

РАСЧЕТ ЗЕРКАЛЬНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ САПР СВЧ

А.Курушин, Е.Лаврецкий, С.Чадов

В размеры современных зеркальных антенн для спутниковой связи и радиоастрономии (от десятков сантиметров до сотен метров [1]) укладываются сотни длин волн и более. Расчет таких больших структур строгими электродинамическими методами требует значительных вычислительных затрат. Для анализа и расчета характеристик излучения зеркальных антенн большого электрического размера применяются приближенные методы геометрической оптики и геометрической теории дифракции, а также методы физической оптики и физической теории дифракции [2–4].

В большинстве случаев применяется наиболее эффективный и точный метод физической оптики, дающий аппроксимацию поверхностного электрического тока для идеально-проводящих рассеивателей (рефлекторов). Ключевой алгоритм численного расчета этого метода основан на формуле

$$\vec{J}^s = 2[\vec{H}, \vec{n}], \quad (1)$$

где \vec{n} – вектор нормали для каждой точки поверхности рефлектора, \vec{H} – вектор магнитного поля, создаваемого в этой точке первичным облучателем ($[A/m]$), \vec{J}^s – поверхностный электрический ток на металлическом рефлекторе ($[A/m]$). Далее по известному электрическому току (1) находится поле излучения зеркальной антенны (вторичное поле). Расчет вторичного поля сводится при этом к вычислению соответствующих двумерных интегралов Фурье от поверхностного электрического тока.

Таким образом, этот метод не требует решения системы линейных алгебраических уравнений большого порядка, к чему сводится большинство электродинамических методов решения системы уравнений Максвелла.

Применение метода физической теории дифракции [3, 4] позволяет учесть еще более тонкие по сравнению с методом физической оптики

эффекты дифракции первичного поля облучателя на кромке зеркала. Как правило, это дает уточнение уровня дальних боковых лепестков поля излучения антенны. Однако численная реализация метода физической теории дифракции более сложна и неуниверсальна. На практике необязательно применять этот метод для анализа больших антенн.

Заметим, что при анализе зеркальных антенн метод геометрической оптики менее точен, чем физической. Метод геометрической оптики не учитывает поляризационные эффекты – в частности, при анализе зеркальных антенн апертурным методом. Метод геометрической теории дифракции по точности примерно равен методу физической оптики.

Анализ и проектирование зеркальных антенн обычно выполняется с помощью уникальных, приспособленных для решения конкретных задач программ. Промышленный стандарт для точного моделирования зеркальных антенн – коммерчески распространяемая специализированная программа GRASP, разработанная компанией TICRA [5]. Еще одна программа для решения таких специализированных задач – Mitgor [6] – разработана в ОКБ Московского энергетического института. Она предназначена для решения задачи облучения рефлектора системой излучателей. Скорость решения задач подобными специализированными

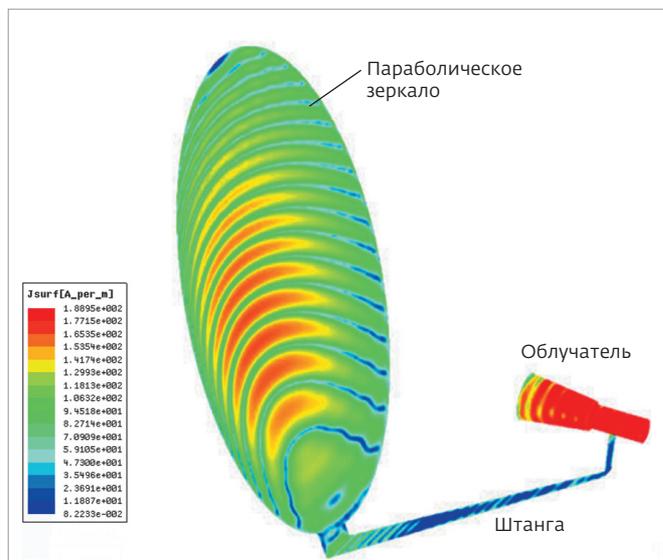


Рис.1. Облучаемая рупором зеркальная параболическая антенна с рассчитанными поверхностными токами

программами очень высока, что позволяет просчитывать множество вариантов уже на этапе эскизного проектирования.

Мощная современная САПР СВЧ FEKO [7] также может эффективно применяться для расчета зеркальных антенн. Это универсальная система, которая позволяет создавать, проектировать и оптимизировать разнообразные излучающие структуры. Однако, как следует из опыта, время расчета в таких универсальных системах бывает значительным. В программах GRASP, Mirror и FEKO для расчета зеркальных антенн используется метод физической оптики.

РАСЧЕТ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MIRROR

Программа Mirror предназначена для расчета характеристик излучения рефлекторных антенн с одиночным или многоэлементным облучателем (рис.1). Работа с программой начинается с выбора параметров задачи. Диалоговое окно с параметрами (рис.2) вызывается командой меню Reflector.

Для анализа антенны, близкой по размеру к описанной в [10], выбран диаметр зеркала 268 см и фокусное расстояние 138 см. Далее командой Array Feed System вызывается окно (рис.3), в котором задаются способы возбуждения зеркальной антенны.

Программа Mirror позволяет создавать до 32 произвольно расположенных и ориентированных в пространстве объектов класса Feed (питающие антенны). Каждый из этих объектов, как и элемент

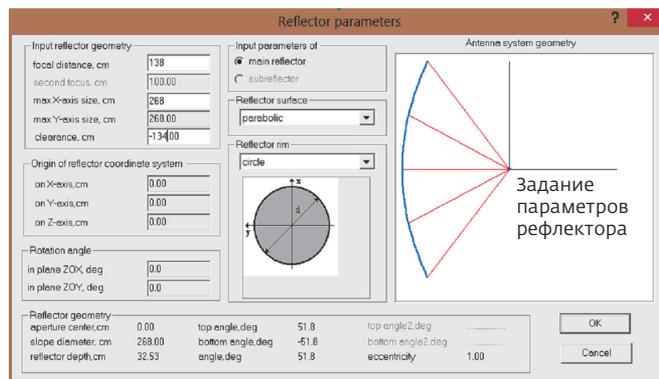


Рис.2. Окно выбора геометрии рефлектора программы Mirror

фазирующей антенной решеткой (ФАР), может быть задан одним из следующих способов:

- табулированной диаграммой направленности (ДН), например полученной экспериментальным путем;
- ДН, аппроксимированной аналитической функцией;
- простой моделью пирамидального рупора;
- электродинамической моделью гладкого конического рупора и конического рупора с изломом;
- электродинамической моделью многосекционного круглого и прямоугольного волноводов, которая позволяет получить любую геометрию рупорного облучателя, включая рупор с канавками.

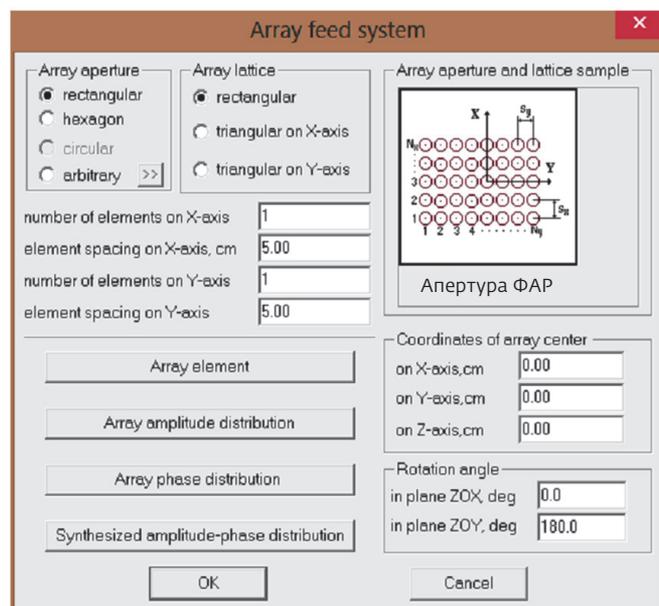


Рис.3. Задание характеристик антенной решетки, облучающей зеркальную антенну

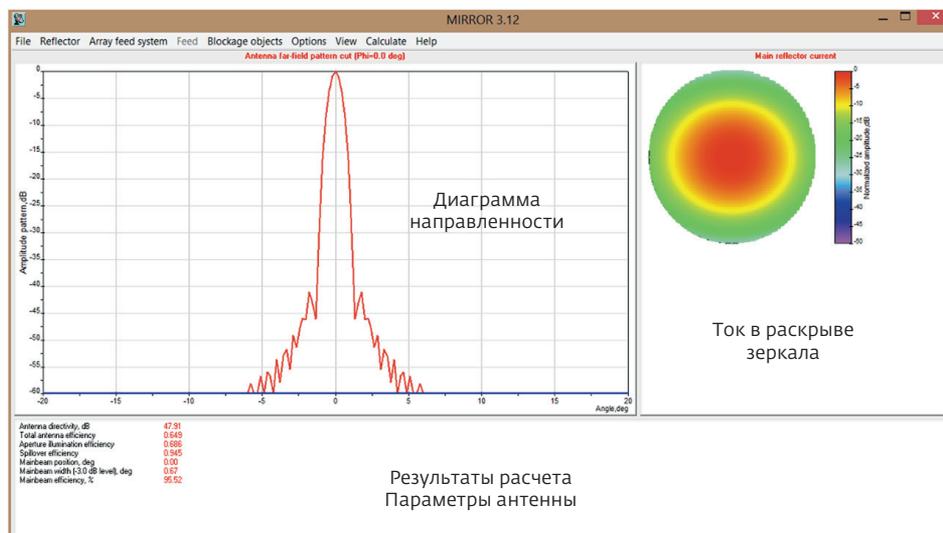


Рис.4. Сечение ДН (слева) и ток в раскрыве апертуры зеркальной антенны (справа), рассчитанные программой Mirror

Функции этого класса рассчитывают электрический ток, наводимый объектом на поверхности рефлекторов, и поле излучения объекта в ближней или дальней зоне (для электродинамических моделей) и выводят результаты в окне (рис.4).

Рассчитанную диаграмму направленности элемента возбуждения можно сохранить в файле с расширением .dat. Позже этот файл можно использовать для расчета в других программах. Полученные поля облучателя применяются для расчета токов на зеркале (см. рис.4).

После расчета распределения токов рассчитывается диаграмма излучения, которая строится в окне отображения ДН. Для ее сечения строятся компоненты по основной поляризации и кросс-поляризации.

В окне отображаются диаграмма направленности, ток в сечении зеркала и параметры зеркальной антенны. Для заданных размеров и данных КНД антенны равен 47,9 дБ.

РАСЧЕТ ОФСЕТНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MIRROR

Зеркальная антенна с осесимметрическим расположением облучателя имеет недостаток: ее облучатель и штанги затеняют лучи прямого прохождения, ухудшая КНД. Поэтому на практике часто

применяется офсетная зеркальная система.

Анализируемая офсетная зеркальная антенна [10] подсвечивается снизу под углом около 50°. Сечение антенны по отношению к вертикальной плоскости находится под углом примерно 26°. Рабочая поверхность рефлектора представляет собой вырезку из параболоида вращения, описываемого уравнением $z = (x^2 + y^2)/4F$, где $F = 138$ см. Центр вырезки расположен на расстоянии 134,5 см от фокальной оси.

По паспорту антенна имеет следующие параметры:

- размеры 240×267 см, раскрыв диаметром 240 см;
- диапазон частот 10,97–12,75 ГГц;
- ширина луча 0,7 град;
- коэффициент усиления 47,6 дБ (10 ГГц);
- уровень боковых лепестков не более 25 дБ.

Рассчитаем офсетную антенну, облучаемую открытым концом круглого волновода.

В программе Mirror учитывается воздействие по дальнему полю. Вначале рассчитывается излучающий элемент и его дальнее поле на каждом элементе сетки зеркальной антенны. Результат расчета может быть выведен в виде диаграммы направленности зеркальной антенны, а также ее кросс-поляризационной составляющей [8, 9] – в окне сечения диаграммы направленности Pattern cut (рис.5).

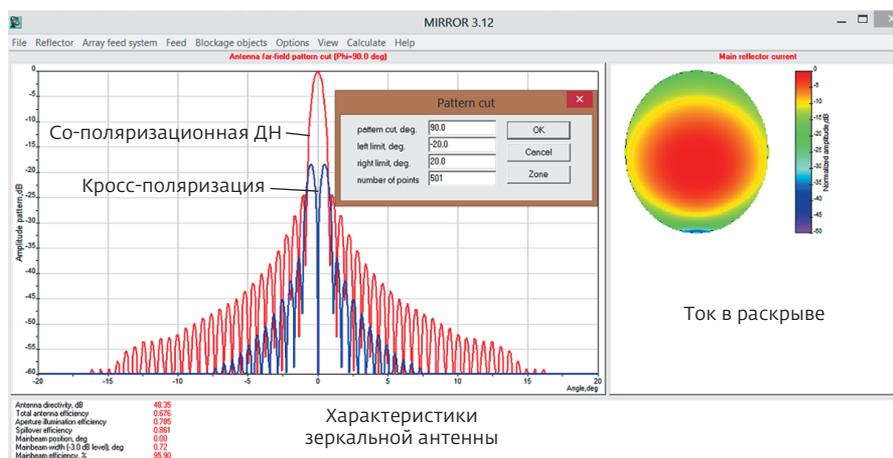


Рис.5. Расчет кросс-поляризации. Вычислена величина –20 дБ

Итак, в результате расчета офсетной антенны получен ее КНД=48,35 дБ, коэффициент использования поверхности 67,6% и ширина луча по уровню -3 дБ – $0,72^\circ$. Рассчитанные программой Mitgor параметры соответствуют данным изготовителя антенны [10]; рассчитанный КНД больше паспортного на $0,75$ дБ.

РАСЧЕТ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ, ОБЛУЧАЕМОЙ КРУГЛЫМ ВОЛНОВОДОМ, В ПРОГРАММЕ FEKO

Программа FEKO также позволяет рассчитать зеркальную антенну большого размера методом физической оптики [2]. В этом методе токи на поверхности зеркальной антенны считаются по формуле (1). Токи рассчитываются в центре каждого элемента декомпозиции зеркальной антенны (треугольника), откуда FEKO вычисляет нормаль. Конечный размер треугольника и замена плавной поверхности параболоида на срезанные плоскости – источники погрешности численного расчета методом физической оптики.

Командой **Draw** → **Paraboloid** начертим параболоид диаметром 240 см. В появившемся окне (рис.6) введем его фокусное расстояние – 138 см.

Для черчения излучателя создается другая рабочая система координат, смещенная на 138 см относительно глобальной. Для сокращения времени расчета на первом этапе анализируется открытый конец круглого волновода и рассчитывается ближнее поле в сечении раstra. Плотность точек, в которых рассчитывается ближнее поле, зависит от шага Increment (рис.7). Для того чтобы сохранить рассчитанные в этих точках поля E и H для дальнейшего расчета, в закладке Advanced выберем сохранение параметров поля в этих точках в файлы

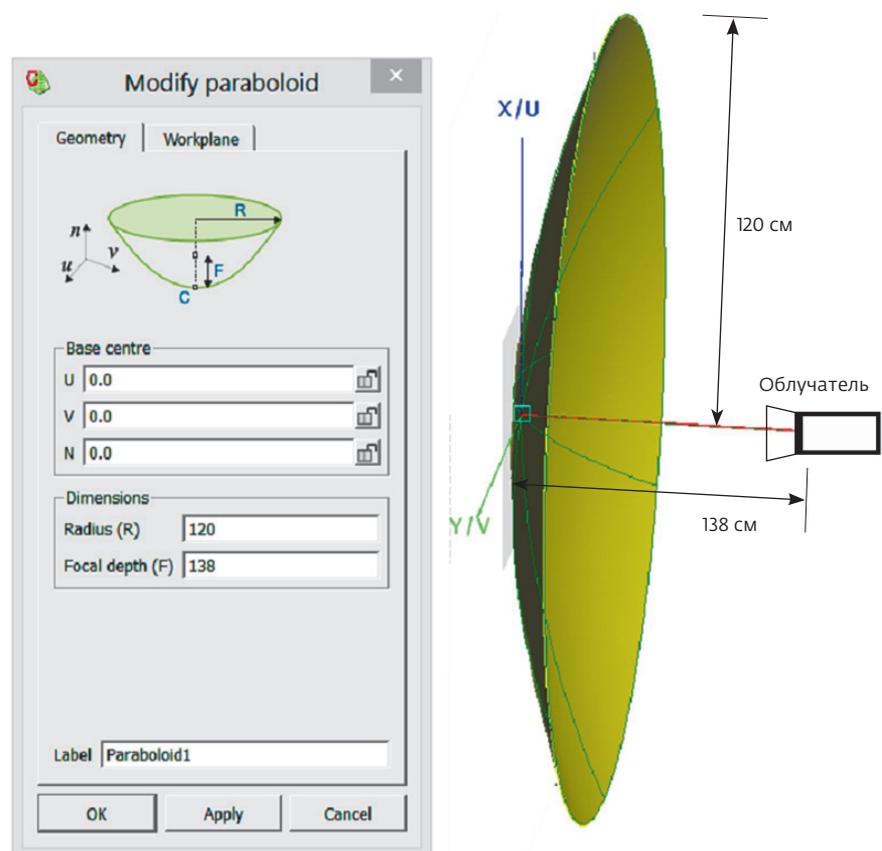


Рис.6. Черчение в FEKO параболоида с фокусным расстоянием 138 см и диаметром 240 см

с расширениями `.efe` и `.hfe`. Используем эти данные для создания плоской апертуры для возбуждения зеркала; точки апертуры поместим в точки, где рассчитывалось ближнее поле.

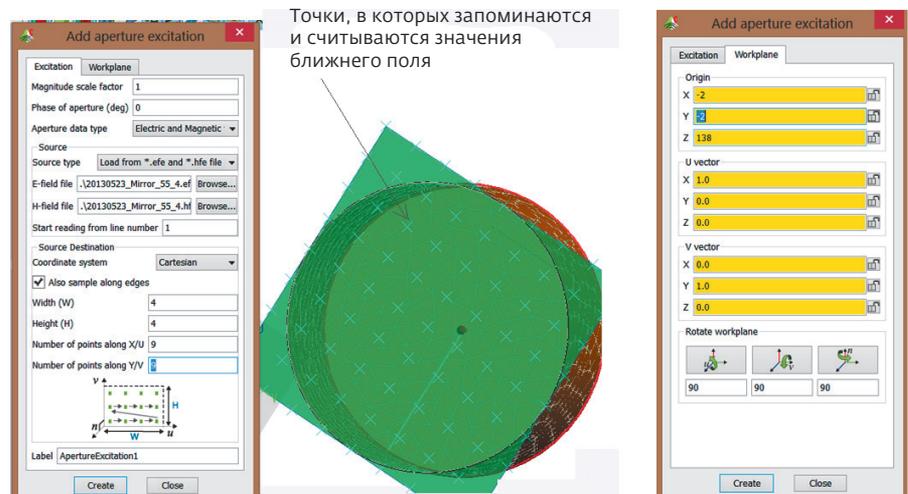


Рис.7. Диалоги установки апертуры облучателя

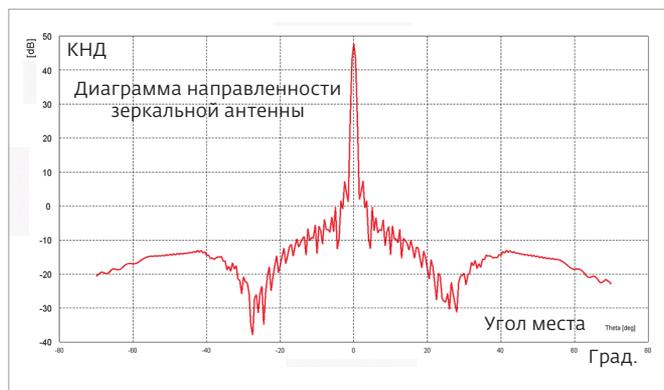


Рис.8. Рассчитанная в FEKO диаграмма направленности осесимметричной зеркальной антенны

FEKO разбивает металлическое зеркало на треугольники. Это может занять значительное время. От каждого элемента апертуры (на рис.7 – перекрестия) рассчитывается луч, по которому распространяется создающая токи на зеркале волна Н. Используя интегральные уравнения и функции Грина, FEKO рассчитывает характеристики в дальней зоне. Рассчитанная ДН показана на рис.8. По ней определяется КНД зеркальной антенны – 48 дБ. Результаты расчета зеркальной антенны, показанные на рис. 5 и 8, совпадают с расчетами, выполненными в Mirrog.

При работе на одном и том же компьютере расчеты в Mirrog выполнялись в пять раз быстрее, чем в FEKO. Однако FEKO более гибка при решении подобных задач; эта программа позволяет обсчитывать структуры с диэлектриками и с потерями в металлических и диэлектрических средах.

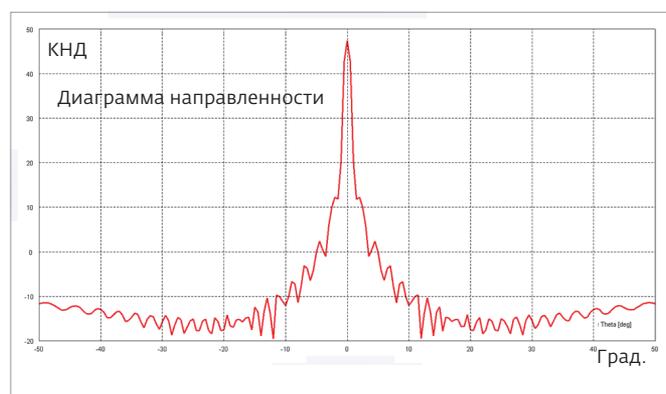


Рис.10. ДН офсетной зеркальной антенны [10], рассчитанная в FEKO

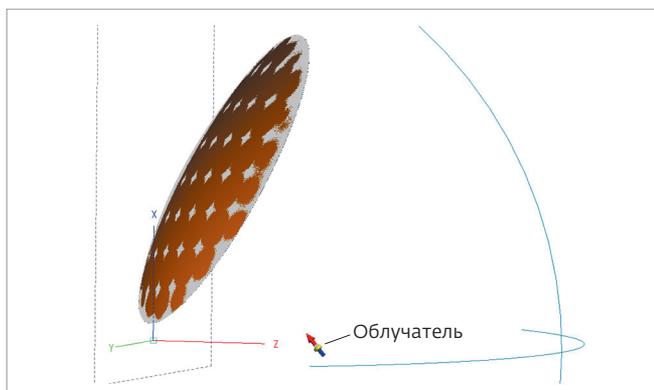


Рис.9. Зеркальная антенна со смещенным облучателем

РАСЧЕТ ОФСЕТНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В FEKO

Рассмотрим структуру офсетной антенны (рис.9). Облучатель находится в фокусе параболоида. Зеркало вырезается из параболоида с помощью объемного цилиндра, приобретая при этом эллиптическую форму.

Для того чтобы разделить нашу задачу на две (расчет облучателя и построение с этими данными падающего на зеркало поля), в сечении круглого волновода-облучателя опишем сферу, на поверхности которой можно сохранить значения ближнего поля. В FEKO разделение подобной задачи можно выполнить и по дальнему полю, как в программе Mirrog.

Можно также рассчитать эту систему целиком, развязав облучатель и зеркало. За облучатель примем отрезок круглого волновода (рис. 7), для которого также вычисляется сечение ДН и определяется ее ширина на уровне -3 дБ, равная 80° .

Выполним расчет зеркала, облучаемого такой круглой антенной, по методу физической оптики. В результате расчета диаграммы направленности по основной поляризации было получено значение КНД = 48 дБ (рис.10).

Для антенн систем связи с поляризационным уплотнением важно учитывать кросс-поляризацию, так как паразитный сигнал может привести к нарушению приема. Типовое требование по уровню кросс-поляризации в максимуме ДН антенны составляет -30 дБ (для систем с двумя линейными ортогональными поляризациями).

Полученная величина кросс-поляризации в максимуме равна 28 дБ (рис.11), что меньше сигнала в максимуме ДН главной поляризации на 20 дБ.

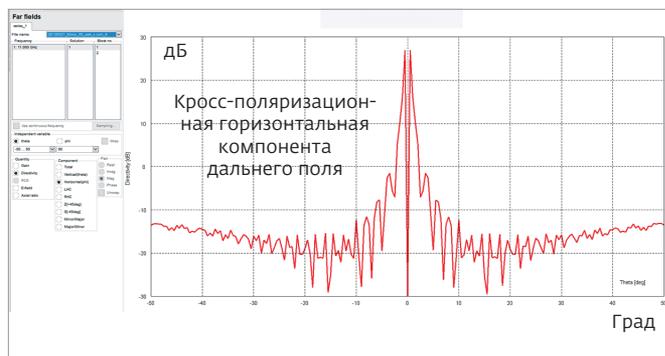


Рис.11. Кросс-поляризационная составляющая диаграммы направленности офсетной зеркальной антенны (расчет в FEKO)

* * *

Итак, в процессе расчета осесимметричной и офсетной зеркальных антенн получено совпадение результатов расчета в программах Mirror и FEKO и данных, приводимых изготовителем антенны. При расчете в обоих случаях применялся метод физической оптики. Программа FEKO – гибкий современный инструмент проектирования сложных антенных систем. Ее дополнительные

возможности позволяют рассчитывать сложные задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vaars J.** The paraboloidal reflector antenna in radio astronomy and communication. – Springer, 2007.
2. **Хенл Х., Мауэ А., Вестпфаль К.** Теория дифракции. – Москва, 1964.
3. **Уфимцев П.Я.** Метод краевых волн в физической теории дифракции. – Москва, 1962.
4. **Shore R.A., Yaghjian A.D.** Incremental diffraction coefficients for planar surfaces. – IEEE Trans., AP, 1988, vol.36, №1, pp.55-70.
5. GRASP – программа для проектирования зеркальных антенн. – tica.com.
6. Программа "Mirror" (авторы-разработчики: Чадов С.Е., Кондратьев А.С., Лаврецкий Е.И.).
7. feko.com.
8. **J.R.Parkinson, M.Mehler.** Convergence of PO integrals by Ludwig technique. – Electronics Lett., vol.22, №22, 1986, pp.1161-1162.
9. **A.C.Ludwig.** The definition of cross polarization. – IEEE Trans. Antennas Propagat., Jan. 1973, vol.AP-21, pp.116-119.
10. Антенна СТВ-2,4-11 АУМ офсетная зеркальная производство ОАО "Алмет", описание. – г.Ульяновск.