

Куренков В.И.

**МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРИБЛИЖЁННОЙ ОЦЕНКИ ПЕРИОДИЧНОСТИ  
НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**Актуальность.** При проектировании космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) необходимо обеспечить заданные целевые показатели: обзорность, линейное разрешение на местности, количество спектральных диапазонов, периодичность наблюдения, производительность съёмки, оперативность доставки видеоинформации, точность привязки снимков к геодезическим координатам и др. Особенностью проектирования КА ДЗЗ является то, что изменение какого-либо одного целевого показателя влечёт за собой изменение других показателей вследствие нелинейных связей проектных параметров с целевыми показателями. На практике «увязка» целевых и проектных параметров производится итерационным путём.

Существуют методики и программное обеспечение, с помощью которых можно провести оценку целевых характеристик КА ДЗЗ, например [1–3]. Однако для этого необходимо задать некоторые проектные параметры, которые на начальных этапах проектирования не всегда определены. Поэтому желательно иметь простые расчётные зависимости, с помощью которых имелась бы возможность проводить приближённую оценку целевых показателей КА ДЗЗ с использованием минимального набора проектных параметров.

В данной статье предлагается модель для приближённой оценки показателя периодичности наблюдения КА ДЗЗ. В качестве показателя периодичности рассматривается время между двумя соседними (по времени полета КА) попаданиями объекта наблюдения с заданными координатами в зону обзора движущегося КА.

**Суть моделирования.** Показатель периодичности наблюдения КА ДЗЗ в основном зависит от параметров орбиты, широты расположения объекта наблюдения и от максимального угла отклонения оптической оси аппаратуры наблюдения КА от надира. Подход к определению показателя периодичности заключается в том, что, зная ширину полосы обзора и период обращения КА, можно приближённо оценить среднее время между двумя смежными попаданиями объекта наблюдения в зону обзора КА.

**Построение модели.** Сначала выберем самый неблагоприятный случай с точки зрения периодичности наблюдения объектов. Пусть движение КА осуществляется по

круговой приполярной (наклонение  $i \approx 90^\circ$ ) орбите высотой  $H$ . Объекты наблюдения располагаются вблизи экватора. Съёмка объектов наблюдения осуществляется только в световом пятне (либо на восходящем, либо на нисходящем витке полёта). Предельное отклонение оптической оси КА ДЗЗ от надира при съёмке составляет  $\gamma_{\max}$  (рис. 1).

Ширина полосы обзора (без учёта кривизны Земли) составляет

$$L \approx 2H \operatorname{tg} \gamma. \quad (1)$$

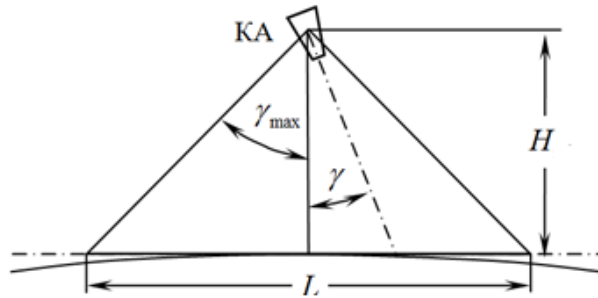


Рис. 1. Схема для определения ширины полосы обзора КА ДЗЗ

За один виток полёта зона обзора КА, граница которой представляет собой круг на поверхности Земли, «покрывает» часть длины экватора, равной ширине полосы обзора  $L$ , а длину всего экватора  $L_{\text{Э}}$  космический аппарат «покрывает» за количество витков, равное отношению длины экватора к ширине полосы обзора

$$N_{\text{Полн}} = \frac{L_{\text{Э}}}{L} = \frac{2\pi R_3}{L}, \quad (2)$$

где  $R_3$  – радиус Земли.

Время полного «покрытия» экваториальных объектов наблюдения (показатель периодичности наблюдения) можно определить как произведение времени периода обращения КА на количество витков, необходимое для этого «покрытия»:

$$t_{\text{Пер}} = T N_{\text{Полн}}.$$

Учитывая, что период обращения КА равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(R_3 + H)^3}{\mu}},$$

где  $\mu$  - гравитационный параметр Земли, и учитывая выражения (1) и (2), получаем

$$t_{\text{Пер}} = \frac{2\pi^2 R_3}{H \operatorname{tg} \gamma} \sqrt{\frac{(R_3 + H)^3}{\mu}}.$$

Если объекты наблюдения находятся не на экваторе, а на широте  $\varphi$ , то длина параллели Земли уменьшится пропорционально косинусу этого угла, и тогда

$$t_{\text{Пер}} = \frac{2\pi^2 R_3 (R_3 + H)^{3/2}}{H \operatorname{tg} \gamma \sqrt{\mu}} \cos \varphi.$$

Отметим, что если объекты наблюдения находятся вблизи полюсов Земли ( $\varphi \rightarrow 90^\circ$  или  $\varphi \rightarrow -90^\circ$ ), то показатель периодичности, рассчитанный по этой зависимости, стремится к нулю. На самом деле периодичность не может быть меньше периода обращения спутника. Поэтому в расчётную зависимость периодичности необходимо ввести ограничения:

$$t_{\text{Пер}} = \begin{cases} \frac{2\pi^2 R_3 (R_3 + H)^{3/2}}{H \operatorname{tg} \gamma \sqrt{\mu}} \cos \varphi, & \text{если } t_{\text{Пер}} > T; \\ T, & \text{если } t_{\text{Пер}} < T. \end{cases}$$

Перейдём к учёту влияния на показатель периодичности угла наклона плоскости орбиты  $i$ . С уменьшением этого угла длина части экватора, которую «накрывает» зона обзора КА ДЗЗ, увеличивается по сравнению с приполярной орбитой обратно пропорционально синусу угла  $i$  (рис. 2):

$$L^* = \frac{L}{|\sin i|}.$$

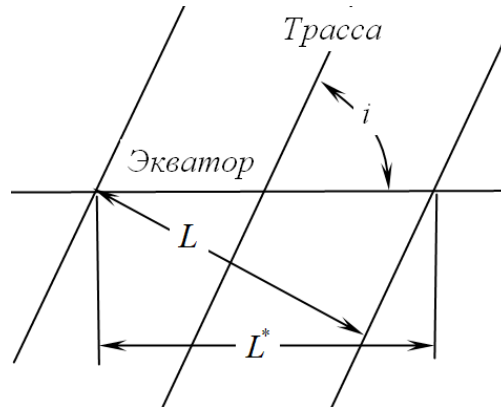


Рис. 2. Схема для учёта угла наклона плоскости орбиты

При малых углах наклона плоскости орбиты возможен случай, когда экваториальная линия всегда будет находиться внутри полосы обзора КА ДЗЗ, что также заставляет ввести ограничения по периодичности.

Учитывая эти обстоятельства, приходим к следующей зависимости для расчёта показателя периодичности:

$$t_{Пер} = \begin{cases} \frac{2\pi^2 R_3 (R_3 + H)^{3/2}}{H \operatorname{tg} \gamma \sqrt{\mu}} \cos \varphi \cdot |\sin(i)|, & \text{если } t_{Пер} > T; \\ T, & \text{если } t_{Пер} < T. \end{cases}$$

**Проверка адекватности модели.** Проверка проводилась путём сравнения результатов расчёта показателей периодичности по предлагаемой модели и результатов, полученных с помощью программного обеспечения EFKAN-43 [3]. Данное программное обеспечение обеспечивает более точное моделирование показателей периодичности с учётом орбитального движения КА, вращения Земли и годового смещения линии «Земля-Солнце» относительно экватора.

Исходные данные для моделирования соответствовали параметрам одного из функционирующих КА ДЗЗ, созданных в АО «РКЦ «Прогресс»: высота орбиты – 729 км, угол наклона плоскости орбиты – 98,3°, максимальное значение угла отклонения от надира – 45°, кратность орбиты (повторение трасс) – около двух суток.

Максимальное значение показателя периодичности, рассчитанное в системе Mathcad по предлагаемой модели, составляет 44,926 часа. Результаты моделирования с помощью программного обеспечения EFKAN-43 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования показателя периодичности КА ДЗЗ

$N$	$t_{Пер}$ , час	$t_{Пер}^{cp}$ , час	$N$	$t_{Пер}$ , час	$t_{Пер}^{cp}$ , час	$N$	$t_{Пер}$ , час	$t_{Пер}^{cp}$
1	-	-	11	47,852	42,232	21	24,745	43,232
2	48,864	47,864	12	47,854	43,652	22	47,845	43,452
3	24,738	36,301	13	47,858	44,002	23	47,851	43,652
4	47,847	40,150	14	47,862	44,299	24	47,854	43,835
5	47,852	42,075	15	24,742	42,902	25	47,857	44,002
6	47,855	43,231	16	47,846	43,232	26	47,861	44,157
7	47,858	44,002	17	47,851	43,521	27	24,747	43,410
8	47,863	44,554	18	47,854	43,766	28	47,844	43,574
9	24,740	42,077	19	47,858	44,002	29	47,852	43,674
10	47,846	42,718	20	47,862	44,205	-	-	-

В таблице приведены следующие обозначения:  $N$  – количество объектов наблюдения, попавших в зону обзора КА ДЗЗ нарастающим итогом;  $t_{Пер}$  – показатель периодичности;  $t_{Пер}^{cp}$  – среднее значение показателя периодичности, рассчитанное по нарастающему количеству элементов массива данных. В первой строке результаты отсутствуют, так как расчёт показателя периодичность начинается со второго момента попадания объекта наблюдения в зону обзора КА ДЗЗ.

Анализ данных таблицы показывает, что максимальное значение периодичности составляет около 48 часов (двое суток), а минимальное – около 24 часа (одни сутки), причём частота наступления периодичности около 48 часов превышает в 5 раз частоту наступления периодичности около 24 часов. Такое «поведение» показателя объясняется тем, что трасса КА постоянно сдвигается относительно объектов наблюдения таким образом, что за 5 витков появляется возможность отснять объект через сутки полёта, а не за двое. Среднее значение показателя периодичности также немного изменяется от витка к витку, однако с увеличением количества обрабатываемых точек среднее значение периодичности постепенно стабилизируется и составляет примерно 44 часа. Приближённые модели таких тонкостей не учитывают, однако результаты близки.

### **Выводы**

1. Получена модель для приближённой оценки периодичности наблюдения КА ДЗЗ, которая может быть использована на начальных этапах проектирования, когда не все основные проектные параметры определены.

2. Сравнение результатов расчёта показателей периодичности КА ДЗЗ, полученных по приближённой формуле и с помощью более точных средств моделирования, показывает, что результаты близки. При этом несколько большее значение показателя периодичности по приближённой модели пойдёт «в запас».

### **Библиографический список**

1. Лебедев, А.А. Основы синтеза систем летательных аппаратов. 2-е изд., доп. и перераб. [Текст] / А.А. Лебедев, Г.Г. Аджимамудов, В.Н. Баранов [и др.]. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 444 с.

2. Красильщиков, М.Н. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление [Текст] / М.Н. Красильщиков, В.Т. Бобронников и др.; под ред. В.В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.

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