазового распределения (АФР) облучающей решетки ГЗА. Это позволяет синтезировать ДН антенны желаемой формы и формировать провалы не только в направлении главного лепестка ДН, но и в направлении боковых лепестков при прежнем количестве облучателей в решетке [3].

В общем случае ДН в дальней зоне МЛА при работе в кластере записывается в виде

$$\left| E(W_j, \theta_i, \varphi_i) \right|^2 = \left| \sum_{j=1}^{N_{\text{изл}}} E_{ij} \cdot W_j \right|^2, \quad (1)$$

где $W_j = A_j \cdot e^{j\varphi_j}$ – весовой коэффициент облучателя; E_{ij} – ДН от j -го облучателя в i -м направлении наблюдения; $\left| E(W_j, \theta_i, \varphi_i) \right|^2$ – требуемая ДН антенны.

Необходимо ограничить амплитуду облучателей исходя из условия нормирования мощности кластера:

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{изл}}} A_j^2 = 1. \quad (2)$$

Величина E_{ij} является заранее известной величиной и в процессе синтеза АФР выступает константой для определенной точки θ_i, φ_i . Для ускорения расчета АФР ограничим функцию (1) набором точек, задаваемых программно. В каждой точке задается требуемое значение уровня сигнала.

Набор весовых коэффициентов представим в виде вектора

$$\mathbf{W} = [W_1, W_2, \dots, W_j]^{*T}. \quad (3)$$

Для ограничения размеров целевой функции и длительности синтеза АФР расчет проводится в наборе точек. Это позволяет значительно ускорить скорость расчета требуемого АФР и повысить эффективность системы в целом.

В качестве критерия для синтеза ДН используется коэффициент усиления (КУ) антенны в заданных точках – «целях». Кроме того, необходимо модифицировать алгоритм в связи с ограничением количества точек и необходимостью формировать провалы в ДН. Введем понятие ВК «цели», которые будут задавать повышение либо уменьшение уровня сигнала для заданной «цели»: $w > 0$ – повышение уровня сигнала в данной точке, стремление к максимально возможному значению; $w < 0$ – подавление сигнала в данной точке, стремление к минимально возможному значению.

Под «целью» здесь понимается возможное положение помехи для синтеза АФР облучающей решетки, а также требования по уровню сигнала в остальной части ЗО. Данные для каждой «цели» задают требуемое значение сигнала в определенной точке ЗО, также набор весовых коэффициентов, которые обозначают цели программы – стремление к максимальному значению сигнала либо подавление сигнала для заданной «цели».

На основе вышеизложенных рассуждений запишем целевую функцию алгоритма для синтеза АФР кластера:

$$f_i = w_i(|E(\theta, \varphi)_{\text{цель}, i}|^2 - |E_i(\theta, \varphi)|^2), \quad (4)$$

где w_i – весовой коэффициент «цели»; $|E(\theta, \varphi)_{\text{цель}, i}|^2$ – требуемое значение уровня сигнала в данной точке пространства; $|E_i(\theta, \varphi)|^2$ – достигнутое значение уровня сигнала в данной точке пространства.

Таким образом, имеется набор значений f_i , соответствующий набору координат в требуемой зоне обслуживания. Цель алгоритма – минимизировать значение функции $F(x)$. Последовательными итерациями подбирается значение параметров для достижения минимального значения целевой функции

$$F(\bar{x}) = \max \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), f_3(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})\}. \quad (5)$$

В качестве первой итерации берется исходное синфазное распределение решетки облучателей. Далее алгоритм рассчитывает КУ для каждой заданной точки и находит максимальное значение разницы между требуемым усилением и действительным $\Delta E = (|E(\theta, \varphi)_{\text{цель}, i}|^2 - |E_i(\theta, \varphi)|^2)$. Из набора ΔE находится та точка, в которой наблюдается максимальное расхождение началь-

ного состояния и требуемого (ΔE_{max}) и вычисляется градиент вектора $\left[\frac{\partial E}{\partial W_1}, \frac{\partial E}{\partial W_2}, \dots, \frac{\partial E}{\partial W_j} \right]^T = \nabla E$

в точке максимального расхождения. Далее заменяется вектор-параметр \mathbf{W} его новым значе-

нием $\mathbf{W}_1 = \mathbf{W}_0 \pm \alpha \nabla E$, где α – размер шага, задаваемый программно. Процесс повторяется до тех пор, пока $\|\mathbf{W}_1 - \mathbf{W}_0\| < \varepsilon$ (ε задается перед началом синтеза), т. е. пока разница между требуе-

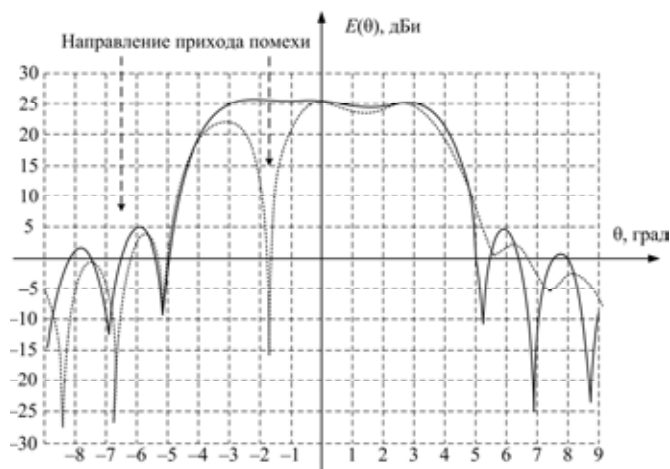


Рис. 3. Подавление в ГЗА помехи, действующей с направлений главного и первого бокового лепестков: сплошная линия – исходная ДН, прерывистая – ДН в результате адаптации

мым значением усиления и действительным значением усиления для каждой «цели» достигнет минимума. Количество итераций можно задавать программно, либо алгоритм сам прекратит свою работу при достижении минимума.

С использованием синтезированного алгоритма проведен расчет АФР кластера, состоящего из 7 облучателей. Расчет проводился для случая одной помехи в направлении главного лепестка ДН и одной помехи в направлении первого бокового лепестка, результаты приведены на рис. 3.

Таким образом, адаптивная многолучевая ГЗА с разработанным алгоритмом синтеза АФР обеспечивает формирование провала ДН в направлении главного лепестка ДН и в направлении боковых лепестков до минус 45–50 дБ, при этом наблюдается уменьшение уровня сигнала на 10 % – от общей ЗО и имеется незначительный перепад в уровне сигнала в главном лепестке (не более 0,3 дБ) за счет задания требования по уровню сигнала в ЗО, не подверженной воздействию помехи.

2. Алгоритм адаптации гибридно-зеркальной антенны в сложной помеховой обстановке

В исходном состоянии, при отсутствии помех, формируется 7 лучей на различных частотах, позволяющих исключить влияние лучей друг на друга. При превышении порога сигнал/шум (СШ) в одном из лучей запускается механизм адаптации. Далее перебором возможных вариантов АФР, заложенных в памяти системы, проверяется возможность подавить помеху. Поскольку в ГЗА каждому лучу антенны соответствует определенная ЗО, это позволяет априорно определить направление помехи в небольшой зоне, что сокращает время работы системы по подбору необходимых вариантов подавления помехи [4].

Варианты АФР заблаговременно рассчитываются исходя из нескольких положений «цели». Заложенные в память варианты АФР формируют провалы по гексагональной структуре в пределах главного лепестка ДН антенны по уровню минус 3 дБ. Количество вариантов от 7 до 37

(в зависимости от ширины ДН), что с большой долей вероятности позволит сформировать провал в направлении помехи.

В режиме сформированного кластера (адаптации) в пределах определенного периода времени (возможен любой период, задается программно) система опрашивает пороговое устройство на предмет превышения порогового значения СШ за период времени. Если превышение наблюдалось, то система сохраняет кластер и распределение на нем. Если превышения не было за заданный период, то система возвращается в исходный режим работы (неадаптивный). Это позволяет обеспечить устойчивость адаптивной системы к прерывистым помехам.

Для случая, когда адаптивная система не смогла обеспечить требуемый уровень подавления при стандартном расположении «целей» (по гексагональной структуре), алгоритм рассчитывает координаты положения помехи с учетом следующих рассуждений:

- «цели» для формирования нулей ДН расположены по гексагональной сетке. Координаты каждой «цели» для синтеза АФР известны и задаются программно;
- угловая ширина ДН, формируемая антенной, составляет значения $1 \times 1^\circ$ либо $2 \times 2^\circ$;
- для каждой ДН антенны задаются порядка 19 целей, что гарантирует близкое формирование нуля ДН относительно помехи;
- таким образом, из набора «целей» существует три, для которых будут получены наилучшие результаты по СШ;
- каждой из них будет получен свой уровень полезного сигнала + сигнал помехи. Находится максимальный и нормируются остальные два относительно него.

Рассмотрим два варианта: уровни сигнала одинаковы; после нормирования были получены значения 0,83 и 0,45.

Для случая, когда уровни сигнала одинаковы, то нуль ДН должен располагаться в центре равностороннего треугольника (рис. 4, а), каждому углу треугольника соответствует положение «цели». Так как соотношения сторон и углы известны исходя из координат «целей», то легко можно рассчитать координаты нуля ДН для подавления помехи.

Для второго варианта с неравными уровнями умножаем угол 30° на полученные значения для каждой «цели». Получаем значения 25 и 10° . Добавляем полученные углы к углам наклона

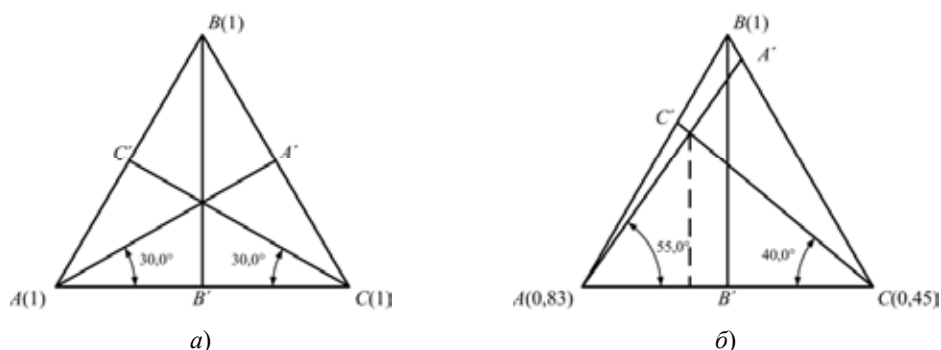


Рис. 4. Определение направления на источник помехи: а – уровни сигнала одинаковы; б – уровни сигнала составляют 0,83 и 0,45

прямых AA' и CC' соответственно (рис. 4, б). Пересечение прямых AA' и CC' даст координаты для формирования нуля ДН.

Таким образом, конечной целью работы системы является вычисление координаты помехи и синтез АФР облучающей решетки для ее подавления.

Выше был рассмотрен вариант подавления одной помехи, когда заранее заданные варианты АФР позволяют подавить помеху и обеспечить заданное значение СШ. Для варианта, когда система не смогла подобрать требуемое АФР, и случая с несколькими помехами данный вариант не подходит, так как системе адаптации необходимо будет самой рассчитывать необходимое распределение в решетке для подавления нескольких помех по алгоритму, приведенному в пункте 1.

Далее рассмотрим еще несколько вариантов помеховой обстановки.

Если несколько помеховых сигналов действуют с близких направлений, то система, используя один кластер и задавая различные варианты подавления сигнала, позволяет реализовать подавление нескольких помех одновременно. Если помехи разнесены на достаточный угол, то используется второй кластер. Для двух помех одновременно система первоначально формирует провал для главного лепестка ДН каждого канала, далее идет по гексагональной решетке. При соблюдении порога СШ для одного из каналов система сохраняет угловое положение главного лепестка ДН и продолжает перебор для второй помехи до достижения требуемого подавления. Для ускорения работы всей системы в целом при нахождении положения помехи одним из лучей информация о положении помехи записывается в память системы для работы алгоритма синтеза АФР остальных лучей. Это позволит в разы увеличить скорость работы системы в целом.

Кроме того, так как каждый луч адаптивной ГЗА, построенной по кластерной схеме, формирует провал независимо от остальных лучей, то для остальных лучей необходимо обеспечить подавление боковых лепестков ДН, на которые может воздействовать помеха.

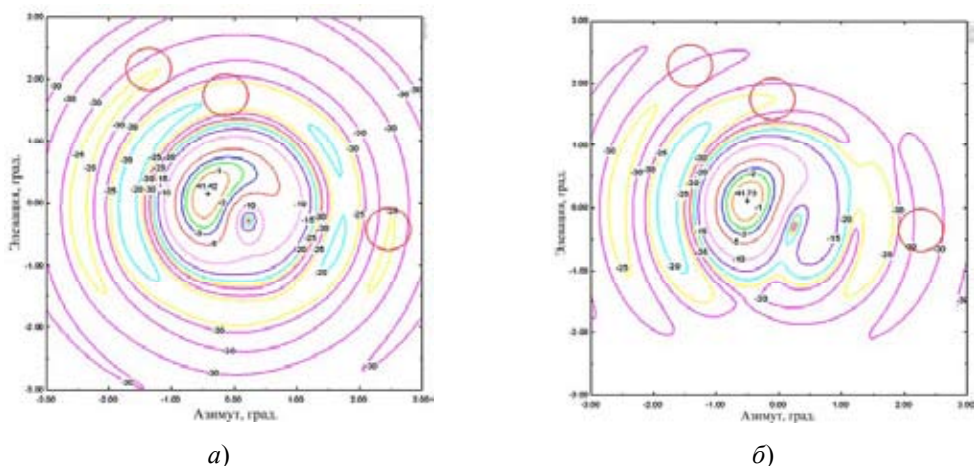


Рис. 5. Подавление трех боковых лепестков ДН центрального луча адаптивной ГЗА: а – исходная ДН; б – ДН после синтеза АФР и подавления боковых лепестков

Сделаем предположение для рассматриваемой семерки лучей, в частности для центрального луча № 1, что одновременно с подавленной помехой существует еще одна, положение которой соответствует боковому лепестку центрального луча.

Вторая помеха будет подавляться остальными лучами. В результате синтеза АФР и поиска помехи будут сформированы провалы в ДН и определено положение помехи. Информация о ее положении будет занесена в память системы. Далее для рассматриваемого центрального луча № 1 проводится синтез АФР для подавления бокового лепестка ДН в направлении помехи. На рис. 5 приведены результаты синтеза АФР и подавление трех боковых лепестков ДН.

Таким образом, из полученных результатов можно сделать вывод, что разработанные алгоритмы адаптации ГЗА позволяют подавлять одну помеху в пределах центрального лепестка ДН и до 3–4 помех в пределах боковых лепестков ДН антенны. При этом сохраняется уровень сигнала в остальной ЗО при подавлении 4 помех одновременно.

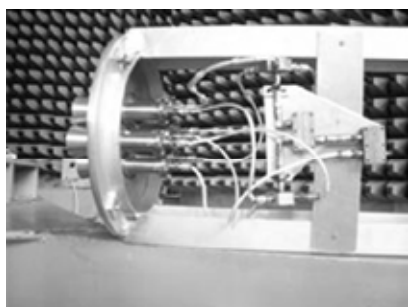
3. Экспериментальные исследования

Для экспериментальной проверки результатов моделирования и расчетов был создан макет адаптивной МЛА с облучающей системой из 7 конических рупоров (рис. 6, а). Макет состоит из рефлектора, облучателя и несущей конструкции.

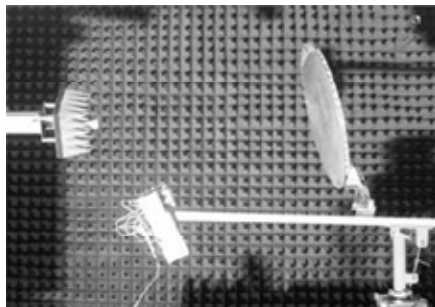
Измерения характеристик макета МЛА проводились на сверхширокополосном автоматизированном измерительно-вычислительном комплексе методом ближнего поля (рис. 6, б) для каждого облучателя отдельно, для 7-элементного кластера при равноамплитудном и синфазном распределении облучающей решетки (рис. 7) и в режиме подавления помехи (рис. 8).

Формирование провала в ДН кластера осуществлялось за счет формирования фазы 180° в одном из облучателей антенны.

Как видно из результатов измерения макета адаптивной МЛА, решетка из 7 конических рупоров, запитанных равноамплитудно и синфазно, формирует луч шириной $3 \times 3^\circ$, а при запитывании одного из рупоров противофазно обеспечивает подавление помехи на 20–25 дБ. При этом сохраняется уровень сигнала для остальной ЗО, что подтверждается результатами моделирования, измерениями макета ГЗА и соответствует предъявляемым требованиям к адаптивным антеннам.



а)



б)

Рис. 6. Модель семиэлементного кластера: а – внешний вид; б – измерение ДН в безэховой камере

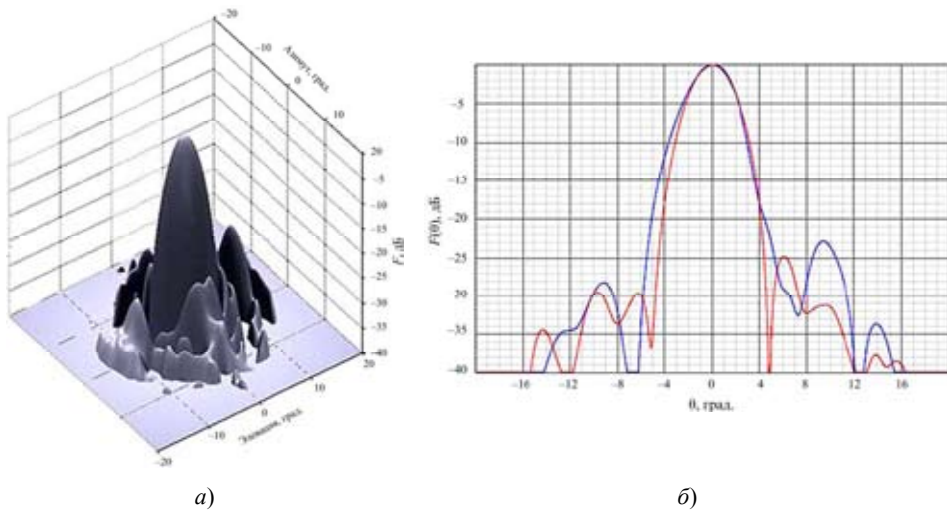


Рис. 7. ДН 7-элементной АР в исходном положении: *а* – объемная; *б* – сечение основными плоскостями

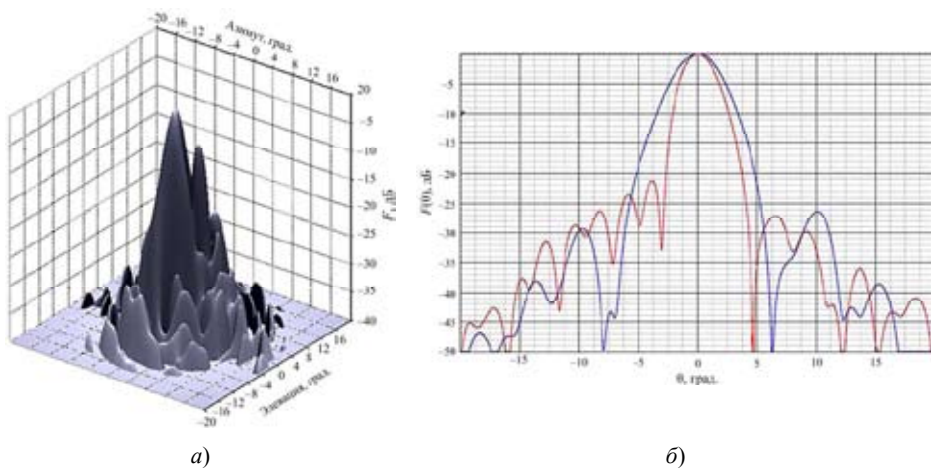


Рис. 8. ДН 7-элементной АР с противофазным запитыванием рупора № 5: *а* – объемная; *б* – сечение основными плоскостями

Заключение

Использование в качестве критерия в алгоритме синтеза АФР в условиях помех КУ антенны в заданных точках позволяет ограничить размеры целевой функции и длительность синтеза, при этом обеспечивает формирование провалов в ДН до минус 45–50 дБ при незначительном снижении уровне полезного сигнала. Предварительно рассчитанные варианты АФР позволяют существенно ускорить процесс адаптации АР.

Существенно упростить алгоритм синтеза АФР позволяет использование априорной информации о направлении помехи при адаптации к помехам, действующим по боковым лепесткам ДН, получаемой от тех лучей, где помеха действует по главному лепестку.

Таким образом, предложенное построение и алгоритмы адаптации многолучевой ГЗА позволяют реализовать современные требования к ССС с минимальными затратами.

Список литературы

- [1] Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
- [2] Тяпкин В.Н., Першин А.С., Дмитриев Д.Д., Мошкина Т.Г. // Вестник Сиб.ГАУ им. акад. М. Ф. Решетнева. 2012. Вып. 2 (42). С. 106–109.
- [3] Джунь В.И., Щестняк С.С. // Зарубежная радиоэлектроника. 1988. № 4. С. 3–15.
- [4] Першин А.С. // Радиолокация и радиосвязь: Материалы VI Всероссийской конференции. М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2012. Ч. 1. С. 58–62.
- [5] Першин А.С. // Радиолокация и радиосвязь: Материалы VI Всероссийской конференции. М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2012. Ч. 1. С. 76–79.

The Adaptive Algorithm Multibeam Antenna, Built on the Hybrid-Reflector Antenna

**Valeriy N. Tyapkin,
Dmitriy D. Dmitriev and Aleksandr S. Pershin**
*Siberian Federal University,
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

The adaptive multibeam antenna that is based on hybrid-reflector antenna with the reflector feed as the antenna array, which used an accelerated algorithm synthesis directivity diagram to suppress the designed noise, using as criteria the antenna directive gain at the given points, and which substantially limit the size of the objective function and duration of the synthesis. An experimental study of the proposed algorithms, and draw conclusions about the possibility of multibeam adaptive hybrid-reflector antennas.

Keywords: adaptation algorithm for noise, multibeam antenna, hybrid-reflector antenna.
