

УДК 621.396.663

А.И. Панычев, А.В. Максимов, А.А. Ваганова
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК РАЗМЕЩЕНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННЫ НА ПОГРЕШНОСТЬ
КОРРЕЛЯЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО
РАДИОПЕЛЕНГАТОРА**

*Южный федеральный университет,
Институт радиотехнических систем и управления,
Таганрог, Россия*

Основными источниками инструментальных ошибок пеленгования в средствах автоматизированного радиомониторинга являются погрешности конструкции и разброс характеристик фидерных трактов антенной системы. В работе рассмотрен радиопеленгатор, реализующий принцип корреляционно-интерферометрического измерителя, в котором результирующая характеристика направленности кольцевой антенной решетки образуется методом прямого синтеза. Использована модель объемной совокупности линейных излучателей, способных принимать произвольную ориентацию и размещенных без затенения друг друга. Даны оценки искажений синтезированной диаграммы направленности, обусловленных ошибками позиционирования элементов антенной системы по азимутальной и радиальной координатам. Проведен сравнительный анализ реализаций синтезированных диаграмм направленности радиопеленгатора, полученных с использованием различных законов распределения геометрических ошибок. Сделаны выводы о степени влияния среднеквадратических ошибок размещения антенных элементов по азимуту и радиусу на искажения диаграммы направленности. Установлено, что смещение элементов кольцевой антенной решетки по азимуту значительно, радиальное смещение, искажает диаграмму направленности. Рассчитаны основные статистические характеристики ошибок пеленгования по обеим угловым координатам при разных законах распределения погрешностей размещения элементов антенной решетки. При равномерном распределении погрешностей размещения гипотеза о том, что инструментальная ошибка по азимутальной координате имеет нормальное распределение, принимается в соответствии с критерием согласия Пирсона. В случае нормального распределения погрешностей размещения закон распределения инструментальной ошибки по обеим координатам не является нормальным.

Ключевые слова: радиопеленгатор, кольцевая антенная решетка, диаграмма направленности, инструментальная погрешность, метод прямого синтеза

Введение. Для контроля радиочастотного спектра и пеленгования источников радиоизлучения (ИРИ) применяют, в основном, корреляционные интерферометрические радиопеленгаторы (КИР) [1–3], антенные системы которых представляют собой кольцевые антенные решетки (КАР) слабонаправленных широкополосных антенных элементов [4–9].

Точность определения угловой координаты ИРИ определяют как среднеквадратическую ошибку (СКО) пеленгования

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

где $\mathcal{G}_i^{ист}$ – истинное направление на ИРИ; $\mathcal{G}_i^{изм}$ – измеренное радиопеленгатором направление; I – число измерений [9, 10].

Инструментальные погрешности пеленгования нарастают в процессе эксплуатации радиопеленгатора вследствие его электрического и механического износа [11]. Этот эффект в наибольшей степени проявляется в мобильных постах радиомониторинга, для которых характерны многократные циклы оперативного разворачивания и свертывания постов, и нарушение вследствие этого оптимальной компоновки элементов шарнирных креплений и откидных поворотных траверс антенной системы.

Модель и методы исследования. Теория кольцевых антенных решеток разработана достаточно подробно [12–16]. Она базируется на строгих и приближенных математических методах и, как показано в [16], во многих практических приложениях с достаточной степенью точности можно использовать модели КАР, состоящих из тонких вибраторных антенных элементов. В основу моделирования влияния на погрешность пеленгования ошибок размещения элементов КАР могут быть положены подходы, использованные в [17–19].

Рассмотрим корреляционный интерферометрический радиопеленгатор (КИР), в котором результирующая диаграмма направленности (ДН) образуется методом прямого синтеза [11]:

$$\dot{D}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \dot{D}_m(\theta, \varphi), \quad (2)$$

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

Направление прихода электромагнитной волны в КИР вырабатывается в результате поиска максимума в двумерном массиве, определяющем зависимость мощности сигнала от положения опорного направления (θ, φ) в угломестной и азимутальной плоскостях. Таким образом, алгоритм оценки угла места и азимута ИРИ сводится к поиску максимума модуля результирующей ДН при заданных угловых координатах опорного пространственного сигнала:

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

где $\theta_p = p\Delta\theta$ – текущее значение опорного угла места; $\Delta\theta = \pi/(2P)$ – 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 опорного азимута; $\Delta\varphi = 2\pi/Q$ – 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 КАР в общем случае с несколькими кольцами тонких вертикальных вибраторов, из (2) получим выражение для парциальной ДН:

$$\begin{aligned} \dot{D}_m(\theta_p, \varphi_q) = \exp \left\{ ik \left[R_{n_1} \left(\sin \theta_m^{u_{3M}} \cos(\varphi_m^{u_{3M}} - \varphi_{n_1}) - \sin \theta_p \cos(\varphi_q - \varphi_{n_1}) \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - R_{n_2} \left(\sin \theta_m^{u_{3M}} \cos(\varphi_m^{u_{3M}} - \varphi_{n_2}) - \sin \theta_p \cos(\varphi_q - \varphi_{n_2}) \right) \right] \right\} \times \quad (3) \\ \times \left(\frac{\cos(kl \cos \theta_m^{u_{3M}}) - \cos(kl)}{\sin \theta_m^{u_{3M}}} \right)^2, \end{aligned}$$

где n_1 и n_2 – номера элементов, образующих m -ю ПП антенных элементов ($n_1 \neq n_2$); R_{n_1}, R_{n_2} – радиусы колец, на которых расположены элементы ПП; $k = 2\pi/\lambda$ – коэффициент распространения электромагнитных волн; l – длина плеча электрического вибратора; $\varphi_{n_1}, \varphi_{n_2}$ – углы расположения антенных элементов ПП; $\theta_m^{u_{3M}}, \varphi_m^{u_{3M}}$ – углы, задающие направление на ИРИ, определенные m -й ПП.

Если пеленгационная КАР содержит только одно кольцо с радиусом $R = R_{n_1} = R_{n_2}$, лежащее в горизонтальной плоскости, то выражение (3) упрощается:

$$\begin{aligned} \dot{D}_m(\theta_p, \varphi_q) = \exp \left\{ i2\pi \frac{R}{\lambda} \left[\sin \theta_m^{u_{3M}} \left(\cos(\varphi_m^{u_{3M}} - \varphi_{n_1}) - \cos(\varphi_m^{u_{3M}} - \varphi_{n_2}) \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \sin \theta_p \left(\cos(\varphi_q - \varphi_{n_1}) - \cos(\varphi_q - \varphi_{n_2}) \right) \right] \right\} \times \quad (4) \\ \times \left(\frac{\cos(kl \cos \theta_m^{u_{3M}}) - \cos(kl)}{\sin \theta_m^{u_{3M}}} \right)^2. \end{aligned}$$

Таким образом, координаты ИРИ определяются углами $\theta_m^{u_{3M}}, \varphi_m^{u_{3M}}$, измеренными различными ПП. Каждая пара элементов характеризуется

среднеквадратической ошибкой пеленгования (1), в значительной степени обусловленной погрешностями размещения элементов КАР по радиальной и угловым координатам.

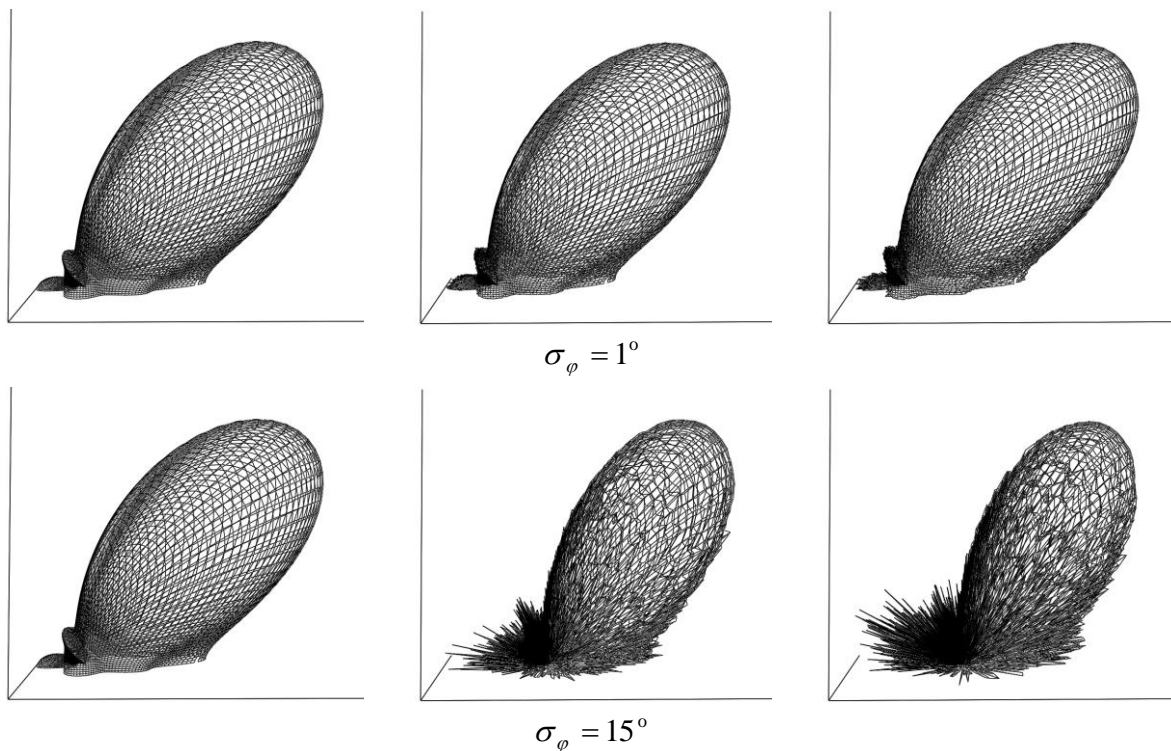
Погрешность компоновки элементов КАР по азимутальной координате моделируется введением в выражение (4) непрерывных случайных величин φ_{n_1} и φ_{n_2} . Ошибка позиционирования по радиальной координатам моделируется введением непрерывной случайной величины R/λ . Случайные величины имеют равномерный или нормальный закон распределения. На первоначальном этапе эксплуатации оборудования или при редком развертывании антенной системы наиболее адекватной моделью является равномерное распределение ошибок позиционирования антенных элементов КАР. Для активно эксплуатируемых антенн более подходит нормальное распределение ошибок размещения антенных элементов.

В качестве математического ожидания случайных координат использовано теоретическое значение параметра. При равномерном законе распределения ошибки размещения элементов КАР диапазон возможных значений случайной величины определяется размерами и конструкцией шарнирных креплений и откидных поворотных траверс антенной системы. В случае нормального распределения ошибки компоновки элементов КАР используется СКО, величина которого задается по правилу «три сигма» с учетом размеров конструкции антенны.

Результаты моделирования. Рассмотрим КИР со следующими параметрами антенной системы: количество элементов $N = 8$ (максимальное число ПП $M_{\max} = 28$); электрический радиус КАР $R/\lambda = 0,45$; антенные элементы имеют ДН вертикального элементарного электрического вибратора. Опорное направление ИРИ задается углами $\varphi^{уст} = 10^\circ$; $\theta^{уст} = 30^\circ$.

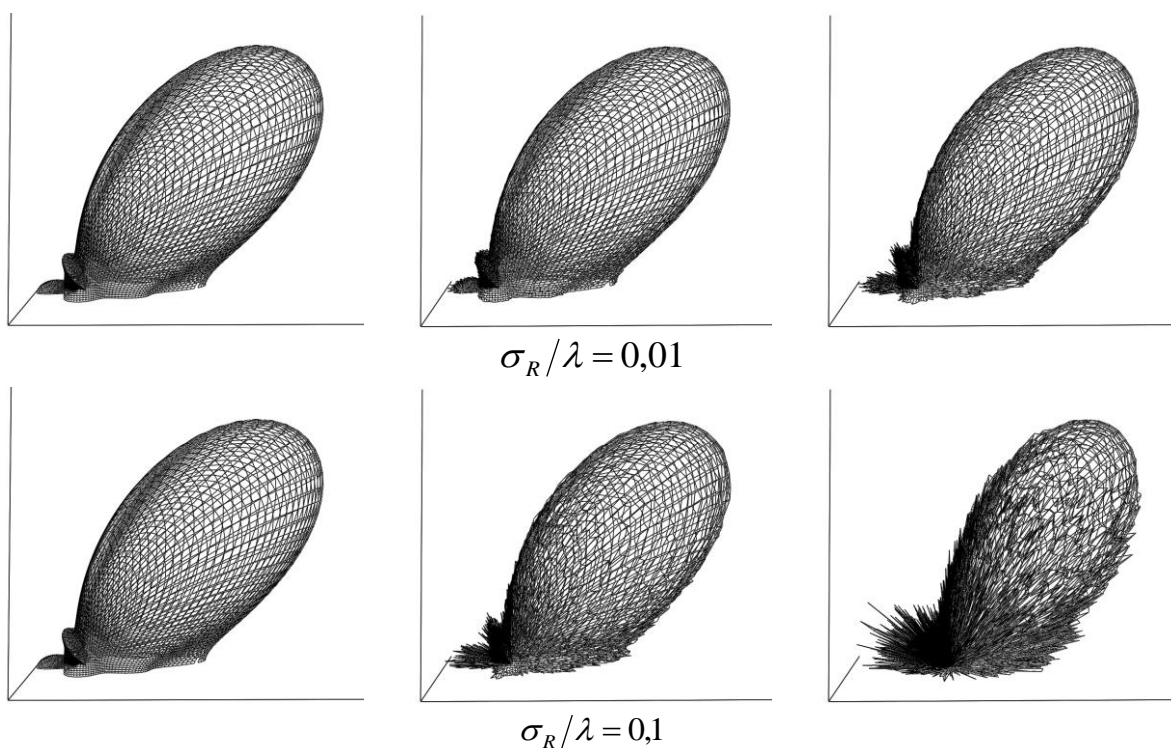
На рисунке 1 представлены реализации синтезированной по (2) и (4) ДН КИР при различных СКО азимутального размещения элементов КАР σ_φ и двух законах распределения ошибок позиционирования.

Реализации синтезированной ДН КИР при различных СКО радиального размещения элементов КАР σ_R и двух законах распределения ошибок позиционирования приведены на рисунке 2.



теоретическая ДН равномерное распределение нормальное распределение

Рисунок 1 – Реализации синтезированной ДН КИР при различных ошибках азимутального размещения элементов КАР



теоретическая ДН равномерное распределение нормальное распределение

Рисунок 2 – Реализации синтезированной ДН КИР при различных ошибках

радиального размещения элементов КАР

Как следует из рисунков 1 и 2, при использованных в моделировании истинных значениях угловых координат, искажения синтезированной ДН в больше степени проявляются при ошибках размещения антенных элементов КАР по азимуту. И при азимутальных, и при радиальных ошибках позиционирования искажения синтезированной ДН сильнее в случае нормального закона распределения ошибок.

Рисунок 3 содержит реализации синтезированной ДН КИР при различных СКО геометрического размещения элементов КАР и различных сочетаниях законов распределения азимутальных и радиальных ошибок.

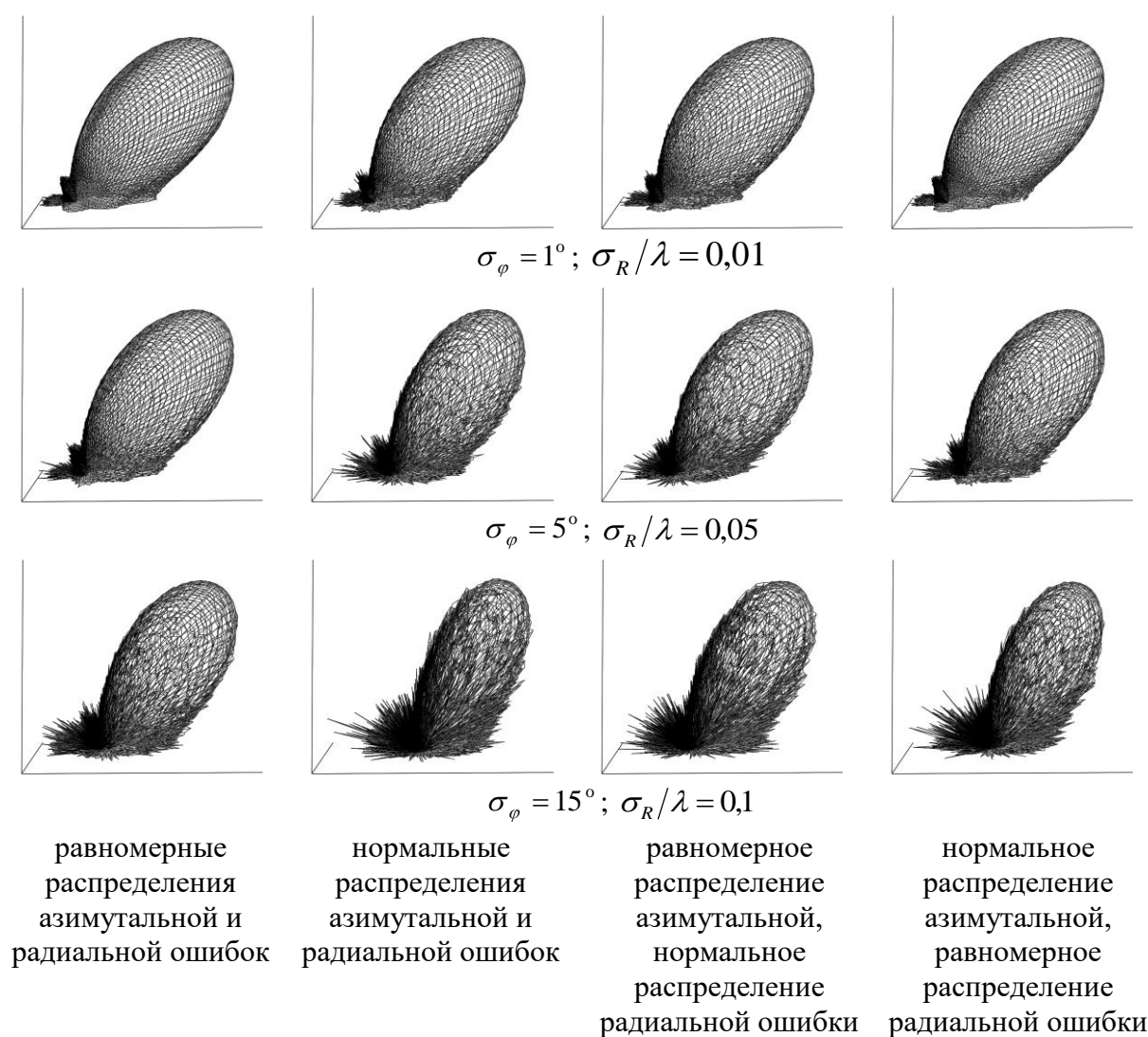


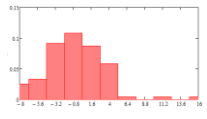
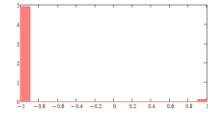
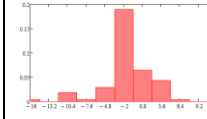
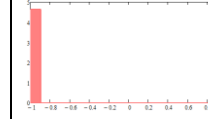
Рисунок 3 – Реализации синтезированной ДН КИР при различных ошибках геометрического размещения элементов КАР

Рисунок 3 иллюстрирует преобладающее влияние на искажения ДН КИР оказывают ошибки размещения антенных элементов КАР, распределенные по нормальному закону.

Таким образом, моделирование влияния износа шарнирных креплений и откидных поворотных траверс антенной системы на синтезированную ДН КИР показывает, что с увеличением срока службы КАР, когда справедлив равномерный закон распределения ошибок размещения антенных элементов, увеличиваются искажения ДН и, следовательно, возрастает инструментальная ошибка пеленгования.

С целью получения статистической оценки погрешности пеленгования рассчитаны массивы значений ошибки измерения азимутального ($\varphi_i^{ист} - \varphi_i^{изм}$) и угломестного ($\theta_i^{ист} - \theta_i^{изм}$) углов, $i = \overline{1, I}$, $I = 100$. Основные статистические характеристики ошибок пеленгования при разных законах распределения азимутальной и радиальной ошибок размещения антенных элементов КАР, полученные как результат обработки этих массивов, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Статистические характеристики ошибок пеленгования

Статистическая характеристика	Ошибка пеленгования			
	Равномерное распределение		Нормальное распределение	
	Азимутальная координата	Угломестная координата	Азимутальная координата	Угломестная координата
Математическое ожидание	0,22	- 0,96	- 0,32	- 0,86
Дисперсия	12,95	0,08	- 14,46	0,26
СКО	3,6	0,28	3,8	0,51
Коэффициент асимметрии	0,93	6,96	- 0,63	3,42
Гистограмма				

Статистические характеристики ошибок пеленгования, представленные в табл. 1, показывают, что математическое ожидание ошибки измерения угломестной координаты приближается к 1,0 градусу, в то время как среднее значение ошибки измерения азимутального угла не превышает 0,3 градуса. Вместе с этим, СКО измерения угломестной координаты не более 0,5 градуса, а СКО измерения азимутального угла более 3,5 градусов. В целом, величина СКО соответствует требованиям к пеленгаторам автоматизированных средств радиомониторинга [11].

Поскольку коэффициент асимметрии совокупности ошибок измерения угломестной координаты значительно больше единицы при

обоих закон распределения ошибок позиционирования элементов КАР, то инструментальная ошибка угломестной координаты имеет распределение, существенно отличное от нормального.

Совокупность ошибок измерения азимутального угла коэффициент асимметрии меньше единицы, что не исключает нормального закона распределения. Применение критерия согласия Пирсона позволило установить, что при равномерном законе распределения ошибок размещения антенных элементов КАР гипотеза о нормальном распределении инструментальной погрешности измерения азимута может быть принята, при нормальном распределении ошибок позиционирования – отвергнута.

Заключение. Таким образом, предложенная модель для исследования влияния погрешности размещения элементов антенной системы на точность КИР позволяет получить качественную картину искажений ДН радиопеленгатора и оценить величину основных статистических характеристик ошибок пеленгования.

ЛИТЕРАТУРА

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. Донец И.В., Рейзенкинд Я.А. Итерационное уточнение оценки пеленга при разрешении нескольких когерентных сигналов круговой антенной решеткой // Радиоконтроль. 2003. Вып. 6.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Регламент радиосвязи. Т.1. М.: Радио и связь, 1985. 509 с.
 10. Справочник по радиоконтролю. МСЭ 2002. Женева, 2004.
 11. 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.
 12. Swindlehurst A., Kailath T. Azimuth / Elevation Direction Finding Regular Array Geometries // IEEE Trans. Aerosp. and Electron Syst. 1993. Vol. 23.1. № 1. P. 145-156.
 13. 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.
 14. Nicel U. Angle Estimation With Adaptive Arrays and Its Relation to Super-Resolution // IEEE Proc. 1987. Vol. 134. № 1. P. 77-82.
 15. 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.
 16. 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.
 17. Панычев А.И., Соломахин П.А. Модель антенны базовой станции системы сотовой связи // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 25-29.
 18. Панычев 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.
 19. Panychev A.I. Ring Antenna Array with Cylindrical Reflector. DOI: 10.1109/CRIMICO.2005.1564940.

A.I. Panychev, A.V. Maksimov, A.A. Vaganova
**MODELING OF THE EFFECT OF ANTENNA ELEMENTS
ARRANGEMENT INACCURACY ON THE ERROR OF THE
CORRELATION INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDER**

*Southern Federal University,
Institute of Radio Engineering Systems and Control,
Taganrog, Russia*

The main sources of instrumental errors of direction finding in means of automated radio monitoring are the design errors and the spread of the feeder path characteristics of the antenna system. In the article the direction finder realizing the principle of the correlation interferometric direction finder in which the resulting characteristic of the directionality of the ring antenna array is formed by the direct synthesis method is considered. The model of a volumetric array of linear radiators capable of taking arbitrary orientation and placed without shading each other is used. The distortions of the synthesized radiation pattern due to errors in the positioning of the antenna system elements along the azimuthal and radial coordinates are estimated. A comparative analysis of realizations of the synthesized radiation pattern of the direction finder obtained using various laws of distribution of geometric errors is carried out. Conclusions are made about the degree of influence of root-mean-square errors of antenna elements placement in azimuth and radius on the distortions of the radiation pattern. It is established that the displacement of the elements of the ring antenna array along the azimuth is more significant than radial displacement for deformation the radiation pattern. The main statistical characteristics of the direction-finding errors for both angular coordinates are calculated for different distribution laws for the errors in the placement of the elements of the antenna array. With a uniform distribution of placement errors, the hypothesis that a instrumental error in the azimuthal coordinate has a normal distribution is adopted in accordance with Pearson's agreement criterion. In the case of a normal distribution of placement errors, the law of distribution of instrumental error in both coordinates is not normal.

Keywords: direction finder, annular array, radiation pattern, instrumental error, the direct synthesis method.

REFERENCES

1. Rembovskii A.M. Avtomatizirovannyj radiokontrol' izluchenij: zadachi i sredstva [Automated radio control of emissions: tasks and means]. Special'naya tekhnika. 2002. pp. 2-6. (in Russian)
2. Ashikhmin A.V., Vinogradov A.V., Rembovskii A.M. Printsipy postroeniya sovremennykh radiopelengatorov [Departmental corporate networks and systems]. Vedomstvennyye korporativnyye seti i sistemy. 2002. No. 2. pp. 80-85 (in Russian)
3. Rembovskii A.M. Zadachi i struktura sredstv avtomatizirovannogo radiokontrolya [The tasks and structure of automated radio monitoring equipment]. Spetsial'naya tekhnika. 2003. pp. 2-8. (in Russian)

4. Donets I.V., Reizenkind Ya.A. Iteratsionnoe utochnenie otsenki pelenga pri razreshenii neskol'kikh kogerentnykh signalov krugovoi antennoi reshetkoi [Iterative refinement of the bearing estimation in the resolution of several coherent signals by a circular antenna array]. Radiokontrol'. 2003. No. 6. (in Russian)
5. Jun Chen, Wei Hong. An Iterative Algorithm, Based on the Mesered Equation of Invariance for the Scattering Analyses of Arbitray Multicylinders. // HIE Trans, on Antennas and Propagation. 1999. Vol. 47, No. 9. pp. 1233-1239.
6. Ivanov A.V., Kuz'minov Yu.V., Panychev S.N. Otsenka rezul'tiruyushchei tochnosti nelineinykh antennykh izmerenii metodom interval'nogo analiza [Estimation of the resulting accuracy of non-linear antenna measurements by the interval analysis method]. Antenny. 2005. No. 7-8(98- 99). pp. 79- 82. (in Russian)
7. Ivanov A.V., Pasternak Yu.G. Algoritm otsenki azimuta istochnika SVCh izlucheniya s pomoshch'yu kol'tsevoi antennoi reshetki iz logoperiodicheskikh antenn [Algorithm for estimating the azimuth of a microwave radiation source using a ring antenna array from log-periodic antennas]. Telekommunikatsii. 2006. No. 11. pp. 26-31. (in Russian)
8. Drogalin V.V., Merkulov V.I., Rodzivilov V.A., Fedorov I.B., Chernov M.V. Algoritmy otsenivaniya uglovykh koordinat istochnikov izlucheniya, osnovannye na metodakh spektral'nogo analiza [Algorithms for estimating the angular coordinates of radiation sources, based on spectral analysis methods]. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 1998. No. 2. p. 3-17. (in Russian)
9. Reglament radiosvyazi [Radio Regulations]. Vol. 1. M.: Radio i svyaz', 1985. 509 p. (in Russian)
10. Spravochnik po radiokontrolyu [Handbook of radio monitoring]. MSE 2002. – Zheneva, 2004. (in Russian)
11. Rembovskii A.M., Ashikhmin A.V., Koz'min V.A. Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva [Radiomonitoring: tasks, methods, tools] / Pod redaktsiei A.M. Rembovskogo. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2006. 492 p. (in Russian)
12. Swindlehurs A., Kailath T. Azimuth / Elevation Direction Finding Regular Array Geometries // IEEE Trans. Aerosp. and Electron Syst. – 1993. Vol. 23.1. No. 1. pp. 145-156.
13. Dinger R. A Planar Version of a 4 GHz Reactively Steered Adaptive Array // IEEE Trans. Antennas and Propag. 1986. Vol. 34, No.3. pp. 427-431.

14. Nicel U. Angle Estimation With Adaptive Arrays and Its Relation to Super-Resolution // IEEE Proc. 1987. Vol. 134, No. 1. pp. 77-82.
15. 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, No. 10. pp. 93-95.
16. Ivanov A.V. Matematicheskoe obespechenie programmno-metodicheskogo kompleksa proektirovaniya radiopelengatornykh antenn, osnovannoe na sistematizatsii ikh evristicheskikh i strogikh modelei [Mathematical support of the program-methodical complex for the design of radio direction-finding antennas, based on the systematization of their heuristic and rigorous models]: dis. ... kand. tekhn. nauk. Voronezh: VGTU, 2007. 226 p. (in Russian)
17. Panychev A.I., Solomakhin P.A. Model' anteny bazovoi stantsii sistemy sotovoi svyazi [Antenna model of a base station of a cellular communication system]. Telekommunikatsii. 2003. No. 4. pp. 25-29. (in Russian)
18. Panychev A.I., Tishchenko B.V. Otsenka vliyaniya oshibok izgotovleniya anteny bazovoi stantsii sistemy GSM na ee kharakteristiki [Evaluation of the effect of manufacturing errors of the GSM base station antenna on its characteristics]. Antenny. 2003. No. 6(73). pp. 43-47. (in Russian)
19. Panychev A.I. Ring Antenna Array with Cylindrical Reflector. DOI: 10.1109/CRIMICO.2005.1564940.