



# Коррекция амплитудно-фазового распределения поля на раскрыве деформированной крупноапертурной стационарной фазированной антенной решетки

Ю. А. Шишов<sup>1</sup>, С. Е. Шалдаев<sup>1</sup>, Д. В. Сергеев<sup>1</sup>, М. Г. Вахлов<sup>1</sup>,  
В. В. Подольцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

На основе аналитического обзора источников научно-технической информации, посвященных вопросам коррекции погрешностей амплитудно-фазового распределения поля на раскрыве (апертуре) фазированной антенной решетки, вызванных корреляцией ошибок квантования фазы дискретными фазовращателями, производственным разбросом их характеристик и отказами части элементов решетки, выявлена нерешенная проблема. Существует необходимость коррекции погрешностей амплитудно-фазового распределения, вызванных деформацией полотна крупноапертурной стационарной фазированной антенной решетки, в результате которой происходит отклонение координат излучателей от их проектных значений.

Разрабатывается математический аппарат электронной коррекции распределения поля совместно с алгоритмом управления диаграммой направленности решетки. Производится оценка эффективности предлагаемого способа коррекции амплитудно-фазового распределения на апертуре деформированной фазированной антенной решетки и приводится вариант его технической реализации.

Актуальность и новизна работы подтверждается патентом на изобретение, выполненным на основе проведенных исследований, и свидетельством о государственной регистрации компьютерной программы, положенной в основу обработки результатов измерений деформаций полотна крупноапертурной решетки.

**Ключевые слова:** крупноапертурная стационарная фазированная антенная решетка, погрешности амплитудно-фазового распределения поля, боковые лепестки, коэффициент направленного действия, пеленгационная характеристика

*Для цитирования:*

Коррекция амплитудно-фазового распределения поля на раскрыве деформированной крупноапертурной стационарной фазированной антенной решетки / Ю. А. Шишов, С. Е. Шалдаев, Д. В. Сергеев, М. Г. Вахлов, В. В. Подольцев // Радиопромышленность. 2018. Т. 28, № 3. С. 55–63. DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-3-55-63

# Correction of amplitude-phase field distribution at aperture of deformed large-aperture fixed phased array

Yu. A. Shishov<sup>1</sup>, S. E. Shaldaev<sup>1</sup>, D. V. Sergeev<sup>1</sup>, M. G. Vahlov<sup>1</sup>,  
V. V. Podoltzev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia

On the basis of an analytical review of scientific and technical information sources dedicated to correction of errors in the gain-phase distribution of the field on the aperture of the phased antenna array, such errors been caused by correlation of errors in phase quantization by discrete phase shifters, and also caused by disbursement of their characteristics and by failures in a part of the phased antenna array elements, an unresolved problem has been discovered. It is required to correct the amplitude-phase distribution errors caused by deformation of the curtain of the large-aperture stationary phased antenna array and resulting in deviation of the radiating elements from their design parameters. A mathematical apparatus of the field distribution electronic correction is being developed together with an algorithm for controlling the radiation pattern of the phased antenna array. The effectiveness of the proposed method for correcting the array pattern distribution on the aperture of the deformed phased antenna array has been evaluated and an option for technical implementation thereof has been proposed.

The relevance and novelty of the work is confirmed by the patent for the invention developed on the basis of the studies performed and by the certificate of state registration of the software, which was based upon in the processing of results of the measurements of the deformations in the curtain of the large-aperture phased antenna array.

**Keywords:** large-aperture stationary phased array antenna, errors in the gain-phase distribution of the field, side lobes, directivity factor, direction-finding characteristic

*For citation:*

Shishov Yu. A., Shaldaev S. E., Sergeev D. V., Vahlov M. G., Podoltzev V. V. Correction of amplitude-phase field distribution at aperture of deformed large-aperture fixed phased array. *Radiopromyshlennost*, 2018, vol. 28, no. 3, pp. 55–63. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-3-55-63

## Введение

Проведенные в данной статье исследования относятся к антенной технике, а именно к крупноапертурным стационарным фазированным антенным решеткам (ФАР) радиолокационных станций (РЛС) дальнего обнаружения. Актуальность работы определяется тем, что характеристики любой антенны существенно зависят от качества амплитудно-фазового распределения (АФР) поля на ее раскрыве (апертуре). Наличие ошибок в АФР поля приводит к «заплыванию нулей» в области боковых лепестков диаграммы направленности антенны, росту их уровня, снижению коэффициента направленного действия (КНД) [1], флуктуациям пеленгационной характеристики [2]. Все это существенно ухудшает тактические характеристики РЛС: снижается дальность обнаружения, точность измерения координат целей и помехозащищенность.

Основными источниками ошибок в АФР поля на апертуре антенной решетки с аналоговыми фазовращателями являются:

- ограниченная разрядность фазовращателей (5–6 бит), приводящая к формированию на апертуре периодического распределения коррелированных между излучателями погрешностей кван-

тования фазы, что влечет за собой рост уровня боковых лепестков диаграммы направленности, увеличение ошибок установки главного максимума диаграммы направленности в заданное положение, снижение КНД ФАР;

- производственный разброс характеристик фазовращателей и выход из строя части их переключающих элементов;
- отказы фазовращателей.

Для коррекции погрешностей АФР поля на апертуре ФАР предложен ряд технических решений, суть которых состоит в следующем.

Декорреляция погрешностей квантования фазы на апертуре ФАР осуществляется путем введения случайного или нелинейного распределения начальной фазы токов возбуждения излучателей  $\varphi_{mn}^{\text{нач}}$  с последующей его компенсацией при формировании кодов управления фазовращателями [3]. Нелинейное начальное распределение обычно применяют в ФАР с пространственным возбуждением. В то же время использовать его для возбуждения излучателей крупноапертурной ФАР практически невозможно, поэтому в качестве  $\varphi_{mn}^{\text{нач}}$  для таких ФАР выбирают случайное распределение начальной фазы.

Для компенсации погрешностей АФР, вызванных производственным разбросом характеристик фазовращателей и выходом из строя части их переключающих элементов [4–6], систематические составляющие погрешности установки состояний каждого из фазовращателей рассчитывают на основе данных встроенного контроля и учитывают при компенсации начального значения фазы токов его возбуждения, а случайные составляющие погрешностей установки состояний каждого из фазовращателей компенсируют путем осуществления  $2^p$ -переключений одновременно всех  $p$ -разрядных фазовращателей ФАР в очередные состояния, измерения параметров сигналов, принятых ФАР, и усреднения результатов  $2^p$ -измерений.

Коррекцию искажений АФР поля на апертуре ФАР, вызванных отказами фазовращателей, предложено осуществлять следующим образом. На основе встроенного контроля определяют координаты неисправных фазовращателей и отключают симметричные им излучатели относительно центра апертуры ФАР [7, 8].

Рассмотренные способы компенсации погрешностей апертурного АФР применяют комплексно, иными словами в сочетании друг с другом, что позволяет компенсировать значительную часть погрешностей АФР, вызванных различными факторами. Однако нерешенным остается вопрос компенсации погрешностей, вызванных деформациями полотна крупноапертурной ФАР. Действительно, для обнаружения малоразмерных целей (10–15 см) на дальности не менее 3000 км должно быть выполнено условие [9]

$$S_{\text{пр}} \geq \frac{(3...5)10^9}{P_{\text{и}}}$$

Здесь  $S_{\text{пр}}$  – эффективная площадь приемной антенны РЛС, м<sup>2</sup>;  $P_{\text{и}}$  – средняя мощность излучения, Вт.

Например, при  $P_{\text{и}} = 1$  МВт размеры антенны должны быть 200 × 20 м<sup>2</sup>. Антенна с такими параметрами представляет собой сложную конструкцию ажурного типа, которая в процессе создания и эксплуатации подвергается влиянию нагрузок и воздействий (длительных, кратковременных, особых). Влияние указанных нагрузок и воздействий неизбежно приводит к деформациям (кренам, прогибам, азимутальным разворотам) полотна ФАР, сопровождающимся отклонениями координат излучателей от их проектных значений, что вызывает искажение АФР поля на апертуре ФАР. Для существующих ФАР устранить эти искажения механическим путем не представляется возможным. Поэтому актуальной является задача разработки методики коррекции АФР поля на апертуре деформированной ФАР электронным путем. Для этого необходимо прежде всего разработать математический аппарат коррекции, совмещенный

с алгоритмом управления диаграммой направленности антенны.

В соответствии с изложенным актуальная задача исследования заключается в разработке математической основы способа электронной коррекции АФР поля на апертуре деформированной ФАР с учетом отклонений координат излучателей ФАР от их проектных значений [10–12], а также в разработке рекомендаций по технической реализации предлагаемого способа коррекции.

### Постановка задачи

В работе [13] предложен алгоритм компенсации погрешностей измерения угловых координат цели, вызванных искажениями АФР поля на апертуре ФАР вследствие деформации ее полотна. С этой целью разработан подход к оценке пеленгационных характеристик с учетом фактических деформаций полотна ФАР, определяемых посредством геодезического контроля, и даются практические рекомендации по компенсации погрешностей измерения угловых координат цели. Однако искажения АФР приводят не только к отклонениям пеленгационных характеристик антенны от заданного положения, но и к росту уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны [1], что снижает скрытность функционирования и помехоустойчивость РЛС. Не случайно в заключении работы [13] делается вывод о необходимости компенсации влияния деформаций ФАР на уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны.

В соответствии с изложенным на основе анализа известных технических решений необходимо предложить методику восстановления исходного (заданного) АФР поля на апертуре деформированной ФАР.

### Решение задачи

Повышение требований к дальности обнаружения малоразмерных космических объектов вызвало необходимость применения крупноапертурных ФАР [9]. Результаты экспериментальных исследований [10] свидетельствуют о наличии деформаций сложного характера (осадки, крены, прогибы, азимутальные развороты и т. д.) на эксплуатируемых ФАР, которые приводят к изменениям расстояний от элементов антенной решетки до точки наблюдения в дальней зоне, что эквивалентно дополнительному изменению фазы тока возбуждения  $mn$ -го излучателя, расположенного на пересечении  $m$ -й строки и  $n$ -го столбца на апертуре деформированной ФАР, на величину [2, с. 152]

$$\Delta\varphi_{mn}^{\text{деф}} = -\frac{360^\circ}{\lambda} (\Delta x_{mn} \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + \Delta y_{mn} \sin \theta_0 \sin \varphi_0 + \Delta z_{mn} \cos \theta_0), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $\Delta x_{mn}, \Delta y_{mn}, \Delta z_{mn}$  – отклонения координат излучателей от проектных значений, м;  $\theta_0$  и  $\varphi_0$  – углы сферической системы координат, определяющие заданное положение главного максимума диаграммы направленности ФАР.

Методика определения значений  $\Delta x_{mn}, \Delta y_{mn}, \Delta z_{mn}$  по результатам геодезических измерений фактических координат излучателей  $x_{mn}^{\text{фак}}, y_{mn}^{\text{фак}}, z_{mn}^{\text{фак}}$  на апертуре деформированной ФАР подробно изложена в [10–13]:

$$\Delta x_{mn} = x_{mn}^{\text{фак}} - x_{mn}^{\text{пр}}; \Delta y_{mn} = y_{mn}^{\text{фак}} - y_{mn}^{\text{пр}}; \Delta z_{mn} = z_{mn}^{\text{фак}} - z_{mn}^{\text{пр}}, (2)$$

где  $x_{mn}^{\text{пр}}, y_{mn}^{\text{пр}}, z_{mn}^{\text{пр}}$  – проектные значения координат излучателей на апертуре недеформированной ФАР, м.

Сущность предлагаемого способа коррекции АФР на апертуре деформированной ФАР состоит в следующем. На основе полученных по формулам (2)–(4) отклонений и вычисления дополнительных фазовых погрешностей токов возбуждения излучателей по формуле (1) формируются фазовые поправки  $\delta\varphi_{mn}$  по правилу

$$\delta\varphi_{mn} = -\Delta\varphi_{mn}^{\text{деф}}, (3)$$

которые используются при формировании кодов управления  $p$ -разрядными фазовращателями в соответствии с соотношением

$$\varphi_{mn} = \Delta\varphi \text{Ent} \left[ \frac{\delta\varphi_{mn} - \varphi_{mn}^{\text{нач}} + \varphi_{mn}^{\text{тр}}}{\Delta\varphi} + 0,5 \right], (4)$$

где  $\Delta\varphi = 2\pi/2^p$ ;  $\text{Ent}[a]$  – целая часть числа  $a$ ;  $\delta\varphi_{mn}$  – фазовая поправка, компенсирующая погрешность тока возбуждения  $mn$ -го излучателя, вызванную деформацией полотна ФАР, которую определяют соотношением (3) с учетом формулы (1);  $\varphi_{mn}^{\text{нач}}$  – начальное фазовое распределение, вводимое для декорреляции погрешностей квантования фазы  $p$ -разрядным фазовращателем;  $\varphi_{mn}^{\text{тр}}$  – фаза тока возбуждения  $mn$ -го излучателя ФАР, требуемая для установки луча диаграммы направленности антенны в заданное положение, которую определяют по формуле

$$\varphi_{mn}^{\text{тр}} = -\frac{360^\circ}{\lambda} (nd_x \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + md_y \sin \theta_0 \sin \varphi_0), (5)$$

где  $d_x$  и  $d_y$  – шаг решетки (расстояния между излучателями ФАР) соответственно по строкам и столбцам, м.

В соответствии с изложенным компенсация погрешностей АФР на апертуре деформированной ФАР сводится к выполнению операций, приведенных на рис. 1.

В результате выполнения указанных операций на апертуре ФАР устанавливают АФР по формуле (5), обеспечивающее установку главного лепестка диа-

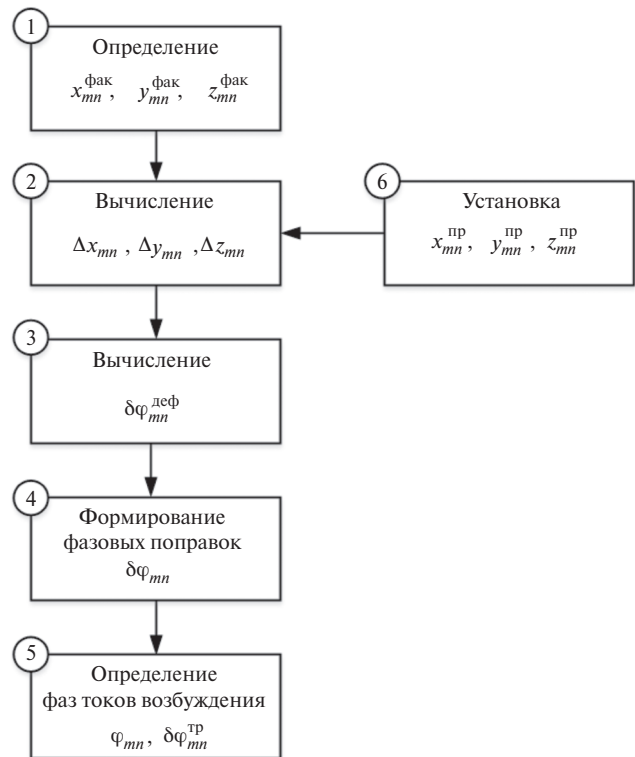


Рисунок 1. Схема компенсации погрешностей АФР на апертуре деформированной ФАР  
Figure 1. Diagram of compensation of APA errors on the aperture of the deformed PAA

граммы направленности в заданное положение  $\theta_0$  и  $\varphi_0$  при минимальном уровне боковых лепестков и самом низком КНД антенны. Вариант технической реализации предложенного способа коррекции АФР на апертуре ФАР иллюстрирует структурная схема устройства управления лучом ФАР (рис. 2). В состав устройства входят:  $N \times M$  – элементная ФАР 1 ( $N$  и  $M$  – число строк и столбцов излучателей);  $N \times M$   $p$ -разрядных фазовращателей 2;  $N \times M$  СВЧ-выключателей 3; СВЧ-сумматор-делитель 4; блок согласования 5;  $N \times M$  устройств управления СВЧ-выключателями 6; вычислитель фаз 7; блок встроенного контроля 8; цифровое вычислительное устройство 9; тест-антенна 10.

Перечисленные узлы 1–10 являются общими со структурной схемой [8] и выполняют следующие функции. Блок встроенного контроля 8 совместно с тест-антенной 10 регистрируют комплексные амплитуды токов возбуждения излучателей ФАР 1. Результаты контроля поступают на цифровое вычислительное устройство 9. Там осуществляются:

- прием и хранение фаз токов возбуждения излучателей ФАР, определяемых в вычислителе фаз 7, которые обеспечивают установку луча антенны в заданное положение;
- прием и хранение поступающей от блока встроенного контроля 8 информации о координатах неисправных фазовращателей;





устройства 9, где в соответствии с формулой (4) формируются коды управления фазовращателями ФАР.

Таким образом, введенные в состав устройства управления АФР на апертуре ФАР блоки 11–14 обеспечивают компенсацию дополнительных фазовых погрешностей, рассчитываемых по формуле (1), т. е. реализуют разработанный авторами математический аппарат коррекции АФР на апертуре деформированной ФАР.

### Оценка эффективности предлагаемых технических решений

Анализ влияния деформации полотна на характеристики антенны проводился на примере крупноапертурной стационарной ФАР дециметрового диапазона волн, излучатели которой расположены на пересечениях  $N = 48$  столбцов и  $M = 64$  строк с шагом  $d_x = d_y = \lambda/2$ . Измерения отклонений истинных координат излучателей по осям  $X$  и  $Y$  на апертуре ФАР проводились по методике [10–13]. Фрагмент результатов измерений приведен на рис. 3–5 [10, с. 351]. Обработка результатов измерений проводилась в соответствии с [14].

По аналогии с [10, 13] двумерная ФАР сведена к двум эквивалентным линейным антенным решеткам, параллельным осям  $X$  и  $Y$ , причем решетка  $X$  отвечает за формирование диаграммы направленности в азимутальной плоскости, а решетка  $Y$  – в угломестной. Поскольку подход к анализу в обоих случаях одинаков, остановимся на результатах для решетки  $X$ .

Проведенный анализ показал, что среднеквадратичное отклонение ошибок фазового распределения вдоль решетки  $X$  составляет  $\sigma_{\text{фх}} = 0,15$  рад. Наличие этих ошибок приводит к флуктуациям пеленгационных характеристик при моноимпульсном методе измерения угловых координат цели, снижению КНД антенны, росту уровня боковых лепестков диаграммы направленности и «заплыванию нулей» между боковыми лепестками.

Среднеквадратичное отклонение флуктуаций пеленгационной характеристики определяют соотношением [2, с. 153]

$$\sigma_{\beta}^{\text{пх}} = \frac{\lambda}{L_x \cos \beta_0} \frac{0,64}{\sqrt{N}} \sigma_{\text{фх}}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $L_x = (N - 1)d_x$  – длина эквивалентной линейной антенной решетки, м;  $N = 48$  – количество элементов (столбцов двумерной ФАР);  $\beta_0$  – заданное направление пеленгационной характеристики в азимутальной плоскости, определяемое как угол отклонения пеленгационной характеристики от нормали к полотну ФАР, т. е. от оси  $Z$ .

Расчеты по формуле (6) при указанных выше значениях дают значения среднеквадратичного отклонения флуктуаций пеленгационной характеристики  $\sigma_{\beta}^{\text{пх}} = 0,06$  рад = 3,5.

В то же время ширина главного лепестка неискаженной диаграммы направленности

$$2\Delta\beta_{05} = \frac{\lambda}{L_x} = \frac{2}{N-1} \approx 2,46^\circ.$$

При этом потенциальная точность измерения азимута при отношении сигнал-шум  $\rho = 20$  дБ = 100 составляет

$$\sigma_{\beta}^{\text{пот}} \approx \frac{(0,4 \dots 0,6) \cdot 2\Delta\beta_{05}}{\sqrt{\rho}} \approx 0,11^\circ.$$

Сравнение результатов вычислений  $\sigma_{\beta}^{\text{пх}}$  и  $\sigma_{\beta}^{\text{пот}}$  показывает, что количество ошибок определения угловых координат при деформации полотна ФАР увеличивается в 20 раз. Следовательно, предложение по коррекции фазового распределения следует считать весьма эффективным.

Снижение КНД антенны вследствие деформации ее полотна определяют по формуле [1, с. 197–198]

$$\Delta = 1 - \frac{\bar{D}}{D_0}, \quad (7)$$

где  $\bar{D}$  – среднее значение КНД деформированной ФАР;  $D_0$  – КНД в отсутствие деформаций антенного полотна.

При большом числе излучателей  $N_x$  и шаге решетки  $d_x = \lambda/2$  снижение КНД антенны примерно равняется  $\sigma_{\text{фх}}^2$ . Из соотношения (7) получаем

$$\frac{\bar{D}}{D_0} = 1 - \sigma_{\text{фх}}^2 = 1 - 0,15^2 \approx 0,978,$$

т. е. среднее значение КНД деформированной ФАР составляет примерно  $0,978D_0$ . Однако необходимо среднее значение КНД учитывать дважды – при излучении зондирующего сигнала и приеме отраженного от цели сигнала. В этом случае среднее значение КНД деформированной ФАР примерно равняется  $0,96D_0$ . Такое сравнительно небольшое снижение КНД объясняется тем, что смещения излучателей исследуемой ФАР относительно их проектных значений координат были значительно меньше длины волны [10, с. 352]. Поэтому следует ожидать, что увеличение отклонений координат излучателей ФАР в процессе дальнейшей эксплуатации РЛС приведет к более существенному снижению КНД. Кроме того, необходимо иметь в виду, что вследствие существенных флуктуаций положения пеленгационной характеристики цель, как правило, будет смещена относительно максимума суммарной диаграммы направленности, что дополнительно приведет к снижению КНД. Этот вопрос нуждается в проведении дополнительных достаточно сложных исследований на основе имитационного моделирования процесса функционирования РЛС при сопровождении цели. Однако эти

исследования выходят за рамки данной статьи и определяют направления дальнейших исследований.

Влияние фазовых ошибок на искажения диаграммы направленности антенны в области боковых излучений состоит в следующем.

Во-первых, возрастает уровень боковых лепестков. Уровень  $k$ -го бокового лепестка [1, с. 77]

$$F_k^2 = F_{ok}^2 + \Delta F_{ok}^2,$$

где  $F_{ok}$  – уровень  $k$ -го бокового лепестка в отсутствие ошибок распределения фазы;  $\Delta F_{ok}$  – приращение уровня  $k$ -го бокового лепестка вследствие их наличия.

Максимальная величина относительного приращения уровня боковых лепестков, %, составляет [1, с. 79]

$$\delta F_k = \frac{F_k^2 - F_{ok}^2}{F_{ok}^2} = 75\psi_k \sigma_{\psi k}^2, \quad (8)$$

где  $\psi_k$  – обобщенная угловая координата  $k$ -го бокового лепестка, определяющая его азимутальное положение при  $\psi_k = 2\pi(2k + 1)$ .

Результаты вычислений по формуле (8) приведены на рис. 3. Как видно, с ростом номера бокового лепестка  $k$  увеличивается относительный прирост уровня, т. е. дальние боковые лепестки растут быстрее, чем ближние. Иными словами, уровни боковых лепестков в некоторой степени выравниваются, что ведет к увеличению доли электромагнитной энергии, излучаемой за пределами главного лепестка диаграммы направленности. А это, в свою очередь, эквивалентно дополнительному снижению КНД антенны, а также к снижению скрытности, помехозащищенности и электромагнитной совместимости РЛС с другими радиоэлектронными системами.

Во-вторых, происходит «заплывание нулей» диаграммы направленности в области боковых лепестков, в результате излучение происходит не только

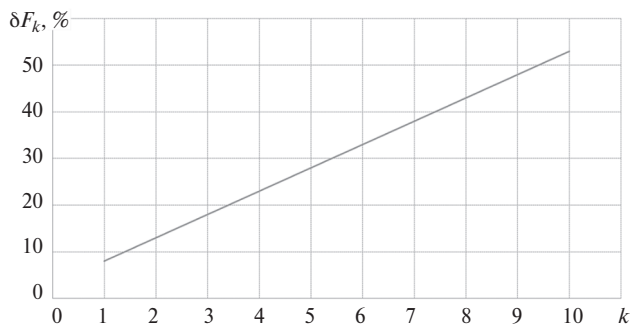


Рисунок 3. Относительные приращения уровня  $k$ -го бокового лепестка

Figure 3. Relative increments of the level of the  $k$  side lobe

по боковым лепесткам, но и между ними, что дополнительно снижает возможности по обеспечению электромагнитной совместимости группировки радиоэлектронных средств, скрытности и помехозащищенности РЛС.

Таким образом, выбранное направление исследований в рамках данной работы является актуальным и свидетельствует о целесообразности проведения мероприятий по коррекции АФР поля на апертуре деформированной ФАР, способствующих восстановлению эксплуатационного качества и эффективности процесса функционирования РЛС.

### Заключение

Аналитический обзор известных технических решений по коррекции АФР поля на апертуре ФАР выявил наличие актуальной научно-технической проблемы, состоящей в необходимости коррекции АФР поля на апертуре деформированной стационарной ФАР. Авторами статьи разработан математический аппарат формирования фазовых поправок по результатам геодезического контроля ФАР, обеспечивающих электронную компенсацию фазовых погрешностей путем введения указанных поправок в алгоритм управления диаграммой направленности ФАР. В статье даны рекомендации по технической реализации разработанного способа коррекции АФР поля на апертуре деформированной ФАР. Проведена оценка эффективности предлагаемых технических решений на примере измерений деформаций полотна эксплуатируемой ФАР. Показано, что наибольший выигрыш применения разработанной методики состоит в повышении точности установки пеленгационной характеристики в заданное положение, а также в снижении уровня дальних боковых лепестков диаграммы направленности антенны.

Задача дальнейших исследований в этом направлении состоит в установлении оптимальных сроков периодичности геодезического контроля и возможности перехода к выполнению непрерывных геодезических наблюдений (мониторингу) фактических параметров ФАР (приращений координат излучателей, шаг решетки, крены и развороты антенных секций) с целью оценки и прогнозирования технического состояния РЛС в режиме реального времени.

Актуальность и новизна выполненных авторами исследований подтверждается свидетельством о государственной регистрации компьютерной программы, положенной в основу обработки результатов измерений деформированной апертуры ФАР [14], и патентом на изобретение [15], разработанным на основе исследований, проведенных в рамках плановых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Советское радио, 1970. 384 с.
2. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.
3. Самойленко В. И., Шишов Ю. А. Управление фазированными антенными решетками. М.: Радио и связь, 1983. 240 с.
4. Авторское свидетельство СССР № 1580393. Вычислительное устройство для управления лучом плоской антенной решетки / Ю. А. Шишов, А. М. Голик, Ю. А. Клейменов, А. Т. Мухаметшин. № 94628545/24-24; G06F15/20; опубл. 23.07.1990.
5. Авторское свидетельство СССР № 1599794. Устройство управления ферритовым фазовращателем / Ю. А. Шишов А. М. Голик Ю. А. Клейменов, А. Т. Мухаметшин. № 4390295/24-21; опубл. 15.01.1990.
6. Авторское свидетельство СССР № 1774282. Устройство управления ферритовым фазовращателем / А. М. Голик, Ю. А. Клейменов, М. А. Барботько, С. Н. Зотов. № 4935269/09; опубл. 07.11.1992.
7. Адаптация управления ФАР по результатам встроенного контроля / Ю. А. Шишов, А. М. Голик, Ю. А. Клейменов, В. А. Бахарев, С. Ю. Демченко // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 9. С. 69–89.
8. Патент 2333578 РФ. Способ управления амплитудно-фазовым распределением на раскрыве фазированной антенной решетки / А. М. Голик И. Н. Павлов Н. Ю. Новиков, А. Ю. Кузин, М. Г. Михайлов, А. Э. Кашпур. № 2006102338; H01Q3/26; опубл. 10.09.2008.
9. Курикса А. А., Фатеев В. Ф. Наблюдение сверхмалых космических аппаратов и фрагментов космического мусора – новая задача контроля космоса // Воздушно-космическая оборона. 2006. № 6. С. 34.
10. Сергеев Д. В. Основы единой методики комплексного геодезического контроля с применением косвенного ориентирования в процессе жизненного цикла РЛС ВЗГ // РТИ Системы ВКО-2014: материалы II Всероссийской научной конференции. М., 2014. С. 345–354.
11. Аналитическое представление крупноапертурной стационарной фазированной антенной решетки / Н. А. Козлов, А. В. Прокофьев, Д. В. Сергеев, В. Ю. Андриевская // Информация и космос. 2017. № 3. С. 26–30.
12. Геодезический контроль деформаций сооружений на основе косвенных способов геодезического ориентирования / В. Ф. Алексеев, Д. В. Сергеев, Н. А. Козлов, А. В. Прокофьев, Т. Н. Аксенова // Информация и космос. 2016. № 2. С. 78–82.
13. Амплитудно-фазовое распределение поля на раскрыве деформированной активной фазированной антенной решетки / А. П. Алешкин, Ю. А. Шишов, Н. А. Козлов, Д. В. Сергеев, В. В. Подольцев, А. Ф. Покора, М. А. Глазнев // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 10. С. 66–73.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663256 от 29.11.2016. Программный модуль расчета и учета погрешностей фазового распределения поля на апертуре ФАР / Ю. А. Шишов, Д. В. Сергеев, С. Е. Мещеряков, Н. А. Козлов.
15. Патент РФ 2644999. Способ управления амплитудно-фазовым распределением на раскрыве фазированной антенной решетки / Ю. А. Шишов, Д. В. Сергеев, Н. А. Козлов, С. Е. Шалдаев, А. В. Прокофьев, С. Е. Мещеряков. № 2016131159; МПК H01Q1/00; опубл. 01.02.2018; бюл. № 04.

## REFERENCES

1. Shifrin Ya. S. *Voprosy statisticheskoiy teorii antenn* [Issues of statistical theory of antennas]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 384 p. (In Russian).
2. Leonov A. I., Fomichev K. I. *Monoimpulsnaya radiolokatsia* [Monopulse radiolocation]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1984, 312 p. (In Russian).
3. Samoiylenko V. I., Shishov Yu. A. *Upravlenie fazirovannymi antennymi reshetkami* [Control of phased array antennas]. Moscow, Radio i svayz Publ., 1983, 240 p. (In Russian).
4. Shishov Yu. A., Golik A. M., Kleiyemenov Yu. A., Muhametshin A. T. Avtorskoe svidetelstvo SSSR no. 1580393. *Vychislitelnoe ystroiystvo dlya upravleniy luchom ploskoiy antennoiy reshetki* [A computer for controlling a beam of a flat antenna array]. No. 9 4628545/24-24, G06F15/20, publ. 23.07.1990. (In Russian).
5. Shishov Yu. A., Golik A. M., Kleiyemenov J. A., Muhametshin A. T. Avtorskoe svidetelstvo SSSR no. 1599794. *Ustroiystvo upravleniya ferritovum fazovrashatelem* [Control device for ferrite phase shifter]. No. 4390295/24-21, publ. 15.01.1990. (In Russian).
6. Golik A. M., Kleiyemenov Yu. A., Barbotko M. A., Zotov S. N. Avtorskoe svidetelstvo SSSR no. 1774282. *Ustroiystvo upravleniya ferritovum fazovrashatelem* [Control device for ferrite phase shifter]. No. 4935269/09, publ. 07.11.1992. (In Russian).
7. Shishov Yu. A., Golik A. M., Kleiyemenov Yu. A., Baharev V. A., Demchenko S. Y. Adaptation of the FAA control based on the results of the integrated control. *Zarubejnaiya radioelektronika*, 1990, no. 9, pp.69–89. (In Russian).
8. Golik A. M., Pavlov I. N., Novikov N. Yu., Kuzin A. Yu., Mihailov M. G., Kashpur A. E. Patent RF no. 2333578. *Sposob upravleniya amplitudno-fazovum raspredeleniem na raskruve fazirovannoy antennoy reshetki* [A method for controlling gain-phase distribution on the face of the phased array antenna]. No. 2006102338, H01Q3/26, publ. 10.09.2008. (In Russian).
9. Kuricsha A. A., Fateev V. F. Observation of ultra-small space vehicles and fragments of space debris – a new task of space control. *Vozdysnorjsmicheskaiya oborona*, 2006, no. 6, p. 34. (In Russian).
10. Sergeev D. V. Osnovu edinoiy metodiki kompleksnogo geodezicheskogo kontroliya s primeneniem kosvennogo orientirovaniya v processe jiznennogo cikla RLS VZG. *RTI Sistemu VKO-2014: materialu II Vserossiyskoiy naychnoiy konferensii* [RTI Systems of aerospace defense-2014: materials of the II All-Russian Scientific Conference]. Moscow, 2014, pp. 345–354. (In Russian).
11. Kozlov N. A., Prokofiev A. V., Sergeev D. V., Andrievskaia V. Y. Analytical presentation of the large aperture stationary phased antenna array. *Informatsia i kosmos*, 2017, no. 3, pp. 26–30. (In Russian).
12. Alekseev V. F., Sergeev D. V., Kozlov N. A., Prokofev A. V., Aksenova T. N. Geodesic control of deformations of structures on the basis of indirect methods of geodetic orientation. *Informatsiya i kosmos*, 2016, no. 2, pp. 78–82. (In Russian).
13. Aleshkin A. P., Shishov Yu. A., Kozlov N. A., Sergeev D. V., Podoltzev V. V., Pokora A. F., Glaznev M. A. Amplitude-phase distribution field on the aperture of the deformed phased antenna array. *Voprosy radioelektroniki*, no. 10, pp. 66–73. (In Russian).



14. Shishov Yu. A., Sergeev D. V., Mesheryakov S. E., Kozlov N. A. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2016663256 29.11.2016. *Programmniy modyl rascheta i ycheta pogreshnostey fazovogo raspredeleniya poliya na aperture FAR* [A software module for calculating and recording of errors in the phase distribution of the field on the phased antenna array aperture]. (In Russian).
15. Shishov Yu. A., Sergeev D. V., Kozlov N. A., Shaldaev S. E., Prokofiev A. V., Mesheryakov S. E. Patent RF no. 2644999. *Sposob upravleniya amplitudno-fazovum raspredeleniem na raskryve fazirovannoy antennoy reshetki* [A method for controlling an amplitude-phase distribution on the phased array antenna aperture]. No. 2016131159, MPK HO1Q1/00, publ. 01.02.2018, bull. No. 04. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Шишов Юрий Аркадьевич**, д.т.н., профессор, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, +7 (911) 719-49-18, e-mail: vka@mil.ru.

**Шалдаев Сергей Евгеньевич**, д.т.н., профессор, начальник управления, Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, +7 (981) 824-22-45, e-mail: vka@mil.ru.

**Сергеев Дмитрий Викторович**, к.т.н., старший научный сотрудник, Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, +7 (911) 768-13-25, e-mail: vka@mil.ru.

**Вахлов Михаил Григорьевич**, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, +7 (921) 742-19-54, e-mail: vka@mil.ru.

**Подольцев Виктор Владимирович**, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, +7 (923) 242-13-54, e-mail: vka@mil.ru.

## AUTHORS

**Yuriy A. Shishov**, Dr.Sci. (Engineering), professor, senior staff scientist, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russia, tel.: +7 (911) 719-49-18, e-mail: vka@mil.ru.

**Sergeiy E. Shaldaev**, Dr.Sci. (Engineering), professor, head of department, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russia, tel.: +7 (981) 824-22-45, e-mail: vka@mil.ru.

**Dmitriy V. Sergeev**, Ph.D. (Engineering), senior staff scientist, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russia, tel.: +7 (911) 768-13-25, e-mail: vka@mil.ru.

**Michael G. Vahlov**, senior staff scientist, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russia, tel.: +7 (921) 742-19-54, e-mail: vka@mil.ru.

**Viktor V. Podoltzev**, senior staff scientist, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197198, Russia, tel.: +7 (923) 242-13-54, e-mail: vka@mil.ru.

Поступила 16.03.2018; принята к публикации 10.05.2018; опубликована онлайн 24.08.2018.  
Submitted 16.03.2018; revised 10.05.2018; published online 24.08.2018.