

УДК 621.396.677.833.2

К.И. Кисиленко, В.А. Малахов, А.С. Раевский, В.В. Щербаков

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫ КАССЕГРЕНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчета и измерения параметров антенны Кассегрена. Расчет электрических параметров антенны проводился с помощью пакета программ численного моделирования как единый проект, а для уменьшения времени расчета использовался трехэтапный метод. Результаты расчета согласуются с результатами измерений параметров антенны Кассегрена в СВЧ диапазоне на частоте 29 ГГц. По результатам проведенных исследований предложена методика расчета параметров антенны Кассегрена, позволяющая сократить время расчета и уменьшить затраты вычислительных ресурсов компьютера.

Ключевые слова: антенна Кассегрена, CST Microwave Studio, безэховая камера, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

Введение

Антенна Кассегрена находит широкое применение в системах беспроводной связи. Основные геометрические параметры антенны приведены на рис. 1. Она состоит из рупорного облучателя, вспомогательного зеркала - субрефлектора в виде гиперboloида вращения и основного зеркала в виде параболоида вращения. Преимуществом антенны является небольшой продольный размер, технология их изготовления хорошо отработана [1, 2]. Она позволяет реализовать необходимые электрические параметры, поскольку можно управлять размерами и формой большего количества элементов (два зеркала, облучатель, расстояние между ними). Облучатель обычно размещают у вершины основного зеркала. Это укорачивает длину питающего фидера, что приводит к уменьшению массы антенны, потерь в фидере и снижению шумовой температуры.

Расчет антенны Кассегрена

Расчет, при заданных требованиях, начинают с определения параметров основного зеркала, затем субрефлектора совместно с облучателем. В качестве облучателей антенны Кассегрена обычно используются рупорные антенны и их модификации, так как они наиболее просты конструктивно, хорошо согласуются с питающим трактом, позволяют осуществить работу на двух линейных поляризациях, имеют фазовый центр, обладают широким рабочим диапазоном частот. Наибольшее применение получили пирамидальные и конические рупоры, причем коэффициент усиления рупорного облучателя выбирают так, чтобы обеспечить одинаковое затенение на основном зеркале субрефлектором и раскрытом облучателе. В этом случае антенна будет оптимизирована по коэффициенту использования поверхности (КИП).

Для расчета геометрических параметров антенны на начальном этапе проектирования используем метод геометрической оптики [3].

При заданном коэффициенте усиления антенны G диаметр большого зеркала находится по формуле $D_m = (\lambda/\pi)Gv$, где КИП антенны $v = 0,5...0,7$. Из соотношения $f_m = (0,35...0,5)D_m$ выбираем фокусное расстояние большого зеркала. Используя формулу $D_s \approx (2\alpha f_m)^{1/2}$, рассчитаем диаметр вспомогательного зеркала D_s , где $\alpha = 1,1...1,3$ – коэффициент, учитывающий амплитудное распределение поля в раскрытом облучателе. Площадь раскрытого облучателя у оптимизированной антенны Кассегрена будет равна $(\pi D_s^2)/4$. По формуле $e = (4 f_m + D_m)/(4 f_m - D_m)$ найдем эксцентриситет гиперболы e . Половина угла раскрытого большого зеркала ψ_v и половина угла раскрытого вспомогательного зеркала ψ_r рассчитываются по формулам (1).

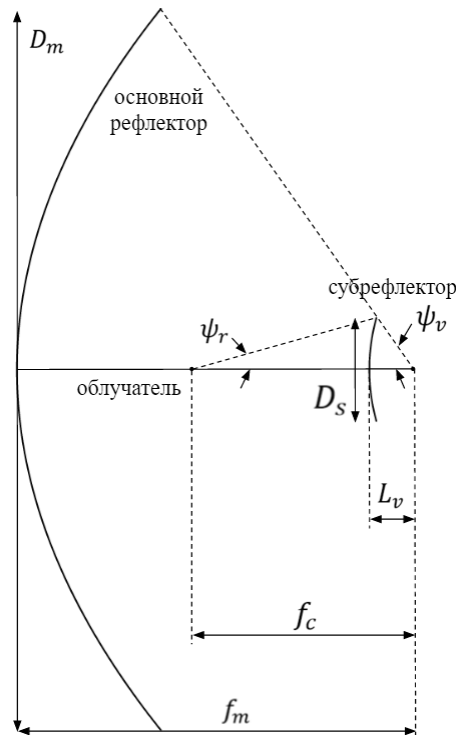


Рис. 1. Основные геометрические параметры антенны Кассегрена

$$\begin{aligned}
 \tan(\psi_v / 2) &= D_m / (4f_m), \\
 \tan(\psi_v / 2) / \tan(\psi_r / 2) &= 2f_c / D_s, \\
 1 - \frac{\sin((\psi_v - \psi_r) / 2)}{\sin((\psi_v + \psi_r) / 2)} &= 2L_v / f_c, \\
 (f_c - L_v) &= L_v (e + 1) / (e - 1).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Дальнейший расчет электрических параметров и характеристик антенны Кассегрена проводим с использованием программы CST Microwave Studio [4], которая предназначена для численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур).

Время расчета электрических параметров антенны Кассегрена на компьютере (параметры: 2 процессора Intel Xeon E5-2690 v2 3.0 GHz, оперативная память 256 Gb DDR3 1666 MHz, интегрированная видеокарта Intel HD Graphics, операционная система Windows 7 Pro) занимает порядка 4-5 ч. Для оптимизации, а также экономии времени и вычислительных ресурсов, расчеты проводились в несколько этапов.

На первом этапе моделировался рупорный облучатель, являющийся источником первичного электромагнитного излучения. При анализе полученных результатов вычисляется фазовый центр рупора, а ДН в дальней зоне сохраняется как источник поля.

Далее создается новый проект для расчета вспомогательного зеркала. На втором этапе, используя результаты вычислений облучателя, определяли токи на поверхности субрефлектора, через которые находится излучение, отраженное от субрефлектора. В проект импортируется ДН рупора в дальней зоне и помещается в фокус гиперболического зеркала, учитывая фазовый центр рупора. При анализе полученных результатов вычисляется фазовый центр системы, а ДН в дальней зоне сохраняется как источник поля.

В третьем проекте рассчитывается основное зеркало. В проект импортируется ДН в дальней зоне предыдущего проекта и помещается в фокус параболического зеркала, учитывая фазовый центр предыдущего проекта. На третьем этапе вычислялись токи на поверхности основного рефлектора, через которые определялось поле антенны Кассегрена в дальней зоне.

Суммарный расчет всех трех проектов занимает порядка 30 мин, что существенно быстрее расчета всей антенны Кассегрена как единого проекта.

Такой трехэтапной методикой была рассчитана антенна Кассегрена на частоту 290 ГГц [2]. Данная поэтапность позволяет существенно сократить время расчета, но не учитывает взаимного влияния зеркал. Для сравнения результатов расчета выполненных трехэтапным и одноэтапным методом был произведен расчет антенны Кассегрена без разбивки на этапы - как один проект.

В качестве исследуемой была выбрана антенна Кассегрена, используемая в частотном диапазоне 28-30 ГГц, имеющая диаметр основного и вспомогательного зеркал 190 и 39,6 мм соответственно. В качестве облучателя для антенной системы использовался пирамидальный рупор, питаемый прямоугольным волноводом сечением 7,2x3,4 мм.

Расчет рупора проводился в частотной области с использованием программы CST Microwave Studio на средней частоте 29 ГГц. Геометрические размеры этого облучателя подбирались из условия оптимальности. Питающий фидер длиной 10 мм. Длина пирамидального рупора 40 мм при раскрыве размерами 30,5 на 18,2 мм.

Результаты расчета диаграммы направленности в плоскостях E и H рупора приведены на рис. 2.

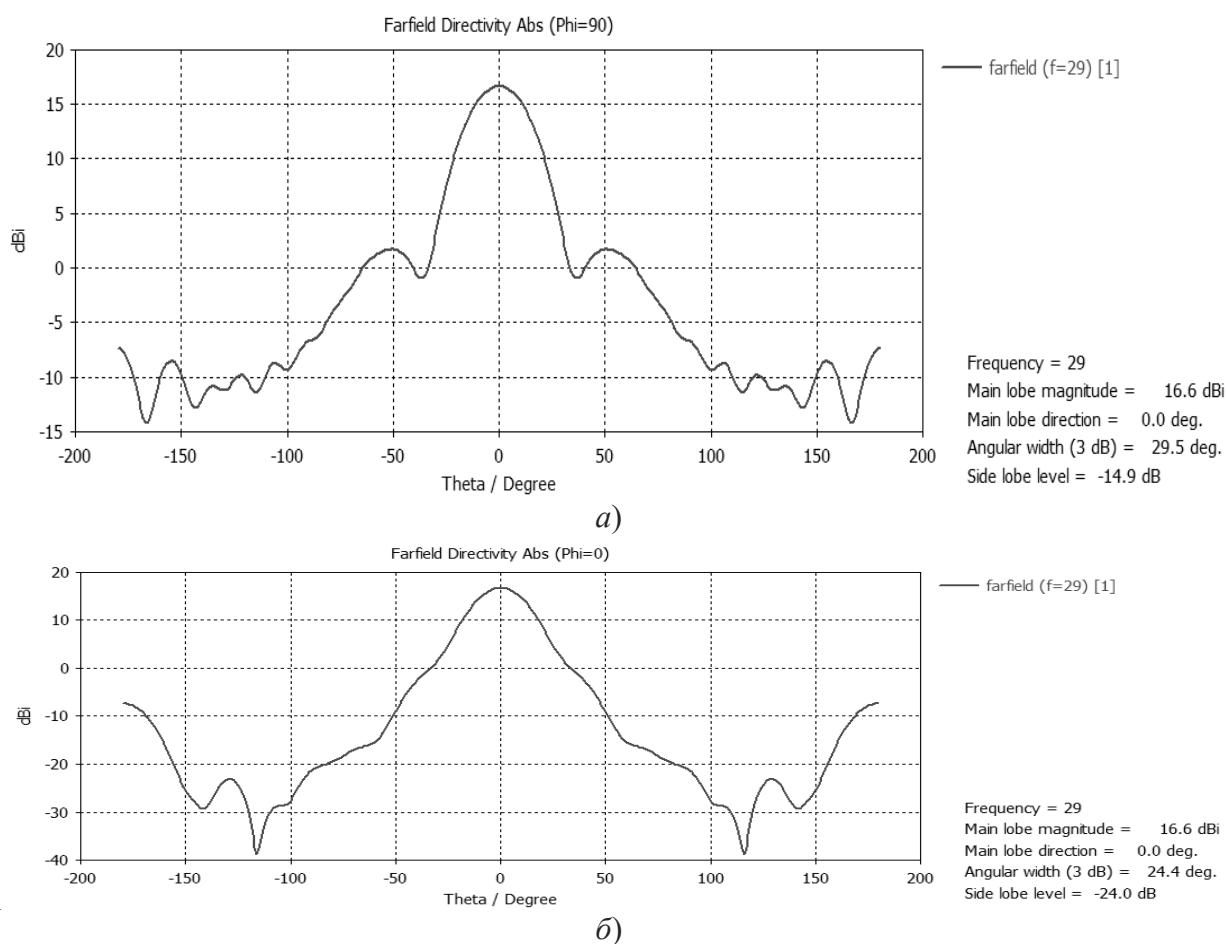


Рис. 2. Диаграмма направленности пирамидального рупора:
 a – E -плоскость; b – H -плоскость

Результаты расчета диаграммы направленности в H -плоскости исследуемой антенны Кассегрена, выполненные трехэтапным (a) и одноэтапным (b) методами расчета на частоте 29 ГГц, приведены на рис. 3. В E -плоскости диаграмма направленности принципиально не отличается от диаграммы направленности в H -плоскости, поэтому она здесь не приводится.

Как видно из графиков, результаты, полученные трехэтапным методом расчета коэффициента усиления антенны, дают больший на 0,3 дБ результат по сравнению с одноэтапным. Однако трехэтапный метод расчета не учитывает взаимного влияния зеркал антенны. Одноэтапный метод дает меньшее значение КУ, так как он учитывает многократные отражения от зеркал антенны, и благодаря дифракции все большая часть энергии будет рассеиваться, образуя боковые лепестки ДН антенны, уменьшая тем самым КУ антенны. Чтобы убедиться в правильности проводимых расчетов одноэтапным и трехэтапным методом, было принято решение сравнить результаты расчета с результатами экспериментальных исследований.

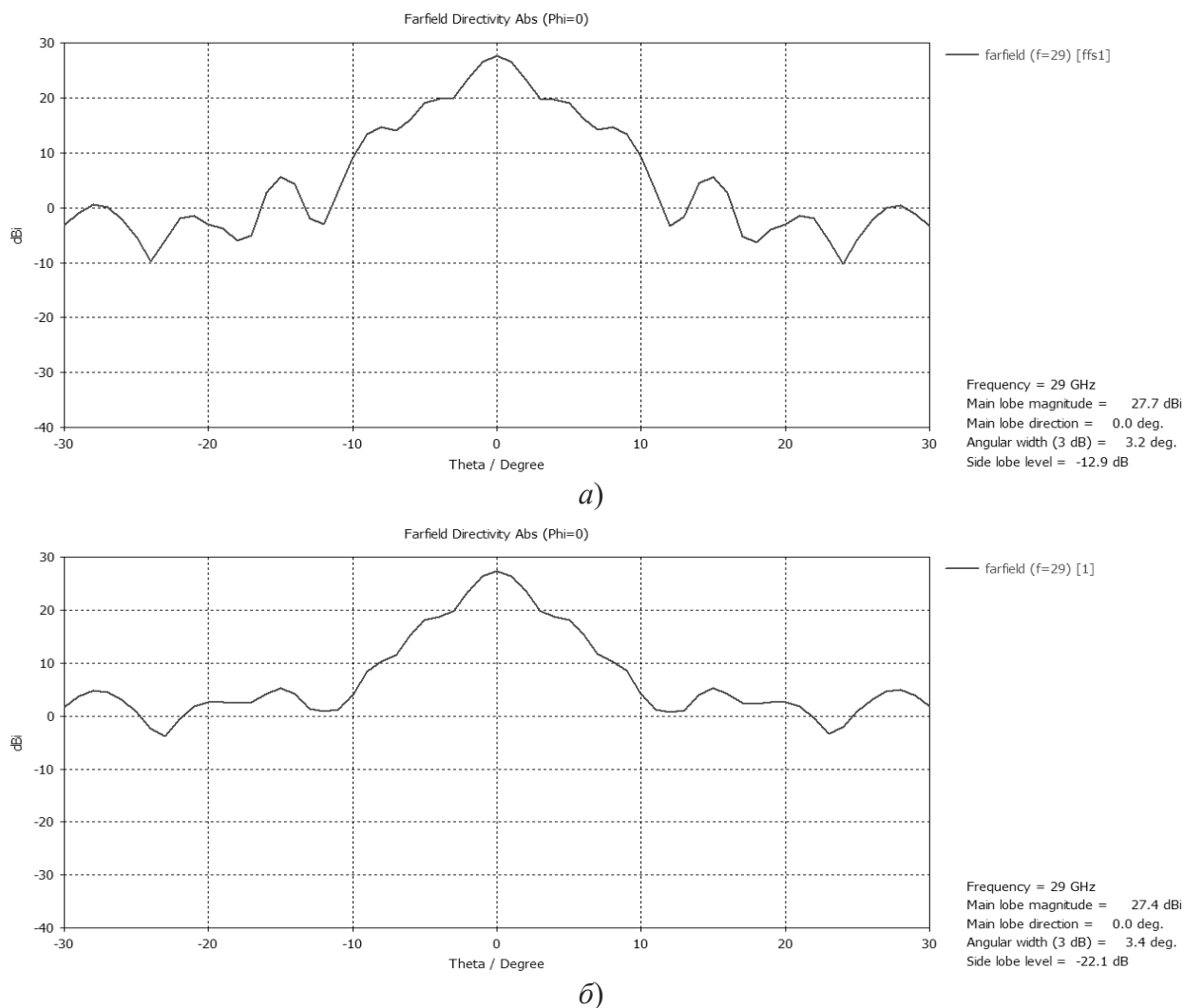


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны Кассегрена в H плоскости на частоте 29 ГГц:
a – трехэтапная методика расчета; *б* – одноэтапная

Экспериментальное исследование антенны проводилось по стандартизированной методике измерения в дальней зоне в безэховой камере [5] с коэффициентом безэховости не хуже минус 40 дБ. Шаг измерения ДН составлял 10 угловых минут. Настройка антенны на максимальное значение КУ проводилась регулировкой субрефлектора по трем координатам. Результаты экспериментального исследования исследуемой антенны приведены на рис. 4.

Результаты эксперимента отличаются от результатов расчета для коэффициента усиления трехэтапным методом не более 3 дБ, а от одноэтапного не более 3,3 дБ.

Сравнение результатов расчета и измерений параметров антенны дает возможность предложить процедуру расчета антенны Кассегрена, позволяющей экономить время расчета

и вычислительные ресурсы компьютера. Сначала методом геометрической оптики, исходя из требуемого коэффициента усиления, выполняется расчет геометрических параметров антенны. Затем выполняется расчет облучателя антенны на основе условия одинакового затенения создаваемого раскрытом облучателя и субрефлектором. Далее с помощью трехэтапной методики выполняется расчет геометрических параметров антенны, при этом добиваются требуемого значения коэффициента усиления. Заключительным шагом является расчет с помощью одноэтапной методики с целью получения более точного значения КУ антенны.

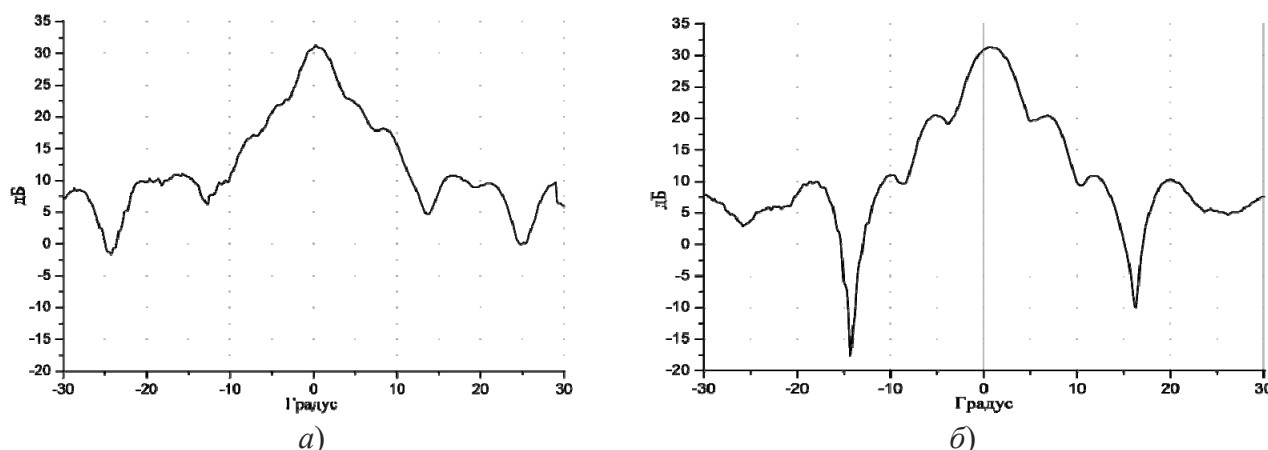


Рис. 4. Измеренная диаграмма направленности антенны Кассегрена на частоте 29 ГГц:
а – *E*-плоскость; *б* – *H*-плоскость

Следует отметить, что используемые при расчете программы позволяют моделировать дефекты или возможные смещения элементов антенны друг относительно друга, которые могут возникнуть в реальной ситуации при ее настройке. В результате можно определить диапазон смещений элементов антенны, при которых это не приводит к выходу параметров антенны за предельно допустимые границы.

На рис. 5 приведена зависимость влияния на КУ антенны Кассегрена изменения расстояния между рупором и субрефлектором. Показано, что при смещении на расстояние, равное длине волны, КУ изменяется на 0,5 – 0,8 дБ.

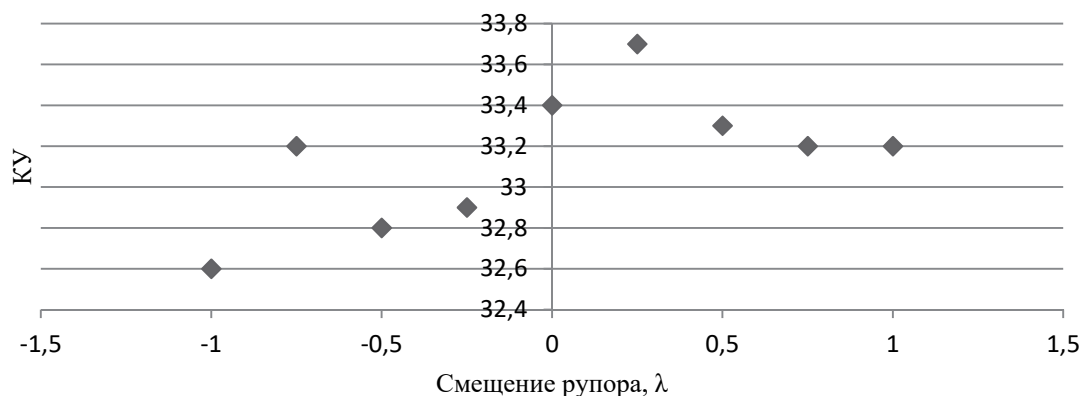


Рис. 5. Влияние на коэффициент усиления перемещения рупора вдоль оси симметрии антенны Кассегрена

На рис. 6 приведена зависимость влияния на КУ антенны Кассегрена смещения рупора в фокальной плоскости. Левая часть графика - рупор смещается вдоль узкой стенки прямоуголь-

ного волновода, а правая - вдоль широкой стенки. Показано, что при смещении на расстояние, равное длине волны, КУ в первом случае уменьшается на 2,15дБ, а во втором – на 3,65дБ.

На рис. 7 приведена зависимость влияния на КУ антенны Кассегрена при повороте рупора относительно оптической оси антенны. Показано, что при повороте рупора в диапазоне ± 2 градуса КУ остается постоянным, а при повороте рупора в диапазоне ± 5 градуса КУ изменяется на величину 0,1 – 0,3дБ.

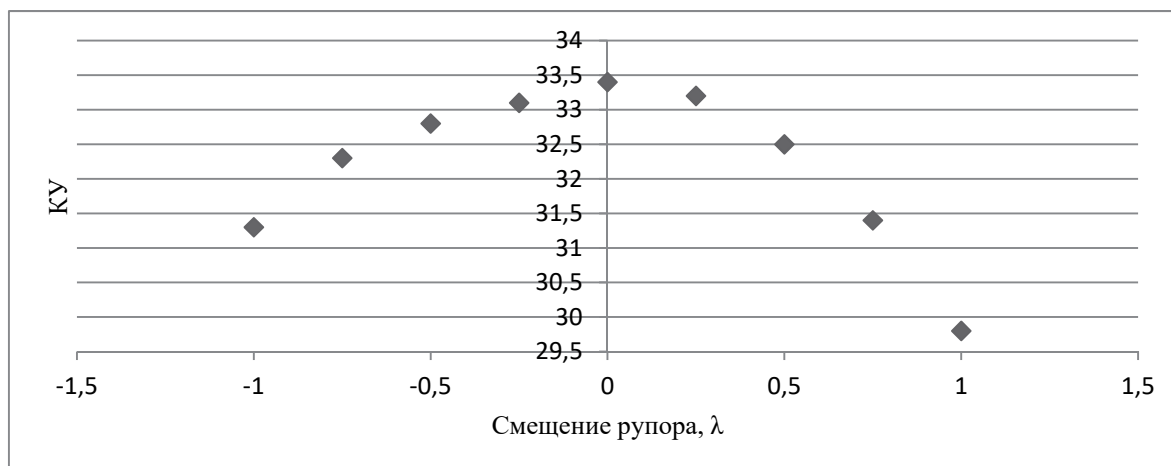


Рис. 6. Влияние на коэффициент усиления антенны Кассегрена перемещения рупора в фокальной плоскости

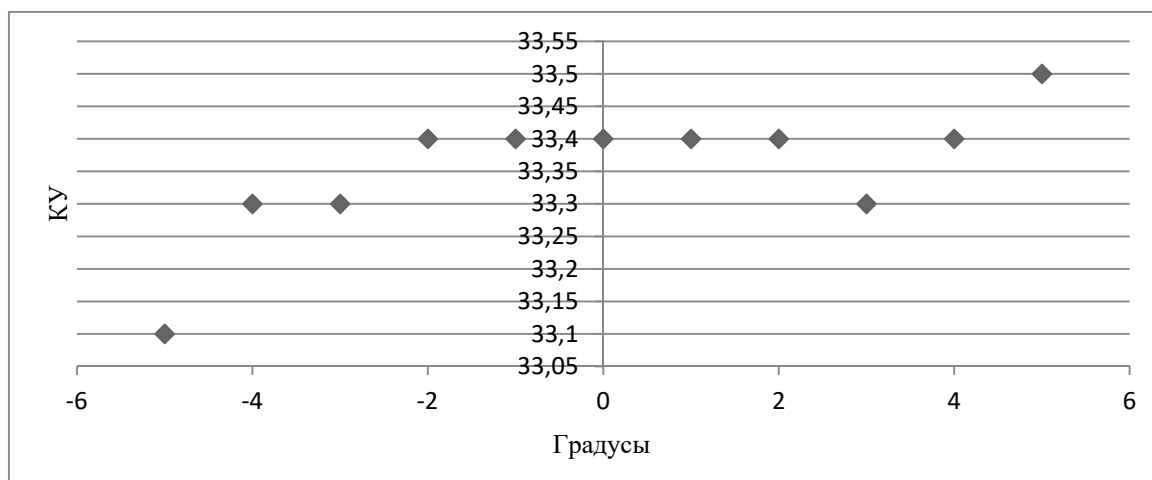


Рис. 7. Влияние на коэффициент усиления при повороте рупора относительно геометрической оси симметрии антенны Кассегрена

Заключение

В данной работе приведены результаты расчета и измерения характеристик антенны Кассегрена на частоте 29 ГГц трехэтапным и одноэтапным методом с помощью программного пакета CST Microwave Studio. Создана модель, позволяющая быстро и эффективно проводить расчеты основных параметров и характеристик антенны Кассегрена, а также учитывать технические неточности при изготовлении и настройке антенны. При использовании трехэтапной методики расчета можно существенно сократить время расчета, однако в этом случае модель не учитывает взаимного влияния зеркал антенны. Одноэтапная методика расчета дает более правильные результаты. Сравнение результатов расчета и экспериментальных исследований параметров антенны дает возможность предложить процедуру расче-

та антенны Кассегрена, позволяющая экономить время расчета и вычислительные ресурсы компьютера.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова Варенцову Е.Л. и Дудкину М.И. за помощь при проведении измерений антенны.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ №17 – 19 – 01628.

Библиографический список

1. **Ху, Х.** Terahertz Cassegrain Reflector Antenna / X. Xu, X. Zhang, Z. Zhou // Antennas & Propagation (ISAP), 2013 Proceedings of the International Symp. – 2013. – P. 969–971.
2. **Кисиленко, К.И.** Моделирование и расчет антенны Кассегрена на 290 ГГц / К.И. Кисиленко, [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – №4. – С. 46–52.
3. **Бахрах, Л.Д.** Зеркальные сканирующие антенны: Теория и методы расчета / Л.Д. Бахрах. – М.: Наука, 1981. – 304 с.
4. CST – Computer Simulation Technology [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cst.com>
5. Методы измерений характеристик антенн СВЧ / под ред. Н.М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.

*Дата поступления
в редакцию 08.07.2017*

K. I. Kisilenko, V. A. Malakhov, A. S. Raevskii, V. V. Shcherbakov

CALCULATION AND MEASUREMENT OF PARAMETERS OF ANTENNA CASSEGRAIN

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Purpose: Calculation and measurement Cassegrain antenna with high gain used for wireless communication systems.

Design/methodology/approach: Calculation of electrical parameters of the antenna were carried out using the software package of numerical simulation. To reduce calculation time, used a three-step method. However, a three-stage method of calculation does not take into account the mutual influence of the mirrors of the antenna. Why was the calculation of a Cassegrain antenna, without division into phases as one project. In order to verify the accuracy of the calculations, it was decided to compare the calculation results with the experimental results in 29 GHz.

Originality/value: Created program allows to quickly and efficiently carry out the calculations of the basic parameters and characteristics of a Cassegrain antenna, which also allows to simulate the technical inaccuracies in the manufacture and adjustment of the antenna. When using a three-step design procedures can significantly reduce the computation time, but in this case, the model does not take into account the mutual influence of the mirrors of the antenna. Single-stage calculation method gives more correct results.

Key words: Cassegrain antenna, CST Studio, anechoic chamber, radiation pattern, gain.