

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 629.7

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Л.А. Макриденко, С.Н. Волков,  
В.П. Ходненко, А.В. Хромов  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Проведено системное исследование метеорологической космической системы (МКС). Исходя из целей и задач, определены требования к МКС, и в частности, к орбитальной системе космических аппаратов (КА), которая является основой МКС. Требования разделены на три основные группы: требования по выполнению целевого назначения; требования к эффективности; требования к орбитальным параметрам и динамической устойчивости системы КА. Требования по выполнению целевого назначения включают в себя требования к району наблюдения, спектральным характеристикам и разрешающей способности аппаратуры наблюдения, требования к обзорности изображения и периодичности наблюдения.

Требования к эффективности МКС объединяют требования по экономической эффективности, оперативности МКС, требования к качеству изображения и потере информации, а также требования к массовым характеристикам КА, аппаратуры наблюдения и стоимостным показателям МКС.

**Ключевые слова:** космический аппарат, метеорологическая космическая система, орбитальная система, эффективность, целевое назначение, аппаратура наблюдения, орбитальная группировка КА, периодичность наблюдения, обзорность изображения, разрешающая способность.

В России космическая метеорология отнесена к числу важнейших приоритетных задач космической техники, направленных на решение проблем, таких как:  
– прогнозирования погоды и изменений климата;  
– мониторинга глобальных изменений;  
– информационное обеспечение наук о Земле;  
– построение и развитие динамической модели Земли.

Космическая метеорология дает значительный экономический выигрыш.

В состав общей метеорологической системы (МС) наряду с метеорологической космической системой (МКС) входят традиционные средства: наземная сеть, самолетные, корабельные, аэростатные метеосредства.

Использование МКС позволяет существенно повысить возможности получения гидрометеорологической информации.

С созданием МКС появилась возможность обеспечить потребителей космической информацией в полном объеме за счет использования согласованно действующих космических аппаратов (КА).

На основе системы КА образуется космический комплекс – совокупность орбитальных и наземных технических средств (рисунок). Совокупность космического комплекса и наземного специального комплекса (аппаратура приема, передачи, обработки информации для потребителей) составляют космическую систему (КС). В состав КС могут входить несколько космических комплексов.

Таким образом, космическая система – это группа согласованно действующих наземных и космических средств. Если наземная и орбитальная системы построены из однотипных элементов, то последние можно представить в виде подмножеств:

$$g_i \in \sigma_g (i = 1, 2, \dots, m); k_j \in \sigma_k (j = 1, 2, \dots, n),$$

где  $\sigma_g$  – множество наземных станций;  $\sigma_k$  – множество орбитальных КА.



Состав космической системы

Орбитальная система является основой любой КС. Ей присущи свои закономерности и своя структура.

Орбитальная система характеризуется глобальным охватом Земли из космоса, оперативностью сбора информации с любых районов земной поверхности, периодичностью её обновления и информативностью.

### Цели и задачи МКС

Определение места МКС в общей метеорологической системе предполагает, прежде всего, анализ целей и задач, которые стоят перед МС, и выделение из них тех, которые должны решаться МКС.

В общем виде целью функционирования МКС является обеспечение экономики страны достоверной метеоинформацией с высоким экономическим эффектом.

Для этого МС должна выдавать фактические данные о текущем состоянии погоды, предупреждения об опасных явлениях природы, прогнозы по регионам специального назначения, по маршрутам кораблей, самолетов и т. д.

Для решения указанных задач необходима получаемая с помощью МКС гидрометеорологическая информация об облачности (количество, форма, высота и другие характеристики), осадках (вид, интенсивность, зона, продолжительность выпадения), ветре (скорость, направление и др.), температуре воздуха (приземного слоя, вертикальный профиль и др.), давлении, плотности и влажности воздуха и их вертикальный профиль, тумане, грозах, гололеде (интенсивность, зоны, продолжительность), метелях, пыльных и песчаных бурях, морских течениях (скорость, турбулентность и др.), температуре воды (вертикальный профиль), ледовой обстановке (сплоченность, направление и скорость дрейфа, высота неровностей, наличие разводий и др.), электромагнитном излучении Солнца, Земли и атмосферы в различных спектральных интервалах т. д. [1]

Необходимо заметить, что требования по точности, периодичности обновления и другим характеристикам гидрометеорологической информации со стороны отдельных потребителей различны.

Для краткосрочных локальных прогнозов нужна высокая точность гидрометеорологической информации и детальное изучение атмосферных процессов; для долгосрочных прогнозов очень важен одновременный охват больших площадей для получения обобщенной информации практически со всей поверхности Земли, особенно с приполярных и экваториальных областей. Одновременно с наблюдениями, имеющими периодичность около су-

ток, для обнаружения быстро протекающих процессов необходимы наблюдения близкие к непрерывным (квазинепрерывные).

Таким образом, основной целью МКС является проведение глобальных квазинепрерывных гидрометеорологических наблюдений с заданными точностью и периодичностью, которые не доступны для традиционных средств МС, указанных выше.

### Основные требования к метеорологической космической системе

Определение задач, которые должна решать МКС, позволяет сформулировать основные требования к ней, непосредственно связанные с параметрами системы [2].

Поскольку МКС принадлежит к классу космических систем наблюдения, то требования к ней целесообразно разделить на три группы:

- по выполнению целевого назначения;
- к эффективности;
- к орбитальным параметрам и динамической устойчивости системы КА (приведены в [3]).

### Требования по выполнению целевого назначения

*Требования к району наблюдения.* Важнейшими характеристиками района наблюдения являются его размеры и географические координаты (широта  $\varphi$  и долгота  $\lambda$ ):

$$B_{p,n} = \{\varphi_{p,n}, \lambda_{p,n}\}.$$

Учитывая глобальный масштаб наблюдения

$$\bar{B}_{p,n} = (\varphi_{p,n} = \pm 90^\circ, \lambda_{p,n} = 0 \dots 360^\circ).$$

*Требования к спектральным характеристикам аппаратуры наблюдения.* В метеорологии наблюдения из космоса объектов или процессов в силу их специфики должны проводиться в следующих диапазонах длин волн  $\lambda$  электромагнитного спектра [4]:

- в видимом диапазоне  $\lambda = 0,40 \dots 0,75$  мкм;
- в инфракрасном диапазоне  $\lambda = 0,72 \dots 14,0$  мкм;
- в микроволновом диапазоне  $\lambda = 0,50 \dots 30,0$  см.

*Требования к пространственной разрешающей способности  $R$*  определяются размерами объектов наблюдения. При изучении объекта по изображению различают пространственную разрешающую способность, необходимую для обнаружения объекта  $R_{об}$  и для идентификации объекта  $R_{ид}$ . Обычно  $R_{об}/R_{ид} \sim 0,3 \dots 0,7$ . При проведении глобальных

метеорологических наблюдений из космоса необходимо получение изображений с пространственным разрешением  $R \leq \bar{R} = 1 \dots 5$  км, а для детальных наблюдений  $R \leq \bar{R} = 1 \dots 300$  м.

*Требования к обзорности изображения.* Обзорность космического изображения – наиболее важный параметр космической съемки, так как реализует её основное преимущество – территориальную интеграцию. Основной характеристикой обзорности является площадь снимаемого участка  $S$ .

Обзорность аппаратуры может быть определена из выражения

$$S = \pi H^2 \operatorname{tg}^2 \gamma,$$

где  $H$  – высота наблюдения;  $\gamma$  – угол обзора с высоты  $H$ .

Космические съемки можно разделить на:

- 1) глобальные съемки обзорностью  $10^7 \dots 10^8$  км<sup>2</sup>, дающие изображение всего или почти всего видимого диска Земли;
- 2) региональные съемки обзорностью  $10^6 \dots 10^7$  км<sup>2</sup>, дающие изображения крупных географических областей и стран;
- 3) локальные съемки отдельных районов обзорностью  $10^5 \dots 10^6$  км<sup>2</sup>;
- 4) детальные съемки обзорностью  $10^4 \dots 10^5$  км<sup>2</sup>.

Для метеорологических наблюдений нужны изображения обзорностью  $10^4 \dots 10^7$  км<sup>2</sup>.

*Требования к периодичности  $t_{\text{пер}}$  и внешним условиям наблюдения.* Знание динамики объектов или процессов наблюдения позволяет оптимизировать время исследований и их периодичность (временная последовательность получения информации). Различают суточные, сезонные и годовые условия.

Суточные условия, в основном, зависят от высоты Солнца над местным горизонтом и метеорологической обстановки. Они определяют требования ко времени наблюдения в течение суток. Рекомендуемое время дня для проведения исследований зависит от задач наблюдения.

Погодные условия характеризуются, прежде всего, распределением облачности, закрывающей поверхность Земли в оптическом и тепловом диапазонах. Они могут оказать существенное влияние на требуемую частоту наблюдения (например в утренние часы облачность меньше).

Для проведения метеорологических наблюдений, очевидно, погодные условия не играют роли. Малозначительны также условия освещенности. Однако существенную роль может играть угол

Солнца относительно оптической оси аппаратуры наблюдения  $\alpha_c$  из-за возможной засветки. Обычно он должен удовлетворять ограничению  $\alpha_c \geq \bar{\alpha}_c$ , где  $\bar{\alpha}_c$  – зависит от конструкции приемного устройства.

Сезонные условия связаны с фенологическими факторами.

Можно различать пять групп явлений, отличающиеся частотой съемки земной поверхности:

- квазинепрерывные (метеонаблюдения, измерение некоторых характеристик океана, стихийные бедствия);
- ежедневные (метеонаблюдения, наблюдения за активными вулканами, пожарами лесов, загрязнением атмосферы, развитием пыльных бурь, волнением моря и т. д.);
- один раз в 1...2 недели (изучение природных ресурсов, наблюдение за снежным покровом, ледниками, морскими течениями и т. п.);
- один раз в месяц или несколько месяцев (изучение эрозионных процессов, землепользования, транспортной системы);
- детальные съемки один раз в несколько лет (среднемасштабное картирование геологических строений, обновление топографических карт и др. задачи).

Для МКС непрерывного наблюдения периодичность обзора  $t_{\text{пер}} = \bar{t}_{\text{пер}} = 0$ .

### Требования к эффективности МКС

*Требование к экономической эффективности.*

Это одна из важнейших характеристик МКС, так как именно по ней можно судить о той отдаче, которую дает МКС для различных отраслей экономики, а также о целесообразности её создания. Экономическая эффективность непосредственно связана с тем доходом, который дает использование системы, с одной стороны, и затратами на неё – с другой.

Поскольку экономическая эффективность зависит от основных показателей качества и эффективности МКС (качества поступающей от неё информации, оперативности и т. п.), а также от стоимости МКС, то требование к экономической эффективности может быть трансформировано в ряд других требований, связанных с характеристиками системы.

*Требования к оперативности МКС.* Под оперативностью  $\tau_{\text{оп}}^{\text{МКС}}$  понимают обычно время от момента получения информации на борту КА до момента её передачи на Землю:

$$\tau_{\text{оп}}^{\text{МКС}} = \tau_{\text{ан}}^{\text{МКС}} + \tau_{\text{ож}}^{\text{МКС}},$$

где  $\tau_{\text{ан}}^{\text{МКС}}$  – интервал времени от начала наблюдения объекта регистрирующей аппаратурой  $t_n$  до момента готовности информации к передаче или записи на хранение  $t_r$ ;  $\tau_{\text{ож}}^{\text{МКС}}$  – интервал времени от момента  $t_r$  до начала передачи информации на Землю.

Время  $\tau_{\text{ан}}^{\text{МКС}}$  определяется характеристиками аппаратуры наблюдения. В современных оптических системах получения изображения развертка его по строке осуществляется с помощью сканирующей системы со скоростью  $V_{\text{ск}}$ , а развертка кадра за счет орбитального движения КА относительно Земли со скоростью  $V_{\text{КА}}$ . Для получения изображения, синхронного с наблюдаемой поверхностью Земли, эти скорости должны быть согласованы.

Скорость движения КА вдоль трассы (проекция подспутниковой точки на Земле) определяется соотношением:

$$V_{\text{КА}} = \frac{2\pi R_3}{T} = \frac{\sqrt{\mu} R_3}{(R_3 + H)^{3/2}},$$

где  $T$  – период обращения КА по орбите;  $R_3$  и  $\mu$  – радиус и коэффициент притяжения Земли соответственно.

Длина полосы обзора на поверхности Земли  $L_1$  (в направлении движения КА), соответствующая одной строке изображения, равна одному элементу (пиксель) разрешения на местности, т. е.  $L_1 = R$ . Тогда период сканирования определяется из условия:

$$\tau_L = \frac{L_1}{V_{\text{КА}}} = \frac{R(R_3 + H)^{3/2}}{\sqrt{\mu} R_3}.$$

Принимая во внимание, что пространственная разрешающая способность аппаратуры наблюдения выражается соотношением

$$R = H / fr_{\text{ан}},$$

где  $f$  и  $r_{\text{ан}}$  – фокусное расстояние и разрешающая способность аппаратуры соответственно, то период сканирования может быть определен следующим образом:

$$\tau_L = \frac{H(R_3 + H)^{3/2}}{\sqrt{\mu} R_3 fr_{\text{ан}}}.$$

Для распознавания объект должен быть накрыт на снимке 10 ... 20 строками. Тогда время  $\tau_{\text{ан}}$ , необходимое для получения его изображения, определяется как  $\tau_{\text{ан}} = 10\tau_L$ . Это время существенно зависит от высоты орбиты наблюдения. Так, если при  $f = 100$  мм и  $r_{\text{ан}} = 100$  эл/мм на высоте  $H = 1$  тыс. км  $\tau_{\text{ан}} \approx 0,15$  с, то на высоте геостационарной орбиты  $H = 36$  тыс. км  $\tau_{\text{ан}} \approx 80$  с.

Время ожидания передачи информации  $\tau_{\text{ож}}^{\text{МКС}}$  определяется взаимным положением наземного пункта приема информации и КА, осуществляющего наблюдение, а также скоростью передачи полученной информации.

Требования к оперативности МКС существенно зависят от требуемой эффективности и от временных характеристик объектов наблюдения. Особенно высокой должна быть оперативность при обнаружении стихийных бедствий и других быстроразвивающихся процессов, к которым можно отнести и метеорологические. Для метеорологической информации требуется  $0 \leq \tau_{\text{оп}}^{\text{МКС}} \leq 6$  ч, либо  $\tau_{\text{оп}}^{\text{МКС}} \rightarrow \min$ .

*Требования к качеству изображения.* Качество изображения оказывает непосредственное влияние на эффективность МКС, а потому требования к качеству предъявляются, исходя из этого показателя. Качество изображения оценивается обычно вероятностью получения достоверной информации  $P_{\text{д}}^{\text{МКС}}$ . Достоверность информации должна быть либо максимально возможной ( $P_{\text{д}}^{\text{МКС}} \rightarrow \max$ ), либо быть не ниже заданной. Для метеорологической информации  $P_{\text{д}}^{\text{МКС}} \geq \bar{P}_{\text{д}} = 0,8 \dots 0,9$ .

*Требования к потере информации.* Потери метеоинформации определяются качеством согласованного действия бортовых средств получения и передачи на Землю информации и наземных средств приема, обработки и распространения целевой информации. Потери информации для МКС оцениваются примерно в 10% для всего срока активного существования (САС) метеорологических КА.

*Требования к стоимости МКС.* Для систем, эффективность которых связана с функционированием в течение заданного времени, важной характеристикой является стоимость единицы времени активного функционирования  $\hat{C}_{\text{МКС}}$ . Требования к ней могут быть заданы как в виде ограничения  $\hat{C}_{\text{МКС}} \leq \hat{C}_{\text{МКС}}^{\text{зад}}$ , так и в форме  $\hat{C}_{\text{МКС}} \rightarrow \min$ .

В общем виде затраты на МКС складываются из затрат на ракеты-носители (РН), на КА и другие

компоненты МКС. В принятой постановке задачи предполагается, что в составе МКС используются уже имеющиеся РН, наземные комплексы и системы. Затраты на систему КА будут складываться из затрат на разработку системы  $C_{КА}^{раз}$  и на изготовление КА  $C_{КА}^{из}$ , входящих в её состав.

Полная стоимость  $C_{МКС}$  системы КА будет складываться из стоимости пусков  $C_{МКС}^п$ , стоимости разработки  $C_{МКС}^{раз}$  и изготовления системы  $C_{МКС}^{из}$ , т. е.

$$C_{МКС} = C_{МКС}^п + C_{МКС}^{раз} + C_{МКС}^{из}.$$

В данной постановке задачи определяющими параметрами системы являются масса КА и относительная масса аппаратуры наблюдения, а также орбитальные параметры КА и суммарное количество КА в системе  $N$ , потребное на заданный срок функционирования системы  $T_\phi$ .

Приведенные затраты, т. е. затраты на единицу времени функционирования, могут быть определены как

$$\hat{C}_{МКС} = C_{МКС} / T_\phi.$$

Поскольку  $\hat{C}_{МКС}$  определяется общими затратами на МКС  $C_{МКС}$  за срок функционирования  $T_\phi$ , то требование к стоимости МКС может быть выражено в одном из двух:

$$C_{МКС} \rightarrow \min \text{ при } T_\phi = \hat{T}_\phi; T_\phi \rightarrow \max \text{ при } C_{МКС} = \hat{C}_{МКС},$$

где  $\hat{T}_\phi$  и  $\hat{C}_{МКС}$  – заданные значения.

*Требования к массовым характеристикам аппаратуры наблюдения.* Как следует из вышеприведенного пункта, относительная масса аппаратуры наблюдения является определяющим фактором стоимости МКС в части КА.

Анализ показывает, что к наиболее важным параметрам регистрирующей аппаратуры относится фокусное расстояние  $f$ , угол обзора  $\gamma$ , размеры элемента разрешения  $l_3 = 1/r_{ан}$ . Их выбор для заданного типа аппаратуры зависит от отводимой под аппаратуру массы:

$$M_{ан} = k_1 f \frac{\pi D_{вх}^2}{4} = k_1 \pi f^3 \text{tg}^2 \gamma,$$

где  $D_{вх}$  – диаметр входного отверстия;  $k_1$  – удельная плотность аппаратуры. По данным [5]  $k_1$  можно принять равной (1...5) кг/дм<sup>3</sup>.

Для оценки массы аппаратуры оптического сканирования можно воспользоваться эмпирическим выражением из [6]:

$$M_{ан} = 0,74 D_{вх}^{0,87}.$$

*Требования к массе КА.* Масса КА, входящих в состав МКС, является определяющим фактором при расчетных оценках стоимости МКС.

Если характеристики ракеты-носителя заданы, то масса КА зависит от них, а также от параметров орбиты выведения. Будем полагать, что выведение КА на заданную орбиту осуществляется с использованием РН с характеристической скоростью  $\Delta V_B$  для вывода на начальную орбиту и импульсных переходов, осуществляемых разгонным блоком (РБ) с суммарным импульсом  $\Delta V_\Sigma$  с начальной орбиты. Тогда масса КА в соответствии с формулой К.Э. Циолковского может быть определена следующим образом:

$$M_{КА} = M_0 e^{\frac{-(\Delta V_B + \Delta V_\Sigma)}{P_{уд} g}},$$

где  $M_0$  – начальная масса КА;  $P_{уд}$  – удельный импульс двигателя разгонного блока;  $g$  – ускорение свободного падения.

С другой стороны, масса КА складывается из масс бортовых систем:

$$\begin{aligned} M_{КА} &= M_{ан} + M_k + M_{эду} + M_{п.с} = \\ &= M_{КА} (K_{ан} + K_k + K_{эду} + K_{п.с}), \end{aligned}$$

где  $M_k$  – масса конструкции;  $M_{эду}$  – масса энергодвигательной системы и  $M_{п.с}$  – масса прочих бортовых систем;  $K_{ан}$ ,  $K_k$ ,  $K_{эду}$ ,  $K_{п.с}$  – соответственно относительные массы указанных составляющих  $M_{КА}$ .

Требования к орбитальным параметрам и динамической устойчивости системы КА приведены [3].

### Заключение

Определено место МКС в составе общей метеорологической системы, исходя из целевого назначения и решаемых задач.

Сформулированы и проанализированы основные требования к МКС по выполнению целевого назначения и эффективности.

Требования по назначению включают в себя требования к району наблюдения, характеристикам аппаратуры и объектов наблюдения, периодичности съемки.

Требования к эффективности МКС характеризуются требованиями к экономической эффективности, оперативности, качеству получаемой информации, а также к массовым и стоимостным показателям.

#### **Литература**

1. Космос – Земля. – М.: Наука, 1981. – 152 с.: илл.
2. Основы синтеза летательных аппаратов: учебное пособие для студентов ВТУЗов / А.А. Лебедев, В.Н. Баранов, В.Т. Бобронников [и др.]; под ред. А.А. Лебедева. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.: илл.
3. Орбитальная группировка космических аппаратов метеорологической космической системы и вопросы обеспечения ее динамической устойчивости / В.П. Ходненко // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 110. – С. 31 – 38.
4. Виноградов Б.В. Космические методы изучения природной среды / Б.В. Виноградов. – М., 1976. – 287 с.
5. Бешелев С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М., 1974. – 160 с.
6. Авдудевский В.С. Народохозяйственные и научные космические комплексы / В.С. Авдудевский, Г.Р. Успенский. – М.: Машиностроение, 1985. – 416 с.: илл.

*Поступила в редакцию 14.01.2009*

*Леонид Алексеевич Макриденко, д-р техн. наук, генеральный директор-генеральный конструктор, т. 365-56-10.*

*Сергей Николаевич Волков, д-р техн. наук, 1-й зам. генерального директора-генерального конструктора, т. 366-42-56.*

*Владимир Павлович Ходненко, д-р техн. наук, начальник лаборатории, т. 624-94-98.*

*Александр Викторович Хромов, аспирант, инженер, т. 607-25-35.*

*E-mail: vniiem@orc.ru.*