

**Н. Н. Клименко<sup>1</sup>, А. Е. Назаров<sup>1</sup>**<sup>1</sup>ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина»

# ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

*Рассмотрены предложения по орбитальному построению космической системы на высокоэллиптических орбитах, предназначенной для наблюдения космических объектов на геостационарной орбите, а также возможные подходы к созданию космических аппаратов, входящих в состав ее орбитальной группировки. Актуальность создания такой системы обусловлена необходимостью контроля космических объектов, представляющих потенциальную опасность для отечественных геостационарных космических аппаратов.*

**Ключевые слова:** наблюдение, высокоэллиптическая орбита, геостационарная орбита, орбитальное построение, космическая платформа, оптико-электронный комплекс.

В настоящее время на околоземных орбитах функционируют более 1000 космических аппаратов (КА) различного назначения. Из них около 42% космических объектов (КО) находятся на геостационарной орбите (ГСО). Интенсивное использование уникальных возможностей ГСО продолжается. Это приводит к необходимости наблюдения ГСО с целью контроля выполнения международных соглашений в области использования ГСО, выявления космических объектов, создающих помехи или нарушающих режим использования ГСО. Кроме того, на ГСО и в ее окрестностях продолжают пассивный полет большое число не функционирующих КА и их фрагментов, так называемый космический мусор, представляющий потенциальную опасность для отечественных геостационарных КА.

В связи с этим актуальной задачей является мониторинг ГСО с целью контроля текущего состава геостационарных объектов, наблюдения потенциально опасных КО, контроля их движения и визуального наблюдения. Для решения этой задачи целесообразно использование специализированных космических средств и создание отечественной космической системы мониторинга ГСО.

За рубежом в этих целях создаются и выводятся на орбиту специализированные КА MSX, XSS-10 и XSS-11, DART, MiTEch, NROL-36/OUT Sat, STARE, развернута низкоорбитальная система SBSS [4—8].

Создание отечественной космической системы (КС) мониторинга ГСО может быть реализовано с использованием уже имеющегося научно-технического задела. В настоящей статье рассмотрен вариант орбитального построения космической системы мониторинга ГСО с КА обзорного и детального наблюдения, а также возможные подходы к созданию КА на базе имеющихся и получивших летную квалифи-

кацию космических платформ и оптико-электронных комплексов (ОЭК).

Проведенный анализ решаемых задач рассматриваемой КС приводит к необходимости декомпозиции общей целевой задачи мониторинга ГСО на две, а именно:

- обзорный контроль текущего состава и движения КО на ГСО;
- детальное визуальное наблюдение КО на ГСО.

Также было определено, что с учетом специфики каждой из этих задач для их решения целесообразно использовать разные типы целевой аппаратуры (ЦА) и космических платформ. Следовательно, далее в статье будут использоваться следующие сокращенные названия задач и названия КА, используемых для их решения:

- КА-ОК — КА обзорного контроля,
- КА-ДН — КА детального наблюдения.

При выборе орбитального построения КС мониторинга ГСО использовались следующие основные критерии:

- минимизация максимальной дальности наблюдения КО на ГСО;
- минимизация энергетических затрат выведения КА на орбиту;
- минимизация энергетических затрат на поддержание КА на орбите.

Дополнительным критерием при выборе орбитального построения КС является возможность использования базовых космических платформ разра-

ботки НПО им. С. А. Лавочкина для создания КА-ОК и КА-ДН.

С учетом изложенных выше критериев для мониторинга ГСО предлагается в качестве орбит использовать полусуточные высокоэллиптические орбиты (ВЭО) типа «Молния» с наклоном около  $63,4^\circ$  и аргументом широты перигея в районе  $0^\circ$  или  $180^\circ$ . Предлагаемые ВЭО обеспечивают необходимые условия для решения рассматриваемых задач мониторинга ГСО, а именно:

- значительный интервал времени в районе апогея орбиты (~ 6 часов), на котором обеспечивается относительно небольшая дальность наблюдения геостационарных КА от 4000 до 18000 км для решения задачи обзорного контроля;
- наличие участка орбиты в районе апогея, на котором обеспечивается дальность до КО от 100 до 400 км для решения задачи детального наблюдения;
- радиовидимость КА с территории РФ на одном из суточных витков (западном или восточном);
- относительно малое смещение КА на рабочем участке орбиты относительно контролируемой дуги ГСО;
- обеспечение требуемой скорости дрейфа географической долготы восходящего узла для приведения апогейного участка орбиты в район точки «стояния» заданного для наблюдения КО;
- ежесуточную повторяемость трассы КА;
- приемлемую устойчивость орбиты под влиянием возмущающих факторов (влияние нецентральности гравитационного поля Земли, притяжения Солнца, Луны и т.п.) в течение длительного времени.

Следует отметить, что как отличаются конструкции КА для обзорного контроля и детального наблюдения, так несколько отличаются и параметры их орбит. Основное отличие параметров орбиты КА-ДН от орбиты КА-ОК состоит в увеличении высоты перигея и, соответственно, уменьшении высоты апогея до значения, при котором апогей будет находиться в близкой окрестности ГСО. Такая близость позволит обеспечить необходимую дальность наблюдения заданных КО с требуемым разрешением. Диапазон дальности наблюдения, на котором можно рассматривать получение целевой информации с требуемым качеством, составляет от 400 до 100 км.

Для решения задачи обзорного контроля ГСО рабочий участок (РУ) КА-ОК, на котором осуществляется работа целевой аппаратуры по обзору ГСО, может располагаться в районе апогея, где обеспечивается требуемая дальность наблюдения. Так, при значении максимальной дальности наблюдения до 18000 км РУ может быть организован на интервале от  $-3,2$  до  $+3,2$  часа от апогея, продолжительностью приблизительно 6,2 часа. При этом в течение суток можно организовать два РУ. Таким образом, орбитальная

группировка из двух КА-ОК на таких ВЭО может обеспечить непрерывный обзор всей ГСО в течение 24 часов в сутки.

Для обеспечения непрерывного обзора ГСО должна быть сформирована соответствующая орбитальная структура (ОС). Назначением ОС является обеспечение определенной пространственно-временной расстановки КА в абсолютном пространстве, при которой обеспечиваются необходимые условия для последовательного обзора участков ГСО.

Организацию непрерывного в течение суток следования РУ предлагается осуществлять посредством фазирования положения КА в плоскости орбиты, т.е. путем разведения двух КА-ОК по аргументу широты на  $180^\circ$ , что эквивалентно разведению РУ по времени на 6 часов.

На рисунке 1 представлен вид предлагаемой орбитальной структуры с двумя КА-ОК (№ 1 и № 2). Кругами показаны условные точки «стояния» КА на дуге ГСО, которая может наблюдаться на РУ КА № 1. Цифры у точек «стояния» соответствуют значению их долгот.

Применение предлагаемой ОС с двумя КА-ОК в одной орбитальной плоскости позволяет реализовать развертывание орбитальной группировки пакетным запуском двух КА за один пуск РН.

Следует отметить, что требуется не только начальное формирование ОС с заданными параметрами, но и осуществление поддержки этих параметров в течение всего срока эксплуатации КА [2, 3]. Для решения этой задачи необходимо предусмотреть соответствующее управление ОС, а именно:

- выбор начальных параметров орбиты, обеспечивающих минимальную пространственно-временную деформацию ОС в течение заданного срока;
- проведение коррекций поддержания орбиты в заданных диапазонах.

Предлагаемые параметры ВЭО обеспечивают минимизацию эволюции аргумента широты перигея, определяющего геометрию расположения РУ

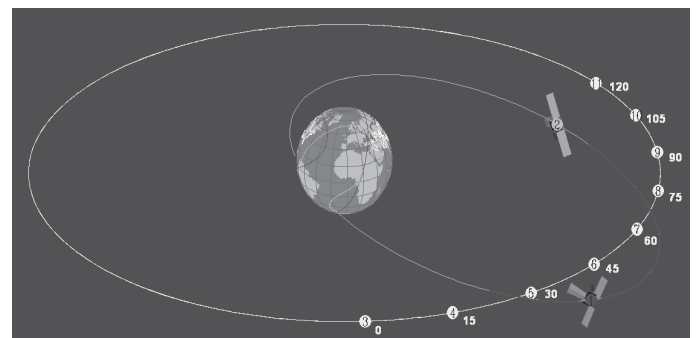


Рисунок 1. Вид орбитальной структуры для обзорного контроля КО на ГСО

отдельного КА относительно ГСО и, соответственно, пространственную деформацию ОС в целом.

Временная деформация ОС для решения задачи обзорного контроля минимизирована уже тем, что скорость прецессии долготы восходящего узла орбиты будет одинакова у обоих КА-ОК, так как они функционируют в одной плоскости орбиты.

Целевой задачей КА-ОК является регулярное проведение съемок объектов на ближайшей к РУ КА-ОК дуге ГСО с помощью целевой аппаратуры (ЦА). Последовательный обзор дуги ГСО осуществляется путем перенацеливания ЦА на участки ГСО. В течение РУ каждому КА-КО доступно для наблюдения при требуемом диапазоне дальностей участок дуги ГСО порядка  $90^\circ$ , т.е. четверть дуги ГСО. Следует заметить, что речь идет только о дуге с дальностью наблюдения не более 17000 км. При больших дальностях для наблюдения доступна практически вся ГСО. Это значит, что в течение суток может быть обеспечен полный обзор ГСО. В зависимости от размеров поля зрения и времени съемки одного фрагмента за 6 часов РУ может быть реализована периодическая съемка одних и тех же КО, что позволит определить динамику их движения.

Анализ результатов проведенного моделирования движения КА орбитальной группировки показывает, что на одном РУ при соответствующем наведении АН возможно наблюдение более четверти ГСО. При этом возможно обеспечить минимальную дальность наблюдения от 17000 км в начале и конце РУ до 4000 км в районе апогея.

При неподвижной установке бортовой ЦА на КА наведение визирной оси ЦА может осуществляться соответствующим разворотом КА и последующей его стабилизацией на время съемки в абсолютной инерциальной системе координат.

Для обеспечения приемлемых условий освещенности наблюдаемой дуги ГСО имеется возможность организации схемы последовательной съемки участков наблюдаемой дуги ГСО, при которой визирная ось ЦА наводится в противоположном направлении относительно Солнца.

При необходимости организации дрейфа орбитальной группировки относительно ГСО возможно проведение коррекции периода обращения КА. Затраты характеристической скорости на проведение таких коррекций будут зависеть от величины требуемой скорости дрейфа и количества их проведения. Для обеспечения скорости дрейфа 1 град./сут. затраты характеристической скорости составят не более 1,4 м/с.

Максимальные затраты характеристической скорости на парирование эволюции периода обращения КА и поддержание географической долготы восходящего узла в заданном диапазоне для обеспечения непрерывности следования РУ двух КА-ОК составят не более 2,1 м/с в год.

Благодаря выбору оптимального начального наклонения для минимизации ухода значения аргумента широты перигея от номинального значения коррекции наклонения этого параметра не потребуются.

В качестве преимуществ ВЭО для выполнения целевой задачи КА-ОК по сравнению с другим типом орбит можно отметить возможность гарантированного обеспечения радиовидимости с пунктом приема и передачи информации на территории РФ до 11—15 часов в течение суток и обеспечение значительно меньшей дальности наблюдения КО на ГСО.

Кроме того, при функционировании КА-ОК на ВЭО имеется потенциальная возможность наблюдения КО на других орбитах при нахождении КА на перигейном участке орбиты.

Решение целевой задачи КА-ДН возможно при его сближении с наблюдаемым КО на относительно небольшое расстояние, примерно до 100 км. Для обеспечения таких условий в качестве варианта рабочей орбиты КА-ДН могут использоваться рассматриваемые ВЭО с высотой апогея примерно равной высоте ГСО.

Параметры ВЭО для КА-ДН отличаются от параметров орбиты КА-ОК значением эксцентриситета, который обеспечивает высоту апогея, равную примерно высоте ГСО. Это условие необходимо для обеспечения требуемой дальности наблюдения до 100 км. Выполнение целевой задачи КА-ДН может осуществляться на РУ, организуемом в окрестности апогея.

На рисунке 2 показан общий вид предлагаемой орбитальной структуры высокоэллиптической КС мониторинга ГСО с двумя КА-ОК (№ 1 и № 2) и КА-ДН (№ 3).

Для наблюдения КО на всей ГСО возможно обеспечение определенного дрейфа рабочего участка КА-ДН вдоль ГСО по долготе. Такой дрейф для приведения КА-ДН к заданным точкам «стояния» КО также как и для КА-ОК может быть обеспечен за счет изменения величины периода обращения и осуществляется проведением соответствующей коррекции этого параметра орбиты.

Основной задачей коррекции орбиты КА-ДН является точное поддержание требуемых значений параметров орбиты, и прежде всего аргумента широты

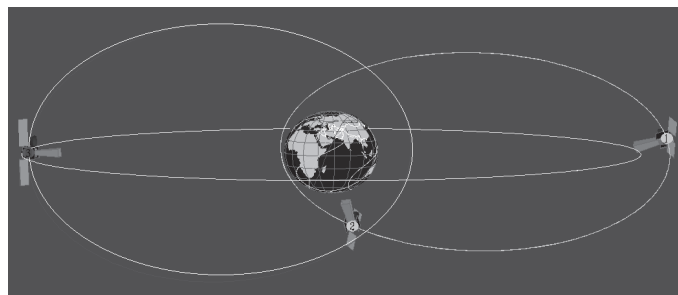


Рисунок 2. Вид орбитальной структуры для детального наблюдения КО на ГСО

перигея, высоты апогея и значения периода обращения КА, при которых обеспечивается на заданном интервале времени требуемая дальность и условия освещенности КО.

Определение стратегии и алгоритмов управления движением центра масс КА-ДН для проведения соответствующих коррекций параметров орбиты является важным этапом баллистического проектирования КА. Предварительные оценки показали достаточность запасов характеристической скорости для решения задач коррекции орбиты КА-ДН при использовании в качестве платформы, разработанную в ФГУП «НПО им С. А. Лавочкина», космическую платформу «Навигатор». Эта космическая платформа может функционировать как на ГСО («Электро-Л»), так и на ВЭО («Спектр-Р», «Арктика-М») и оснащена двигательной установкой с большим запасом топлива, обеспечивающим проведение требуемых маневров в течение длительного срока функционирования КА-ДН.

Следует отметить, что стратегия приведения КА-ДК к заданной точке «стояния» должна учитывать ограничения на условия освещенности наблюдаемого КО.

Наведение целевой аппаратуры на КО является еще одной важной задачей. Сложность ее решения обусловлена значительными относительными скоростями движения КА-ДН и наблюдаемого КО.

Наведение целевой аппаратуры КА-ДК должно осуществляться в режиме программного отслеживания движения КО.

На рисунках 3 и 4 в качестве примера динамики изменения размеров и ориентации КО в поле зре-

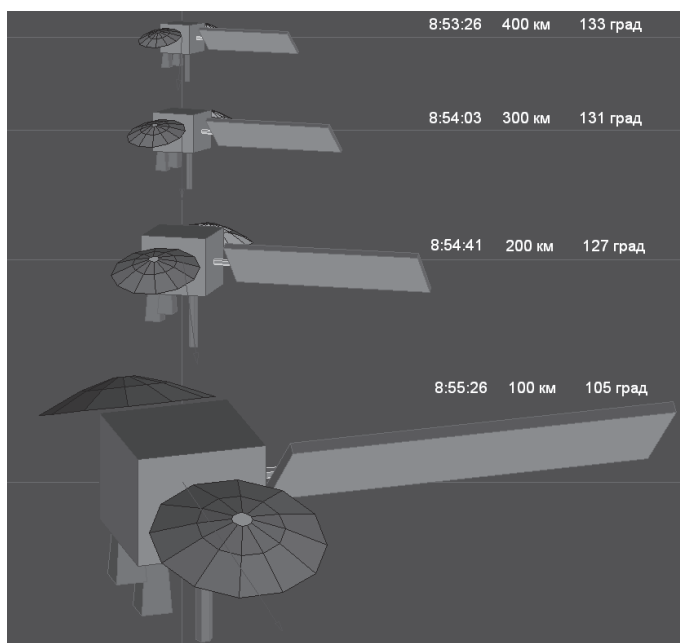


Рисунок 3. Вид геостационарного КА на интервале изменения дальности от 400 до 100 км

ния целевой аппаратуры представлен вид геостационарного КА на интервале изменения дальности наблюдения от 400 до 100 км. Цифры на рисунке соответствуют времени (час: мин: сек), дальности наблюдения (км), углу Солнце — КА — КО (градус).

Результаты моделирования относительного движения КА-ДН и КО на РУ представлены на рисунке 5 в виде графика изменения дальности наблюдения КО. По оси абсцисс отложено время в часах, по оси ординат — дальность наблюдения в км.

На рисунке 6 представлен график изменения угловой скорости наведения визирной оси ЦА на КО для рассматриваемого участка полета. По осям абсцисс и ординат отложены соответственно значения составляющих угловой скорости наведения вокруг осей Z и Y связанной системы координат КА в угловых минутах в секунду.

Анализ рисунка 6 показывает, что максимальное значение угловой скорости (в момент минимальной дальности до КО) составляет примерно 2 град./с.

Следовательно, для наведения ЦА на КО необходимо обеспечивать программную угловую скорость отслеживания до 2 град./с. Предварительные оценки показывают возможность реализации такой скорости отслеживания КО визирной осью целевой аппаратуры при требуемой точности стабилизации КА.

С учетом специфики каждой из рассматриваемых задач мониторинга ГСО для их решения целесообразно использовать разные типы ЦА и космических платформ. Использование единой космической платформы для КА-ДН и КА-ОК нецелесообразно из-за различных требований по запасам

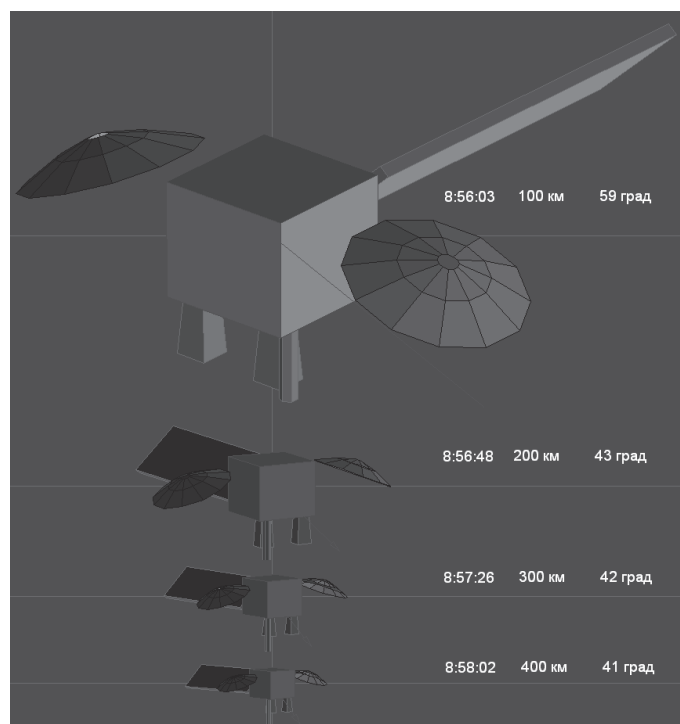


Рисунок 4. Вид геостационарного КА на интервале изменения дальности от 100 до 400 км

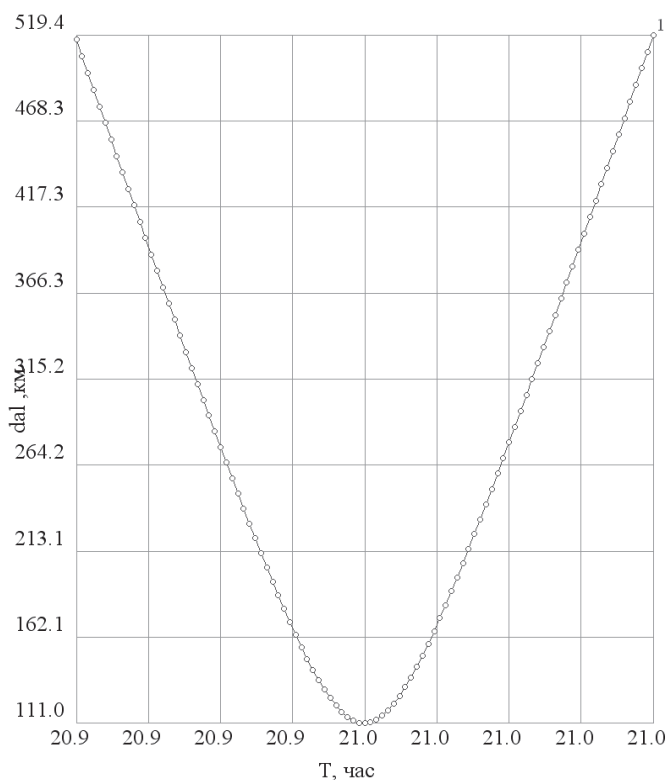


Рисунок 5. Изменения дальности наблюдения КО

характеристической скорости для совершения маневров, большой разницы в массе ЦА для детального наблюдения и обзорного контроля, требований энергопотребления и обеспечения теплового режима.

Для выполнения целевых задач с учетом проведения необходимых маневров для коррекции параметров орбиты, а также минимизации затрат на создание и развертывание системы предлагается рассматривать два типа унифицированных платформ [1].

КА детального наблюдения КА-ДН целесообразно строить на базе бортового модуля служебных систем (БМСС) «Навигатор», оснащенного двигательной установкой с большим запасом характеристической скорости для коррекции параметров орбиты.

Для КА, выполняющих задачи обзорного контроля КА-ОК, с учетом относительно небольшого веса их ЦА целесообразно создавать малоразмерный космический аппарат (МКА) на базе БМСС «Карат 200».

Эти КА строятся по модульному принципу (рисунки 7 и 8) с максимальным использованием существующего задела НПО имени С. А. Лавочкина.

Применение технологий создания малоразмерных КА для предлагаемой ОС позволяет вывести на рабочие орбиты два КА-КО одним запуском РН, что существенно снижает стоимость ее построения.

Следует отметить, что с учетом требуемой высокой скорости наведения ЦА при отслеживании направления на наблюдаемый КО выполнение соответствующих требований средствами БМСС «Навигатор» может оказаться затруднительным, поэтому в каче-

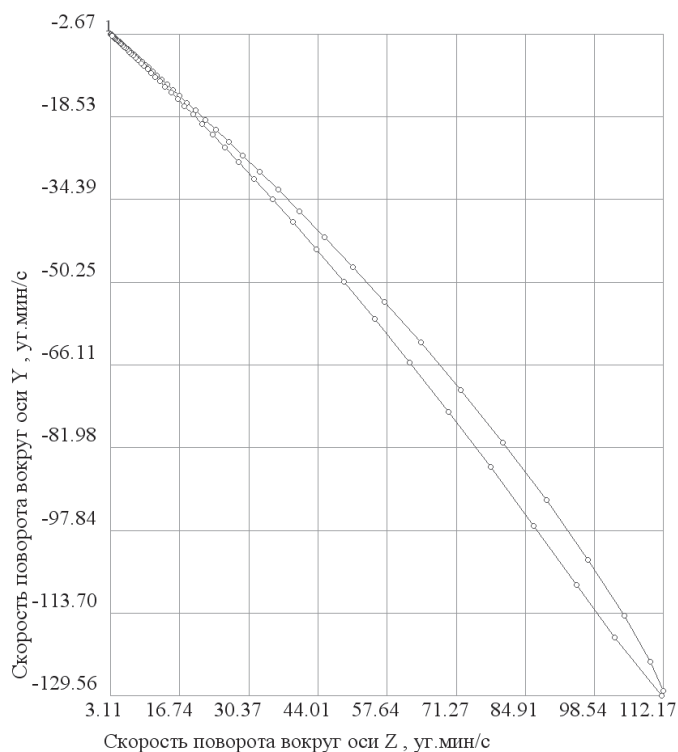


Рисунок 6. Изменение угловой скорости наведения визирной оси ЦА на КО

стве альтернативы может быть рассмотрена разрабатываемая в настоящее время перспективная космическая платформа. Кроме требуемой динамики и точностных характеристик эта платформа имеет двигательную установку с большим запасом топлива, обеспечивающую проведение требуемых маневров в течение длительного срока функционирования КА.

В качестве целевой аппаратуры для рассматриваемых КА предлагается использовать оптико-электронные комплексы (ОЭК).

Основными показателями качества ОЭК являются: предельная звездная величина наблюдаемых КО, размеры поля зрения, определяющие производительность и информативность системы, геометрическое качество изображения для проведения измерений.

Важным показателем при выборе ОЭК является отношение квадрата диаметра к фокусному расстоянию. Диаметр ОЭК определяет светособирающую площадь, а фокусное расстояние определяет линейную скорость бега изображения. Технически это означает, что чем больше диаметр и лучше светосила ОЭК, тем большую звездную величину можно зарегистрировать, и, следовательно, тем меньший по размерам КО может быть обнаружен.

Пределами роста диаметра и светосилы являются абберрации, ухудшающие качество изображения, а также масштаб изображения на один пиксель. Слишком высокая светосила приводит к росту фонового сигнала от слабых звезд Млечного пути и свечения магнитосферы Земли. Ряд ограничений также

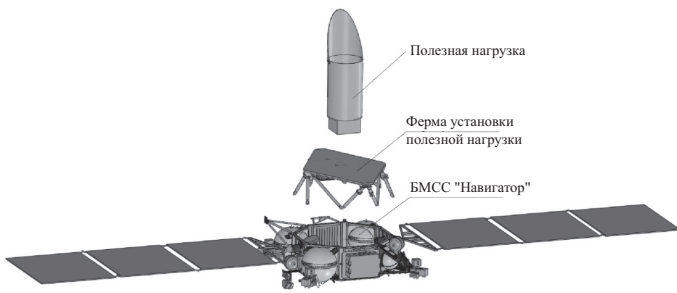


Рисунок 7. КА на базе БМСС «Навигатор»

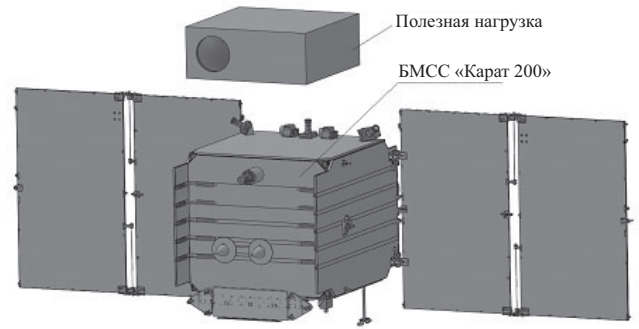


Рисунок 8. КА на базе БМСС «Карат 200»

накладывают и конструктивные особенности различных типов ОЭК.

При выборе оптической системы учитываются не только основные оптические параметры, но и ряд дополнительных специфических показателей, к которым относятся:

- длина оптической схемы, определяющая габариты ОЭК;
- количество зеркальных поверхностей, в том числе асферических, характеризующих технологичность изготовления;
- количество оптических элементов, требующих контроля их положения в условиях эксплуатации и определяющих необходимость комплекса служебных систем и исполнительных механизмов для обеспечения автоматической юстировки и фокусировки ОЭК;
- устойчивость оптических элементов к изменению температуры и к температурным перепадам на элементах конструкции ОЭК;
- защита фокальной плоскости от «паразитных» засветок для ОЭК, построенных по двухзеркальным схемам.

Анализ зарубежных ОЭК, используемых в КА наблюдения за космическим пространством, показал, что для обнаружения КО (например, космического мусора) наиболее часто применяется трехзеркальный анастигмат (триплет) Кука (с четвертым плоским зеркалом, укорачивающим оптическую систему) с фокусным расстоянием около 1 метра.

Для детального наблюдения за КО в зарубежных КА, как правило, используются трехзеркальные анастигматы Корша на основе современных конструкционных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хартон В.В. Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. — 2011. — № 3. — С. 3—10.
2. Назаров А.Е. Динамическая устойчивость спутниковых систем непрерывного обслуживания на высокоэллиптических геосинхронных орбитах // Полет. — 2007. — № 7. — С. 39—49.

Сравнительный анализ различных ОЭК с учетом как отечественного, так и зарубежного опыта показал, что для решения задачи обнаружения КО на ГСО наиболее рационально использовать светосильный трехзеркальный анастигмат Кука.

Для решения задачи детального наблюдения целесообразно создание и применение трехзеркального анастигмата Корша.

Массовое применение геостационарных КА требует обеспечения наблюдения ГСО как наземными, так и космическими средствами. Для предлагаемой высокоэллиптической космической системы мониторинга ГСО определены орбитальная структура и состав орбитальной группировки КА для решения задач обзора и детального наблюдения. Использование предложенных высокоэллиптических орбит нашло широкое практическое применение при создании КА в НПО имени С.А. Лавочкина.

Создание КА для мониторинга ГСО предлагается на базе уже созданных в НПО имени С.А. Лавочкина и получивших летную квалификацию космических платформ «Навигатор» и «Карат».

В качестве аппаратуры обзорного контроля может быть использован ОЭК на базе внеосевого триплета Кука. Для детального наблюдения может быть создан ОЭК на базе трехзеркального анастигмата Корша разработки НПО имени С.А. Лавочкина совместно с ЛЗОС и ЛОМО.

За рамки статьи вышло решение проблемы обеспечения программной угловой скорости отслеживания КО до 2 град./сек. для наведения визирной оси целевой аппаратуры. Возможные варианты решения этой задачи прорабатываются в НПО имени С.А. Лавочкина в рамках проектов КА для научных и межпланетных исследований.

3. Назаров А.Е. Орбитальное построение и управление инновационной космической системы «Арктика-М» (к 50-летию космической деятельности НПО имени С.А. Лавочкина) // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. — 2015. — № 3. — С. 124—131.
4. Covault G. Secret inspection satellites boost space intelligence ops // Spaceflight Now. — 2009. — Jan. 14. — P. 1—2.
5. Deaver T.L. COMM OPS: Leveraging COMSATS to support Space Situational Awareness // Milsat Magazine, Sept. 2009. — [Электронный ресурс]. — Системные требования: Adobe Acrobat Reader. Дата обновления: 10.04.2015. — URL: <http://satmilmagazine.com/index.php?number=1432519454>. (Дата обращения 03.06.2015).
6. Graham W. ULA Atlas V finally launches with NROL-36 // NASA, Sept. 2013. — [Электронный ресурс]. — Системные требования: Adobe Acrobat Reader. Дата обновления: 10.04.2015. — URL: <http://www.nasaspaceflight.com/2012/09/uatas-v-launch-nrol-36-vanderberg>. (Дата обращения: 03.06.2015).
7. Lozada V. C. Space-Based Telescope for the Actionable Refinement of Ephemeris Systems and Test Engineering // Thesis, NPS, Dec. 2011. — [Электронный ресурс]. — Системные требования: Adobe Acrobat Reader. Дата обновления: 10.04.2015. — URL: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA556592>. (Дата обращения: 08.06.2015).
8. Stokes G.H., Braun C., Sridharan R., Harrison D. The Space-based Visible Program // MTI Lincoln Laboratory Journal. — 1998. — V. 11 — № 2. — P. 205—238.

## **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Клименко Николай Николаевич**, к.т.н., ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», e-mail: [klimenko@laspace.ru](mailto:klimenko@laspace.ru).

**Назаров Анатолий Егорович**, д.т.н., ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», e-mail: [naz-a-e@yandex.ru](mailto:naz-a-e@yandex.ru).

---

For citation: Radiopromyshlennost. — 2016. — № 1. — P. 102—108.

УДК 629.783

**N. N. Klimenko, A. E. Nazarov**

## **HIGHLY ELLIPTIC SPACE SYSTEM FOR MONITORING OF GEOSTATIONARY ORBIT**

*Considered proposals to build orbital constellation of highly elliptic space system, designed for surveillance of geostationary space objects, as well as possible approaches to development of satellites for inclusion to such orbital constellation. The actuality of development of such a system is due to the necessity to control space objects representing potential danger for domestic geostationary satellites.*

**Keywords:** *surveillance, highly elliptic orbit, geostationary orbit, orbital constellation, space bus, opto-electronic complex.*

## **AUTHORS**

**Klimenko Nikolay**, Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, e-mail: [klimenko@laspace.ru](mailto:klimenko@laspace.ru).

**Nazarov Anatoly**, Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, e-mail: [naz-a-e@yandex.ru](mailto:naz-a-e@yandex.ru).