

УДК 629.783

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ТИПА «КАНОПУС-В-ИК» ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ И ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Л. А. Макриденко, А. В. Горбунов,
И. Ю. Ильина, В. К. Саульский

В 2017 году был выведен в космос новый космический аппарат «Канопус-В-ИК». На его борту впервые в отечественной практике появился широкозахватный инфракрасный радиометр, способный обнаруживать малоразмерные лесные пожары в круглосуточном режиме. В ходе лётных испытаний космического аппарата подтверждена возможность раннего выявления сверхмалых пожаров с размерами от 5×5 м. В полезную нагрузку спутника «Канопус-В-ИК» входит также и моноблок съемочной аппаратуры базового космического аппарата «Канопус-В». Он служит для оперативного мониторинга природных и техногенных чрезвычайных ситуаций и используется лишь в дневное время, а точнее при углах места Солнца не ниже 10° . При обнаружении малоразмерных лесных пожаров и при оперативном мониторинге чрезвычайных ситуаций предъявляются высокие требования к периодичности повторения зондирования Земли. Поэтому в обоих случаях необходимо создание и непрерывное поддержание системы из пяти или более спутников. В статье решается задача оптимизации орбитальных группировок из пяти и шести космических аппаратов для оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций, а также проводится поиск компромиссных спутниковых структур для одновременной реализации двух целей: обнаружения малоразмерных лесных пожаров и оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций. Найденные варианты структур можно учитывать в будущем при оценке возможностей формирования системы из космических аппаратов типа «Канопус-В-ИК», реализующей обе поставленные цели. Главным назначением статьи является иллюстрация одного из направлений применения векторной модели обзора Земли и компьютерной программы на её основе.

Ключевые слова: широкозахватный инфракрасный радиометр, моноблок целевой аппаратуры, малоразмерный лесной пожар, оперативный мониторинг, векторная модель обзора Земли, спутниковая структура, орбитальное построение, максимальный перерыв обзора, эффективный период обзора, ошибка обзора, частота ошибок обзора, рабочий интервал, изомаршрутная орбита.

Введение

В 2017 году был запущен на солнечно-синхронную орбиту (ССО) с высотой около 510 км новый спутник «Канопус-В-ИК», изготовленный в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». На нем впервые в отечественной практике установлен широкозахватный двухканальный инфракрасный (ИК) радиометр МСУ-ИК-СРМ, разработанный в АО «Российские космические системы» с целью обнаружения малоразмерных лесных пожаров (МЛП). В ходе летных испытаний космического аппарата (КА) «Канопус-В-ИК» подтверждена возможность раннего выявления сверхмалых пожаров с размерами от 5×5 м, используя дистанционное зондирование (ДЗЗ) из космоса лесной территории России с помощью радиометра МСУ-ИК-СРМ. Данный прибор обеспечивает наблюдение земной поверхности на обеих сторонах орбиты: восходящей и нисходящей, – независимо от их солнечной освещенности, т. е. он функционирует в круглосуточном режиме.

В полезную нагрузку спутника «Канопус-В-ИК» входит также и моноблок съемочной аппаратуры базового КА «Канопус-В», на космической платформе которого создан новый спутник. Моноблок предназначен для оперативного монито-

ринга (ОМ) чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного происхождения. Он используется только на дневных, т. е. освещенных Солнцем, сторонах орбиты КА. Говоря точнее, съемки с помощью данного моноблока целевой аппаратуры (ЦА) возможны лишь при углах места Солнца не ниже 10° . Следовательно, режимы работы широкозахватного ИК-радиометра и моноблока ЦА на КА «Канопус-В-ИК» носят существенно разный характер.

Известно, что при обнаружении малоразмерных лесных пожаров и при проведении оперативного мониторинга ЧС предъявляются очень высокие требования к периодичности повторения зондирования Земли. Поэтому в обоих случаях необходимо создание и непрерывное поддержание в космосе достаточно большой системы из пяти или более спутников. Режимы работы рассматриваемых целевых приборов КА «Канопус-В-ИК» существенно отличаются друг от друга. Размеры их полос обзора также имеют разные значения: 2000 км у ИК-радиометра против 880 км у моноблока. Отмеченные факторы являются ключевыми при выборе орбитального построения космической системы (КС), т. е. ее спутниковой структуры. В связи с этим возникает довольно сложная проблема поиска такого

орбитального построения для системы из КА типа «Канопус-В-ИК», которое было бы одинаково удобно и эффективно для обнаружения малоразмерных лесных пожаров и оперативного мониторинга ЧС одновременно.

В работе [1] уже исследована и решена задача оптимизации орбитальной группировки из пяти и шести КА типа «Канопус-В-ИК» применительно к обнаружению МЛП. Для этого использована «векторная модель обзора Земли» (ВМОЗ), изложенная в ряде публикаций [2 – 8].

В настоящей статье аналогичная задача решается для оперативного мониторинга ЧС. Затем проводится поиск компромиссных спутниковых структур из пяти и шести КА для обнаружения малоразмерных лесных пожаров и оперативного мониторинга ЧС одновременно. Полученные результаты можно использовать в будущем при практическом выборе орбитального построения перспективной системы из спутников типа «Канопус-В-ИК», состав полезной нагрузки и остальные параметры которых даны в [9]. Однако, главной целью статьи является демонстрация возможностей применения математического аппарата ВМОЗ и компьютерной программы на ее основе.

1. Выбор структуры космической системы для обнаружения малоразмерных лесных пожаров

В данном разделе приводятся основные результаты, полученные в [1] в процессе анализа орбитального построения космической системы из пяти и шести КА типа «Канопус-В-ИК», решающей задачу обнаружения малоразмерных лесных пожаров с помощью широкозахватного ИК-радиометра с полосой захвата (и обзора) 2000 км [9]. Заданный в [1] для обнаружения МЛП пояс широт $[43^\circ, 70^\circ]$ соответствует основной территории лесной зоны нашей страны. Результаты получены, применяя математический аппарат ВМОЗ, детально описанный в [2 – 8], поэтому в настоящей статье его изложение отсутствует.

Для выполнения конкретных расчетов в [1] использована компьютерная программа, разработанная на базе ВМОЗ. Она вычисляет для системы из любого, сколь угодно большого количества КА с любой спутниковой структурой полный набор перерывов обзора вместе с частотами их возникновения на заданном для зондирования поясе широт Земли.

Программа отличается высоким быстродействием. Например, для очень большой системы из 100 спутников, предназначенной для круглосуточного наблюдения пояса широт Земли в пределах от -80° до $+80^\circ$, на расчет всех перерывов обзора и их ча-

стот затрачивается менее 2 с, когда вычисления идут с шагом по широте в 1° . Дальнейшее измельчение шага не ведет к существенному изменению получаемых результатов. Для системы из пяти – шести КА, зондирующей пояс широт $[43^\circ, 70^\circ]$, длительность вычислений измеряется сотыми долями секунды.

Столь высокая скорость вычислений позволяет рассчитывать и сравнивать многочисленные варианты спутниковой структуры, выбирая затем из них наилучшие по заданным критериям эффективности. В качестве последних в [1] использованы следующие показатели:

1. «Максимальный перерыв обзора» T_{\max} .
2. «Эффективный период обзора» T_{ef} .
3. «Частота (вероятность) ошибок обзора» $F(a)$.

1-й критерий T_{\max} давно и практически постоянно встречается в отечественной и зарубежной литературе. Это объясняется тем, что он относительно просто определяется разными способами. При расчетах по рассматриваемой компьютерной программе он мгновенно выделяется среди всех перерывов обзора. Однако, данный показатель далеко не всегда дает адекватное представление об эффективности решения задач ДЗЗ ввиду чрезвычайно малой частоты его возникновения на практике.

2-й критерий T_{ef} уже встречался в последних статьях по ВМОЗ [5 – 8]. Это условно одинаковый для всех точек заданной области Земли период повторения наблюдений. Он вычисляется так, чтобы потери, т. е. негативный эффект, появляющийся в процессе эксплуатации реальной КС ДЗЗ из-за всех перерывов обзора, был бы равен аналогичному эффекту при постоянном перерыве, который и называется «эффективным периодом обзора». Данный показатель рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ef} = T_{dr} \sum_{n=1}^{n_{\max}} t_n^2 g_n / 24, \quad (1)$$

выведенной в предположении, что негативный эффект от очередного n -го перерыва обзора t_n приближенно пропорционален его квадрату, т. е. t_n^2 .

В формуле (1) фигурируют следующие величины: T_{dr} – драконический период обращения спутника, исчисляемый в часах; g_n – частота перерыва обзора t_n (выражаемого в витках орбиты) за сутки.

Результирующая величина эффективного периода обзора T_{ef} выражается в виде количества драконических периодов обращения, или попросту витков орбиты.

Полезно уточнить, что в общем случае T_{ef} не является целым числом. Эффективный период обзора зависит от всего набора перерывов обзора. Поэтому он значительно полнее, чем максимальный перерыв обзора, характеризует работу КС из спутников типа «Канопус-В» или «Канопус-В-ИК», в частности, применительно к оперативному мониторингу ЧС.

3-й критерий $F(a)$, т. е. «частота ошибок обзора», введен в [1] впервые. Он актуален, в частности, для КС, решающей задачу обнаружения малоразмерных лесных пожаров. В этом случае ошибки обзора возникают при нарушении требования по обнаружению случайных событий типа малоразмерных лесных пожаров за время не более заданного интервала a [часов], начавшегося в момент достижения минимального размера МЛП, обнаруженного со спутника. Параметр a назван в [1] «рабочим (съемочным) интервалом» и принят равным 2 часам.

Для вычисления частоты ошибок обзора получена формула:

$$F(a) = \sum_{n \geq m}^{n_{\max}} (t_n T_{dr} - a) g_n / 24, \quad (2)$$

где $t_m T_{dr} > a$, $t_{m-1} T_{dr} \leq a$, $F(a)$ – величина безразмерная, она может выражаться, например, в %.

В [1] сначала, используя свойства ВМОЗ, показано, что для обнаружения МЛП общий вид наилучшей структуры системы с числом спутников N_{sat} фиксируется следующим образом:

$$\lambda_k = (k-1)\Delta\lambda, \quad \phi_k = (k-1)\Delta\phi, \\ k = 1, 2, \dots, N_{sat} \quad (3)$$

где k – номер очередного спутника; λ_k – долгота восходящего узла орбиты k -го спутника; ϕ_k – фаза того же спутника в плоскости орбиты; $\Delta\lambda$ – сдвиг долготы восходящего узла орбиты относительно предыдущего КА; $\Delta\phi$ – сдвиг по фазе в плоскости орбиты относительно предыдущего КА.

В соответствии с (3) структура формируется за счет одинаковых сдвигов по долготам восходящих узлов орбит и одинаковых фазовых сдвигов между соседними спутниками системы. Для системы из пяти КА типа «Канопус-В-ИК» оптимальные сдвиги по долготе равны $\Delta\lambda = 38,78^\circ$, а для шести КА – $\Delta\lambda = 32,32^\circ$.

Далее в [1], используя вычисления с помощью компьютерной программы, построены графики частоты ошибок обзора $F(2 \text{ часа})$ в зависимости от сдвигов фаз в пределах $0^\circ \dots 360^\circ$. Наименьшие, т. е. лучшие, значения этого показателя реализуют-

ся при следующих сдвигах фаз: $F(2 \text{ часа}) = 7,29\%$ при $\Delta\phi = 264^\circ$ для системы из 5 спутников; $F(2 \text{ часа}) = 1,33\%$ при $\Delta\phi = 291^\circ$ для системы из 6 спутников.

2. Предварительная оценка совместимости задач оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций и малоразмерных лесных пожаров для системы из космических аппаратов типа «Канопус-В-ИК»

Выше уже отмечалось, что широкозахватный ИК-радиометр МСУ-ИК-СРМ установлен на спутнике «Канопус-В-ИК» в дополнение к полезной нагрузке базового КА «Канопус-В»: моноблоку ЦА в составе панхроматической и многозональной съемочных систем [9]. Моноблок предназначен для съемки земной поверхности в видимом диапазоне спектра с целью оперативного мониторинга техногенных и природных ЧС, стихийных гидрометеорологических явлений и т. д. Для эффективного оперативного мониторинга за возникающими ЧС имеется возможность нацеливания неширокой полосы захвата ЦА (20 км) на заданный объект в пределах большой полосы обзора 880 км за счет разворотов базового КА «Канопус-В» по крену.

Положительные результаты использования ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ для обнаружения малоразмерных лесных пожаров позволяют задуматься о возможности создания системы из пяти, шести или более КА типа «Канопус-В-ИК» для одновременного решения задач оперативного мониторинга ЧС и обнаружения МЛП. Однако, необходимо учитывать наличие серьезных затруднений для реализации этого замысла на практике.

Во-первых, ИК-радиометр осуществляет зондирование Земли на обеих сторонах орбиты независимо от условий солнечного освещения, т. е. в круглосуточном режиме. Моноблок ЦА, напротив, может производить съемку земной поверхности только при углах места Солнца A не менее 10° . Во-вторых, полоса обзора первого из рассматриваемых приборов гораздо шире аналогичной величины второго. В-третьих, возможность разворотов КА, полезная для моноблока целевой аппаратуры, только мешает работе широкозахватного ИК-прибора. Наконец, в-четвертых, для оценки эффективности конкурирующих видов аппаратуры следует исходить из различных критериев, учитывая их специализацию: $F(2 \text{ часа})$ для МСУ-ИК-СРМ, предназначенного для обнаружения МЛП; T_{\max} и T_{ef} для моноблока ЦА, реализующего оперативный мониторинг ЧС.

Учитывая сказанное, становится еще более интересно исследовать принципиальную возмож-

ность синтеза компромиссного орбитального построения космической системы из пяти – шести КА типа «Канопус-В-ИК», в наибольшей степени удовлетворяющего и оперативному мониторингу ЧС, и обнаружению малоразмерных лесных пожаров. Для данной статьи не ставится задача получения обязательных для внедрения выводов, однако иллюстрируется одно из направлений применения математического аппарата ВМОЗ и компьютерной программы, разработанной на её основе.

В предыдущем разделе определено орбитальное построение из пяти и шести КА типа «Канопус-В-ИК», оптимальное по критерию $F(2 \text{ часа})$ для обнаружения МЛП. Ниже сначала проводится идентичный анализ, но по другим критериям для КС из пяти и шести КА типа «Канопус-В», решающей задачи оперативного мониторинга. Точно так же должна быть построена система из спутников типа «Канопус-В-ИК» применительно к реализации только оперативного мониторинга ЧС. Затем будут рассмотрены результаты поиска компромиссной спутниковой структуры для решения двух задач.

Однако, сначала нужно разобраться с вопросом учета в ВМОЗ солнечной освещенности вдоль трасс полета КА на земной поверхности. Это необходимо, так как целевая задача оперативного мониторинга ЧС реализуется, как уже отмечено выше, только при требуемых углах места Солнца в процессе наблюдения из космоса. В прежних публикациях по теории ВМОЗ данный вопрос не рассматривался.

3. Изменение векторной модели обзора Земли для учета солнечной освещенности трасс космических аппаратов на земной поверхности

Поскольку оперативный мониторинг реализуется при углах места Солнца $A \geq 10^\circ$, что эквивалентно зенитным углам $z \leq 80^\circ$, необходимо предварительно очертить круг ССО, пригодных для этого.

Для вычисления зенитного угла действует следующая формула, выведенная с помощью аппарата сферической тригонометрии [10], используя картинку, изображенную на рис. 1:

$$\cos z = \sin \phi \sin s + \cos \phi \cos s \times \cos(\lambda - 180^\circ + \sin^{-1}(\tan \phi / \tan i)), \quad (4)$$

где s – склонение Солнца; ϕ – широта Земли; λ – долгота узла ССО, соответствующего точке с долготой g на широте ϕ ; g – долгота точки на широте

ϕ , соответствующая зенитному углу z ; i – наклонение орбиты.

На рис. 1 и далее в тексте условно принято, что долгота среднего экваториального Солнца 180° . В связи с этим долготы восходящих и нисходящих узлов ССО приводятся далее с учетом данного допущения.

На каждом из трех рис. 2 представлено по семь графиков значений углов места Солнца A в зависимости от широты Земли ϕ . На рис. 2, *a* даны графики в день зимнего солнцестояния, на рис. 2, *b* – в день летнего солнцестояния и на рис. 2, *в* – в дни равноденствия. Каждый график имеет свой номер и соответствует определенной долготе узла ССО. Значения этих долгот приведены в табл. 1. На всех рисунках выделен пояс широт, в котором лежит основная обжитая территория России; этот пояс зачернен.

Видно, что в зимний период съемка нашей страны со спутников типа «Канопус-В» малоэффективна. В летний период, наоборот, практически на всех широтах основной России эта съемка наиболее

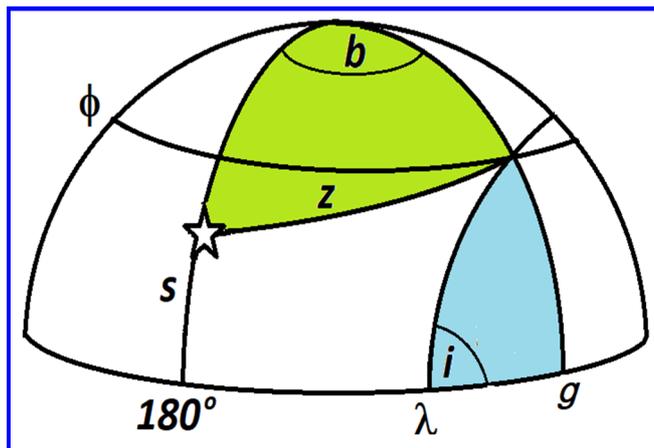


Рис. 1. К выводу формул для расчета зенитных углов z и границ «белой зоны» с $A \geq 10^\circ$ на векторной модели обзора Земли для системы из КА типа «Канопус-В»

Таблица 1

Семь значений долгот узла орбит

Номер графика	Долгота узла орбиты / солнечное время прохождения спутника через узел орбиты	
	Восходящие узлы	Нисходящие узлы
1	260° / 17:20	100° / 6:40
2	255° / 17:00	105° / 7:00
3	250° / 16:40	110° / 7:20
4	225° / 15:00	135° / 9:00
5	200° / 13:20	160° / 10:40
6	180° / 12:00	180° / 12:00
7	135° / 9:00	225° / 15:00

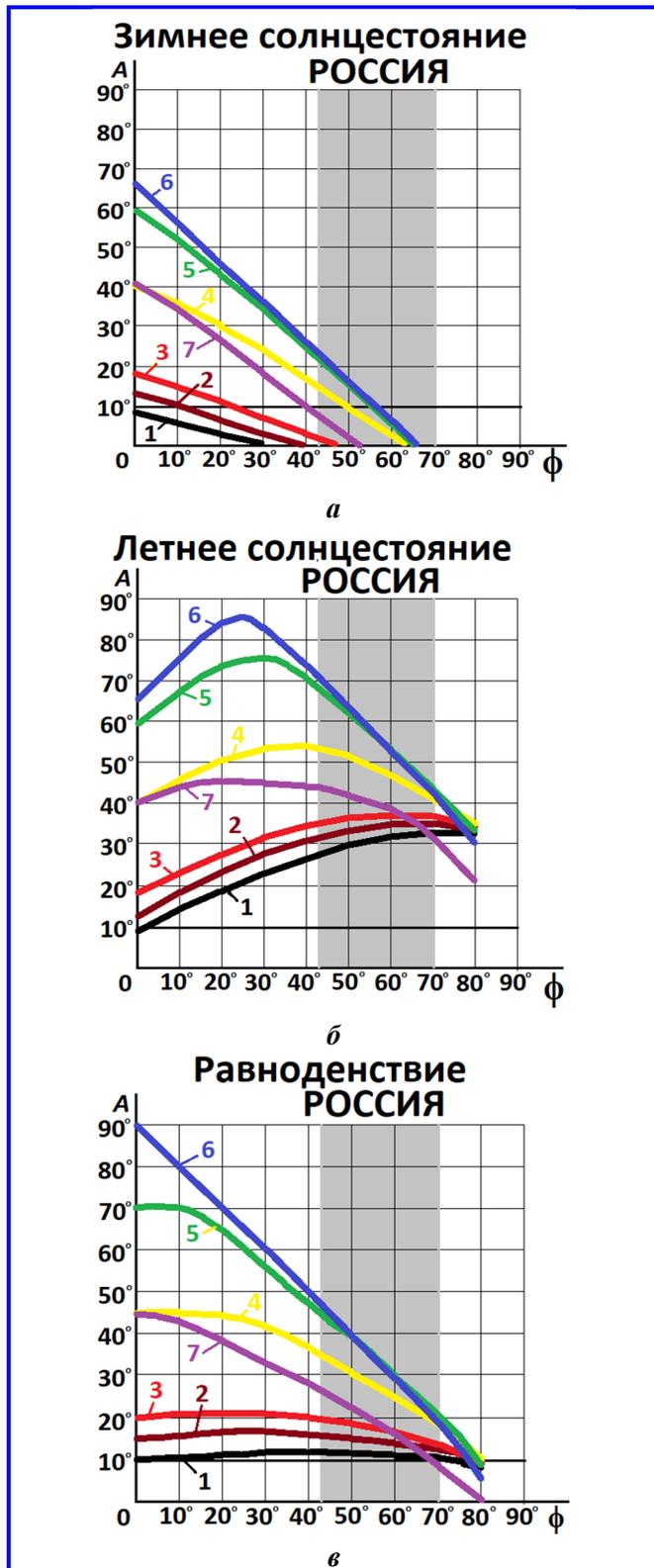


Рис. 2. Графики углов места Солнца A в зависимости от широты Земли ϕ для солнечно-синхронных орбит с семью значениями долгот узлов орбит (табл. 1):

- a – в день зимнего солнцестояния;
- b – в день летнего солнцестояния;
- v – в дни равноденствия

продуктивна. По рис. 2, б и в, можно сделать вывод о том, что в течение полугодового периода от весеннего до осеннего равноденствия углы места Солнца A , превышающие требуемое минимальное значение 10° , обеспечиваются для ССО с долготами восходящих узлов $135^\circ - 260^\circ$ и нисходящих узлов $100 - 225^\circ$. Поэтому далее рассматриваются орбиты из этих диапазонов.

На рис. 3 изображена ВМОЗ на широте 43° для системы из пяти КА типа «Канопус-В» с полосами обзора 880 км. Внизу выделена «белая зона», в пределах которой реализуется съемка при углах места Солнца не менее 10° в течение всего сезона между весенним и осенним равноденствиями. «Спутниковые следы» (термин ВМОЗ в публикациях [1 – 8]), не попавшие в «белую зону», на рис. 3 не изображаются, так как для них требования солнечной освещенности не соблюдаются.

Уравнения границ «белой зоны» находим по рис. 1. При склонении Солнца, равном 0° , получаем формулу для расчета долготных расстояний $+b$ и $-b$ от Солнца до граничных точек широты 43° , для которых $z = 10^\circ$:

$$b = \cos^{-1}(\cos 80^\circ / \cos 43^\circ) = 76,26^\circ. \quad (5)$$

Практически все КА ДЗЗ и в том числе КА «Канопус-В» выводятся на изомаршрутные солнечно-синхронные орбиты, трассы которых повторяются с периодом T витков и L суток. Для изомаршрутной орбиты удобно ввести на оси абсцисс ВМОЗ новую единицу масштаба:

$$e = 2\pi/T, \quad (6)$$

которая используется на рис. 3 и 4 (вместо радианов).

За счет введения единицы измерений (6) горизонтальные проекции «шаг-векторов» $R_0, R_1, R_2, R_3, \dots$, применяемых в математическом аппарате ВМОЗ [1, 6] для изомаршрутной орбиты, являются целочисленными. При этом параметр L равняется межвитковому сдвигу трассы спутника, измеренному в единицах e [1, 6].

Для изомаршрутной орбиты КА «Канопус-В» (в том числе КА «Канопус-В-ИК»)

$$T = 1200, L = 79. \quad (7)$$

На векторной модели для солнечно-синхронной изомаршрутной орбиты Солнце перемещается (во времени) по линии, параллельной шагу-вектору $R_1 = (-L; 1)$. Величине $b = 76,26^\circ$ соответствует расстояние $a = bT/360^\circ[e] = 254,2[e]$. Поэтому пограничные точки широты 43° , удовлетворяющие условию $A \geq 10^\circ$, находятся на прямых линиях, задаваемых следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} y &= (a - x)/L \text{ (верхняя граница),} \\ y &= -(a + x)/L \text{ (нижняя граница).} \end{aligned} \quad (8)$$

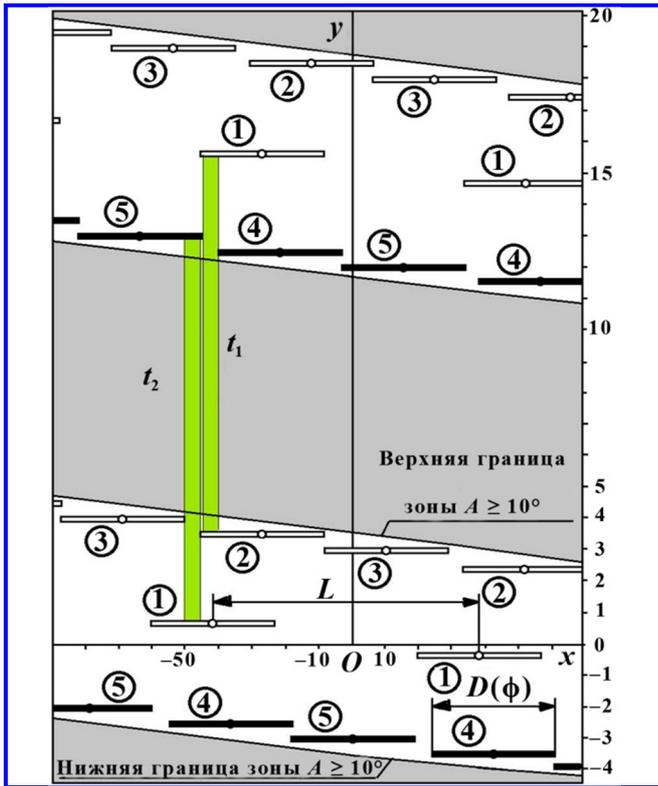


Рис. 3. Векторная модель системы из пяти космических аппаратов типа «Канопус-В» на широте $\phi = 43^\circ$ для оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций: $D(\phi)$ – след; L – межвитковый сдвиг; космические аппараты обозначены номером

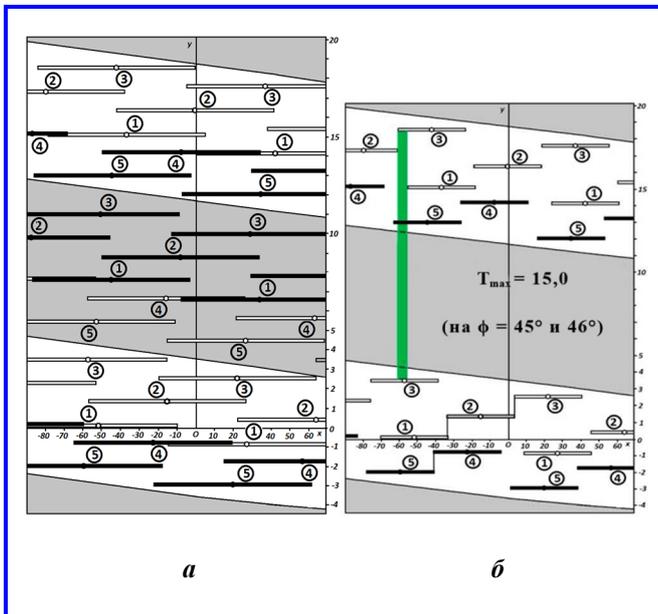


Рис. 4. Компромиссная модель системы из пяти космических аппаратов типа «Канопус-В-ИК» на широте $\phi = 43^\circ$ для одновременного решения задач оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций и обнаружения малоразмерных лесных пожаров: a – полоса обзора 2000 км; b – полоса обзора 880 км

Помимо «белой зоны», расположенной внизу на рис. 3, существует бесконечное множество таких же зон, образуемых путем смещений исходной из них по горизонтали на $T[e]$ в случае изомаршрутной орбиты с периодом повторения T (соответствует 2π [рад] в общем случае).

4. Расчёт структур из пяти и шести космических аппаратов типа «Канопус-В-ИК» для задачи оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций

Оптимальная ВМОЗ на рис. 3 для оперативного мониторинга ЧС строится совершенно иначе, чем для обнаружения МЛП в предыдущей работе [1].

В настоящей статье на рис. 3 для системы из пяти спутников «Канопус-В» восходящие «спутниковые следы» для 2-го и 3-го спутников (на рис. 3 и 4 восходящие «спутниковые следы» изображаются белыми) образуют цепочку, параллельную верхней границе белой зоны. Аналогичная цепочка нисходящих (черных) «спутниковых следов» КА с номерами 4 и 5 находится в нижней части белой зоны параллельно ее нижней границе.

Пара «спутниковых следов», соответствующих полосе обзора 880 км, почти перекрывает межвитковое расстояние $L[e] = 79 [e]$ уже на нижней широте 43° рассматриваемого пояса, поэтому больше 2-х «спутниковых следов» в цепочке быть не должно. Для каждой цепочки, параллельной шаг-вектору $R_1 = (-L; 1)$, породившие её спутники находятся в одной плоскости орбиты.

Подобное расположение двух цепочек «спутниковых следов» минимизирует перерывы обзора во всем поясе широт $[43^\circ, 70^\circ]$. Дело в том, что с ростом широты восходящие «спутниковые следы» энергично смещаются влево и чуть-чуть вверх, а нисходящие – вправо и немного вниз. В результате обе пары «спутниковых следов» на всех широтах пояса остаются в пределах белой зоны, а их предельная близость к границам этой зоны приводит к сокращению вертикальных интервалов между «спутниковыми следами» на векторной модели.

«Спутниковые следы» оставшегося, т. е. 1-го КА, необходимо поместить в середину белой зоны. Их горизонтальное положение, точнее абсцисса исходного «спутникового узла» (термин ВМОЗ), выбирается так, чтобы максимальные перерывы обзора t_1 и t_2 как можно раньше исчезли с ростом широты за счет увеличения длины «спутниковых следов» (в единицах e). Вертикальное положение данных следов определяется, исходя из достижения равенства $t_1 = t_2 = T_{max}$. С этой целью можно вывести несложные, но требующие трудоемкого кропотливого изложения уравнения, которые по этой причине здесь не приводятся.

В итоге для КС из пяти КА типа «Канопус-В» в моменты равноденствия минимальная величина максимального перерыва обзора $T_{\max} = 12,34$ витка. Ее можно найти как непосредственно путем анализа построения векторной модели, так и с помощью компьютерной программы (на основе «векторной модели обзора Земли»). Значение эффективного периода обзора $T_{ef} = 7,405$ витка. Оно определено расчетом по данной программе и также практически достигает возможного минимума. Значения тех же показателей эффективности, вычисленные на

компьютере за полугодичный сезон между весенним и осенним равноденствиями таковы: $T_{\max} = 12,34$ витка; $T_{ef} = 6,10$ витка. Результирующая спутниковая структура приведена в табл. 2.

Аналогично строится наилучшая ВМОЗ для КС из шести спутников. Однако, вместо «спутниковых следов» одного КА посередине белой зоны появляется цепочка из следов двух спутников. Показатели за тот же полугодовой период составляют: $T_{\max} = 12,00$ витка; $T_{ef} = 5,62$ витка. Спутниковая структура дана в табл. 3.

Таблица 2

Рекомендуемые системы из пяти космических аппаратов типа «Канопус-В-ИК»

Варианты спутниковых структур	ОМ, полоса обзора 880 км		ОМЛП, полоса обзора 2000 км
	T_{\max} , витки	T_{ef} , витки	$F(2 \text{ часа}), \%$
Структура лучшей системы $1 + 2 \cdot 2 = 5$ для ОМ, долготы / фазы КА, град.: 190 / 162; 257 / 93; 257 / 285; 283 / 325; 283 / 133	12,34	6,10	34,6
Структура лучшей системы $5 \cdot 1 = 5$ для обнаружения малоразмерных лесных пожаров (ОМЛП), сдвиги долготы / фазы, град., между соседними КА: 38,78 / 264	32,27	8,44	7,29
Структура компромиссной системы для ОМ и ОМЛП одновременно, долготы / фазы КА, град.: 174 / 0; 213,5 / 288; 253 / 216; 326,5 / 72; 287 / 144	15,00	7,83	8,76
Значения максимального перерыва T_{\max} и эффективного периода T_{ef} определены за полугодие между весенним и осенним равноденствиями. Долгота Солнца условно принята равной 180° .			

Таблица 3

Рекомендуемые системы из шести КА типа «Канопус-В-ИК»

Варианты спутниковых структур	ОМ, полоса обзора 880 км		ОМЛП, полоса обзора 2000 км
	T_{\max} , витки	T_{ef} , витки	$F(2 \text{ часа}), \%$
Структура лучшей системы $3 \cdot 2 = 6$ для ОМ, долготы / фазы КА, град.: 190 / 270; 190 / 90; 259,5 / 270; 259,5 / 80; 280,5 / 270; 280,5 / 100	12,00	5,62	30,07
Структура лучшей системы $6 \cdot 1 = 6$ для обнаружения ОМЛП, сдвиги долготы / фазы, град., между соседними КА: 32,32 / 291	28,81	8,52	1,33
Структура компромиссной системы для ОМ и ОМЛП одновременно, долготы / фазы КА, град.: 191,5 / 180; 225 / 198; 258 / 216; 348,5 / 180; 315 / 162; 281,5 / 144	13,31	6,82	6,69
Структура компромиссной системы $3 \cdot 2 = 6$, для ОМ и ОМЛП одновременно, долготы / фазы КА, град.: 190 / 270; 190 / 90; 300 / 45; 300 / 225; 245 / 145; 245 / 300	15,00	7,31	18,03
Значения максимального перерыва T_{\max} и эффективного периода T_{ef} определены за полугодие между весенним и осенним равноденствиями. Долгота Солнца условно принята равной 180° .			

5. Поиск вариантов структуры из пяти – шести космических аппаратов типа «Канопус-В-ИК» для решения двух задач: оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций и обнаружения малоразмерных лесных пожаров одновременно

Переходим к рассмотрению компромиссной модели из пяти КА типа «Канопус-В-ИК» для одновременного решения задач оперативного мониторинга ЧС и обнаружения малоразмерных лесных пожаров. Она представлена на рис. 4, где в левой части изображаются «спутниковые следы», длины которых вычислены для полосы обзора 2000 км широкозахватного ИК-радиометра, предназначенного для обнаружения МЛП, а в правой – 880 км моноблока ЦА, выполняющего оперативный мониторинг. Во втором случае, т. е. справа на рис. 4, не показаны «спутниковые следы», находящиеся вне белой зоны.

Компромисс построен на следующих принципах:

1) с целью обнаружения МЛП три восходящих (белых) и два нисходящих (черных) «спутниковых следа» даны в виде «лесенок» типа тех, что рекомендованы в [1];

2) в интересах оперативного мониторинга обе «лесенки» заключены в «белую зону», а горизонтальные сдвиги между их следами-«ступеньками» соответствуют полосе обзора моноблока ЦА.

По левому изображению на рис. 4 нетрудно убедиться, что каждый комплект из пяти восходящих (и нисходящих) следов КА № 1, 2, 3, 5 и 4 образует «лесенку», хотя и с неравномерными сдвигами ее спутниковых следов-«ступенек». Это удобно для обнаружения МЛП, несмотря на то, что размеры сдвигов по горизонтали, вычисленные по полосам обзора для оперативного мониторинга, слишком малы для первой задачи.

Вид конечной группировки «лесенок» «спутниковых следов» определяется следующими тремя параметрами, различные сочетания которых подвергались перебору и сравнению с помощью компьютерных расчетов:

- высота ступенек «лесенки»;
- вертикальное расстояние между «лесенками»;
- относительное горизонтальное положение «лесенок».

Выбранный компромиссный вариант спутниковой структуры для КС из пяти КА типа «Канопус-В-ИК» представлен в табл. 2.

Аналогичный характер имеет компромиссная модель для КС из шести КА типа «Канопус-В-ИК» с той разницей, что каждая из двух «лесенок» восходящих и нисходящих следов насчитывает по три «спутниковых следа». Результаты её расчета сохранились в табл. 3.

Итак, для обеих найденных компромиссных спутниковых структур из пяти и шести КА типа «Канопус-В-ИК» получены достаточно приличные значения всех трех критериев эффективности. Однако, они обладают следующим недостатком, важным для практического формирования систем из спутников данного типа: все КА находятся в разных плоскостях орбит, что нерационально для экономичного выведения их в космос.

В табл. 3 имеется еще одна компромиссная структура, состоящая из трех пар КА в трех плоскостях орбит, что удобно для рассматриваемого типа космических систем, хотя значения критериев эффективности здесь несколько уступают предыдущим вариантам. Данная структура, по-видимому, обладает наибольшей практической целесообразностью для одновременной реализации двух поставленных задач.

Таким образом, принципиально возможно создание системы из пяти – шести КА «Канопус-В-ИК» для одновременного решения задач оперативного мониторинга ЧС и обнаружения малоразмерных лесных пожаров.

Кроме того, целесообразно рассмотреть в будущем вопрос о создании сверхмалых КА с единственным целевым прибором – широкозахватным инфракрасным радиометром. Масса таких спутников, по предварительным оценкам, не превысит 150 – 200 кг. На их основе возможно формирование многоспутниковых систем с целью наиболее эффективного и экономичного решения задачи раннего обнаружения малоразмерных лесных пожаров.

Выводы

1. На примере исследования орбитального построения (структуры) возможной системы из КА типа «Канопус-В-ИК» для одновременной реализации двух разных целевых задач: обнаружения малоразмерных лесных пожаров и оперативного мониторинга ЧС, – продемонстрировано одно из направлений применения математического аппарата ВМОЗ и компьютерной программы на её основе.

2. Используя результаты предыдущей работы [1], выбраны лучшие структуры для систем из пяти и шести КА «Канопус-В-ИК», решающих задачу обнаружения малоразмерных лесных пожаров.

3. Внесены изменения в теорию ВМОЗ, необходимые для учета солнечной освещенности вдоль трасс спутников на земной поверхности. Коррекция потребовалась для анализа оперативного мониторинга ЧС.

4. Рассчитаны лучшие структуры для систем из пяти и шести КА типа «Канопус-В-ИК», решающих задачу оперативного мониторинга ЧС.

5. Найдены варианты компромиссных структур для группировок из пяти и шести КА типа «Канопус-В-ИК», которые можно рекомендовать для одновременной реализации двух разных целевых задач: обнаружения малоразмерных лесных пожаров и оперативного мониторинга ЧС.

6. В будущем целесообразно поставить вопрос о разработке сверхмалых КА с массой до 150 – 200 кг с единственным целевым прибором: широкозахватным ИК-радиометром; таким путём может быть сформирована специализированная космическая система для наиболее экономичного и эффективного обнаружения малоразмерных лесных пожаров.

Литература

1. Анализ орбитального построения перспективных космических систем на базе КА «Метеор-МП» и «Канопус-В-ИК» / Л. А. Макриденко, А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 168. – № 1. – С. 10 – 18.
2. Векторный метод синтеза орбит и структуры систем спутников для многополосного обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2016. – Т. 54 – № 4. – С. 334 – 346.
3. Векторная модель многоспутникового обзора Земли / А. В. Горбунов, А. Л. Чуркин, В. К. Саульский // Материалы третьей международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Во-

просы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2015 год. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – С. 31 – 39.

4. Векторный метод анализа спутниковых структур / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – Т. 147. – № 4. – С. 18 – 28.

5. Анализ систем спутников для периодического обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2017. – Т. 55 – № 4. – С. 290 – 304.

6. Применение векторной модели обзора Земли для анализа ИСЗ на изомаршрутных орбитах / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – Т. 153. – № 4. – С. 29 – 46.

7. Векторная модель обзора Земли и направления ее использования / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 156. – № 1. – С. 21 – 32.

8. Vector Model of Multi-Satellite Earth Survey and Its Use Directions / V. K. Saulskiy // 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (May 30 – June 1, 2017). – 2017.

9. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» / под ред. Л. А. Макриденко и др. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 130 с.

10. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – 4-е изд. – Москва : Наука, 1977. – С. 51 – 56.

Поступила в редакцию 01.10.2019

*Леонид Алексеевич Макриденко, доктор технических наук, генеральный директор, т. (495) 365-56-10.
Александр Викторович Горбунов, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, т. (495) 623-41-81.
E-mail: vniiem@orc.ru.*

Ирина Юрьевна Ильина, заместитель начальника научно-производственного комплекса «Космические комплексы», т.: (495) 623-57-74, e-mail: nprk@hq.vniiem.ru.

*Виктор Константинович Саульский, доктор технических наук, главный специалист, т. (495) 623-57-74, e-mail: ntk.vniiem@bk.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

ASSESSMENT OF POSSIBILITIES FOR BUILDING A SPACE SYSTEM COMPRISING «CANOPUS-V-IK» SATELLITES FOR MONITORING OF EMERGENCIES AND DETECTION OF SMALL SIZE FOREST FIRES

**L. A. Makridenko, A.V. Gorbunov,
I. Iu. Ilina, V. K. Saulskii**

A new satellite Kanopus-V-IK was launched in 2017. It is the first Russian satellite bearing a wide-coverage IR radiometer able to detect small forest fires 24 hours per day. The flight tests of the satellite confirmed the possibility of early detection of very small areas of fire (from 5 x 5 m). The payload of Kanopus-V-IK also includes the imaging equipment unit integrated on baseline Canopus-V satellite. This unit performs real-time monitoring of natural and man-made disasters, and is used only during the day time, to be more precise, when the Sun elevation angles are no less than 10°. Strict requirements are imposed on revisit time, as far as the tasks of detection of small size forest fires and on-line monitoring of emergencies are concerned. That is why, in both cases, there is a need to build and maintain a system of five or more satellites. The article provides the resolution of the

task of optimization of five and six satellite constellations for monitoring emergencies, as well as small size forest fires, and considers the options of orbital structures for simultaneous implementation of two functions: detection of small size forest fires and real-time monitoring of emergencies. The elaborated options of orbital structures may be used in the future assessment of the possibility to build a space system comprising the Canopus-V-IK satellites that will ensure the implementation of both tasks. The main purpose of the article is to illustrate one of directions of application of the Earth survey vector model and a computer program developed on its basis.

Key words: wide-coverage infrared radiometer, mission hardware unit, small forest fire, real-time monitoring, vector model for the Earth survey, orbital structure, maximum survey time-out, effective period of survey, survey error, survey error frequency, operating interval, repeating orbit.

References

1. Analysis of orbital structure of prospective space systems comprising the Meteor-MP and Canopus-V-IK satellites / L. A. Makridenko, A. V. Gorbunov, I. Iu. Ilina [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2019. – Vol. 168. – N. 1. – P. 10 – 18.
2. Vector method for synthesis of orbits and structure of satellite systems for analysis of satellite systems for multiswath Earth observation / V. K. Saulskii // Space research. – 2016. – Vol. 54. – N. 4. – P. 334 – 346.
3. Vector model of multi-satellite Earth survey / A. V. Gorbunov, A. L. Churkin, V. K. Saulskii // Proceedings of the 3rd International Scientific Conference ‘Critical Issues in Designing of ERS Systems’. Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. Appendix 2015 – Moscow, 2015. – P. 31 – 39.
4. Vector method for analysis of satellite structures / A.V. Gorbunov, V.K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2015. – Vol. 147. – N. 4. – P. 18 – 28.
5. Analysis of satellite systems for periodical Earth observation / V. K. Saulskii // Space research. – 2017. – Vol. 55. – N. 4. – P. 290 – 304.
6. Application of vector model for Earth survey for analysis of satellites on repeating orbits / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2016. – Vol. 153. – N. 4. – P. 29 – 46.
7. Vector model for Earth survey and its application areas / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2017. – Vol. 156. – N. 1. – P. 21 – 32.
8. Vector Model of Multi-Satellite Earth Survey and Its Use Directions / V. K. Saulskiy // 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (May 30 – June 1, 2017). – 2017.
9. Canopus-V space system with Canopus-V-IK satellite for real-time monitoring of man-made and natural disasters / edited by L. A. Makridenko et al. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2017. – P. 130.
10. Mathematics reference book for researchers and engineers/ G. Korn, T. Korn. – 4th edition. – Moscow : Nauka, 1977. – P. 51 – 56.

Leonid Alekseevich Makridenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Director General, tel.: +7 (495) 365-56-10.

Aleksandr Viktorovich Gorbunov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),

Deputy Director General, tel.: +7 (495) 623-41-81.

Irina Iurevna Ilina, Deputy Head of Space Systems Research and Production Center,

tel.: +7 (495) 623-57-74, e-mail: npk@hq.vniiem.ru.

Viktor Konstantinovich Saulskii, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Chief Specialist,

tel.: +7 (495) 623-57-74, e-mail: ntk.vniiem@bk.ru.

(JC «VNIIEM Corporation»).