

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ПОЛНЫЙ СОСТАВ ПЕРЕРЫВОВ ОБЗОРА ЗАДАННОЙ ОБЛАСТИ ЗЕМЛИ

И. Ю. Ильина, В. К. Саульский

В качестве критерия оптимизации космических систем дистанционного зондирования Земли, как правило, применяется максимальный перерыв (T_{\max}) обзора заданной области Земли. Его часто называют «периодом обзора», что некорректно. Использование данного критерия может приводить к завышению требуемого количества спутников в космической системе, так как частота реализации T_{\max} обычно ничтожно мала по сравнению с частотами остальных перерывов обзора. Полноценный критерий оптимизации должен быть функцией от всех реализуемых на заданной области Земли перерывов обзора с учетом их частот. Для вычисления полного состава перерывов с частотами разработана компьютерная программа на основе векторной модели обзора Земли. Предложены три вида критериев-функций для оптимизации космических систем, решающих три широких класса задач дистанционного зондирования Земли: космические системы мониторинга, космические системы обнаружения «внезапных» чрезвычайных ситуаций, космические системы обнаружения «развивающихся» чрезвычайных ситуаций. Целесообразность использования этих критериев-функций проверена и подтверждена на примерах космических систем для гидрометеорологического мониторинга и раннего обнаружения лесных пожаров.

Ключевые слова: критерий оптимизации, максимальный перерыв, перерыв обзора, частота реализации, векторная модель, «внезапные» чрезвычайные ситуации, «развивающиеся» чрезвычайные ситуации, малоразмерный лесной пожар.

Введение

Организации-заказчики космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), как правило, заинтересованы в регулярном наблюдении заданной области Земли с фиксированной периодичностью его повторения. Однако на практике это невыполнимо, так как для любой многоспутниковой КС на достаточно большой территории земного шара возникает не один, а множество перерывов обзора. В частности, это подтверждается на конкретном примере, на рис. 1, где представлена диаграмма относительных частот f реализации (повторения) всех перерывов t обзора Земли, возникающих при ее мониторинге с помощью КС из 4-х условных метеоспутников типа «Метеор» с полосами захвата 2950 км.

Орбитальная структура КС на рис. 1 сформирована следующим образом: 4 плоскости орбиты по одному космическому аппарату (КА) в каждой, сдвиги $d\lambda$ восходящих узлов орбит одинаковы и равны 45° , сдвиги dt по фазам КА в соседних плоскостях орбит равны 0° , то есть структура синфазная.

На практике для анализа и оптимизации КС ДЗЗ в качестве критерия оптимальности, как правило, используется максимальный перерыв T_{\max} обзора заданной области Земли. Его часто называют периодом обзора, хотя это некорректно. На рис. 1 наибольший перерыв $T_{\max} = 2,557$ витка. Он находится в интервале $2,5 \div 2,6$ витка. Частота реализации всех перерывов интервала, куда попал T_{\max} , составляет 0,0015, то есть очень мала по сравнению с частотами других перерывов. В связи с этим напрашивается вывод о том, что роль максимального перерыва обзора при оценке работы данной КС не может считаться определяющей. Работу КС, а точнее ее эффективность, нужно оценивать, ис-

ходя из полного состава перерывов обзора, причем с учетом частот их реализации. В данной статье будет продемонстрировано, что применение T_{\max} в качестве критерия оптимальности КС ДЗЗ может приводить к необоснованному завышению числа спутников в КС.

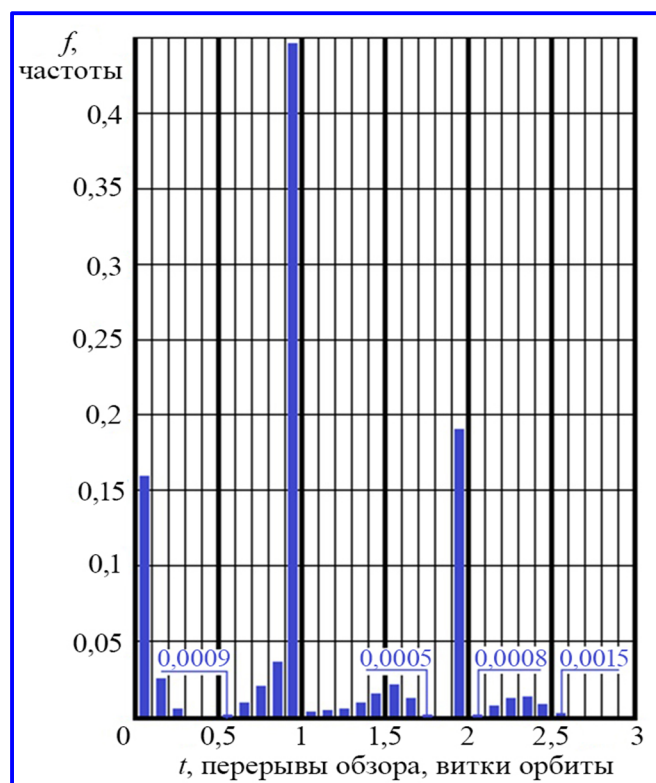


Рис. 1. Диаграмма относительных частот реализации (повторения) перерывов глобального обзора Земли для четырех космических аппаратов с полосами захвата 2950 км, долготный сдвиг – 45° , фазовый сдвиг – 0°

Широкое использование T_{\max} объясняется тем, что еще недавно отсутствовал метод определения полного набора перерывов обзора вместе с частотами их повторения. Сейчас такой метод имеется в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Он базируется на математическом аппарате векторной модели обзора Земли (ВМОЗ) [1 – 6]. На этой основе разработана компьютерная ВМОЗ-программа, позволяющая вычислять многочисленные варианты структуры КС ДЗЗ. На расчет одного варианта КС типа той, что рассмотрена на рис. 1, затрачивается лишь около 0,05 секунды. Следовательно, можно выполнять поиск оптимальной КС ДЗЗ среди очень большого состава ее возможных вариантов, опираясь на полноценные критерии в виде функций от всех перерывов обзора с их частотами.

Общее число перерывов обзора на рис. 1 равно 3725. Частоты перерывов сгруппированы и подсчитаны в виде сумм по интервалам в 0,1 драконического периода (T_{dr}) обращения спутника, то есть в 0,1 витка орбиты.

Цель настоящей работы: выбор и проверка обоснованности применения критериев-функций от всех перерывов обзора и их частот. Она будет реализована на двух примерах оптимизации КС ДЗЗ: для гидрометеорологии и для раннего обнаружения лесных пожаров (РОЛП). Вслед за каждым примером будет выполнено обобщение критериев, обоснованность которых подтверждена в этих примерах, на 3 широких класса задач ДЗЗ:

- мониторинговые задачи ДЗЗ;
- задачи по обнаружению внезапных чрезвычайных ситуаций (ЧС);
- задачи по обнаружению развивающихся ЧС.

1. Оптимизация гидрометеорологической космической системы на основе критерия «ошибок обзора»

Первый пример посвящен оптимизации числа спутников и орбитальной структуры гидрометеорологической (ГМ) КС из спутников типа «Метеор» с полосами захвата 2950 км, как и на рис. 1. ГМ-мониторинг предполагает ежедневное регулярное проведение глобальных съемок, приуроченных к синоптическим срокам в 0, 3, 6, ..., 21 час, чередующихся через каждые 3 часа. Результаты съемки, полученные за очередной «период обновления» $a = 3h$ (часа), считаются условно отнесенными к синоптическому сроку, являющемуся центром периода обновления. Ввиду трудностей создания высокоточной широкозахватной съемочной аппаратуры, пока допускается расширение периода обновления до 3,5h (часов).

Структура ГМ КС состоит из L плоскостей орбит по одному КА в каждой, поэтому общее количество спутников $N_{sat} = L$. Будут рассматриваться 2 типа структуры: «номинальная» и «эквилидистантная» [6 – 7]. В «номинальной» структуре фиксируется долготный сдвиг (между восходящими узлами соседних орбит):

$$d\lambda = 180^\circ/L = 180^\circ/N_{sat}. \quad (1)$$

В «эквилидистантной» структуре долготный сдвиг $d\lambda$ определяется так, чтобы выбранный критерий принимал оптимальное значение.

Фазовый сдвиг dt в обоих типах структуры находится в диапазоне от -180° до $+180^\circ$, обеспечивая оптимизацию выбранного критерия при каждом значении долготного сдвига $d\lambda$.

Очевидно, «номинальная» структура – это частный случай «эквилидистантной» структуры, причем из-за его простоты он широко применяется на практике.

На рис. 2 представлены графики наилучших, то есть наименьших T_{\max} , реализуемых в зависимости от долготного сдвига $d\lambda$ для «эквилидистантных» ГМ КС из $N_{sat} = 4, 5$ и 6 спутников. На графиках также можно увидеть значения T_{\max} для «номинальных» структур, для которых значения долготных сдвигов $d\lambda$ на оси абсцисс определены по формуле (1).

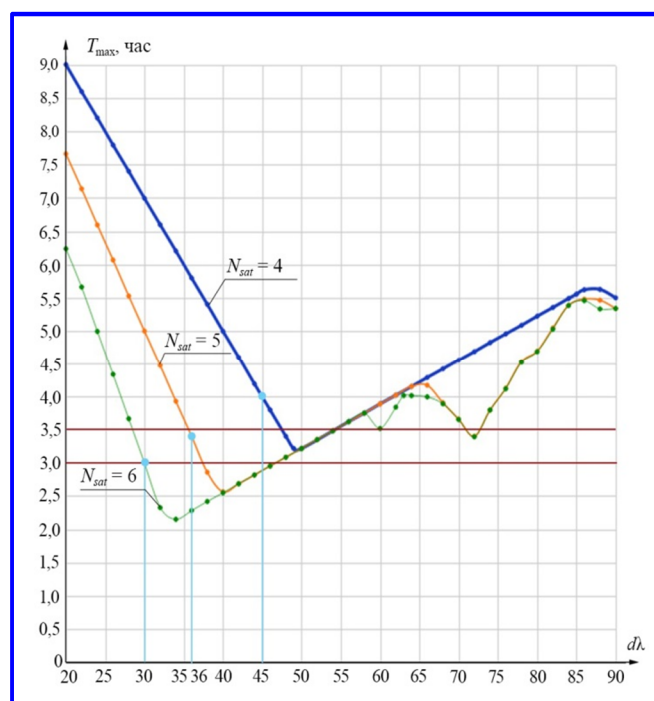


Рис. 2. Минимальные значения максимальных перерывов глобального обзора Земли для «эквилидистантных» гидрометеорологических космических систем из 4 – 6 спутников

По графикам на рис. 2 нетрудно сделать следующие выводы:

1. В случае «эквилистантной» ГМ КС из 4-х КА глобальный обзор без потерь реализуется лишь для периода обновления $a = 3,5$ часа, причем оптимальный долготный сдвиг $d\lambda = \sim 49,5^\circ$.

2. В случае «эквилистантной» ГМ КС из 5-ти КА глобальный обзор без потерь реализуется для $a = 3,0$ часа и $a = 3,5$ часа, оптимальный $d\lambda$ близок к 40° .

3. В случае «номинальной» ГМ КС из 4-х КА при $d\lambda = 45^\circ$ (вычислено по формуле (1)) глобальный обзор без потерь не обеспечивается даже для $a = 3,5$ часа.

4. В случае «номинальной» ГМ КС из 5-ти КА при $d\lambda = 36^\circ$ глобальный обзор без потерь реализуется только для $a = 3,5$ часа.

5. В случае «номинальной» и тем более «эквилистантной» ГМ КС из 6-ти КА глобальный обзор без потерь реализуется для обоих периодов обновления $a = 3,0$ часа и $a = 3,5$ часа.

Таким образом, в случае обычно используемой в интересах ГМ «номинальной» структуры необходимо 5 КА для периода обновления $a = 3,5$ часа и 6 КА для $a = 3,0$ часа. В случае «эквилистантной» структуры требуется 5 КА для обоих периодов обновления.

Однако, если допустить ничтожные потери глобального ГМ-обзора в виде относительной площади участков заданной области Земли, не просмотренных за период обновления, на уровне в несколько сотых долей, то есть в несколько процентов, то требуемое количество КА уменьшается. Важным обоснованием допустимости и целесообразности введения подобных потерь является то, что в процессе практического использования получаемых данных ДЗЗ также обязательно возникают ошибки и потери. Следовательно, вполне оправданно определить уровень потерь при съемках, соответствующий или меньший в сравнении с аналогичным уровнем при операциях по обработке, преобразованию, интерпретации и дальнейшему использованию космических данных ДЗЗ. Добавим, что при съемках в видимой области спектра неизбежны потери из-за облачности.

В частности, при ограничении потерь глобального ГМ-обзора на уровне не более 2%, то есть 0,02, как будет показано ниже, оказывается достаточно применение «номинальной» структуры из 4-х КА даже для периода обновления в 3,0 часа вместо 6 КА при оптимизации по критерию T_{\max} . Для доказательства этого утверждения нужно сначала вывести формулу для расчета потерь обзора в зависимости от полного состава перерывов обзора с учетом их частот. Величина потерь как раз и станет естественным критерием оптимальности.

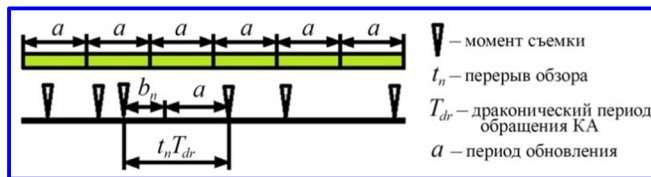


Рис. 3. Схема регулярного мониторинга точки Земли с помощью гидрометеорологической космической системы

Рассмотрим изображенную на рис. 3 схему съемки малого участка (точки) Земли.

На этой схеме изображен бесконечный ряд периодов обновления a . Видно, что при достаточно большом перерыве обзора $t_n > a$ данная точка Земли может оказаться вне съемок, если начало периода a попало на участок b_n перерыва t_n , определяемый по формуле:

$$b_n = t_n T_{dr} - a, \quad (2)$$

где перерыв t_n измеряется в количестве витков орбиты, а драконический период T_{dr} — в часах; причем считается, что все перерывы обзора перечислены по возрастанию, то есть

$$t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_n < t_{n+1} < \dots < t_{n_{\max-1}} < t_{n_{\max}}, t_{n_{\max}} = T_{\max}. \quad (3)$$

По схеме на рис. 3 можно установить, что величина средних потерь обзора, которую будем обозначать $F(a)$ и называть критерием «ошибок обзора» или кратко — критерием «ошибок», может быть вычислена следующим образом:

$$F(a) = \sum_{n=m}^{n=n_{\max}} b_n g_n = \sum_{n=m}^{n=n_{\max}} (t_n T_{dr} - a) f_n / (t_{mid} T_{dr}), \quad (4)$$

где

$$t_{m-1} T_{dr} \leq a, t_m T_{dr} > a; \quad (5)$$

g_n — частота повторения перерыва t_n по времени, в данном случае за час; f_n — относительная (безразмерная) частота перерыва t_n среди всех перерывов обзора; t_{mid} — средний период обзора, измеряемый в количестве витков орбиты, причем

$$t_{mid} = \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} t_n f_n; \quad (6)$$

$$g_n = f_n / (t_{mid} T_{dr}). \quad (7)$$

На рис. 4 представлены графики минимальных значений критерия «ошибок» $F(a)$ для периодов обновления $a = 3,0$ и $3,5$ часа при глобальном обзоре Земли с помощью «эквилистантных» структур ГМ КС из 4-х спутников. По этим графикам можно найти также значения $F(a)$ для «номинальной» структуры, в которой на основании формулы (1) долготный сдвиг $d\lambda = 45^\circ$.

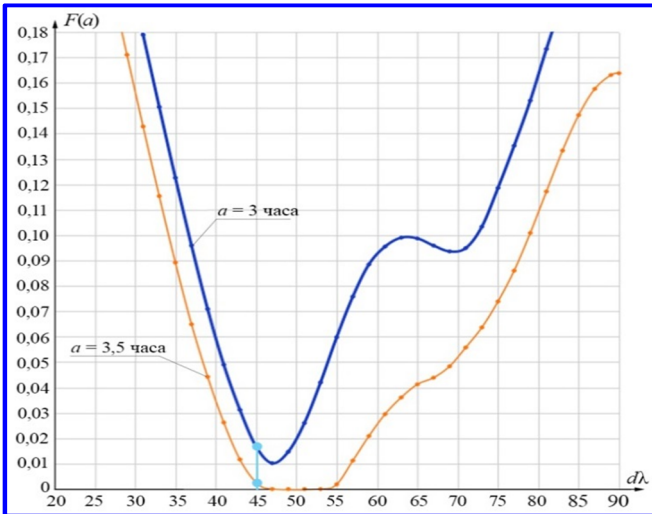


Рис. 4. Минимальные значения критерия «ошибок» $F(a)$ при глобальном обзоре Земли для «эквидистантных» гидрометеорологических космических систем из четырех спутников

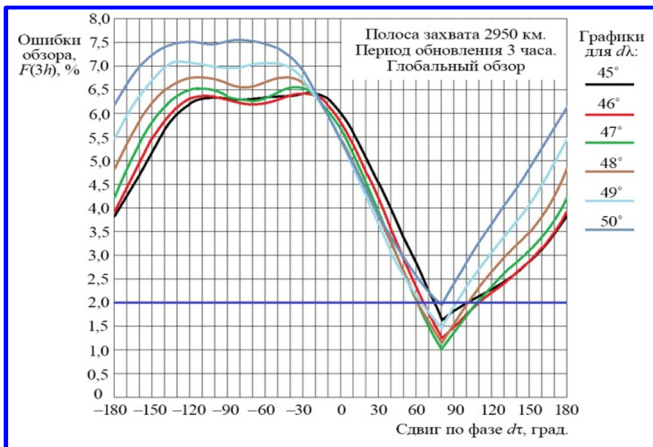


Рис. 5. «Ошибки» обзора $F(a)$ при глобальном мониторинге, выполняемом гидрометеорологическими космическими системами из четырех космических аппаратов с полосами захвата 2950 км, период обновления 3,0 часа

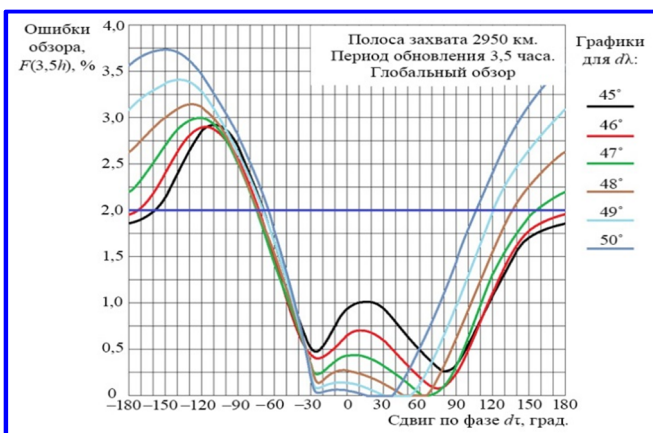


Рис. 6. «Ошибки» обзора $F(a)$ при глобальном мониторинге, выполняемом гидрометеорологическими космическими системами из четырех космических аппаратов с полосами захвата 2950 км, период обновления 3,5 часа

На рис. 4 для «номинальной» структуры с долготным сдвигом 45° ошибка обзора $F(a) = 0,017 = 1,7\%$ применительно к периоду обновления $a = 3,0$ часа и $F(a) = 0,0028 = 0,28\%$ в случае $a = 3,5$ часа.

Для «эквидистантных» структур ошибка обзора $F(a)$ находится ниже уровня в 2% для периода обновления $a = 3,0$ часа в диапазоне долготных сдвигов $d\lambda$ от $\sim 44,5^\circ$ до $\sim 50^\circ$, понижаясь до $\sim 1\%$ при $d\lambda \approx 47^\circ$. Для периода обновления $a = 3,5$ часа ошибка обзора $F(a) = 0$, то есть вовсе отсутствует в диапазоне долготных сдвигов $d\lambda$ от $\sim 47^\circ$ до $\sim 54^\circ$.

Выше указывалось, что в каждой точке графиков на рис. 2 и 4 в неявном виде присутствует оптимальное значение фазового сдвига $d\tau$, требуемое для минимизации соответствующего критерия, то есть T_{\max} или $F(a)$. Полезно исследовать в явном виде, как выбор фазового сдвига влияет на оптимизацию критерия ошибок $F(a)$.

На рис. 5 и 6 даны графики оптимальных ошибок $F(a)$ в зависимости от фазовых сдвигов для ГМ КС из 4-х КА при следующих наиболее интересных долготных сдвигах $d\lambda$: $45^\circ, 46^\circ, 47^\circ, 48^\circ, 49^\circ$ и 50° .

По рис. 5 можно установить, что для периода обновления 3 часа реализация уровня ошибок менее 2% обеспечивается для всех рассматриваемых долготных сдвигов, кроме $d\lambda = 50^\circ$, однако в довольно узких интервалах значений фазовых сдвигов.

По графикам на рис. 6 видно, что для увеличенного периода обновления 3,5 часа при всех долготных сдвигах от 45° до 50° ошибки обзора понижаются до 1% и ниже, вплоть до 0. Более того, это происходит в достаточно широких интервалах фазовых сдвигов.

Таким образом, графики на рис. 5 и 6 позволяют выбрать как долготные, так и фазовые сдвиги с целью оптимального выбора структуры ГМ КС из 4-х КА типа «Метеор».

Подведем итог исследованию, проведенному на примере оптимизации ГМ КС. Можно утверждать, что критерий «ошибок обзора» $F(a)$, вычисляемый с учетом всех перерывов обзора и их частот по формулам (4) и (5), адекватно оценивает эффективность работы мониторинговых КС типа ГМ КС и позволяет, определяя и минимизируя потери обзора, выбирать минимальное число спутников и оптимальную орбитальную структуру КС.

С помощью введенного выше критерия «ошибок обзора» $F(a)$ удобно анализировать практическую выполнимость периода обновления, заданного заказчиком. Для этого производится сравнение реализуемых (при данном периоде) потерь обзора с их допустимыми (для заказчика) уровнями. Величина a периода обновления может трактоваться как обобщенная периодичность регулярного мониторинга заданной области Земли.

2. Распространение критерия «ошибок обзора» на космические системы для мониторинговых задач

Задача ГМ-мониторинга обладает теми же принципами и особенностями использования космических данных ДЗЗ для своего решения, что и ряд следующих задач, которые можно кратко называть задачами мониторинга или мониторинговыми задачами:

- мониторинг производственной деятельности в сельскохозяйственной, водохозяйственной, лесохозяйственной, рыболовственной и других природо-хозяйственных отраслях экономики;

- мониторинг состояния текущих запасов природных ресурсов на суше и в прибрежных зонах Мирового океана;

- мониторинг землепользования, регулярное обновление кадастровых данных, периодическая инвентаризация земельных угодий;

- регулярная оценка ледовой обстановки;

- мониторинг состояния и нарушений в заповедниках, заказниках, природных парках и других природоохраненных территориях;

- мониторинг градостроительства, урбанизации и застройки территорий;

- экологический мониторинг;

- мониторинг вулканической деятельности;

- оперативное и регулярное наблюдение заданных районов на земной поверхности и морских акваториях.

Все перечисленные задачи, как и задача ГМ-мониторинга, нуждаются в регулярном поступлении данных ДЗЗ на чередующихся периодах обновления.

Ввиду принципиальной аналогии задачи ГМ-мониторинга и каждой мониторинговой задачи критерий «ошибок обзора» $F(a)$, выбранный и проверенный для ГМ КС, может столь же успешно использоваться и для всех мониторинговых задач, обеспечивая минимизацию требуемого количества КА в КС и оптимизацию ее орбитальной структуры.

3. Космические системы для обнаружения «внезапных» чрезвычайных ситуаций и применение «вероятности обнаружения чрезвычайных ситуаций за заданное время» в качестве критерия оптимизации

Рассмотрим далее состав задач ДЗЗ по обнаружению внезапных ЧС, возникающих в предельно короткие сроки и сразу достигающих размеров, выявляемых со спутника. Такие ЧС могут иметь природное или антропогенное происхождение. К внезапным ЧС можно отнести следующие техногенные и природные катастрофы, крупные аварии и масштабные опасные явления в атмосфере и на подстилающей поверхности:

- промышленные и природные катастрофы;

- знаковые транспортные аварии;

- крупные аварии на АЭС и ГЭС;

- разрушение плотин и прорывы протяженных дамб;

- гибель авиасредств с большими человеческими жертвами;

- землетрясения;

- извержения вулканов;

- крупные выбросы загрязнений в природную среду;

- крупные горные обвалы и сели;

- ледовые заторы на больших реках;

- особо крупные стихийные ГМ-явления в виде групповых смерчей, градобитий, масштабных заморозков, обширных интенсивных дождевых ливней и выпадений снега и др.

На схеме на рис. 7 отображается принципиальный характер обнаружения ЧС, которая должна быть выявлена за допустимое время a , которое коротко можно назвать «лимитом».

В качестве критерия оптимизации КС для обнаружения «внезапных» ЧС естественно ввести «вероятность $P(a)$ обнаружения внезапной ЧС за заданное Заказчиком время (обнаружения)», то есть за «лимит» a , исчисляемый в единицах времени, например, в часах.

Анализируем схему на рис. 7 и сравниваем ее со схемой регулярного ГМ-мониторинга, ранее показанной на рис. 3. Убеждаемся, что выведенные по схеме на рис. 3 формулы (4) и (5) для расчета потерь, то есть «ошибок обзора» $F(a)$, сохраняются для схемы на рис. 7 со сменой смысла функции $F(a)$: теперь она определяет вероятность не обнаружения ЧС за «лимит» a .

Значит, искомую вероятность $P(a)$ обнаружения ЧС за лимит a можно вычислить по следующей формуле, в которой учтен расчет функции $F(a)$, используя (4) и (5):

$$P(a) = 1 - \sum_{n=m}^{n=n_{\max}} (t_n T_{dr} - a) f_n / (t_{mid} T_{dr}), \quad (8)$$

где

$$t_{m-1} T_{dr} \leq a, \quad t_m T_{dr} > a; \quad (9)$$

f_n – относительная (безразмерная) частота очередного перерыва t_n среди всех перерывов обзора (3), упорядоченных по возрастанию; t_{mid} – средний период обзора, измеряемый в количестве витков орбиты и вычисляемый по формуле (6).

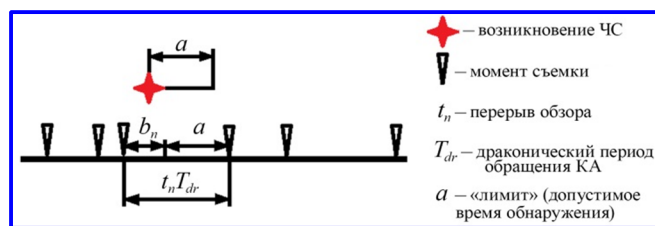


Рис. 7. Схема обнаружения «внезапной» чрезвычайной ситуации с помощью космической системы дистанционного зондирования Земли

4. Класс задач обнаружения «развивающихся» чрезвычайных ситуаций

Наряду с только что рассмотренными внезапными ЧС, которые практически сразу вырастают до размеров, обнаружимых при первом попадании в полосу захвата любого спутника КС ДЗЗ, существует важный класс развивающихся ЧС. Подобные ЧС постепенно растут во времени от первоначально небольшого (очагового) уровня, не детектируемого со спутника, до величины, когда их уже удается обнаружить с определенной вероятностью, зависящей от достигнутого ими размера и попадания в полосу захвата КА под разными углами визирования.

К развивающимся ЧС можно причислить следующие виды опасных процессов:

- лесные пожары;
- степные пожары;
- наводнения;
- разливы нефтепродуктов;
- распространение загрязнений от аварийных источников в воздушной и водной средах;
- распространение насекомых-вредителей и болезней на лесных и степных территориях;
- тропические штормы – очаги будущих тайфунов и ураганов;
- стремительно растущие и перемещающиеся с учетом погодных условий стаи саранчи;
- «красные» приливы и другие виды опасных процессов в прибрежных районах крупных водоемов.

5. Выбор критериев и оптимизация космических систем для выявления «развивающихся» чрезвычайных ситуаций на примере космической системы для раннего обнаружения лесных пожаров

Рассмотрим процедуру оптимизации орбитально-го построения КС ДЗЗ для обнаружения развивающихся ЧС на примере перспективной КС для раннего обнаружения лесных пожаров (РОЛП). Такая система может быть реально сформирована из КА с широкозахватными ИК-радиометрами типа МСУ-ИК-СРМ [8], которые уже опробованы в космосе на борту КА «Канопус-В-ИК» [9]. Целями оптимизации КС РОЛП будут выбор высоты круговой солнечно-синхронной орбиты h в диапазоне от 250 до 1000 км и обоснование рекомендуемого числа спутников N_{sat} .

В качестве критериев оптимизации КС РОЛП можно предложить следующие показатели эффективности использования такой системы:

- вероятность $V(a)$ обнаружения МЛП за заданное заказчиком время a часов;
- среднее время T_{mid} часов обнаружения МЛП;
- средняя площадь S_{mid} м² МЛП в момент обнаружения.

Критерий $V(a)$ по смыслу совпадает с критерием $P(a)$ обнаружения внезапных ЧС при лимите времени a . Однако вместо пары простых формул (8) и (9), по которым вычисляется $P(a)$, определение нового показателя $V(a)$, как мы увидим далее, потребует существенно более сложной процедуры расчета.

В дополнение к критериям, названным выше, можно использовать среднюю вероятность V_{mid} обнаружения МЛП на задаваемом перечне времен обнаружения $a_1 < a_2 < a_3 < \dots < a_m < a_{m+1} < \dots < a_{M-1} < a_M$:

$$V_{\text{mid}} = \sum_{m=1}^{m=M} V(a_m) / M. \quad (10)$$

Возможны и другие критерии по желанию заказчика. Важно, что для расчета любого из них сначала необходимо найти следующие аналитические модели и зависимости:

- модель роста площади (S) малоразмерного лесного пожара (МЛП) во времени (T);
- зависимость минимально обнаружимой в надире площади $\sigma(h)$ МЛП от высоты (h);
- модель расчета минимально обнаружимой площади $\sigma(h, w)$ МЛП от высоты h и его положения на полосе захвата под углом визирования w ;
- модель (схема) обнаружения МЛП системой спутников.

Модель роста площади (S) МЛП, выраженной в м², заимствуем из публикаций [10 – 12]. Она получена на основе рекомендаций, таблиц и графиков из [13] и представляет собой следующую зависимость:

$$S = S_{\text{beg}} + 1,32 \sqrt{S_{\text{beg}}} V_{\text{fr}} T + 0,4356 V_{\text{fr}}^2 T^2, \quad (11)$$

где S_{beg} – площадь МЛП в начальный момент времени в м²; V_{fr} – скорость перемещения фронта МЛП в м/час; T – промежуток времени от начального момента до текущего времени в часах.

Минимально обнаружимая площадь $\sigma(h)$ МЛП в надире с высоты h определяется по следующей формуле из [10, 11]:

$$\sigma(h) = \sigma(510) h^2 / 510^2 = 25 h^2 / 510^2, \quad (12)$$

где $\sigma(510) = 25$ м² – минимально обнаружимая площадь МЛП в надире для радиометра МСУ-ИК-СРМ с высоты орбиты $h = \sim 510$ [8].

Используя формулу (12), вычисляем начальную площадь МЛП, минимально обнаружимую в надире с минимальной высоты 250 км [10, 11]:

$$S_{\text{beg}} = 6 \text{ м}^2. \quad (13)$$

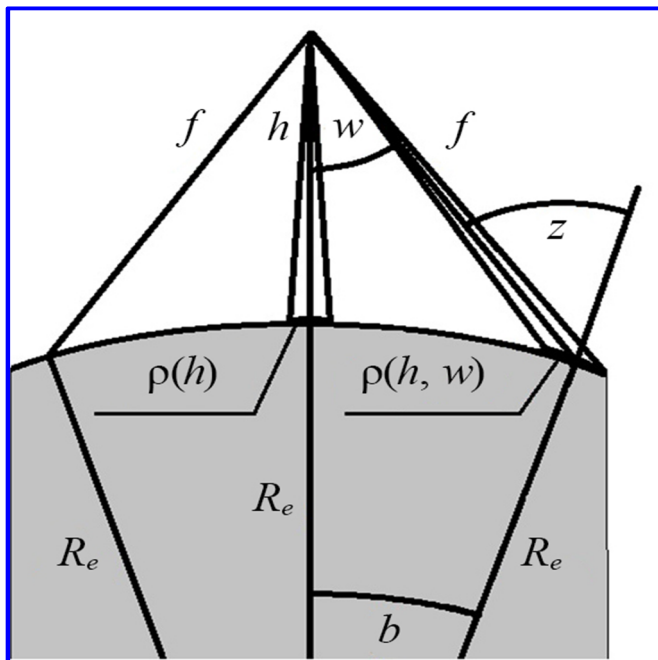


Рис. 8. Схема зондирования поверхности Земли широкозахватным ИК-радиометром

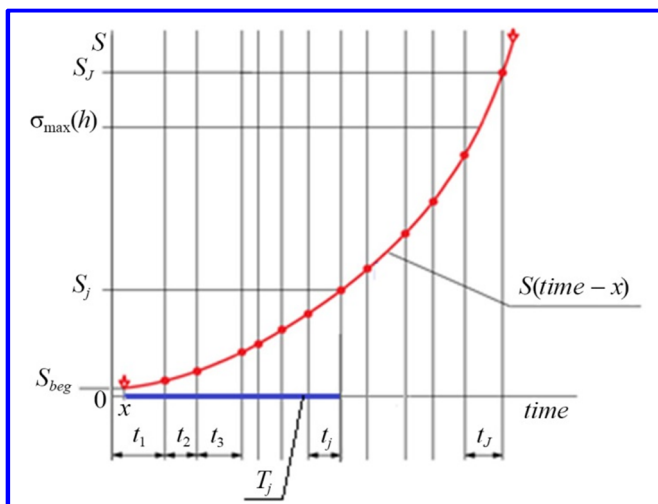


Рис. 9. Схема обнаружения малоразмерного лесного пожара с помощью системы спутников

Модель расчета минимально обнаружимой площади $\sigma(h, w)$ МЛП с высоты h при его положении на полосе захвата под углом визирования w иллюстрируется на рис. 8.

На схеме на рис. 8 применяются следующие обозначения: f – дальность (км) от спутника до места на полосе захвата под углом визирования w ; $\rho(h)$ и $\rho(h, w)$ – площади пикселей с высоты (h) , соответственно, в надири и под углом w ; $R_e = 6371$ км – средний радиус Земли; z – зенитный угол спутника для точки Земли под углом w ; b – «центральный

ный угол» точки Земли, расположенной под углом визирования w относительно точки надира.

В [11] по схеме на рис. 8 выведена следующая формула для вычисления минимально обнаружимой площади МЛП:

$$\sigma(h, w) = 25R_e^2 \sin^2(z - w) / (510^2 \sin^2 w \cos z) \text{ м}^2, \quad (14)$$

где

$$z = \sin^{-1}(\sin w(R_e + h)/R_e). \quad (15)$$

По этим формулам можно, в частности, найти максимальную минимально обнаружимую площадь $\sigma_{\max}(h)$ на краю полосы захвата ИК-радиометра типа МСУ-ИК-СРМ под предельным углом визирования $w_{\max} = 59^\circ$ [8]. МЛП с площадью, равной или превышающей $\sigma_{\max}(h)$, будет обнаружен при попадании на любой участок полосы захвата.

Будет использоваться также следующая формула для расчета центрального угла b :

$$b = z - w. \quad (16)$$

Переходим к рассмотрению схемы обнаружения МЛП системой спутников на рис. 9.

На рис. 9 по горизонтали откладывается время (time) в часах, а по вертикали – площадь (S) МЛП в м^2 . Выделены промежутки времени $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_j$ между моментами наблюдения (с какого-нибудь спутника КС ДЗЗ) участка Земли, на котором возник и развивается МЛП. Эти промежутки времени являются перерывами обзора.

Развивающийся МЛП достиг начальной обнаружимой площади (S_{beg}) на 1-ом перерыве обзора t_1 в момент x . Далее отсчитываются времена до моментов окончания перерывов обзора, например, T_j в момент завершения перерыва t_j :

$$T_j = \left(\sum_{m=1}^{m=j} t_m \right) - x. \quad (17)$$

График $S(\text{time} - x)$ показывает рост площади МЛП по формуле (11) при $T = \text{time} - x$ после достижения начальной площади (S_{beg}), определенной по формуле (13). Маленькими кругами выделены значения этой площади в моменты окончания перерывов обзора. В частности, при завершении перерыва t_j она равна S_j .

Максимальная минимально обнаружимая площадь $\sigma_{\max}(h)$ найдена по формулам (14) и (15) при $w = w_{\max} = 59^\circ$. В очередной момент t_j , наступивший сразу после достижения значения $\sigma_{\max}(h)$, МЛП будет непременно обнаружен с вероятностью 1.

Обнаружение МЛП носит дискретный характер, так как пожар детектируется, попадая в какой-нибудь один из пикселей с номерами $n = 1, 2, 3, \dots, N_{pixel}$, перечисляемых налево и направо от надира на полосе захвата спутника. Общее число пикселей равно $2N_{pixel}$.

Введем угол δ , под которым виден один пиксель со спутника. Он определяется так:

$$\delta = w_{max}/N_{pixel}, \quad (18)$$

а центры пикселей фиксируются следующими углами визирования w :

$$0,5\delta; 1,5\delta; \dots; (n-0,5)\delta; (n+0,5)\delta; \dots; (N_{pixel}-0,5)\delta. \quad (19)$$

Для вычисления минимально обнаружимой площади МЛП в центре пикселя с номером n формулы (14) и (15) с учетом (18) и (19) конкретизируются следующим образом:

$$\sigma(h, n) = 25R_e^2 \sin^2(z - (n-0,5)\delta) / (510^2 \sin^2((n-0,5)\delta) \cos z), \quad (20)$$

где

$$z = \sin^{-1}(\sin((n-0,5)\delta) (R_e + h) / R_e). \quad (21)$$

Максимальная минимально обнаружимая площадь $\sigma_{max}(h)$ МЛП на крайнем пикселе с номером N_{pixel} вычисляется по формулам (20) и (21) при $n = N_{pixel}$.

Фиксируем растущий ряд минимально обнаружимых площадей $\sigma_{max}(h, n)$ для перечня пикселей $n = 1, 2, 3, \dots, N_{pixel}$, рассчитанный по формулам (20) и (21):

$$\sigma(h, 1), \sigma(h, 2), \dots, \sigma(h, n), \dots, \sigma(h, N_{pixel}-1), \sigma(h, N_{pixel}) = \sigma_{max}(h). \quad (22)$$

Параллельно находим ряд центральных углов $b(h, n)$ для центров пикселей с номерами $n = 1, 2, 3, \dots, N_{pixel}$. Для этой цели углы визирования w выбираются из ряда (19), а зенитные углы z вычисляются по формуле (21). Подставляя эти значения в формулы (16) и (15), получаем следующую формулу для расчета $b(h, n)$:

$$b(h, n) = \sin^{-1}(\sin((n-0,5)\delta) (R_e + h) / R_e) - (n-0,5)\delta,$$

используя которую, определяется искомым ряд центральных углов:

$$b(h, 1), b(h, 2), \dots, b(h, n), \dots, b(h, N_{pixel}-1), b(h, N_{pixel}) = b_{max}(h). \quad (23)$$

По набору значений (22) удобно находить пиксель с наибольшим номером n , при котором еще обнаруживается МЛП с площадью S_j в конце перерыва обзора t_j . Эта площадь вычисляется по формуле (11) для каждого перерыва обзора $j = 1, 2, 3,$

\dots, J , подставляя в нее T_j из (17) вместо T и $S_{beg} = 6$ из (13). Используя ряд (22), для каждого j -го перерыва подбирается наибольший номер n -пикселя, на котором еще обнаруживается МЛП с площадью S_j . Он должен удовлетворять следующему условию:

$$\sigma(h, n) \leq S_j < \sigma(h, n+1), \text{ если } S_j < \sigma_{max}(h), \\ \text{и } n = N_{pixel}, \text{ если } S_j \geq \sigma_{max}(h). \quad (24)$$

Для всех найденных номеров n -пикселей однозначно определяются соответствующие им в ряду (23) центральные углы $b(h, n)$, используя которые, вычисляются вероятности P_j обнаружения МЛП в конце каждого перерыва t_j :

$$P_j = b(h, n) / b_{max}(h), \text{ если } S_j < \sigma_{max}(h), \quad (25)$$

$$P_j = 1, \text{ если } S_j \geq \sigma_{max}(h). \quad (26)$$

Рассчитав все P_j , определяются все вероятности F_j обнаружения МЛП именно в конце каждого из перерывов t_j , то есть при условии, что это еще не случилось в конце какого-нибудь из предыдущих перерывов:

$$F_j = P_j \prod_{m=1}^{m=j-1} (1 - P_m). \quad (27)$$

Используя вероятности F_j , вычисляются все искомые критерии оптимальности для последовательности перерывов обзора $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_J$ на схеме на рис. 9:

– вероятность $V(a)$ выявления МЛП за время обнаружения a по формуле

$$V(a) = \sum_{m=1}^{m=j} F_m \text{ при } T_j \leq a < T_{j+1}; \quad (28)$$

– среднее время T_{mid} обнаружения МЛП по формуле

$$T_{mid} = \sum_{j=1}^{j=J} T_j F_j; \quad (29)$$

– средняя площадь S_{mid} МЛП в момент его обнаружения по формуле

$$S_{mid} = \sum_{j=1}^{j=J} S_j F_j; \quad (30)$$

– средняя вероятность обнаружения МЛП на перечне времен обнаружения $a_1 < a_2 < a_3 < \dots < a_m < a_{m+1} < \dots < a_{M-1} < a_M$ по формуле (10).

Итак, процедура, реализуемая на базе формул (10) – (30), обеспечивает расчет критериев оптимальности КС РОЛП для фиксированной последовательности перерывов обзора. Поэтому нужно многократно повторять эту процедуру для различных последовательностей, возникающих на разных

участках заданной области Земли, а затем находить средние значения критериев оптимальности по всем последовательностям.

Для формирования рассматриваемых последовательностей используется набор перерывов обзора вместе с частотами их повторения, определяемый с помощью уже упоминавшейся компьютерной программы на основе аппарата ВМОЗ. Выбор очередной последовательности производится с помощью датчика случайных чисел по известному методу Монте-Карло [13, 14]. Завершение их перебора наступает по специальному правилу, состоящему из 2-х условий и обеспечивающему высокую точность расчетов критериев оптимальности.

Более подробное изложение способа формирования последовательностей перерывов обзора, вычисления по ним средних значений показателей эффективности КС РОЛП, а также обоснования условий завершения вычислений при достижении заданной точности дано в публикациях [11, 15 – 16]. Кроме того, в них содержатся таблицы, графики, результаты анализа и рекомендации по выбору количества спутников, высоты орбит и структуры КС РОЛП, основываясь на каждом из рассмотренных выше критериев оптимальности.

В качестве примера на рис. 10 приведены графики, демонстрирующие зависимость средней площади (S_{mid}) обнаруженного МЛП от числа спутников (N_{sat}) и высоты орбиты h . Орбитальная структура КС РОЛП – «эквидистантная», состоящая из нескольких плоскостей орбит, в каждой из которых размещено по два спутника на расстоянии 180° друг от друга.

Рис. 10 заимствован из статьи [16]. В каждой точке графиков на рис. 10 в неявном виде отражены оптимальные сдвиги по долготе $d\lambda$ и фазе $d\tau$, анализ выбора которых для оптимизации «эквидистантной» структуры КС РОЛП выполнен в работе [17]. По графикам на рис. 10 можно, например, установить, что для обеспечения средней площади (S_{mid}) МЛП в момент обнаружения на уровне ниже 1000 м^2 , то есть $0,1 \text{ га}$, потребуется КС РОЛП из 10 КА на орбитах с высотами от 600 до 850 км. КС из 8 КА может обеспечить $S_{mid} < 1100 \text{ м}^2$ при высотах орбит от ~ 750 до ~ 850 км.

Далее полезно отметить следующее любопытное обстоятельство, выявленное в работах [16, 17]: результаты оптимизации КС РОЛП по каждому из критериев V_{mid} , T_{mid} и S_{mid} в отдельности оказались близки друг к другу. Скорее всего, это объясняется тем, что формула (10) с учетом (28) для расчета V_{mid} , а также формулы (29) для T_{mid} и (30) для S_{mid} являются функциями от одних и тех же вероятностей F_j . Несмотря на различный вид данных функций, результаты вычислений по ним все равно не слишком существенно отличаются.

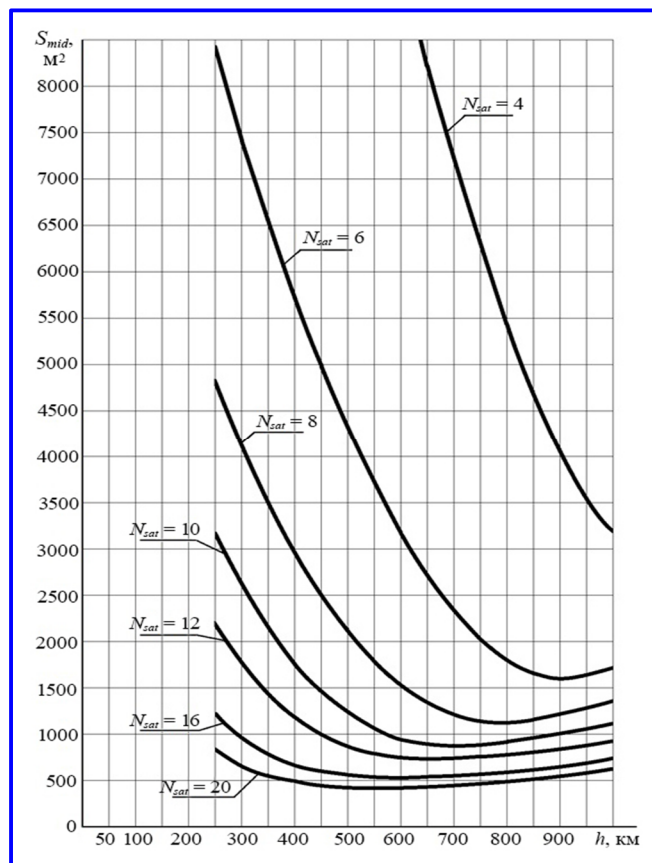


Рис. 10. Графики средней площади (S_{mid}) малоразмерных лесных пожаров (в момент обнаружения) в зависимости от числа спутников (N_{sat}) и высоты орбиты (h), орбитальная структура – «эквидистантная», в каждой плоскости орбиты находится по 2 космических аппарата

Можно ожидать, что любой иной мыслимый критерий оптимальности КС РОЛП также должен иметь вид некоторой функции от вероятностей F_j , выводимой на основе схемы на рис. 9. Следовательно, возникает естественный вывод о том, что и для него результаты оптимизации не будут существенно отличаться, в частности, от представленных на рис. 10 и других результатов статей [16, 17].

6. Видоизменение и обобщение критериев оптимизации космических систем раннего обнаружения лесных пожаров на остальные космические системы по обнаружению «развивающихся» чрезвычайных ситуаций

Для остальных задач по обнаружению развивающихся ЧС можно рекомендовать критерии оптимальности, аналогичные по смыслу рассмотренным выше критериям КС РОЛП:

- вероятность $V(a)$ обнаружения ЧС за заданное заказчиком время a ;
- среднее время T_{mid} обнаружения ЧС;

– средняя площадь S_{mid} или иной растущий во времени параметр обнаруженной ЧС;

– средняя вероятность V_{mid} обнаружения ЧС на задаваемом перечне времен обнаружения $a_1 < a_2 < a_3 < \dots < a_m < a_{m+1} < \dots < a_{M-1} < a_M$, вычисляемая по формуле (10).

Как и для КС РОЛП, для расчета любого из названных критериев сначала необходимо найти следующие аналитические модели и зависимости:

– модель роста площади (S) или иного растущего во времени (T) параметра ЧС;

– зависимость минимально обнаружимой в надире площади $\sigma(h)$ ЧС от высоты (h);

– модель расчета минимально обнаружимой площади $\sigma(h, w)$ или иного растущего параметра ЧС от высоты (h) и положения на полосе захвата под углом визирования w ;

– модель (схема) обнаружения ЧС системой спутников.

Процедура по вычислению критериев оптимальности для каждой задачи по обнаружению конкретной развивающейся ЧС будет идентична изложенной процедуре для КС РОЛП, однако вид используемых аналитических моделей и зависимостей может отличаться от тех, что выведены ранее для КС РОЛП.

Естественно также ожидать, что результаты оптимизации любой КС обнаружения развивающейся ЧС по каждому из выше названных критериев будут не слишком сильно отличаться друг от друга.

Выводы

1. На примере КС ГМ-мониторинга показано, что использование в качестве критерия оптимизации КС ДЗЗ максимального перерыва обзора T_{max} нерационально, так как частота его реализации, как правило, ничтожно мала по сравнению с остальными перерывами обзора заданной области Земли.

Применение T_{max} может приводить к завышению необходимого числа КА в КС ДЗЗ.

2. Для оптимизации состава и орбитального построения КС ДЗЗ необходимо применять критерии в виде функций от всех перерывов обзора на заданной области Земли вместе с частотами их реализации (повторения). Для расчета полного состава перерывов с частотами рекомендована компьютерная программа на базе ВМОЗ.

3. Выделены три широких класса задач ДЗЗ: задачи мониторинга, задачи обнаружения «внезапных» ЧС, задачи обнаружения «развивающихся» ЧС.

Для каждого класса предложены и обоснованы критерии-функции от всех перерывов обзора за-

данной области Земли, используемые для оптимизации соответствующих КС.

4. Для мониторинговых КС рекомендован критерий «ошибок обзора» $F(a)$ на задаваемом заказчиком «периоде обновления» a . Он фиксирует среднюю относительную площадь участков заданной области Земли, не просматриваемых за период обновления.

Приведен пример оптимизации КС ГМ-мониторинга на основе критерия «ошибок обзора».

5. Для КС по обнаружению внезапных ЧС в качестве критерия обоснована вероятность $P(a)$ обнаружения ЧС за заданный «лимит» времени a .

6. Для КС по обнаружению развивающихся ЧС рекомендовано несколько критериев:

– вероятность $V(a)$ обнаружения ЧС за заданное время a ;

– среднее время T_{mid} обнаружения ЧС;

– средняя площадь S_{mid} или иной растущий во времени параметр обнаруженной ЧС;

– средняя вероятность V_{mid} обнаружения ЧС на заданном перечне времен обнаружения.

Для расчета этих критериев сначала выводятся следующие модели и зависимости:

– модель роста площади (S) или иного растущего во времени параметра ЧС;

– зависимость минимально обнаружимой в надире площади $\sigma(h)$ ЧС от высоты (h);

– модель расчета минимально обнаружимой площади $\sigma(h, w)$ или иного растущего параметра ЧС от высоты (h) и положения на полосе захвата под углом визирования w ;

– модель (схема) обнаружения ЧС системой спутников.

Приведен пример оптимизации КС РОЛП, в котором выведены перечисленные модели и зависимости, изложена процедура вычисления критериев оптимальности, выполнены расчеты и проанализированы полученные результаты.

Литература

1. Саульский В. К. Рациональные орбиты для многополосного обзора Земли из космоса / В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2015. – Т. 145. – № 2. – С. 42 – 56.
2. Горбунов А. В. Векторный метод анализа спутниковых структур / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2015. – Т. 147. – № 4. – С. 18 – 28.
3. Горбунов А. В. Применение векторной модели обзора Земли для анализа ИСЗ на изомаршрутных орбитах / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2016. – Т. 153. – № 4. – С. 29 – 46.

4. Саульский В. К. Анализ систем спутников для периодического обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2017. – Т. 55 – № 4. – С. 290 – 304.
5. Горбунов А. В. Векторная модель обзора Земли и направления ее использования / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2017. – Т. 156. – №1. – С. 21 – 32.
6. Анализ структуры группировок спутников типа «Метеор-М» / А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина, Л. А. Макриденко [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2020. – № 2 (113). – С. 5 – 21.
7. Анализ структуры многоспутниковых группировок для раннего обнаружения малоразмерных лесных пожаров / А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина, Л. А. Макриденко [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2020. – № 4 (115). – С. 5 – 20.
8. Первые результаты работы ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ в составе КА «Канопус-В-ИК» / Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. – Вып. 4. – С. 34 – 45.
9. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» / Под редакцией Л. А. Макриденко, С. Н. Волкова, А. В. Горбунова, Р. С. Салихова, С. И. Терехова. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 130 с.
10. Ильина И. Ю. Разработка метода расчета числа спутников и высоты орбит для космической системы обнаружения малоразмерных лесных пожаров / И. Ю. Ильина, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2021. – Т. 183. – № 4. – С. 26 – 43.
11. Метод определения орбитальных параметров систем КА для обнаружения малоразмерных лесных пожаров / А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина, В. Н. Почукаев [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – Королев : АО «ЦНИИ-маш», 2023. – Т. 132. – № 3. – С. 28 – 43.
12. Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС. Книга 2. – Москва : МЧС РФ, 1994. – 54 с.
13. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – Москва : Наука, 1968. – 64 с.
14. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – Москва: Советское радио, 1972. – 552 с.
15. Ильина И. Ю. Исследование орбитального построения системы обнаружения лесных пожаров / И. Ю. Ильина, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2021. – Т. 184. – № 5. – С. 43 – 54.
16. Ильина И. Ю. Метод расчета состава космического аппарата и высот орбит для раннего обнаружения лесных пожаров / И. Ю. Ильина // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2022. – Т. 186. – № 1. – С. 42 – 56.
17. Ильина И. Ю. Анализ и выбор структуры систем спутников для раннего обнаружения лесных пожаров / И. Ю. Ильина // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2022. – Т. 190. – № 5. – С. 49 – 60.

Поступила в редакцию 06.10.2023

Ирина Юрьевна Ильина, заместитель начальника научно-производственного комплекса, т. (495) 623-57-74, e-mail: npk@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»).

CRITERIONS FOR REMOTE SENSING SPACE SYSTEMS OPTIMIZATION USING FULL NUMBERS OF A GIVEN EARTH ZONE SURVEY TIME INTERVALS

I. Iu. Ilina, V. K. Saulskii

The maximum break (T_{max}) of the Earth specified area survey is usually applied in the capacity of criteria of Earth remote sensing space systems optimization. It is often called 'survey period' that is not correct. Usage of the present criteria may result in increasing of required spacecraft quantity in space system because the T_{max} realization rate is usually negligibly small in comparison with the rates of remaining survey breaks. Full optimization criteria shall be a function of the all survey breaks, realized on the Earth specified area, taking into account their rates. The computer program based on vector model of the Earth survey is developed for calculation of full complement of breaks with rates. There are presented three forms of criteria-functions for optimization of the space systems for three wide variety of the Earth remote sensing tasks: monitoring space systems, space systems for 'sudden' emergency situation detection, space systems for 'processive' emergency situation detection. Practicality of using of these criteria-functions is checked and confirmed at the examples of space systems for hydrometeorological monitoring and early detection of forest fires.

Key words: Optimization criteria, maximum break, survey break, realization rate, vector model, 'sudden' emergency situations, 'processive' emergency situations, small forest fire.

References

1. Saulskii V. K. Rational orbits for multiswath survey of the Earth from space / V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow: VNIIEM Corporation JSC. – 2015. – Vol. 145. – No. 2 – P. 42–56.
2. Vector method for analysis of satellite structures / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2015. – Vol. 147. – No. 4. – P. 18–28.
3. Gorbunov A. V. Application of vector model for Earth survey for analysis of artificial Earth satellite on repeating orbits / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2016. – Vol. 153. – No. 4. – P. 29–46.
4. Saulskii V. K. Analysis of satellite systems for periodical Earth observation / V. K. Saulskii // Space research. – 2017. – V. 55. – No. 4. – P. 290–304.
5. Gorbunov A. V. Vector model for Earth survey and its application areas / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow: VNIIEM Corporation JSC. – 2017. – Vol. 156. – No. 1. – P. 21–32.
6. Analysis of structure of Meteor-M type satellite constellations / A. V. Gorbunov, I. Yu. Ilyina, L. A. Makridenko [et al.] // Cosmonautics and rocket engineering. – 2020. – No. 2 (113). – P. 5–21.
7. Analysis of structure of multi-satellite constellations for early detection of small forest fires / A. V. Gorbunov, I. Yu. Ilyina, L. A. Makridenko [et al.] // Cosmonautics and rocket engineering. – 2020. – No. 4 (115). – P. 5–20.
8. First results of operation of the IR-radiometer MSU-IK-SRM as part of CANOPUS-V-IK spacecraft / N. P. Akimov, K. V. Badaev, Yu. M. Gektin [et al.] // Rocket and space instrument engineering and information systems. – 2018. – V. 5. – Issue 4. – P. 34–45.
9. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V-IK / Edited by L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov, R. S. Salikhov, S. I. Terekhov. – Moscow: VNIIEM Corporation JSC, 2017. – 130 p.
10. Ilyina I. Yu. Development of method of calculation of spacecraft quantity and orbit altitude for space system of detection of forest fires // I. Yu. Ilyina, V. K. Saulskii // Matters of electromechanics. VNIIEM Proceedings – Moscow: VNIIEM Corporation JSC - 2021. – V. 183. – No. 4. – P. 26–43.
11. Method of determination of SC system orbital parameters for detection of small forest fires / A. V. Gorbunov, I. Yu. Ilyina, V. N. Pochukaev [et. Al] // Cosmonautics and rocket engineering. – Korolev: JSC TSNIIMASH, 2023. – Vol. 132 – No. 3 – P. 28–43.
12. Collection of Methods of Forecasting of Potential Accidents, Catastrophes and Natural Calamities in Russian Emergency Services, Vol. 2. – Moscow: MChS, 1994 – P. 54.
13. Sobol I. M. Monte Carlo method / I. M. Sobol. – Moscow : Nauka (Science), 1968. – 64 p.
14. Ventcel E. S. Research of operations / E. S. Ventcel – Moscow: Sovetskoe Radio, 1972 – P. 552.
15. Ilyina I. Yu. Investigation of orbital structure of a space system for detection of forest fires / I. Yu. Ilyina, V. K. Saulsky // Matters of electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow: VNIIEM Corporation JSC. – 2021. – V. 184. – No. 5. – P. 43–54.
16. Method of calculation of spacecraft composition and orbit attitudes for early detection of forest fires / I. Yu. Ilyina // Matters of electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow: VNIIEM Corporation JSC. – 2022. – V. 186. – No. 1. – P. 42–56.
17. Ilyina I. Yu. Analysis and selection of composition of spacecraft systems for early detection of forest fires / I. Yu. Ilyina // Matters of electromechanics. VNIIEM Proceedings. – M.: VNIIEM Corporation JSC. – 2022. – V. 190. – No. 5. – P. 49–60.

*Irina Yurevna Ilyina, Deputy Head of Research and Production Center,
t. +7 (495) 623-57-74, e-mail: npk@hq.vniiem.ru.*

*Viktor Konstantinovich Saulskii, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Chief Specialist
t. +7 (495) 623-57-74, e-mail: ntk.vniiem@bk.ru.
(JC VNIIEM Corporation).*