

УДК 621.396.677

**Н.В. Шацкий, С.А. Головань, А.Г. Стрижак, В.Н. Шацкий**

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ  
МАЛОЭЛЕМЕНТНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ НАЛИЧИИ ОШИБОК  
РЕАЛИЗАЦИИ ФАЗЫ В ЕЕ КАНАЛАХ**

*Рассматривается фазированная антенная решетка (ФАР) как многоканальная система с квазиизбыточностью, состоящая из конечного множества приемных и передающих элементов (излучателей), соответствующим образом расположенных в пространстве. Это ФАР с электрическим сканированием, реализуемым при помощи дискретных устройств управления (например, фазовращателей). Проведен анализ достоинств и недостатков дискретных и аналоговых устройств управления. Предложена модель антенной решетки с электрическим сканированием при наличии отказов или ошибок реализации амплитуды и фазы в ее каналах. Получены аналитические зависимости, позволяющие учесть влияние отказов в каналах управления амплитудой и фазой на ряд характеристик ФАР. В качестве примера рассмотрена цилиндрическая антенная решетка с излучателями в виде ориентированных параллельно образующей идеально проводящего кругового цилиндра магнитных диполей (продольных щелей). Показана возможность использования предлагаемого аппарата для системы управления техническим состоянием антенны и улучшения характеристик излучения ФАР при флуктуациях различной природы путем адекватного выбора алгоритма реализации амплитудно-фазового распределения при использовании дискретных устройств управления.*

*Фазированная антенная решётка; аналоговые и дискретные устройства; локализация неисправностей; многофункциональность; модель; область отказовых состояний; случайное событие.*

**N.V. Shatsky, S.A. Golovan, A.G. Strizhak, V.N. Shatsky**

**SYSTEM FOR CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF SMALL  
ELEMENT PHASED ARRAYS BASED ON THE MODEL OF THE ANTENNA  
ARRAY IF THERE ARE ERRORS DURING THE IMPLEMENTATION PHASE  
IN ITS CHANNELS**

*Considered a phased array (PAR) as a multichannel system with structural redundancy, consisting of a finite set of transmitting and receiving elements (radiators), appropriately located in space. This phased array with electrically scanned implemented using discrete control devices (eg, phase shifters). An analysis of the advantages and disadvantages of digital and analog controls. A model of the antenna array with electrically scanned in the presence of failures or implementation errors in amplitude and phase of its channels. Analytical dependences, allowing taking into account the effect of failures in the control channels amplitude and phase characteristics of phased series. As an example, the cylindrical array with radiators in the form of oriented parallel forming a perfectly conducting circular cylinder of magnetic dipoles (longitudinal slots). The possibility of using the proposed unit for the control system and the technical condition of the antenna radiation characteristics improve PAR fluctuations at different nature by an adequate choice of the algorithm implementation amplitude-phase distribution with discrete control devices.*

*Phased antenna array; analog and discrete devices; fault isolation; multifunctionality; model; failures; random event.*

Все возрастающие требования к радиотехническим системам связи и локации, точности и достоверности мониторинга окружающего пространства как в военной области, так и в интересах решения мирных задач обуславливают важность разработки специальных информационно-управляющих систем различного базирования. Комплексы на основе таких систем должны оперативно, непрерывно,

независимо от погодных условий, условий местности, геодезии объектов, на больших удалениях и при различной помеховой обстановке обеспечить сбор информации, передачу, транслирование управляющих сигналов до потребителей, а также получение сведений о функциональном состоянии интересующих районов и реализацию этих сведений в виде конкретных управляющих воздействий с привлечением большого числа исполнительных систем. Необходимость значительного повышения эффективности и снижения стоимости жизненного цикла предопределила разработку на основе таких систем многофункциональных информационно-управляющих комплексов, что предполагает расширение числа используемых связанных, информационных и управленческих режимов. Требования снижения затрат при возрастающих сложности и объеме решаемых задач выдвигают необходимость поиска новых альтернативных путей управления техническим состоянием последних на всем жизненном цикле этих комплексов [1–3].

Для некоторых комплексов актуальным остается использование в качестве антенны – фазированной антенной решетки (ФАР) различной геометрии [4]. Использование ФАР позволяет реализовать многофункциональный режим работы, при котором обеспечивается одновременное функционирование каналов ретрансляции нескольким абонентам, сопровождение подвижных объектов (целей) и т. п. При этом возможно формирование многолучевых диаграмм направленности (ДН), ДН с изменяемыми формой, шириной и положением в пространстве, лучей с разным энергетическим потенциалом.

Известно, что ФАР является многоканальной системой с избыточностью, состоящей из конечного множества приемных и передающих элементов (излучателей), соответствующим образом расположенных в пространстве [4]. Иными словами, ФАР представляет собой совокупность совместно действующих устройств, обеспечивающих управление распределением энергии излучаемого или принимаемого радиосигнала в пространстве. Управление характеристиками решетки может осуществляться как изменением фазы, так и амплитуды, в любых их сочетаниях (как отдельно фазовое управление, так и амплитудно-фазовое) в каналах АР. Поле в раскрыве антенны определяет ряд важнейших характеристик ФАР, основной из которых является диаграмма направленности (ДН) (по полю и по мощности) и связанные с ней параметры [4, 5]. Ошибки реализации фазовых набегов, полученных по результатам синтеза, в каналах ФАР не только изменяют саму ДН антенны, но также влияют на связанные с ней параметры. Наличие ошибок при реализации амплитудно-фазового распределения (АФР) на раскрыве ФАР приводит к существенному ухудшению направленных свойств, особенно при формировании ДН с низким уровнем бокового излучения. Искажения фазового распределения на раскрыве антенны могут привести к увеличению уровня бокового излучения, уходу направления главного максимума ДН, изменению крутизны характеристики и т. д.

Известно, что практически любое инженерное устройство имеет целью своего функционирования то или иное преобразование энергии или преобразование информации. В электронных устройствах существуют два основных способа обработки информации: аналоговый и цифровой. Также известно, что причиной перехода от аналоговых технологий к цифровым стала потребность, прежде всего, в повышении качества информации, хранения, а также автоматизации процесса управления, что является актуальным при создании многофункциональных информационно-управляющих систем. В свою очередь необходимо помнить, что иногда возникает вынужденная необходимость использования только аналоговых устройств.

При аналоговом способе обработки информации каждой переменной величине в системе ставится в соответствие один из плавно меняющихся параметров определенного участка электрической цепи (ток, напряжение, частота и т.д.). Принципиальной особенностью аналогового способа обработки информации является возможность плавного изменения величин электрических сигналов практически мгновенно.

При цифровом способе обработки информации каждой переменной величине в системе ставится в соответствие ее цифровой код. Функциональные зависимости в системе реализуются путем непосредственного решения уравнений системы теми или иными численными методами по заранее заложенной программе. Цифровые устройства по сравнению с аналоговыми обладают неоспоримыми преимуществами по массогабаритным показателям. Незначительные габариты и малый вес цифровых устройств приводят к упрощению процесса подключения, снижению затрачиваемого на это времени и упрощению обслуживания в процессе эксплуатации, что, в конечном итоге, приводит к снижению финансово-экономических критериев использования последних.

Одним из весомых, на современном этапе, достоинств цифровых устройств является возможность применения беспроводных технологий. Кроме того, неоспоримым преимуществом использования цифровых технологий является возможность осуществлять контроль за действием системы, внесение корректировок в параметры её работы и возможность сопряжения с вычислительной системой, а при необходимости обеспечение доступа к данным на любом расстоянии в любой момент времени.

Для создания системы управления состоянием рассматриваемых объектов не маловажным фактором является возможность применения в цифровых системах специального программного обеспечения, которое осуществляет постоянную проверку работоспособности всего оборудования. Этот автоматический мониторинг способствует оперативному выявлению и оперативному устранению последствий любых изменений в работе.

Современные тенденции применения многофункциональных информационно-управляющих систем, относящихся к большим системам, требуют оснащения настраиваемой функцией искусственного интеллекта, что существенно облегчает работу операторов, что в свою очередь актуально для цифровых систем.

Наконец, преимуществом цифровых устройств является возможность хранения данных на компактных цифровых носителях, позволяющих оперативно находить требующуюся информацию и, используя методы анализа и обработки накапливать и обобщать по группам для дальнейшего использования, например, в едином пространстве промышленного проектирования комплексов и систем.

Также при наличии разрядности, большей, чем 14 бит, цифровая система не уступает, но и превосходит по точности аналоговую. Это связано, в первую очередь, с тем, что параметры цифровой системы не изменяются с течением времени и не подвержены действию таких внешних факторов, как температура, влажность и т.п., что в большой степени присуще практически всем аналоговым системам. Следует отметить, недостаток цифровых систем по параметрам быстродействия, и, в частности, по области устойчивости и полосе пропускания, связанных с последовательным во времени выполнением команд. Однако временные параметры цифровых систем не изменяются с течением времени, но неуклонно минимизируется время выполнения команды.

Таким образом, широкое использование цифровых устройств управления в каналах АР вызвано рядом эксплуатационных преимуществ (малым энергопотреблением, возможностью управления, легкостью «снятия» параметров, широкими возможностями в оптимизации управления и т.д.).

**Постановка задачи и цели исследования.** При реализации синтезированной амплитудно-фазового распределения в ФАР с использованием дискретных устройств управления фазой – фазовращателей (ФВ) принципиальным является вопрос обеспечения наиболее точного соответствия дискретного АФР заданному. Кроме того, исследования вопросов дискретизации распределений в каналах ФАР на данном уровне развития методов синтеза, микропроцессорных элементов и языков программирования позволяет рассматривать изменения способов реализации фазы в каналах последней как один из возможных вариантов «борьбы» с последствиями отказов, а иногда и преднамеренных и непреднамеренных помех, что выдвигает на новый уровень данный вопрос и позволяет использовать его при построении перспективных систем управления техническим состоянием ФАР комплексов специального назначения.

В связи с этим возникает необходимость получения основных соотношений, описывающих ДН системы излучателей при реализации заданного АФР, имеющих дискретный характер, и исследование основных закономерностей изменения параметров ДН при различных вариантах дискретизации фазового распределения в каналах АР [5].

**Модель ФАР с отказами и ошибками реализации АФР.** Рассмотрена система из  $M$  излучателей, диаграмма каждого из которых описывается комплексной функцией, вида

$$\bar{\mu}_m(\theta, \varphi) = \bar{\theta}\mu_m^\theta(\theta, \varphi) + \bar{\varphi}\mu_m^\varphi(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где  $\bar{\mu}_m^\theta(\theta, \varphi)$  и  $\bar{\mu}_m^\varphi(\theta, \varphi)$  – соответственно  $\theta$  и  $\varphi$  компоненты диаграммы направленности одиночного излучателя. Выражение для ДН такой системы имеет вид

$$\bar{F}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M A_m \exp(i\varphi_m) \bar{\mu}_m(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где  $A_m$  и  $\varphi_m$  – соответственно амплитуда и фаза тока возбуждения в  $m$ -м излучателе ( $m = \overline{1, M}$ ). Пусть для управления фазой в каждом из  $M$  каналов используется  $K$  – разрядный ФВ (число секций в каждом канале АР одинаково).

С учетом возможных ошибок соответствующих устройств управления в каналах выражение для ДН принимает вид

$$\bar{F}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M (A_{0m} + \Delta a_m) \exp[i(\varphi_{0m} + \Delta\psi_m)] \bar{\mu}_m(\theta, \varphi), \quad (3)$$

в котором  $A_{0m}$  и  $\varphi_{0m}$  – номинальные значения амплитуды и фазы в  $m$ -м канале ФАР, а  $\Delta a_m$  и  $\Delta\psi_m$  – ошибка реализации (установки) амплитуды возбуждения и соответственно фазы в  $m$ -м канале. При дискретном управлении амплитудой и фазой соответствующие ошибки в  $m$ -м канале равны

$$\Delta a_m = \prod_{n_m} \delta a_{n_m}, \quad (4,а)$$

$$\Delta\psi_m = \sum_{k_m} \delta\psi_{k_m}, \quad (4,б)$$

где  $\delta a_{n_m}$  ( $\delta\psi_{k_m}$ ) – ошибка управления амплитудой (фазой), обусловленная отказом  $n_m$ -й ( $k_m$ -й) секции аттенюатора (фазовращателя) в  $m$ -м канале ФАР, индекс  $n_m$  ( $k_m$ ) принимает значения, совпадающие с номерами вышедших из строя секций в  $m$ -м канале ФАР. Значения ошибок управления определяются конкретным исполнением дискретных устройств управления. Так как в антенных решетках допуска-

ются различные виды управления, то предположим, что появления рассматриваемых амплитудных и фазовых ошибок являются несовместными событиями и их взаимной корреляцией можно пренебречь.

Исследование статистики поля ФАР проводилось только для фазовых ошибок, а выражение для ДН такой системы принимает вид

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M A_m \exp[i(\varphi_{0m} + \Delta\psi_m)] \vec{\mu}_m(\theta, \varphi). \quad (5)$$

Дисперсия значений амплитуд (фаз) токов в каналах ФАР зависит от типа используемого устройства управления. При использовании устройств лестничного типа, для которых  $\delta a_1 = \delta a_2 = \dots = \delta a_N = c/N$ , где  $c$  – любое положительное число, ( $\delta\psi_1 = \delta\psi_2 = \dots = \delta\psi_K = 2\pi/K$ ), величина дисперсии равна:

$$\sigma_a^2 = ((\delta a)^2)^{N-N_1} q(1-q)^{N-1} \left[ \frac{(N-2Nq-c^2)qc + N(N-c)}{c^2} + 1 - 4N(1-q) \right]; \quad (6)$$

– для амплитудных ошибок

– для фазовых ошибок

$$\sigma_\psi^2 = \frac{4\pi^2}{K} q(1-q)^{K-1}. \quad (7)$$

При применении устройств бинарного типа, для которых  $\delta a_n = c/2^n$ , где  $c$

– целое положительное число и  $\delta\psi_k = \pi/2^{k-1}$ , величина дисперсии определяется:

для амплитудных ошибок выражением

$$\sigma_a^2 = \prod_{l_2} (\delta a_{l_2})^2 \left[ 2^{v-2} + 3 \cdot 2^{1-v} - 2^{-2v} + 2^{-3v-2} + (2^{-3v} + 3 \cdot 2^{-v} - 2 - 2^{-2v}) q(1-q)^{N-1} \right], \quad (8)$$

где  $N2 \in l_2$ , ( $N2$  – секции аттенуатора, участвующие в формировании амплитуд каналов ФАР), а  $v$  – номер отказавшей секции;

– для фазовых ошибок выражением

$$\sigma_\psi^2 = \frac{4}{3} K \pi^2 \left( 1 - \frac{1}{4^K} \right) q(1-q)^{K-1}. \quad (9)$$

С учетом подхода, описанного в [1-3, 6], математическое ожидание ДН равно:

– с учетом амплитудных ошибок

$$M\{\vec{F}_a(\theta, \varphi)\} = \vec{F}_0(\theta, \varphi); \quad (10)$$

– с учетом фазовых ошибок

$$M\{\vec{F}_\psi(\theta, \varphi)\} = \sum_{m=1}^M A_m \exp(i\varphi_m) \vec{\mu}_m(\theta, \varphi) \overline{\cos(\Delta\psi_m)}, \quad (11)$$

где  $\vec{F}_0(\theta, \varphi)$  – ДН без ошибок, описываемая выражением (2); множитель  $\overline{\cos(\Delta\psi_m)}$  при учете ошибок только в одном из каналов управления излучателей ФАР (однократных) имеет вид

$$\overline{\cos(\Delta\psi_m)} = (1-q)^{M-1} \left[ 1 - q + qM \cos(\Delta\psi_m) \right]. \quad (12)$$

Дисперсии ДН ФАР соответственно для ошибок в каналах управления амплитудой и фазой описываются следующими соотношениями:

$$D\{\bar{F}_a(\theta, \varphi)\} = \sigma_a^2 \sum_{m=1}^M |\bar{\mu}_m(\theta, \varphi)|^2; \quad (13)$$

$$D\{\bar{F}_\psi(\theta, \varphi)\} = |\bar{F}_0(\theta, \varphi)|^2 \left\{ (1-q)^M \left[ 1 - 2 \sum_{m=1}^M \overline{\cos \Delta \varphi_m} + \left( \sum_{m=1}^M \overline{\cos \Delta \varphi_m} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + q(1-q)^{M-1} \left[ (\cos(\delta\psi_m))^2 - 2 \cos(\delta\psi_m) \sum_{m=1}^M \overline{\cos \Delta \varphi_m} + \left( \sum_{m=1}^M \overline{\cos \Delta \varphi_m} \right)^2 \right] \right\}. \quad (14)$$

Из приведенных соотношений непосредственно следует, что наличие отказов в каналах управления амплитудой не приводит к изменению поляризационных характеристик антенны; выражение (11) показывает, что появление ошибок в установке фазы приводит к изменению поляризационных характеристик ФАР.

Дисперсия ДН по полю антенной решетки зависит от дисперсии значений амплитуд токов в излучателях ФАР и суммы диаграмм направленности по мощности отдельных излучателей. Зависимость дисперсии ДН, описанной выражением (14), указывает на сложный характер зависимости между параметрами излучения ФАР даже при наличии однократных отказов в ее каналах, так как величина  $D\{\bar{F}_\psi(\theta, \varphi)\}$  зависит от всех рассматриваемых характеристик и параметров антенной решетки.

Так как в большинстве работ по данной тематике в качестве исходной берется ДН по мощности, то далее обратимся к статистическим характеристикам данной функции. Средняя ДН по мощности имеет вид

$$M\{|\bar{F}_a(\theta, \varphi)|^2\} = |\bar{F}_0(\theta, \varphi)|^2 + \sigma_a^2 \sum_{m=1}^M |\bar{\mu}_m(\theta, \varphi)|^2; \quad (15)$$

при наличии ошибок в каналах управления амплитудой

$$M\{|\bar{F}_\psi(\theta, \varphi)|^2\} = \left( \sum_{m=1}^M \bar{\Delta}_m |A_m \bar{\mu}_m(\theta, \varphi)| \right)^2 + \sigma_\psi^2 \sum_{m=1}^M A_m^2 |\bar{\mu}_m(\theta, \varphi)|^2, \quad (16)$$

при наличии ошибок в каналах управления фазой, где множитель  $\bar{\Delta}_m$ , вывод которого для четырехсекционных имеет вид:

$$\bar{\Delta}_m = \exp(i\varphi_m) \left[ (1-q)^M + q(1-q)^{M-1} \sum_{k=1}^K \exp(i\delta\psi_{k_m}) \right]. \quad (17)$$

При записи выражений (15) и (16) было учтено, что, при сделанных предположениях  $\bar{\Delta}_a = 0$  и  $\bar{\Delta}_\psi = 0$ , значения  $\sigma_a^2$  и  $\sigma_\psi^2$  определяются формулами (6) - (9). Подчеркнем, что вывод этих выражений предполагает лишь независимость ошибок в излучателях и их однородность. Величины (дисперсии) ошибок и закон распределения их могут быть произвольными. Допускается также корреляция различных видов ошибок в отдельных излучателях, характер которых одинаков для всех излучателей. При малых значениях ошибок  $\delta a$  и  $\delta \psi$  выражения совпадают с соотношениями, приведенными, например, в [8].

Математическое ожидание ДН по мощности является суммой двух слагаемых. Первое, из которых представляет собой ДН по мощности в отсутствие ошибок. Второе слагаемое для системы изотропных излучателей не зависит от угла (в данном случае не имеет явной зависимости), т.е. представляет собой некоторый постоянный фон. Перераспределение мощности между двумя слагаемыми приводит к сглаживанию диаграммы и к снижению направленных свойств антенной системы.

Отметим, что также получены выражения, позволяющие учесть влияние отклонений в каналах управления амплитудой и фазой на ряд характеристик ФАР (уровень бокового излучения ДН, уходы направления главного максимума и крутизну ДН), основой для которых явился приведенный аппарат и описанные допущения.

**Пример.** В качестве примера многоканальной системы рассмотрена цилиндрическая антенная решетка (ЦАР) с излучателями  $m = \overline{1, M}$  в виде ориентированных параллельно образующей идеально проводящего кругового цилиндра магнитных диполей (продольных щелей) [6]. Геометрия задачи и отсчет угла  $\theta$  показаны на рис. 1.

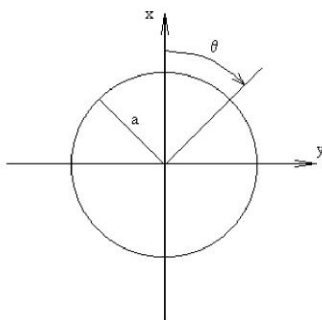


Рис. 1. Геометрия задачи для ЦАР и отсчет угла  $\theta$

Нормированная диаграмма направленности  $\mu_n(\theta)$  указанных излучателей определяется в виде суммы по бесконечным азимутальным гармоникам выражением [1]:

$$\mu_m(\theta) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^m \frac{\cos[m(\theta - \theta^{(n)})]}{H_m^{(2)'}(\beta a)}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon_m$  – число Неймана ( $\varepsilon_m = 1$  при  $m = 0$  и  $\varepsilon_m = 2$  при  $m \neq 0$ );  $a$  – радиус цилиндра;  $\theta^{(n)}$  – угловое положение  $n$ -го излучателя;  $\beta = 2\pi/\lambda$  – волновое число свободного пространства;  $\lambda$  – длина волны;  $i$  – мнимая единица;  $H_m^{(2)'}(\bullet)$  – производная функции Ганкеля 2-го рода  $m$ -го порядка. При проведении вычислительного эксперимента полагалось, что круговой цилиндр имеет радиус  $a = 2,5\lambda$ ; элементы дуговой антенной решетки из 16 излучателей располагались равномерно в пределах полуокружности и возбуждались по закону

$$A_m = [\cos(\theta^{(m)})]^2 \quad (19)$$

и

$$\varphi_m = 2\pi a/\lambda [1 - \cos(\theta^{(m)})]. \quad (20)$$

На рис. 2–4 показаны результаты исследований для ЦАР при реализации фазового набега в каналах с использованием четырехсекционных бинарных фазовращателей ( $\delta\psi_k = \pi/2^{k-1}$ ), при  $\theta_0 = 0^\circ$ . При реализации фазового распределения были рассмотрены различные варианты допущений

$$\varphi_m \leq \sum_{j=1}^J \delta\psi_j \text{ – увеличение (максимизация фазового набега);} \quad (21)$$

$$\varphi_m \geq \sum_{j=1}^J \delta\psi_j \text{ – уменьшение (минимизация фазового набега);} \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^J \delta\psi_j - \frac{\Delta\psi_{\min}}{2} \leq \varphi_m \leq \sum_{j=1}^J \delta\psi_j + \frac{\Delta\psi_{\min}}{2}, \text{ (усреднение фазового набег), } (23)$$

где  $\delta\psi_j$  – дискрет секции ФВ, участвующий ( $j = 1, 2, \dots, K$ ) в формировании фазового отклонения в  $m$ -м излучателе ЦАР, причем  $J \subseteq K$ ,  $\Delta\psi_{\min}$  – наименьший дискрет секции ФВ, в нашем случае  $\Delta\psi_{\min} = \frac{\pi}{8} = 22,5^\circ$ . Оговоримся, что используемые понятия «максимизация», «минимизация» и «усреднение» носят формальный характер.

Моделирование проведено для объемной модели ДН ЦАР, а результаты для анализа представлены в плоском виде: для  $\theta$ -срезов – рис. 2, для  $\varphi$ -области – рис. 3–5. Для наглядности эффектов, проявляющихся при исследовании, использованы последние рисунки. На рис. 3 представлены ДН при реализации в каналах ЦАР синтезированного фазового распределения по соотношению (20), кривая 1 и ДН при использовании условия (22). На рис. 4 представлены аналогично кривые, имеющие ту же интерпретацию, однако кривая 2 отражает особенности формирования ДН при реализации фазового распределения по условию (21).

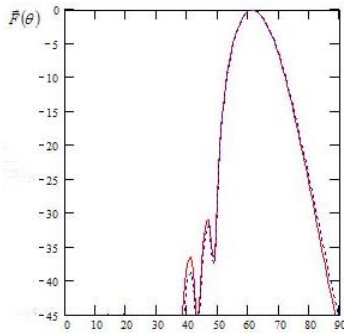


Рис. 2. ДН для  $\theta$ -области при реализации в каналах ЦАР синтезированного фазового распределения

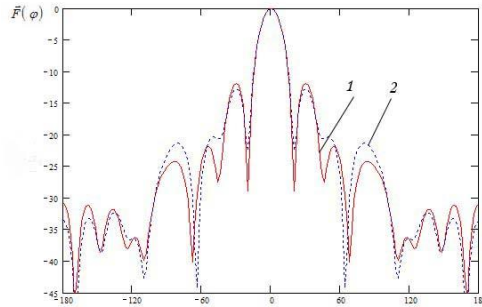


Рис. 3. ДН для  $\varphi$ -области при максимизации фазового распределения в каналах ЦАР

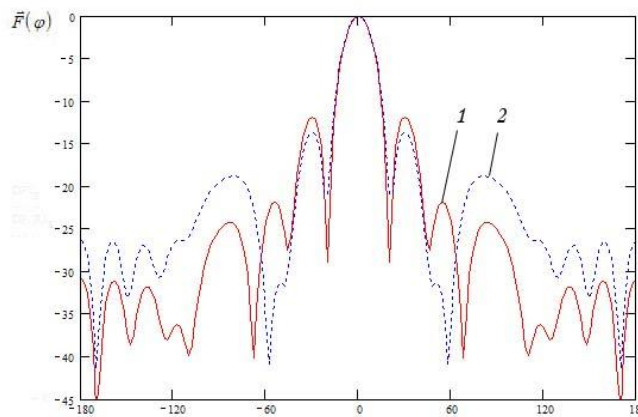


Рис. 4. ДН для  $\varphi$ -области при минимизации фазового распределения в каналах ЦАР



На рис. 5 представлены результаты моделирования по условию (23) кривой 2, причем кривая 1 имеет ту же интерпретацию, что и на рис. 2 и рис. 3.

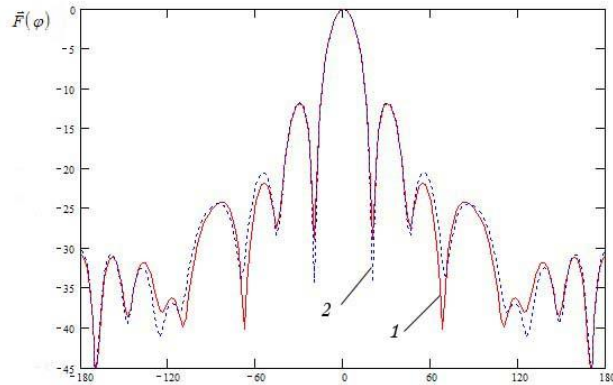


Рис. 5. Сечение ДН для  $\varphi$ -области при усреднении фазового распределения в каналах ЦАР

**Выводы.** Даже качественный анализ показывает на значительные изменения формы ДН при различных вариантах допусков реализации синтезированного распределения в каналах АР. При этом наблюдается повышение уровня бокового излучения, заполнение провалов характеристики, смещение локальных максимумов боковых лепестков ЦАР. Наиболее ценными для исследований являются следующие выявленные особенности:

- ◆ при использовании условия «увеличение» для ДН исследуемой ЦАР наблюдается смещение минимума второго бокового лепестка с увеличением провала с  $-40$  дБ до  $-45$  дБ; а также увеличение провала третьего бокового лепестка с уровня  $-40$  дБ до  $-43$  дБ (см. рис. 3);
- ◆ при реализации второго условия, характеризуемого соотношением (8), наблюдается вырождение второго бокового лепестка со смещением минимума к направлению главного максимума ДН с естественным повышением уровня бокового излучения (см. рис. 4);
- ◆ реализация условия (23) наиболее точно формирует ДН ЦАР, при этом увеличиваются провалы главного лепестка характеристики, и формируется провал между четвертым и пятым боковыми лепестками с уровня  $-37$  дБ до  $-42$  дБ (см. рис. 5).

Полученные результаты исследований показали возможность использования предлагаемого аппарата при построении ее системы управления техническим состоянием и улучшения характеристик излучения ЦАР при флуктуациях различной природы путем адекватного выбора алгоритма реализации АФР при использовании дискретных устройств управления. Результаты могут быть в дальнейшем использованы в системе управления состоянием ФАР многофункциональных инфокоммуникационных систем, при построении алгоритмов восстановления характеристик ФАР [7] с учетом влияния отказов дискретных устройств управления, а также как один из возможных дополнительных вариантов компенсации внешних возмущений (иногда даже помех).

Приведенные численные результаты полностью подтверждают аналитические зависимости, приведенные выше.

**Заключение.** Результаты работы являются развитием статистической теории антенн и позволяют распространить их на малозлементные антенные решетки, в которых ошибки, вызванные рассеянными отказами, соизмеримы с величиной

управляющего воздействия и качественно изменяют эксплуатационные свойства (показатели) антенны. Практическим направлением развития этой работы может явиться возможность организации контроля с восстановлением ФАР при приближении последней к критическому состоянию.

Авторы выражают признательность за помощь, оказанную доктором технических наук профессором Габриэльяном Д.Д. и доктором физико-математических наук профессором Звездиной М.Ю.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шацкий Н.В.* Обеспечение требуемого качества функционирования технических систем с квазиизбыточностью в период эксплуатации // Методы менеджмента качества. – 2001. – Вып. 2. – С. 29-32.
2. *Шацкий Н.В.* Построение перспективных систем управления функционированием радиотехнических комплексов // Сборник научных трудов. «Современные проблемы радиоэлектроники». – Ростов-на-Дону: РИО РТИСТ ФГБОУ «ЮРГУЭС», 2012. – С. 6-10.
3. *Шацкий Н.В., Шацкий В.Н.* Формирование диаграммы направленности антенной решетки при использовании дискретных устройств управления фазой // Сборник научных трудов «Современные проблемы радиоэлектроники». – Ростов-на-Дону: РИО РТИСТ ФГБОУ «ЮРГУЭС», 2012. – С. 385-388.
4. *Филиппов В.С., Пономарев Л.И., Гринев А.Ю. и др.* Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: Учебное пособие для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Радио и связь, 1994. – 592 с.
5. *Самойленко В.И., Шишов Ю.А.* Управление фазированными антенными решетками. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
6. *Шацкий Н.В., Габриэльян Д.Д., Звездина М.Ю.* Точность установки луча в цилиндрической антенной решетке при наличии отказов в каналах управления амплитудой // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – Т. 42, № 5-6. – С. 19-23.
7. *Шацкий Н.В., Габриэльян Д.Д.* Алгоритм поэлементного контроля фазированной антенной решетки по одному определяющему параметру // Вопросы радиоэлектроники. Сер. “ОВР”. – 2000. – Вып. № 19. – С. 40-46.
8. *Шифрин Я.С.* Вопросы статистической теории антенн. – М.: Сов. радио, 1970. – 384 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор П.Ф. Денисенко.

**Шацкий Николай Витальевич** – Научно-исследовательский институт физики ЮФУ; e-mail: shatskiy@sfedu.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194; тел./факс: 86322975041, 89044443467; с.н.с.; к.т.н.; доцент.

**Головань Сергей Анатольевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: gsa@sfedu.ru; 344094, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40; кафедра связи; начальник; к.ф.н.

**Стрижак Александр Георгиевич** – e-mail: gsa@sfedu.ru; кафедра связи; зам. начальника.

**Шацкий Виталий Николаевич** – e-mail: shik-93@rambler.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5; студент.

**Shatsky Nikolay Vitalievich** – Research Institute of Physics, Southern Federal University; e-mail: shatskiy@sfedu.ru; 194, Stachki (Strikes) pr., Rostov-on-don, 344090, Russia; phone/fax: +76322975041; senior scientist; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Golovan Sergey Anatolievich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: gsa@sfedu.ru; 40, R. Zorge street, Rostov-on-Don, 344094, Russia; the department of communication; head the department; cand. of philol. sc.

**Strizhak Alexander Georgievich** – e-mail: gsa@sfedu.ru; the department of communication. deputy head.

**Shatsky Vitaly Nikolayevich** – e-mail: shik-93@rambler.ru; 344090, Rostov-on-don, street R. Zorge 5; student.