

УДК 629.7 : 621.396

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТУРЫ НАБЛЮДЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ С БОРТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ТОЧКЕ ЛАГРАНЖА L1 СИСТЕМЫ «ЗЕМЛЯ – ЛУНА» И НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

А.В. Карелин, В.А. Шувалов, А.А. Яковлев
(ФГУП ЦНИИмаш)

В статье приведены оценки проектных параметров оптической аппаратуры для контроля баллистической обстановки в околоземном космическом пространстве. Расчёт проводился на основе методологии синтеза космических систем наблюдения и приближённых методов определения аппаратуры на ранних стадиях проектирования. Выполнен анализ определяющих характеристик аппаратуры наблюдения, расположенной на космическом аппарате (КА), в точке Лагранжа L1 системы «Земля – Луна» и на геостационарной орбите. Результаты анализа позволяют обосновать целесообразность решения задачи контроля околоземной баллистической обстановки с помощью КА на геостационарной орбите.

Ключевые слова: точка Лагранжа, геостационарная орбита, контроль баллистической обстановки, оптическая аппаратура, геометрический параметр, чувствительный элемент.

Введение

В последние несколько лет в области космических исследований наблюдается повышенный интерес к точкам либрации в гравитационной системе «Земля – Луна». Рассматриваются проекты использования точки Лагранжа L2 для построения космической станции технологического назначения, изучения физических условий в окрестности L2, создания промежуточной платформы в L1 для пилотируемых полётов на Луну и в дальний космос [например, 1 – 3].

Но эти проекты слабо обоснованы. Более привлекательным выглядит предложение по созданию космической платформы с оптической аппаратурой дистанционного зондирования Земли и расположенной в точке L1 (находящейся на расстоянии $\sim 3 \times 10^5$ км от Земли) [4]. Предполагается, что КА с телескопом в этой области позволит контролировать баллистическую обстановку в околоземном пространстве и наблюдать развитие крупномасштабных явлений на поверхности Земли. Однако целесообразность этого предложения также основана на интуитивных соображениях, тем более, что решение упомянутых задач возможно реализовать с геостационарной орбиты и аппаратурой аналогичного типа (и возможно с большей эффективностью). В настоящей работе приводятся расчётные оценки проектных параметров оптической аппаратуры (телескопов), решающей задачи контроля баллистической обстановки в околоземном космическом пространстве для двух вариантов наблюдения: с геостационарной орбиты и точки Лагранжа L1 системы «Земля – Луна».

Результаты исследований позволяют выделить предпочтительный вариант.

Определение основных геометрических параметров оптической аппаратуры

Геометрические характеристики телескопов определяются диаметром D и фокусным расстоянием f . Известно [5], что диаметр апертуры связан с пространственным разрешением R соотношением:

$$R = 1,2 \left(\frac{\lambda}{D} \right) H, \quad (1)$$

где λ – длина волны оптического излучения; H – расстояние от точки наблюдения до объекта.

Для оценочных расчётов достаточно принять: $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м (т. е. среднее значение длины волны видимого диапазона); расстояние от точки либрации L1 до Земли $H_L = 3 \cdot 10^8$ м; высота наблюдения с геостационарной орбиты $H_G = 3,6 \cdot 10^7$ м. Далее будем считать, что индекс «Л» означает параметр для аппаратуры в точке Лагранжа, а индекс «Г» – для геостационарной орбиты.

Графические зависимости, приведённые на рис. 1, построены в соответствии с (1) и позволяют выбрать диаметры апертуры телескопов (D_L, D_G) в точке либрации и на геостационарной орбите в зависимости от требуемого пространственного разрешения R . Фокусное расстояние f определяется соотношением [6]:

$$f = H \left(\frac{l_n}{R} \right), \quad (2)$$

где l_n – размер пикселя приёмной матрицы (разрешающая способность аппаратуры).

На рис. 2, 3 приведены графические зависимости фокусного расстояния от пространственного

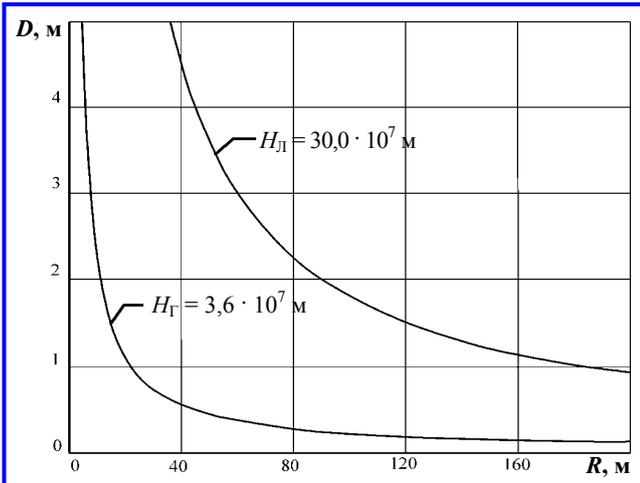


Рис. 1. Зависимость диаметра телескопа от пространственного разрешения и высоты орбиты

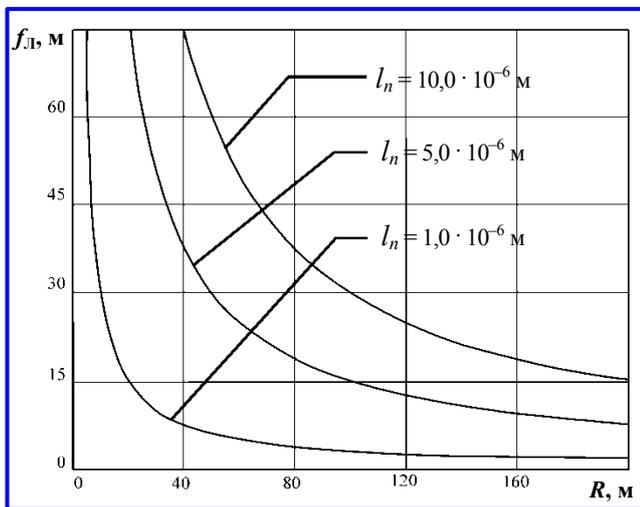


Рис. 2. Зависимость фокусного расстояния от пространственного разрешения и размера пикселя для аппаратуры в точке Лагранжа L1

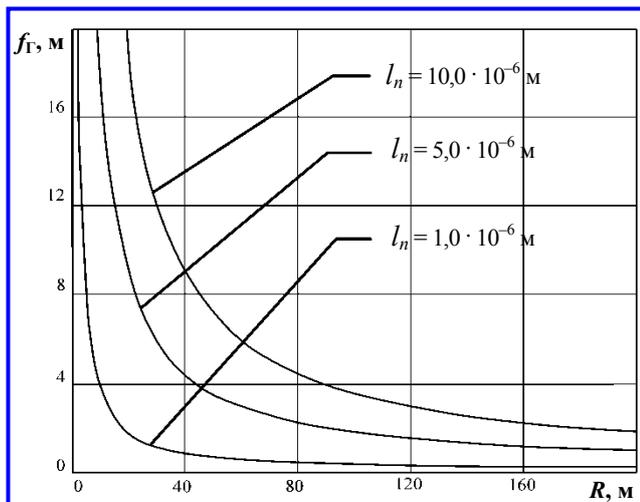


Рис. 3. Зависимость фокусного расстояния от пространственного разрешения и размера пикселя для аппаратуры на геостационарной орбите

разрешения и размера пикселя, построенного по выражению (2), для аппаратуры, расположенной в точке L1 и на геостационарной орбите. Таким образом, рис. 1 – 3 позволяют определить геометрические параметры телескопов.

Будем считать, учитывая доставку телескопов в точку Лагранжа, что диаметр не должен превышать 2 м, т. е. $D_L = 2$ м. Тогда из графика на рис. 1 получаем $R_L = 90$ м. При этом (как следует из рис. 2) фокусное расстояние телескопа $f_L = 35$ м для $l_n = 10^{-5}$ м, что реализовать практически невозможно.

В настоящее время наибольшая величина фокусного расстояния телескопа в наземных условиях не превышает 8 м. Тогда, если положить в оценочных расчетах $f_L = 10$ м, из графика рис. 2 для $l_n = 10^{-5}$ м получаем $R_L \approx 300$ м. Такое разрешение аппаратуры не решает задачи контроля баллистической обстановки в окрестности Земли, поскольку для идентификации спутника необходимо иметь $R < 10$ м.

Лучшее разрешение можно получить с помощью аппаратуры на геостационарной орбите. Из рис. 1 видно, что при $D_G = 2$ м пространственное разрешение $R_G \approx 10$ м, но фокусное расстояние при этом (рис. 3) будет $f_G = 20$ м, что также не решает поставленную задачу.

Если принять фокусное расстояние $f_G = 10$ м, то при $l_n = 10^{-5}$ м пространственное разрешение будет $R_G \approx 35$ м. Для улучшения этих характеристик необходимо использовать матрицу с более высокими параметрами, например, с размерами элемента разрешения (пикселя) $l_n = 10^{-6}$ м, что позволит получить (см. рис. 3) пространственное разрешение аппаратуры $R_G \approx 4$ м при фокусе $f_G = 6$ м. Таким образом, геостационарная орбита является более подходящей для решения задачи контроля баллистической обстановки, хотя реализовать такую аппаратуру в настоящее время практически не реально.

Обзорность телескопа и требования к чувствительному элементу

Обзорность телескопа S определяется следующим образом [6]:

$$S = \pi H^2 \operatorname{tg}^2 \gamma, \quad (3)$$

где γ – угол обзора, который определяется соотношением $\operatorname{tg} \gamma = \frac{D}{2f}$.

Если телескоп в точке L1 будет иметь параметры $D_L = 2$ м и $f_L = 10$ м, тогда $\operatorname{tg} \gamma = 0,1$, $\gamma \approx 5,6^\circ$. Из выражения (3) получим обзорность $S_L = 2,1 \cdot 10^{15} \text{ м}^2$,

что превосходит наблюдаемый диск Земли из точки $L1$ и, таким образом, низкоорбитальная группировка будет в области обзора. Но, несмотря на это обстоятельство, пространственное разрешение телескопа $R_{\text{Д}} = 300$ м не позволяет решить поставленную задачу.

Мгновенный угол зрения γ' одного пикселя определяется из выражения

$$\gamma' = \frac{l_n}{2f}.$$

Если положить $l_n = 10^{-5}$ м, то $\gamma' = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м. Тогда число пикселей в строке изображения $N_n = \frac{\gamma}{\gamma'} \approx 0,2 \cdot 10^6$. Такую строку, а тем более матрицу, реализовать практически невозможно.

Пусть параметры телескопа для геостационарной орбиты будут следующими: $D_{\text{Г}} = 2$ м, $f_{\text{Г}} = 10$ м, $\text{tg}\gamma = 0,1$. Тогда обзорность $S_{\text{Г}} = 4 \cdot 10^{13}$ м². Отсюда ясно, что видеть диск Земли полностью аппаратура не будет (площадь диска Земли составляет $\sim 1,2 \cdot 10^{14}$ м²).

Поставленная задача может быть решена с помощью нескольких спутников на геостационарной орбите, при этом требования к аппаратуре должны быть менее жёсткими.

Оценка массы требуемой оптической аппаратуры

Масса M оптической аппаратуры связана с геометрическими параметрами полуэмпирическим соотношением [6]:

$$M = K\pi f^3 \text{tg}^2 \gamma, \quad (4)$$

где K – удельная плотность аппаратуры, которая зависит от конструкции и технологического уровня производства.

В настоящее время значение этого коэффициента для оптической аппаратуры находится в пределах $K = 50 \div 100$ кг/м³. Тогда из (4) получаем массу аппаратуры $M = (1,5 \div 3)10^3$ кг. Доля целевой аппаратуры от общей массы КА составляет $\sim 25 - 30$ %. Тогда общая масса КА, который должен быть выведен на геостационарную орбиту, будет не менее 5000 кг.

Облучённость объектива и требования к энергетическим характеристикам

Обнаружение и идентификация объекта наблюдения дистанционными методами осуществляется по яркостным параметрам. Солнечное излучение

отражается спутником и попадает в объектив. Следовательно, оптическая аппаратура измеряет падающее излучение, т. е. значение энергетической характеристики $E_{\text{нор}}$ должно соответствовать облучённости W апертуры телескопа:

$$E_{\text{нор}} = \frac{4mf\sqrt{\gamma'}\Delta f}{\pi D^2 D^* \eta} = W, \quad (5)$$

где m – коэффициент, определяющий превышение сигнала над шумами; f – полоса частот приёмно-измерительного тракта; D^* – обнаружительная способность приёмника; η – коэффициент полезного действия оптической системы.

Определим плотность падающего на объектив солнечного излучения, отражённого от спутника. В оценочных расчётах можно воспользоваться следующим выражением:

$$W = \frac{Ed_s^2 K(\lambda) A_s}{4\pi H^2}, \quad (6)$$

где E – солнечная постоянная, $E = 1366$ Вт/м²; d_s – диаметр спутника; $K(\lambda)$ – спектральный коэффициент энергетической яркости; A_s – коэффициент отражения спутника; H – расстояние от спутника до телескопа.

Облучённость объектива $W_{\text{Д}}$ в точке Лагранжа вычислим при следующих условиях: диаметр спутника $d_s = 2$ м, $K(\lambda) = 1$ (полный спектр), $A_s = 0,35$ (альbedo спутника), $H_{\text{Л}} = 3 \cdot 10^8$ м (точка Лагранжа). Тогда, в соответствии с (6) получаем $W_{\text{Д}} \approx 1,37 \cdot 10^{-15}$ Вт/м². Именно такой световой поток от спутника доходит до точки Лагранжа.

Вычисление облучённости объектива $W_{\text{Г}}$ на геостационарной орбите при $H_{\text{Г}} = 3,6 \cdot 10^7$ м приводит к следующему значению $W_{\text{Г}} \approx 1,1 \cdot 10^{-13}$ Вт/м². Облучённость объектива на геостационарной орбите также достаточно низкая.

Таким образом, пороговое значение (5) энергетической характеристики аппаратуры должно соответствовать вычисленной облучённости объектива. Из выражений (5) ясно, что для решения задачи наблюдения баллистической обстановки конструкцию оптической аппаратуры необходимо строить такого качества, чтобы удовлетворялось требование $E_{\text{нор}} = W$.

Анализ результатов и заключение

Предпроектные оценки параметров оптической аппаратуры позволяют сравнить возможности ре-

шения задачи контроля баллистической обстановки в окрестности Земли с борта КА на геостационарной орбите и в точке $L1$ системы «Земля – Луна».

Результаты расчёта показывают, что пространственное разрешение R_L в околоземной окрестности для оптической аппаратуры не может быть лучше $R_L \approx 90$ м исходя из дифракционного соотношения. При этом фокусное расстояние $f_L \approx 35$ м. Таким образом, по габаритам телескоп практически не реализуем, а по разрешению он не позволяет решить поставленную задачу (требуется разрешение $R < 10$ м). По-видимому, здесь необходимы новые подходы и более глубокие проработки аппаратуры.

Требования к чувствительному элементу, как показали расчёты, заметно превосходят существующие возможности. Эта часть телескопа также требует прорывных технологий. Оценка облучённости апертуры телескопа отражённым излучением КА выдвигает высокие требования к энергетическим характеристикам телескопа. Обзорность аппаратуры удовлетворяет требованиям постановки задачи наблюдения. Масса аппаратуры также значительная и по оценкам может быть на уровне $M = 3 \cdot 10^3$ кг.

Оценки показывают, что более реалистичным является решение задачи с помощью оптической аппаратуры на геостационарных КА. Однако создание телескопа с пространственным разрешением $R_T < 10$ м также представляет проблему. Здесь целесообразно использовать несколько КА, наблюдение с которых приведёт к решению поставленной задачи.

Литература

1. Официальный сайт Федерального космического агентства Российской Федерации [электронный ресурс]. – Режим доступа : www.federalspace.ru/13489.
2. NASA рассматривает вариант постройки космической станции за Луной // Военное обозрение. – 26 октября 2012.
3. Филипенков С. И на Луну, и на Марс // Авиапанорама. – № 3 (93). – 2012.
4. Маглинов И. Упредить быстрый глобальный удар / И. Маглинов // Военно-промышленный курьер. – № 39 (456). – 3 октября 2012.
5. Рис У. Основы дистанционного зондирования / Рис У. – М. : Техносфера, 2006. – 336 с.
6. Лебедев А. А., Нестеренко О. П. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование / А. А. Лебедев, О. П. Нестеренко. – М. : Машиностроение, 1991. – 224 с.

Поступила в редакцию 03.03.2014

*Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела,
т. (985) 121-84-49, e-mail: avkarelin@mail.ru.*

*Вячеслав Александрович Шувалов, начальник лаборатории, канд. техн. наук,
т. (495) 513-49-45, e-mail: s5134146@yandex.ru.*

*Александр Александрович Яковлев, начальник сектора, канд. техн. наук,
т. (495) 513-47-44, e-mail: aakuzmin@yandex.ru.*