

*Куренков В.И., Пупков Е.А.*

## **ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА МЕСТНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

В процессе проектирования космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) основное внимание уделяется обеспечению заданных целевых показателей космической системы наблюдения. Одним из важнейших целевых показателей КА ДЗЗ является пространственное разрешение (линейное разрешение на местности - ЛРМ), которое зависит от множества факторов, значения которых на этапе проектирования заранее неизвестны [1 - 6]. В общем случае они относятся к категории неопределённых факторов, каждый из которых изменяется в своих пределах.

На этапе проектирования КА ДЗЗ ЛРМ обычно подсчитывается по детерминированным моделям при определённых значениях факторов, которые выбираются не самыми благоприятными [2, 5]. Практически это означает, что расчёт значений ЛРМ осуществляется с некоторым запасом.

Однако использование детерминированных моделей не дает ответа на вопрос: «С какой вероятностью может быть обеспечено требуемое пространственное разрешение?» То есть возникает необходимость в определении показателей КА ДЗЗ с учётом вероятностных характеристик отдельных случайных параметров, которые в детерминированной модели представлены усреднёнными величинами.

Целью настоящего исследования является вероятностная оценка линейного разрешения на местности КА оптико-электронного наблюдения поверхности Земли в зависимости от случайных параметров входных величин, в наибольшей степени влияющих на показатель ЛРМ.

В работах [1 - 6] представлена формула для проектной оценки ЛРМ КА ДЗЗ оптико-электронного наблюдения при съёмке в надира в зависимости от рабочей длины световой волны ( $\lambda_p$ ), диаметра оптической системы ( $D_{ГЗ}$ ), высоты полёта КА ( $H_{КА}$ ) и нормированной пространственной частоты ( $k_0$ ):

$$L_{ЛРМ} = \frac{\lambda_p H_{КА}}{2k_0 D_{ГЗ}} \quad (1)$$

Диаметр главного зеркала в этом выражении будем рассматривать как детерминированную величину, так как этот параметр определяется по результатам проектирования оптической системы и в процессе эксплуатации КА не изменяется. Остальные параметры (факторы) могут быть неопределёнными и изменяться в процессе проведения съёмки в некоторых пределах. В работе принято допущение, что эти факторы относятся к категории неопределённых факторов стохастической природы, то есть случайных факторов, которые при массовом появлении обладают свойством статистической устойчивости и описываются определёнными законами распределения вероятности.

В процессе съёмки объектов наблюдения оптическая ось аппаратуры наблюдения КА отклоняется от надира и вместо высоты  $H_{КА}$  в этой формуле надо использовать дальность от КА до объекта наблюдения, которая зависит от высоты полёта КА и от угла отклонения оптической оси от надира  $\mu$ , постоянно изменяющегося в процессе съёмки в заданных пределах [8]. Формула для определения линейного разрешения на местности  $L_{ЛРМ}$  с учётом этого выглядит следующим образом:

$$L_{ЛРМ} = \frac{\lambda_p \left( (R_3 + H_{КА}) \cos \mu - \sqrt{(R_3 + H_{КА})^2 \cos^2 \mu - H_{КА} (2R_3 + H_{КА})} \right)}{2k_0 D_{ГЗ} \cos \mu}. \quad (2)$$

Угол отклонения оптической оси от надира  $\mu$  при объектовой съёмке на данном этапе исследования будем считать случайной величиной с равномерным законом распределения от нуля до максимального значения.

Рабочую длину волны оптической системы наблюдения  $\lambda_p$  также будем считать случайной величиной с равномерным законом распределения на отрезке от минимальной до максимальной длин волн рассматриваемого спектрального диапазона от ультра фиолетового до инфракрасного спектра (0,38...0,8) мкм.

Нормированная пространственная частота  $k_0$ , пропускаемая оптической системой, зависит от типа оптической системы. Так для линзовых оптических систем  $k_0$  соответствует среднему значению участка от нуля до единицы, то есть,  $k_0 = 0,5$  [7]. Для зеркальных оптических систем с центральным экранированием значение нормированной пространственной частоты принимают в пределах от 0,27 до 0,33, то есть  $k_0 = 0,3 \pm 0,03$  [3]. Мы также будем рассматривать её как случайную величину с равномерным законом распределения.

Для оценки вероятностных показателей ЛРМ был выбран КА ДЗЗ с характеристиками, как у КА «WorldView-4» (США): диаметр главного зеркала оптической аппаратуры наблюдения зеркального типа с экранированием - 1,1 м, средняя высота околокруговой орбиты - 603 км, максимальное отклонение оптической оси аппаратуры наблюдения от надира - 45 градусов.

Была поставлена задача статистической динамики, а для её решения использован метод статистических испытаний, который был реализован с помощью математической системы Mathcad.

В соответствии с принятыми допущениями о равномерных законах распределения случайных величин были сгенерированы выборки для угла отклонения оптической оси от надира  $\mu$  в пределах от 0 до 45 градусов, для рабочей длины волны оптической системы наблюдения  $\lambda_p$  в пределах от 0,38 до 0,8 мкм и для нормированной частоты в пределах от 0,27 до 0,33.

Используя формулу (1) были определены элементы выборки значений линейного разрешения на местности, которые были в дальнейшем обработаны методами статистического анализа и получены функции плотности распределения и функции распределения вероятности значения линейного разрешения на местности. Графики этих функций представлены на рис. 1.

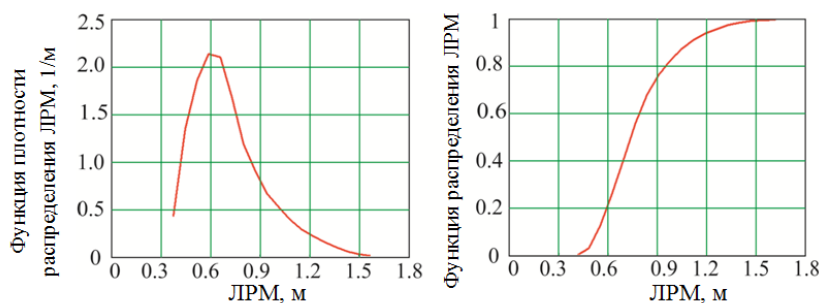


Рис. 1. Графики функции плотности распределения и функции распределения ЛРМ

Математическое ожидание ЛРМ получилось равным  $m_{\text{ЛРМ}} = 0,742$  м, а среднеквадратичное отклонение -  $\sigma_{\text{ЛРМ}} = 0,218$  м. Отметим, что заявленное линейное разрешение на местности КА ДЗЗ «WorldView-4» составляет по разным источникам 0,32...0,34 м, и, судя по полученной функции распределения ЛРМ, может быть получено с очень малой вероятностью.

Таким образом, была представлена методика вероятностной оценки ЛРМ КА оптико-электронного наблюдения поверхности Земли с учётом вероятностных факторов: угла отклонения оптической оси от надира, рабочей длины волны оптической системы наблюдения и нормированной пространственной частоты как случайных величин для одного из проектов КА ДЗЗ.

С помощью полученной функции распределения можно для рассматриваемого проекта КА ДЗЗ рассчитывать вероятностные показатели получения ЛРМ не менее заданного значения, или оценивать гарантированные по вероятности значение ЛРМ.

## Библиографический список

1. Проектирование оптических систем / Э. Бетенски, Р. Хопкинс, З. Шенон [и др.]; под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта; пер. с англ. И. В. Пейсахсона. – М.: Мир, 1983. – 430 с.
2. Матиясевич, Л. М. Введение в космическую фотографию / Л. М. Матиясевич. – М.: Недра, 1989. – 149 с.
3. Маламед, Е. Р. Конструирование оптических приборов космического базирования: учеб. пособие / Е. Р. Маламед. - СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2002. – 291 с.
4. Бакланов, А.И. Возможности модернизации космического комплекса на базе КА «АИСТ-2» / А.И. Бакланов, М.В. Ключников // Сб. материалов IV Всеросс. НТК «Актуальные проблемы РКТ» (IV Козловские чтения) (14–18 сен. 2015 г. Самара, АО «РКЦ «Прогресс»). – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2015. Т. 1. С. 303-310.
5. Замечания АО «РКЦ «Прогресс» к статье «О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3)» автора К. Н. Свиридова (журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы». 2017. Т. 4. Вып. 2. С. 20-28) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. Вып. 1. – С. 48-51.
6. Куренков, В. И. Методика оценки параметров оптико-электронных телескопических комплексов космического назначения по заданному пространственному разрешению /В. И. Куренков, В. М. Фёдоров, Е. А. Пупков, В. В. Каменский // Сб. материалов VII Всеросс. НТК «Актуальные проблемы РКТ» (VII Козловские чтения) (31 сен. 2021 г. Самара, АО «РКЦ «Прогресс»), – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2021. Т. 1. С. С. 45 – 54.
7. Куренков, В. И. Основы проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения поверхности Земли. Расчёт основных характеристик и формирование проектного облика: учебное пособие / В. И. Куренков. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 461 с.

8. Куренков, В. И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие / В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. - 296 с.

*УДК 533.6.01*

*Хоанг В.Х., Лукьянов О.Е., Комаров В.А.*

### **ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЁТА РАСХОДА ТОПЛИВА САМОЛЁТА С ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Этап концептуального проектирования летательных аппаратов играет ключевую роль в реализации проекта в целом [1, 2]. В частности, определение массы компонентов с целью решения уравнения существования самолёта является обязательным условием, которое необходимо выполнить на ранних стадиях проектирования. Топливо обеспечивает возможность самолёта выполнять свои задачи и соответствовать тактико-техническим требованиям. При типичной характеристике расхода во время полёта определение количества топлива играет важную роль, влияя на процесс проектирования самолёта на последующих этапах [3].

Для оценки достоверности расчёта массы топлива в данной работе предложены три метода определения массы топлива, основанные на непосредственном решении задачи уравнения существования летательного аппарата с учётом требования обеспечения условий равновесия летательного аппарата с входными параметрами прототипа БПЛА U-40 (табл. 1) [4]. Эти три метода применяются к этапу крейсерского полёта, поскольку это основной этап полёта, занимающий больше всего времени в течение всего полёта.