

УДК 629.783:551.5

АНАЛИЗ И ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВ ДЛЯ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

И. Ю. Ильина

Анализируются варианты орбитальной структуры перспективной космической системы раннего обнаружения лесных пожаров. Основываясь на ранее опубликованных результатах, рассматриваются структуры, называемые «эквилибрированными». Они фиксируются, помимо общего числа спутников в космической системе и их количества в каждой плоскости орбиты, еще двумя ключевыми параметрами: долготным сдвигом (сдвигом восходящих узлов орбит) и фазовым сдвигом (сдвигом аргументов широты) для спутников в соседних плоскостях орбит. Исследуются орбитальные структуры для космической системы из 6-ти, 8-ми, 10-ти и 12-ти космических аппаратов. Для каждой космической системы проанализированы, выбраны и рекомендованы для практического применения оптимальные долготные сдвиги, обеспечивающие реализацию лучших значений следующей тройки показателей эффективности: средней вероятности обнаружения лесных пожаров, среднего времени обнаружения лесных пожаров и средней площади обнаруживаемого лесного пожара. Результаты представлены на графиках, удобных для анализа и выбора наилучших вариантов. Построены диаграммы частот перерывов обзора, возникающих на всей обширной территории лесов нашей страны. Исследована зависимость показателей эффективности от выбора фазовых сдвигов. Установлено, что все три показателя эффективности мало изменяются при варьировании фазовых сдвигов в широких пределах. С целью проверки и возможной коррекции результатов, полученных ранее с пониженным уровнем точности (ввиду необходимости экономии времени на большие программы расчетов), проведены вычисления с повышенным уровнем точности, позволившие построить уточненные графики зависимостей показателей эффективности от выбора высоты солнечно-синхронных орбит. Сравнение новых результатов с ранее опубликованными подтвердило практическую корректность последних и целесообразность в будущем при выполнении новых программ вычислений использовать относительно невысокий уровень точности, обеспечивающий многократное сокращение времени расчетов.

Ключевые слова: эквилибрированная структура, долготный сдвиг, фазовый сдвиг, диаграмма частот перерывов обзора, показатель эффективности, средняя вероятность обнаружения лесных пожаров, среднее время обнаружения лесных пожаров, средняя площадь обнаруженного лесного пожара, уровень точности.

Введение

Настоящая статья служит продолжением публикации [1] и посвящена исследованию и определению количественного состава и основных орбитальных характеристик перспективной космической системы (КС), предназначенной для раннего обнаружения лесных пожаров (РОЛП).

Раннее выявление возникающих лесных пожаров (ЛП) на всей лесной территории России создаст условия для их ликвидации в короткие сроки и с минимальными затратами, пока относительно малые размеры возгоревших и далее быстро разрастающихся ЛП еще позволяют оперативно ликвидировать их с помощью небольших сил и средств пожаротушения. Следовательно, разработка, изготовление, выведение необходимого состава космических аппаратов (КА) в космос и дальнейшее непрерывное поддержание функционирования КС РОЛП является актуальным, а потому и перспективным направлением применения космической техники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в интересах российской экономики.

В новой статье будут использованы те же термины, формулы, модели и алгоритмы, которые с достаточной полнотой изложены в [1].

В [1] дано исчерпывающее изложение метода расчета состава и орбитальных параметров КС РОЛП

и выполнен очень большой объем вычислений различных вариантов ее построения. Однако оказалось невозможным довести до конца анализ всех результатов этих обширных вычислений. В целом в [1] на базе обстоятельных расчетов, проиллюстрированных на многочисленных графиках, получены следующие основные выводы и рекомендации:

– показано, что наиболее целесообразно использование КС, включающих несколько плоскостей солнечно-синхронных орбит (ССО), в каждой из которых находится по два спутника типа КА «Канопус-В» [2], снабженных широкозахватными инфракрасными (ИК) радиометрами типа МСУ-ИК-СРМ [3], способными детектировать малоразмерные ЛП;

– обосновано применение достаточно большой группировки спутников, включающей не менее 6-ти КА, а лучше 8, 10 или в отдаленной перспективе 12 КА;

– рекомендовано поэтапное наращивание КС РОЛП, начиная с 6-ти спутников;

– выбраны следующие рациональные значения высоты ССО в зависимости от общего количества КА в системе: 850 км при 6-ти КА, 750 км при 8-ми КА, 650 км при 10-ти КА и 600 км при 12-ти КА.

Итак, в предыдущей работе [1] исследован и выбран количественный и качественный состав

КС РОЛП и определены высоты ССО, на которые наиболее целесообразно запускать ее спутники. Но в этой статье оказалось невозможным представить и проанализировать обширные результаты анализа и выбора рациональных вариантов орбитальной структуры КС РОЛП. Уточним, что в каждом варианте структуры фиксируются: во-первых, относительное расположение всех плоскостей орбит КА; во-вторых, положение спутников в каждой плоскости орбиты относительно их позиций в предыдущей (соседней) плоскости орбиты.

Таким образом, в [1] осталась не реализованной задача исследования и определения орбитальной структуры перспективной КС РОЛП. Данной цели, то есть достаточно подробному анализу и обоснованному выбору рациональных вариантов структуры КС РОЛП, посвящена настоящая статья.

1. Краткая характеристика метода расчета космической системы раннего обнаружения лесных пожаров

В [1] подробно изложен метод расчета количества спутников, орбитальной структуры и высоты круговых ССО для КС, решающей актуальную задачу РОЛП.

Метод базируется на специально разработанных моделях и схемах, предназначенных для следующих целей:

- определения роста площади ЛП во времени;
- расчета вероятности обнаружения ЛП в зависимости от высоты орбиты и с учетом возможности его попадания в разные места на полосе захвата бортового широкозахватного ИК-радиометра;
- вычисления показателей эффективности для различных вариантов КС РОЛП.

В качестве показателей эффективности были выбраны: средняя вероятность обнаружения ЛП, среднее время обнаружения ЛП и средняя площадь обнаруживаемого ЛП.

Серьезную трудность при вычислении показателей эффективности представляла необходимость учитывать наличие очень большого состава разных по длительности перерывов обзора, возникающих на различных участках огромного пространства лесов нашей страны. Потребовалось обеспечить вычисление всех наборов таких перерывов. Это было достигнуто на основе применения компьютерной программы на базе аппарата «Векторная модель обзора Земли» [4, 5].

Однако полный объем разнообразных последовательностей перерывов обзора оказался настолько огромен, что на его основе было крайне

трудоемко и долго реализовывать процедуру расчетов многочисленных вариантов построения КС РОЛП. Выходом из положения оказался принцип сокращения всего объема последовательностей до репрезентативной выборки, обеспечивающей вполне достаточную точность процедуры расчетов. Этот принцип был реализован с помощью метода Монте-Карло [6]. При этом для достижения заданной точности конечных результатов использовалось специально разработанное условие, позволяющее завершать вычисления в момент, когда желаемая точность уже гарантируется [1, 7].

В [1] выполнен большой объем расчетов различных вариантов КС РОЛП, отличавшихся общим количеством спутников N_{sat} (от 1 до 20), числом КА в каждой из плоскостей орбит M_{ip} (от 1 до 6) и высотой ССО h (от 250 до 1000 км).

Рассматривались только орбитальные структуры, относящиеся к классу так называемых эквидистантных структур (эквидистантных систем). Ранее в работах, на которые сделаны ссылки в публикации [1], обосновано, что именно этот класс (или тип) структур наиболее подходит для регулярного наблюдения больших территорий на земной поверхности из космоса. Такой же характер функционирования требуется обеспечить при решении задачи РОЛП на огромном пространстве лесных массивов нашей страны.

Подробная характеристика и формулы для фиксации конкретных вариантов эквидистантных структур приведены в [1]. Нет необходимости их дублировать здесь. Достаточно констатировать, что любая эквидистантная структура задается двумя параметрами:

- разностью долгот восходящих узлов орбит $d\lambda$;
- разностью фаз (точнее аргументов широты) КА в соседних плоскостях орбит $d\tau$.

Для краткости будем именовать $d\lambda$ долготным сдвигом, а $d\tau$ – фазовым сдвигом. При расчетах эти параметры варьировались в следующих пределах:

$$\Delta\lambda = 0 \div 90^\circ; \quad (1)$$

$$\Delta\tau = 0 \div 360^\circ. \quad (2)$$

Однако ввиду того, что в [1] одним из основных выводов стало то, что на практике наиболее целесообразно применение эквидистантных систем, в которых в каждой плоскости орбиты содержится по $M_{\text{ip}} = 2$ спутника, находящихся в противофазе, то есть на расстоянии 180° друг от друга, можно сократить интервал (2) ровно вдвое:

$$\Delta\tau = 0 \div 180^\circ. \quad (3)$$

Таким образом, в настоящей публикации будут исследоваться все варианты эквидистантных структур, фиксируемых различными сочетаниями долготных и фазовых сдвигов из диапазонов (1) и (3).

В качестве показателей (критериев) эффективности, как уже отмечено выше, будут использоваться, как и в статье [1]:

– средняя вероятность (V_{mid}) обнаружения ЛП в интервале 1 ÷ 5 часов с момента достижения им минимальной начальной площади $S_{beg} = 6 \text{ м}^2$;

– среднее время (T_{mid}) обнаружения ЛП (после достижения начальной площади S_{beg});

– средняя площадь (S_{mid}) обнаруживаемого ЛП.

Итак, в соответствии с выводами статьи [1], далее будут рассматриваться КС РОЛП из $N_{sat} = 6, 8, 10$ и 12 спутников. В каждой плоскости орбиты будут находиться по два спутника, то есть $M_{ip} = 2$. Рекомендованные в [1] высоты орбит h_{opt} , в зависимости от общего числа КА, в системе фиксируются следующим образом:

– при $N_{sat} = 6$ $h_{opt} = 850 \text{ км}$; (4)

– при $N_{sat} = 8$ $h_{opt} = 750 \text{ км}$; (5)

– при $N_{sat} = 10$ $h_{opt} = 650 \text{ км}$; (6)

– при $N_{sat} = 12$ $h_{opt} = 600 \text{ км}$. (7)

Перечисленные высоты орбит будут использоваться в расчетах настоящей статьи. Уточним, что выбор этих h_{opt} был сделан, ориентируясь на достижение лучших значений одновременно для всей тройки рассматриваемых показателей эффективности: V_{mid} , T_{mid} , S_{mid} . Следовательно, он имеет компромиссный характер, поскольку для каждого из этих показателей в отдельности оптимальные высоты орбит различаются, как об этом можно наглядно судить по графикам на рис. 4 – 7 в [1].

В настоящей статье будут анализироваться КС РОЛП, состоящие только из 6-ти, 8-ми, 10-ти и 12-ти спутников, а не от 1-го до 20-ти, как в [1]. Кроме того, будет рассматриваться резко сокращенный состав орбит с высотами, заданными в виде (4) – (7). Благодаря многократному уменьшению объема вычислений появляется возможность повышения их точности, то есть минимизации ошибок в конечных значениях вычисляемых показателей эффективности V_{mid} , T_{mid} , S_{mid} .

Неизбежные ошибки в расчетах возникают из-за необходимости завершения программы расчетов в момент, когда, используя метод Монте-Карло, выделяется репрезентативная выборка последовательностей перерывов обзора. В [1] вычисления прекращались при реализации следующих уровней

параметров, определяющих точность итоговых величин показателей эффективности V_{mid} , T_{mid} , S_{mid} :

– предельная ошибка $\delta_{max} = 0,01$;

– минимальное число блоков выполненных операций $M_{min} = 50$.

При таких уровнях параметров δ_{max} и M_{min} гарантировалась точность расчета всех показателей эффективности до третьей значащей цифры. В настоящей работе будут реализовываться (в зависимости от конкретной задачи вычислений) два более высоких уровня точности:

– $\delta_{max} = 0,001$ и $M_{min} = 500$; (8)

– $\delta_{max} = 0,0001$ и $M_{min} = 5000$. (9)

Согласно исследованию, выполненному в [1] при использовании результатов [6], точность расчетов по методу, изложенному в публикации [1], повышается пропорционально корню квадратному из общего количества реализованных блоков операций, которое зависит от δ_{max} и всегда не меньше числа M_{min} . Значит, для уровня точности (8) ошибки сокращаются втрое, а для уровня (9) – в 10 раз. Однако подобное снижение ошибок расчетов достигается за счет того, что на всю процедуру вычислений затрачивается гораздо большее время, которое возрастает приблизительно в 10 раз для уровня точности (8) и в 100 раз для уровня точности (9).

В результате для наиболее высокого уровня (9) гарантируется определение значений показателей эффективности до четвертой значащей цифры.

2. Анализ и выбор долготных сдвигов $d\lambda$

В данном разделе будет проанализировано, как выбор долготного сдвига влияет на оптимизацию всех трех показателей эффективности: средней вероятности (V_{mid}) обнаружения ЛП, среднего времени (T_{mid}) обнаружения ЛП и средней площади (S_{mid}) обнаруженного ЛП. Точность расчетов будет найдена на уровне (8), то есть втрое выше, чем в [1].

На рис. 1 – 3 представлены графики зависимостей рассматриваемых показателей эффективности от значений долготного сдвига ($d\lambda$), изменяющегося в пределах диапазона (1). При этом каждый раз, то есть для очередной величины долготного сдвига, используется наилучшее (оптимальное по конкретному показателю эффективности) значение фазового сдвига ($d\tau$), варьируемого в интервале (3). Значения фазового сдвига на рис. 1 – 3 в явном виде отобразить невозможно, их анализу (при фиксируемом долготном сдвиге) будет посвящен 4-й раздел настоящей статьи.

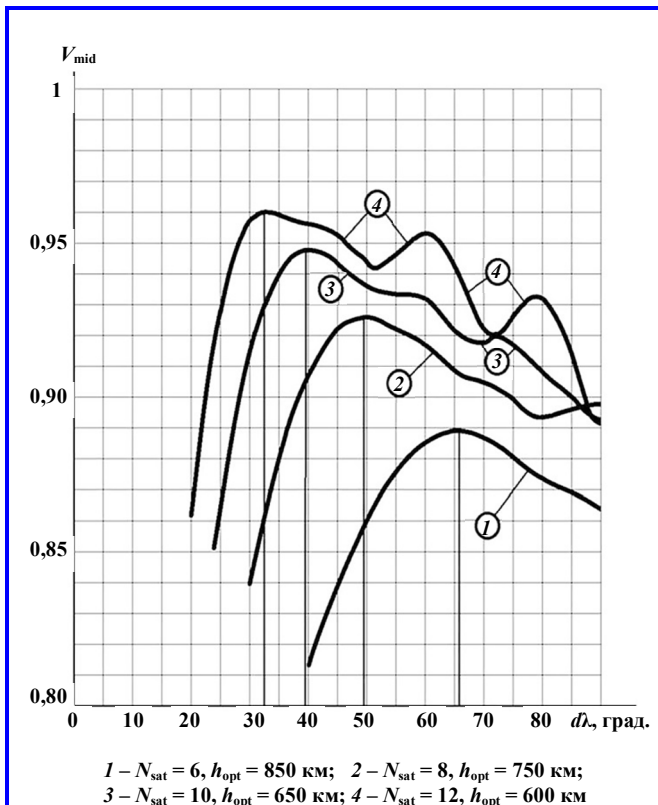


Рис. 1. Графики средней вероятности (V_{mid}) обнаружения лесного пожара в зависимости от долготного сдвига ($d\lambda$) при фиксированном количестве спутников (N_{sat}) и оптимальной для него высоте орбиты (h_{opt})

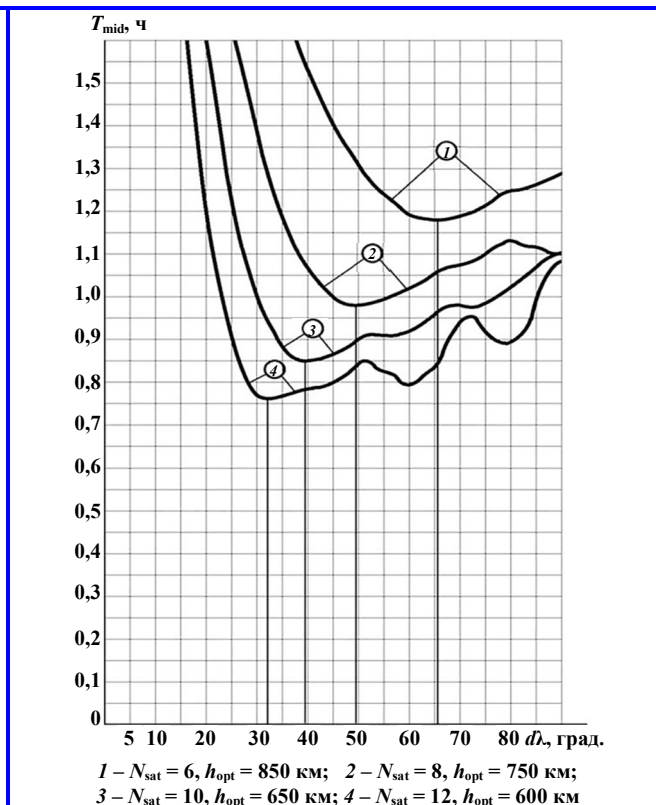


Рис. 2. Графики среднего времени (T_{mid}) обнаружения лесного пожара в зависимости от долготного сдвига ($d\lambda$) при фиксированном количестве спутников (N_{sat}) и оптимальной для него высоте орбиты (h_{opt})

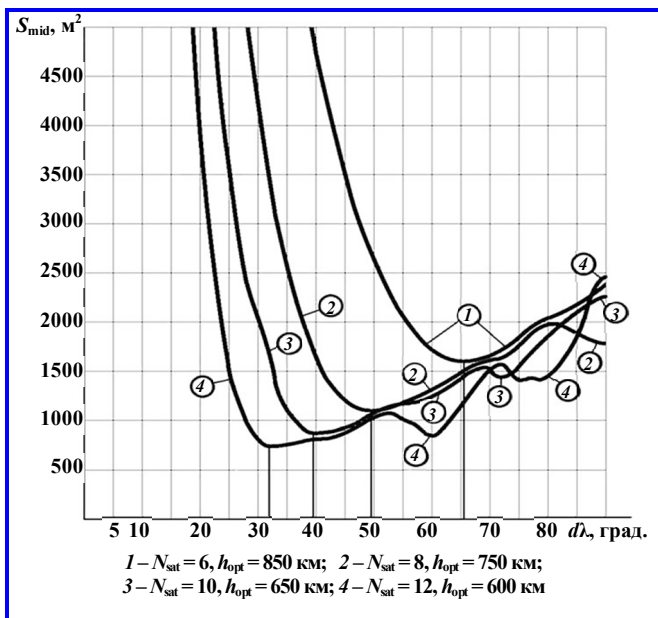


Рис. 3. Графики средней площади (S_{mid}) обнаруживаемого лесного пожара в зависимости от долготного сдвига ($d\lambda$) при фиксированном количестве спутников (N_{sat}) и оптимальной для него высоте орбиты (h_{opt})

На всех рис. 1 – 3 отчетливо выделяются лучшие, то есть оптимальные по достигаемым величинам всех трех показателей эффективности, долготные сдвиги $d\lambda_{opt}$:

$$- d\lambda_{opt} = 65^\circ \div 66^\circ \text{ при } N_{sat} = 6; \quad (10)$$

$$- d\lambda_{opt} = 49^\circ \div 50^\circ \text{ при } N_{sat} = 8; \quad (11)$$

$$- d\lambda_{opt} = 39^\circ \div 40^\circ \text{ при } N_{sat} = 10; \quad (12)$$

$$- d\lambda_{opt} = \sim 32^\circ \text{ при } N_{sat} = 12. \quad (13)$$

Уточним, что средняя вероятность (V_{mid}) обнаружения ЛП при $d\lambda_{opt}$ достигает максимума, а два остальных показателя, то есть среднее время (T_{mid}) и средняя площадь (S_{mid}) обнаруженного пожара, в этом случае, наоборот, минимизируются.

Обращает на себя внимание, что оптимальные значения $d\lambda_{opt}$ практически совпадают для всех трех рассматриваемых показателей эффективности. Различия можно выявить лишь при укрупнении масштаба. Одной из возможных причин этого служит, по-видимому, то, что при построении графиков на всех рис. 1 – 3 для каждого количества спутников в КС РОЛП выбираются общие (компромиссные) значения высот орбит h_{opt} для всех показателей эффективности $V_{mid}, T_{mid}, S_{mid}$ в соответствии с равенствами (4) – (7).

На всех графиках на рис. 1 – 3 можно наблюдать, как при возрастании долготного сдвига от самых маленьких значений до оптимальной величины $d\lambda_{opt}$ значения каждого показателя эффективности быстро улучшаются, то есть активно растут для средней вероятности (V_{mid}) и энергично уменьшаются для среднего времени (T_{mid}) и средней площади (S_{mid}) обнаружения ЛП.

Достигнув оптимальных величин показателей эффективности при $d\lambda_{opt}$, все показатели эффективности при последующем увеличении долготного сдвига начинают ухудшаться. Однако процесс ухудшения существенно различается для разных количеств спутников в системе N_{sat} при разных показателях эффективности.

Наиболее просто выглядят графики для $N_{sat} = 6$. Они представляют собой просто выпуклую кривую линию для средней вероятности (V_{mid}) и вогнутые кривые для среднего времени (T_{mid}) и средней площади (S_{mid}) обнаруженного ЛП.

С ростом N_{sat} вид графиков на всех рис. 1 – 3 усложняется, причем тем сильнее, чем больше число КА.

Для $N_{sat} = 8$ на графике для показателя V_{mid} появляется локальный минимум около $d\lambda = 80^\circ$, а на графиках для T_{mid} и S_{mid} приблизительно там же образуются локальные максимумы.

При $N_{sat} = 10$ на графике для показателя V_{mid} имеется дополнительный максимум немного правее $d\lambda \approx 70^\circ$ и минимум слева от него. Величина V_{mid} энергично снижается, то есть ухудшается, при возрастании долготного сдвига до 90° . На графике для среднего времени (T_{mid}) появляются две пары особенностей, в каждой из которых есть пологий локальный максимум и аналогичный минимум справа. При этом график T_{mid} достаточно решительно растет, то есть становится хуже и хуже, при увеличении долготного сдвига вплоть до 90° . График показателя S_{mid} приобретает при приближении $d\lambda$ к 70° локальный максимум и минимум справа от последнего, а далее с повышением долготного сдвига до 90° быстро увеличивается.

Наиболее причудливый вид приобретают графики всех трех показателей эффективности для $N_{sat} = 12$. На каждом из них отчетливо просматриваются по два дополнительных локальных максимума и минимума. Однако наиболее знаменательным обстоятельством служит то, что во всех случаях при приближении к $d\lambda = 90^\circ$ значения показателей эффективности для $N_{sat} = 12$ уступают величинам тех же показателей при меньшем числе КА. Наиболее отчетливо это проявляется для средней площади (S_{mid}), которая становится хуже, чем при $N_{sat} = 6, 8$ и 10 .

Этот факт требует исследования, результат которого будет приведен в следующем разделе настоящей статьи.

В данный момент можно повторить ранее сделанный вывод о том, что оптимальные значения всех трех показателей эффективности реализуются при оптимальных долготных сдвигах, приведенных в равенствах (10) – (13). Полная картина оптимальных значений показателей эффективности и сочетаний долготных и фазовых сдвигов, при которых они реализуются, дана в табл. 1.

Таблица 1

Лучшие значения показателей эффективности V_{mid} , T_{mid} и S_{mid} , достигаемые при номинальных долготных сдвигах $d\lambda_{nom}$ и оптимальных сочетаниях долготных и фазовых сдвигов $d\lambda_{opt}$ и $d\tau_{opt}$

N_{sat}	h_{opt} , км	$d\lambda_{nom}$, град.	$d\lambda_{opt}$, град.	$d\tau_{opt}$, град.	V_{mid}	T_{mid} , ч	S_{mid} , м ²
6	850	60	–	65	0,885	1,19	1730
		–	65	77	0,889	1,18	1610
		–	66	72	0,889	1,18	1605
8	750	45	–	65	0,921	1,00	1215
		–	49	70	0,926	0,98	1100
		–	50	60	0,926	0,98	1095
10	650	36	–	46	0,943	0,87	975
		–	39	92	0,947	0,85	875
		–	40	86	0,948	0,85	875
12	600	30	–	66	0,957	0,78	800
		–	32	35	0,961	0,76	730

В табл. 1 показано также, какие лучшие значения рассматриваемые показатели эффективности могут получить при использовании номинального долготного сдвига $d\lambda_{nom}$, который традиционно применяется в орбитальном построении многочисленных спутниковых систем наблюдения Земли в нашей стране и за рубежом. Видно, что при $d\lambda_{nom}$ значения рассматриваемых показателей оказались хуже их оптимальных величин при $d\lambda_{opt}$, хотя и незначительно.

Номинальный долготный сдвиг при $M_{ip} = 2$ вычисляется по следующей формуле:

$$d\lambda_{nom} = 360^\circ / N_{sat}. \quad (14)$$

Оптимальные долготные сдвиги, представленные в табл. 1 и обеспечивающие наилучшие сочетания значений показателей эффективности для КС РОЛП, приблизительно соответствуют следующему равенству:

$$d\lambda_{opt} \approx 1,1 \times 360^\circ / N_{sat}. \quad (15)$$

3. Сравнение диаграмм частот перерывов обзора для систем из 8-ми и 12-ти космических аппаратов

В данном разделе будет дано объяснение несколько парадоксальному факту, состоящему в том, что при долготном сдвиге в 90° значения показателей эффективности на графиках на рис. 1 – 3 оказались для 12-ти спутников не лучше, чем для 6 ÷ 10-ти КА. Наиболее отчетливо это видно на рис. 3, где величина средней площади (S_{mid}) обнаруженного ЛП при $N_{sat} = 12$ стала больше, то есть хуже, чем при каждом N_{sat} , равном 6-ти, 8-ми и 10-ти КА.

Попытаемся проанализировать, почему это происходит. Можно предположить, что обсуждаемый факт является следствием того, что при $N_{sat} = 12$, $h = 600$ км и $d\lambda = 90^\circ$ орбитальная структура оказалась неудачной с точки зрения наличия большого числа длинных перерывов обзора. При возникновении таких перерывов стремительно возрастает площадь ЛП. В предыдущей публикации [1] содержится модель роста площади ЛП во времени, задаваемая следующей формулой:

$$S = S_{beg} + 1,32\sqrt{S_{beg}} V_{fr} T + 0,4356V_{fr}^2 T^2, \quad (16)$$

где S – площадь ЛП; S_{beg} – начальная площадь ЛП; V_{fr} – скорость перемещения фронта ЛП; T – время, истекшее от момента достижения начальной площади ЛП.

Из выражения (16) видно, что площадь ЛП, действительно, очень быстро растет в геометрической прогрессии с течением времени. Поэтому, если окажется, что при $N_{sat} = 12$, $h = 600$ км и $d\lambda = 90^\circ$ частота возникновения длинных перерывов обзора больше, чем для остальных систем из меньшего числа спутников, то обнаруженный факт перестанет быть парадоксальным.

При $d\lambda = 90^\circ$ самое лучшее, то есть наименьшее значение площади S_{mid} среди всех рассматриваемых космических систем из 6-ти, 8-ми, 10-ти и 12-ти КА, фиксируется для $N_{sat} = 8$. Поэтому целесообразно сравнить два следующих варианта, для которых на рис. 3 при долготных сдвигах 90° зафиксированы самое лучшее и наиболее худшее значение средней площади (S_{mid}) обнаруживаемого ЛП:

$$- N_{sat} = 8, h = 750 \text{ км}, d\lambda = 90^\circ, d\tau = 85^\circ; \quad (17)$$

$$- N_{sat} = 12, h = 600 \text{ км}, d\lambda = 90^\circ, d\tau = 160^\circ. \quad (18)$$

В (17) и (18) сдвиги фаз $d\tau$ выбраны наилучшим образом для каждого варианта.

Воспользуемся компьютерной программой на базе аппарата «Векторная модель обзора Земли». Она позволяет найти все перерывы обзора на заданной для наблюдения области Земли, причем вместе с их частотами. Результат расчета дан на рис. 4.

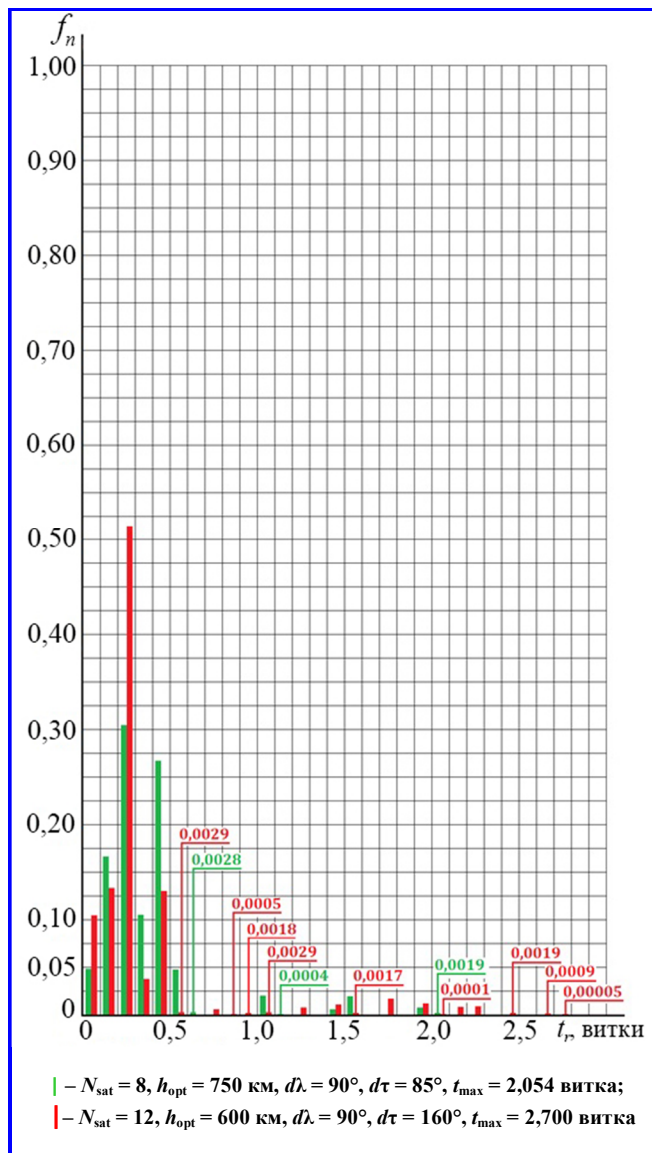


Рис. 4. Диаграммы частот перерывов обзора, просуммированных по интервалам в 0,1 витка орбиты, t_r – правая граница интервала; в обоих случаях долготный сдвиг $d\lambda = 0 \div 90^\circ$

На рис. 4 изображены диаграммы перерывов обзора с частотами их повторения, полученные для вариантов (17) и (18) при регулярном наблюдении территории лесов нашей страны. Поскольку общее количество всех перерывов обзора очень велико: для варианта (17) оно составляет 448, а для (18) – 420, на обеих диаграммах частоты перерывов просуммированы (в интересах обозримого представления) по интервалам с длительностью в 0,1 витка орбиты.

По диаграммам на рис. 4 можно установить, что в случае (17) максимальный перерыв обзора равен 2,05 витка, а для (18) наибольший перерыв обзора гораздо больше и достигает 2,70 витка. Суммарная частота всех перерывов обзора, превышающих 2,0 витка,

для варианта (17) равна 0,0019, а для (18) она больше и, как несложно подсчитать по диаграмме на рис. 4, немного превосходит 0,0020. Отсюда вытекает, что показатель эффективности S_{mid} должен быть больше, то есть хуже, в варианте (18), а не в варианте (17). Это и объясняет отсутствие парадокса при сравнении значений средней площади (S_{mid}) для КС из 8-ми и 12-ти спутников при долготном сдвиге 90° .

Полезно добавить, что средний перерыв обзора, не зависящий от орбитальной структуры, оказался для варианта (17) больше, чем для варианта (18): 0,38 витка против 0,36 витка. Этот результат носит вполне ожидаемый характер, но не помогает варианту (18) стать лучше варианта (17) по величине средней площади обнаруживаемого ЛП, поскольку она в максимальной степени зависит именно от наиболее длинных перерывов обзора.

Далее сравним диаграммы частот перерывов обзора для той же пары вариантов, то есть для $N_{sat} = 8$ и $N_{sat} = 12$, но при оптимальных (для каждого из этих вариантов) значениях сдвигов по долготе и фазе:

$$- N_{sat} = 8, h = 750 \text{ км}, d\lambda_{opt} = 50^\circ, d\tau_{opt} = 60^\circ; \quad (19)$$

$$- N_{sat} = 12, h = 600 \text{ км}, d\lambda_{opt} = 32^\circ, d\tau_{opt} = 35^\circ. \quad (20)$$

Эти диаграммы приведены на рис. 5.

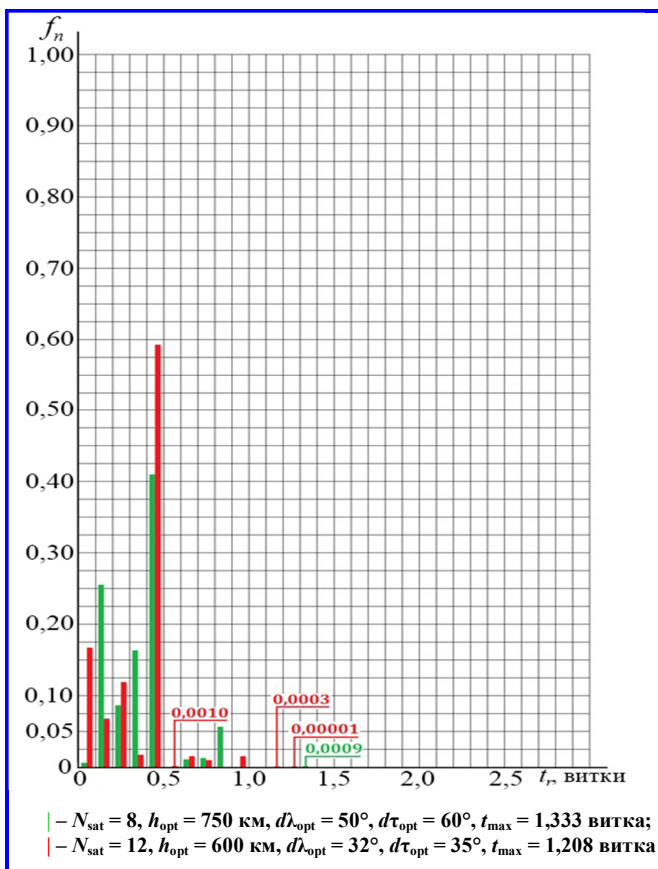


Рис. 5. Диаграммы частот перерывов обзора, просуммированных по интервалам в 0,1 витка орбиты, t_r – правая граница интервала; сдвиги по долготе и фазе оптимальны

В отличие от предыдущей пары случаев (17) и (18), для новой пары (19) и (20) лучшие, то есть меньшие значения средней площади (S_{mid}) обнаруживаемого ЛП, фиксируются, как можно наблюдать по соответствующим графикам на рис. 3, для наибольшего числа КА, равного 12-ти, то есть для варианта (20).

По диаграммам на рис. 5 видно, что максимальный перерыв обзора в случае (19) находится в интервале 1,3 – 1,4 витка. Точнее он равен 1,33 витка. Суммарная частота перерывов в диапазоне 1,3 – 1,4 витка равна 0,0009. Второй интервал, в котором содержатся наиболее длинные перерывы по варианту (19) – это 0,8 – 0,9 витка. Суммарная частота перерывов этого интервала довольно велика и превышает 0,05, а точнее равна 0,057.

В варианте (20) имеются два интервала 1,1 – 1,2 и 1,2 – 1,3 витка, в которых лежат наиболее длинные перерывы обзора с общей частотой 0,00031, что практически втрое меньше, чем частота максимального перерыва варианта (19), который к тому же и длиннее. Следующий по длительности интервал перерывов обзора для варианта (20) – это 0,9 – 1,0, где частота равна 0,015. Данный интервал расположен непосредственно справа от интервала 0,8 – 0,9 витка, где располагается 2-й по величине перерыв обзора варианта (19), причем, как отмечено выше, частота перерывов обзора этого интервала равна 0,057, что более чем втрое превышает частоту перерывов варианта (20) в соседнем интервале 0,9 – 1,0 витка.

Сравнивая приведенные данные по частотам наиболее длинных перерывов обзора для обоих вариантов (19) и (20), можно сделать вывод о том, что средняя площадь (S_{mid}) обнаруживаемого ЛП в случае (19) должна быть выше, то есть хуже, чем для варианта (20). Это и фиксируется на графиках для $N_{sat} = 8$ и $N_{sat} = 12$ на рис. 3.

В оптимальных точках всех графиков на рис. 3, возникающих при оптимальных значениях долготных сдвигов для всех рассматриваемых чисел КА, наилучшие (то есть наименьшие) величины средней площади (S_{mid}) обнаруживаемого ЛП уменьшаются с ростом общего количества спутников N_{sat} .

Итак, проведенный анализ диаграмм частот перерывов обзора, изображенных на рис. 4 и 5, объясняет несколько неожиданное «поведение», то есть парадоксальный, но лишь на первый взгляд, вид графиков на рис. 3 при приближении к правой границе в 90° на оси абсцисс. С другой стороны, подтверждается ожидаемое улучшение оптимальных величин показателей эффективности с увеличением количества КА в системе спутников при оптимальных значениях долготных сдвигов (для конкретных значений N_{sat}).

4. Анализ и выбор фазовых сдвигов $d\tau$

Графики показателей эффективности V_{mid} , T_{mid} , S_{mid} в зависимости от долготных сдвигов $d\lambda$ на рис. 1, 2 и 3 построены следующим образом:

– при каждом долготном сдвиге $d\lambda$ для всех фазовых сдвигов $d\tau$ из диапазона (3) вычисляются значения конкретного показателя эффективности, то есть V_{mid} , T_{mid} или S_{mid} ;

– все полученные для фиксированного $d\lambda$ значения показателя эффективности сравниваются между собой и среди них выбирается лучшее;

– найденное лучшее (для фиксированного $d\lambda$) значение показателя эффективности изображается на графике этого показателя с абсциссой $d\lambda$, но фазовый сдвиг $d\tau$, при котором оно найдено, не может быть показан в явном виде на рис. 1 – 3.

Фазовые сдвиги τ , при которых достигнуты наилучшие значения показателей эффективности, представлены в табл. 1. Следовательно, формально цель определения рекомендуемых сочетаний долготных и фазовых сдвигов, приводящих к достижению оптимальных показателей эффективности, реализована.

Однако остается незавершенным анализ зависимости показателей эффективности от фазовых сдвигов. Точнее говоря, нужно исследовать, насколько существенно будут изменяться показатели эффективности при отклонении фазовых сдвигов от их значений в табл. 1. Это нужно для понимания того, каковы допустимые отклонения фазовых сдвигов от их лучших значений в процессе эксплуатации будущей КС РОЛП.

Для проведения этого анализа построены графики на рис. 6 – 8.

На всех трех рис. 6, 7 и 8 анализируются КС из 8-ми спутников, запускаемых на ССО с высотой 750 км. В соответствии с результатами из табл. 1 эквидистантная структура КС задана долготным сдвигом 50° . Оптимальные фазовые сдвиги на всех трех графиках различаются очень мало и близки к 60° .

Точность расчетов, выполненных для построения графиков на рис. 4 – 6, соответствовала уровню (9), то есть была наиболее высокой, чтобы можно было оценивать самые небольшие вариации показателей эффективности.

Все три анализируемых графика имеют точки минимумов и максимумов практически при почти одинаковых значениях на абсциссе, то есть на горизонтальной оси координат.

Видно, что диапазоны изменения значений показателей эффективности на всех анализируемых графиках на рис. 4 – 6 невелики.

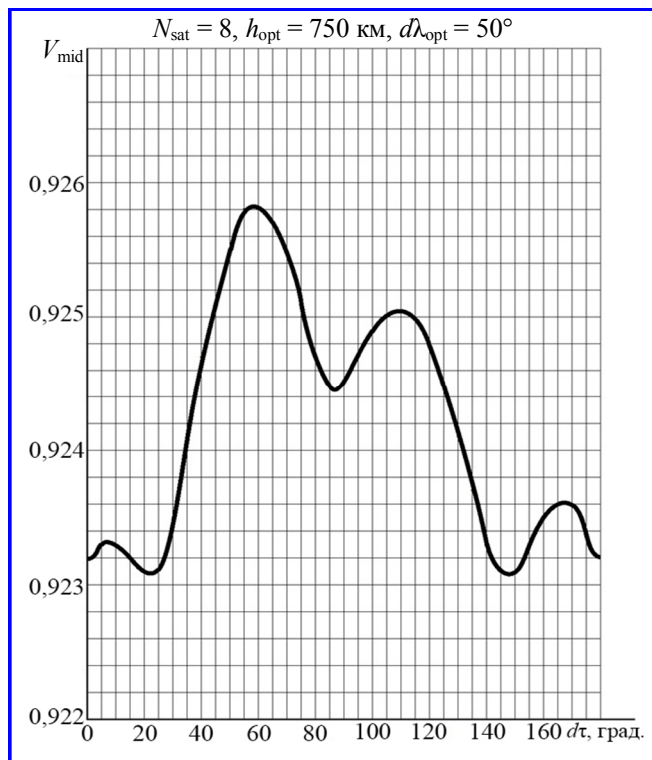


Рис. 6. График средней вероятности (V_{mid}) обнаружения лесного пожара в зависимости от фазового сдвига ($d\tau$) для системы из 8-ми космических аппаратов на эквидистантных солнечно-синхронных орбитах с высотой 750 км при долготном сдвиге 50°

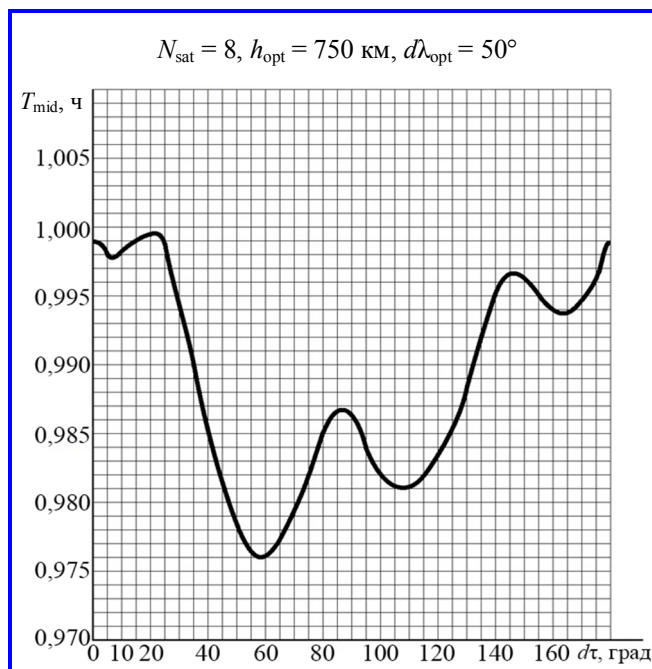


Рис. 7. График среднего времени (T_{mid}) обнаружения лесного пожара в зависимости от фазового сдвига ($d\tau$) для системы из 8-ми космических аппаратов на эквидистантных солнечно-синхронных орбитах с высотой 750 км при долготном сдвиге 50°

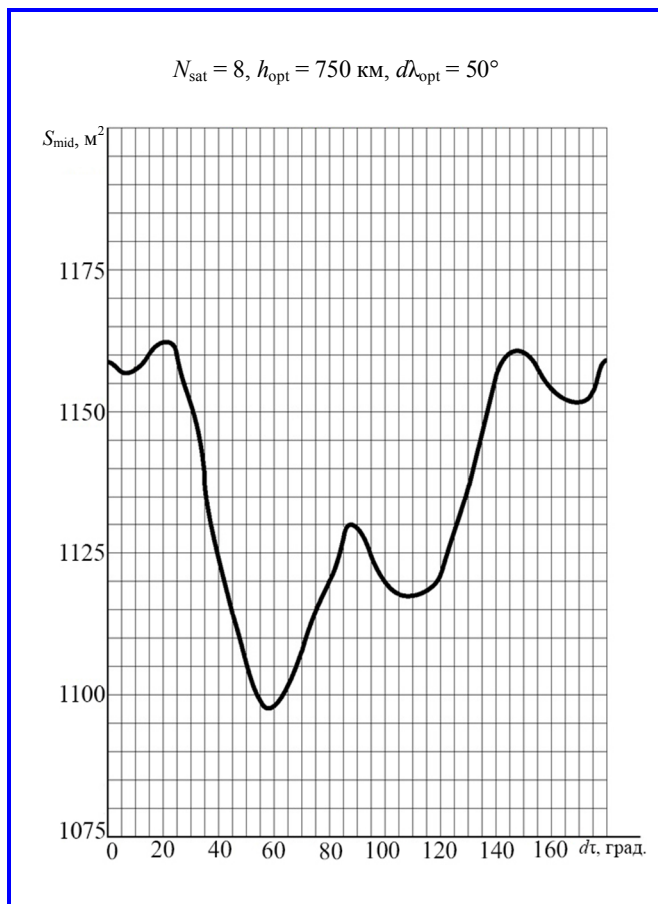


Рис. 8. График средней площади (S_{mid}) обнаруживаемого лесного пожара в зависимости от фазового сдвига (dt) для системы из 8-ми космических аппаратов на эквидистантных солнечно-синхронных орбитах с высотой 750 км при долготном сдвиге 50°

На рис. 6 для средней вероятности (V_{mid}) обнаружения ЛП во всем интервале изменения сдвига фаз от 0° до 180° наименьшее значение немного выше 0,923, а наибольшее $\sim 0,9258$. Это означает, что полный размах колебаний равен 0,0028, что меньше 0,3%. Следовательно, любые изменения сдвига фаз практически не оказывают существенного влияния на величину средней вероятности (V_{mid}).

График среднего времени (T_{mid}) обнаружения ЛП, представленный на рис. 7, изменяется в пределах от $\sim 0,975$ до 1,000 часа, то есть диапазон колебаний составляет $\sim 0,025$ часа или около 2,5%. Значит, и для данного показателя эффективности любые отклонения фазовых сдвигов не приводят к существенным изменениям T_{mid} .

График зависимости средней площади (S_{mid}), изображенный на рис. 8, испытывает наибольшие колебания по сравнению с графиками для V_{mid} и

T_{mid} . Значения S_{mid} варьируют от ~ 1100 до ~ 1165 M^2 , что приблизительно можно оценить в $\sim 5,5\%$.

В целом по результатам проведенного анализа графиков на рис. 6 – 8 можно утверждать, что зависимость всех показателей эффективности от изменения фазовых сдвигов пренебрежимо мала. Для практики достаточно точно выдерживать лишь значения долготных сдвигов $d\lambda$.

5. Уточненный анализ и выбор высот орбит

В предыдущей публикации [1] был выполнен анализ рекомендуемых высот ССО для КС РОЛП, состоящих из $2 \div 20$ КА. Результаты показаны на графиках на рис. 4 – 7 в [1], где изображены зависимости оптимальных значений показателей эффективности V_{mid} , T_{mid} и S_{mid} в диапазоне высот орбит от 250 до 1000 км. Там же, а точнее на рис. 7 в [1], приведен компромиссный (средний) график оптимальной высоты орбиты, ориентированный на одновременное (равномерное) достижение лучших величин для всех трех рассматриваемых показателей эффективности.

Поскольку в соответствии с выводами предыдущей публикации отобраны для практической реализации КС только из $N_{sat} = 6, 8, 10$ и 12 спутников, в настоящей работе был произведен более качественный анализ высот орбит именно для этих четырех значений количества КА в перспективной КС РОЛП. Сокращение состава вариантов N_{sat} , а потому и затрат времени на его осуществление, позволило повысить точность расчетов до уровня (8), что втрое лучше, чем в предыдущей работе [1].

Результаты представлены на графиках на рис. 9 – 11. Они позволяют оценить корректность рекомендованных в статье [1] в качестве оптимальных (одновременно для всей тройки показателей эффективности) высот орбит h_{opt} , рассчитанных ранее при меньшей точности вычислений.

Для каждого графика на всех рис. 9 – 11 выделены на горизонтальной оси координат значения высот орбит, при которых достигаются оптимальные величины показателей эффективности V_{mid} , T_{mid} , S_{mid} . Эти значения, обозначаемые, соответственно, как $h(V_{mid})$, $h(T_{mid})$ и $h(S_{mid})$, представлены в табл. 2. В нижней строке табл. 2 даны компромиссные высоты орбит h_{opt} , которые можно рекомендовать в качестве оптимальных для КС РОЛП в целом. Для конкретного числа спутников N_{sat} высота h_{opt} является средним значением от пары крайних величин среди тройки $h(V_{mid})$, $h(T_{mid})$ и $h(S_{mid})$ для этого N_{sat} .

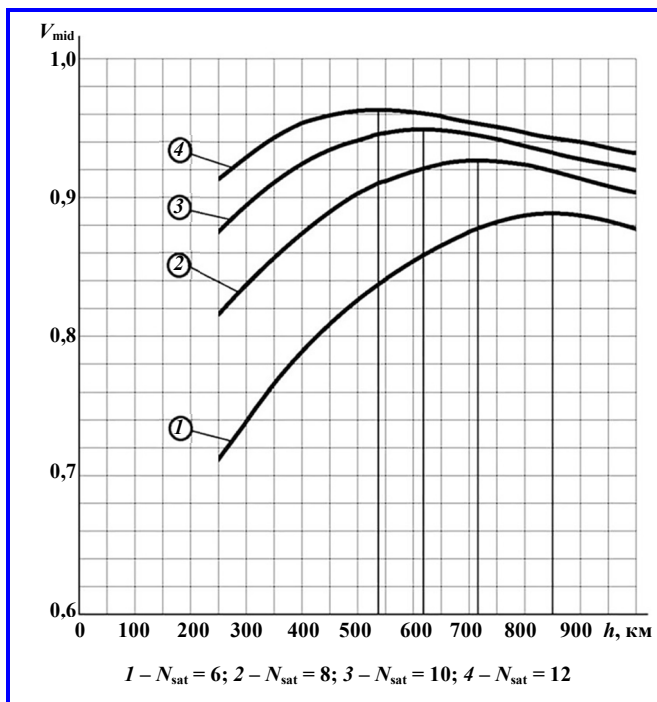


Рис. 9. Графики максимально достижимых значений средней вероятности (V_{mid}) обнаружения лесного пожара в зависимости от высоты орбиты (h) для систем из различного количества космических аппаратов с оптимальной (для конкретной высоты орбиты) структурой

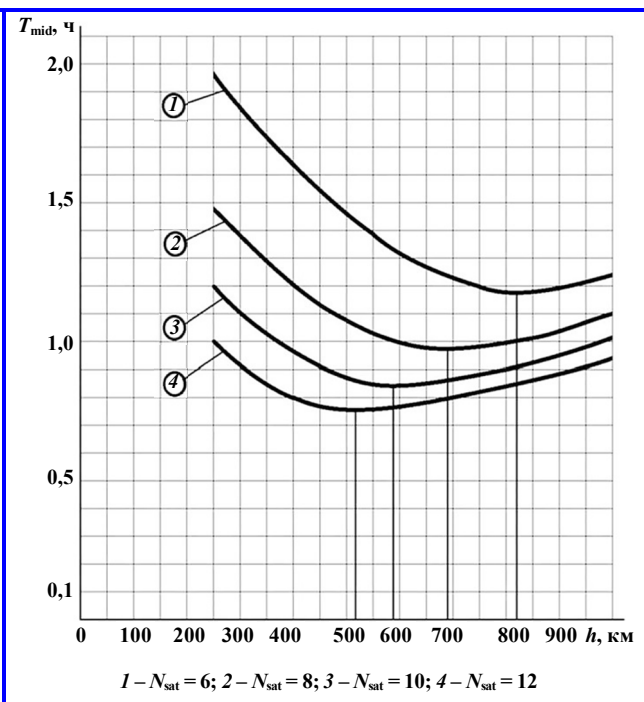


Рис. 10. Графики минимально достижимых значений среднего времени (T_{mid}) обнаружения лесного пожара в зависимости от высоты орбиты (h) для систем из различного количества космических аппаратов с оптимальной (для конкретной высоты орбиты) структурой

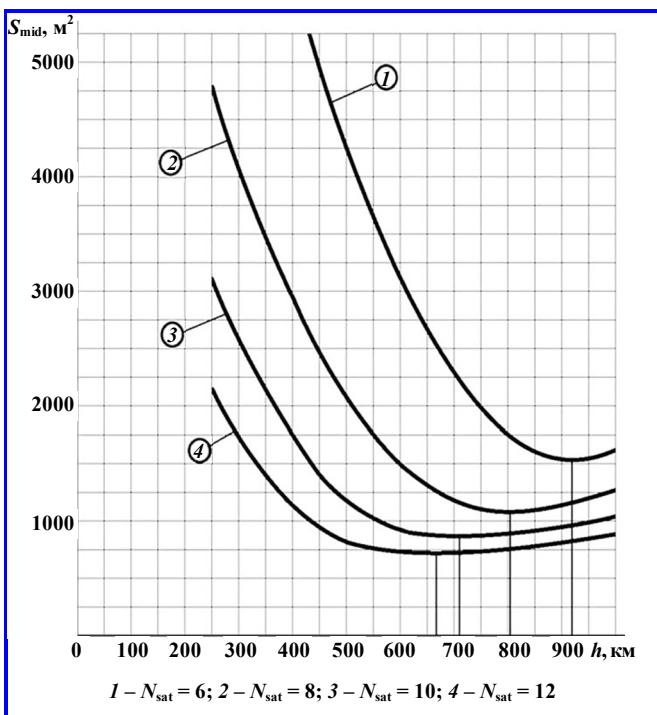


Рис. 11. Графики минимально достижимых значений средней площади (S_{mid}) обнаружимого лесного пожара в зависимости от высоты орбиты (h) для систем из различного количества космических аппаратов с оптимальной (для конкретной высоты орбиты) структурой

Таблица 2
Уточненные высоты орбит $h(V_{mid})$, $h(T_{mid})$ и $h(S_{mid})$ для оптимизации показателей эффективности V_{mid} , T_{mid} , S_{mid} и компромиссные высоты орбит h_{opt} , которые можно рекомендовать в качестве оптимальных для КС РОЛП в целом

N_{sat}	6	8	10	12
$h(V_{mid})$	850	715	620	540
$h(T_{mid})$	820	690	590	520
$h(S_{mid})$	920	805	710	670
h_{opt}	870	747,5	650	595

Таблица 3
Высоты орбит $h(V_{mid})$, $h(T_{mid})$, $h(S_{mid})$ и h_{opt} , полученные на основе табл. 1 из [1]

N_{sat}	6	8	10	12
$h(V_{mid})$	850	720	620	540
$h(T_{mid})$	825	700	600	525
$h(S_{mid})$	900	790	715	660
h_{opt}	862,5	745	657,5	592,5

Для наглядного сравнения результатов табл. 2 с результатами работы [1] рассмотрим табл. 3, где представлены аналогичные параметры, но полученные на основе данных в табл. 1 из [1].

Сопоставляя данные в табл. 2 и 3, несложно убедиться, что они очень мало различаются. Кроме

того, по виду графиков на рис. 9 – 11 легко установить, что величины показателей эффективности при существенных отклонениях от $h(V_{\text{mid}})$, $h(T_{\text{mid}})$ и $h(S_{\text{mid}})$ изменяются медленно, что еще более сближает результаты в обеих сравниваемых таблицах.

Следовательно, можно утверждать, что результаты предыдущей статьи, вычисленные при меньшем уровне точности, а потому и с существенной (приблизительно десятикратной) экономией затрат времени на расчеты, тем не менее оказались вполне корректными. В связи с этим предложенные там для практического использования округленные оптимальные величины высот орбит, зафиксированные в виде соотношений (4) – (7), выбраны правильно и могут рекомендоваться для дальнейшего применения в процессе проектирования перспективной КС РОЛП.

Целесообразно также отметить, что немного пониженный уровень точности расчетов, реализованный в статье [1] и обеспечивающий минимизацию затрат времени на проведение вычислений, является вполне достаточным при необходимости выполнения новых программ расчетов в интересах дальнейшего углубления анализа и выбора параметров КС РОЛП.

Выводы

1. Для построения орбитальной структуры перспективной КС РОЛП целесообразно использовать тип структуры, называемый эквидистантным.

2. Ключевыми параметрами для задания эквидистантных структур являются долготный сдвиг, т. е. разность восходящих узлов соседних орбит, и фазовый сдвиг, т. е. разность фаз (точнее аргументов широты) для спутников в соседних плоскостях орбит.

3. Рассчитаны, построены и проанализированы графики зависимостей показателей эффективности от выбора долготного сдвига для КС РОЛП из 6-ти, 8-ми, 10-ти и 12-ти спутников.

4. Вычислены и представлены диаграммы частот перерывов обзора, возникающих на всей площади лесов нашей страны; диаграммы позволили

объяснить особенности графиков показателей эффективности в зависимости от долготных сдвигов.

5. Рассчитаны и построены графики зависимостей показателей эффективности от фазового сдвига, установлена слабая изменчивость этих показателей при варьировании значений этого сдвига в больших пределах, что весьма удобно на практике.

6. Рассчитаны с повышенной точностью высоты орбит для КС из 6-ти, 8-ми, 10-ти и 12-ти КА; подтверждена приемлемость для практики меньшей точности более ранних вычислений данных высот; рекомендовано использование пониженной точности расчетов при выполнении будущих программ расчетов в процессе дальнейшего проектирования КС РОЛП с целью экономии затрат времени на их проведение.

Литература

1. Ильина И. Ю. Метод расчета состава КА и высот орбит для раннего обнаружения лесных пожаров / И. Ю. Ильина // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 186. – № 6. – С. 42 – 56.
2. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» / Под редакцией Л. А. Макриденко, С. Н. Волкова, А. В. Горбунова, Р. С. Салихова, С. И. Терехова. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 129 с.
3. Первые результаты работы ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ в составе КА «Канопус-В-ИК» / Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. – Вып. 4. – С. 34 – 45.
4. Саульский В. К. Анализ систем спутников для периодического обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2017. – Т. 55. – № 4. – С. 290 – 304.
5. Анализ структуры группировок спутников типа «Метеор-М» / А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина, Л. А. Макриденко [и др.] // Космонавтика и Ракетостроение. – 2020. – № 2 (113). – С. 5 – 21.
6. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – Москва : Наука, 1968. – 64 с.
7. Ильина И. Ю. Исследование орбитального построения системы обнаружения лесных пожаров / И. Ю. Ильина, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 184. – № 5. – С. 43 – 54.

Поступила в редакцию 21.10.2022

Ирина Юрьевна Ильина, заместитель начальника НПК, т. (495) 623-57-74, e-mail: nrk@hq.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

ANALYSIS AND SELECTION OF STRUCTURE OF SATELLITE SYSTEM FOR EARLY DETECTION OF FOREST FIRES

I. Iu. Ilyina

The article analyses the options of orbital structure of a future space system for early detection of forest fires. Based on previously published results, the structures called 'equidistant' are considered. Apart from the total number of satellites in the satellite system and number of satellites in each orbital plane, they are fixed by two other key parameters: longitude shift (shift of ascending orbit nodes) and phase shift (shift of latitude arguments) for the satellites in the neighbouring orbital planes. The orbital structures for a space system consisting of 6, 8, 10 and 12 satellites are investigated. For each space system, optimal longitude shifts ensuring the implementation of the following three efficiency factors - mean probability of forest fire detection, mean time of forest fire detection, average area of detected forest fire - are analysed, selected and recommended for practical application. The results are presented the form of diagrams convenient for analysis and selection of the best options. The diagrams of frequencies of survey interruptions occurring over the whole area of Russia's forests are constructed. The dependence of efficiency factors on the selection of phase shifts is investigated. It is established that all three efficiency factors vary only slightly with phase shifts change over wide ranges. For the purpose of checking and possible correction of the lower accuracy level results received earlier (due to necessity to save time for long calculation programs), high accuracy calculations that allowed construction of improved diagrams showing the dependence of efficiency factors on the selection of Sun-synchronous orbit altitude, are performed. The comparison of new results with previously published results has proved practical correctness of the latter and usefulness of a relatively low accuracy level ensuring a many times reduction of calculation time during the implementation of new calculation programs in future.

Key words: equidistant structure, longitude shift, phase shift, survey interruption frequency diagram, efficiency factor, mean probability of forest fire detection, mean time of forest fire detection, average area of detected forest fire, accuracy level.

References

1. Ilyina I. Yu. Method of calculation of composition of spacecraft and its orbit altitudes for early detection of forest fires // Matters of electromechanics. VNIIEM Proceedings – 2021. – V. 186. – No. 6. – Pp. 42 – 56.
2. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V-IK / Edited by L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov, R. S. Salikhov, S. I. Terekhov. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2017. –129 p.
3. First results of operation of the IR-radiometer MSU-IK-SRM as part of CANOPUS-V-IK spacecraft / N. P. Akimov, K. V. Badaev, Yu. M. Gektin [et al.] // Rocket and space instrument engineering and information systems. – 2018. – V. 5. – Issue 4. – Pp. 34–45.
4. Saulsky V. K. Analysis of satellite systems for periodical Earth observation / V. K. Saulsky // Space research. – 2017. – V. 55. – No. 4. – Pp. 290 – 304.
5. Analysis of structure of Meteor-M type satellite constellations / A. V. Gorbunov, I. Yu. Ilyina, L. A. Makridenko [et al.] // Cosmonautics and rocket engineering. – 2020. – No. 2 (113). – Pp. 5 – 21.
6. Sobol I. M. Monte Carlo method / I. M. Sobol. – Moscow : Nauka (Science), 1968. –64 p.
7. Ilyina I. Yu. Investigation of orbital structure of a space system for detection of forest fires / I. Yu. Ilyina, V. K. Saulsky // Matters of electromechanics. VNIIEM Proceedings. – 2021. – V. 184. – No. 5. – Pp. 43 – 54.

*Irina Yurevna Ilyina, Deputy Head of Space Systems Research and Production Center,
tel.: +7 (495) 623-57-74, e-mail: npk@hq.vniiem.ru.
(JC «VNIIEM Corporation»).*