

11.1

## Механически управляемый фазовращатель на основе гар-волновода

© А.Д. Полигина<sup>1,2</sup>, С.В. Поленга<sup>1</sup>, Е.А. Стригова<sup>1</sup><sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия<sup>2</sup> АО „Научно-производственное предприятие „Радиосвязь“, Красноярск, Россия

E-mail: anastasia0711@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 8 ноября 2023 г.

Принято к публикации 9 ноября 2023 г.

Исследована возможность реализации фазовращателя на основе гар-волновода в Ку-диапазоне частот. Приведены результаты моделирования предложенной конструкции фазовращателя. Диапазон регулировки фазы превысил  $360^\circ$  в рабочем диапазоне частот шириной более 30% при механическом смещении замедляющей линии на 6 мм. Коэффициент стоячей волны по напряжению устройства составил не более 1.1. Предложенный фазовращатель может быть применен для построения антенных решеток с механоэлектрическим сканированием.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2024.03.57044.19748

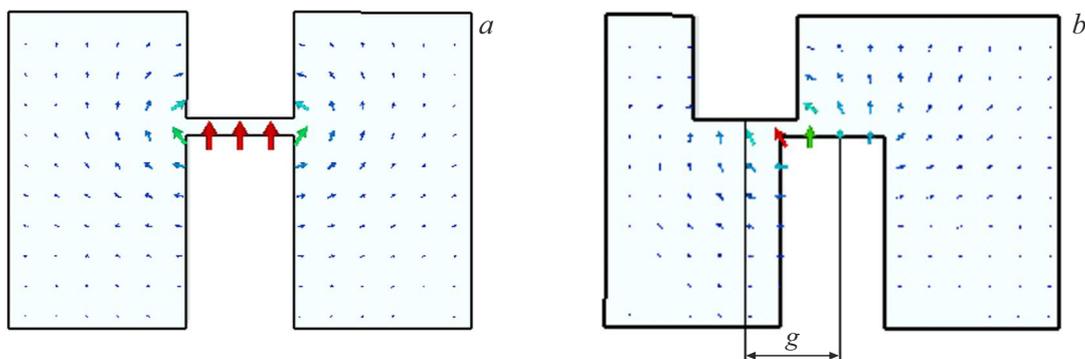
В последние годы спутниковые системы связи получили новый виток активного развития. Происходит как обновление геостационарной, так и развертывание новых низко- и среднеорбитальных спутниковых группировок. Развитие последних подразумевает использование сканирующих антенных систем даже в составе неподвижных наземных терминалов спутниковой связи. Высокая стоимость современной активной элементной базы и ее доступность ставят под вопрос создание активных фазированных антенных решеток для массового потребителя, что подогревает значительный интерес к антенным системам с механоэлектрическим типом сканирования, в которых управление лучом осуществляется за счет механического управления компонентами антенной системы [1,2]. Наиболее важным элементом антенной системы с механоэлектрическим типом сканирования является фазовращатель. От его свойств во многом зависят характеристики антенной системы.

Зачастую для проектирования фазовращателей и линий задержки используют полосковую технологию [3], устройства на основе которой обладают значительными

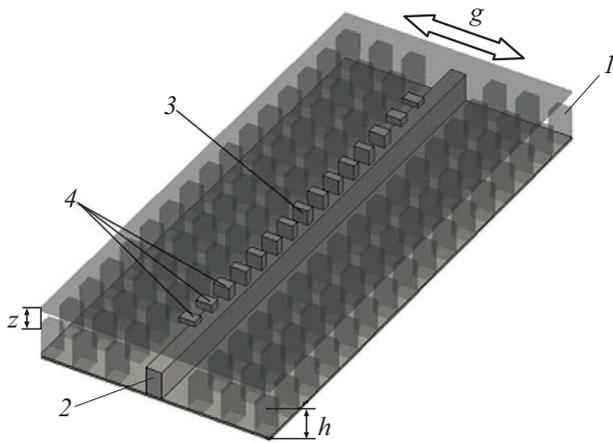
потерями, особенно на высоких частотах. Волноводные фазовращатели хотя и обладают сравнительно малыми потерями [4], но требуют высокой точности изготовления для сохранения их электрических параметров. Помимо этого предъявляются требования к электрическому контакту составных стенок волновода, что не всегда в достаточной степени реализуемо. Для нивелирования перечисленных выше недостатков необходимы более дорогостоящие технологии изготовления и обработки поверхностей для эффективной сборки деталей, что также усложняет технологический процесс.

Развитие технологии „волновод с разрывом“ (gap-waveguide) открывает спектр возможностей для создания механически управляемых СВЧ-компонентов, поскольку в таком типе линии передачи нет необходимости в контакте между составными частями устройства.

Принцип работы данной линии передачи ранее был описан в [5]. Периодически расположенные штыри имитируют поверхность с высоким импедансом, которая препятствует распространению волны внутри структуры.



**Рис. 1.** Волновод  $H$ -сечения.  $a$  — распределение поля в волноводе  $H$ -сечения,  $b$  — распределение поля в волноводе  $H$ -сечения при смещении гребней относительно друг друга.



**Рис. 2.** Структура фазовращателя. 1 — штыри гар-волновода, 2 — нижний гребень волновода, 3 — меандровая периодическая замедляющая структура, 4 — элементы согласования.

Таким образом формируется полоса заграждения [6], нижняя частота которой определяется высотой штырей  $h$ , составляющей примерно  $\lambda/4$ , а верхняя частота определяется соотношением  $h + z = \lambda/2$ , где  $z$  — зазор между вершинами штырей и отстоящей стенкой волновода.

За основу механически управляемого волновода был взят  $H$ -образный гар-волновод, электрическое поле в котором представлено на рис. 1, *a*.

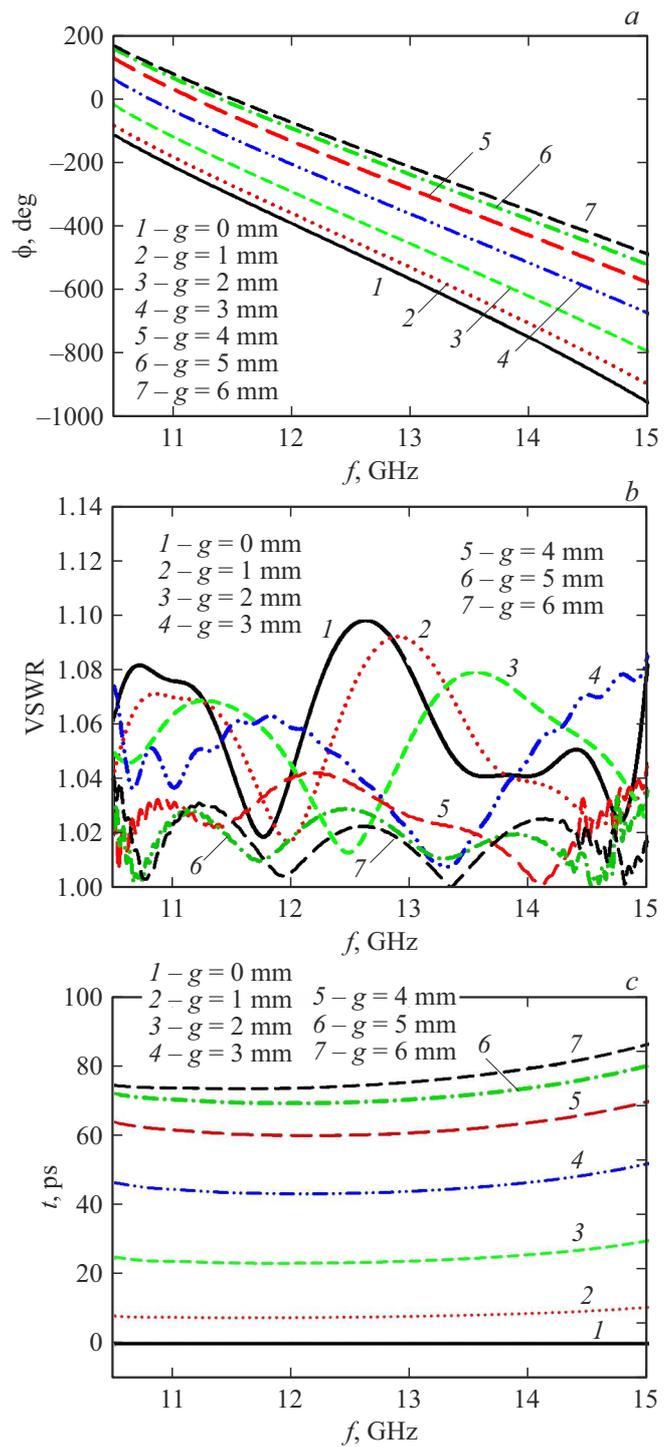
Поперечные компоненты электромагнитного поля концентрируются в основном в узком зазоре, где поле близко к ТЕМ-волне, подобно микрополосковой линии передачи, у которой критическая частота равна нулю [7]. Следовательно, волновод с таким сечением имеет более низкую критическую частоту в сравнении с прямоугольным волноводом того же габарита.

В итоге периодически расположенные гребни выступают в роли высокоимпедансной структуры, препятствующей распространению волны в нежелательном направлении, в результате чего волна распространяется между гребнями  $H$ -сечения волновода без дополнительного затухания.

Дополнительная фазовая задержка в таком волноводе может быть получена путем реализации одного из гребней в виде меандровой замедляющей линии [8].

На основе рассмотренного волновода и линии задержки был реализован механически управляемый фазовращатель (рис. 2), не требующий прямого контакта поверхностей, что значительно упрощает его практическую реализацию. Габариты устройства составили  $90 \times 40 \times 9$  мм.

В положении, в котором гребни находятся друг над другом, концентрация поля в зазоре максимальна (рис. 1, *a*), и волна максимально взаимодействует с линией задержки. Как только структура верхнего гребня сдвигается в сторону на некоторую величину  $g$  (влево или вправо относительно нижнего), влияние замедляющей



**Рис. 3.** Частотные зависимости при различных сдвигах замедляющей линии. *a* — фаза коэффициента передачи, *b* — КСВН (VSWR), *c* — время задержки.

ющей линии снижается (рис. 1, *b*), и распространяющаяся волна начинает приобретать меньшую фазовую задержку. Такая структура в зависимости от положения гребня может обеспечить 360-градусную фазовую задержку. Расчетные фазовые зависимости представлены на рис. 3, *a*.

Для минимизации коэффициента отражения волны от фазовращателя высота гребней меандровой замедляющей линии выполнена плавно возрастающей и убывающей. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) такой структуры в зависимости от смещения гребня  $g$  показан на рис. 3, *b*. Расчетные потери в фазовращателе при реализации его из алюминия не превышают 0.2 dB. Вносимая временная задержка в рабочем диапазоне частот носит линейный характер (рис. 3, *c*), что позволит использовать устройства в широкополосных антенных решетках с минимальным частотным сканированием. Максимальная фазовая и временная задержки зависят от длины замедляющей линии в фазовращателе.

Проведенные исследования показывают возможность создания механически управляемого фазовращателя на основе гар-волновода с перестройкой фазы более  $360^\circ$  в рабочем диапазоне частот. Отсутствие требований к электрическому контакту стенок гар-волноводов дает большой технологический выигрыш при проектировании механических СВЧ-узлов.

### Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО „Сибирский федеральный университет“ (номер FSRZ-2023-0008).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] А.В. Станковский, А.Д. Немшон, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов, в сб. *Материалы докладов X Междунар. науч.-практ. конф. „Электронные средства и системы управления“* (Томск, 2014), ч. 1, с. 149–153.
- [2] Е.А. Литинская, В.С. Панько, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов, *Успехи современной радиоэлектроники*, № 1, 24 (2015).
- [3] Y.-P. Lyu, L. Zhu, C.-H. Cheng, *IEEE Trans. Comp. Packaging Manufact. Technol.*, 7 (7), 1119 (2017). DOI: 10.1109/TCPM.2017.2691739
- [4] Д.В. Дикий, В.П. Акимов, А.А. Сочава, А.С. Черепанов, *Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки*, 11 (2), 130 (2018). DOI: 10.18721/JPM.11212
- [5] А.Д. Полигина, А.В. Таганов, *Письма в ЖТФ*, 48 (19), 24 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.19.53591.19319 [A.D. Poligina, A.V. Taganov, *Tech. Phys. Lett.*, 48 (10), 21 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.10.54791.19319].
- [6] S.A. Buendia, F. Gallée, A. Valero-Nogueira, C. Person, in *8th Eur. Conf. on antennas and propagation (EuCAP 2014)* (Hague, Netherlands, 2014), p. 982–986. DOI: 10.1109/EuCAP.2014.6901929
- [7] Н.А. Семенов, *Техническая электродинамика* (Связь, М., 1973).
- [8] S.A. Razavi, A.U. Zaman, in *12th Eur. Conf. on antennas and propagation (EuCAP 2018)* (London, U.K., 2018), p. 1–3. DOI: 10.1049/cp.2018.0571