

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ЗАДАННОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А.А. Мартынчук, В.В. Лукьянчук, Г.Н. Зубицкий, С.А. Волвач, Д.В. Фоменко
(Харьковский университет Воздушных Сил)

Приведены результаты исследований поляризационных характеристик ФАР заданной конструкции методом математического моделирования.

поляризационные характеристики, фазированная антенная решетка, математическое моделирование

Постановка задачи. Антенны, как системы направленного излучения, приема и пространственно-поляризационной обработки сигналов, в значительной мере определяют потенциальные возможности РЛС по помехозащищенности, точности измерения угловых координат целей и другим показателям. Наиболее перспективным типом антенн для современных многофункциональных РЛС являются фазированные антенные решетки (ФАР) у которых, как и у других типов антенн, наряду с излучением на основной поляризации существует излучение на ортогональной (кроссовой) поляризации [1]. Его уровень зависит от конструктивных особенностей построения и функционирования антенны и учитывается поляризационными характеристиками (ПХ) ФАР.

Эффективность поляризационной селекции целей на фоне помех в РЛС с управляемым поляризационным базисом или в РЛС с полным поляризационным зондированием, значительно зависит от ПХ ФАР, так как их искажения могут привести к появлению дополнительных ошибок оценивания поляризационных параметров помех, а, следовательно, к неоптимальной для данных условий обработке.

Кроме того, воздействие кросс-поляризационных помех на РЛС может привести к значительным ошибкам измерения угловых координат целей, снижению эффективности функционирования поляризационных автокомпенсаторов помех с выделенным ортогональным каналом приема и т.д.

Количественное описание искажений ПХ ФАР требует разработки соответствующих математических моделей. Таким образом, задача разработки математического аппарата по расчету и проведению исследований ПХ ФАР заданной конструкции, является актуальной.

Анализ литературы. Для задач пространственно-временной обработки в основном ограничивались исследованием характеристик ФАР на основной поляризации, при этом поляризационные параметры антенн считались статическими, т.е. фиксированными на основании усреднения параметров сигналов или помех [2]. Переход же к пространственно-поляризационной обработке, т.е. адаптивной по поляризации, предполагает использование ФАР с управляемыми поляризационными параметрами, что обусловило необходимость изучения динамических свойств изменения поляризации излучаемых и принимаемых сигналов и помех, а также вопросов их поляризационной обработки [3]. При этом был проведен анализ влияния ПХ ФАР на качество радиолокационной информации [1].

Однако до сих пор исследованию искажений ПХ ФАР, заданного конструктивного исполнения, при сканировании в пределах заданного сектора уделялось не достаточно внимания.

Цель статьи: исследование искажений ПХ ФАР при сканировании в пределах сектора на основе разрабатываемой математической модели, учитывающей конструктивные особенности построения антенны.

Математическая модель ФАР позволит получить основные характеристики антенны: амплитудную, фазовую, поляризационную и частотную в заданном секторе электронного сканирования.

Основой для построения модели является решение внешней задачи теории антенн [2] в соответствии с методом Гюйгенса-Кирхгофа в предположении известного решения внутренней задачи распределения полей отдельных дискретных источников. Исходными данными модели являются задаваемые параметры ФАР: линейные размеры плоского раскрыва, длина волны, расположение, ориентация, размеры полуволновых вибраторов, используемых в качестве элементарных излучателей (ЭИ) и среднее значение и среднее квадратичное отклонение коэффициента развязки по поляризации в ЭИ по нормали, т.е. отношение напряженности электрического поля на основной поляризации сигнала к кроссовой.

Диаграмма направленности (ДН) вибратора на основной линейной горизонтальной поляризации имеет следующий вид [4]:

$$f_0(\theta) = \frac{\sin(kl \sin \theta)}{kl \sin \theta} \cos \theta \sqrt{\frac{51.5\lambda^2}{\pi^2 + [2 \ln(0.178\lambda/a)]^2}}, \quad (1)$$

где l – длина вибратора; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны, a – радиус вибратора; θ – угол между направлением максимума излучения и нормалью ФАР [2].

ДН ЭИ на кроссовой вертикальной поляризации с учетом фазы сигнала имеет вид [5]

$$f_k(\theta) = \sqrt{\frac{4.73\pi a^2}{\pi^2 + [2\ln(0.178\lambda/a_r)]^2}} \cdot \left[\exp\left(j\left(\frac{lk\sin\theta}{2}\right)\right) + \exp(j(-lk\sin\theta)) \right] / 2 \cdot e^{-j\pi/2}, \quad (2)$$

где a_r – радиус скругления конца ЭИ, являющихся системой блестящих точек и порождающих крессовую составляющую поля, задаваемый значением развязки по поляризации в ЭИ.

Развязка по поляризации отдельного ЭИ в направлении θ учитывается на основе использования аппроксимирующего функционала вида косинус на подставке

$$r_n(\theta) = r_0 \cdot (\Delta_n + (1 - \Delta_n) \cdot \cos(\theta)), \quad (3)$$

где $\Delta_n = 1/3$ – величина подставки, r_0 – величина развязки по поляризации в ЭИ по нормали.

Поляризационная диаграмма ЭИ с учетом развязки по поляризации в излучателе есть

$$\vec{P}_n = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{1-r_n(\theta)^2} \\ r_n(\theta)/\sqrt{1-r_n(\theta)^2} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Выражение векторной комплексной ДН ФАР имеет следующий вид:

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{pmatrix} = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \begin{pmatrix} f_0(\theta) \\ f_k(\theta) \end{pmatrix} \vec{P}_n \exp[j(\varphi_{n,m} + k\rho_{n,m}\sin(\theta)\cos(\varphi - \nu_{n,m}))], \quad (5)$$

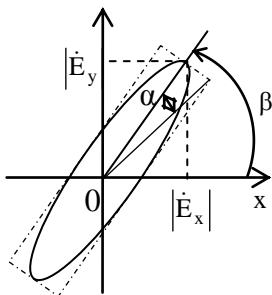


Рис. 1. Поляризационный эллипс

где $\rho_{n,m}$ и $\nu_{n,m}$ определяют положение ЭИ в полярной системе координат, расположенного на пересечении n -й строки и m -го столбца; $\varphi_{n,m}$ – фазовое распределение, необходимое для ориентации максимума ДН в заданном направлении; j – мнимая единица; M и N – количество излучателей в столбце и строке соответственно; \dot{E}_x , \dot{E}_y – ортогональные компоненты поля (рис. 1).

Средняя ДН ФАР при малом радиусе корреляции фазовых ошибок, характеризующих расстояние, в пределах которого фазовые ошибки можно считать взаимозависимыми и при малых ошибках имеет вид [6]:

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = \vec{F}(\theta, \varphi)(1 - \alpha) + \frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi} s, \quad (6)$$

где s – радиус корреляции в относительных единицах; α – дисперсия

ошибок фазового распределения, $\bar{F}(\theta, \varphi)$ – ДН ФАР без учета взаимной связи ЭИ, φ – угол в картинной плоскости между проекцией направления максимума излучения и опорным направлением, например, горизонтальным ортом антенны [2].

Для оценки искажения формы и взаимного расположения лепестков ДН ФАР, уровень которых не ниже заданного приводятся не только трехмерные графические представления пространственных ДН на основной и крессовой поляризациях, но и их картографические представления.

ПХ приводятся в виде трехмерного изображения и в виде зависимостей углов эллиптичности и ориентации поляризационного эллипса (рис. 1) от пространственного угла θ при фиксированном угле φ в двух главных сечениях $\varphi = 0$ и $\varphi = 90$ и сечении $\varphi = 45$, позволяющие провести качественный и количественный анализ искажений.

Угол ориентации поляризационного эллипса ФАР в заданном направлении определяется как [3]:

$$\beta = 1/2 \cdot \arctg \left(2|\dot{E}_y||\dot{E}_x| \cos(\phi) / \left(|\dot{E}_y|^2 - |\dot{E}_x|^2 \right) \right), \quad (7)$$

где ϕ – разность фаз между ортогональными компонентами поля \dot{E}_y и \dot{E}_x ; $|\dot{E}_y|$, $|\dot{E}_x|$ – модули ортогональных компонентов поля.

Значение коэффициента эллиптичности поляризационного эллипса в заданном направлении вычисляется как [3]:

$$r = \sqrt{\frac{|\dot{E}_x|^2 \sin(\beta)^2 - |\dot{E}_y||\dot{E}_x| \sin(2\beta) \cos(\phi) + |\dot{E}_y|^2 \cos(\beta)^2}{|\dot{E}_x|^2 \cos(\beta)^2 + |\dot{E}_y||\dot{E}_x| \sin(2\beta) \cos(\phi) + |\dot{E}_y|^2 \sin(\beta)^2}}. \quad (8)$$

Отсюда значение угла эллиптичности поляризационного эллипса ФАР

$$\alpha = \arctg(r). \quad (9)$$

Рассмотрим результаты моделирования некоторой типовой бортовой ФАР. ЭИ в ФАР располагаются в круглом раскрыве эквидистантной решетки, метод управления положением максимума ДН фазо-фазовый, фазовращатели дискретные, четырехразрядные. При моделировании предполагалось, что длина волны соответствует сантиметровому диапазону, расстояние между излучателями – $0,7\lambda$; радиус раскрыва ФАР – 5λ ; относительная ошибка изготовления и установки ЭИ не превышает 1%, а средняя величина развязки по поляризации в них по нормали 25 дБ.

На рис. 2, 3 приведены пространственные ДН ФАР на основной горизонтальной поляризации и крессовой вертикальной поляризации при излучении по нормали, полученные в соответствии с (5, 6), анализ которых говорит о различии их как по форме, так и по уровню. Уровень первого бокового лепестка на основной поляризации составляет – 9,85 дБ, а

на кроссовой – 33,67 дБ, при этом максимум кроссовой составляющей относительно основной составляет – 24,75 дБ.

Из анализа картографических изображений пространственных диаграмм направленности на основной и кроссовой поляризациях по уровням – 13 и – 38 дБ (рис. 4, 5) следует, что ДН ФАР по нормали на основной поляризации имеет симметричную относительно ее максимума форму, а на кроссовой поляризации эта симметричность нарушается. В пользу определенной адекватности разработанной модели свидетельствует соответствие результатов, полученных с ее использованием, аналогичным, приведенным в [2] для пространственных характеристик на основной поляризации.

Анализ ПХ в трехмерном представлении (рис. 6, 7) показывает, что зависимости имеют не симметричную форму, при этом в пределах ДН угол эллиптичности изменяется от – 45 до 45 град., а угол ориентации – от 0,05 до 78 град. Рассмотрим ПХ в выбранных для анализа сечениях. В главных сечениях угол эллиптичности (рис. 8, 10) изменяется от – 3,5 град. до 3 град, а угол ориентации (рис. 9, 11) от 0,05 до 1,5 град в пределах ДН. В сечении $\varphi = 45$ град. в пределах ДН угол эллиптичности (рис. 12) изменяется от – 42 до 38 град, а угол ориентации от 0,05 до 80 град (рис. 13), т.е. наибольшие искажения ПХ в линейном базисе наблюдаются в сечении развернутом под углом 45 градусов к горизонтальному орту. В пределах основного лепестка ДН углы эллиптичности и ориентации поляризационного эллипса составляют соответственно 0,19 и 0,05 град., что соответствует величине развязки по поляризации – 24,7 дБ.

Для обзора пространства требуется отклонения положения максимума ДН от нормали. Это обуславливает необходимость анализа как пространственных, так и поляризационных характеристик ФАР в заданном направлении в пределах сектора электронного сканирования.

На рис. 14, 15 приведены пространственные ДН ФАР на основной и кроссовой поляризациях, а на рис. 16, 17 – их картографические представления по уровню – 13 и – 38 дБ. Их анализ показывает, что отклонение максимума ДН на углы $\varphi = 25^\circ$ и $\theta = 30^\circ$ приводит к расширению главного лепестка ДН, возрастанию уровня и искажению формы боковых лепестков, а также к нарушению симметричности их взаимного расположения.

Соответствующие данным условиям ПХ ФАР приведены рис. 18, 19. Их анализ показывает, что отклонение луча от геометрической оси ФАР приводит к нарушению поляризационной структуры поля, происходит разворот поляризационного базиса, нарушается его ортогональность. Отметим возрастание уровня максимума ДН на кроссовой поляризации по отношению к основной при этом до -20,2 дБ, при возрастании среднего фона до -39 дБ, т.е. происходит "перекачка" между основными и кроссовыми каналами приема.

В пределах главных сечений ПХ наблюдается возрастание углов эллиптичности (рис. 20, 22) и ориентации (рис. 21, 23) в пределах основного лепестка соответственно до 1 и 27 град, что соответствует величине развязки по поляризации – 17,7 дБ. В пределах всей диаграммы угол эллиптичности изменяется от – 14,6 до 6 град, а угол ориентации – от 17 до 36 град, что отражается на развязке по поляризации в пределах всей ДН. В сечении $\varphi = 45$ град. угол эллиптичности (рис. 24) изменяется от – 37 до 14 град., а угол ориентации – от 10 до 55 град (рис. 25) в пределах ДН, что свидетельствует об излучении и приеме эллиптически поляризованных волн в пределах сектора, а не линейно горизонтально поляризованных как по нормали.

Выводы. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что ПХ ФАР представляют собой достаточно сложные закономерности, имеющие несимметричную форму, и определяемые конструктивными особенностями построения ФАР, как системы неидентичных элементарных излучателей. Поляризационная структура излучаемого и принимаемого поля ФАР неоднородна в пределах диаграммы направленности, наибольшие искажения наблюдаются по боковым лепесткам, располагаемым дальше от основного. ПХ существенно изменяются в пределах сектора электронного сканирования, причем наибольшие искажения наблюдаются при смещении максимума излучения к краю этого сектора.

Таким образом, разработанная математическая модель позволит рассчитать ПХ ФАР требуемой конструкции для заданного сектора сканирования, анализ которых позволит учесть их при пространственно-поляризационной обработке сигналов для повышения эффективности функционирования современных РЛС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. – Одесса: ОИУМ, 1999. – 230 с.
2. Проблемы антенной техники / Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.Н.Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.
3. Родимов С.П., Поповский В.В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
4. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. – М.: Сов. радио, 1978. – 224 с.
5. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.
6. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. – М.: Сов. радио, 1970. – 470 с.

Поступила 8.07.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор Л.Г. Корниенко,
Харьковский университет Воздушных Сил.