

11.1

Увеличение коэффициента эллиптичности электромагнитной волны при помощи поляризатора на основе меандровой линии

© Е.Р. Гафаров, А.А. Ерохин, Е.А. Литинская

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
E-mail: egafarov@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 24 сентября 2020 г.

В окончательной редакции 26 января 2021 г.

Принято к публикации 3 февраля 2021 г.

Предложен метод повышения коэффициента эллиптичности электромагнитной волны с малых значений 0.2–0.3 до 1 при помощи применения структуры поляризатора меандрового типа. Решены прямая и обратная задачи возбуждения решетки поляризатора меандрового типа. Показана сходимость результатов.

Ключевые слова: поляризатор на основе меандровой линии, коэффициент эллиптичности, поляризационный эллипс, плоская волна.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.09.50899.18559

Как правило, поляризационные устройства сверхвысоких частот преобразуют линейную поляризацию в круговую или наоборот [1]. Однако существуют задачи, в которых необходимо улучшить поляризационные характеристики, например, антенны круговой поляризации, где ограничения коэффициента эллиптичности (axial ratio, AR) диктует конфигурация антенны. Задачи подобного рода возникают в случае антенн для глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Необходимость обеспечения поля круговой поляризации со всех направлений верхнего полупространства отмечалась многократно [2,3]. Кроме того, важно иметь высокую кросс-поляризационную развязку на скользящих углах ($\theta = 90 \pm 10^\circ$). Это позволяет уменьшить прием сигналов многолучевого переотражения, которое является основным источником ошибок позиционирования в ГНСС. В рамках настоящей работы рассмотрен способ увеличения AR источника поля эллиптической поляризации при помощи применения поляризатора.

Обратимся к теории известных сегодня работ по исследованиям поляризаторов меандрового типа [4,5]. Геометрия поляризатора показана на рис. 1. Можно выделить параметры поляризатора: a — период меандровой линии; b — период решетки; h — высота меандровой линии; w_1 — ширина линии, перпендикулярной оси x ; w_2 — ширина линии, параллельной оси x .

Конфигурация плоскости меандровых линий является по сути емкостной для перпендикулярной компоненты E_\perp и индуктивной для параллельной E_\parallel . Волну E_{inc} , падающую под углом ψ по отношению к оси меандра x , можно представить разложением на E_\perp и E_\parallel . В этом случае плоскость меандровых линий является окном, которое обеспечивает опережение по фазе одной компоненты и запаздывание фазы другой ортогональной компоненты электрического поля [4].

Следует отметить, что однослойные поляризационные структуры на основе меандровой линии имеют сравнительно узкую полосу рабочих частот (порядка 10%), в

которой AR составляет величину не менее 0.8. В работах [5,6] освещаются вопросы расширения полосы рабочих частот и представлено исследование плоской волны, падающей под различными углами. В [7] указано, что использование четырех слоев поляризаторов на основе меандровой линии с разделителями позволяет достичь полосы частот около 40% относительно частоты f_0 с AR более 0.8. Тем не менее получение высокого AR с требуемыми фазовыми и амплитудными соотношениями ортогональных компонент электромагнитной волны поляризатора на основе меандровой линии сильно зависит от точности изготовления, особенно в многослойных структурах. Поэтому далее проведено исследование однослойного поляризатора на основе меандровой линии с целью улучшения AR с малых значений порядка 0.2 до 1.

Расчет характеристик периодических структур возможен с использованием теоремы Флоке, она позволяет получить гармоническое разложение любой функции, значения которой повторяются периодически с точностью до экспоненциального множителя. Теорема Флоке является, по существу, обобщением теории рядов Фурье для периодических функций. Теорема Флоке в комбинации с методом конечных элементов (FEM — finite element method) позволяет получать достаточно точные параметры матрицы рассеяния, а также проводить анализ электромагнитного поля в дальней зоне.

Возбуждение меандровой структуры произведем при помощи плоской волны с круговой поляризацией (AR = 1), т.е. решается обратная задача, при которой из круговой поляризации будет получена эллиптическая. Такой подход реализован из-за простоты возбуждения структуры полем E , поляризованным по кругу, при котором отсутствует необходимость дальнейшей постобработки результатов, как в случае возбуждения двумя низшими ортогональными модами TM_{00} и TE_{00} . Для построения поляризатора с малым AR, т.е. частично преобразовывающего энергию большой оси поляриза-

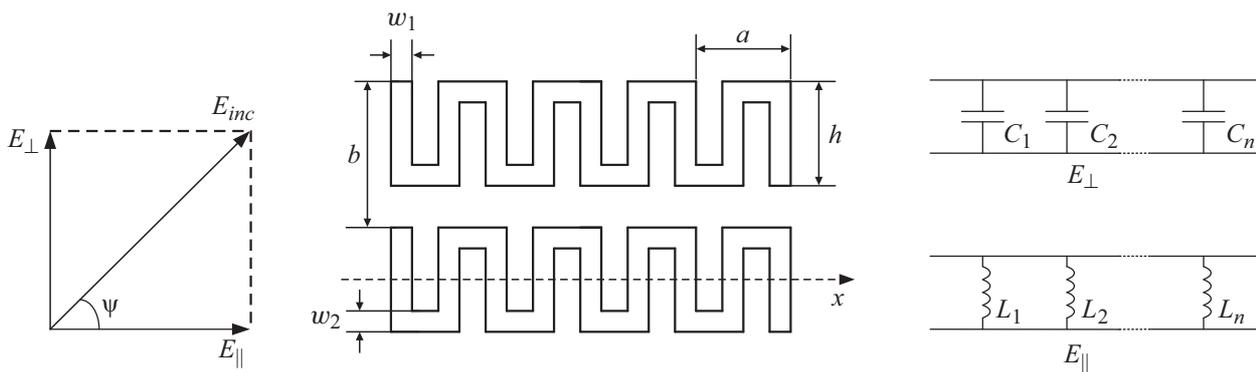


Рис. 1. Геометрия поляризатора на основе меандровой линии и эквивалентная схема для параллельной и перпендикулярной поляризации.

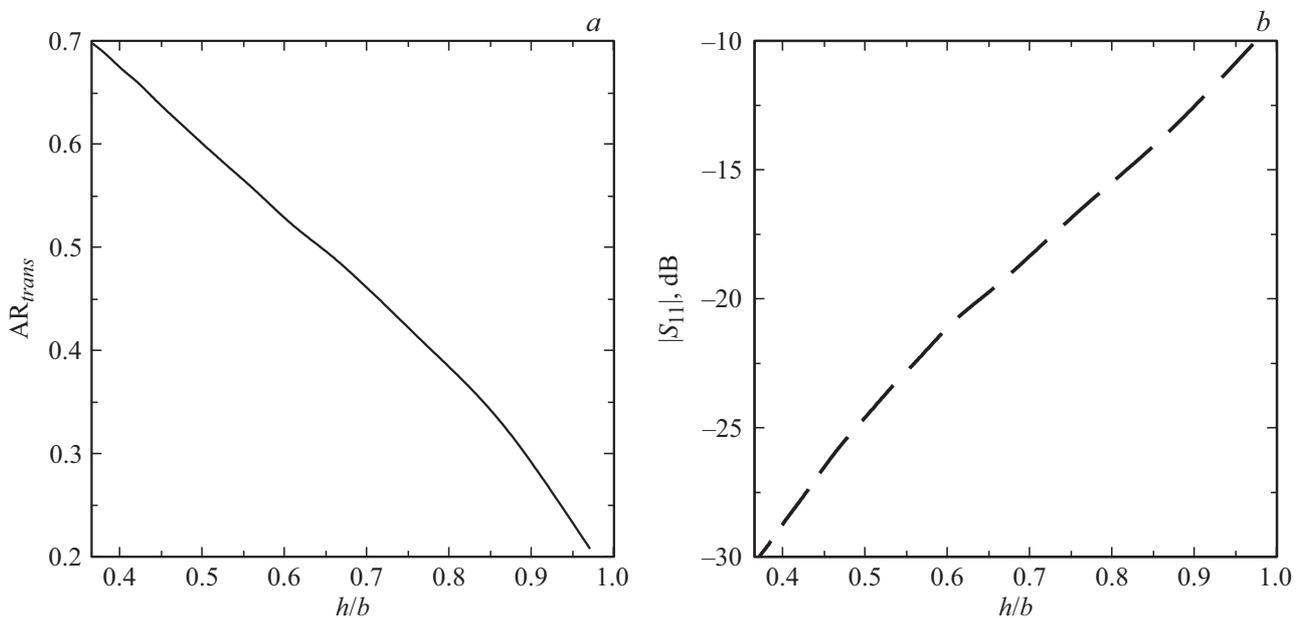


Рис. 2. Зависимость AR волны, прошедшей через элементарную ячейку Флоке (а), и коэффициента отражения $|S_{11}|$ (б) от периода решетки поляризатора h/b на частоте f_0 .

ционного эллипса в энергию малой оси, воспользуемся соотношениями параметров поляризатора на основе меандровой линии из работы [7]. Расчет проведен в системе автоматизированного проектирования CST Studio Suite, при этом параметры поляризатора были следующими: $a = \lambda_0/5$, $h = \lambda_0/5.5$, $w_1 = w_2 = \lambda_0/31$, h/b — изменяемый параметр.

В результате моделирования получены зависимости AR_{trans} волны, прошедшей через структуру, и $|S_{11}|$ от h/b (рис. 2). Анализируя графики, важно отметить, что для получения волны с $AR = 1$ достаточно изменять соотношение h/b от 0.37 до 0.97, при этом AR падающей волны будет изменяться в пределах от 0.7 до 0.2. Модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$ в этом случае составит менее -10 dB.

Помимо анализа структуры на основе меандровой линии при помощи ячейки Флоке выполнено решение прямой задачи, при которой возбуждение производится

плоской волной эллиптической поляризации с различным AR менее единицы. Проведен анализ структуры поляризатора ограниченных размеров с длиной $11a$ ($2\lambda_0$) и шириной в восемь линеек. Возбуждение структуры организовано нормальным падением плоской волны эллиптической поляризации с AR_{inc} и h/b согласно рис. 2, а. В отличие от возбуждения структуры меандра круговой поляризацией (обратная задача) при эллиптической поляризации важно выбрать угол наклона поляризационного эллипса $\psi = 45^\circ$ (рис. 1) относительно оси x для разложения вектора электрического поля большой оси эллипса на ортогональные составляющие E_\perp и E_\parallel .

На рис. 3, а представлен малый AR_{inc} падающей волны, преобразованный в высокий AR_{trans} прошедшей через поляризатор волны. Следует отметить, что получение плоской волны с AR_{trans} , близким к единице, достигается изменением для каждого из зна-

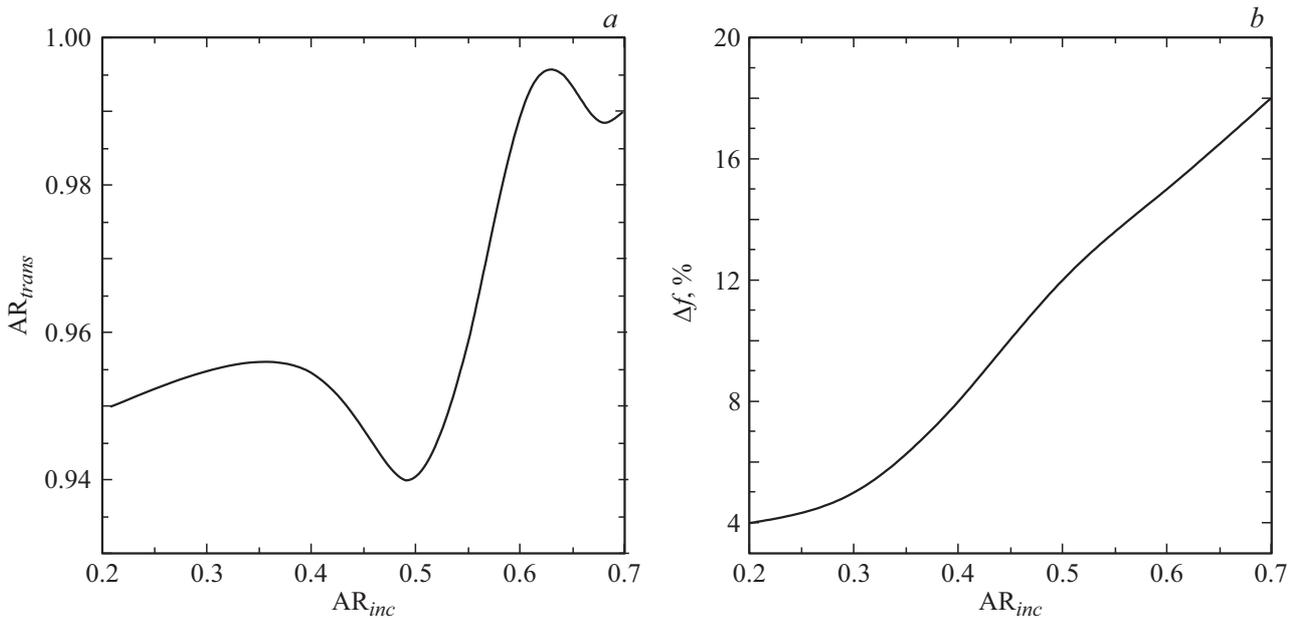


Рис. 3. Зависимость AR волны, прошедшей через структуру поляризатора на частоте f_0 (a), и полосы частот Δf (b) от AR падающей волны.

чений $AR_{inc} = 0.2-0.7$ соотношения $h/b = 0.97-0.37$. На частоте f_0 получена эллиптическая поляризация с высоким AR_{trans} более 0.94, отсутствие поля круговой поляризации ($AR_{trans} \neq 1$) и нелинейность зависимости можно обосновать ограниченным размером решетки поляризатора. На рис. 3, b показана зависимость полосы частот прошедшей волны по уровню $AR \leq 0.8$ от AR_{inc} падающей волны. Можно отметить, что чем меньше разрыв AR падающей и прошедшей волн, тем в большей полосе частот работает поляризатор.

Таким образом, в проведенном исследовании предложен способ улучшения AR при помощи поляризатора на основе меандровой линии. Исследована элементарная ячейка Флоке поляризатора на основе меандровой линии. Создана модель облучения структуры ограниченных размеров планарного поляризатора на основе меандровой линии плоской волной с различным AR малых значений. Показана возможность увеличения AR со значений 0.2–0.7 до 1 при помощи изменения только периода поляризатора.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-37-90009, а также Российского фонда фундаментальных исследований совместно с Красноярским краевым фондом поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках проекта № 20-47-243003.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E.R. Gafarov, A.V. Stankovsky, Yu.P. Salomatov, in *2017 Radiation and scattering of electromagnetic waves (RSEMW)* (Divnomorskoe, 2017), p. 311. DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103659
- [2] D. Tatarnikov, A. Stepanenko, A. Astakhov, in *2017 Progress in electromagnetics research symposium — Spring (PIERS)* (St. Petersburg, 2017), p. 479. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261789
- [3] F. Khosravi, H. Moghadas, P. Mousavi, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **63**, 5287 (2015). DOI: 10.1109/TAP.2015.2491323
- [4] C. Terret, J. Levrel, K. Mahdjoubi, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **32**, 1007 (1984). DOI: 10.1109/TAP.1984.1143456
- [5] M. Joyal, M. Riel, Y. Demers, J. Laurin, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **63**, 5391 (2015). DOI: 10.1109/TAP.2015.2487517
- [6] R.-S. Chu, K.-M. Lee, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **35**, 652 (1987). DOI: 10.1109/TAP.1987.1144158
- [7] J.-C. Zhang, Y.-Z. Yin, J.-P. Ma, *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, **6**, 55 (2009). DOI: 10.2528/PIERL08112303