

ТЕХНОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ ДОО С ЗАДАНЫМИ ФОКУСИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

И.В. Минин

Институт прикладных физических проблем

Введение

За последнее столетие в исследованиях дифракционных оптических элементов (ДОО) СВЧ и миллиметрового диапазона был достигнут значительный прогресс [1, 2]. Обобщение полученных в последнее время результатов исследований фокусирующих и частотных свойств ДОО миллиметрового диапазона длин волн (ММДВ) выполнено в работах [3, 4]. Для проведения вычислительных экспериментов по изучению и оптимизации фокусирующих свойств ДОО ММДВ, выполненных на произвольной поверхности, представляется актуальным выделить основные закономерности, описывающие зависимости свойств ДОО от тех или иных параметров, и на основании полученных данных разработать технологию и общую структуру алгоритма оптимизации фокусирующих свойств ДОО в дальней зоне.

Основные закономерности фокусирующих свойств ДОО ММДВ

На основании результатов исследований, полученных с помощью вычислительных и натуральных экспериментов, представленных и обобщенных в работах [3-4], можно выделить несколько основных закономерностей влияния базовых параметров ДОО ММДВ, выполненных на произвольной поверхности, на их фокусирующие свойства в дальней зоне. Это следующие положения.

1. Для амплитудного бинарного ДОО эффективность фокусировки максимальна, когда последняя зона, помещающаяся на заданном диаметре ДОО, является прозрачной. В случае непрозрачной крайней зоны на поверхности ДОО, его эффективный диаметр уменьшается на ширину этой зоны.
2. Для ДОО фазового типа дифракционная эффективность возрастает при увеличении числа уровней квантования фазы (P). При увеличении числа уровней квантования фазы более 4, коэффициент усиления ДОО (G) растет слабо.
3. Зависимость эффективности фокусировки ДОО от фокусного расстояния (F) при заданных длине волны, диаметре, числе уровней квантования фазы и закона облучения апертуры (n) ДОО имеет максимум. На данное свойство ДОО впервые, по-видимому, было обращено внимание в работе [5]. Сущность эффекта заключается в том, что при заданных длине волны и диаметре зонной пластины, ее оптимальное фокусное расстояние может не совпадать с заранее заданным значением. Этот же эффект имеет место и для ДОО, выполненного на произвольной поверхности. В качестве иллюстрации на рис. 1 показана зависимость диаграммы направленности ДОО, выполненного на цилиндрической поверхности. Фокус

находится в центре цилиндра. Из представленного рисунка видно, что зависимость интенсивности поля от радиуса цилиндрической поверхности носит осциллирующий характер.

4. Для минимизации уровня боковых максимумов в диаграмме направленности при прочих заданных параметрах ДОО целесообразно уменьшать фокусное расстояние.

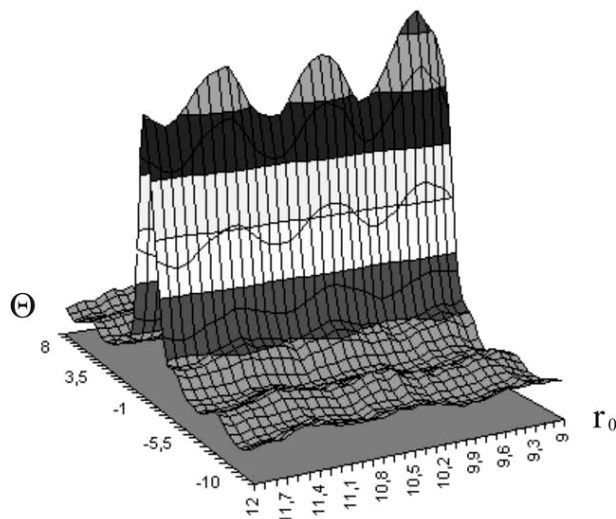


Рис. 1. Зависимость диаграммы направленности ДОО, выполненного на цилиндрической поверхности, от радиуса этой поверхности

5. Выполнение ДОО на криволинейной поверхности позволяет уменьшить эффект затенения зон и увеличить коэффициент использования поверхности. Сущность данного эффекта заключается в том, что для светосильных ДОО (с малым значением отношения F/D) фазовый профиль на поверхности ДОО начиная с некоторого номера зоны Френеля, начинает экранировать лучи, проходящие через следующую зону. Подробно этот эффект исследован в работе [6]. На рис. 2 в качестве иллюстрации показана зависимость эффективности использования поверхности ДОО, выполненного на конической поверхности, от угла раствора конуса и его относительного отверстия F/D .
6. Выполнение ДОО на криволинейной поверхности позволяет увеличить допустимый диапазон углов сканирования.
7. Комбинация ДОО с апертурной диафрагмой позволяет оптимизировать сочетание «диапазон углов сканирования» и «ширина диаграммы направленности» ДОО. Детально этот вопрос рассмотрен в работе [7].
8. Введение постоянного фазового сдвига в фазовую функцию ДОО (опорного радиуса R_0) даже для бинарных ДОО позволяет регулировать уровень боковых лепестков рассеяния в диаграмме

направленности и оптимизировать коэффициент усиления ДОЭ. Влияние постоянного фазового сдвига фазовой функции ДОЭ [3, 4] иллюстрируется на рис.3 и 4. На рис. 3 показана зависимость уровня первого бокового максимума в диаграмме направленности бинарной зонной пластины, а на рис.4 – величина максимальной интенсивности поля в главном лепестке рассеяния ДОЭ, выполненного на цилиндрической поверхности.

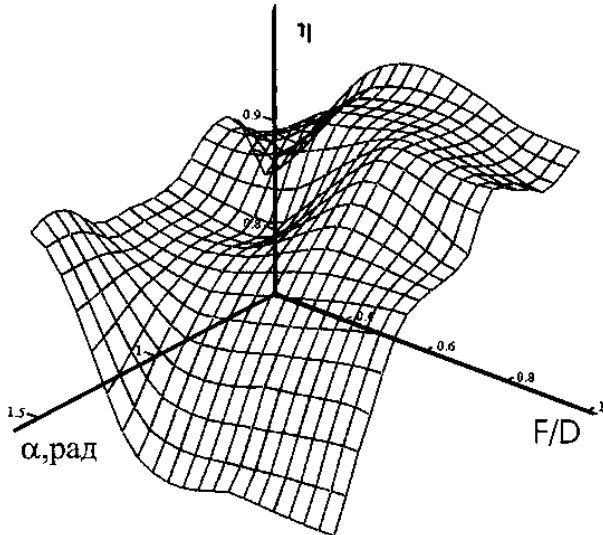


Рис. 2. Эффективность использования поверхности ДОЭ в зависимости от угла раствора конической поверхности (в радианах) и относительного отверстия F/D

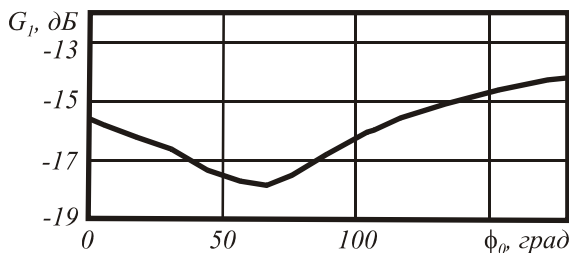


Рис. 3. Зависимость уровня первого бокового максимума от величины постоянного фазового сдвига фазовой функции плоского ДОЭ

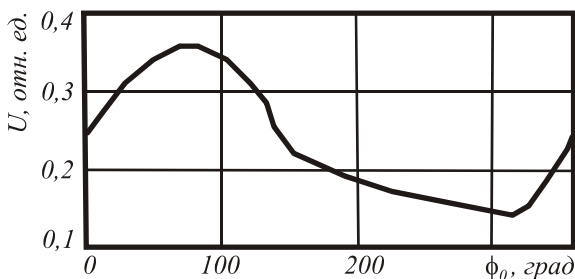


Рис. 4. Значение интенсивности поля в главном лепестке рассеяния от величины постоянного фазового сдвига фазовой функции ДОЭ, выполненного на цилиндрической поверхности

9. При заданных оптических характеристиках материала ДОЭ минимизировать френелевские потери на отражение можно выбором числа уровней квантования фазы. В случае нормального падения плоского фронта на поверхность ДОЭ можно получить соотношение для оптимального

выбора числа уровней квантования фазы p . С учетом того, что высота фазовой ступеньки рельефа ДОЭ есть $h \sim \frac{\lambda}{p(n-1)}$, записывая условие

противофазности лучей, отраженных от двух соседних фазовых ступенек ДОЭ, получаем $2h \approx \frac{\lambda}{2}$, отсюда для оптимального значения числа

уровней квантования фазы имеем $p = \frac{4}{(n-1)}$.

Поскольку в миллиметровом диапазоне длин волн показатель преломления материала ДОЭ составляет около $n=1,5 \dots 1,7$, то с точки зрения минимизации отражения от поверхности плоского ДОЭ оптимальное количество уровней квантования фазы составляет 8. В случае использования искусственных диэлектриков оптимальное количество уровней квантования фазы может быть другим, зависящим от значения коэффициента преломления материала.

10. Согласование ДОЭ с пространством позволяет уменьшить уровень боковых лепестков рассеяния в диаграмме направленности. Естественно предположить, что в случае принятия мер по уменьшению Френелевского отражения от плоской поверхности ДОЭ удастся улучшить его фокусирующие характеристики. С этой целью были проведены экспериментальные исследования с зонной пластиной с четырьмя уровнями квантования фазы, на плоскую поверхность которой наносилось согласующее покрытие в виде дифракционной решетки [8]. Такая субволновая дифракционная решетка эквивалентна искусственной среде с эффективным показателем преломления, определяемым параметрами решетки. Параметры решетки выбирались по следующей методике в соответствии с выражениями [8]:

$$\varepsilon_{эфф,\perp} = \sin^2 \Theta + \cos \Theta \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Theta},$$

$$\varepsilon_{эфф,\parallel} = \left(1 + \sqrt{1 - 4\alpha \sin^2 \Theta}\right) / 2\alpha,$$

$$\alpha = \cos \Theta \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Theta} / \varepsilon,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала ДОЭ, Θ – угол падения излучения на согласующий слой. После определения эффективной диэлектрической проницаемости вычислялись параметры решетки из соотношений:

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon_{эфф,\perp} - \sin^2 \Theta}}, \quad \varepsilon_{эфф,\perp} \approx 1 + (\varepsilon - 1) \frac{2t}{T},$$

$$\varepsilon_{эфф,\parallel} \approx \frac{1}{\left(1 - \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right) \frac{2t}{T}},$$

где d – высота ступеньки решетки, $2t$ – ширина ступеньки, T – период решетки.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 5. По оси абсцисс отложен угол в единицах ширины диаграммы направленности по дифракционному

пределу, по оси ординат – относительный коэффициент усиления в дБ. В качестве облучателя использовался рупор. У согласованной зонной пластины КСВН изменился с 1,35 для несогласованной до 1,05. Ширина диаграммы направленности, измеренная на уровне –3 дБ и по первым нулям, не изменилась. Уровень боковых лепестков рассеяния в диаграмме направленности существенно снизился (примерно на 10 дБ). Коэффициент усиления возрос примерно на 0,3 дБ.

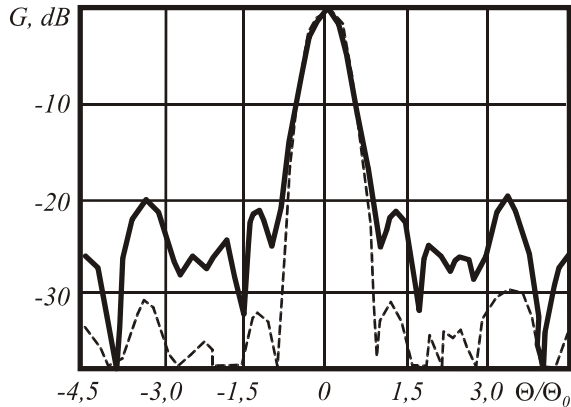


Рис. 5. Диаграмма направленности зонной пластины без согласующего слоя (сплошная линия) и с согласующим слоем (пунктирная линия)

Алгоритм оптимизации

На основе перечисленных основных закономерностей была разработана структурная схема оптимизации фокусирующих характеристик ДОЭ ММДВ в дальней зоне, показанная на рис. 6. Отметим основные особенности предложенного алгоритма и основные ограничения на параметры при оптимизации. Диапазон изменения целого ряда исходных и варьируемых параметров ДОЭ не может быть выбран произвольно. Так, диаметр ДОЭ определяется его практическим назначением, с другой стороны коэффициент усиления также определяется диаметром ДОЭ. Рабочая длина волны ДОЭ ММДВ определяется его назначением и не может быть уменьшена произвольно из-за размера стандартного волновода в выбранном частотном диапазоне. Величина спада интенсивности поля к краю апертуры ДОЭ (закон облучения апертуры n) ограничен физическими размерами облучателя.

Рассмотрим основные положения, перечисленные выше, с точки зрения особенностей оптимизации каждого из этапов. Фактически, критериев оптимизации (иногда противоречащих друг другу) два: это получение максимального коэффициента усиления ДОЭ и минимального уровня боковых лепестков рассеяния.

Положение №1. В данном случае параметрами оптимизации будут такие начальные данные ДОЭ (в первую очередь соотношение фокусного расстояния и диаметра), при которых критерий оптимизации – прозрачная последняя зона – будет соблюдаться. При заданной форме поверхности ДОЭ реализация данного критерия возможна на основе простых аналитических зависимостей.

Положение №2. Тенденцию увеличения дифракционной эффективности ДОЭ при увеличении

числа уровней квантования фазы в общей схеме оптимизации параметров дифракционного элемента целесообразно рассматривать только в сочетании с другими параметрами.

Положения №3-№4. Для фазовых ДОЭ определение оптимальных (по критерию получения максимального значения коэффициента усиления) параметров фокусного расстояния, числа уровней квантования фазы, формы и кривизны поверхности представляет собой многопараметрическую задачу оптимизации. Эта ситуация усугубляется тем, что дополнительное требование на уменьшение уровня боковых лепестков рассеяния путем уменьшения фокусного расстояния может приходиться в противоречие с требованием на фокусное расстояние ДОЭ при максимизации его коэффициента усиления. В настоящее время разработано достаточно много эффективных алгоритмов оптимизации свойств ДОЭ оптического диапазона, обзор которых дан, например, в работе [9]. В миллиметровом диапазоне длин волн с учетом произвольной формы поверхности ДОЭ и естественного требования по применению одного и того же типа алгоритма к каждому этапу оптимизации представляется целесообразным использование генетических алгоритмов, показавших достаточно высокую эффективность на примере решения некоторых задач [10]. В то же время такой подход не исключает использования различных типов оптимизационных алгоритмов на разных этапах оптимизации.

Положение №5. Если форма поверхности ДОЭ жестко не лимитирована, то увеличение коэффициента использования его поверхности может быть достигнуто соответствующим выбором как формы поверхности ДОЭ, так и формой фазового профиля (кусочно-постоянного или кусочно-непрерывного) [6]. Кривизна поверхности ДОЭ (максимальная величина стрелки прогиба его поверхности) ограничена снизу плоской поверхностью, а сверху – углами падения излучения на заданный тип диэлектрика, при котором коэффициент прохождения излучения в материал ДОЭ становится меньше заданного.

Положение 6. Допустимые углы сканирования и уровень боковых лепестков рассеяния, ширина диаграммы направленности определяются как назначением ДОЭ, так и его диаметром и методом синтеза. Фокусное расстояние не может быть выбрано слишком маленьким, поскольку уменьшаются допустимые углы сканирования и возрастают требования к облучающей апертуру ДОЭ системе. С другой стороны фокусное расстояние сверху ограничено габаритными соображениями и уменьшением коэффициента усиления.

Положение 7. Введение апертурной диафрагмы позволяет увеличить допустимый диапазон углов сканирования. Однако при этом возрастают продольно-поперечные габариты всей сканирующей системы (комбинации ДОЭ + апертурная диафрагма), на которые налагаются ограничивающие требования ее практического применения.

Положения 8-10. Специфические требования практического применения ДОЭ ММДВ могут содержать ряд ограничений. В частности, если ДОЭ ММДВ применяется в системе пассивного типа [1, 4], то ста-

новится необходимым минимизация Френелевского отражения и согласования с пространством. При этом следует учитывать, что согласование ДОЭ с пространством накладывает определенные ограничения на тип поляризации используемого излучения. Также в случае пассивных систем особенно ярко проявляются требования максимального снижения любых типов потерь, борьба идет даже за единицы процентов энергетического выигрыша. Правильный выбор постоян-

ного фазового сдвига фазовой функции ДОЭ позволяет частично решить эту проблему, что показано в [3, 4] и подтверждено позднее в работе [11].

Разработанный многопараметрический алгоритм (рис. 6) оптимизации фокусирующих свойств ДОЭ ММДВ, выполненных на произвольной поверхности, позволяет осуществить проведение вычислительного эксперимента для оптимального конструирования ДОЭ.

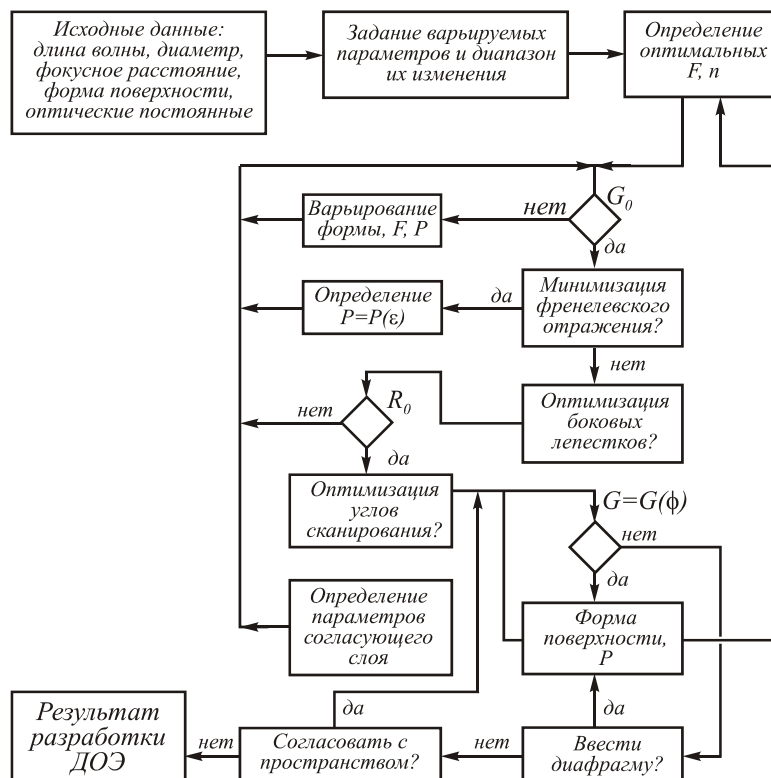


Рис. 6. Схема алгоритма оптимизации параметров ДОЭ ММДВ

Заключение

Существующие средства моделирования и предложенный в настоящей работе алгоритм оптимизации позволяют вести речь о создании основ технологии автоматизированного проектирования ДОЭ ММДВ с заданными фокусирующими свойствами в дальней зоне.

Литература

1. Wiltse J.C. History and Evolution of Fresnel zone plate antennas for microwaves and millimeter waves // APURSI-1999, IEEE, 1999. P. 722-725.
2. Минин О.В., Минин И.В. Дифракционная квазиоптика СВЧ и миллиметровых волн: хронология развития. // Межвузовский сборник «Естествознание. Экономика. Управление», Самара, 2001. Вып. 2. С. 49-62.
3. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика // М.: ИнформТэи, 1992. 180 с.
4. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика и ее применения // Новосибирск: СибАГС, 1999. 380 с.
5. Shekhar S., Ojha S.P., Dey K.K. Ray-theoretic Characteristics of a Plane Microwave Zone Plate

and Their Experimental Verification // Nat. Sci. Lett., 1991. V. 14. N10. P. 421-426.

6. Минин И.В., Минин О.В. Эффект затенения зон в фокусирующих дифракционных оптических элементах. // Автометрия (принята в печать).
7. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Минин И.В., Минин О.В., Степанов С.А. Расчет дифракционного фокусирующего элемента антенны автомобильного локаатора // Компьютерная оптика, №21, 2001. С. 73-76.
8. Jones E.M.T., Cohn S.B.. Surface matching of dielectric lenses // J. Appl. Phys., 1955. V.26. P. 452-457.
9. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000. 687 с.
10. Минин И.В. Применение генетического алгоритма для оптимизации параметров дифракционных элементов // Научный вестник, НГТУ. 2003. №1(14). С. 181-184.
11. Webb G.W. New variable for Fresnel zone plate antennas // Proceedings of 2003 Antenna Applications Symposium, Allerton Park, Monticello, IL, September 15-17, 2003.