

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.67

ДИСТАНЦИОННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

© 2021 г. В. И. Гусевский^а, М. Д. Дупленкова^{а, б, *}, О. Н. Цветкова^а

^аОсобое конструкторское бюро Московского энергетического института, ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250 Российская Федерация

^бИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11, стр.7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: duplenkova@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.08.2020 г.

После доработки 18.09.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Рассмотрены проблемы надежности многоэлементных антенных устройств, а также вопросы, относящиеся к анализу искажений в неремонтопригодных условиях, построению алгоритмов дистанционного управления и коррекции антенных характеристик многоэлементных антенн. Предложен новый подход к разработке алгоритма восстановления исходных (проектных) диаграмм направленности в пределах плоских раскрытов. Обеспечение восстановления диаграммы направленности осуществляется при отсутствии априорной информации о характере деформации излучающей поверхности, без знания искаженного фазового распределения вдоль раскрыва, без использования дополнительной измерительной аппаратуры в непосредственной близости от рассматриваемой фазированной антенной решетки (ФАР). Представлены примеры восстановления диаграмм направленности деформированных ФАР.

DOI: 10.31857/S0033849421030062

ВВЕДЕНИЕ

Качество функционирования многоэлементных антенных устройств с электронным управлением, в частности плоских фазированных антенных решеток (ФАР) и активных фазированных антенных решеток (АФАР), во многом зависит от необходимой степени плоскостности излучающей поверхности и точной периодичности расположения излучающих элементов. Обычно стабильность их положения обеспечивается благодаря механической жесткости плоской конструкции, поддерживающей сотни антенных элементов. Использование жестких конструкций, часто выполняемых из специальных сплавов, чтобы избежать тепловых деформаций, приводит к усложнению устройства, увеличению массы и повышению стоимости изделия. Вместе с тем любая потеря жесткости конструкции может повлечь за собой значительное ухудшение характеристик системы в результате механических искажений из-за условий эксплуатации, среди которых тепловые искажения, неустойчивые аэродинамические нагрузки, такие как ветер и турбулентность, осадки, дополнительные ледовые или снежные нагрузки, механические вибрации и т.д. Поэтому повышение надежности многоэлементных антенных устройств, работающих в том числе в экстремаль-

ных условиях космического пространства, и решение проблем постепенной деградации их параметров в течение длительного периода эксплуатации до сих пор остаются одной из наиболее насущных задач создания образцов новой техники.

В связи с многосторонним характером этой проблемы в данной статье рассматриваются вопросы, относящиеся к анализу искажений в неремонтопригодных условиях, построению алгоритмов дистанционного управления и коррекции антенных характеристик многоэлементных антенн, прежде всего ФАР и АФАР. Для этого проведен анализ диаграмм направленности (ДН) бортовых антенных устройств. Акцент сделан на задаче дистанционного восстановления параметров многоэлементных ФАР за счет возможностей электронного управления фазой отдельных каналов.

1. ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время проблема восстановления ДН ФАР и АФАР, деформированных в результате внешних воздействий на излучающую поверхность, вызывает большой интерес.

Известны следующие способы уменьшения влияния структурной деформации на электрические свойства антенной решетки (АР). Одним из

них является методика механической компенсации, которая позволяет увеличить жесткость и прочность антенны [1, 2]. Другой способ состоит в том, что антенна оснащается датчиками для измерения абсолютных деформаций поверхности в реальном времени [3, 4]. Данные, предоставляемые датчиками, позволяют моделировать механическую форму деформированной структуры в целом; после этого компенсируется влияние указанных деформаций с помощью коррекции АФР. Еще один способ относится к методам активной компенсации, которые обычно компенсируют эффекты искажений путем прямого воздействия на АФР антенного устройства, чтобы изменить его диаграмму направленности без непосредственного измерения механических искажений. Такой подход представляется наиболее перспективным, так как он не требует дополнительных средств измерения (датчиков). В [5] авторы исследуют ДН АФАР после деформации излучающей поверхности, с помощью обратного преобразования Фурье [6], определяют искаженное (реальное) амплитудно-фазовое распределение. Разница между реальным и проектным АФР корректируется. В результате уровень боковых лепестков (УБЛ) деформированной АР снижается до проектного уровня. Однако авторы указанной работы не рассматривают вопрос восстановления направления главного лепестка ДН.

В [7] описан метод компенсации искажений в деформированной ФАР, который основан на фазовой перенастройке всех излучающих элементов с тем, чтобы восстановить направление главного лепестка ДН, при этом УБЛ остается прежним. Этот подход сравнивается с методами, основанными на оптимизации АФР для восстановления ДН по методу наименьших квадратов и с помощью спектрального анализа. Алгоритм на основе метода наименьших квадратов минимизирует разность между идеальной ДН и искаженной ДН в каждом направлении. В [7] отмечают эффективную компенсацию как ближних, так и дальних боковых лепестков ДН. Однако в работе отмечено, что метод наименьших квадратов требует продолжительных вычислений, особенно для многоэлементных АФАР. Метод компенсации на основе спектрального анализа имеет меньшую продолжительность вычислений и результаты, аналогичные методу наименьших квадратов, но он менее эффективен при высокой амплитуде искажений формы поверхности.

В [8] предлагается относительно простой метод калибровки и компенсации механических искажений излучающей поверхности бортовых ФАР. В указанном методе используется одна зондовая антенна, интегрированная на спутниковой ФАР, на том же спутнике установлена вынесенная измерительная приемная антенна. Анализируются сигналы, принимаемые зондовой антенной до и

после деформации поверхности. На основании этого анализа сделаны выводы о механическом смещении каждого излучающего элемента и определены фазовые добавки для коррекции ДН. Авторы фокусируются лишь на случае линейного наклона апертуры, обсуждения иных видов деформации не представлено. Недостатком предложенного метода является то, что для его применения требуется дополнительная зондовая антенна и вынесенная приемная антенна на спутнике.

Наряду с проблемами восстановления ДН, искаженных в результате механической деформации излучающей поверхности, в литературе широко обсуждается проблема восстановления ДН после отказа некоторой части излучающих элементов. В [9] предлагается способ перенастройки амплитудного и фазового распределений оставшихся элементов путем минимизации среднего УБЛ с помощью метода сопряженных градиентов. Описанный в [10] подход основан на том, что сигнал от бортовой антенны с некоторым количеством отказавших элементов поступает на приемную АР с цифровым формированием луча. Предлагается алгоритм, который позволяет сформировать в принимаемой АР необходимое АФР, для того чтобы скомпенсировать влияние отказавших элементов в бортовой антенне. В статье [11] метод, основанный на генетическом алгоритме, применен к исправлению ДН решетки с вышедшими из строя элементами. Введено понятие вектора решетки, где учитывается вес каждого элемента при формировании ДН. В процессе коррекции веса отказавших элементов обнуляются и посредством генетического алгоритма синтезируется новый набор амплитуд и фаз на исправных элементах; при этом критерием остановки итерационного процесса является минимизация разницы между проектной и восстановленной ДН. Хотя данные методы применялись для восстановления ДН, искаженной в результате выхода нескольких излучающих элементов из строя, они также могут быть эффективно использованы для компенсации деформированной поверхности антенны.

Обратим внимание, что описанные выше подходы к восстановлению ДН принадлежат к методам активной компенсации, т.е. они применимы только к активным ФАР.

Метод фазовой коррекции предложен в [12]. При данном способе на первом этапе для каждого антенного элемента случайным образом генерируется некоторая фазовая добавка. С помощью дополнительной эталонной антенны определяется значение коэффициента усиления ФАР с фазовой коррекцией, после чего измеренное значение коэффициента усиления (КУ) сравнивается с проектным. Если условие сходимости не выполнено, новое значение фазового распределения определяется с помощью итерационного процесса, со-

ставляющего суть генетического алгоритма. Следует отметить такие существенные особенности данного метода, как необходимость использования дополнительной эталонной бортовой антенны для анализа реализованного коэффициента усиления в процессе каждой итерации; метод ориентируется только на величину КУ в максимуме излучения и не учитывает такие существенные параметры восстанавливаемой ДН, как ориентацию направления главного луча ДН, ширину главного луча ДН, уровень боковых лепестков и т.д.; на первом этапе значения фазовых сдвигов на каждом элементе генерируется случайным образом без анализа искажений ДН ФАР, что приводит к значительному увеличению количества итераций при поиске компенсирующих фазовых добавок.

Предлагаемый в данной статье способ решает задачу восстановления ДН методом фазовой коррекции, т.е. он подходит не только для активных, но и для пассивных ФАР, что существенно расширяет область его применимости по сравнению с работами, перечисленными выше. Обеспечение восстановления ДН осуществляется при отсутствии априорной информации о характере деформации излучающей поверхности, без знания искаженного фазового распределения вдоль раскрыва, без использования дополнительной измерительной аппаратуры в непосредственной близости от рассматриваемой ФАР. Задача восстановления ДН решается лишь на основе знания проектных параметров ФАР и измеренной деформированной ДН.

2. МЕТОД АПЕРТУРНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПОЛИНОМОВ

В основе предлагаемого подхода к разработке алгоритма восстановления исходных (проектных) ДН в пределах плоских раскрывов произвольной формы лежит метод апертурных ортогональных полиномов (АОП) [13–15]. Особенность этого метода состоит в том, что структура решения интегрального уравнения для амплитудно-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля на плоском раскрыве в соответствии с теоремой эквивалентности [16] опирается на известное представление векторных потенциалов через интегральные выражения функции Грина свободного пространства, умноженного на векторную функцию АФР поля. При этом используются ортогональные представления АФР поля в пределах плоского раскрыва, отвечающие в задачах фазового синтеза весовой функции, совпадающей с известной функцией амплитудного распределения поля и удовлетворяющей условиям Дирихле на границе раскрыва произвольной формы.

В рамках данного метода фазовое распределение представляется отрезком обобщенного ряда

Фурье по ортогональным полиномам с неизвестными коэффициентами C_{nm} :

$$\Phi(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{nm} P_{nm}(x, y). \quad (1)$$

В соответствии с известными методами ортогонализации [17] будем считать, что набор ортогональных полиномов $P_{nm}(x, y)$, порожденный функцией амплитудного распределения поля $\rho(x, y)$, задан.

Тогда для плоского раскрыва областью $\Omega(x, y)$ выражение для диаграммы направленности имеет вид

$$f(\theta, \varphi) = \iint_{\Omega} \exp(-ik \sin \theta (x \cos \varphi + y \sin \varphi)) \times \exp\left(i \sum_n \sum_m C_{nm} P_{nm}(x, y)\right) \rho(x, y) dx dy, \quad (2)$$

где C_{nm} – коэффициенты ортогональных полиномов, $\rho(x, y)$ – амплитудное распределение (весовая функция процесса ортогонализации) поля в раскрыве.

Свойства ортогональности фазовых гармоник в антенном раскрыве обеспечивают взаимную независимость отдельных фазовых гармоник. В соответствии с [18] первые гармоники фазового распределения оказывают максимальное влияние на форму ДН, положение главного луча ДН, и уровень первых боковых лепестков, причем 1-я гармоника влияет на ориентацию главного лепестка, 2-я на ширину главного лепестка и т.д.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПЛОСКОГО РАСКРЫВА

Предлагаемый способ восстановления диаграммы направленности, искаженной по причине случайных деформаций излучающей поверхности ФАР, основан на известном в теории ФАР фазовом синтезе ДН путем управления и коррекции фазового распределения электромагнитного поля в раскрыве [19, 20]. С использованием упомянутых методов строится энергетический функционал ФАР, характеризующий степень искажения ДН в заданном диапазоне углов по сравнению с проектным при наличии фазовых искажений электромагнитного поля в антенном раскрыве. В рамках предлагаемого способа мы определяем фазовое распределение $\Phi(x, y)$ в раскрыве, отвечающее деформированной ДН, а затем, сравнивая его с проектным $\Phi_0(x, y)$, определяем необходимые дополнительные фазовые сдвиги для каждого элемента и устанавливаем их с помощью управляемых фазовращателей. При реализации предлагаемого способа известными величинами являются проектные параметры ФАР $\rho_0(x, y)$ и $\Phi_0(x, y)$ – соответственно амплитудное и фазовое распределение

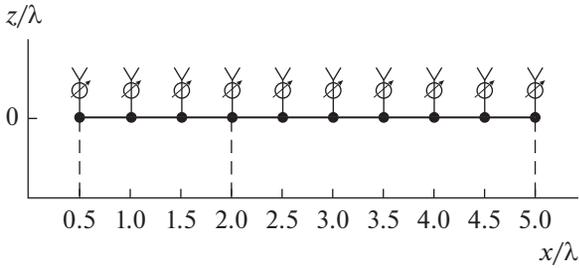


Рис. 1. Структурная схема недеформированной ФАР.

напряженности поля вдоль раскрыва, проектная ДН $f_0(x, y)$, а также $f(\theta, \varphi)$ – ДН, искаженная в результате деформации излучающей поверхности и измененная в процессе контрольных процедур.

Для определения дополнительных фазовых сдвигов используется следующая последовательность действий.

1. Исходя из требований технического задания, определяют требования к восстановленной ДН. На практике, как правило, не требуется полного совпадения восстановленной ДН с исходной [7, 11, 21], обычно требования к восстановленной ДН ограничиваются величиной КУ, расширением главного лепестка, УБЛ.

2. Представляют неизвестное фазовое распределение $\Phi(x, y)$ напряженности поля вдоль деформированного раскрыва в виде (1) разложения в ряд Фурье по ортогональным полиномам $P_{nm}(x, y)$, где C_{nm} – неизвестные коэффициенты Фурье фазового распределения напряженности поля вдоль деформированного раскрыва.

3. Переходят к конечному представлению фазового распределения напряженности поля вдоль деформированного раскрыва

$$\Phi(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{nm} P_{nm}(x, y), \quad (3)$$

причем количество гармоник на первом этапе выбирается в соответствии с [18], на практике обычно достаточно пяти–десяти гармоник, тогда выражение для ДН, которую формирует распределение фазы напряженности поля $\Phi(x, y)$, можно представить в виде

$$f_p(\theta, \varphi) = \int_{\Omega} \exp(ik \sin \theta (x \cos \varphi + y \sin \varphi)) \times \exp\left(i \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{nm} P_{nm}(x, y)\right) \rho(x, y) dx dy, \quad (4)$$

4. Минимизируя функционал

$$I = \min_{C_{nm}} \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} (f(\theta, \varphi) - f_p(\theta, \varphi))^2 d\theta d\varphi, \quad (5)$$

находят значения C_{nm} . Необходимо отметить, что при определении неизвестных коэффициентов Фурье C_{nm} в качестве первого приближения целесообразно принимать коэффициенты обобщенного ряда Фурье C_{0nm} разложения функции $\Phi_0(x, y)$, полученные следующим образом:

$$C_{0nm} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Phi_0(x, y) \rho(x, y) P_{nm}(x, y) dx dy. \quad (6)$$

Также следует отметить, что на этапе определения значений C_{nm} , анализируя форму диаграммы направленности $f(\theta, \varphi)$, возникшей в результате внешних воздействий на ФАР при эксплуатации, можно качественно отмечать наличие следующих искажений: смещение ориентации главного луча ДН, расширение главного луча ДН, размытие нулей ДН, несимметричные искажения боковых лепестков, и в соответствии с [18] делать выводы о том, какие гармоники имеют максимальное влияние, т.е. какие $(C_{nm} - C_{0nm})$ имеют максимальную величину.

5. Вычисляют $\Phi(x_r, y_r)$ – значения $\Phi(x, y)$ в точках размещения антенных элементов под номерами r , где $r = 1, \dots, K$, вычисляют $\Delta\Phi_r = \Phi_0(x_r, y_r) - \Phi(x_r, y_r)$ – значения фазовых искажений в апертуре, возникших в результате воздействий на ФАР при эксплуатации, и с помощью управляемых фазовращателей в антенных элементах под номерами r добавляют фазовый сдвиг $\Delta\Phi_r$, где $r = 1, \dots, K$, что обеспечивает восстановление $f_0(\theta, \varphi)$ – проектной ДН.

После этого проводят контрольный расчет восстановленной ДН с учетом добавленных фазовых сдвигов

$$f_{p1}(\theta, \varphi) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho(x, y) \times \exp(i\Phi(x, y) + i\Delta\Phi(x, y)) \times \exp(ikL/2(x \cos \varphi \sin \theta + y \sin \varphi \sin \theta)) dx dy \quad (7)$$

и сравнивают с проектной ДН $f_0(\theta, \varphi)$.

Если расчетная восстановленная ДН не удовлетворяет заданным требованиям, то следует увеличить диапазоны суммирования M и N и повторить процедуру подбора C_{nm} .

4. ПРИМЕРЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОГО РАСКРЫВА

Для иллюстрации данного способа восстановления ДН, искаженной по причине случайных деформаций излучающей поверхности, рассмотрим следующий пример: равномерная антенная решетка состоит из 10 элементов (рис. 1), длина волны $\lambda = 30$ см, межэлементное расстояние $\lambda/2$,

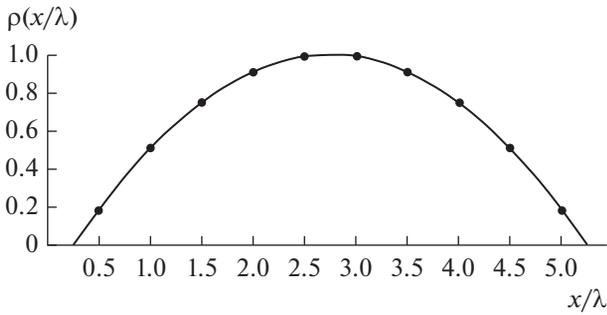


Рис. 2. Нормированное амплитудное распределение.

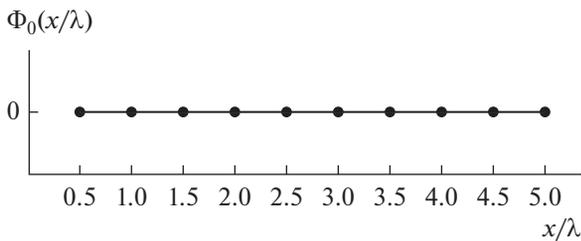


Рис. 3. Проектное фазовое распределение ФАР.

длина решетки $L = 1.5$ м. Проектные амплитудное $\rho_0(x)$ и фазовое $\Phi_0(x)$ распределения такой решетки представлены на рис. 2 и 3 соответственно, ДН $f_0(x)$ – на рис. 4 (кривая 1). В результате случайной деформации излучающей поверхности ФАР исказилась, как показано на рис. 5 (смещение элементов в долях длины волны отложено по оси z). Диаграмма направленности деформированной ФАР $f(\theta)$ представлена на рис. 4 (кривая 2).

Требования к восстановленной ДН: снижение коэффициента усиления не более чем на 0.001 дБ, расширение главного лепестка 0.1 град, превышение УБЛ не более чем на 0.1 дБ. Анализируя искаженную ДН $f(\theta)$, отмечаем наличие следующих искажений: смещение главного луча ДН, расширение главного луча ДН, несимметричные искажения боковых лепестков. Выбираем диапазон суммирования в (2) $M = 5$.

Минимизируя функционал (5), определяем $C_1 \dots C_5$, значения которых составляют $C_1 = 0.502$, $C_2 = 0.088$, $C_3 = 0.059$, $C_4 \rightarrow 0$, $C_5 \rightarrow 0$, и после этого формируем множество $\Phi(x_r)$:

$$\Phi(x) = 0.502x + 0.088x^2 + 0.059x^3,$$

учитывая, что $\Phi_0(x) = \text{const}$, $\Delta\Phi_r = \Phi(x_r)$.

Проводим контрольный расчет $f_{p1}(\theta)$ по (7) (см. рис. 4, кривая 3), сравниваем ее с проектной ДН $f_0(\theta)$ и убеждаемся, что требования к восстановленной ДН выполнены. Поэтому дальнейшего расширения диапазона суммирования не требуется.

Таким образом, мы показали, что для восстановления ДН в данном примере в пределах заданных допусков достаточно использовать три гармоники: C_2 (компенсация ширины главного лепестка ДН), C_3 (коррекция первых боковых лепестков) и C_1 (коррекция смещения главного лепестка ДН).

В качестве второго примера восстановления ДН, искаженной по причине случайных деформаций излучающей поверхности, рассмотрим искажение поверхности, показанное на рис. 6 (по оси z отложено смещение элементов решетки в

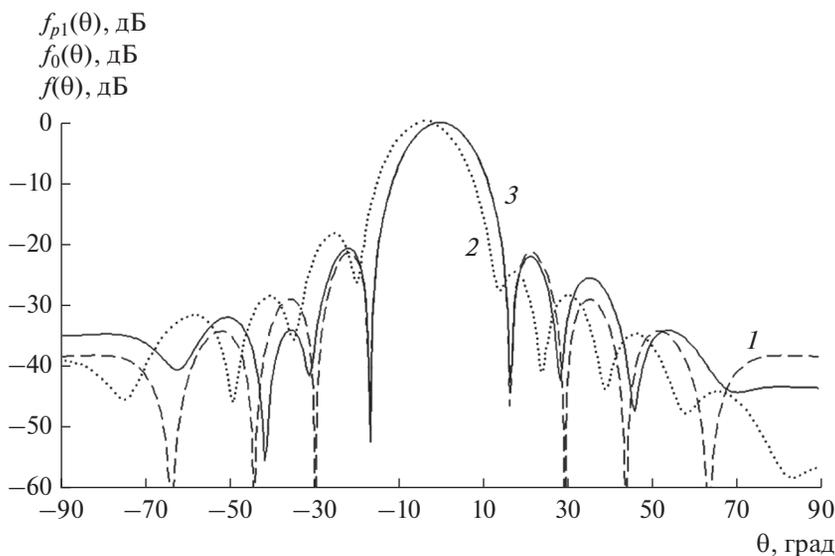


Рис. 4. Нормированная диаграмма направленности (пример 1): 1 – проектная, 2 – испорченная, 3 – восстановленная с использованием гармоник C_1 , C_2 и C_3 .

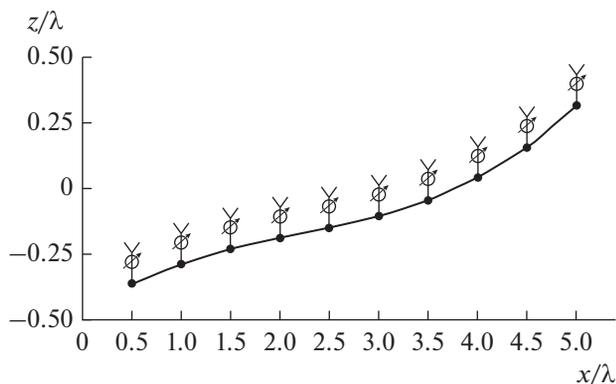


Рис. 5. Структурная схема деформированной ФАР (пример 1).

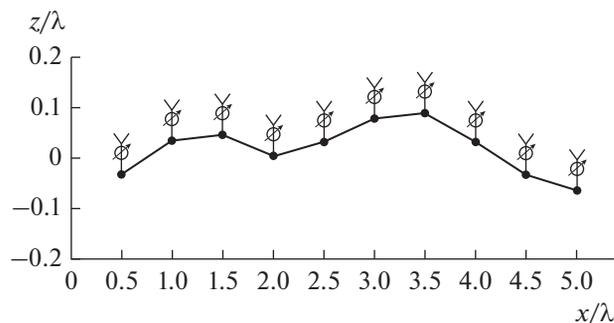


Рис. 6. Структурная схема деформированной ФАР (пример 2).

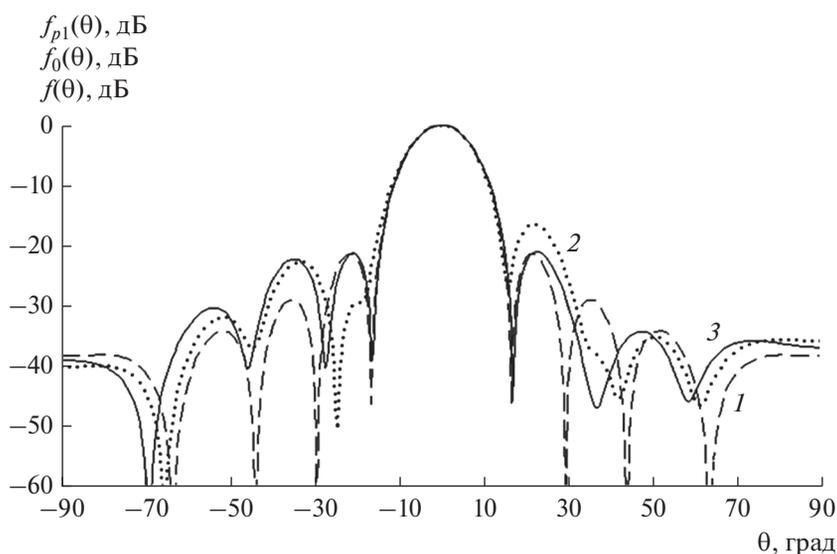


Рис. 7. Нормированная диаграмма направленности (пример 2): 1 – проектная ДН, 2 – испорченная ДН, 3 – восстановленная ДН с использованием гармоник C_2 , C_3 и C_5 .

долях волны). Требования к восстановленной ДН остались прежними.

Расчеты показали, что для восстановления ДН (рис. 7, кривая 2) в пределах заданных допусков достаточно использовать три гармоники: C_2 (компенсация ширины главного лепестка ДН), C_3 (коррекция первых боковых лепестков) и C_5 (коррекция первых и вторых боковых лепестков).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинствами описанного метода является то, что задача восстановления ДН решается лишь на основе знания проектных параметров ФАР и деформированной ДН. Обеспечение восстановления ДН осуществляется при отсутствии априорной информации о характере деформации излучающей поверхности, без знания искаженного

фазового распределения вдоль раскрыва, без использования дополнительной измерительной аппаратуры в непосредственной близости от рассматриваемой ФАР. Также важным достоинством предложенного метода является быстрая сходимость. За счет того, что положение и ширина главного луча и уровень первых боковых лепестков определяются гармониками низших порядков, приемлемое восстановление достигается при использовании первых трех–пяти гармоник. Еще одна из причин хорошей сходимости метода – использование нулевого приближения при поиске неизвестных коэффициентов C_{nm} , которое рассчитывается исходя из проектных параметров решетки. Однако следует отметить, что задача построения метода дистанционного восстановления ДН решена в данной работе лишь частично, так как проблема сходимости алгоритма восстановления

ДН не исследована. По этой причине вопрос о границах применимости метода остается открытым и может быть предметом для дальнейших исследований. Предлагаемый метод может стать альтернативой широко распространенным в настоящее время методикам восстановления на основе генетического алгоритма и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mailloux R.J.* // Proc. IEEE. 1982. V. 70. № 3. P. 246.
2. *Jasik H.* Antenna Engineering Handbook. N.Y.: McGraw-Hill Book Corp., 1961. Ch. 32. P. 35.
3. *Schippers H., van Tongeren J.H., Knott P. et al.* // Proc. 2007 IEEE Aerospace Conf. 3–10 Mar. 2007. Big Sky. N.Y.: IEEE, 2007. P. 352866.
4. *Lesueur G., Gilles H., Girard S., Merlet T. et al.* // Photonics Technol. Lett. 2008. V. 20. № 21.
5. *Svensson B., Lanne M., Wingard J.* // Proc. 4 th Europ. Conf. on Antennas and Propagation. Barcelona. 12–16 Apr. 2010. N.Y.: IEEE, 2010. Article № 781.
6. *Svensson B., Eriksson H.* // Proc. 3 rd Europ. Conf. on Antennas and Propagation EUCAP 2009. Berlin. 23–27 Mar. 2009. N.Y.: IEEE, 2009. P. 1213.
7. *Lesueur G., Caer D., Merlet T., Grangier P.* // Proc. 3rd Europ. Conf. on Antennas and Propagation EUCAP 2009. Berlin. 23–27 Mar. 2009. N.Y.: IEEE, 2009. P. 1578.
8. *Takahashi T., Nakamoto N., Ohtsuka M. et al.* // IEEE Trans. 2012. V. AP-60. № 3. P. 1362.
9. *Peters T.J.* // IEEE Trans. 1991. V. AP-39. № 10. P. 1497.
10. *Mailloux R.J.* // IEEE Trans. 1996. V. AP-44. № 12. P. 1543.
11. *Yeo B.-K., Lu Y.* // IEEE Trans. 1999. V. AP-47. № 5. P. 823.
12. *Son S.H., Eom S.Y., Jeon S.I. et al.* // IEEE Trans. 2008. V. AP-56. № 8. P. 2751.
13. *Фельд Я.Н.* // РЭ. 1959. Т.4. № 2. С. 2004.
14. *Гусевский В.И.* // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи совр. радиоэлектроники. 2001. № 3. С. 50.
15. *Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Гусевский В.И.* Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн. М.: Сайнс-Пресс, 2005.
16. *Марков Г.Т., Чаплин А.Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. М.: Радио и связь, 1983.
17. *Суетин П.К.* Ортогональные многочлены по двум переменным. М.: Наука, 1988.
18. *Гусевский В.И., Цветкова О.Н.* // Антенны. 2017. № 12. С. 8.
19. *Минкович Б.М., Яковлев В.П.* Теория синтеза антенн. М.: Сов. радио, 1969.
20. *Бондарев В.Е., Гусевский В.И., Дуленкова М.Д. и др.* Способ адаптивного подавления пространственных помех. Пат. РФ № 2488928. Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 21 от 27.07. 2013.
21. *Zainud-Deen S.H., Ibrahim M.S., Sharshar H.A., Ibrahim S.M.M.* // Proc. 21st Nat. Radio Sci. Conf. (NRSC2004) (NTI). Cairo. 16–18. Mar. 2004. N.Y.: IEEE, 2004. P. B-7.