

УДК 004.9: 629.78

## Концепция построения базовой технологической модели разработки баллистической структуры автоматических КА

В. В. Бетанов<sup>1</sup>, В. К. Ларин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>д. т. н., проф., <sup>2</sup>к. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: betanov\_vv@spacecorp.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена концепция построения базовой технологической модели баллистической структуры КА автоматического типа. Полная технологическая модель БС представляет собой совокупность базовой и частной моделей. Как правило, такая модель необходима для расчета БС КА конкретного вида, что является наиболее частым случаем в практике проектирования КС. Основой для построения моделей являются т. н. таблицы соответствия параметров функционального назначения и баллистической структуры. Последние формируются на базе ТЗ на проект и на базе данных анализа баллистических характеристик предыдущих пусков. Отличие данных ПФН базовой и частной ТМ заключается в различии конкретных значений ПФН и включении в таблицу дополнительных значений, характерных для проектируемого КА. Предлагаемая базовая ТМ БС, построенная на основе данных функционирующих КА автоматического типа, позволяет рассчитывать большую часть параметров БС, значительно упрощая процесс проектирования новых КА.

**Ключевые слова:** технологическая модель, баллистическая структура, система, показатели функционального назначения

## Concept of Development of Basic Engineering Model for Ballistic Structure of Unmanned Spacecraft

V. V. Betanov<sup>1</sup>, V. K. Larin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>doctor of engineering science, professor, <sup>2</sup>candidate of engineering science

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: betanov\_vv@spacecorp.ru

**Abstract.** The article deals with the concept of development of the basic engineering model of ballistic structure (BS) for the unmanned SC. The complete engineering model of the BS is a combination of the basic and the special models. Typically, such a model is needed to calculate the BS for a specific type of SC, which is the most frequent task in spacecraft design. The basis for development of the models are the so-called compliance matrixes for the factors of functional purpose (FFP) and BS. The latter are formed based on the statement of work (SOW) and the ballistic analysis data from the previous launches. The difference between the FFP data for the basic and the special engineering models (EM) lies in the difference of specific values of FFP and inclusion of additional values, characteristic for the SC under development, into the matrix. The proposed basic EM BS, based on the data of the functioning unmanned SC, makes it possible to calculate the majority of features of BS, greatly simplifying the process of designing new SC.

**Keywords:** engineering model, ballistic structure, system, factors of functional purpose

## Введение

Одной из основных составляющих проектирования космических систем является выбор орбитальной структуры, включающей число плоскостей орбит, их наклонение, положение в пространстве, количество КА в каждой плоскости, их фазовое расположение в плоскости и высоты полета.

В большинстве публикаций, посвященных данной теме [1, 2, 8], представлены методики (или технологии) проектирования БС, применяемые для конкретной КС (или КА) определенного типа с соответствующим набором условий функционирования. Наиболее полно эта проблема рассмотрена в [3], где описываются методы баллистического проектирования для спутников ДЗЗ и связи.

Построение универсальной модели для проектирования баллистической структуры большинства типов КС теоретически возможно [3], но технология ее применения на практике сложна вследствие большого числа условий функционирования.

Более целесообразным можно считать построение модели БС для проектируемой КС одного типа.

Концепция построения унифицированной технологической модели (УТМ) заключается в двухэтапной последовательности разработки, вначале базовой модели, затем уточняющей — частной ТМ.

В работе рассмотрена концепция построения базовой ТМ для КС автоматического типа.

Предлагаемая ТМ может быть использована в качестве базового методического инструмента для проектирования БС других типов КА.

## 1. Общая постановка задачи

Определения.

**Технологическая модель проектирования БС** — унифицированное описание структуры, функциональных характеристик и способов определения орбитальных параметров в зависимости от основных функциональных показателей, характеризующих целевое назначение КС.

**Показатели функционального назначения** — количественные характеристики основных параметров, определяющих функциональное назначение КА.

**Баллистическая структура спутниковой системы (БС)** характеризуется следующими данными: количеством плоскостей орбит, их пространственным положением, наклонением к плоскости экватора, количеством КА в каждой плоскости, их фазовым расположением внутри плоскости и высотами полета.

Введем обозначения орбитальных параметров и других необходимых элементов БС СС:

- количество плоскостей орбит —  $n$ ,  $n = 1, \dots, m$ ;
- количество КА в каждой плоскости —  $k$ ,  $k = 1, \dots, q$ ;
- долгота восходящего узла плоскости орбиты —  $L_{\Omega k}$ ;
- минимальная, максимальная высота полета —  $H_{\min}, H_{\max}$ ;
- наклонение плоскости орбиты к экватору —  $i$ ;
- эксцентриситет орбиты —  $e$ ;
- фазовое расположение КА в плоскости орбиты —  $\varphi_{n1}, \dots, \varphi_{nk}$ .

Введем формальное обозначение обобщенных показателей функционального назначения КА (ПФН):  $\psi_j$ ,  $j = 1, \dots, p$ .

В этом случае постановка задачи построения УТМ для новой КС формулируется следующим образом. Пусть известны значения ПФН  $\psi_j = \psi_j(Q_j)$ , для проектируемого типа КА, необходимо найти значения орбитальных параметров баллистической структуры  $\{n, k, L_{\Omega k}, H, i, e, \varphi_{nk}\}$ , используя известные зависимости [1] для определения соответствия между ПФН и орбитальными параметрами.

## 2. Системный подход к разработке унифицированной ТМ БС

В соответствии с [1] «системный подход» — это методологическое направление в науке, основная задача которого состоит в разработке методов исследования и конструирования сложноорганизованных объектов — систем разных типов и классов, в которых выделены элементы, внутренние и внешние связи, наиболее существенным образом влияющие на исследуемые результаты его функциониро-

вания определены цели каждого из элементов исходя из общего предназначения объекта.

В данном случае в качестве системы выступает БС, которая состоит из элементов  $Vi\{n, k, L_{\Omega k}, H, i, e, \varphi_{nk}\}$ . Каждый элемент БС —  $Vi$  зависит от заданных ПФН —  $Q_j$ , характерных для заданного типа КА. Согласно постановке задачи необходимо найти зависимость  $Vi = f(Q_j)$ .

Анализ существующих систем КА показал, что в некоторых случаях установить математическую зависимость  $Vi$  от  $Q_j$  затруднительно, так как часть ПФН имеет неформализованный вид, в связи с чем данная проблема носит слабоструктурированный характер [7] и для ее решения целесообразно применять методы системного анализа.

### 3. Концептуальная модель унифицированной ТМ БС

Концепция проектирования УТМ БС заключается в первоначальной разработке базовой ТМ (БТМ) с последующим ее уточнением частными ТМ (ЧТМ), учитывающими детали функциональных признаков проектируемой космической системы (рис. 1).

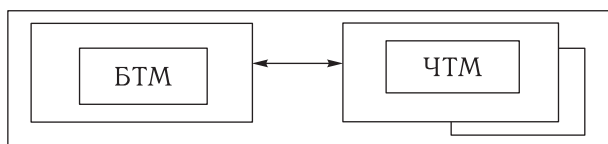


Рис. 1. Принципиальная схема УТМ-БС

Разработка БС нового КА должна происходить в два этапа. На первом этапе используется базовая ТМ, которая позволит определить основную часть параметров БС, характерных для данного типа КА, на втором — частные ТМ для определения недостающих (или уточнения известных) параметров БС, относящихся к конкретной КС (или КА) данного типа.

Исходными данными для проектирования БС новой КС (КА) являются:

- показатели функционального назначения (ПФН);
- высотный диапазон орбит КА (ближний, средний и дальний космос);
- система или единичный КА.

На рис. 2 приводится обобщенная схема распределения совокупности существующих типов КА в зависимости от высотных зон полета (ближний, средний и дальний космос).

Высотный диапазон орбит КА:

- ближний космос — 200–2000 км,
- средний космос — ~20 000–40 000 км,
- дальний космос — ~380 000 км и более.

В работе рассмотрены только автоматические КС.

### 4. Разработка базовой ТМ БС автоматических КС

Под базовой ТМ БС автоматических КС понимается модель, построенная на основе совпадающих ПФН (в рамках установленного диапазона) для большинства видов КА данного типа.

Для уточнения понятия базовой УТМ БС и последующего анализа данных по существующим видам КА в табл. 1 приводится соответствующий набор формальных параметров ПФН.

Таблица 1.

№	Вид КС	Показатели функционального назначения				
		1П1	1П2	1П3	...	1Пn
1	Навигационные	2П1	2П2	2П3	...	2Пn
2	Связные	3П1	3П2	3П3	...	3Пn
3	Метеорологическ.	4П1	4П2	4П3	...	4Пn
4	ДЗЗ	5П1	5П2	5П3	...	5Пn
5	Геодезические	6П1	6П2	6П3	...	6Пn
6	Фото- и радионаблюдения					

В качестве примера допустим, что совпали признаки 1П2, ..., 6П2, тогда ТМ, построенную по выбранным признакам, можно считать базовой.

Для выбора конкретных ПФН ниже приводится схема классификации КА автоматического типа по функциональным признакам существующих систем [6, 7].

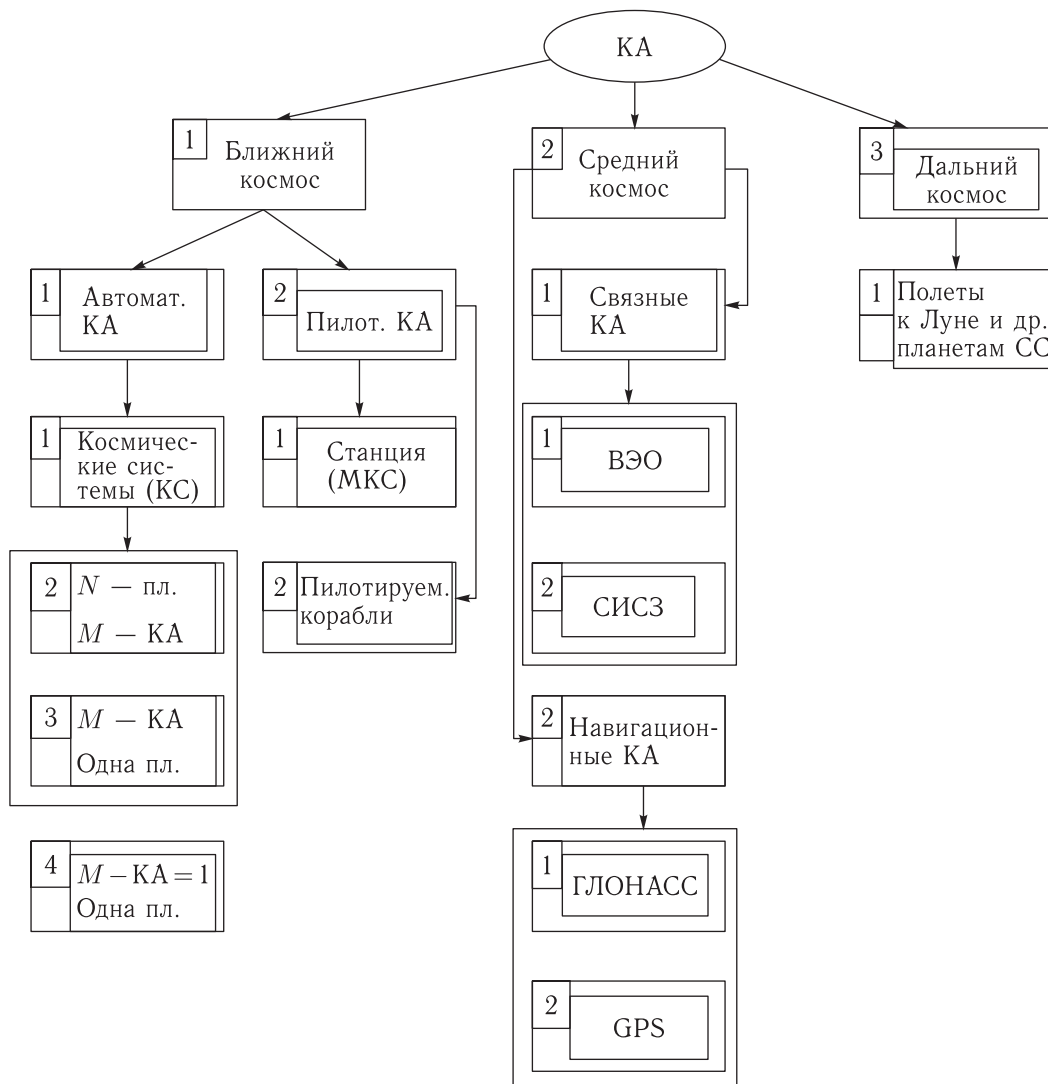


Рис. 2. Обобщенная схема распределения по основным типам КА

Пояснения к рис. 2.

Блок 1.1.2 — количество плоскостей в КС —  $N$ , в каждой плоскости —  $M$  КА.

Блок 1.1.3 — одна плоскость,  $M$  — количество КА в плоскости.

Блок 1.1.4 — одна плоскость, один КА в плоскости.

Блок 2.1.1 — ВЭО — высокоэллиптические орбиты.

Блок 2.1.2 — СИСЗ — стационарные ИСЗ.

В табл. 2 приводятся параметры функционального назначения для основных типов автоматических КА, функционирующих в настоящее время, баллистические параметры которых выбраны из схемы (рис. 3).

Для определения дальнейшего решения на основе анализа данных табл. 2 приведем табл. 3, где показано соответствие значений ПФН и параметров БС (см. разд. 1).

Сравнительный анализ орбитальных параметров различных видов КС, приведенных в табл. 2, показал целесообразность разработки трех базовых моделей:

БМ1 — для навигационных КС;

БМ2 — для связных КС;

БМ3 — для метеорологических, геодезических КС, ДЗЗ, КС фото- и радионаблюдения.

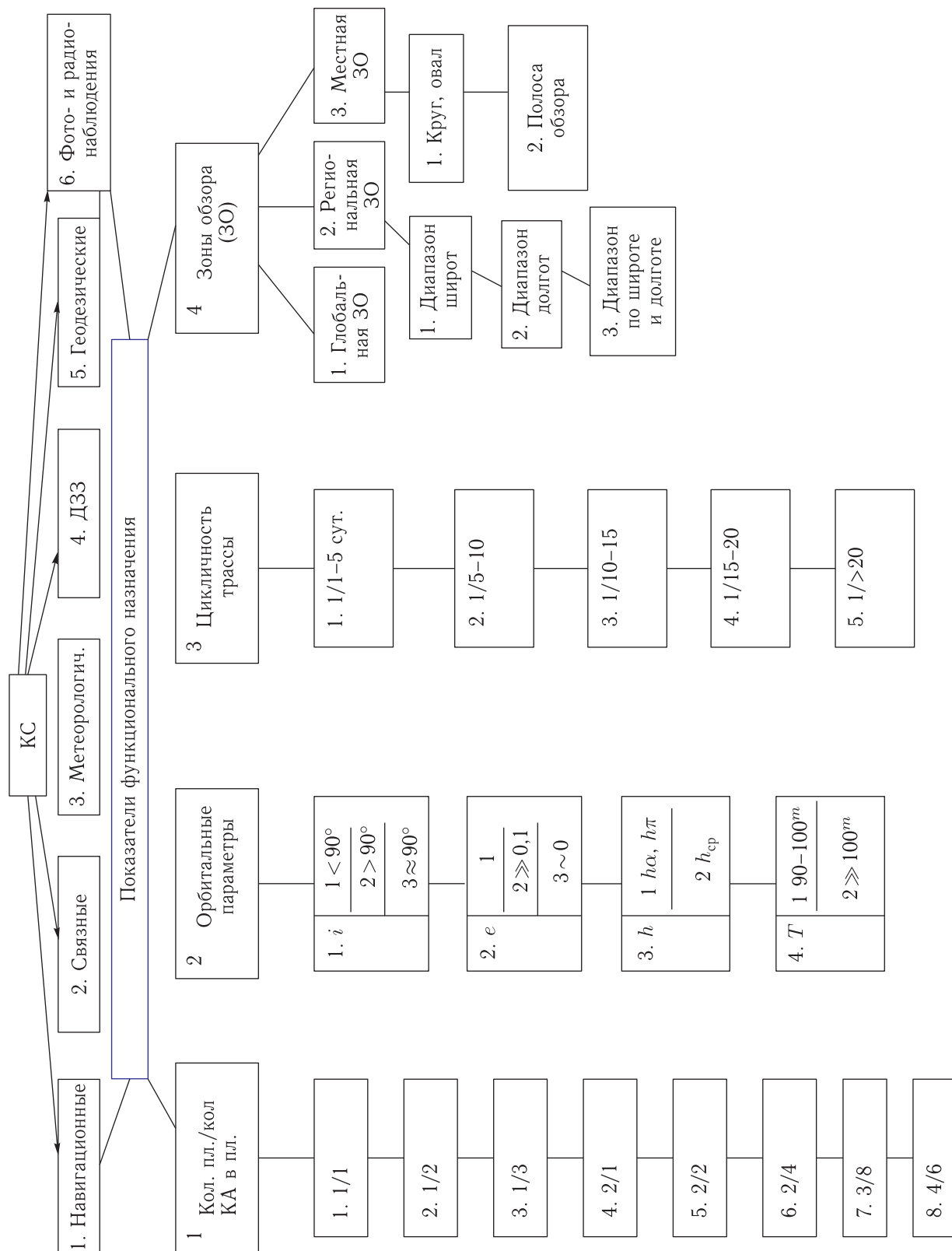


Рис. 3. Схема классификации КС

Таблица 2.

Виды КС (КА)	Показатели функционального назначения					Примечание
	$N/n$	$\Delta h_{\text{ср}}$ (км)	$i/e$	Зоны обзора (ЗО)	Цикличность трассы (цикл.)	
Навигация	4–6 /24	~20 000	~68°/ ~0	ГЗО	–	<b>Цель:</b> определение МП наземных объектов
Связь	2–4/ 2–8	ВЭО 600–37 000 км	~63°/0,7	Северное полушарие	–	<b>Цель:</b> обеспечение многоканальной связью абонентов
	1/1–4	ГСО ~37 000 км	~0/ ~0	±70° по широте/ 90° по долготе		
Метеорология	1/1	~600–1200	~98°/ ~0	~120 км	1/10–15 сут	<b>Цель:</b> съемка облачности неба в различных диапазонах спектра
ДЗЗ	1/2	~600–700	~98°/ ~0	~100 км	1/15–20 сут	<b>Цель:</b> изучение природных ресурсов Земли (съемка)
Геодезия	1/1	~1500	73,6; 82,6/~0,0	–	–	Создание геодезической системы координат повышенной точности, уточнение формы Земли, ее ГПЗ
Фото- и радионаблюдение	1/1	~300–400	65–72°/~0,0	~100 км	1/ > 20 сут	<b>Цель:</b> съемка земных объектов, пеленгация каналов радиосвязи

*Примечание.* Данные табл. 2 получены на основе анализа опубликованных материалов по существующим в настоящее время КС (КА) [7].

ВЭО — высокоэллиптические орбиты, ГСО — геостационарные орбиты, ГЗО — глобальная зона обзора, ДЗЗ — дистанционное зондирование Земли.

Таблица 3.

ПФН	Параметры								
	$n_{\text{ут}}$	$k_{\text{ут}}$	$L_{\text{ут}}$	$h_{\text{ут}}$	$i$	$e$	$\varphi_{\text{ут}}$	ЗО	Цикл
БС	$n$	$k$	$L$	$h$	$i$	$e$	$\varphi$		

*Примечание.* ПФН:  $n_{\text{ут}}$ ,  $k_{\text{ут}}$ , ... представляют собой параметры, которые определяются на основе значений табл. 2 и математических зависимостей от ЗО и цикличности трасс полета.

#### 4.1. Технология разработки БМ 1

Сформируем таблицу соответствия ПФН и БС на базе табл. 2, выбрав значения ПФН применительно к навигационным КС (табл. 3.1).

Таблица 3.1

ПФН	Параметры								
	4–6	24	$L_{\text{ут}}$	20 000	68	0	$\varphi_{\text{ут}}$	ГЗО	–
БС	$n$	$k$	$L$	$h$	$i$	$e$	$\varphi$		

Согласно табл. 3.1 для создания БС необходимо определить долготы восходящего узла плоскостей орбиты  $L_{\text{ут}}$  и фазовое расположение КА в каждой плоскости  $\varphi_{\text{ут}}$ .

Известно, что значение долготы восходящего узла первой орбитальной плоскости (фаза формирования системы) есть функция времени старта первого КА системы и продолжительности активного участка выведения на орбиту. Последующие

Т а б л и ц а 3.2

Параметры									
ПФН	2-4	6-8	$L_{ут}$	600-37 000	$\sim 63^\circ$	$\sim 0,7$	$\varphi_{ут}$	Сев. полушарие	-
БС	$n$	$k$	$L$	$h$	$i$	$e$	$\varphi$		

Т а б л и ц а 3.3

Параметры									
ПФН	1	1-4	$L_{ут}$	$\sim 37 000$	$\sim 0^\circ$	$\sim 0,0$	$\varphi_{ут}$	$\pm 70^\circ$ по широте/ $90^\circ$ по долготе	-
БС	$n$	$k$	$L$	$h$	$i$	$e$	$\varphi$		

плоскости орбит располагаются равномерно вдоль экватора путем сдвига времени старта каждого следующего запуска на время  $\Delta t$ .

$$t_n = t_{ст} + \Delta t,$$

где  $\Delta t = 2\pi/n \cdot \omega_3$ ,  $t_{ст}$  — московское время предыдущего старта,  $n$  — число плоскостей.

Фазовое расположение КА внутри плоскости  $\varphi_{ут}$  является равномерным. При условии межплоскостного фазирования КА одной плоскости сдвинуты на угловое расстояние  $\Delta\varphi$  по отношению КА соседней плоскости.

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \Delta\varphi,$$

где  $\Delta\varphi = 2\pi/k$ ,  $k$  — число КА в плоскости.

## 4.2. Технология разработки БМ2

В силу большого различия орбит БМ2 разбивается на две составные части:

- для высокоэллиптических орбит — БМ2-1,
- для геостационарных орбит — БМ2-2.

### 4.2.1. Базовая модель разработки БС для высокоэллиптических КА — БМ2-1

Сформируем таблицу соответствия ПФН и БС на базе табл. 2, выбрав значения ПФН применительно к связным КС на высокоэллиптических орбитах, — табл. 3.2.

Для одновременного покрытия Северного полушария коммуникационными зонами обслуживания КА типа «Молния-3» необходимо иметь четыре орбитальные плоскости, равномерно распределенных по экватору, с долготами восходящего узла, равными

$$Li = L_0 + 90^\circ \cdot (i - 1), \quad i = 1 \dots 4,$$

где  $L_0$  — долгота восходящего узла первой плоскости начального этапа формирования системы.

В каждой плоскости расположены два КА на фазовом расстоянии равном  $\pi$ . При этом фазовый сдвиг КА в одной плоскости относительно КА в другой плоскости рассчитывается по формуле:

$$\Delta\varphi = \pi/4.$$

### 4.2.2. Базовая модель разработки БС для геостационарных КА — БМ2-2

Сформируем таблицу соответствия ПФН и БС на базе табл. 2, выбрав значения ПФН применительно к КА, находящихся на геостационарных орбитах (ГСО), — табл. 3.3.

Система геостационарных КА для обеспечения глобальной связи должна состоять из четырех КА, равномерно расположенных по экватору со следующими долготами стояния:

$$L1 = 0^\circ, \quad L2 = 90^\circ, \quad L3 = 180^\circ, \quad L4 = 270^\circ.$$

Т а б л и ц а 3.4

		Параметры							
ПФН	1	1-2	$L_{\text{ут}}$	300-1200 км	$\sim 65^\circ/\sim 98^\circ$	$\sim 0$	-	$\sim 100$ км	1/ $\sim 15$
БС	$n$	$k$	$L$	$h$	$i$	$e$	$\varphi$		

В практике проектирования БО полетов геостационарных КА точки стояния определяются Международным союзом связи (МСС) по заявкам государств.

В настоящее время функционируют четыре ГСС (геостационарных спутника) «Экспресс-NN» с долготами стояния:  $14^\circ$  з. д.,  $56^\circ$  в. д.,  $96,5^\circ$  в. д.,  $103^\circ$  в. д. и два ГСС «Ямал-1,2» с долготами стояния:  $90^\circ$  в. д. и  $55^\circ$  в. д. [5], значительно отличающимися от глобальной структуры.

Таким образом, выбор  $Li$  — рабочих точек «стояния» будет зависеть не только от требований проектировщиков системы, но и возможностей, предоставляемых МСС.

Фазовое расположение КА на ГСО совпадает с расположением по долготе и не требует специальных расчетов.

### 4.3. Технология разработки БМЗ

Сформируем таблицу соответствия ПФН и БС на базе табл. 2, выбрав значения ПФН применительно к метеорологическим, геодезическим КС, ДЗЗ, КС фото- и радионаблюдения, — табл. 3.4.

Долгота восходящего узла плоскости орбиты (фаза формирования системы) есть функция времени старта первого КА системы и продолжительности активного участка выведения на орбиту и связано только с техническими условиями пуска ракеты-носителя.

$$L = L_{\text{ст}} + \Delta t_{\text{акт}} \cdot \omega_3,$$

где  $L_{\text{ст}}$  — гринвичская долгота старта,

$\Delta t_{\text{акт}}$  — время активного участка выведения на орбиту КА,

$\omega_3$  — угловая скорость вращения Земли.

Наклонение орбиты выбирается исходя из следующих условий: если в ТУ на функционирование КА задана постоянная ориентация на Солнце,

то  $i > 90^\circ$  (синхронно-солнечная орбита), в других случаях наклонение выбирается в зависимости от географического расположения районов связи, а также от ширины зона обзора земной поверхности бортовой аппаратурой [1]. В этом случае  $i$  должно находиться в пределах

$$\pi/2 - l/R \cdot (1 - k') < i < \pi/2 + l/R \cdot (1 - k'),$$

где  $l$  — половина диаграммы направленности бортовой аппаратуры;

$R = 6371$  км — средний радиус Земли;

$k'$  — коэффициент, равный отношению одномоментной зоны обзора (по ширине) к зоне обзора по трассе одного витка в процентах.

В [6] приведен график зависимости наклонения  $i$  от коэффициента  $k'$ .

При выборе высоты полета (периода обращения) должно учитываться следующее:

- заданная ширина зоны обзора бортовой аппаратуры (функция диаграммы направленности);
- съем информации с одних и тех же районов земной поверхности за заданное число суток;
- повторение трассы через заданное число суток (цикличность трассы).

С учетом перечисленных требований период обращения определяется по формуле

$$T = 2\pi \cdot k_c / (\omega_3 \cdot [1 + (n_c - 1) \cdot k_c]),$$

где  $k_c$  — коэффициент, равный цикличности трасс,  $n_c$  — целое число витков в звездных сутках.

Для орбит с  $e \sim 0$  (квазикруговые орбиты) при известном значении  $T$  высота орбиты рассчитывается по формуле

$$h = T/4\pi \cdot \mu^{3/2} - R_3,$$

где  $\mu = 398\,600$  км<sup>3</sup>/с<sup>2</sup> — гравитационная постоянная.



## Заключение

Материалы статьи позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана концепция построения базовой ТМ для БС КА автоматического типа, состоящей из трех базовых ТМ: БТМ1 для навигационных КС, БТМ2 — для связных КС и БТМ3 — для метеорологических, геодезических КС, ДЗЗ и КС фото- и радионаблюдения.

2. Унифицированная ТМ БС УТМ БС состоит из двух частей: базовой ТМ, определяющей основную часть элементов БС, и частных ТМ, определяющих недостающие элементы БС, учитывающие детали классификационных признаков проектируемой КС, и базируется на показателях функционального назначения, характерных для выбранного типа КА.

3. Для удобства формирования алгоритма построения базовой ТМ предложена универсальная таблица соответствия ПФН и элементов БС, в которой строка ПФН заполняется данными, выбранными путем анализа параметров существующих КС проектируемого типа.

4. Предлагаемая базовая ТМ БС может найти применение при баллистическом проектировании КА (КС) автоматического типа.

## Список литературы

1. Основы теории полета космических аппаратов. Под ред. д-ра физ-мат. наук Г. С. Нариманова, д-ра тех. наук М. К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972.
2. Байрамов К.Р., Бетанов В.В., Ступак Г.Г., Урличич Ю.М. Управление космическими объектами. Методы, модели и алгоритмы решения некорректных задач НБО. М.: Радиотехника, 2012.
3. Зеленцов В.В, Казаковцев В.П. Основы баллистического проектирования ИСЗ. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012.
4. Еленев В.Д., Панков А.А. Метод выбора параметров орбитальной структуры КС // Вестник СГАУ, 2006, № 1.
5. Ступак Г.Г. и др. Выбор структуры орбит группировки перспективной системы ГЛОНАСС // Исследования наукограда, 2013, № 3–4.
6. Невдяев Л.М. Характеристики негеостационарной орбитальной группировки // Сети, 1999, № 1–2.
7. Космические аппараты / Военный энциклопедический словарь. М.: Большая российская энциклопедия, РИПОЛ КЛАССИК, 2001.
8. Бетанов В.В., Ларин В.К. Использование системного подхода к решению проблемных вопросов функционирования АКП БНО полетов КА «ГЛОНАСС» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 2, вып. 1.