В. А. Вечтомов, М. Е. Голубцов,
Э. О. Можаров

ЗЕРКАЛЬНЫЙ КОЛЛИМАТОР МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Приведено подробное описание уникального испытательного стенда электрических характеристик антенн миллиметрового диапазона волн с зеркальным коллиматором. Даны технические характеристики устройств, входящих в испытательный стенд. Описана технология изготовления сегментов высокоточного сборного коллиматорного зеркала.

E-mail: vechtomov@bmstu.ru

Ключевые слова: антенна, коллиматор, облучатель, параболическое зеркало, координатно-измерительное устройство.

Зеркальный коллиматор («Коллиматор-М») миллиметрового диапазона волн (ММВ диапазона) разработан в Московском НИИ радиосвязи (г. Москва) в обеспечение работ по созданию многолучевых антенн (МЛА). Аналогом разработки является антенный полигон (индекс 5752), изготовленный фирмой SientificAtlanta [1]. В 1988 г. с использованием «Коллиматора-М» был введен в эксплуатацию компактный полигон (КП), в котором проводились испытания макетов МЛА ММВ диапазона, включая измерения на частотах 44 и 60 ГГц. В 2000—2002 гг. в рамках работ по договору ОАО «МНИИРС» с Минпромэнерго РФ проводились работы по юстировке отражающей поверхности зеркала, подтвердившие его точностные характеристики.

В настоящее время испытательный стенд с «Коллиматор-М», сменил владельца, разобран, тщательно упакован и перевезен в УЭЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Дмитров. Работы по восстановлению испытательного стенда с зеркальным коллиматором (далее «Испытательный стенд») находятся на стадии подготовки помещения для его сборки и юстировки.

Разрабатываемые в настоящее время системы связи требуют создания антенн большой апертуры со специальной формой диаграмм направленности (ДН), работающих, в том числе, и в ММВ диапазоне. Отличительной особенностью таких антенн является большой радиус дальней зоны, не позволяющий использовать имеющиеся на предприятиях экранированные безэховые камеры (БЭК). Для решения задач радиолокации, навигации и управления необходимо знать полные характеристики эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) объекта, например, летательного аппарата: частотные, фазовые, поляризационные, амплитудные. Характеристики ЭПР могут быть получены непосредственными измерениями в КП уменьшенной модели летательного

аппарата на макетных (увеличенных) частотах, позволяя избежать дорогостоящих натурных испытаний на открытых полигонах.

Кроме того, к испытательным стендам предъявляются жесткие, часто невыполнимые в условиях открытых полигонов требования по электрическим характеристикам, степени автоматизации и стоимости проведения измерений. Климатические условия России часто не позволяют проводить измерения на открытых полигонах из-за плохих погодных условий.

Тактико-технические характеристики испытательного стенда:

- рабочая частота — 14 ... 60 ГГц;
- неравномерность распределения фазы в зоне измерений — $\pm 0,5^\circ$;
- неравномерность распределения амплитуды поля в зоне измерений — $\pm 0,5\text{дБ}$;
- максимальные размеры апертур испытуемых антенн — 1000...1500 мм;
- габаритные размеры зеркального коллиматора — $5070 \times 5430 \times 3910\text{ мм}^3$;
- масса зеркального коллиматора (с учетом веса сегментов) — 970 кг.

В состав оборудования [1, 2] входят: зеркало коллиматора (рис. 1, поз. 1); облучатели; поворотное устройство для установки и юстировки облучателей; основание; леса металлические; шаблон; опорно-поворотное устройство; блоки питания и управления ОПУ; приемопередающая и регистрирующая аппаратура. Зеркальный коллиматор показан на рис. 1.

Рис. 1. Зеркало коллиматора испытательного стенда:

1 — зеркало; 2 — поглощающий материал

Пространственная несущая ферменная конструкция (рис. 2) выполнена из алюминиевого профиля. В конструкции фермы исключены любые виды сварки, а при соединении элементов фермы использовался крепеж презонными болтами (рис. 2, поз. 9). Основой пространственной ферменной конструкции являются 18 радиальных секций (рис. 2, поз. 4). В нижней части фермы (по центру) расположена втулка для установки шаблона (рис. 2, поз. 1), по которому выполняется предварительная юстировка сегментов. На втулке расположен лазер (рис. 2, поз. 2), луч которого материализует оптическую (фокальную) ось зеркала коллиматора.

Рис. 2. Пространственная ферменная несущая конструкция из алюминиевого профиля с рабочей (а) и с тыльной стороны (б):

1 — центральный сегмент; 2 — втулка с лазером; 3 — поворотное устройство для облучателя; 4 — радиальная секция ферменной конструкции; 5 — облучатель коллиматорного зеркала; 6 — основание; 7 — леса металлические; 8 — алюминиевый профиль формы; 9 — презонные болты

Зеркало коллиматора (см. рис. 1, поз. 1) представляет собой несимметричную вырезку из параболоида вращения размерами $5\,430 \times 3\,200 \text{ мм}^2$. Зеркало составное, из 143 алюминиевых сегментов трапециевидальной формы (рис. 3). Всего имеется шесть типоразмеров сегментов, высота которых одинакова и составляет 500 мм. Общая высота (радиус) зеркала 3 250 мм, 250 мм приходится на центральный сегмент (рис. 2, а, поз. 1). Нижние сегменты выполнены с наименьшей площадью, поскольку имеют максимальную кривизну поверхности и наиболее сложны для фрезерования. Сегменты установлены на пространственной ферменной конструкции с помощью юстировочных узлов (рис. 4, поз. 4) на алюминиевом профиле (рис. 4, поз. 5).

Рабочая поверхность сегментов (см. рис. 3, поз. 5) зеркала выполнена с точностью $\pm 15 \text{ мкм}$ фрезерованием на обрабатывающем центре СВРКФ 110/1. Разработанный алгоритм подготовки исходных данных для обрабатывающего центра СВРКФ 110/1 (грубого и точно-

го фрезерования) позволил использовать только три координаты для перемещения обрабатывающего инструмента станка, вместо четырех-пяти, как в зарубежных аналогах, что существенно снизило стоимость и время изготовления сегментов зеркала. Толщина сегментов составляет 30 мм.

Рис. 3. Сегмент зеркального коллиматора (фото):

а — обратная сторона сегмента; *б* — рабочая поверхность сегмента; 1, 4 — отверстия для посадочных штифтов; 2 — резьба для крепления основания сегмента; 3 — ребра жесткости сегмента; 5 — рабочая поверхность сегмента

Рис. 4. Юстировочные узлы отражающей поверхности на несущей ферме коллиматора:

1 — юстировочный узел; 2 — алюминиевый профиль ферменной конструкции; 3 — резонансные болты; 4 — юстировочный узел на ферменной конструкции; 5 — ребро фермы, на которую посажены юстировочные узлы; 6 — обратная поверхность сегмента

Заготовка сегмента закреплялась горизонтально на рабочем столе станка. В качестве режущего инструмента применялась дисковая фреза, толщина и диаметр которой выбирался из условия обеспечения заданной точности обработки поверхности. Дисковая фреза пе-

ремещалась по линии «С—С» (см. рис. 3, б) и смещалась по вертикали. Массив точек перемещений строился из условия воспроизводства с заданной точностью (± 15 мкм) параболической поверхности сегмента. После прохождения по линии «С—С», резец смещался параллельно этой линии и его движение продолжалось до полной обработки поверхности сегмента. Таким образом, резец совершал движение «вверх-вниз», по оси сегмента (линия «С—С») и выполнял параллельное смещение.

Разработанная технология изготовления сегментов практически полностью исключила процессы старения, приводящие к искажениям их профиля поверхности. Сегменты изготавливались из алюминиевого сплава АМг6Б-40, имеющего минимальную вязкость, что позволило снять проблему появления заусенцев при их фрезеровании.

На завод МНИИРС заготовки поступали с небольшим допуском по габаритам, и на обычных фрезерных станках обрабатывалась обратная сторона сегментов с целью снижения массы (см. рис. 3, а). Для фиксации заготовки на рабочем столе обрабатывающего центра СВРКФ 110/1 были изготовлены шесть типоразмеров оснований, на которые крепились заготовки. В течение всего технологического процесса до его окончания заготовки сегментов не снимались с оснований. Точность и идентичность установок заготовок сегментов на основания обеспечивалась штифтами (см. рис. 3, а, поз. 1), что гарантировало при сборке зеркала гладкость и точность воспроизведения заданной параболической поверхности.

Первая технологическая операция — грубая обработка на обрабатывающем центре СВРКФ 110/1 плоской поверхности заготовки сегмента.

Вторая технологическая операция — термическая обработка для удаления остаточных напряжений, возникших после фрезеровки рабочей поверхности сегмента.

Третья технологическая операция — точная фрезеровка рабочей поверхности сегмента.

Четвертая технологическая операция — термическое старение образца сегмента. Готовый образец сегмента с основанием остывал в термической печи в заданном температурном режиме.

Каждый сегмент (см. рис. 3) крепится к ферме тремя юстировочными узлами (см. рис. 4, поз. 1). Перемещение точки крепления юстировочного узла к сегменту осуществляется дифференциальной резьбовой парой на 1,25 мм на один оборот (грубо) или на 0,25 мм (точно). Полное линейное перемещение штока узла составляет ($40 \pm 0,01$) мм. Стопорящаяся шаровая опора юстировочного узла позволяет крепить сегмент под телесным углом $\pm 14^\circ$ к оси узла, что существенно снижает требования к точности изготовления простран-

Рис. 5. Облучатель зеркала коллиматора на диапазон 20 ГГц

поддерживается сменными облучателями. Конструкция облучателя позволяет получать ДН практически прямоугольной формы с шириной порядка $12 \dots 30^\circ$ по уровню мощности $0,1 \dots 0,5$ дБ в узком (около 4 %) диапазоне частот. Антенна технологична в производстве, не требует при изготовлении сложного дорогостоящего оборудования. Масса облучателя не превышала 1 000 г. Среднее положение оси поляризации облучателя (см. рис. 2, поз. 5) составляет 25° к оптической оси зеркала.

Поворотное устройство (рис. 6) предназначено для совмещения фазового центра облучателя с фокусом зеркала коллиматора. Технические характеристики устройства приведены ниже:

Параметр	Пределы перемещений	Точность установки
Перемещение линейное, мм:		
вдоль оптической оси	± 50	0,1
в вертикальной плоскости	± 50	0,1
в горизонтальной плоскости	± 50	0,1
Перемещение угловое, град:		
по азимуту	± 10	0,1
по углу места	± 10	0,1
вокруг оси поляризации	± 5	0,1

Основание зеркала коллиматора (см. рис. 2, поз. 6) предназначено для установки на нем фермы зеркала коллиматора и поворотного устройства облучателя (см. рис. 2, поз. 3). Основание выполнено из стального швеллера и установлено на бетонную стяжку пола экранированного помещения с помощью опор с резиновыми амортизаторами. Применение массивного основания с резиновыми амортизаторами уменьшает влияние вибраций от окружающих промышленных объектов на точность измерений в КП.

Леса металлические (см. рис. 2, поз. 7) установлены за пространственной ферменной конструкцией и обеспечивают удобство сборки

ственной ферменной конструкции. Общее число юстировочных узлов составляет 429 шт.

Облучатели (рис. 5) выполнялись в виде антенны бегущей волны на коаксиально-диэлектрическом волноводе. Конструктивно облучатель представляет собой диэлектрический стержень, окруженный цилиндром из того же материала. Рабочий диапазон частот до 60 ГГц

фермы и юстировки сегментов. Кроме того, леса позволяют исключить нагружение пространственной фермы при выполнении юстировки сегментов зеркала коллиматора.

Шаблон предназначен для предварительной (при монтаже фермы) юстировки сегментов зеркала и окончательной (точной) юстировки с использованием оптического стенда. Шаблон представляет собой стальную трубчатую конструкцию размерами $3\,850 \times 1\,590 \times 770\text{ мм}^3$. Масса шаблона не превышает 130 кг. Точный профиль параболы создается четырьмя частями ножа, торцевая поверхность которого фрезеруется на станке с ЧПУ. При проведении оптической юстировки, шаблон является одним из элементов оптического стенда.

Рис. 6. Поворотное устройство облучателя зеркала коллиматора

Координатно-измерительное устройство (КИУ) обеспечивает перемещение измерительного зонда в плоскости, перпендикулярной оптической оси зеркала. КИУ предназначено для:

- радиоголографической юстировки сегментов зеркала коллиматора;
- проведения регламентных работ в КП;
- аттестации коллиматорного устройства;
- проведения измерений электрических характеристик антенн, эффективной поверхности рассеяния и других характеристик методом ближней зоны.

Размеры зоны сканирования КИУ — $1\,500 \times 1\,500\text{ мм}^2$. Точность установки зонда 0,1 мм. Дискрет позиционирования — 0,2 мм. Скорость перемещения зонда при работе электродвигателя в номинальном режиме — 7 мм/с по каждой оси. Масса координатно-измерительного устройства 70 кг.

В качестве опорно-поворотного устройства (ОПУ) используется ОПУ АК-12ЩД. Грузоподъемность ОПУ АК-12ЩД составляет 100 кг, что достаточно для радиотехнических систем ММВ диапазона. ОПУ имеет две оси вращения: по азимуту $\pm 180^\circ$; по углу места $+90^\circ$ и -15° . ОПУ работает в режиме как равномерного, так и дискретного вращения. Дискрет перемещения ОПУ по углам составляет $6'$ по обеим осям вращения. Блоки системы управления и питания используются стандартные, поставляемые с ОПУ АК-12ЩД.

Для оценки влияния старения на точность соответствия рабочей поверхности сегмента форме параболоида вращения, в 2012 г. были проведены тестовые измерения с использованием лазерного радара фирмы Nikon Metrology марки MV224 [2]. Лазерный радар позволяет измерять положения точек объекта в пространстве с СКО = 50 мкм на расстоянии до 5 м и с СКО = 25 мкм на расстоянии до 2 м. Для проведения измерений сегмент коллиматора жестко закрепляется на металлическом столе в чистом помещении с подготовленным фундаментом.

В пакете программного обеспечения лазерного радара при помощи встроенной в него видеокамеры строится контур измеряемого сегмента. Все дальнейшие измерения проводятся только внутри намеченного контура.

Поскольку возможно применение нескольких режимов, в которых скорость измерений влияет на точность, выбирается самый точный режим — EnhancedMetrologyScan. Скорость измерения в этом режиме составляет 2 точки в секунду. После получения «облака точек», поверхность сегмента коллиматора сравнивается с поверхностью параболоида с фокусным расстоянием 3 250 мм. Положение сегмента относительно параболоида предварительно определяется по нескольким опорным точкам и уточняется в процессе сравнения методом минимума среднего квадратичного.

Промер сегмента коллиматора осуществлялся двумя способами, отличающимися количеством измеренных точек. Первый способ состоит в измерении точек на поверхности сегмента с шагом 20 мм. В результате сегмент коллиматора разбивается на 215 точек, СКО от поверхности параболоида составляет 30 мкм. Максимальное отклонение — +80 мкм и минимальное — -80 мкм. Данный способ позволяет быстро, но грубо оценить качество поверхности сегмента коллиматора (рис. 7).

Второй способ состоит в измерении точек на поверхности сегмента с шагом 1 мм. В данном случае сегмент коллиматора разбивается на 87 500 точек. При таком количестве измерений можно оценить промахи и отбросить их. С наличием промахов максимальное отклонение +530 мкм и минимальное -450 мкм, количество промахов 1 200 (1,4 % всех точек). В результате промера получено СКО от поверхности параболоида порядка 30 мкм. Данный способ позволяет качественно оценить поверхность сегмента коллиматора.

Используя цветовое деление участков отклонения от 200 до 30 мкм, от +30 до -30 мкм, от -30 до -200 мкм, можно проследить влияние структуры фрезеровки внутренней части сегмента на его зеркальную поверхность (рис. 8).

Рис. 7. Результаты промера сегмента с шагом 20 мм при разбиении на 215 точек

Рис. 8. Структура фрезеровки внутренней части сегмента коллиматора

Проведенные исследования подтверждают работоспособность сегментов зеркала коллиматора и возможность воссоздания на его основе КП в УЭЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты промеров доказывают правильность выбранной технологии снятия напряжений, возникающих при механообработке и старении материала.

Существенным отличием КП являются его малые продольные размеры, что позволяет компактно разместить в одном экранированном помещении блоки питания, блоки управления ОПУ, приемо-передающую и регистрирующую аппаратуру.

Испытательный стенд «Коллиматор-М» и в настоящее время является высокотехнологичным и дорогостоящим устройством, позволяющим вести разработки антенн большой апертуры со специальной формой ДН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вечтомов В. А., Седов А. Н. Компактный полигон с зеркальным коллиматором миллиметрового диапазона волн // Антенны. – 2005. – Вып. 10 (101). – С. 76–77.
2. MV330/MV350 Laser Radar // nikonmetrology.com: официальный сайт Nikon Metrology. 2012. URL: http://nikonmetrology.com/en_EU/Products/Large-Volume-Applications/Laser-Radar/MV330-MV350-Laser-Radar (дата обращения: 15.04.2012).

Статья поступила в редакцию 07.09.2012