

Проблемы прецизионности криогенного космического телескопа обсерватории «Миллиметрон», раскрываемого на орбите в окрестностях точки Лагранжа L2 системы Солнце — Земля

© С.Н. Саяпин¹, Ю.Н. Артеменко², Н.В. Мышонкова²

¹ МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 117997, Россия

В соответствии с Федеральной космической программой РФ учеными и специалистами российских и международных организаций ведутся работы по созданию космической обсерватории (КО) «Миллиметрон» (проект «Спектр-М»). Головная научная организация: АКЦ ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, головное предприятие — НПО им. С.А. Лавочкина. Планируемый срок запуска — 2019 г. В работе 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. В состав обсерватории входит криогенный космический телескоп (ККТ) с раскрываемым на указанной орбите главным параболическим зеркалом (ГПЗ) диаметром 10 м. Этот телескоп устанавливается на модуль служебных систем (МСС), который должен обеспечивать его ориентацию и стабилизацию. Рабочие диапазоны длин волн ККТ составляют 0,02...3 мм и 0,3...16 мм и определяют требования к прецизионности ККТ и МСС: точность ориентации 1"; точность стабилизации 0,2"; точность рабочей поверхности ГПЗ (после его раскрытия) 10 мкм; температура рабочей поверхности ГПЗ 4,5 К. Показано, что из-за своей протяженности и низкой частоты собственных колебаний ККТ становится гравитационно- и инерциально-чувствительной системой к воздействию внешних и внутренних микродинамических возмущений (ВВМВ). Рассмотрены проблемы обеспечения прецизионности ККТ при эксплуатации в условиях ВВМВ, глубокого вакуума и сверхнизких температур. Показано также, что точность ориентации и стабилизации МСС на порядок ниже требуемых, а упругие колебания низкочастотных крупногабаритных элементов конструкции ККТ от воздействия ВВМВ способны привести к нарушению требуемой прецизионности. Отмечено, что удаление орбиты обсерватории на огромные расстояния от Земли не позволяет осуществлять управление ее системами 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 ККТ обсерватории «Миллиметрон», направленная на решение указанных проблем.

Ключевые слова: обсерватория «Миллиметрон», интеллектуальные системы виброзащиты, механизмы параллельной кинематики.

Введение. В соответствии с Федеральной космической программой РФ (ФКП РФ) учеными и специалистами российских и международных организаций ведутся работы по созданию космической обсерватории (КО) «Миллиметр» (проект «Спектр-М»). Планируемое время запуска КО, предусмотренное ФКП РФ, — 2019 г. Космическая обсерватория «Миллиметр» 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 космического телескопа достигается за счет активного охлаждения зеркальной системы и приемной аппаратуры до температуры 4,5 К, а детекторов приемников — до 0,1 К. Кроме того, «Миллиметр» предназначена для эксплуатации в условиях глубокого вакуума и сверхнизких температур. Рекордное разрешение ККТ достигается его совместной работой с большими наземными телескопами 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 (рис. 1). При этом удаление от Земли самой КО будет достигать 2 млн км. В состав КО (рис. 2, а) входит двухзеркальный ККТ с раскрываемым на указанной орбите ГПЗ диаметром 10 м, состоящим из 24 раскрываемых лепестков 1 и стационарного центрального зеркала 2 диаметром 3 м. Этот телескоп устанавливают на космической платформе 3 типа «Навигатор-М» через переходную ферму

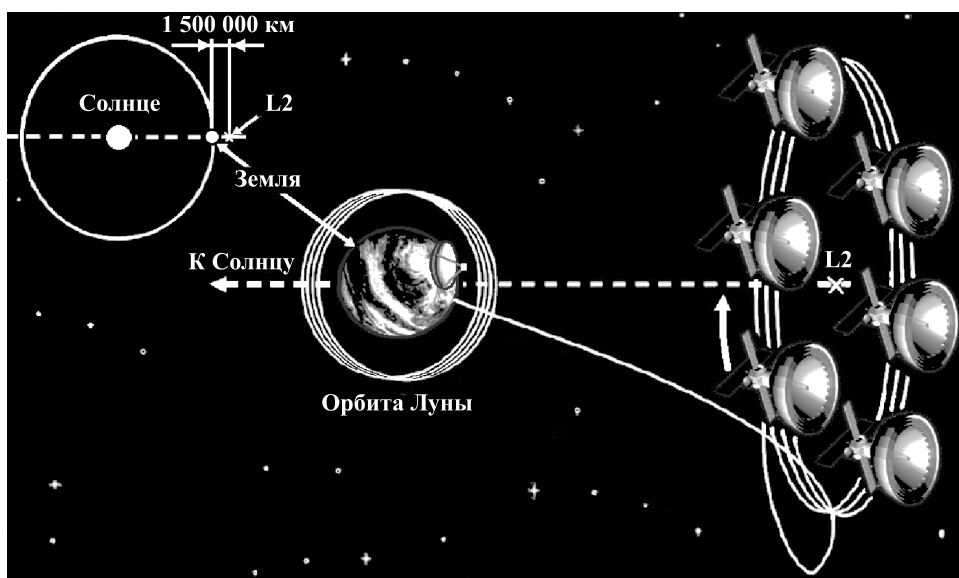


Рис. 1. Орбита космической обсерватории «Миллиметр» с ККТ

и центральные силовые конструкции: опорную ферму рефлектора, опору систем охлаждения и неохлаждаемый контейнер. Рабочие диапазоны длин волн ККТ составляют 0,02...3 мм и 0,3...16 мм и определяют требования к прецизионности ККТ и космической платформе: точность рабочей поверхности (среднеквадратическое отклонение) ГПЗ (после его раскрытия) 10 мкм; точность ориентации и стабилизации космической платформы с ККТ должна быть не хуже 1" и 0,2" соответственно. При этом гиперчувствительность ККТ предъявляет жесткие требования к температуре рабочей поверхности ГПЗ, вторичного зеркала 4 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, криозюкрана 5 и многослойных коаксиальных раскрываемых теплозащитных экранов 6. Раскрытие КО «Миллиметронт» на орбите из транспортного положения (рис. 2, б) происходит в указанной последовательности: раскрытие солнечных батарей 7 и стабилизация ККТ на рабочей орбите (рис. 2, в); раскрытие радиаторов 8, антенны высокоинформативного радиокомплекса (ВИРК) 9 и элементов сервисных систем (рис. 2, г); раскрытие четырех теплозащитных экранов 6 (рис. 2, д); раскрытие криозюкрана 5 (рис. 2, е); раскрытие ГПЗ (рис. 2, ж).

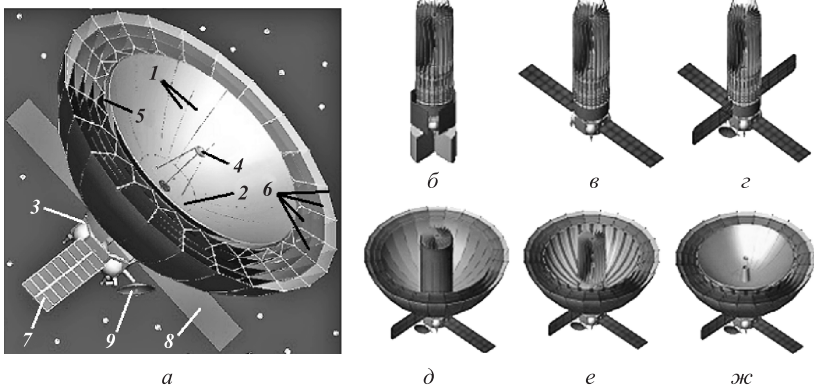


Рис. 2. Общий вид космической обсерватории «Миллиметронт» (а) и циклограмма ее раскрытия на орбите (б–ж)

Обоснование интеллектуальной системы активной виброзащиты и высокоточного наведения криогенного космического телескопа (ИСАВВН ККТ). Высокие требования по точности и надежное функционирование механических систем при сверхнизких температурах и колоссальном удалении от Земли ставят перед разработчиками ряд проблем, для решения которых требуется разработка новых эффективных концептуальных решений, основанных на современных подходах с применением интеллектуальных систем,

способных длительно и автономно функционировать в экстремальных условиях, их конструктивная проработка и создание. Первая из них — проблема гравитационной и инерциальной чувствительности. Вследствие своей протяженности, низких частот собственных колебаний конструкции антенны (~ 5 Гц) и теплозащитных экранов (~ 3 Гц), а также высоких требований к прецизионности, ККТ становится гравитационно-инерциальной чувствительной системой к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям (ВВМВ) [2–5]. В соответствии с терминологией, приведенной в работе [2], под гравитационно-инерциальной чувствительностью следует понимать недопустимое изменение тактико-технических характеристик ККТ в орбитальном полете под влиянием ВВМВ (рис. 3) гравитационного и инерционного происхождения [2–6]. Под действием инерционных нагрузок, вызванных ВВМВ, и за счет сил упругости протяженные формообразующие элементы конструкции приходят в

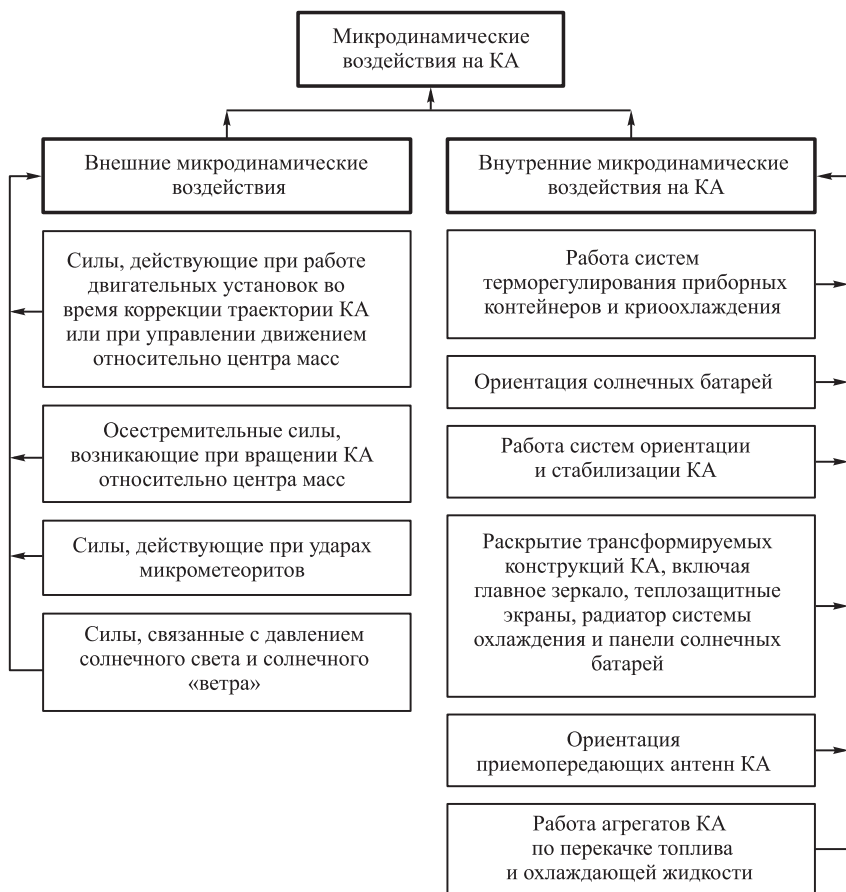


Рис. 3. Классификация внешних и внутренних микродинамических воздействий на КА с орбитой вокруг антисолнечной точки Лагранжа L2

колебательное движение, которое неизбежно приводит к снижению их геометрической точности и формостабильности и, как следствие, к ухудшению тактико-технических характеристик ККТ [2–6].

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

Основным направлением решения первой проблемы в настоящее время является поиск путей снижения ВВМВ от модуля служебных систем (МСС) на полезную нагрузку. Это может быть достигнуто снижением уровня собственных возмущений работающих систем МСС или за счет развязки МСС с полезной нагрузкой путем применения мягкой связи в виде гибкого интерфейса или карданового подвеса, а также применением 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. Имеется пример успешного применения в качестве развязки между главным зеркалом двухзеркальной офсетной антенны японского космического радиотелескопа и МСС управляемого карданового подвеса (рис. 4, а) [7]. Однако в этом случае зеркало антенны имеет малую массу 200 кг при диаметре 9,26 м.

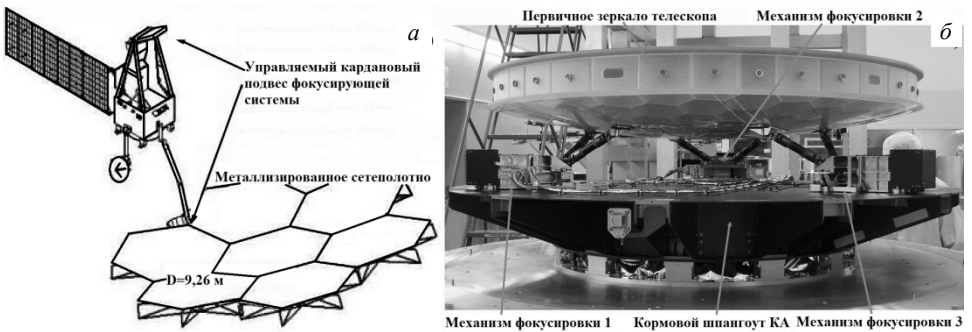


Рис. 4. Общий вид японского космического радиотелескопа ASTRO-G (VISOP) с большим развертываемым рефлектором (а) и первичного зеркала телескопа «Кеплер», установленного на механизмах фокусировки (б)

Что касается решения второй проблемы, то в настоящее время наблюдается тенденция к применению для этих целей пространственных механизмов параллельной структуры, выполненных в виде триподов, гексаподов и других механизмов, имеющих как моно-, так и многомодульное исполнение. Например, для наведения и стабилизации главного зеркала космического телескопа «Кеплер» применен прецизи-

онный пространственный механизм в виде трипода с тремя V-образными опорами (рис. 4, б) [8]. Однако вследствие высокой жесткости главного зеркала и его малого диаметра (1,4 м) не требуется использовать виброзащиту зеркала (в отличие от крупногабаритных прецизионных космических антенных зеркал диаметром 10 м и более).

Таким образом, для решения указанных проблем необходимо 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 требуется применение пространственной системы активной низкочастотной виброзащиты и высокоточного наведения. В связи с колоссальным удалением ККТ от Земли (около 2 млн км) данная 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. На сегодняшний день практически все системы виброзащиты и высокоточного наведения прецизионной полезной нагрузки КА подчинены одной общей трехуровневой концепции построения, включающей установку прецизионной полезной нагрузки на космический аппарат (КА) через последовательно соединенные переходную ферму (1-й уровень), систему виброзащиты (2-й уровень) и платформу высокоточного наведения (3-й уровень). Однако такой подход неизбежно приводит к резкому увеличению габаритно-массовых характеристик системы и в ряде случаев неприемлем из-за дефицита полезного объема под обтекателем ракеты-носителя, особенно при размещении крупногабаритной полезной нагрузки, например разворачиваемого на орбите ККТ КО «Миллиметрон». При этом в системе виброзащиты (2-й уровень) в области высоких, низких и инфранизких частот предпочтительнее применение активных средств, которые по сравнению с пассивными отличаются более низкими значениями габаритно-массовых характеристик, что очень важно при создании космических систем [4, 5, 9, 10].

В связи с этим авторами предложена новая концепция построения функционально-одноуровневой ИСАВВН ККТ КО «Миллиметрон», направленная на решение указанных проблем. В одноуровневой концепции пространственной ИСАВВН ККТ, отличающейся мировым уровнем новизны [4–6, 9–14], удалось существенно повысить ее эффективность за счет расширения функциональных возможностей элементов конструкции КО «Миллиметрон». Например, выполнение переходной фермы между ККТ и МСС активной, в виде гексапода [15] на основе платформы Стюарта (Stewart) [16] (исполнительный орган

ИСАВВН ККТ), в одномодульном исполнении (или в комбинации с додекаподом [13–14] в двух и более модульном исполнении) позволит синтезировать одноуровневую ИСАВВН ККТ практически при тех же габаритно-массовых характеристиках и минимальном энергопотреблении, а также получить новое качество для 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 и криоэкрана, ГПЗ (см. рис. 2, *з-ж*);

виброзащиту крупногабаритных элементов ККТ от низкочастотных микродинамических воздействий, вызванных работой систем МСС;

подавление низко- и высокочастотных колебаний упругой конструкции космического телескопа, вызванных ВВМВ;

периодическое высокоточное угловое наведение оптической оси ККТ;

генерирование при необходимости вибрационных воздействий на конструкцию ККТ и МСС, включая проведение вибродиагностики элементов их конструкций.

При этом одноуровневая ИСАВВН ККТ в отличие от зарубежных аналогов [17–18] способна осуществлять пространственную активную виброзащиту прецизионного объекта с одновременным его высокоточным наведением и стабилизацией [10]. В связи с этим ИСАВВН ККТ относят к классу наиболее перспективных на современном уровне активных пространственных виброзащитных систем «кинематического типа» [10]. В активной виброзащите «кинематического типа» закладываются следующие принципы с позиций механики: полагается, что активный исполнительный элемент, оставаясь абсолютно жестким (в пределах принятых допущений), направленно меняет 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 воздействием сигналов от датчиков механических величин (ускорений, сил, перемещений, скоростей и других параметров). Важное 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 [19] или с использованием фильтров верхних частот, а также созданием каналов управления по интегралам перемещений. Учитывается, кроме того, специфика дискретности управления от бортовой высокопроизводительной информационно-измерительной управляющей системы (БВИИУС). Управление ИСАВВН ККТ в режиме реального времени обеспечивается за счет

применения сверхвысокопроизводительной вычислительной техники, реализующей методы нейронного управления [20].

Ниже представлена концепция ИСАВВН раскрываемого на орбите ККТ КО «Миллиметр», которая способна обеспечивать в режиме реального времени реализацию своих, указанных выше функциональных возможностей: виброзащиту ККТ с одновременным его наведением на исследуемые объекты и др. [4–6, 9–11]. Система выполнена в виде пространственной активной переходной фермы, механически соединяющей МСС с ККТ (рис. 5). ККТ включает в себя ГПЗ 1 с 24 раскрываемыми лепестками, теплозащитные экраны 2, опоры 3 контррефлектора 4 и астродатчики 5. ККТ установлен на несущей конструкции 6 МСС, содержащей панели солнечных батарей 7 и высокоинформативный радиокомплекс (ВИРК) 8, через переходную ферму 9. Платформа 10 и основание 11 переходной фермы жестко прикреплены к узлам стыковки неохлаждаемого отсека ККТ с одной стороны и к несущей конструкции 6 МСС — с другой. Платформа 10 шарнирно связана с основанием 11 посредством подвески 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 9) при отключенных приводах ЕМАВ 12, являющихся, в свою очередь, стержнями фермы 9. Каждый из стержней снабжен приводом линейного перемещения, позволяющим манипулятору-ферме шестистепенную подвижность в работающем состоянии и геометрическую неизменяемость в выключенном состоянии. В местах шарнирного закрепления каждого из ЕМАВ 12 к платформе 10 и основанию 11 установлены совмещенные датчики пространственного положения и ускорений 13 и 14, выполненные в виде миниатюрных трехосных блоков гироскопов-акселерометров, позволяющих определять относительные перемещения ЕМАВ 12 и измерять составляющие ускорения, действующие на их продольные оси. В контрольных точках теплозащитных экранов 2, радиаторов рефрижераторов и панелей солнечных батарей 7 установлены совмещенные датчики пространственного положения и ускорений 15–17. Бортовая высокопроизводительная информационно-измерительная управляющая система (БВИИУС) 18 включает в себя нейрокомпьютер 19, программно-алгоритмическое обеспечение 20 и цифроаналоговые преобразователи 21. Входы БВИИУС 18 через входные шины аналого-цифровых преобразователей (АЦП) подключены соответственно к выходам АЦП 22 совмещенных датчиков пространственного положения и ускорений 13–17, АЦП 23 — астродатчиков 5, АЦП 24 — датчиков

относительной скорости 25. Выходы БВИИУС 18 через выходные шины подключены к соответствующим входам последовательно соединенных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) 21, усилителей мощности 26 и исполнительных органов (ЕМАВ 12 и приводов поворота 27 панелей солнечных батарей 7), а также к входу соединенных последовательно ВИРК 8, радиолинии 28 и наземного радиотехнического комплекса 29.

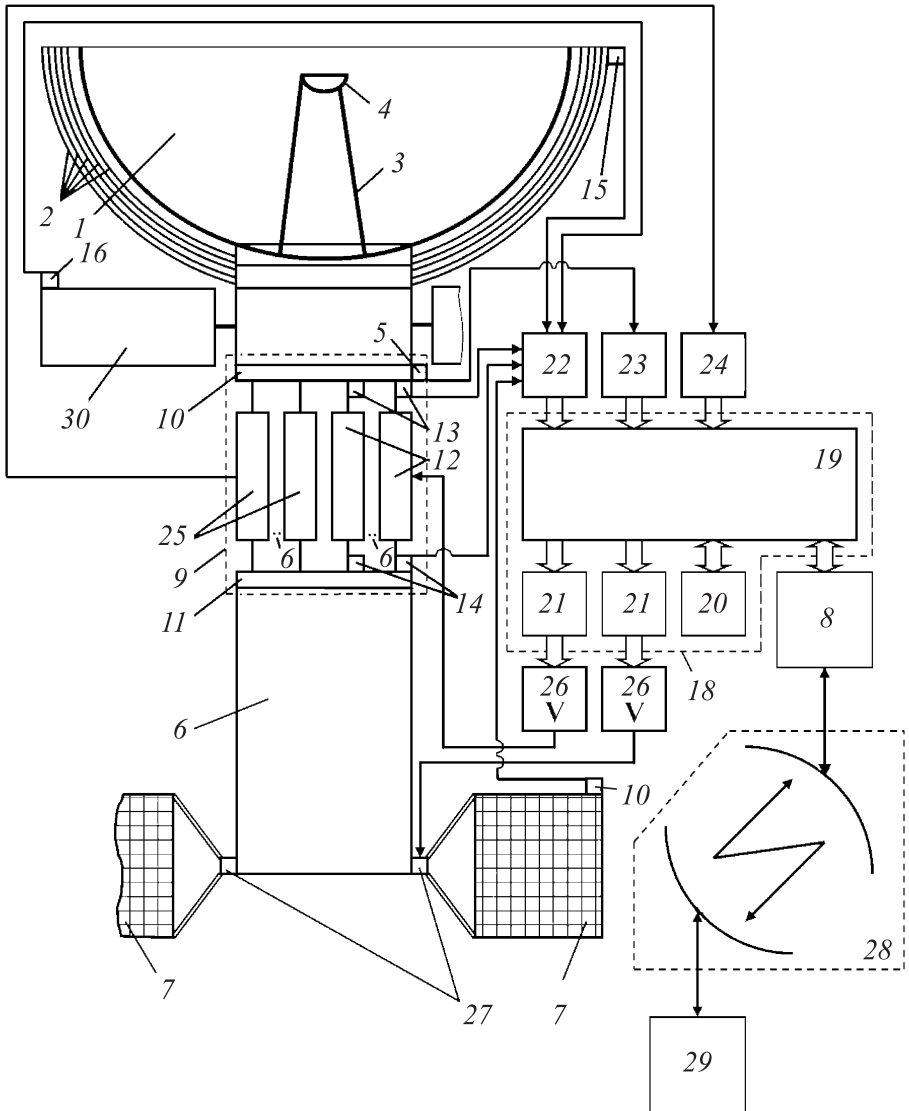


Рис. 5. Структурная схема ИСАВВН ККТ

Функционирование ИСАВВН в процессе эксплуатации ККТ реализовано следующим образом. После выведения на орбиту космической обсерватории и раскрытия ГПЗ 1, теплозащитных экранов 2, радиаторов

рефрижераторов 30, панелей солнечных батарей 7, антенны ВИРК 8 и других протяженных элементов, а также включения ЕМАВ 12 в активный режим, показания совмещенных датчиков пространственного положения и ускорений сравнивают со значениями, полученными при их наземной настройке. По результатам сравнения судят о деформациях и упругих колебаниях протяженных элементов конструкции космического телескопа и МСС, а также о взаимном расположении платформы 10 и основания 11 в процессе эксплуатации. При отклонениях, превышающих допустимые значения, осуществляют выбор одного из следующих режимов (или их комбинаций) управления динамикой ККТ и МСС в режиме реального времени:

первый режим — виброизоляция МСС и его протяженных элементов (панели солнечных батарей 7, антенна ВИРК 8 и др.) при раскрытии ГПЗ 1, теплозащитных экранов 2 и радиаторов рефрижераторов 30;

второй режим — виброизоляция прецизионного ГПЗ 1 и теплозащитных экранов 2 ККТ от микродинамических воздействий, вызванных работой МСС в процессе эксплуатации;

третий режим — подавление колебаний протяженных элементов конструкций ККТ, вызванных их раскрытием и внешними воздействующими факторами;

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;

диагностика раскрытия складных элементов ККТ и МСС, а также контроль ВВМВ на ККТ и МСС;

восстановление координат центра масс космической обсерватории относительно базовой системы координат в случае их изменений в процессе эксплуатации, например из-за выработки запасов топлива в МСС.

При этом ведут непрерывную обработку векторной информации от астродатчиков 5, совмещенных датчиков пространственного положения и ускорений 13–17, а также датчиков относительной скорости 25. На основании анализа этой информации в БВИИУС 18 формируются в масштабе реального времени управляющие команды, которые подаются на исполнительные органы (ЕМАВ 12 и приводы поворота 27 панелей солнечных батарей 7). Обработанную информацию от датчиков и научной аппаратуры фокального блока 4 преобразуют в радиосигналы и через ВИРК 8 по радиолинии 28 передают в наземный радиотехнический комплекс 29 для дальнейшей обработки, анализа и формирования (при

необходимости) управляющих команд, а также для передачи их на МСС для проведения корректировки программ наблюдений.

Необходимо отметить, что для обеспечения с помощью одноуровневой ИСАВВН виброзащиты ККТ КО «Миллиметрон» необходимо каждый из ЕМАВ выполнять двухкаскадными. 1-й каскад — низкочастотный прецизионный линейный привод, способный обеспечивать точные перемещения с амплитудой 10 мкм до 200 мм в диапазоне частот от 0,1 до 15 Гц и 2-й каскад — прецизионный пьезопровод, способный обеспечивать прецизионные перемещения с амплитудой от 1 мкм до 500 мкм в диапазоне частот от 15 до 100 Гц.

Заключение. Для обеспечения с помощью одноуровневой ИСАВВН виброзащиты ККТ КО «Миллиметрон» необходимо каждый из ЕМАВ выполнять двухкаскадными: 1-й каскад — низкочастотный прецизионный линейный привод, способный обеспечивать точные перемещения с амплитудой от 10 мкм до 200 мм в диапазоне частот 0,1...15 Гц, и 2-й каскад — прецизионный пьезопровод, способный обеспечивать прецизионные перемещения с амплитудой 1...500 мкм в диапазоне частот 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 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, pp. 221–244. DOI: 10.1007/s10686-008-9097-62009.
- [2] Лебедев А.Л., 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.
- [3] Титов Б.А., Вьюжанин В.А., Дмитриев В.В. *Формирование динамических свойств упругих космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1995, 304 с.
- [4] Саяпин С.Н., Синев А.В., Трубников А.Г. Проблема гравитационной чувствительности высокоточных трансформируемых антенн космических радиотелескопов. *Сб. трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем»*. Москва, 11–14 апреля 2000 г. Москва, ИПМ РАН, 2001, с. 463–474.
- [5] Саяпин С.Н., Синев А.В., Трубников А.Г. *Способ подавления помех от колебаний упругой конструкции космической трансформируемой антенны в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления*. Пат. № 2161109 Российская Федерация, 2000, бюл. № 36.
- [6] 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, pp. 935–938.

- [7] 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”. Bologna, Italy. September 23–26, 2008.
- [8] Koski K. Focus Mechanism for Kepler Mission. *Proceedings of the 39th Aerospace Mechanisms Symposium*, NASA Marshall Space Flight Center, May 7–9, 2008, pp. 359–372.
- [9] Саяпин С.Н. Перспективы и возможное применение пространственных механизмов параллельной структуры в космической технике. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2001, № 1, с. 17–26.
- [10] Саяпин С.Н. *Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, ИМАШ РАН, 2003, 446 с.
- [11] 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. № 2323136 Российская Федерация, 2008, бюл. № 12.
- [12] Саяпин С.Н., Синев А.В. *Линейный привод*. Пат. № 2373611 Российская Федерация, 2009, бюл. № 32.
- [13] Саяпин С.Н., Синев 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. № 2424893 Российская Федерация, 2011, бюл. № 21.
- [14] Саяпин С.Н. Дodeкапод как современный этап развития пространственных параллельных роботов. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2012, № 6, с. 31–45.
- [15] Merlet J.-P. *Parallel Robots, 2nd ed. Dordrecht, The Netherlands: Springer*, 2006, ch. 2.
- [16] Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proc. Inst. Eng.* 1965–66, vol. 180, no. 15, pt. 1, pp. 371–386.
- [17] 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 Sebastián, Spain. Compiled by R. A. Harris. ESA SP-524, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-834-4, 2003, pp. 391–396.
- [18] Bronowicki A.-J. Vibration Isolator for Large Space Telescopes. *Journal of spacecraft and rockets*, vol. 43, no. 1, January–February 2006.
- [19] Квакернаак Х., Сиван Р. *Линейные оптимальные системы управления*. Москва, Мир, 1977, 650 с.
- [20] Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф. *Нейроуправление и его приложения*. Кн. 2. Москва, ИПРЖР, 2000, 272 с. (Нейрокомпьютеры и их применение). Sigeru Omatu, Marzuki Khalid, Rubiyah Yusof. *Neuro-Control and its Applications: Springer*.

Статья поступила в редакцию 26.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Саяпин С.Н., Артеменко Ю.Н., Мышонкова Н.В. Проблемы прецизионности криогенного космического телескопа обсерватории «Миллиметр», раскрываемого на орбите в окрестностях точки Лагранжа L2 системы Солнце — Земля. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1139.html>

Саяпин Сергей Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий лабораторией Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН). e-mail: S.Sayarin@rambler.ru

Артеменко Юрий Николаевич — канд. техн. наук, заведующий отделом Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). e-mail: altishenko@yahoo.com

Мышонкова Нелли Валентиновна — канд. техн. наук, заведующая лабораторией Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). e-mail: altishenko@yahoo.com