

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.6>

УДК: 621.396.677

РАСЧЕТ ДВУЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ОПОР СТРОГИМ МЕТОДОМ

Е.И. Лаврецкий, В.С. Чернышов

НИИ Точных Приборов
127490, г. Москва, ул. Декабристов, вл. 51

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2023 г.

Аннотация. Проведен расчет двузеркальной антенны Кассегрена с учетом влияния опор с помощью метода интегрального уравнения электрического поля для поверхностного электрического тока и метода физической оптики с учетом многократных переотражений. Для одной и той же антенны Кассегрена проведено сравнение характеристик на круговой поляризации (КНД, КИП, УБЛ и т.д.) с учетом влияния опор и без учета влияния опор на частотах 1,7 ГГц, 3,4 ГГц и 5,1 ГГц. Выполнен расчет антенных характеристик при разном диаметре установки опор на главном зеркале на частотах 1,7 ГГц и 5,1 ГГц. Результаты расчетов строгим методом показали рост бокового излучения в плоскостях, проходящих через опоры, и рост уровня кросс-поляризации. При этом боковое излучение в срединных плоскостях между опорами примерно соответствует расчетному боковому излучению без учета влияния опор. Проведено сравнение снижения КНД из-за влияния опор, рассчитанного строгим методом и апертурным методом.

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

Автор для переписки: Лаврецкий Евгений Изидорович, e.lavretski@mail.ru

Введение

Конкретная реализация зеркальных антенн приводит к тому, что в них появляются конструктивные элементы, присутствие которых необходимо для обеспечения работоспособности антенн, но они выполняют не электрические функции. Такими конструктивными элементами являются опоры (штанги), служащие для удержания облучающей системы. Обычно в зеркальных антеннах используется четыре опоры (реже три). Опоры оказываются размещены непосредственно в области ближнего поля как облучателя антенны, так и антенны в целом, поэтому могут достаточно сильно влиять на характеристики излучения антенны [1]. В осесимметричных антеннах, выполненных по двузеркальной схеме, опоры служат для удержания контр-рефлектора (заметим, что на практике опоры обычно обеспечивают удержание ригеля, к которому уже крепится контр-рефлектор), или для удержания облучающего устройства в однозеркальных антеннах. Присутствие опор в поле излучения антенны приводит к частичной деформации структуры этого поля, что, в свою очередь, может привести к снижению усиления антенны, к росту бокового и кросс-поляризационного излучений [1].

При проектировании зеркальных антенн требуется проводить расчеты антенн при учете максимального количества факторов, влияющих на характеристики антенны, в том числе при учете влияния опор. Для оценки влияния фактора опор используются несколько подходов. Первый подход базируется на апертурном методе, когда влияние опор оценивается как вклад затененной области в апертурном распределении поля в раскрыве антенны. Достаточно подробно данный подход обсужден в [1, 2], где указано, что метод позволяет оценить потери усиления и рост бокового излучения, но не позволяет оценить изменение поляризационной структуры излучаемого поля. При применении апертурного метода рассматривают плоскую волну, падающую на главное зеркало, для которой за счет опор возникают затенения на главном зеркале (так называемое затенение по плоской волне). Если опоры крепятся не у самого края главного зеркала (a на радиусе $R_q < D/2$, где D – диаметр главного

зеркала), то отраженные от главного зеркала лучи не попадают в облучатель из-за опор (как в однозеркальной, так и в двузеркальной антенне), и возникают еще и зоны затенения по «сферической волне».

Второй подход для оценки влияния опор основан на результатах строгого решения модельной задачи дифракции плоской волны на цилиндрических телах различной конфигурации [1], что позволяет оценить влияние опор не только на деформацию параметров излучения антенны на основной поляризации, но и изменение поляризационной структуры излучаемого поля. В справочнике [3] использовалась следующая последовательность этапов расчета однозеркальной антенны, в которой рупорный облучатель удерживался четырьмя опорами:

- облучатель наводил первичные токи на опорах;
- комбинация поля облучателя и поля первичных токов на опорах использовалась для расчета токов на рефлекторе, что позволяло учесть затенение опорами поля облучателя;
- вторичный ток на опорах возбуждался плоским волновым фронтом, создаваемым токами на рефлекторе;
- результирующая ДН рассчитывалась как комбинация полей облучателя, полей токов на рефлекторе, а также первичных и вторичных токов на опорах.

Результаты расчетов антенны показали повышенный уровень бокового излучения в плоскостях, проходящих через опоры [3].

И наконец, третий подход основан на строгом решении задачи рассеяния первичной ДН облучателя на полной конструкции зеркальной антенны, включающей в себя главное и вспомогательное зеркала, опоры и т.д. В статье [4] проведен расчет по методу интегральных уравнений с помощью алгоритма MLFMA для конкретной двузеркальной антенны, в которой контр-рефлектор удерживался четырьмя опорами. К сожалению, в [4] не были проведены сравнительные расчеты одной и той же антенны с опорами и без опор.

В свете сказанного, возникла идея рассчитать строгим методом одну и ту же двузеркальную антенну без опор и с опорами, что позволит оценить влияние опор. Для расчетов была взята двузеркальная антенна Кассегрена, рассчитанная

ранее в [5] на нескольких рабочих частотах без влияния опор. Представляет интерес рассчитать одну и ту же геометрию антенны с разным радиусом $R_q \leq D/2$ крепления опор на главном зеркале. Как уже обсуждалось, если опоры заканчиваются на краю зеркала, то затенения по сферической волне нет, есть только затенение по плоской волне. Если опоры заканчиваются на радиусе $R_q < D/2$, то от точек крепления опор до краев зеркала возникают трапециевидные зоны затенения по сферической волне.

В [5] был проведен расчет двузеркальной антенны по методу физической оптики (ФО) с учетом многократных переотражений и, для проверки, расчет методом интегрального уравнения для неизвестных поверхностных электрических токов на рефлекторе и контр-рефлекторе. В данных расчетах не учитывалось влияние опор, необходимых для удержания контр-рефлектора. Заметим, что метод интегрального уравнения позволяет рассчитывать произвольную структуру рассеивающих объектов, поэтому опоры могут быть добавлены в математическую модель элементарным образом, что, однако, приводит к росту числа неизвестных.

Предложенный в [5] расчет двузеркальной антенны по методу физической оптики с учетом многократных переотражений продемонстрировал достаточную для практики точность, быстроту расчета и низкие требования к объему оперативной памяти компьютера. Поэтому данный метод имеет перспективы для его применения в расчете антенны Кассегрена с учетом влияния опор. Рассмотрение геометрии антенны Кассегрена позволяет естественным образом опоры считать принадлежностью (продолжением) контр-рефлектора. Тогда, в случае отсутствия затенения по сферической волне, может быть реализован алгоритм расчета двузеркальной антенны по методу [5]. Как и ранее, первичный облучатель здесь наводит токи на контр-рефлекторе, но теперь и на опорах. Далее токи на контр-рефлекторе и опорах наводят токи на главном зеркале, далее токи на главном зеркале наводят вторичные токи на контр-рефлекторе и опорах и т.д.

Цель данной статьи – рассчитать одну и ту же двузеркальную антенну Кассегрена сначала без учета влияния опор, а затем с учетом влияния опор. Основным методом расчета является здесь метод интегрального уравнения электрического тока, дополнительным методом расчета является метод физической оптики с учетом многократных переотражений (но только для случая крепления опор на краю зеркала). Проводится сравнение следующих расчетных характеристик: КНД, уровня бокового излучения в плоскости опор и в диагональной плоскости между опорами, уровня кросс-поляризации.

1. Геометрия зеркальной системы для расчета

Выберем для расчета классическую осесимметричную систему Кассегрена (рисунок 1), которая использовалась в [5]. Параболический рефлектор имеет диаметр $D = 5000$ мм, фокусное расстояние равно $F = 2000$ мм ($F/D = 0,4$), гиперболический контр-рефлектор имеет диаметр $D_{кр} = 750$ мм, эксцентриситет $\varepsilon = 2,1$ и расстояние между фокусами гиперболы $2S_{кр} = 987$ мм. В данной зеркальной системе угол облучения края контр-рефлектора равен $\theta_{\text{макс}} = 25^\circ$, угол облучения края параболического рефлектора равен $\psi_{\text{макс}} = 64^\circ$. Правый фокус контр-рефлектора совмещен с фокусом рефлектором, первичный облучатель установлен в левый фокус контр-рефлектора.

В качестве первичного облучателя применим осесимметричный облучатель круговой поляризации (может быть представлен в виде комбинации двух обобщенных элементов Гюйгенса, где второй развернут на 90° и взят в квадратуре), не имеющий кросс-поляризации. Амплитудную ДН для облучателя по полю возьмем в виде:

$$F_{\text{обл}}(\theta) = \left(\cos \frac{\theta}{2} \right)^p. \quad (1)$$

Значение параметра примем равным $p = 50$, при котором обеспечивается уровень облучения края контр-рефлектора на уровне -10 дБ. Данный облучатель является «виртуальным», участвует только в облучении контр-рефлектора, но не затеняет главное зеркало.

В качестве модели опор рассмотрим прямоугольные полосы в виде тонких металлических экранов (без изгибов), начинающиеся на краю контр-рефлектора и заканчивающиеся на зеркале на радиусе R_q (рисунок 2). Введем между концами опор и отражателями небольшие зазоры (равные $\lambda/2$ на частоте расчета), чтобы не было перетекания токов с отражателей на опоры. Благодаря этому в методе интегрального уравнения электрического тока на всех объектах можно вводить независимые сетки (не потребуется перехода триангуляции поверхностей с отражателей на опоры). Небольшие зазоры практически не влияют на действие опор, так как изменяют только распределения токов на концах опор [3]. Рассмотрим самый распространенный случай, когда используется четыре опоры. Для простоты расположим опоры по осям системы координат, что также позволяет вводить на них сетку простейшим образом. На рисунке 2 показан вид спереди на зеркальную антенну, где изображены четыре одинаковые опоры. На рисунке 3 показан вид на зеркальную систему в изометрии.

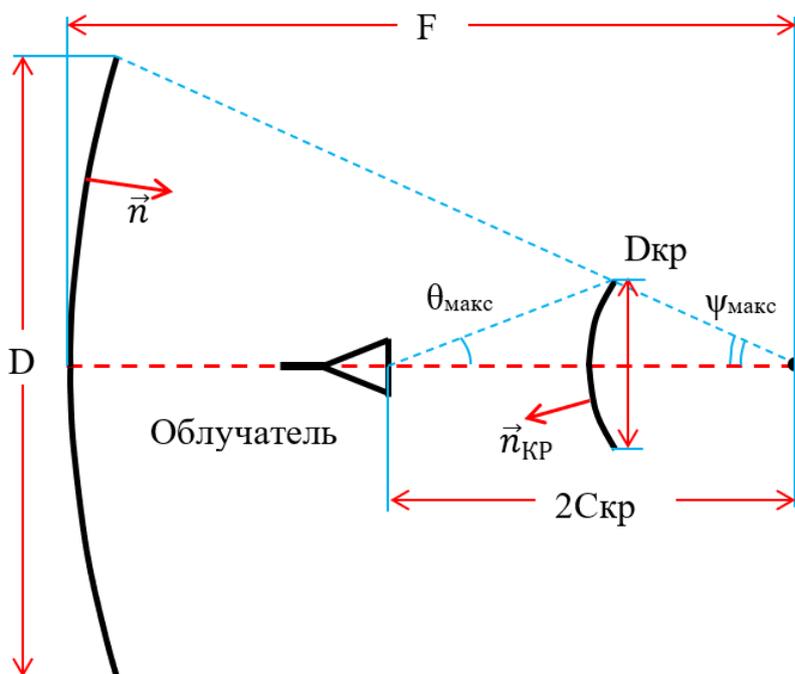


Рис. 1. Зеркальная система антенны Кассегрена (опоры не показаны)

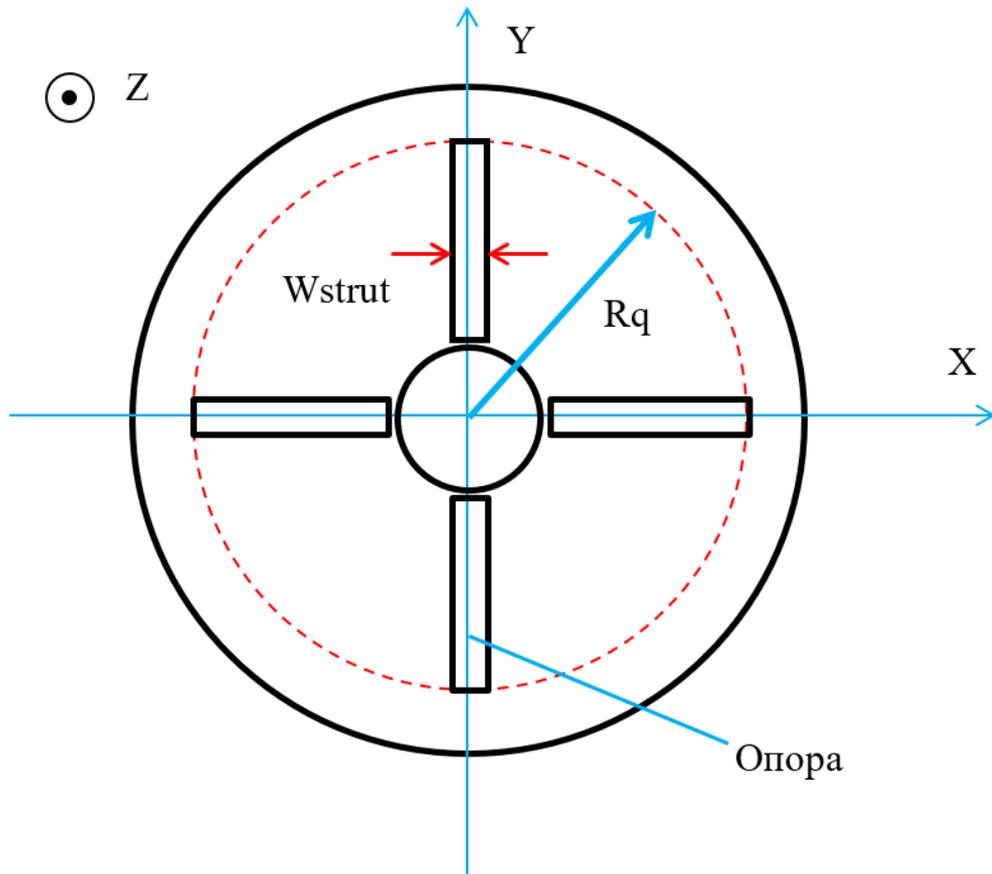


Рис. 2. Вид спереди на зеркальную систему Кассегрена (опоры показаны)

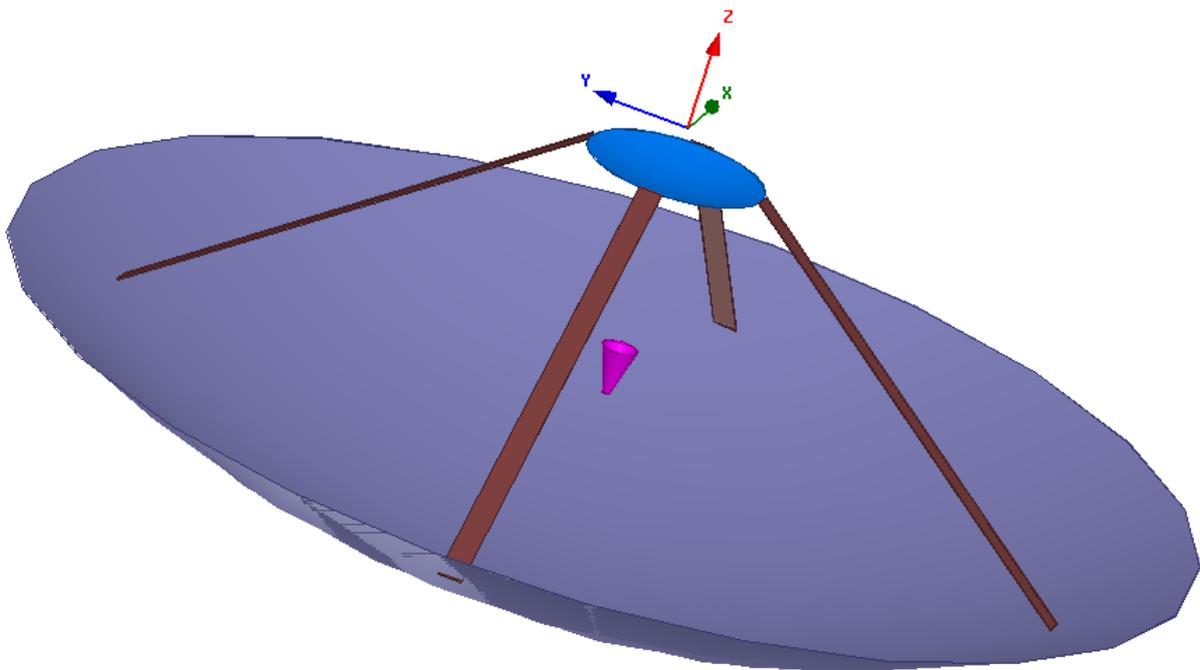


Рис. 3. Вид на зеркальную систему Кассегрена в изометрии

Будем проводить расчет со штангами в виде прямоугольных полосок, имеющих ширину $W_{\text{strut}} = 100$ мм (данная значительная ширина была выбрана, чтобы эффект затенения был сильнее). Для системы из четырех опор данной ширины, идущих от края контр-рефлектора до края рефлектора, расчетное снижение КНД, рассчитанное апертурным методом по аналитическим формулам из [2], равно $\eta \approx 0,906 \approx -0,43$ дБ. Данное снижение КНД учитывает затенение только по плоской волне, которое не зависит от частоты.

2. Результаты расчетов

В таблице 1 приведены результаты расчета зеркальной антенны по методу интегральных уравнений электрического тока на трех частотах (использовался метод MLFMA с 6-ю уровнями [6]). Расчет с учетом опор был выполнен для случая закрепления опор на краю рефлектора ($R_q = D/2$).

В таблице 2 приведены результаты расчета зеркальной антенны по методу ФО с учетом многократных переотражений (расчет без опор и с опорами, закрепленными на краю рефлектора, $R_q = D/2$).

Из сравнения результатов расчета в таблицах 1 и 2 следует, что оба метода дают достаточно близкие результаты расчета КНД, КИП и уровня бокового излучения для структуры без опор и с опорами. При этом одна частотная точка по методу интегральных уравнений рассчитывалась в $40 \div 50$ 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). При введении в модель расчета опор уровень бокового излучения возрастает на $1,5 \div 2$ дБ в плоскостях, проходящих через опоры (в таблицах 1 и 2-плоскость $\varphi = 90^\circ$). В диагональной же плоскости ($\varphi = 45^\circ$) расчет показал даже небольшое снижение УБЛ от 0,3 до 1 дБ (зависит от частоты расчета).

Расчетное снижение КНД из-за влияния опор по методу интегрального уравнения составило 0,56 дБ на частоте 1,7 ГГц, 0,39 дБ на 3,4 ГГц и 0,4 дБ на

частоте 5,1 ГГц (опоры закреплены на краю рефлектора), т.е. $\approx 0,39 \div 0,56$ дБ. В то же время расчетное снижение КНД, рассчитанное апертурным методом по формулам из [2] равно $\eta \approx 0,906 \approx -0,43$ дБ. Следовательно, апертурный метод обеспечивает достаточную для инженерного проектирования точность для оценки снижения КНД в зеркальных антеннах из-за затенения опорами.

В таблицах 3 и 4 приведены результаты расчета зеркальной антенны по методу интегральных уравнений электрического тока на частотах 1,7 ГГц и 5,1 ГГц соответственно, при разном закреплении опор на рефлекторе ($R_q = 1250 \div 2500$ мм). Случай $R_q = 2500$ мм соответствует закреплению опор на краю главного зеркала, $R_q = 1250$ мм – на половинном радиусе главного зеркала. Легко видеть, что для частоты 1,7 ГГц (таблица 3) при уменьшении радиуса закреплении опор R_q происходит незначительное снижение КНД, при этом уровень бокового излучения немного снижается в обеих плоскостях ($\varphi = 45^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$), но затем начинает возрастать. Для частоты 5,1 ГГц (таблица 4) при уменьшении R_q также происходит монотонное снижение КНД, а уровень бокового излучения показывает тенденцию к возрастанию. Расчет апертурным методом дает при $R_q = 1500$ мм снижение КНД за счет затенения $\eta \approx 0,829 \approx -0,81$ дБ [2], в то время как электродинамический расчет показал снижение КНД на $\approx 0,6$ дБ на обеих частотах 1,7 ГГц и 5,1 ГГц.

Таблица 1. Результаты расчета по методу интегральных уравнений электрического тока (опоры на краю рефлектора, $R_q = D/2$)

f, ГГц	Размер матрицы, N	Оперативная память (RAM), ГБ	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ	
					$\varphi = 45^\circ$	$\varphi = 90^\circ$
Без учета опор						
1,7	191465	5,6	35,67	0,466	-17,2	-17,2
3,4	191669	11,7	43,50	0,706	-18,2	-18,2
5,1	276237	25,4	47,07	0,714	-21,6	-21,6
С учетом опор $W_{strut} = 100$ мм (4 шт.)						
1,7	197447	6,2	35,11	0,409	-17,5	-15,5
3,4	197855	12,0	43,11	0,645	-18,9	-16,9
5,1	285533	25,7	46,67	0,651	-22,6	-19,7

Таблица 2. Результаты расчета по методу по методу ФО с учетом многократных переотражений (опоры на краю рефлектора, $R_q = D/2$)

f, ГГц	Число переотражений, N_{refl}	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ	
				$\varphi = 45^\circ$	$\varphi = 90^\circ$
Без учета опор					
1,7	10	35,68	0,467	-17,2	-17,2
3,4	10	43,52	0,710	-18,3	-18,3
5,1	10	47,14	0,726	-21,6	-21,6
С учетом опор $W_{strut} = 100$ мм (4 шт.)					
1,7	10	35,12	0,411	-17,2	-15,5
3,4	10	43,05	0,636	-18,8	-16,8
5,1	10	46,75	0,663	-22,5	-19,7

Таблица 3. Результаты расчета по методу интегральных уравнений электрического тока на частоте 1,7 ГГц при разном закреплении опор на рефлекторе

R_q , мм	Размер матрицы, N	Оперативная память (RAM), ГБ	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ	
					$\varphi = 45^\circ$	$\varphi = 90^\circ$
2500	197447	6,2	35,11	0,409	-17,5	-15,5
2250	196962	6,1	35,14	0,413	-17,6	-15,8
2000	196209	6,1	35,09	0,407	-17,9	-15,5
1750	195470	6,0	35,07	0,405	-18,1	-16,2
1500	194706	6,0	35,07	0,405	-18,5	-16,2
1250	193953	5,9	35,04	0,403	-18,4	-15,8

Таблица 4. Результаты расчета по методу интегральных уравнений электрического тока на частоте 5,1 ГГц при разном закреплении опор на рефлекторе

Rq, мм	Размер матрицы, N	Оперативная память (RAM), ГБ	КНД, дБ	КИП	УБЛ, дБ	
					$\varphi = 45^\circ$	$\varphi = 90^\circ$
2500	285533	25,7	46,67	0,651	-22,6	-19,7
2250	284374	25,3	46,66	0,651	-22,7	-19,7
2000	283288	25,2	46,63	0,646	-23,1	-19,6
1750	282156	25,1	46,52	0,630	-22,3	-18,8
1500	281054	25,0	46,46	0,620	-21,7	-18,4
1250	279970	25,0	46,44	0,619	-20,7	-18,7

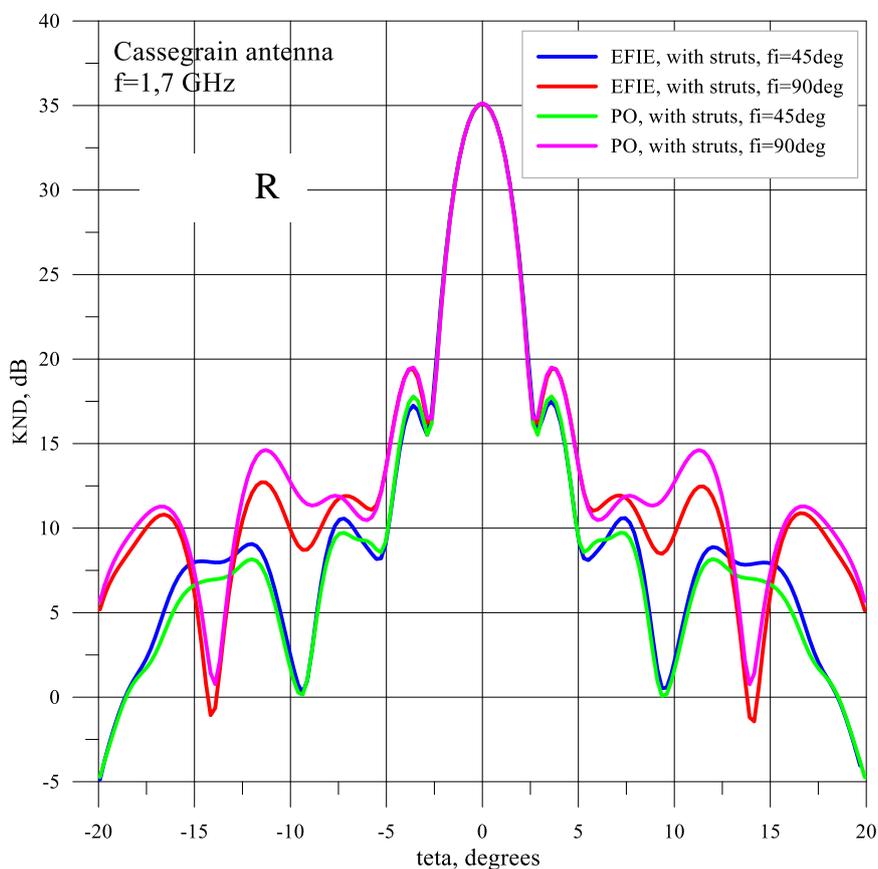


Рис. 4. Расчетный КНД на частоте $f = 1,7$ ГГц (EFIE-MLFMA-6 и PO)

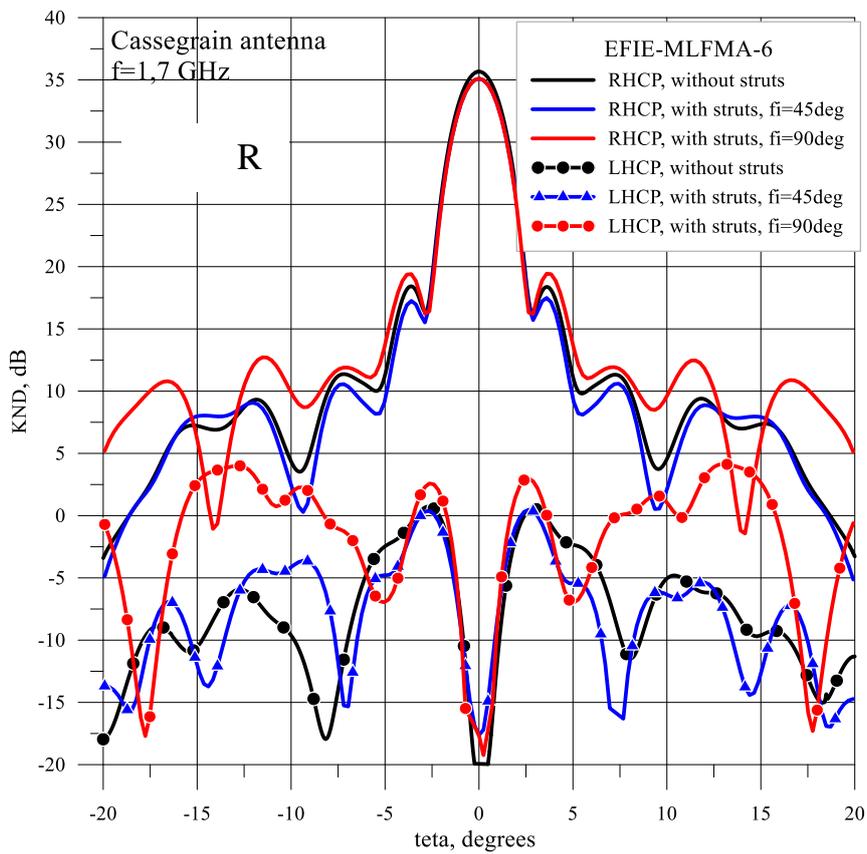


Рис. 5. Расчетный КНД на частоте $f = 1,7$ ГГц (EFIE-MLFMA-6)

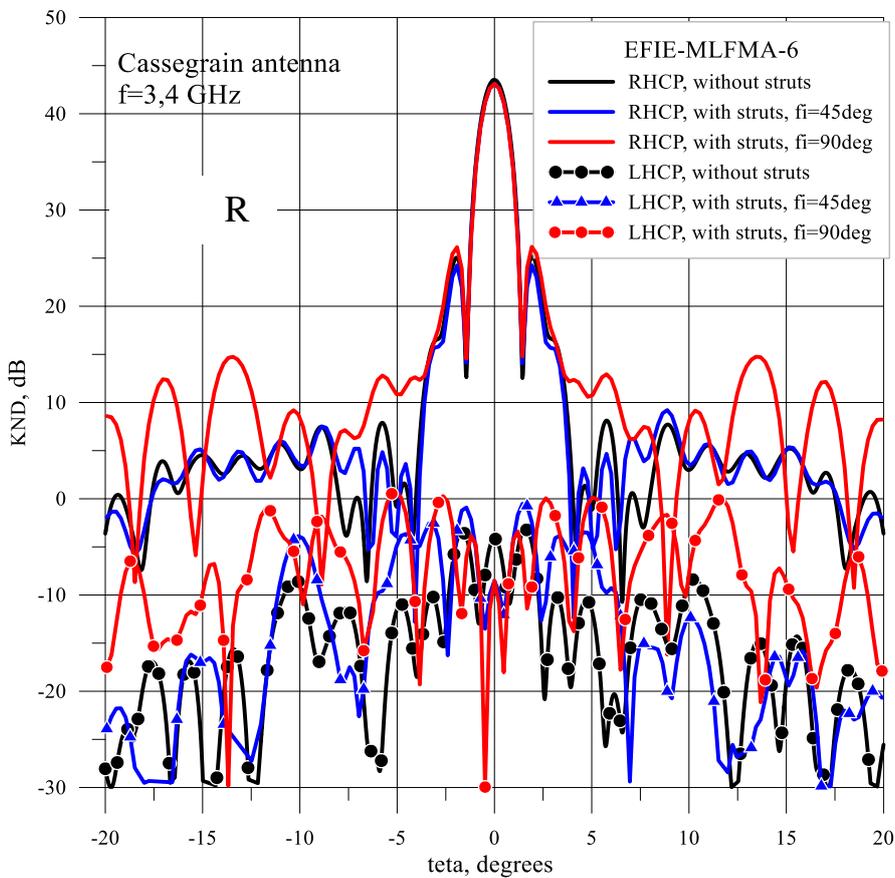


Рис. 6. Расчетный КНД на частоте $f = 3,4$ ГГц (EFIE-MLFMA-6)

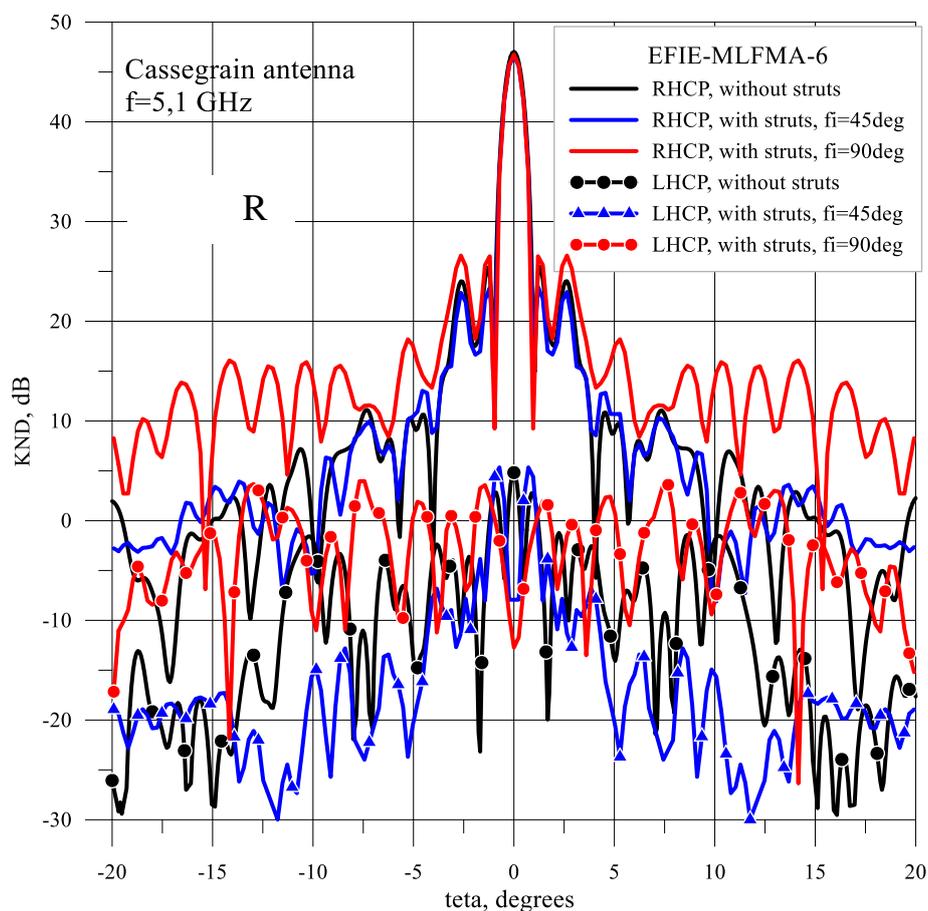


Рис. 7. Расчетный КНД на частоте $f = 5,1$ ГГц (EFIE-MLFMA-6)

На рисунке 4 сравнивается КНД в диапазоне углов на частоте $f = 1,7$ ГГц для антенны с опорами (with struts), закрепленными на краю рефлектора ($R_q = D/2$), рассчитанный по методу ФО с учетом многократных отражений (при числе переотражений $N_{refl} = 10$) и 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 метода ФО с учетом переотражений для рассматриваемой задачи учета влияния опор. Заметим, что граничный размер объекта для применения метода физической оптики равен нескольким длинам волн ($\approx 2\lambda$) [7]. В ситуации, когда метод ФО с учетом многократных переотражений применялся для расчета зеркальной антенны с опорами, поперечный размер опор был небольшим, меньшим граничного размера (например, на частоте 1,7 ГГц $W_{strut} \approx 0,57\lambda$). Это могло приводить к неверному

расчету поперечного распределения тока на опорах. Тем не менее, применение метода ФО позволило получить результат расчета, весьма близкий к результату расчета по методу интегрального уравнения.

На рисунках 5,6 и 7 показан КНД в диапазоне углов, рассчитанный по методу интегральных уравнений на частотах $f = 1,7$ ГГц, $3,4$ ГГц и $5,1$ ГГц соответственно. Расчет был выполнен для антенны без опор (на графике – without struts) и для антенны с опорами (with struts) в двух плоскостях ($\varphi = 90^\circ$ – вертикальная плоскость, проходящая через пару опор, $\varphi = 45^\circ$ – диагональная плоскость между опорами); опоры закреплены на краю рефлектора ($R_q = D/2$). На рисунках показан КНД для главной поляризации (RHCP – right-hand circular polarization) и для кросс-поляризации (LHCP – left-hand circular polarization). Легко видеть, что в плоскости опор возрастает первый боковой лепесток и дальние боковые лепестки, а в диагональной плоскости наблюдается небольшое снижение первого бокового лепестка при сохранении в целом огибающей дальнего бокового излучения. При отсутствии опор кросс-поляризационные ДН являются осесимметричными, при учете опор расчет показывает возрастание уровня кросс-поляризации в плоскости опор.

При практической реализации зеркальных антенн опоры (quadripod) обычно располагают в диагональных плоскостях (под 45° к горизонту). При этом вертикальная и горизонтальная плоскости оказываются точно посередине между плоскостями опор, поэтому в них обеспечивается наименьший уровень бокового излучения и кросс-поляризации.

Заключение

Проведен расчет двузеркальной антенны Кассегрена с учетом влияния опор с помощью метода интегрального уравнения электрического поля для поверхностного электрического тока и метода физической оптики с учетом многократных переотражений. Проведено сравнение характеристик антенны Кассегрена на круговой поляризации, рассчитанных с учетом влияния опор и без учета влияния опор на частотах $1,7$ ГГц, $3,4$ ГГц и $5,1$ ГГц. Оба метода дают

достаточно близкие результаты расчета КНД, КИП и уровня бокового излучения для структуры без опор и с опорами. Результаты расчетов показали рост бокового излучения в плоскостях, проходящих через опоры, и рост уровня кросс-поляризации. При этом боковое излучение и кросс-поляризация в срединных плоскостях между опорами примерно соответствуют расчетным значениям без учета влияния опор. Показано, что апертурный метод обеспечивает достаточную для инженерного проектирования точность для оценки снижения КНД в зеркальной антенне из-за влияния опор.

По методу интегральных уравнений на частотах 1,7 ГГц и 5,1 ГГц были рассчитаны антенные характеристики при разном диаметре установки опор на главном зеркале. Для частоты 1,7 ГГц при уменьшении радиуса закрепления опор R_q происходит незначительное снижение КНД, при этом уровень бокового излучения также немного снижается, но затем начинает возрастать. Для частоты 5,1 ГГц при уменьшении R_q происходит монотонное снижение КНД, а уровень бокового излучения в целом возрастает. Расчеты подтвердили целесообразность расположения опор в зеркальной антенне в 45-градусных плоскостях, что позволяет получить в вертикальной и горизонтальной плоскостях меньший УБЛ и кросс-поляризацию.

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

Литература

1. Фролов О.П., Вальд В.П. *Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи*. Москва, Горячая линия - Телеком. 2012. 496 с.
2. Vaars J. *The paraboloidal reflector antenna in radio astronomy and communication. Theory and practice*. New York, Springer. 2007. 253 p.
3. Rao S., Sharma S., Shafai L. *Handbook of reflector antennas and feed systems. Vol.1. Theory and design of reflectors*. Boston, Artech House. 2013. 309 p.
4. Heldring A., Rius J., Ligthart L., Cardama A. Accurate numerical modeling of the TARA reflector system. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 2004. V.52. №7. P.1758-1766. <https://doi.org/10.1109/TAP.2004.831408>
5. 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>
6. Chew W., Jin J., Michielssen E. and Song J. *Fast and efficient algorithms in computational electromagnetics*. Boston, Artech House. 2001. 931 p.
7. Васильев Е.Н. *Возбуждение тел вращения*. Москва, Радио и связь. 1987. 272 с.

Для цитирования:

Лаврецкий Е.И., Чернышов В.С. Расчет двузеркальной антенны с учётом влияния опор строгим методом. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2023. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.6>