

УДК 621.396

**АНТЕННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ТЕСТОВОГО
ГЕНЕРАТОРА РАДИОПОМЕХ****А.В. ТОЛМАЧЕВ, В.М. ЧЕРТКОВ**
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрен порядок работы, проведенной в ходе решения вопроса выбора антенной системы для малогабаритного тестового генератора радиопомех. Описаны основные требования, предъявляемые к антенной системе. Представлены результаты модулирования антенны в программном обеспечении FEKO и результаты натурного эксперимента измерения параметров разработанной антенны.

Ключевые слова: зеркальная антенна, тестовый генератор радиопомех, диаграмма направленности, FEKO.

Введение. Малогабаритный тестовый генератор радиопомех (МТГР) применяется для испытаний работы радиолокационного оборудования и радиолокационных станций (РЛС) в условиях широкого применения противником средств радиоэлектронной борьбы с использованием различных тактических приемов. Таким образом, перед тем, как начать разработку МТГР необходимо провести анализ технических характеристик РЛС.

Как правило, абсолютное большинство РЛС обнаружения целей предназначена для решения следующего спектра задач:

- автоматического обнаружения, измерения первичных координат (азимут, дальность), радиальной скорости воздушных объектов (самолет, вертолет, крылатая ракета, воздушный шар);
- автоматического обнаружения и сопровождения трасс воздушных объектов при воздействии активных и пассивных помех и выдачи радиолокационной информации на систему дистанционного управления (СДУ);
- автоматического распознавания классов воздушных объектов (самолет, вертолет, крылатая ракета, воздушный шар, нераспознанная цель);
- определения азимута постановщиков активных шумовых помех (АШП).

Практически все типы РЛС обладают возможностью кругового поиска воздушных объектов независимо от типа конструкции их антенной системы.

При проведении испытаний генератор помех по азимуту можно расположить в любом направлении относительно РЛС. Однако, исходя из данных об угле места, приходим к выводу, что генератор радиопомех необходимо располагать либо на том же уровне, что и станция, либо под положительным углом, либо учитывать ослабление помехи при отрицательных углах. На основании этого можно сделать вывод, что диаграмма направленности антенны разрабатываемого генератора помех должна обладать достаточно узконаправленными свойствами, а также иметь возможность работы в достаточно широком спектре излучаемого сигнала.

В ходе проектирования малогабаритного тестового генератора радиопомех возник вопрос разработки антенной системы, которая должна была удовлетворять следующим требованиям:

1. Простота конструкции.
2. Возможность использования антенной системы в различных частотных диапазонах.
3. Формирование осесимметричной (игольчатой) диаграммы направленности – диаграммы с относительно узким основным лепестком, т. е. антенна должна обладать хорошими направленными свойствами, т. к., это необходимо для создания необходимого уровня мощности сигнала помехи на входе приемного устройства радиолокационной станции (а это, в свою очередь, возможно только при использовании помехи направленного типа).
4. Антенна должна обеспечивать невысокий уровень бокового излучения.
5. Высокий коэффициент использования поверхности (КИП) антенны.
6. Высокий коэффициент полезного действия (КПД) антенны.
7. Высокий коэффициент эффективности антенны.

Основная часть. Выбор источника излучаемого сигнала обусловил применение зеркальной антенны для эффективной работы в заданном диапазоне частот [2].

Зеркальными называют антенны, в которых требуемые направленные свойства обеспечиваются за счет отражения электромагнитной волны от металлического зеркала (рефлектора) определенного про-

филя. Источником электромагнитной волны, падающей на зеркало, является какая-либо слабонаправленная антенна, называемая облучателем [1]. В разрабатываемом генераторе помех в качестве облучателя используется прямоугольный волновод (его можно отнести к направленным апертурным антеннам со слабыми направленными свойствами), в котором располагается лавинно-пролетный диод.

Антенны, имеющие зеркала с центральной симметрией, формируют осесимметричные (игольчатые) амплитудные диаграммы направленности. Параболоцилиндрические и кругоцилиндрические антенны имеют веерные диаграммы направленности с существенно различной шириной главного лепестка в перпендикулярных плоскостях.

Целью данной работы является проектирование, создание, моделирование и испытание антенны – генератора помех направленного типа. Для создания необходимых направленных свойств целесообразно использовать антенну с игольчатой диаграммой направленности, т.е. использование параболических антенн [1].

Из всех типов зеркал наилучшими фокусирующими свойствами обладают параболические. Парабола является геометрическим местом точек, равноудаленных от некоторой прямой (директрисы) и точки (фокуса F), не совпадающей с этой прямой (показано на рисунке 1). Следовательно, с учетом обозначений на рисунке 1 для точки A , произвольно выбранной на параболе, выполняется уравнение $FA + AB = \text{const}$. Из этого равенства следует, что

$$FA + AB = 2F,$$

где F – фокусное расстояние, равное удалению вершины параболы от фокуса и от директрисы [1].

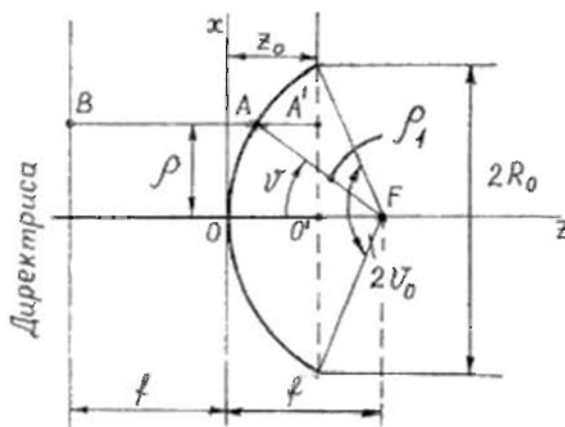


Рисунок 1. – Геометрия зеркальной параболической антенны

Из определения параболы следует ее основное свойство: сумма расстояний от фокуса F до любой точки A на параболе и от этой точки A до точки A' на раскрыве зеркала есть величина постоянная ($FA + AA' = \text{const}$). Благодаря указанному свойству оптические пути от фокуса до точек раскрыва оказываются одинаковыми, вследствие чего сферическая волна, создаваемая точечным облучателем, помещенным в фокус, после отражения от параболоида вращения превращается в плоскую. Соответственно цилиндрическая волна, создаваемая линейным облучателем, преобразуется в плоскую параболическим цилиндром. В обоих случаях на излучающем раскрыве параболических антенн поле является синфазным, чем достигается высокая направленность излучения [1].

Существенно, что равенство оптических путей в параболических зеркалах обеспечивается независимо от длины волны. Поэтому параболические зеркальные антенны обладают хорошими диапазонными свойствами, определяемыми фактически полосой пропускания облучателя и питающего его волновода.

На основании вышеизложенного была выбрана зеркальная антенна на параболоиде вращения. Параболоид вращения – это наиболее простая конструкция из всех параболических антенн с центральной симметрией, формирующая игольчатую диаграмму направленности.

Диаграмма направленности параболоида вращения. В системе координат, выбранной согласно рисунку 1, уравнение параболоида вращения имеет вид

$$x^2 = 2pz; \quad z \geq 0, \quad (1)$$

где $p = 2F$ – параметр параболы.

Линия Oz , проходящая через вершину параболоида и его фокус, называется оптической или фокальной осью. Угол $2\theta_0$, под которым из фокуса F видны края параболоида вращения, называется углом раскрытия зеркала. Круг радиусом R_0 образует апертуру (раскрыв) зеркала. Расстояние z_0 от вершины зеркала до раскрытия называют глубиной зеркала. Если $z_0 < F$, то *параболоид* вращения является мелким, или длиннофокусным, если же $z_0 > F$ – глубоким, или короткофокусным. Глубина зеркала, радиус раскрытия и фокусное расстояние связаны между собой:

$$F = \frac{R_0^2}{4z_0}. \quad (2)$$

Принято решение использовать поверхность зеркала с радиусом $R_0 = 12,5$ см. Подставив в формулу (2) $R_0 = 12,5$ см, а глубину $z_0 = 5$ см, получено фокусное расстояние $F = 7,8$ см.

Расчет поля излучения параболоида вращения опираясь на строгие аналитические методы технически сложен. Из приближенных методов в инженерной практике наибольшее распространение получил апертурный метод. Суть его сводится к приближенной оценке амплитудно-фазового распределения поля на раскрытии зеркала с последующим применением теоремы перемножения, где диаграмма направленности элемента излучения представляет диаграмму направленности источника Гюйгенса, а множитель системы определяется видом амплитудно-фазового распределения на раскрытии и формой излучающей апертуры. При этом расчет амплитудно-фазового распределения поля на раскрытии осуществляется с учетом следующих допущений:

1) токи и касательные составляющие поля на «неосвещенной» поверхности зеркала принимаются равными нулю;

2) не учитывается дифракция волн на кромке зеркала;

3) не учитывается теневой эффект облучателя, т. е. последний считается точечным;

4) внутренняя поверхность зеркала располагается в дальней зоне облучателя;

5) не учитывается влияние зеркала на характеристики облучателя [1].

Перечисленные допущения существенно упрощают расчет диаграммы направленности параболоида вращения при удовлетворительном для инженерной практики совпадении результатов расчета с экспериментом в области главного лепестка амплитудной диаграммы направленности (АДН).

При расчете АДН разрабатываемой антенны при помощи программы САДФЕКО использован аналогичный метод, который учитывает все вышесказанные допущения.

Напомним, что с увеличением угла раскрытия зеркала ширина главного лепестка увеличивается, что объясняется увеличением спада амплитудного распределения к краям зеркала. Очевидно, что увеличение ширины АДН облучателя при заданном угле раскрытия зеркала вызовет обратный эффект.

Сделанные допущения позволяют существенно упростить задачу расчета АДН. В частности, согласно первым трем допущениями излучающую апертуру можно считать круглой с радиусом R_0 .

Обобщенным показателем качества любой антенны, учитывающим в совокупности ее направленные свойства и эффективность, как преобразователя энергии является коэффициент эффективности, равный

$$g_A = \xi_A \eta_A, \quad (3)$$

где ξ_A и η_A – КИП и КПД антенны соответственно [1].

Величины ξ_A и η_A зависят от угла раскрытия зеркала. Мощность, подводимая к зеркальной антенне, частично расходуется на нагрев элементов конструкции (тепловые потери), рассеяние на краях зеркала, облучателе и его деталях. Кроме этого, мощность, излучаемая облучателем, не полностью перехватывается и переизлучается зеркалом. Соответственно КПД зеркальной антенны можно представить в виде произведения

$$\eta_A = \eta_T \eta_D \eta_P, \quad (4)$$

где η_T , η_D , η_P – коэффициенты тепловых, дифракционных потерь и перехвата соответственно [1].

Проанализировав полученные значения коэффициентов, можно отметить, что для параболоида вращения тепловые и дифракционные потери невелики ($\eta_T \eta_D = 0,8...0,9$), а их величина незначительно зависит от геометрических параметров зеркала и облучателя. Коэффициент перехвата вычисляется по формуле

$$\eta_{\Pi} = \frac{P_{\Sigma 3}}{P_{\Sigma \text{ОБЛ}}}, \quad (5)$$

где $P_{\Sigma 3}$ – мощность, перехватываемая и излучаемая зеркалом;

$P_{\Sigma \text{ОБЛ}}$ – мощность излучения облучателя.

Коэффициент использования поверхности параболоида вращения, в отличие от КПД, при заданных форме и ширине амплитудной диаграммы направленности облучателя, монотонно уменьшается с ростом угла раскрыва зеркала [1]. Действительно, при малом угле раскрыва зеркала амплитудное распределение $E(\rho)$ поля на раскрыве оказывается практически равномерным ввиду того, что $F_{\text{ОБЛ}}(\vartheta) \approx 1$ при $\vartheta > \vartheta'_0$. С увеличением угла ϑ_0 амплитудное распределение поля $E(\rho)$ на раскрыве существенно спадает к его краям, что приводит к снижению коэффициента использования поверхности [1].

Изменение коэффициентов ξ_A и η_A обуславливают согласно равенству (3) экстремальный характер зависимости коэффициента эффективности. Оптимальное значение угла раскрыва ϑ_{opt} зависит от формы и ширины главного лепестка АДН облучателя. Так, при сужении АДН облучателя величина ϑ_{opt} уменьшается. В процессе расчета установлено, что для обеспечения максимального коэффициента эффективности уровень облучения краев зеркала должен составлять примерно минус 10 дБ относительно уровня облучения его середины. При этом ширину главного лепестка АДН параболоида вращения ориентировочно можно оценить как

$$2\theta_{0,5} = C_{0,5} \frac{\lambda}{2R_0}, \quad (6)$$

где $C_{0,5}$ – коэффициент, определяющий вид амплитудного распределения поля, для зеркальных антенн выбирают из диапазона от 65 до 75° .

Подставив в формулу (6) следующие значения $\lambda = 3$ см, а $R_0 = 12,5$ см, получим ширину главного лепестка $2\theta_{0,5} = 7,8^\circ$. Таким образом, используемая в малогабаритном передатчике радиопомех зеркальная антенна обеспечивает формирование относительно узкой диаграммы направленности [1].

Максимальный коэффициент направленного действия (КНД) антенны определяется по формуле

$$D_{\max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{\Gamma} \xi_A, \quad (7)$$

где $\xi_A \leq 1$ – коэффициент использования поверхности, а S_{Γ} – геометрическая площадь апертуры (см^2).

По теоретическим данным [1], КНД может составлять $10^4...10^6$, подставив значения, рассчитанные в ходе проектирования антенны, в формулу (7), получаем 686 (28,4 дБ).

Проведенные вычисления позволили сделать вывод, что зеркальная антенна наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к антенной системе:

1. Простота конструкции по сравнению с фазированной антенной решеткой или различными щелевыми антеннами.
2. Обеспечение работы на различных частотах в любой произвольный момент времени.
3. Ширина основного лепестка разрабатываемой зеркальной антенны $2\theta_{0,5} = 7,8^\circ$.

Проектируемая зеркальная антенна удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям. В дальнейшем именно ее используем в качестве антенной системы передатчика помех.

Моделирование антенны. В процессе разработки и проектирования передатчиков СВЧ-энергии всегда приходится сталкиваться со значительным объемом работ, существенную часть которых занимают расчеты конструкции излучающей системы, расчеты основных параметров формируемого поля, а также

вида и параметров диаграммы направленности антенны. В ходе проектирования и разработки основной антенны выбор был остановлен на зеркальной антенне в виде параболоида вращения. Для упрощения расчетов и уменьшения времени, затрачиваемого на них, была использована методика с применением компьютерных программ [3].

Главный инструмент – программа FEKO, которая нашла много сторонников, работающих в области проектирования СВЧ-устройств вместе с HFSS, CST, MWO и другими коммерческими программами.

Особое место среди задач, решаемых в ходе расчетов при проектировании радиоэлектронной аппаратуры, занимают задачи излучения и рассеяния электромагнитных волн. Их отличие от задач анализа печатных или волноводных схем состоит в необходимости определения поля в области больших электрических размеров (под электрическим размером понимается отношение геометрического размера антенны к длине волны в свободном пространстве). Дискретизация больших областей порождает задачи огромной размерности. Поэтому использование многих «стандартных» методов здесь заведомо неэффективно. В этом случае строгие методы электродинамики необходимо дополнить так называемыми асимптотическими методами: физической оптики, геометрической теории дифракции и т.д. Гибридные подходы, использующие физическую оптику и геометрическую теорию дифракции ГТД, реализованы в системе FEKO [3].

Главной особенностью программы FEKO, отличающей ее от других коммерческих программ проектирования СВЧ устройств и моделирования электромагнитного излучений, является удачное сочетание базового метода моментов с приближенными аналитическими методами: методом физической оптики и однородной теории дифракции. Такое сочетание позволяет преодолеть главный недостаток программ компьютерного моделирования высокочастотных структур: большие затраты ресурсов при моделировании объектов с размерами много большими длины волны. В результате появляется возможность решения таких задач, как рассеяние радиоволн на самолете или корабле и распространение радиоволн в городских условиях, с высокой точностью. Ключевой задачей можно считать решение проблемы облучения параболической антенны, которая описана методом геометрической оптики, рупорной антенной, представленной прямоугольным волноводом [3].

С помощью программы FEKO v.5.2 была смоделирована зеркальная антенна передатчика на частоте 10 ГГц. В ходе исследований получена модель зеркальной антенны, для которой рассчитаны параметры дальнего поля (обзор по углу θ осуществлен в секторе 60° , шаг по углу θ выбран $0,5^\circ$ для получения наилучшей точности в последующем анализе диаграммы направленности) и получена трехмерная диаграмма направленности антенны, представленная на рисунке 2.

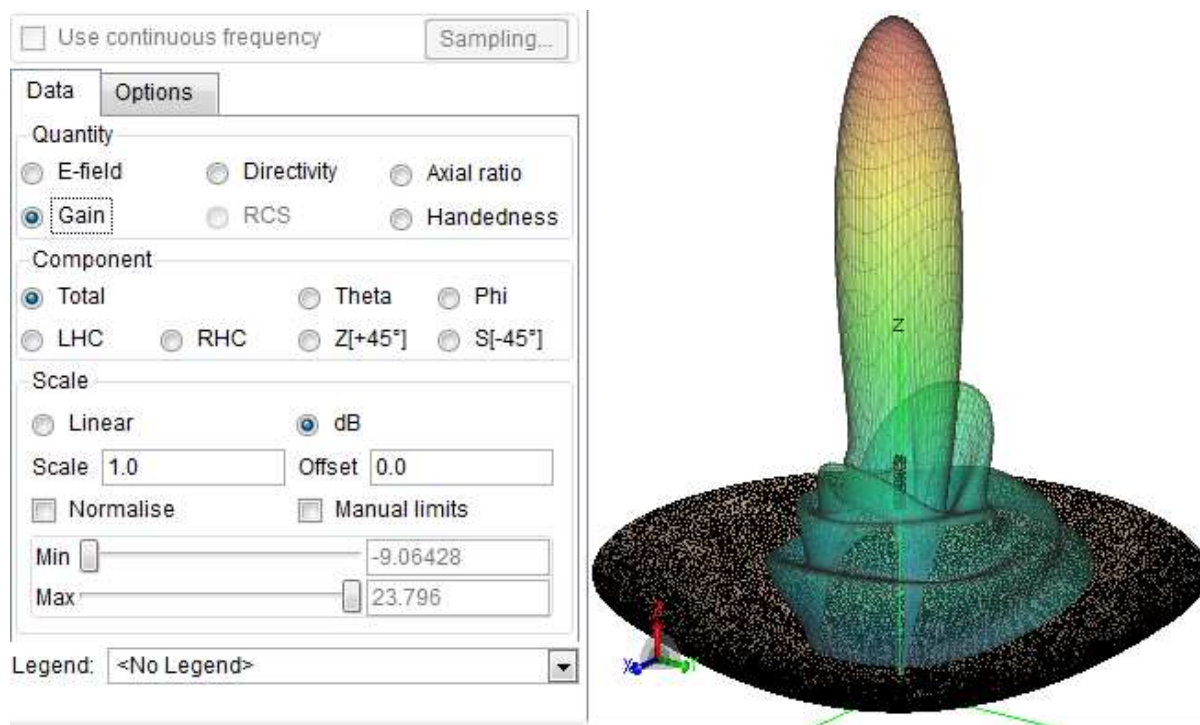


Рисунок 2. – Трехмерная диаграмма направленности антенны, полученной в программе FEKO

Анализ результатов моделирования. Рассчитанная диаграмма направленности имеет не совсем осесимметричный вид. Это объясняется тем, что при проектировании модели в программе FEKO к излучающему элементу подключался лишь один питающий порт к началу линии, поэтому возбуждение линии происходит от начала к концу. Это соответствует реальной ситуации, когда происходит формирование и прохождение домена через лавинно-пролетный диод, который излучает сигнал в реальном передатчике.

Основная мощность излучаемого поля передается в плоскости XZ , в связи с этим большее внимание сосредоточено на изучении характеристик поля именно в этой плоскости.

По результатам моделирования коэффициент направленного действия основного лепестка составляет 23,8 дБ. Опираясь на теоретические расчеты, был определен максимальный КНД антенны по формуле (7), где коэффициент ξ_A принят равным 1. Подставив эти значения, получаем $D_{\max} = 28,4$ дБ. Следовательно, теоретические расчеты и результаты моделирования в компьютерной программе FEKO оказались близки друг к другу, что говорит о правильном построении модели. Отличия в этих значениях объясняются более точным расчетом коэффициента использования поверхности антенны в модели, а также несимметричностью диаграммы направленности.

В горизонтальной плоскости получен лишь один лепесток. Его максимум соответствует максимальному значению КНД в данной плоскости 1,31 дБ. Однако излучающий элемент расположен в вертикальной плоскости, и значит поля в горизонтальной плоскости быть не должно. Наличие поля в этой плоскости объясняется явлением кроссполяризации. Это вызывает уменьшение коэффициента использования поверхности антенны. Уровень кроссполяризационной составляющей тем меньше, чем меньше отношение f/R_0 . В нашем случае это отношение составляет 0,625.

Боковые лепестки имеются они только в вертикальной плоскости. Интерес для нас представляют ближайшие лепестки, так как именно в основном лепестке и в них сосредотачивается до 98% мощности излучаемого сигнала. Рассмотрим ближайшие четыре лепестка. Уровни их мощностей составляют (слева направо): 5,3; 0,7; 2,42; 3,71 дБ.

Коэффициент усиления антенны определяется как произведение КНД и КПД. Коэффициент полезного действия антенны составляет 0,809814, соответственно коэффициент усиления – 22,9 дБ. Если сравнивать коэффициент усиления и КНД антенны, то можно отметить, что происходит ослабление мощности излучаемого сигнала на 0,9 дБ. Это ослабление объясняется потерями энергии в излучающем волноводе вследствие отражения от основной антенны, а также явлением кроссполяризации.

В результате моделирования АДН ширина основного лепестка по уровню 0,5 составляет $7^\circ 30'$. Расчетное значение ширины лепестка определяется по формуле (6) и имеет значение $7^\circ 48'$. Проведенные теоретические расчеты оказались весьма близки к данным, полученным при компьютерном моделировании. Различие можно объяснить тем, что с помощью программы FEKO получено более точное значение коэффициента, определяемого амплитудным распределением поля $C_{0,5}$ и несимметричностью диаграммы направленности.

Результаты натурального эксперимента. После сопоставления теоретических расчетов и результатов модулирования был реализован макетный образец разрабатываемой антенны. Натурный эксперимент проводился в условиях, где генератор радиопомех размещался на треноге, которая имела градусную шкалу в азимутальной плоскости. В качестве измерительной антенны использовалась детекторная секция с присоединенной к ней рупорной антенной, благодаря которой удалось оптимизировать направленные свойства приемной антенны в целом. На рисунках 3 и 5 приведены результаты натурального эксперимента в вертикальной и горизонтальных плоскостях соответственно. На рисунках 4 и 6 – результаты, полученные при помощи моделирования в программе FEKO в тех же плоскостях.

Как видно из рисунков 3 – 6, форма и вид диаграмм направленности, полученных в ходе моделирования и проведения натурального эксперимента, близки друг другу. В реальной диаграмме направленности антенны имеются такие же несимметричности, как и в промоделированной, которые объясняются появлением и прохождением доменов через пролетную область лавинно-пролетного диода (расширение АДН в области положительных углов). Ширина диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости составила $2\theta_{0,5} = 8^\circ 18'$, а в горизонтальной – $2\theta_{0,5} = 10^\circ 30'$. Полученные данные схожи с результатами эксперимента, что говорит о правильности произведенных расчетов. Различия полученных значений в ходе натурального эксперимента и модулирования объясняются тем, что реальная антенна имеет форму близкую к параболоиду, а не идеальный параболоид. Кроме того, следует отметить, что при моделировании не учитывается затекание токов на обратную сторону зеркала.

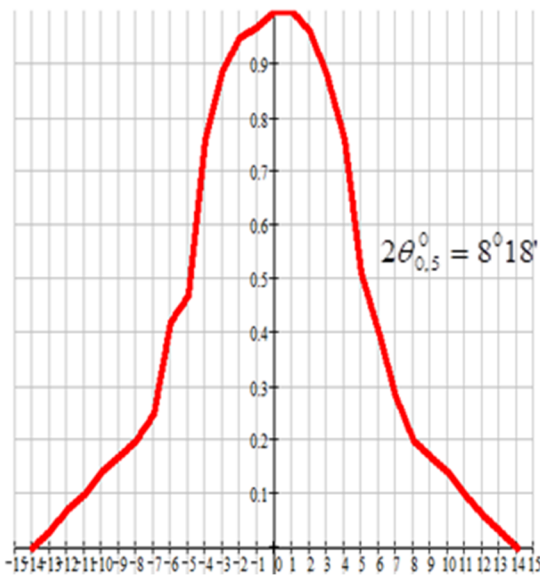


Рисунок 3. – Результаты натурального эксперимента (АДН антенны в вертикальной плоскости)

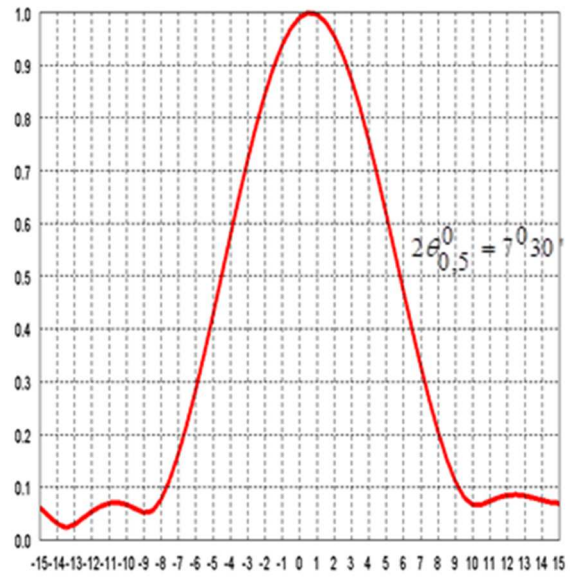


Рисунок 4. – Результат моделирования (АДН антенны в вертикальной плоскости)

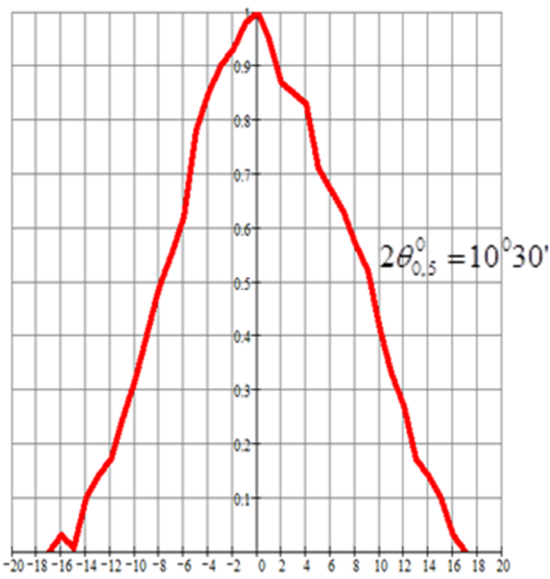


Рисунок 5. – Результаты натурального эксперимента (АДН антенны в горизонтальной плоскости)

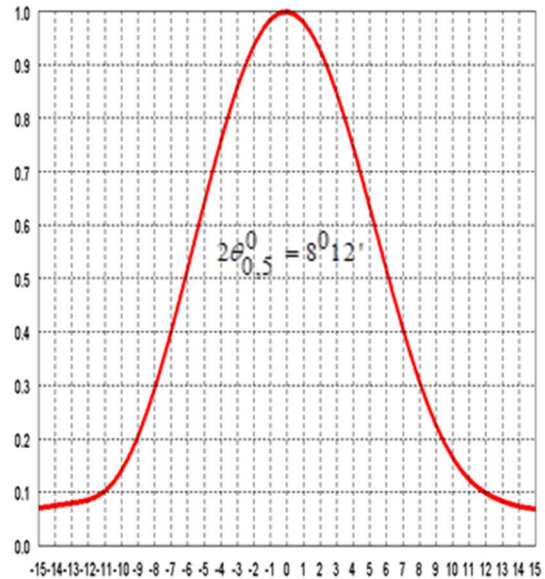


Рисунок 6. – Результат моделирования (АДН антенны в горизонтальной плоскости)

По полученным в результате натурального эксперимента данным был произведен расчет КНД антенны:

$$D_{\max} = 10 \lg \frac{36000}{2\theta_{0,5\text{верт}} 2\theta_{0,5\text{гор}}} = 26,2 \text{ дБ.}$$

Эти данные также близки к результатам теоретического расчета и моделирования.

Таким образом, используемая в данном передатчике антенная система позволяет получить характеристики, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к малогабаритному передатчику помех. Для сравнения в таблице приведены результаты, полученные при теоретическом расчете, моделировании и натурном эксперименте.

Таблица. – Результаты моделирования, расчета и эксперимента

Параметр	Теоретический расчет	Моделирование	Эксперимент
Ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны $2\theta_{0,5}$	$2\theta_{0,5} = 7^\circ 48'$	$2\theta_{0,5} = 7^\circ 30'$	$2\theta_{0,5} = 8^\circ 18'$
Коэффициент направленного действия D_{\max}	28,4 дБ	23,8 дБ	26,2 дБ

Заключение. В качестве антенной системы была выбрана зеркальная антенна, которая наиболее полно удовлетворяла требованиям, предъявляемым к антенной системе МТГР. Выполнены теоретические расчеты и моделирование антенной системы с помощью компьютерной программы FEKO. Проведенный сравнительный анализ теоретического расчета и моделирования показал, что полученные данные почти идентичны. Натурным экспериментом подтверждены результаты моделирования и продемонстрировано их соответствие заданным требованиям при проектировании антенны для малогабаритного тестового генератора радиопомех.

При разработке антенны передатчика получена игольчатая диаграмма направленности с минимальной шириной главного лепестка, минимальным уровнем бокового излучения; при этом на раскрытие зеркала формируется плоский фронт электромагнитной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков, Л.Н. Антенные системы радиоэлектронной техники / Л.Н. Марков. – М. : Воениздат, 1993.
2. Полупроводниковые приборы. Справочник / под ред. Н.Н. Горюнова. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
3. Банков, С.Е. Практикум проектирования СВЧ-структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М. : ЗАО «НПП «Родник», 2009.

Поступила 29.03.2018

ANTENNA SYSTEM FOR SMALL-SIZED TEST GENERATOR RADIO

A. TOLMACHEV, V. CHERTKOV

The article reflects the order of work on solving the issues of choosing an antenna system for a small-sized test jamming generator. The basic requirements for the antenna system are described. The results of antenna modulation in the FEKO software are presented. The results of a full-scale experiment on measuring the parameters of a developed antenna are described.

Keywords: mirror antenna, jamming generator, direction pattern, FEKO.