

Исследование технологии для изготовления отражателей зеркальных антенн КВЧ

12, декабрь 2017

Голубцов М. Е., Можаров Э. О.^{*}, Димиев Д. К.

УДК: 621.317.2

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

^{*}eduardmozharov@yandex.ru

Введение

В связных и радиолокационных комплексах широко применяются зеркальные антенны в связи с их надежностью, легкой масштабируемостью и дешевизной. Но с увеличением рабочей частоты требования к качеству изготовления зеркальной антенны резко возрастают.

Существуют различные технологии изготовления: выдавливание в матрицу, выдавливание-обкатка роликом, фрезерование на многокоординатных станках с ЧПУ. В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Радиоэлектроники и лазерной техники» была разработана технология изготовления единичных и мелкосерийных зеркальных антенн. Начало данной технологии в МГТУ им. Н.Э. Баумана дали Кутушев А.М. и Парщиков А.А [1]. На территории Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана под их руководством разработаны, собраны и введены в эксплуатацию в 1972 году западная и в 1978 восточная антенны радиотелескопа РТ-7,5.

1. Технология изготовления отражателей зеркальных антенн

Технологии изготовления отражателей зеркальных антенн можно разделить на два больших класса: изготовление небольших зеркальных антенн из цельного листа металла, изготовление более крупных зеркальных антенн путем сборки из отдельных сегментов.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана отработаны оба класса технологий. На рис. 1 приведено подробное описание технологии изготовления зеркальных антенн на примере изготовления двухметровой зеркальной антенны, построенной по схеме Кассегрена.

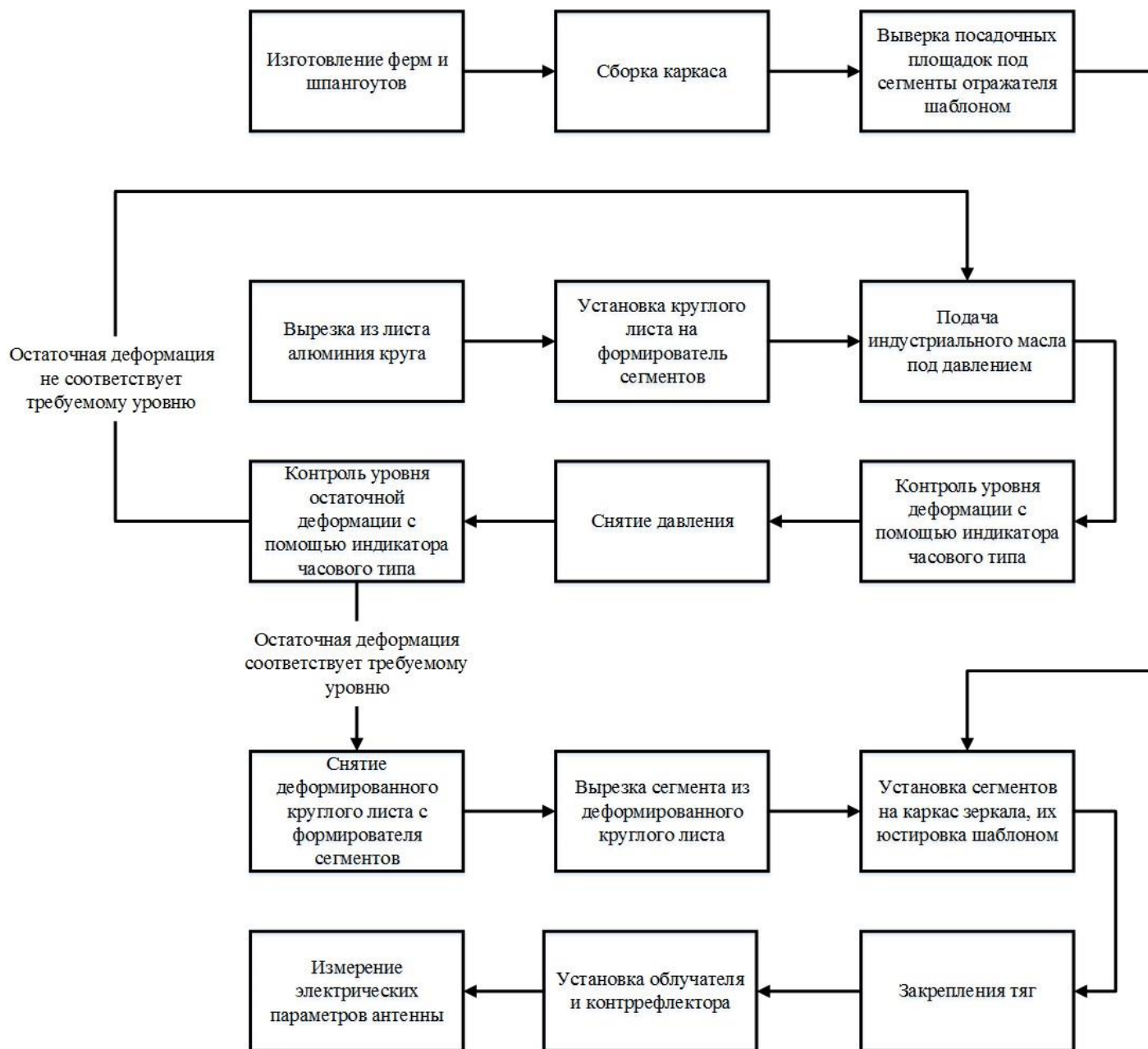


Рис. 1. Технологический процесс изготовления отражателя зеркальной антенны

2. Изготовление каркаса отражателя

Каркас отражателя изготавливается из ферм и шпангоутов. Симметрия конструкции зеркальной антенны и то, что сечение параболоида, перпендикулярное плоскости раскры- ва является параболой с тем же самым фокусным расстоянием, позволяет упростить кон- струкцию и использовать один тип фермы и шпангоута при составлении каркаса отража- теля. На рис. 2 показан каркас зеркальной антенны на карусельном станке и шаблон, предназначенный для выверки посадочных мест для сегментов отражателя.



Рис. 2. Каркас зеркальной антенны на карусельном станке

В качестве материала используется лист легкого, прочного алюминиевого сплава Д16Т ГОСТ 4784-97, толщиной от 1,5 мм. Изготовление ферм и шпангоутов осуществляется абразивной гидрорезкой. Со стороны отражателя на фермах и шпангоутах проектируются посадочные выступы высотой 15...20 мм. Выступы располагаются равномерно на параболе, с фокусным расстоянием тем же самым, что у изготавливаемой зеркальной антенны. Заготовки ферм и шпангоутов располагают на столе карусельного станка, скрепляются друг с другом винтами. На ось карусельного станка одевается шаблон, который является стальной пластиной с параболической образующей. Шаблон изготовлен на фрезерном станке с ЧПУ с высокой точностью, среднеквадратическое отклонение профиля шаблона от параболы не превышает 15 мкм.

После совмещения оси каркаса с осью шаблона, производится доработка посадочных площадок: вручную срезаются вершины посадочных площадок, а их профиль и взаимное расположение контролируется шаблоном.

3. Формирование отражающей поверхности зеркальной антенны

Поверхность рефлектора разбивается на сегменты. Форма сегментов может различаться и зависит от геометрии всего отражателя. Для осесимметричных антенн проекция центрального сегмента на плоскость раскрыва является кругом. Остальные сегменты будут трапециевидной формы. Для офсетных антенн чаще используются квадратные сегменты.

У двухметровой осесимметричной зеркальной антенны, представленной на рис. 2, центральный сегмент – круглый, трапециевидных одинаковых 6 и 12 сегментов.

В качестве материала для сегментов выбраны деформируемые сплавы алюминия, так как они обладают малой плотностью, коррозионной стойкостью, хорошей электропроводимостью и высокой пластичностью, что необходимо при выдавливании из плоского листа. В

качестве материала берутся следующие сплавы: АМг5, А5М, АД1М. Толщина листов алюминия берется от 1 мм до 2 мм. Листы толщиной менее 1 мм сложнее закрепить на каркасе, также они могут сильно деформироваться в процессе эксплуатации. Листы толще 2 мм будут создавать излишнюю весовую нагрузку на каркас антенны, что может привести к его провисанию и уходу профиля от идеального параболоида. Для выдавливания слишком толстых листов необходимы более высокие давления.

На рис. 3 представлен стенд формирователя сегментов зеркала, введены следующие обозначения: 1 – формирователь профиля сегментов отражателя; 2 – прижимное кольцо; 3 – круглая алюминиевая заготовка профиля; 4 – индикатор часового типа (ИЧ-50); 5 – зажим; 6 – манометр; 7 – бак с индустриальным маслом; 8 – насос шестеренчатый; 9 – электродвигатель; 10, 11 – рукав напорный.

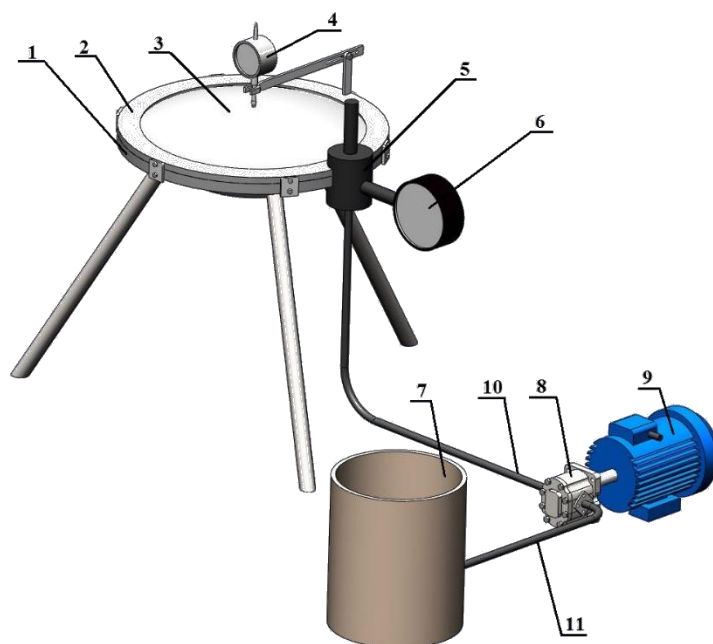


Рис. 3. Стенд формирователя профиля сегментов отражателя

Заготовками для выдавливания сегментов являются круглые алюминиевые листы. Диаметр листа определяется оправкой формирователя профиля сегментов зеркала. Чаще используются листы диаметра 320 мм и 520 мм.

Круглый лист устанавливается на формирователь профиля сегментов зеркала, крепится прижимным кольцом и зажимом. С помощью насоса подается индустриальное масло (например, И-20А) в формирователь, манометром контролируется уровень давления. В процессе выдавливания листам придается сферическая форма. Необходимый диаметр сферы для каждой пластины рассчитывается таким образом, чтобы пластины аппроксимировали поверхность параболоида с максимальным приближением к требуемой форме. Индикатор часового типа, расположенный над центром формирователя регистрирует уровень деформации. После снятия давления контролируется уровень остаточной деформации алюминиевой пластины, если остаточная деформация не удовлетворяет расчетным значениям, то процесс выдавливания повторяется снова.

Проведен численный расчет зависимости уровня деформации от значения давления на пластину диаметра 500 мм сплава АД1М ГОСТ 4784-97 и толщиной 1,5 мм. На рис. 4 представлена зависимость максимального прогиба в центре пластины от уровня подаваемого давления.

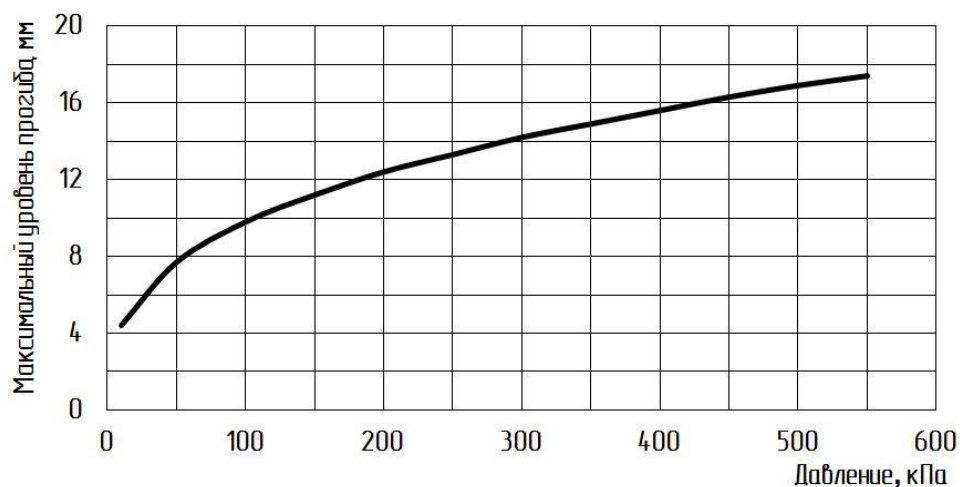


Рис. 4. Зависимость уровня прогиба в центре круглого листа диаметра 500 мм сплава АД1М ГОСТ 4784-97 и толщиной 1,5 мм от давления

После деформации пластин из них вырезаются сегменты необходимой формы. Сегменты крепятся на посадочные места к каркасу винтами потай. За счет того, что посадочные места выверены шаблоном, сегменты притягиваются и изменяют свою форму из сферической в параболическую. Шаблон приподнимается на толщину листа сегмента и происходит проверка профиля сегментов, при необходимости выполняется доработка поверхности. Отражатель зеркальной антенны после установки всех сегментов представлен на рис. 5.



Рис. 5. Отражатель двухметровой зеркальной антенны

Следующим этапом является изготовление тяг под контррефлектор (для двухзеркальных антенн) или под облучатель (для однозеркальных антенн). Так как контррефлектор является гиперboloидом вращения, то он изготавливается фрезерованием на станке с ЧПУ. После установки облучателя и контррефлектора зеркальная антенна считается изготовленной.

Зеркальные антенны, изготовленные по рассматриваемой технологии, активно используются в составе радиолокационных комплексов и при создании лабораторных установок измерения параметров антенн. Так как за период разработки данной технологии было изготовлено множество зеркальных антенн СВЧ и КВЧ диапазонов частот, ниже представлено несколько изготовленных за последние годы антенных систем.

4. Радиотелескоп РТ-7,5

По описанной выше технологии были изготовлены отражатели двух радиотелескоп РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана [1-3] (см. рис. 6). Измерения профиля поверхности восточной антенны в 2013 году показали, что СКО поверхности отражателя составляет 0,34 мм, СКО центральной части 0,16 мм. Максимальные отклонения от поверхности параболоида на краю зеркала не превышают 2 мм.

Рабочий диапазон волн 4-1 мм, диаметр зеркала 7,75 м, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности 2,5 угл.мин. на $\lambda = 3,4$ мм и 1 угл.мин. на 1 мм.



а)



б)

Рис. 6. Восточная антенна радиотелескопа РТ-7,5: а) вид сбоку; б) вид спереди

Более чем за 35 лет с помощью радиотелескопа МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнены тысячи измерений радиоярких карт Солнца, характеризующих его хромосферу, проведено множество исследований и экспериментов по распространению радиоволн КВЧ диапазона в атмосфере Земли.

5. Антенна радиолокатора для сверхкороткоимпульсной радиолокации

Антенна радиолокатора для сверхкороткоимпульсной радиолокации (СКИРЛ) [4] представлена на рис. 7. Каркас антенны состоит из 5 шпангоутов и 13 ферм, отражатель является вырезкой из параболоида вращения 500×2000 мм². Радиолокационный комплекс СКИРЛ неоднократно подтверждал свои технические характеристики, позволяет обнаруживать людей и малоразмерные летательные аппараты с высокой разрешающей способностью.



а)



б)

Рис. 7. Радиолокатор СКИРЛ (а) и антенна радиолокатора СКИРЛ (б)

6. Зеркальный радиоколлиматор Ка-диапазона длин волн.

Для измерения электрических параметров антенн в миллиметровом диапазоне волн в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 году начались разработки зеркального радиоколлиматора с раскрытием 1×1 м². В 2012 году был изготовлен зеркальный коллиматор (рис. 8) [5] и проведена серия промеров профиля его поверхности, проведены испытания, подтверждающие его работоспособность в Ка-диапазоне волн. Отражатель коллиматора состоит из 9 сегментов, 7 ферм и 4-х шпангоутов. СКО поверхности коллиматора от поверхности параболоида вращения составляет 0,28 мм.



а)



б)

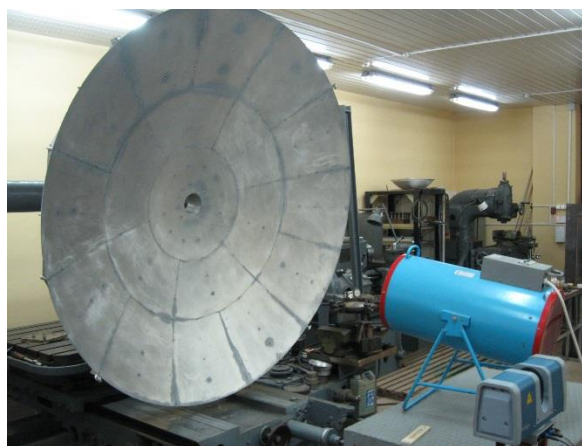
Рис. 8. Зеркальный радиоколлиматор Ка-диапазона волн: **а)** изготовление отражателя; **б)** в составе лабораторной установки измерения параметров антенн

За три года с помощью зеркального коллиматора были измерены электрические параметры более 7 антенн, среди которых были и волноводно-щелевые решетки с частотным сканированием луча и двумерные проходные ФАР.

7. Контроль профиля поверхности двухметровой зеркальной антенны

Измерения профиля поверхности, изготовленной двухметровой зеркальной антенны, проводились лазерным сканером Surphaser 25SHX ER. Согласно приложению, к свидетельству №45637 об утверждении типа средства измерен, сканер обеспечивает допустимое СКО измерения координат не более 0,2 мм на расстоянии от 1,5 до 20 м.

Проведена серия измерений при различных положениях антенны относительно вектора силы тяжести: плоскость раскрыва отражателя располагалась вертикально (см. рис. 9, а), горизонтально и под 30 градусов к плоскости горизонта (см. рис. 9, б). Поскольку зеркальная антенна будет работать вне помещений, то необходимо исследовать температурные деформации ее профиля. Первоначально антенн измерялась в сборочном цехе при комнатной температуре 22°C. После этого отражатель нагревался в течении одного часа тепловой пушкой до 40°C. При всех измерениях контролировалась температура металлических сегментов.



а)



б)

Рис. 9. Измерение профиля двухметровой зеркальной антенны: **а)** антенна в вертикальном положении, температура поверхности 40°; **б)** антенна наклонена к горизонту на 30 градусов

Последующий цикл измерений проводился после выдержки антенны ночью на улице при температуре минус 15°C. После охлаждения сборочного цеха до 10°C и подготовки измерительного оборудования, антенна вносилась в помещение. Цикл измерений лазерным сканером, без учета настройки и подготовки, занимает не более 3 минут, за это время температура поверхности антенны не успевает заметно измениться.

Следующий этап анализа полученных результатов наиболее трудоемкий, частично он описан работах [7, 8]. Полученные данные, так называемое «облако точек», имеют вид матрицы точек с координатами в декартовой системе координат. Далее осуществляется зачистка данных от посторонних предметов, удаляются шумы. При проведенном анализе данные сокращены до 50 тысяч точек. В «облако точек» вписывает параболоид вращения по критерию минимума среднеквадратичного отклонения, строится карта неровностей зеркала (см. рис. 10). В работе [8] подробно описан процесс вычисления вклада неровностей в фазовое распределение в раскрыве антенны. Для этого проведена регуляризация сетки, использована триангуляция Делоне.

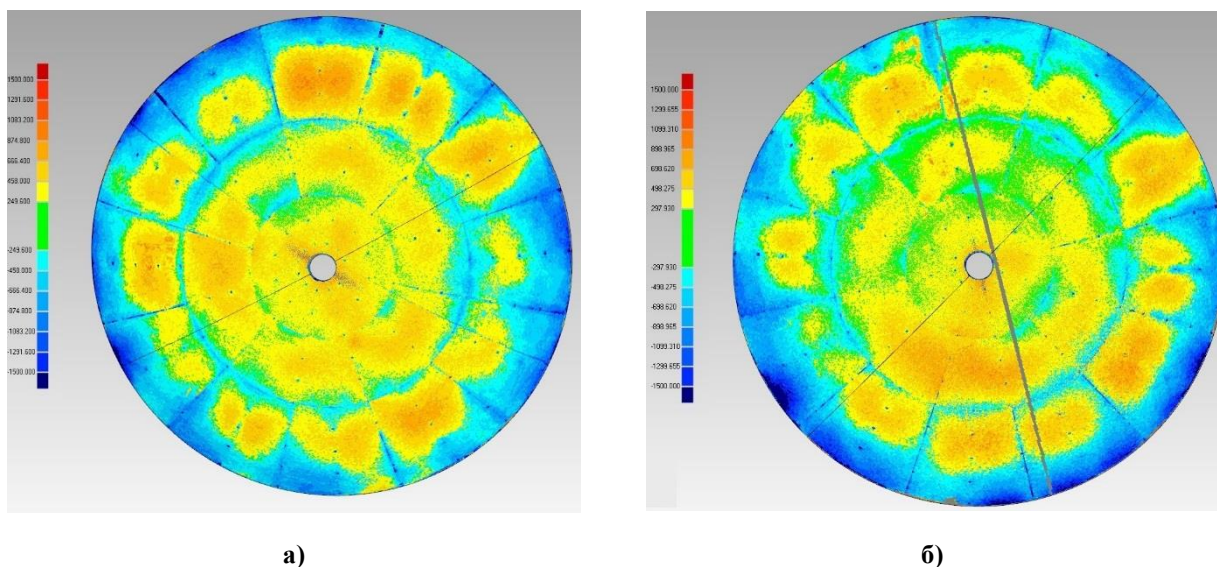


Рис. 10. Измерение профиля двухметровой зеркальной антенны: **(а)** антенна в вертикальном положении, температура поверхности 40°C; **(б)** угол антенны к горизонту составляет 30 градусов, температура поверхности 22°C

8. Прогнозирование электрических характеристик двухметровой зеркальной антенны на основании промера ее поверхности

Знание СКО поверхности отражателя позволяет приближенно оценить снижение коэффициента усиления (КУ) G согласно формуле Рузе (1) [6].

$$G_{\text{нер.}} = G_{\text{ид}} \cdot \exp\left(-\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2. \quad (1)$$

где, $G_{\text{ид}}$ – коэффициент усиления антенны с идеальным отражателем;

$G_{\text{нер.}}$ – коэффициент усиления антенны с реальным, неровным отражателем;

λ – длина волны в свободном пространстве;

σ – среднеквадратичное отклонение поверхности отражателя от параболоида вращения.

При данной оценке не рассматривались другие источники погрешности, приводящие к ухудшению формы ДН и спаду КУ, поэтому считаем, что:

- фазовый центр облучателя точно совпадает с фокусом зеркальной антенны;
- фазовая ДН облучателя, является равномерной в пределах угла облучения;
- ДН облучателя осесимметричная, без учета потерь за счет перелива мощности за зеркало;
- не учитываются потери в волноводном тракте, облучателе и на кроссполяризацию.

В таблице 1 представлен прогнозируемый коэффициент усиления зеркальной антенны при равномерном амплитудном распределении в раскрытии зеркала. График 2 на рис. 10 показывает зависимость КУ от частоты. Данные графики коррелируют с известными зависимостями для антенн, описанных в работе [6]. Так как СКО поверхности антенны изменяется в зависимости от ее положения в пространстве и температуры окружающей среды, предполагается, что значения СКО поверхности отражателя будут лежать в диапазоне между графиками 1 и 3 на рис. 11.

Таблица 1. Прогнозируемый коэффициент усиления зеркальной антенны на частоте 100 ГГц, согласно формуле Рузе

Состояние антенн		СКО поверхности, мм	Вычисленное значение КУ на 100 ГГц, дБ
Положение в пространстве	Температура поверхности, °С		
Вертикальное	22	0,38	55,3
Вертикальное	40	0,32	58,6
Горизонтальное	22	0,34	57,6
Наклон к горизонту в 30 градусов	-15	0,346	57,3
Наклон к горизонту в 30 градусов	15	0,352	57
Наклон к горизонту в 30 градусов	22	0,32	58,6

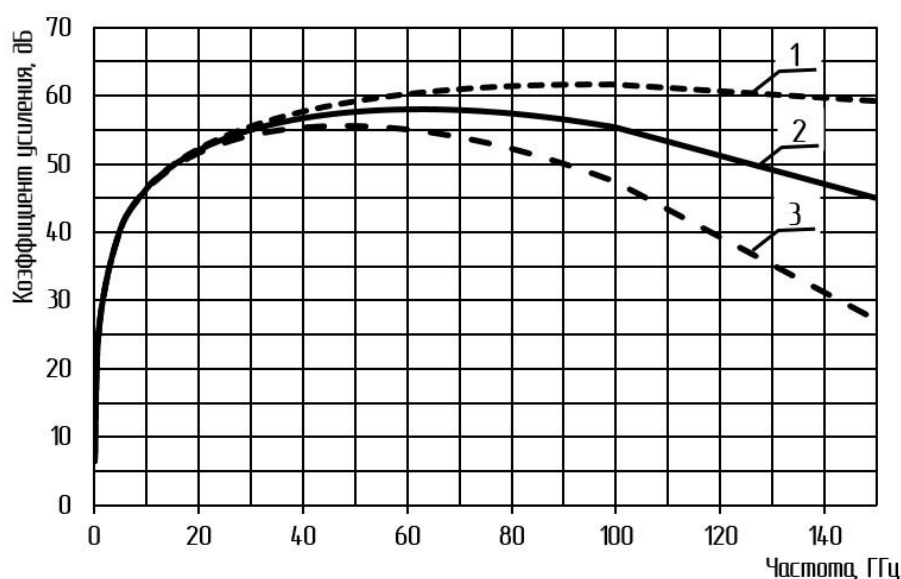


Рис. 11. График зависимости КУ исследуемой антенны от частоты при равномерном амплитудном распределении в раскрытии: 1 – при СКО = 0,25 мм, 2 – при СКО = 0,38 мм и 3 – при СКО = 0,5 мм

Более точная оценка электрических характеристик зеркальной антенны осуществляется с учетом карты неровностей отражателя для фиксированных условий ее положения в пространстве и температуры ее поверхности. Задано ниспадающее амплитудное распределение по закону «косинуса» (2) с уровнем поля на краю зеркала $\Delta = 0,1$.

$$A(r) = \Delta + (1 - \Delta) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{r}{R}\right), \quad (2)$$

где, $A(r)$ – амплитудное распределение в раскрыве;

R – радиус зеркала.

Расчетная диаграмма направленности, для антенны с идеальным параболическим зеркалом отмечена цифрой 1 на рис. 12. ДН зеркальной антенны на частоте 100 ГГц с учетом неровностей рефлектора при его вертикальном положении и температуре 40°C отмечена цифрой 2 на рис. 12.

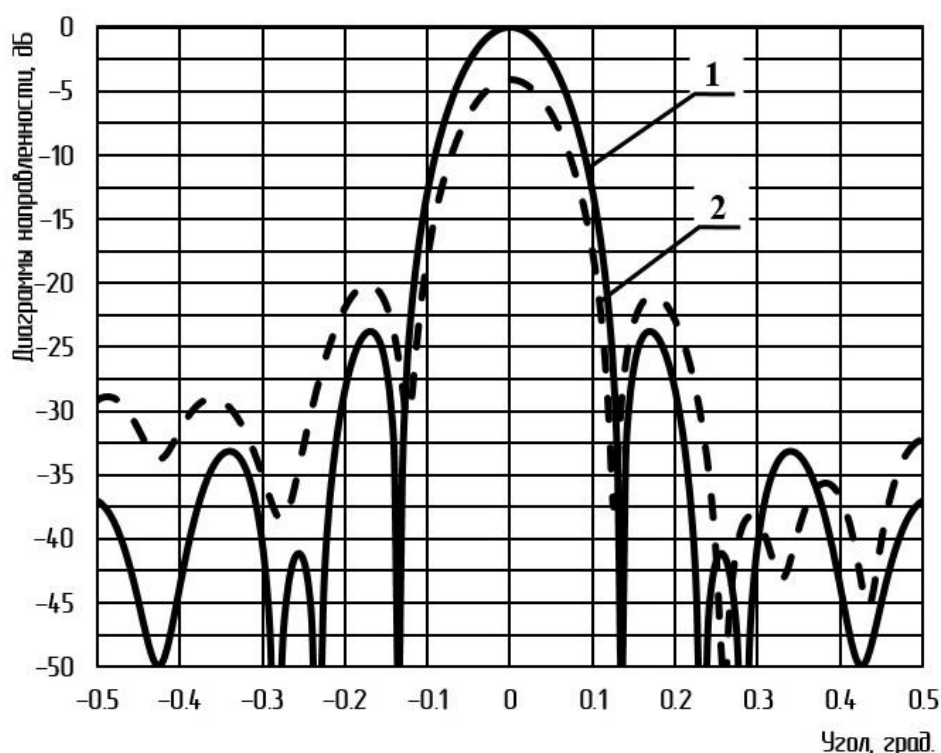


Рис. 12. Сечение диаграммы направленности при спадающем амплитудном распределении в раскрыве зеркальной антенны: 1 – при идеальном отражателе, 2 – с учетом неровностей профиля поверхности с СКО=0,32 мм (вертикальное положение и температура 40°C)

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

- диаграмма направленности теряет свою симметричность, так как отклонения профиля от параболоида распределены на поверхности антенны несимметрично;
- УБЛ возрастает с минус 23 дБ (для зеркала без неровностей) до минус 15 дБ;
- снижение КУ составляет 4 дБ, что значительно меньше значения в минус 11 дБ, рассчитанного по формуле Рузе (1). Данный эффект давно описан в литературе и объясняется тем, что при ниспадающем амплитудном распределении в раскрыве вклад неровностей отражателя уменьшается. Стоит отметить, что центр отражателя закреплен жестче, поэтому СКО поверхности центральной области меньше, чем всего зеркала в целом.

Заключение

В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Радиоэлектроники и лазерной техники» была разработана и отлажена технология изготовления единичных и мелкосерийных зеркальных антенн. Представлены антенные системы, в которых используются произведенные антенны. Исследован профиль поверхности отражателя двухметровой антенны при эксплуатации в различных положениях и температурных условиях. Показана и отработана методика оценки влияния неровностей профиля отражателя зеркальной антенны на ее электрические характеристики излучения, что позволяет сделать вывод о пригодности зеркальной антенны для работы в миллиметровом диапазоне длин волн.

Список литературы

- [1]. Парщиков А. А., Розанов Б.А., Сагатов В.С. и др. Методика выверки и технология изготовления антенн радиотелескопа РТИ-7,5/250 МВТУ // Известия вузов. Радиофизика, 1973. Т. 16. № 5. С. 665–668.
- [2]. Парщиков А.А., Жаркова Н.А. Антенны и аппаратура радиотелескопа МГТУ им. Н.Э. Баумана // Антенны, 2006. № 7 (110). С. 64-68.
- [3]. Розанов Б.А. Радиотелескопу МГТУ — 35 ЛЕТ// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 1998. № 4 (110). С. 66-72.
- [4]. Голубцов М.Е., Овечкин В.С., Фадеева Н.Ю., Парщиков А.А., Борисов А.А. Разработка узлов антенны и волноводного тракта макета короткоимпульсной радиолокационной установки. Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. №12. С. 550-559.
- [5]. Можаров Э.О., Парщиков А.А., Голубцов М.Е., Русов Ю.С. Коллиматор для исследования малоапертурных антенн Ка-диапазона // Сборник докладов XVIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2012. Т. 1. С. 1113-1118.
- [6]. Ruze J. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern // Suppl. al Nuovo Cimento, vol. 9, No. 3. 1952. P. 364 - 380.
- [7]. Лавров В.И., Кузовников А.В., Сомов В.Г. Методика оценки параметров крупногабаритных бортовых антенн спутниковых систем связи // Антенны, 2013. № 2 (189). С. 40-46.
- [8]. Митрохин В.Н., Можаров Э.О., Русов Ю.С. Исследование ближнего поля зеркальной антенны с учетом качества поверхности отражателя // Антенны, 2014. №7. С. 16-21.