

Сравнение характеристик металло-диэлектрических линз W-диапазона

Л. М. Любина, Н. Е. Староверов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

lmlyubina@etu.ru

Аннотация. Приведено сравнение полученных на основе численного моделирования характеристик диэлектрических и металло-диэлектрических линз в диапазоне 75-100 ГГц, синтезированных на основе как голографического, так и комбинации фазового и голографического подходов. Показано, что переход от металлических голографических антенн с бинарной аппроксимацией интерференционной картины к диэлектрическим (при той же аппроксимации) позволяет за счёт утолщения структуры (до 4.5 раз в рассмотренных случаях) достичь улучшения КИП на 3 дБ на частоте синтеза (95 ГГц).

Ключевые слова: голография; полоса рабочих частот; КУ; КИП; линза; W-диапазон

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы растёт интерес как к массовым, так и специальным телекоммуникационным системам, работающим в W-диапазоне, что, в свою очередь, требует адаптации и антенных решений для использования в условиях, когда рабочие длины волн составляют единицы миллиметров [1]. Ряд традиционных решений для фокусировки поля, основанных на использовании электрически малых или резонансных элементов в данном случае оказывается неоптимальным с точки зрения технологичности и стоимости изготовления [2]. С другой стороны, известный голографический подход, основанный на идее Габора при реализации в рамках скалярной теории дифракции [3], наоборот, применим к синтезу структур, размерами большими, чем рабочая длина волны, что позволяет его считать перспективным именно в верхней части мм-диапазона [4]. Актуальными задачами здесь являются улучшение КИП и отношения F/V при сохранении простоты структуры [5].

В рамках данной работы рассматриваются способы решения этих задач за счёт перехода к металло-диэлектрическим и полностью диэлектрическим конструкциям голографических антенн на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины.

II. МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ W-ДИАПАЗОНА

Методом конечных элементов в пакете ANSYS Electromagnetic были исследованы следующие структуры, при питании слабонаправленным облучателем (открытый конец прямоугольного волновода WR10) (рис. 1):

- Металлическая зонированная линза, синтезированная на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины поля с применением голографического подхода (рис. 1а; кривые 1 на рис. 2 и рис. 5).

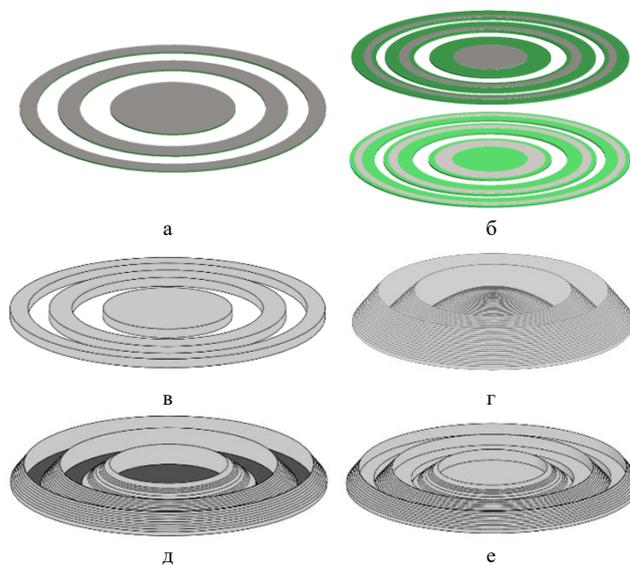


Рис. 1. Рассматриваемые структуры

- Зонированная линза на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины, синтезированной с применением голографического подхода, с применением сплошных областей металлизации, с учётом набега фазы в диэлектрическом слое, на основе RO3003 ($\epsilon = 3.0$, $\text{tg}\delta = 0.001$), с толщиной диэлектрика 0.254 мм, толщиной металлизации 0.035 мм (рис. 1б; кривые 2 на рис. 2 и рис. 5).
- Диэлектрическая зонированная линза, синтезированная на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины поля с применением голографического подхода, диэлектрик – HIPS ($\epsilon = 2.2$), толщиной 1.4 мм (рис. 1в; кривые 3 на рис. 2 и рис. 5).
- Замедляющая зонированная линза, диэлектрик – HIPS (рис. 1г; кривые 4 на рис. 2 и рис. 5).
- Комбинация металлической зонированной линзы, синтезированной на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины поля с применением голографического подхода и замедляющей зонированной линзы, диэлектрик – HIPS (рис. 1д; кривые 5 на рис. 2 и рис. 5).
- Комбинация диэлектрической зонированной линзы, синтезированной на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины поля с применением голографического подхода и замедляющей зонированной линзы, диэлектрик – HIPS (рис. 1е; кривые 6 на рис. 2 и рис. 5).

Радиус раскрыва для всех конструкций антенн составляет 25 мм, расстояние до источника опорного поля – 30 мм, центральная частота (частота расчёта) – 95 ГГц (λ_0). Геометрия линз по рис. 1а и рис. 1д,е одинаковы с точки зрения элементов, полученных на основе аппроксимации интерференционной картины, однако в случае полностью диэлектрической линзы для аппроксимации зон, где поле не должно проходить в переднюю полусферу использован не металл, а диэлектрик толщиной, подобранной на частоте расчёта таким образом, чтобы осуществлялся набег фазы в 180° . В случае же комбинации зонированных линз на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины поля с элементами зонированной линзы, в зонах, где в рамках бинарной аппроксимации поле должно беспрепятственно проходить в переднюю полусферу дополнительно осуществляется фазовая коррекция по традиционной методологии. Отметим, что при получении и аппроксимации интерференционной картины полей также проводилась оптимизация с точки зрения максимизации отношения F/V за счёт выбора начальной фазы опорного поля, что, как ранее показано [5], позволяет достичь выигрыша до 2 дБ в случае бинарной аппроксимации. Многомерная оптимизация выбора начальной фазы опорного поля [5] проводилась при помощи метода Нелдера–Мида [6], такой метод был выбран чтобы не использовать градиент, что позволило работать с негладкими функциями. Так как рассмотренный метод может найти не глобальный, а локальный минимум начальные приближения выбирались по случайной сетке.

Расчетные частотные зависимости КУ и отношения F/V для всех представленных случаев при облучении слабонаправленным облучателем в виде открытого конца прямоугольного волновода WR10 в полосе частот 75–110 ГГц приведены на рис. 2а и рис. 2б соответственно.

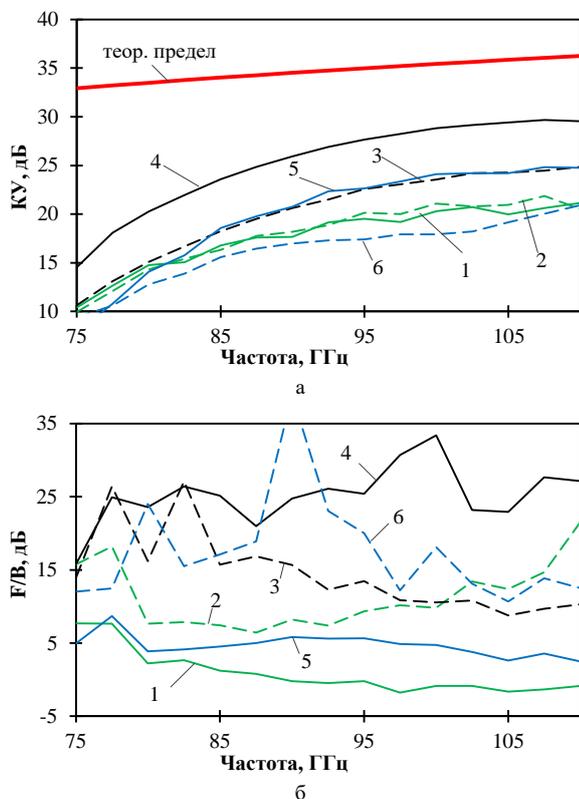


Рис. 2. Частотные зависимости а) КУ; б) отношения F/V

Из рис. 2 видно, что наилучшим с точки зрения КИП (-7.3 дБ на 95 ГГц) и отношения F/V решением, как и ожидалось, является фазокорректирующая зонированная линза. Однако эта же структура обладает и наибольшей толщиной в 6.5 мм. Диэлектрическая зонированная линза, синтезированная на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины поля с применением голографического подхода, при этом, показывает существенно лучшие характеристики (КИП -12.4 дБ), по сравнению с аналогичной, но металлической структурой (КИП -15.5 дБ), а её F/V сопоставим с зонированной линзой на основе бинарной аппроксимации интерференционной картин, но с учётом набега фазы в диэлектрическом слое. Толщина такой линзы составила всего 1.4 мм. Комбинация же линз, на основе голографического подхода и фазовой коррекции даёт промежуточные варианты, с различным соотношением КИП, F/V и толщины конструкции. Так комбинация фазокорректирующей линзы и бинарной металлической структуры обладает КИП (-12.3 дБ), сопоставимым с линзой по рис. 1в, но худшим отношением F/V в полосе рабочих частот. Толщина же такой конструкции составила 3.4 мм. Полностью диэлектрическая структура по рис. 1е обладает сопоставимыми с замедляющей линзой уровнем излучения «назад», но при этом её КИП остаётся на уровне бинарной металлической голографической структуры.

Сравнение нормированных ДН в Е- и Н-плоскостях на 95 ГГц для структур по рис. 1б и рис. 1в приводится на рис. 3а и рис. 3б соответственно. Из рисунков видно, что, обладающая более простой конструкцией, диэлектрическая зонированная линза, синтезированная на основе голографического подхода, обладает меньшим уровнем излучения в задней полусфере, чем металлическая двуслойная зонированная линза. Разница в толщинах конструкций при этом составляет 4.5 раз.

В связи с тем, что интерференционные картины поля, на основании которых были синтезированы структуры по рис. 1а-в и соответствующие компоненты структур по рис. 1г-д, получены с помощью аналитической оценки [7], то при учёте в численном моделировании конструктивных особенностей фланца (рис. 4), используемого в экспериментальной установке, наблюдается некоторое изменение в частотных зависимостях КУ и отношениях F/V для всех представленных случаев в полосе частот 75–110 ГГц (рис. 5а и рис. 5б соответственно). Наименьшая разница наблюдается для зонированной линзы, наибольшая – для комбинации диэлектрической зонированной линзы, синтезированной на основе бинарной аппроксимации интерференционной картины поля с применением голографического подхода и замедляющей зонированной линзы.

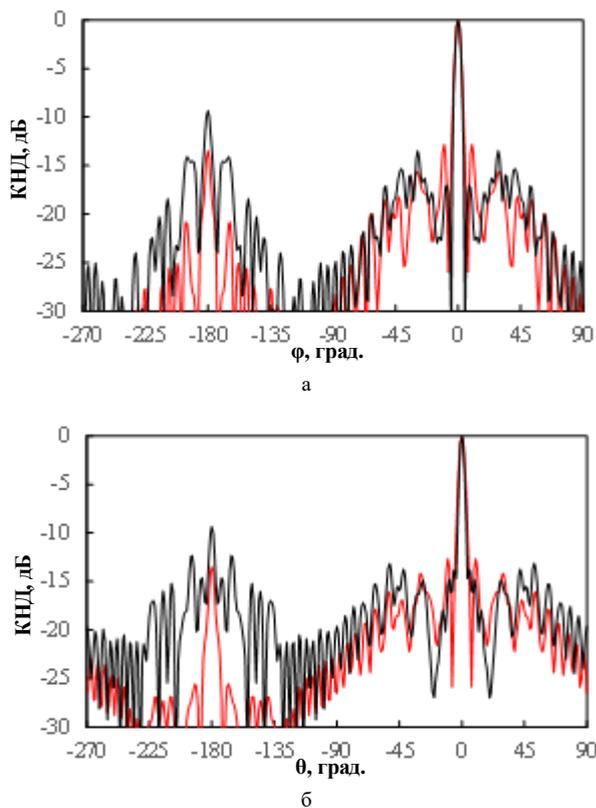


Рис. 3. Нормированные диаграммы направленности в а) Е-плоскости, б) Н-плоскости для зонированной линзы синтезированной с применением голографического подхода, с применением сплошных областей металлизации, с учётом набега фазы в диэлектрическом слое по рис. 1б (черная кривая), для диэлектрической зонированной линзы, синтезированной с применением голографического подхода по рис. 1в (красная кривая)

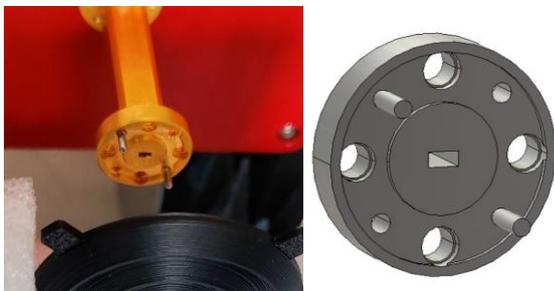


Рис. 4. Отрезок волновода WR10 с фланцем как облучатель

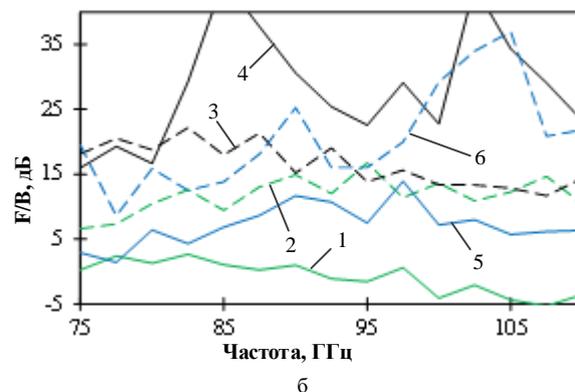
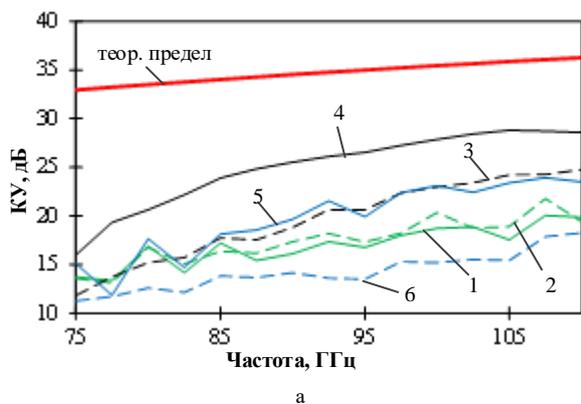


Рис. 5. Частотные зависимости а) КУ; б) отношения F/V при облучении открытого конца волновода при наличии фланца

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен ряд моделей металлодиэлектрических и диэлектрических линз, синтезированных как с использованием голографического и фазокорректирующего подходов, так и с их комбинированием. Показано, что за счёт перехода к полностью диэлектрическим структурам, синтезированным на основе голографического подхода, можно достичь улучшения КИП на 3 дБ при меньшем уровне излучения «назад». Также показано, что существенное влияние на характеристики рассмотренных проходных линз оказывает наличие фланца у отрезка волновода WR10, что следует учитывать при организации соответствующего экспериментального исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] R. Deng et al., "Reconfigurable Holographic Surfaces for Ultra-Massive MIMO in 6G: Practical Design, Optimization and Implementation," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 8, pp. 2367-2379, Aug. 2023.
- [2] M. Barbuto et al., "Metasurfaces 3.0: A New Paradigm for Enabling Smart Electromagnetic Environments," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 10, pp. 8883-8897, Oct. 2022.
- [3] A. Papoulis. *Systems and Transforms with Applications in Optic*. New York: McGraw-Hill. 1968.
- [4] T. O. Olwal, P. N. Chuku and A. A. Lysko, "Antenna Research Directions for 6G : A brief overview through sam-pling literature," 2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2021, pp. 1582-1587.
- [5] L. M. Liubina, S. V. Ballandovich, G. A. Kostikov, Y. G. Antonov and M. I. Sugak, "X-band Holographic Antennas Back Radiation Comparison," 2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russian Federation, 2024, pp. 023-026.
- [6] J. A. Nelder and R. Mead, *Computer Journal*, 1965, vol. 7, p. 308-313.
- [7] L. M. Liubina, Y. G. Antonov, S. V. Ballandovich, G. A. Kostikov, D. A. Struk and M. I. Sugak, "Radiation Pattern of Conformal Holographic Surfaces," 2023 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 37-40.