

УДК 621.396.677

**Влияние ошибок формирования амплитудно-фазового распределения в раскрытии фазированной антенной решетки на точность пеленгации**

**Influence of errors in the formation of the amplitude-phase distribution in the aperture of a phased array antenna on the accuracy of direction finding**

**Бибарсов / Bibarsov M.**

Марат Рашидович  
(bibarsovmr@rambler.ru)

кандидат технических наук, доцент.  
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» (ВАС им. С. М. Буденного) МО РФ, старший преподаватель кафедры радиосвязи. г. Санкт-Петербург

**Бибарсова / Bibarsova G.**

Гульнара Шихмуратовна  
(bgsh2@rambler.ru)

кандидат педагогических наук, доцент.  
ВАС им. С. М. Буденного, доцент кафедры военно-политической работы в войсках (силах). г. Санкт-Петербург

**Габриэльян / Gabrieljan D.**

Дмитрий Давидович  
(rniirs@rniirs.ru)

доктор технических наук, профессор.  
ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи», заместитель начальника НТК по науке. г. Ростов-на-Дону

**Шацкий / Shatsky V.**

Виталий Николаевич  
(vitaliyfgup@mail.ru)

ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи», руководитель группы. г. Ростов-на-Дону

Ключевые слова: фазированная антенная решетка – phased antenna array; амплитудно-фазовое распределение – amplitude-phase distribution; пеленгационная характеристика – direction finding characteristic; среднеквадратическая погрешность – root-mean-square error.

Рассматривается влияние ошибок формирования амплитудно-фазового распределения (АФР) в раскрытии фазированной антенной решетки (ФАР) на формирование пеленгационной характеристики (ПХ) и, соответственно, на точность пеленгации радиоизлучающего объекта. Показано, что при симметричном законе распределения амплитудных и фазовых ошибок возбуждения в антенных элементах ФАР средняя ПХ во всему диапазону углов является несмещенной. Получены соотношения, определяющие дисперсию статистического распределения формируемых ПХ, и исследованы значения дисперсий для различных азимутальных плоскостей положения объекта при пеленгации.

The influence of errors in the formation of the amplitude-phase distribution (APD) in the aperture of a phased antenna array (PAA) on the formation of the direction finding characteristic (DFC) and, accordingly, on the direction finding accuracy of a radio-emitting object is considered. It is shown that with a symmetrical law of distribution of amplitude and phase errors of excitation in the PAA antenna elements, the average DFC in the entire range of angles is unbiased. Relations are obtained that determine the variance of the statistical distribution of the formed DFC, and the values of the variances for various azimuthal planes of the object's position during direction finding are studied.

**Введение**

Фазированные антенные решетки (ФАР) находят широкое применение в радиотехнических системах, обеспечивающих определение углового положения источника радиоизлучения (ИРИ) и его автосопр-

вождение по сигналам радиоизлучения. В основе этого лежит, как правило, использование моноимпульсного метода, основанного на формировании четырех (трех) диаграмм направленности (ДН), максимумы которых смещены относительно электрической оси антенны. Указанное смещение достигается формированием

специального амплитудно-фазового распределения (АФР) в излучающем раскрые ФАР.

Однако, в многоканальной системе из-за влияния различных факторов могут возникать искажения АФР в излучающем раскрые, приводящие к смещению равносигнального направления. Следствием этого являются ошибки определения углового положения ИРИ.

Вопросы анализа ошибок, возникающих из-за искажений АФР в излучающем раскрые, рассматриваются в большом числе работ [1–9]. Основой такого анализа является статистическая теория ФАР [1]. Представленные в этой работе результаты позволяют оценить взаимосвязь погрешностей АФР с математическим ожиданием и дисперсией оценок углового положения ИРИ.

Ряд результатов, связанных с исследованиями влияния искажений АФР на точность пеленгования, приведен в работах [10, 11]. Однако, приведенные в указанных работах результаты исследований носят общий характер и не позволяют конкретизировать получаемые результаты в важных с практической точки зрения случаев. Это, в первую очередь, относится к рассмотрению статистических характеристик погрешности оценивания углового положения ИРИ, обусловленного погрешностями АФР в излучающем раскрые ФАР.

Целью статьи является исследование взаимосвязи параметров погрешности реализации АФР в излучающем раскрые ФАР с характеристиками оценок углового положения ИРИ.

Для достижения указанных целей решаются следующие задачи:

1. Вывод основных соотношений, связывающих параметры ошибок реализации АФР в излучающем раскрые ФАР с математическим ожиданием и дисперсией оценок углового положения ИРИ при использовании моноимпульсного метода.

2. Численное моделирование и выявление на основе полученных результатов наиболее общих закономерностей, связывающих погрешности реализации АФР

в излучающем раскрые ФАР с математическим ожиданием и дисперсией оценок углового положения ИРИ при использовании моноимпульсного метода.

### Основные соотношения

Рассмотрим  $N$ -элементную ФАР, формирующую для реализации моноимпульсного метода четыре ДН. Геометрия задачи представлена на рис. 1. Главные лепестки указанных ДН ориентированы соответственно в азимутальных направлениях:  $(\Delta\theta, 0^\circ)$ ,  $(\Delta\theta, 180^\circ)$  и  $(\Delta\theta, 90^\circ)$ ,  $(\Delta\theta, 270^\circ)$ ,  $\Delta\theta$  – изменение угла места,  $0^\circ, 180^\circ, 90^\circ, 270^\circ$  – азимутальные углы. Формирование таких ДН, может быть реализовано с использованием ФАР.

Запишем соотношения, определяющие данные ДН, в следующем виде:

$$F_p(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N W_n^{(p)} E(\theta, \varphi; x_n, y_n), \quad (1)$$

В выражении (1)  $W_n^{(p)} = A_n^{(p)} \exp(i\Phi_n^{(p)})$  является комплексной амплитудой возбуждения  $n$ -го излучателя для формирования  $p$ -й ДН ( $p = 1, \dots, 4$ );  $x_n, y_n$  – координаты  $n$ -го излучателя в излучающем раскрые;  $k$  – волновое число свободного пространства;

$$E(\theta, \varphi; x_n, y_n) = \exp(-ik \sin \theta (x_n \cos \varphi + y_n \sin \varphi)).$$

Аргумент комплексной амплитуды  $W_n$  определяется выражением  $\Phi_n^{(p)} = k \sin \Delta\theta (x_n \cos \varphi^{(p)} + y_n \sin \varphi^{(p)})$ ,  $\varphi^{(1)} = 0^\circ$ ,  $\varphi^{(2)} = 180^\circ$ ,  $\varphi^{(3)} = 90^\circ$ ,  $\varphi^{(4)} = 270^\circ$ ;  $\Delta\theta$  – угол, определяющий отклонение максимума основного лепестка ДН от равносигнального направления.

На основе четырех ДН в двух ортогональных плоскостях формируются пеленгационные характеристики (ПХ):

$$\Pi_1(\Delta\theta, \varphi) = \frac{F_1(\Delta\theta, \varphi) - F_2(\Delta\theta, \varphi)}{F_1(\Delta\theta, \varphi) + F_2(\Delta\theta, \varphi)} \Big|_{\varphi=0}, \quad (2)$$

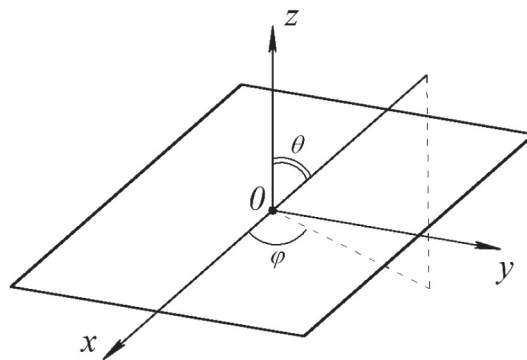


Рис. 1. Геометрия задачи

$$\Pi_2(\Delta\theta, \varphi) = \frac{F_3(\Delta\theta, \varphi) - F_4(\Delta\theta, \varphi)}{F_3(\Delta\theta, \varphi) + F_4(\Delta\theta, \varphi)} \Big|_{\varphi=90}, \quad (3)$$

Из-за влияния различных факторов АФР, на основе которого формируется  $p$ -я ДН, реализуется с некоторой погрешностью  $A_n^{(p)} = A_{0,n}^{(p)} + \Delta A_n^{(p)} \exp(i(\Phi_{0,n}^{(p)} + \Delta\Phi_n^{(p)}))$ . С учетом погрешности АФР выражения для ПХ могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Pi_1(\Delta\theta, \varphi) = & \Pi_1^{(0)}(\Delta\theta, \varphi) + \\ & + \frac{2|F_2(\Delta\theta, \varphi)|}{|F_1(\Delta\theta, \varphi) + F_2(\Delta\theta, \varphi)|^2} \Big|_{\varphi=0} \Delta F_1(\Delta\theta, \varphi) - \\ & - \frac{2|F_1(\Delta\theta, \varphi)|}{|F_1(\Delta\theta, \varphi) + F_2(\Delta\theta, \varphi)|^2} \Big|_{\varphi=0} \Delta F_2(\Delta\theta, \varphi), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Pi_2(\Delta\theta, \varphi) = & \Pi_2^{(0)}(\Delta\theta, \varphi) + \\ & + \frac{2|F_4(\Delta\theta, \varphi)|}{|F_3(\Delta\theta, \varphi) + F_4(\Delta\theta, \varphi)|^2} \Big|_{\varphi=0} \Delta F_3(\Delta\theta, \varphi) - \\ & - \frac{2|F_3(\Delta\theta, \varphi)|}{|F_3(\Delta\theta, \varphi) + F_4(\Delta\theta, \varphi)|^2} \Big|_{\varphi=0} \Delta F_4(\Delta\theta, \varphi). \end{aligned} \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5)  $\Pi_1^{(0)}(\Delta\theta)$ ,  $\Pi_2^{(0)}(\Delta\theta)$  представляют соответствующие ПХ в отсутствии искажений АФР в излучающем раскрые ФАР; выражения для  $\Delta F_p(\Delta\theta)$  имеют вид (1) при замене  $A_n^{(p)}$  на  $\Delta A_n^{(p)}$ .

Соотношения (4) и (5) определяют ПХ, формируемую ФАР при наличии погрешностей.

Для проведения дальнейших преобразований сделаем ряд следующих допущений о распределении параметров АФР в излучающем раскрые ФАР:

– математическое ожидание модуля и фазы  $M\{\Delta A_n^{(p)}\} = 0$ ,  $M\{\Delta\Phi_n^{(p)}\} = 0$ ,  $n = 1, \dots, N$ ,  $p = 1, \dots, 4$ ;

– распределения случайных значений модуля и фазы в любых двух различных излучателях с индексами  $n$  и  $m$  ФАР ( $n = 1, \dots, N$ ,  $m = 1, \dots, N$ ) являются статистически независимыми:

$$M\{\Delta A_n^{(p)} \cdot \Delta A_m^{(p)}\} = 0, \quad n \neq m;$$

$$M\{\Delta\Phi_n^{(p)} \cdot \Delta\Phi_m^{(p)}\} = 0, \quad n \neq m;$$

$$M\{\Delta A_n^{(p)} \cdot \Delta\Phi_m^{(p)}\} = 0, \quad n = 1, \dots, N, \quad m = 1, \dots, N.$$

С учетом сделанных предположений на основе соотношений (2) и (3) можно записать для математического ожидания и дисперсии ПХ соответственно следующие соотношения:

$$M\{\Pi_1(\Delta\theta, \varphi)\} = \Pi_1^{(0)}(\Delta\theta, \varphi), \quad (6)$$

$$M\{\Pi_2(\Delta\theta, \varphi)\} = \Pi_2^{(0)}(\Delta\theta, \varphi), \quad (7)$$

$$D\{\Pi_1(\Delta\theta, \varphi)\} = D\{\Delta F_1(\Delta\theta, \varphi)\} + D\{\Delta F_2(\Delta\theta, \varphi)\}, \quad (8)$$

$$D\{\Pi_2(\Delta\theta, \varphi)\} = D\{\Delta F_3(\Delta\theta, \varphi)\} + D\{\Delta F_4(\Delta\theta, \varphi)\}. \quad (9)$$

Соотношения для  $|\Delta F_p(\Delta\theta)|^2$  ( $p = 1, \dots, 4$ ) имеют вид:

$$\begin{aligned} D\{\Delta F_p(\Delta\theta, \varphi)\} = & \sum_{n=1}^N |E(\theta, \varphi; x_n, y_n)|^2 \left\{ D\{\Delta A_n^{(p)}\} + \right. \\ & \left. + |A_{0,n}^{(p)}|^2 D\{\Delta\Phi_n^{(p)}\} \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношение (10) получено при условии статистической независимости распределения амплитудных и фазовых ошибок в одном канале ФАР, а также независимости распределения по каналам ФАР как амплитудных, так и фазовых ошибок АФР. Следует отметить, что выражение (10) определяет дополнительную к шумовой составляющей дисперсию оценивания угловых координат ИРИ.

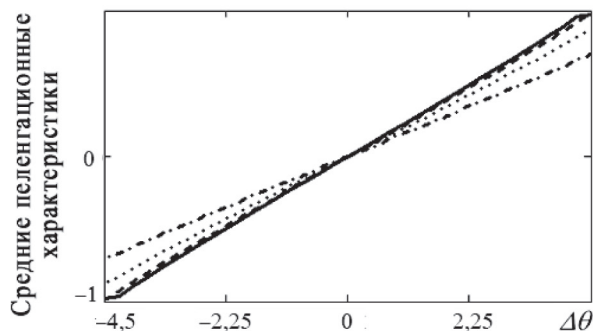


Рис. 2. Средние пеленгационные характеристики при равномерном амплитудном распределении

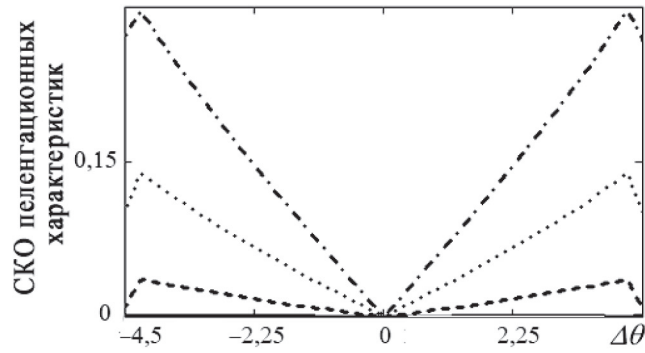


Рис. 3. СКО пеленгационных характеристик при равномерном амплитудном распределении

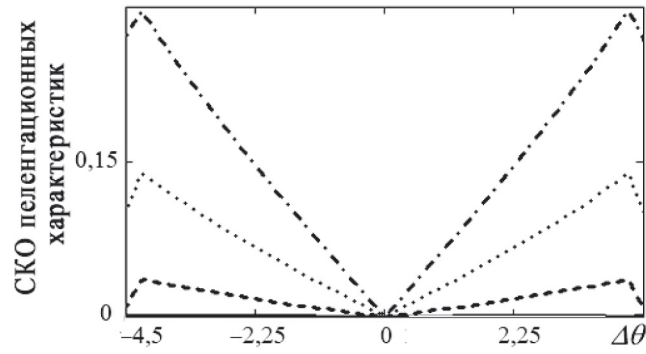


Рис. 4. Средние пеленгационные характеристики при спадающем амплитудном распределении

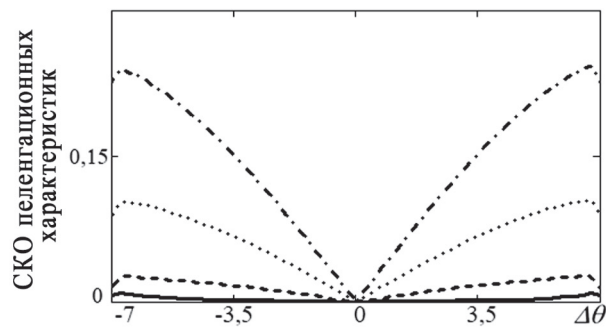


Рис. 5. СКО пеленгационных характеристик при спадающем амплитудном распределении

Из соотношений (6–10) непосредственно следует:

- оценка положения объекта является несмещенной;
- точность определения углового положения объекта определяется как амплитудными, так и фазовыми ошибками в раскрыве ФАР и зависит от углового положения объекта относительно равносигнального направления.

Среднеквадратическая погрешность (СКП) оценивания углового положения объекта, связанная с ошибками формирования АФР в раскрыве ФАР, может быть записана в виде

$$\sigma_{\Delta\theta}(\varphi) = \frac{\sqrt{D\{\Delta F_p(\Delta\theta, \varphi)\}}}{2} \varepsilon(\varphi). \quad (11)$$

В соотношении (11)  $\varepsilon(\varphi)$  определяет среднеквадратическое отклонение (СКО) ширины ДН в соответствующем азимутальном сечении.

### Результаты численных исследований

Численное моделирование проводилось на примере ФАР с излучающим раскрывом 15x15 антенных элементов. Диаграммы направленности антенных элементов приняты изотропными, межэлементное расстояние равно  $0,5\lambda$ . При проведении исследований рассматривались два случая:

- равноамплитудное возбуждение в раскрыве ФАР:

$$W_n^{(p)} = 1, \quad (12)$$

- спадающее по раскрыву амплитудное распределение в раскрыве ФАР:

$$W_n^{(p)} = \cos\left(\pi \frac{2n - N + 1}{2N}\right) \exp(ik \sin \Delta\theta (x_n \cos \varphi_p + y_n \sin \varphi_p)). \quad (13)$$

Амплитудные и фазовые ошибки АФР в раскрыве ФАР в обоих случаях распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКП, соответственно равным 0,1 для амплитудных ошибок и 0,1 рад – для фазовых.

Статистические характеристики ПХ определялись путем усреднения формируемых ПХ при каждой реализации распределения ошибок АФР в раскрыве ФАР. Число реализаций при проведении исследований выбиралось 10000.

Результаты численных исследований средней ПХ и СКО ПХ представлены на рис. 2 и 3 для первого случая амплитудного распределения в раскрыве и на рис. 4 и 5 – для второго случая амплитудного распределения соответственно. В частности, на рис. 2 и 4 показаны средние ПХ в азимутальных сечениях  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$  соответственно сплошной, штриховой, точечной и штрихпунктирной линиями.

Полученные выше результаты показывают, что средние ПХ при симметричном законе распределения погрешностей АФР будут совпадать с ПХ, формируемыми в отсутствии данных погрешностей АФР. Приведенные на рис. 2 и рис. 4 результаты подтверждают сделанный вывод.

Результаты на рис. 3 и 5 позволяют оценить СКО ПХ в различных сечениях и, соответственно, СКП оценивания углового положения объекта. Как следует из представленных результатов, погрешность формирования АФР в наименьшей степени проявляется в главных сечениях ДН. При отклонении в азимутальном сечении дисперсия формируемых ПХ увеличивается.

Сравнение зависимостей, приведенных на рис. 3 и 5, показывает, что при спадающем АФР влияние погрешностей АФР проявляется в меньшей степени. Это связано с уменьшением вклада в ДН антенной решетки излучающих элементов с малыми значениями амплитуд возбуждения.

Как следует из приведенных зависимостей, в главных сечениях ДН ошибки АФР практически не приводят к снижению точности оценивания углового положения объекта. Однако, по мере отклонения от главного сечения по углу азимута СКО ПХ быстро увеличивается, что приводит к увеличению СКП углового положения объекта.

### Заключение

Рассмотрены вопросы влияния реализации АФР на точность определения углового положения объекта. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Получены основные соотношения, связывающие параметры ошибок АФР в излучающем раскрыве ФАР со средней ПХ и ее дисперсией при использовании моноимпульсного метода.

2. Выполнены численные исследования, показавшие, что при нормальном законе распределения ошибок АФР в раскрыве ФАР с нулевым математическим ожиданием:

- средняя ПХ совпадает с ПХ, формируемой при отсутствии ошибок;

- точность определения углового положения объекта определяется как амплитудными, так и фазовыми ошибками в раскрыве ФАР, а также зависит от углового положения объекта относительно равносигнального направления.

### Литература

1. Шифрин, Я. С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – Москва : Советское радио, 1970. – 384 с.
2. Инденбом, М. В. Флуктуации параметров диаграммы направленности антенной решетки по мощности / М.В. Инденбом // Антенны. – 2008. – № 4. – С. 40–46.

3. Analysis of the pattern tolerances in linear arrays with arbitrary amplitude errors / P. Rocca, L. Manica, N. Anselmi, A. Massa // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2013. – Vol. 12. – P. 639–642.

4. Маслов, О. Н. Статистические характеристики поля решетки апертурных случайных антенн / О.Н. Маслов, А.С. Раков, А.А. Силкин // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58, № 11. – С. 1093–1101.

5. Красильникова, Е. П. Моделирование статистических характеристик электромагнитного поля апертурной случайной антенны / Е.П. Красильникова, О.Н. Маслов, А.С. Раков // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 12, № 2. – С. 78–86.

6. Зимина, С. В. Влияние флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивной антенной решетки с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраивающейся по алгоритму LMS с квадратичным ограничением / С.В. Зимина // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2014. – Т. 17, № 4. – С. 26–33.

7. Synthesis of Amplitude-phase Distribution on Non-planar Surface on Given Vector Pattern / D.D. Gabriel'ayn, V.I. Demchenko, Dan.S. Fedorov, Den.S. Fedorov // IEEE Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) (Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2017). – 2017. – P. 287–290.

8. Синтез амплитудно-фазового распределения в квази-кольцевой антенной решетке / М.Р. Бибарсов, Е.В. Грибанов, Д.Д. Габриэльян [и др.] // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2017. – № 2. – С. 28–33.

9. Влияние локально плоских искажений излучающего раскрыва на диаграмму направленности фазированной антенной решетки / М.Р. Бибарсов, Г.Ш. Бибарсова, Д.Д. Габриэльян [и др.] // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 17–25.

10. Васин, А. А., Потенциальная точность определения угловых координат цели с использованием фазированных антенных решеток / А.А. Васин, Е.В. Манаенков, Л.И. Пономарев // Антенны. – 2018. – № 7 (251). – С. 40–48.

11. Реальная точность пеленгования целей с использованием фазированных антенных решеток / Л.И. Пономарев, Е.В. Манаенков, А.А. Васин, О.В. Терехин // Антенны. – 2019. – № 4 (258). – С. 57–68.