

УДК 629.783

Формирование полетной программы работы космического аппарата при наличии электроэнергетических ограничений

Д. Г. Белов

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 23.06.97

Сформульована задача оперативного планування роботи космічного апарата при наявності електроенергетичних обмежень. Розроблені алгоритми її розв'язування на основі методів оптимального розподілу ресурсів.

Главная цель летной эксплуатации КА состоит в достижении положительного эффекта, предусмотренного его назначением и техническими характеристиками. Инструментом ее осуществления служит оперативное планирование работы аппаратуры целевого назначения (АЦН) КА в ходе полета (Беляев, 1981; Мальшев, Моисеев, 1982). Предпосылками для формирования программы работы АЦН на некоторый временной интервал полета $[t_n, t_k]$ являются заявки потребителей информации и набор сопутствующих факторов, влияющих на выполнение задач КА (общая стратегия полета, текущие потребности в информации, баллистические особенности трассы полета относительно источников и приемников информации, прогноз метеобстановки, загруженность наземных средств, состояние бортового комплекса КА и т. п.). Естественно стремление построить программу работы так, чтобы наилучшим образом использовать функциональные возможности КА, т. е. обеспечить на интервале планирования экстремальное значение показателя эффективности функционирования КА (Соллогуб, 1983).

Назовем сформированную таким образом про-

грамму заявленной программой работы (ЗПР). Она представляет собой совокупность сеансов (операций) АЦН и сопряженных с нею бортовых систем КА (в дальнейшем это сочетание именуется сеансной аппаратурой, или СА), характеризующуюся подмножеством параметров R :

$$R = R\{t_{ij}, \Delta t_{ij}, \beta_{ij}\}, \\ j = 1, \dots, m, \quad i = 1, \dots, n, \quad R \in R_0,$$

где R_0 — множество возможных для КА данного типа вариантов ЗПР на интервале планирования, ограниченное его предельными техническими данными; t_{ij} , Δt_{ij} , β_{ij} — соответственно время начала, продолжительность и информативность j -го режима работы СА в i -м сеансе; m — количество возможных режимов работы СА в сеансе; n — количество сеансов на интервале $[t_n, t_k]$. Отсутствие j -го режима в i -м сеансе эквивалентно $\Delta t_{ij} = 0$.

Степень выполнения ЗПР на борту КА определяется прогнозируемыми на интервал планирования электроэнергетическими возможностями КА, характеризующимися энергозапасом $E(\tau)$ и скоростью его изменения dE/dt . Последние зависят как

от параметров энергосистемы КА, так и от параметров электрической нагрузки, образованной СА и обеспечивающими системами КА:

$$E(\tau) = E(t_h) + \int_{t_h}^{\tau} (N_r(t) - N_n(t)) dt, \quad (1)$$

$$t_h < \tau \leq t_k,$$

где $N_r(t)$ — эффективная мощность, генерируемая энергосистемой КА, $N_n(t)$ — мощность потребителей энергии (электрическая нагрузка),

$$N_n(t) = \begin{cases} N_0(t) + \sum_{j=1}^m N_{Aij}, & \text{при } t_{ij} \leq t \leq t_{ij} + \Delta t_{ij}, \\ N_0(t), & \text{при } t < t_{ij} \text{ и } t > t_{ij} + \Delta t_{ij}, \end{cases}$$

$$N_{Aij} = \begin{cases} N_{Aj}, & \text{при } \Delta t_{ij} > 0, \\ 0, & \text{при } \Delta t_{ij} = 0; \end{cases} \quad (2)$$

N_{Aj} , $N_0(t)$ — мощность электропотребления СА в j -м режиме и обеспечивающих систем КА соответственно.

Управление процессом выработки и потребления электроэнергии на борту КА построено так, что $E_{mn} \leq E(t) \leq E_{ms}$. При $E(t) = E_{ms}$ ограничивается поступление энергии от генератора, при $E(t) = E_{mn}$ ограничиваются потребности нагрузки. Значение $E(t)$ поддерживается на верхнем граничном уровне E_{ms} ($N_r(t) = N_n(t)$, $dE/dt = 0$) до момента времени $(t + \Delta\tau)$, когда $N_r(t + \Delta\tau) < N_n(t + \Delta\tau)$. При уменьшении $E(t)$ до нижнего граничного уровня E_{mn} накладывается запрет на подключение части или всей СА, чтобы обеспечить $N_r(t + dt) > N_n(t + dt)$.

При проектировании КА и его бортовых систем, в том числе и энергосистемы, их параметры выбираются так, чтобы в течение расчетного срока активного существования КА исполнение всех априорных вариантов ЗПР, заданных его целевым назначением, обеспечивалось бы всей совокупностью необходимых ресурсов, в том числе и электроэнергетических. Поэтому, если условия полета, функциональное состояние и программа целевого использования КА, а также поле источников и приемников информации в ходе полета соответствуют проектным, энергодефицит на борту КА исключен.

Иное дело, когда в полете возникают ситуации, требующие адаптации КА к изменениям внутреннего состояния и/или внешней среды, выходящим из очерченных при проектировании диапазонов. Это связано не только с появлением отказов в работе бортовых систем, но и с потребностью расширить первоначальную программу исследований,

уточнить методику их проведения, увеличить количество и номенклатуру объектов наблюдения, продолжить эксплуатацию КА за пределами гарантийного срока. В любой из этих ситуаций энергобаланс на борту КА может быть нарушен и исполнение ЗПР принудительно прекращено автоматикой энергосистемы.

Поставим целью избежать несанкционированных прерываний ЗПР (запретов включения СА) из-за электроэнергетических ограничений заблаговременной (при оперативном планировании) ее коррекцией в рамках располагаемых энерговозможностей КА.

Сущность оценки электроэнергетического обеспечения ЗПР сводится к сопоставлению энерговозможностей КА и энергопотребностей на исполнение ЗПР с контролем удовлетворения критериям X_l ($l = 1, 2, 3$):

$$X_1 = E(t_k) - E^* \geq 0,$$

$$X_2 = E(t) - E_{mn} \geq 0, \quad (3)$$

$$X_3 = \xi \left| \frac{dE}{dt} \right| - N_{ms}(t) \leq 0,$$

где

$$\xi = \begin{cases} 1, & \text{при } \frac{dE}{dt} < 0, \\ 0, & \text{при } \frac{dE}{dt} \geq 0, \end{cases}$$

E^* — установленный энергозапас на конец интервала планирования, E_{mn} — минимально допустимый энергозапас, $N_{ms}(t)$ — предельно допустимая для энергосистемы КА мощность электрической нагрузки.

Два первых критерия носят интегральный характер, третий — локальный.

Если неравенства (3) выполняются, то ЗПР разрешается к реализации, становясь разрешенной программой работы (РПР), тождественной в данном случае ЗПР. Если хотя бы одно из неравенств (3) не выполнено, то ЗПР трансформируется в РПР путем коррекции, так что подмножество параметров R' , характеризующих РПР, отличается от подмножества параметров R ЗПР.

$$R' = \Gamma(x)R, \quad R' \in R_0,$$

$$\Gamma(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } X_1 \geq 0 \cap X_2 \geq 0 \cap X_3 \leq 0, \\ D(R, E), & \text{при } X_1 < 0 \cup X_2 < 0 \cup X_3 > 0, \end{cases}$$

где $D(R, E)$ — оператор процедуры преобразования ЗПР в РПР.

При этом, если следствием невыполнения крите-

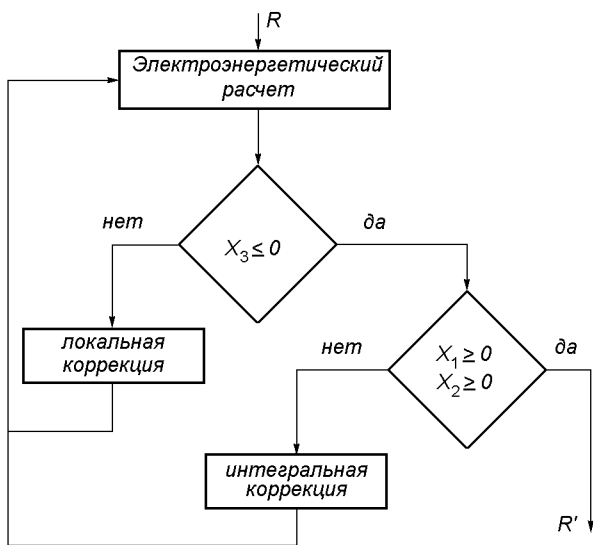


Рис. 1. Структурная схема формирования РПП

риев X_1, X_2 является только сокращение ЗПР, то невыполнение критерия X_3 может повлечь выход из строя энергосистемы КА, поэтому его удовлетворение является приоритетным.

Как указывалось выше, ЗПР формируется из условия достижения на интервале планирования экстремума, например максимума Φ_0 показателя эффективности функционирования КА, поэтому преобразование ЗПР в РПП приводит только к снижению Φ_0 на величину $\Delta\Phi$. Очевидно, что оператор $D(R, E)$ должен быть таким, чтобы ущерб от трансформации ЗПР в РПП был минимальным, т. е.

$$\Delta\Phi = \min_{R'} \{\Phi_0(R) - \Phi(R')\},$$

откуда

$$\Phi'_0 = \max_{R'} \Phi(R'),$$

где Φ'_0 — максимально возможное по электроэнергетическим ограничениям значение показателя эффективности КА при реализации РПП.

На рис. 1 показана укрупненная структурная схема формирования РПП. Она содержит три модуля: электроэнергетического расчета, критериальный и коррекции, состоящий из блоков локальной и интегральной коррекции.

Результатом электроэнергетического расчета являются прогностические зависимости $N_r(t), N_n(t), E(t), dE/dt$. Примерный их вид в графической интерпретации показан на рис. 2 для случаев

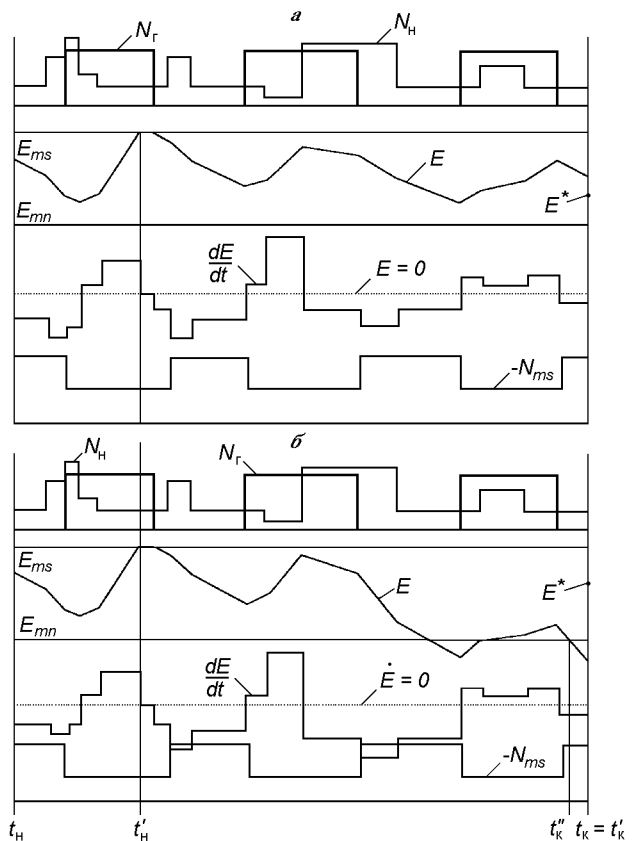


Рис. 2. Прогностические энергетические зависимости и ограничения

удовлетворения (а) и неудовлетворения (б) критериям (3). В последнем случае между потребителями электроэнергии, составляющими СА, имеют место конфликтные ситуации, для разрешения которых необходимо сформулировать правила взаимного поведения и последовательности смены состояний субъектов конфликта (Павлов, 1982). В качестве первого из них будем полагать, что вариации в сеансах состава и продолжительности включения режимов СА не влияют на информативность каждого из них. Вторым правилом определим произвольность последовательности вариации режимов СА и отсутствие корреляции информативности одноименных режимов в разных сеансах. Для определенности положим также, что показателем эффективности функционирования КА на интервале планирования служит интегральная производительность I (количество информации) (Ханцеверов, Остроухов, 1989):

$$\Phi = I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \Delta t_{ij}.$$

В аспекте потребления электроэнергии ЗПР характеризуется подмножеством параметров L :

$$L = L\{N_{Aij}, t_{ij}, \Delta t_{ij}\}, \quad L \in L_0,$$

где L_0 — множество параметров энергопотребления КА, ограниченное его техническими данными. Пусть несовпадающие элементы β_{ij} и N_{Aij} подмножеств R и L связаны неубывающими функциями φ_{ij} ($\beta_{ij} = \varphi_{ij}(N_{Aij})$, причем $\varphi_{ij}(0) = 0$), отражающими зависимость информативности j -го режима работы СА в i -м сеансе от мощности ее электропотребления в этом режиме.

Заметим также, что источниками информации для КА являются различные объекты и физические процессы, определенные в пространстве и/или во времени, так что параметры t_{ij} при преобразовании ЗПР в РПР изменению, как правило, не подлежат.

С учетом введенных допущений задача оптимизации РПР при наличии электроэнергетических ограничений формулируется так:

$$I'_0 = \max_{\Delta t} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \Delta t'_{ij} \quad (4)$$

при

$$0 \leq \Delta t'_{ij} \leq \Delta t_{ij},$$

$$\beta_{ij} = \varphi_{ij}(N_{Aij}),$$

$$X_1 \geq 0, \quad X_2 \geq 0, \quad X_3 \leq 0.$$

Алгоритм решения задачи (4), представляющий комплексный оператор $D(R, E)$, существенно зависит от поведения функции $E(t)$ на интервале планирования. По результатам электроэнергетического расчета ЗПР можно выделить на интервале $[t_n, t_k]$ несколько характерных в энергетическом отношении участков $[t'_n, t'_k]$, ограниченных во времени смежными моментами достижения $E(t)$ верхнего граничного значения, а также t_n, t_k , в пределах каждого из которых имеются либо отсутствуют точки $E(t) = E_{mn}$ и/или точки $|dE/dt| \gg N_{ms}$, в которых $dE/dt < 0$. Наличие таких точек свидетельствует о невыполнении на этих участках критериев X_2 и/или X_3 . Кроме того, на последнем из них возможно невыполнение критерия X_1 .

Коррекции ЗПР на участках, где все критерии (3) выполняются, не требуется и, как нетрудно показать, изменение ЗПР на этих участках не влияет на результат критериальной проверки других участков, так что энергетически достаточные участки могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения.

На оставшихся участках прежде всего, как указывалось ранее, следует добиться удовлетворения критерия X_3 . Оно осуществляется изменением ре-

жимов работы СА в пределах того сеанса, где нарушен критерий X_3 (локальная коррекция). Если в течение Δt_{ij} величины N_{ms} и N_0 постоянны, для i -го из этих сеансов критерий оптимизации (4) преобразуется в

$$I'_0 = \max_{\Delta t} \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \Delta t'_{ij} \quad (5)$$

при

$$0 \leq \Delta t'_{ij} \leq \Delta t_{ij},$$

$$\beta_{ij} = \varphi_{ij}(N_{Aij}),$$

$$\sum_{j=1}^m N_{Aij} \leq N_{msi} - N_{0i}.$$

Если в пределах i -го сеанса N_{ms} и N_0 переменны, то временной промежуток, занимаемый сеансом, разбивается на ряд отрезков, внутри которых $N_{ms} = \text{const}$, $N_0 = \text{const}$, и для каждого из них решается задача локальной оптимизации.

Обычно m невелико, а число элементов $\Delta t_{ij} > 0$ в конкретном сеансе менее m , так что для решения задачи (5) вполне можно использовать простой перебор вариантов. Результатом решения будет совокупность $\{\Delta t'_{ij}\}$, в которой число элементов $\Delta t'_{ij} = 0$ больше, чем в исходной совокупности $\{\Delta t_{ij}\}$. Может оказаться, что итогом явится несколько совокупностей $\{\Delta t'_{ij}\}$, которые обеспечивают одно и то же значение I'_0 , но различные величины

$$N'_{Ai} = \sum_{j=1}^m N_{Aij}$$

(суммирование производится только по тем j , для которых $\Delta t'_{ij} > 0$). Предпочтение в этом случае должно быть отдано той совокупности $\{\Delta t'_{ij}\}$, которая дает меньшую величину N'_{Ai} , так как это улучшает условия последующего удовлетворения критериев $X_2(X_1)$.

Оптимизационная задача (4) при коррекции программы работы СА с целью удовлетворения критериев X_1, X_2 (интегральная коррекция) на энергетически дефицитном участке $[t'_n, t'_k]$, на котором расположены сеансы с k -го по p -й, представляется в виде

$$I'_0 = \max_{\Delta t} \sum_{i=k}^p \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \Delta t'_{ij}, \quad (6)$$

при

$$0 \leq \Delta t'_{ij} \leq \Delta t_{ij},$$

$$\beta_{ij} = \varphi_{ij}(N_{Aij}),$$

$$0 \leq E_A \leq \bar{E}_A,$$

где E_A — количество электроэнергии, расходуемое

СА; \bar{E}_A — потенциально возможное количество энергии, которое может быть обеспечено энергосистемой КА для сеансов СА:

$$E_A = \sum_{i=k}^p \sum_{j=1}^m N_{Aij} \Delta t'_{ij}. \quad (7)$$

\bar{E}_A находится после преобразования X_1 и X_2 из (3) с учетом (1), (2):

$$\bar{E}_A = \begin{cases} E(t_H) - E_{ms} + \int_{t_H}^{t'_k} (N_r(t) - N_0(t)) dt & \text{для участка } [t_H, t'_k], \\ \int_{t_H}^{t'_k} (N_r(t) - N_0(t)) dt & \\ E_{ms} - E^* + \int_{t_H}^{t_k} (N_r(t) - N_0(t)) dt & \text{для участка } [t'_H, t_k], \\ E(t_H) - E^* + \int_{t_H}^{t_k} (N_r(t) - N_0(t)) dt, & \\ \text{если на интервале } [t_H, t_k] E(t) < E_{ms}. & \end{cases}$$

Размерность задачи (6) много выше, чем задачи (5), поэтому применение для ее решения простого перебора вариантов неэффективно, а во многих случаях практически неосуществимо. Вид задачи (6) позволяет использовать для ее решения специальные алгоритмы устранения конфликтов между режимами СА, разработанные на базе методов условной оптимизации параметров процессов с аддитивными целевыми функциями (Аншаков и др., 1988). В то же время анализ особенностей задачи (6) дает возможность, уточнив операционное пространство и конкретизировав ограничения, разработать более простые, компактные и быстродействующие алгоритмы ее решения.

Во-первых, поскольку E_{mn} является глобальным по минимуму ограничением функции $E(t)$, то, как следует из исследования выражения (1) на участке $[t'_H, t'_k]$, изменение длительности Δt_{ij} или мощности $N_{Ai} = \sum_{j=1}^m N_{Aij}$ сеансов, планируемых к более позднему исполнению, чем последний из сеансов, в котором проявляется $E(t) = E_{mn}$, не влияет на предыдущую траекторию функции $E(t)$, приводящую к нарушению критерия X_2 , а вызывает только смещение момента $t = t'_k$. Следовательно, в (6) и (7) можно ограничить верхний предел суммирования по i значением $i = q < p$, где q — последний на участке $[t'_H, t'_k]$ сеанс, в котором получено $E(t = t'_k) = E_{mn}$. Это справедливо для всех участков

$[t'_H, t'_k]$, включая и последний ($t'_k = t_k$), если на нем не нарушается еще и критерий X_1 . В противном случае на этом участке задача (6) решается в объеме $i = p$.

Во-вторых, поскольку функции φ_{ij} — неубывающие, $\Delta t'_{ij} \leq \Delta t_{ij}$, то при осуществлении вычислительных процедур увеличение квоты энергии на исполнение j -го режима i -го сеанса СА сверх $\Delta E_{ij} = N_{Aij} \Delta t_{ij}$ становится излишним, так как не вызывает приращения показателя эффективности.

В-третьих, однозначность связи β_{ij} и N_{Aij} с учетом выполнения сформулированных выше правил разрешения энергетических конфликтов служит основанием для декомпозиции задачи (6), т. е. перехода от ансамбля сеансов с подчиненными им режимами к ансамблю режимов с индивидуальными отличительными признаками в виде удельной информативности $g_r = g_{ij} = \beta_{ij} / N_{Aij}$ ($r = 1, 2, \dots, d \leq (q - k)m$).

На основе результатов анализа задача (6) преобразуется в

$$I'_0 = \max_{\Delta t} \sum_{r=1}^d \beta_r \Delta t'_r, \quad (8)$$

при

$$\begin{aligned} 0 &\leq \Delta t'_r \leq \Delta t_r, \\ \beta_r &= g_r N_{Ar}, \\ 0 &\leq E_A \leq \bar{E}_A, \end{aligned}$$

где

$$E_A = \sum_{r=1}^d N_{Ar} \Delta t'_r;$$

$$\bar{E}_A = \begin{cases} E(t_H) - E_{mn} + \int_{t_H}^{t'_k} (N_r(t) - N_0(t)) dt & \text{для участка } [t_H, t'_k], \\ E_{ms} - E_{mn} + \int_{t'_H}^{t'_k} (N_r(t) - N_0(t)) dt & \text{для участка } [t'_H, t'_k]. \end{cases}$$

На последнем участке формулировка задачи сохраняется с заменой E_{mn} на E^* , t'_k на t_k и увеличением d до $(p - k)m$.

Для решения задачи (8) разработаны алгоритмы на основе методов оптимизации распределения однородного ресурса между неоднородными потребителями (Берзин, 1974). В качестве ресурса выступает энергозапас $E_A \leq \bar{E}_A$, а потребителей — предельно $(p - k)m$ режимов СА, неоднородность которых выражена признаками g_{ij} .

Таблица 1. Параметры модельной ЗПР

Режимы (j)	Сеансы											
	1			2			3			4		
	β_{1j}	N_{A1j}	Δt_{1j}	β_{2j}	N_{A2j}	Δt_{2j}	β_{3j}	N_{A3j}	Δt_{3j}	β_{4j}	N_{A4j}	Δt_{4j}
1	1	10	10	1	10	10	1	10	10	2	10	10
2	2	20	15	2	20	15	0	0	0	2	20	10
3	3	40	20	0	0	0	2	40	15	3	40	20
4	0	0	0	2.5	50	20	3	50	20	3	50	20

Алгоритм сводится к следующей последовательности операций:

- для каждого j -го режима i -го сеанса, где $\Delta t_{ij} > 0$, вычисляется удельная информативность g_{ij} ;
- режимы СА, составляющие ЗПР, нумеруются в порядке убывания g_{ij} (номер $r = 1$ присваивается режиму с наибольшей величиной g);
- с использованием рекуррентного соотношения

$$E_{Ar} = E_{Ar-1} - \Delta E_{Ar-1},$$

где $r = 1, \dots, d$, $E_{A1} = \overline{E}_A$, $\Delta E_{Ar} = N_{Ar} \Delta t_r$, последовательно определяются

$$\Delta t'_r = \begin{cases} \Delta t_r, & \text{если } \Delta E_{Ar} \leq E_{Ar}, \\ \frac{E_{Ar}}{N_{Ar}}, & \text{если } \Delta E_{Ar} > E_{Ar}, \end{cases}$$

до $r = s$, где получено впервые $\Delta E_{Ar} > E_{Ar}$;

- для всех последующих режимов с $r > s$ полагается $\Delta t'_{ij} = 0$.

Показатель эффективности функционирования КА на отрезке $[t'_н, t''_к]$ при исполнении сформированной таким образом РПП равен

$$I'_0 = \sum_{r=1}^s \beta_r \Delta t'_r.$$

Иногда для решения задачи (8) возможно уменьшить количество шагов вычислительного процесса, построив алгоритм на принципе устранения энергодефицита. Сущность его заключается в следующем:

- режимы СА, составляющие ЗПР, пронумеровываются в порядке увеличения g_{ij} (номер $r = 1$ присваивается режиму с наименьшей величиной g);
- определяется энергодефицит $\overline{\Delta E}_A$ на отрезке $[t'_н, t''_к]$:

$$\overline{\Delta E}_A = \left| \overline{E}_A - \sum_{i=k}^q \sum_{j=1}^m N_{Aij} \Delta t_{ij} \right|,$$

- с использованием рекуррентного соотношения

$$\Delta E_{Ar} = \Delta E_{Ar-1} - N_{Ar-1} \Delta t_{r-1},$$

где $r = 1, \dots, d$, $\Delta E_{A1} = \overline{\Delta E}_A$, определяются

$$\Delta t'_r = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta E_{Ar+1} > 0, \\ \Delta t_r - \frac{\Delta E_{Ar}}{N_{Ar}}, & \text{если } \Delta E_{Ar+1} \leq 0, \end{cases}$$

до $r = z$, где получено впервые $\Delta E_{Ar+1} \leq 0$;

- для всех режимов с $r > z$ полагается $\Delta t'_{ij} = \Delta t_{ij}$.

Показатель эффективности функционирования КА на отрезке $[t'_н, t''_к]$ при исполнении РПП

$$I'_0 = I_0 - \sum_{r=1}^z \beta_r (\Delta t_r - \Delta t'_r),$$

где

$$I_0 = \sum_{r=1}^d \beta_r \Delta t_r.$$

Следующий численный пример иллюстрирует применение последнего алгоритма.

В табл. 1 приведены параметры подмножества R ЗПР (без t_{ij} , не подлежащих изменению) на некотором временном отрезке $[t'_н, t''_к]$, ограниченном соседними моментами достижения $E(t) = E_{ms}$ и $E(t) = E_{mn}$. Здесь и далее размерные величины даны в условных единицах. Параметры N_{Aj} : $N_{A1} = 10$, $N_{A2} = 20$, $N_{A3} = 40$, $N_{A4} = 50$. Показатель эффективности функционирования КА при исполнении ЗПР $I_0 = 450$. Потенциально возможное количество электроэнергии для СА составляет $E_A = 4400$.

Таблица 2. Ход вычислений при преобразовании ЗПР в РПП

Шаг (r)	$N_{Ar} \Delta t_r$	ΔE_{Ar+1}	$\Delta t'_r$	$\beta_r (\Delta t_r - \Delta t'_r)$
1	600	1400	0	30
2	1000	400	0	50
3	1000	-600	12	24

Таблица 3. Параметры модельной РПР

Режимы (j)	Сеансы											
	1			2			3			4		
	β_{1j}	N'_{A1j}	$\Delta t'_{1j}$	β_{2j}	N'_{A2j}	$\Delta t'_{2j}$	β_{3j}	N'_{A3j}	$\Delta t'_{3j}$	β_{4j}	N'_{A4j}	$\Delta t'_{4j}$
1	1	10	10	1	10	10	1	10	10	2	10	10
2	2	20	15	2	20	15	0	0	0	2	20	10
3	3	40	20	0	0	0	0	0	0	3	40	20
4	0	0	0	0	0	0	3	50	12	3	50	20

Ранжированная в порядке возрастания удельной информативности ($g_i = g_{ij}$) последовательность сеансов СА (для $\Delta t_{ij} > 0$):

$$\begin{aligned}
 g_1 = g_{33} = 0.05; & & g_8 = g_{22} = 0.1; \\
 g_2 = g_{24} = 0.05; & & g_9 = g_{21} = 0.1; \\
 g_3 = g_{34} = 0.06; & & g_{10} = g_{11} = 0.1; \\
 g_4 = g_{44} = 0.06; & & g_{11} = g_{12} = 0.1; \\
 g_5 = g_{13} = 0.075; & & g_{12} = g_{42} = 0.1; \\
 g_6 = g_{43} = 0.075; & & g_{13} = g_{41} = 0.2. \\
 g_7 = g_{31} = 0.1; & &
 \end{aligned}$$

Энергодефицит $\overline{\Delta E_A} = 2000$. Ход вычислений отражен в табл. 2, а параметры подмножества R' сформированной РПР — в табл. 3. Показатель эффективности функционирования КА при исполнении РПР $I'_0 = 346$.

Выше упоминалось, что автоматика энергосистемы КА при достижении $E(t) = E_{\min}$ накладывает запрет на включение СА. Расчет показывает, что при исполнении ЗПР с параметрами, указанными в табл. 1, и при $\overline{E_A} = 4400$ это произойдет в момент $t''_k = t_4 + 0.8$, где $t_4 = t_{41} = \dots = t_{44}$. При этом эффективность функционирования КА составила бы $I' = 298$, что на 16 % меньше, чем при исполнении энергетически оптимизированной РПР.

Одна из версий алгоритма оперативного планирования работы СА с учетом электроэнергетических ограничений внедрена в автоматизированной системе управления серии океанографических КА разработки ГКБ «Южное» имени М. К. Янгеля (Кавелин

и др., 1985), продолжателем которой явился первый зарегистрированный под юрисдикцией Украины КА дистанционного зондирования «Січ-1».

Аншаков Г. Н., Соллогуб А. В., Бундов Д. Г. Методы устранения конфликтов между режимами функционирования КА ИПРЗ при составлении программы работы // Исслед. Земли из космоса.—1988.—№ 3.—С. 107—116.

Беляев М. Ю. Основные задачи и методы оперативного планирования экспериментов по исследованию Земли из космоса // Исслед. Земли из космоса.—1981.—№ 3.—С. 96—101.

Берзин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / Под ред. Е. В. Золотова. — М.: Сов. радио, 1974.—304 с.

Кавелин С. С., Белов Д. Г., Гладилин В. С. и др. Экспериментальный океанографический спутник «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 3.—С. 115—122.

Мальшев В. В., Моисеев Д. В. Оперативное планирование процесса съемки земной поверхности с помощью автоматических ИСЗ // Исслед. Земли из космоса.—1982.—№ 5.—С. 104—109.

Павлов В. В. Конфликты в технических системах. Управление, целостность. — Киев: Вища шк., 1982.—184 с.

Соллогуб А. В. Алгоритм оптимального планирования работы космических аппаратов // Космич. исслед.—1983.—21, № 1.—С. 34—40.

Хандеверов Ф. Р., Остроухов В. В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. — М.: Машиностроение, 1989.—264 с.

FORMING THE PROGRAM OF SPACECRAFT OPERATION UNDER ELECTRIC POWER CONSTRAINTS

D. G. Belov

The problem of on-line planning the spacecraft operation under electric power constraints is formulated. Algorithms are developed for its solution based on the methods of optimal distribution of resources.