

ПРОБЛЕМЫ ПРЕЦИЗИОННОСТИ КРИОГЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА ОБСЕРВАТОРИИ “МИЛЛИМЕТРОН”**С.Н. Саяпин¹, Ю.Н. Артеменко², Н.В. Мышонкова²**¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: S.Sayapin@rambler.ru²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация
e-mail: altishenko@yahoo.com; nelly@asc.rssi.ru

Приведено общее описание обсерватории “Миллиметрон”, предназначенной для эксплуатации в условиях глубокого вакуума и сверхнизких температур на сверхдальней рабочей орбите в районе либрационной точки Лагранжа L2 в системе Солнце–Земля, удаленной от Земли на расстояние 1,5 млн км. Показано, что вследствие своей протяженности и низкой частоты собственных колебаний телескоп является гравитационно- и инерциально-чувствительной системой к воздействию внешних и внутренних микродинамических возмущений. Рассмотрены проблемы обеспечения прецизионности телескопа при эксплуатации в условиях указанных возмущений, глубокого вакуума и сверхнизких температур. Определено, что точность ориентации и стабилизации модуля служебных систем на порядок ниже требуемой, а упругие колебания низкочастотных крупногабаритных элементов конструкции телескопа, возникающие от воздействия внешних и внутренних микродинамических возмущений, способны привести к нарушению требуемой прецизионности. Отмечено, что удаление орбиты обсерватории на огромные расстояния от Земли не позволяет управлять системами обсерватории и планом эксперимента в режиме реального времени. Проведен анализ известных методов и средств, применяемых для решения подобных проблем. Представлена оригинальная концепция интеллектуальной системы активной виброзащиты и высокоточного наведения телескопа обсерватории “Миллиметрон”, направленная на решение указанных проблем.

Ключевые слова: криогенный космический телескоп, космическая обсерватория “Миллиметрон”, интеллектуальные активные структуры, механизмы параллельной кинематики.

PROBLEMS OF PRECISION OF CRYOGENIC SPACE TELESCOPE OF THE MILLIMETRON OBSERVATORY**S.N. Sayapin¹, Yu.N. Artemenko², N.V. Myshonkova²**¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: S.Sayapin@rambler.ru²Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
e-mail: altishenko@yahoo.com; nelly@asc.rssi.ru

The Millimetron observatory is generally described that is designed for operation under conditions of high vacuum and ultra-low temperatures on the remote working orbit in the vicinity of the Lagrange libration point L2 in the Sun–Earth system at a distance of 1.5 million km from the Earth. It is shown that the telescope due to its extension and low frequency of free oscillations is the gravitational and inertial system sensitive to impact of external and internal microdynamic perturbations. The problems of ensuring the high precision of the telescope exposed in its operation to

the indicated perturbations, high vacuum and ultra-low temperatures are considered. It is determined that an accuracy of orientation and stabilization of the service module is lower by the order of magnitude than the required accuracy, while elastic oscillations of low-frequency large-size members of the telescope structure induced by external and internal microdynamic perturbations can lead to violation of the required accuracy. It is noted that remoteness of the observatory orbit at a great distance from the Earth does not allow the observatory systems and experiment plan to be controlled in real time. The analysis of the known methods and aids applied for solving similar problems is performed. An original concept of intelligence system of active vibroprotection and high-precision pointing of the Millimetron observatory telescope is presented that is aimed at fulfillment of the indicated tasks.

Keywords: cryogenic space telescope, Millimetron space observatory, intelligence active structures, parallel-kinematics mechanisms.

Введение. В настоящее время в России, США и Японии, независимо друг от друга и при широком международном сотрудничестве, ведутся работы по созданию прецизионных криогенных космических телескопов (ККТ) обсерватории “Миллиметрон” (Россия) [1], JWST (James Webb Space Telescope, США) [2] и SPICA (Space Infra-Red Telescope for Cosmology and Astrophysics, Япония) [3], предназначенных для работы в инфракрасном диапазоне в точке Лагранжа L2 (рис. 1, таблица). Повышенный научный интерес к инфракрасному диапазону обусловлен, прежде всего, тем, что атмосфера Земли для него непрозрачна и для проведения наблюдений требуется вывести телескопы за ее пределы в открытый космос. Точка Лагранжа L2 — область, которая является идеальным местом для размещения космических обсерваторий. Фактически космические телескопы будут находиться за орбитой Земли на линии Солнце – Земля (рис. 2). В этой точке телескопу обеспечивается наивысшая гравитационная стабильность и наилучший обзор. Кроме того, здесь будет достигнута наибольшая эффективность работы защитных экранов, так как они закроют телескоп

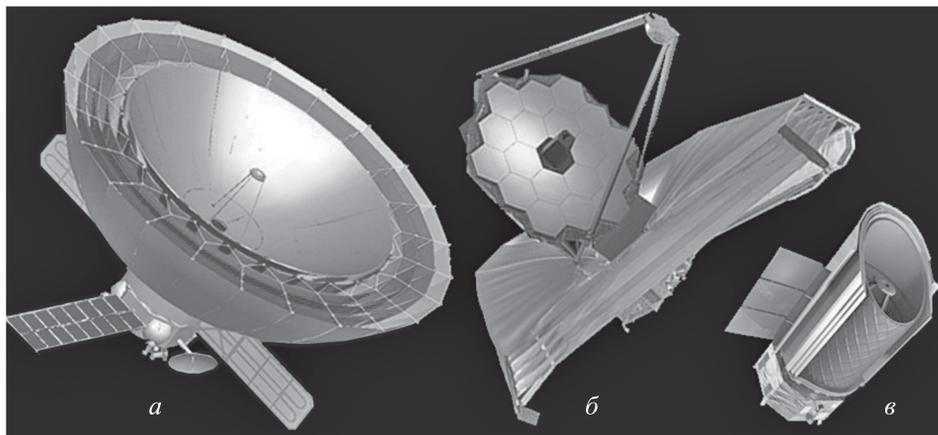


Рис. 1. Разрабатываемые прецизионные крупногабаритные ККТ “Миллиметрон” (Россия, диаметр главного зеркала 10 м) (а), JWST (США, диаметр главного зеркала 6,5 м) (б) и SPICA (Япония, диаметр главного зеркала 3,5 м) (в)

Технические характеристики ККТ

Проекты и участники	Год запуска и длительность миссии	Орбита/масса, т	Диапазон длин волн, мкм	Главное зеркало				Температура рефлектора/приемников телескопа, К
				Диаметр, м	Тип	Материал	Регулируемость	
JWST (США, Европа, Канада)	2018; 5 лет	L2; 6,2	0,6...28,3	6,5	Складное	Бериллий	Адаптивная настройка на орбите	45/75
“Миллиметров” (Россия, Европа)	2019; 10 лет	L2; 6,6	0,02...3,0 мм 0,3...16 мм	10	То же	Высокомодульный углепластик	То же	4,5/0,1
SPICA (Япония, Европа)	2022; 5 лет	L2; 4	5...210	3,5	Цельное	Карбид кремния	—	< 6,0/0,1

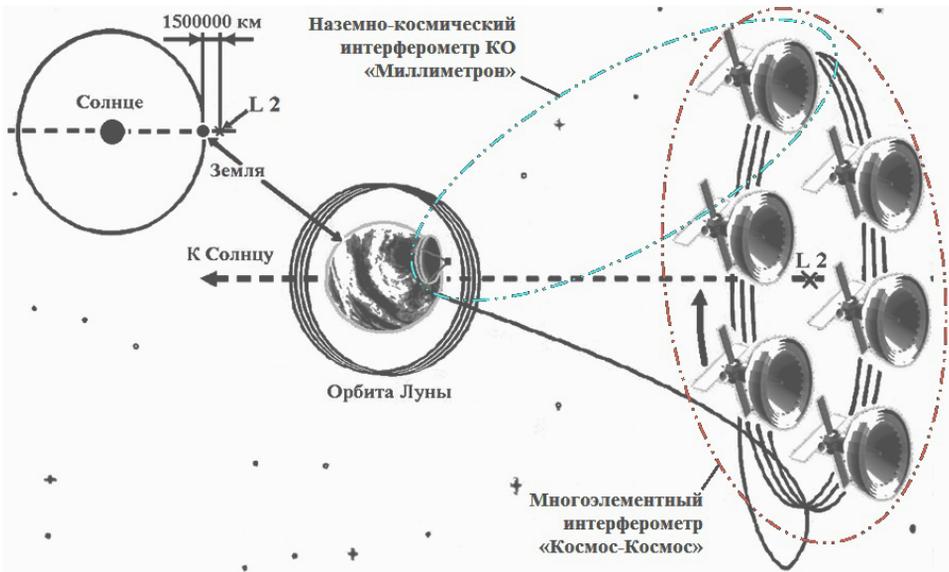


Рис. 2. Орбита КО “Миллиметр” с ККТ

одновременно от Солнца, Земли и Луны, что очень важно для обеспечения постоянных низкотемпературных режимов. Точка Лагранжа L2 также интересна тем, что в ней практически отсутствует вероятность встречи с метеоритами таких размеров, которые могли бы вывести из строя или повредить элементы телескопов.

Работы по созданию ККТ космической обсерватории (КО) “Миллиметр” (проект “Спектр-М”) ведутся в соответствии с Федеральной космической программой РФ (ФКП РФ) учеными и специалистами российских и международных организаций. Головной научной организацией проекта “Спектр-М” является АКЦ ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, а головным предприятием — НПО им. С.А. Лавочкина. Научный руководитель проекта — директор АКЦ ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН академик Н.С. Кардашев [4]. Планируемое время запуска КО “Миллиметр”, предусмотренное ФКП РФ, — 2019 г. Обсерватория предназначена для проведения исследований различных типов объектов Вселенной со сверхвысокой чувствительностью (в режиме одиночного телескопа) и рекордно высоким угловым разрешением (в режиме наземно-космического интерферометра) в миллиметровом и инфракрасном диапазонах длин волн [1]. При этом сверхвысокая чувствительность ККТ достигается за счет активного охлаждения зеркальной системы и приемной аппаратуры до температуры 4,5 К, а детекторов приемников — до температуры 0,1 К. Обсерватория “Миллиметр” предназначена для эксплуатации в условиях глубокого вакуума и сверхнизких температур. Рекордное разрешение ККТ достигается его совместной работой с большими наземными теле-

скопами в режиме интерферометра на сверхдальней рабочей орбите в окрестностях точки Лагранжа L2 в системе Солнце – Земля, удаленной от Земли на расстояние 1,5 млн км (см. рис. 2). При этом удаление от Земли самой КО будет составлять 2 млн км. Следует отметить, что создание радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ) стало возможным благодаря революционному изобретению ученых Н.С. Кардашева, И.Л. Матвеевко и Г.Б. Шоломицкого. В 1965 г. они предложили сигналы, принятые антеннами радиоинтерферометра, преобразовывать с помощью высокостабильных атомных стандартов частоты до низких частот и регистрировать на магнитофонную ленту в виде отдельных импульсов, положение которых задается атомным стандартом частоты [4–6]. В результате на магнитофонных лентах оказываются записанными последовательности импульсов, положение которых соответствует строго определенному времени. Затем с магнитофонных лент в вычислительном центре синхронно считывают сигналы и перемножают их между собой для выделения сигнала от источника. При этом антенны радиоинтерферометра не связаны кабелем, а расстояние между ними может быть сколь угодно большим. В настоящее время осуществляются систематические наблюдения на глобальной сети РСДБ, включающей в себя радиотелескопы России, Германии, Великобритании, Швеции, США, Австралии и других стран [7]. Ограничения, связанные с размерами Земли, стали причиной создания наземно-космических радиоинтерферометров. Летом 1979 г. в СССР был создан первый в мире космический радиотелескоп первого поколения КРТ-10 (диапазоны длин волн 72 и 12 см) с диаметром зеркала 10 м, смонтированный на борту орбитальной космической станции (ОКС) “Салют-6” (рис. 3) [8]. Проведенные с КРТ-10 успешные экспериментальные работы в режимах одиночного космического радиотелескопа и наземно-космического радиоинтерферометра открыли новое направление в науке и технике — создание орбитальных КРТ и наземно-космических РСДБ, а в перспективе — РСДБ космос – космос (см. рис. 2). Благодаря накопленному опыту в России была создана КО второго поколения “Радиоастрон” (диапазоны длин волн 92, 18, 6 и 1,35 см) с диаметром зеркала антенны 10 м, успешный запуск которой состоялся 18 июля 2011 г. (рис. 4) [4, 5, 9]. Вследствие максимального удаления КО “Радиоастрон” от Земли на расстояние более 360 000 км созданный совместно с крупнейшими радиотелескопами мира наземно-космический интерферометр является уникальным радиоастрономическим инструментом, не имеющим себе равных в ближайшем будущем.

Создаваемая в настоящее время КО “Миллиметрон” с ККТ по всем основным параметрам значительно превосходит КО “Радиоастрон” и

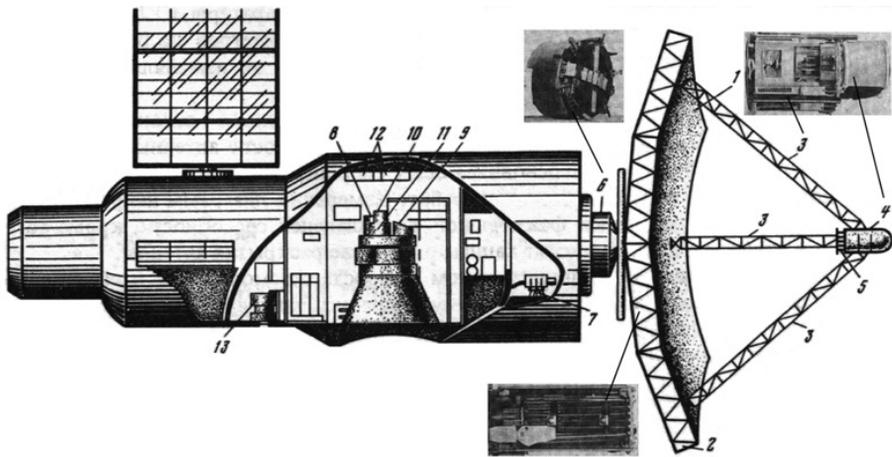


Рис. 3. Долгосрочная орбитальная станция “Салют-6” с КРТ-10 на борту:

1 — отражающее трикотажное металлическое сетеполотно; 2 — каркас зеркала; 3 — опоры с кабелями; 4 — фокальный контейнер; 5 — облучатели; 6 — механизм крепления антенны к станции; 7 — механизм отвода кабелей; 8 — низкочастотные блоки радиометров; 9 — пульт управления КРТ-10; 10 — пульт управления отделением антенны; 11 — блок времени; 12 — аппаратура регистрации; 13 — астроориентатор

относится к КО третьего поколения. В состав КО “Миллиметр” (рис. 5, <http://asc-lebedev.ru>) входит двухзеркальный ККТ с раскрываемым на указанной орбите главным параболическим зеркалом (ГПЗ) диаметром 10 м, состоящим из 24 раскрываемых лепестков рефлектора и стационарного центрального зеркала диаметром 3 м. Телескоп устанавливается на модуле служебных систем (МСС) типа космической платформы “Навигатор” через переходную ферму и центральные силовые конструкции: опорную ферму рефлектора, опору систем охлаждения и неохлаждаемый контейнер. Рабочие диапазоны длин волн ККТ составляют 0,02...3,0 мм или 0,3...16 мм и определяют требования к прецизионности ККТ и космической платформе: точность рабочей поверхности (СКО) ГПЗ (после его раскрытия) 10 мкм; точность ориентации и стабилизации космической платформы с ККТ не менее 1" и 0,2" соответственно. При этом гиперчувствительность ККТ предъявляет жесткие требования к температуре рабочей поверхности ГПЗ, вторичного зеркала и детекторов приемников, которая не должна превышать 4,5 К для зеркал ККТ и 0,1 К для детекторов приемника. Указанные требования обуславливают необходимость применения в конструкции ККТ криогенного охлаждения ГПЗ, криозжрана и многослойных коаксиальных раскрываемых теплозащитных экранов. На рис. 5, в приведена циклограмма раскрытия КО “Миллиметр” на орбите из транспортного положения в рабочее.

Обоснование интеллектуальной системы активной виброзащиты и высокоточного наведения криогенного космического телескопа (ИСАВВН ККТ). Высокие требования по точности и



Рис. 4. Российская КО “Радиоастрон”:

a–в — антенна в сложенном, промежуточном и раскрытом положениях; *г* — запуск обсерватории на ракете-носителе “Зенит” с космодрома “Байконур” (18 июля 2011 г.)

надежное функционирование механических систем при сверхнизких температурах и колоссальном удалении от Земли ставят перед разработчиками ряд проблем, для преодоления которых необходимы новые эффективные концептуальные решения, основанные на современных подходах с применением интеллектуальных систем, способных длительно и автономно функционировать в экстремальных условиях, а также их создание и конструктивная проработка. Первая проблема — наличие гравитационной и инерциальной чувствительности. Вследствие своей протяженности, низких частот собственных колебаний конструкции антенны (≈ 5 Гц) и теплозащитных экранов (≈ 3 Гц), а также жестких требований к прецизионности, ККТ становится

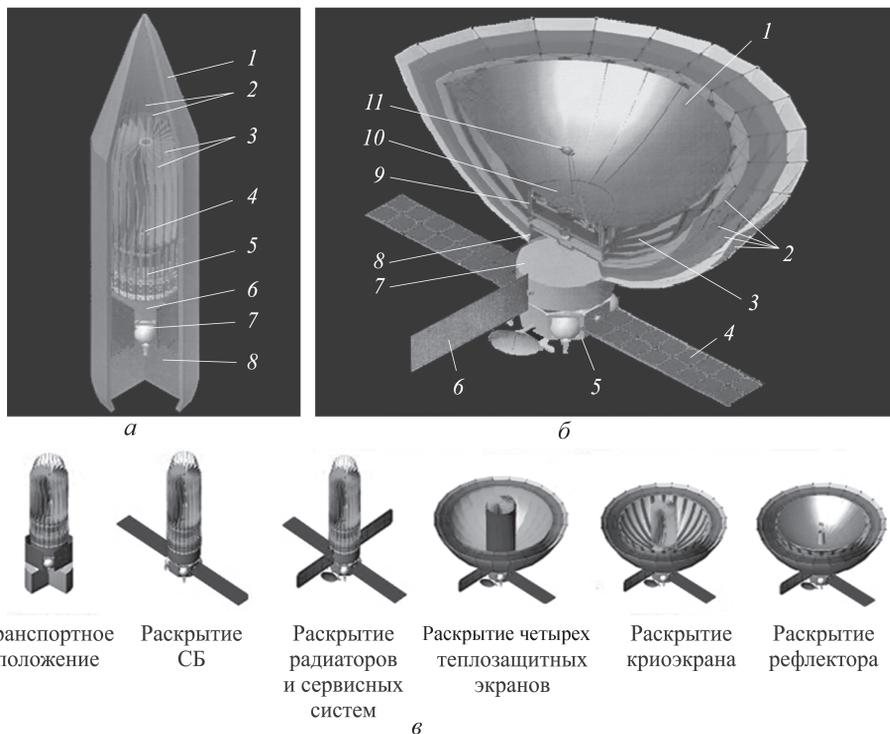


Рис. 5. Общий вид КО “Миллиметр”:

a – в транспортном положении (1 – обтекатель ракеты-носителя; 2 – радиационные краны; 3 – лепестки рефлектора; 4 – отсек криоконтейнера; 5 – опора теплозащитных экранов; 6 – контейнер научной аппаратуры (неохлаждаемый отсек); 7 – служебный модуль (платформа “Навигатор”); 8 – разгонный блок); *б* – в рабочем положении (1 – лепестки рефлектора; 2 – система теплозащитных экранов; 3 – криоэкран; 4 – солнечные батареи; 5 – служебный модуль; 6 – радиатор; 7 – неохлаждаемый отсек; 8 – опора теплозащитных экранов; 9 – опорная ферма рефлектора с охлаждаемым контейнером; 10 – центральное зеркало; 11 – контррефлектор с опорами); *в* – циклограмма раскрытия КО на орбите

гравитационно-инерциальной чувствительной системой к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям (ВВМВ) [10–13]. В соответствии с терминологией, приведенной в работе [12], под гравитационно-инерциальной чувствительностью ККТ следует понимать недопустимое изменение его тактико-технических характеристик в орбитальном полете под влиянием ВВМВ (рис. 6) гравитационного и инерционного происхождения [10–14]. Под действием инерционных нагрузок, вызванных ВВМВ, и за счет сил упругости протяженные формообразующие элементы конструкции приходят в колебательное движение, которое неизбежно снижает их геометрическую точность и формостабильность и, как следствие, ухудшает тактико-технические характеристики ККТ [10–14].

Вторая проблема – обеспечение сверхвысокоточного наведения телескопа на исследуемые объекты (не менее $1''$), его стабилизации (не менее $0,2''$) и периодического контроля геометрии ГПЗ.



Рис. 6. Классификация ВВМВ на космический аппарат (КА) с орбитой в окрестности антисолнечной точки Лагранжа L2

Основное направление решения первой проблемы — поиск путей снижения ВВМВ от МСС на полезную нагрузку. Это может быть достигнуто за счет снижения уровня собственных возмущений работающих систем МСС или развязки МСС с полезной нагрузкой путем применения мягкой связи в виде гибкого интерфейса или карданового подвеса, а также за счет использования эффективных интеллектуальных систем активной пространственной виброзащиты в виде механизмов параллельной структуры, устанавливаемых между МСС и полезной нагрузкой. Следует отметить, что, несмотря на эффективность, организация развязки МСС с крупногабаритной полезной нагрузкой массой в несколько тонн, является в настоящее время и в ближайшей перспективе сложно реализуемой задачей. Примером успешного применения в качестве развязки между главным зеркалом двухзеркальной офсетной антенны японского космического радиотелескопа и МСС может служить использование управляемого карданового под-

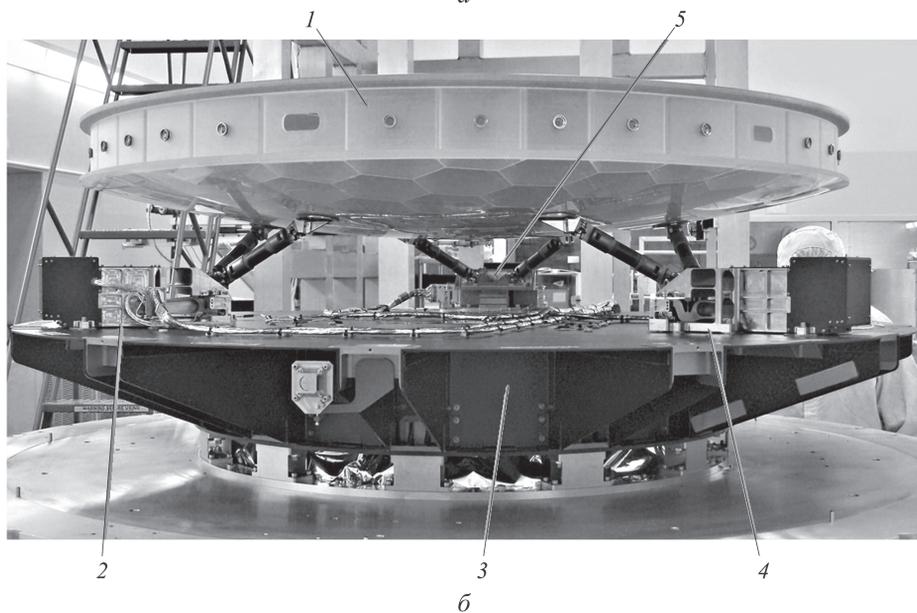
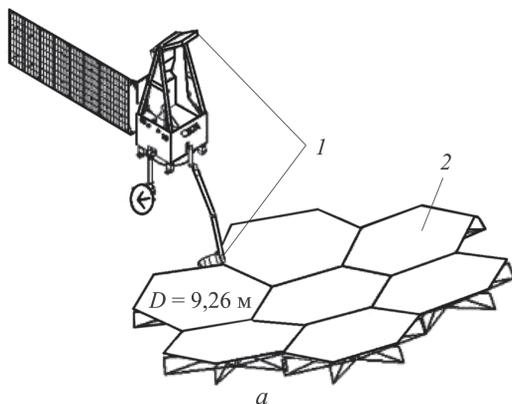


Рис. 7. Общий вид:

а — японский космический радиотелескоп “ASTRO-G” (VISOP) с большим раз-
вертываемым рефлектором (*1* — управляемый карданный подвес фокусирующей
системы; *2* — металлизированное сетеполотно); *б* — первичное зеркало телескопа
“Кеплер”, установленного на механизмах фокусировки (*1* — первичное зеркало
телескопа; *2, 4, 5* — механизмы фокусировки *1, 3* и *2*; *3* — кормовой шпангоут КА)

веса (рис. 7, *а*) [15]. Однако в данном случае зеркало антенны имеет
малую массу (200 кг) при диаметре 9,26 м.

Примером применения механизма параллельной структуры, вы-
полненного в виде гексапода, для обеспечения активной простран-
ственной виброзащиты прецизионных полезных нагрузок, устанавли-
ваемых на космических аппаратах (КА), могут быть работы, прове-
денные фирмой MATRA MARCONI SPASE (Франция) по контракту с
ESA [16, 17].

Действующая модель (прототип) многоцелевой активной изолиру-
ющей системы MAIS (Multi-purpose Active Isolation System) с шестью

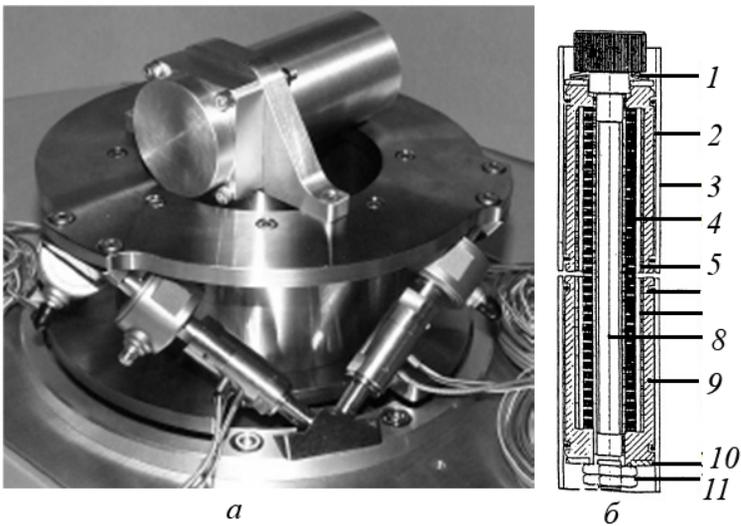


Рис. 8. Действующая модель многоцелевой активной изолирующей системы MAIS (а) и схема прототипа активной стойки фирмы MATRA MARCONI SPASE (Франция) (б):

1 — тарельчатая пружина; 2 — верхний конец корпуса из алюминиевого сплава; 3 — алюминиевая стойка; 4 — пьезокерамический пакет; 5 — тефлоновый вкладыш; 6 — кольцо; 7 — тефлоновая прокладка; 8 — стягивающий стержень из коррозионно-стойкой стали; 9 — нижний конец корпуса из алюминиевого сплава; 10 — упорная шайба; 11 — тонкая гайка М5

степенями свободы, выполненной в виде гексапода с шестью активными стержнями [16], представлена на рис. 8, а. Основные характеристики модели: диаметр 15 см, высота 7 см; масса 7 кг; масса полезной нагрузки 2,2 кг; диапазон значений частоты 50... 200 Гц. Достигнутое снижение вибрации в указанном диапазоне значений частоты составило 20 дБ. Схема прототипа активной стойки шестистепенной системы активной виброизоляции с увеличенным рабочим ходом, позволяющим понизить частоту виброзащиты, приведена на рис. 8, б [17].

На рис. 9 представлена классификация методов и средств виброзащиты космического телескопа (КТ) [18]. По сравнению с виброизоляцией других объектов в машино- и приборостроении виброзащита прецизионного крупногабаритного телескопа “Миллиметр” имеет ряд особенностей:

— к системам виброизоляции прецизионного КТ предъявляют более высокие требования, так как допустимые уровни вибрации и амплитуды микродинамических возмущений на несколько порядков ниже допустимых для наземных технических объектов уровней вибрации;

— система виброизоляции КТ должна, с одной стороны, обеспечивать несущую способность при передаче нагрузок от МСС в процессе



Рис. 9. Классификация методов и средств виброзащиты ККТ

проведения маневров и ориентации, с другой — не вносить собственных микродинамических воздействий при эксплуатации КТ;

- критерием эффективности системы виброизоляции является СКО рабочей поверхности зеркала антенны и отклонение ее фокуса от теоретического под действием микродинамических возмущений;

- датчики, входящие в систему виброизоляции, должны обладать более высокой чувствительностью и минимальными размерами и массой, а приводные механизмы и подвижные элементы — высокой плавностью хода и кинематической чувствительностью при минимальном энергопотреблении; так, чувствительность микроакселерометров должна быть не менее $10^{-6} g$;

- масса виброизолируемого КТ должна быть соизмерима с массой МСС, относительно которого осуществляется виброзащита;

- с учетом сверхудаленности КТ от Земли и длительности его активного существования система виброзащиты должна работать автономно и способна принимать решения при изменении ВВМВ на защищаемый объект, т.е. быть интеллектуальной.

Что касается решения второй проблемы, то в настоящее время наблюдается тенденция к применению пространственных механизмов параллельной структуры, выполненных в виде триподов, гексаподов и др., имеющих моно- и многомодульное исполнение. Например, для

наведения и стабилизации главного зеркала КТ “Кеплер” использован прецизионный пространственный механизм в виде трипода с тремя V-образными опорами (см. рис. 7, б) [19]. Однако вследствие высокой жесткости главного зеркала и его малого диаметра (1,4 м) применение виброзащиты зеркала (в отличие от крупногабаритных прецизионных космических антенных зеркал диаметром 10 м и более) не требуется. Аналогично с помощью прецизионных приводов проводится индивидуальная юстировка каждого шестиугольного фацетного зеркала в КТJWST (18 зеркал) [2]. Таким образом, для решения указанных проблем требуется создание системы, способной обеспечить виброзащиту ККТ и его высокоточное наведение. При этом с учетом низкой частоты собственных колебаний формообразующих элементов конструкции ККТ, их значительных масс и широкого диапазона ВВМВ пассивная виброзащита является неэффективной и необходимо применение пространственной системы активной низкочастотной виброзащиты и высокоточного наведения. С учетом колоссального удаления ККТ от Земли (≈ 2 млн км) такая система должна адекватно реагировать на изменяющиеся во времени ВВМВ и автономно, в режиме реального времени, принимать оптимальные решения, обеспечивающие сохранение технических характеристик ККТ в процессе эксплуатации, т.е. быть интеллектуальной.

Концепция построения ИСАВВН ККТ. В настоящее время практически все системы виброзащиты и высокоточного наведения прецизионной полезной нагрузки КА подчинены одной общей трехуровневой концепции построения (рис. 10), включающей в себя установку



Рис. 10. Существующий (а) и новый (б) подходы к организации виброзащиты и высокоточного наведения прецизионной космической конструкции

прецизионной полезной нагрузки на КА через последовательно соединенные переходную ферму КА с посадочным местом (уровень 1), систему виброзащиты (уровень 2) и высокоточную поворотную платформу (уровень 3), на которой устанавливается прецизионная космическая конструкция. Однако такой подход неизбежно приводит к резкому увеличению массогабаритных характеристик системы и в ряде случаев неприемлем в результате дефицита полезного объема под обтекателем ракеты-носителя, особенно при размещении прецизионной крупногабаритной полезной нагрузки, например, разворачиваемого на орбите ККТ КО “Миллиметр”. При этом в системе виброзащиты в области высоких, низких и инфранизких частот предпочтительно применение активных средств, которые по сравнению с пассивными имеют более низкие значения массогабаритных характеристик, что очень важно при создании космических систем [12, 13, 20, 21].

В связи с этим авторами настоящей статьи предложена новая концепция построения функционально-одноуровневой ИСАВВН ККТ КО “Миллиметр”, направленная на решение указанных проблем. В одноуровневой концепции пространственной ИСАВВН ККТ, отличающейся мировым уровнем новизны [12–14, 20–25], удалось существенно повысить ее эффективность за счет расширения функциональных возможностей элементов конструкции КО “Миллиметр”. Выполнение переходной фермы между ККТ и МСС активной в виде гексапода [26] на основе платформы Стюарта (Stewart) [27] (исполнительный орган ИСАВВН ККТ) в одномодульном исполнении (или в комбинации с додекаподом [24, 25] в двух- и более модульном исполнении) позволит синтезировать одноуровневую ИСАВВН ККТ при тех же массогабаритных характеристиках и минимальном энергопотреблении, а также получить новое качество КА и возможность их модернизации с минимальными затратами.

Предлагаемая концепция ИСАВВН ККТ способна обеспечить:

- виброзащиту панелей солнечных батарей МСС от низкочастотных упругих колебаний, вызванных раскрытием радиаторов, теплозащитных экранов, криоэкрана и ГПЗ (см. рис. 5, в);
- виброзащиту крупногабаритных элементов ККТ от низкочастотных микродинамических воздействий, вызванных работой систем МСС;
- подавление низко- и высокочастотных колебаний упругой конструкции КТ, вызванных ВВМВ;
- периодическое высокоточное угловое наведение оптической оси ККТ;
- генерирование вибрационных воздействий на конструкцию ККТ и МСС, включая вибродиагностику элементов их конструкций, при необходимости.

В отличие от зарубежных аналогов [2, 28], одноуровневая ИСАВВН ККТ, способна осуществлять пространственную активную виброзащиту прецизионного объекта с одновременным его высокоточным наведением и стабилизацией [21].

ИСАВВН КТ относятся к классу наиболее перспективных на современном уровне активных пространственных виброзащитных систем “кинематического типа” [21]. Рассмотрим основные принципы, заложенные в активную виброзащиту “кинематического типа” с позиции механики.

Полагаем, что активный исполнительный элемент, оставаясь абсолютно жестким (в пределах наших допущений), направленно изменяет свою длину и рассматривается как генератор относительного перемещения (скорости, ускорения). Такое действие может быть реализовано устройствами различной физической природы. Это кинематическое изменение элемента происходит под действием сигналов от информационно-измерительных преобразователей (датчиков) механических величин (ускорений, сил, а также перемещений, скоростей и др.).

Покажем возможность обеспечения защиты ККТ от вибраций со стороны МСС и, наоборот, МСС со стороны ККТ с помощью одноуровневой пространственной ИСАВВН, построенной в виде гексапода на основе платформы Стюарта.

Шестистепенная схема системы активной виброзащиты кинематического типа приведена на рис. 11, на схеме твердое тело 1 шарнирно прикреплено к основанию 2 активными элементами-стержнями длиной l_i ($i = 1 \dots 6$).

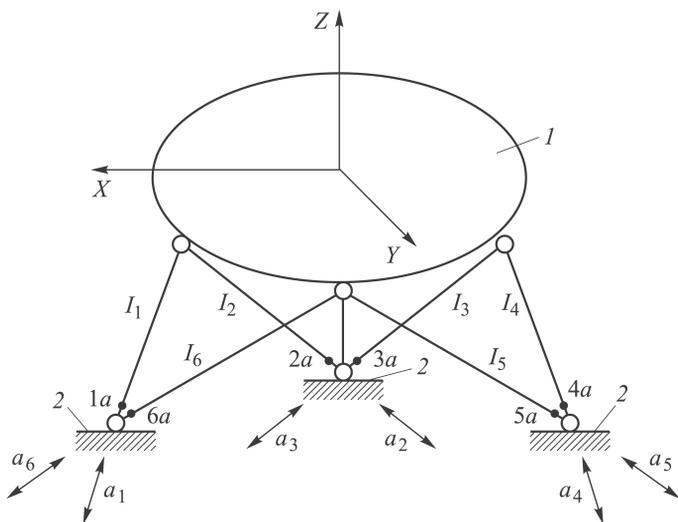


Рис. 11. Схема шестистепенной системы активной виброзащиты кинематического типа, построенной на основе платформы Стюарта:
 1 — твердое тело; 2 — основание

Рассмотрим вариант действия вибраций со стороны основания. Принято допущение об объекте как абсолютно твердом теле. По направлениям осей стержней l_i со стороны основания действуют ускорения a_i ($i = 1 \dots 6$), измеряемые акселерометрами a_i ($i = 1 \dots 6$).

Если каждый i -й стержень изменяет свою длину по закону

$$s^2 l_i = -a_i \text{ или } s l_i = -a_i/s \text{ и } l_i = -a_i/s^2, \quad i = 1 \dots 6, \quad (1)$$

то это управление приводит к тому, что твердое тело остается в пространстве неподвижным. Здесь s — оператор дифференцирования.

Согласованным изменением длин активных элементов-стержней l_i достигается (с учетом значительных базовых расстояний между шарнирными соединениями) прецизионное пространственное позиционирование твердого тела относительно основания, что позволяет обеспечить высокоточное наведение ККТ на исследуемый объект.

Рассмотрим пример твердого тела на платформе Стюарта, когда к твердому телу приложен вектор вибрационных сил и моментов:

$$F = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T. \quad (2)$$

Силы и моменты приложены относительно декартовой системы координат XYZ на твердом теле и передаются через активные элементы-стержни l_i ($i = 1 \dots 6$).

Ускорения a'_i ($i = 1 \dots 6$) вдоль осей активных элементов-стержней l_i измеряются в точках крепления к твердому телу акселерометрами $i a'$ ($i = 1 \dots 6$) и образуют вектор:

$$a' = [a'_1, a'_2, a'_3, a'_4, a'_5, a'_6]^T, \quad (3)$$

соответствующие векторы образуют скорости и перемещения v и l этих точек.

Последовательно с активными элементами-стержнями l_i установлены динамометры f_i ($i = 1 \dots 6$), которые измеряют вектор сил

$$f = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T. \quad (4)$$

Принятые допущения: твердое тело — абсолютно жесткое; основание — абсолютно жесткое и неподвижное; перемещения твердого тела — малые, т.е. геометрически задача может рассматриваться в линейной постановке. Задача заключается в защите от передачи вибрационных сил F основанию. В этой задаче большое значение имеет линейная связь между векторами $a'(s)$ и $\ddot{X}(s)$, $v(s)$ и $\dot{X}(s)$ или $l(s)$ и $X(s)$, а также $f(s)$ и $F(s)$, которая осуществляется через матрицу плюккерových координат A :

$$a'(s) = A \ddot{X}(s) = A s^2 X(s); \quad (5)$$

$$v(s) = A \dot{X}(s) = A s X(s); \quad l(s) = A X(s);$$

$$F_1(s) = A^T f(s), \quad (6)$$

где $F_1(s)$ — сила, приложенная к твердому телу, от активных элементов-стержней l_i .

Построим компенсирующее управление следующим образом. Запишем уравнение движения тела

$$s^2MX + F_1 = F, \quad (7)$$

где M — матрица инерции твердого тела относительно системы координат XYZ .

Сила F определяется измерением вектора ускорений a' и вектора сил f с учетом (5)–(7):

$$F = MA^{-1}a + A^T f. \quad (8)$$

Вектор кинематических ускорений для управления активными элементами-стержнями l_i находится из (8):

$$a_y = a' + AM^{-1}A^T f. \quad (9)$$

Задавая такой закон движения, обеспечиваем условие $F_1 = f = 0$, т.е. изоляцию основания от вибрационных сил. Этот принцип определен как создание “управляемой податливости” [21].

Аналитические формулы (1)–(9) показывают принципиальную возможность обеспечения защиты объекта от вибраций основания и основания от вибраций объекта путем компенсации сил и кинематических воздействий с помощью активных устройств кинематического типа. На последующих этапах создания таких активных систем разработчиками проводится оценка их реализации с учетом конкретных свойств приводов и управляющих систем. При этом огромное значение имеет оценка устойчивости алгоритмов компенсации в диапазоне низких частот и возможностей работы приводов в высокочастотном диапазоне. В вопросах устойчивости проблема решается в рамках современной теории управления [29] с использованием фильтров верхних частот, а также созданием каналов управления по интегралам перемещений. Учитывается также специфика дискретности управления от бортовой информационно-измерительной управляющей системы. Управление ИСАВВН в режиме реального времени обеспечивается применением сверхвысокопроизводительной вычислительной техники, реализующей методы нейронного управления [30].

Ниже представлены результаты физического моделирования пространственной системы активной виброизоляции и наведения (САВН). Впервые в мировой практике в качестве полномасштабной физической модели пространственной САВН КТ был успешно применен шестистепенной динамический стенд авиационного тренажера [21, 31].



Рис. 12. Общий вид шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера — полномасштабной физической модели пространственной САВН КТ:
 1 — нижняя опора; 2 — основание; 3 — гидропривод с обратной связью; 4 — верхняя опора; 5 — подвижная платформа

В результате не потребовалось каких-либо конструкторских и технологических доработок стенда, что позволило существенно (на несколько порядков) сократить финансовые и временные ресурсы, необходимые для создания аналогичной полномасштабной физической модели, а также повысить коэффициент использования в авиационной промышленности шестистепенных динамических стендов авиационных тренажеров. Общий вид шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера — полномасштабной физической модели пространственной САВН КТ — представлен на рис. 12, а. Возмущения, созданные в направлении вертикальной оси стенда, были реализованы с помощью вибратора, выполненного на базе линейного гидропривода и установленного на платформе физической модели через датчики силы. На рис. 13 показана зависимость сил P , передаваемых вибратором на платформу шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера — полномасштабной физической модели пространственной САВН КТ и воспринимаемых платформой, от частоты f , наглядно демонстрирующая возможность практической реализации предлагаемой концепции САВН КТ. Снижение эффекта виброизоляции в области частот менее 5 Гц (см. рис. 13) связано с нестабильностью точного поддержания фаз задающими генераторами на этих частотах. В дальнейшем подобный недостаток будет устранен аппаратными средствами

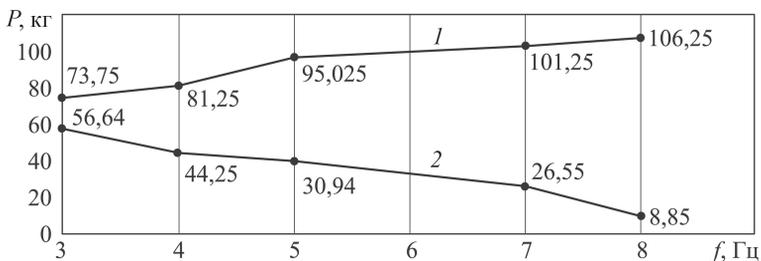


Рис. 13. Зависимость сил P , передаваемых вибратором на платформу шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера — полномасштабной физической модели пространственной САВН КТ (1) и воспринимаемых платформой (2), от частоты f

и с помощью подключения нейрокомпьютерной системы управления, основанной на нейросетевых алгоритмах самонастройки.

Созданная физическая модель может быть применена для физического моделирования самоадаптируемых пространственных узлов стыковки и мягкой посадки космических и других технических объектов, а также пространственных механизмов перемещения рабочих органов металлорежущих станков и контрольно-измерительных машин с параллельной кинематикой [20].

Далее представлена концепция ИСАВВН раскрываемого на орбите ККТ КО “Миллиметр”, которая способна обеспечивать в режиме реального времени реализацию указанных выше функциональных возможностей: виброзащиту ККТ с одновременным его высокоточным наведением на исследуемые объекты и др. [12–14, 20, 21]. Система выполнена в виде пространственной активной переходной фермы, механически соединяющей МСС с ККТ (рис. 14). Телескоп включает в себя ГПЗ 1 с 24 раскрываемыми лепестками, теплозащитные экраны 2, опоры 3 контррефлектора 4 и астродатчики 5. Телескоп установлен на несущей конструкции 6 МСС, содержащего панели солнечных батарей 7 и высокоинформативный радиокomплекс (ВИРК) 8, соединенные переходной фермой 9. Платформа 10 и основание 11 переходной фермы жестко прикреплены к узлам стыковки неохлаждаемого отсека ККТ с одной стороны и к несущей конструкции МСС — с другой. Платформа шарнирно связана с основанием подвеской с шестью степенями свободы, выполненной в виде пространственного манипулятора, включающего не менее шести одинаковых единичных модулей активной виброизоляции (ЕМАВ) 12. Манипулятор построен на основе параллельно соединенных приводных кинематических цепей с возможностью образования пространственной фермы (переходной фермы) при отключенных приводах ЕМАВ, являющихся, в свою очередь, стержнями фермы. Каждый стержень снабжен приводом линейного перемещения, позволяющим обеспечить манипулятору-ферме шестистепенную подвижность в работающем состоянии и геометрическую

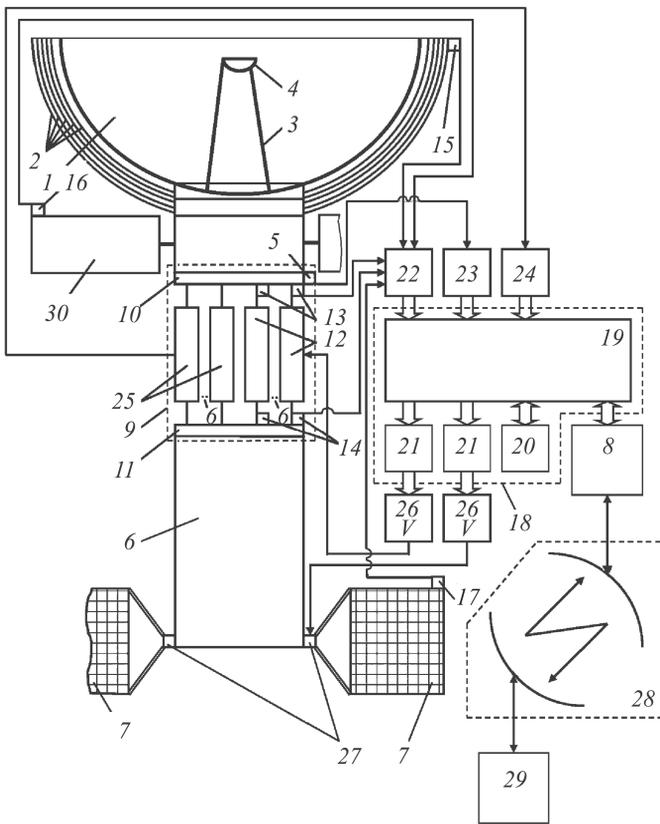


Рис. 14. Структурная схема ИСАВВН ККТ

неизменяемость в выключенном состоянии. В местах шарнирного закрепления каждого из ЕМАВ к платформе и основанию установлены совмещенные датчики пространственного положения и ускорений *13* и *14*, выполненные в виде миниатюрных трехосных блоков гироскопов-акселерометров, позволяющих определять относительные перемещения ЕМАВ и измерять составляющие ускорения, действующие на их продольные оси. В контрольных точках теплозащитных экранов, радиаторов рефрижераторов и панелей солнечных батарей установлены совмещенные датчики пространственного положения и ускорений *15–17*. Бортовая высокопроизводительная информационно-измерительная управляющая система (БВИИУС) *18* состоит из нейроконтроллера *19*, программно-алгоритмического обеспечения *20* и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) *21*. Входы БВИИУС через входные шины аналого-цифровых преобразователей (АЦП) подключены соответственно к выходам АЦП *22* совмещенных датчиков пространственного положения и ускорений, АЦП *23* — к астродатчикам, АЦП *24* — к датчикам относительной скорости *25*. Выходы БВИИУС через выходные шины подключены к соответствующим входам после-

довательно соединенных ЦАП, усилителей мощности 26 и исполнительных органов (ЕМАВ и приводов поворота 27 панелей солнечных батарей), а также к входу соединенных последовательно ВИРК, радиолинии 28 и наземного радиотехнического комплекса 29.

Функционирование ИСАВВН в процессе эксплуатации ККТ реализовано следующим образом. После выведения на орбиту КО и раскрытия ГПЗ, теплозащитных экранов, радиаторов рефрижераторов 30, панелей солнечных батарей, антенны ВИРК и других протяженных элементов, а также включения ЕМАВ в активный режим показания совмещенных датчиков пространственного положения и ускорений сравнивают со значениями, полученными при их наземной настройке. По результатам сравнения определяют деформации и упругие колебания протяженных элементов конструкций КТ и МСС, а также взаимное расположение платформы и основания в процессе эксплуатации. При отклонениях, превышающих допустимые значения, выбирают один из режимов (или их комбинаций) управления динамикой ККТ и МСС в режиме реального времени.

Первый режим. Виброизоляция МСС и его протяженных элементов (панели солнечных батарей, антенна ВИРК и др.) при раскрытии ГПЗ, теплозащитных экранов и радиаторов рефрижераторов.

Второй режим. Виброизоляция прецизионного ГПЗ и теплозащитных экранов ККТ от ВВМВ, вызванных работой МСС в процессе эксплуатации.

Третий режим. Подавление колебаний протяженных элементов конструкций ККТ, вызванных их раскрытием и ВВМВ.

Четвертый режим. Подавление колебаний протяженных элементов конструкций МСС, например панелей солнечных батарей и балки ВИРК с антенной, вызванных работой МСС в процессе эксплуатации.

Пятый режим. Высокоточное наведение ККТ на исследуемый объект и его стабилизация в режиме реального времени.

Шестой режим. Диагностика раскрытия складных элементов ККТ и МСС, а также контроль ВВМВ на ККТ и МСС.

Седьмой режим. Восстановление координат центра масс КО относительно базовой системы координат в случае их изменений в процессе эксплуатации, например, вследствие выработки запасов топлива в МСС.

При этом осуществляется непрерывная обработка векторной информации от астродатчиков, совмещенных датчиков пространственного положения и ускорений, а также датчиков относительной скорости. На основании анализа этой информации в БВИИУС в масштабе реального времени формируются управляющие команды, которые

подаются на исполнительные органы (ЕМАВ и приводы поворота панелей солнечных батарей). Обработанную информацию от датчиков и научной аппаратуры фокального блока преобразуют в радиосигналы и через ВИРК по радиолинии передают в наземный радиотехнический комплекс для дальнейшей обработки, анализа и формирования (при необходимости) управляющих команд, а также для передачи их на МСС для проведения корректировки программ наблюдений.

Следует отметить, что для обеспечения с помощью одноуровневой ИСАВВН виброзащиты ККТ “Миллиметрон” необходимо каждый ЕМАВ выполнять двухкаскадным. Первый каскад — низкочастотный прецизионный линейный привод, способный обеспечивать точные перемещения амплитудой 10...200 мкм в диапазоне значений частоты 0,1...15 Гц, второй каскад — прецизионный пьезопровод, который может обеспечивать прецизионные перемещения амплитудой 1...500 мкм в диапазоне значений частоты 15...100 Гц.

Применение в составе ККТ ИСАВВН позволит обеспечить выполнение высоких требований к его прецизионности и максимально сохранить тактико-технические характеристики КО “Миллиметрон” при длительной ее эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wild W., Kardashev N.S., Babakin N.G.* Millimetron — a large Russian-European submillimeter space observatory // *Experimental Astronomy*. 2009. Vol. 23. No. 1. P. 221–244. DOI: 10.1007/s10686-008-9097-62009.
2. *Bronowicki A.-J.* Vibration Isolator for Large Space Telescopes // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2006. Vol. 43. No. 1. January–February. P. 45–53.
3. *Nakagawa T.* SPICA and its instrumentation. Proceedings of the 19th International Symposium on Space Terahertz Technology: Groningen, the Netherlands, April 28–30, 2008. Pt. 1: Oral contributions. 2008. P. 20–26.
4. *Лескова Н.* Академик Николай Кардашев: “Люди должны уметь мечтать” // *Наука и жизнь*. 2013. № 11. С. 34–39.
5. *Транковский С.* Зачем нужен радиотелескоп на орбите // *Наука и жизнь*. 2013. № 11. С. 36–39.
6. *Матвеев Л.И., Кардашев Н.С., Шоломицкий Г.Б.* О радиоинтерферометре с большой базой // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1965. Т. 8. № 4. С. 651–654.
7. *Матвеев Л.И.* Радиоинтерферометр. В кн. *Физика космоса: маленькая энциклопедия*. М.: Сов. энциклопедия, 1986. С. 547–551.
8. *Космический радиотелескоп КРТ-10 / В.М. Арсентьев, А.С. Гвамичава, Ю.И. Данилов и др.* Доклады Академии наук СССР. *Астрономия*. 1982. Т. 264. № 3. С. 588–591.
9. *Архипов М.Ю., Виноградов И.С., Кардашев Н.С., Усюкин В.И.* “Радиоастрон” — вклад в проект сотрудничества кафедры СМ-1 МГТУ им. Н.Э. Баумана и АКЦ ФИАН // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спецвыпуск “Крупногабаритные трансформируемые космические конструкции и материалы для перспективных ракетно-космических систем”*. 2012. С. 49–59.
10. *Лебедев А.П., Полежаев В.И.* Механика невесомости: микроускорения и гравитационная чувствительность процессов массообмена при получении материалов в космосе // *Успехи механики*. 1990. Т. 13. Вып. 1. С. 3–51.

11. *Титов Б.А., Вьюжанин В.А., Дмитриев В.В.* Формирование динамических свойств упругих космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1995. 304 с.
12. *Саяпин С.Н., Синева А.В., Трубников А.Г.* Проблема гравитационной чувствительности высокоточных трансформируемых антенн космических радиотелескопов. Сб. труд. VII Российского симпозиума “Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем”. 11–14 апреля 2000 г. М., ИПМ РАН, 2001. С. 463–474.
13. *Саяпин С.Н., Синева А.В., Трубников А.Г.* Способ подавления помех от колебаний упругой конструкции космической трансформируемой антенны в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления. Пат. РФ на изобретение № 2161109. Бюл. изобр. 2000. № 36.
14. *Sayapin S.N.* Active Vibration Isolation and Pointing System for High-Precision Large Deployable Space Antennas // Scientific Journal “FACTA UNIVERSITATIS”, Series “MECHANICAL ENGINEERING”. Vol. 1. No. 8. 2001. University of Nis, Yugoslavia. P. 935–938.
15. *Murata Y., Saito H., Tsuboi M.* The VSOP-2 (ASTRO-G) project // To be published in Proceedings of Science, proceedings of “The 9th European VLBI Network Symposium” on “The role of VLBI in the Golden Age for Radio Astronomy and EVN Users Meeting” September 23–26, 2008 Bologna, Italy.
16. *Defendini A., Vaillon L., Trouve F., Rouse Th., Sanctorum B., Griseri G.* Technology predevelopment for active control of vibration & very high accuracy pointing systems. Proceedings of 4th ESA International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems (Proceedings to appear in spring 2000). 18–21 October 1999. Noordwijk: The Netherlands. 7 p.
17. *Vaillon L., Champetier C., Gullaud V., Alldridge J., Philippe C.* Passive and active microvibration control for very high pointing accuracy space system. Proceedings of Third International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems. ESTEC. Noordwijk: The Netherlands, 26–29 November 1996. ESASP-381 (February 1997). P. 497–503.
18. *Разработка принципов построения комплекса эффективных средств виброзащиты и высокоточного наведения прецизионных космических конструкций и схемных решений для его реализации в составе базовых космических аппаратов.* Отчет / А.В. Синева, С.Н. Саяпин, М.Я. Израйлович и др. М., 2000. 108 с.
19. *Koski K.* Focus Mechanism for Kepler Mission. Proceedings of the 39th Aerospace Mechanisms Symposium. NASA Marshall Space Flight Center. May 7–9. 2008. P. 359–372.
20. *Саяпин С.Н.* Перспективы и возможное применение пространственных механизмов параллельной структуры в космической технике // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. № 1. С. 17–26.
21. *Саяпин С.Н.* Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа: Дис... д-ра техн. наук. М.: ИМАШ РАН, 2003. 446 с.
22. *Саяпин С.Н., Кокушкин В.В.* Способ подавления помех от колебаний упругой конструкции космической трансформируемой антенны в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления. Пат. РФ на изобретение № 2323136. Бюл. изобр. 2008. № 12.
23. *Саяпин С.Н., Синева А.В.* Линейный привод. Пат. РФ на изобретение № 2373611. Бюл. изобр. 2009. № 32.
24. *Саяпин С.Н., Синева А.В.* Адаптивный мобильный пространственный робот-манипулятор и способ организации движений и контроля физико-механических свойств и геометрической формы контактируемой поверхности и траектории перемещения с его помощью. Пат. РФ на изобретение № 2424893. Бюл. изобр. 2011. № 21.

25. Саяпин С.Н. Додекапод как современный этап развития пространственных параллельных роботов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 6. С. 31–45.
26. Merlet J.-P. Parallel Robots, Dordrecht. Ch. 2. The Netherlands: Springer, 2006.
27. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proc. Inst. Eng. 1965–66. Vol. 180. No. 15. Pt 1. P. 371–386.
28. Baier H., Reindl M. Adaptive structures and mechatronic components for vibration and shape control of satellite payloads // In: Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 24–26 September 2003, San Sebastian, Spain. Compiled by R.A. Harris. ESA SP-524, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2003. P. 391–396.
29. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977. 650 с.
30. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2. / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф; пер. с англ.; под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. М.: ИПРЖР, 2000. 272 с.
31. Физическая модель пространственной системы активной виброизоляции и наведения / К.В. Фролов, С.Н. Саяпин, А.В. Синев и др. Пат. РФ на изобретение № 2224295. Бюл. изобр. 2004. № 5.

REFERENCES

- [1] Wild W., Kardashev N.S., Babakin N.G. et al. Millimetron – a large Russian-European submillimeter space observatory. *Experimental Astronomy*, 2009, vol. 23, no. 1, pp. 221–244. DOI: 10.1007/s10686-008-9097-62009
- [2] Bronowicki A.-J. Vibration Isolator for Large Space Telescopes. *J. Spacecraft & Rockets*, 2006, Vol. 43, no. 1, pp. 45–53.
- [3] Nakagawa T. SPICA and its instrumentation. *Proc. 19th Int. Symp. on Space Terahertz Technology* Groningen, the Netherlands, April 28–30, 2008, pt. 1 (Or. Contrib.), pp. 20–26.
- [4] Leskova N. Academician Nikolay Kardashev: “The people should be able to dream”. *J. Nauka & Zhizn* [Science & Life], 2013, no. 11, pp. 34–39 (in Russ.).
- [5] Trankovsky S. Why you need a telescope in orbit. *J. Nauka & Zhizn* (Science & Life), 2013, no. 11, pp. 36–39, (in Russ.).
- [6] Matveenکو L.I., Kardashev N.S., Sholomitcky G.B. The radiointerferometer with large base. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved.* [Proc. Univ., Physics], 1965, vol. 8, no. 4, p. 65–71 (in Russ.).
- [7] Matveenکو L.I. Radiointerferometer. *Fizika kosmosa* [Physic of Space. Small encyclopedia], Moscow, Soviet Encyclopedia Publ., 1986, pp. 547–551 (in Russ.).
- [8] Arsentiev V.M., Gvamichava, Danilov Yu.I. Space radio telescope KRT-10. *Dokl. Akad. Nauk SSSR, Astr.* [Proc. Acad. Sci. USSR, Astronomy], 1982, vol. 264, no. 3, pp. 588–591 (in Russ.).
- [9] Arkhipov M.Yu., Vinogradov I.S., Kardashev N.S., Usyukin V.I. “Radioastron” – the contribution to the project from collaboration between SM-1 department of the Bauman MSTU & Astro Space Center of the Lebedev Ph. Inst. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr., Spetsvyp.* “Krupnogabaritnye transformiruemye kosmicheskie konstruksii i materialy dlya perspektivnykh raketno-kosmicheskikh sistem” [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng., Spec. Issue “Large-sized reshaped space structures and materials for advanced rocket-and- space systems”], 2012, pp. 49–59 (in Russ.).
- [10] Lebedev A.P, Polezhaev V.I. Mechanics of microgravity: microaccelerations and gravitational sensitivity of processes of mass transfer upon receipt of the materials in space. *Usp. Mekhaniki* [Sov. Mechanics–Usp.], 1990, vol. 13, no. 1, pp. 3–51 (in Russ.).

- [11] Titov V.A., Vyuzhanin V.A., Dmitriev V.V. Formirovanie dinamicheskikh svoystv uprugikh kosmicheskikh apparatov Formation of dynamic properties of elastic space vehicles. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 304 p.
- [12] Sayapin S.N., Sineov A.V., Trubnikov A.G. Problem of gravitational sensitivity of transformable antennas of space radio telescopes. *Sb. trud. VII Ross. Simp. "Mekhanika nevesomosti. Itogi i perspektivy fundam. issledovaniy gravitatsionno-chuvstvitel'nykh sistem"* [Proc. 7th Russ. Symp. "Mechanics of microgravity. Results and prospects of fundamental research of gravitational Sensitivity Systems"]. Moscow, April 11–14, 2000, IPM RAS Publ., 2001, pp. 463–474 (in Russ.).
- [13] Sayapin S.N., Sineov A.V., Trubnikov A.G. Sposob podavleniya pomekh ot kolebaniy uprugoy konstruksii kosmicheskoy transformiruemy anteny v protsesse ekspluatatsii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of suppression of interference caused by vibrations of elastic structure of transformable space antenna in the course of operation and device for realization of this method]. Patent RF, no. 2161109, 2000.
- [14] Sayapin S.N. Active Vibration Isolation and Pointing System for High-Precision Large Deployable Space Antennas. *Sc. J. "FACTA UNIVERSITA-TIS", Ser. "MECHANICAL ENGINEERING"*, Un. Nis, Yugoslavia, 2001, vol. 1, no. 8, pp. 935–938.
- [15] Murata Y., Saito H., Tsuboi M. The VSOP-2 (ASTRO-G) project. *Proc. 9th Europ. VLBI Network Symp. on "The role of VLBI in the Golden Age for Radio Astronomy and EVN Users Meeting"*, Bologna, September 23–26, 2008.
- [16] Defendini A., Vaillon L., Trouve F., Rouse Th., Sanctorem B., Griseri G. Technology predevelopment for active control of vibration & very high accuracy pointing systems. *Proc. 4th ESA In. Conf. on "Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems"*, Noordwijk, 18–21 October, 1999, pp. 1–7.
- [17] Vaillon L., Champetier C., Gullaude V., Alldridge J., Philippe C. Passive and active microvibration control for very high pointing accuracy space system. *Proc. 3rd Int. Conf. on "Spacecraft Cuidance, Navigation and Control Systems"*, ESTEC, Noordwijk, 26–29 November, 1996, ESA SP-381, 1997, pp. 497–503.
- [18] Sineov A.V. Sayapin S.N., Frolov K.V., Izrailovich M.Ya. Development of effective methods and devices for vibration isolation and high-precision pointing of high-precision large space structures. *Otchet inst. mashinovedeniya IMASH RAN* [Report of Engineering Sc. Inst., Russ. Acad. Sci.]. Moscow, 2000, Inventory no. 02.2.00.105013 of All-Russian Sc.-Techn. & Inf. Center., 108 p. (in Russ., unpublished).
- [19] Koski K. Focus Mechanism for Kepler Mission. *Proc. 39th Aerospace Mechanisms Symp.* NASA Marshall Sp. Fl. Cent., May 7–9, 2008, pp. 359–372.
- [20] Sayapin S.N. Prospects and available application of parallel spatial mechanism in space technology. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [J. Problems of Eng. Sc. & Mach. Reliability], 2001, no. 1, pp. 17–26 (in Russ.).
- [21] Sayapin S.N. Analiz i sintez raskryvaemykh na orbite pretsizionnykh krupnogabaritnykh mekhanizmov i konstruksiy kosmicheskikh radioteleskopov lepestkovogo tipa. Diss. dokt. tekhn. nauk [Analysis and synthesis of high-precision large mechanisms and structures for unfolding in orbit space radio telescopes petal type. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, IMASH RAS Publ., 2003. 446 p.
- [22] Sayapin S.N., Kokushkin V.V. Sposob podavleniya pomekh ot kolebaniy uprugoy konstruksii kosmicheskoy transformiruemy anteny v protsesse ekspluatatsii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya Method of suppression of interference caused by vibrations of elastic structure of transformable space antenna in the course of operation and device for realization of this method. Patent RF, no. 2323136, 2008.
- [23] Sayapin S.N., Sineov A.V. Lineynyy privod [Linear drive]. Patent RF, no. 2373611, 2009.

- [24] Sayapin S.N., Sineov A.V. Adaptivnyy mobil'nyy prostranstvennyy robot-manipulyator i sposob organizatsii dvizheniy i kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoystv i geometricheskoy formy kontaktiruemoй poverkhnosti i traektorii peremeshcheniya s ego pomoshch'yu [Adaptive mobile 3D manipulator robot and method of organizing displacements and control over physical mechanical properties, geometrical shape of contact surface and displacement trajectory hereby]. Patent RF, no. 2424893, 2011.
- [25] Sayapin S.N. Dodekapod as modern stage of development of spatial parallel robots. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [J. Problems of Eng. Sc. & Mach. Reliability], 2012, no. 6, pp. 31–45 (in Russ.).
- [26] Merlet J.-P. Parallel Robots. 2nd Ed. Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2006, ch. 2.
- [27] Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proc. Inst. Eng.*, 1965–66, vol. 180, no. 15, pt. 1, pp. 371–386.
- [28] Baier, H., Reindl, M. Adaptive structures and mechatronic components for vibration and shape control of satellite payloads *Proc. 10th Europ. Space Mechanisms and Tribology Symp.*, San Sebastián, 24–26 September 2003, ESA SP-524, Noordwijk, ESA Publ. Division, 2003, pp. 391–396.
- [29] Quakernak, H., Sivan, R. Linear optimal control systems. Publisher: Wiley-Interscience, 1972. 608 p. (Russ. Ed.: Kvakernaak Kh., Sivan R. Lineynye optimal'nye sistemy upravleniya. Moscow, Mir Publ., 1977. 650 p.).
- [30] Sigeru Omatu, Marzuki B. Khalid, Rubiyah Yusof. Neuro-Control and its Applications. Springer-Verlag London Limited, 1996. 252 p. (Russ. Ed.: Neyroupravlenie i ego prilozheniya. Kn. 2. Moscow, IPRGR Publ., 2000. 272 p.).
- [31] Frolov K.V., Sayapin S.N., Siniov A.V., Galushkin A.I., Yakemenko G.V. Fizicheskaya model' prostranstvennoy sistemy aktivnoy vibroizolyatsii i navedeniya [Physical model of spatial system active виброизоляции and pointing]. Patent RF, no. 2224295, 2001.

Статья поступила в редакцию 03.12.2013

Сергей Николаевич Саяпин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Теоретическая механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий лабораторией Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Автор более 200 научных работ в области трансформируемых космических конструкций, пространственных механизмов параллельной структуры, систем активной виброзащиты, робототехнических систем.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.N. Sayapin — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Theoretical Mechanics” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of laboratory of the Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences. Author of more than 200 publications in the field of transformable space structures, spatial mechanisms of parallel structure, systems of active vibroprotection, robotic systems.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Юрий Николаевич Артеменко — канд. техн. наук, заведующий отделом Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Автор научных работ в области радиотелескопов, процессов управления и измерения в машиностроении, робототехники.

Физический институт им. П.Н. Лебедева, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53.

Yu.N. Artemenko — Cand. Sci. (Eng.), head of department of the Astro Space Center of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. Author of publications in the field of radiotelescopes, processes of control and measuring in machine building, robotics.

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii pr., 53, Moscow, 119991 Russian Federation.

Нелли Валентиновна Мышонкова — канд. техн. наук, заведующая лабораторией Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Автор научных работ в области конструкций телескопов, испытаний конструкций, композитных материалов, метрологии.

Физический институт им. П.Н. Лебедева, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53.

N.V. Myshonkova — Cand. Sci. (Eng.), head of laboratory of the Astro Space Center of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. Author of publications in the field of telescope structures, testing of structures, composite materials, metrology.

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii pr., 53, Moscow, 119991 Russian Federation.