УДК 621.396.67

Анализ изменения параметров антенных решеток сложной конфигурации при отклонении луча от нормали

Лагунов И.Р., Храмов К.К.

Рассматриваются вопросы анализа антенных решёток с апертурой сложной конфигурации. Исследуется изменение основных параметров антенных решеток, построенных на базе турникетной антенны, при сканировании луча. Выполняется моделирование антенных решеток с квадратной, псевдокруглой, круглой и кольцевой конфигурацией. Приводятся и анализируются результаты такого моделирования.

Ключевые слова: фазированная антенная решётка, антенная решётка сложной конфигурации, диаграмма направленности, коэффициент эллиптичности, ширина луча диаграммы направленности.

Введение

Применение в радиолокационных станциях (РЛС) фазированных антенных решёток, которые предполагают одновременное излучение сигналов и их одновременный прием на массив элементов, открывает возможности для улучшения таких параметров РЛС как разрешающая способность, направленность излучения и быстрое электронное управление. Кроме того, присутствует возможность формировать несколько лучей одновременно для многофункциональных операций [1-4]. Вместе с тем параметры фазированных антенных решеток могут в значительной степени меняться при сканировании луча. Поэтому актуальной задачей является выявление характера и степени таких изменений. Особую значимость эта информация имеет для радиолокационных станций, использующих полнополяриметрический режим зондирования.

Целью работы является исследование изменения основных параметров антенных решеток различной конфигурации, построенных на базе турникетной антенны, при отклонении луча от нормали.

1. Постановка задачи исследования

Как известно, турникетные антенны относятся к антеннам с вращающейся поляризацией [3, 4]. Поле их излучения способно иметь эллиптическую поляризацию. При распространении волны конец вектора электрического поля $\vec{E}$ рассматриваемой точки пространства в общем случае описывает эллипс (рис. 1) за период высокочастотного колебания. Этот эллипс лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны [5].

Математически поляризационные состояния поляризованных плоских электромагнитных волн могут быть представлены пространственно-ортогональными составляющими в декартовой системе координат:

$E_H = E_a\cos(\omega t + \varphi_H)$;

$E_V = E_b\cos(\omega t + \varphi_V)$,

где E_a, E_b – амплитуды, а φ_H, φ_V – фазовые углы ортогональных составляющих.

Приведенную выше систему можно записать в виде

$$\frac{E_H^2}{E_a^2} - \frac{2E_H E_V\cos(\Delta\varphi)}{E_a E_b} + \frac{E_V^2}{E_b^2} = \sin^2(\Delta\varphi),$$

где $\Delta\varphi = \varphi_V - \varphi_H$.

Последнее выражение описывает поляризационный эллипс, вписанный в прямоугольник, стороны которого имеют длины $2E_a$ и $2E_b$ соответственно (рис. 1).

Направление вращения вектора электрического поля $\vec{E}$ (направление обхода эллипса) будем определять с точки зрения наблюдателя, рассматривающего волну по направлению распространения. Тогда для эллиптически поляризованных волн с правым направлением вращения, вектор вращается по часовой стрелке, а для левого направления вращения – против часовой стрелки.

Основной интерес для анализа представляют ориентация эллипса и величина эллиптичности его поляризации. Ориентация собственной системы координат эллипса относительно опорной системы координат определяется углом наклона эллипса – азимутом τ, т.е. углом между большой полуосью эллипса и положительным направлением оси x. Форма эллипса (т.е. эллиптичность) определяется коэффициентом эллиптичности – отношением большой и малой полуосей эллипса

$$k = E_a/E_b.$$

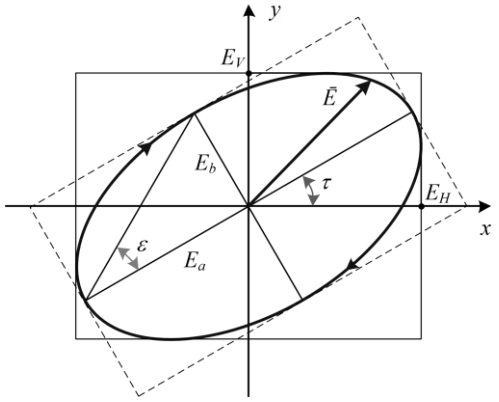


Рис. 1. Поляризационный эллипс

Если коэффициент эллиптичности равен бесконечности, то антенна имеет линейную поляризацию; если коэффициент равен единице (0 дБ), то – круговую, в промежутке (1, ∞) – эллиптическую [6, 7]. Знание коэффициента эллиптичности в произвольной точке пространства для турникетной антенны и антенной решетки, построенной на базе таких антенн, открывает возможности обнаружения и селекции малозаметных целей (в том числе в условиях наличия искажений ионосферы), извлечения амплитудных и фазовых признаков, связ анных с поляризационными особенностями элементов цели.

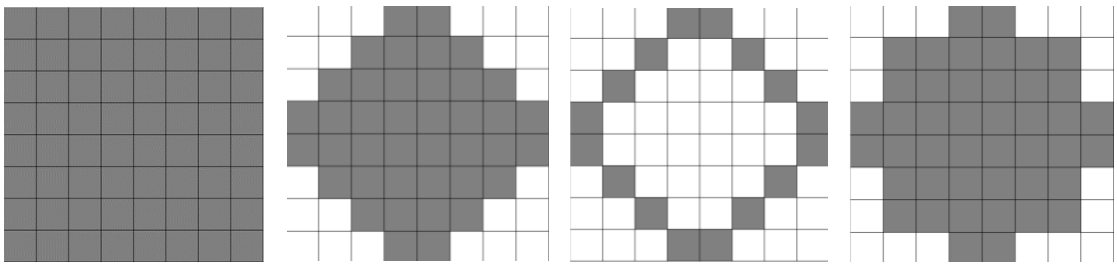
Для сравнительно простых антенных решеток основные параметры (коэффициент эллиптичности k, коэффициент усиления K_0 антенны в направлении главного максимума, ширина $\Delta\theta$ главного лепестка диаграммы направленности, уровень боковых лепестков УБЛ) при произвольном значении азимута α и угла места θ могут быть найдены аналитически, путем моделирования или получены экспериментально.

Определение параметров крупноапертурных фазированных антенных решеток, имеющих апертуру сложной конфигурации, представляет собой серьезную инженерно-техническую задачу. Проблема нахождения параметров, в частности, коэффициента эллиптичности, осложняется при отклонении луча на угол θ_0 от нормали.

2. Моделирование параметров антенных решеток

Для выполнения конкретных задач проектируются антенны с различными параметрами и конфигурацией. При этом параметры во многом зависят от формы, размеров и потребляемой мощности.

Рассмотрим следующие типы конфигураций антенных решёток (АР) в базисе квадратной матрицы из 64 элементов (рис. 2): квадратную, псевдокруглую, кольцевую и круглую. Будем полагать, что АР являются эквидистантными, плоскими и состоят из элементарных излучателей типа турникетная антенна.



а б в г

Рис. 2. – Конфигурации антенных решеток (активные элементы закрашены):
а) квадратная; б) псевдокруглая; в) кольцевая; г) круглая

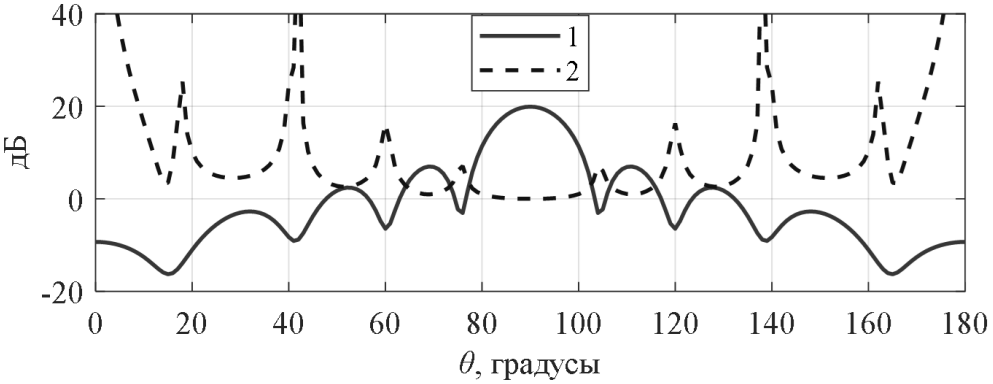


Рис. 3. – Диаграмма направленности (1) и коэффициент эллиптичности (2) антенной решетки квадратной конфигурации при $\theta_0 = 0$

Выполним моделирование приведенных антенных решеток при следующих исходных данных:

- максимальный размер антенной решетки: 8×8 элементов;

- тип элементарного излучателя: турникетная антенна, плечи которой возбуждаются с фазовым сдвигом 90 градусов;

- шаг между излучателями: $d = \lambda/2$, где λ – рабочая длина волны;

- длина плеча турникетной антенны: $l = \lambda/2$.

Моделирование осуществляется в пакете Antenna Toolbox среды Matlab. Для расчёта импеданса, поверхностных свойств, таких как распределение тока и заряда, полевых свойств, таких, например, как диаграмма направленности, Antenna Toolbox использует метод моментов. Инструментарий, предоставляемый данным пакетом, позволяет проводить достаточно точное моделирование как одиночных антенн, так и антенных массивов [8, 9].

На рис. 3 приведены диаграмма направленности (ДН) и коэффициент эллиптичности (КЭ), полученные в плоскости сканирования луча для антенной решетки квадратной конфигурации при $\theta_0 = 0$. Из рисунка видно, что ширина главного лепестка для данной апертуры составляет $\Delta\theta = 14°$. Наименьшее значение коэффициента эллиптичности $k =$

Таблица 1. Результаты моделирования АР квадратной конфигурации

θ_0, градусы	УБЛ, дБ	K_0, дБ	$\Delta\theta$, градусы	k, дБ	k_1, дБ	k_2, дБ
0	–13	19,93	14	0,033	0,348	0,348
5	–12,777	19,98	14	0,061	0,321	0,342
10	–12,714	19,95	14,5	0,307	0,693	0,282
15	–12,533	19,76	14,7	0,728	1,03	0,374
25	–12,286	19,46	15,5	1,829	2,449	1,143
35	–11,791	18,77	17	3,354	4,048	2,741
50	–10,552	17,65	19	6,266	6,895	5,61

Таблица 2. Результаты моделирования АР псевдокруглой конфигурации

θ_0, градусы	УБЛ, дБ	K_0, дБ	$\Delta\theta$, градусы	k, дБ	k_1, дБ	k_2, дБ
0	–29,49	18,12	18	0,033	0,107	0,107
5	–28,73	18,12	18	0,09	0,376	0,224
10	–27,95	18,1	18,2	0,353	0,866	0,27
15	–26,77	18,04	18,5	0,767	1,453	0,247
25	–25,062	17,76	18,9	2,028	3,112	0,936
35	–23,559	17,37	20,5	3,759	5,132	2,194
50	–20,594	16,06	23	6,748	8,036	4,969

Таблица 3. Результаты моделирования АР кольцевой конфигурации

θ_0, градусы	УБЛ, дБ	K_0, дБ	$\Delta\theta$, градусы	k, дБ	k_1, дБ	k_2, дБ
0	–19,778	15,68	13,5	0,03	0,579	0,579
5	–19,791	15,63	13,5	0,07	0,468	0,615
10	–19,744	15,56	14	0,345	0,608	0,559
15	–19,529	15,49	14	0,798	0,87	0,462
25	–19,226	15,16	15	1,9	2,124	1,123
35	–18,4605	14,5	16	3,361	3,495	2,707
50	–15,8052	12,75	18,5	6,103	6,389	5,496

Таблица 4. Результаты моделирования АР круглой конфигурации

θ_0, градусы	УБЛ, дБ	K_0, дБ	$\Delta\theta$, градусы	k, дБ	k_1, дБ	k_2, дБ
0	–11,959	18,56	16	0,032	0,093	0,093
5	–11,882	18,57	16,3	0,108	0,264	0,315
10	–11,8	18,55	16,7	0,35	0,627	0,177
15	–11,99	18,45	17,5	0,683	1,2	0,355
25	–11,56	18,12	18	1,937	3,075	1,042
35	–11,389	17,67	19	3,629	4,967	2,384
50	–9,077	16,44	22,5	6,794	7,983	4,845

0 дБ, соответствующее круговой поляризации, совпадает с направлением излучения антенной решётки ($\theta = 90°$). При других значениях угла θ поляризация становится эллиптической.

В таблице 1 приведены результаты моделирования антенной решетки (АР) квадратной конфигурации при отклонении луча от нормали. Через k_1 и k_2 обозначены коэффициенты эллиптичности на границах ширины главного лепестка.

Аналогичные данные для антенных решеток с псевдокруглой, круглой и кольцевой конфигурациями приведены в таблицах 2-4.

Сравнивая влияние угла отклонения луча на коэффициент усиления антенных решеток (рис. 4), видим, что на рассматриваемом интервале θ_0 все исследуемые конфигурации имеют приблизительно одинаковую скорость спада зависимости $K_0(\theta_0)$. При этом наибольшее значение КУ соответствует АР квадратной конфигурации, так как она имеет

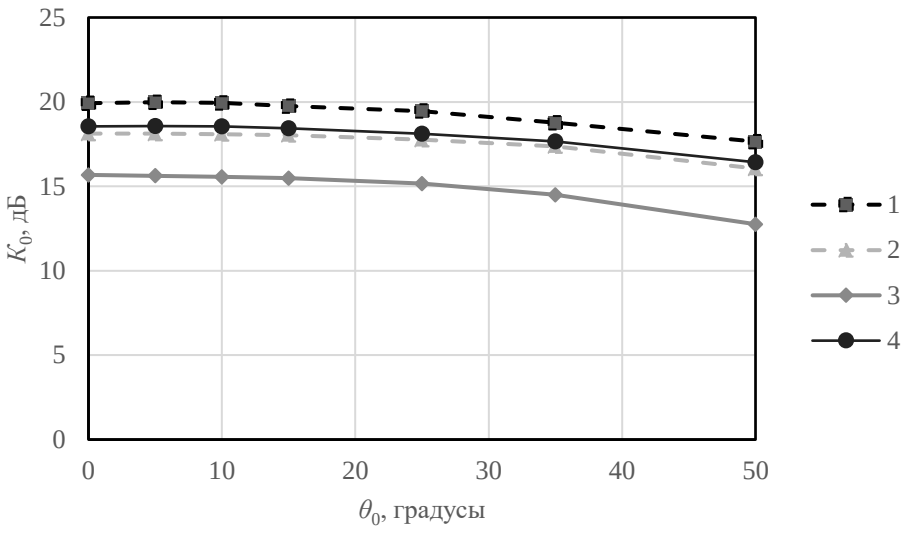


Рис. 4. – Коэффициент усиления антенных решеток при отклонении луча от нормали: 1 – квадратная АР; 2 – псевдокруглая АР; 3 – кольцевая АР; 4 – круглая АР

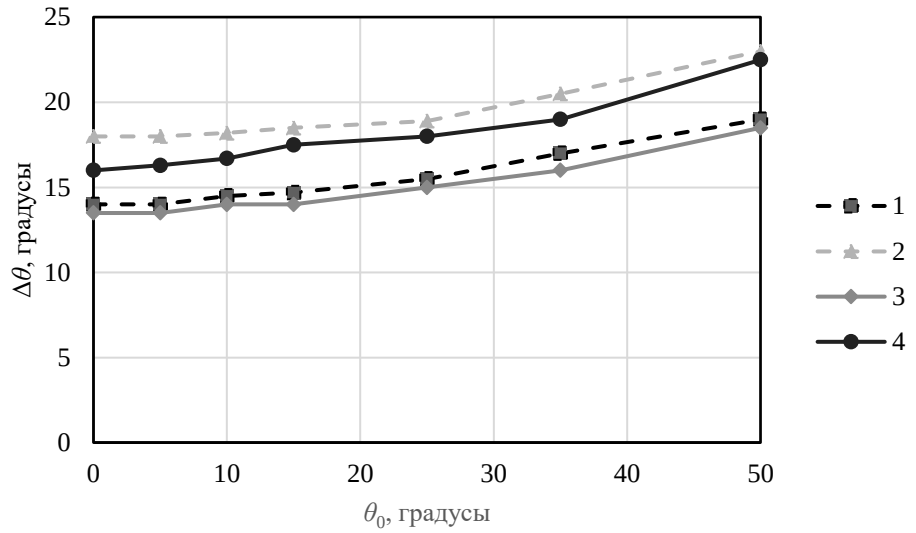


Рис. 5. – Изменение ширины главного лепестка ДН при отклонении луча от нормали: 1 – квадратная АР; 2 – псевдокруглая АР; 3 – кольцевая АР; 4 – круглая АР

наибольшее число антенных элементов. Наименьшее значение у кольцевой АР.

Проводя анализ изменения ширины главного лепестка ДН антенной решетки (рис. 5) от угла θ_0, приходим к выводу о нелинейном характере увеличения $\Delta\theta$ с ростом θ_0. Наиболее монотонный характер зависимости $\Delta\theta(\theta_0)$ имеет АР с круглой конфигурацией. На исследуемом интервале θ_0 наименьшую ширину главного лепестка сохраняет кольцевая АР, а наибольшая соответствует псевдокруглой решетке.

Сравнивая максимальный уровень боковых лепесков ДН рассматриваемых антенных решеток на интервале $\theta_0 = (0 \ldots 50°)$ (рис. 6), можно увидеть, что наиболее резко (на 8,5 дБ) УБЛ возрастает у АР с псевдокруглой конфигурацией. При этом минимальное изменение (около 2,5 дБ) уровня боковых лепестков имеет квадратная антенная решетка. Добавим, что, несмотря на высокую крутизну возрастания этой характеристики, псевдокруглая

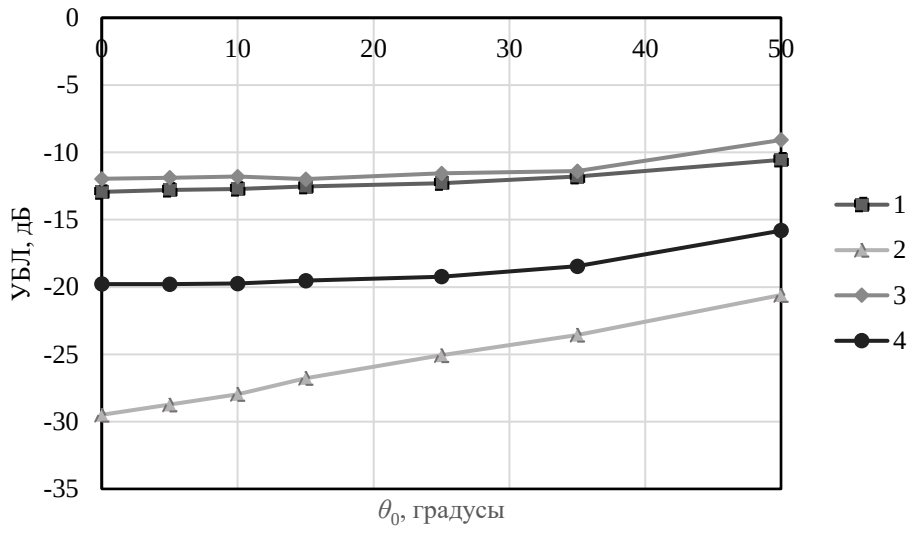


Рис. 6. – Относительный уровень боковых лепестков ДН при отклонении луча от нормали: 1 – квадратная АР; 2 – псевдокруглая АР; 3 – кольцевая АР; 4 – круглая АР

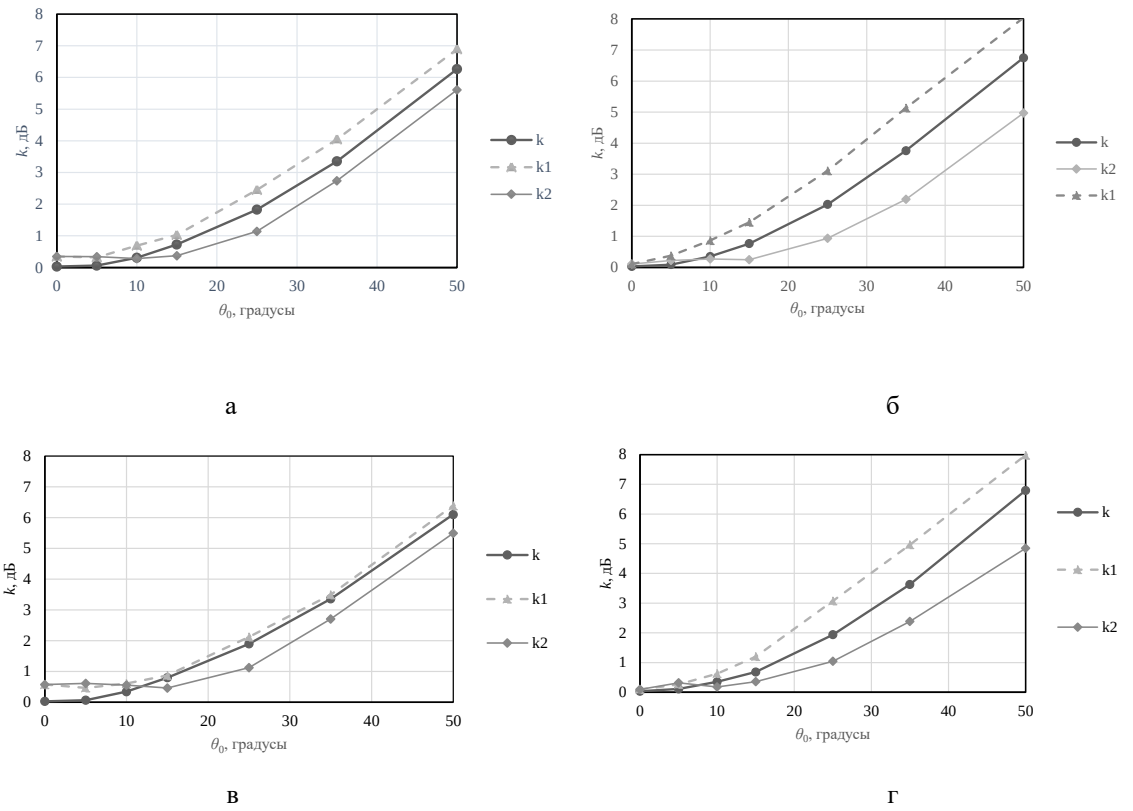


Рис. 7. – Зависимости коэффициента эллиптичности в пределах основного лепестка ДН от угла отклонения от нормали: а – квадратная АР; б – псевдокруглая АР; в – кольцевая АР; г – круглая АР

конфигурация сохраняет самый низкий относительный УБЛ среди рассматриваемых АР.

Рассмотрим влияние угла отклонения луча от нормали на коэффициент эллиптичности. Анализ КЭ выполним также на границах ширины главного лепестка (по уровню половинной мощности) (рис. 7).

Для всех четырёх исследуемых типов АР можно наблюдать, что при увеличении угла θ_0 КЭ возрастает, что говорит об искажении параметров поляризации, которые возникают в антенной решетке, состоящей из турникетных антенных элементов. При малых углах отклонения $\theta_0 < 10°$ в пределах ширины ДН зависимость $k(\theta_0)$ является практически горизонтальной и имеет место симметрия значений коэффициента эллиптичности: $k > k_1$ и $k > k_2$. При бóльших углах θ_0, когда главный лепесток ДН расширяется, имеем возрастающее в пределах ширины ДН значение k, причем $k_1 > k > k_2$. Коэффициент эллиптичности возрастает на 3 дБ при $\theta_0|_{k=3\text{ дБ}} \approx 32°$.

Для рассматриваемых значений $\theta_0 = (0 \dots 50°)$ в пределах ширины главного лепестка ДН наименьший разброс (около 1 дБ) значений КЭ имеет АР с кольцевой конфигурацией, а наибольший – соответствует псевдокруглой АР и составляет около 3,1 дБ.

Заключение

Проведено моделирование основных параметров антенных решеток размером 8×8 элементов квадратной, круглой, псевдокруглой и кольцевой конфигураций при изменении угла θ_0 отклонения луча от нормали. Получены зависимости коэффициента усиления, ширины главного лепестка уровня боковых лепестков и коэффициента эллиптичности от θ_0, которые позволяют качественно и количественно оценить поведение параметров крупноапертурной фазированной антенной решетки с аналогичной конфигурацией при сканировании луча.

Анализ результатов моделирования позволил выявить особенности искажений параметров поляризации, которые возникают в антенной решетке, состоящей из турникетных антенных элементов, при отклонении луча от нормали на угол θ_0: в пределах главного лепестка ДН поляризация не является круговой, имеется неравномерность коэффициента и

угла эллиптичности; при $\theta_0 > 10°$ минимальное значение коэффициента эллиптичности не совпадает с направлением излучения; с ростом θ_0 увеличивается минимально возможное значение коэффициента эллиптичности.

Полученные результаты также показали, что при изменении угла отклонения луча сохраняются основные особенности каждой из анализируемых конфигураций антенных решеток: АР с квадратной конфигурацией имеет наибольший коэффициент усиления, псевдокруглая решетка – минимальный уровень боковых лепестков, кольцевая АР – наименьшую ширину главного лепестка ДН.

Литература

1. Романюк В.А. Основы радиосвязи: учебник для вузов / В.А. Романюк. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 288 с.

2. Шаров Г.А., Гладейчук В.В., Гусинский А.В., Кондрашов Д.А., Свирид М.С. Апертурные антенны сантиметровых и миллиметровых длин волн. – Санкт-Петербург: Изд-во: Горячая линия – Телеком. 2017. 332 с.

3. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Советское радио, 1966. 440 с.

4. Пудовкин, А.П. Основы теории антенн: учебное пособие / А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, А.А. Иванков. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 92 с.

5. Храмов К.К., Костров В.В., Лагунов И.Р. Анализ алгоритма формирования элементов поляризационной матрицы рассеяния в условиях шумового воздействия // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XVI Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской научной конференции. Муром, 2 февр. 2024 г. – Муром: МИ ВлГУ, 2024. – 421 с.: ил. – [Электронный ресурс]: 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). С.336-338

6. Доманов С.К. Особенности измерения коэффициента эллиптичности на автоматизированном измерительном комплексе дальней зоны в частотной области // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2017. № 1–1. С. 142–144.

7. Кочетков В.А., Тихонов А.В., Солдатиков И.В. и др. Структура областей применения численных методов моделирования линзовых антенных решёток СВЧ диапазона в процессе их проектирования (1-я часть цикла статей) // Научно-технический сборник «Техника радиосвязи». 2016. Вып. 3 (30). С. 46-61.

8. Дьяконов В.П. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Солон-Пресс, 2008. 800 с.

9. Типикин А.А. Моделирование антенных устройств в Matlab с использованием пакета расширения Antenna Toolbox. М.: СОЛОН-Пресс, 2019. 116 с.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10114 (https://rscf.ru/project/23-29-10114/)

Поступила 07 июня 2024 г.

The issues of analyzing antenna arrays with an aperture of complex configuration are considered. The change in the basic parameters of antenna arrays built on the basis of a turnstile antenna during beam scanning is investigated. Antenna arrays with square, pseudo-circular, circular, and annular configurations are modeled. The results of such modeling are presented and analyzed.

Keywords: Phased array, antenna array configuration, radiation pattern, axial ratio, beam width.

Лагунов Иван Романович – магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: ilavina175@gmail.com.

Храмов Константин Константинович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: hramovkk@gmail.com.

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.