

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ФАЗОВОГО И АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРВОГО БОКОВОГО ЛЕПЕСТКА В АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ

В. С. Лосев, Б. А. Старостенко,
В. А. Цветков, С. Г. Кондратьева

В работе для фазированной антенной решетки наземных станций дальней радиолокации исследованы способы подавления первого нижнего бокового лепестка диаграммы направленности с помощью фазового и амплитудно-фазового синтеза. Подавление этого лепестка снижает влияние радиоэлектронного противодействия на функционирование станции, а также уменьшает размеры санитарно-защитной зоны при работе приёмо-передающей фазированной антенной решетки. Получены аналитические выражения для амплитудно-фазового и фазового распределений в раскрыве антенной решётки. Приведены результаты расчётов уровня и ширин зон ослабления, снижения максимума главного лепестка диаграммы направленности.
Ключевые слова: антенная решётка, диаграмма направленности, фазовый синтез, амплитудно-фазовый синтез.

Введение

Против радиолокационной станции (РЛС) наземного эшелона в качестве средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ) могут использоваться средства наземного базирования для создания радиоэлектронного противодействия (РЭП) при работе РЛС в барьерной зоне, то есть при малых углах места.

В этом случае в качестве одного из методов снижения влияния РЭП может быть использован синтез диаграммы направленности антенной решетки (АР) с пониженным уровнем боковых лепестков в области малых углов места. Снижение уровня боковых лепестков при малых углах места позволяет также уменьшить размеры санитарной защитной зоны (СЗЗ) при работе передающей фазированной антенной решетки (ФАР). Такой способ уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) может быть реализован в ФАР за счет изменения амплитудно-фазового распределения [1]. Известно, что использование спадающего амплитудного распределения в ФАР снижает эффективность использования раскрыва антенной решетки. Поэтому в настоящее время делаются попытки снижения уровня боковых лепестков диаграммы направленности (УБЛ ДН) ФАР за счет введения фазового распределения (ФР) [2, 3].

Объект исследования и расчётные соотношения

Введение ФР понижает (подавляет) уровень выbranного бокового лепестка (БЛ) ДН ФАР. С другой стороны, ФР вносит изменения в форму и уровень других лепестков ДН ФАР.

Рассмотрим выражение для ДН плоской ФАР:

$$F(\theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0) = \sum_n \sum_m a_{nm} e^{ikd_x n(\sin\theta \cos\varphi - \sin\theta_0 \cos\varphi_0) + ikd_y m(\sin\theta \cos\varphi - \sin\theta_0 \cos\varphi_0)} \quad (1)$$

где a_{nm} – амплитудное распределение; θ, φ – координаты антенной решетки; θ_0, φ_0 – координаты главного луча АР; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; d_x, d_y – шаг излучателей АР.

Поскольку снижение уровня БЛ ДН интересует в вертикальной (угломестной) плоскости, то для равномерного амплитудного распределения ($a_{nm} = 1$) выражение (1) записывается в нормированном виде:

$$F_n(\theta, \theta_0) = \frac{\sin\left(\frac{kd}{2}(2N+1)(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)}{(2N+1)\sin\left(\frac{kd}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)} \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой ДН линейной антенной решетки.

Синтезированная ДН с целью снижения уровня первого бокового лепестка линейной антенны имеет вид [1]:

$$F_c(\theta, \theta_0, \theta_1) = \sqrt{1+a^2+2a} + 2\sum_{n=1}^N \sqrt{1+a^2+2a\cos(kdn(-\sin\theta_1 + \sin\theta_0))} \times \cos\left(kdn(\sin\theta - \sin\theta_0) - \arcsin\left(\frac{a\sin(kdn(\sin\theta_1 + \sin\theta_0))}{1+a\cos(kdn(\sin\theta_1 + \sin\theta_0))}\right)\right) \quad (3)$$

где θ_1 – угловое направление подавленного бокового лепестка; a – амплитуда (коэффициент) подавления.

Рассматривая вариант равномерного амплитудного распределения в выражении (3), ДН запишем в виде:

$$F_c(\theta, \theta_0, \theta_1) = 1 + 2\sum_{n=1}^N \cos \times \left(kdn(\sin\theta - \sin\theta_0) - \arcsin\left(\frac{a\sin(kdn(\sin\theta_1 + \sin\theta_0))}{1+a\cos(kdn(\sin\theta_1 + \sin\theta_0))}\right) \right) \quad (4)$$

Проведенные расчеты $F_c(\theta, \theta_0, \theta_1)$ для параметров $a = 0,21$; $\theta_0 = 0^\circ$; $\theta_1 = 1,5^\circ$ показали, что УБЛ снизился с -13 до -18 дБ. При этом возрастают уровни верхних боковых лепестков.

Для одного из вариантов ФАР с треугольным расположением излучателей проведен анализ ДН с целью оптимального выбора параметра a при снижении УБЛ.

Вертикальное сечение ДН ФАР в системе координат (θ, φ) , показанной на рис. 1, записывается в виде:

$$F_n(\theta, \theta_0, \theta_1) = \frac{\sqrt{\cos \theta}}{16} \sum_{m=1}^{16} B_m \cos \left(kd_b \left(m - \frac{1}{2} \right) (\sin \theta - \Phi_m) \right), \quad (5)$$

где:

$$B_m = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cos \left(kd_b \left(m - \frac{1}{2} \right) (\sin \theta_0 - \sin \theta_1) \right)} -$$

амплитуда;

$$\Phi_m = \arctg \times$$

$$\times \frac{\left(\sin \left(kd_b \left(m - \frac{1}{2} \right) \sin \theta_0 \right) + a \sin \left(kd_b \left(m - \frac{1}{2} \right) \sin \theta_1 \right) \right)}{\left(\cos \left(kd_b \left(m - \frac{1}{2} \right) \sin \theta_0 \right) + a \cos \left(kd_b \left(m - \frac{1}{2} \right) \sin \theta_1 \right) \right)}$$

фаза;

$\sqrt{\cos \theta}$ – диаграмма направленности излучателя АР;

d_b – вертикальный шаг излучателей АР;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda};$$

θ_0 – угол направления максимума ДН АР.

Для расчета характеристик таких ФАР используется система координат азимут – угол места, показанная на рис. 2, а для оптимизации характеристик ФАР в секторе сканирования антенное полотно устанавливается наклонно, как изображено на рис. 3. При этом β – угол наклона антенного полотна.

Рассчитанные формулы для углов систем координат имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \cos \theta = \sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \cos \alpha \sin \beta; \\ \cos \varphi = \cos \gamma \frac{\sin \alpha}{\sin \theta}; \\ \theta = \arccos (\sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \cos \alpha \sin \beta); \\ \varphi = \arccos \left(\cos \gamma \frac{\sin \alpha}{\sin \theta} \right); \end{cases}$$

где γ – угол места; α – азимут.

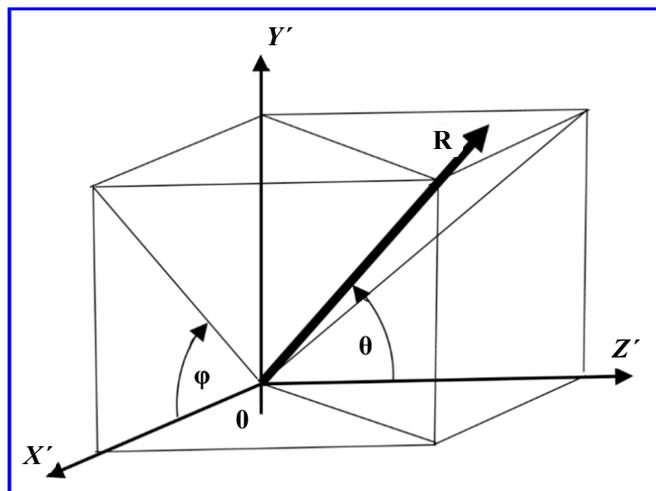


Рис. 1. Система координат фазированной антенной решетки

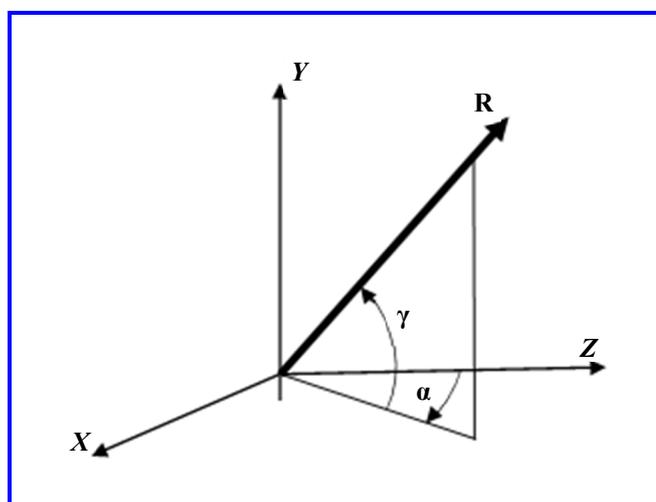


Рис. 2. Система координат азимут – угол места

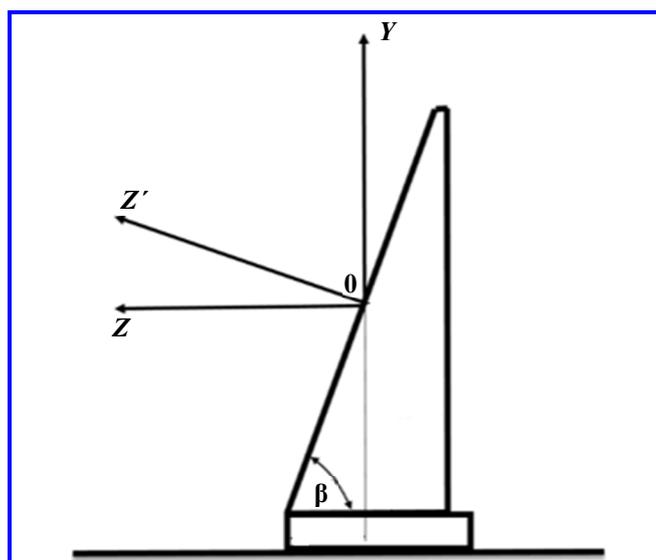


Рис. 3. Расположение антенного полотна

Типовая зона сканирования РЛС показана на рис. 4. Барьерная зона находится на углах места 2 – 4 градуса, а зона источников помех на углах места ниже барьерной зоны.

При таком расположении угломестных секторов требования к угломестной ДН прежде всего связаны с угломестным сектором, расположенным ниже барьерной зоны, в котором ДН приемной и передающей ФАР должны иметь минимальный уровень.

Результаты расчётов

На рис. 5 приведена ДН линейной АР с равноамплитудным и линейным фазовым распределением. УС1 – угломестный сектор барьерной зоны; УС2 – угломестный сектор СЗЗ и области источников помех.

Для оценки возможности минимизации уровня ДН по формуле (5) для одного из вариантов проведены расчеты угломестной ДН при различных коэффициентах «а» для амплитудно-фазового (АФ)

и фазового (Ф) синтеза. Результаты расчетов показаны на рис. 6 – 9.

На рис. 6 приведена диаграмма направленности линейной АР с амплитудно-фазовым распределением при $a = 0,2$. Ширина зоны ослабления по уровню -30 дБ составляет $\approx 1,6^\circ$; снижение максимума ДН составляет $(\delta) \approx 0,35$ дБ; уровень первого верхнего бокового лепестка не изменился $(\delta_b) \approx -13$ дБ.

На рис. 7 приведена ДН с ФС при $a = 0,2$. Ширина зоны ослабления по уровню -19 дБ составляет $\approx 3,5^\circ$; $\delta \approx 0,02$ дБ; $\delta_b \approx -10$ дБ.

На рис. 8 приведена ДН с ФС при $a = 0,4$. Ширина зоны ослабления по уровню -30 дБ составляет $\approx 1,4^\circ$; $\delta \approx 0,39$ дБ; $\delta_b \approx -8$ дБ.

На рис. 9 приведена ДН с ФС при $a = 0,3$. Ширина зоны ослабления по уровню -24 дБ составляет $\approx 2,5^\circ$; $\delta \approx 0,18$ дБ; $\delta_b \approx -9$ дБ.

Таким образом, использование этого метода снижает уровень основного лепестка ДН ФАР не более чем на $0,39$ дБ.

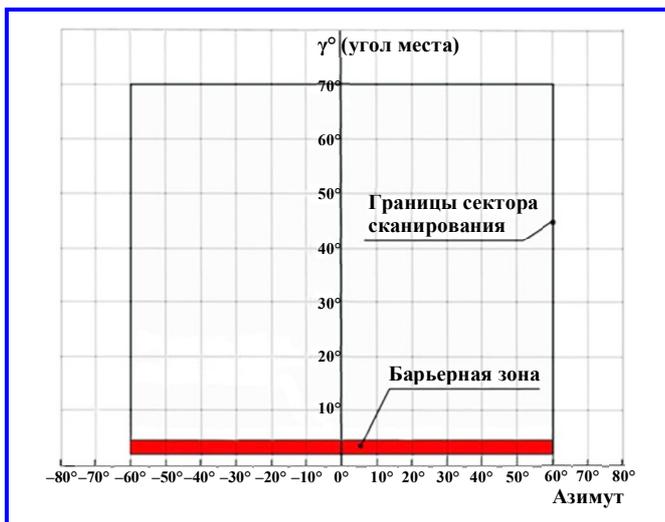


Рис. 4. Зона сканирования радиолокационной станции

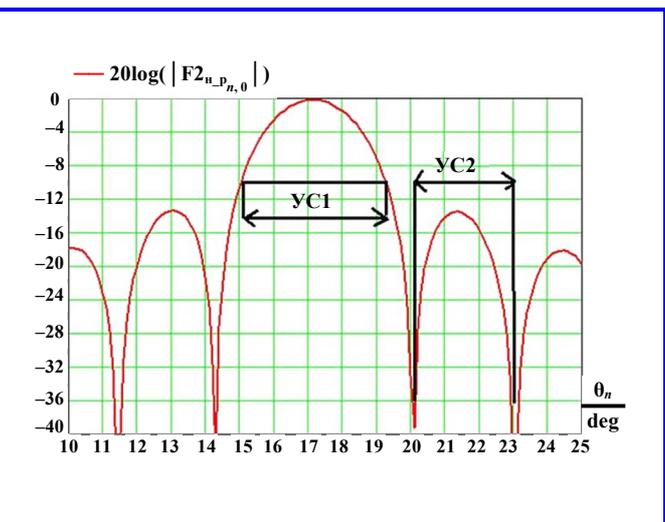


Рис. 5. Угломестное сечение диаграммы направленности фазированной антенной решетки

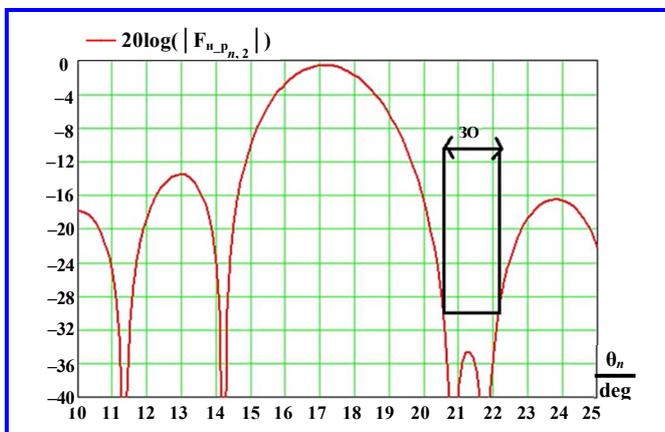


Рис. 6. Диаграмма направленности с амплитудно-фазовым синтезом при $a = 0,2$

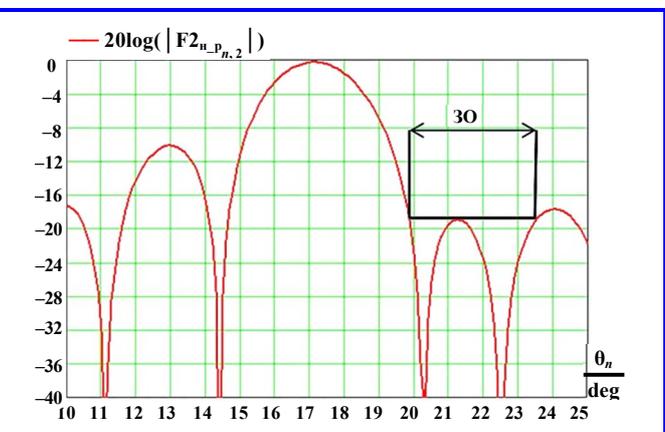


Рис. 7. Диаграмма направленности с фазовым распределением при $a = 0,2$

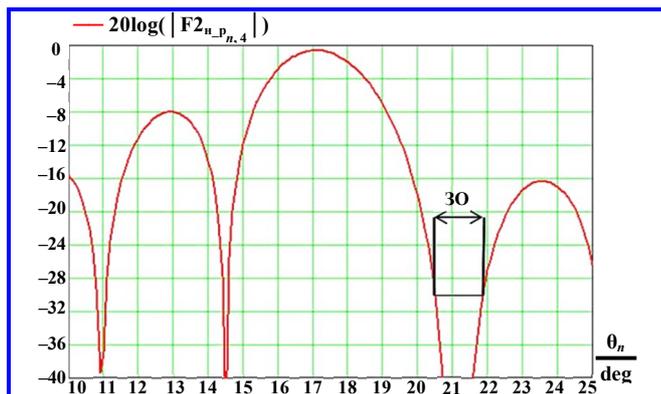


Рис. 8. Диаграмма направленности с фазовым распределением при $a = 0,4$

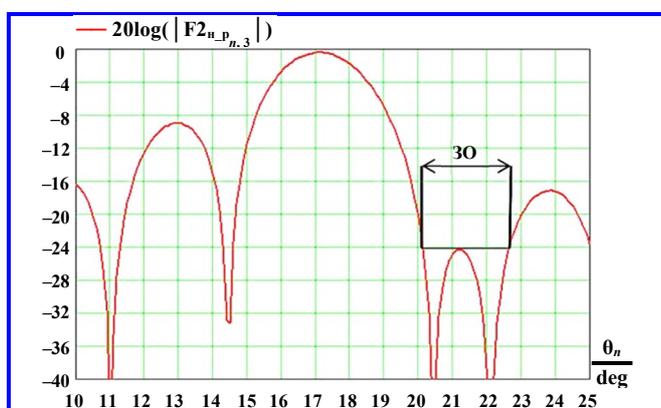


Рис. 9. Диаграмма направленности с фазовым распределением при $a = 0,3$

Заключение

Рассмотрен простой способ получения амплитудно-фазового и фазового распределений, обеспечивающих эффективное подавление первого нижнего бокового лепестка ДН. Для ФАР наземных станций дальней радиолокации приведены результаты расчётов уровня и области подавления первого нижнего бокового лепестка ДН при использовании фазового и амплитудно-фазового синтеза.

Литература

1. Harry L. Van Trees. Optimum Array Processing : Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory / Harry L. Van Trees. – Hoboken, NJ, United States: Wiley Interscience, 2002. – 1472 p.
2. Уменьшение уровня боковых лепестков диаграммы направленности за счет регулирования амплитудно-фазового распределения в раскрытии ФАР с целью сокращения размеров СЗЗ / П. И. Гребенщиков, В. С. Лосев // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция молодых конструкторов и инженеров «Минцевские чтения» : труды конференции. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – С. 77 – 84.
3. Снижение уровня интерференционных лепестков фазированной решетки модульного типа путем регулирования амплитудно-фазового распределения / П. И. Гребенщиков, В. С. Лосев, О. Атаев [и др.] // Труды IV Всероссийской научно-технической конференции; «РТИ Системы ВКО – 2016». – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – С. 248 – 255.

Поступила в редакцию 16.06.2022

*Валентин Степанович Лосев, кандидат технических наук, главный специалист.
Борис Арсенович Старостенко, кандидат технических наук, главный специалист.
Василий Алексеевич Цветков, ведущий инженер, e-mail: visvetkov@rti-mints.ru.
(АО «РТИ им. академика А.Л. Минца»).*

*Светлана Геннадьевна Кондратьева, кандидат технических наук.
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)).*

USE OF PHASE AND AMPLITUDE-PHASE SYNTHESIS FOR SUPPRESSION OF THE FIRST SIDE LOBE OF THE ANTENNA ARRAY

**V. S. Losev, B. A. Starostenko,
V. A. Tsvetkov, S. G. Kondratyeva**

The methods for suppressing the first lower side lobe of the antenna pattern using the phase and amplitude-phase synthesis are studied in the article for a phased antenna array of long-distance radar location ground stations. Suppression of this lobe reduces the influence of electronic countermeasures on functioning of the ground station, as well as allows decreasing the sanitary protection area during operation of the transmit/receive phased antenna array. Analytic expressions for amplitude-phase and phase distribution in the antenna array aperture have been obtained. The results of calculation of the level and width of attenuation zones, as well as reduction of the peak of beam of the antenna pattern are presented.

Key words: antenna array, antenna pattern, phase synthesis, amplitude-phase synthesis.

References

1. Harry L. Van Trees. Optimum Array Processing : Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory / Harry L. Van Trees. – Hoboken, NJ, United States: Wiley Interscience, 2002. – 1472 p.
2. Reduction of level of antenna pattern side lobes by regulating the amplitude-phase distribution in the phased antenna array aperture in order to decrease the sanitary protection area / P. I. Grebenshchikov, V. S. Losev // The Second All-Russia Scientific and Technical Conference of Young Designers and Engineers ‘Mints readings’ : Conference proceedings. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2015. – P. 77 – 84.
3. Reduction of level of interference lobes of a modular phased array by regulating the amplitude-phase distribution / P. I. Grebenshchikov, V. S. Losev, O. Atayev [et al.] // Proceedings of the IVth All-Russia Scientific and Technical Conference: ‘Radio and Information Systems for Aerospace Defense – 2016’. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2017. – P. 248 – 255.

Valentin Stepanovich Losev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief Specialist.
Boris Arsenovich Starostenko, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief Specialist.
Vasily Alekseyevich Tsvetkov, Leading Engineer, e-mail: vtsvetkov@rti-mints.ru.
(JSC ‘Radiotechnical Institute named after Academician A.L. Mints’).
Svetlana Gennadyevna Kondratyeva, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.).
(Moscow Aviation Institute (National Research University)).