

УДК 621.396.96

Разработка узлов антенны и волноводного тракта макета короткоимпульсной радиолокационной установки

Голубцов М. Е.¹, Овечкин В. С.¹,
Фадеева Н. Ю.^{1,*}, Парщиков А. А.¹,
Борисов А. А.¹

[*fadeeva.n.u@gmail.com](mailto:fadeeva.n.u@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приводятся результаты разработки узлов зеркальной антенны и волноводного тракта, предназначенных для макета короткоимпульсной радиолокационной установки X-диапазона. Зеркальная антенна имеет форму усеченного параболоида вращения со смещенным из фокуса офсетно расположенным облучателем. В конструкции предусмотрено развязывающее устройство на основе Y-циркулятора. Расчетная модель антенны предполагает учет диаграммы направленности облучателя. В статье анализируются экспериментально полученные характеристики антенны и волноводных узлов. Макет допускает дальнейшую модернизацию. Предусмотрена возможность изменения положения рупорного облучателя и установки на раму облучателя контррефлектора в виде плоского зеркала.

Ключевые слова: усеченная параболическая зеркальная антенна, диаграмма направленности, короткоимпульсная радиолокационная установка, облучатель, полоса частот

Введение

В современной радиолокации одним из актуальных направлений является применение широкополосных и сверхширокополосных сигналов для обнаружения объектов в том числе малоразмерных в сложной помеховой обстановке и составления их радиолокационных портретов. На сегодняшний день разработан математический аппарат для обработки широкополосных сигналов и ведется активная разработка блоков и узлов таких РЛС, в связи с чем возникает потребность в создании экспериментальной установки и узлов трактов и антенн, отвечающих специальным требованиям.

Для проведения экспериментов, связанных с изучением возможностей короткоимпульсных сигналов, таких как получение высокого разрешения объектов, синтезу аппаратуры, составления радиолокационных портретов наземных и надводных целей была разработана приемно-передающая система мобильной радиолокационной установки. При разработке к ее функциональным частям предъявлен ряд требований. Узлы волноводного тракта должны обеспечивать работу в X-диапазоне, с относительной шириной рабочей полосы не менее 10% и мгновенной полосой сигнала 5% при величине излучаемой мощности порядка 1,5 кВт. Антенна должна обеспечивать форму диаграммы направленности

(ДН), близкую к косекансной для обзора земной поверхности, уровнем боковых лепестков не более минус 25 дБ и уровнем фона не хуже минус 30 дБ. При этом специфика применения широкополосных и короткоимпульсных сигналов требует строгой одновременности формирования в пространстве фронта волны, излучаемой с апертуры антенны.

Помимо требований к электрическим характеристикам, разработанные элементы приемо-передающей системы должны быть адаптированы к техническим возможностям опытно-го производства, а также отвечать жестким требованиям к массе и габаритам для установки на мобильную платформу с возможностью быстрой реконфигурации системы из транспорт-ного положения в рабочее.

Наиболее полно всему спектру требований отвечают тракты на основе волноводных узлов и зеркальной антенны (ЗА). Для зеркальной антенны в форме параболоида вращения требование одновременности формирования фронта волны выполняется в силу ее геометрии [1, 2]. Особенностью разработанной антенны является то, что специальная форма ДН обеспечивается малым смещением облучающего рупора из фокуса. Сложная геометрия ЗА (вырез из параболоида вращения больших габаритов), строгие требования к массе и габаритам антенной системы и ограниченные возможности экспериментального производства приводят к созданию каркасной конструкции ЗА на основе алюминиевых профилей, обшитых панелями правильной формы.

Ответственным узлом тракта, ограничивающим рабочую мощность, является вращающееся сочленение. За основу была принята конструкция на основе коаксиального волновода. Это позволяет, с одной стороны сохранить осевую симметрию возбуждаемой волны во вращающемся участке, а с другой – не требует применения металлических резонансных колец, встраиваемых в диэлектрические шайбы для организации перехода от вращающейся круглой части к неподвижному прямоугольному волноводу [2-4]. Особенностью приведенного в работе узла является конструкция, сочетающая бесконтактное вращающееся сочленение и зондовые коаксиально волноводные переходы.

1. Основная часть

В работе ставится задача разработки узлов антенны и волноводного тракта макета новой короткоимпульсной радиолокационной установки.

На рис. 1 показана конструкция макета. Развязывающее устройство, обеспечивающее независимую работу приемного и предающего радиотрактов, выполнено на основе серийно выпускаемого Y-циркулятора и на рисунке не показано.

Существует несколько способов формирования косекансной диаграммы направленности, которые подробно рассмотрены в [5]. В результате проработки конструкции была выбрана офсетная зеркальная антенна, которая представляет собой вырез из параболического зеркала размером 1000х2000 мм. Для формирования необходимого амплитудно-фазового распределения использован рупорный облучатель с размерами 200х28 мм, размещаемый с отклонением от точки фокуса параболоида. Смещение облучателя в какой-либо плоскости приводит к искажению формы ДН антенны, близкому в некоторой области к косекансной зависимости. При этом происходит повышение уровня нулей боковых лепестков таким образом, чтобы слияние боковых лепестков с основным лепестком ДН обеспечило требуемую форму в рабочем секторе углов. Оптимизация формы рупора и его положения относительно зеркала позволяют добиться заданной формы ДН. Расчет и оптимизация характеристик такой антенной системы требует решения достаточно объемных задач.

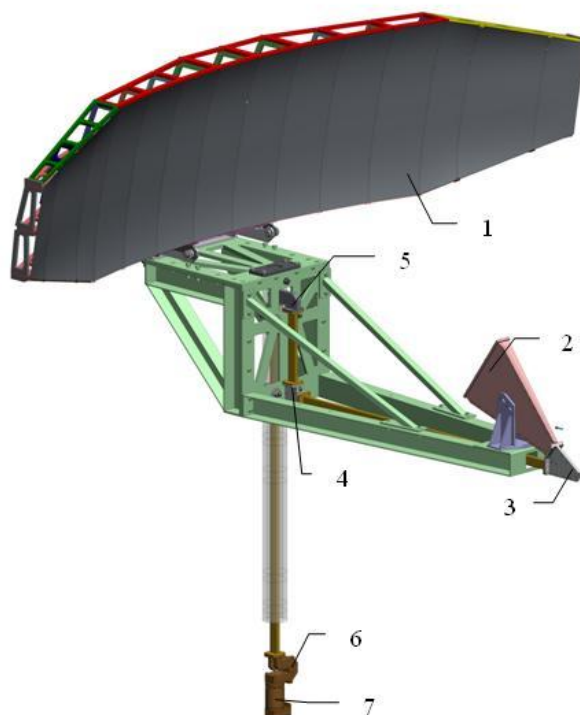


Рис. 1. Трехмерная модель макета: 1 – зеркальная антенна, 2 – рупорный облучатель, 3 – волноводный изгиб 35°, 4 – волноводный изгиб 90°, 5 – сдвоенный волноводный изгиб 90°, 6 – встроенный обводной волноводный изгиб 90°, 7 – вращающееся волноводное сочленение

Антенная система имеет значительные размеры по сравнению с рабочей длиной волны. Это затрудняет ее моделирование, т.к. большинство известных методов основаны на разбиении модели на элементы (ячейки), внутри и на границах которых решаются системы уравнений в зависимости от метода расчета. При увеличении размеров антенной системы по сравнению длиной волны растет необходимое количество элементов разбиения (как правило, в квадратичной зависимости от линейного размера), и время на получение результатов моделирования, которое связано с увеличением порядка матрицы решаемой системы алгебраических уравнений. Одним из основных методов расчета, применяемым для составления программ моделирования, является метод моментов (МОМ). Важным фактором, влияющим на точность решения, является алгоритм разбиения поверхности объекта на ячейки. Чаще всего поверхность объекта разбивается на треугольники, площадь которых должна быть меньше $\lambda^2/70$, где λ – длина волны в устройстве. С учетом размеров зеркальной антенны, а также расстояния от рупора до раскрытия отражателя, при расчетах нельзя использовать МОМ. Размерность системы уравнений, необходимых для отыскания диаграммы направленности будет слишком велика. При анализе зеркальных антенн удобно использовать метод физической оптики (ФО). Приближение ФО состоит в том, что каждый элемент поверхности отражает так же, как бесконечная касательная плоскость в точке падения [6].

Найдено новое решение, при котором алгоритм расчета существенно упрощается. Поскольку ряд расчетных алгоритмов [7], реализуемых, в частности, в электродинамических программных пакетах, позволяет рассчитывать ДН зеркальной антенны с учетом диаграммы направленности облучателя, то для упрощения расчета ДН рупорной антенны рассчитывается отдельно при помощи, например, МОМ. Зеркальная антенна облучается точечным облучателем с заданной ДН. На рис. 2 приведены результаты моделирования рупорного облучателя и ЗА с учетом ДН облучателя.

На основе расчетных характеристик ЗА и оптимизации ее ДН до вида, близкого к косекансному, была разработана эскизная документация, по которой были изготовлены элементы антенной системы. Зеркальная антенна представляет собой каркасную конструкцию с закрепляемыми на ней элементами отражающей поверхности. Отражающая поверхность выполнена составной из прямоугольных панелей, изготовленных методом гидроформовки. Панели при гидроформовке деформируются в виде тела вращения со сферической образующей. Радиус образующей подбирается из условия оптимальной аппроксимации требуемой формы параболоида ЗА. Каркас состоит из плоских алюминиевых ферм со стыковочными площадками, форма поверхности которых соответствует профилю параболоида вращения.

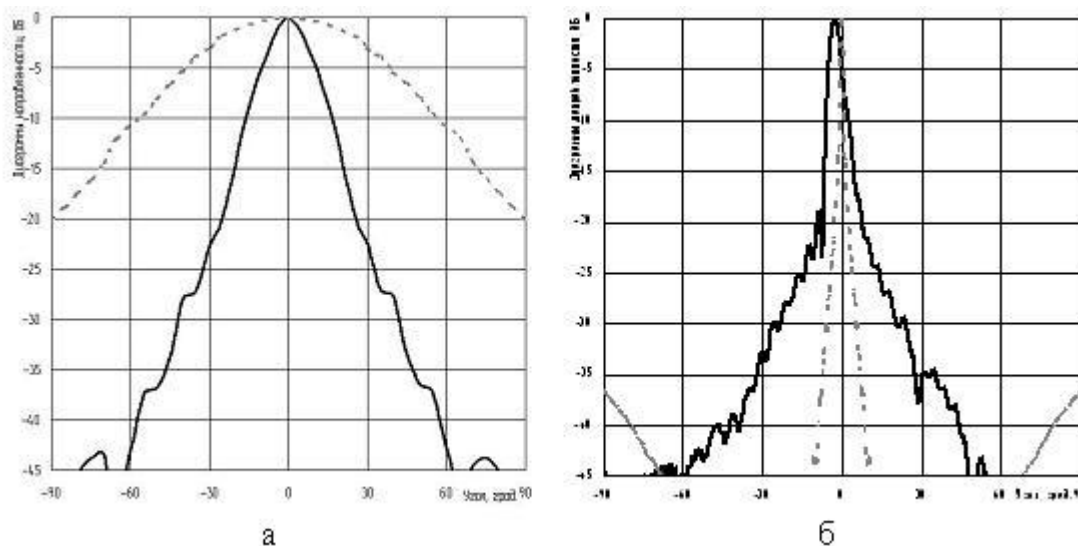


Рис. 2. Диаграммы направленности: а – пирамидального рупорного облучателя; б – зеркальной антенны.
Сплошная линия – ДН по углу места, прерывистая линия – ДН по азимуту

В безэховой камере были проведены измерения диаграммы направленности изготовленных ЗА и облучающего рупора в азимутальной и угломестной плоскостях. Результат измерений показан на рис. 3.

Уровень первых ярко выраженных боковых лепестков диаграммы направленности ЗА не более минус 25 дБ. Уровень дальних боковых не выше минус 32 дБ. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости имеет специальную форму, близкую к косекансной, и соответствует расчетной. Расчетная ширина ДН в горизонтальной плоскости по уровню -3 дБ составляет 1° , измерения показывают ширину ДН $1^\circ 43'$, что соответствует требованиям технического задания.

Для предварительной настройки положения рупорного облучателя использовался гибкий гофрированный волновод. Для жесткого закрепления положения облучателя относительно зеркала и несущей конструкции разработан и изготовлен фрезерованием комплект волноводных изгибов, отмеченный на рис. 1 позициями 3, 4, 5, 6.

Основным показателем работоспособности волноводных узлов принят коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВ) [2-4]. На рис. 4 показаны результаты моделирования и измерения характеристик волноводного узла. Следует отметить, что все расчеты осуществлялись с учетом возможностей обеспечения производством допусков, технологических скруглений углов, точностей изготовления и прочих параметров.

Сравнение кривых показывает хорошее совпадение результатов моделирования и измерения. Прочие изгибы из комплекта также показывают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных характеристик. КСВ для элементов, содержащих волноводные изгибы на 90° , не превышает значений 1,1-1,12 во всей рабочей полосе и даже более.

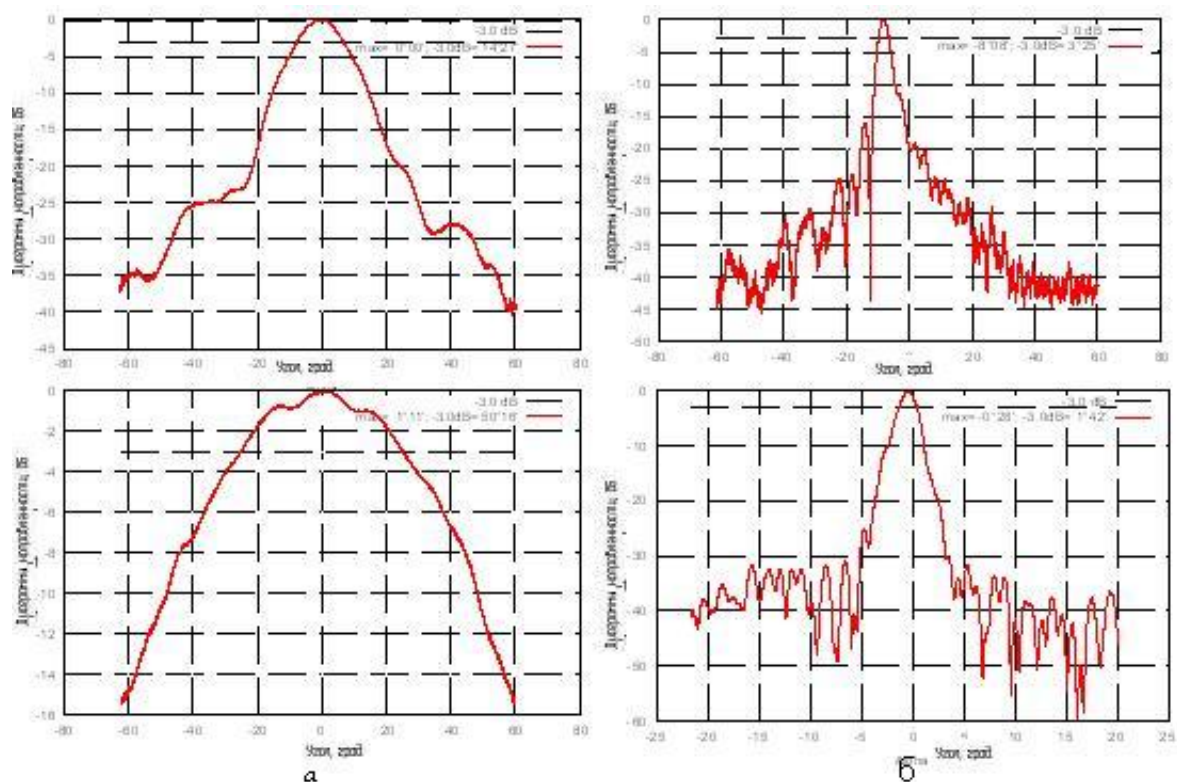


Рис. 3. Экспериментальные ДН: а – пирамидального рупорного облучателя; б – зеркальной антенны.
Сверху – ДН по углу места, внизу – ДН по азимуту

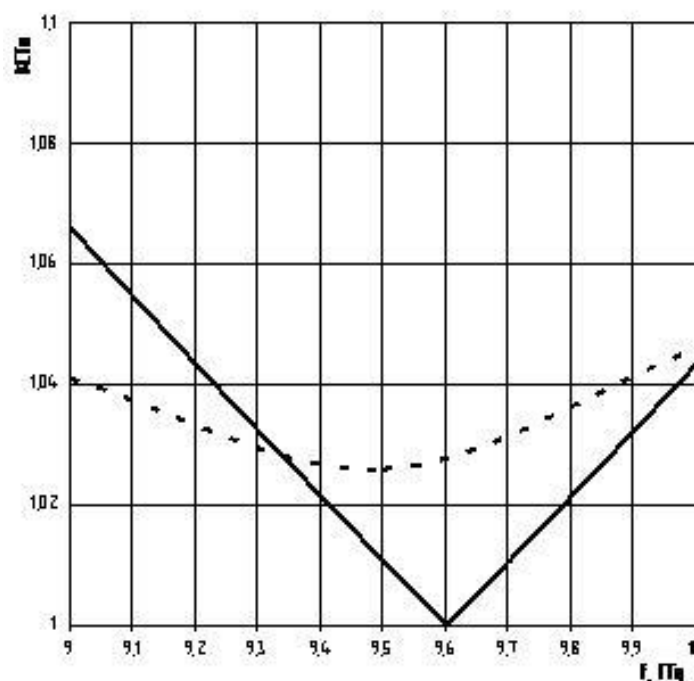


Рис. 4. КСВ волноводного изгиба. Сплошная линия – результат моделирования; прерывистая линия – результаты измерения

Одним из самых ответственных узлов макета является вращающееся волноводное сочленение. Особенности опытного производства позволяют выполнить бесконтактное вращающееся сочленение. Конструкция характеризуется тем, что части устройства сопрягаются при помощи дроссельно-фланцевого соединения. Основной частью устройства является коаксиально-волноводный переход. Из ряда конструкций было необходимо выбрать ту, которая обеспечит требуемый уровень пропускаемой мощности [3]. Как известно, явления, связанные с пробоем возникают на неоднородностях в тракте, в узких местах. Следовательно, желательно исключить из конструкции диафрагмы, крестовины и контакт центрального проводника коаксиального волновода со стенками перехода. Указанным требованиям удовлетворяет зондовый переход. Согласование достигается изменением глубины погружения зонда в волновод и выбором расстояния до стенки устройства, которое должно соответствовать короткому замыканию.

На рис. 5 показана конструкция волноводного вращающегося сочленения. Расчет проводился методом конечных интегралов.

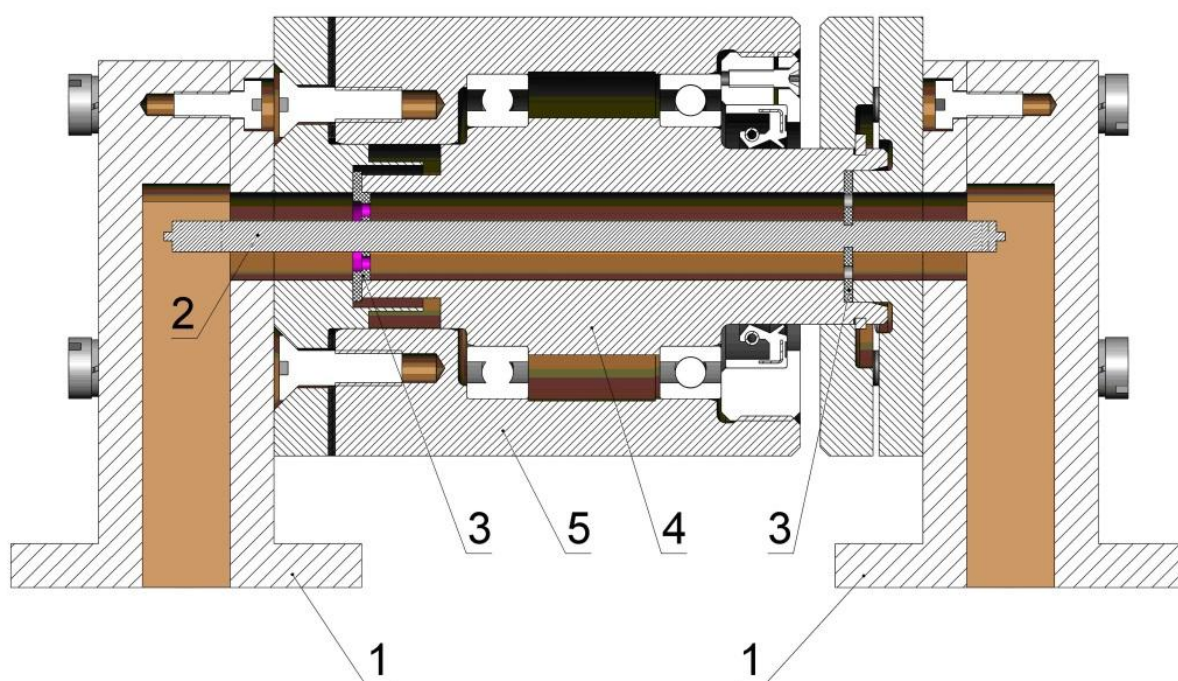


Рис. 5. Вращающееся волноводное сочленение: 1 – коаксиально-волноводный переход, 2 – центральный проводник коаксиального волновода, 3 – фиксирующие шайбы, 4 – корпус коаксиального волновода, 5 – внешний корпус устройства

Технологическую сложность представляет точное изготовление центрального стержня, его последующая установка и позиционирование. Для этого предусмотрены две полистирольные шайбы с перфорацией, которые с одной стороны, достаточно гладкие и устойчивые к истиранию, с другой, обладают низкой диэлектрической проницаемостью и не нарушают согласования. Для установки шайб предусмотрены проточки в стержне, размеры и положение которых также определяются в ходе моделирования.

Так как конструкция волноводного канала сложна и имеет несколько ответственных областей, задача была разделена на несколько этапов: моделирование коаксиально-волноводного перехода, моделирование регулярной части с фиксирующей шайбой, моделирование отрезка коаксиального волновода с фиксирующей шайбой и дроссельными ка-

навками. После оптимизации каждого отдельного узла было проведено моделирование всех компонентов в сборе. Результаты расчетов и измерений приведены на рисунке 6.

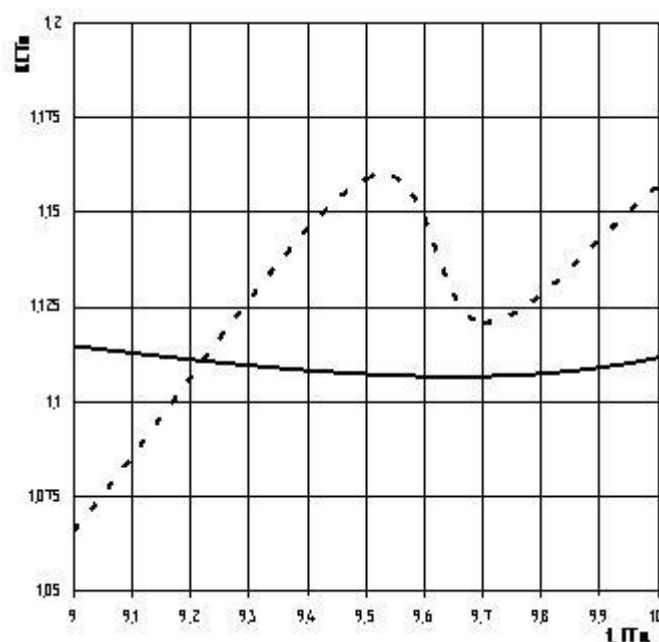


Рис. 6. КСВ вращающегося сочленения. Сплошная линия — результат моделирования, прерывистая линия — результат измерений

Подстройка положения центрального проводника в коаксиально-волноводных переходах может осуществляться только изменением длины корпуса коаксиального волновода. Для этого предусматривается набор тонких латунных шайб, подбор которых позволяет компенсировать ошибки, связанные с допусками при производстве.

Несущая рама антенной системы разработана таким образом, чтобы снизить отражения и затенения раскрыва зеркала. В транспортном положении облучатель снимается, волноводный канал закрывается пылевлагозащитной заглушкой. Зеркало опускается вручную при помощи винтов и закрепляется, закрывая раму.

Макет допускает дальнейшую модернизацию. Предусмотрена возможность изменения положения рупорного облучателя и установки на раму облучателя контррефлектора в виде плоского зеркала. Это позволит перейти к касегреновской схеме облучения зеркальной антенны. Возможна полная замена ЗА на микрополосковую антенную решетку с интегрированной системой распределения мощности с выравниванием длин каналов для одновременной запитки излучателей. Это позволит кардинально снизить массу и габариты всей антенной системы [8-10]. На сегодняшний день макет установлен на мобильную платформу и с его помощью ведутся экспериментальные исследования.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Для разработки антенно-фидерной системы экспериментального макета применены современные системы электродинамического моделирования в необходимой комбинации для расчета и сквозной оптимизации характеристик антенной системы. Разработка проводилась с учетом требований опытного производства. Полученные экспериментальные результаты исследования узлов антенны и волноводного тракта макета короткоимпульсной радиолокационной станции хорошо совпадают. В процессе разработки предусмотрены возможности

для дальнейшей модернизации системы, узлы макета пригодны для серийного производства.

Статья выпущена в рамках НИОКТР "Реализация комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства радиолокационного комплекса для системы управления воздушным движением с удаленной диспетчеризацией", выполняемой МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ОАО "РТИ" в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, в целях реализации постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства», при финансовой поддержке по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Balanis A. Antenna Theory: Analysis Design. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2005. 1117 p.
2. Голубева Н.С., Митрохин В.Н. Основы радиоэлектроники сверхвысоких частот: учеб. пособие. 2-е изд. стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 488 с.
3. Максимов В.М. Устройства СВЧ: основы теории и элементы тракта. М.: Сайнс-Пресс, 2002. 72 с.
4. Малков Н.А., Пудовкин А.П. Устройства сверхвысоких частот: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 92 с.
5. Фадеева Н.Ю., Голубцов М.Е., Парщиков А.А. Разработка зеркальной антенны со специальной формой диаграммы направленности применительно к условиям производства // Сб. докладов по тематике «Электродинамика, распространение радиоволн, антенны. Техника СВЧ» международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» за период 2002 г.-2013 г. Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2014. С. 2914-2921.
6. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. 246 с.
7. Банков С.Е., Грибанов А. Н., Курушин А. А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. М.: OneBook, 2013. 419 с.
8. Литун В.И., Прохорова В.В., Русов Ю.С, Фадеева Н.Ю. Печатная антенная решётка сантиметрового диапазона волн // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011) (Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.): матер. В 2 т. Т. 2. Севастополь: Вебер, 2011. С. 559-560.
9. Митрохин В.Н., Фадеева Н.Ю., Литун В.И. Разработка V-образного широкополосного излучателя для печатной антенной решётки // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/248346.html> (дата обращения 01.11.2014).
10. Фадеева Н.Ю., Литун В.И., Митрохин В.Н. Трёхмерный широкополосный микрополосковый излучатель // XVII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь»: матер. В 3 т. Т. 2. Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2011. С. 1590-1594.

Antenna Parts and Waveguide Transmission Line of Short Pulse Radar System Design

M.E. Golubcov¹, V.S. Ovechkin¹,

[*fadeeva.n.u@gmail.com](mailto:fadeeva.n.u@gmail.com)

N.Yu. Fadeeva^{1,*}, A.A. Parschikov¹, A.A. Borisov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: cut-parabolic antenna, beam pattern, short pulse radar system, irradiator, frequency band

The main point of this research was работы являлось to create a stand to explore the application of short pulse radio signals in radar. The stand consists of antenna and waveguide elements. Each element out to guarantee operation in X-band with 10 percent working bank and 5 percent instantaneous bandwidth and the power output gotta be 1.5 kW. The form of the antenna beam patten need to be similar to cosecant pattern Side-lobe level need to be less than -25 dB. Background level got to be at least -30 dB. Wave friction, which is radiated from the antenna aperture, got to simultaneous formed in a space.

As the most easily realizing variant of such antenna cutting parabolic mirror antenna with offset irradiator was chosen. The irradiator phase centre is shifted from the focal point of the paraboloid to form a cosecant pattern. Method of physical optics is used for the analysis of antennas. Calculating pattern of horn irradiator and mirror antenna which were met the requirements was received. The construction choice was limited by the preproduction possibilities, mass and dimensions. Mirror antenna consists of skeleton framing with mirroring elements which are fixing on it. Mirroring plane is multiplex and consists off rectangular planes made by hydroforming method. Antenna was tested and adjusted at the antenna darkroom after fabricating. The results were meted requirements.

Besides the mirror antenna and the horn antenna waveguide elements, waveguide bends and rotating joints were calculated, manufactured and researched. All calculations included the manufacturers tolerances, technological corner R etc. As the construction base of rotating joint coaxial waveguide was chosen. The decision on the one hand: let keep the axial symmetry of excited wave at rotating part of the waveguide, on the other hand there's no necessary to apply resonant rings, which are plug into dielectric beads for the transition from rotating ring part to rectangular waveguide. Devices' parts are interconnected by choke-flange coupling. Chosen construction provides required power level. Researching of all devices shows there's satisfying to the requirements.

Model could be modifying. Horn irradiator could be replaced and plane mirror subdish could be placed at irradiator frame.

References

1. Balanis A. *Antenna Theory: Analysis Design*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2005. 1117 p.
2. Golubeva N.S., Mitrokhin V.N. *Osnovy radioelektroniki sverkhvysokikh chastot* [Fundamentals of microwave radioelectronics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 488 p. (in Russian).
3. Maksimov V.M. *Ustroystva SVCh: osnovy teorii i elementy trakta* [Microwave devices: basic theory and elements of the tract]. Moscow, Sayns-Press, 2002. 72 p. (in Russian).
4. Malkov N.A., Pudovkin A.P. *Ustroystva sverkhvysokikh chastot* [Microwave devices]. Tambov, TSTU Publ., 2008. 92 p. (in Russian).
5. Fadeeva N.Yu., Golubtsov M.E., Parshchikov A.A. Development of reflector antenna with special form of radiation pattern with respect to the conditions of production. *Sb. dokladov po tematike "Elektrodinamika, rasprostranenie radiovoln, anteny. Tekhnika SVCh" mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz" za period 2002 g.-2013 g.* [Collection of reports on the subject of "Electrodynamics, radio wave propagation, antennas. Microwave technology" of International Scientific and Technical Conference "Radar, navigation, communication" for the period 2002-2013]. Voronezh, Publ. of NPF "SAKVOEE", 2014, pp. 2914-2921. (in Russian).
6. Bankov S.E., Kurushin A.A. *Raschet izluchaemykh struktur s pomoshch'yu FEKO* [Calculation of radiated structures using FEKO]. Moscow, Publ. of CJSC "NPP "Rodnik", 2008. 246 p. (in Russian).
7. Bankov S.E., Gribov A. N., Kurushin A. A. *Elektrodinamicheskoe modelirovanie antenykh i SVCh struktur s ispol'zovaniem FEKO* [Electrodynamic modeling of antenna and microwave structures using FEKO]. Moscow, OneBook Publ., 2013. 419 p. (in Russian).
8. Litun V.I., Prokhorova V.V., Rusov Yu.S., Fadeeva N.Yu. X-band printed antenna array. *21-ya Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya "SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii" (KryMiKo'2011): mater. V 2 t. T. 2* [Proc. of the 21st International Crimean Conference "Microwave equipment and telecommunication technologies" (KryMiKo'2011). In 2 vols. Vol. 2], Sevastopol', 12–16 September, 2011. Sevastopol', Veber Publ., 2011, pp. 559-560. (in Russian).
9. Mitrokhin V.N., Fadeeva N.Yu., Litun V.I. Design of V-shaped wideband radiation source for printed antenna array. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/248346.html> , accessed 01.11.2014. (in Russian).
10. Fadeeva N.Yu., Litun V.I., Mitrokhin V.N. 3D wideband microstrip irradiator. *17 mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"': mater. V 3 t. T. 2* [Proc. of the 17 International Scientific and Technical Conference on Radiolocation, Navigation and Communication. In 3 vols. Vol. 2]. Voronezh, Publ. of NPF "SAKVOEE", 2011, pp. 1590-1594. (in Russian).