

УДК 681.7.03:520.272.22+621.396.677.8

ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОРОВ ЗЕРКАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АНТЕНН ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЧАСТОТ

© 2021 г. А. Н. Муранов*

Институт конструкторско-технологической информатики РАН, г. Москва, Россия

**MuranovAlecs@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2019 г.

После доработки 27.02.2020 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

Увеличение частот функционирования перспективных зеркальных космических антенн приводит к существенному ужесточению требований к точности и стабильности профиля отражающей поверхности используемых рефлекторов, однако обеспечение высоких требований является технически сложно реализуемым. Исходя из этого предложена задача Парето-оптимального проектирования параболических антенных рефлекторов с относительно высоким коэффициентом усиления сигнала и минимальными требованиями к точности профиля их отражающей поверхности. Получены аналитические оценки для Парето-фронттов различного ранга, характеризующих точность профиля отражающей поверхности антенного параболического рефлектора в зависимости от его диаметра и диапазона рабочих частот, требуемую для обеспечения высокого коэффициента усиления сигнала.

DOI: 10.31857/S0023420621010088

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для существующих и разрабатываемых зеркальных космических антенн связи (ЗКА) частотный диапазон может составлять от 1 до 100 ГГц, при этом, для сетчатых развертываемых рефлекторов частотная область функционирования ограничена максимальной частотой 30 ГГц, что обусловлено радиофизическими характеристиками материала их отражающей поверхности – металлического трикотажного сетеполотна [1, 2]. Габаритные размеры космических антенных рефлекторов, в свою очередь, ограничены конструктивными параметрами модулей полезного груза (ПГ) существующей космической транспортной системы (КТС) [3], таким образом, характерный размер космического антенного рефлектора любого типа не может, в общем случае, при транспортировке превышать 4 м. Сложившаяся перегрузка спутниковой связи и вещания в полосах частот C (от 4 до 6 ГГц) и Ku (от 11 до 18 ГГц) приводит к необходимости разработки новых ЗКА для перспективных K и Ka диапазонов, т.е. для частот от 18 до 40 ГГц и более [4–8].

Таким образом, актуальным представляется:

– разработка и совершенствование жестких неразвертываемых рефлекторов с диаметром до 4 м для использования в частотном диапазоне от 18 до 40 ГГц;

– разработка и совершенствование жестких неразвертываемых высокоточных рефлекторов с диаметром до 4 м для использования в диапазоне от 40 до 100 ГГц;

– разработка и совершенствование сетчатых развертываемых рефлекторов с диаметром от 4 до 100 м для работы в частотном диапазоне от 18 до 30 ГГц;

– разработка и совершенствование развертываемых рефлекторов с жесткими элементами с диаметром от 4 до 100 м для работы в диапазоне от 30 до 100 ГГц.

При этом требуется, чтобы антенный рефлектор функционировал максимально эффективно, а затраты на его разработку и производство были сопоставимы с достигаемым техническим результатом. Целью настоящей работы является анализ и выбор минимально необходимых требований к точности профиля отражающей поверхности параболических рефлекторов зеркальных космических антенн при их производстве и проектировании для перспективных частот.

НЕКОТОРЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОРОВ ЗЕРКАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АНТЕНН

Параболический рефлектор может быть, как “мелким”, так и “глубоким” в зависимости от

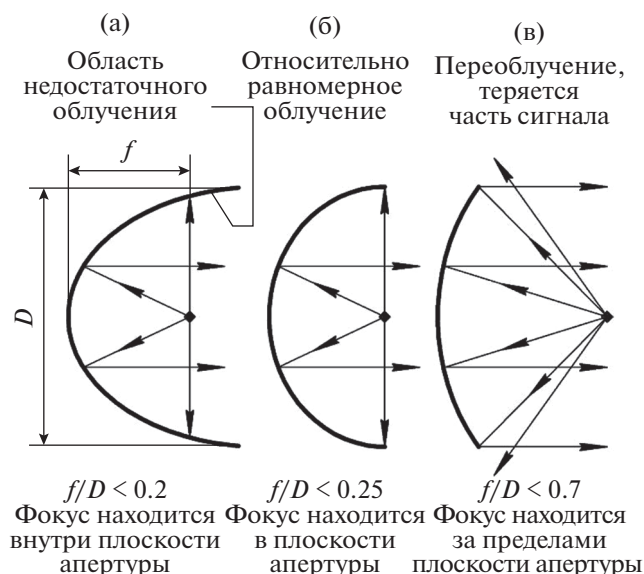


Рис. 1. Влияние геометрии рефлектора на процессы облучения и фокусировки.

профиля отражающей поверхности (рис. 1). Равномерное облучение невозможно под таким широким углом, как при конфигурации параболической антенны, показанной на рис. 1а, данный эффект называется недостаточным облучением. Глубокие зеркала с низкими величинами отношений f/D больше защищены от фонового шума, но они имеют очень узкую диаграмму направленности и низкую интенсивность сигнала из-за недостаточного облучения. С другой стороны, – трудно собрать большую часть сигнала при конфигурации, представленной на рис. 1в, вследствие переоблучения [9, 10]. Наиболее равномерное облучение достигается при конфигурации параболического рефлектора, приведенной на рис. 1б. Данная конфигурация такова, что фокальная точка находится в плоскости апертуры, что возможно лишь при отношении фокусного расстояния f к диаметру D , равно $f/D = 0.25$ [9, 10]. Однако, увеличенное более 0.25 отношение f/D играет важную роль в подавлении перекрестной поляризации в главном луче антенны, т.е. в направлении фокусной оси [10, 11]. В результате, – в целях минимизации недостаточного облучения и расширения диаграммы направленности параболические прямофокусные рефлекторы ЗКА проектируются с отношением f/D , лежащим в диапазоне от 0.3 до 0.6 [9, 10], что является важным проектным ограничением для геометрической конфигурации разрабатываемых параболических рефлекторов ЗКА.

Необходимость фокусировки сигнала в малой области пространства – фокальной точке накладывает ограничение на точность отражающей поверхности антенного рефлектора: среднеквадратическое отклонение (СКО) δ профиля поверхности

рефлектора не должно превышать величины $\lambda/16$ [11, 12], где λ – длина волны, на которой работает рефлектор. Для больших параболических радиотелескопов используют аналогичное более строгое ограничение по СКО δ : $\delta \leq \lambda/20$ [13]. Требование точности вида $\delta \leq (\lambda/20 \dots \lambda/16)$ основано на соображениях о допустимой ошибке волнового фронта [11–14]. Как будет показано далее, – выполнение такого требования является лишь необходимым условием функционирования параболического рефлектора, но не является достаточным для его качественного функционирования с высоким коэффициентом усиления. Кроме того, для параболических антенных рефлекторов различного диаметра должны предъявляться различные требования к точности отражающей поверхности.

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик [9, 10] антенного рефлектора является его коэффициент усиления. Коэффициент усиления G_A^1 антенного рефлектора в виде идеального эллиптического параболоида вращения, возрастает при увеличении его диаметра D и увеличении частоты сигнала ν , эта зависимость описывается выражением (1):

$$G_A^1(D, \lambda) = 10 \lg \left(p \cdot \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где G_A^1 – коэффициент усиления сигнала идеальным параболическим рефлектором, дБ; D – диаметр параболического рефлектора, м; λ – длина волны, на которой работает антенный рефлектор, мм; p – эффективность антенны, равная доли сигнала, поступающего в фокальную точку от всего проходящего на рефлектор сигнала. Значение параметра p в первую очередь зависит от конструктивных особенностей рефлектора, определяемых отношением f/D . Типичные значения коэффициента усиления G_A^1 современных параболических антенных рефлекторов лежат в диапазоне от 20 до 70 дБ, а их эффективность p , составляет от 60 до 80% [9, 10]. Зависимость (1) представлена графически на рис. 2.

Однако, коэффициент усиления реального антенного рефлектора G_A^R меньше идеального [12, 14], исходя из чего, выражение (1) приобретает вид (2):

$$G_A^R(D, \lambda) = \eta_S \cdot G_A^1(D, \lambda), \quad (2)$$

где η_S – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент пропорциональности η_S , характеризующий уменьшение усиления сигнала, для однозеркальных прямофокусных параболических антенных рефлекторов, согласно теории ан-

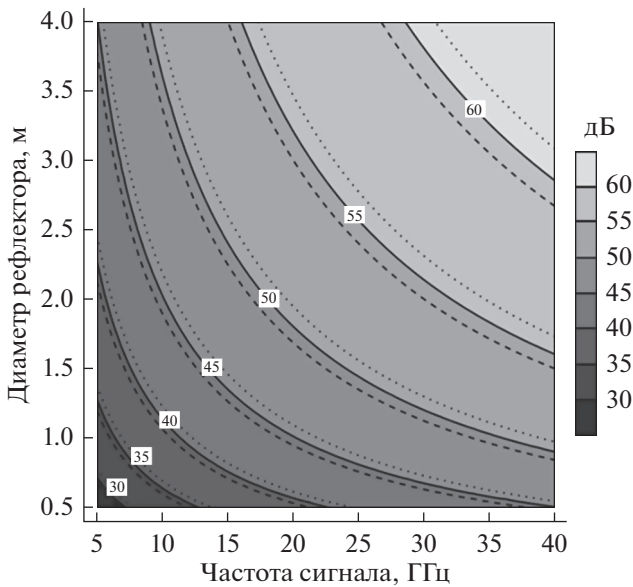


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления G_A^1 идеального параболического рефлектора от диаметра D и частоты сигнала ν , сплошные линии уровня соответствуют эффективности антенны $p = 70\%$; пунктирные — $p = 80\%$; точечные — $p = 60\%$.

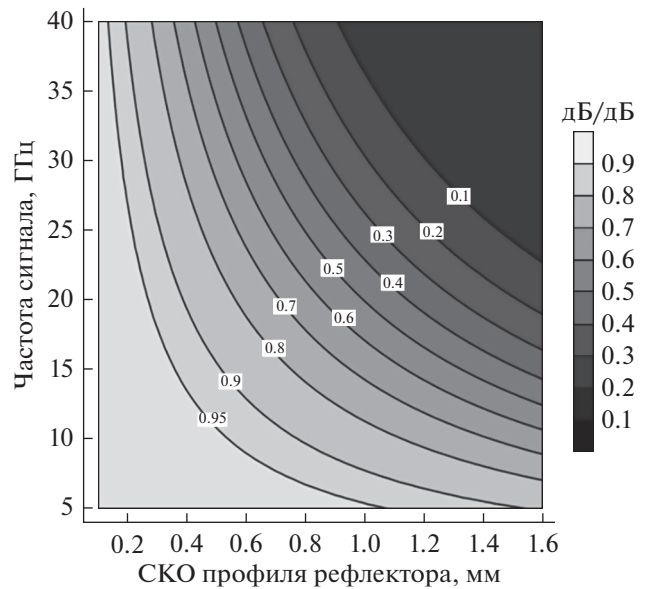


Рис. 3. Зависимость коэффициента ослабления η_S от частоты сигнала ν и СКО δ реального профиля рефлектора от теоретического.

тенных допусков [14, 15], связан с длиной волны излучения соотношением (3):

$$\eta_S(\delta, \lambda) = \exp\left(-\left(\frac{4\pi\delta}{\lambda}\right)^2\right), \quad (3)$$

где δ – СКО реальной отражающей поверхности рефлектора, мм.

Зависимость коэффициента η_S от частоты сигнала ν и СКО профиля рефлектора δ , представле-

на на рис. 3, где видно, что коэффициент пропорциональности η_S для параболических антенных рефлекторов резко уменьшается с увеличением как СКО профиля рефлектора, так и с увеличением частоты сигнала.

Так, в соответствии с изложенным, задача оптимального проектирования по величине СКО для параболических антенных рефлекторов, в общем случае, сводится к следующей системе соотношений (4):

$$\begin{aligned} C_1 \leq \lambda \leq C_2 \quad (\text{допустимое множество рабочих длин волн}), \\ 0 < \delta < \lambda/16 \quad (\text{допустимое множество значений СКО}), \\ \eta_S(\delta, \lambda) = \exp\left(-\left(\frac{4\pi\delta}{\lambda}\right)^2\right) \quad (\text{целевая функция}), \\ \eta_S(\delta, \lambda) \rightarrow \max \quad (\text{критерий поиска}), \end{aligned} \quad (4)$$

здесь и далее C_i – некоторое проектное ограничение.

Такая постановка задачи оптимизации (4) приводит к необходимости минимизации СКО δ поверхности рефлектора, с возможным в рамках проектных ограничений уменьшением частоты сигнала. Приемлемым значением СКО δ реального профиля антенного рефлектора от идеального параболоида тогда считают значение СКО δ , не приводящее к уменьшению коэффициента η_S менее 0.95, что, исходя из (3), приводит к мнемоническому соотношению: допустимое СКО δ профиля рефлектора ЗКА должно быть меньше

чем $\lambda/50$ [2, 16], аналогично, – при $\eta_S \geq 0.90$ получим $\delta \leq \lambda/30$ [17]. В результате, проектное решение по величине допустимого СКО δ профиля рефлектора, для частот Ka диапазона, становится ограниченным величиной менее 200 мкм (см. рис. 3), что в последствии, – при производстве и эксплуатации рефлектора сложно технически реализуемо [18–20], либо не реализуемо вовсе в случае крупногабаритных развертываемых рефлекторов [21]. Следовательно, – задача оптимального проектирования параболических антенных рефлекторов ЗКА, по меньшей мере, должна быть дополнена функциональной зависимостью допу-

стимого СКО и размеров рефлектора, что не учитывается в случае применения проектного ограничения точности вида $\delta \leq \lambda/50$.

Рассмотрим представленную графически на рис. 4 зависимость (2) коэффициента усиления реального параболического рефлектора G_A^R от частоты сигнала и значений СКО профиля отражающей поверхности. Из рис. 4 видно, что коэффициент усиления реального рефлектора резко снижается по мере того, как возрастает СКО, однако в области “средних” частот СКО мало влияет на коэффициент усиления. Данный факт свидетельствует о наличии “окна возможностей”, позволяющего проектировать и изготавливать параболические СВЧ рефлекторы ЗКА с относительно вы-

соким коэффициентом усиления сигнала и относительно “мягкими” требованиями к СКО профиля их отражающей поверхности, что приводит к возможности постановки задачи Парето-оптимального проектирования.

В такой задаче Парето-оптимизации должна быть учтена зависимость СКО и размеров рефлектора; учтена необходимость “смягчения” требований к СКО, т.е. их последующая технологическая достижимость. С учетом изложенного, задача Парето-оптимального проектирования параболических рефлекторов ЗКА в которой ищется максимум функции $G_A^R(D, \lambda, \delta)$ при максимальном СКО δ принимает вид (5):

$$\begin{aligned} \forall p \in \{0.6 \dots 0.8\} \text{ (параметр задачи – коэффициент эффективности),} \\ C_1 \leq \lambda \leq C_2 \text{ (допустимое множество рабочих длин волн),} \\ C_3 \leq D \leq C_4 \text{ (допустимое множество габаритов рефлектора),} \\ C_5 \leq G_A^R \leq C_6 \text{ (допустимое множество коэффициентов усиления),} \\ 0 < \delta < \lambda/16 \text{ (допустимое множество значений СКО),} \\ G_A^R(D, \lambda, \delta) = 10 \cdot \left[\exp\left(-\left(\frac{4\pi\delta}{\lambda}\right)^2\right) \right] \cdot \left[\lg\left(p \cdot \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2\right) \right] \text{ (целевая функция),} \\ G_A^R(D, \lambda, \delta) \rightarrow \max \text{ (функциональный критерий поиска),} \\ \delta \rightarrow \max \text{ (технологический критерий поиска).} \end{aligned} \quad (5)$$

Частный вид решения задачи (5) зависит от набора проектных ограничений C_i и определяется с необходимой точностью на основе использова-

ния методов математического программирования, однако для предела минимальной необходимой точности профиля отражающей поверхности антенного рефлектора могут быть получены аналитические оценки общего вида.

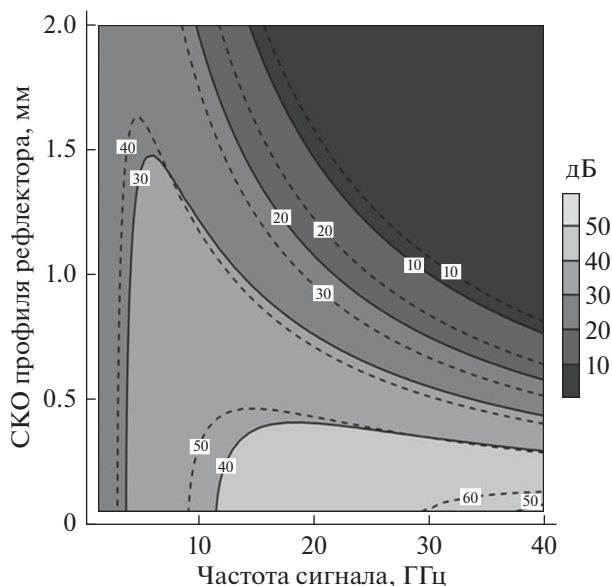


Рис. 4. Коэффициент усиления G_A^R реального антенного рефлектора при $p = 70\%$. Сплошные линии уровня соответствуют рефлектору с диаметром $D = 1$ м, пунктирные линии – рефлектору с диаметром $D = 4$ м.

Соответственно, – из условия $\partial G_A^R / \partial \lambda = 0$ можно оценить требование минимальной точности, необходимой для качественного функционирования параболического антенного рефлектора ЗКА с относительно высоким коэффициентом усиления (т.е. рефлектора “очень хорошего” качества) в зависимости от частоты сигнала и, что важно – его диаметра. Так, после тождественных преобразований, получим аналитическое выражение (6), описывающее зависимость максимального допустимого СКО $\delta_{Хор}^{Теор}$ профиля поверхности рефлектора, т.е. требование минимальной точности, необходимой для качественного функционирования ЗКА. Полученное решение (6) можно считать Парето-фронтom первого ранга.

$$\delta_{Хор}^{Теор}(D, \lambda) = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{\ln\left(p \cdot \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2\right)}}. \quad (6)$$

Зависимость (6) достаточного СКО $\delta_{Хор}^{Теор}$ представлена графически на рис. 5.

В результате анализа полученной зависимости (6) видно (рис. 5), что при увеличении диаметра рефлектора требования к точности его отражающей поверхности ужесточаются и, по-видимому, не могут быть в полной мере реализованы в случае крупногабаритных развертываемых сетчатых рефлекторов ЗКА. Таким образом, задача обеспечения высокого качества работы крупногабаритных рефлекторов существенно усложняется не только за счет роста сложности создания точных крупногабаритных поверхностей, но и за счет ужесточения требований точности при увеличении размеров отражающей поверхности. Следовательно, для крупногабаритных рефлекторов ЗКА перспективных частот целесообразно дополнительно определить иное технически достижимое условие, определяющее границу минимальной точности отражающей поверхности, обеспечивающей функционирование рефлектора. Такую оценку можно получить из условия $\partial^2 G_A^R / \partial \delta^2 = 0$. После преобразований, получим аналитическое выражение (7) для Парето-фронта второго ранга, который характеризует рефлекторы ЗКА “удовлетворительного” качества, т.е. их СКО $\delta_{\text{удовл}}^{\text{Теор}}$ позволяет обеспечить относительно высокий коэффициент усиления при любом диаметре и частоте работы рефлектора. Требование точности (7) актуально, по-видимому, лишь для крупногабаритных развертываемых сетчатых рефлекторов.

$$\delta_{\text{удовл}}^{\text{Теор}}(D, \lambda) = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{2}} \approx \frac{\lambda}{18}. \quad (7)$$

Однако, из анализа полученной зависимости (6) также видно (см. рис. 5), что требование точности (6), напротив, является, более чем технически достижимым для жестких неразвертываемых рефлекторов с диаметром до 4 м, для таких рефлекторов технически возможно создание более точных поверхностей, обеспечивающих “отличное” качество функционирования, т.е. максимально возможный коэффициент усиления сигнала. Такое требование точности отражающей поверхности можно определить из условия $\partial^2 G_A^R / \partial \lambda^2 = 0$, что позволяет после преобразований получить аналитическое выражение (8) для Парето-фронта второго ранга, который характеризует высококачественные рефлекторы ЗКА, такие рефлекторы, которые обладают “отличным” качеством, т.е. их СКО $\delta_{\text{отл}}^{\text{Теор}}$ позволяет наилучшим образом обеспечить коэффициент усиления при любом диаметре и частоте функционирования рефлектора. Полученное требование (8), по-видимому, актуально лишь для жестких неразвертываемых рефлекторов с диаметром до 4 м.

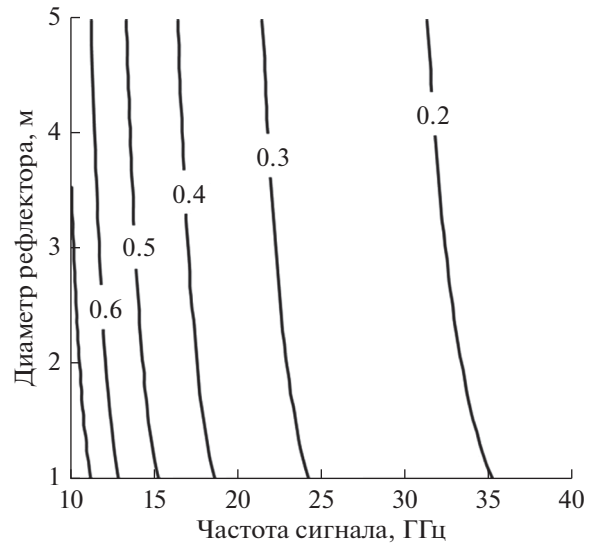


Рис. 5. Минимальная точность $\delta_{\text{Хор}}^{\text{Теор}}$ [мм] профиля поверхности параболического антенного рефлектора в зависимости от частоты сигнала ν и диаметра D , достаточная для обеспечения высокого коэффициента усиления сигнала рефлектором.

$$\delta_{\text{отл}}^{\text{Теор}}(D, \lambda) = \frac{\lambda}{8\pi} \sqrt{\frac{(3a+4) - \sqrt{(3a+4)^2 - 8a}}{a}}, \quad (8)$$

$$a = \ln\left(p\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2\right).$$

Аналогично зависимости (6), зависимость (8) показывает, что с увеличением диаметра параболического рефлектора ЗКА требования к точности его отражающей поверхности ужесточаются. В случае высококачественных рефлекторов большого диаметра эти требования становятся меньше чем величина $\lambda/50$, приближаясь к требованиям точности оптических поверхностей зеркал космических телескопов, которые в настоящее время проектируются и изготавливаются с точностью до $\delta \leq \lambda/100$ [22–24]. Иллюстрация полученных аналитических зависимостей (6)–(8) представлена на рис. 6, расчет проведен при $p = 0.7$ для двух диаметров жестких рефлекторов ЗКА: для $D = 1$ м и для $D = 4$ м. Зависимость $G_A^R(D, \nu, \delta)$ представлена в нормированном виде относительно эталонной точки — экстремума $G_A^R(C_4, C_2, 0)$ на пространстве поиска.

Полученные требования к величине допустимого СКО отражающей поверхности параболических рефлекторов ЗКА позволяют классифицировать параболические СВЧ рефлекторы ЗКА по качеству обеспечения коэффициента усиления сигнала рефлектором в зависимости от диаметра рефлектора и частоты работы; такая классификация представлены на рис. 7.

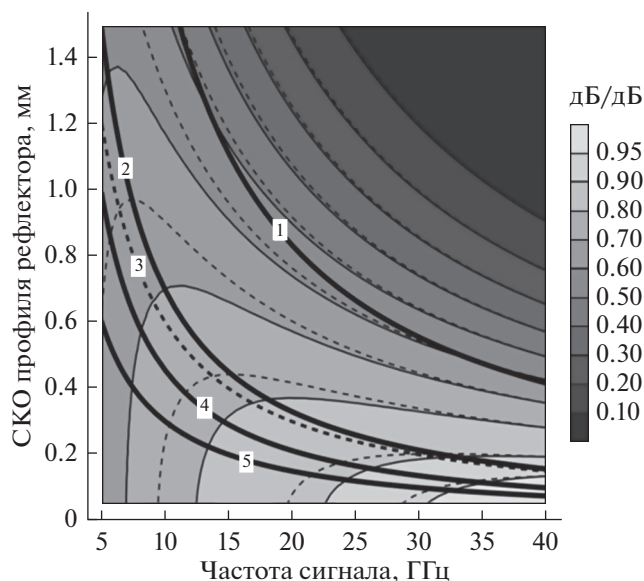


Рис. 6. Зависимость нормированного коэффициента усиления G_A реального параболического антенного рефлектора от частоты сигнала ν и СКО его поверхности δ . Сплошные тонкие линии уровня соответствуют рефлектору ЗКА с диаметром $D = 1$ м; тонкие пунктирные линии уровня – рефлектору ЗКА с $D = 4$ м. Числами обозначены: 1 – Парето-фронт из уравнения (7); 2 – Парето-фронт из уравнения (6); 3 – условие точности $\delta \leq \lambda/50$; 4 – Парето-фронт из уравнения (8); 5 – условие точности $\delta \leq \lambda/100$.

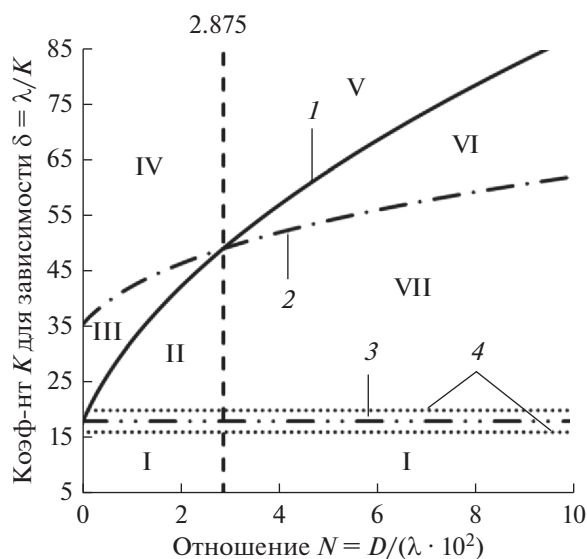


Рис. 7. Требования к точности K отражающей поверхности параболических антенных СВЧ рефлекторов в зависимости от диаметра D и длины волны сигнала λ .

На рис. 7: 1 – условие точности из уравнения (6); 2 – условие точности из уравнения (8); 3 – условие точности из уравнения (7); 4 – условие работоспособности антенного рефлектора; соответственно: I – рефлекторы неудовлетворительного

качества; II – рефлекторы малого диаметра удовлетворительного качества; III – рефлекторы малого диаметра хорошего качества; IV – рефлекторы малого диаметра отличного качества; V – габаритные рефлекторы отличного качества; VI – габаритные рефлекторы хорошего качества; VII – габаритные рефлекторы удовлетворительного качества. Необходимо отметить, что параболические рефлекторы, соответствующие условиям точности II и VII (см. рис. 7) обладают высокой чувствительностью коэффициента усиления к изменению СКО (см. рис. 6), в связи с чем их практическое использование ограничено.

Из рис. 6 и 7 видно, что выполнение условия работоспособности в виде $\delta \leq \lambda/16$ является существенно недостаточным для обеспечения высокого коэффициента усиления антенным рефлектором, а выполнение условия работоспособности в виде $\delta \leq \lambda/50$ не обладает достаточной модельной полнотой, т.к. не учитывает влияние диаметра рефлектора и как следствие, – лишь оценочно применимо как для сетчатых развертываемых рефлекторов ЗКА большого диаметра так и для жестких неразвертываемых прецизионных рефлекторов ЗКА с диаметром до 4 м.

Полученные в соответствии с уравнениями (6)–(8) значения допустимого СКО δ^{top} всегда меньше чем величина $\lambda/16$, что является необходимым условием [11, 15] фокусировки сигнала в фокальной точке. Входящий в выражения (6)–(8) параметр эффективности ЗКА p во многом определяется именно отношением f/D фокусного расстояния к диаметру рефлектора, что позволяет применять полученные выражения (6)–(8) при расчете как “мелких”, так и “глубоких” параболических рефлекторов. Однако следует отметить, что выражения (1)–(3) и, соответственно, полученные на их основе выражения (6)–(8), оперируют с эффективными техническими характеристиками и адекватны лишь в модельном приближении геометрической оптики, при $D \gg \lambda$, таким образом, использование полученных выражений (6)–(8) при экстранизких и экстравысоких значениях частоты СВЧ-сигнала и значениях диаметра рефлектора не корректно. Кроме того, полученные аналитические оценки (6)–(8) для величины допустимого СКО как эффективной макромасштабной характеристики, по-видимому, могут быть скорректированы исходя из соображений адаптивной радиооптики и дополнены микромасштабными условиями качества рефлекторов ЗКА, шероховатость отражающей поверхности которых в случае перспективных K и K_a диапазонов должна составлять менее 0.1 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из того, что увеличение частот работы параболических рефлекторов зеркальных косми-

ческих антенн приводит к существенному ужесточению требований к точности и стабильности профиля их отражающей поверхности, а обеспечение высоких требований точности является технически сложно достижимым, была сформулирована задача Парето-оптимального проектирования параболических рефлекторов с высоким коэффициентом усиления сигнала и минимальными требованиями к точности профиля их отражающей поверхности, в задаче учтено влияние диаметра рефлектора. В приближении геометрической оптики получены аналитические оценки (6)–(8) для Парето-фронттов различного ранга, описывающих зависимость точности профиля отражающей поверхности рефлектора, требуемой для функционирования антенны с относительно высоким коэффициентом усиления сигнала с учетом диаметра рефлектора.

В результате анализа полученных зависимостей (6)–(8) показано, что с увеличением диаметра рефлектора зеркальной космической антенны требования к точности отражающей поверхности ужесточаются. В случае высокоточных рефлекторов большого диаметра эти требования могут быть меньше чем величина $\lambda/50$, приближаясь к требованиям точности для оптической поверхности зеркал космических телескопов. Таким образом, задача обеспечения высокого коэффициента усиления крупногабаритных рефлекторов существенно усложняется не только за счет роста сложности создания точных крупногабаритных поверхностей, но и за счет ужесточения требований точности с увеличением размеров отражающей поверхности.

Полученные требования к среднеквадратическому отклонению профиля отражающей поверхности параболических рефлекторов зеркальных космических антенн классифицированы по практической применимости в зависимости от диаметра рефлектора и коэффициента усиления сигнала. По-видимому, полученные аналитические оценки (6)–(8) для величины допустимого СКО отражающей поверхности прямофокусных параболических рефлекторов могут дополнить существующую систему [25] показателей комплексного качества рефлекторов зеркальных космических антенн и могут быть применены при оценке бюджета погрешностей при их проектировании и производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Imbriale W.A.* Spaceborn antennas for planetary exploration. NY.: Wiley-Interscience: John Wiley and Sons Inc., 2006. <https://doi.org/10.1002/0470052783>
2. *Reznik S.V., Prosuntsov P.V. et al.* Material science problems of building space antennas with a transformable reflector 100 m in diameter // *Proceed. of the АСМТАА* 2015: 4th International conference on advanced composites and materials technologies for arduous applications. Wrexham, UK, 05–06.11.2015. IOP Conf. series: Materials science and engineering. 2016. V. 153. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/153/1/012001>
3. Концепция космической транспортной системы // Сайт ГК “Роскосмос”. URL: www.roscosmos.ru/media/files/docs/3/manned_mission_to_mars_ru_308_316.pdf.
4. *Brunnenmeyer D., Mills S., Patel S. et al.* Ka and Ku operational considerations for military SATCOM applications // *Proceed. of the MILCOM 2012: The 2012 IEEE military communications conference*. Orlando, USA, 29.10–01.11.2015. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2012.6415563>
5. *Вечтомов В.А., Зимин В.Н. и др.* Бортовая многолучевая антенна Ка-диапазона для зонированного обслуживания территории РФ спутниковой связью с высокоскоростным доступом // *Наука и инновации*. 2012. № 8. С. 70–81. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-319>
6. *Бутенко В.В., Желтоногов И.В., Кантор Л.Я.* Новые горизонты систем спутниковой связи в Ка-диапазоне // *Электросвязь*. 2013. Т. 1. С. 7–12.
7. *Буйцинов Е., Локишин Б.* Пути освоения Ка-диапазона космическими аппаратами ГПКС // *Технологии и средства связи*. 2014. Т. 101. № 2. С. 64–67.
8. *Султанов А.С., Корниенко В.И., Пантелеймонов И.Н.* Оценка перспектив применения К/Ка-диапазона в отечественных системах спутниковой связи // *Технические науки*. 2014. Т. 23. № 1. С. 10–19.
9. *Balanis C.A.* Antenna theory and design. 3rd ed. New Jersey: Wiley-Interscience: John Wiley and Sons Inc., 2005.
10. *Stutzman W.L., Thiele G.A.* Antenna theory and design. 3rd ed. NY.: Wiley: John Wiley and Sons Ltd, 2013.
11. *Пригода Б.А.* Особенности конструирования зеркальных антенн космических аппаратов // *Вестник “ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина”*. 2011. Т. 1. С. 27–31.
12. *Buffa F. et al.* The Sardinia radio telescope: a comparison between close-range photogrammetry and finite element models // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2015. P. 1–22. <https://doi.org/10.1177/1081286515616227>
13. *Белянский П.В., Мустафаев М.И.* Управление формой корректоров фазового фронта больших радиотелескопов // *Автоматика и телемеханика*. 1985. Т. 46. № 8. С. 5–14.
14. *Ruze J.* Antenna tolerance theory — a review // *Proceed. of the IEEE*. 1966. V. 54. № 4. P. 633–640. <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4784>
15. *Климов А.Н.* Настройка крупногабаритных трансформируемых рефлекторов зонтичного типа в динамической системе координат // *Вестник СибГАУ*. 2013. Т. 52. № 6. С. 137–142.
16. *Reznik S.V. et al.* Modeling of the temperature and stressed-strained states of the reflector of a mirror space antenna // *J. Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. V. 88. № 4. P. 978–983. <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1273-8>

17. *Кисляков А.Г.* Радиоастрономические исследования в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн // *Успехи физических наук.* 1970. Т. 101. № 4. С. 607–653.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0101.197008b.0607>
18. *Ломаев В.И., Сагателян Г.Р.* Компьютерное моделирование операции доводки параболического рефлектора // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана.* 2011. № 10.
19. *Федорчук С.Д., Архипов М.Ю.* Вопросы обеспечения точности конструкции космического радиотелескопа проекта “РадиоАстрон” // *Космич. исслед.* 2014. Т. 52. № 5. С. 415–415.
<https://doi.org/10.7868/S0023420614050057>
20. *Филина Е.К. и др.* Влияние разброса физико-механических характеристик углепластика на температурную формостабильность панели главного зеркала космической обсерватории “Миллиметрон” // *Механика композиционных материалов и конструкций.* 2019. Т. 25. № 4. С. 509–521.
https://doi.org/10.33113/mkmmk.ras.2019.25.04.509_521.04
21. *Hedgepeth J.M.* Accuracy potentials for large space antenna reflectors with passive structure // *J. Spacecraft and Rockets.* 1982. V. 19. № 3. P. 211–217.
<https://doi.org/10.2514/3.62239>
22. *Сычев В.В.* Метод изготовления облегченных оптических элементов // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана.* 2012. № 4.
23. *Абдулкадыров М.А., Семенов А.П.* Современные способы изготовления астрономических и космических зеркал // *Фотоника.* 2015. Т. 3. № 51. С. 62–79.
24. *Духопельников Д.В. и др.* Влияние режима ионной обработки на плотность дефектов и разрушение поверхности астроситалла // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана.* 2014. Т. 12. С. 181–191.
<https://doi.org/10.7463/1214.0748236>
25. *Куприянова О.А. и др.* Определение комплексного показателя для оценки уровня качества рефлектора // *Вестник СибГАУ.* 2015. Т. 16. № 4. С. 946–951.