

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

к.т.н. А.Н. Загорулько, В.Н. Мироненко  
(представил д.т.н., проф. С.В. Козелков)

*Сформулирована задача оперативного планирования работы космических систем при присутствии ограничений. Разработаны алгоритмы ее решения на основе методов оптимального распределения ресурсов.*

**Введение.** Современный уровень развития космических систем наблюдения Земли (КС НЗ) характеризуется стремительным ростом числа потребителей информации, совершенствованием программно-математического обеспечения обработки и интерпретации результатов и повышением требований к тактико-техническим характеристикам космических систем [1, 3].

В то же время ограниченный состав космических систем наблюдения Земли и их тактико-технические характеристики (ТТХ) не позволяют в полной мере удовлетворить растущие потребности потребителей информации, которые, в силу их многообразия по районам наблюдения и требованиям к параметрам съемки, носят иногда противоречивый характер.

Вследствие этого существует *проблема* достижения в процессе летной эксплуатации космических систем максимального эффекта, предусматривающего удовлетворение потребностей большинства потребителей [2].

Инструментом для этого служит процесс планирования работы бортовой аппаратуры (БА) в ходе полета, а входными данными - заявки потребителей информации и набор сопутствующих факторов, влияющих на выполнение системой целевой задачи (общая стратегия полета, баллистические особенности трассы полета, прогноз метеообстановки, состояние бортовой аппаратуры, наземных средств и т. п.) [6]. Планирование работы БА выявляет совокупность и последовательность операций, необходимых для выполнения целей запуска. В зависимости от длительности интервала планирования различают долгосрочное и оперативное планирование.

Долгосрочное планирование включает:

– программу полёта КС, рассчитанную на время активного суще-

ствования и определяющую конечные цели, которые должны быть достигнуты в результате запуска;

– план работы с космическими аппаратами (КА), входящими в систему, на месяц или недельный план, который представляет собой парциальные планы, соответствующие достижению частных целей.

Оперативное планирование представляет собой суточную программу работы с КА, соответствует длительности технологического цикла управления (ТЦУ) и конкретизирует текущий этап выполнения плана более высокого уровня с учётом успешности выполнения программы полёта и состояния бортовых и наземных средств. Планирование осуществляется на основе выработанных целей и критериев оптимального выполнения программы полёта с учётом выделенных ресурсов средств и построенного графа «цели – задачи – операции». При этом частные решения задач планирования бортового обеспечивающего комплекса (БОК) и бортового специального комплекса (БСК), в силу ряда обстоятельств, производилось в разных контурах – БОК в наземном комплексе управления (НКУ), БСК – в наземном специальном комплексе (НСК).

Требуемый уровень эффективности функционирования КС НЗ, как и других КС, достигался за счет географического рассредоточения наземных средств КС на большой территории, что обеспечивало непрерывную и устойчивую связь с КА на длительных интервалах времени [2, 3]. Известная методология в условиях однопунктной технологии управления, принятой в Украине, неприемлема в силу ряда обстоятельств. К основным из них целесообразно отнести:

1) ограниченные территориальные возможности по зонам связи с КА (снижение длительности сеансов управления и увеличение межсеансных интервалов). Так, для КА с высотами орбит  $H = 500 - 800$  км и наклоном  $i = 80 - 85$  град, длительность сеанса связи при управлении по однопунктной схеме построения НКУ не превышает 10 – 12 минут. При этом межсеансные интервалы достигают 8 – 12 часов (5 – 8 витков), в отличие от многопунктной схемы, где их продолжительность не превышала длительности одного витка 1,5 – 2 часов);

2) усложнение космического сегмента в условиях ограниченности количества наземных технических средств, непосредственно осуществляющих управление при увеличении численности группировки КА.

Кроме того, необходимо учитывать, что для КС НЗ характерна оперативная смена целевых задач, особенно для КС мониторингового типа. В этих условиях применение известной методологии затруднено, что вызывает необходимость поиска новых подходов к процессу функционирования отечественных КС, в первую очередь, к процессу формирования

технологических циклов управления, стремясь при этом максимально снизить временные и ресурсные затраты на процесс применения КС НЗ.

Отдельные подходы к вопросам планирования космических информационных систем, к которым относятся и КС НЗ, рассмотрены в работах [1, 3, 4, 8]. Однако в них предложены подходы, во-первых, в основном к долгосрочному планированию, и, во-вторых, преимущественно к этапу проектирования космических систем.

Этап оперативного планирования является наиболее сложным и, как следствие, слабо изученным и недостаточно совершенным, особенно для КС НЗ оборонного и двойного назначения, характеризующихся большим числом потребителей с различными приоритетами.

Процесс оперативного планирования целесообразно разделить на два этапа: подготовительный, в ходе которого формируется перспективный план и основной, в ходе которого этот план подвергается оптимизации.

**Подготовительный этап.** На основе плановых заявок потребителей, содержащих координаты районов наблюдения и требования к конечному продукту, формируется перспективный план. При этом производится расчет временных и пространственных параметров (времена включения – отключения бортовой аппаратуры,  $t_{\text{вкл}}$ ,  $t_{\text{выкл}}$ , угол отклонения оптической оси БА  $\varphi_i$  от направления в надир). Расчет сводится к выбору подмножества рабочих витков  $\{V_m\}$  из множества  $V = \{V_n\}$ ,  $n = \overline{1, N}$ , на которых возможна реализация заявки.

Дальнейшая работа с перспективным планом предполагает исключение из плана витков, не удовлетворяющих *критериям пригодности*, требованиям, изложенным в заявке потребителя. Критерии пригодности не являются функционалом, их значения бинарные и могут принимать одно из двух значений: „1 – требования пригодности выполняются” и „0 – требования не выполняются”:

а) требования по освещённости:

$$L = \begin{cases} 1, & \text{если } \varphi_i \geq \varphi_{\text{доп}}; \\ 0, & \text{если } \varphi_i < \varphi_{\text{доп}} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi_i$  – расчётный угол места Солнца в районе наблюдения;  $\varphi_{\text{доп}}$  – предельно допустимый угол места Солнца, при котором ещё возможно наблюдение за районом с требуемым показателем качества изображения;

б) требования по допустимой разрешающей способности (для КС с перенацеливанием):

$$R = \begin{cases} 1, & \text{если } r_i \leq r_{\text{доп}}; \\ 0, & \text{если } r_i > r_{\text{доп}} \end{cases} \quad (2)$$

где  $r_i$  – разрешающая способность БА на  $i$ -м витке;  $r_{\text{доп}}$  – допустимая разрешающая способность, заданная в заявке потребителя;

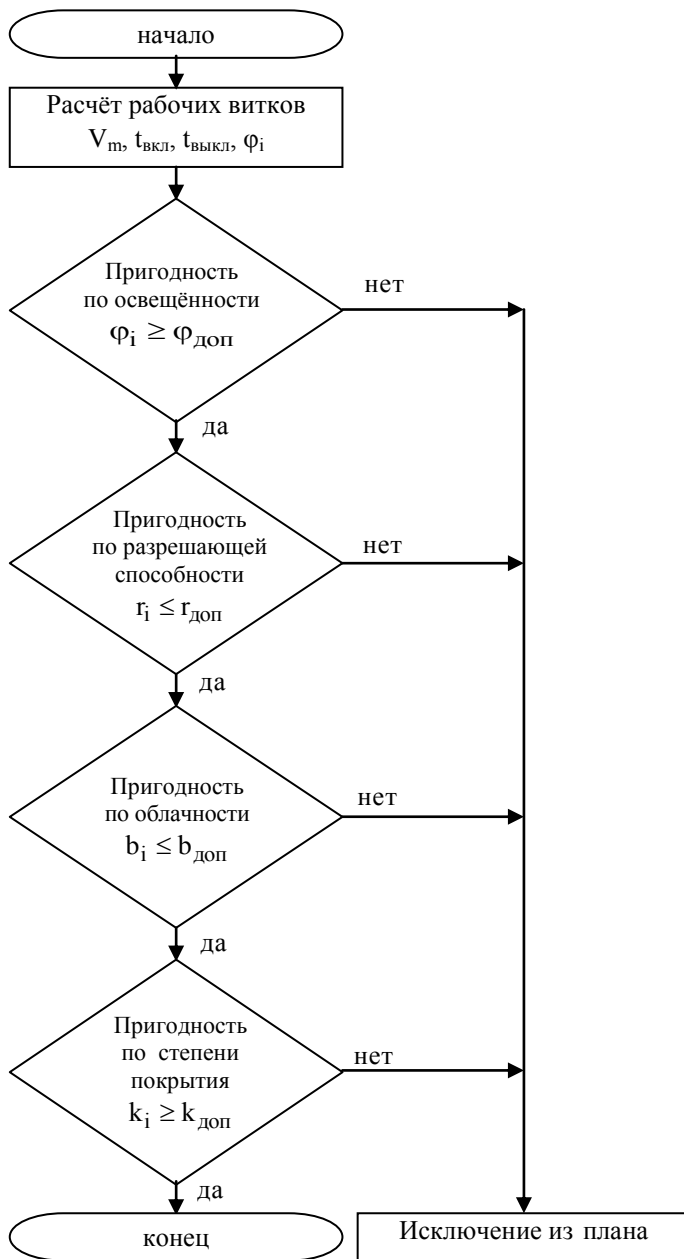


Рис. 1. Контроль соответствия плана критериям пригодности требований заявки

в) допустимая степень покрытия района:

$$S = \begin{cases} 1, & \text{если } k_i \geq k_{\text{доп}}; \\ 0, & \text{если } k_i < k_{\text{доп}}; \end{cases} \quad (3)$$

где  $k_i = s_i / s_0$  – коэффициент, характеризующий отношение площади района съёмки  $s_i$  попадающей в поле зрения БА к общей площади района  $s_0$ ;  $k_{\text{доп}}$  – допустимый коэффициент, указанный в заявке на съёмку;

г) требования по облачности над районом съёмки:

$$W = \begin{cases} 1, & \text{если } b_i \leq b_{\text{доп}}; \\ 0, & \text{если } b_i > b_{\text{доп}}; \end{cases} \quad (4)$$

где  $b_i$  и  $b_{\text{доп}}$  – прогнозируемый и фактический соответственно балл (процент) облачности в районе съёмки.

Степень выполнения оперативного плана КА определяется выделенным ресурсом бортовой аппаратуры (электроэнергетическим, информационным и техническим). Поэтому следующим этапом оперативного планирования будет проверка соответствия плана ресурсу, являющимся ограниченным как в целом на жизненном цикле КА, так и на интервале планирования [11].

Под электроэнергетическим ресурсом [6] понимается часть эффективной мощности, генерируемой системой электроснабжения (СЭС) КА, выделяемой для потребления целевой аппаратурой:

$$N_{\text{ца}} = N_0 - \sum_{i=1}^n N_{\text{ос}i},$$

где  $N_{\text{ца}}$  – энергоресурс целевой аппаратуры;  $N_0$  – общая мощность, генерируемая СЭС;  $\sum_{i=1}^n N_{\text{ос}i}$  – суммарная мощность энергопотребления обеспечивающих систем КА.

Информационный ресурс представлен, с одной стороны, ёмкостью (объёмом памяти) бортового запоминающего устройства для накопления целевой информации в режиме записи информации (ЗУ), и, с другой, выделяемым количеством слов временной программы управления (ВПУ), подлежащей закладке на борт КА.

Технический ресурс является невосстанавливаемым ресурсом [11] и определяется как старением и износом аппаратуры со временем работы, так и количеством включений – выключений этой аппаратуры.

**Основной этап.** Дальнейшее решение задачи планирования предполагает использование метода сетевого планирования и управления (СПУ) [7], позволяющего:

- определять объём предстоящего комплекса работ;
- детализировать работы, установить взаимосвязь между ними и рациональную последовательность их выполнения;
- скоординировать задействование бортовых и наземных технических средств.

Как было отмечено выше, особенности однопунктной технологии применения КС предполагают одновременную работу как технических средств управления КА, так и средств приёма целевой информации. Это происходит вследствие совпадения зон радиовидимости РТС и КА, что и определяет временной интервал  $t_{cy}$  сеанса управления:

$$t_{cy} = t_{ни} + t_{тми} + t_{кпи} + t_{си},$$

где  $t_{ни}$  – временной интервал навигационных измерений;  $t_{тми}$  – временной интервал приёма телеметрической информации;  $t_{кпи}$  – временной интервал выдачи на борт командно – программной информации (команд, временных программ, вставок, массивов информации);  $t_{си}$  – временной интервал приёма специальной (по функциональному назначению КА) информации.

Всё это вызывает необходимость координации работы средств управления и средств целевой нагрузки КА. В этом случае предполагается максимизировать интегральную производительность  $U$  в условиях ограниченного технического ресурса  $q$ :

$$U \rightarrow \max \quad \text{при } q \leq q_{\text{доп}},$$

где  $U$  – модифицированная интегральная производительность;  $q$  – объём фактически израсходованного ресурса;  $q_{\text{доп}}$  – допустимый объём ресурса на интервале планирования. При этом, с учётом изложенных выше факторов, предлагается модифицировать метод сетевого планирования введением гибкого интервала планирования со свободным правым концом. Как правило, интервал планирования представляет собой временной отрезок между очередными сеансами закладки на борт КА командно – программной информации. Если на рассматриваемом сеансе присутствует конфликт в задействовании бортовых систем КА, рассматривается следующий возможный сеанс закладки из всей совокупности планов. Далее последовательно производится расчёт интегральной производительности  $U$  до тех пор, пока множество планов не сузится до единственного плана, одновременно удовлетворяющего, как комплекс управления, так и специальный комплекс по критерию оптимальности, в качестве которого примем максимум интегральной производительности  $U$ .

**Выбор и обоснование показателей эффективности процесса планирования КС НЗ.** Процессы проектирования и функционирования

КС НЗ, в силу их принадлежности к сложным техническим системам, состоящим из множества различных по принципу действия и физико-технической природе подсистем, взаимодействующих между собой и образующих многоуровневую иерархическую структуру, имеют много общих признаков, связанных с решением задач как системного анализа, так и системного синтеза.

К задачам системного анализа относятся задачи [3]:

- структуризация системы (декомпозиция на подсистемы и выявление их связей между собой, с суперсистемой и средой);
- выявление условий функционирования системы;
- выбор показателей и критериев эффективности;
- выбор и обоснование математической модели;
- моделирование системы с целью выявления зависимости свойств системы от характеристик подсистем и связей между ними;
- оценка эффективности функционирования системы в различных условиях применения.

Задачи синтеза включают:

- распределение функций и объемов решаемых задач между элементами системы (распределение прав и ответственности);
- определение алгоритма функционирования (поведения) системы, удовлетворяющего предъявленным требованиям;
- оптимизация системы по одному или нескольким критериям и обоснование требований к подсистемам.

При этом важнейшим этапом является определение состава показателей и критериев эффективности системы и разработка требований к их значениям в условиях заданных ограничений.

Эффективность – динамическое свойство системы обеспечивать выполнение возложенных на нее функций (задач) на требуемом уровне в течение заданного времени и в определенных условиях. Показателем этого свойства в большинстве случаев выбирают вероятность выполнения целевой задачи, либо более сложную конструкцию, называемую целевой функцией [3]. Очевидно, что на нее действует различное число факторов, причем на различных этапах жизненного цикла системы их число и интенсивность воздействия существенно изменяется [7].

К показателю эффективности могут быть предъявлены следующие общие требования: он должен быть представительным, критичным к исследуемым параметрам, по возможности простым и желательно единственным. Правило, по которому, с целью оценки эффективности системы, производится сравнение показателей с некоторым порогом или областью значений, является критерием.



В качестве функционального показателя эффективности (целевой функции) для процесса оптимизации оперативного плана целесообразно применить модифицированную интегральную производительность  $U$ :

$$U = \sum_{i=1}^n I_i \cdot Q_i,$$

где  $I_i$  – объём целевой информации с  $i$ -го района;  $Q_i$  – важность  $i$ -го района наблюдения.

Объём целевой информации может быть определён как

$$I = t_{ci} \cdot C,$$

где  $t_{ci}$  – время проведения съёмки  $i$ -го района;  $C$  – скорость информационного потока с борта КА [11]:

$$C = \frac{LV}{r^2} \cdot J \cdot N \cdot K,$$

где  $V$  – скорость перемещения подспутниковой точки по трассе КА;  $L$  – ширина полосы обзора;  $r$  – пространственное разрешение;  $J$  – число бит на пиксел изображения;  $N$  – число спектральных каналов;  $k \geq 1$  – коэффициент, зависящий от типа применяемого помехоустойчивого кодирования.

Важность  $i$ -го района съёмки  $Q_i$  (весовую функцию) можно представить как

$$Q = \prod_{i=1}^n k_i, \quad 0 \leq k \leq 1,$$

где  $k_i$  – нормированные коэффициенты важности.

Эти коэффициенты определяются методом экспертных оценок и характеризуют:

$k_1$  – коэффициент приоритетности заявки, зависящий от её срочности (очередная, внеочередная, срочная, весьма срочная), автора заявки (МЧС, МОУ, НАНУ), вида съёмки (съёмка происшествий, статистика, научные исследования);

$k_2$  – коэффициент пребывания заявки в очереди на обслуживание:

$$k_2 = \exp\left(-\frac{\Delta T}{T_0}\right),$$

где  $\Delta T$  – время, оставшееся до конца предельного срока реализации заявки;  $T_0$  – общее время на реализацию заявки;

$k_3$  – необходимость съёмки именно на этом витке (отсутствует возможность повторной съёмки района по баллистическим показателям).

**Выводы.** Таким образом, практическое применение предложенных подходов к процессу планирования технических средств КС НЗ позволит обеспечить достижение максимального эффекта, предусматривающего удовлетворение потребности большинства потребителей информации в условиях ограниченного ресурса технических систем и оперативной смене целевых задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. Малышев В.В., Моисеев Д.В. Оперативное планирование процесса съемки земной поверхности с помощью автоматических ИСЗ // Исслед. Земли из космоса. – 1982. – № 5. – С. 104 – 109.
3. Космические радиотехнические комплексы / Под общ. редакцией Г.В. Стогова. – М.: МО СССР, 1986. – 626 с.
4. Моделирование и оценка эффективности применения космических систем: Уч. пособие / Под общ. ред. Н.С. Пастушенко, В.П. Деденка. – Х.: ХВУ, 1997. – 278 с.
5. Застосування космічних систем для забезпечення дій збройних сил: Навчальний посібник / За ред. В.І. Ткаченка. – Х.: ХВУ, 2001. – 192 с.
6. Белов Д.Г. Формирование полетной программы работы космического аппарата при наличии электроэнергетических ограничений // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т. 3. – № 5/6 – С. 120 – 126.
7. Абраменко Б.С., Вольский И.В., Гладченко В.В. Эксплуатация радиотехнических систем. – М.: МО СССР, 1982. – 326 с.
8. Федоровский А.Д., Даргейко Л.Ф., Зубко В.П., Якимчук В.Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. – 2001. – Т. 7. – № 5/6. – С. 75 – 79.
9. Авдудевский В.С., Успенский Г.Р. Народнохозяйственные и научные космические комплексы. – М.: Машиностроение, 1985. – 416 с.
10. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Вопросы военной системотехники. – М.: Воениздат, 1976. – 224с.
11. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: 1997. – 296 с.
12. Машков О.А., Фриз С.П. Методика оптимізації планування орбітальних засобів космічних систем спостереження // Збірник наукових праць ЖВІРЕ. – Житомир.: ЖВІРЕ. – № 6. – С. 80 – 91.

Поступила 2.10.2004

**ЗАГОРУЛЬКО Александр Николаевич**, канд. техн. наук, зам. нач. ЦУП (Евпатория). В 1979 году окончил ХВВКИУ. Область научных интересов – радиотехника.

**МИРОНЕНКО Владимир Николаевич**, начальник Киевского оперативного центра Национального центра управления и испытаний космических средств. Область научных

*интересов – радиотехника.*