

СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ИНСПЕКТИРУЕМОГО РАЙОНА КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В.В. Салов

П.А. Проценко

Р.В. Хуббиев

prosvka@gmail.com

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Предложен вариант использования изомаршрутных орбит в целях увеличения частоты наблюдения района земной поверхности космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли. Разработаны алгоритмы расчета временных и ресурсных затрат, необходимых для изменения параметров орбит космических аппаратов дистанционного зондирования Земли при перестроении орбитальной группировки для наблюдения инспектируемого района. Обоснована целесообразность рассматриваемого способа при решении задач мониторинга районов стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций

Ключевые слова

Космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, изомаршрутная орбита, мониторинг, район

Поступила в редакцию 13.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. В настоящее время задача поиска и мониторинга лесных пожаров приобретает все большую актуальность. Каждый год от лесных пожаров гибнут люди, уничтожается флора и фауна, наносится значительный ущерб экономике и экологии. В связи с этим крайне важно своевременно обнаружить и локализовать лесные пожары. Один из способов организации поиска очагов возгораний — мониторинг пожароопасных районов космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Однако при этом способе периодичность наблюдения пожароопасных районов зачастую является недостаточной для своевременного реагирования на складывающуюся чрезвычайную ситуацию. Повысить частоту мониторинга можно путем наращивания орбитальной группировки (ОГ) КА ДЗЗ, но такой способ требует значительных ресурсных и временных затрат, связанных с изготовлением КА и их выведением на заданные орбиты. Более рационально в рассматриваемой ситуации — орбитальное перестроение функционирующих КА.

Постановка задачи. Орбитальное перестроение функционирующих КА заключается в изменении параметров орбит КА (перевод на новые целевые орбиты) в целях создания ОГ ДЗЗ для наблюдения инспектируемого района на заданном интервале времени, который определяется либо заблаговременно на

период сезонного обострения пожароопасной обстановки, либо оперативно в период стихийного бедствия в районе. По окончании выполнения задачи по инспектированию района КА ОГ переводят на исходные орбиты с восстановлением показателей функционирования космических систем. Совокупность таких приемов образует способ увеличения частоты наблюдений инспектируемого района КА ДЗЗ.

Качество (эффективность применения) любой сложной системы (в том числе ОГ КА ДЗЗ) характеризуется следующими ее показателями: результативность; ресурсоемкость; оперативность. Оценить эти показатели ОГ, а следовательно, и обосновать целесообразность перевода каждого КА на новую целевую орбиту предлагается путем определения таких показателей, как:

– результативность (ε) — отношение частоты наблюдения инспектируемого района КА, функционирующим на новой целевой орбите, к частоте наблюдения района КА с исходной орбиты. Перевод КА ДЗЗ на новую целевую орбиту целесообразен только при значениях результативности больше единицы. Основной целевой показатель, характеризующий результат, для которого проводится маневр;

– ресурсоемкость (r) — запас характеристической скорости, расходуемый на осуществление перевода КА на новую целевую орбиту. Общий запас характеристической скорости КА ДЗЗ ограничен и в большей части определяет срок активного существования КА;

– оперативность (τ) — время, требуемое на осуществление перевода КА с исходной орбиты на новую целевую.

Выбор рационального варианта орбитального перестроения КА ДЗЗ подразумевает проверку критерия пригодности перестроения по совокупности условий

$$\begin{cases} \varepsilon > \varepsilon_r; \\ r < r_r; \\ \tau < \tau_r. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь ε_r , r_r , τ_r — граничные значения показателей результативности, ресурсоемкости и оперативности.

Задание граничных значений показателей осуществляется:

– по результативности ε_r — исходя из требований, предъявляемых к частоте наблюдения инспектируемого района;

– оперативности τ_r — в зависимости от скорости развития чрезвычайной ситуации в районе;

– ресурсоемкости r_r — исходя из ограничений запасов топлива на борту КА ДЗЗ, зависит от предполагаемого использования КА.

При заблаговременном переводе КА на новую целевую орбиту в целях наблюдения района в период сезонного обострения пожароопасной обстановки значимость показателя оперативности не столь существенна и его учет требуется только для планирования маневра.

При возникновении стихийного бедствия в районе значимость показателя оперативности орбитального перестроения КА ДЗЗ возрастает, так как необходимость перевода КА на новую целевую орбиту обусловлена чрезвычайной обстановкой, складывающейся в инспектируемом районе, что накладывает более жесткие ограничения по оперативности (τ_r) в (1).

Из совокупности всех пригодных вариантов маневров выбирается тот, который позволяет получить максимальную результативность.

Обоснование выбора орбиты. В качестве новых целевых орбит следует выбирать изомаршрутные (квазисинхронные) орбиты, так как именно они обеспечивают наилучшую устойчивую периодичность наблюдения заданного района. Под изомаршрутной (квазисинхронной) орбитой понимают орбиту КА, трасса полета которого замыкается через определенный промежуток времени.

Исследование вопросов определения изомаршрутных орбит для обеспечения отдельными КА и космическими системами наилучших с позиции заданных значений показателей зондирования Земли проведено в работах [1, 2]. В указанных работах рассмотрен случай, когда изомаршрутные орбиты выбираются на этапе создания космических систем КА ДЗЗ. При этом не учитывается частота просмотра какого-либо конкретного района поверхности Земли. На этапе функционирования КА ДЗЗ для улучшения значений показателей наблюдения конкретного района, подлежащего мониторингу, требуется оценить возможность перевода КА на новую целевую изомаршрутную орбиту с учетом различных ограничений, связанных с ресурсом КА и возможностями работы специальной аппаратуры на новой орбите.

В случае если ширина полосы обзора аппаратуры меньше межвиткового расстояния, расположенный на изомаршрутной орбите КА может не обеспечивать наблюдение требуемых районов, поскольку полоса обзора не будет образовывать безразрывного покрытия заданного широтного пояса. Следует также отметить, что для обеспечения наибольшей частоты наблюдения зондируемого района требуется, чтобы трасса полета КА проходила через геометрический центр заданного района.

Расчет показателя результативности. Расчет показателя результативности осуществляют способом имитационного моделирования процесса функционирования КА ДЗЗ. Основу имитационной модели составляет методика расчета зон обзора КА ДЗЗ, изложенная в работе [3].

Расчет показателя оперативности. Расчет времени перевода КА ДЗЗ с исходной орбиты на целевую изомаршрутную предложено осуществить с использованием следующего подхода [4–7].

Пусть параметры орбиты КА ДЗЗ заданы кеплеровскими элементами

$$X = \{i, \Omega, \omega, a, e, u\},$$

где i — наклонение орбиты; Ω — прямое восхождение восходящего узла орбиты; ω — аргумент широты перигея; a — большая полуось; e — эксцентриситет; u — аргумент широты КА.

Известны координаты центра района наблюдения: λ_p — долгота центра района; ψ_p — широта центра района. Движение КА осуществляется в нормальном гравитационном поле Земли. Трассы полета показаны на рис. 1.

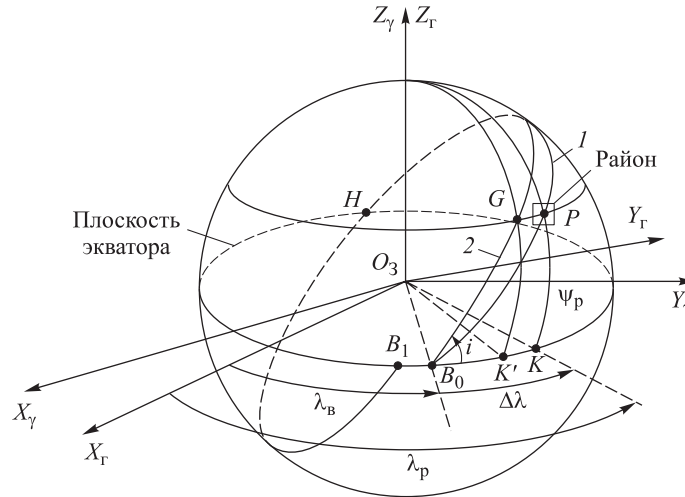


Рис. 1. Трассы полета КА в нормальном гравитационном поле Земли (1) и по оскулирующей орбите (2)

Долгота восходящего узла орбиты, гарантирующая прохождение трассы КА через геометрический центр заданного района, определяется по выражению

$$\lambda_B = \lambda_p - \Delta\lambda, \tag{2}$$

где $\Delta\lambda$ — геоцентрический угол в плоскости экватора, который КА пролетает от восходящего узла до инспектируемого района.

Геоцентрический угол $\Delta\lambda$ из сферического треугольника B_0PK представляет собой сумму дуг B_0K' и KK' . Дуга B_0K' из сферического прямоугольного треугольника $B_0P'K'$, по правилу Непера, вычисляется по формуле

$$B_0K' = \arcsin \frac{\operatorname{tg} \psi_p}{\operatorname{tg} i}. \tag{3}$$

Аргумент широты КА в момент пролета КА над заданным районом определяется по формуле

$$u = \arcsin \frac{\sin \psi_p}{\sin i}. \tag{4}$$

Дуга KK' определяется наличием как вращения Земли, так и прецессии плоскости орбиты КА и вычисляется из соотношения

$$KK' = \frac{u}{2\pi} \Delta\lambda_{MB}, \tag{5}$$

где $\Delta\lambda_{MB}$ — межвитковое расстояние.

С учетом влияния нецентральной гравитационного поля Земли абсолютная величина межвиткового расстояния определяется как

$$\Delta\lambda_{\text{мв}} = 2\pi \frac{T_{\Omega}}{T_{\text{эф}}} \quad (6)$$

Здесь T_{Ω} — драконический период обращения КА (промежуток времени между двумя последовательными пересечениями плоскости небесного экватора в восходящем узле); $T_{\text{эф}}$ — эффективные сутки, время полного оборота Земли относительно восходящего узла орбиты,

$$T_{\text{эф}} = \frac{2\pi}{\omega_3 - \dot{\Omega}}, \quad (7)$$

где ω_3 — угловая скорость вращения Земли; $\dot{\Omega}$ — угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты. При этом следует учитывать, что восходящий узел за виток смещается на запад. Таким образом, использование формул (3)–(7) позволяет по формуле (2) вычислить долготу $\lambda_{\text{в}}$ восходящего узла орбиты, пройдя через который КА гарантированно пролетит над заданным районом.

Для изомаршрутной орбиты с параметрами p и q (q — число суток; p — число витков) существует p восходящих узлов с долготой λ_i , повторяющихся через q суток. Учитывая, что восходящий узел за виток смещается на запад, значения долготы восходящего узла на изомаршрутной орбите определяются по выражению $\lambda_i = \lambda_{\text{в}} - n\Delta\lambda_{\text{мв}}$, $n = 0, 1, \dots, p-1$, где n — номер восходящего узла орбиты.

Совпадение долготы восходящего узла орбиты КА, переведенного с исходной орбиты на изомаршрутную, хотя бы с одним из значений долготы λ_i обеспечивает прохождение траектории полета КА через центр заданного района.

Изомаршрутная и исходная орбиты являются околокруговыми, что обеспечивает возможность выбора точки старта с исходной орбиты при постоянстве энергетических затрат на маневр. Для обеспечения полета КА над заданным районом необходимо выполнить следующее равенство:

$$\lambda_{\text{в}} - n\Delta\lambda_{\text{мв}} = \lambda_0 - m\Delta\lambda_{\text{мв.и}} - \frac{\Delta u}{2\pi} \Delta\lambda_{\text{мв.и}} - \frac{\Delta\lambda_{\text{мв.п}}}{2} - \frac{\pi - \Delta u}{2\pi} \Delta\lambda_{\text{мв}}, \quad (8)$$

$$n = 0, 1, \dots, p-1.$$

Здесь λ_0 — долгота восходящего узла на исходной орбите; m — число витков ожидания на исходной орбите; $\Delta\lambda_{\text{мв.и}}$, $\Delta\lambda_{\text{мв.п}}$ — межвитковое расстояние на исходной и переходной орбитах; Δu — аргумент широты точки старта с исходной орбиты, $\Delta u \in [0; 2\pi]$.

Для осуществления перевода КА ДЗЗ на требуемую изомаршрутную орбиту с требуемым значением долготы восходящего узла за минимально возможный промежуток времени необходимо определить минимальное значение m , для которого равенство (8) станет верным.

Расчет показателя ресурсоемкости. В качестве маневра перевода КА с исходной орбиты на изомаршрутную целесообразно использовать оптимальный гомановский переход (рис. 2).

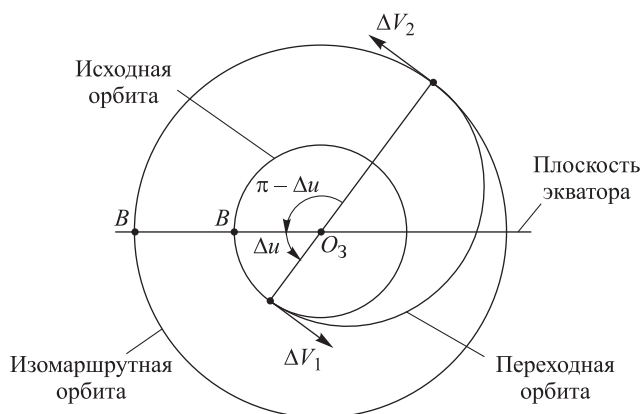


Рис. 2. Схема гомановского перехода с исходной орбиты на изомаршрутную

Запас характеристической скорости ΔV , требуемый для осуществления маневра перевода КА с исходной орбиты на изомаршрутную, вычисляется по формуле

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2,$$

где $\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_{\text{и}}}} \left(\sqrt{\frac{2r_{\text{из}}}{r_{\text{и}} + r_{\text{из}}}} - 1 \right)$; $\Delta V_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_{\text{из}}}} \left(1 - \sqrt{\frac{2r_{\text{и}}}{r_{\text{и}} + r_{\text{из}}}} \right)$; μ — гравитационная

постоянная Земли; $r_{\text{и}}$, $r_{\text{из}}$ — радиусы исходной и изомаршрутной орбит КА ДЗЗ.

Применимость предлагаемого способа оценена на примере.

Пример перевода космического аппарата на изомаршрутную орбиту. Рассмотрим создание ОГ наблюдения инспектируемого района на заданном интервале времени с использованием предлагаемого способа на примере двух КА типа «Ресурс-П». В качестве района мониторинга как одну из наиболее пожароопасных областей России, по данным Рослесхоза, выберем Волгоградскую область.

В связи с тем, что средняя продолжительность крупных лесных пожаров составляет обычно 10...15 сут [8], примем временной интервал моделирования 15 сут.

Определение граничных значений показателей эффективности — сложная задача, требующая дополнительного глубокого анализа предметной области. В большинстве случаев показатели определяют методом экспертных оценок или эвристически. Для рассматриваемого примера заданы следующие значения: $\varepsilon_r = 1$; $r_r = 100$ м/с; $\tau_r = 5$ сут.

Результаты расчетов сведены в таблицу, в которой представлены изомаршрутные орбиты (суточная $q = 1$, двухсуточная $q = 2$, трехсуточная $q = 3$), на кото-

рые можно перевести рассматриваемые КА в целях повышения эффективности их функционирования, а также оцениваемые значения показателей эффективности.

**Показатели эффективности при создании ОГ КА на изомаршрутных орбитах
для КА «Ресурс-П1» (числитель) и «Ресурс-П2» (знаменатель)**

Показатель эффективности	Изомаршрутная орбита				
	А	Б	В	Г	Д
	$p = 15, q = 1$	$p = 16, q = 1$	$p = 31, q = 2$	$p = 46, q = 3$	$p = 47, q = 3$
τ_r , сут	2,04/3,66	0,16/0,87	1,33/1,03	11,22/34,01	0,54/0,96
r_r , м/с	56,9/56,8	106,5/106,7	25,8/25,8	1,58/1,50	52/52,9
ε_r	4,28/3,32	2,14/1,66	1,00/0,88	0,71/0,56	1,42/1,11

Анализ значений показателей, представленных в таблице, показывает, что критерию пригодности (1) удовлетворяют маневры по переводу КА на изомаршрутные орбиты А и Д. Оптимальным вариантом перевода КА «Ресурс-П1» и «Ресурс-П2» на изомаршрутную орбиту по результативности является перевод на орбиту А.

Особенности использования предлагаемого способа. Следует отметить, что запас характеристической скорости изначально закладывается на борт КА для обеспечения функционирования КА в течение заданного срока. С одной стороны, использование таких запасов может привести к уменьшению сроков активного существования КА, что является негативным последствием предлагаемого способа. С другой стороны, КА ДЗЗ служит для получения информации об интересующих районах в требуемый интервал времени, и ценность полученных снимков этих районов трудно переоценить, когда вовремя полученная информация о развивающемся пожаре может спасти жизни десяткам людей. Таким образом, если оценивать эффективность применения КА как интегральную ценность полученной информации за весь срок активного существования, то применение указанного способа не снижает эффективность применения КА ДЗЗ, хотя и снижает сроки его активного существования.

Остается открытым нетривиальный вопрос оценивания ценности информации, получаемой с борта КА ДЗЗ. Этот вопрос напрямую связан с ограничениями, накладываемыми на ресурсоемкость (расход характеристической скорости КА), — чем выше ценность информации, получаемой при наблюдении требуемого района, тем больше характеристической скорости можно потратить для ее получения. При выборе ограничения на расход характеристической скорости также необходимо учитывать технические характеристики целевой аппаратуры ДЗЗ, определяющие строгий диапазон высот, в пределах которого возможно применение КА.

Использование предлагаемого способа непосредственно связано с маневром для перевода КА ДЗЗ на новую орбиту. Возникает вопрос о необходимости возвращения КА на исходную орбиту для его функционирования в штатном

режиме. Для упрощения процедуры оценивания целесообразности перевода КА ДЗЗ на новую орбиту можно в качестве ресурсоемкости рассматривать суммарные затраты характеристической скорости на маневры для перевода КА на новую орбиту и возвращению его на исходную орбиту. При этом возможны случаи, когда новая орбита отвечает всем требованиям для функционирования целевой аппаратуры КА, которые имеет штатная орбита, или планируется совершение очередного маневра для перевода на следующую новую орбиту в целях увеличения частоты наблюдения другого инспектируемого района. В этих случаях проводить маневр для возвращения КА ДЗЗ на исходную орбиту не требуется. Таким образом, оценивать всю схему применения КА ДЗЗ следует комплексно с учетом динамически меняющейся обстановки, а предлагаемый способ расширяет возможности повышения эффективности применения КА ДЗЗ.

Заключение. Использование предложенного способа позволяет повысить частоту наблюдения КА ДЗЗ пожароопасных районов в течение заданного интервала времени. При этом возможно как заблаговременное создание ОГ КА ДЗЗ над требуемым районом, так и оперативное перестроение КА ДЗЗ.

Такой способ может быть использован при планировании применения КА ДЗЗ для контроля не только пожароопасных районов, но и для мониторинга стихийных бедствий в любом районе земного шара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверкиев Н.Ф., Власов С.А., Салов В.В., Киселев В.В. Маневрирование космическим аппаратом с целью улучшения характеристик наблюдения района поверхности Земли // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 10. С. 798–803.
2. Свиридов А.С. Принципы выбора высоты орбиты группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на изомаршрутных солнечно-синхронных орбитах // Вестник МАИ. 2010. Т. 17. № 6. С. 30–39.
3. Власов С.А., Мамон П.А. Теория полета космических аппаратов. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. 435 с.
4. Власов С.А., Кубасов И.Ю., Селин В.А. Расчет структуры системы космических аппаратов периодического наблюдения заданного района на поверхности Земли // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2010. № 627. С. 42–44.
5. Коваленко А.Ю. Баллистическое проектирование разнородной системы КА с заданным циклом замыкания трассы // Труды СПИИРАН. 2015. № 3 (40). С. 45–54.
DOI: 10.15622/sp.40.4
6. Власов С.А., Кубасов И.Ю., Селин В.А. Выбор баллистической структуры системы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2009. № 625. С. 76–80.
7. Колесников К.Г., Масалкин А.А., Москвин Б.В. Модель планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2016. № 655. С. 122–127.
8. Гонгальский К.Б. Лесные пожары и почвенная фауна. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 169 с.

Салов Вячеслав Викторович — канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13).

Проценко Петр Александрович — канд. техн. наук, начальник лаборатории — старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13).

Хуббиев Руслан Владимирович — научный сотрудник военного института (научно-исследовательского), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Салов В.В., Проценко П.А., Хуббиев Р.В. Способ увеличения частоты наблюдений инспектируемого района космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 1. С. 105–114.

DOI: 10.18698/0236-3933-2018-1-105-114

**METHOD OF INCREASING THE MONITORING FREQUENCY
OF THE INSPECTING AREA BY EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT**

V.V. Salov

P.A. Protsenko

prosvka@gmail.com

R.V. Khubbiev

Mozhaisky Military Space Academy, St Petersburg, Russian Federation

Abstract

The study introduces an option for using iso-path orbits in order to increase the monitoring frequency of the Earth's surface area by the Earth remote sensing spacecraft. We developed the algorithms for calculating the time and resource costs necessary to change the orbital parameters of the Earth remote sensing spacecraft when the orbit group is rebuilt for observation of the inspected area. Findings of the research show the expediency of the method under consideration in solving the problems of monitoring the areas of natural disasters and emergency situations

Keywords

*Earth remote sensing spacecraft,
iso-path orbit, monitoring, area*

Received 13.06.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Averkiev N.F., Vlasov S.A., Salov V.V., Kiselev V.V. Maneuvering by spacecraft to improve characteristics of the Earth surface area observation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2015, vol. 58, no. 10, pp. 798–803 (in Russ.).
- [2] Sviridov A.S. Orbit altitude choice principles for Earth surface observation space system on Sun-synchronous repeat ground track orbits. *Vestnik MAI*, 2010, vol. 17, no. 6, pp. 30–39 (in Russ.).

- [3] Vlasov S.A., Mamon P.A. Teoriya poleta kosmicheskikh apparatov [Spacecraft flight theory]. St Petersburg, VKA n.a. A.F. Mozhaysky Publ., 2007. 435 p.
- [4] Vlasov S.A., Kubasov I.Yu., Selin V.A. Calculation of spacecraft system structure for periodic surveillance of designated area on Earth surface. *Trudy VKA im. A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy], 2010, no. 627, pp. 42–44 (in Russ.).
- [5] Kovalenko A.Yu. Ballistic design of heterogeneous system of the spacecraft with a given cycle of track circuit. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2015, no. 3 (40), pp. 45–54 (in Russ.). DOI: 10.15622/sp.40.4
- [6] Vlasov S.A., Kubasov I.Yu., Selin V.A. Vybor ballisticheskoy struktury sistemy kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli. *Trudy VKA im. A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy], 2009, no. 625, pp. 76–80 (in Russ.).
- [7] Kolesnikov K.G., Masalkin A.A., Moskvin B.V. Application planning model of Earth remote sounding spacecraft. *Trudy VKA im. A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy], 2016, no. 655, pp. 122–127 (in Russ.).
- [8] Gongalskiy K.B. Lesnye pozhary i pochvennaya fauna [Forest fires and pedofauna]. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2014. 169 p.

Salov V.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of Department, Mozhaisky Military Space Academy (Zhdanova ul. 13, St Petersburg, 197082 Russian Federation).

Protsenko P.A. — Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, Senior Research Fellow, Mozhaisky Military Space Academy (Zhdanova ul. 13, St Petersburg, 197082 Russian Federation).

Khubbiev R.V. — Research Fellow, Mozhaisky Military Space Academy (Zhdanova ul. 13, St Petersburg, 197082 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Salov V.V., Protsenko P.A., Khubbiev R.V. Method of Increasing the Monitoring Frequency of the Inspecting Area by Earth Remote Sensing Spacecraft. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 1, pp. 105–114 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-1-105-114

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
press@bmstu.ru www.baumanpress.ru

Подписано в печать 25.01.2018
Формат 70 × 108/16
Усл.-печ. л. 10,00

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com