

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 89.35.55; 621.396.2.49.43.31

**Особенности построения бортовой аппаратуры
командно-измерительной системы
и радиолинии сброса информации
для космических аппаратов системы обнаружения
опасных для Земли небесных тел**

В. Г. Алыбин¹, Н. Н. Булгаков², А. Н. Ершов³, В. В. Березкин⁴, Ю. П. Кулешов⁵

¹д. т. н., ⁴к. т. н.,

^{1,2,3,4}ОАО «Российские космические системы»

⁵ОАО «Корпорация «Комета», г. Москва

e-mail: 1741otd@rniikp.ru

Аннотация. Обсуждается построение комплекса обнаружения опасных для Земли небесных тел и особенности построения бортовой аппаратуры командно-измерительной системы и бортовой аппаратуры радиолинии сброса космических аппаратов комплекса.

Ключевые слова: метеорит, телескоп, космический аппарат, линия сброса, бортовая аппаратура командно-измерительной системы, орбита Земли

**Peculiarity of On-Board Equipment
of Command-Measuring System and Radio Link
for Information Transmission
for Spacecrafts Intended for Detection
of Heavenly Bodies Hazardous to Earth**

V. G. Alybin¹, N. N. Bylgakov², A. N. Ershov³, V. V. Berezkin⁴, Yu. P. Kuleshov⁵

¹doctor of engineering science, ⁴candidate of engineering science,

^{1,2,3,4}Joint Stock Company "Russian Space Systems"

⁵JSC "Corporation "Cometa", Moscow

e-mail: 1741otd@rniikp.ru

Abstract. The construction of a complex for detection of heavenly body dangerous to Earth and features of design of the onboard equipment of command-measuring system and onboard equipment of return link are discussed.

Key words: meteorite, telescope, spacecraft, return link, onboard equipment command-measuring system, orbit of Earth

Введение

Метеориты и другие небесные тела, периодически сталкивающиеся с Землей, представляют большую опасность. Еще со времен падения тунгусского метеорита возникла проблема обнаружения опасных для Земли тел и были предприняты попытки обзора небосвода радиотелескопами с Земли, а после падения челябинского метеорита в 2013 г. начался серьезный поиск наиболее эффективного решения этого вопроса [1].

Основная цель обнаружения опасных небесных тел (ОНТ) заключается в возможности оповещения населения и организации эвакуации его до момента столкновения метеорита с Землей, а также в возможности отклонения их орбит либо уничтожения. Особенно важно обнаруживать не менее 90% ОНТ размером 50 и более метров минимум за 20–30 дней до катастрофы. Учитывая, что максимальная скорость ОНТ — 42 км/с и учитывая, что они могут направляться навстречу движению Земли, которая тоже перемещается со скоростью 30 км/с, следует различать ОНТ уже на расстоянии от Земли порядка 120–150 млн км.

Возможны наблюдения ОНТ в оптическом диапазоне с помощью радиотелескопов по переизлучениям ОНТ от Солнца. Осмотр всего небосвода с наземных обсерваторий невозможен полностью, т. к. зона дневного неба, недоступная для обзора, составляет конус с вершиной на поверхности Земли и углом от Солнца порядка 40–50° [2]. Кроме того, глубина осмотра из-за влияния атмосферы Земли недостаточна для распознавания ОНТ хотя бы размером 50–100 м и более. Наконец, требуется весьма большое количество обсерваторий, равномерно размещенных на поверхности Земли, для выполнения обзора небосвода.

Размещение мощных телескопов в околоземном космическом пространстве открывает возможности для обнаружения ОНТ размером от 50 м за 20–30 дней до момента их столкновения с Землей. Данная работа посвящена особенностям организации связи с орбитальной системой, предложенной в [2, 3], предназначенной для обнаружения ОНТ космическими средствами. Кроме того, объектом рассмотрения является и способ обзора участка дневного неба, который невозможно исследовать ни с Земли, ни с околоземного пространства.

Группировка космических аппаратов для обзора небосвода с целью обнаружения ОНТ

Основу космической системы обнаружения ОНТ составляет группировка из двух или более космических аппаратов (КА) и системы наземных станций (ЗС), обеспечивающих сбор и обработку получаемой КА информации, а также управление движением КА и парирование на них нештатных ситуаций.

На каждом из КА размещены по два телескопа, производящих наблюдение небосвода в оптическом диапазоне с целью обнаружения ОНТ путем регистрации отраженного от них солнечного света матричными фотоприемниками.

Информация о светящихся телах в космическом пространстве формируется в бортовых, буферном и специальном вычислителях и передается по радиолинии сброса КА–пункт приема и обработки информации (ППОИ). Служебная информация с каждого КА о состоянии систем КА передается на наземную станцию командно-измерительной системы (НС КИС). По результатам полученной информации производится обработка и выдача команд на управление КА.

На рис. 1 показаны зоны обзора небосвода ближними КА на геосинхронных орбитах и дальними КА на околосолнечной орбите.

Осмотр небосвода осуществляется методом сканирования его участков, и с этой целью КА с жестко закрепленными на их платформах телескопами поворачиваются своей продольной осью относительно Земли. Один или два КА, условно называемые «ближними» КА, располагаются на геосинхронных орбитах, близких к геостационарной. Каждый из КА может сканировать космическое пространство в интервале долгот $\pm 160^\circ$. Оба ближних КА могут осматривать все космическое пространство за исключением зоны дневного неба, т. е. в направлении КА на Солнце. Эта зона космического пространства представляет собой конус с вершиной на КА и углом от Солнца порядка 20° [1].

Для осмотра участка дневного неба предложено расположить КА, условно названный «дальним» КА, на орбите Земли сзади нее относительно направле-

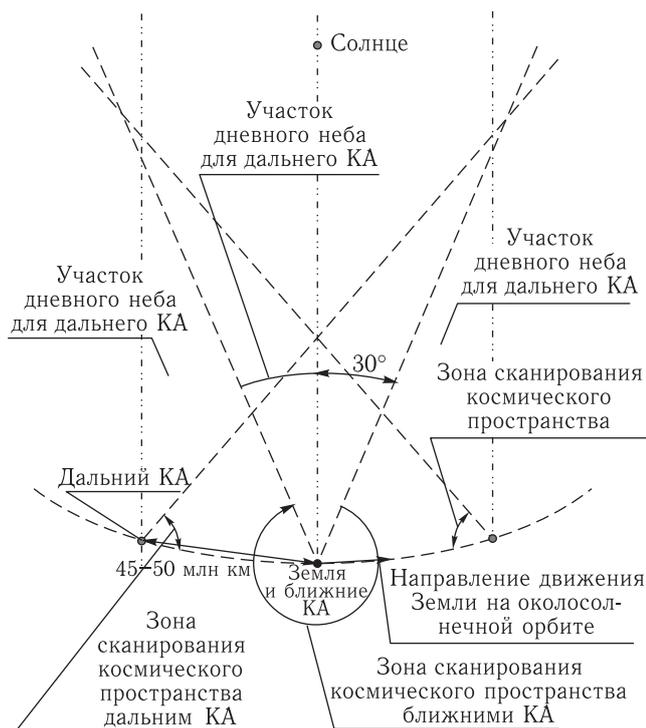


Рис. 1. Зоны обзора небосвода ближними и дальним КА

ния ее движения по околосолнечной орбите, на расстоянии 45–50 млн км от Земли.

Расположение ближних и дальних КА по отношению к ППОИ и НС КИС и их ориентация во времени сканирования небосвода определяют особенности построения радиолиний и бортовой аппаратуры КИС (БА КИС). В табл. 1 приведены основные характеристики ближних и дальнего КА.

Как следует из табл. 1, для КА характерным является поворот оси КА по отношению ЗС. Для того, чтобы не пропадала в штатном режиме связь КА с ЗС и НС КИС, располагаемых одна вблизи другой или совмещенных, на КА предусмотрена система наведения бортовых антенн на ЗС. Система наведения бортовых антенн линии сброса информации содержит опорно-поворотное устройство и блок управления, на который из бортового комплекса управления (БКУ) поступают команды для обеспечения требуемого положения бортовых антенн [1].

Срок активного существования ближних КА ограничен возможностями бортовой аппаратуры и в первую очередь качеством ЭКБ и принимается 15 лет. Для дальних КА серьезным ограничением

Таблица 1. Основные характеристики КА «Небосвод»

Название характеристик	Ближний КА	Дальний КА
Дальность радиосвязи	не менее 42 000 км	не менее 50 млн км
Диапазон углов оси КА при сканировании небосвода	$\pm 160^\circ$	50°
Доля объема небосвода, которая может быть осмотрена одним КА	0,866	0,66
Время сеансов связи	круглосуточно	(8–14) ч
Минимальный угол места НС КИС	12°	7°
Рабочий диапазон частот: для линии сброса для КИС	Ku X	Ku X
САС	15 лет	10 лет

является возможность запаса топлива для корректирующих двигателей, поэтому расчетный САС дальних КА не превышает 10 лет.

Рабочие диапазоны частот для линии сброса информации и для линий связи НС КИС с БА КИС выбраны исходя из возможностей и рекомендаций реестра радиосвязи и из наличия соответствующей аппаратуры.

Аппаратура КА, включая все системы, кроме бортовой аппаратуры линии сброса информации и БА КИС, описана в [1]. Ее рассмотрению посвящены следующие разделы.

Радиолиния сброса информации

С ближних и дальних КА необходимо сбрасывать информацию о состоянии небосвода со скоростями соответственно 600 Мбит/с и 100 Мбит/с. При этом предполагается, что ЗС ППОИ имеет антенны для работы с ближними КА с диаметром 12 м, а с дальними КА — 32 м. Целесообразно использование и антенн 64 и 70 м для уменьшения мощности бортовых передатчиков, однако число таких антенн ограничено, а строительство новых антенн с такими же диаметрами или антенн другого типа, эквивалентным им по коэффициенту усиления, нерентабельно.

Структуры сигналов в радиолиниях связи с ближними КА — фазовая манипуляция 8PSK

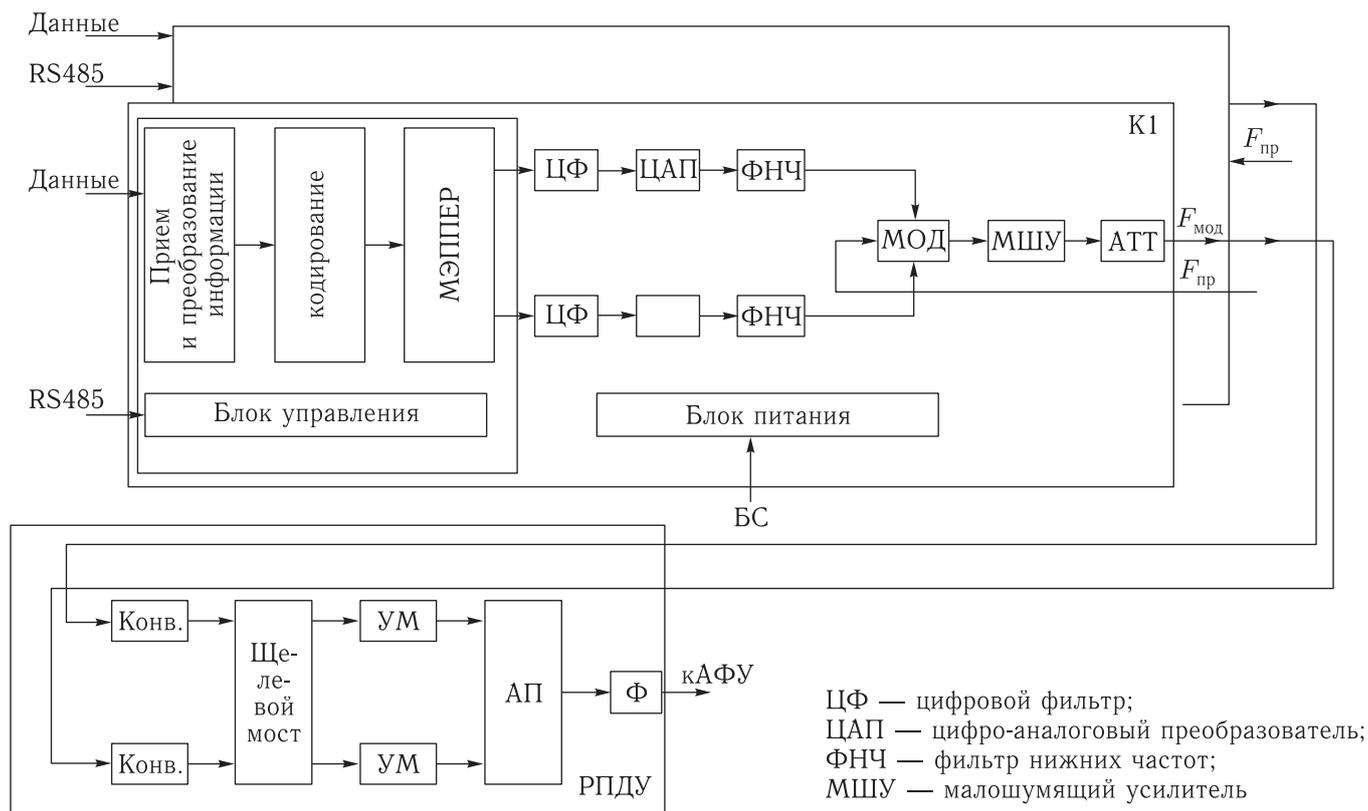


Рис. 2. Структурная схема передатчика

с турбопродукт-кодом (ТРС) и кодовой скоростью $R = 0,8$. Для дальних КА — фазовая манипуляция QPSK с кодом ТРС и $R = 0,5$. Для ближних КА реализуется вероятность побитовых ошибок не более 10^{-6} , для дальнего КА вероятность побитовых ошибок — не более 10^{-7} .

Энергетические расчеты, проведенные для радиолиний связи ближних и дальних КА с ППОИ, показали, что требуемые мощности бортовых передатчиков при работе с упомянутыми выше антеннами в Ки-диапазоне составляет: для ближних КА — 20 Вт; для дальних КА — 250 Вт. В передатчике линии сброса информации ближнего КА предлагается использовать транзисторный усилитель мощности (УМ), для дальнего КА — УМ на мощной ЛБВ. Бортовые антенны ближних и дальних КА должны быть остронаправленными, при этом на ближнем КА устанавливается антенна диаметром 1 м, а на дальнем КА — диаметром 5 м.

Структурная схема бортовых передатчиков одинакова для ближних и дальних КА и представлена

Таблица 2. Основные параметры линии сброса информации для ближнего и дальнего КА

Наименование характеристик	Ближний КА	Дальний КА
Символьная скорость в канале	266,6 МГц	100 МГц
Информационная скорость в канале	640 Мбит/с	100 Мбит/с
Энергопотребление	215 Вт	1000 Вт
Выходная мощность	20 Вт	250 Вт
Габариты:		
ФИП	190 × 16 × × 53 мм	190 × 160 × × 53 мм
БАВ	225 × 179 × × 165 мм	225 × 179 × × 165 мм
РПДУ	1120 × 476 × × 65 мм	1000 × 224 × × 75 мм
Масса (без АФУ)*	~ 27,4 кг	~ 26 кг

Примечание: * — данные для передатчика дальнего КА даны без учета параметров системы охлаждения ЛБВ.

на рис. 2. Высокоскоростной модулятор содержит интерфейс управления RS485, турбокодер, цифровые фильтры с Найквистовой передаточной функцией, блок управления и блок питания. На входе модулятора используется центральная промежуточная частота 2 ГГц, которая с помощью переносчика частоты преобразуется в центральную частоту Ки-диапазона.

Для повышения надежности предлагается использовать дублирование модуляторов (МОД) с конвертерами (КОНВ) и УМ. С этой целью на входе УМ располагается щелевой мост, а выходы УМ подключены к антенному переключателю (АП). Для обеспечения чистоты спектра передатчиков применен соответствующий фильтр (Ф). Конструктивно бортовой передатчик предлагается выполнить в виде трех блоков: формирователя информационных потоков (ФИП), блока автоматики (не показан) и передатчика (РПДУ).

Основные параметры бортовых передатчиков ближнего и дальнего КА приведены в табл. 2.

Бортовая аппаратура командно-измерительной системы (БА КИС)

Для управления движением ближних и дальних КА предназначена БА КИС, которая должна обеспечить выполнение следующих задач:

- прием с НС КИС радиоконанд (РК) и особых РК, командно-программной информации (КПИ), формирование и выдачу квитанций об их приеме на НС КИС;
- прием от бортовой аппаратуры телеметрической системы (БАТС) телеметрической информации (ТМИ) и передачу ее на НС КИС;
- прием и передачу сигналов для измерения текущих навигационных параметров — наклонной дальности и радиальной скорости КА;
- прием и передачу сигналов управления режимами работы БА КИС от БКУ, обмен информацией РК, КПИ с БКУ.

Отличительной особенностью БА КИС является ее автономность от систем КА в наиболее возможной степени.

БА КИС содержит приемно-передающее устройство (ППУ), бортовой миникомпьютер в виде дешифратора командно-программной и телеметрической информации (ДКТИ), отдельные усилители мощности (УМ) и приемную и передающую АФС. Наличие ДКТИ позволяет обеспечить надежность БА КИС выше, чем надежность КА, что необходимо для его существования и поддержания на нужной орбите в течение САС, а также препровождение на орбиту захоронения при необходимости. С другой стороны, связанное с наличием ДКТИ и отдельных УМ некоторое увеличение массы БА КИС (примерно на 6 кг) несущественно для весьма большого КА с радиотелескопами, масса которого, по предварительным оценкам, составляет 2,2–2,3 т.

Выбор структур сигналов в соответствии с рекомендациями CCSDS обеспечивает наиболее высокий энергетический потенциал в радиолиниях «НС КИС–БА КИС» и «БА КИС–НС КИС». Отношение сигнала к шуму для вероятности ошибок не более 10^{-5} составляет порядок 10 дБ. Для дальних КА энергетика радиолиний становится решающим фактором.

Наиболее приемлемым для БА КИС является X-диапазон частот, рекомендованный для дальнего космоса, т.е. для связи с дальними КА. Для унификации БА КИС целесообразно и для ближних КА использовать тот же диапазон частот. При этом БА КИС для ближних и дальних КА будут отличаться только мощностью УМ.

В отличие от антенны КА для линии сброса, предназначенной для работы в ориентированном режиме, бортовые приемные и передающие антенны БА КИС должны обеспечить связь как в ориентированном, так и в неориентированном режимах нахождения КА на орбите. Под неориентированным режимом понимается вращение КА со скоростью 3–7 °/с, а также его неопределенное положение («закрутка») в случае нештатных ситуаций во время нахождения его на орбите.

С этой целью в запросном (приемном) канале и в ответном (передающем) канале БА КИС используются по две малонаправленные антенны, расположенные диаметрально противоположно на боковых сторонах КА, и еще по одной остро-направленной антенне, размещенных на том же

поворотном устройстве, что и антенна линии сброса информации.

Для радиолиний связи НС КИС и БА КИС используются структуры сигналов типа UQPSK с корректирующими кодами в соответствии с рекомендациями CCSDS, позволяющие работать с отношением сигнал/шум в приемных устройствах не хуже чем 10 дБ.

В результате проведенных энергетических расчетов радиолиний «НС КИС–БА КИС» и «БА КИС–НС КИС» с антеннами НС КИС (для связи с ближними КА — 9 м, для связи с дальними КА — 32 м), получены значения необходимой мощности передатчиков БА КИС: для ближнего КА — 10 Вт, для дальнего КА — 40 Вт.

Структурная схема БА КИС для дальнего КА показана на рис. 3. Для повышения надежности она выполнена с троированием ее приборов:

- три ППУ, каждое из которых содержит сверхвысокочастотный приемник (СВЧ ПРМ), цифровой приемник и блок цифровой обработки сигналов с модулятором ответного канала (ЦОС), сверхвысокочастотный формирователь ответного канала (СВЧ ФОС), синтезатор частот (СЧ) и вторичные источники электропитания (ИВЭП);

- ДКТИ, содержащий три комплекта дешифратора командно-программной информации, объединенных с блоком обработки телеметрии, два программно-временных устройства (ПВУ), коммутационно-распределительное устройство (КРУ), интерфейсы связи с БКУ, а также ИВЭП;

- делитель мощности «3×3» в запросном и ответном каналах (Д 3×3) и кабельная сеть.

Приемная антенно-фидерная система (АФС) содержит две малонаправленные антенны (МЛА) и одну остронаправленную антенну (ОНА), подключенные через фильтры (Ф) к блоку малошумящих усилителей (БМШУ), содержащему шесть МШУ и три переключателя «1×2» (П).

Передающая АФС содержит две МЛА и одну ОНА, подключенные к УМ через два АП «1×3» и фильтр.

Особенностью БА КИС, предлагаемой для дальних КА, является наличие БМШУ, позволяющего повысить чувствительность запросного канала, что существенно для возможности работать дальнему КА с НС КИС, имеющей диаметр антенны 32 м.

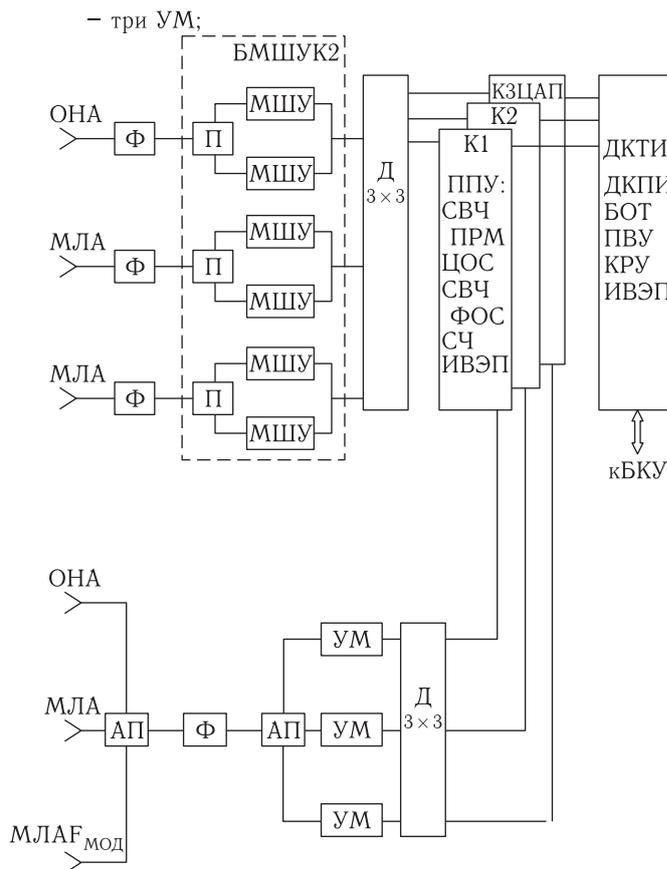


Рис. 3. Структурная схема БА КИС для дальнего КА

Структурная схема БА КИС для ближнего КА отличается тем, что из нее можно исключить БМШУ, поскольку КА расположен на значительно меньшем удалении от Земли.

В табл. 3 приведены основные технические характеристики БА КИС для ближнего и дальнего КА.

Как видно из табл. 3, БА КИС для ближнего КА имеет меньшую выходную мощность УМ, что позволяет (учитывая дополнительно отсутствие БМШУ) снизить ее массу без АФС до 20 кг.

Заключение

Рассмотрены особенности бортовой аппаратуры линии сброса информации и командно-измерительной линии для ближних и дальних КА космической системы обнаружения опасных небесных тел размером от 50 м за 20–30 сут от их возможного столкновения с Землей. Показано, что при наличии дальних КА, расположенных на орбите

Таблица 3. Основные технические характеристики БА КИС для ближнего и дальнего КА

Параметр	Единицы измерения	Ближний КА	Дальний КА
Максимальная дальность связи между НС КИС и КА	тыс. км	42	50 000
Структура сигналов в радиопереносах: «Земля–Космос» «Космос–Земля»		Фазокодоманипулированный псевдослучайный небалансный сигнал (QPSK) вида $(\text{ЦИ}_1)PN_1 \cdot 0^{180} + (\text{ЦИ}_q)PN_q \cdot 0^{270}$ Кодирование: R-S	
Режимы работы: – прием РК ориентированный (ОР) – прием КПИ неориентированный (НР) – передача ТМИ – передача КВ – измерение дальности – измерение угловой скорости		некогерентный некогерентный некогерентный некогерентный когерентный, коэффициент когерентного преобразования 749/880	
Техническая скорость передачи информации:			
Запросный канал			
КПИ	НР	0,1; 1	0,1; 1
РК	ОР	1; 4; 8	1; 4; 8
Ответный канал			
КВ	НР	0,1; 1; 2	0,1; 2
ТМИ	ОР	0,1; 1; 4; 8; 32	4; 8
Точность траекторных измерений*:			
– по дальности	м	10	50
– по скорости	м/с	0,01	0,05
Вероятность ошибки на бит		10^{-5}	10^{-4}
Выходная мощность УМ	Вт	не менее 10	не менее 40
Энергопотребление	Вт	80	220
Масса БА КИС (без АФУ)	кг	20	35

*включая погрешности НС КИС и в радиопереносах.

Земли и на расстоянии от нее до 50 млн км, для того, чтобы можно было различать ОНТ в зоне «дневного неба», недоступной для оптических аппаратов, расположенных на Земле или в околоземном пространстве, возможно осуществить как управление движением ближних и дальних КА и парирование нештатных ситуаций, так и получение от них целевой информации с требуемой информационной скоростью и малой вероятностью ошибок.

Список литературы

1. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. Под ред. Б. М. Шустова и Л. В. Рыхловой. М.: ФИЗМАЛИТ, 2010. 384 с.
2. Кулешов Ю. П., Егоров В. Л., Мисник В. П., Яковенко Ю. П., Рыхлова Л. В. и др. Принципы и основные технические решения создания астрономического комплекса обнаружения и определения параметров движения опасных для Земли астероидов и комет (комплекс «Небосвод») // Экологический вестник научных центров ЧЭС. ISS № 1729–5459, 2013, № 4. С. 1–9.
3. Булгаков Н. Н., Алыбин В. Г., Кривошеин А. А. Особенности построения бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата для управления им как в зоне его радиовидимости с наземной станцией, так и вне ее. 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). Севастополь.