

29. Cessna J.R., Levy D.M. Phase noise and transient times for a binary quantized digital phase-locked loop in which Gaussian noise // IEEE Trans, 1972, Com-20, № 2. – P.94-104.
30. Yakaws J., Mori S. A binary quantized digital phase-locked loop // IEEE. – 1973. – Vol. 56-A, № 12. – P. 79-85.
31. Yamamoto H. Mori S. Performance of a binary quantized all digital phase-locked loop with a new class of sequential filter // IEEE Trans. – 1978. – V.Com-26, № 1. – P. 35-45.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

**Максимов Александр Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: kafmps@tspark.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328058, кафедра встраиваемых систем; доцент.

**Гелозе Юрий Андреевич** – e-mail: rts@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А; тел.: 88634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

**Клименко Павел Петрович** – кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

**Maksimov Aleksandr Viktorovich** – Southern Federal University; e-mail: kafmps@tspark.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328058; the department of embedded systems; associate professor.

**Gelozhe Yuriy Andreevich** – e-mail: rts@tsure.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

**Klimenko Pavel Petrovich** – the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

УДК 621.396.663

**А.И. Паньчев, А.В. Максимов, А.А. Ваганова**

#### **АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАДИОПЕЛЕНГАТОРА МОБИЛЬНОГО ПОСТА РАДИОМОНИТОРИНГА**

*Одной из основных технических характеристик средств автоматизированного радиомониторинга является точность радиопеленгатора, определяемая угловой ошибкой пеленгования. Инструментальные ошибки пеленгования обусловлены погрешностями конструкции антенной системы, разбросом параметров антенных элементов, различием характеристик фидерных трактов. Задача теоретической оценки инструментальной погрешности для текущей коррекции среднеквадратической ошибки пеленгования актуальна ввиду большой трудоемкости стендовых испытаний и поверочных процедур средств автоматизированного радиомониторинга, а также необходимости размещения оборудования на специальных полигонах, что для активно эксплуатируемых радиопеленгаторов затруднительно. Рассмотрена степень влияния погрешностей компоновки элементов антенной системы на обусловленную искажением диаграммы направленности ошибку пеленгования радиопеленгатора, работающего по принципу корреляционно-интерферометрического измерителя, в котором результирующая характеристика направленности антенной решетки образуется методом прямого синтеза. Учет погрешностей позиционирования вибраторных элементов радиопеленгаторной системы произведен с помощью модели, представляющей собой объемную совокупность линейных излучателей, способных принимать произвольную ориентацию и размещенных без затенения друг друга. Поляризационные погрешности антенной системы учтены произвольной ориентацией вибратора в пространстве, которая задаётся его вращением вокруг координатных осей локальной декартовой системы координат, совмещенной с серединой этого излучателя. Проведен сравнительный анализ синтезированных по методу прямого синтеза диаграмм направленности корреляционно-*

*интерферометрического измерителя, полученных с использованием различных законов распределения ошибок пеленгования пеленгационных пар. Сделаны выводы о степени влияния среднеквадратических ошибок пеленгационных пар антенной системы по азимуту и углу места на искажения диаграммы направленности корреляционно-интерферометрического измерителя. При малом значении угломестной ошибки неприемлемые искажения диаграммы направленности радиопеленгатора наступают лишь при возрастании азимутальной ошибки до 15°. При малой азимутальной ошибке пеленгационных пар с нормальным распределением диаграмма направленности становится непригодной уже при угломестной ошибке 5°, при равномерном распределении допустима угломестная ошибка до 15°. Для среднеквадратических ошибок парциальных пар по обеим угловым координатам в 5° синтезированная диаграмма направленности практически неприемлема при углах места источника радиоизлучения более 60°. В направлении горизонта среднеквадратические ошибки пеленгационных пар вплоть до величины 30° не ухудшают точности радиопеленгатора.*

*Радиопеленгатор; кольцевая антенная решетка; диаграмма направленности; инструментальная погрешность; ошибка пеленгования; метод прямого синтеза.*

**A.I. Panychev, A.V. Maksimov, A.A. Vaganova**

### **THE ANALYSIS OF THE DIRECTION FINDER RADIATION PATTERN OF MOBILE RADIOMONITORING STATIONS**

*One of the main technical characteristics of automated radio monitoring is the accuracy of the direction finder, define the angular error of direction finding. Instrumental errors of direction finding due to errors in the design of the antenna system, the variation of parameters of antenna elements, the difference of characteristics of the feeder lines. The task of a theoretical estimation of the instrumental error for the current correction root mean square error of direction finding is relevant because of the high complexity of bench testing and calibration procedures for automated radio monitoring and the need for placement of equipment in special landfills that actively operated stations is difficult. The influence degree of layout errors of elements of the antenna system due to the error of the direction finder radiation pattern is considered. Direction finding is operating on the principle of correlation-interferometric measuring instrument in which the resulting directional characteristics of the antenna array is formed by direct synthesis method. The accounting errors of positioning of the vibrator elements of direction finder is produced by the model representing the volumetric sum of linear emitters, able to take an arbitrary orientation and is posted without shading each other. Polarization error of the antenna system is considered arbitrary orientation of the vibrator in the space which is defined by its rotation around the coordinate axes of the local Cartesian coordinate system, aligned with the middle of the radiator. A comparative analysis of synthesized by the method of direct synthesis of radiation patterns of correlation and interferometric meter, calculated with different laws of distribution of errors of direction finding direction finding pairs is carried out. The conclusions about the degree of influence the standard errors of the bearing couples the antenna system in azimuth and elevation on the radiation pattern distortion of correlation-interferometric measuring instrument are performed. With a small elevation errors unacceptable distortion of the direction finder radiation pattern come only with increasing azimuthal errors of up to 15°. At small direction-finding pairs azimuth error with the normal distribution, the radiation pattern becomes unsuitable when elevation error of 5°, in case of a uniform distribution valid elevation error of up to 15°. For the direction-finding pairs standard errors on both angular coordinates near 5° the synthesized radiation pattern is almost unacceptable when the elevation angles of the radiation source more than 60°. In the direction of the horizon direction-finding pairs standard error up to a value of 30° do not impair the accuracy of the direction finder.*

*Direction finder; a circular antenna array; pattern, instrumental error; error DF; the direct synthesis method.*

**Введение.** На мобильных постах автоматизированного радиомониторинга (АРМ) для контроля радиочастотного спектра и пеленгования источников радиоизлучения (ИРИ) в настоящее время применяются, в основном, радиопеленгаторы, работающие по принципу фазового или корреляционного интерферометра [1–3]. Антенные системы таких устройств, как правило, представляют собой кольцевые антенные решетки (КАР),

состоящие из слабонаправленных широкополосных антенных элементов. В качестве антенных элементов КАР могут использоваться конические и биконические вибраторы, штыревые антенны, дисконусные антенны, логопериодические антенны и т.д.

Одной из основных технических характеристик средств АРМ является точность радиопеленгатора, определяемая угловой ошибкой пеленгования. Точность определения угловой координаты источника радиоизлучения принято понимать как среднеквадратическую ошибку пеленгования

$$СКО = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (\mathcal{G}_i^{уст} - \mathcal{G}_i^{изм})^2}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{G}_i^{уст}$  – истинный азимут ИРИ;  $\mathcal{G}_i^{изм}$  – измеренный радиопеленгатором азимут;  $I$  – число измерений [4–6].

Обоснованное значение точности пеленгатора может быть получено только путем проведения большого числа измерений с множеством вариаций расположения ИРИ, частоты и мощности излучения тестового генератора [7–16].

Как отмечается в [17], в нижних поддиапазонах рабочих полос частот радиопеленгаторов наблюдается ухудшение точности пеленгования, вызванное влиянием земной поверхности, вследствие того, что высота мачты антенной системы оказывается соизмеримой с длиной волны. Кроме того, для корреляционных интерферометров характерно уменьшение точности пеленгования в нижней части рабочего диапазона, где корреляционная кривая, показывающая связь между теоретическим и практическим распределением поля на элементах КАР, имеет слабо выраженный максимум.

В целом, в низкочастотной части диапазона радиопеленгатора (до 100 МГц) СКО пеленгования составляет до 3° и более, на частотах до 500 МГц – улучшается до 2°, в верхней части рабочей полосы частот (до нескольких единиц гигагерц и выше) – обычно не превышает 1°.

Помимо указанных ранее причин принципиального характера, эксплуатационная точность пеленгования ИРИ в существенной мере определяется погрешностями изготовления и регулировки отдельных функциональных узлов радиопеленгатора. Эти инструментальные ошибки обусловлены, в первую очередь, несовершенством антенной системы: погрешностями конструкции КАР, разбросом параметров антенных элементов, различием характеристик фидерных трактов и т.д.

Экспериментальное определение инструментальной точности радиопеленгатора представляет собой весьма трудоемкий процесс, требующий обеспечения большого отношения сигнал – шум, что исключает возможность учета влияния погрешностей конструкции антенной системы на чувствительность пеленгатора, которая, в свою очередь, связана с СКО пеленгования обратной зависимостью. Наибольшие технические и организационные сложности измерение инструментальной погрешности вызывает в пеленгаторах с громоздкой антенной системой, а также в тех случаях, когда требуется учет угла места ИРИ и поляризационных ошибок пеленгования.

Инструментальные погрешности нарастают в процессе эксплуатации оборудования АРМ вследствие его электрического и механического износа. В наибольшей степени усиление инструментальной ошибки с увеличением срока эксплуатации проявляется в пеленгаторах мобильных постов АРМ, что обусловлено многократными циклами оперативного разворачивания и свертывания постов, и нарушением вследствие этого оптимальной компоновки элементов шарнирных креплений и откидных поворотных траверс антенной системы.

В связи с тем, что стендовые испытания и поверочные процедуры средств АРМ являются не только трудоемкими, но требуют размещения оборудования на специальных полигонах, что для активно эксплуатируемых радиопеленгаторов весьма затруднительно, становится актуальной задача теоретической оценки инструментальной погрешности для текущей коррекции СКО пеленгования.

**Основная часть.** Теория антенных систем в виде кольцевых решеток широкополосных элементов разработана достаточно подробно [18–23]. Она базируется на нескольких строгих и приближенных математических методах и допускает проведение расчетов с различной степенью точности. Однако, как показано в [24], во многих практических приложениях с достаточной степенью адекватности можно использовать модели КАР, состоящих из тонкопроволочных вибраторных антенных элементов.

В дополнение к имеющимся результатам исследований радиопеленгационных КАР выполним моделирование влияния конструктивных параметров антенной системы радиопеленгатора на погрешность пеленгования, вызванную ухудшением чувствительности вследствие нарушения компоновки элементов КАР. За основу могут быть взяты подходы, использованные в работах [25, 26] для оценки влияния ошибок изготовления антенн другого назначения на их характеристики.

Учет погрешностей позиционирования вибраторных элементов радиопеленгаторной КАР заложено в модели, представляющей собой объемную совокупность  $N$  линейных излучателей, способных принимать произвольную ориентацию и размещенных без затенения друг друга (рис. 1). Характеристика направленности такой системы излучателей формируется в результате суперпозиции характеристик направленности отдельных элементов. Элементом с номером  $n$  антенной решетки пеленгатора является симметричный прямолинейный электрический вибратор длиной  $2l_n$ .

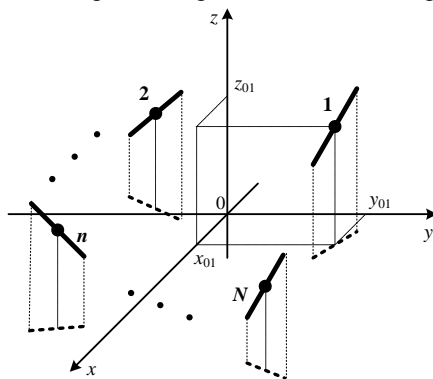


Рис. 1. Кольцевая антенная решетка радиопеленгатора

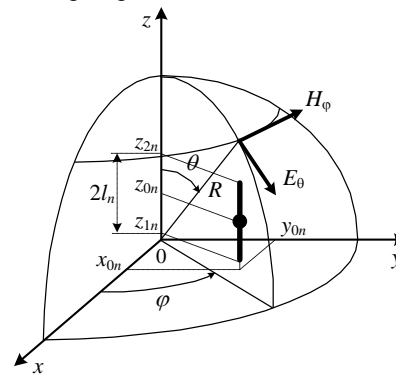


Рис. 2. К определению поля одиночного вибратора

Введем общую декартову систему координат (ДСК), в которой центр  $n$ -го вибратора расположен в точке  $(x_{0n}, y_{0n}, z_{0n})$  (рис. 2). Ось вибратора направим вдоль оси  $z$  этой ДСК. Обобщая результаты анализа поля линейного излучателя в дальней зоне, полученные в [27], на случай произвольного расположения середины вибратора, получим выражение для вертикальной составляющей комплексной амплитуды напряженности электрического поля:

$$\dot{E}'_{\theta n} = \frac{iWI_{0n}}{2\pi} \frac{e^{-ikR}}{R} e^{i(kx_{0n} \sin \theta \cos \varphi + ky_{0n} \sin \theta \sin \varphi + kz_{0n} \cos \theta)} \frac{\cos(kl_n \cos \theta) - \cos(kl_n)}{\sin \theta}, \quad (1)$$

где  $I_{0n}$  – электрический ток в точке возбуждения  $n$ -го вибратора;  $W$  – характеристическое сопротивление окружающего пространства;  $k$  – коэффициент распространения электромагнитных волн;  $R, \theta, \varphi$  – координаты сферической системы координат (ССК), центр которой совмещен с центром глобальной ДСК (рис. 2).

Ориентация вибратора в пространстве задается его вращением вокруг координатных осей локальной ДСК, совмещенной с серединой этого излучателя. Так, при последовательном вращении вибратора вокруг осей в порядке  $x, y, z$  в положительном направлении на углы  $\psi_x, \psi_y, \psi_z$  матрица перехода от старого репера к новому имеет вид

$$\Psi = \begin{pmatrix} \cos\psi_y \cos\psi_z & \cos\psi_x \sin\psi_z + \sin\psi_x \sin\psi_y \cos\psi_z & \sin\psi_x \sin\psi_z - \cos\psi_x \sin\psi_y \cos\psi_z \\ -\cos\psi_y \sin\psi_z & \cos\psi_x \cos\psi_z - \sin\psi_x \sin\psi_y \sin\psi_z & \sin\psi_x \cos\psi_z + \cos\psi_x \sin\psi_y \sin\psi_z \\ \sin\psi_y & -\sin\psi_x \cos\psi_y & \cos\psi_x \cos\psi_y \end{pmatrix}.$$

Кроме того, для получения выражения составляющей электрического поля в сферических координатах, необходимо выполнить пересчет координат и компонентов вектора из ССК в ДСК, для чего используется известная матрица перехода от базиса ССК к базису ДСК:

$$\Omega = \begin{pmatrix} \sin\theta \cos\varphi & \sin\theta \sin\varphi & \cos\theta \\ \cos\theta \cos\varphi & \cos\theta \sin\varphi & -\sin\theta \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, вектор комплексной амплитуды напряженности электрического поля  $n$ -го вибратора в глобальной ССК вычисляется по правилу

$$\vec{E}_n = \vec{E}'_n \cdot \Omega \cdot \Psi_n \cdot \Omega^T,$$

где  $\vec{E}'_n = (0 \quad \dot{E}'_{\theta n} \quad 0)^T$ .

Поле антенной решетки, являющееся суперпозицией полей отдельных вибраторов, определяется как

$$\vec{E} = \sum_{n=1}^N \vec{E}'_n \cdot \Omega \cdot \Psi_n \cdot \Omega^T. \quad (2)$$

Следовательно, электрическое поле такой антенной системы в глобальной ССК на основании (2) и (1) вычисляется по формуле

$$\vec{E} = \sum_{n=1}^N \left( \begin{array}{c} 0 \\ \frac{iWI_{0n}}{2\pi} \frac{e^{-ikR}}{R} e^{ik((x_{0n} \cos\varphi + y_{0n} \sin\varphi) \sin\theta + z_{0n} \cos\theta)} \frac{\cos(kl_n \cos\theta) - \cos(kl_n)}{\sin\theta} \\ 0 \end{array} \right) \Omega \Psi_n \Omega^T. \quad (3)$$

Рассмотрим степень влияния на угловую ошибку пеленгования погрешностей компоновки элементов антенной системы радиопеленгатора, работающего по принципу корреляционно-интерферометрического измерителя (КИИ), в котором результирующая характеристика направленности (ХН) образуется методом прямого синтеза [17]:

$$\dot{D}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \dot{D}_m(\theta, \varphi), \quad (4)$$

где  $\dot{D}_m(\theta, \varphi)$  – парциальная характеристика направленности  $m$ -й пеленгационной пары;  $M$  – количество пеленгационных пар, составленных из элементов КАР; максимальное число возможных пеленгационных пар равно  $M_{\max} = \frac{N!}{2(N-2)!}$ .

Направление прихода электромагнитной волны в КИИ вырабатывается в результате поиска максимума в двумерном массиве, определяющем зависимость мощности выходного сигнала от углового положения опорного направления  $(\theta, \varphi)$  в меридианальной и азимутальной плоскостях. Таким образом, алгоритм оценки угла и азимута источника радиоизлучения сводится к поиску максимума модуля результирующей ХН при заданных значениях угловых координат опорного (теоретического) пространственного сигнала:

$$S(\theta, \varphi) = \arg \left\{ \max \left| \dot{D}(\theta_p, \varphi_q) \right| \right\} = \arg \left\{ \max \left| \sum_{m=1}^M \dot{D}_m(\theta_p, \varphi_q) \right| \right\}, \quad (5)$$

где  $\theta_p = p\Delta\theta$  – текущее значение угла опорного направления в угломестной плоскости;  $\Delta\theta = \pi/(2P)$  – шаг вычисления;  $p$  и  $P$  – текущее значение и общее число точек вычисления в угломестной плоскости;  $p = 0, \dots, P-1$ ;  $\varphi_q = q\Delta\varphi$  – текущее значение угла опорного направления в азимутальной плоскости;  $\Delta\varphi = 2\pi/Q$  – шаг вычисления;  $q$  и  $Q$  – текущее значение и общее число точек вычисления в азимутальной плоскости;  $q = 0, \dots, Q-1$ .

Учитывая, что элементы антенной системы образуют кольцевую антенную решетку в общем случае с несколькими кольцами вибраторов, из (1) получим выражение для парциальной ХН:

$$\begin{aligned} \dot{D}_m(\theta_p, \varphi_q) = \exp \left\{ ik \left[ R_{n_1} \left( \sin \theta_m^{u3M} \cos(\varphi_m^{u3M} - \varphi_{n_1}) - \sin \theta_p \cos(\varphi_q - \varphi_{n_1}) \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - R_{n_2} \left( \sin \theta_m^{u3M} \cos(\varphi_m^{u3M} - \varphi_{n_2}) - \sin \theta_p \cos(\varphi_q - \varphi_{n_2}) \right) \right] \right\} \times \quad (6) \\ \times \left( \frac{\cos(kl_n \cos \theta_m^{u3M}) - \cos(kl_n)}{\sin \theta_m^{u3M}} \right)^2, \end{aligned}$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – номера элементов, образующих  $m$ -ю пеленгационную пару антенных элементов ( $n_1 \neq n_2$ );  $R_{n_1}, R_{n_2}$  – радиусы колец, на которых расположены элементы пеленгационной пары;  $\varphi_{n_1}, \varphi_{n_2}$  – углы расположения антенных элементов пеленгационной пары;  $\theta_m^{u3M}, \varphi_m^{u3M}$  – углы в ССК, задающие направление на источник радиоизлучения, определенные  $m$ -й пеленгационной парой.

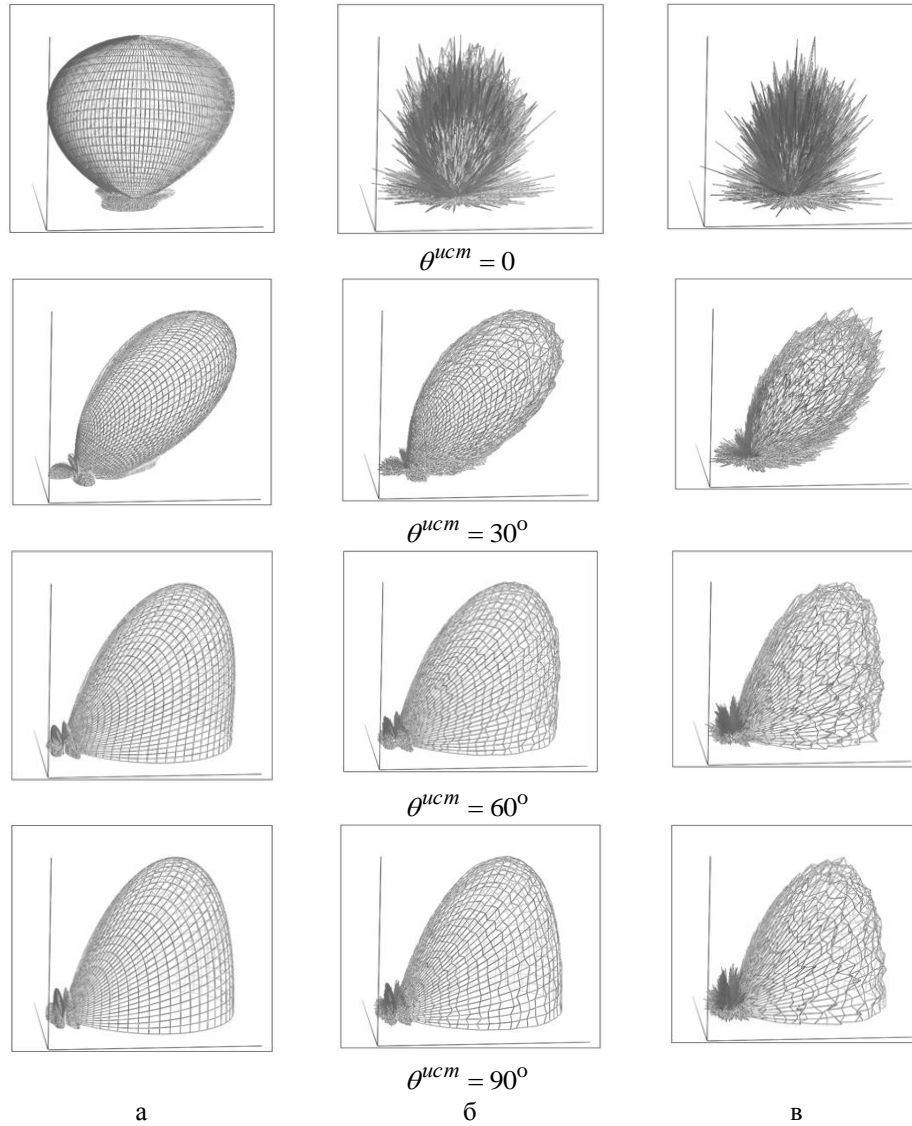
Считаем, что пеленгационная КАР содержит одно кольцо радиуса  $R = R_{n_1} = R_{n_2}$ , лежащее в экваториальной плоскости ССК, тогда выражение (6) упрощается и принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{D}_m(\theta_p, \varphi_q) = \exp \left\{ ikR \left[ \sin \theta_m^{u3M} \left( \cos(\varphi_m^{u3M} - \varphi_{n_1}) - \cos(\varphi_m^{u3M} - \varphi_{n_2}) \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \sin \theta_p \left( \cos(\varphi_q - \varphi_{n_1}) - \cos(\varphi_q - \varphi_{n_2}) \right) \right] \right\} \times \quad (7) \\ \times \left( \frac{\cos(kl_n \cos \theta_m^{u3M}) - \cos(kl_n)}{\sin \theta_m^{u3M}} \right)^2. \end{aligned}$$

Таким образом, координаты источника радиоизлучения определяются углами  $\theta_m^{u3M}, \varphi_m^{u3M}$ , измеренными различными пеленгационными парами. Каждая пара элементов характеризуется среднеквадратической ошибкой пеленгования (1), в большой степени обусловленной погрешностями компоновки антенных элементов КАР, проявляющимися в неточном позиционировании излучателей как по радиальной, так и по угловым координатам.

Рассмотрим корреляционно-интерферометрический измеритель со следующими параметрами антенной системы: количество элементов  $N=11$  (максимальное число пеленгационных пар  $M_{\max}=55$ ); электрический радиус КАР  $R/\lambda = 0,45$  (низкочастотная часть диапазона радиопеленгатора); антенные элементы имеют диаграмму направленности элементарного электрического вибратора; СКО по обеим угловым координатам  $\sigma_\varphi = 5^\circ$ ;  $\sigma_\theta = 5^\circ$  (типичные для низкочастотной части диапазона радиопеленгатора значения).

На рис. 3 представлены синтезированные по (4) и (7) диаграммы направленности при различных углах места источника радиоизлучения. Рис. 3,а иллюстрирует изменение формы теоретической ДН КИИ, полученной в предположении, что угловая ошибка всех пеленгационных пар равна нулю. На рис. 3,б представлены реализации синтезированной ДН КИИ в случае равномерного распределения ошибок пеленгования всех пар элементов, что справедливо для инструментальной ошибки пеленгования на первоначальном этапе эксплуатации оборудования или при редком развертывании антенной системы.



$$N = 11; R/\lambda = 0,45; \varphi^{ист} = 0; \sigma_\varphi = 5^\circ; \sigma_\theta = 5^\circ$$

Рис. 3. Зависимость формы синтезированной ДН КИИ от угла места источника радиоизлучения: а – теоретическая ДН; б – равномерное распределение ошибок пеленгования; в – нормальное распределение ошибок пеленгования

Измеренное значение направления на источник радиоизлучения полагалось равномерно распределенным на отрезке  $5^\circ$  вблизи истинного значения азимутального  $\varphi^{ист}$  и угломестного  $\theta^{ист}$  пеленга.

На рис. 3, в приведены реализации формы ДН КИИ при нормальном распределении угловых ошибок пеленгационных пар, характерном для этапа активной эксплуатации радиопеленгатора. Параметры распределения: математическое ожидание –  $\varphi^{ист}$ ,  $\theta^{ист}$ , среднеквадратическое отклонение –  $\sigma_\varphi$ ;  $\sigma_\theta$ .

Качественный анализ синтезированных ДН показывает, что наибольшие погрешности определения направления на источник радиоизлучения характерны для нормального распределения угловых ошибок пеленгационных пар. Кроме того, погрешность КИИ возрастает по мере увеличения угла места измеряемого направления. Это вызвано снижением чувствительности радиопеленгатора в зоне зенита, обусловленным формой диаграммы направленности антенных элементов. Очевидно, что при типичных для низкочастотной части диапазона радиопеленгатора среднеквадратических ошибках по обеим угловым координатам в  $5^\circ$  ДН КИИ в секторе углов отклонения от зенита до  $30^\circ$  практически разваливается, и определение пеленга невозможно.

Факт сильной зависимости погрешности угловых измерений корреляционно-интерферометрического измерителя от точности пеленгационных пар по угломестной координате подтверждают рис. 4, 5, на которых представлены формы реализаций синтезированных ДН КИИ при различных СКО по азимуту и углу места.

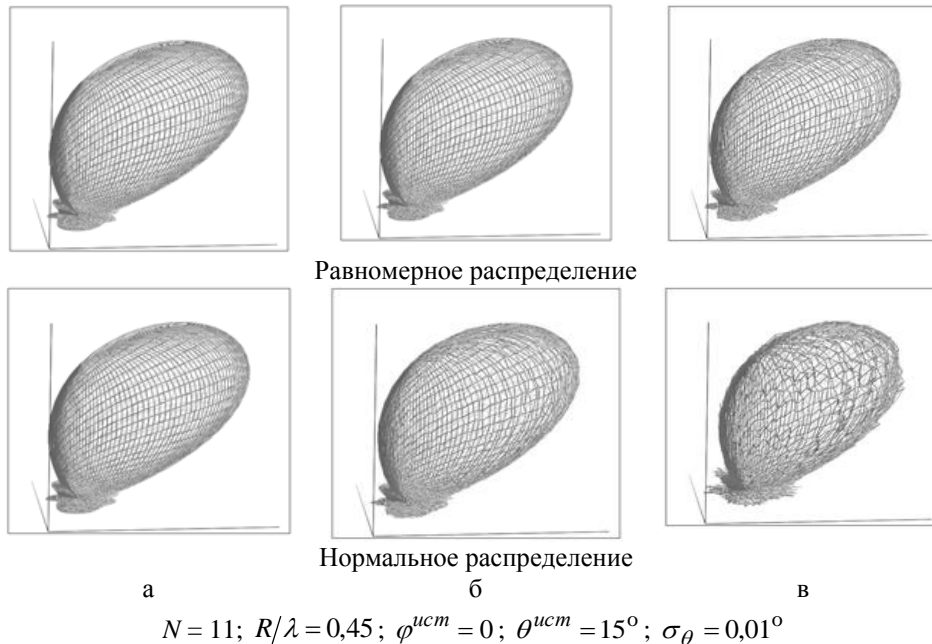


Рис. 4. Зависимость формы синтезированной ДН КИИ от азимутальной СКО пеленгационных пар: а)  $\sigma_\varphi = 1^\circ$ ; б)  $\sigma_\varphi = 5^\circ$ ; в)  $\sigma_\varphi = 15^\circ$

Как следует из рис. 4, форма синтезированной диаграммы направленности корреляционно-интерферометрического измерителя практически не зависит от азимутальной СКО пеленгационных пар как при равномерном, так и при нормаль-



ном распределении ошибок. При малом значении угломестной СКО  $\sigma_\theta = 0,01^\circ$  заметное искажение формы ДН и следовательно, увеличение ошибки пеленгования, наступают лишь при возрастании азимутальной СКО  $\sigma_\varphi$  до  $15^\circ$ . Такие значения СКО для низкочастотной части рабочего диапазона радиопеленгатора не характерны, поэтому можно утверждать, что угловые ошибки пеленгационных пар КАР в азимутальной плоскости не сказываются на точности измерений КИИ.

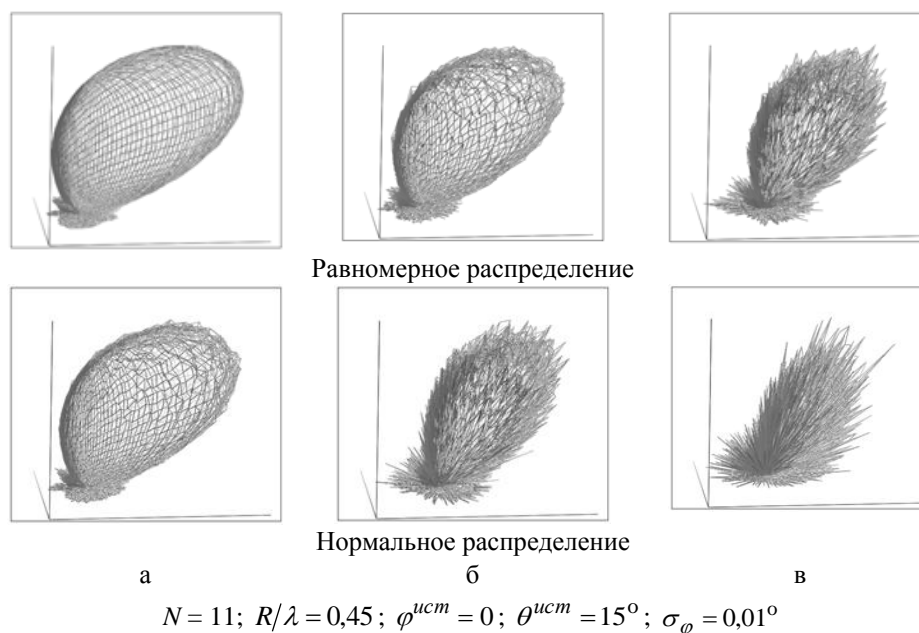
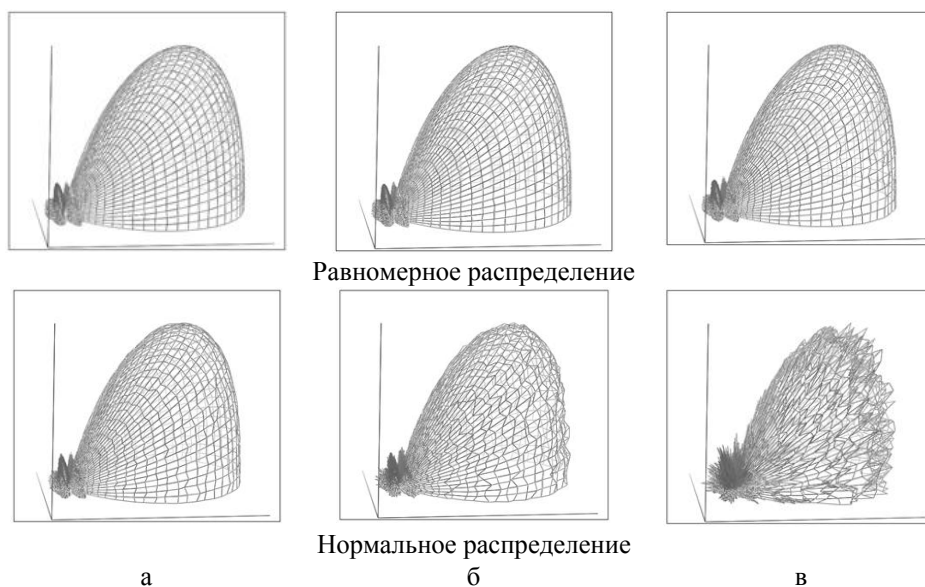


Рис. 5. Зависимость формы синтезированной ДН КИИ от угломестной СКО пеленгационных пар: а)  $\sigma_\theta = 1^\circ$ ; б)  $\sigma_\theta = 5^\circ$ ; в)  $\sigma_\theta = 15^\circ$

Рис. 5 иллюстрирует существенную зависимость формы синтезированной ДН КИИ от значения угломестной СКО пеленгационных пар при малой азимутальной СКО  $\sigma_\varphi = 0,01^\circ$ . В случае равномерного распределения ошибок пеленгования антенных элементов КАР заметные искажения диаграммы направленности КИИ возникают при угломестной СКО  $\sigma_\theta = 5^\circ$ , а при значении  $\sigma_\theta = 15^\circ$  синтезированная ДН становится малопригодной для надежной пеленгации источника радиоизлучения. Для нормального распределения угловых ошибок пеленгационных пар диаграмма направленности КИИ теряет приемлемую форму уже при угломестной СКО, равной  $5^\circ$ .

Как следует из рис. 3, величина инструментальной погрешности, вызванной ошибками компоновки элементов антенной системы радиопеленгатора, уменьшается с уменьшением угла места источника радиоизлучения и достигает минимума при  $\theta^{уст} = 90^\circ$ . Проследим влияние угломестной СКО на форму синтезированной диаграммы направленности корреляционно-интерферометрического измерителя в горизонтальной плоскости (рис. 6). Видно, что при равномерном распределении угловых ошибок пеленгационных пар угломестная СКО не оказывает практического влияния на ДН КИИ. В случае нормального распределения пеленгационных

ошибок существенных искажений синтезированной ДН следует ожидать только при угломестной СКО  $\sigma_\theta = 30^\circ$ , что не характерно для в низкочастотной части рабочего диапазона радиопеленгатора.



$$N = 11; R/\lambda = 0,45; \varphi^{уст} = 0; \theta^{уст} = 90^\circ; \sigma_\varphi = 1^\circ$$

Рис. 6. Зависимость формы синтезированной ДН КИИ от угломестной СКО пеленгационных пар: а –  $\sigma_\theta = 5^\circ$ ; б –  $\sigma_\theta = 15^\circ$ ; в –  $\sigma_\theta = 30^\circ$

**Заключение.** Анализ диаграмм направленности пеленгатора мобильного поста радиомониторинга, работающего по принципу корреляционно-интерферометрического измерителя, показывает, что среднеквадратические угловые ошибки пеленгационных пар в разной степени сказываются на точности определения пеленга.

При малом значении угломестной СКО увеличение ошибки пеленгования наступают лишь при возрастании азимутальной СКО до  $15^\circ$ . Следовательно, в низкочастотной части рабочего диапазона радиопеленгатора угловые ошибки пеленгационных пар КАР в азимутальной плоскости не сказываются на точности измерений КИИ.

Напротив, зависимость формы синтезированной ДН КИИ от значения угломестной СКО пеленгационных пар при малой азимутальной ошибке весьма существенная. В случае равномерного распределения ошибок пеленгования антенных элементов КАР заметные искажения диаграммы направленности КИИ возникают при угломестной СКО  $\sigma_\theta = 5^\circ$ , а при значении  $\sigma_\theta = 15^\circ$  синтезированная ДН становится малоприменной для надежной пеленгации источника радиоизлучения. Для нормального распределения угловых ошибок пеленгационных пар диаграмма направленности КИИ теряет приемлемую форму уже при угломестной СКО в  $5^\circ$ . Следовательно, справедлив также вывод о более сильном влиянии нормального, нежели равномерного, распределения ошибок на форму синтезированной ДН.

Парциальные СКО в максимальной степени сказываются в близких к зениту направлениях пеленгования. Для среднеквадратических ошибок парциальных пар по обеим угловым координатам в  $5^\circ$  синтезированная диаграмма направленности КИИ практически неприемлема для однозначного определения пеленга при углах места источника радиоизлучения более  $60^\circ$ . В направлении горизонта СКО пеленгационных пар вплоть до  $30^\circ$  практически не искажают форму синтезированной диаграммы направленности корреляционно-интерферометрического измерителя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рембовский А.М. Автоматизированный радиоконтроль излучений: задачи и средства // Специальная техника. – 2002. – С. 2-6.
2. Ашихмин А.В., Виноградов А.В., Рембовский А.М. Принципы построения современных радиопеленгаторов // Ведомственные корпоративные сети и системы. – 2002. – № 2. – С. 80-85.
3. Рембовский А.М. Задачи и структура средств автоматизированного радиоконтроля // Специальная техника. – 2003. – С. 2-8.
4. Регламент радиосвязи. Т. 1. – М.: Радио и связь, 1985. – 509 с.
5. Справочник по радиоконтролю / Бюро радиосвязи Международного Союза Электросвязи. Роберт У. Джонс. – 1995.
6. Справочник по радиоконтролю. МСЭ 2002. – Женева, 2004.
7. Douglas N. Trovers. The Effect of Mutual Impedance on the Spacing Error of an Eight Element // Ahdcock. IRE, Trans. on Ant. and Prop. – 1957. – Vol. AP-S, № 1. – P. 36-39.
8. Johnson R.L., Miner G.E. Comparison of Superresolution Algorithms for Radio Direction Finding // IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst. – 1986. – Vol. 22, № 4. – P. 432-442.
9. Реши Дж. П. Алгоритм оценивания направления прихода радиоволн с высоким разрешением в реальном времени // ТИИЭР. – 1987. – Т. 75.12. – С. 166-168.
10. Schmidt R.O. A Signal Subspace Approach to Multiple Emitter Location and Spectral Estimation: Ph. D. dissertation. – Stanford: 1981.
11. Schmidt R.O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation // Proc. RADC Spectrum Estimation Workshop, Griffiths AFB, Rome, NY. – 1979. – P. 243-258.
12. Донец И.В., Рейзенкинд Я.А. Итерационное уточнение оценки пеленга при разрешении нескольких когерентных сигналов круговой антенной решеткой // Радиоконтроль. – 2003. – Вып. 6.
13. Jun Chen, Wei Hong. An Iterative Algorithm, Based on the Mesered Equation of Invariance for the Scattering Analyses of Arbitray Multicylinders. // IIE Trans, on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47, № 9. – P. 1233-1239.
14. Иванов А.В., Кузьминов Ю.В., Паньчев С.Н. Оценка результирующей точности нелинейных антенных измерений методом интервального анализа // Антенны. – 2005. – Вып. 7-8 (98- 99). – С. 79- 82.
15. Иванов А.В., Пастернак Ю.Г. Алгоритм оценки азимута источника СВЧ излучения с помощью кольцевой антенной решетки из логопериодических антенн // Телекоммуникации. – 2006. – №11. – С. 26- 31.
16. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Родзивилов В.А., Федоров И.Б., Чернов М.В. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 2. – С. 3-17.
17. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под редакцией А.М. Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 492 с.
18. Sestroretzkiy B.V., Nazarov A.G., Klimov K.N. Electrodynamical Analysis and Topological Optimization of Broad Band Polarized Devices // Proceeding of 5-th International Symposium on recent advances in microwave technology, Kiev. – 1995. – Vol. 2. – P. 711-713.
19. Swindlehurs A., Kailath T. Azimuth / Elevation Direction Finding Regular Array Geometries // IEEE Trans. Aerosp. and Electron Syst. – 1993. – Vol. 23.1, № 1. – P. 145-156.
20. Dinger R. A Planar Version of a 4 GHz Reactively Steered Adaptive Array // IEEE Trans. Antennas and Propag. – 1986. – Vol. 34, № 3. – P. 427-431.
21. Nicel U. Angle Estimation With Adaptive Arrays and Its Relation to Super-Resolution // IEEE Proc. – 1987. – Vol. 134, № 1. – P. 77-82.

22. Upanikrishna Pillai S., Bar-Ness Y., Haber F. A New Approach to Array Geometry to improved Spatial Spectrum Estimation // Proc. of IEEE. – 1985. – Vol. 73, № 10. – P. 93-95.
23. Хансен Р.С. Сканирующие антенные системы СВЧ: В 3-х т.: Пер. с англ. / Под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. – М.: Сов. Радио, 1966. Т. 1. – 536 с.; 1969. Т. 2. – 496 с.; 1971. Т. 3. – 464 с.
24. Иванов А.В. Математическое обеспечение программно-методического комплекса проектирования радиопеленгаторных антенн, основанное на систематизации их эвристических и строгих моделей: дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж: ВГТУ, 2007. – 226 с.
25. Паньчев А.И., Соломахин П.А. Модель антенны базовой станции системы сотовой связи // Телекоммуникации. – 2003. – № 4. – С. 25-29.
26. Паньчев А.И., Тищенко Б.В. Оценка влияния ошибок изготовления антенны базовой станции системы GSM на ее характеристики // Антенны. – 2003. – Вып. 6(73). – С. 43-47.
27. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 2000. – 559 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

**Максимов Александр Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: kafmps@tppark.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328058; кафедра встраиваемых систем; доцент.

**Паньчев Андрей Иванович** – e-mail: ruu2011@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; доцент.

**Ваганова Анастасия Алексеевна** – e-mail: anastasia\_vaganova@mail.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; студент.

**Maksimov Aleksandr Viktorovich** – Southern Federal University; e-mail: kafmps@tppark.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328058; the department of embedded systems; associate professor.

**Panychev Andrey Ivanovich** – e-mail: gvf@dce.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371737; department of antenna and radio transmitter units; associate professor.

**Vaganova Anastasia Alekseevna** – e-mail: anastasia\_vaganova@mail.ru; the department of antenna and radio transmitter units; student.

УДК 621.396.67

**Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко, Д.С. Дерачиц**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОПРОФИЛЬНЫХ КОНФОРМНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН**

*В связи с ростом спроса на недорогие системы связи, микрополосковой плоской антенны, в последнее время претерпела огромный рост. Хотя применяемые конформные микрополосковые антенны широко используются, влияние кривизны на характеристики антенны детально не изучены. Микрополосковые антенны широко используются на таких объектах как самолеты, ракеты, в системах связи. Преимущества таких антенн очевидны, они технологичны, легко устанавливаются на такие объекты и не требуют наличия обтекателя. Проведены исследования характеристик конформной МПА на примере прямоугольного излучателя, расположенной на цилиндрической поверхности. Для моделирования характеристик антенны использовался пакет электромагнитного моделирования FEKO. Выполнена оптимизация конструкции плоской микрополосковой антенны по критерию обеспечения минимального коэффициента стоячей волны (КСВН). Получены обобщенные зависимости влияния радиуса кривизны антенны на резонансную частоту при различной ориентации МПА на цилиндрической поверхности. Показано, что при деформации антенны на цилиндрической поверхности в Е-плоскости с уменьшением кривизны резонансная частота антенны смещаются в сторону повышения частоты, в то время как при деформации антенны на цилиндрической*