

## **Моделирование и оптимизация характеристик сверхширокополосного облучателя на основе четырех-гребневого расширяющегося рупора**

*В работе представлены результаты имитационного компьютерного моделирования и оптимизации сверхширокополосного облучателя на основе четырех-гребневого расширяющегося рупора с частотным перекрытием 3 - 18 ГГц. В среде электродинамического моделирования СВЧ-структур Ansoft HFSS рассчитаны основные параметры облучателя: КСВН, ДН в Е- и Н-плоскостях и распределение поля в ближней зоне. Проведена оптимизация геометрии области возбуждения облучателя с целью улучшения согласования и развязки каналов линейной поляризации. Результаты компьютерного моделирования сравниваются с соответствующими результатами экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** радиотелескоп, сверхширокополосный облучатель, антенна, моделирование, КСВН, диаграмма направленности

Современная концепция радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), предполагает одновременный прием и обработку сигналов в нескольких частотных диапазонах с общей шириной полосы до 15 ГГц. В Институте прикладной астрономии РАН (Санкт-Петербург) заканчивается разработка проекта двухэлементного радиоинтерферометра нового поколения для проведения фундаментальных и прикладных исследований, для технической реализации которого используются сверхширокополосные (3-18 ГГц) приемники [1].

Одним из наиболее сложных элементов по требованию широкополосности, является антенный облучатель, обеспечивающий требуемое перекрытие частотного диапазона 6:1. В качестве антенной системы радиотелескопа РТ-13 [1] разрабатываемого двухэлементного радиоинтерферометра была выбрана антенная система с геометрией J. K. Lee (осесимметричная двухзеркальная антенна со смещенной осью параболической образующей), фирма – производитель Vertex Antennentechnik (Германия). Диаметр главного зеркала радиотелескопа составляет 13,2 м. Геометрия антенного комплекса радиотелескопа определяет требования к характеристикам облучателя: диаграмма направленности (ДН) облучателя должна иметь циркулярно-симметричную форму близкую к гауссовой и ширина ДН по уровню -16 дБ должна составлять  $\pm 65^\circ$ . Прием излучения должен осуществляться одновременно в двух ортогональных поляризациях радиоволн.

Большинство известных сверхширокополосных облучателей строится на основе логопериодических антенн, которые имеют ряд недостатков, в частности изрезанность диаграммы направленности в области высоких частот, сложность узла возбуждения. Другой подход связан с использованием сверхширокополосного облучателя на основе двух скрещенных излучателей Вивальди. Однако, так как облучатель помещается в криостат фокального модуля радиотелескопа, его конструкция должна обеспечить независимость параметров от расположенных вблизи проводящих поверхностей, что невозможно в случае антенн открытого типа.



Рисунок 1.

1 - корпус; 2 - гребни; 3 - крышка; 4 - выходные разъемы; 5- цанговые зажимы

В качестве прототипа облучателя радиотелескопа РТ-13 был выбран четырех-гребневый расширяющийся рупор (Quad-Ridge Flared Horn) [3], обладающий следующими преимуществами:

- облучатель имеет требуемое перекрытие по частоте (6:1);
- двухканальный СВЧ выход позволяет принимать сигналы двух ортогональных линейных поляризаций;
- волновое сопротивление СВЧ выходов соответствует входному сопротивлению малошумящих усилителей (50 Ом);
- номинальная ширина ДН соответствует конструкции антенной системы радиотелескопа РТ 13 ( $\pm 65^\circ$  по уровню -16 дБ).

Геометрия рупора, и четырех его внутренних продольных гребней автором [3] была оптимизирована для работы в диапазоне 2,3-14 ГГц. Для определения геометрии требуемого облучателя был использован принцип масштабирования с коэффициентом преобразования равным 0.767 [4]. На рис. 1 представлен общий вид облучателя. Он состоит из плавно расширяющегося рупора с четырьмя гребнями, расположенными в двух ортогональных плоскостях. Облучатель работает на двух линейных поляризациях. Возбуждение каждой поляризации осуществляется коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом в зазоре между соответствующей парой оппозитно расположенных гребней. На рисунке 2 представлены результаты электродинамического моделирования поля в ближней зоне и внутри облучателя. Ширина диаграммы направленности определяется отношением эффективного размера апертуры к длине волны. Отрыв поля от гребней облучателя на высоких частотах приводит к уменьшению эффективной апертуры и обеспечивает независимость ДН от частоты [5].

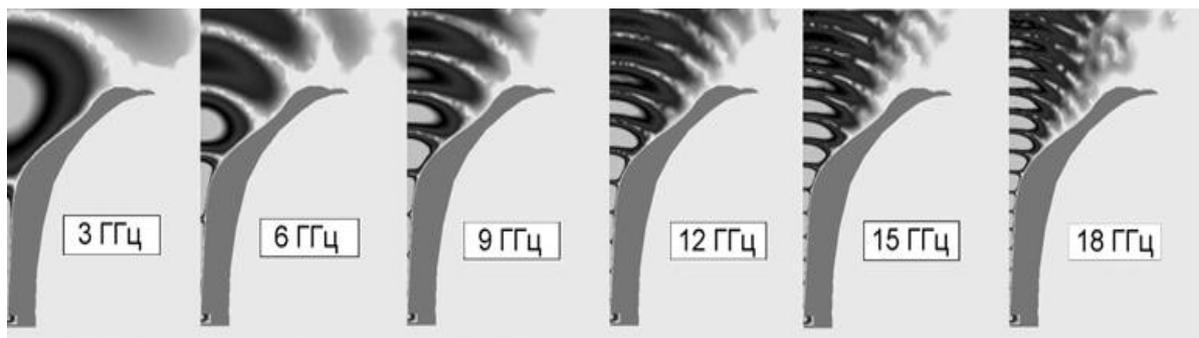


Рисунок 2.

На рис. 3 и 4 приведены диаграммы направленности облучателя в  $E$ - и  $H$ - плоскости соответственно на частотах 3, 8 и 18 ГГц. Видно, что в  $E$ -плоскости диаграмма направленности слабо зависит от частоты. Для углов  $\pm 65^\circ$ , что соответствует кромкам контррефлектора РТ-13, ее уровень составляет  $-13$  дБ по отношению к максимуму. В  $H$ -плоскости ДН не столь стабильна – в зависимости от частоты ее ширина меняется от  $80^\circ$  до  $120^\circ$  (рисунок 4).

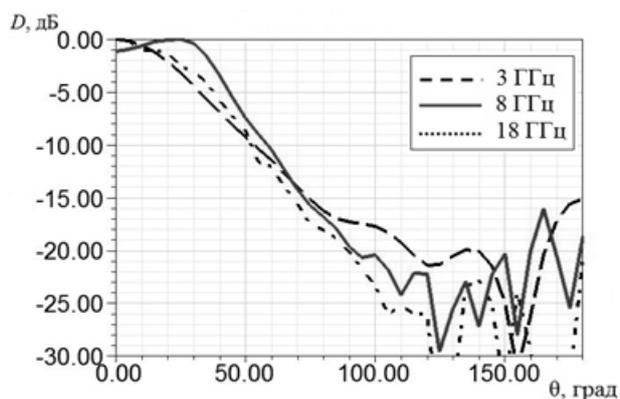


Рисунок 3.

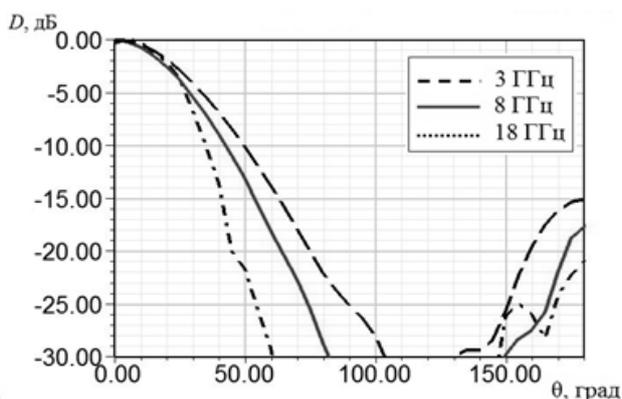


Рисунок 4.

Несмотря на указанные недостатки, ожидаемый коэффициент использования поверхности радиотелескопа РТ-13 с облучателем типа QRFH составляет не менее 50% .

Проведенное моделирование области возбуждения показало сильное влияние конфигурации ребер в горловине облучателя на характеристики согласования и развязки. На рисунке 5 показан фрагмент профиля ребра, соответствующий области возбуждения. Он представляет собой гладкую кривую, за исключением ступеньки шириной  $D$ . Согласно общей теории электродинамики, неоднородность в виде резкого расширения профиля волноводной структуры приводит к отражению распространяющейся волны. Таким образом, происходит передача энергии лишь в направлении излучающей апертуры. В ходе оптимизации был рассмотрен профиль ребер в области возбуждения, изменялась ширина ступеньки  $D$  в начале ребер. На рисунке 6 представлено семейство графиков КСВН в рабочей полосе частот при различной ширине  $D$  – 5,33; 2,40; 1,48.



Рисунок 5.

Для всех кривых характерен подъем КСВН около нижней границы рабочего частотного диапазона. Такое поведение КСВН объясняется приближением нижней границы диапазона к критической частоте для волновода с ребрами, сечение которого совпадает с сечением облучателя в области возбуждения. При уменьшении значения параметра  $D$  наблюдается снижение КСВН в области 8-18 ГГц, однако в пределе малых  $D$  область возбуждения вырождается в регулярный волновод с короткозамкнутыми ребрами, что ведет к потере согласования (см. кривую  $D=1,48$  мм на рис. 6). Численными расчетами было найдено оптимальное значение ширины ступеньки  $D=2,4$  мм.

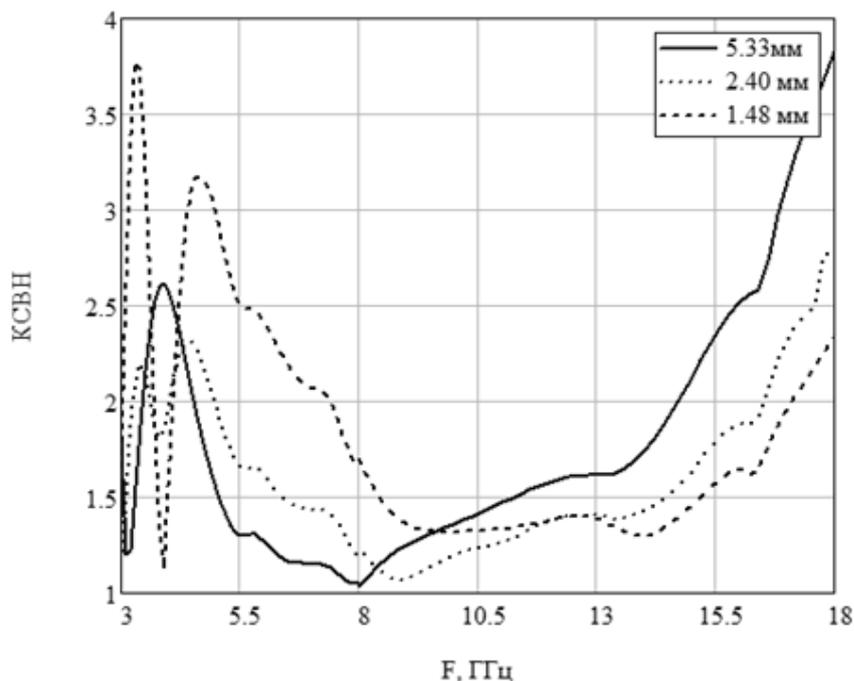


Рисунок 6.

На основании полученных результатов был разработан и изготовлен экспериментальный образец сверхширокополосного облучателя, с учетом ряда технологических сложностей, возникших при масштабировании прототипа [3]. На рисунке 7 представлены результаты измерения КСВН облучателя в диапазоне 3-18 ГГц. Экспериментальные характеристики хорошо согласуются с соответствующими характеристиками, полученными при

компьютерном моделировании. Различия кривых, соответствующих разным каналам линейной поляризации, объясняются необходимым разносом трактов возбуждения каждого из них вдоль оси облучателя.

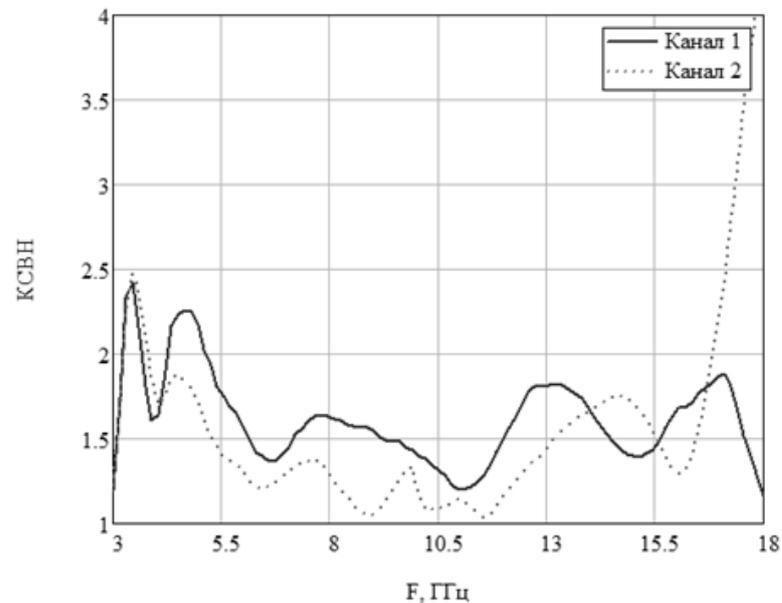


Рисунок 7

В настоящее время на основе результатов решения задачи оптимизации профиля ребер, полученных с помощью компьютерного моделирования, планируется дальнейшая модернизация экспериментального образца сверхширокополосного облучателя для антенной системы радиотелескопа РТ-13.

#### Библиографический список

1. *Ипатов А. В.* Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. №7. С.769-777.
2. *Евстигнеев А.А., Лавров А.С., Мардышкин В.В., Чернов В.К.* Сверхширокополосная приемная система для малых РСДБ радиотелескопов // ВАК-2013, сборник тезисов докладов, 2013. С. 76.
3. *Akgiray A. H.* New Technologies Decade-Bandwidth Radio Astronomy: Quad-Ridged Flared Horn & Compound-Semiconductor LANs // Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2013.
4. *Иванов С.И., Роев А.А., Чернов В.К.* Сверхширокополосный облучатель для телескопов радиоинтерферометрической сети нового поколения//Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Лучшие доклады. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С.185-189.
5. *Роев А.А., Чернов В.К.* Сверхширокополосный облучатель радиотелескопа РТ-13 // ВРК-2014: тезисы докладов. Пушино: Изд-во ПРАО АКЦ ФИАН, 2014. – С.67.