

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.5>

УДК: 621.396.677

## **РАСЧЕТ ДВУЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ПО МЕТОДУ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ С УЧЕТОМ МНОГОКРАТНЫХ ПЕРЕОТРАЖЕНИЙ**

**Е.И. Лаврецкий\*, В.С. Чернышов**

**НИИ Точных Приборов, 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51**

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2021 г.

**Аннотация.** Проведен расчет двузеркальной антенны Кассегрена по методу физической оптики с учетом многократных переотражений между контр-рефлектором и рефлектором. Показано, что с увеличением числа учтенных переотражений наблюдается сходимость результата для расчетных характеристик антенны (КНД, КИП, УБЛ). Для проверки предложенного метода проведен расчет антенны Кассегрена методом интегрального уравнения для неизвестного поверхностного электрического тока на рефлекторе и контр-рефлекторе. Сравнение показало высокую степень совпадения результатов, полученных двумя разными методами. С помощью метода многократных переотражений проведен расчет КНД и КИП зеркальной антенны Кассегрена в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц.

**Ключевые слова:** зеркальная антенна Кассегрена, метод физической оптики, многократные переотражения, интегральное уравнение электрического поля.

**Abstract.** Calculation of a double reflector Cassegrain antenna by physical optics method with taking into account multiple reflections between the reflector and the subreflector was performed. It was shown that the convergence of antenna characteristics (gain, antenna efficiency, side-lobe level) with the increase of accounting reflections is observed. To check the method of multiple reflections the same Cassegrain antenna was calculated by the method of electric field integral equation with the unknown surface electric currents on the reflector and the sub-

reflector. The comparison showed the coincidence of the result obtained by two different methods. The calculation of gain and efficiency of a Cassegrain antenna in frequency range from 1 to 10 GHz was performed by physical optics method with multiple reflections.

**Key words:** Cassegrain reflector antenna, physical optics method, multiple reflections, electrical field integral equation (EFIE).

**Автор для переписки:** Лаврецкий Евгений Изидорович, [e.lavretski@mail.ru](mailto:e.lavretski@mail.ru)

## Введение

При проектировании зеркальных антенн требуется проводить расчеты антенн при учете максимального количества факторов, определяющих характеристики антенны. В настоящее время для расчета зеркальных антенн широко применяется метод физической оптики (ФО), дающий высокую точность и позволяющий быстро выполнять вычисления на персональном компьютере. В частности, метод ФО используется в специализированной программе расчета зеркальных антенн GRASP (разработана компанией Ticsa [1]), которая позиционируется как промышленный стандарт для анализа и оптимизации рефлекторных антенн, а также в составе пакета электродинамического моделирования FEKO [2]. Указанные программы в принципе позволяют выполнять расчет по методу ФО не только для однозеркальных, но и для двухзеркальных антенн. Многозеркальную систему лучевода совместно с двухзеркальной антенной по методу ФО рассчитывал Белькович И.В. [3].

Расчет многозеркальной системы выполняется в рамках метода ФО обычно последовательным образом [1-3]: первичный облучатель наводит электрические токи на первом зеркале, затем по этим электрическим токам рассчитываются токи второго зеркала, далее по электрическим токам второго зеркала рассчитываются электрические токи третьего зеркала и т.д. Такой приближенный подход дает достоверный результат расчета для многозеркальных систем офсетного типа, когда отраженные от зеркал волновые

фронты практически не задевают предыдущих зеркал, что позволяет пренебречь переотражениями в лучевом поле.

Если метод ФО применяется для рассмотрения осесимметричной двузеркальной антенны, то контррефлектор затеняет волновой фронт от главного зеркала, на контррефлекторе наводятся значительные вторичные токи, которые, в свою очередь, облучают главный рефлектор, наводя на нем соответствующие вторичные токи. Излучаемые поля от вторичных токов складываются с полями от первичных токов и изменяют ДН антенны. Целесообразно учесть вторичные токи для повышения точности расчета двузеркальной антенны.

Двузеркальную антенну можно трактовать как открытый зеркальный резонатор, характеризующийся соответствующей добротностью. Чем меньше нужно переотражений для «высвечивания» вторичных токов на зеркалах, тем ниже добротность открытого резонатора. Наоборот, чем выше добротность, тем сильнее будет влияние переотражений на диаграмму направленности антенны (ДН), коэффициент направленного действия (КНД), уровень боковых лепестков (УБЛ) и т.д.

В работе [4] рассмотрен вопрос концентрации электромагнитного поля с помощью открытого зеркального резонатора, состоящего из двух параболических рефлекторов, повернутых друг к другу. Для расчета такого резонатора была применена численная реализация рекуррентного процесса последовательных отражений электромагнитных волн от зеркал. Подобный рекуррентный процесс идеально подходит для задачи расчета двузеркальной антенны, если для расчета электрических токов на втором зеркале по электрическим токам на первом зеркале используется метод физической оптики. Цель настоящего исследования – разработать такой рекуррентный процесс для расчета многократных переотражений в двузеркальной антенне, выполнить расчеты на модельных задачах, провести сравнения характеристик двузеркальной антенны, полученных с помощью разработанного приближенного метода и с помощью строгого метода интегрального уравнения электрического тока.

## 1. Учет многократных переотражений

Рассмотрим осесимметричную двузеркальную антенну, в которой первичный облучатель находится между зеркалом и контррефлектором, максимум ДН облучателя направлен по оси к контррефлектору. Частным случаем двузеркальной антенны является антенна Кассегрена, имеющая параболическое зеркало и гиперболический контррефлектор (рисунок 1). В рамках геометрооптической картины лучи от первичного облучателя падают на контррефлектор, отражаются от него, приходят на главное зеркало, в свою очередь отражаются от него и выходят в виде параллельного пучка лучей (плоского волнового фронта).

Применим метод ФО для расчета такой осесимметричной двузеркальной антенны. Токи физической оптики вводятся только на «освещенных» частях поверхностей проводящих тел, а необходимые для записи выражений токов нормали должны быть направлены из объемных проводящих тел наружу [5]. Первичная ДН облучателя наводит на контррефлекторе поверхностный электрический ток:

$$\vec{J}_{\text{КР}}^{(1)} = 2 \cdot [\vec{n}_{\text{КР}}, \vec{H}_{\text{обл}}], \quad (1)$$

где  $\vec{H}_{\text{обл}}$  – магнитное поле от первичного облучателя,  $\vec{n}_{\text{КР}}$  – вектор нормали для контррефлектора. В свою очередь токи контррефлектора наводят поверхностные электрические токи на главном зеркале:

$$\vec{J}^{(1)} = 2 \cdot [\vec{n}, \vec{H}(\vec{J}_{\text{КР}}^{(1)})], \quad (2)$$

где  $\vec{H}(\vec{J}_{\text{КР}}^{(1)})$  – магнитное поле от тока на контррефлекторе,  $\vec{n}$  – вектор нормали для главного зеркала. В обычном методе ФО здесь уже переходят к расчету результирующей ДН поля в дальней зоне как суммы полей от первичного облучателя и полей поверхностных электрических токов на зеркалах.

Учтем многократные переотражения между зеркалами рекуррентным образом. Пусть поверхностные токи на главном зеркале наводят теперь вторичные поверхностные электрические токи на контррефлекторе. Затем

данные вторичные поверхностные электрические токи на контррефлекторе наводят вторичные поверхностные токи на главном зеркале, далее вторичные токи главного зеркала наводят токи третьего порядка на контррефлекторе и т.д.

$$\vec{J}_{\text{КР}}^{(2)} = 2 \cdot [\vec{n}_{\text{КР}}, \vec{H}(\vec{J}^{(1)})], \vec{J}^{(2)} = 2 \cdot [\vec{n}, \vec{H}(\vec{J}_{\text{КР}}^{(2)})] \text{ и т.д.} \quad (3)$$

Получаем системы токов на зеркалах:

$$\vec{J}_{\text{КР}} = \{ \vec{J}_{\text{КР}}^{(1)}, \vec{J}_{\text{КР}}^{(2)}, \vec{J}_{\text{КР}}^{(3)}, \dots \}, \quad (4')$$

$$\vec{J} = \{ \vec{J}^{(1)}, \vec{J}^{(2)}, \vec{J}^{(3)}, \dots \}. \quad (4'')$$

При переотражениях большая часть мощности от токов на зеркалах излучается в свободное пространство, меньшая часть мощности расходуется на наведение токов другого зеркала. Поэтому рекуррентный процесс расчета системы токов на зеркалах должен носить быстро сходящийся характер.

Для расчета полного поля излучения будем суммировать поля первичного облучателя, поля системы токов на контррефлекторе и поля системы токов на главном зеркале:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{обл}} + \sum_{\alpha} \vec{E}(\vec{J}_{\text{КР}}^{(\alpha)}) + \sum_{\beta} \vec{E}(\vec{J}^{(\beta)}). \quad (5)$$

В силу линейности выражений для полей можем записать:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{обл}} + \vec{E}(\sum_{\alpha} \vec{J}_{\text{КР}}^{(\alpha)}) + \vec{E}(\sum_{\beta} \vec{J}^{(\beta)}). \quad (6)$$

Введем обозначения для результирующих токов:

$$\vec{J}_{\text{КР}}^{\Sigma} = \sum_{\alpha} \vec{J}_{\text{КР}}^{(\alpha)}, \quad (7')$$

$$\vec{J}^{\Sigma} = \sum_{\beta} \vec{J}^{(\beta)}. \quad (7'')$$

Тогда полное поле излучения равно:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{обл}} + \vec{E}(\vec{J}_{\text{КР}}^{\Sigma}) + \vec{E}(\vec{J}^{\Sigma}). \quad (8)$$

Заметим, что рассмотренная приближенная модель двузеркальной антенны использует «виртуальный» первичный облучатель, который участвует только в облучении контррефлектора, но не затеняет главное зеркало.

По форме выражение (8) такое же, что и в методе ФО с учетом первичных токов на зеркалах, но в качестве сторонних источников здесь фигурируют результирующие токи с учетом переотражений.

Таким образом, для учета многократных переотражений должны быть рассчитаны системы токов (4), затем найдены результирующие токи (7), по которым рассчитаны поля по формуле (8).

Кратко остановимся на примененных методах расчета полей. При реализации метода многократных переотражений требуется рассчитывать магнитное поле от поверхностного тока одного рефлектора на втором рефлекторе. Магнитное поле рассчитывается как ротор от электрического векторного потенциала [6]:

$$\vec{H}(\vec{J}) = \nabla \times \int_{S'} \vec{J} \cdot G(\vec{r}, \vec{r}') \cdot dS', \quad (9)$$

где скалярная функция Грина равна  $G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{-ik_0R}}{4\pi R}$ ,  $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$ ,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число.

Применяя оператор ротора к подынтегральной функции в (9), получаем следующее представление для магнитного поля электрического тока [7]:

$$\vec{H}(\vec{J}) = -ik_0 \int_{S'} (\vec{r} - \vec{r}') \times \vec{J} \cdot \frac{(1 - \frac{i}{k_0R})}{R} \cdot G(\vec{r}, \vec{r}') \cdot dS', \quad (10)$$

которое более удобно для непосредственного применения тем, что в нем нет дифференциальных операторов. При расчете поля электрического тока одного рефлектора на втором рефлекторе по формуле (10) подынтегральная функция не имеет особенностей (рефлектора разнесены в пространстве). Интегрирование в (10) должно быть выполнено по криволинейной поверхности рефлектора.

Расчет поля излучения поверхностных токов в дальней зоне при расчете ДН был проведен обычным образом [6]:

$$E_{\theta, \varphi}(\vec{J}) = -ik_0 W_0 \cdot \frac{e^{-ik_0R_0}}{4\pi R_0} \cdot \int_{S'} J_{\theta, \varphi} e^{ik_0x' \sin\theta \cos\varphi + ik_0y' \sin\theta \sin\varphi + ik_0z' \cos\theta} dS', \quad (11)$$

где  $J_{\theta, \varphi}$  – сферические компоненты поверхностного электрического тока,  $W_0 = 120\pi$  Ом – волновое сопротивление свободного пространства. Интегралы излучения в (11) также являются интегралами по криволинейным поверхностям рефлекторов.

Полученные криволинейные интегралы были записаны в виде интегралов по плоским областям проекций рефлекторов на поперечную плоскость [8].

Численный расчет таких интегралов был выполнен далее с помощью введения квадратной сетки в областях проекций. Подынтегральные функции в (10) и (11) полагались постоянными в пределах ячеек сетки, что позволило приближенно представить поля в виде конечных двумерных сумм.

Известно, что повышение точности вычисления интегралов излучения в (11) может быть достигнуто с помощью методов [7, 8], когда вводится кусочно-линейная аппроксимация фазы поверхностного тока на ячейке сетки. Данные методы дают выигрыш при «грубой» сетке интегрирования, но усложняют алгоритм. Для проведения расчетов в настоящей статье такие методы не использовались, применялась достаточно мелкая сетка с шагом  $0.1\lambda$ , обеспечивающая высокую точность без усложнения алгоритма.

## 2. Результаты расчетов

Выберем для расчета классическую осесимметричную систему Кассегрена, в которой параболический рефлектор имеет диаметр  $D = 5000$  мм, фокусное расстояние равно  $F = 2000$  мм ( $F/D = 0,4$ ), а гиперболический контр-рефлектор имеет диаметр  $D_{кр} = 750$  мм, эксцентриситет  $\varepsilon = 2,1$  и расстояние между фокусами гиперболы  $2C_{кр} = 987$  мм (рисунок 1). В данной зеркальной системе угол облучения края контр-рефлектора равен  $\theta_{\max} = 25^\circ$ , угол облучения края параболического рефлектора равен  $\psi_{\max} = 64^\circ$ . Правый фокус контр-рефлектора совмещен с фокусом рефлектором, первичный облучатель установлен в левый фокус контррефлектора.

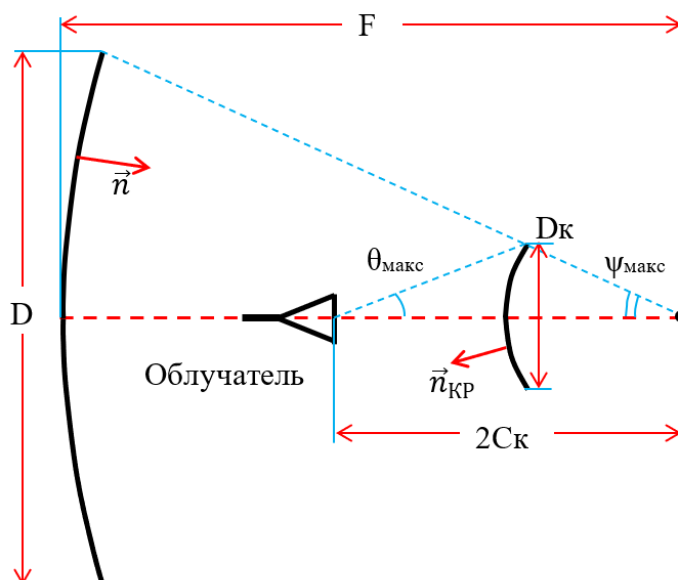


Рис. 1. Зеркальная система антенны Кассегрена

В качестве первичного облучателя применим облучатель идеальной круговой поляризации с амплитудной ДН по полю:

$$F_{\text{обл}}(\theta) = \left(\cos \frac{\theta}{2}\right)^p. \quad (12)$$

Значение параметра примем равным  $p=50$ , при котором обеспечивается уровень облучения края контррефлектора на уровне -10 дБ.

Проведем расчет антенных параметров (КНД, КИП, УБЛ) для ряда частот в зависимости от числа переотражений  $N_{\text{refl}}$  (длины рекуррентного процесса). Первым переотражением будем называть излучение токов контррефлектора после падения на него первичной волны, второе переотражение имеем после возбуждения главного рефлектора токами контррефлектора  $\vec{J}_{\text{КР}}^{(1)}$ , третье переотражение – после возбуждения контррефлектора токами главного зеркала  $\vec{J}^{(1)}$ , четвертое переотражение – после возбуждения главного рефлектора токами контр-рефлектора  $\vec{J}_{\text{КР}}^{(2)}$  и т.д. Коэффициент использования поверхности (КИП) будем определять относительно КНД равномерного раскрыва  $\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$ , где  $D$  – диаметр главного зеркала.

Результаты расчетов антенных параметров по методу ФО в зависимости от числа переотражений приведены в таблицах 1,2,3,4 для частот  $f = 1,7$  ГГц, 3,4 ГГц, 5,1 ГГц и 8,2 ГГц соответственно.



Легко видеть, что при увеличении числа переотражений Nrefl значения расчетных КНД и КИП снижаются, уровень боковых лепестков возрастает. Основной вклад от переотражений оказывается учтенным уже при Nrefl = 4, когда берутся только токи  $(\vec{J}_{\text{КР}}^{(1)} + \vec{J}_{\text{КР}}^{(2)})$  и  $(\vec{J}^{(1)} + \vec{J}^{(2)})$ . При учете числа переотражений более Nrefl = 10 результаты не меняются, наблюдается сходимость результатов. Обычный метод ФО (соответствует Nrefl = 2) дает всегда завышение КНД (до  $\approx 2$  дБ на частоте 1,7 ГГц) и занижение УБЛ (на 8 дБ на частоте 1,7 ГГц и на 2 дБ на частоте 8,2 ГГц). Влияние дополнительных переотражений на антенные параметры сильнее для более низких частот (например, для  $f = 1,7$  ГГц), где нужно учитывать больше переотражений, что можно трактовать как более высокую добротность открытого зеркального резонатора для длинноволнового диапазона.

Таблица 1. Результаты расчета по методу ФО на частоте  $f = 1,7$  ГГц в зависимости от числа переотражений Nrefl

Nrefl	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ
2	37,65	0,735	-25,1
3	37,27	0,674	-20,6
4	35,58	0,456	-17,4
5	35,58	0,456	-17,9
6	35,63	0,462	-17,1
7	35,64	0,463	-17,2
8	35,64	0,463	-17,1
9	35,65	0,463	-17,2
10	35,68	0,466	-17,2
11	35,68	0,467	-17,2
12	35,68	0,467	-17,3
13	35,68	0,467	-17,3
14	35,68	0,467	-17,3
15	35,68	0,467	-17,3
20	35,68	0,467	-17,3

Таблица 2. Результаты расчета по методу ФО на частоте  $f = 3,4$  ГГц в зависимости от числа переотражений  $N_{refl}$

$N_{refl}$	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ
2	43,74	0,746	-25,7
3	43,38	0,687	-20,7
4	43,42	0,693	-17,1
5	43,51	0,707	-17,8
6	43,56	0,716	-18,7
7	43,53	0,711	-18,5
8	43,51	0,707	-18,2
9	43,52	0,709	-18,3
10	43,52	0,710	-18,3

Таблица 3. Результаты расчета по методу ФО на частоте  $f = 5,1$  ГГц в зависимости от числа переотражений  $N_{refl}$

$N_{refl}$	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ
2	47,17	0,731	-23,2
3	46,81	0,673	-19,2
4	47,21	0,737	-21,7
5	47,20	0,736	-21,8
6	47,14	0,726	-21,6
7	47,16	0,730	-21,8
8	47,14	0,725	-21,6
9	47,14	0,726	-21,6
10	47,14	0,726	-21,6

Таблица 4. Результаты расчета по методу ФО на частоте  $f = 8,2$  ГГц в зависимости от числа переотражений  $N_{refl}$

$N_{refl}$	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ
2	51,42	0,752	-24,3
3	51,07	0,693	-20,0
4	51,25	0,723	-22,3
5	51,21	0,717	-21,8
6	51,23	0,721	-22,0
7	51,24	0,721	-22,1
8	51,23	0,720	-22,1
9	51,23	0,719	-22,1
10	51,23	0,710	-22,1

Для проверки полученных результатов для той же геометрии зеркальной антенны Кассегрена (и с той же моделью облучателя) были проведены строгие расчеты по методу интегральных уравнений (метод ФО является приближенным методом). Главный рефлектор и контррефлектор рассматривались как бесконечно тонкие незамкнутые идеально проводящие поверхности [11], для которых использовались интегральные уравнения электрического поля для поверхностных электрических токов (EFIE). Геометрия структуры обладает осевой симметрией, так как рефлектор и контр-рефлектор являются телами вращения. В этом случае токи и поля могут быть разложены в ряды Фурье, и получены одномерные интегральные уравнения для гармоник токов [12]. Однако для расчетов в статье был применен метод решения интегрального уравнения для произвольной геометрии, не учитывающий симметрии структуры. При этом на поверхностях зеркал были введены базисные функции RWG [13], задающиеся на двух треугольниках, имеющих общую сторону. При решении системы интегральных уравнений применен алгоритм MLFMA [14], в котором использовались мультипольные разложения полей от электрических токов. Для эффективного вычисления интегралов по телесному углу, возникающих в мультипольных разложениях, использован метод статьи [15]. Решение СЛАУ большой размерности выполнялось итерационным способом с помощью метода сопряженных градиентов [16].

В таблице 5 приведены результаты расчета по методу интегральных уравнений электрического тока на трех частотах (использовался метод MLFMA с 6-ю уровнями). Размерность матрицы СЛАУ (число неизвестных  $N$ ) составляла  $\approx (190 \div 280)$  тысяч.

Таблица 5. Результаты расчета по методу интегральных уравнений электрического тока

$f$ , ГГц	Размер матрицы, $N$	Оперативная память (RAM), ГБ	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ
1,7	191465	5,6	35,67	0,466	-17,2
3,4	191669	11,7	43,50	0,706	-18,2
5,1	276237	25,4	47,07	0,714	-21,6

Сравнение таблицы 5 с результатами в таблицах 1÷3 показывает практически полное совпадение антенных параметров, рассчитанных строгим методом (метод интегральных уравнений) и приближенным методом (метод ФО с учетом переотражений). При этом одна частотная точка по методу интегральных уравнений рассчитывалась в 40÷50 раз дольше, чем по методу ФО с учетом переотражений. Также для решения интегрального уравнения использовался компьютер с 32 ГБ ОЗУ, в то время как метод ФО с учетом переотражений не требовал использования большого объема оперативной памяти компьютера (достаточно 4 ГБ ОЗУ).

На рисунках 2,3 и 4 показан расчетный КНД в диапазоне углов на частотах  $f = 1,7$  ГГц, 3,4 ГГц и 5,1 ГГц соответственно (сравнивался расчет по методу ФО и расчет по методу интегральных уравнений). Легко видеть, что имеется практически полное совпадение КНД в области главного лепестка и первого бокового лепестка. Успешный результат сравнения полученных разными методами характеристик двузеркальной антенны позволяет сделать вывод о пригодности и высокой точности метода ФО с учетом переотражений для рассматриваемой задачи.

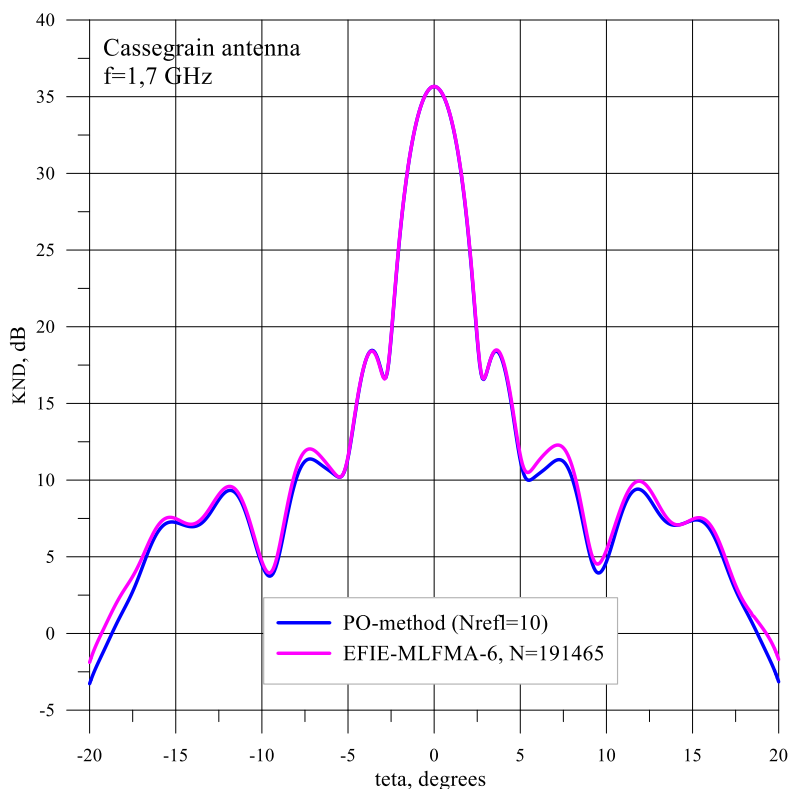


Рис. 2. Расчетный КНД на частоте  $f = 1,7$  ГГц

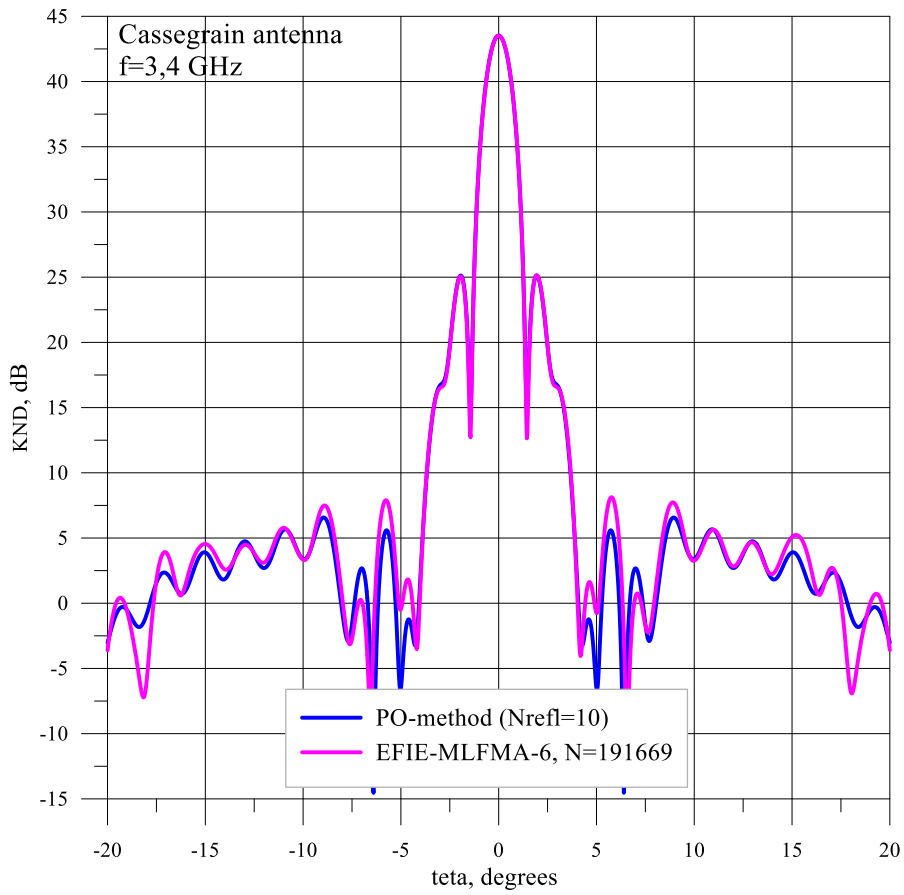


Рис. 3. Расчетный КНД на частоте  $f = 3,4$  ГГц

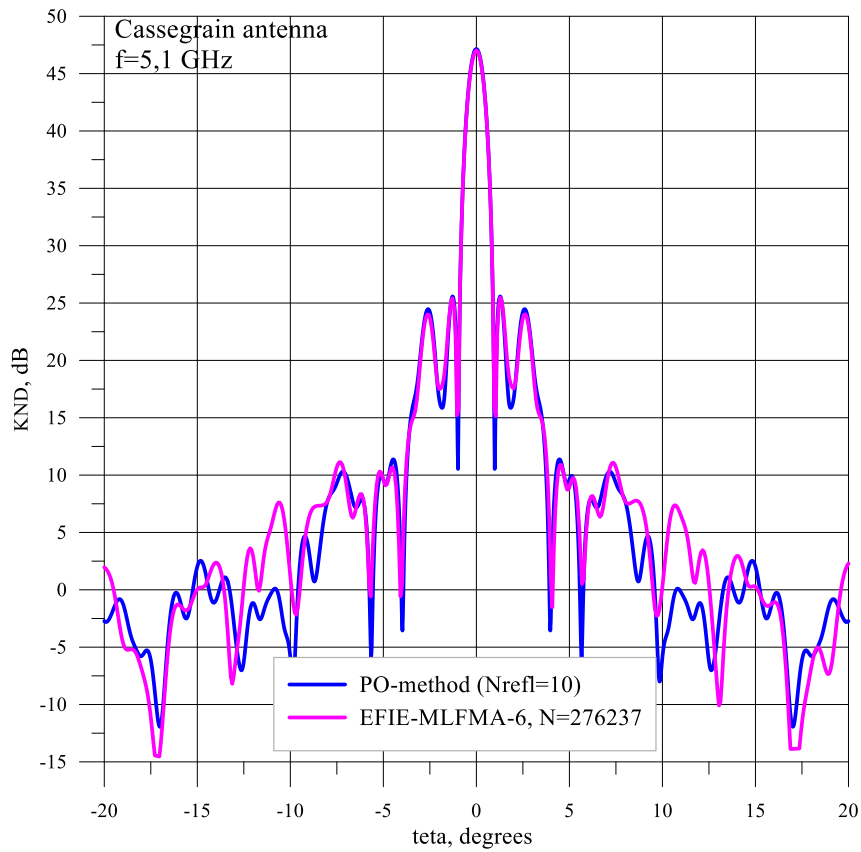


Рис. 4. Расчетный КНД на частоте  $f = 5,1$  ГГц

На рисунке 5 показан расчетный КНД двузеркальной антенны в максимуме ДН в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц (расчет с шагом 5 МГц по методу ФО при  $N_{\text{refl}} = 10$ ). Легко видеть, что на кривой имеются осцилляции, нарушающие монотонный рост с увеличением частоты. На рисунке 6 показан соответствующий расчетный КИП двузеркальной антенны в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц (расчет по методу ФО при  $N_{\text{refl}} = 10$ ). На кривой КИП осцилляции выражены сильнее, имеют максимальную амплитуду на левом краю рабочего диапазона и постепенно затухают с ростом частоты. На рисунке 7 показан расчетный КИП двузеркальной антенны в узком диапазоне частот от 1,4 до 1,9 ГГц (расчет по методу ФО при  $N_{\text{refl}} = 10$ ). По графику определяем, что период осцилляций здесь равен  $\approx 90$  МГц.

Расчет по методу ФО с  $N_{\text{refl}} = 2$  (обычный метод ФО) показал, что в этом случае осцилляции практически исчезают, и во всем частотном диапазоне имеется значение КИП  $\approx 0,7$ . Физической причиной наличия осцилляций КИП двузеркальной антенны в диапазоне частот является изменение амплитудно-фазового распределения электрического тока на главного зеркала из-за многократных переотражений в открытом зеркальном резонаторе. На правом краю частотного диапазона переотражения быстро высвечиваются и оказывают меньшее влияние на характеристики зеркальной антенны.

Для иллюстрации сказанного на рисунке 8 показаны амплитудные распределения на главном зеркале на частоте  $f = 1,7$  ГГц при числе переотражений  $N_{\text{refl}} = 2$  и  $N_{\text{refl}} = 10$ . Данная частота соответствует минимуму КИП на рисунке 7 (расчет по методу интегральных уравнений подтвердил данное значение КИП). Легко видеть, что при увеличении числа переотражений амплитудное распределение концентрируется в небольшой зоне в центре зеркала, что приводит к снижению эффективности антенны. Для полноты на рисунке 9 показаны амплитудные распределения на главном зеркале при числе переотражений  $N_{\text{refl}} = 2$  и  $N_{\text{refl}} = 10$  на частоте  $f = 1,4$  ГГц, которая соответствует максимуму КИП (рисунок 7). Благодаря переотражениям здесь наблюдается заметный рост амплитуды в широкой центральной зоне с почти

равномерным амплитудным распределением, что приводит к росту эффективности антенны.

Наличие осцилляций КИП в антенне Кассегрена может быть объяснено иначе при рассмотрении интерференции полей от первичного и вторичного токов на главном зеркале (как было уже указано, при этом основной вклад от переотражений оказывается учтенным). Рассмотрим падение на контр-рефлектор плоского волнового фронта, создаваемого первичным током на главном зеркале. В диапазоне более длинных волн (на левом краю частотного диапазона) отраженное от контррефлектора вторичное поле будет иметь примерно такую же ДН, какая создается мнимым точечным источником за контррефлектором (поскольку для длинной волны гиперболоид приблизительно эквивалентен параболоиду). В результате этого вторичный ток на главном зеркале будет возбуждаться с амплитудно-фазовым распределением, аналогичным распределению первичного тока. Интерференция полей первичного и вторичного токов главного зеркала приведет к частотным осцилляциям КИП антенны. С ростом частоты амплитуда осцилляций КИП снижается, так как отраженное от контр-рефлектора вторичное поле становится фазопеременным в телесном угле облучения главного зеркала, в результате чего вторичный ток главного зеркала создает ДН с более низким КНД в направлении оси антенны, которая дает меньший вклад в результирующую ДН.

Период осцилляций можно приближенно рассчитать на основании разницы длины пути  $\Delta L$  лучей от облучателя до фокальной плоскости, соответствующих первичному и вторичному токам на главном зеркале. Частотный период осцилляций равен  $\Delta f = \frac{c}{\Delta L}$ , где  $c$  – скорость света в вакууме.

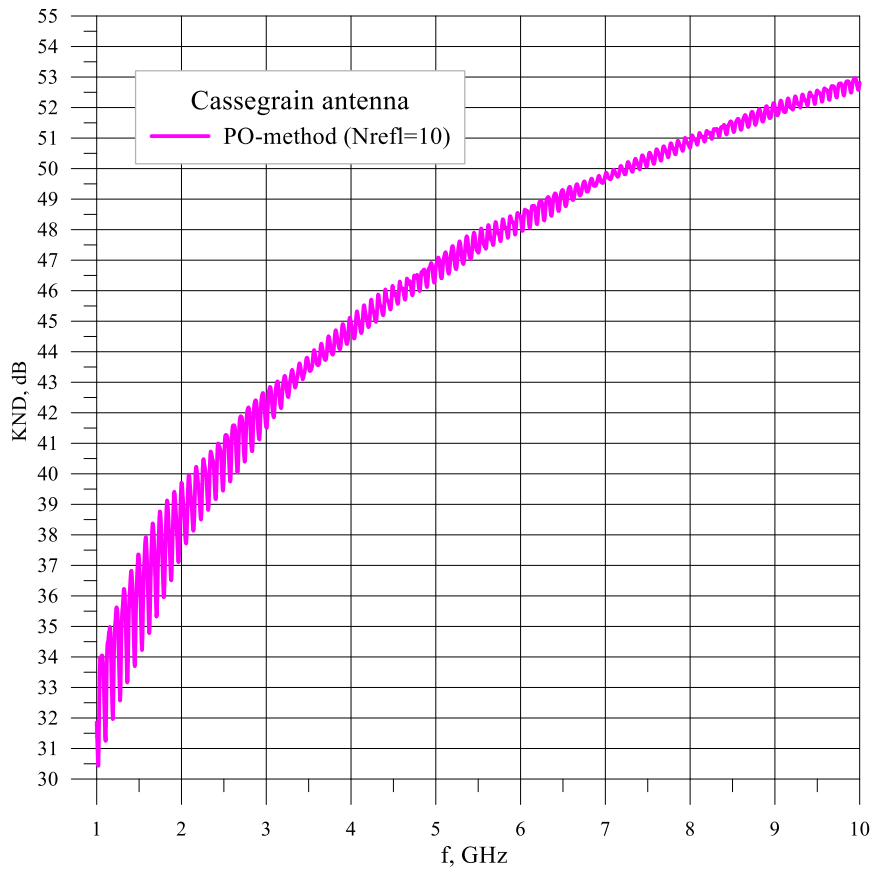


Рис. 5. Расчетный КНД в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц

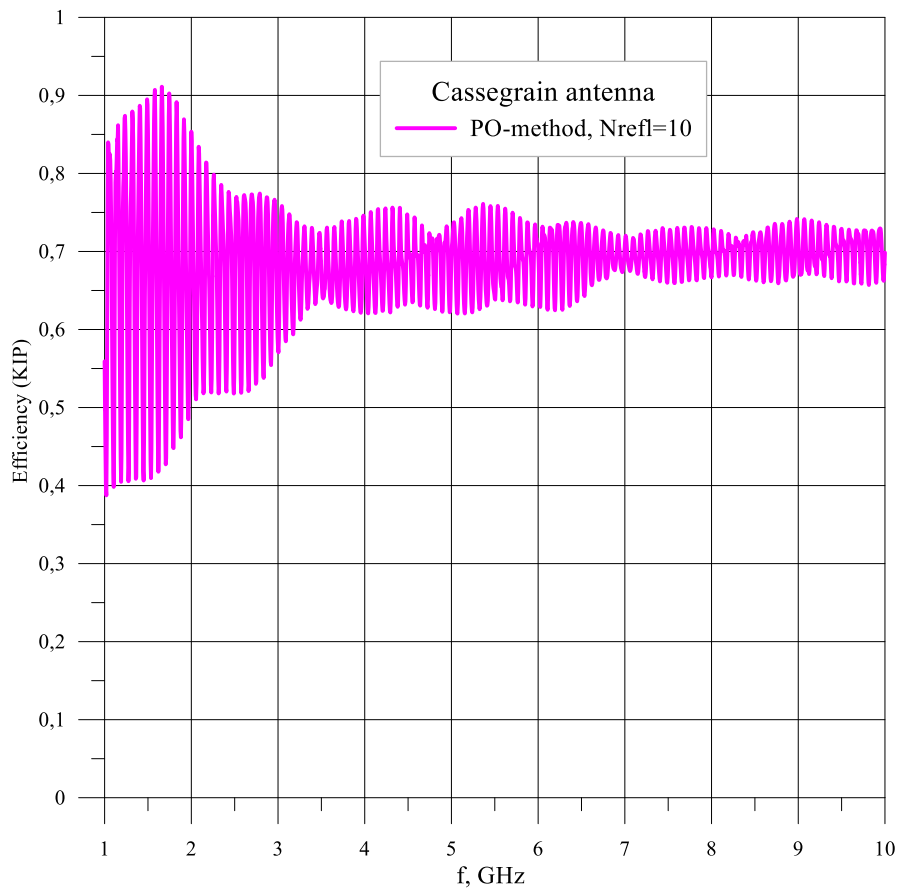


Рис. 6. Расчетный КИП в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц



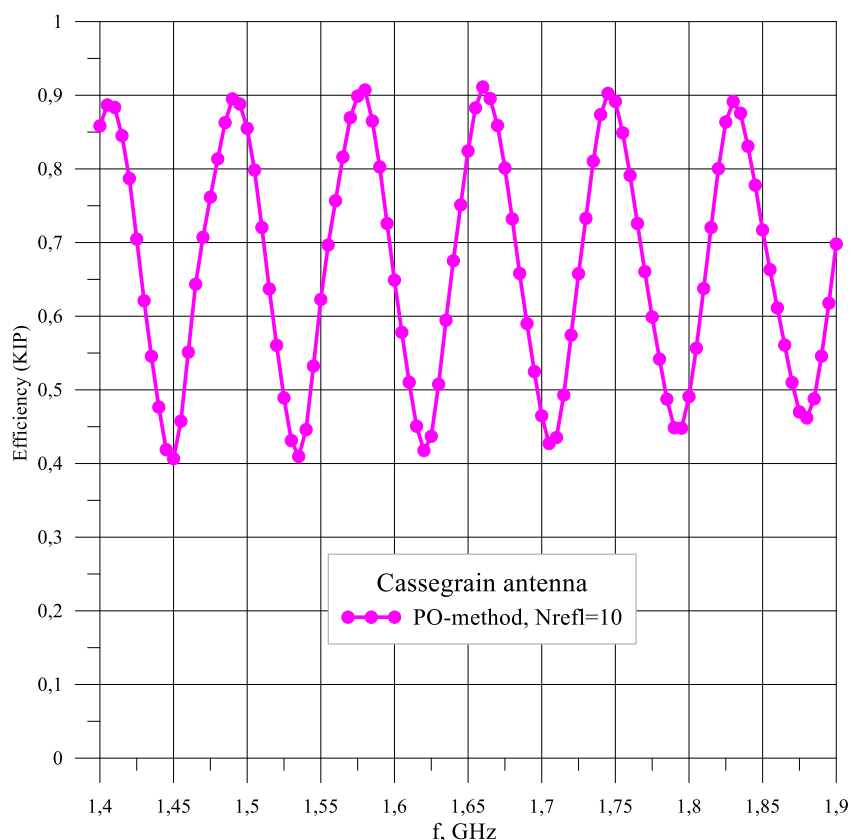


Рис. 7. Расчетный КИП в диапазоне частот от 1,4 до 1,9 ГГц

Разница длин пути  $\Delta L$  приблизительно равна удвоенному расстоянию между вершинами главного зеркала и контррефлектора. Для рассматриваемой антенны Кассегрена (рисунок 1) разница длин пути равна:

$$\Delta L = 2 \cdot \left( F - C_{\text{кр}} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) \right) = 2 \times 1741,5 = 3483 \text{ мм.}$$

Тогда период осцилляций будет равен  $\Delta f \approx 86$  МГц. Данное значение близко к расчетному 90 МГц (рисунок 7).

Если на данной конкретной частоте переотражения привели к минимуму КИП (например, на частоте 1,7 ГГц, см. рисунок 7), то можно поднять КИП изменением фазовых соотношений между первичным и вторичным токами на главном зеркале (в максимуме ДН обеспечить сложение в фазе полей от первичного и вторичного токов на главном зеркале) с помощью перемещения контррефлектора вдоль оси на четверть длины волны. Расчеты показали, что здесь целесообразнее перемещать контррефлектор к зеркалу, так как лучше прорезаются нули боковых лепестков и т.п.

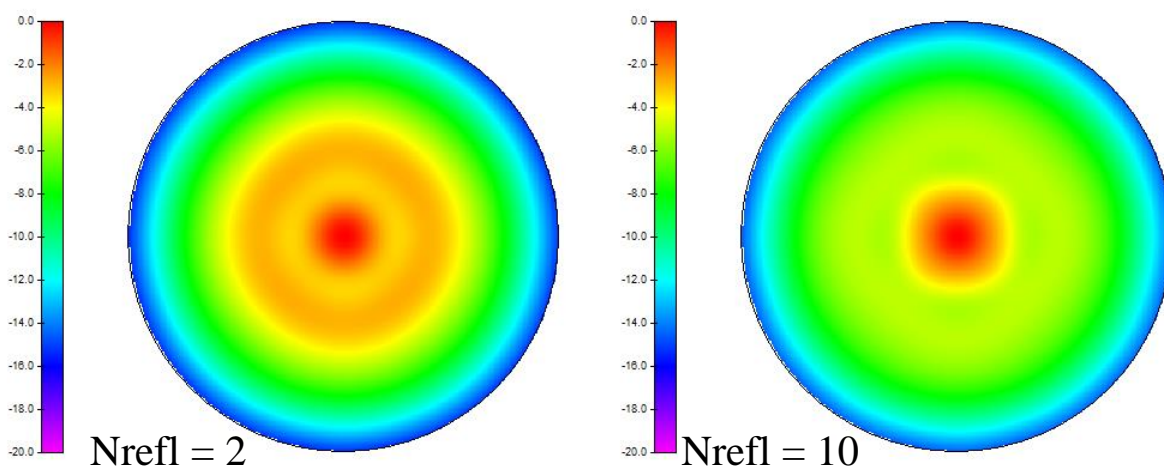


Рис. 8. Расчетное амплитудное распределение на главном зеркале на частоте  $f = 1,7$  ГГц

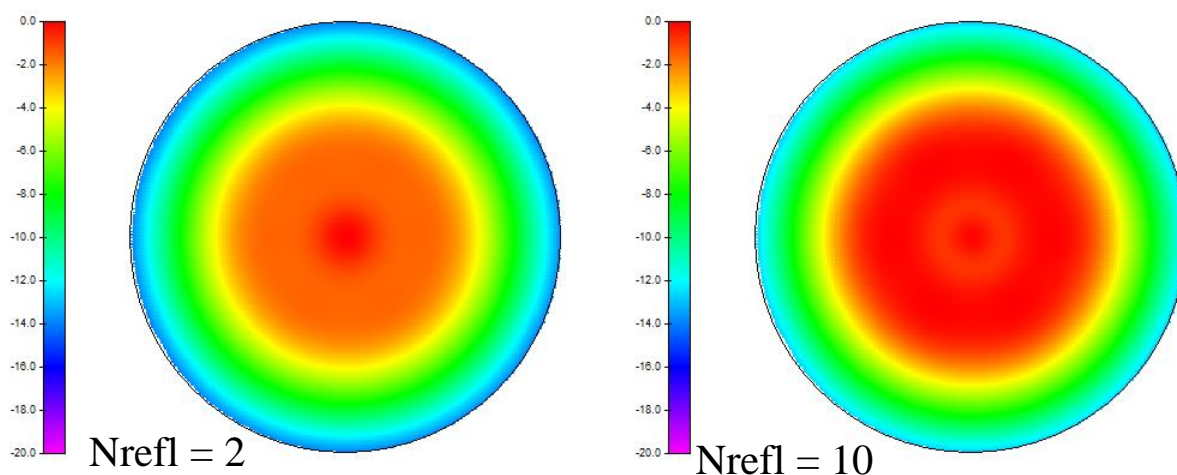


Рис. 9. Расчетное амплитудное распределение на главном зеркале на частоте  $f = 1,4$  ГГц

## Заключение

Для повышения точности расчета двузеркальной осесимметричной антенны по методу физической оптики предложено использовать метод многократных переотражений между контррефлектором и рефлектором, который учитывает вклад вторичных токов на отражателях в формирование результирующей ДН антенны. В качестве примера применения метода ФО с учетом многократных переотражений проведен расчет двузеркальной антенны Кассегрена. Показано, что с увеличением числа учтенных переотражений

наблюдается сходимость результата для расчетных характеристик антенны. Для проверки предложенного метода проведен расчет этой же антенны методом интегрального уравнения электрического поля для неизвестного поверхностного электрического тока на рефлекторе и контррефлекторе. Сравнение показало высокую степень совпадения результатов (КНД, КИП, УБЛ), полученных двумя разными методами. С помощью метода многократных переотражений проведен расчет КНД и КИП зеркальной антенны Кассегрена в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц, который показал наличие осцилляций КИП, затухающих с ростом частоты. Причина возникновения осцилляций состоит в изменении амплитудного распределения на главном зеркале из-за многократных переотражений. Для учета основного вклада от переотражений расчет антенных характеристик должен быть выполнен по крайней мере с использованием первичного и вторичного токов на главном зеркале.

Как уже было указано, рассмотренная модель двузеркальной антенны использует «виртуальный» первичный облучатель, который участвует только в облучении контррефлектора, но не затеняет главное зеркало, также модель не учитывает наличие штанг для крепления контррефлектора. Тем не менее, данная модель учитывает основные факторы, определяющие характеристики антенны, и может применяться на практике при проектировании двузеркальных антенн.

**Автор для переписки:** Лаврецкий Евгений Изидорович, [e.lavretski@mail.ru](mailto:e.lavretski@mail.ru)

### Литература

1. Jorgensen E., Lumholt M., Meicke P., Zhou M. New modelling capabilities in commercial software for high-gain antennas. *6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2012. P.855-859. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2012.6206621>
2. Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. *Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO*. Москва, One book. 2013. 423 с.

3. Белькович И.В. Расчет эффективности зеркальных антенн и лучеводов с учетом неидеальностей поверхностей зеркал и кожуха лучевода с применением векторов Римана-Зильберштейна. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2019. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.14>
4. Белобаба И.Н., Сазонов Д.М. Открытый резонатор для создания высокоинтенсивного сфокусированного электромагнитного поля и его математическая модель. *Сборник Трудов XXVIII Международной научно-технической конференции «Теория и техника антенн – ТТА'98»*. 1998. С.513-515.
5. Уфимцев П.Я. *Метод краевых волн в физической теории дифракции*. Москва, Сов. радио. 1962. 243 с.
6. Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. *Электродинамика и распространение радиоволн*. Москва, Сов. радио. 1979. 376 с.
7. Volakis J., Sertel K. *Integral equation methods for electromagnetics*. Scitech. Publ. 2012. 391 p.
8. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Москва, Наука. 1984. 831 с.
9. Ludwig A. Computation of radiation patterns involving numerical double integration. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 1968. V.16. №11. P.767-769. <https://doi.org/10.1109/TAP.1968.1139296>
10. Imbriale W. *Large antennas of the deep space network*. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. 2002. 316 p.
11. Захаров Е.В., Пименов Ю.В. *Численный анализ дифракции радиоволн*. Москва, Радио и связь. 1982. 184 с.
12. Васильев Е.Н. *Возбуждение тел вращения*. Москва, Радио и связь. 1987. 272 с.

13. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 1982. V.30. №3. P.409-418. <https://doi.org/10.1109/TAP.1982.1142818>
14. Chew W., Jin J., Michielssen E., Song J. *Fast and efficient algorithms in computational electromagnetics*. Artech House. 2001. 931 p.
15. Лаврецкий Е.И. Применение квадратурных формул Гаусса-Лежандра и Эрмита для вычисления интегралов в методе мультипольных разложений. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.7>
16. Saad Y. *Iterative methods for sparse linear systems*. The Society for Industrial and Applied Mathematics Publ. 2003. 447 p.

**Для цитирования:**

Лаврецкий Е.И., Чернышов В.С. Расчет двузеркальной антенны по методу физической оптики с учетом многократных переотражений. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.5>