

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.783

АНАЛИЗ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ КА «МЕТЕОР-МП» И «КАНОПУС-В-ИК»

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

При разработке космических систем из КА ДЗЗ заказчики обычно стремятся обеспечить регулярный обзор заданного пояса широт земного шара с требуемой периодичностью повторения. Однако, на практике это невыполнимо. На любом участке земной широты, и тем более широтного пояса, при работе каждой КС ДЗЗ возникает не один, а множество перерывов между очередными моментами съёмки или иного дистанционного зондирования. В связи с этим для анализа эффективности КС ДЗЗ нужно сначала найти полный ансамбль из всех перерывов обзора и их частот на каждой широте и широтном поясе в целом, для чего требуется соответствующий алгоритм. Для данной цели предлагается «векторная модель обзора Земли». Она позволяет наглядно отобразить на плоскости в координатах: географическая долгота [в радианах] – время [в драконических периодах обращения ИСЗ, т. е. витках орбиты], все перерывы обзора и их частоты на произвольной широте Земли. На базе модели разработан искомый алгоритм, пригодный для КС ДЗЗ из любого числа спутников с любой структурой. Приведены примеры применения компьютерной программы (на базе этого алгоритма) для расчёта и анализа КС из КА типа «Метеор-МП» и «Канопус-В-ИК».

Ключевые слова: векторная модель обзора Земли, спутниковый узел, спутниковый след, спутниковая структура, критерий эффективности КС ДЗЗ, эффективный период обзора, ошибка обзора, частота ошибок обзора, изомаршрутная орбита, перерыв обзора, частота перерыва обзора, ансамбль перерывов обзора, ВМОЗ.

Введение

В технических заданиях (ТЗ) на разработку перспективных космических систем (КС) из КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), как правило, фигурирует требование обеспечить регулярное наблюдение заданной области земного шара с заданной периодичностью повторения. На самом деле это требование и теоретически, и практически невыполнимо. Суть в том, что на каждом локальном участке земной широты, и тем более широтного пояса, в процессе работы любой космической системы будет возникать не один, а множество самых разных перерывов обзора между очередными моментами съёмки или иного зондирования.

В связи со сказанным для адекватной оценки эффективности КС ДЗЗ нужно находить и исследовать полный ансамбль, т. е. весь состав перерывов обзора в совокупности с частотами их возникновения на произвольной широте и заданном широтном поясе в целом. Однако, до недавнего времени отсутствовал универсальный аналитический метод для данной цели.

В последние несколько лет в ряде статей [1 – 7] была опубликована так называемая «векторная модель обзора Земли» (ВМОЗ). Она позволяет в статичном, наглядном и удобном для аналитического представления и исследования виде отобразить на

плоскости в системе координат географическая долгота (в радианах) – время (в драконических периодах обращения ИСЗ, т. е. попросту в витках орбиты) все перерывы обзора и их частоты на произвольной широте Земли. Модель пригодна для любой, сколь угодно большой и сложной по орбитальному построению КС ДЗЗ.

На основе ВМОЗ разработана компьютерная программа, обеспечивающая определение полного ансамбля перерывов обзора и их частот для любой, сколь угодно большой КС ДЗЗ с произвольно задаваемой спутниковой структурой. Программа рассчитывает КС из нескольких десятков КА практически мгновенно. Это открывает широкие возможности для сравнения многочисленных вариантов орбитального построения многоспутниковых систем и поиска среди них наиболее эффективных.

В данном докладе описываются свойства векторной модели обзора Земли, затем вводятся критерии эффективности КС ДЗЗ (в виде функций от всех перерывов обзора с их частотами) и далее излагаются примеры применения рассматриваемой компьютерной программы для анализа и выбора орбитального построения космических систем из КА типа «Метеор-МП» и «Канопус-В-ИК».

Пример построения и основные свойства векторной модели обзора Земли

На рис. 1 дан простейший пример, иллюстрирующий превращение структуры КС в её векторную модель на произвольной широте Земли (на данном рисунке для наглядности выбран экватор) и обратный переход от модели к структуре.

На рис. 1 структура КС задаётся парами угловых параметров, определяющих относительные положения спутников: $\Delta\delta$ – сдвиг по долготе восходящего узла орбиты и $\Delta\phi$ – сдвиг по фазе в плоскости орбиты; обе величины выражаются в радианах. На векторной модели в системе координат «долгота – время» каждому спутнику с некоторым номером соответствует его «спутниковый узел», имеющий тот же номер. Спутниковый узел отображает место и время пересечения трассой КА фиксированной широты Земли (здесь – это экватор). Поэтому абсциссой узла служит долгота (в радианах) точки пересечения, а ординатой – момент времени (в витках орбиты) этого пересечения. Координаты очередного узла рассчитываются по следующим формулам:

$$\Delta y_1 = -\Delta\phi_1 / (2\pi), \Delta y_2 = -\Delta\phi_2 / (2\pi); \quad (1)$$

$$\Delta x_1 = \Delta\delta_1 + l\Delta\phi_1 / (2\pi), \Delta x_2 = \Delta\delta_2 + l\Delta\phi_2 / (2\pi), \quad (2)$$

где l – межвитковое расстояние (в радианах).

Каждому спутнику соответствует бесконечное множество спутниковых узлов, возникающих при очередных пересечениях его трассы с фиксированной широтой. Для их расчёта достаточно прибавлять к векторам, определяющим по

формулам (1, 2) положения начальных спутниковых узлов, различные (линейные) комбинации из следующих векторов:

$$\mathbf{r}_0 = (2\pi; 0), \mathbf{r}_1 = (-l; 1), \quad (3)$$

где 1-е числа – это проекции векторов на ось абсцисс, а 2-е – на ось ординат.

1-е свойство ВМОЗ – это то, что на ней отображаются все перерывы обзора на фиксированной широте и можно вычислить их частоты.

Для этого нужно провести через спутниковые узлы одинаковые горизонтальные отрезки, называемые «спутниковыми следами». Длина каждого «следа» соответствует участку широты (в радианах), пересечённому полосой обзора КА. Вертикальные интервалы между соседними следами равны перерывам обзора, измеряемым в витках орбиты. На рис. 1 показаны отдельные следы и перерывы t_1 и t_2 между ними. Относительные частоты этих перерывов f_1 и f_2 вычисляются по формулам, приведённым на рис. 1.

Опираясь на 1-е свойство, разработан быстродействующий алгоритм расчёта полного ансамбля перерывов обзора вместе с их частотами на любой широте Земли и задаваемом широтном поясе в целом [4, 5]. Длительность расчёта системы из 4-х КА типа «Метеор-МП» измеряется сотыми долями секунды и даже с ростом количества спутников до 100 она остаётся меньше 2 с. Столь высокое быстродействие обеспечивает широкие возможности для анализа и сравнения многочисленных вариантов орбитального построения КС и выбора среди них наиболее оптимальных.

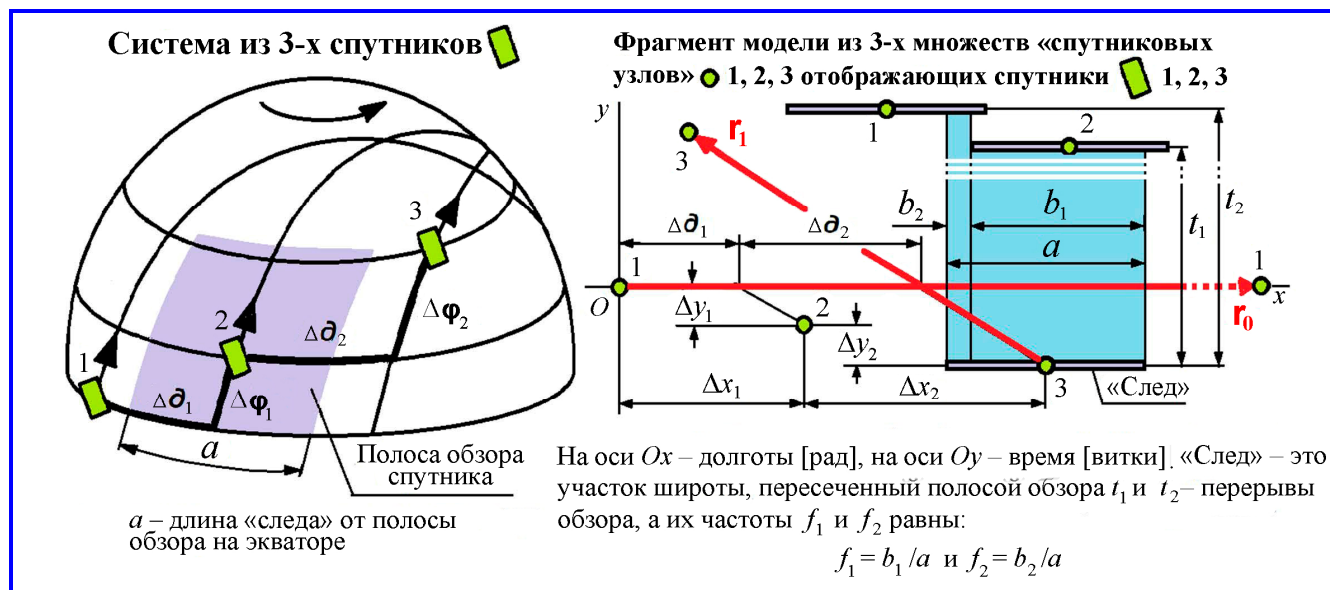


Рис. 1. Система спутников и её векторная модель на экваторе

2-м свойством ВМОЗ является наличие взаимно однозначного соответствия между любой спутниковой структурой и её (векторной) моделью на произвольно фиксируемой широте Земли.

2-е свойство вытекает из того, что в дополнение к формулам (1, 2), фиксирующим модель по спутниковой структуре, действуют формулы

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_1 &= -2\pi\Delta y_1, \Delta\varphi_2 = -2\pi\Delta y_2; \\ \Delta\partial_1 &= \Delta x_1 + l\Delta y_1, \Delta\partial_2 = \Delta x_2 + l\Delta y_2, \end{aligned} \quad (4)$$

определяющие обратный переход от модели к структуре системы спутников. Детальное описание и обоснование сущности и всех свойств векторной модели обзора Земли содержится в уже упомянутых публикациях [1 – 7].

В статьях [4 – 7] подробно изложен алгоритм расчёта ансамбля перерывов обзора и их частот на отдельной широте и широтном поясе в целом. Однако, в завершающую стадию алгоритма вкралась ошибка: там некорректно используется суммирование (точнее интегрирование) значений относительных частот $f_n(\varphi)$ перерыва t_n по широтам φ для получения итоговой относительной частоты f_n данного перерыва на широтном поясе $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ в целом. Складывать допускается лишь абсолютные частоты (по времени, например, за сутки). Они обозначаются $g_n(\varphi)$ и вычисляются так:

$$g_n(\varphi) = 24f_n(\varphi) / (T_{mid}(\varphi)T_{dr}) [1/\text{сут.}], \quad (6)$$

где $T_{mid}(\varphi) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} t_n f_n(\varphi)$ – средний период обзора (в витках) на широте φ ; T_{dr} – драконический период обращения спутника (в часах).

Абсолютная частота обзора g_n на поясе широт $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ равна:

$$g_n = \sum_{m=1}^M g_n(\varphi) \cos \varphi_m / \sum_{m=1}^M \cos \varphi_m [1/\text{сут.}], \quad (7)$$

где M – число малых поясов, на которые разделён пояс $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$; $\varphi_m = \varphi_{\min} + (m-0,5)\Delta\varphi$ – средняя широта m -го малого широтного пояса, $m = 1, 2, \dots, M$.

Особенности применения векторной модели обзора Земли для космических систем из КА на изомаршрутных орбитах

Практически все КА ДЗЗ выводятся на солнечно-синхронные и притом изомаршрутные орбиты (ИМО), трассы которых повторяются с периодом T витков и L суток. Для ИМО удобно вместо радиа-

нов ввести на оси абсцисс векторной модели следующую единицу масштаба:

$$e = 2\pi/T. \quad (8)$$

Тогда большие «шаг-векторы» $\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots$, широко применяемые в математическом аппарате ВМОЗ [1, 2, 4, 5], получают целочисленные проекции не только на вертикальную, но и на горизонтальную оси, что удобно для построения и исследования векторных моделей [4, 5].

Структура КС из N_{sat} спутников задаётся парами долгот восходящих узлов орбит и фаз спутников:

$$\partial_k [\text{рад}] \text{ и } \varphi_k [\text{рад}], k = 1, 2, \dots, N_{sat}. \quad (9)$$

Векторная модель фиксируется парами координат восходящих спутниковых узлов:

$$x_k \text{ и } y_k, k = 1, 2, \dots, N_{sat}. \quad (10)$$

Переход от структуры к её модели:

$$\begin{aligned} x_k &= (T\partial_k + L\varphi_k)/(2\pi)[e], y_k = -\varphi_k/(2\pi)[\text{витков}], \\ k &= 1, 2, \dots, N_{sat}. \end{aligned} \quad (11)$$

Обратный переход от модели к структуре КС:

$$\begin{aligned} \partial_k &= 2\pi(x_k + Ly_k)/T[\text{рад}], \varphi_k = -2\pi y_k[\text{рад}], \\ k &= 1, 2, \dots, N_{sat}. \end{aligned} \quad (12)$$

Важный частный случай – КС с равными сдвигами между соседними КА:

$$\begin{aligned} \text{её структура: } \partial_k &= (k-1)\Delta\partial, \varphi_k = (k-1)\Delta\varphi, \\ k &= 1, 2, \dots, N_{sat}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{её модель: } x_k &= (k-1)\Delta x, y_k = (k-1)\Delta y, \\ k &= 1, 2, \dots, N_{sat}. \end{aligned} \quad (14)$$

Критерии эффективности космических систем ДЗЗ

Состав перерывов обзора в зависимости от количества КА в КС и числа малых поясов, на которые разбивается заданный широтный пояс, может измеряться десятками, сотнями, тысячами, десятками тысяч и т. д. Ясно, что для оценки эффективности КС ДЗЗ требуются критерии, являющиеся некоторыми функциями от всего ансамбля перерывов обзора с их частотами.

Первым и давно применяемым показателем является максимальный перерыв обзора T_{max} . Разумеется, он легко выделяется среди всех перерывов обзора. Однако, вполне очевидно, что T_{max} не даёт адекватного представления об эффективности решения большинства задач ДЗЗ.

В связи с этим предлагаются ещё два новых критерия: 1 – «эффективный период» обзора T_{ef} и 2 – «частота (вероятность) ошибок обзора» $F(a)$.

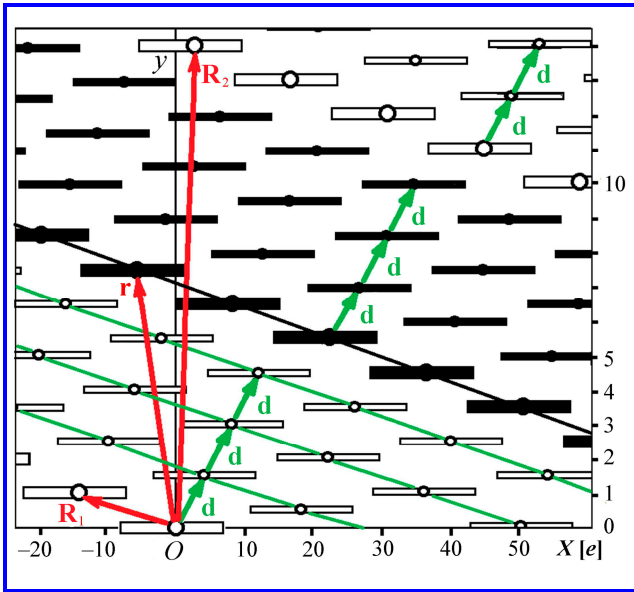


Рис. 2. Векторная модель гидрометеорологической космической системы из 4-х перспективных КА «Метеор-МП»

1-й критерий уже встречался в последних статьях по данной теме. Это условно одинаковый для всех точек заданной области Земли период повторения наблюдений. Он вычисляется так, чтобы потери, т. е. негативный эффект, появляющийся в процессе использования реальной КС ДЗЗ из-за всех перерывов обзора, был равен аналогичному эффекту при постоянном перерыве обзора, который и называется «эффективным периодом (обзора)». Данный показатель рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ef} = T_{dr} \sum_{n=1}^{n_{max}} t_n^2 g_n / 24, \quad (15)$$

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

2-й критерий $F(a)$ вводится впервые и будет актуален, по крайней мере, для КС ДЗЗ на основе КА «Метеор-МП» и «Канопус-В-ИК». Ошибки обзора возникают при нарушении требования ТЗ по съёмке регулярно чередующихся или случайных событий за время не более заданного a [часов] после их начала. Назовём a «рабочим (съёмочным) интервалом».

Например, для перспективной КС «Метеор-МП» предписано обеспечить наблюдения в каждом из одинаковых и регулярно повторяющихся интервалов времени. Важнейшей задачей возможной КС из КА «Канопус-В-ИК» является обнаружение мало-размерных очагов лесных пожаров (ОЛП) за за-

данное короткое время после случайных моментов их возгораний.

В обоих вариантах, т. е. и для регулярных, и для случайных событий,

$$F(a) = \sum_{n \geq m}^{n_{max}} (t_n T_{dr} - a) g_n / 24. \quad (16)$$

Анализ орбитального построения гидрометеорологической космической системы «Метеор-МП»

Выше отмечалось, что компьютерная программа, разработанная на основе 1-го свойства ВМОЗ, отличается высоким быстродействием, что позволяет сравнивать многочисленные варианты орбитального построения многоспутниковых группировок, выбирая среди них наилучшие по критериям эффективности. Однако, можно сразу резко сократить количество перебираемых структур, опираясь на 2-е свойство ВМОЗ. Покажем, как это делается на примере анализа векторной модели Гидрометеорологической космической системы (ГКС) из 4-х перспективных КА «Метеор-МП». Эта модель, построенная для экватора, представлена на рис. 2.

ГКС предназначена для «двустороннего» обзора Земли, осуществляемого и на восходящих, и на нисходящих ветвях трасс ИСЗ. На рис. 2, как и во всех публикациях по ВМОЗ, «восходящие» спутниковые узлы и следы изображены белыми, а «нисходящие» – чёрными. Узлы и следы 1-го спутника выделяются на рис. 2 более крупными размерами. Начало координат помещено в некоторый узел 1-го спутника. Положения всех узлов и следов этого КА с учётом того, что орбита КА «Метеор-МП» – изомаршрутная с периодом повторения $T = 199$ витков и $L = 14$ суток, определяются следующими векторами:

$$\mathbf{R}_1 = (-14e; 1), \mathbf{R}_2 = (-3e; 14), \mathbf{r} = (-5, 5e; 7, 5). \quad (17)$$

Позиции цепочек следов 1-го спутника изменять нельзя, поскольку они зависят только от заданных параметров орбиты. Цепочки следов остальных спутников, наоборот, разрешается свободно перемещать поступательно, т. е. так, чтобы они оставались параллельными самим себе. При этом, благодаря 2-му свойству ВМОЗ, возникают различные варианты спутниковых структур.

Для равномерной минимизации ансамбля перерывов обзора, которые являются (по 1-му свойству ВМОЗ) вертикальными интервалами между соседними спутниковыми следами, нужно, чтобы це-

почки следов 2-го, 3-го и 4-го спутников равномерно заполняли пространство между цепочками восходящих и нисходящих следов 1-го спутника. Все варианты моделей, а потому и спутниковых структур, соответствующих этому принципу, возникают при перемещении цепочек следов 2 – 4-го спутников по наклонным прямым линиям, параллельным цепочке нисходящих следов 1-го спутника и находящимся на одинаковых вертикальных расстояниях друг от друга. Цепочки следов 2 – 4-го спутников, а потому и соответствующие им варианты спутниковой структуры ГКС, фиксируются векторами

$$\mathbf{d} = (\mathbf{r} - z\mathbf{R}_1) / N_{sat}, \quad (18)$$

где z может быть любым числом.

По формулам (12) при всех значениях множителя z сдвиги по долготе (между КА системы) сохраняются равными $\Delta\delta = \pi/N_{sat} = 45^\circ$, а сдвиги по фазе $\Delta\phi$, наоборот, варьируют во всём диапазоне от 0° до 360° .

Заметим, что долготный сдвиг 45° зафиксирован и в проекте ТТЗ на ГКС «Метеор-МП». Это основано на многолетнем опыте эксплуатации космических метеорологических систем в нашей стране и за рубежом. Следовательно, только что проведённый на основе свойств

ВМОЗ анализ наглядно подтвердил его правильность.

Итак, для оптимизации орбитального построения ГКС из 4-х спутников «Метеор-МП» осталось найти наилучший сдвиг по фазе.

Главное требование проекта ТТЗ – отсутствие ошибок обзора на регулярных рабочих интервалах $a = 3,5$ часа для съёмочной аппаратуры инфракрасного (ИК) и микроволнового диапазонов (для последней только на широтах выше 40°).

На рис. 3 и 4 даны графики критериев эффективности $F(a)$, T_{max} и T_{ef} в зависимости от сдвига фаз в системе из 4-х КА «Метеор-МП». Графики построены для инфракрасного (ИК) прибора МСУ-МР-МП (рис. 3) и микроволнового МТВЗА-ГЯ-МП (рис. 4).

Как несложно установить по графикам на обоих рис. 3 и 4, главное требование проекта ТТЗ по полному отсутствию ошибок обзора не достигается ни для МСУ-МР-МП, ни для МТВЗА-ГЯ-МП. Минимальные значения критерия ошибок обзора $F(a)$ реализуются при сдвигах фаз 80° для МСУ-МР-МП и 0° для МТВЗА-ГЯ-МП.

Опираясь на графики критерия $F(a)$, можно рекомендовать значение долготного сдвига 0° , что соответствует синфазному орбитальному построению КС. При таком сдвиге, наряду с минимальной и весьма незначительной величиной

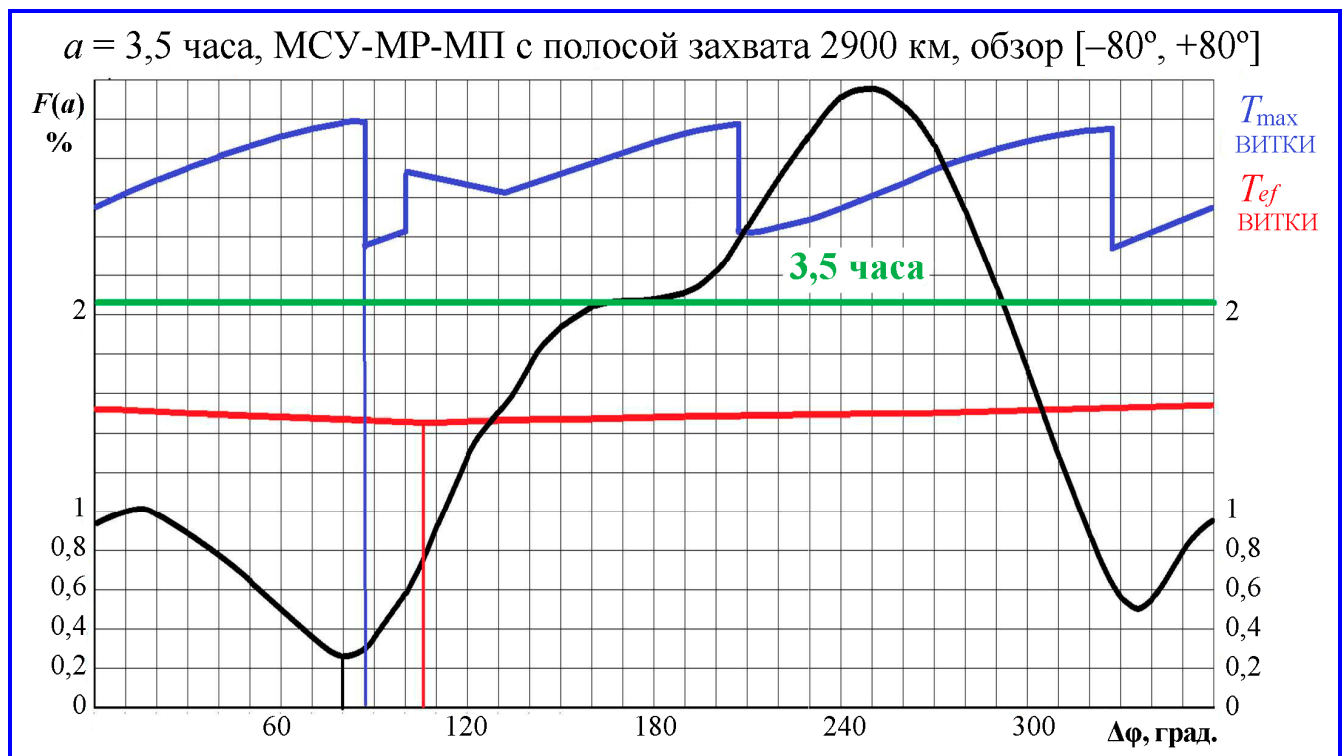


Рис. 3. Графики критериев эффективности в зависимости от сдвига фаз в системе из 4-х КА «Метеор-МП» со съёмочными приборами МСУ-МР-МП

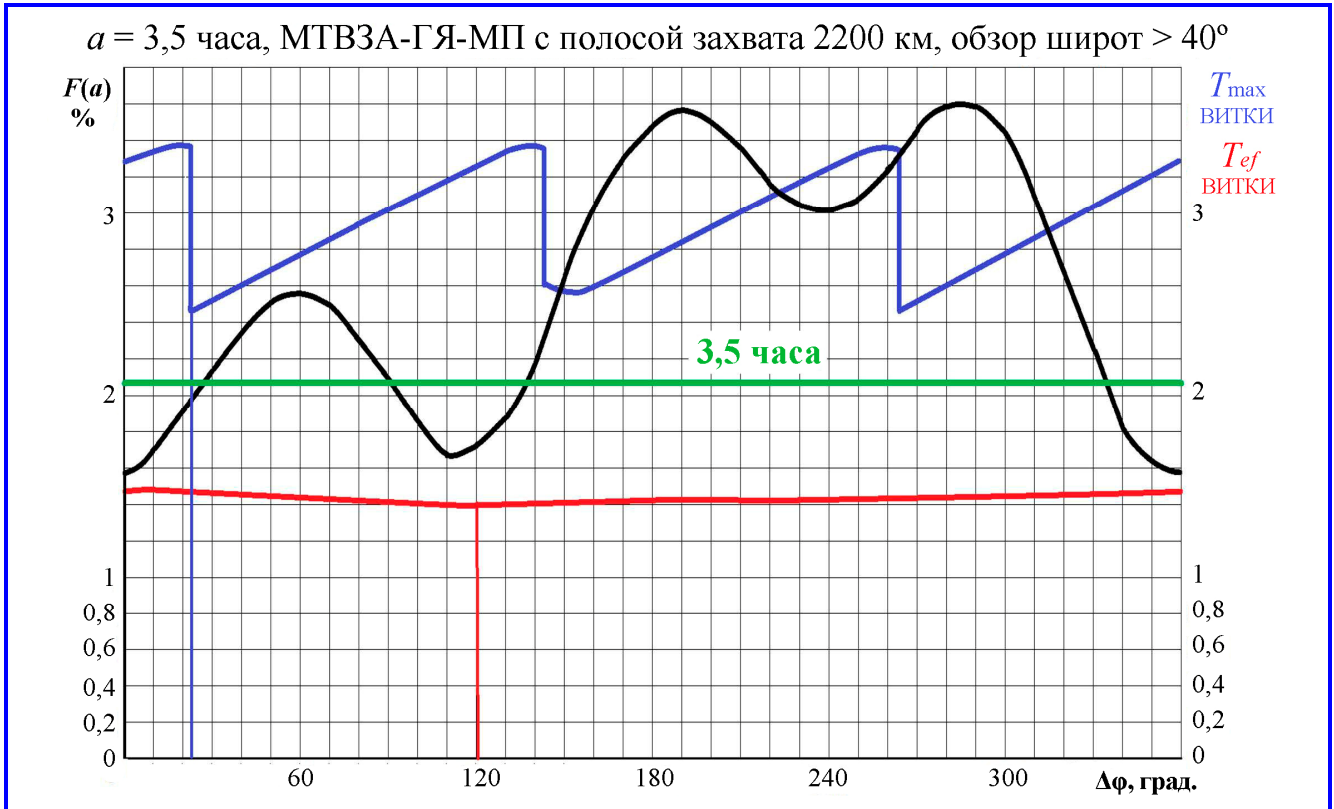


Рис. 4. Графики критериев эффективности в зависимости от сдвига фаз в системе из 4-х КА «Метеор-МП» со съёмными приборами МТВЗА-ГЯ-МП при обеспечении обзора широт не ниже 40°

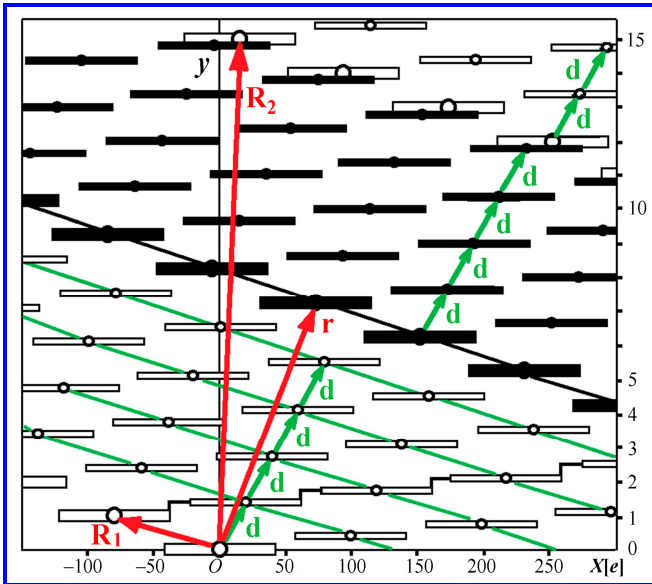


Рис. 5. 1-й тип векторной модели для космической системы из 5 КА типа «Канопус-В-ИК» для обнаружения очагов лесных пожаров

показателя $F(a) = 1,6 \%$ для микроволнового прибора МТВЗА-ГЯ-МП, достигается ещё меньшее значение того же критерия для ИК-аппаратуры МСУ-МР-МП.

Дополнительно можно предложить ввести в окончательную редакцию ТТЗ на перспективную

ГКС «Метеор-МП» вероятность ошибок обзора на уровне не более 0,02 или, что по сути то же самое, вероятность безошибочного обзора на уровне не менее 0,98.

Анализ орбитального построения КС из 5 и 6 КА типа «Канопус-В-ИК» для обнаружения очагов лесных пожаров

В 2017 г. был запущен спутник «Канопус-В-ИК», на борту которого имеется новый интересный и актуальный прибор, появившийся впервые в отечественной космонавтике: широкозахватный инфракрасный (ИК-) радиометр МСУ-ИК-СРМ [8]. Прибор зондирует земную поверхность в двух каналах: 3,5 – 4,1 и 8,4 – 9,4 мкм, выделенных на тепловом участке ИК-области спектра. Радиометр разработан в АО «Российские космические системы».

Главное назначение МСУ-ИК-СРМ – оперативное обнаружение лесных пожаров на самой ранней (очаговой) стадии, когда стремительно разрастающийся, но пока малоразмерный очаг ещё можно потушить минимальными средствами в кратчайшие сроки. Согласно предварительным расчётам и экспериментам, которые уже нашли первое подтверждение в ходе лётных испыта-

ний КА «Канопус-В-ИК», по информации данного ИК-радиометра будут выявляться очаги лесных пожаров с площадью от 5×5 кв. м, т. е. почти от размеров первоначального костра.

Исследуем (в качестве очередного примера применения ВМОЗ) орбитальное построение принципиально возможной КС из 5 и 6 спутников типа «Канопус-В-ИК» с ИК-радиометрами МСУ-МР-ИК с широкой полосой захвата (2000 км) для обнаружения ОЛП на территории России в поясе широт $[43^\circ, 70^\circ]$.

В данном случае можно использовать, как и в предыдущем разделе для ГКС «Метеор-МП», аналогичную картину векторных моделей и принцип равномерного распределения цепочек следов спутников с номерами от 2-го до последнего N_{sat} -го между цепочками следов 1-го КА. Однако, ввиду того, что модели для обнаружения ОЛП строятся не на экваторе, а на нижней границе 43° пояса широт России, возникают 2 типа векторных моделей, представленные на рис. 5 и 6. Разница типов вытекает из того, что в 1-м из них на рис. 5 принцип равномерного заполнения пространства между цепочками следов 1-го спутника реализуется от восходящей до нисходящей цепочки, а во 2-м, наоборот, – от нисходящей до восходящей цепочки, как видно на рис. 6.

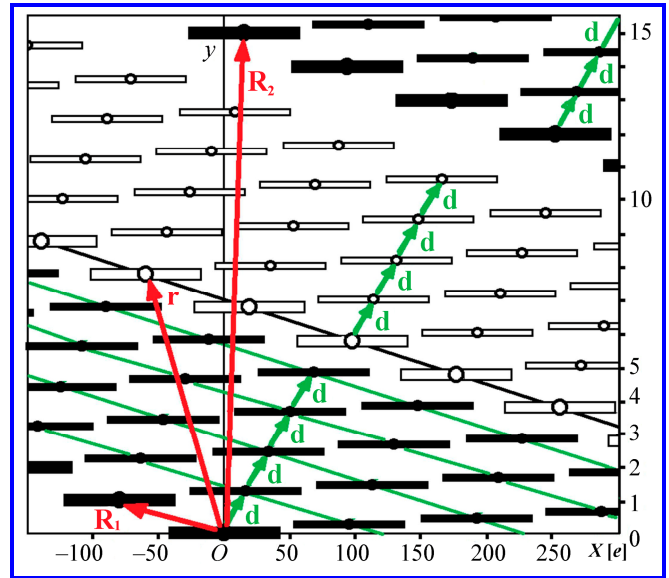


Рис. 6. 2-й тип векторной модели для космической системы из 5 КА типа «Канопус-В-ИК» для обнаружения очагов лесных пожаров

Учитывая, что орбита КА «Канопус-В-ИК» – изомаршрутная с периодом повторения $T = 1200$ витков и $L = 79$ суток, положения цепочек следов 1-го КА определяются следующими векторами, общими для обоих типов моделей:

$$\mathbf{R}_1 = (-79e; 1), \mathbf{R}_2 = (15e, 15), \quad (19)$$

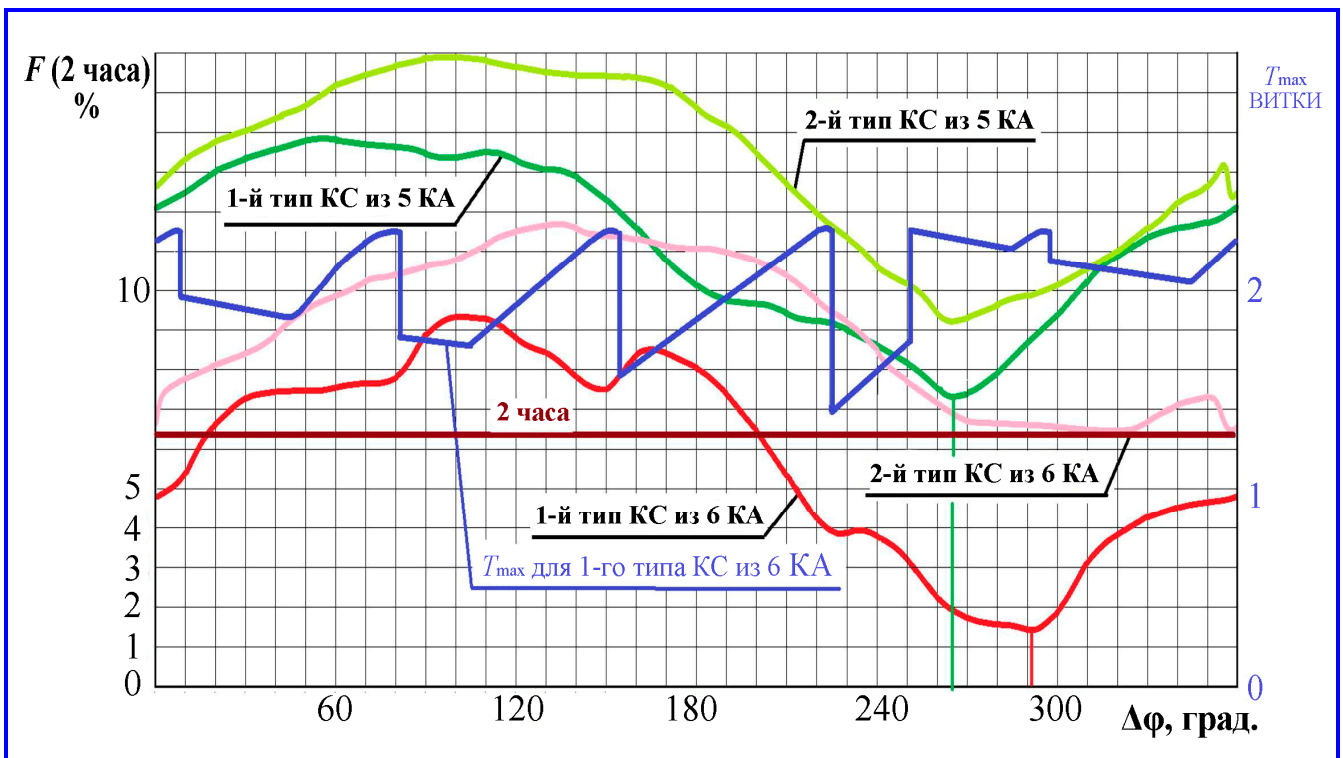


Рис. 7. Графики критериев эффективности в зависимости от сдвига фаз в системах из 5 и 6 КА типа «Канопус-В-ИК» с широкозахватными ИК-радиометрами

а также индивидуальными значениями вектора \mathbf{r} , вычисленными для указанной ИМО на широте 43° с учётом формул из [5]:

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= (73\mathbf{e}; 7,26) \text{ для 1-го типа и} \\ \mathbf{r} &= (-58\mathbf{e}; 7,74) \text{ для 2-го типа.} \end{aligned} \quad (20)$$

Цепочки следов остальных КА фиксируются векторами вида

$$\mathbf{d} = (\mathbf{r} - z\mathbf{R}_1)/N_{sat} \quad (21)$$

при произвольных значениях множителя z .

По формулам (12) при всех значениях множителя z сдвиги по долготе равны $\Delta\delta = 2\pi(73 + 79 \cdot 7,26)/1200/N_{sat} = 193,962^\circ/N_{sat}$ для КС при 1-м типе моделей и $\Delta\delta = 2\pi(-58 + 79 \cdot 7,74)/1200/N_{sat} = 166,038^\circ/N_{sat}$ для КС 2-го типа. Сдвиги по фазе $\Delta\phi$ для обоих типов варьируют от 0° до 360° .

Оптимизацию фазовых сдвигов выполняем по графикам критерия ошибок $F(a)$ на рис. 7 для $N_{sat} = 5$ и 6. Рабочий интервал a был принят равным 2 часам. Нетрудно убедиться, что для системы из 5 КА наименьшее значение $F(2 \text{ часа}) = 7,29\%$ реализуется при сдвиге фаз 264° , а для 6 КА аналогичный минимум равен $1,33\%$ и достигается при фазовом сдвиге 291° .

Заметим, что на рис. 4 и 5 и ранее на рис. 2 восходящие (и нисходящие) спутниковые следы разных КА образуют «лесенки». Одна из них выделена на рис. 5, внизу. Построение ВМОЗ из «лесенок» следов рекомендуется для минимизации критериев эффективности $F(a)$. На рис. 5 при оптимальном сдвиге фаз 264° соседние ступеньки «лесенок» чуть-чуть перекроются.

Выводы

1. На основе ВМОЗ разработана компьютерная программа для расчёта полных ансамблей перерывов обзора и частот их возникновения (на каждой широте земного шара и заданном широтном поясе в целом).

2. Программа применяется для космических систем из любого, сколь угодно большого числа КА с произвольно задаваемой спутниковой структурой.

3. Практически мгновенное действие компьютерной программы предоставляет широкие возможности для анализа и выбора вариантов орбитального построения, т. е. распределения КА по орбитам.

4. Варианты можно задавать как в форме векторных моделей, т. е. косвенно, так и прямо, в виде многоспутниковых орбитальных структур.

5. ВМОЗ и программа на её базе предназначены для оптимизации построения космических систем ДЗЗ на начальных этапах их разработки.

Литература

1. Векторный метод синтеза орбит и структуры систем спутников для многополосного обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2016. – Т. 54. – № 4. – С. 334 – 346.
2. 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». Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2015 год. – М., 2015. – С. 31 – 39.
3. Векторный метод анализа спутниковых структур / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – Т. 147. – № 4. – С. 18 – 28.
4. Анализ систем спутников для периодического обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2017. – Т. 55. – № 4. – С. 290 – 304.
5. Применение векторной модели обзора Земли для анализа ИСЗ на изомаршрутных орбитах / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – Т. 153. – № 4. – С. 29 – 46.
6. Векторная модель обзора Земли и направления её использования / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 156. – № 1. – С. 21 – 32.
7. 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).
8. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» / под ред. Л. А. Макриденко и др. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 130 с.

Поступила в редакцию 11.01.2019

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: 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.

Александр Львович Чуркин, кандидат технических наук, главный конструктор космических систем и комплексов, т. (495) 623-31-98, e-mail: a.churkin@hq.vniiem.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

ANALYSIS OF ORBITAL STRUCTURE OF PROSPECTIVE SPACE SYSTEMS COMPRISING METEOR-MP AND CANOPUS-V-IK SATELLITES

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

During the development of space systems comprising the ERS satellites the customers usually wish to have a regular survey of the specified latitude belts of the Earth with specified revisit periodicity. However it is actually impossible. Not one, but a multitude of time-outs between the series of survey sessions or another type of remote sensing activities occur during the ERS space system operation at any part of the Earth's latitude, and particularly of the latitude belt. Due to this fact, to analyze an ERS satellite system, in the first place we need to find a complete ensemble of all survey time-outs and their frequencies on each latitude and on the latitude belt as a whole, which requires a special algorithm. For this purpose a 'vector model for Earth survey' is proposed. The vector model allows a vivid display of the following information on a 2-D coordinate plane: geographical longitude [in radians], time [in satellite nodical periods or orbits], all survey time-outs and their frequencies at an arbitrary Earth's latitude. This model was used as a basis for development of the required algorithm that can be applied for ERS space systems comprising any number of satellites with any orbital structure. The article is supplemented with examples of application of a computer program (based on this algorithm) for calculation and analysis of space systems comprising the Meteor-MP and Canopus-V-IK satellites.

Key words: vector model for Earth survey, satellite node, satellite ground track, satellite structure, ERS imaging efficiency criterion, effective period of survey, survey error, survey error frequency, repeating orbit, survey time-out, survey time-out frequency, ensemble of survey time-outs.

References

1. Vector method for analysis of satellite systems / V. K. Saulskii // Space research. – 2016. – Vol. 54. – No. 4. – Pp. 334 – 346.
2. 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. VNIIEEM Proceedings. Appendix 2015 – Moscow, 2015. – Pp. 31 – 39.
3. Vector method for analysis of satellite structures / A.V. Gorbunov, V.K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JC, 2015. – Vol. 147. – No. 4. – Pp. 18 – 28.
4. Analysis of satellite systems for periodical Earth observation / V. K. Saulskii // Space research. – 2017. – Vol. 55. – No. 4. – Pp. 290 – 304.
5. Application of vector model for Earth survey for analysis of satellites on repeating orbits / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JC, 2016. – Vol. 153. – No. 4. – Pp. 29 – 46.
6. Vector model for Earth survey and its application areas / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JC, 2017. – Vol. 156. – No. 1. – Pp. 21 – 32.
7. 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).
8. 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 : VNIIEEM Corporation JC, 2017. – 130 p.

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, e-mail: gor@hq.vniiem.ru.

Irina Iurievna 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.

Aleksandr Lvovich Churkin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief Designer of Space Systems, tel.: +7 (495) 623-31-98, e-mail: a.churkin@hq.vniiem.ru.

(JC «VNIIEEM Corporation»).