
УДК 629.783

Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли*

В.В.Дарнопых, И.В.Усовик

Аннотация.

В настоящее время при решении задач проектирования спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) необходимо учитывать огромное число различных ограничений, связанных с баллистическим построением самой системы, параметрами спутниковой аппаратуры, а также различными заявками, поступающими на выполнение в систему. Для выбора оптимальных параметров системы ДЗЗ необходимо проводить комплексный параметрический анализ функционирования систем ДЗЗ. Разработан программный комплекс для расчетов различных параметров функционирования систем ДЗЗ, рассмотрено применение комплекса на конкретном примере.

Ключевые слова:

космические системы, дистанционное зондирование Земли, орбитальные группировки, целевое функционирование, бортовая аппаратура, периодичность наблюдения, оптимизация, программный комплекс, моделирование, параметрический анализ, анализ эффективности.

Введение.

В настоящее время использование снимков полученных из космоса становится всё более распространённым. Использование этих данных находит применение в самых различных отраслях: от поиска полезных ископаемых до сельского хозяйства. В связи с увеличением числа потребителей данной информации, в настоящее время идёт процесс, направленный на создании многофункциональных спутниковых систем, состоящих из нескольких космических аппаратов (КА). Эффективность использования таких систем зависит от их характеристик и текущего состояния, состава задач, которые должны быть решены с помощью системы в рассматриваемый период её функционирования, от факторов

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-08-01278-а).

внешней среды, влияющих на работу системы. Кроме того, на эффективность использования системы существенно влияет программа (план) работы целевой аппаратуры спутников и наземной аппаратуры приёма информации. Ограниченные возможности по получению, хранению и передаче информации обуславливают необходимость решения задачи формирования оптимального плана работы системы с учётом всех требований и ограничений. В общем случае параметрический анализ функционирования спутниковой системы ДЗЗ можно разделить на решение нескольких задач:

1. Анализ эволюции орбит спутников ДЗЗ, позволяющий судить о вековых уходах орбиты на длинных интервалах времени.
2. Анализ периодичности покрытия различных территорий на земле.

Для оценки функционирования систем ДЗЗ необходимо иметь программный комплекс, позволяющий проанализировать большое количество задач связанных с функционированием систем ДЗЗ на этапе технических предложений, а также последующим выбором оптимального построения системы.

В работе приведено исследование функционирования системы ДЗЗ состоящей из 4-х КА, расположенных на одной орбите, разбросанных на 90 градусов по аргументу широты.

1. Постановка задачи и модели.

Необходимо провести параметрический анализ функционирования системы ДЗЗ состоящей из одного или более космических аппаратов: провести анализ эволюции орбиты, анализ периодичности съёмки для различных территорий поверхности Земли, провести анализ функционирования спутниковой аппаратуры при съёмке некоторого числа объектов на земле.

В данном разделе описываются основные математические модели, которые используются для анализа спутниковых систем ДЗЗ. Они включают в себя анализ эволюции орбиты, методику имитационного моделирования функционирования спутниковой системы, а так же алгоритмы формирования оптимального плана работы спутниковой аппаратуры системы.

1.1. Численно аналитические модели эволюции орбит КА.

Спутники ДЗЗ относятся к классу низкоорбитальных (LEO) спутников, и располагаются в основном в диапазоне высот от 500 до 2000 км. Исключением можно считать некоторые метеорологические спутники, которые располагаются на геостационарных орбитах. Для описания орбит спутников традиционно используют шесть параметров: три координаты, три скорости или набор шести Кеплеровых элементов [1-3].

В общем случае возмущения Кеплеровых элементов орбит можно разделить на: короткопериодические, среднепериодические и вековые. На больших интервалах времени целесообразно рассматривать только вековые возмущения, вследствие которых орбита сильно изменяется. На эволюцию орбиты спутников данного типа оказывают воздействие следующие возмущающие факторы: нецентральность гравитационного поля Земли и атмосферное торможение. Остальные возмущающие факторы обычно не используются для анализа эволюции орбит таких спутников на больших интервалах времени, т.к. возмущения от них являются на много меньшими. Отдельного анализа требует возмущение от воздействия давления света, т.к. на высотах более 800 км возмущения от давления света становятся больше чем возмущения от атмосферы. При анализе данных возмущений следует учитывать, что воздействие давления света на аппарат происходит только в те моменты времени, когда он не затенен землей, а для низкоорбитальных орбит затенение происходит практически на каждом витке. На интервале активного функционирования системы ДЗЗ на высоту орбиты КА возмущения от светового давления не влияют. Также воздействие давления света и атмосферы сильно зависят от баллистического коэффициента, который зависит от того, с какой стороны происходит воздействие на спутник, если он не сферической формы, поэтому в расчетах необходимо использовать некоторый усредненный баллистический коэффициент. Для анализа эволюции орбиты на больших интервалах времени целесообразно использовать аналитические модели вековых возмущений орбиты использованные в [1].

Вековые возмущения за виток от второй зональной гармоники:

$$\bar{\delta}\Omega = 2\pi \frac{3}{2} c_{20} \left(\frac{R_3}{p}\right)^2 \cos(i), \quad (1.1)$$

$$\bar{\delta}\omega = -2\pi \frac{3}{4} c_{20} \left(\frac{R_3}{p}\right)^2 (4 - 5\sin(i)), \quad (1.2)$$

$$\bar{\delta}a = \bar{\delta}e = 0. \quad (1.3)$$

Где Ω – долгота восходящего узла, R_3 – радиус экватора, i – наклонение, p – фокальный параметр орбиты, a – большая полуось, e – эксцентриситет, c_{20} – возмущение от второй зональной гармоники.

Вековые возмущения за виток от атмосферных возмущений:

$$\bar{\delta}a = -4\pi(k_b \rho_{per} p) \frac{a^2}{p} \exp(-z) [I_0(z) + 2eI_1(z) \dots], \quad (1.4)$$

$$\bar{\delta}e = -4\pi(k_b \rho_{per} p) \exp(-z) \left[I_1(z) + \frac{1}{2}e(I_0(z) + I_2(z)) + \dots \right], \quad (1.5)$$

$$\bar{\delta}\omega, = \bar{\delta}\Omega = 0, \quad (1.6)$$

Где k_b – баллистический коэффициент, $\rho_{пер}$ – плотность атмосферы, зависящая от различных факторов, $z = ae/H$ где H – высота однородной атмосферы, $I_n(z)$ – бесселевы функции мнимого аргумента, которые удовлетворяют соотношениям:

$$I_n(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(z \cos(E)) \cos(nE) dE, \quad (1.7)$$

Данные модели позволяют получать оценки изменения основных параметров орбиты на длительных интервалах времени с малыми затратами машинного времени.

1.2 Имитационная модель для расчета периодичности съёмки территорий Земли.

Задача расчета периодичности съёмки различных территорий на земле, является одной из самых важных при выборе параметров орбит спутниковой системы. Это обусловлено тем, что для систем ДЗЗ выполняющих различные функции, необходимы различные периодичности съёмки конкретных территорий. Чаще всего решают упрощённую задачу, рассчитывая периодичность покрытия экватора, но данная оценка не всегда подходит для хорошего анализа функционирования системы над районами не находящимися на экваторе, особенно если система состоит из нескольких аппаратов. Под периодичностью съёмки понимается время между двумя последовательными проходами спутников из системы над одними и теми же районами Земли. Для решения задачи была применена следующая имитационная модель: движение спутников рассчитывается с использованием модели движения в оскулирующих элементах, которая интегрируется численно с мелким шагом по времени.

$$\frac{dp}{dt} = 2r \sqrt{\frac{p}{\mu}} T, \quad (1.8)$$

$$\frac{d\lambda_1}{dt} = \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left[T \left(1 + \frac{r}{p} \right) \cos(u) + S \sin(u) + \frac{r}{p} (T\lambda_2 - W\lambda_1 \operatorname{ctg}(i) * \sin(u)) \right], \quad (1.9)$$

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left[T \left(1 + \frac{r}{p} \right) \sin(u) - S \cos(u) + \frac{r}{p} (T\lambda_1 + W\lambda_2 \operatorname{ctg}(i) * \sin(u)) \right], \quad (1.10)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin(u)}{\sin(i)} W, \quad (1.11)$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{r}{\sqrt{\mu p}} \cos(u) W, \quad (1.12)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} + \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \sin(u) \operatorname{ctg}(i) W, \quad (1.13)$$

Где

$p(t)$ – фокальный параметр, $e(t)$ – эксцентриситет, $\Omega(t)$ – долгота восходящего узла, $i(t)$ – наклонение орбиты, $w(t)$ – аргумент перицентра, $U(t)$

- аргумент широты, $\lambda_1 = e * \cos(w)$, $\lambda_2 = e * \sin(w)$. T, S, W - возмущающие ускорения,

вызванные нецентральностью гравитационного поля Земли и действием атмосферы. Для каждого положения спутника рассчитывается его проекция на землю. Геоцентрическая долгота и широта подспутниковой точки рассчитывается по формулам:

$$\varphi = \arcsin (\sin (u) \sin (i)) , \quad (1.14)$$

$$\lambda = \Omega + \bar{a}b - \frac{T}{T_{3\text{Э}}} U$$

$$, \quad (1.15)$$

$$\arcsin \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{\operatorname{tg}(i)} \text{ при } 0 \leq u \leq \frac{\pi}{2},$$

$$\bar{a}b = \pi - \arcsin \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{\operatorname{tg}(i)} \text{ при } \frac{\pi}{2} < u \leq \frac{3\pi}{2}. \quad (1.16)$$

$$2\pi - \arcsin \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{\operatorname{tg}(i)} \text{ при } \frac{3\pi}{2} < u < 2\pi,$$

Для каждого спутника рассчитывается зона обзора спутниковой аппаратуры Ψ , которая определяется максимальной величиной телесного угла обзора аппаратуры спутника δ .

$$\Psi = \frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{R_2 + h}{R_2} \sin(\delta) \right) - \delta. \quad (1.17)$$

Таким образом, для каждого момента времени можно фиксировать какие территории попадают в поле действия спутниковой аппаратуры. Для расчета периодичности съемки всей поверхности Земли разбиваем поверхность на отдельные территории с мелким шагом по долготе и широте. Для удобства работы будем пользоваться цилиндрической проекцией Земли, тогда получается много маленьких квадратов, каждый из которых задаётся 4-мя точками. При расчете учитываем, что проекция полосы обзора на карту в цилиндрической проекции деформируется при приближении трассы спутника к полюсам.

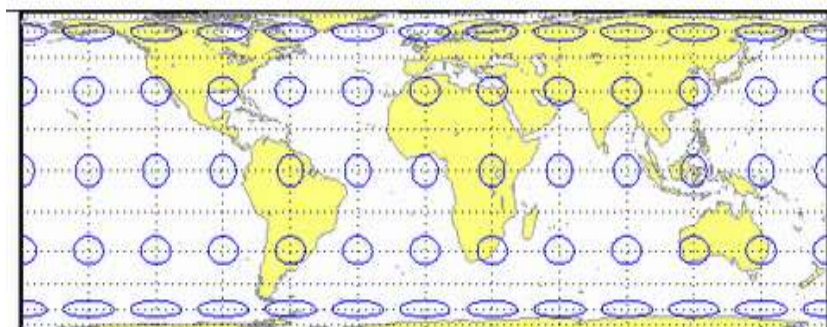


Рис.1 Изменение проекции зоны обзора на карту.

Далее, для каждого мгновенного положения спутника, рассчитываем какие территории попадают в зону обзора. Территория считается попавшей, если четыре точки, задающие её границы, входят в зону обзора как на рис. 2

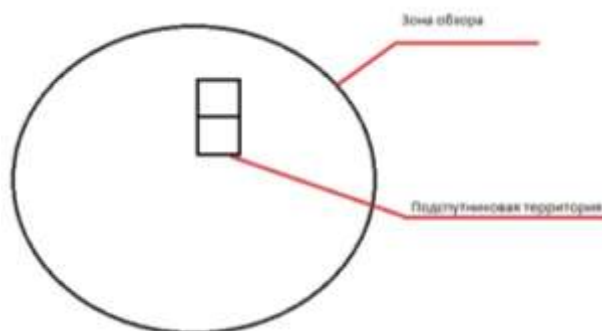


Рис.2 Расчет попадания территории в зону обзора спутниковой аппаратуры.

Для каждого такого элемента фиксируются времена входа и выхода из зоны обзора. Во время моделирования происходит расчет для каждой территории минимальной, максимальной и средней периодичности.

1.3 Модели расчета показателя эффективности целевого функционирования спутниковых систем ДЗЗ.

Для оптимизации баллистического построения спутниковых систем ДЗЗ регионального назначения возможно в качестве критерия можно использовать среднюю периодичность съемки региона которая рассчитывается:

$$J = \sum_{\varphi} \sum_{\lambda} F(\varphi, \lambda) . \quad (1.18)$$

Где $F(\varphi, \lambda)$ - средняя периодичность съемки территории с координатами φ по широте, λ по долготе, суммирование производится только для территории выбранного региона или территории. При минимизации значения данного критерия, мы будем искать такое построение системы, при котором периодичность съемки всей территории чаще.

2. Программный комплекс.

В разделе дано описание программ для анализа эволюции орбиты, периодичности съёмки поверхности Земли, составления всех возможных моментов съёмки и передачи информации на наземные станции приёма информации, составления оптимального плана выполнения заявок.

2.1 Окно «Анализ эволюции»

Вид программы представлен на рис. 3. В основном окне расположены поля для ввода параметров орбиты, усреднённого баллистического коэффициента, а так же поле с номером года от начала цикла солнечной активности для учёта нелинейности в вариации плотности атмосферы. Расчёт можно провести на период времени от нескольких витков до нескольких лет. В данном окне есть возможность посмотреть результаты в графическом и текстовом форматах.

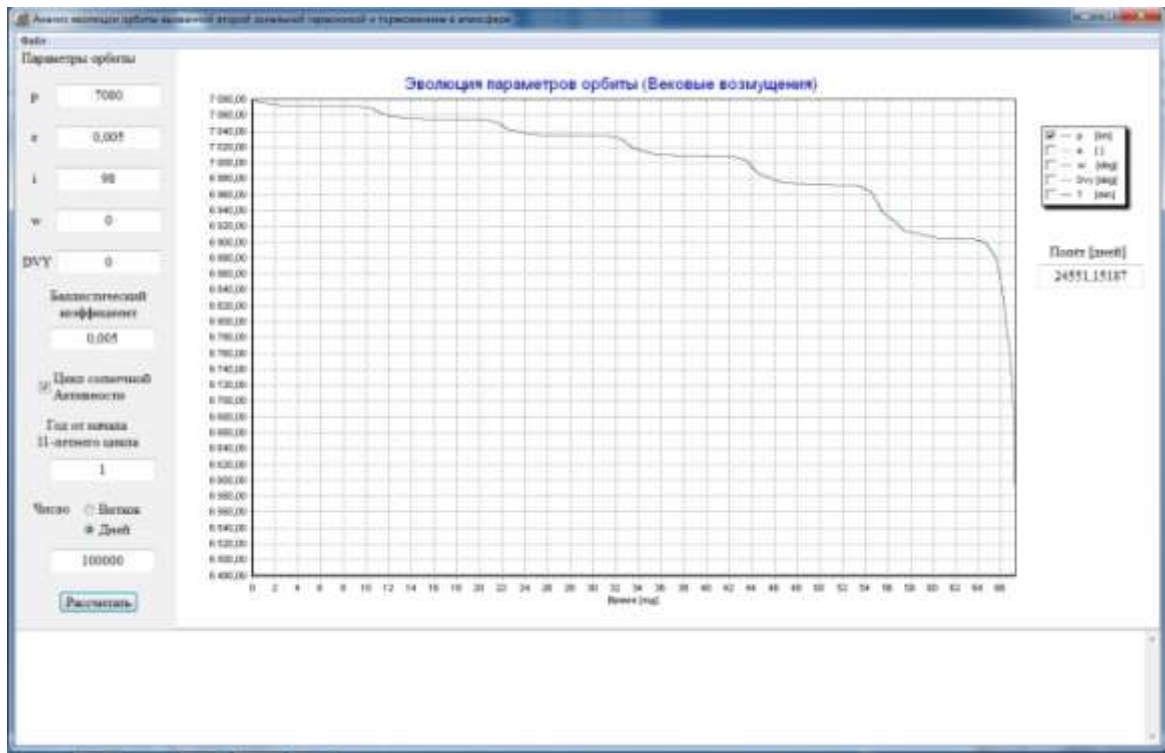


Рис.3 Окно программы «Анализ эволюции»



Рис.4 Окно вкладки «Параметры»

2.2 Окно «Расчёт периодичности»

Для расчёта периодичности съёмки спутниковой системы, а так же расчёта оптимального плана работы спутниковой аппаратуры разработана группа программ для прогнозирования движения спутников и анализа функционирования и периодичности, а также для расчета оптимального плана выполнения заявок с использованием методов математического программирования. Для расчётов необходимо заполнить все окна вкладки параметры.

В данной вкладке располагается таблица для введения параметров спутниковой системы состоящей из одного или более спутников, параметров аппаратуры, и БЗУ. Также здесь находится менеджер заявок для ввода заявок с ограничениями на проведение точечных съёмок и поля для ввода параметров пунктов приёма информации. Все параметры можно сохранять и загружать в базу данных или текстовые файлы.

Для моделирования и выбора параметров расчета используется программа «Моделирование». В данной программе, после того как все необходимые параметры заданы, происходит прогнозирование и расчет периодичности съёмки как отдельных объектов, так и всей поверхности Земли. При моделировании время задается по Гринвичу.

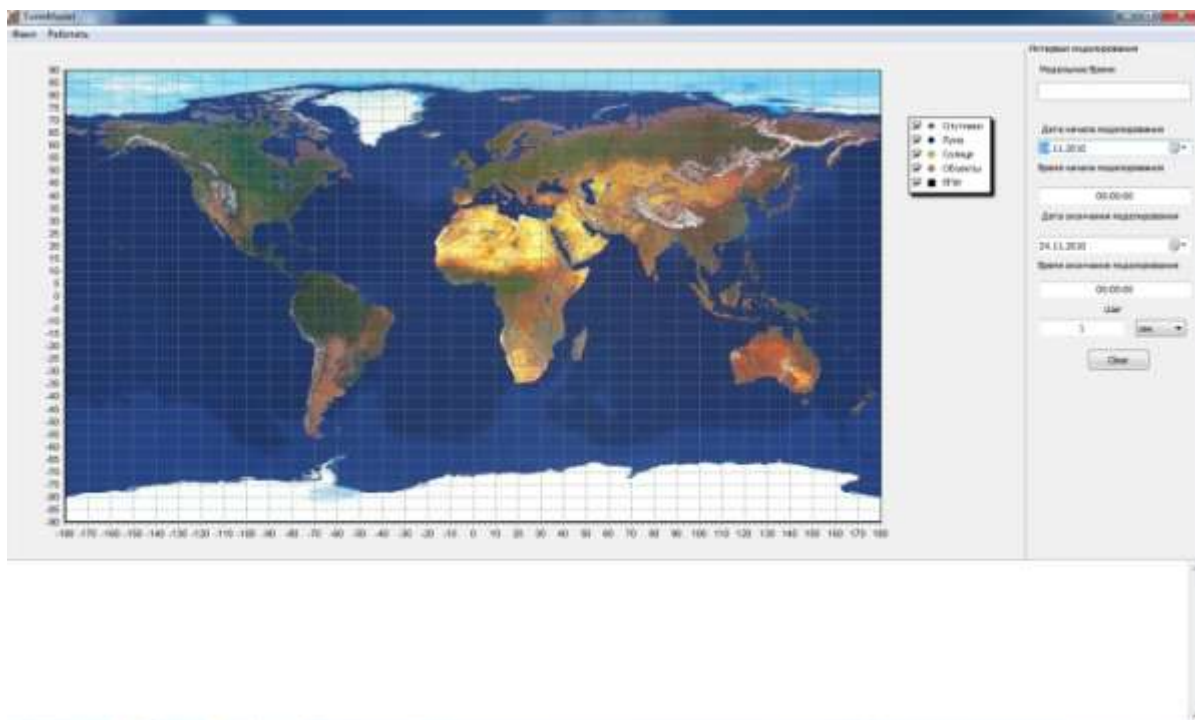


Рис.5 Окно программы «Моделирование»

3. Пример решения модельной задачи

Для примера расчетов периодичности и эволюции орбиты была выбрана система, состоящая из 4-х спутников на одной орбите, разнесенных на 90 градусов по аргументу широты. Параметры орбиты: $r = 7080$ км, $e = 0.002$, $I = 98.4$, $\Omega = 0$, $w = 0$. На каждом спутнике установлено по гиперспектрометру. Угол обзора аппаратуры на спутниках 10 градусов.

3.1. Анализ эволюции орбиты

Перед расчетом эволюции орбиты следует определить значения баллистического коэффициента. Для спутников типа ДЗЗ баллистические коэффициенты обычно имеют значения в диапазоне $0,005..0.015$ м²/кг. Рассмотрим эволюцию фокального параметра r для двух граничных случаев значений баллистических коэффициентов, в случае запуска спутников на орбиту с такими параметрами в 2012 году. Следует отметить, что на данный год должен приходиться пик солнечной активности. Данный факт учитывается при моделировании.

Как видно из рисунка 7, в течение 10 первых лет функционирования орбита спутника не опустится ниже высоты 620 км. над землёй. Баллистическое существование объектов на орбите, в случае их не увода по завершении срока активного существования составляет от 23 до 70 лет.

Остальные параметры изменяются ожидаемо. Долгота восходящего узла изменяется приблизительно на 1 град/сутки. Эксцентриситет стремится к 0 под действием возмущений атмосферы, аргумент перицентра w изменяется достаточно сильно, но так как орбита почти круговая его можно не учитывать в различных расчетах.

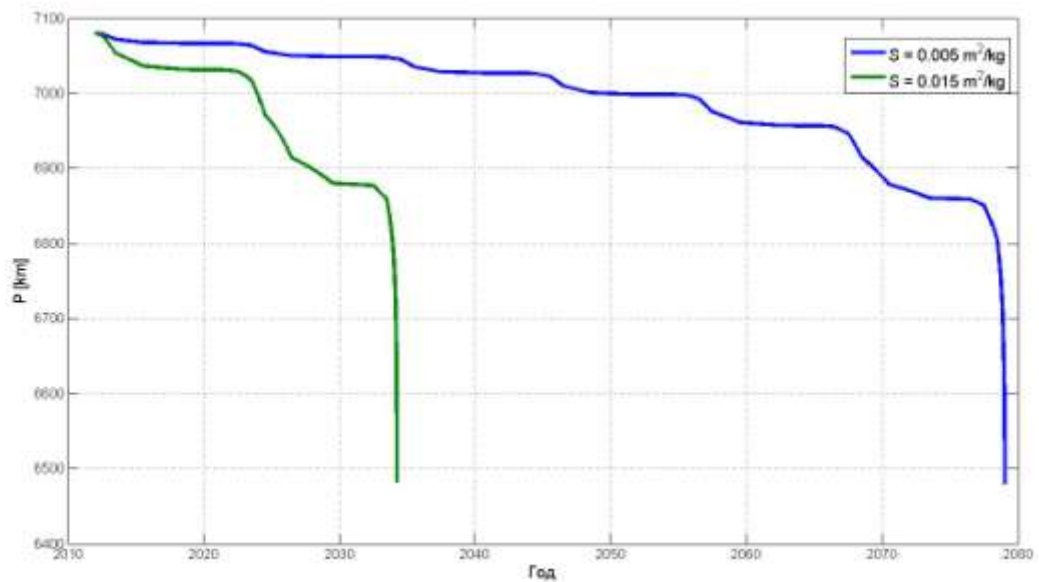


Рис. 6. Зависимость p от года при различных значениях баллистического коэффициента.

3.2 Анализ периодичности съемки над различными территориями

Для данной системы был проведен анализ периодичности покрытия для территории России на интервале кратности повторения трасс на земле. Пример трасс спутников за один виток, представлен на рисунке 8.

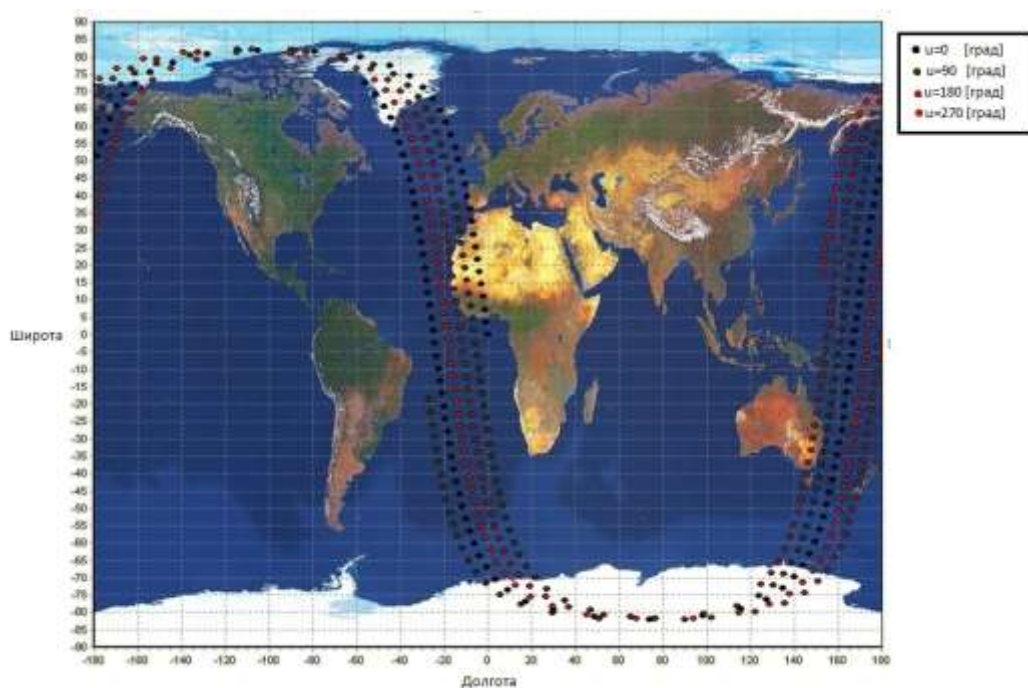


Рис. 7. Пример трасс системы из 4-х спутников разным цветом

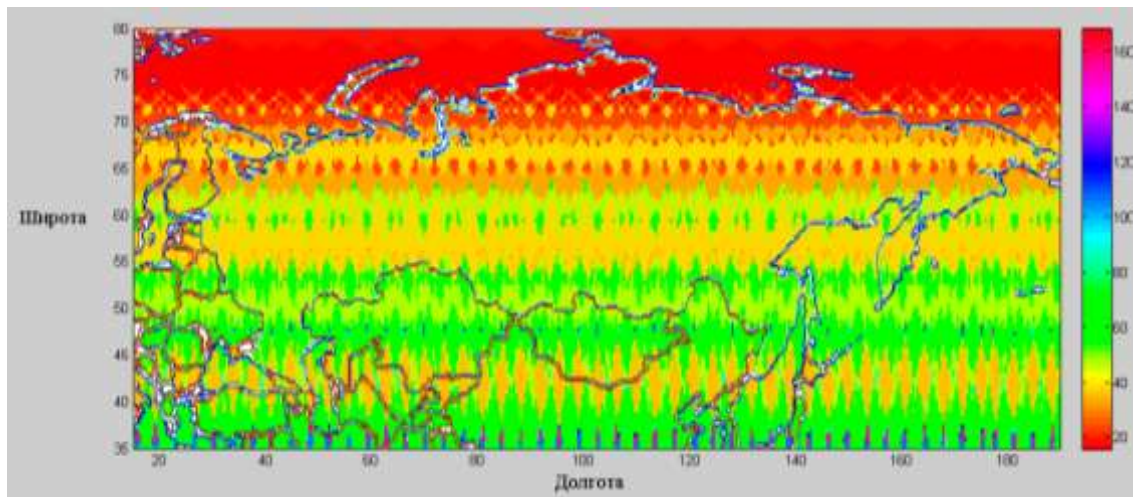


Рис.8. Максимальная периодичность съемки в часах от долготы и широты.

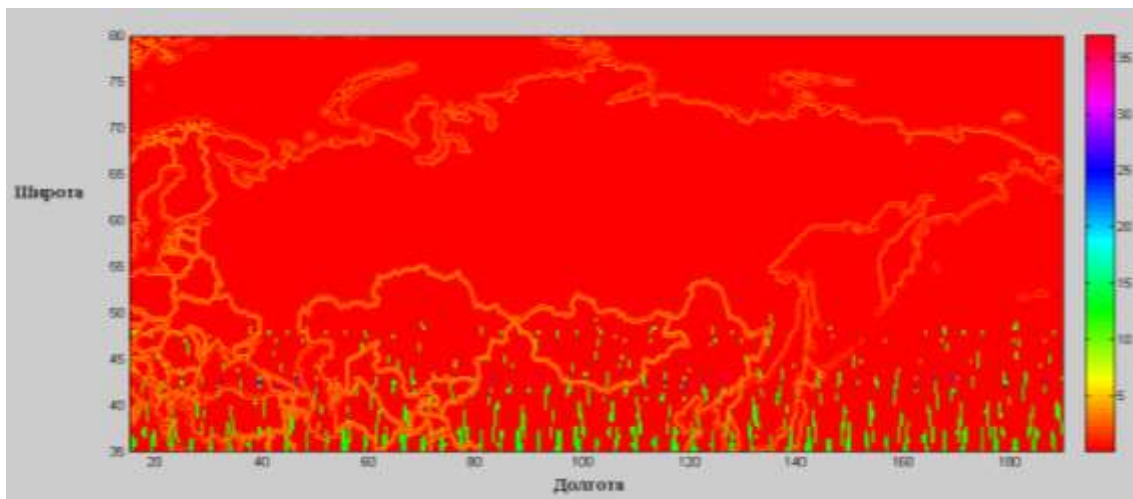


Рис.9. Минимальная периодичность съемки в часах от долготы и широты.

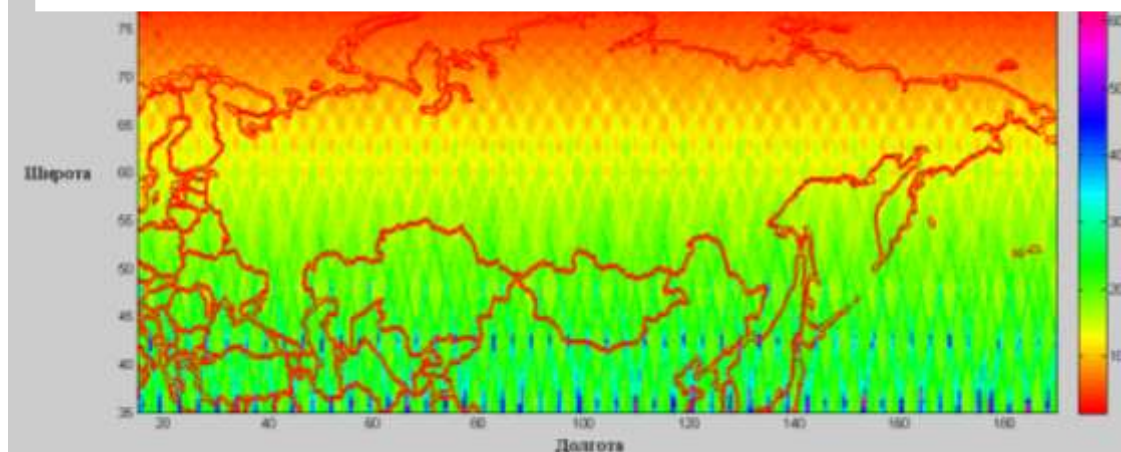


Рис.10. Средняя периодичность съемки в часах от долготы и широты.

Как видно из рис. 7 траектории спутников следуют одна за другой со сдвигом по долготе в 6 градусов. Периодичность покрытия экватора для такой системы может составлять 12 часов. Так же такое построение системы позволяет в некоторые моменты времени наблюдать за некоторыми быстро развивающимися процессами на земле с периодичностью в четверть периода обращения спутника, при достаточных для этого параметрах аппаратуры. Периодичность покрытия экватора для такой системы может составлять 12 часов. Данные результаты хорошо иллюстрируются на графиках периодичности от широты и долготы. Для примера, анализ был проведён для всей территории России с близлежащими территориями. Следует отметить, что анализ проведён для полосы захвата, при съёмке в надир. Это было сделано для того, чтобы проанализировать периодичность съёмки близкой к надирной линии, так как такая съёмка является наиболее ценной.

Как видно из рис. 9 – минимальная периодичность спутниковой системы из 4-х КА расположенных в одной плоскости для практически всей территории России одинакова и равняется $\frac{1}{4}$ периода обращения спутника.

На рис. 8 изображена максимальная периодичность съёмки. Как видно из данного рисунка всю территорию России можно разделить на несколько групп по Максимальной периодичности. В диапазоне широт:

- 80 до 70 максимальная периодичность составляет менее 20 часов,
- 70 до 60 в среднем около 30-ти часов,
- 60 до 55 в среднем около 40 часов,
- менее 55 в среднем более 50 часов,

Как видно из рис. 10 – средняя периодичность имеет менее изрезанный характер по сравнению с максимальной, и более полно отражает характеристики системы.

Явно выделяется по широте периодичность:

- 80 до 70 менее 10 часов
- 70 до 60 от 10 до 15 часов
- от 60 и менее от 15 до 25 часов.

4. Заключение

В данной работе были рассмотрены подходы методы и программы для анализа функционирования систем состоящих из нескольких спутников. Был проведён анализ для спутниковой системы, состоящей из 4-х КА на одной орбите, разнесённых на 90 градусов по аргументу широты. Орбита является круговой, и удовлетворяет требованиям солнечной синхронности. В результате анализа было выявлено, что данная система позволяет

наблюдать не реже чем раз в двое суток на территории России различные процессы в надир, с периодичностью в $\frac{1}{4}$ периода обращения спутников, что обусловлено баллистическим построением системы. Так же характерно для такой системы последовательное покрытие экватора, т.к. межвитковые сдвиги соседних спутников составляют 6 градусов, в случае если спутниковая аппаратура имеет полосу обзора в 3 градуса вправо и влево, то система последовательно сканирует всю территорию Земли и периодичность покрытия экватора составляет 12 часов.

Анализ эволюции орбиты показал, что данная орбита полностью удовлетворяет требованиям солнечной синхронности. На интервале возможного активного функционирования не опускается более чем на 60 км.

Также приведен пример расчета оптимального плана работы спутниковой аппаратуры.

Библиографический список.

1. *Назаренко А.И., Скребушевский Б.С.* Эволюция и устойчивость спутниковых систем. 1981г. Издательство «Машиностроение».
2. *Чернов А.А., Чернявский Г.М.* Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. 2004г. «Радио и связь».
3. *Дарных В.В., Малышев В.В.* Планирование управления съемочной аппаратурой системы космических аппаратов // Изв. РАН. ТиСУ. 1998. № 6. С.135-149.
4. *Малышев В.В., Бобронников В.Т., Дарных В.В. и др.* Планирование целевого функционирования спутниковых систем мониторинга: Учебное пособие. М.: МАИ, 2002. 80 с.
5. *Darnopykh V., Malyshev V.* Planning the Control of Survey Devices for a System of Satellites / Journal of Computer and Systems Sciences International (A Journal of Optimization and Control). - МАИК НАУКА / Interperiodica Publishing. 1998, V.37, № 6. P.957-969.
6. *Дарных В.В.* Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения // Интернет–журнал «Труды МАИ», 2004. Выпуск № 16. 15 с. <http://www.mai.ru>.
7. *Беляев М.Ю.* Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.

8. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: А и Б, 1997. 296 с.
9. *Мальшев В.В., Красильщиков М.Н., Бобронников В.Т. и др.* Спутниковые системы мониторинга. М.: МАИ, 2000. 568 с.
10. *Чандра А.М., Гош С.К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дарнопых Валерий Витальевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., e-mail: darnopykh@mail.ru.

Усовик Игорь Вячеславович, студент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: usovikiv@mail.ru

