



Научная статья

УДК 629.783:621.396.967

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188281>

EDN: <https://www.elibrary.ru/PNNIWY>

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПЕРИОДИЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ

К.А. Занин, В.И. Дмитриев✉

Акционерное общество "Научно-Производственное Объединение Им. С.А. Лавочкина",

Московская обл., г. Химки, Россия

✉ DmitrievVI@laspace.ru

Цитирование: Занин К.А., Дмитриев В.И. Стохастическая модель оценки периодичности наблюдения многоспутниковой орбитальной группировки // Труды МАИ. 2026. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188281>

Аннотация. В статье рассматривается стохастическая численно-аналитическая методика оценки средней периодичности наблюдения многоспутниковой орбитальной группировки. Отмечается, что орбитальное построение современных группировок наблюдения отличается от традиционного. Для улучшения периодичности наблюдения заданных районов космические аппараты располагаются на наклонных, а не солнечно-синхронных орбитах как ранее. Известные аналитические методы оценки параметров орбитальных группировок основаны на аналитических оценках повторяемости трассы при условии изомаршрутности. Для группировок на разнотипных орбитах обычно применяется численное статистическое моделирование. Одним из направлений, позволяющих получить аналитические оценки, является разработка стохастических методик. Численность современных орбитальных группировок наблюдения достигает десятков и сотен космических аппаратов, что позволяет применять для их моделирования методы теории вероятности. Аналитические оценки по сравнению с численными позволяют установить качественную

взаимосвязь между параметрами орбитального построения, количеством аппаратов и периодичностью наблюдения. Разработанная методика основана на аналитических зависимостях частоты попадания в полосу захвата и плотности вероятности распределения космических аппаратов от широты, долготы и наклона орбиты. Получена оценка плотности распределения вероятности наблюдения в зависимости от наклона, высоты орбиты, полосы захвата и количества космических аппаратов. Показано, что применение орбит с различным наклоном позволяет улучшить периодичность наблюдения в заданном широтном поясе. Методика позволяет найти наилучшее распределение орбитальных плоскостей по наклонам и количеству космических аппаратов для организации наблюдения с высокой периодичностью в заданном регионе. Приводится пример оценки периодичности наблюдения для группировки типа World View Legion. Показана сходимость оценок с результатами численного статистического моделирования.

Ключевые слова: стохастическая модель; космическая система оптико-электронного наблюдения; многоспутниковая орбитальная группировка; плотность вероятности; количество космических аппаратов; орбитальное построение; наклон плоскости орбиты; показатели эффективности; периодичность наблюдения; широтный пояс.

.....

PROBABILISTIC MODEL FOR ANALYZING THE REVISIT TIME OF MULTI-SATELLITE ORBITAL CONSTELLATION

K.A. Zanin, V.I. Dmitriev✉

Joint Stock Company "NPO Lavochkin", Khimki, Moscow Region, Russia

✉ DmitrievVI@laspace.ru

Citation: Zanin K.A., Dmitriev V.I. Probabilistic model for analyzing the revisit time of multi-satellite orbital constellation // Trudy MAI. 2026. No. 148. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188281>

Abstract. This article presents a probabilistic numerical-analytical method for estimating the average revisit time of multi-satellite orbital constellation. It is noted that the design of modern orbital constellations spaceborne electro-optical observation

system differs from traditional methods. To improve the observation frequency of given areas, spacecraft are positioned in inclined orbits rather than sun-synchronous orbits, as was previously the case. A known analytical method for estimating orbital constellation parameters are based on analytical estimates of path repeatability under iso-route conditions. For constellations in different orbits, numerical statistical modeling is typically used. The one approach to obtaining analytical estimates is the development of probabilistic methods. Modern orbital constellations comprise tens and hundreds of spacecraft, allowing the use of probability theory methods for their modeling. Analytical estimates, compared to numerical ones, allow for the establishment of a qualitative relationship between orbital design parameters, the number of satellites, and the observation frequency. The developed method is based on analytical relationships between the frequency of capture within the swath and the probability density of spacecraft distribution as functions of latitude, longitude, and orbital inclination. An estimate of the probability density of observation is obtained depending on inclination, orbital altitude, swath, and the number of spacecrafts. It is shown that using orbits with different inclinations improves the observation frequency in a given latitude zone. The method enables the optimal distribution of orbital planes by inclination and number of spacecrafts to organize high-frequency observation in a given region. An example of estimating the observation frequency for a World View Legion constellation is provided. A convergence of the estimates with the results of numerical statistical modeling is demonstrated.

Keywords: probabilistic model; spaceborne electro-optical observation system; multi-satellite orbital constellation; probability density; number of spacecrafts; orbital architecture; orbital inclination; metrics of efficiency; revisit time; latitudinal band.

Введение

Важную роль в информационном обеспечении имеют космические оптико-электронные системы наблюдения. Их основным направлением развития является создание орбитальных группировок (ОГ) для улучшения производительности и периодичности наблюдения.

Периодичность наблюдения для околополярных и солнечно-синхронных как на изомаршрутных орбитах классически определяется через период повторения трассы космических аппаратов (КА) [1, 2]. Принципы построения ОГ и оценки параметров повторяемости трассы КА подробно приведены в работах отечественных и зарубежных ученых [3-8]. Обычно считается, что относительное положение КА в ОГ поддерживается с заданной точностью и КА находятся на околополярных орбитах.

Очевидно, что для современных многоспутниковых группировок из сотен и тысяч КА на различных орбитах методики оценки параметров на основе изомаршрутности трассы имеют ограничения. За рубежом в настоящее время активно разрабатываются новые способы моделирования и определения оптимальных параметров мегасозвездий КА. Одним из направлений является разработка стохастических методик [9] и применение методов глубокого машинного обучения для оптимизации орбитального построения [10].

Анализ публикаций показал, что вероятностные методы моделирования и оптимизации орбитальных группировок за рубежом применяются в основном для систем связи [14]. В связи с этим актуальной задачей является разработка аналогичных методов применительно к системам наблюдения, состоящим из большого количества КА.

Ряд отечественных ученых ранее предлагали вероятностные подходы к моделированию многоспутниковых группировок [11-13]. Однако в силу малочисленности существующих в то время отечественных ОГ он не был развит. Основным направлением стало развитие методов численного статистического моделирования функционирования ОГ различного назначения.

В статье представлена стохастическая модель оценки периодичности наблюдения многоспутниковой группировки на орбитах с различным наклонением.

Анализ особенностей построения современных орбитальных группировок наблюдения

Основным направлением развития современных ОГ наблюдения является создание гибридной космической архитектуры, объединяющей возможности больших и многочисленных малых КА наблюдения [19,20]. Численность ОГ наблюдения достигает десятков и сотен КА на орбитах разной высоты и наклонения. Такое построение обеспечивает потребителям высокую периодичность наблюдения заданных районов и высокую разрешающую способность материалов съемки.

Примером орбитальной космической системы нового поколения является WorldView Legion фирмы MAXAR. Планируется, что на первом этапе она будет состоять из 6 КА, по 2 КА на круговых орбитах высотой 517 км с наклонением 45° , 58° и 98° . Космические аппараты оснащены крупногабаритным оптико-электронным комплексом и обеспечивают высокие скорости перенацеливания и съемки. Заявленная периодичность наблюдения такой ОГ достигает 15 раз в сутки. Далее планируется довести численность ОГ до 12 КА.

Производство большого количества КА типа WorldView Legion затруднено. Поэтому существуют более многочисленные ОГ, состоящие из упрощенных малых КА. В состав орбитальной группировки КА SkySat входит не менее 21 КА. Из них на солнечно-синхронной орбите находится 15 КА. На орбиту с наклонением 53° выведены 6 КА. Высота орбит КА варьируется в диапазоне от 500 до 600 км и от 400 до 450 км.

Дополнительно к WorldView Legion компания BlackSky создает ОГ из 60 малых КА для детального наблюдения с периодичностью не менее 15 раз в сутки и пространственным разрешением лучше 0,5 м. Кроме солнечно-синхронных орбит большинство КА BlackSky планируется вывести на орбиты с наклонением от 42° до 59° с высотой от 400 до 701 км.

Ряд малых КА выводится попутным запуском на отличающиеся друг от друга орбиты. Относительное положение таких КА в орбитальных плоскостях не поддерживается. Например, орбитальная группировка КА Dove компании Planet из не менее чем 144 КА строится на основе технологии CubeSat. Она предназначена

для ежесуточной съемки всей земной поверхности и выявления признаков изменений для последующего наведения по этим данным КА наблюдения с высоким разрешением.

Численность современных ОГ наблюдения увеличивается. Характерной особенностью новых ОГ является различная высота и наклонение орбит. В результате периодичность наблюдения планируемых к разворачиванию ОГ теоретически приближается к непрерывной, что позволяет применять вероятностные методы оценки производительности, периодичности и других показателей.

Известные стохастические модели оценки вероятностей доступности и обеспечения требуемой скорости передачи данных многоспутниковых систем связи [15] не полностью учитывают особенности космических систем наблюдения.

Предлагаемая стохастическая модель для оценки средней периодичности наблюдения многоспутниковой орбитальной группировки состоит из нескольких этапов. На первом этапе производится расчет плотности вероятности наблюдения для заданной широты, наклонения орбиты и количества КА. Далее оценивается эффективное количество КА на полярных орбитах, которое бы реализовало такую же плотность вероятности на заданной широте, как на наклонных орбитах. Эффективное количество КА суммируется для каждого типа наклонения орбит. Итоговая средняя периодичность наблюдения оценивается по известной методике в предположении равномерного распределения узлов орбиты по долготе зависимости от оценки эффективного количества КА на полярной орбите.

Модель оценки плотности вероятности наблюдения по широте и эффективного количества космических аппаратов

Полоса обзора КА формирует на поверхности Земли шаровой сектор с центральным углом раскрыва 2δ . Половина угла раскрыва определяется по теореме синусов:

$$\delta = z - \arcsin\left(\frac{R_z}{R_{ка}} \sin z\right), \quad (1)$$

где z – зенитный угол наблюдения,

$R_{\text{ка}}$ – радиус орбиты КА,

R_3 – радиус Земли.

Особенностью орбитальной группировки на наклонных орбитах является неравномерное распределение подспутниковых точек КА по поверхности Земли. Пространственная плотность КА увеличивается с ростом широты и приближением широты к наклонению орбиты. Соответственно для обеспечения одинаковой плотности на наклонной орбите требуется меньшее количество КА.

Определим эффективное количество КА на полярных орбитах с наклонением 90° и равномерным распределением с пространственной плотностью равной реальному количеству КА на наклонных орбитах.

Средняя пространственная плотность КА на заданном широтном поясе $\varphi \pm \delta$ определяется выражением:

$$\rho_i = P_\delta(i, \varphi) \frac{N_{\text{КА}}}{S_\delta}, \quad (2)$$

где $P_\delta(i, \varphi)$ – вероятность нахождения КА в широтном поясе $\varphi \pm \delta$,

$N_{\text{КА}}$ – количество КА,

$R_{\text{ка}}$ – радиус орбитальной сферы,

$S_\delta = 2\pi R_{\text{ка}}^2 (\sin(\varphi + 2\delta) - \sin \varphi) \approx 4\pi R_{\text{ка}}^2 \delta \cos \varphi$ – площадь шарового сегмента в диапазоне широтного пояса $\varphi \pm \delta$.

Периодичность наблюдения по заданным широтным поясам удобнее оценивать относительно экватора. Поэтому базовую пространственную плотность определим относительно экваториального пояса:

$$\rho_{90} = \frac{P_\delta(90, \varphi) N_e}{S_3}, \quad (3)$$

где $S_3 \approx 4\pi R_{\text{ка}}^2 \delta$ – площадь шарового сегмента в диапазоне широтного пояса $\varphi \pm \delta$.

N_e – эффективное количество КА.

Вероятность нахождения КА в широтном поясе угловой ширины 2δ определяется выражением:

$$P_\delta(i, \varphi) = P(i, \varphi + \delta) - P(i, \varphi - \delta), \quad (4)$$

где $P(i, \varphi)$ – функция распределения вероятности положения КА от широты.

Заметим, что при $\delta \rightarrow 0$:

$$\frac{P(i, \varphi + \delta) - P(i, \varphi - \delta)}{\delta} \rightarrow 2p_{\varphi}(i, \varphi), \quad (5)$$

где p_{φ} – функция распределения плотности вероятности положения КА от широты.

Приравняв выражения для плотности (1) на (2), получим оценку среднего эффективного количества КА:

$$N_e = \frac{\eta_i}{\cos \varphi} N_{KA}, \quad (6)$$

где $\eta = \frac{p_{\varphi}(i, \varphi)}{p_{90}}$ – относительная плотность КА по широте.

Определим функцию плотности вероятности нахождения КА на заданной широте. Географическая широта подспутниковой точки КА вычисляется с использованием выражения:

$$\varphi(u) = a \sin \left(\frac{\sin u}{\sin i} \right), \quad (7)$$

где u – аргумент широты КА,

i – наклонение орбиты.

Далее будем считать, что КА расположены на круговых орбитах и его аргумент широты является случайной величиной, которая имеет равномерное распределение в диапазоне $u = \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right)$. Соответствующая плотность вероятности распределения аргумента широты определяется выражением:

$$p_u = \frac{1}{\pi}. \quad (8)$$

Плотность вероятности нахождения КА на заданной широте вычисляется при помощи выражения:

$$p_{\varphi}(\varphi) = p_u \frac{d}{d\varphi} g^{-1}(\varphi), \quad (9)$$

где $g^{-1}(\varphi) = a \sin \left(\frac{\sin \varphi}{\sin i} \right)$ – обратная функция от (7).

Соответственно плотность распределения КА по широте для орбиты с заданным наклонением:

$$p_{\varphi}(\varphi) = \frac{1}{\pi} \frac{\cos \varphi}{\sin i} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \varphi}{\sin i} \right)^2}} = \frac{1}{\pi} \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \varphi}}. \quad (10)$$

Для орбиты с наклонением 90° плотность вероятности постоянна:

$$p_{90} = \frac{1}{\pi}. \quad (11)$$

Тогда относительная плотность КА определяется выражением:

$$\eta = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \varphi}}. \quad (12)$$

На рисунке 1 приводятся зависимости относительной плотности вероятности положения подспутниковой точки КА от широты для различного наклонения.

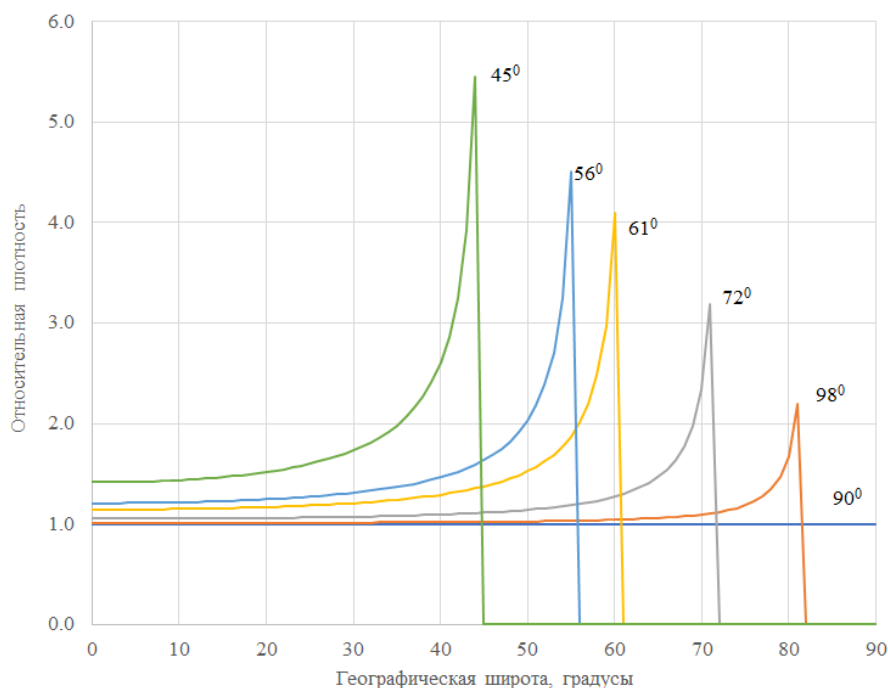


Рисунок 1 – Зависимость относительной плотности вероятности от географической широты и наклонения орбиты

Заметим, что выражение (10) имеет особенность в точке $i=\varphi$, где $p_\varphi \rightarrow \infty$. Для практических вычислений удобнее воспользоваться оценкой вероятности (4), что дает среднюю относительную плотность в широтном поясе 2δ , исключая указанную особенность вычисления p_φ .

Многоспутниковая группировка наблюдения может иметь несколько типов орбит с различным наклонением. Выражение для оценки суммарного эффективного количества КА принимает вид:

$$N_\Sigma(\varphi) = \sum_i N_{KAi} \pi \frac{P(i, \varphi + \delta) - P(i, \varphi - \delta)}{2\delta \cos \varphi}, \quad (13)$$

где N_{KAi} – количество КА в плоскости i ,

$P(i, \varphi)$ – функция распределения вероятности.

Функция распределения вероятности равна интегралу от плотности распределения (6):

$$P(i, \varphi) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{\sin|\varphi|}{\sin i}\right), & \text{если } |\varphi| \leq i; \\ 0.5, & \text{если } |\varphi| > i. \end{cases} \quad (14)$$

Выражение (13) позволяет оценить эффективное количество КА в зависимости от географической широты для орбитальной группировки с различным наклонением плоскостей и количеством КА в них.

В качестве примера рассмотрим орбиту аналогичную применяемой в орбитальной группировке WorldView Legion с высотой 518 км, полосой обзора, ограниченной зенитным углом 60° , что соответствует центральному углу $6,5^\circ$. На рисунке 2 приводятся зависимости эффективного количества КА, в случае если в каждой плоскости с наклонением: $45^\circ, 56^\circ, 61^\circ, 72^\circ, 98^\circ$, находится по одному КА.

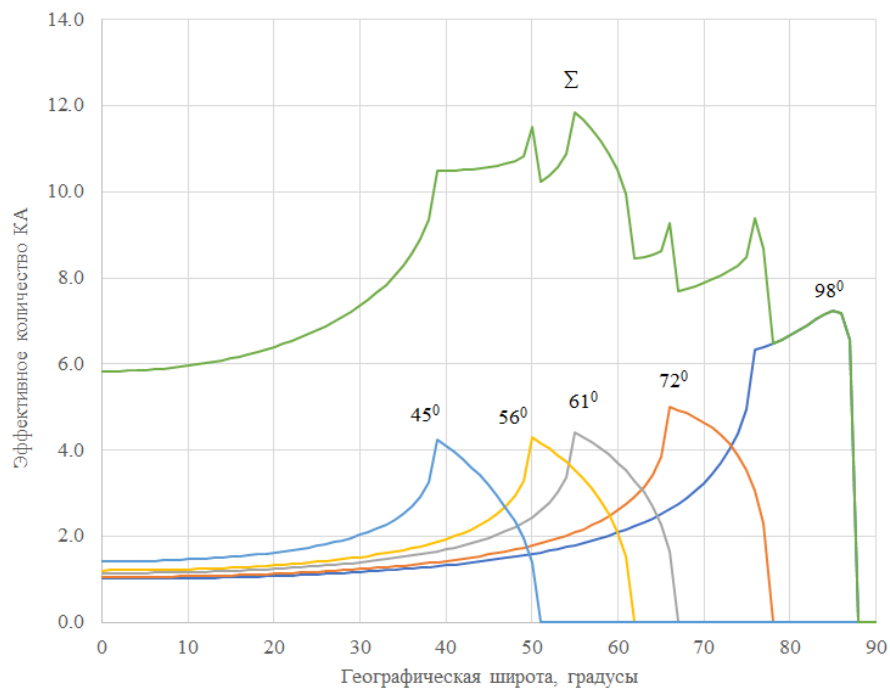


Рисунок 2 – Зависимость эффективного количества КА от географической широты, наклонения орбиты и суммарное количество

Оценка средней периодичности наблюдения

Оценку периодичности наблюдения обычно осуществляют в заданном широтном поясе. Под периодичностью наблюдения далее понимается средний

интервал времени между последовательными наблюдениями объекта на поверхности Земли:

$$\langle T_{\Pi} \rangle = \langle t_{m+1} - t_m \rangle, \quad (15)$$

где t_m – моменты времени наблюдения,

$m = (0; M)$ – дискретное множество номеров моментов наблюдения,

M – максимальное количество реализаций,

$\langle T_{\Pi} \rangle$ – математическое ожидание периодичности наблюдения.

Существует простой способ основанный на оценке периодичности через максимальное расстояние между узлами трассы КА [16], однако он не учитывает ряд факторов и является слишком приближенным:

$$\langle T_{\Pi} \rangle = \frac{\Delta\Omega}{2\pi} T_{\text{сут}}, \quad (16)$$

где $\Delta\Omega$ – максимальное расстояние между восходящими узлами трасс КА,

$T_{\text{сут}} = 24$ ч – длительность календарных суток.

Рассмотрим метод расчета средней периодичности наблюдения, основанный на зависимости плотности вероятности положения и оценке эффективного количества КА в многоспутниковой группировке.

Общее количество КА в орбитальной группировке распределяется по нескольким плоскостям N_P по N_S КА в каждой плоскости: $N_{\text{КА}} = N_P N_S$. Существуют известные способы определения оптимального относительного положения плоскостей КА и относительного положения КА внутри плоскостей при которых долготы восходящих узлов трассы КА распределены равномерно [17, 18].

Плотность вероятности положения равномерно распределенных подспутниковых точек на экваторе по долготе определяется выражением:

$$p_{\lambda} = \frac{1}{\pi}. \quad (17)$$

Вероятность попадания объекта наблюдения в полосу захвата на интервале времени одного витка:

$$P_{\lambda} = 2\delta p_{\lambda}, \quad (18)$$

Соответствующее среднее количество наблюдений в сутки:

$$N_{\lambda} = P_{\lambda} Q, \quad (19)$$

где Q – количество витков КА за одни сутки.

Оценка средней периодичности наблюдения с учетом оценки эффективного количества КА на полярной орбите определяется выражением:

$$\langle T_{\Pi}(\varphi) \rangle = \frac{T_{\text{сут}}}{P_{\lambda} N_{\lambda} N_{\Sigma}(\varphi)} = \frac{\pi}{2\delta Q N_{\Sigma}(\varphi)} T_{\text{сут}}. \quad (20)$$

Пример оценки средней периодичности наблюдения

Для проверки разработанной стохастической модели был рассмотрен пример оценки периодичности орбитальной группировки World View Legion. Планируется, что она будет состоять из 12 КА с высотой 518 км для варианта, где в каждой плоскости с наклонениями: 45°, 56° и 98° находится по 4 КА. По данным TLE элементов орбит количество суточных витков трассы КА World View Legion лежит в диапазоне от 15.15 до 15.17. Восходящие узлы орбит КА по долготе расположены равномерно.

Зависимость эффективного количества КА от географической широты и оценка средней периодичности наблюдения показаны на рисунках 3 и 4.

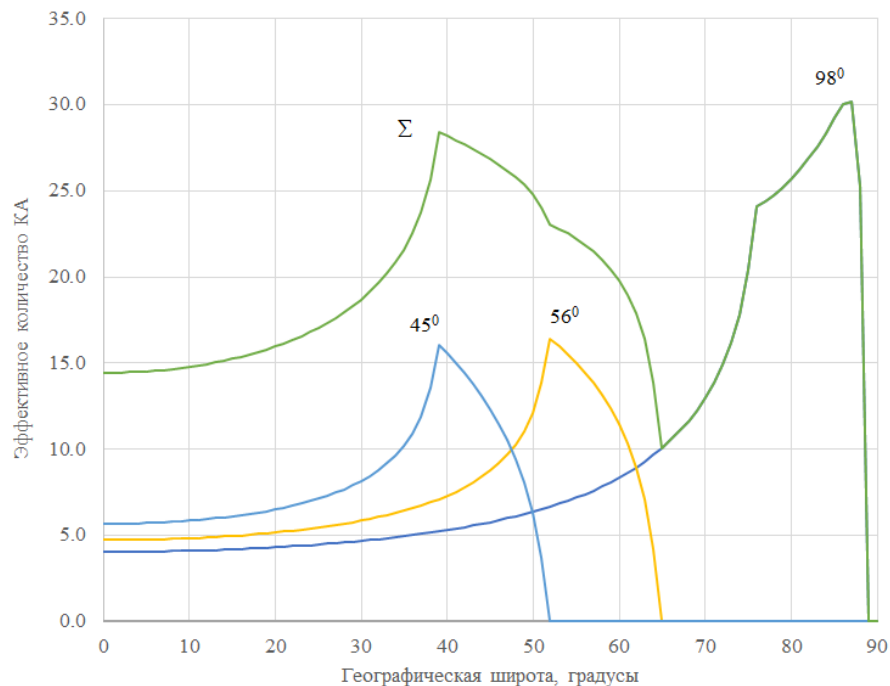


Рисунок 3 – Зависимость эффективного количества КА от географической широты для варианта орбитальной группировки типа World View Legion с наклонениями 45°, 56°, 98° по 4 КА на каждом наклонении

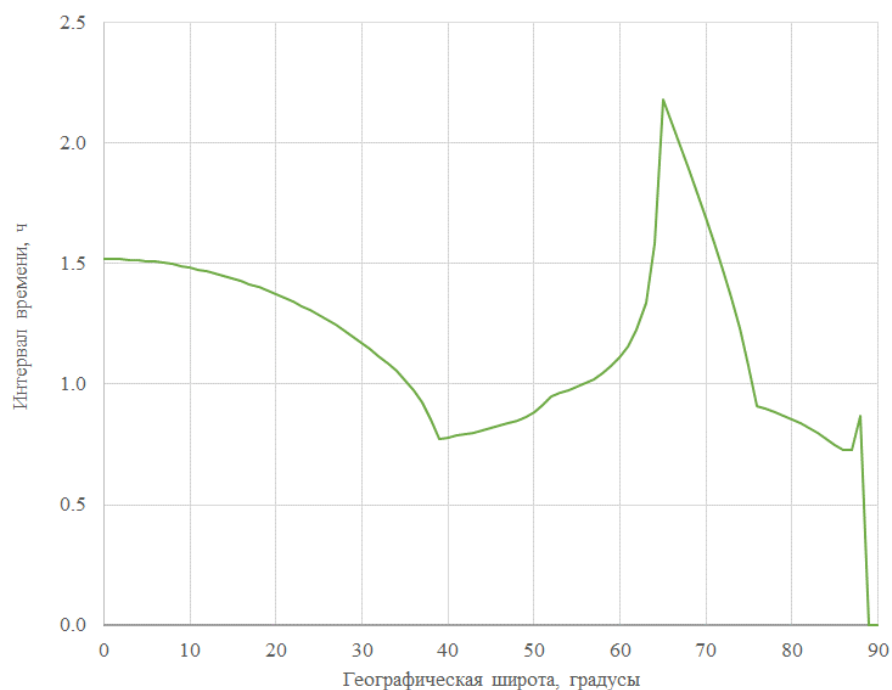


Рисунок 4 – Зависимость средней периодичности наблюдения от географической широты для варианта орбитальной группировки типа World View Legion с наклонениями 45° , 56° , 98° по 4 КА на каждом

На рисунке 5 приводится оценка периодичности наблюдения, полученная путем численного статистического моделирования [20]. Моделирование проводилось на интервале времени 1 год. Различия между кривыми максимальной и средней периодичностью обусловлены различной скоростью прецессии орбитальных плоскостей при разном наклонении. В результате этого равномерность покрытия полосами по долготе может на некоторое время нарушаться.

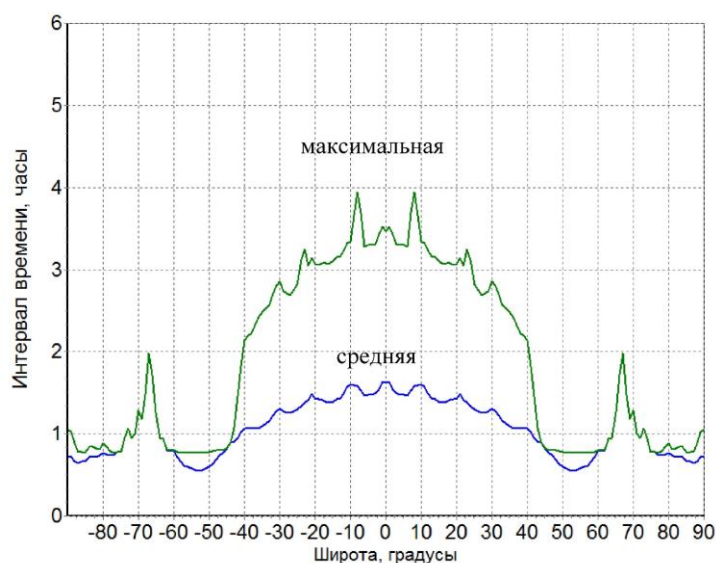


Рисунок 5 – Зависимость численной оценки средней периодичности наблюдения орбитальной группировки типа World View Legion с наклонениями 45° , 56° , 98° по 4 КА на каждом

Сравнение рисунков 4 и 5 показывает хорошее соответствие результатов расчетов средней периодичности наблюдения путем численного моделирования и по предлагаемой методике. Для большего количества КА будет достигаться лучшая равномерность распределения и сходимость результатов.

Оценки показывают, что в широтном поясе от 40° до 60° достигается средняя периодичность наблюдения лучше одного часа при минимальном значении порядка 40 минут. Для широты 65° периодичность составляет 2 часа. На экваторе достигается периодичность наблюдения не хуже 1,5 ч.

По данным компании MAXAR группировка World View Legion должна обеспечивать периодичность наблюдения не менее 15 раз в сутки (1,5 ч), что сходится с оценкой, полученной по разработанной методике.

Анализ зависимостей показывает, что применение орбитального построения World View Legion на наклонных орбитах позволило улучшить периодичность наблюдения в диапазоне от 40° до 60° при ограниченном количестве КА от 6 до 12 штук.

Заключение

В статье рассмотрены особенности орбитального построения современных многоспутниковых группировок наблюдения. Показано, что для улучшения производительности и периодичности наблюдения современные ОГ строятся на орбитах с различным наклоном и высотой. С целью достижения практически непрерывного наблюдения заданного района численность перспективных ОГ достигает десятков и сотен КА. Существующие методы моделирования, основанные на принципах изомаршрутного построения трасс, не учитывают отмеченные особенности многоспутниковых ОГ.

Разработан метод расчета средней периодичности наблюдения основанный на зависимости плотности вероятности положения и оценке эффективного количества КА в многоспутниковой группировке на орбитах с различным наклоном и высотой.

Применение вероятностного подхода позволило реализовать алгоритм с небольшими вычислительными затратами по сравнению с полным численным статистическим моделированием. Показано совпадение оценок средней

периодичности с результатами численного статистического моделирования ОГ типа World View Legion.

Предлагаемый метод объединяет параметры наклона, высоты, полосы обзора и количества КА на каждом типе орбит. Это позволяет проводить наглядный анализ зависимостей эффективного количества КА, плотности вероятности и средней периодичности наблюдения в заданном районе по широте.

Учет в модели параметров высоты орбиты и полосы обзора позволяет оценить ограничения на характеристики целевой аппаратуры и проводить определение наилучших вариантов орбитального построения ОГ на этапах предварительных проектных оценок и эскизного проектирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Walker, J.G., Satellite Constellations, Journal of the British Interplanetary Society, Vol. 37, 1984, pp. 559-571.

2. Можаяев Г.В., Синтез орбитальных структур спутниковых систем, Москва: Машиностроение, 1989, 304 с.

3. Можаяев Г.В., Возможности кинематически правильных спутниковых систем с группами симметрии первого типа в задаче непрерывного однократного обзора Земли, Космические исследования, 2005, т. 43, № 3, с. 215–223.

4. Разумный Ю.Н., Route theory for optimal design of satellite constellations to minimize revisit time in low earth orbits, International Astronautical Federation, 2005.

5. Разумный Ю.Н. Козлов П.Г., Мошнин А.А., Разумный В.Ю. Способ наблюдения поверхности планеты из космоса и космическая спутниковая система для осуществления этого способа//Патент RU2535375C1, опубликовано: 10.12.2014 Бюл. № 34.

6. Саульский В.К. Рациональные орбиты для многополосного обзора Земли из космоса// Вопросы электромеханики. Т. 145. 2015.
7. Свиридов А.С. Принцип выбора высоты орбиты группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на изомаршрутных солнечно-синхронных орбитах// Вестник МАИ, Т.17, №6, 2010.
8. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. М.: Радио и связь, 2004, 200 с.
9. Design of Mega-Constellations for Global Uniform Coverage with Inter-Satellite Links. URL: <https://www.mdpi.com/journal/aerospace>.
10. Optimization of Reconfigurable Satellite Constellations Using Simulated Annealing and Genetic Algorithm. URL: <https://www.mdpi.com/journal/sensors>.
11. Малышев В.В. Системное проектирование и управление космическими комплексами. // Системный анализ и управление космическими комплексами. 4-я Международная конференция, Евпатория, 1999: Сборник трудов. – М.: МАИ, 1999. - с.3.
12. Малышев В.В., Карп К.А., Дарнопых В.В. Алгоритм формирования оптимальных съемочных планов системы космических аппаратов. // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. VII Международный научно-технический семинар, Алушта, 1998: Труды. – М.: МАИ, 1998. - с.85-86.
13. Малышев В.В., Дарнопых В.В. Об общем методическом подходе к планированию целевых операций в низкоорбитальных космических системах связи и наблюдения. // Системный анализ и управление космическими комплексами. 4-я Международная конференция, Евпатория, 1999: Сборник трудов. – М.: МАИ, 1999. - с.23-24.
14. Elevation Angle Characterization for LEO Satellites: First and Second Order Statistics. URL: <https://www.mdpi.com/journal/applsci>.
15. Stochastic Analysis of Satellite Broadband by Mega-Constellations with Inclined LEOs. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.00871v1>.

16. S. Biktimirov, F. Alnaqbi, Remote sensing satellite constellation design based on repeat ground track orbits properties// Analytical Methods of Celestial Mechanics 2024, pp. 18–23, 2024.

17. Xin Luo, Maocai Wang, Guangming Dai, Xiaoyu Chen A Novel Technique to Compute the Revisit Time of Satellites and Its Application in Remote Sensing Satellite Optimization Design// International Journal of Aerospace Engineering Volume 2017, Article ID 6469439, pp.1-9.

18. X. Luo, M. Wang, G. Dai, and Z. Song, Constellation design for earth observation based on the characteristics of the satellite ground track,” Advances in Space Research, vol. 59, pp. 1740–1750, 2017.

19. Занин К.А., Клименко Н.Н. Применение космических аппаратов двойного назначения для решения военных задач. Часть 1. Космические аппараты оптико-электронного наблюдения нового поколения компаний Planet и Blacksky // Вестник НПО Лавочкина, №4/62, 2023, с.20-28.

20. Занин К.А., Клименко Н.Н. Применение космических аппаратов двойного назначения для решения военных задач. Часть 2. Космические аппараты оптико-электронного наблюдения нового поколения компаний MAXAR //Вестник НПО Лавочкина, №4/62, 2023, с.3-16.

References

1. Walker, J.G., Satellite Constellations, Journal of the British Interplanetary Society, Vol. 37, 1984, pp. 559-571.

2. Mozhaev G.V., *Sintez orbital'nykh struktur sputnikovykh sistem*, Moskva: Mashinostroenie, 1989, 304 p.

3. Mozhaev G.V., Vozmozhnosti kinematicheski pravil'nykh sputnikovykh sistem s gruppami simmetrii pervogo tipa v zadache nepreryvnogo odnokratnogo obzora Zemli, *Kosmicheskie issledovaniya*, 2005, vol. 43, no. 3, pp. 215–223.

4. Razumnyi YU.N., Route theory for optimal design of satellite constellations to minimize revisit time in low earth orbits, *International Astronautical Federation*, 2005.

5. Razumnyi YU.N. Kozlov P.G., Moshnin A.A., Razumnyi V.YU. *Sposob nablyudeniya poverkhnosti planety iz kosmosa i kosmicheskaya sputnikovaya sistema dlya*

osushchestvleniya ehtogo sposoba//Patent RU2535375C1, opublikovano: 10.12.2014 Byul. no. 34.

6. Saul'skii V.K. Ratsional'nye orbity dlya mnogopolosnogo obzora Zemli iz kosmosa// *Voprosy ehlektromekhaniki*. 2015, vol. 145.

7. Sviridov A.S. Printsip vybora vysoty orbity gruppirovki kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli na izomarshrutnykh solnechno-sinkhronnykh orbitakh// *Vestnik MAI*, 2010, vol.17, no. 6.

8. Chernov A.A., Chernyavskii G.M. *Orbity sputnikov distantsionnogo zondirovaniya Zemli*. M.: Radio i svyaz', 2004, 200 p.

9. Design of Mega-Constellations for Global Uniform Coverage with Inter-Satellite Links. URL: <https://www.mdpi.com/journal/aerospace>.

10. Optimization of Reconfigurable Satellite Constellations Using Simulated Annealing and Genetic Algorithm. URL: <https://www.mdpi.com/journal/sensors>.

11. Malyshev V.V. *4-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya*, Evpatoriya, 1999: *Sbornik trudov*. – M.: MAI, 1999. - p.3.

12. Malyshev V.V., Karp K.A., Darnopykh V.V. *VII Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii seminar*, Alushta, 1998: *Trudy*. – M.: MAI, 1998. - pp.85-86.

13. Malyshev V.V., Darnopykh V.V. *4-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya*, Evpatoriya, 1999: *Sbornik trudov*. – M.: MAI, 1999. - pp.23-24.

14. Elevation Angle Characterization for LEO Satellites: First and Second Order Statistics. URL: <https://www.mdpi.com/journal/applsci>.

15. Stochastic Analysis of Satellite Broadband by Mega-Constellations with Inclined LEOs. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.00871v1>.

16. S. Biktimirov, F. Alnaqbi, Remote sensing satellite constellation design based on repeat ground track orbits properties// *Analytical Methods of Celestial Mechanics 2024*, pp. 18–23, 2024.

17. Xin Luo, Maocai Wang, Guangming Dai, Xiaoyu Chen A Novel Technique to Compute the Revisit Time of Satellites and Its Application in Remote Sensing Satellite Optimization Design// *International Journal of Aerospace Engineering Volume 2017*, Article ID 6469439, pp. 1-9.

18. X. Luo, M. Wang, G. Dai, and Z. Song, Constellation design for earth observation based on the characteristics of the satellite ground track,” *Advances in Space Research*, 2017, vol. 59, pp. 1740–1750.

19. Zanin K.A., Klimenko N.N. *Primenenie kosmicheskikh apparatov dvoynogo naznacheniya dlya resheniya voennykh zadach. Chast' 1. Kosmicheskie apparaty optiko-ehlektronnogo nablyudeniya novogo pokoleniya kompanii Planet i Blacksky // Vestnik NPO Lavochkina*, 2023, no. 4/62, pp. 20-28.

20. Zanin K.A., Klimenko N.N. *Primenenie kosmicheskikh apparatov dvoynogo naznacheniya dlya resheniya voennykh zadach. Chast' 2. Kosmicheskie apparaty optiko-ehlektronnogo nablyudeniya novogo pokoleniya kompanii MAXAR // Vestnik NPO Lavochkina*, 2023, no. 4/62, pp. 3-16.

Информация об авторах

Кирилл Анатольевич Занин, доктор технических наук, Акционерное общество "Научно-Производственное Объединение Им. С.А. Лавочкина", Московская обл., г. Химки, Россия; e-mail: ZaninKA@laspace.ru

Василий Иванович Дмитриев, Акционерное общество "Научно-Производственное Объединение Им. С.А. Лавочкина", Московская обл., г. Химки, Россия; e-mail: DmitrievVI@laspace.ru

Information about the authors

Kirill A. Zanin, Doctor of Technical Sciences, Joint Stock Company “NPO Lavochkin”, Khimki, Moscow Region, Russia; e-mail: ZaninKA@laspace.ru

Vasily I. Dmitriev, Joint Stock Company “NPO Lavochkin”, Khimki, Moscow Region, Russia; e-mail: DmitrievVI@laspace.ru

Получено 11 февраля 2026 ● Принято к публикации 27 мая 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026
Received 11 February 2026 ● Accepted 27 May 2026 ● Published 25 June 2026
