

## КРИТЕРИИ ПРИГОДНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

В настоящее время имеется ряд научно-технических задач, решаемых с помощью космических аппаратов (КА) сферической формы.

Так, при исследовании плотности атмосферы используются методы определения плотности  $\rho$  по торможению, в которых в качестве меры торможения КА принято изменение драконического периода обращения за мерный интервал [ 1 ]. Это изменение периода обращения характеризует невязку между реальными характеристиками торможения  $C_{xp}$  и их соответствующими модельными значениями  $C_{xp}$ ;  $\rho_m$ , где  $C_{xp}$  – расчетное значение коэффициента аэродинамического сопротивления сферы. Для сферы значения  $C_x$  на мерном интервале принимается постоянной величиной.

Для слежения за КА средствами контроля космического пространства необходимо обеспечить его устойчивое сопровождение, которое реализуется за счет стабильного значения баллистического коэффициента КА и энергетическими характеристиками наземных радиолокационных средств (РЛС).

Наиболее стабильное значение баллистического коэффициента также обеспечивается сферическим КА, при этом степень инерционности КА может быть обеспечена выбором соответствующих значений диаметра сферы и ее массы, т.е. соотношением  $\sigma_m/m$ , где  $\sigma_m/m$  - площадь миделя КА;  $m$  - его масса.

Для обеспечения максимального времени существования КА необходимо уменьшение площади миделя сферы и увеличение ее массы. Радиус сферы выбирается из необходимости обеспечения величины эффективная площадь рассеяния (ЭПР) КА и является заданным. Значение рекомендуемой массы сферы определяется энергетическими возможностями ракеты-носителя. С другой стороны, необходимость определения изменения периода обращения такого КА наземными средствами требует уменьшения массы КА таким образом, чтобы реализуемое изменение периода обращения за виток регистрировалось этими средствами.

Рассмотрим факторы, влияющие на значение потенциала РЛС, являющегося основной энергетической характеристикой наземной станции. Из теории радиолокации следует [ 2 ], что

$$q^2 = \Pi \frac{\sigma_3}{D_0^4}, \quad (1)$$

где  $q$  – отношение сигнал/шум по мощности;  $\sigma_3$  – ЭПР цели;  $D_0$  – дальность до цели.

Потенциал определяется в процессе проведения натурального эксперимента путем измерения  $q$  при известных значениях  $\sigma_3$ ,  $D_0$ . Следовательно, для уменьшения погрешности определения потенциала необходимо обеспечить постоянство ЭПР при любых положениях КА относительно РЛС.

Как следует из (1), относительная случайная ошибка определения  $\frac{\Delta\Pi}{\Pi}$  равна:

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} \leq \sqrt{\left(2\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(4\frac{\Delta D_0}{D_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma_3}{\sigma_3}\right)^2}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что оценка и контроль энергетических характеристик РЛС будет обеспечена, если будет обеспечено заданное значение ЭПР КА с ограничениями по допустимым флуктуациям ЭПР. Функция показателя эффективности (целевая функция)  $F(X_i)$  будет иметь вид

$$F(X_i) = F_{0i}, \quad \Delta\sigma_{o\text{эф}} \leq \Delta\sigma_{o\text{зад}},$$

где  $F_{0i}$ ,  $\Delta\sigma_{o\text{зад}}$  – требуемые значения.

Следовательно, для уменьшения относительной случайной ошибки необходимо обеспечить большое значение эффективной площади рассеяния с малыми флуктуациями ЭПР.

Выполнение этого условия может быть реализовано конструкцией, конфигурацией и габаритами КА. Космический аппарат сферической формы обеспечивает всенаправленность излучения, независимость ЭПР от угла наклона плоскости поляризации, а также возможность точного расчета значений ЭПР согласно формуле [ 3 ]:

$$\sigma_3 = \pi r^2 U(kr), \quad (3)$$

где  $U(kr)$  – безразмерная функция моностатического рассеяния;

$k$  – волновое число,  $k = 2\pi / \lambda$ ;

$\lambda$  – длина волны;

$r$  – характерный размер рассеивающего тела (для сферы  $r$  – радиус).

График значений функций  $U(kr)$ , заимствованный из [ 3 ], приведен на рис. 1. На этом рисунке указаны также выраженные в процентах отклонения максимумов и минимумов от асимптотического значения функции  $U(kr)$ . Так, отклонения не превосходят 10 % при  $kr > 12$ , что обеспечивается в случае, если сферический корпус КА имеет радиус не менее двух длин волн рабочего диапазона РЛС. Из графика видно, что разброс диаметра сферы при больших значениях  $2r/\lambda$  приводит к меньшему изменению  $U(kr)$ . При этом минимальные флуктуации

$\sigma_3 / \sigma_m$  обеспечиваются при значениях  $2r/\lambda$ , соответствующих максимальным и минимальным значениям асимптотических значений  $U_{(kr)}$ .

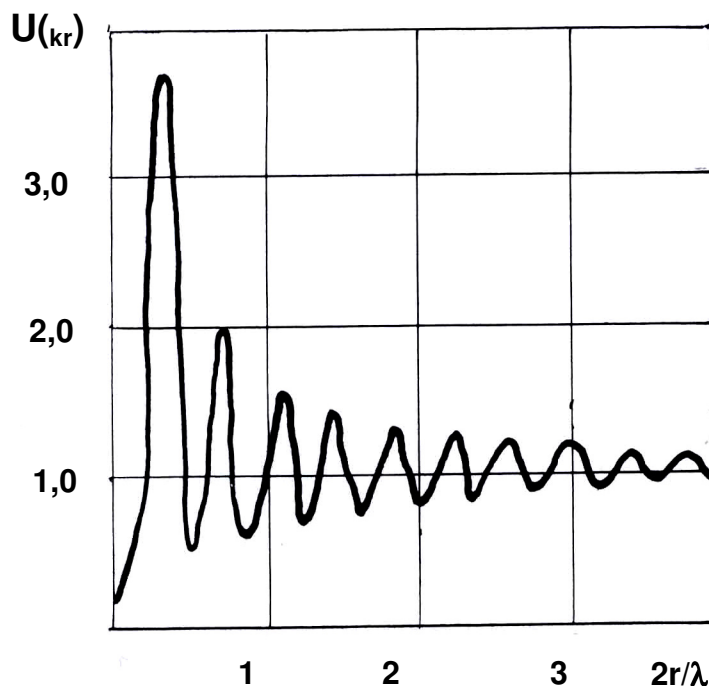


Рисунок 1

К основным характеристикам сферы относятся также стабильность конструкции в течение всего срока активности существования и минимальные флуктуации ЭПР.

Рассмотрим, какие точности должны быть обеспечены при изготовлении эталонных КА. Полагая  $U_{(kr)} = 1$ , дифференцируя (3) и относя полученный результат к  $\sigma_3$ , находим выражение для относительной погрешности  $\Delta\sigma_3$ , из которого следует, что относительная погрешность ЭПР зависит от относительной погрешности размеров тела:

$$\Delta\sigma_3 = 2\sigma_3 \frac{\Delta r}{r}. \quad (4)$$

Например, для обеспечения относительной погрешности ЭПР  $\Delta\sigma_3 / \sigma_3 = 10^{-2}$  эталонного КА с радиусом  $2r/\lambda$  необходимо выдержать его размеры с погрешностью  $\Delta r = 10^{-2\lambda}$ , то есть для волны  $\lambda = 3, 10, 50$  см абсолютная погрешность размеров КА должна быть не более 0,3, 1,0, 5,0 мм соответственно.

Из приведенного примера видно, что точность изготовления эталонных КА должна быть высокой.

Отклонение от сферичности корпуса КА приводит к неравномерности диаграммы направленности, поэтому отклонение от сферичности должно быть значительно меньше длины волны РЛС. Так,

величина отклонения от сферичности в 0,5% может дать значение флуктуаций ЭПР до одного децибелла.

Материал элементов сферы должен быть электропроводным. Тип металла, из которого изготавливается сфера, практически не влияет на ее отражательные характеристики [ 3 ]. Дополнительные элементы крепления к ракете-носителю, щели и отверстия, приводящие к разрыву тангенциальной составляющей поверхностных токов, недопустимы.

В качестве критерия оценки несферичности сферы примем максимальное отклонение (по абсолютной величине) точек поверхности сферы от геометрической поверхности идеальной сферы диаметром  $D_{cp}$ , определенным как усредненный диаметр вписанной и описанной сфер по фактическим размерам сферы (рис. 2).

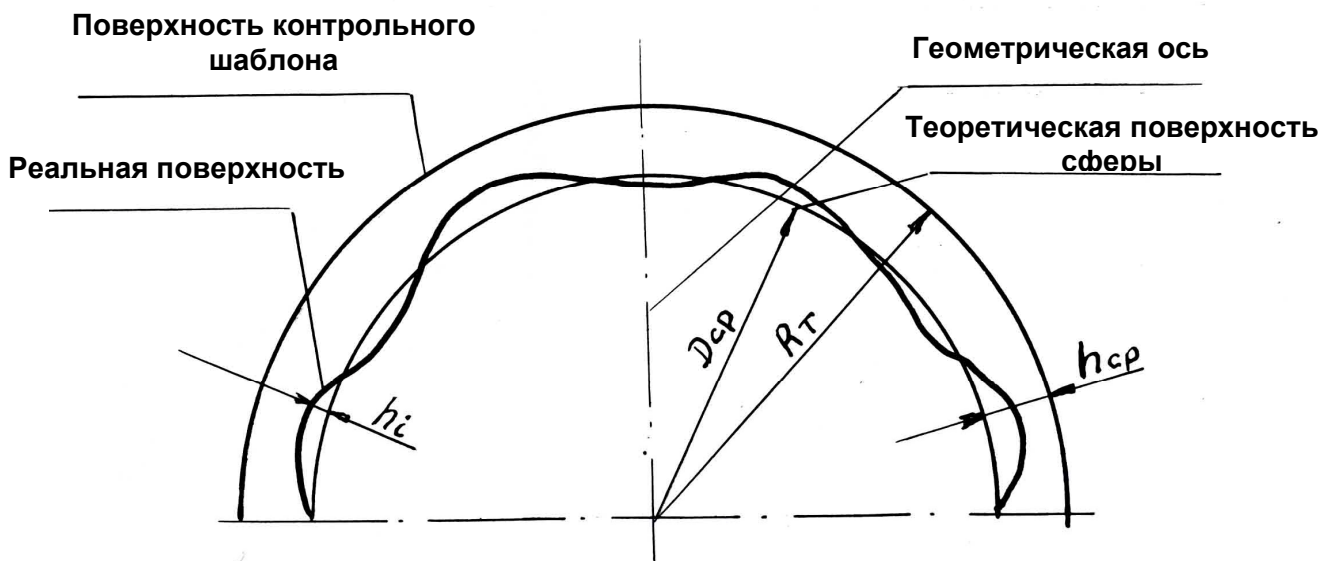


Рисунок 2

Пусть  $h_i$  – значение отклонения сферы от заданного радиуса в измеренных точках (зазор между поверхностью аттестованного шаблона и реальной поверхностью полусферы, замеренный для  $n$  точек согласно карте обмера) – величина несферичности. Тогда величину несферичности определим по соотношению

$$\bar{r} = \frac{(h_{cp} - h_{max})}{r} = \frac{\Delta r}{r}, \quad (5)$$

где  $h_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$ ;

$\Delta r$  – среднее изменение радиуса сферы, абсолютное значение несферичности;

$h_{max}$  – максимальное значение  $h$  из числа измеренных.

Точки для замера несферичности выбираются на поверхности таким образом, чтобы обеспечивалось равномерное распределение точек в любом направлении с выбранным шагом.

Значение диаметра сферы  $D_{\text{ср}}$  определяется формулой

$$D_{\text{ср}} = 2 (R_{\text{т}} - h_{\text{ср}}),$$

где  $R_{\text{т}}$  – радиус контрольной сферы, геометрическая поверхность которой образована вращением геометрического профиля произвольного радиуса вокруг геометрической оси, проходящей перпендикулярно к опорной поверхности полусферы через центр окружности, определяемой наружной поверхностью.

Флуктуация  $\Delta\sigma_3$  в выражении (2) с помощью (4) и (5) может быть выражена через величину  $r = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta\sigma_3}{\sigma_3}$ , поэтому величина несферичности является мерой, характеризующей разброс эталонного значения ЭПР:

$$\frac{\Delta\sigma_3}{\sigma} = 2\bar{r}. \quad (6)$$

Для определения необходимой чистоты поверхности при изготовлении КА были выполнены специальные теоретические и экспериментальные исследования [2, 4]. Эти расчеты показали, что если неоднородность поверхности сферы меньше  $\lambda \cdot 10^{-2}$ , то погрешность ЭПР составляет не более 0,5 децибелл. При этом неоднородности поверхности (шероховатость, пористость и др.) не должны превышать значений  $10^{-3}\lambda$ . Например, для измерений на волнах  $\lambda=3,10$  см неровности поверхности не должны превышать 0,03 и 0,1 мм соответственно.

Из рассмотренного видно, что для сферы с одинаковыми неоднородностями флуктуации ЭПР увеличиваются с уменьшением длины волны.

Требования к чистоте обработки поверхности могут быть выражены и из условия получения зеркального отражения, которое наблюдается при облучении больших поверхностей, размеры которых на много больше длины волны РЛС, а размеры шероховатостей не превосходят  $\lambda/16$  [3,4]. Учитывая общую тенденцию освоения в радиолокации все более высоких частот, можно предъявить требование к обработке поверхности сферы –  $R_z \leq 40$  мкм.

Чистота поверхности сферы определяется шероховатостью поверхности и пористостью материала, а шероховатость – качеством и структурой заготовки и качеством литья. Необходимо отметить, что величина шероховатости будет различной на различных участках сферы, так как после литья при обработке на карусельном станке скорости резания будут значительно отличаться при одних и тех же оборотах планшайбы на периметре полусферы и ближе к ее вершине. Поэтому для снижения шероховатости после механической обработки необходимо вести дополнительную обработку поверхности КА. Химфрезерование, химполирование, напыление полимерными

порошками и металлами, по существу, повторяют уже имеющиеся шероховатости после механической обработки поверхности, а в ряде случаев даже увеличивают их.

Уменьшение пористости можно достичь качеством литья, например, заливкой вакуумированного металла с последующей подпрессовкой в автоклавах.

При изготовлении полусфер штамповкой из катаных листовых алюминиевых сплавов поры отсутствуют.

Таким образом, при создании КА сферической формы для решения целевых задач критерием его пригодности является обеспечение необходимой эффективной площади рассеяния КА с минимальными флуктуациями, что обеспечивается выбором необходимого диаметра сферы, чистотой обработки поверхности, шероховатостью и величиной несферичности.

Эти параметры выбираются в зависимости от диапазона частот РЛС сопровождения.

#### Список использованных источников

1. Кинг-Хили Д. Теория орбит искусственных спутников в атмосфере/ Д. Кинг-Хили. – М.: Мир, 1966. – 189 с.

2. Испытания РЛС (оценка характеристик) / А.М. Леонов, С.А. Леонов, Ф.В. Нагулинко; под ред. А.И. Леонова. – М.: Радиосвязь, 1990. – 208 с.

3. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели / В.О. Кобак. – М.: Сов. радио, 1985. – 248 с.

4. Майзельс Е.Н. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей / Е.Н. Майзельс, В.А. Торгованов. – М.: Сов. радио, 1972. – 232 с.

5. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С. Саврасов – М.: Радиосвязь, 1985. – 216 с.

*Поступила в редакцию 11.03.2009 г.  
Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*