

УДК 621.396.677

А. А. Бакин, Л. И. Оборина, И. В. Трифанов

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВУХЗЕРКАЛЬНОГО ЛУЧЕВОДА

Представлен расчет лучевода численно-аналитическим методом. Получены частотные зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ) от геометрических параметров лучевода.

Ключевые слова: лучевод, облучатель, антенно-фидерное устройство, коэффициент стоячей волны.

Лучеводы представляют собой систему конфокальных зеркал или линз. Используются в качестве квазиоптических линий передачи сфокусированной электромагнитной энергии [1].

Повышенный интерес к лучеводом в связи с развитием спутниковых систем связи объясняется тем, что они по сравнению с традиционными волноводами СВЧ-КВЧ-диапазонов обладают важными преимуществами:

- обеспечивают удобное и эффективное размещение антенно-фидерных устройств (АФУ);
- позволяют снизить потери тракта, а следовательно, уменьшить шумовую температуру и увеличить шумовую добротность антенны.

Особенно заметно это преимущество в КВЧ-диапазоне, где велики потери, вносимые волноводным трактом.

Кроме того, при лучеводном питании из тракта двухзеркальной антенны исключаются узкополосные вращающиеся переходы, что позволяет создать антенну, способную работать в весьма широком диапазоне частот.

Лучеводная система является достаточно универсальной и применима в антеннах с модифицированными профилями поверхностей контррефлектора и основного зеркала, имеющих высокий коэффициент использования поверхности раскрыва (КИП).

Разработана модель волноводно-лучеводной линии (рис. 1). Поверхности зеркал представляли собой вырезки из параболоидов вращения со следующими геометрическими характеристиками:

$$\begin{aligned} y^2 + x^2 &= 4Fz, \\ z &= x^2 / 4F, \end{aligned} \quad (1)$$

где F – фокусное расстояние.

С целью подавления кроссполяризованного излучения в систему лучевода вводили два зеркала, располагая их симметрично, кривизной навстречу друг другу. В результате кроссполяризованные составляющие, порожденные одним зеркалом, компенсировались другим.

Для лучевода (см. рис. 1) был разработан метод численно-аналитического расчета.

Рассматривали систему с двумя зеркалами параболической формы (рис. 2, 3). Зеркала размещены на расстоянии 200 мм друг от друга.

Подобная система позволяет избежать потерь при передаче, вызванных неравномерностью внутренней

поверхности волновода. При решении предполагалось возбуждение одним рупорным облучателем и прием сигнала вторым. Для волн частот 50...60 ГГц был использован алгоритм решения интегральных уравнений с поверхностными граничными условиями.

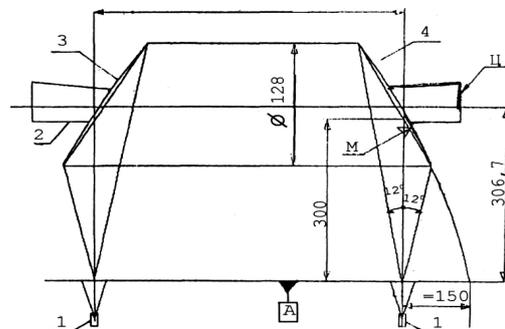


Рис. 1. Принципиальная схема лучевода КВЧ-диапазона: 1 – облучатели с пирамидальным рупором; 2 – штанга; 3, 4 – зеркала параболические

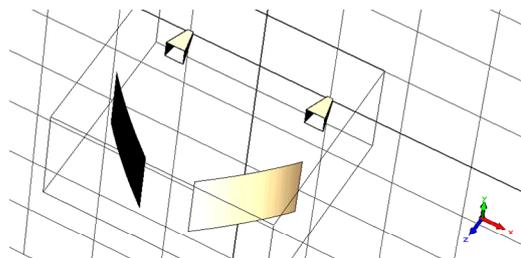


Рис. 2. Внешний вид системы лучевода в CST Microwave Studio

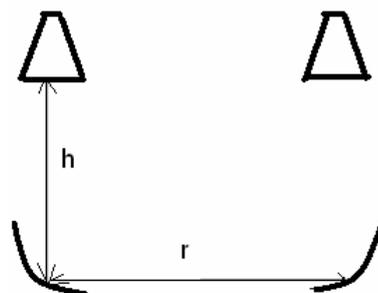


Рис. 3. Схематичное расположение облучателей и зеркал в лучеводной системе (вид сверху)

Для определения параметров системы целесообразно рассматривать устройство с помощью падающих и отраженных волн. Элементы матрицы рассеивания приведены на рис. 4, где S22 описывает коэффициент отражения по волноводному входу излучающего рупора (в данном случае это рупор № 2, однако ввиду симметричности лучевой системы картина не изменится при первом, излучающем, и втором, принимающем рупоре), S12 – коэффициент передачи на приемный рупор.

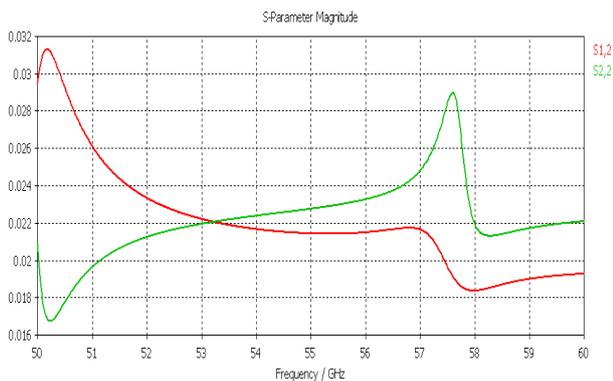


Рис. 4. Частотная зависимость элементов матрицы рассеивания

Для оценки потерь в системе также был рассчитан коэффициент стоячей волны (КСВ) (рис. 5).

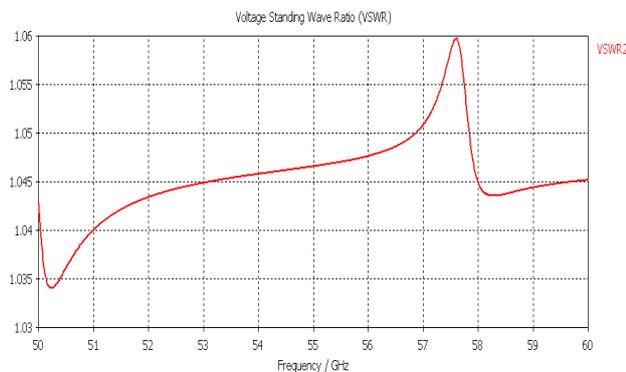


Рис. 5. Зависимость КСВ от частоты (ГГц)

Можно видеть, что потери составляют от 1,7 до 2,9 %. При этом максимум потерь приходится на частотную область 57...58 ГГц, на большей же части исследуемого диапазона потери не превышают 2,2 %. В децибелах потери по напряженности поля составляют от -17,6 до -17,7 дБ, либо, если сравнивать отклонения напряженности, имеем разницу 0,14...0,23 дБ.

Для определения комплексного сопротивления лучевода была построена диаграмма Вольперта–Смита (рис. 6), которая показывает, что изменение полного импеданса системы при значительном изменении частоты мало. Данная система может быть эффективно использована для широкого диапазона миллиметровых волн.

Рассмотрим изменение характеристик лучевода при варьировании расстояния от облучателей до зеркал и между облучателями. Обозначим расстояние между облучателями и соосными с ними отражателями r , а расстояние от центра апертуры облучателя до центра отражателя h . Тогда при различных значениях r и h будем получать разные частотные зависимости КСВ. Лучшая частотная зависимость КСВ наблюдается при $r = 200$, $h = 100$ мм (рис. 7).

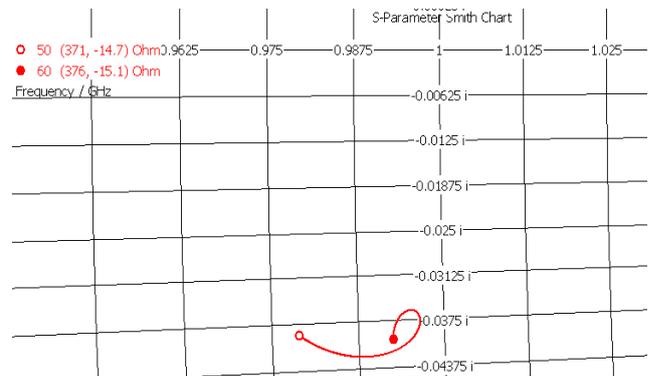


Рис. 6. Диаграмма Вольперта–Смита для лучевода

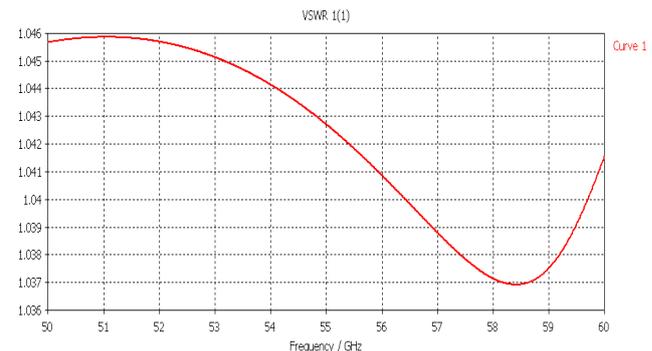


Рис. 7. Частотная зависимость КСВ при $r = 200$ мм, $h = 100$ мм

Для расчета поля, рассеянного первым зеркалом лучевода в зоне Френеля, используется дифракционная формула Кирхгофа [1] с интегрированием по поверхности отражающего элемента:

$$E = \frac{1}{4} I \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\iiint \frac{(3\Delta + k^2 J) e^{-lkr}}{r} dx dy dz}{\pi k}, \quad (2)$$

$$H = \frac{\iiint \frac{J \Delta e^{-lkr}}{r} dx dy dz}{4\pi},$$

где E – напряженность электрического поля на расстоянии r от зеркала; H – напряженность магнитного поля r от зеркала; $J = J(x, y, z)$ – распределение тока по поверхности зеркала; k – волновое число; r – параметр, равный расстоянию между зеркалами; Δ – дифференциальный оператор Лапласа; I – мнимая единица.

Для параболоида распределение токов на поверхности (рис. 8) определим с помощью TLM Solver CST Microwave Studio, а затем аппроксимируем аналитической функцией с помощью MATLAB.

В рамках приближения геометрической оптики считаем фронт падающей на зеркало волны плоским, поляризацию определим как линейную.

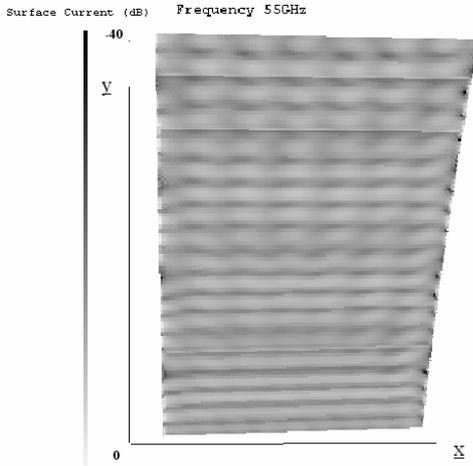


Рис. 8. Поверхностный ток (дБ) на поверхности зеркала при облучении его плоской волной с частотой 55 ГГц

Для расчета поля по формуле (2) требуется представить J как аналитическую функцию. Для построения приближенной аналитической функции из набора дискретных значений обычно используются аппроксимационные или интерполяционные алгоритмы, однако в данном случае использование их без предварительной подготовки данных связано с вычислительными трудностями. В связи с высокой частотой конечно-элементное моделирование, используемое в CST Microwave studio, требует разбиения на очень большое количество малых областей – в данном случае количество ячеек сетки разбиения $\sim 28\ 000$. Интерполяция функции трех переменных по такому массиву точек требует больших вычислительных мощностей. С другой стороны, можно видеть (см. рис. 8), что интересующие нас значения поверхностного тока мало отличаются на участках поверхности, в разы превышающих размер ячейки разбиения. Воспользовавшись этим, выделим области, в которых значения отличаются не более чем на $\pm 0,5$ дБ. Примем значение тока в этих областях равным среднему [2, с. 134], а точку для интерполяции установим в геометрическом центре области. Также разделим параболоид на 9 зон, содержащих несколько таких областей, разбив соответствующим образом пределы интегрирования в (1). Для интерполяции воспользуемся интерполяционным полиномом Лагранжа [3, с. 145–147], обобщенным для функции трех переменных. В результате этих действий удалось получить 9 зон, в каждой из которых порядок полинома не превосходит 7.

Общий вид интерполяционного многочлена Лагранжа для трех переменных:

$$W := \sum_{i=1}^n J_i p_{x_i}(x) p_{y_i}(y) p_{z_i}(z), \quad (3)$$

где $J_i(x, y, z)$ – известные значения плотности тока в точках, а коэффициенты $p_{x_i}, p_{y_i}, p_{z_i}$ определяются подобно:

$$p_{x_i} := \prod_{\substack{1 \dots k \\ i \neq k}} \left(\frac{x - x_k}{x_i - x_k} \right). \quad (4)$$

Функция представляет собой в данном случае полином седьмой степени и, следовательно, легко дифференцируется и интегрируется.

Количество минимумов и максимумов полинома на области интегрирования совпадает с количеством минимумов и максимумов значений плотности тока после сглаживания данных моделирования, что указывает на физичность интерполяции.

Подставив W в качестве $J(x, y, z)$ в (2) и проинтегрировав в пределах координат поверхности отражателя лучевода, получим

$$(0,178\ 798\ 000\ 000 + 12,4\ 140\ 000\ 000\ 000\ k \sim) \times$$

$$E := \frac{\times \cos(1. k r \sim)}{r}, \quad (5)$$

где k – волновое число; r – расстояние от поверхности отражателя до точки измерения поля.

Приняв напряженность падающего поля за единицу, построим 3D-зависимость отношения напряженности отраженного поля к напряженности упавшего от k и r (рис. 9).

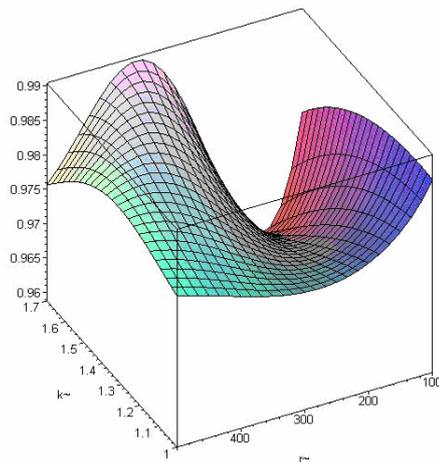


Рис. 9. 3D-зависимость отношения напряженности поля на расстоянии r от зеркала к напряженности поля, упавшего на зеркало (по оси z , %), от k , мм^{-1} и r , мм

Можно видеть, что существуют определенные пары значений параметров r и k , при которых потери минимальны. Для частоты 55 ГГц оптимальное значение расстояния до второго отражателя лежит в диапазоне 200...300 мм (см. рис. 9). Чтобы найти точное

значение, продифференцируем (5) по r , подставим значение волнового числа и найдем экстремумы, приравняв полученное выражение к 0:

$$\begin{aligned} & \frac{1,659631300 \cos(0,01150000000r \sim)}{r^2 \sim} = \\ & = \frac{0,01908575995 \sin(0,01150000000r \sim)}{r \sim}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) следует, что для $k = 1,15$ функция E принимает максимум при $r = 243,3$ мм, что качественно согласуется с результатами моделирования.

Найдем потери на первичном зеркале лучеводной системы. При оптимальном расстоянии между зеркалами потери на первом зеркале при частоте 55 ГГц составят $-0,13$ дБ. Предполагая ввиду идентичности первого и второго зеркал лучеводной системы, что потери на втором отражателе аналогичны, получим для потерь на обоих зеркалах $-0,26$ дБ.

Таким образом, пренебрегая потерями в облучателях, при оптимальном расположении зеркал можно добиться потерь в лучеводном тракте $-0,2 \dots 0,3$ дБ, что согласуется с результатами численного моделирования.

Проведено моделирование системы лучеводов с оптимальным (согласно аналитическим расчетам) расстоянием между зеркалами в CST Microwave Studio, используя Transient Solver. Произведено сравнение частотных зависимостей КСВ для подобной системы, полученных численным моделированием и путем численно-аналитического расчета (рис. 10).

Таким образом, предложено усовершенствование метода расчета лучеводных систем в приближении геометрической оптики. Метод может применяться в тех случаях, когда полное компьютерное моделирование системы затруднено ввиду высоких частот, что требует уменьшения шага сетки и следовательно, увеличения количества элементов.

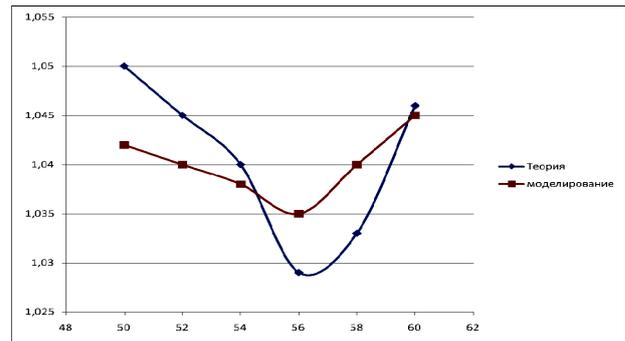


Рис. 10. Зависимость КСВ от частоты (ГГц) для лучеводной системы с $r = 243,3$ мм

Преимуществом использованного подхода перед описанным в [1] является то, что он хотя и приближенно, но учитывает реальное распределение токов по поверхности отражателей, численное вычисление которых при помощи интегральных уравнений на поверхности намного проще численного расчета полей во всем объеме системы лучеводов. Использование модельного распределения плотности тока на поверхности криволинейного зеркала должно привести к повышению точности расчетов. К недостаткам предложенного метода можно отнести необходимость первичной обработки данных моделирования для получения интерполяционных полиномов доступной для вычислительных мощностей степени.

Библиографические ссылки

1. Мирошниченко А. Я. Лучеводы для двухзеркальных антенн // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 7. С. 28–62.
2. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М.: Наука, 1989.
3. Афонин В. Л., Макушин В. А. Интеллектуальные робототехнические системы. М.: Интернет-ун-т информ. технологий, 2005.

А. А. Бакин, Л. И. Оборина, И. В. Трифанов

CALCULATION OF PARAMETERS OF A TWO-MIRROR BEAM WAVEGUIDE

The authors present calculation of a beam waveguide, made by numerical analytical method. The frequency dependence of the SWR on the geometric parameters of the beam waveguide are presented as well.

Keywords: beam waveguide, feed element, aerial-feed device, standing wave coefficient.

© Бакин А. А., Оборина Л. И., Трифанов И. В., 2012