

11

Увеличение диапазона рабочих частот малогабаритных щелевых полосковых антенн вытекающей волны для высокоточного позиционирования по сигналам ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou

© В.Н. Шепов, В.А. Борисов

Федеральный исследовательский центр „Красноярский научный центр СО РАН“, Красноярск, Россия
E-mail: shepov@ksc.krasn.ru

Поступило в Редакцию 28 октября 2024 г.

В окончательной редакции 28 октября 2024 г.

Принято к публикации 24 декабря 2024 г.

Описан новый подход, направленный на увеличение диапазона рабочих частот малогабаритных щелевых полосковых антенн вытекающей волны с круговой поляризацией, предназначенных для приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou. Показано, что эффект увеличения диапазона рабочих частот антенны составил свыше 85%.

Ключевые слова: широкополосная щелевая полосковая антенна, высокоточное позиционирование по сигналам ГНСС, малогабаритная приемная антенна ГНСС.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.08.60164.20171

Щелевые полосковые антенны вытекающей волны обладают стабильным фазовым центром, высоким коэффициентом эллиптичности для приема сигналов с правой круговой поляризацией в верхней полусфере, высоким уровнем кросс-поляризационной развязки, крутым спадом диаграммы направленности (ДН) вблизи нулевых углов возвышения для подавления многолучевости, достаточным для надежного приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) коэффициентом усиления (КУ), поэтому с успехом применяются для высокоточного позиционирования по фазе несущей частоты сигналов ГЛОНАСС, GPS. Несомненными достоинствами данных антенн являются низкопрофильность, сравнительно низкая себестоимость, технологичность изготовления, небольшие габаритные размеры и вес. Для подавления заднего лепестка ДН в малогабаритных щелевых полосковых антеннах применяется малогабаритный проводящий экран.

Особенностью конструкции данных антенн является применение СВЧ-поглотителя. Он выполняется в виде кольца и располагается между излучателем антенны и экраном. Благодаря СВЧ-поглотителю подавляются переотраженные навигационные сигналы, сменившие поляризацию с правой круговой на левую круговую, что повышает стойкость данных антенн к многолучевости, которая, как известно, вносит определяющий вклад в ошибку высокоточного позиционирования по сигналам ГНСС. Однако при этом снижается и КУ полезных навигационных сигналов с правой круговой поляризацией. Поэтому важно сохранить высокий КУ в отсутствие поглотителя при расширении диапазона рабочих частот антенны для того, чтобы иметь возможность применить поглотитель большей ширины, подавив как можно сильнее переотраженные сигналы с левой круговой поляризацией.

Классические щелевые полосковые антенны вытекающей волны сравнительно узкополосны. Это обусловлено тем, что для приема сигналов ГНСС используется одна мода колебаний H -волны — низшая полуволновая. Поэтому для приема сигналов ГЛОНАСС, GPS в частотных диапазонах $L1$, $L2$ короткие и длинные щели чередуются для настройки резонансных частот полуволновой моды колебаний H -волны в диапазонах 1563–1610 МГц и 1215–1254 МГц соответственно [1,2].

С введением в работу частотных диапазонов $L3$ ГЛОНАСС и $L5$ GPS, а также навигационных систем Galileo и Beidou появилась необходимость расширения полосы рабочих частот щелевых полосковых антенн ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou в одном из диапазонов до 1164–1300 МГц для приема сигналов ГЛОНАСС $L2/L3$, GPS $L2/L5$, Galileo $E5a/E5b/E6$, Beidou $B2/B3$. Обеспечить прием сигналов ГНСС в таком расширенном диапазоне рабочих частот одной модой половины количества щелей с сохранением стабильности основных технических характеристик антенны становится затруднительно.

Для расширения диапазона рабочих частот щелевых полосковых антенн с круговой поляризацией в [3] применены дополнительные щели, соединенные с четырнадцатью основными щелями и названные фрактальными петлями. В [4] разработана щелевая полосковая антенна вытекающей волны с двенадцатью щелями, основная мода колебаний H -волны которых настроена на диапазон частот от 1.14 до 1.67 GHz. Однако для увеличения КУ из конструкции антенны убран СВЧ-поглотитель, что приводит к возрастанию левой круговой поляризации и в дальнейшем приведет к ухудшению точности измерений по сигналам ГНСС.

В настоящей работе для увеличения диапазона рабочих частот приемных щелевых полосковых антенн с

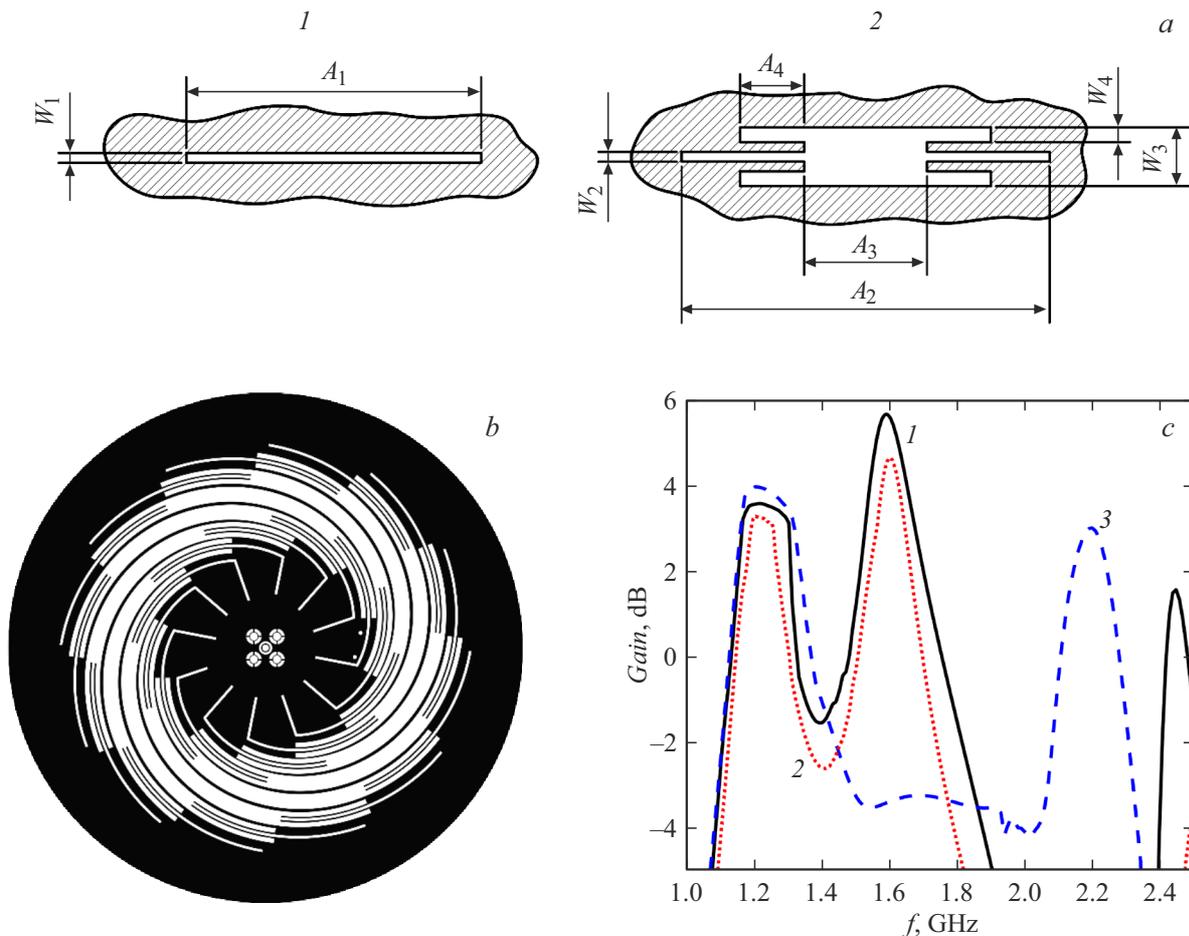


Рис. 1. *a* — регулярный щелевой полосковый резонатор (1) и щелевой полосковый резонатор со скачками ширины щели (2); *b* — верхняя сторона излучателя 3D-модели антенны; *c* — рассчитанные диапазоны рабочих частот антенн: 1 — на полуволновой и волновой модах колебаний H -волны щелевых резонаторов со скачками ширины щели, 2 — антенна, в которой все щели выполнены без скачков ширины, при этом полуволновая мода половины щелей настроена на один частотный поддиапазон, а второй половины щелей — на другой, 3 — антенна, в которой все щели выполнены без скачков ширины и имеют одинаковую длину.

сохранением коэффициента усиления антенны описанный новый подход — принимать навигационные сигналы в диапазоне частот 1164–1300 МГц (ГЛОНАСС $L2$, $L3$, GPS $L2$, $L5$, Galileo $E5a$, $E5b$, $E6$, Beidou $B2$, $B3$) полуволновой модой колебаний H -волны всех щелей, а в диапазоне 1559–1610 МГц (ГЛОНАСС $L1$, GPS $L1$, Galileo $E1$, Beidou $B1$) — волновой. Для этого все щели излучателя антенны выполняются со скачками волнового сопротивления в узле высокочастотного электрического поля волновой моды колебаний H -волны, обусловленными скачками их ширины [5].

На рис. 1, *a* показан регулярный щелевой полосковый резонатор (1) и резонатор со скачками ширины щели (2), выполненными для понижения частоты волновой моды колебаний H -волны. Благодаря увеличению волнового сопротивления щели в узле высокочастотного электрического поля волновой моды колебаний H -волны резонансная частота волновой моды колебаний H -волны понижается. Длина же широкого участка щели (A_3) настроена оптимально для максимального сближения частот полуволновой и

волновой мод колебаний. Тем не менее регулярного скачка ширины щелей (W_3) для настройки резонансных частот волновой моды щелей на требуемый диапазон рабочих частот антенны недостаточно, так как W_3 ограничена соседними щелями излучателя антенны. Поэтому выполняются дополнительные скачки с длиной A_4 и шириной W_4 .

На рис. 1, *b* показана верхняя сторона излучателя антенны, спроектированного на основе предлагаемого подхода. Излучатель выполнен из диэлектрической подложки с двухсторонней металлизацией толщиной 1.524 мм, диаметром 112 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3.38$. В металле верхней стороны подложки выполнены щели, закрученные по спирали вокруг центра излучателя для приема сигнала с правой круговой поляризацией. На нижней стороне подложки выполнен микрополосковый резонатор бегущей волны, подобный описанному в [6], для передачи принимаемых щелями навигационных сигналов в радиотракт. Между излучателем и плоским проводящим экраном располо-

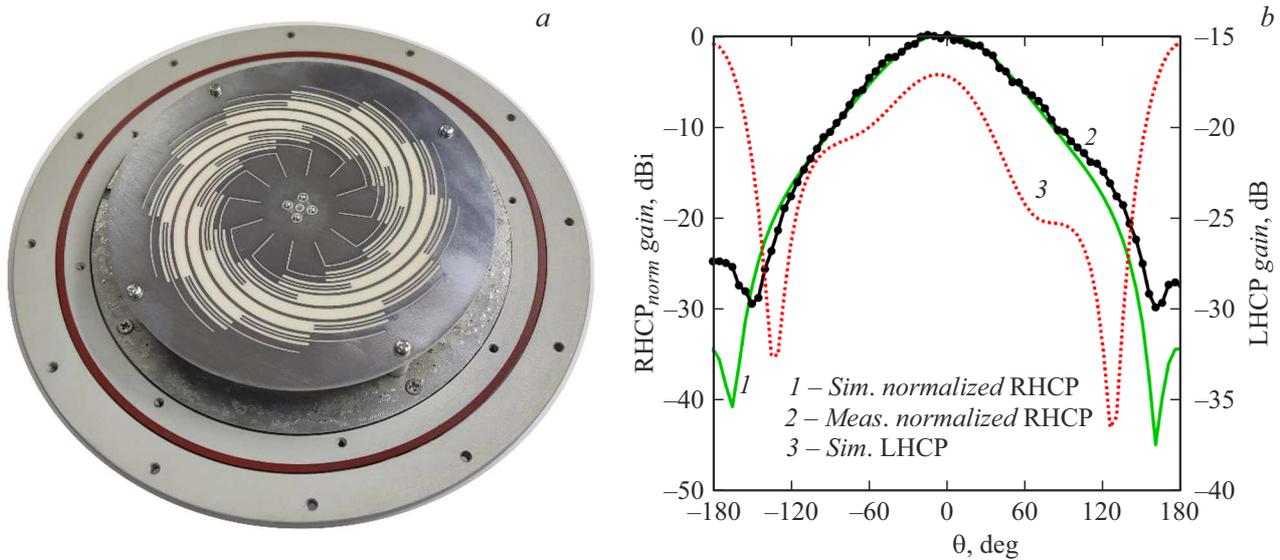


Рис. 2. *a* — фотография антенны со снятой крышкой; *b* — рассчитанная (1) и измеренная (2) нормированные диаграммы направленности для правой круговой поляризации и рассчитанная диаграмма направленности для левой круговой поляризации (3) на частоте 1300 MHz.

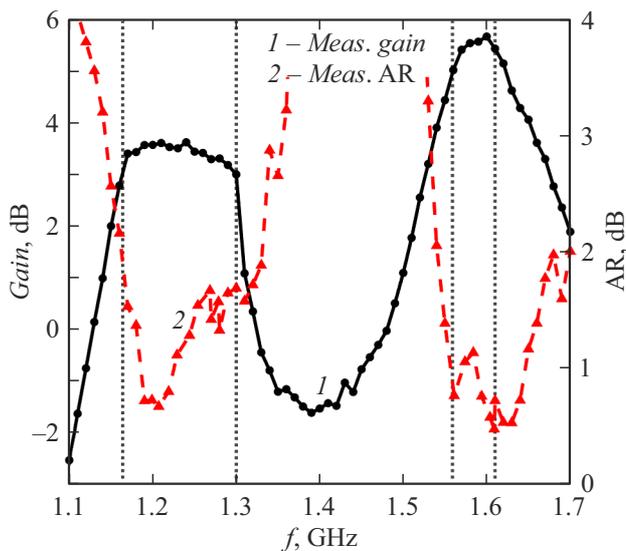


Рис. 3. Измеренные частотные зависимости коэффициентов усиления (1) и эллиптичности (2).

жен в виде кольца СВЧ-поглотитель C-RAM MT-30 с вносимым затуханием 16 dB/cm на частоте 1 GHz.

Результаты электродинамического анализа частотных зависимостей КУ 3D-модели щелевой полосковой антенны вытекающей волны приведены на рис. 1, *c*. На этом рисунке кривая 1 — антенна, спроектированная на основе предлагаемого подхода, в которой все щели выполнены со скачками волнового сопротивления таким образом, что полуволновая мода колебаний *H*-волны всех щелей настроена на диапазон частот 1164–1300 MHz, а волновая мода — на диапазон

1559–1610 MHz; кривая 2 — антенна, в которой все щели выполнены без скачков ширины, при этом полуволновая мода половины количества щелей настроена на один частотный поддиапазон, а второй половины щелей — на другой; кривая 3 — антенна, в которой все щели выполнены без скачков ширины и имеют одинаковую длину. Из рис. 1, *c* видно, что при проектировании антенны на основе предлагаемого подхода (кривая 1) диапазон рабочих частот антенны, формируемый полуволновыми модами двенадцати щелей по уровню 0.5 dB, составил 158 MHz при КУ = 3.5 dB, а классической антенны (кривая 2) — 85 MHz при КУ = 3.1 dB. Таким образом, эффект увеличения диапазона рабочих частот антенны до 1164–1300 MHz составил свыше 85% при КУ порядка 3 dB. Данный эффект обусловлен увеличением количества резонансов мод колебаний *H*-волны в диапазоне рабочих частот антенны в 2 раза в предлагаемом подходе в сравнении с традиционными щелевыми полосковыми антеннами. Настроенные параметры щелей при этом составили $A_1 = 105.64$ mm, $A_2 = 122.99$ mm, $A_3 = 40.22$ mm, $A_4 = 19.78$ mm, $W_1 = 0.3$ mm, $W_2 = 0.3$ mm, $W_3 = 3.1$ mm, $W_4 = 0.75$ mm, высота СВЧ-поглотителя 12.3 mm, ширина 9 mm. В случае если все щели выполнены без скачков волнового сопротивления и одинаковой длины, полуволновая мода *H*-волны которых настроена на диапазон частот 1164–1300 MHz, волновая мода расположена в районе 2.2 GHz (кривая 3).

Диапазон рабочих частот антенны, который необходимо сформировать волновой модой колебаний *H*-волны, — более узкий (1559–1610 MHz), вследствие

этого в нем антенна имеет больший КУ. Поэтому оптимизация ширины СВЧ-поглотителя осуществляется в диапазоне частот 1164–1300 МГц для достижения КУ порядка 3.5 dB. Следует отметить, что в отсутствие СВЧ-поглотителя КУ в данном диапазоне частот увеличивается до 6.5 dB, однако при этом уровень левой круговой поляризации в зените ДН антенны возрастает с –18 до –13 dB.

На рис. 2, а приведена фотография разработанной антенны без крышки. Диаметр экрана антенны равен 146 mm, расстояние между излучателем и экраном 12.3 mm. Рассчитанная (кривая 1) и измеренная (кривая 2) нормированные ДН антенны на частоте 1300 МГц показаны на рис. 2, б. Наблюдается неплохое совпадение рассчитанной и измеренной ДН антенны в диапазоне рабочих углов возвышения $\theta \pm 85^\circ$ от зенита. Падение КУ антенны от зенита к горизонту составляет около 12 dB. Снижение измеренного уровня заднего лепестка обусловлено недостаточной экранировкой корпуса антенны в безэховой камере. Рассчитанное наихудшее подавление левой круговой поляризации составило –18 dB в зените ДН антенны (кривая 3).

Измеренные частотные зависимости КУ (кривая 1) и коэффициента эллиптичности (кривая 2) показаны на рис. 3. При высоте СВЧ-поглотителя 12.3 mm и ширине 9 mm измеренный КУ антенны в диапазоне частот 1164–1300 МГц составил 3 dB, неравномерность 0.5 dB, в диапазоне 1559–1610 МГц — 5 dB, неравномерность 0.5 dB. Наихудшее значение коэффициента эллиптичности в диапазоне частот 1164–1300 МГц составило 1.8 dB, в диапазоне 1559–1610 МГц — 1.2 dB. Коэффициент стоячей волны в обоих диапазонах не хуже 1.7.

Таким образом, в работе предложен способ расширения диапазона рабочих частот щелевых полосковых антенн вытекающей волны с круговой поляризацией. Показано, что благодаря тому, что в каждом диапазоне рабочих частот антенны (1164–1300 и 1559–1610 МГц) работают все щели, количество их резонансов увеличивается в 2 раза в сравнении с классическими щелевыми полосковыми антеннами ГНСС, что позволяет сохранить высокий коэффициент усиления антенны при увеличении диапазона рабочих частот. Поэтому становится возможным применять СВЧ-поглотитель и в широкополосных щелевых полосковых антеннах ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou в отличие от зарубежных аналогов, что в свою очередь увеличивает кросс-поляризационную развязку, необходимую для борьбы с многолучевостью.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Краевого государственного автономного учреждения „Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности“ и научно-производственной фирмы „Электрон“ (договор № 681).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Kunysz, in *Proc. of the 2000 National Technical Meeting of the Institute of Navigation* (Anaheim, CA, 2000), p. 698–705.
- [2] W. Kunysz, in *Proc. of the 13th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2000)* (Salt Lake City, UT, 2000), p. 2506–2511.
- [3] W. Kunysz, *Leaky wave antenna with radiating structure including fractal loops*, pat. US007250916B2 (date of patent: Jul. 31, 2007).
- [4] Z.-P. Zhong, X. Zhang, *IEEE Open J. Antennas Propag.*, **2**, 578 (2021). DOI: 10.1109/OJAP.2021.3074287
- [5] В.Н. Шепов, В.А. Борисов, *Двухмодовая малогабаритная щелевая полосковая антенна для высокоточного позиционирования по сигналам ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou*, патент RU 2821218 (заявл. 01.03.2024, опубл. 18.06.2024), бюл. № 17.
- [6] В.Н. Шепов, В.М. Владимиров, В.В. Марков, *Радиотехника и электроника*, **62** (7), 662 (2017). DOI: 10.7868/S0033849417060237 [V.N. Shepov, V.M. Vladimirov, V.V. Markov, *J. Commun. Technol. Electron.*, **62**, 770 (2017). DOI: 10.1134/S1064226917060225].