

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.67

АНТЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБУРГА ПРИ СКАНИРОВАНИИ

© 2019 г. Д. В. Денисов^{1, *}, Б. А. Панченко^{1, 2}, С. Н. Шабунин²¹Уральский технический институт связи и информатики (филиал) СибГУТИ,
Российская Федерация, 620109 Екатеринбург, ул. Репина, 15²Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина,
Российская Федерация, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

*E-mail: denisov.d1v@gmail.com

Поступила в редакцию 07.12.2017 г.

После доработки 01.10.2018 г.

Принята к публикации 03.10.2018 г.

Исследованы антенные характеристики полусферической линзы Люнебурга с плоским экраном со стороны линзы, противоположным расположению облучателя. Полусферическая геометрия линзы позволяет эффективно использовать ее в режиме сканирования. При работе антенной системы в режиме сканирования возможен выбор формы и параметров диаграммы направленности в зависимости от положения облучателя.

DOI: 10.1134/S003384941904003X

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Полноразмерная линза Люнебурга (ЛЛ) представляет собой сферическое тело с меняющимся по радиусу r коэффициентом преломления по закону

$$n(r) = \sqrt{2 - (r/a)^2},$$

где a – радиус сферы, r – текущая радиальная координата [1]. Полноразмерная линза имеет две фокальные точки: $F1$ – на освещенной поверхности (в месте расположения первичного облучателя антенны) и $F2$ – на теневой стороне линзы на бесконечном удалении. Вблизи точки $F2$ формируется диаграмма направленности антенны. Основными недостатками линзовой антенны являются габариты и масса, которая определяется материалом линзы. Этот недостаток можно частично устранить, отбрасывая теневую половину линзы и заменяя ее плоским экраном. В этом случае вторая фокальная точка $F2$ оказывается на освещенной стороне линзы, и лучи первичного источника проходят дважды тело линзы, вследствие чего антенна теряет геометрическую симметрию (рис. 1). В этом случае диаграмма направленности ориентирована в сторону расположения первичного источника (обратное излучение). При такой модификации линзы решение задачи расчета существенно усложняется, так как для линзы в форме полусферы не может быть записана в замкнутой форме функция Грина и задача решается численно методом конечных элементов в программном пакете ANSYS HFSS [2, 3]. Следует отметить, что

идея реализации многолучевого режима работы антенной системы на базе ЛЛ не нова. Различные антенные системы, работающие в режиме формирования луча заданной формы в зависимости от положения первичного облучателя на поверхности линзы, исследовались и ранее [4–6].

В данной статье рассматривается работа линзы Люнебурга с фокусом на поверхности в режиме антенны. Данная реализация антенны на базе полусферической ЛЛ приведена в [7], однако в ней не было исследовано влияние размеров и положение металлического экрана на форму диаграммы направленности в режиме сканирования.

2. СХЕМА АНТЕННЫ И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 1 представлена схема антенны на базе модифицированной линзы и прохождения лучей через нее.

В качестве первичного облучателя при расчете характеристик антенны используется волновод с квадратным излучающим раскрытием, с волной типа H_{10} . На рис. 2 в качестве примера для последующих сравнений приведена рассчитанная диаграмма направленности (ДН) для полной сферической ЛЛ электрического радиуса $k_0 a = 6\pi$, где $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – основная длина волны рабочего диапазона. Расчетный вариант ЛЛ имеет шестислойную оптимизированную аппроксимацию [4, 8].

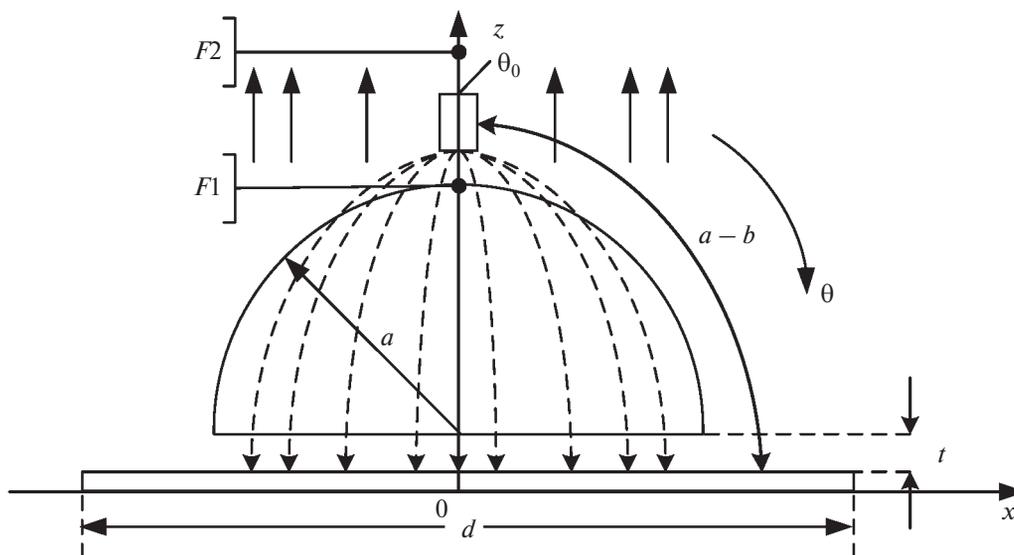


Рис. 1. Схема антенны на базе модифицированной линзы Лüneбурга: d – диаметр плоского металлического экрана, t – расстояние между срезом линзы и экраном.

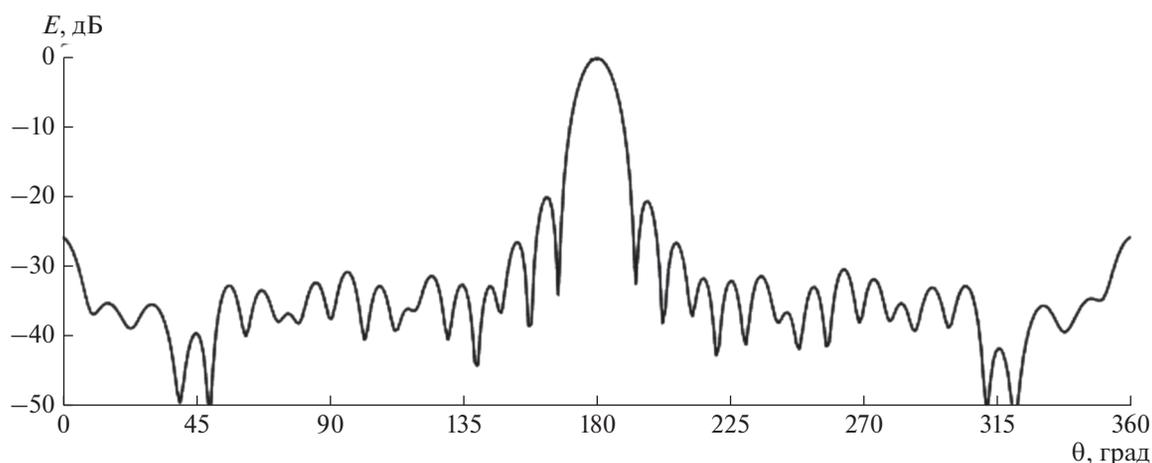


Рис. 2. Диаграмма направленности сферической линзы Лüneбурга размером $k_0a = 6\pi$.

Отметим, что основным параметром, определяющим направленность антенны, является электрический радиус сферы k_0a . На рис. 3 приведена серия диаграмм направленности полусферической антенны на основе ЛЛ при изменении диаметра металлического экрана с тыльной стороны линзы $d = [2a, 2.5a, 3.5a, 4a]$, $t = 0$. При этом первичный облучатель был расположен вдоль оси z ($\theta_0 = 0$, где θ_0 – угловое положение первичного облучателя).

Сравнение результатов расчетов для полной и модифицированной линзы показывает, что для полусферической линзы ширина диаграммы направленности несколько увеличивается, а уровень боковых лепестков зависит от d и также несколько

увеличивается. При этом увеличение размеров экрана по сравнению с радиусом линзы ($d > 2a$) приводит к увеличению габаритов антенны и влияет на уровень заднего лепестка, но реализация такой системы является нецелесообразной.

В табл. 1 приведены данные о влиянии k_0a на основные антенные характеристики полусферической линзы с диаметром экрана $d = 2a$, $t = 0$: ширину диаграммы направленности $\Delta\theta$, уровень первого бокового лепестка (УПБЛ) и коэффициент направленного действия (КНД).

Основными параметрами, на которые влияют габариты линзы, являются ширина диаграммы направленности и КНД.

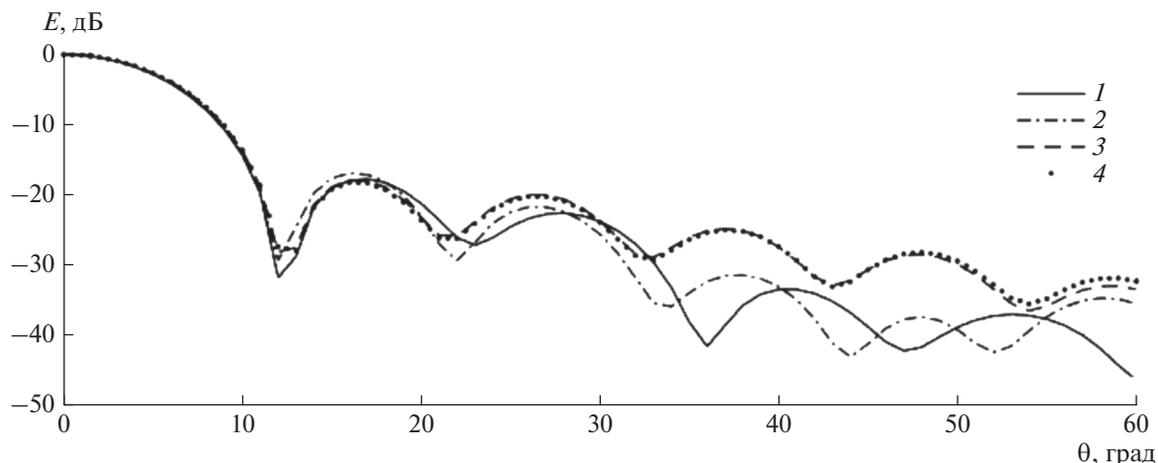


Рис. 3. Диаграмма направленности полусферической линзы Лüneбурга с различными диаметрами экрана: $d = 2a$ (1), $2.5a$ (2), $3.5a$ (3) и $4a$ (4).

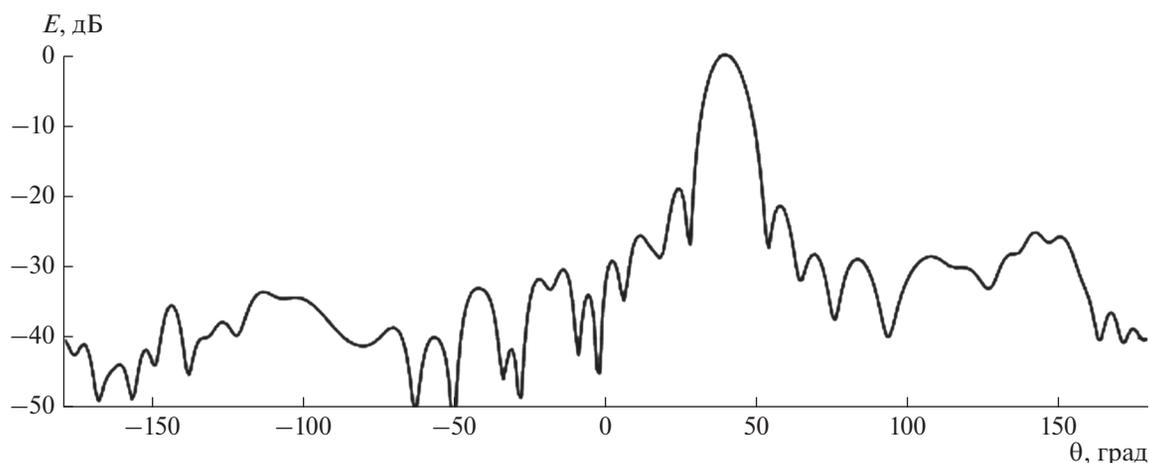


Рис. 4. Диаграмма направленности полусферической линзы Лüneбурга при сканировании $\theta_0 = 40$ deg.

3. АНТЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЗЫ ПРИ СКАНИРОВАНИИ

Сканирование луча антенны производится путем перемещения облучателя (траектория движения $a-b$ на рис. 1) по поверхности освещенной

Таблица 1. Влияние k_0a на антенные характеристики полусферической линзы

$k_0a (a/\lambda)$	$\Delta\theta$, град	УПБЛ, дБ	КНД, дБ
$2\pi (a/\lambda = 1)$	22	-10	12
$4\pi (a/\lambda = 2)$	15.6	-16.5	20.5
$6\pi (a/\lambda = 3)$	10.49	-17.24	24.15
$8\pi (a/\lambda = 4)$	8	-19.4	26.5

части линзы, т.е. фактически в каждом из вариантов облучатель находится в фокальной точке. Вследствие асимметричности конструкции из-за наличия экрана антенны сканирование луча сопровождается изменением его формы по сравнению с центральным положением излучателя ($\theta_0 = 0$). На рис. 4 для примера приведена диаграмма направленности антенны для угла сканирования $\theta_0 = 40$ deg.

Основные характеристики антенны для разных k_0a и $\theta_0 = 40$ deg в режиме сканирования приведены в табл. 2.

Увеличение угла сканирования $\theta_0 = 0$ приводит к смещению максимума излучения и изменению формы ДН. На рис. 5 для $k_0a = 6\pi$ показана серия диаграмм направленности при изменении угла сканирования.

Таблица 2. Влияние k_0a на антенные характеристики полусферической линзы в режиме сканирования

$k_0a(a/\lambda)$	$\Delta\theta$, град	УПБЛ (лев), дБ	УПБЛ (прав), дБ	E_{\max} , град	КНД, дБ
$2\pi(a/\lambda = 1)$	37.5	-18.2	-12.9	39.1	13.7
$4\pi(a/\lambda = 2)$	17.7	-20.2	-20	36.9	19.9
$6\pi(a/\lambda = 3)$	11.9	-18.4	-21.1	41	23.5
$8\pi(a/\lambda = 4)$	9	-18	-20.6	39.5	25.9

Примечание: УПБЛ (лев, прав) – уровень левого и правого боковых лепестков соответственно, E_{\max} – положение максимума излучения.

Для углов сканирования $\theta_0 \geq 80$ deg ДН становится существенно асимметричной, теряет односторонний характер и может быть использована в радиолокации для синтеза специальных диаграммы типа $\text{csc } \alpha, (\text{csc } \alpha)^2$ [9].

4. УПРАВЛЕНИЕ УРОВНЕМ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ

Уровень боковых лепестков является одним из основных характеристик антенны и задается, как правило, в техническом задании при проектировании антенной системы. Уровень первого и второго боковых лепестков диаграммы направленности определяется характеристиками и размерами первичного облучателя, зависящими от уровня облучения края линзы (spillover), от размеров линзы k_0a и размеров и положения экрана.

В табл. 3 приведены характеристики ДН в зависимости от радиуса экрана. Помимо уровня

первых боковых лепестков и ширины ДН, в таблице отражены такие параметры как максимальное значение бокового излучения в противоположной вертикальной плоскости E_m , а также угол, при котором наблюдается это боковое излучение – θ_{E_m} . Для наглядности на рис. 6 приведены ДН для двух размеров экрана. Отметим, что при увеличении радиуса экрана, происходит существенное снижение уровня бокового излучения в правое полупространство E_m и незначительное уменьшение уровня боковых лепестков. Увеличение диаметра экрана оказывает незначительное влияние на ширину и форму основного лепестка диаграммы в режиме сканирования.

На рис. 7 изображены графики зависимости коэффициента направленного действия G от угла сканирования. Можно отметить, что при достаточно большом размере экрана ($d \geq 3a$) КНД остается достаточно стабильным вплоть до 60 град. При меньшем диаметре экрана, соизмеримым с разме-

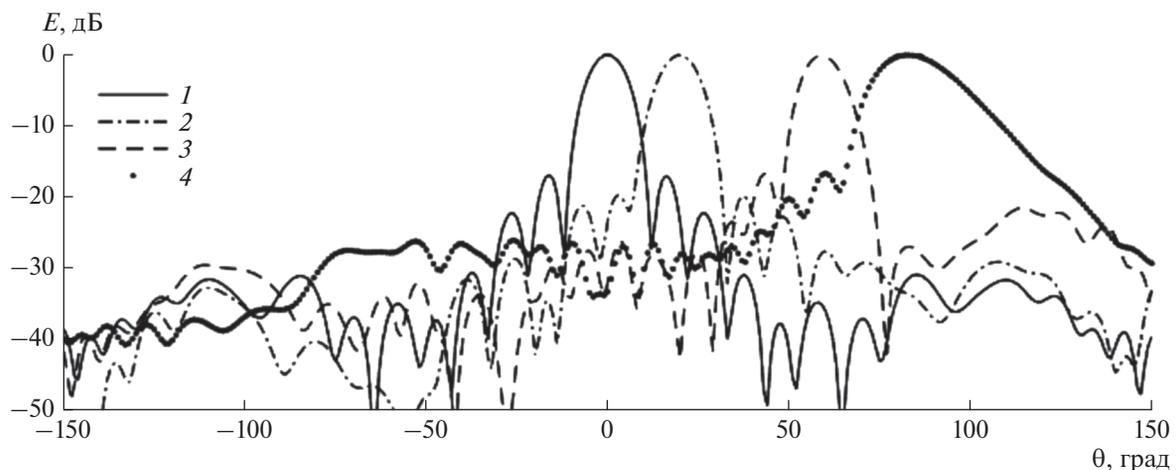
**Рис. 5.** Диаграмма направленности для различных углов сканирования: $\theta_0 = 0$ (1), 20 (2), 60 (3) и 80 (4).

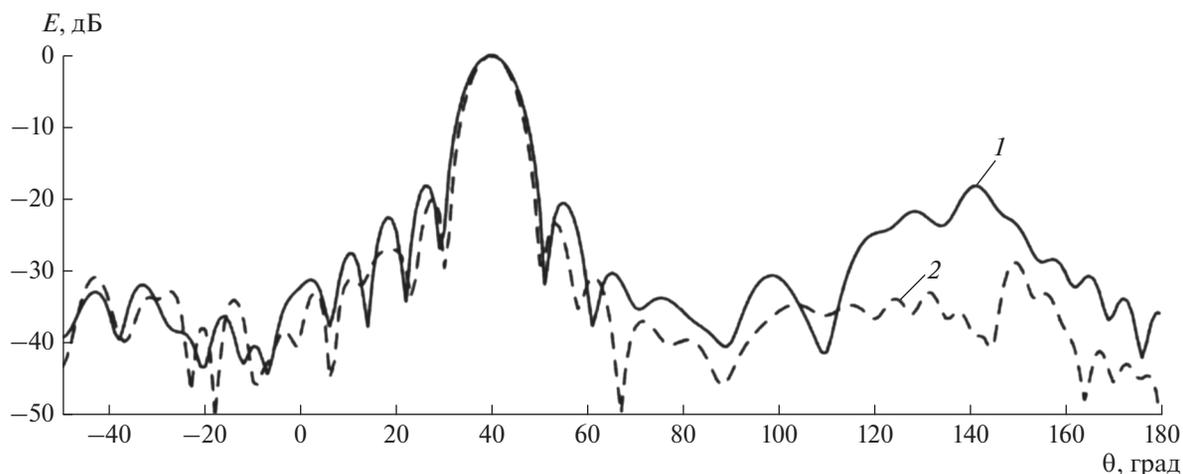
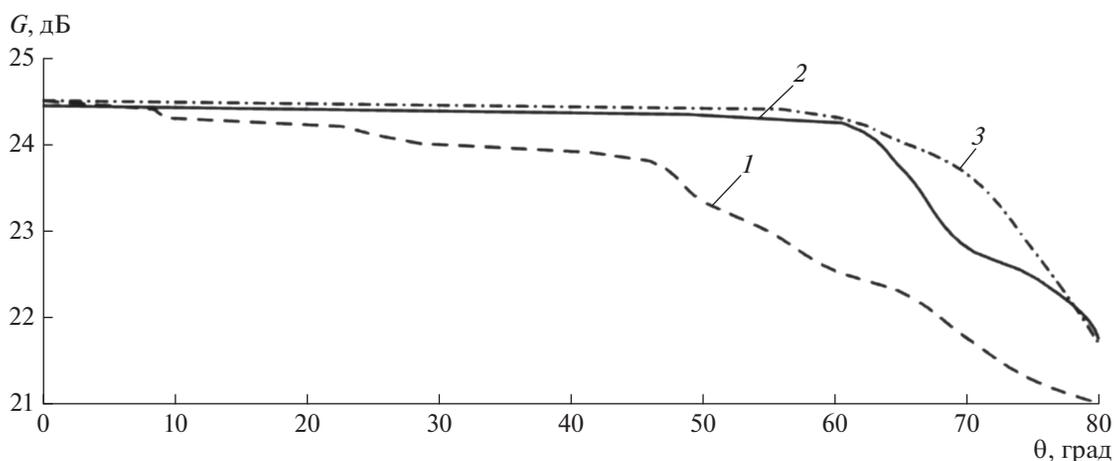
Таблица 3. Влияние размеров экрана на диаграмму направленности

d	a	$1.2a$	$1.4a$	$1.6a$	$1.8a$	$2a$	$2.2a$	$2.4a$	$2.6a$	$2.8a$
$\Delta\theta$, град	7.6	7.7	7	7	7	7.1	7	7	7	7.65
УПБЛ (лев), дБ	-18	-17.7	-18.5	-19.4	-20	-19.8	-20	-20.1	-18.5	-20
УПБЛ (прав), дБ	-20.5	-20.7	-22.3	-22.8	-23.4	-23.4	-23.4	-23.5	-22.3	-23.2
E_m	-18	-24.4	-27.7	-29.1	-29.1	-28.5	-29.1	-29.1	-29.9	-28.8
θ_{Em}	141	145	150	149	150	149	150	149	143	149

ром линзы ($d \approx 2a$), при увеличении угла сканирования происходит непрерывное снижение КНД.

В предложенной конструкции может возникнуть излучение в горизонтальную плоскость под экраном. Физически задний лепесток является

результатом интерференции волн, просочившихся с тыльной стороны линзы и волн, отраженных от среза линзы и экрана. Регулируя зазор между телом полусферической линзы и металлическим экраном, можно добиться требуемого уровня зад-

**Рис. 6.** Диаграмма направленности для двух размеров металлического экрана: $d = a$ (1), $2.8a$ (2).**Рис. 7.** Зависимости КНД от угла сканирования при $d = 2a$ (1), $3a$ (2), $4a$ (3).

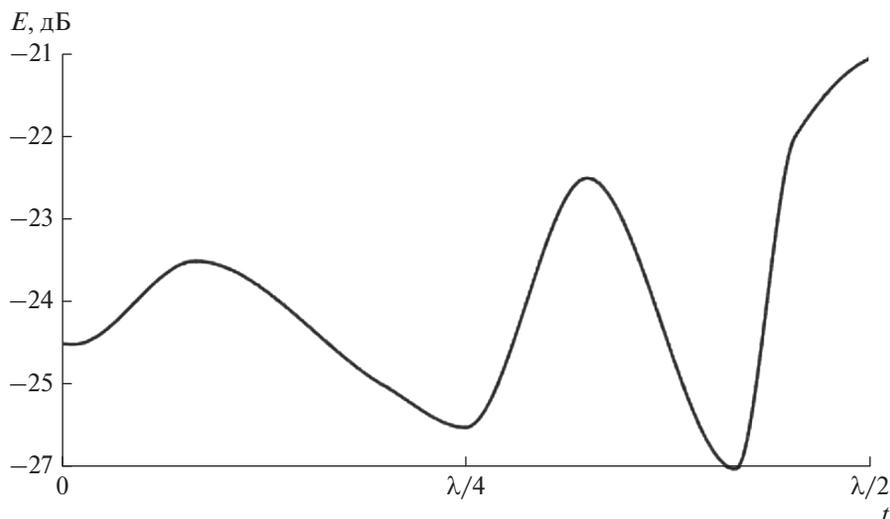


Рис. 8. Зависимость уровня заднего излучения от $t = (0 \dots 0.5)\lambda$.

него излучения в соответствии с техническим заданием. На рис. 8 показаны зависимости уровня заднего лепестка от величины зазора $t = (0 \dots 0.5)\lambda$.

ВЫВОДЫ

Полусферическая конструкция линзы Лунебурга может быть использована в режиме сканирования. Размеры и положение экрана оказывают влияние на форму диаграммы направленности при сканировании. Рассматриваемая конструкция позволяет формировать диаграммы направленности специального типа. Габаритными размерами и положением экрана можно регулировать основные характеристики диаграммы направленности в определенных пределах: уровни бокового излучения, ширину диаграммы направленности и коэффициент направленного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Luneburg R.K.* The Mathematical Theory of Optics. Providence: Brown Univ. Press, 1944. V. 1.
2. *Panchenko B., Shabunin S., Denisov D.* // European Microwave Association (EuMA). Paris, France. 9–11 Sept. 2015. P. 568.
3. *Fuchs B., Lafond O., Himdi M., Rondineau S., Le Coq L.* // IEEE Trans. 2006. V. AP-42. № 5. P. 261.
4. *Fuchs B., Le Coq L., Lafond O., Rondineau S.* // IEEE Trans. 2007. V. AP-55. № 2. P. 283.
5. *Калошин В.А.* // Тез. докл. Труды 13 Междун. Крымской конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь. Сентябрь 2003. Crimico 2003.
6. *Caille G., Julia A., Catarino M., Thiry M., Lopez J.-M.* // Luneberg Technologies. 2008. № 1. http://www.radar-reflector.com/wp-content/uploads/2008/09/jina_gb.pdf.
7. *Slavi R. Baev and others* // TEFLOR 2008, p. 488. https://www.researchgate.net/publication/237127096_Modeling_and_Simulations_of_Luneburg_Lens_Antennas_for_Communication_Purposes.
8. *Панченко Б.А., Денисов Д.В.* // Антенны. 2013. № 12. С. 26.
9. *Elliott R.S.* Antenna Theory and Design. Hoboken: J. Wiley and Sons, 2003.