

УДК 629.78

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАСТЕРА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. В. Соллогуб,

доктор техн. наук, профессор
«ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

П. О. Скобелев,

доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник
Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Е. В. Симонова,

канд. техн. наук, доцент

А. В. Царев,

генеральный директор

М. Е. Степанов,

разработчик

А. А. Жиляев,

разработчик

ООО «Научно-производственная компания «Разумные решения», г. Самара

Предлагаются модели оценки эффективности при формировании кластера малых космических аппаратов для мониторинга поверхности Земли в целях обеспечения требований по оперативности доставки информации потребителю и надежности решения функциональных задач.

Ключевые слова — эффективность, кластер малых космических аппаратов, оперативность доставки информации, надежность решения функциональных задач.

Введение

Задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) возникают в широком спектре предметных областей: мониторинг окружающей среды, поиск движущихся объектов, контроль состояния технических объектов и сооружений, наблюдение за объектами в околоземном пространстве и т. п. К недостаткам ДЗЗ, выполняемого одиночными крупногабаритными космическими аппаратами (КА), следует отнести дороговизну производства, требующего одномоментных крупных вложений, недостаточную точность изображения, длительный анализ изображений, ограниченные условия передачи информации, централизованное управление с Земли. Поэтому наиболее современной тенденцией является использование для решения задач ДЗЗ группировок (кластеров) малоразмерных космических аппаратов (МКА), оснащенных аппаратурой различного назначения, напри-

мер, видимого, инфракрасного, радиационного спектра [1–6]. Основными преимуществами кластера МКА ДЗЗ перед одиночными КА являются улучшение целевых показателей по оперативности наблюдения за процессами, происходящими на поверхности Земли, возможности более эффективного наблюдения за быстропротекающими процессами, а также повышение надежности наблюдения при параллельно функционирующих КА кластера.

Формирование кластера МКА в зависимости от показателя старения наблюдаемого процесса

Эффективность систем КА ДЗЗ с точки зрения оперативности доставки необходимой потребителю информации во многом зависит от степени старения наблюдаемого на поверхности Земли процесса. Интуитивно понятно, что для быстро-

протекающих процессов периодичность наблюдения должна быть выше, чем для медленно протекающих процессов. Задержка в доставке информации по быстроизменяющемуся процессу может привести в ряде случаев к тому, что потребитель вместо информации получит фактически дезинформацию.

В качестве простейшей модели рассмотрим экспоненциальный закон старения [7]

$$p(t) = e^{-\beta t},$$

где $p(t)$ — вероятность того, что по истечении времени t поступившая потребителю информация не устарела; β — показатель старения. Величину $p(t)$ можно принять за уровень достоверности информации, а $(1 - p(t))$ — за уровень ее недостоверности. Показатель β зависит от динамики изменения состояния объекта или процесса, который наблюдается. В связи с этим различают группировки КА для планово-периодического наблюдения (для относительно мало изменяющихся процессов) и группировки КА для оперативного наблюдения (для быстропротекающих процессов).

Существуют различные методы повышения оперативности наблюдения и доставки информации. К ним относятся: увеличение числа пунктов приема информации (ППИ) и равномерное их территориальное распределение, использование для доставки информации спутников-ретрансляторов, совмещение во времени при пролете над ППИ режимов наблюдения и передачи информации на ППИ, увеличение количества КА в группировке. Рассмотрим последний из методов.

Интервал времени $[0, \infty)$ изменения $p(t)$ можно разбить на два участка — участок быстрого изменения $p(t)$ и участок, на котором $p(t)$ приближается к оси абсцисс и изменяется незначительно. Можно полагать, что если время задержки соответствует второму участку, то потребитель получит информацию с довольно значительным уровнем недостоверности. Предположим, что по истечении времени T_{dz} полученную информацию с вероятностью $1 - p_{dz}$, где $p_{dz} = p(T_{dz})$, можно рассматривать как дезинформацию. Отсюда

$$p_{dz} = e^{-\beta T_{dz}} \text{ и } \beta = -\ln p_{dz} / T_{dz}.$$

Оценим допустимое время задержки для случая, когда потребителю необходима информация, уровень достоверности которой не ниже

$$p_{dop}. \text{ Из уравнения } p_{dop} = e^{-\frac{\ln p_{dz}}{T_{dz}} \cdot t_{dop}} \text{ получим}$$

$$t_{dop} = \frac{\ln p_{dop}}{\ln p_{dz}} \cdot T_{dz}.$$

За время наблюдения за процессом (T_{dz}) число циклов доставки, которое обеспечивает заданный уровень достоверности, равно

$$n = \frac{T_{dz}}{t_{dop}} = \frac{\ln p_{dz}}{\ln p_{dop}}.$$

Рассмотрим пример. Пусть требуется контролировать экологическую обстановку в весенний период, например, в районах разлива рек. В качестве интервала наблюдения примем интервал продолжительностью в одну неделю (7 сут).

Если потребитель получит информацию о паводке через неделю с момента последнего его наблюдения и информация будет на 30 % не соответствовать действительности, то уровень ее старения $\beta_1 = -\ln(0,7)/7$ или $\beta_1 = 0,051$.

Оценим теперь периодичность и число циклов доставки информации потребителю, если требуемый уровень достоверности получаемой информации должен быть не ниже $p_{dop} = 0,95$. В этом случае, если принять $T_{dz} = 7$, получим $t_{dop} = 1,007$, $n = 6,951$.

Таким образом, для достижения требуемого уровня достоверности информация должна обновляться один раз в сутки. Для этого достаточно иметь один низкоорбитальный КА.

В случае если наводнение угрожает затопить густонаселенные районы или прорвать плотину, необходимо обеспечить наблюдение за процессом с более высоким уровнем старения, т. е. более быстро протекающим процессом. Если принять, что по истечении 7 дней мы потеряем 50 % информации, то уровень старения $\beta_2 = -\ln(0,5)/7$ или $\beta_2 = 0,099$. В этом случае $t_{dop} = 0,518$, $n = 13,514$. Для наблюдения за этим процессом система должна включать два низкоорбитальных КА ДЗЗ.

При наличии на орбите кластера МКА ДЗЗ существующая парадигма планирования их работы состоит в составлении расписания функционирования КА в наземных условиях, при этом наибольшим приоритетом, с точки зрения оперативности, обладают быстропротекающие процессы. Перечень и порядок съемки целей для каждого КА определяется и задается с Земли.

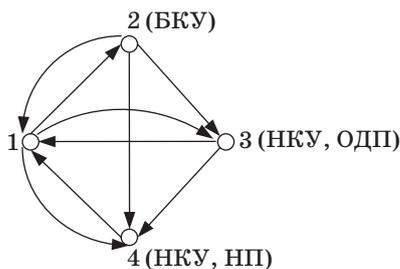
Перспективным направлением в вопросах планирования работы малых КА является применение мультиагентных технологий и технологий представления и обработки знаний [1–6]. Здесь с каждым КА и с каждой целью связывается программа-агент, которая представляет соответствующий КА или цель в интеллектуальной среде и «действует» от их имени. КА-агенты ассоциируются с возможностями орбитальной группировки КА, а агенты-цели — с потребностями или заказами на информацию зондирования. В результате появляется возможность построить

в реальном масштабе времени глобально распределенную в космическом пространстве виртуальную сеть потребностей и возможностей (ПВ-сеть [8]). Связи между КА-агентами могут устанавливаться в результате переговорного процесса. В базе знаний каждого КА хранится список целей, передаваемый с Земли, с их координатами, приоритетами и показателями старения. Если приоритеты не задаются, то показатели старения могут использоваться для определения приоритетности зондирования целей. Каждый КА-агент «знает» координаты других КА. Все это дает возможность планировать в бортовых условиях работу каждого из КА по целям в соответствии с установленными приоритетами. Таким образом, задача целеуказаний в значительной своей части может быть возложена непосредственно на кластер. Рассмотренная парадигма является важным элементом «встроенной самоорганизации», которая реализуется автономно в бортовых условиях. Для случая, когда группировка малых КА представляет собой плотно расположенную в пространстве «стаю» КА-агентов, это дает возможность задействовать значительную часть КА на зондирование кратковременных быстропротекающих процессов.

Вероятности состояний отдельных элементов кластера МКА в процессе функционирования

В процессе функционирования каждый МКА в кластере может находиться в различных состояниях. Выделим четыре основных состояния: 1 — состояние работоспособности МКА; 2 — состояние восстановления работоспособности МКА средствами бортового комплекса управления (БКУ); 3 — состояние восстановления работоспособности МКА средствами наземного контура управления (НКУ) с нахождением МКА в режиме ориентированного дежурного полета (ОДП); 4 — состояние восстановления работоспособности МКА средствами НКУ с нахождением МКА в режиме неориентированного полета (НП).

Граф переходных вероятностей состояний МКА представлен на рис. 1.



■ Рис. 1. Граф переходных вероятностей состояний МКА

Уравнения Колмогорова для переходных вероятностей имеют вид

$$\frac{dp1(t)}{dt} = \lambda_{21}p2(t) + \lambda_{31}p3(t) + \lambda_{41}p4(t) - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})p1(t);$$

$$\frac{dp2(t)}{dt} = \lambda_{12}p1(t) - (\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})p2(t);$$

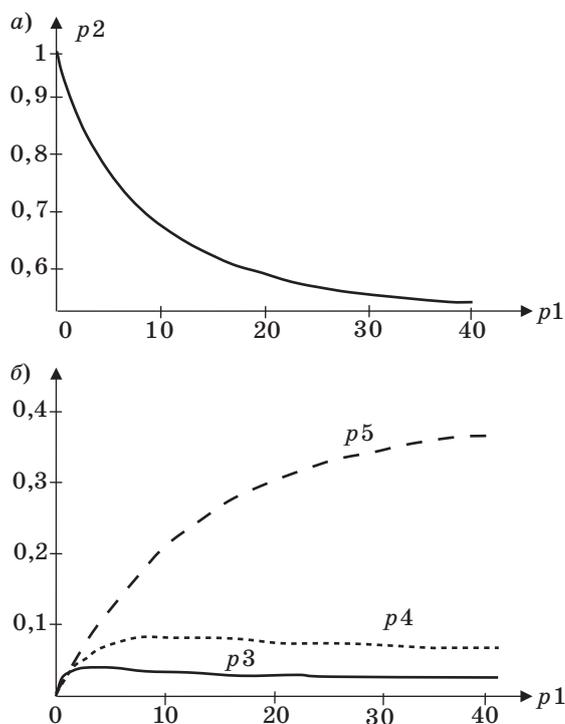
$$\frac{dp3(t)}{dt} = \lambda_{23}p2(t) + \lambda_{13}p1(t) - (\lambda_{31} + \lambda_{34})p3(t);$$

$$\frac{dp4(t)}{dt} = \lambda_{14}p1(t) + \lambda_{24}p2(t) + \lambda_{34}p3(t) - \lambda_{41}p4(t).$$

Здесь $p1(t)$, $p2(t)$, $p3(t)$, $p4(t)$ — вероятности нахождения МКА соответственно в состояниях 1, 2, 3, 4; λ_{ij} — интенсивность перехода МКА из состояния i в состояние j ($i, j = 1, 2, 3, 4$).

В качестве примера приводятся графики (рис. 2, а, б) решения системы дифференциальных уравнений для значений интенсивностей переходов: $\lambda_{12} = 0,05$, $\lambda_{21} = 1,0$, $\lambda_{23} = 0,01$, $\lambda_{24} = 0,01$, $\lambda_{31} = 0,2$, $\lambda_{13} = 0,03$, $\lambda_{34} = 0,05$, $\lambda_{41} = 0,05$, $\lambda_{14} = 0,03$ и начальных условий: $p1(0) = 1$, $p2(0) = 0$, $p3(0) = 0$, $p4(0) = 0$.

Расчеты выполнены путем численного интегрирования системы дифференциальных уравне-



■ Рис. 2. Графики изменения переходных вероятностей: а — в состоянии работоспособности МКА; б — в различных состояниях восстановления работоспособности МКА

ний в пакете MathCad методом Рунге–Кутты для интервала $t \in [0, 10]$ с шагом $\Delta t = 0,2$.

Стационарные вероятности состояний МКА

Представляет интерес получение конечных зависимостей для стационарных вероятностей нахождения КА в рассматриваемых состояниях ($t \rightarrow \infty$).

Приравняем правые части дифференциальных уравнений к нулю:

$$\lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3 + \lambda_{41}p_4 - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})p_1 = 0;$$

$$\lambda_{12}p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})p_2 = 0;$$

$$\lambda_{23}p_2 + \lambda_{13}p_1 - (\lambda_{31} + \lambda_{34})p_3 = 0;$$

$$\lambda_{14}p_1 + \lambda_{24}p_2 + \lambda_{34}p_3 - \lambda_{41}p_4 = 0.$$

К этим уравнениям в качестве условия нормировки добавим пятое уравнение

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1.$$

Решение системы уравнений позволяет получить конечные формулы для стационарных вероятностей состояний КА, выраженных через интенсивности переходов системы из состояния в состояние:

$$p_1 = \frac{ab}{1 + b(1 + a + e)}; \quad p_2 = \frac{b}{1 + b(1 + a + e)};$$

$$p_3 = \frac{1}{1 + b(1 + a + e)}; \quad p_4 = \frac{be}{1 + b(1 + a + e)},$$

где

$$a = \frac{\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}}{\lambda_{12}}; \quad b = \frac{\lambda_{31} + \lambda_{34}}{\lambda_{23} + a\lambda_{13}};$$

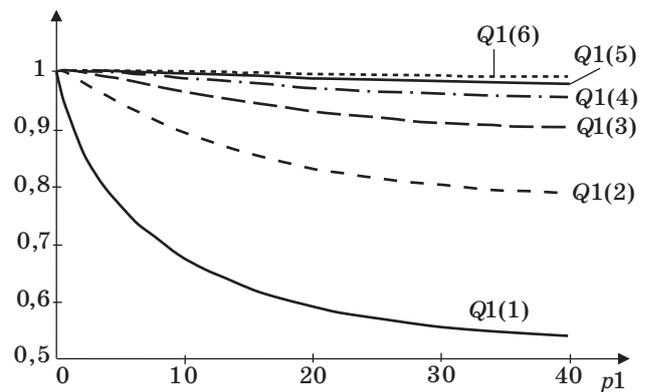
$$c = [\lambda_{21} - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})a]b + \lambda_{13};$$

$$e = \frac{\lambda_{14}a + \lambda_{24}}{\lambda_{34} + \lambda_{41} + \lambda_{41}}.$$

Для приведенных выше интенсивностей переходов получим стационарные вероятности: $p_1 = 0,526$, $p_2 = 0,026$, $p_3 = 0,064$, $p_4 = 0,385$.

Оценка работоспособности системы из нескольких МКА

Выше выведены соотношения для определения вероятностей нахождения отдельного МКА в различных состояниях. Из приведенных мате-



■ Рис. 3. Надежность кластеров МКА, включающих от 1 до 6 МКА

риалов следует, что вероятность того, что какой-то объект на поверхности Земли может быть отснят одиночным МКА, равна $p_1(t)$. Представляет интерес оценка вероятности съёмки объекта не одним МКА, а кластером, включающим n однотипных МКА. В этом случае отказ одного из МКА не влечет отказ всего кластера, так как кластер сохраняет работоспособность до тех пор, пока функционирует хотя бы один из МКА. Здесь можно воспользоваться расчетом надежности системы, состоящей из n параллельных элементов, каждый из которых имеет надежность $p_1(t)$ [9].

Вероятность отказа одного i -го МКА равна $g_i(t) = p_2(t) + p_3(t) + p_4(t)$, вероятность одновременного отказа всех элементов кластера, состоящего из n однотипных элементов: $Q(t) = (p_2(t) + p_3(t) + p_4(t))^n$. Надежность кластера равна $Q_1(t) = 1 - Q(t)$.

Значения надежности для кластеров, включающих от 1 до 6 МКА, показаны на графиках (рис. 3).

Заключение

Приведенный гипотетический пример показывает, что при достаточно низкой надежности одиночного МКА применение кластера из параллельно функционирующих МКА позволяет значительно повысить надежность системы. В рассматриваемом случае при стационарной вероятности $p_1 = 0,526$ безотказной работы одного МКА формирование кластера, состоящего из 6 МКА, позволяет довести вероятность безотказной работы системы до 0,99.

Приведенные выше модели позволяют решать большое количество задач, связанных с формированием кластеров МКА ДЗЗ, задач планирования и управления групповыми операциями, выполняемыми кластером МКА.

Литература

1. Скобелев П. О., Соллогуб А. В., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Решение задач дистанционного зондирования Земли с применением мультиагентных технологий // Вестник Самарского государственного технического университета. 2010. № 7(28). С. 47–54.
2. Скобелев П. О., Соллогуб А. В., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Мультиагентные системы для исследования методов взаимодействия космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010): тр. Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи. Самара: СГАУ, 2010. С. 226–230.
3. Скобелев П. О., Соллогуб А. В., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Мультиагентные технологии в задачах дистанционного зондирования Земли // Тр. XIII Междунар. конф. по проблемам управления и моделирования в сложных системах / Сам. НЦ РАН, ИПУСС РАН. Самара, 2011. С. 426–434.
4. Соллогуб А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е. Применение мультиагентной системы коллективного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли // Управление большими системами-2011 (УБС'2011): тр. Междунар. науч.-практ. конф. / ИПУ РАН. М., 2011. Т. 3. С. 259–262.
5. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Модели для решения сетевых задач планирования и управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1(56). С. 33–38.
6. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Проблемы автономного согласованного межспутникового взаимодействия в гетерогенных мультиагентных системах МКА ДЗЗ // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2012. № 4. С. 65–70.
7. Ахметов Р. Н. Управление живучестью космических аппаратов // Полет. 2006. № 9. С. 16–20.
8. Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребителей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.
9. Васильев А. И. Основы надежности транспортных сооружений: учеб. пособие. — М.: МАДИ, 2008. — 46 с.