УДК 520.628

В.А. Хлусов, В.В. Доценко

Коэффициент шума активной антенной решетки

Анализируются шумовые свойства активной антенной решетки (АР) с произвольным распределением поля по раскрытию. Определен коэффициент шума активной АР, рассчитанный относительно АР с равномерным синфазным распределением амплитуды поля по раскрытию и выраженный через широко распространенные характеристики антенной техники. Показан количественный выигрыш в коэффициенте шума активной АР относительно пассивной АР (при идентичных направленных свойствах).

Ключевые слова: антенная решетка, коэффициент шума, синфазное распределение амплитуды поля, раскрытие антенны, диаграмма направленности.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-7-10

Основное отличие активных приемных антенных решеток (АР) от пассивных заключается в том, что амплитудное распределение поля по раскрытию активной АР производится после предварительного усиления выходных сигналов антенных элементов АР. При этом взвешиваются как полезный сигнал, так и тепловой шум, приведенный ко входу каждого из малошумящих усилителей (МШУ).

Несмотря на большое количество работ, посвященных теоретическому анализу шумовых свойств АР, представляется интересным провести сравнительный анализ коэффициента шума активной и пассивной АР и получить количественные результаты такого анализа, выраженные через широко распространенные характеристики антенн.

Результаты такого анализа представляют самостоятельный практический интерес для инженеров, поскольку в явном виде позволят разработчикам АР учесть их основные особенности.

В [1] приведены результаты анализа величины отношения сигнал/шум на выходах пассивной и активной АР с пространственным суммированием выходных сигналов. Показана зависимость количественного выигрыша в шумовых свойствах активной АР от параметров диаграммы направленности (ДН) приемного «суммирующего» рупора. В [2–5] приводятся методики расчета коэффициента шума активной решетки с неравномерным распределением взвешивающих коэффициентов. Во всех упомянутых работах содержатся все фундаментальные сведения о шумовых свойствах АФАР, но не акцентируются практическая значимость полученных результатов анализа. Такой акцент, на взгляд авторов данной работы, был бы очень полезен для разработчиков радиотехнических систем, использующих узконаправленные антенны с низким уровнем боковых лепестков диаграммы направленности.

В настоящей работе на примере анализа N -элементной линейной АР, в которой распределение поля по раскрытию задано коэффициентами a_i , определяющими коэффициенты передачи сигнала (по амплитуде) от i -го антенного элемента в суммирующее устройство, при этом $0 < a_i \leq 1$, получены выражения для количественной оценки коэффициента шума активной и пассивной АР.

Отметим, что коэффициенты a_i , формирующие дискретный синфазный раскрыт АР, есть отсчеты $a_i = g(x_i)$ непрерывной функции $g(x)$, определяющей в аналитической форме вид распределения амплитуды поля по раскрытию АР единичной длины. Функция $g(x)$ нормирована к ее максимуму на интервале определения $x \in (-1/2; 1/2)$. Площадь под кривой, заданной функцией $g(x)$, всегда меньше

единицы, и величина $A = \int_{-1/2}^{1/2} g(x) dx$ определяет по-

тери коэффициента усиления антенны [1] при отличии распределения поля по раскрытию от равномерного, для которого $g(x)=1$ и, следовательно, $A=1$. Очевидно, что

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i = \int_{-1/2}^{1/2} g(x) dx = A \leq 1; \quad (1)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 = \int_{-1/2}^{1/2} g^2(x) dx = C \leq 1,$$

где величина C получила название «полная излучаемая (принимаемая) мощность» [6].

Для N -элементной пассивной АР (рис. 1), в которой отсутствуют потери при передаче сигнала от антенных элементов на выход антенны и коэффициенты a_i равны единице (равномерное синфазное распределение амплитуды поля по раскрытию АР), выражение для величины γ_0 (отношения «принимаемый сигнал/шум») на ее выходе имеет вид

$$\gamma_0 = \frac{P_i N}{P_{\text{ш}}^{\Phi} + P_{\text{ш}}^{\text{МШУ}}} = \frac{P_0}{P_{\text{ш}}}, \quad (2)$$

где P_0 – полная мощность плоской электромагнитной волны (принимаемого сигнала), падающей на раскрыт АР, волновой вектор которой перпендикулярен плоскости раскрытия; P_i – мощность электромагнитной волны, принимаемой отдельным антенным элементом; $P_{\text{ш}}^{\text{МШУ}}$ – мощность тепловых шумов МШУ, усиливающего выходной сигнал пассивной АР, приведенная к его входу, $P_{\text{ш}}^{\Phi}$ – мощность тепловых шумов в пассивной линии (фидере) передачи

сигналов антенных элементов, $P_{\text{ш}} = P_{\text{ш}}^{\Phi} + P_{\text{ш}}^{\text{МШУ}}$ – полная мощность шумов на входе МШУ.

Рис. 1. Пассивная антенная решетка

Необходимо отметить, что для упрощения анализа мы считаем, что как входы пассивного сумматора, так и его выход имеют одинаковый активный импеданс (например, 50 Ом), величина которого и определяет мощность тепловых шумов $P_{\text{ш}}^{\Phi}$. Собственный шум пассивного сумматора на его выходе не зависит от величины коэффициентов a_i .

Выражение (2) определяет максимально возможное значение величины отношения сигнал/шум на выходе АР. Для всех других соотношений коэффициентов, когда $a_i \neq 1$, отношение сигнал/шум будет хуже. Отметим также, что для $a_i = 1$ (равномерное распределение) ДН АР имеет максимально узкий главный лепесток и, следовательно, максимальный коэффициент усиления.

В общем случае при произвольных значениях a_i величина отношения сигнал/шум на выходе пассивной АР (см. рис. 1) определяется выражением

$$\gamma_{\text{ПА}} = \frac{P_i \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{\text{ш}}} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{P_i \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_i N A^2}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_0 A^2}{P_{\text{ш}}} = \gamma_0 A^2, \quad (3)$$

где $P_i \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2 = P_c$ – мощность сигнала на выходе синфазного сумматора (синфазное «весовое» суммирование N взаимно когерентных сигналов с выходов антенных элементов [1]).

Нетрудно убедиться, что для $a_i = 1$ выражение (3) идентично выражению (2), величина $\gamma_{\text{ПА}} = \gamma_0$ и при любых a_i справедливо неравенство $\gamma_{\text{ПА}} \leq \gamma_0$.

Отношение величин γ_0 и $\gamma_{\text{ПА}}$ определяет коэффициент шума $K_{\text{ш}}^{\text{П}}$ пассивной АР с произвольным распределением коэффициентов a_i относительно

антенны с равномерным ($a_i=1$) распределением этих коэффициентов. Учитывая выражение (1), можем записать соотношение

$$K_{\text{ш}}^{\text{П}} = \frac{\gamma_0}{\gamma_{\text{ПА}}} = \frac{N^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} \rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} = A^{-2}, \quad (4)$$

где A – величина потерь усиления антенны (по амплитуде) [6]. Таким образом, коэффициент шума (4) определяет величину потерь усиления пассивной АР при изменении ее ДН относительно ДН АР с равномерным распределением коэффициентов a_i .

Активная АР

Для активной АР (рис. 2) выходные сигналы антенных элементов предварительно усиливаются в канале МШУ с коэффициентом усиления (по мощности) $K_{\text{МШУ}}$. Выражение для величины отношения сигнал/шум $\gamma_{\text{АА}}$ на выходе сумматора активной АР имеет вид

$$\gamma_{\text{АА}} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}^{\Sigma}} = \frac{P_i K_{\text{МШУ}} \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{K_{\text{МШУ}} P_{\text{ш}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 + P_{\text{ш}}^{\Phi}} = \frac{P_i \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{\text{ш}}^{\text{МШУ}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 + P_{\text{ш}}^{\Phi} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 + K_{\text{МШУ}}^{-1} \right)}, \quad (5)$$

где $P_c = P_i K_{\text{МШУ}} \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2$ – мощность принятого и усиленного сигнала на выходе сумматора активной АР; $P_{\text{ш}}^{\Sigma} = K_{\text{МШУ}} P_{\text{ш}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 + P_{\text{ш}}^{\Phi}$ – мощность шумов на выходе сумматора, обусловленная совокупностью $\left(K_{\text{МШУ}} P_{\text{ш}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 \right)$ взаимно некоррелированных

выходных шумов МШУ и тепловым шумом $P_{\text{ш}}^{\Phi}$ выходного фидера пассивного сумматора.

Как было отмечено выше, шум выходного фидера пассивного сумматора не зависит от значений коэффициентов a_i и всегда присутствует на его выходе. При выборе достаточно большого коэффициента усиления МШУ влиянием шума выходного фидера пассивного сумматора можно пренебречь, поскольку выходной шум будет определяться только выходными шумами МШУ. При выполнении неравенства $K_{\text{МШУ}}^{-1} \ll \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2$, откуда следует

$$K_{\text{МШУ}} \gg \frac{N}{\sum_{i=1}^N a_i^2} \approx C^{-1}, \quad (6)$$

выражение (5) упрощается и принимает вид

$$\gamma_{AA} = \frac{P_c}{P_{\Sigma}} = \frac{P_i \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{\Sigma} \sum_{i=1}^N a_i^2} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{P_i \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{\Sigma} \sum_{i=1}^N a_i^2} = \frac{P_0 A^2}{P_{\Sigma} C} = \gamma_0 \frac{A^2}{C}. \quad (7)$$

Рис. 2. Активная антенная решетка

Отметим, что выражение (7) идентично выражению (3) в [4], определяющее величину соотношения сигнал/шум на выходе активной АР, что подтверждает корректность формулы (7).

Для случая $a_i = 1$ (равномерное распределение значений a_i , для которых $A = C = 1$) имеет место равенство

$$\gamma_{AA}|_{a_i=1} = \frac{P_i N^2}{P_{\Sigma} N} = \frac{P_i N}{P_{\Sigma}} = \gamma_0,$$

и активная АР по шумовым свойствам эквивалентна пассивной АР с равномерным распределением поля по раскрытию.

В общем случае для произвольных значений a_i коэффициент шума активной АР равен

$$K_{\Sigma}^A = \frac{\gamma_0}{\gamma_{AA}} = \frac{N \sum_{i=1}^N a_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N \sum_{i=1}^N a_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} = \frac{C}{A^2} \quad (8)$$

и, сравнивая коэффициент шума (4) пассивной АР и коэффициент шума (8) активной АР (учитывая, что $C \leq 1$), можно записать неравенство

$$\frac{C}{A^2} \approx \frac{N \sum_{i=1}^N a_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} = K_{\Sigma}^A \leq K_{\Sigma}^{\Pi} = \frac{N^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} \approx \frac{1}{A^2}, \quad (9)$$

из которого следует, что коэффициент шума активной АР, в которой взвешивание сигналов от отдельных антенных элементов производится после их усиления, всегда меньше коэффициента шума пас-

сивной АР с такой же ДН и сравнивается с ним только в предельном случае равномерного распределения взвешивающих коэффициентов a_i .

Из выражения (9) также следует, что выигрыш в коэффициенте шума активной АР по сравнению с пассивной АР составляет величину

$$\delta = \frac{K_{\Sigma}^{\Pi}}{K_{\Sigma}^A} = \frac{N^2 \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2 N \sum_{i=1}^N a_i^2} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} = \frac{1}{C}. \quad (10)$$

Предельный переход к непрерывному раскрытию АР в выражениях (3), (4), (7), (8), (10) позволяет производить расчет нужных величин непосредственно по известным для ряда распределений значениям величин A и C [6], не производя предварительный расчет коэффициентов a_i .

Выигрыш в шумовых свойствах активной АР тем больше, чем сильнее отличие распределения коэффициентов a_i от равномерного. Например, для 33-элементной ($N = 33$) пассивной АР, когда распределение $g(x)$ задано широко применяемой в антеннах активной радиолокации функцией «cos на пьедестале», имеющей вид

$$g(x) = k + (1-k) \cos \pi x \Big|_{k=0,2} = 0,2 + 0,8 \cos \pi x, \quad (11)$$

(уровень первого бокового лепестка (УБЛ) ДН равен ~ -22 дБ, а остальных ниже -30 дБ), коэффициенты a_i определены выражением $a_i = g(x = x_i)$, где

$$x_i = \pi \frac{(N+1)-2i}{2(N-1)}, \quad i=1,2,\dots,33;$$

$$a_i = g(x = x_i) = (0,2; 0,278; \dots 0,996; 1; 0,996; \dots 0,278; 0,2).$$

Коэффициент шума K_{Σ}^{Π} [см. выражение (4)] такой АР равен

$$K_{\Sigma}^{\Pi} = 10 \log \left(\frac{33^2}{(1 + 2(0,2 + 0,278 + \dots + 0,996))^2} \right) = 10 \log 2,08 = 3,18 \text{ дБ}. \quad (12)$$

Для 33-элементной активной АР с таким же распределением $g(x)$ коэффициент шума K_{Σ}^A (8) равен

$$K_{\Sigma}^A = 10 \log \left(\frac{33 \cdot (1 + 2(0,2^2 + 0,278^2 + \dots + 0,996^2))}{(1 + 2(0,2 + 0,278 + \dots + 0,996))^2} \right) = 10 \log 1,14 = 0,56 \text{ дБ}.$$

Выигрыш в коэффициенте шума составляет величину $\delta = \frac{K_{\Sigma}^{\Pi}}{K_{\Sigma}^A} = 1,82$ (2,6 дБ). Таким образом, ко-

эффициент шума активной АР на 2,6 дБ меньше, чем у пассивной АР [см. выражение (12)], что очень существенно, особенно для активной радиолокации, где энергетический потенциал РЛС во многом определяет ее стоимость. Данный выигрыш физически

обусловлен снижением теплового шума приемной активной антенны (по сравнению с пассивной) за счет взвешивания тепловых шумов выходных фидеров антенных элементов (АЭ), поскольку предварительно выходные сигналы АЭ усиливаются и только потом взвешиваются (для обеспечения необходимого УБЛ).

Приведенные результаты согласуются с известными данными теории и практики антенн [1–6] и получены с использованием основных положений СВЧ-радиотехники.

Заключение

Результаты проведенного анализа шумовых свойств активных и пассивных линейных АР позволяют сделать вывод о чрезвычайной привлекательности использования активных АР в однопозиционных РЛС с твердотельными формирователями излученного сигнала. Полученный выигрыш в 2,6 дБ для конкретного варианта АР на практике может быть и большим, поскольку потери в подводящих фидерах пассивной антенны, как правило, больше соответствующих потерь в активных АР, так как в активных АР маломощные усилители сигналов размещены в непосредственной близости от антенных элементов и потери на передачу и прием сигналов минимальны. Дополнительный выигрыш в энергетическом потенциале может составлять до 1,5 дБ, а суммарный выигрыш – до 4 дБ, что в 2,5 раза снижает требование к мощности излучаемого сигнала (при прочих равных условиях) и, следовательно, качественно снижает затраты на реализацию твердотельных генераторов сигнала излучения РЛС.

Приведенные результаты сравнительного анализа шумовых свойств активных и пассивных линейных АР справедливы и для двумерных АР, в том числе и конформных. Это утверждение следует из того факта, что, как и в одномерных (линейных) активных АР, в двумерных активных АР при выполнении условия (6) производится взвешивание тепловых шумов питающих линий антенных элементов, что и обуславливает снижение коэффициента шума активной двумерной решетки. При этом для выполнения условия (6) в общем случае необходим больший коэффициент усиления МШУ, поскольку число элементов N_2 двумерной АР при ширине телесного угла ДН, равной ширине ДН линейной АР, гораздо больше числа элементов N_1 линейной АР ($N_2 \approx N_1^2$, для квадратного раскрыва двумерной АР).

Литература

1. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канашенкова. – М.: Радиотехника, 2004, 488 с.
2. Gatti R.V. Computation of Gain, Noise Figure, and Third-Order Intercept of Active Array Antennas / R.V. Gatti, M. Dionigi, R. Sorrentino // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2004. – Vol. 52, No. 11. – P. 3139–3143.
3. Holzman E.L. A comparison of active phased array, corporate beamforming architectures / E.L. Holzman, A.K. Agrawal // Proc. IEEE Int. Symp. Phased Array Systems and Technology, Oct. 15–18, 1996. – P. 429–434.
4. Lee J.J. G/T and noise figure of active array antennas // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1993. – Vol. 41. – P. 241–244.
5. Holzman E.L. Intercept points of active phased array antennas // Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. – 1996. – P. 999–1002.
6. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям / Д. Бартон, Г. Вард; пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.

Хлусов Валерий Александрович

Д-р техн. наук, вед. научный сотрудник
НИИ радиотехнических систем ТУСУРА,
вед. специалист АО «НПФ «МИКРАН»
Тел.: 8-(382-2) 41-35-62
Эл. почта: hva@micran.ru

Доценко Владимир Викторович

Ген. директор АО «НПФ «МИКРАН»
Тел.: +7 (382-2) 41-34-03
Эл. почта: dvv@micran.ru

Khlusov V.A., Dotcenko V.V.

Noise figure of an active antenna array

The article considers the noise characteristics of an active antenna array (AA) with an arbitrary aperture field distribution. The noise figure of an active AA was defined, calculated relating to an antenna array with a random in-phase aperture amplitude distribution, and expressed in terms of common characteristics for antenna engineering. Quantitative benefits of the noise figure of the active AA in respect to the passive AA (in case of the identical directional response) are demonstrated.

Keywords: antenna array, noise figure, in-phase aperture amplitude distribution, aperture, antenna pattern.