

11.1

Механически управляемый фазовращатель Ku-диапазона

© А.Д. Полигина^{1,2}, С.В. Поленга¹, Е.А. Стригова¹, Р.О. Рязанцев¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² АО „Научно-производственное предприятие “Радиосвязь“, Красноярск, Россия

E-mail: anastasia0711@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 13 марта 2024 г.

Принято к публикации 29 марта 2024 г.

Проведено исследование механически управляемого фазовращателя на основе гар-волновода с переходом на стандартное волноводное сечение. Приведены результаты электродинамического моделирования широкополосного перехода с гар-волновода П-сечения на прямоугольный волновод стандартного сечения WR-75. Результаты измерения характеристик макета фазовращателя, изготовленного по результатам электродинамического моделирования, продемонстрировали хорошее согласие с расчетными значениями. Коэффициент стоячей волны фазовращателя составил не более 1.5 в диапазоне частот 10.7–14.5 GHz. Максимальное значение суммарных потерь составило 0.3 dB. Диапазон фазовой регулировки оказался немного ниже расчетного и составил от 351° на нижней частоте диапазона до 517° на верхней. Рассмотренный фазовращатель может быть использован в составе антенных решеток с механоэлектрическим сканированием для работы в сетях спутниковой связи.

Ключевые слова: гар-волновод, фазовращатель, механоэлектрическое сканирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.13.58169.19881

В связи с активным развитием спутниковых систем с использованием низкоорбитальных, среднеорбитальных и высокоэллиптических космических аппаратов важной задачей является обеспечение непрерывных приема-передачи сигналов антенными системами (АС) как для мобильных, так и для стационарных объектов. Одним из решений поставленной задачи является использование сканирующих АС. Различают несколько подходов к изменению пространственного положения луча диаграммы направленности: механическое, электронное и механоэлектрическое сканирование.

В первом случае сканирование достигается за счет поворота антенны целиком, что затрудняет создание низкопрофильных АС с высоким быстродействием для организации связи в движении.

АС с электронным сканированием [1] отличаются малыми габаритами и высоким быстродействием. Одним из основных недостатков АС с электронным сканированием является их высокая стоимость.

Одним из возможных компромиссов для достижения малых габаритов, высокого быстродействия и невысокой стоимости является применение систем на основе механоэлектрического метода [2,3]. Неотъемлемой частью этих АС являются фазовращатели (ФВ) [4]. Кроме того, механически управляемые ФВ с малыми потерями могут быть использованы для немеханической регулировки положения диаграммы направленности в антеннах базовых станций современных сотовых систем связи [5].

Для построения механически управляемого ФВ необходима линия передачи, обладающая низкими потерями и не требующая обеспечения электрического контакта

между подвижными частями. Развитие нового типа линии передачи „gap-waveguide“ (волновод с зазором) [6] открывает возможности создания механически управляемой элементной базы с низкой стоимостью для применения в составе сканирующих антенных систем. Принцип работы гар-волновода заключается в создании условий высокого импеданса в определенной полосе частот, что не позволяет распространяться плоскопараллельным модам в нежелательных направлениях [7]. В качестве высокоимпедансной структуры могут выступать периодически расположенные металлические штыри.

В работе [8] в качестве периодической заграждающей структуры используются симметричные фрезерованные отверстия. Параллельно электрическим силовым линиям гар-волновода располагается диэлектрическая пластина. Ее перемещение ведет к изменению фазовой постоянной в волноводе. Данный ФВ показывает приемлемый уровень согласования лишь в узкой полосе частот, потери составляют более 0.6 dB.

В предложенном в [9] ФВ механизм фазового сдвига заключается в изменении положения боковой стенки гар-волновода для управления постоянной распространения. ФВ обладает значительной частотной неравномерностью и потерями, достигающими 0.6 dB.

В настоящей работе на основе ранее разработанного ФВ [10] была спроектирована и исследована полномерная модель механически управляемого ФВ на гар-волноводе. Для применения ФВ в составе сканирующих систем или подключения к измерительному оборудованию необходимы переходы на стандартные волноводные сечения либо переходы на коаксиальные

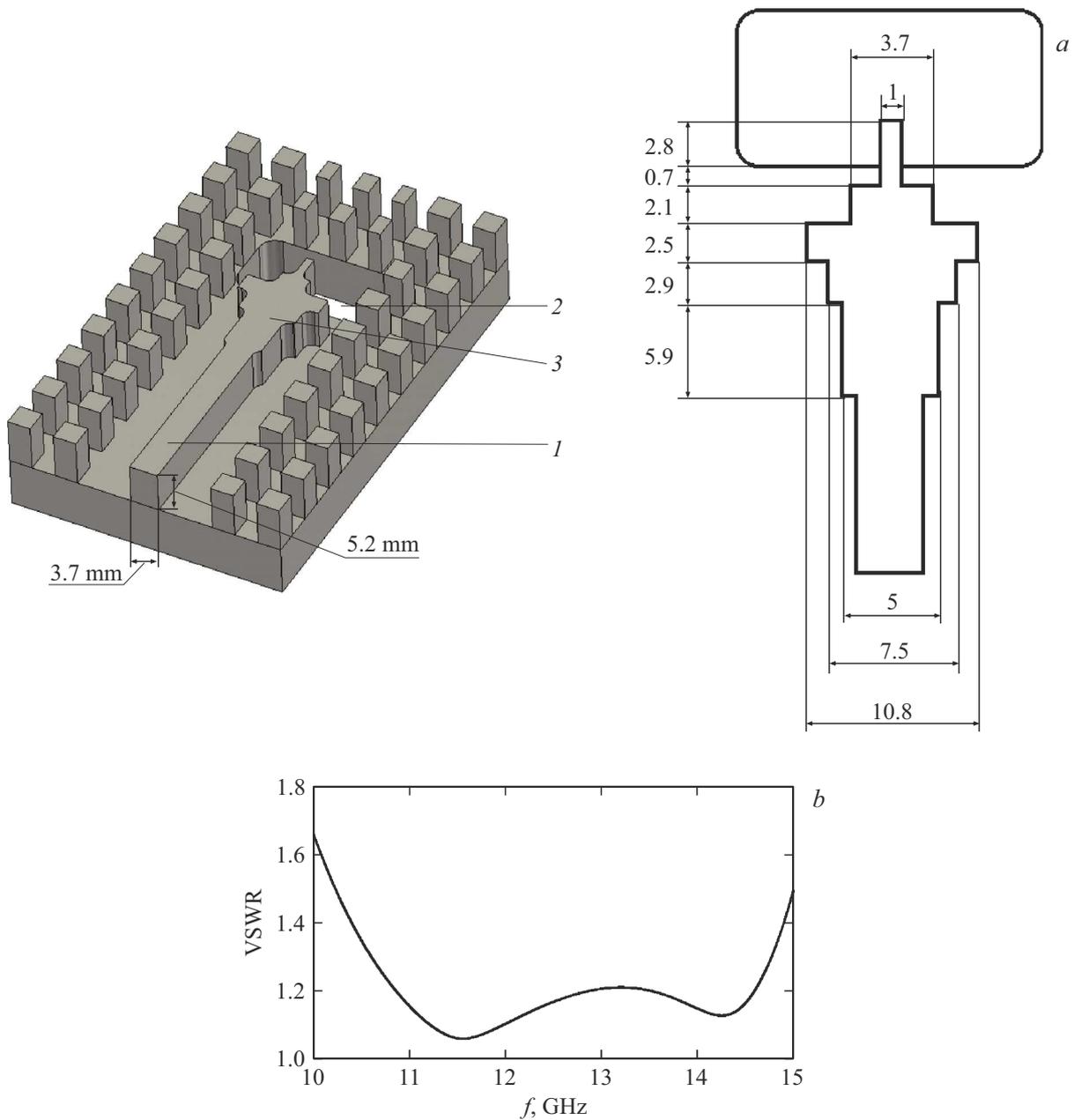


Рис. 1. *a* — конструкция перехода. *1* — гар-волновод П-сечения, *2* — прямоугольный волновод, *3* — согласующая часть. Справа приведены габаритные размеры (в мм) трансформирующих ступеней. *b* — частотная зависимость КСВН перехода.

разъемы. В представленной работе исследован переход с гар-волновода П-сечения на прямоугольный волновод стандартного сечения WR-75.

Рассмотренные в литературе переходы отличаются своей узкой полосой рабочих частот [11], что не позволяет обеспечить функционирование ФВ во всем требуемом диапазоне. Другие конфигурации переходов существенно усложняют работу ФВ, так как подразумевается их расположение на верхней стенке гар-волновода [12], что в рассматриваемом случае затрудняет осуществление сдвига замедляющей линии при сохранении перехода в стационарном положении.

Предложенный переход состоит из трех частей (рис. 1, *a*): гар-волновода П-сечения (верхняя стенка гар-волновода скрыта) (*1*), металлического полого волновода сечения WR-75 (*2*) и согласующей части, работающей как многоступенчатый трансформатор импеданса (*3*).

Данный переход по уровню коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), равному 1.2, имеет ширину рабочей полосы более 30% (рис. 1, *b*), что удовлетворяет всему связному Ku-диапазону (10.7–14.5 GHz). Расширение рабочей полосы частот было достигнуто добавлением неоднородностей в структуру трансформатора, что дало дополнительные резонансы в рабочей

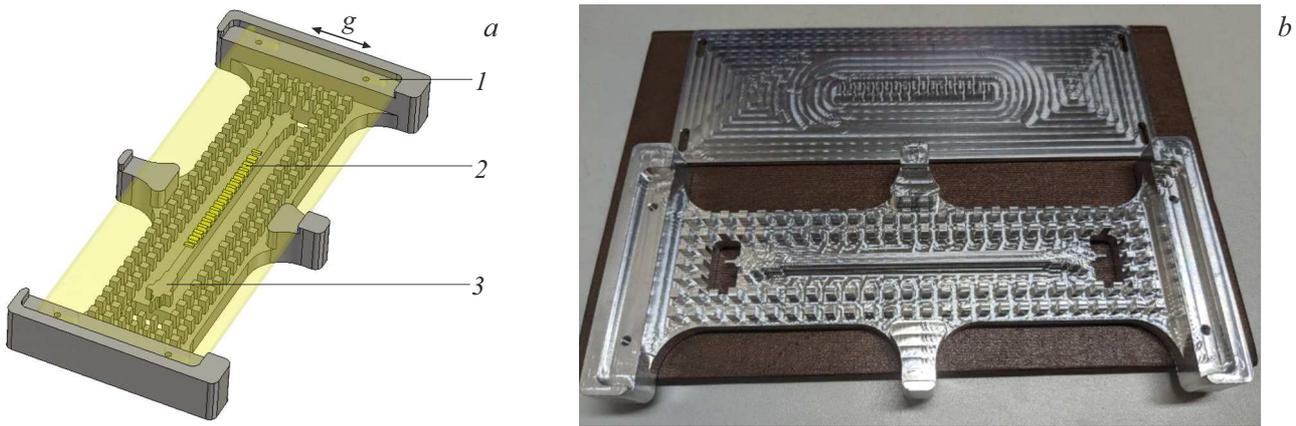


Рис. 2. *a* — модель фазовращателя. 1 — крышка, 2 — замедляющая структура, 3 — П-волновод с переходом. *b* — макет фазовращателя.

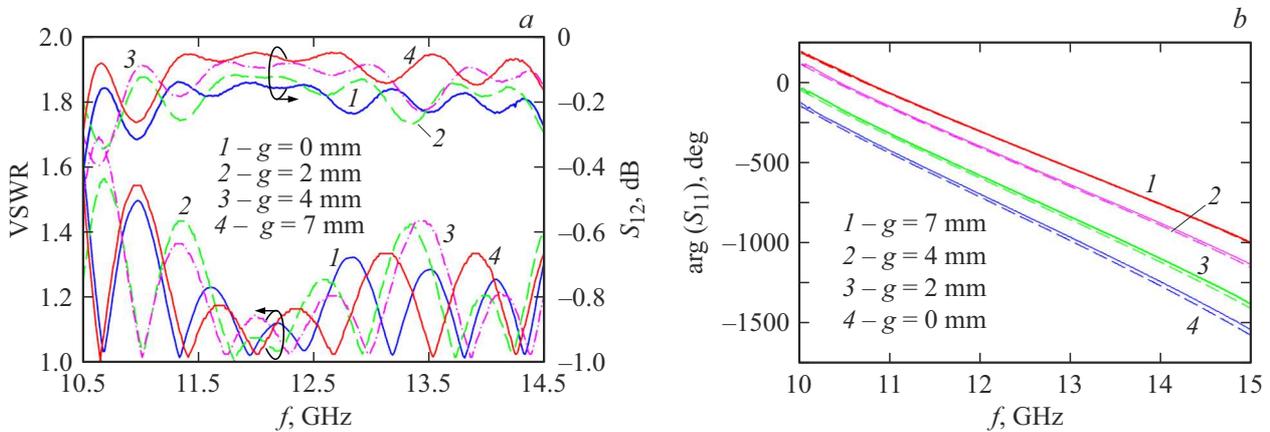


Рис. 3. *a* — измеренные частотные зависимости КСВН (нижние кривые) и коэффициента передачи (верхние кривые). *b* — измеренные (сплошные линии) и рассчитанные (штриховые линии) частотные зависимости фазы коэффициента передачи.

полосе частот. Количество трансформирующих ступеней и их габаритные размеры (приведены справа на рис. 1, *a*) были определены в ходе численной оптимизации по критерию КСВН < 1.3 в заданной полосе рабочих частот.

Модель ФВ со встроенными переходами показана на рис. 2, *a*. Принцип работы ФВ заключается в смещении замедляющей системы 2, расположенной на верхней подвижной крышке 1 П-образного гар-волновода 3, из зазора с максимальной напряженностью поля; таким образом происходит регулировка степени влияния замедляющей системы на волну, а соответственно и фазы прошедшей волны. На рис. 2, *b* показан макет ФВ, изготовленный методом фрезерования. Габаритные размеры устройства составили $195.0 \times 85.0 \times 17.5$ мм.

Макет ФВ состоит из двух составных частей. Первая часть содержит два перехода с прямоугольного на гар-волновод, гребень гар-волновода с заграждающей системой из штырей и ложементы для верхней крышки. Вторая часть представляет собой механически сдвигаемую крышку, несущую замедляющую систему. В конструкции нет необходимости в контакте между двумя

составными частями, а осуществляющийся в местах соприкосновения частей контакт не влияет на параметры устройства.

На рис. 3, *a* показаны измеренные частотные зависимости КСВН и коэффициента передачи при различных значениях смещения g . Худшее значение суммарных потерь составляет 0.3 дБ в случае, когда замедляющая система расположена над линией передачи ($g = 0$). Среднее же значение ослабления составляет всего 0.2 дБ. В случае смещения замедляющей системы на 7 мм относительно центрального положения средний уровень потерь изменяется до 0.1 дБ. Расчетные суммарные потери с учетом проводимости алюминия и шероховатости поверхности $1 \mu\text{m}$ составили менее 0.35 дБ, что хорошо согласуется с экспериментом.

КСВН оказался незначительно хуже расчетных значений в начале частотного диапазона и немного превышает 1.5. В оставшемся диапазоне экспериментальные значения соответствуют расчетным.

На рис. 3, *b* показаны частотные зависимости фазы коэффициента передачи при различных смещениях за-

медляющей системы. Макет показал меньший диапазон регулировки относительно модели на 16° на частоте 10.7 GHz и на 30° на частоте 14.5 GHz. Снижение диапазона регулировки связано с погрешностями при изготовлении макета, а именно с деформацией пластины с замедляющей системой, что привело к тому, что замедляющая система оказалась на большем расстоянии от гребня волновода относительно номинального значения. Тем не менее диапазон фазовой перестройки экспериментального образца составил от 351° на нижней частоте диапазона до 517° на верхней. Диапазон фазовой регулировки с увеличением частоты расширяется: исследуемый ФВ ведет себя подобно линии задержки. Данный факт позволяет использовать такое устройство в широкополосных антенных системах.

Проведенные исследования показывают возможность создания эффективных механически управляемых СВЧ-устройств на основе гар-волновода. Разработанный переход и ФВ демонстрируют минимальные потери и хорошее согласование во всем используемом в спутниковой связи Ки-диапазоне частот. Диапазон регулировки разработанного ФВ достаточен для его использования в составе сканирующих антенных устройств для спутниковой связи. Конечная конфигурация конструкции ФВ может быть изменена исходя из его места установки, а также требований к массогабаритным параметрам.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10205).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.Д. Парнес, СВЧ-электроника, № 2, 24 (2019).
- [2] B. Panzner, A. Joestingmeier, A. Omar, in *2008 8th Int. Symp. on antennas, propagation and EM theory* (IEEE, 2008), p. 31–34. DOI: 10.1109/ISAPE.2008.4735132
- [3] S. Ravishankar, in *IEEE Int. Workshop on antenna technology: small antennas and novel metamaterials 2005 (IWAT 2005)* (IEEE, 2005), p. 539–542. DOI: 10.1109/IWAT.2005.1461135
- [4] Е.А. Литинская, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов, Изв. вузов России. Радиоэлектроника, **24** (5), 36 (2021). DOI: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-36-49
- [5] T. Ravi, M. Sugadev, S. Karthikeyan, V. Vijayakumar, K. Vibhavas, C. Ashok, in *2021 Int. Conf. on artificial intelligence and smart systems (ICAIS)* (IEEE, 2021), p. 1436–1442. DOI: 10.1109/ICAIS50930.2021.9395915
- [6] P.-S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, E. Rajo-Iglesias, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, **8**, 84 (2009). DOI: 10.1109/LAWP.2008.2011147
- [7] M. Lv, Z.-H. Yan, W. Liu, Y.-B. Zhong, in *2013 Int. Workshop on microwave and millimeter wave circuits and system technology* (IEEE, 2013), p. 72–75. DOI: 10.1109/MMWCST.2013.6814569
- [8] E. Rajo-Iglesias, M. Ebrahimpouri, O. Quevedo-Teruel, *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, **28** (6), 476 (2018). DOI: 10.1109/LMWC.2018.2832013
- [9] H. Abdollahy, A. Farahbakhsh, M.H. Ostovarzadeh, *AEU — Int. J. Electron. Commun.*, **132**, 153655 (2021). DOI: 10.1016/j.aeue.2021.153655
- [10] А.Д. Полигина, С.В. Поленга, Е.А. Стригова, Письма в ЖТФ, **50** (3), 44 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.03.57044.19748 [A.D. Poligina, S.V. Polenga, E.A. Strigova, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (2), 40 (2024)].
- [11] J. Liu, A.U. Zaman, P.-S. Kildal, in *2016 Global Symp. on millimeter waves (GSMM) & ESA Workshop on millimetre-wave technology and applications* (IEEE, 2016), p. 1–4. DOI: 10.1109/GSMM.2016.7500320
- [12] A.U. Zaman, P.-S. Kildal, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **62** (6), 2992 (2014). DOI: 10.1109/TAP.2014.2309970