

УДК 629.783

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

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

Актуальной проблемой для России является борьба с лесными пожарами. Эффективную поддержку практическому решению этой проблемы могут оказать спутники, снабжаемые широкозахватными инфракрасными радиометрами для обнаружения малоразмерных лесных пожаров. Очевидно, что затраты времени и средств на ликвидацию малоразмерных лесных пожаров будут минимальны. Проведено исследование орбитального построения многоспутниковой группировки из космических аппаратов с широкозахватными инфракрасными радиометрами, первый образец которых испытан на спутнике «Канопус-В-ИК» в 2017 году. Рассмотрено свыше 250 тысяч вариантов спутниковой структуры для систем с числом космических аппаратов до 14-ти включительно. Для анализа, сравнения и выбора лучших и наилучших вариантов применялся специальный критерий: «частота ошибок обзора» на пяти рабочих интервалах с длительностью от 1-го до 3-х часов. Вычисление данного критерия требовало предварительного определения всех перерывов обзора (их количество составляло от 400 до 5000 на один вариант) вместе с частотами их возникновения на поясе широт от 43° до 70°, в пределах которого находятся практически все хозяйственно значимые лесные массивы нашей страны. Для расчета полных наборов перерывов обзора и их частот применялась универсальная компьютерная программа на основе векторной модели обзора Земли. В таблицах и на графиках представлены многочисленные результаты расчетов и исследований, которые могут быть использованы при практическом выборе орбитального построения возможной многоспутниковой системы для обнаружения малоразмерных лесных пожаров.

Ключевые слова: малоразмерный лесной пожар, векторная модель обзора Земли, частота ошибок обзора, рабочий интервал, эквидистантная K-модель, эквидистантная структура, диаграмма частот перерывов обзора, «острые» минимумы.

Введение

14 июля 2017 года был выведен на орбиту новый российский спутник «Канопус-В-ИК», на борту которого впервые появился широкозахватный инфракрасный (ИК) радиометр, способный обнаруживать малоразмерные лесные пожары (МЛП) с площадью от 25 кв. м. В будущем возможно создание специализированной космической системы из космических аппаратов (КА), оснащаемых подобными приборами. Это позволит оперативно выявлять лесные пожары на начальном этапе их развития, когда затраты на тушение минимальны.

Учитывая потенциальную актуальность разработки и создания космической системы для раннего обнаружения МЛП, в статье [1] выполнен анализ орбитального построения, то есть спутниковой структуры, группировок из 5-ти и 6-ти КА, снабжаемых широкозахватными ИК-радиометрами типа того, что опробован на спутнике «Канопус-В-ИК». В настоящей статье этот анализ продолжается и максимально расширяется. Будут подробно исследованы системы, количество спутников в которых изменяется от 1-го до 14-ти. В отличие от [1], где рассматривались лишь два типа структур, соответствовавших двум фиксированным значениям сдвигов долготы восходящих узлов соседних орбит,

будут рассчитаны все структуры с аналогичными долготными сдвигами из диапазона 0° – 60°, а в отдельных случаях 0° – 90°.

В работе [1] в качестве критерия эффективности, по значениям которого сравнивались и отбирались лучшие варианты структуры, применялась частота ошибок обзора на рабочем интервале с длительностью 2 часа. В данном исследовании также используется этот критерий, но число рабочих интервалов возрастает до пяти и включает 1, 1,5, 2, 2,5 и 3 часа.

Отмеченное масштабное расширение рамок исследований направлено на то, чтобы получить исчерпывающий объем результатов, которые могут быть востребованы при практическом рассмотрении различных вариантов формирования многоспутниковой группировки для обнаружения малоразмерных лесных пожаров на территории России.

Настоящее исследование будет выполняться на основе математического аппарата векторной модели обзора Земли (ВМОЗ). Будут использоваться понятия, обозначения, аналитические выражения, алгоритмы расчета и критерии эффективности обзора, изложенные в [2]. Сущность и практическая ценность ВМОЗ сводится к следующим операциям:

– проведение (для каждого варианта спутниковой структуры) расчетов с помощью универсальной компьютерной программы на базе ВМОЗ по определению всех перерывов обзора вместе с частотами их появления;

– вычисление (используя найденные составы перерывов обзора вместе с их частотами) значений критерия эффективности обзора (для всех вариантов);

– анализ полученных результатов и выделение лучших и наилучших вариантов спутниковых структур по значениям критерия эффективности обзора.

1. Исходные данные и критерий эффективности обзора

В статье будут исследоваться многочисленные группировки спутников, предназначенные для наблюдения МЛП с помощью бортовых широкозахватных ИК-радиометров типа того, который был опробован на КА «Канопус-В-ИК» [3]. Ширина полосы обзора ИК-радиометра равна 2000 км. Поэтому будут рассматриваться условные КА, снабженные ИК-радиометрами с такой же полосой.

Остальные параметры, используемые в качестве исходных данных в настоящем исследовании, также взяты из справочника по КА «Канопус-В-ИК» [3]. Будем считать, что все спутники находятся на одинаковых почти круговых солнечно-синхронных орбитах (ССО) со средней высотой 520 км и наклоном $97,4^\circ$. Эта орбита является «изомаршрутной» [1] с периодом повторения трассы на земной поверхности через каждые 1200 витков и 79 суток. Ее драконический период $T_{dr} = 1,58$ часа.

В качестве заданной зоны обзора на Земле будет фигурировать пояс широт от 43° до 70° , охватывающий основную обжитую территорию России. В этом поясе находятся практически все хозяйственно значимые лесные массивы нашей страны.

Орбитальное построение (структура) группировки из K спутников будет фиксироваться, задавая сдвиги восходящих узлов соседних орбит $\Delta\lambda_{k, k+1}$ и сдвиги фаз $\Delta\tau_{k, k+1}$ для КА на соседних орбитах (точнее в соседних плоскостях орбит). Подобную структуру удобно кратко записывать следующим образом:

$$K\text{-структура: } \Delta\lambda_{k, k+1}, \Delta\tau_{k, k+1}, \quad k = 1, 2, \dots, K-1. \quad (1)$$

Как отмечено во введении, исследование, сравнение и выбор лучших и наилучших (оптимальных) вариантов спутниковой структуры должны производиться по критерию эффективности обзора, являющемуся функцией от всех перерывов обзора с уче-

том частот их появления. Вид критерия обязан соответствовать заданной задаче наблюдения Земли.

В [2] для двух конкретных задач: 1) глобального метеорологического мониторинга и 2) обнаружения МЛП, – предложен безразмерный критерий частоты ошибок обзора $F(a)$ на заданном рабочем интервале a , измеряемом в часах. Критерий вычисляется по формуле:

$$F(a) = \sum_{n=m}^{n_{\max}} (t_n - a/T_{dr}) f_n / t_{\text{mid}}, \quad t_m > a/T_{dr}, \quad t_{m-1} \leq a/T_{dr}, \quad (2)$$

где $t_n, n = 1, 2, \dots, n_{\max}$ – перерывы обзора, выражаемые в количестве витков орбиты, то есть драконических периодов T_{dr} обращения спутника по орбите, T_{dr} измеряются в часах, причем для КА «Канопус-В-ИК» $T_{dr} = 1,58$ часа [3]; f_n – относительная частота перерыва t_n в составе всех перерывов; t_{mid} – средний период обзора заданного пояса широт Земли, вычисляемый по следующей формуле:

$$t_{\text{mid}} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} t_n f_n.$$

Для задачи раннего обнаружения МЛП смысл критерия частоты ошибок обзора $F(a)$ состоит в том, что он равен относительному числу пожаров, не обнаруженных до окончания рабочих интервалов a . Рабочий интервал начинается в случайный момент времени, когда площадь МЛП достигает минимальной величины, обнаруживаемой с помощью широкозахватного ИК-радиометра, устанавливаемого на спутнике. Пропуск пожара может произойти только на достаточно «длинных» перерывах обзора, превышающих минимальное значение:

$$t_{\min} = a/T_{dr}.$$

При «длинном» перерыве обзора t_n МЛП не удастся выявить до окончания a только в том случае, когда начало интервала a пришлось на начальный участок $t_n - t_{\min}$ «длинного» перерыва. Учитывая вышесказанные соображения, можно убедиться в корректности формулы (2) для вычисления критерия $F(a)$.

Формула (2) будет использоваться для сравнения и выбора лучших и наилучших вариантов орбитального построения систем КА для раннего обнаружения МЛП. Составы перерывов обзора вместе с их частотами, необходимые для подстановки в формулу (2), будут определяться с помощью упомянутой выше компьютерной программы на базе математического аппарата ВМОЗ.

В настоящий момент не хватает данных для точно-го задания длительности рабочих интервалов. По этой причине будут рассмотрены сразу пять конкретных значений: 1, 1,5, 2, 2,5 и 3 часа. Для каждого из них будут найдены лучшие и наилучшие спутниковые структуры по критерию (2) при разных числах спутников в космической системе. Уточним, что термины «оптимальный» и «наилучший» эквивалентны. Смысл понятия «лучший» будет разъяснен ниже.

В тесной связи с выбранным перечнем рабочих интервалов находится количество спутников, которое будет использоваться в расчетах: от 1-го до 14-ти. Ограничение максимального числа КА объясняется тем, что наилучшая (оптимальная) система из 14-ти спутников обеспечивает, как показали расчеты, полное отсутствие ошибок обзора уже на минимальном рабочем интервале в 1 час. Следовательно, дальнейший рост состава группировки КА теряет смысл.

2. Эквидистантные К-модели и структуры

Вполне очевидно, что количество вариантов построения многоспутниковой системы, фиксируемых всевозможными сочетаниями значений долготных сдвигов $\Delta\lambda_{k, k+1}$ и фазовых сдвигов $\Delta\tau_{k, k+1}$, в (1), может быть очень велико, что затрудняет расчеты и исследование. Однако, используя свойства ВМОЗ, можно выделить относительно узкий класс спутниковых структур, среди которых находятся лучшие и наилучшие варианты орбитального построения группировок КА для раннего обнаружения МЛП.

В [2] приведены формулы, определяющие переход от спутниковой структуры к ее единственной ВМОЗ и обратный переход от ВМОЗ к породившей ее структуре. Отсюда вытекает, что между структурой любой группировки КА и ее векторной моделью на произвольной широте Земли существует взаимно однозначное соответствие. Это дает весьма удобный способ анализа и выбора принципиального вида лучших структур систем КА. Дело в том, что на картине ВМОЗ, которая наглядно отображает все перерывы обзора, можно поступательно перемещать цепочки спутниковых узлов и следов для отдельных КА исследуемой системы. Можно видеть, как меняется состав перерывов обзора. Таким путем удастся добиться их равномерной минимизации и сокращения больших перерывов. Понятно, что это приведет к более эффективному обзору заданной области Земли и уменьшению частоты ошибок обзора по формуле (2). Найденной таким путем картине ВМОЗ будет однозначно соответствовать лучшая спутниковая структура, вычисляемая по формулам, приведенным в [2].

Используем только что описанный способ с целью уменьшения состава исследуемых спутниковых структур для задачи раннего обнаружения лесных пожаров. На рис. 1 представлен пример ВМОЗ, построенной для системы из 4-х КА на нижней широте заданного пояса $[43^\circ, 70^\circ]$. Построение выполнено по правилам, изложенным в статье [2]. Видно, что модель состоит из прямолинейных цепочек спутниковых узлов и следов. Восходящие узлы и следы изображены светлыми, а нисходящие, наоборот, – темными. Более крупными размерами выделены цепочки узлов и следов 1-го спутника. Направление цепочек задается шаг-вектором r_1 . Для каждого КА расстояние между его восходящими цепочками фиксируется шаг-вектором r_2 , а расстояние от восходящей до нисходящей цепочки – бета-вектором $\beta_{1,0}$ (а также бета-вектором $\beta_{1,7}$).

В один из восходящих узлов 1-го КА помещено начало координат, поэтому восходящие и нисходящие цепочки узлов и следов 1-го спутника на рис. 1 занимают стационарное положение, а цепочки 2-го, 3-го и 4-го КА могут перемещаться поступательно, то есть параллельно самим себе (и шаг-вектору r_1). Вертикальные расстояния между спутниковыми следами равны перерывам обзора. Учитывая это, можно убедиться, что наиболее равномерное, а потому и наилучшее положение цепочек восходящих (и нисходящих) узлов и следов возникает, когда они задаются одинаковыми векторами сдвигов v для цепочек соседних КА на рис. 1.

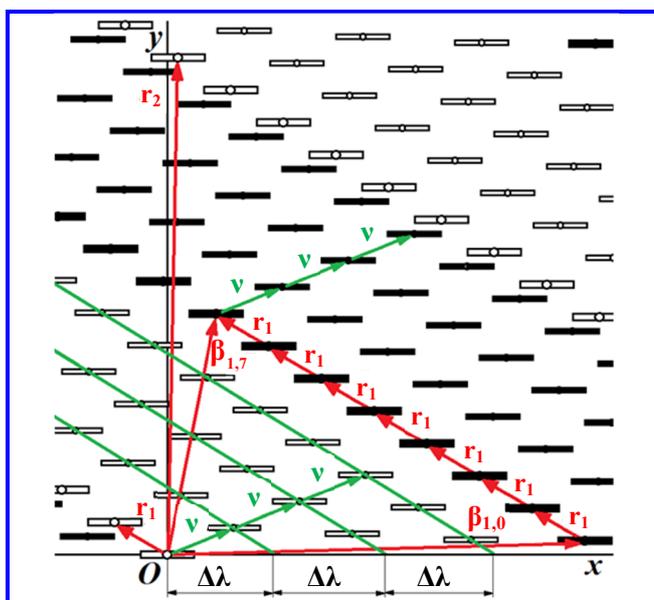


Рис. 1. Векторная модель обзора широты 43° для эквидистантной системы из 4-х космических аппаратов с широкозахватными ИК-радиометрами (полоса обзора 2000 км)

Назовем векторную модель для K спутников, фиксируемую одинаковыми векторами сдвигов \mathbf{v} , эквидистантной K -моделью, потому что в ней относительное положение цепочек спутниковых узлов и следов для любой пары соседних КА остается неизменным. Придавая различные значения координатам векторов \mathbf{v} , получаем класс эквидистантных K -моделей, среди которых должны находиться наилучшие варианты моделей. Весьма удобно, что этот класс, хотя и довольно обширен, но вполне поддается расчету (на основе компьютерной программы на базе ВМОЗ) и исследованию, что мы увидим уже в следующем разделе.

Рассмотрим подробнее найденный класс эквидистантных K -моделей и соответствующих им спутниковых эквидистантных K -структур, или просто эквидистантных структур.

Пусть вектор сдвигов \mathbf{v} изменяется за счет перемещения его конца по линии цепочки спутниковых узлов и следов, то есть по направлению шаг-вектора \mathbf{r}_1 . При подобном перемещении возникают новые эквидистантные K -модели и однозначно соответствующие им спутниковые K -структуры. В [2] установлено, что у всех таких структур будут одни и те же долготные сдвиги $\Delta\lambda$, численно равные расстоянию от начала координат векторной модели по оси абсцисс до точки пересечения с наклонной линией, на которой находится цепочка восходящих узлов. Фазовые сдвиги при рассматриваемом перемещении конца вектора \mathbf{v} периодически повторяют весь перечень значений от 0° до 360° .

Теперь предположим, что конец вектора \mathbf{v} перемещается только в горизонтальном направлении. Тогда, как следует из [2], сохраняются фазовые сдвиги в результирующей спутниковой структуре, а сдвиги по долготам восходящих узлов соседних орбит изменяются в любых пределах.

В целом полученному классу эквидистантных K -моделей соответствует класс спутниковых структур, которые также следует считать эквидистантными. Они фиксируются следующим образом: эквидистантная K -структура

$$\Delta\lambda_{k, k+1} = \Delta\lambda, \Delta\tau_{k, k+1} = \Delta\tau, \quad k = 1, 2, \dots, K-1. \quad (3)$$

В дальнейших расчетах и исследовании будут рассматриваться долготные сдвиги $\Delta\lambda$ от 0° до 60° для систем из 4-х – 14-ти КА и от 0° до 90° для 1-го – 3-х КА. Проведенный анализ показал, что именно в этих интервалах находятся наилучшие ВМОЗ и соответствующие им спутниковые струк-

туры по значениям критериев (1). Фазовые сдвиги будут изменяться в полном диапазоне от 0° до 360° .

Значения долготных и фазовых сдвигов будем чередовать через 1° , что, в конечном итоге, составит существенно больше 250 тысяч вариантов спутниковых структур для всего рассматриваемого диапазона чисел спутников. Столь внушительное количество вариантов удалось вычислить и проанализировать за несколько дней, благодаря высокому быстродействию уже не раз упомянутой компьютерной программы. Скорость расчетов можно охарактеризовать следующими примерами вычислений на компьютере: на определение полного состава перерывов обзора вместе с частотами их возникновения для одного варианта структуры затрачивалось $\sim 0,09$ с в случае системы из 2-х КА, $\sim 0,13$ с для 6-ти КА и $\sim 0,21$ с для 14-ти КА. Уточняем, что при этом широтный пояс от 43° до 70° разделялся на весьма малые пояса в $0,1^\circ$, так что их количество достигало 271.

3. Лучшие и наилучшие эквидистантные структуры

Используя метод, изложенный в разделе 1, выполнены расчеты и исследование эквидистантных структур из 1-го – 14-ти спутников, предназначенных для раннего обнаружения малоразмерных лесных пожаров на поясе широт от 43° до 70° . Основные результаты представлены в табл. 1 – 5 и на графиках на рис. 2 – 6.

Все результаты вычислений отразить в рамках одной статьи невозможно. Поэтому графики построены лишь для лучших структур. Определим этот термин. При конкретном (фиксированном) долготном сдвиге $\Delta\lambda$ лучшей структурой и лучшей группировкой КА станет та, которую фиксирует фазовый сдвиг $\Delta\tau$, обеспечивающий минимум критерия $F(a)$ (2) на всем интервале значений $\Delta\tau$ от 0° до 360° .

Среди всех лучших структур и группировок КА выделяются наилучшие, для которых реализуется наименьшая величина критерия (2) при изменении долготного сдвига $\Delta\lambda$ в диапазоне от 0° до 60° (для одного спутника и систем из 2-х и 3-х КА потребовалось повысить правую границу этого интервала до 90°).

Рассмотрим графики на рис. 2, построенные для лучших эквидистантных структур из 8-ми – 14-ти КА для критерия частоты ошибок обзора $F(1 \text{ час})$. Поскольку верхний предел значений данного критерия на всех графиках на рис. 2 – 6 равен 20%, на рис. 2 отсутствуют графики для меньших чисел спутников, хотя все расчеты по ним выполнены. Это уточнение касается и всех остальных рис. 3 – 6. По

графику для 14-ти КА можно установить, что наилучшие группировки из 14-ти спутников, долготные сдвиги которых принадлежат диапазону $14^\circ - 15^\circ$, реализуют нулевую частоту $F(1 \text{ час}) = 0$, то есть полное отсутствие ошибок обзора. Поэтому группировки из 15-ти и более КА становятся избыточными, и в статье не рассматриваются.

Почти достигается отсутствие ошибок обзора для наилучшей группировки из 13-ти КА; точнее реализуется $F(1 \text{ час}) = 0,05\%$. С ростом числа КА долготные сдвиги для наилучших структур постепенно смещаются вправо, а соответствующие минимумы $F(1 \text{ час})$ повышаются. Помимо наилучших группировок, на рис. 2 наблюдается еще ряд локальных минимумов критерия $F(1 \text{ час})$ при всех числах спутников.

В табл. 1 представлены сдвиги по долготе и фазе, а также значения частоты ошибок обзора на рабочем интервале 1 час для всех наилучших группировок КА. При этом для 14-ти КА приведена только одна структура для долготного сдвига 14° , соответствующего левой границе диапазона группировок, обеспечивающих полное отсутствие ошибок обзора.

Заметим, что и в остальных табл. 2 – 5 при наличии диапазона наилучших группировок, для которых нет ошибок обзора, даны параметры только группировок на левых границах таких диапазонов.

На рис. 3 изображены графики критерия $F(1,5 \text{ часа})$ для лучших структур из 5 – 14-ти КА. Видно, что при количестве спутников от 9-ти до 14-ти существуют расширяющиеся диапазоны долготных сдвигов, которым соответствуют наилучшие группировки КА, минимизирующие частоту ошибок обзора до 0. Для самых больших чисел КА: от 12-ти до 14-ти, возникает уже больше одного такого диапазона. В табл. 2 приведены данные для наилучших группировок из 1-го – 8-ми КА и наилучших

группировок, соответствующих левым границам диапазонов наилучших структур из 9 – 14-ти КА, для которых реализуется нулевая частота ошибок обзора.

На рис. 4 и в табл. 3 даны лучшие и наилучшие структуры на рабочем интервале 2 часа. Состав группировок, обеспечивающих отсутствие ошибок обзора, возрос до 7-ми – 14-ти КА. В табл. 3 для подобных группировок приводятся, как и ранее, данные только для структур на левых границах их диапазонов долготных сдвигов.

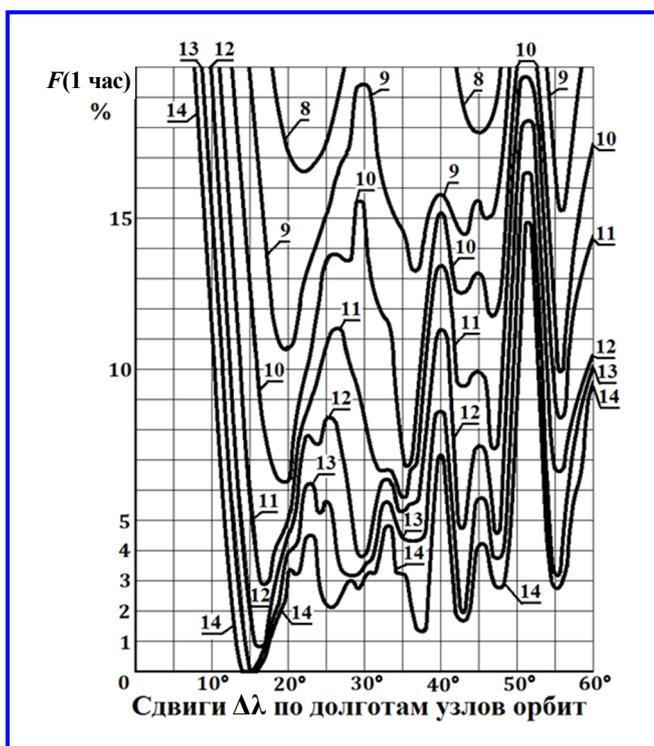


Рис. 2. Графики частот ошибок обзора $F(1 \text{ час})$ для лучших группировок из космических аппаратов с широкозахватными ИК-радиометрами, цифры обозначают число космических аппаратов

Таблица 1

Наилучшие системы космических аппаратов для рабочих интервалов $a = 1 \text{ час}$

	Число космических аппаратов													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\Delta\lambda$, град.	–	76	47	40	30	27	23	23	20	20	17	17	15	14
$\Delta\tau$, град.	–	83	132	97	132	132	132	132	132	132	132	135	132	146
$F(a)$, %	87,9	75,9	63,8	52,4	41,6	31,5	23,9	16,5	10,9	6,2	3,0	0,9	0,05	0

Таблица 2

Наилучшие системы космических аппаратов для рабочих интервалов $a = 1,5 \text{ часа}$

	Число космических аппаратов													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\Delta\lambda$, град.	–	77	50	40	34	30	28	25	22	20	18	16	15	14
$\Delta\tau$, град.	–	74	18	18	18	18	18	28	24	19	19	19	19	15
$F(a)$, %	81,9	63,8	46,1	31,0	19,1	10,6	4,5	0,7	0	0	0	0	0	0

На рис. 5 и 6 и в табл. 4 и 5 показаны лучшие и наилучшие группировки КА по критериям соответственно $F(2,5 \text{ часа})$ и $F(3 \text{ часа})$. Видно, как расширяются диапазоны наилучших структур с ростом рабочих интервалов до 2,5 и 3 часов.

Рассмотрим, как соотносятся результаты статьи [1] с данными в табл. 1 – 5. В [1] анализировались только два типа структур, а точнее два долготных сдвига:

$$\Delta\lambda = 193,965^\circ / K \text{ (1-й тип)} \text{ и } \Delta\lambda = 193,962^\circ / K \text{ (2-й тип)}, \text{ (4)}$$

где K – число спутников в группировке, которая фактически является эквидистантной, поскольку соответствует условиям (3).

В [1] установлено, что 1-й тип структур из (4) превосходит 2-й, так как приводит к меньшим величинам критерия частоты ошибок обзора на

рабочем интервале 2 часа, то есть $F(2 \text{ часа})$. Там же даны два минимальных значения $F(2 \text{ часа})$, найденных на диапазоне фазовых сдвигов от 0° до 360° для 1-го типа структур в (4): 7,29% при $K = 5$ и 1,33% при $K = 6$. В настоящей статье в табл. 3 наилучшие значения того же критерия оказались равными соответственно 7,1 и 1,1 %, то есть лучше, но не намного. Можно показать, что подобный же результат наблюдается и при всех остальных числах КА. Это свидетельствует о том, что 1-й тип лучших структур из [1] весьма близок к оптимальным (наилучшим) структурам.

На этом прекращаем исследование графиков лучших систем на рис. 2 – 6 и характеристик наилучших систем в табл. 1 – 5. Внимательный читатель может самостоятельно сделать ряд дополнительных выводов о поведении этих систем.

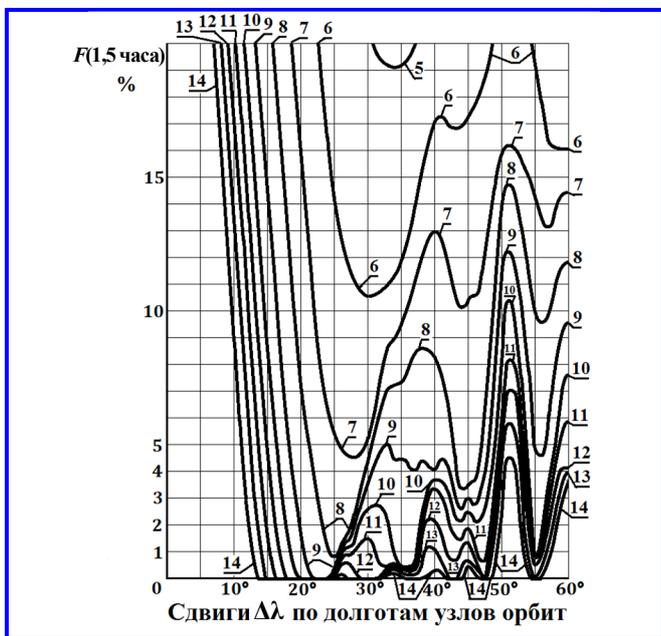


Рис. 3. Графики частот ошибок обзора $F(1,5 \text{ часа})$ для лучших группировок из космических аппаратов с широкозахватными ИК-радиометрами, цифры обозначают число космических аппаратов

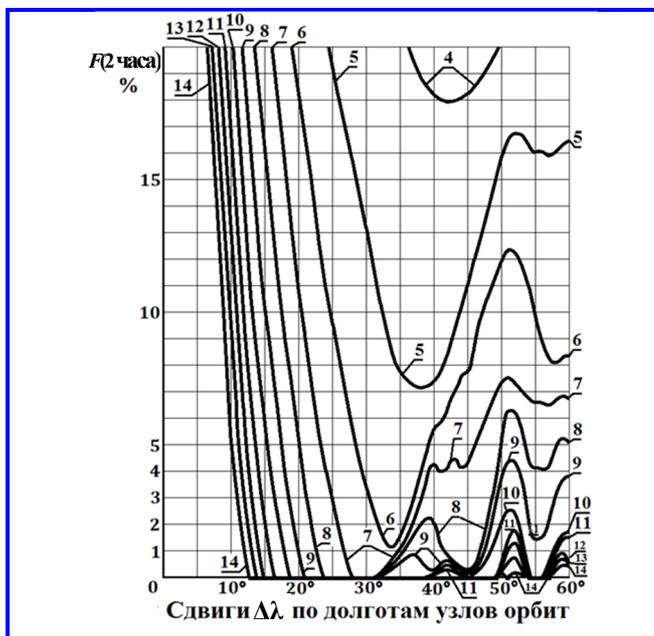


Рис. 4. Графики частот ошибок обзора $F(2 \text{ часа})$ для лучших группировок из космических аппаратов с широкозахватными ИК-радиометрами, цифры обозначают число космических аппаратов

Таблица 3

Наилучшие системы космических аппаратов для рабочих интервалов $a = 2$ часа

	Число космических аппаратов													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\Delta\lambda$, град.	–	72	53	43	38	34	28	24	21	19	17	15	14	13
$\Delta\tau$, град.	–	146	264	264	264	267	292	0	0	0	0	0	0	0
$F(a)$, %	77,4	54,9	33,8	18,0	7,1	1,1	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 4

Наилучшие системы космических аппаратов для рабочих интервалов $a = 2,5$ часа

	Число космических аппаратов													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\Delta\lambda$, град.	–	69	55	45	41	32	27	23	20	18	16	15	14	13
$\Delta\tau$, град.	–	150	150	150	151	159	187	9	9	5	8	0	0	0
$F(a)$, %	73,3	46,6	23,2	8,3	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 5

Наилучшие системы космических аппаратов для рабочих интервалов $a = 3$ часа

	Число космических аппаратов													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\Delta\lambda$, град.	–	74	57	50	38	30	25	22	20	17	15	14	13	12
$\Delta\tau$, град.	–	36	36	37	49	45	38	24	9	20	23	15	12	11
$F(a)$, %	69,1	38,4	14,3	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

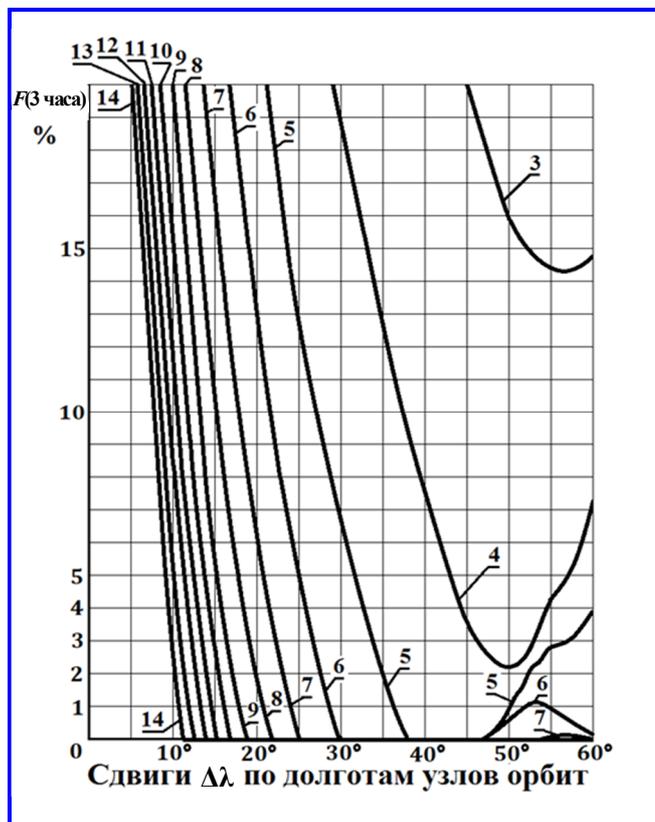
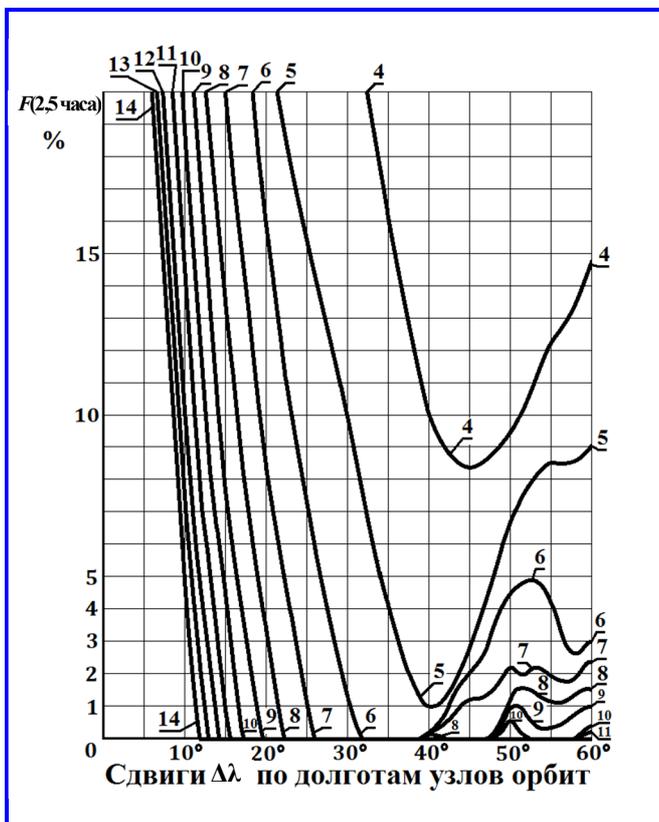


Рис. 5. Графики частот ошибок обзора $F(2,5$ часа) для лучших группировок из космических аппаратов с широкозахватными ИК-радиометрами (цифры обозначают число космических аппаратов)

Рис. 6. Графики частот ошибок обзора $F(3$ часа) для лучших группировок из космических аппаратов с широкозахватными ИК-радиометрами (цифры обозначают число космических аппаратов)

Далее рассмотрим рис. 7, на котором в удобном графическом виде представлены основные данные из всех табл. 1 – 5. По этим данным можно наглядно выбирать эквидистантные структуры, рекомендуемые для конкретных сочетаний требований по раннему обнаружению малоразмерных лесных пожаров. Например, задавая длительность рабочего интервала a и допустимую величину критерия $F(a)$, можно определять минимально допустимое количество спутников. Наоборот, при фиксированном числе КА определяются наименьшие значения $F(a)$, которые достигаются для разных рабочих интервалов a .

В дополнение к графикам на рис. 7 в табл. 6 приведены минимальные количества спутников

для разных уровней максимально допустимых значений частоты ошибок обзора при различных длительностях рабочих интервалов.

По данным в табл. 6 несложно убедиться, что полного отсутствия ошибок обзора можно добиться только с помощью наилучших эквидистантных систем из не менее, чем 14-ти КА при рабочем интервале $a = 1$ час, 9-ти КА при $a = 1,5$ часа, 7-ми КА при $a = 2$ часа, 6-ти КА при $a = 2,5$ часа и 5-ти КА при $a = 3$ часа.

Для обеспечения допустимого уровня частоты ошибок обзора в 1% потребуется не менее 12-ти КА при $a = 1$ час, 8-ми КА при $a = 1,5$ часа, 7-ми КА при $a = 2$ часа, 6-ти КА при $a = 2,5$ часа и 5-ти КА при $a = 3$ часа.

Системы до 3-х КА включительно полностью непригодны, поскольку не в состоянии обеспечить даже частоту ошибок обзора в 10% при всех рассмотренных значениях рабочих интервалов.

Для 4-х КА можно реализовать более или менее приемлемую частоту ошибок обзора в 3% только при $a = 3$ часа.

Для 5-ти КА достигается безошибочный обзор при $a = 3$ часа и частота ошибок обзора в 2% при $a = 2,5$ часа.

Для 6-ти КА обеспечивается безошибочный обзор при $a = 2,5$ и 3 часа, а также уровень частоты ошибок обзора в 2% при $a = 2$ часа. Более того, для системы из 6-ти спутников, как можно установить по соответствующему графику на рис. 4, при рабочем интервале $a = 2$ часа можно добиться предельного уменьшения частоты ошибок обзора почти до 1%.

4. Оптимальные сдвиги фаз

В предыдущем разделе на графиках на рис. 2 – 6 фигурировали лучшие структуры. Они соответствовали минимальным значениям критериев $F(a)$, достигаемым при оптимальных сдвигах фаз Δt из всего диапазона возможных значений от 0° до 360° . Исследуем, как изменяются эти критерии в зависимости от фазовых сдвигов и насколько глубокие минимумы $F(a)$ возникают при этом.

Для примера рассмотрим наилучшие эквидистантные структуры по критерию $F(2 \text{ часа})$, для группировок из 4-х – 7-ми спутников. По данным табл. 3 они реализуются при следующих долготных сдвигах: $\Delta\lambda = 43^\circ$ для 4-х КА, $\Delta\lambda = 38^\circ$ для 5-ти КА, $\Delta\lambda = 34^\circ$ для 6-ти КА. Для них на рис. 8 показаны графики критерия $F(2 \text{ часа})$ в зависимости от фазового сдвига.

Для 7-ми КА, как показали расчеты, не полностью отраженные в табл. 3, критерий $F(2 \text{ часа})$ снижается до 0 и остается на этом предельном уровне в диапазоне сдвигов долгот от 28° до 31° , поэтому для построения соответствующих графиков на рис. 8 выбраны сразу три значения долготного сдвига: 28° , $29,5^\circ$ и $30,5^\circ$.

По графикам для 4-х и 5-ти спутников видно, что глобальные и притом ярко выраженные, глубокие минимумы $F(2 \text{ часа})$ возникают при одном и том же значении сдвига фаз 264° . Для 6-ти спутников аналогичный минимум появляется при сдвиге фаз 267° . Учитывая большую глубину данных минимумов, нужно будет обеспечивать достаточно точное поддержание оптимальных значений фазовых сдвигов при практической ре-

ализации группировок для раннего обнаружения лесных пожаров.

На трех графиках для семи КА сохраняется минимальное значение $F(2 \text{ часа}) = 0$ в следующих диапазонах значений фазовых сдвигов: $292^\circ - 300^\circ$ при $\Delta\lambda = 28^\circ$, $269^\circ - 294^\circ$ при $\Delta\lambda = 29,5^\circ$ и $265^\circ - 279^\circ$ при $\Delta\lambda = 30,5^\circ$. Наиболее широкий из них, как и следовало ожидать, оказался у «среднего» долготного сдвига $29,5^\circ$.

Таблица 6

Минимальное количество космических аппаратов для обеспечения задаваемой максимально допустимой частоты ошибок обзора

Допустимая частота ошибок обзора, %	Рабочие интервалы, ч				
	1	1,5	2	2,5	3
0	14	9	7	6	5
1	12	8	7	6	5
2	12	8	6	5	5
3	11	8	6	5	4
4	11	8	6	5	4
5	11	7	6	5	4
10	10	7	5	4	4

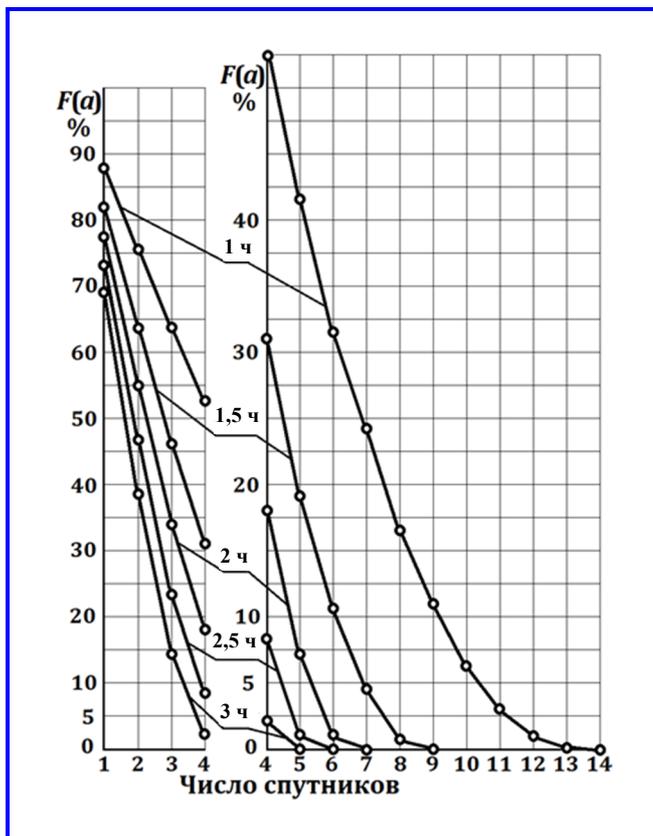


Рис. 7. Частоты ошибок обзора $F(a)$ для наилучших систем космических аппаратов при рабочих интервалах a , равных 1, 1,5, 2, 2,5 и 3 часа

5. «Острые» минимумы критерия частоты ошибок обзора

Особо следует остановиться на совпадающих по фазовому сдвигу $\Delta\tau = 264^\circ$ минимумах у пары графиков на рис. 8: для 4-х и 5-ти КА. При более детальных расчетах с шагом по $\Delta\tau$ в $0,001^\circ$ выясняется, что оба минимума наступают при еще более точном совпадении экстремальных значений сдвигов фаз, равном $264,304^\circ$. Такое идеальное совпадение сдвигов фаз, обеспечивающих минимумы критерия частоты ошибок обзора для структур с различными числами спутников, не может быть случайным. Оно получило объяснение в предыдущей работе [2].

Отметим, что оба анализируемых минимума функции $F(2 \text{ часа})$ имеют «острый» характер, принципиально отличаясь от привычных «гладких» экстремумов, для которых существует обращающаяся в нуль в точке экстремума 1-я производная (от функции, принимающей экстремальное значение). «Острый» минимум означает, что в непосредственной близости от экстремального значения аргумента, $\Delta\tau = 264,304^\circ$ график минимума представляет собой пересечение двух наклонных и почти прямых линий. Остается добавить, что величину этого экстремального аргумента можно вычислить по формулам из [2], которые в данном конкретном случае принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= 365^\circ \operatorname{mod}(1; -a / T_{dr}) = \\ &= 360^\circ \operatorname{mod}(1; -2/1,58) \approx 264,3038^\circ. \end{aligned} \quad (5)$$

Подробное обоснование появления «острых» минимумов и формулы (5) содержится в [2]. Поэтому нет смысла повторять с небольшими уточнениями (ввиду отличия векторной модели для широты 43° от модели для экватора Земли) приведенное там и довольно длинное изложение.

Требуется отметить, что «острые» минимумы появляются не всегда. В частности, по данным в табл. 1 – 5 можно установить наличие таких минимумов для 5 – 13-ти КА при рабочем интервале $a = 1$ ч, для 3-х – 7-ми КА при $a = 1,5$ ч, для 3-х – 5-ти КА при $a = 2$ ч, для 2 – 4-х КА при $a = 2,5$ ч и для 2 – 3-х КА при $a = 3$ ч. Точные значения их фазовых сдвигов вычисляются по формуле (5). В остальных случаях минимумы $F(a)$, во-первых, не являются «острыми», а во-вторых, наступают при аргументах $\Delta\tau$, отличных от величин, получаемых из формулы (5).

6. Диаграммы частот перерывов обзора

Наиболее полную характеристику работы космической системы, выполняющей наблюдение заданной области Земли, дает диаграмма частот полного набора перерывов обзора. Однако, ввиду того, что количество перерывов измеряется тысячами, на практике приходится исследовать более обзримую диаграмму, в которой перерывы распределяются по отдельным интервалам. Разумеется, частоты перерывов обзора в пределах одного интервала складываются.

Рассмотрим в качестве показательных примеров две диаграммы на рис. 9, в которых частоты перерывов обзора суммируются по интервалам длиной в $0,1$ витка. Для их построения выбрана пара наилучших группировок из тех, что исследовались в разделе 4: 1) структура из 6-ти КА с параметрами: долготный сдвиг $\Delta\lambda = 34^\circ$, фазовый сдвиг $\Delta\tau = 267^\circ$; 2) «срединная» группировка из 7-ми КА, задаваемая сдвигами $\Delta\lambda = 29,5^\circ$ и $\Delta\tau = 269^\circ$.

Рабочему интервалу $a = 2$ ч соответствует перерыв обзора

$$t^* = 2/T_{dr} = 1,2658 \text{ витка}. \quad (6)$$

Видно, что для 1-й группировки лишь небольшое число перерывов превышает $1,3$ витка, причем наибольший из них находится в интервале $2,2 - 2,3$ витка. Сумма частот этих перерывов лишь немного превышает 1% . Напротив, частота перерывов обзора, попавших в интервал $1,2 - 1,3$ витка, очень велика и равна $33,09\%$. Используемая компьютерная про-

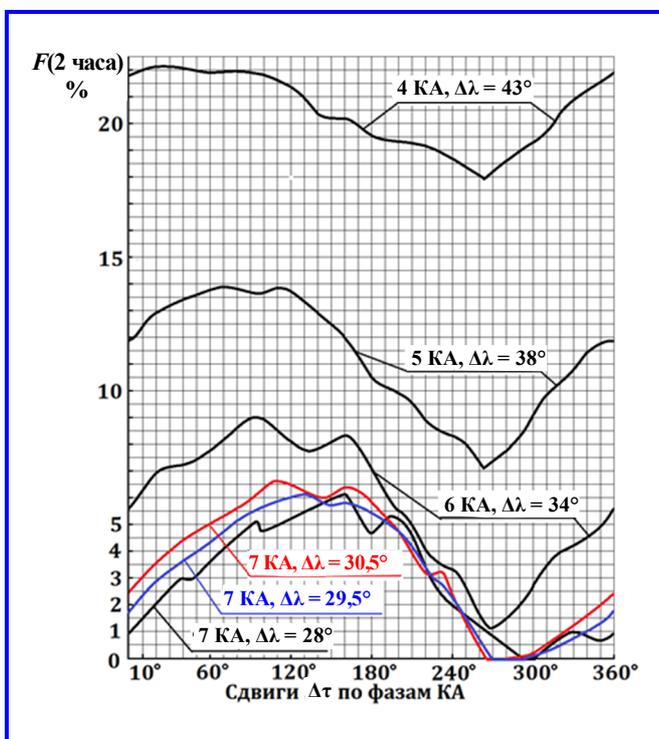


Рис. 8. Графики частот ошибок обзора $F(2 \text{ часа})$ для группировок из 4-х, 5-ти, 6-ти и 7-ми космических аппаратов с наилучшими сдвигами долгот $\Delta\lambda$

грамма может вычислять суммарные частоты перерывов по сколь угодно малым интервалам. Уменьшая интервал до 0,001 витка, убеждаемся, что все перерывы интервала 1,2 – 1,3 витка попадают в единственный маленький интервал 1,258 – 1,259 витка и оказываются меньше перерыва t^* из (6).

2-ая группировка (для 7-ми КА) вообще не имеет перерывов, превышающих 1,3 витка. Более того, в широком интервале 1,2 – 1,3 витка все перерывы уместаются в одном узком интервале 1,252 – 1,253 витка, правая граница которого также меньше перерыва t^* . Частота перерывов данного узкого интервала достигает 27,37%.

Итак, все перерывы обзора для наилучшей группировки из 7-ми КА и почти все перерывы для 6-ти КА оказались меньше t^* из (6). Именно по этой причине для 7-ми КА отсутствуют ошибки обзора, а для 6-ти КА их частота чуть больше 1%. Кроме того, можно констатировать, что частоты перерывов обзора на обеих диаграммах близки друг к другу на подавляющем количестве интервалов. Это означает, что обе группировки обладают приблизительно одинаковой эффективностью обзора.

Как следует из диаграмм на рис. 9, максимальный перерыв обзора для группировки из 7-ми КА возникает с весьма большой частотой. Частота максимального перерыва для 6-ти КА, наоборот, очень мала. Следовательно, подтверждается вывод статьи [2] о том, что максимальный перерыв обзора не стоит применять в качестве критерия эффективности обзора, потому что он не может считаться адекватным представителем всех перерывов обзора, так как часто реализуется с чрезмерно низкой частотой.

7. Применение полученных результатов

Наилучшие спутниковые структуры, являются оптимальными по критерию частоты ошибок обзора (2). Тем не менее, они не должны немедленно рекомендоваться для практического применения, так как проблема выбора орбитального построения космической системы носит сложный системный характер. Это значит, что, помимо критерия эффективности обзора, в процессе данного выбора требуется учитывать еще ряд других технико-технологических факторов и организационных условий и обстоятельств. К ним относятся:

- доступные ракеты-носители и новые возможности по запускам спутников на орбиты (в том числе с применением пакетного и попутного выведения в космос);
- технологические и организационные проблемы управления и поддержания непрерывного функционирования многоспутниковой группировки;

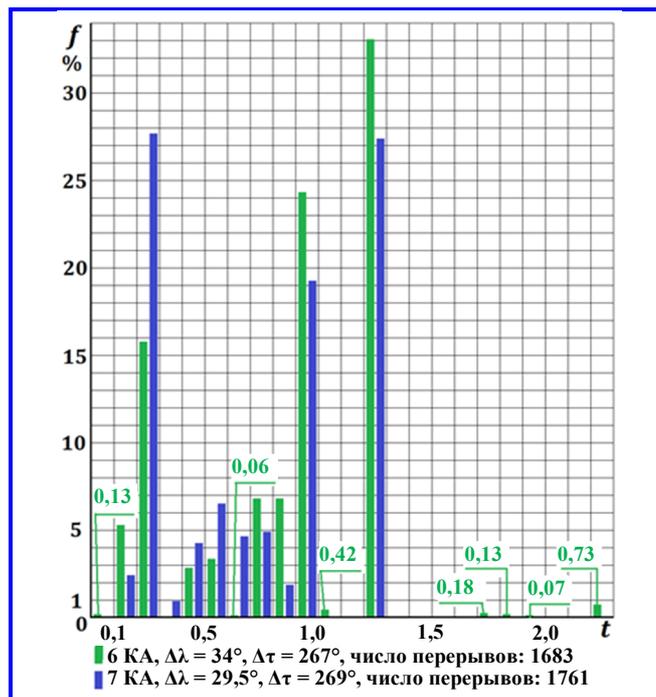


Рис. 9. Диаграммы частот f диапазонов перерывов обзора t с длиной в 0,1 витка орбиты для «наилучших» группировок из 6-ти и 7-ми космических аппаратов

- способы восполнения группировки спутников при завершении срока активного существования спутника и в случаях непредусмотренных отказов;
- современный и планируемый состав средств наземного комплекса приема и распространения космических данных;
- имеющиеся в наличии и перспективные средства наземных лесохозяйственных ведомств и служб по обеспечению тушения лесных пожаров.

Этот перечень можно существенно расширить, добавляя фактические потребности в организации тушения лесных пожаров по различным регионам, возможности оперативного и эффективного усвоения космических данных в региональных и территориальных подразделениях лесоохраны и т. д.

Подводя итоги, можно констатировать, что на этапе проектирования космической системы для обнаружения малоразмерных лесных пожаров в процедуру выбора ее орбитального построения целесообразно включать, как составную часть, метод расчета и анализа, использованный в настоящей работе. Ожидается, что будут востребованы и приведенные в статье результаты вычислений.

Заключение

В качестве рекомендуемого типа орбитального построения многоспутниковых систем для обнаружения малоразмерных лесных пожаров обоснованы

эквилистантные спутниковые структуры. Они образуются при одинаковых сдвигах долгот для восходящих узлов соседних орбит и одинаковых сдвигах фаз для спутников на соседних орбитах.

С помощью компьютерной программы на основе векторной модели обзора Земли определены составы перерывов обзора вместе с частотами их возникновения на поясе широт $[43^\circ, 70^\circ]$ для эквидистантных структур с числом КА от 1-го до 14-ти. При этом сдвиги долгот изменялись от 0° до 60° , а сдвиги фаз – от 0° до 360° . Используя найденные перерывы и их частоты, вычислены значения критериев эффективности обзора, в качестве которых выступали частоты ошибок обзора на рабочих интервалах с длительностью 1, 1,5, 2, 2,5 и 3 часа. Результаты расчетов представлены в таблицах и на графиках. Выполняя их анализ, выделены наилучшие спутниковые структуры при разных количествах КА.

Установлено, что на графиках критериев частоты ошибок обзора, построенных в зависимости от сдвигов фаз (при фиксированных сдвигах долгот), как правило, возникают глубокие минимумы. Более того, в некоторых случаях наблюдаются не просто глубокие, но и «острые» минимумы, которые вблизи экстремальных значений аргументов (точнее при экстремальных сдвигах фаз) имеют вид острых углов, образуемых путем пересечения почти прямых наклонных линий. В связи с этим при практическом создании космической системы обнаружения МЛП потребуется достаточно точное поддержание оптимальных сдвигов фаз.

Большой объем полученных результатов, представленных в таблицах и на графиках, а также примененный метод, включающий расчет перерывов обзора с их частотами и последующее сравне-

ние вариантов орбитального построения по критериям частоты ошибок обзора на задаваемых рабочих интервалах, могут быть использованы в будущем на этапе проектирования космической системы обнаружения МЛП.

Необходимо уточнить, что проблема выбора орбитального построения космической системы носит, в целом, сложный системный характер, а потому и процедура ее решения должна учитывать, наряду с результатами оптимизации по критериям эффективности обзора, ряд дополнительных технико-технологических и организационных факторов. В эту процедуру целесообразно включать, как составную часть, метод расчета и анализа, использованный в настоящей статье.

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. Исследование орбитального построения группировок спутников для метеорологического мониторинга / Л. А. Макриденко, А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020 – Т. 179. – № 6. – С. 28 – 41.
3. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» / под редакцией д-ра техн. наук Л. А. Макриденко, д-ра техн. наук С. Н. Волкова, канд. техн. наук А. В. Горбунова [и др.]. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 130 с.

Поступила в редакцию 28.12.2020

Леонид Алексеевич Макриденко, доктор технических наук, генеральный директор, т. (495) 365-56-10.

Сергей Николаевич Волков, доктор технических наук, первый заместитель генерального директора, т. (495) 608-84-67.

E-mail: vniiem@orc.ru.

Александр Викторович Горбунов, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, т. (495) 623-41-81, e-mail: gor@hq.vniiem.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»).

INVESTIGATION OF ORBITAL STRUCTURE OF A SPACE SYSTEM FOR DETECTION OF SMALL-SCALE FOREST FIRES

L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov,
I. Iu. Ilina, V. K. Saulskii

Fighting forest fires is a critical issue for Russia. The efficient support in solution of this issue may be provided by the satellites equipped with wide-coverage infrared radiometers for detection of small-scale forest fires. Obviously, in this case time and money expenditures for suppression of forest fires will be minimal. The orbital structure of a constellation comprising multiple satellites with wide-coverage infrared radiometers, the first model of which had been tested as part of Canopus-V-IK in 2017, was studied. More than 250 thousand versions of satellite structure for systems comprising up to 14 satellites were considered. A special criterion was used for analysis, comparison and selection of the best versions: 'survey error frequency' over five operating intervals from 1 to 3 hours. Calculation of this criterion required a preliminary determination of all survey interruptions (their number was from 400 to 5000 for one version) with the frequencies of their occurrence within the latitudes from 43° to 70°, where almost all forest areas important for the economy of our country are situated. For calculation of complete sets of survey interruptions and their frequencies, a general-purpose computer program based on the Earth survey vector model was used. The multiple results of calculations and studies that may be used for practical selection of the orbital structure of a probable multi-satellite system for detection of small-scale forest fires are presented in tables and graphs.

Key words: small-scale forest fire, Earth survey vector model, survey error frequency, operating interval, equidistant K-model, equidistant structure, survey interruption frequency diagram, 'sharp' minimums.

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. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2019. – Vol. 168. – No. 1. – Pp. 10 – 18.
2. Investigation of orbital structure of space systems for meteorological monitoring / L. A. Makridenko, A. V. Gorbunov, I. Iu. Ilina [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2020 – V. 179. – No. 6. – Pp. 28 – 41.
3. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V-IK / edited by Doctor of Technical Sciences (D. Sc.) L. A. Makridenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.) S. N. Volkov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.) A. V. Gorbunov [et al.]. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2017. – 130 p.

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

Sergei Nikolaevich Volkov, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.),

First Deputy Director General, tel.: +7 (495) 608-84-67.

E-mail: vniem@orc.ru

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.vniem.ru.

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

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

(JC «VNIEM Corporation»).