

УДК 004.42:62-519

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ИНТЕРАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ С БОРТА МКС

В.С. Заборовский

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
E-mail: vlad@neva.ru

М.Ю. Гук

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики
Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
E-mail: mgook@stu.neva.ru

А.С. Ильяшенко

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
E-mail: ilyashenko.alex@gmail.com

В.А. Мулюха

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики
Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
E-mail: vladimir@mail.neva.ru

К.С. Селезнев

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики
Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
E-mail: miisle@yandex.ru

Ключевые слова: сетецентрический подход, двухконтурное интерактивное удаленное управление, силомоментное очувствление, динамическая адаптация

Аннотация: Рассматриваются вопросы разработки сетецентрического интерактивного алгоритма удаленного управления робототехническим объектом с использованием механизма силомоментного очувствления. Предложен алгоритм управления, который позволяет расширить возможности применения сетевых технологий для приложений, критичных к задержкам в каналах связи. Создана программное обеспечение для отработки алгоритмов управления киберфизическими объектами в реальном масштабе времени. Анализируется алгоритм динамической настройки параметров модели, используемой для формирования силомоментных воздействий рукоятки джойстика на оператора. Рассматривается архитектура программного обеспечения, используемого для очувствления задержек в канале передачи.

1. Введение

Решение задач удаленного управления робототехническими объектами требует разработки новых сетевых методов и алгоритмов информационного взаимодействия роботов и оператора. С точки зрения управления, современный робот можно рассматривать как киберфизический объект, характеризуемый набором параметров, которые можно представить в виде точки в многомерном фазовом пространстве. Отличительной особенностью киберфизических объектов является тот факт, что траектория движения точки его отображения в фазовом пространстве меняется в результате физического и информационного взаимодействия с другими объектами, окружающей средой или оператором. Совокупность каналов связи, устройств управления, операторов и киберфизических объектов образует сеть информационного взаимодействия – киберфизическую систему.

Организация процесса обмена данными между элементами такой системы требует наличия сетевых ресурсов для передачи информационных потоков, что позволяет формировать виртуальный транспортный канал, соединяющий источник и приемник данных. Виртуальный канал – это ключевая абстракция, которая положена в основу многих современных информационных и телематических сервисов. Параметризация характеристик виртуальных соединений и каналов связи, а также требования, формируемые прикладными телематическими сервисами, позволяют оценивать качество передачи данных в киберфизической системе.

Стандартизация транспортных протоколов (TCP, UDP) и применение алгоритмов адаптации пропускной способности виртуальных соединений (протокол TCP) к текущему состоянию сетевой среды позволяет обеспечить высокий уровень надежности доставки информации, однако использование существующих механизмов адаптации виртуальных каналов вносит случайные задержки в процесс доставки пакетов. В силу того, что сетевая среда является неотъемлемой частью контура управления киберфизическими объектами, к ней предъявляется ряд требований, а именно: возможность организации виртуального канала между всеми узлами сети; существование максимального значения RTT (Round Trip Time) для всех допустимых в данной сети виртуальных каналов; малое значение допустимой вероятности потери пакетов, образующих конкретное виртуальное соединение.

В работе рассматриваются вопросы создания программного обеспечения для сетевых технологий для разработки приложений, критичных к задержкам в каналах связи. Анализируется алгоритм динамической настройки параметров модели, используемой для формирования силомоментных воздействий рукоятки задающего манипулятора джойстика (ЗМ) на оператора. Рассматривается архитектура программного обеспечения, используемого для очувствления задержек в канале передачи управляющих воздействий.

Проводимые исследования выполняются в рамках программы космического эксперимента (КЭ) «Контур-2» [1], который проводится специалистами ЦНИИ РТК и кафедры «Телематика (при ЦНИИ РТК)» СПбГУ совместно с Институтом мехатроники и робототехники Германского аэрокосмического агентства (DLR-RMC) на Российском сегменте международной космической станции (РС МКС).

2. Сетевые технологии в космическом эксперименте «Контур-2»

Создание систем управления на базе сетевых технологий открывает новый этап в развитии как теории, так и практики управления. На этом этапе важную роль начинают играть такие аспекты создания программного обеспечения для систем управления, в рамках которых широко используются принципы самоорганизации и адаптации. Особые условия для реализации сетевых принципов возникают в тех случаях, когда в контуре управления сетевым объектом находится человек-оператор, который должен иметь средства идентификации параметров среды передачи данных и состояния управляемого объекта, чтобы в режиме реального времени оценивать результаты своей деятельности, основываясь на объективной информации, получаемой по каналам связи. Одним перспективным направлением использования человека-оператора в сетевом контуре управления динамическими объектами является космонавтика.

В рамках Государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013 - 2020 годы» к приоритетным областям исследований отнесены различные направления применения робототехнических систем для сервисных операций на борту орбитальных станций и освоения поверхностей тел Солнечной системы. Поэтому одной из целей КЭ «Контур-2» [1] является отработка технологий удаленного управления роботами применительно к условиям, когда оператор находится в условиях микрогравитации на борту Международной космической станции (МКС), а для передач команд управления наплантным роботом используются сетевые сегменты с различной канальной структурой. Схема космического эксперимента приведена на рис. 1.

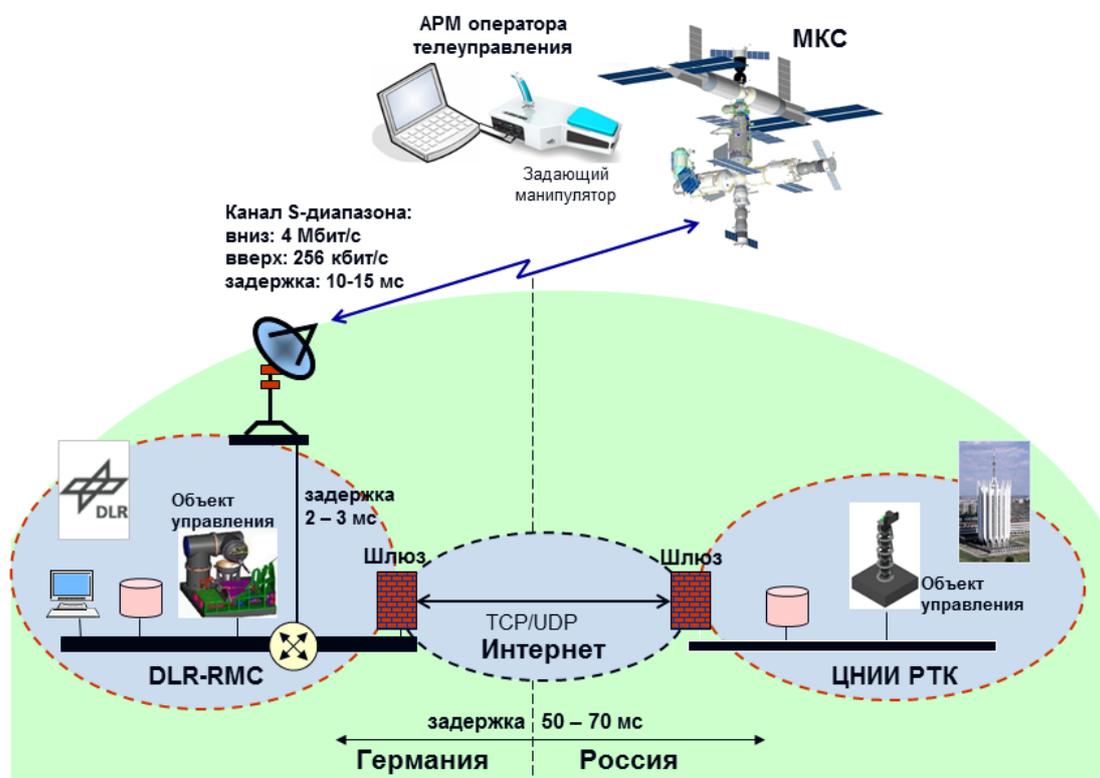


Рис. 1. Схема КЭ «Контур-2».

Особенностью КЭ «Контур 2», которая влияет на выбор архитектуры системы программного обеспечения, является тот факт, что объекты сетевого управления представлены двумя типами роботов, функционирующих в различных режимах, но управляемых с помощью одного устройства – задающего манипулятора. Это устройство оснащено электроприводами, формирующими регулируемые усилия (моменты) по двум ортогональным осям рукоятки управления. Для управления первым типом роботов используется синхронный канал связи, задержка в котором не превышает 15 мс, а величина дисперсии задержки (джиттера) не более 10% от значения параметра RTT. В этом случае оператор может использовать режим билатерального управления роботом [2, 3]. Такой режим основан на технологии телеприсутствия, которая позволяет в реальном масштабе времени ощущать результаты выполнения целевых операций, анализируя для этого данные о значениях текущих координатах или моментах, которые передаются в формате IP пакетов (22 байта полезной нагрузки) с частотой 500 пакетов в секунду. Для управления вторым типом роботов используется виртуальный канал, проходящий через сегмент сети Интернет. Неотъемлемым свойством такого канала является высокое значение величины и дисперсии RTT (см. рис. 2), что снижает эффективность использования режима телеприсутствия, но, тем не менее, позволяет оператору с помощью обратного усилия на рукоятке ЗМ оценивать свойства сетевой среды, в которой функционирует исполнительный элемент робота.

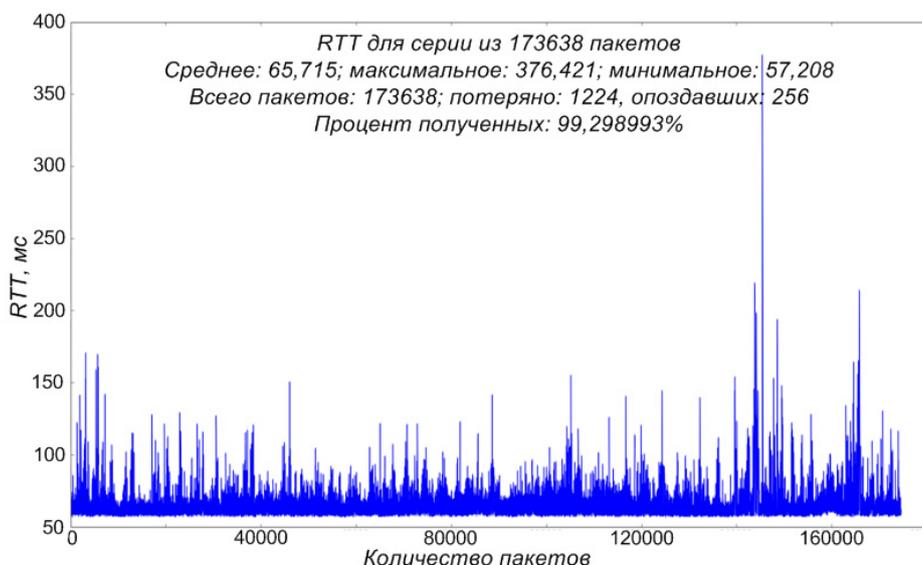


Рис. 2. Изменения значений параметра RTT в виртуальном канале управления, проходящем через сеть Интернет.

Такое повышение информативности управления за счет эффекта силомоментного ощущения задержек позволяет оператору корректировать скорость и направления перемещения робота, а с помощью воздействия на рукоятку джойстика - ощущать влияние сетевой среды и формировать оценку задержки данных в канале связи и сетевых сегментах, которые включают в себя:

- радиоканал S-band, обеспечивающий передачу данных между бортом МКС и наземной приемной станцией, расположенной на территории Германии;
- цифровую синхронную линию связи между наземной приемной станцией и объектом управления (наземный сегмент №1 в Германии);

- публичная сеть (Интернет), связывающая германский наземный сегмент №1 с российским наземным сегментом №2.

Особенности исследуемой сетевой среды характеризуют следующие факторы:

- радиоканал S-band диапазона является асимметричным (256 кбит/с от сегмента №1 к МКС и 4 Мбит/с от МКС к сегменту №1);
- радиоканал обеспечивает дуплексную передачу данных только в течение 9-10 минут, когда пилотируемая орбитальная станция находится в зоне устойчивого приема;
- в сегменте №2 требуется использование режима компенсации задержек, неупорядоченной доставки или потерь пакетов при прохождении данных через сеть Интернет, что позволяет реализовать интерактивное управление, учитывающее пространственные и временные ограничения.

Перечисленные особенности существенно повышают требования к архитектуре и составу системного и прикладного программного обеспечения ЗМ.

3. Организация интерактивного управления роботом с помощью двухконтурной системы

Учитывая особенности используемой сетевой среды для организации интерактивного управления, процессы информационного взаимодействия ЗМ и робота предлагается декомпозировать на два класса – процессы локальной отработки команд управления в режиме жесткого реального времени и процессы доставки команд управления через сетевую инфраструктуру с использованием модели взаимодействия типа «точка-точка» и протоколов из стека TCP/IP. Организованная таким образом система обеспечивает взаимодействие двух контуров управления (рис. 3):

- а) локального контура, в котором программный модуль «контроллер ЗМ» (КЗМ) обеспечивает циклический опрос текущих координат ЗМ, вычисление и отправку в ЗМ вектора силы, зависящего от текущего положения и скорости перемещения рукоятки, а также информации обратной связи (T'), получаемой от объекта управления (ОУ);
- б) сетевого контура, в котором программные компоненты используются для организации процесса передачи векторов управления (C) и данных телеметрии (T) между КЗМ и ОУ.

Основой сетевого контура управления является программный модуль Транспортёр, состоящий из сетевых модулей задающего манипулятора и ОУ (СМЗМ и СМОУ, соответственно, см. рис 3), связанных виртуальным транспортным каналом, который построен на базе протокола UDP [6-8]. С конечными системами (КЗМ и ОУ) сетевые модули связаны через модули адаптации (МА) к свойствам среды передачи (МАЗМ и МАОУ, соответственно).

Очевидно, что для обеспечения плавности управления силового воздействия на рукоятку ЗМ частота циклов КЗМ должна быть достаточно высокой. Связку КЗМ-ЗМ при этом можно рассматривать как (почти) аналоговую систему, что упрощает математическое описание системы и анализ ее устойчивости. Также как аналоговую систему, желательно рассматривать и ОУ со своим локальным контуром управления, обеспечивающим его движение под управлением задания, приходящего в виде вектора C' . Обе эти конечные «почти аналоговые» системы объединяются в глобальный контур через сеть с пакетной коммутацией. Темп посылки пакетов по сети может быть значительно

ниже частоты циклов КЗМ, поэтому связь по сети следует рассматривать как дискретную (по времени), причем вносящую существенное запаздывание.

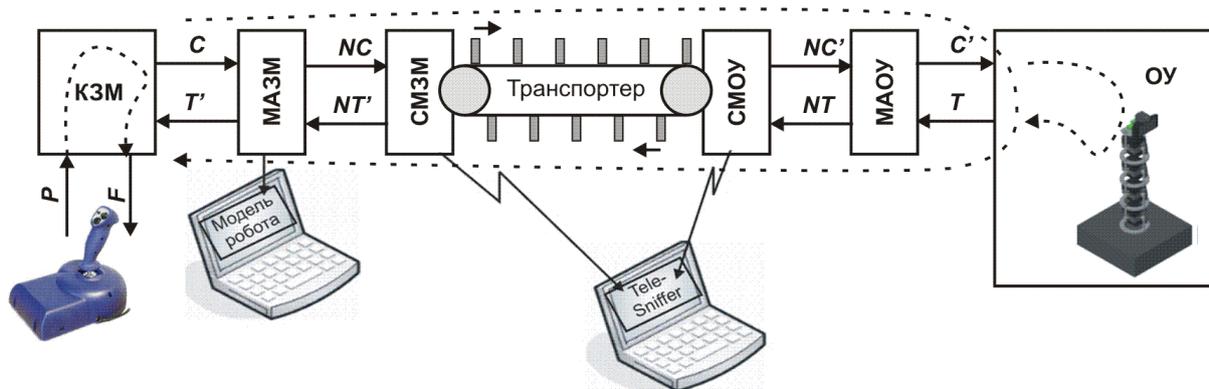


Рис. 3. Структура системы телеуправления.

Программный модуль Транспортёр основан на протоколе UDP, обеспечивающем скорейшую, но не гарантированную и не упорядоченную доставку сообщений. Транспортёр предназначен для обеспечения изохронной связи локальных контроллеров: отсчеты вектора управления, равномерно получаемые от локального контроллера ЗМ, должны также равномерно (но, естественно, с задержкой) передаваться локальному контроллеру ОУ. Аналогично во встречном направлении должны передаваться отсчеты вектора телеметрии. Таким образом, организуется «цифровая» связь «аналоговых» конечных систем с частотой дискретизации, равной частоте отправки сообщений. Однако задержка доставки, вносимая сетью, не является постоянной: часть отсчетов может теряться, порядок доставки может нарушаться. Задачей принимающей части Транспортёра является отслеживание правильного порядка и стимулирование своего модуля адаптации на восполнение пропущенных отсчетов. Транспортёр также определяет текущее состояние среды передачи: задержку доставки (среднюю и вариации); вероятность пропущенного сообщения.

Кроме изохронной доставки потоков отсчетов векторов, Транспортёр обеспечивает и доставку асинхронных сообщений о событиях, которые имеют отношение к процессу телеуправления. Примером таких событий является нажатие кнопок, имеющих на рукоятке ЗМ. Эти кнопки могут использоваться для управления режимом работы ОУ или выполнения ими каких-либо действий. Асинхронность события означает, что оно возникает эпизодически в произвольный момент времени. Однако оно должно гарантированно дойти до получателя, сохраняя привязку по времени к передаваемому изохронному потоку отсчетов.

В условиях управления с борта пилотируемой орбитальной станции в канале связи могут возникать случайные задержки, которые приводят к тому, что управляемое устройство может обладать неполной информацией о текущем состоянии управляющего устройства. С учетом этих обстоятельств в контур управления добавлены элементы, которые называются модулями адаптации. Задачами модулей адаптации является восполнение (при необходимости) пропущенных отсчетов, а также трансляция векторов управления и телеметрии (С, Т) в сообщения, передаваемые по сети (NC, NT), с учетом текущих параметров среды передачи (и обратные преобразования на противоположной стороне). Модули адаптации предназначены для решения задачи обеспечения управляемого устройства дополнительной информацией. Такая информация в случае недостаточности данных позволит спрогнозировать и предсказать поведение оператора, не

допустить перерывов в процессе передачи управляющих сигналов, и, тем самым, обеспечить плавность управления роботом.

В простейшем случае трансляция прозрачна: в сообщениях передаются непосредственно текущие (на момент отправки) значения соответствующих векторов (отсчеты), и на принимающей стороне эти векторы передаются в локальный контур управления. Более сложный вариант поведения МА может быть основан на формировании функций, зависящих как от векторов управления и телеметрии (текущих значений, предыстории), так и от текущих параметров среды передачи данных.

Для визуализации модели робота, а также для «осциллографирования» процессов управления с целью оценки качества Транспортёр передает на компьютер оператора потоки отсчетов векторов управления (текущая позиция ЗМ), силы, прикладываемой к рукоятке ЗМ, и телеметрии (информация от робота, отстающая на время доставки). Для отладочных целей в сетевые модули введена возможность отправки сообщений трассировки на внешний приемник (на рис. 3 обозначен как TeleSniffer).

4. Реализация модулей адаптации

По результатам анализа ряда работ по соответствующей тематике [1-4] была построена схема контура управления, позволяющего решить поставленную задачу. Данная схема изображена на рис. 4.

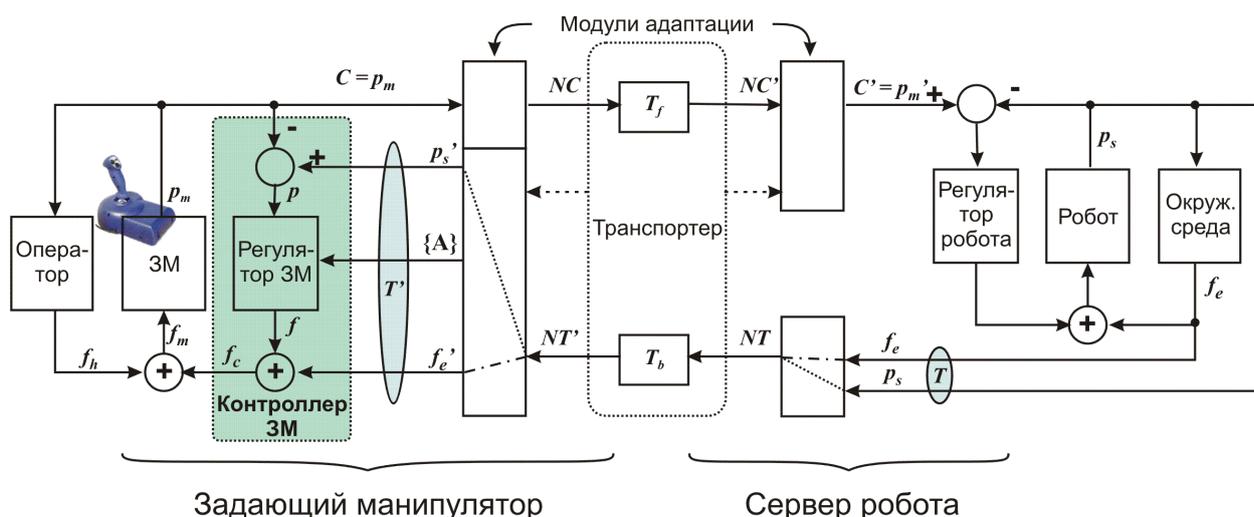


Рис. 4. Схема контура управления.

На данной схеме можно видеть разделение контура на три основные части:

- контур управляющего устройства (на схеме слева), выходом которого является вектор управления s , отображающий текущее положение рукоятки манипулятора p_m . Перемещение рукоятки определяется силой f , складывающейся из силы воздействия оператора f_h , силы f , формируемой регулятором ЗМ, и силы f_e' , отображающей силу воздействия окружающей среды f_e на робота. Входом p регулятора ЗМ является рассогласование текущей позиции ЗМ (p_m) с отображением текущей позиции робота (p_s). Параметры регулятора – вектор $\{A\}$ – могут изменяться динамически.
- Средства коммуникации (Транспортёр), вносящие задержки доставки, и модули адаптации, парирующие действие этих задержек. В общем случае задержки в прямом (T_f) и обратном канале (T_b) могут быть различными.

- контур управляемого устройства (на схеме справа), вырабатывающего воздействие на робота по рассогласованию его текущей позиции p_s и отображения p_m позиции задающего манипулятора. На робота также может воздействовать окружающая среда с силой f_e . В качестве обратной связи может использоваться вектор текущей позиции робота p_s и, при наличии соответствующих датчиков, вектор силы воздействия окружающей среды f_e .

В рамках исследования предлагается провести сравнение четырех способов организации удаленного управления с использованием модулей адаптации с целью изучения эффективности предлагаемых далее подходов:

- а) управление без модулей адаптации;
- б) управление с модулем адаптации принимаемых сигналов на стороне задающего манипулятора;
- в) управление с модулем адаптации принимаемых сигналов на обеих сторонах;
- г) управление с симметричными модулями адаптации, осуществляющими преобразования как принимаемых, так и отправляемых сигналов.

Первый из предлагаемых подходов подразумевает под собой процесс управления без попытки какого-либо прогнозирования поведения оператора или робота в процессе управления, а также учет влияния управляющих сигналов только в момент их непосредственного поступления. Второй и третий способы реализуют стандартные способы прогнозирования поведения оператора и устройств на основе методов экстраполяции исторических данных, которые будут накапливаться по мере проведения эксперимента в памяти объекта управления. Для этих способов будет проведено исследование пригодности моделей прогнозирования на основе построения «скользящей средней» (Moving Average) или кривых более высоких порядков. Эти кривые позволят выявить основное направление движения джойстика или робота и осуществить необходимое прогнозирование дальнейшего движения в случае, когда информация от ЗМ не дошла до ОУ по каким-либо причинам. Четвертый способ предполагает использование модулей адаптации не только при приеме управляющих сигналов, но и, непосредственно, при подготовке их к передаче по сети. Такой способ позволяет при передаче управляющих сигналов включить в передаваемое сообщение информацию о предыстории процесса (которая известна ЗМ) так, чтобы при выработке сигнала в модуле адаптации принимающего устройства, полученные данные использовались для формирования воздействий, обеспечивающих устойчивость и подавление автоколебаний в замкнутой системе управления.

5. Модель силомоментного очувствления процесса управления

Организация процесса удаленного управления с силомоментным очувствлением требует того, чтобы в процессе управления оператор имел возможность «ощущать» текущее состояние как робота, так и сети передачи данных. Поэтому для описания конфигурационного пространства системы управления предлагается использовать модель виртуальной пружины, закрепленной одним концом в основании джойстика, начальное положение которой совпадает с текущим положением управляемого робота. В начальном положении робот никаким образом не воздействует на ЗМ. Однако если оператор начнет осуществлять управление и выводить джойстик из начального положения, то чем дальше будет отведен джойстик от начального положения, тем большие усилия операция растяжения виртуальной пружины потребует от оператора. На рис. 4 представлена схема, реализующая алгоритм расчета величины силомоментного воздей-

вия, которую ощущает оператор в процессе управления. Сила упругости виртуальной пружины рассчитывается по результатам анализа текущего положения джойстика с учетом пришедшей информации о положении робота, которая рассчитывается по формуле (1)

$$(1) \quad p = p'_s - p_m,$$

где p'_s – вектор координат робота, который на данный момент доступен для обработки в модуле адаптации джойстика, p_m – текущее положение манипулятора. Расчет силового воздействия, ощущаемого оператором, производится по формуле (2).

$$(2) \quad f(t) = A_0 \int_0^t p(\tau) d\tau + A_1 p + A_2 \dot{p} + A_3 \ddot{p},$$

где A_0 – астатизм системы, A_1 – жесткость виртуальной пружины, A_2 – вязкость среды, в которой происходит управление, A_3 – виртуальная масса рукоятки.

В процессе управления, стартовое положение виртуальной пружины будет изменяться так, чтобы совпасть с текущим положением координат робота. Эти изменения оператор сможет ощутить в виде ослабления силового давления виртуальной пружины и, как следствие, более легкого продвижения ЗМ в заданном направлении. Предложенная модель позволяет организовать процесс управления так, чтобы информация о состоянии канала связи вносила коррективы в процесс оцувствления. Другими словами, жесткость виртуальной пружины должна увеличиваться не только в зависимости от расхождения положения робота и ЗМ, но и корректироваться с учетом величины задержки данных в канале связи, увеличивая, таким образом, инерционность сетевого контура управления.

Для реализации такого режима взаимодействия на управляющем устройстве потребуется обрабатывать дополнительный объем информации о состоянии канала связи, в качестве которой в ЗМ используются упорядоченная по времени последовательность отсчетов параметра задержки RTT и доля потерянных сетевых пакетов (ДПП) [6,7,8]. Таким образом, жесткость виртуальной пружины и скорость перемещения исполнительного органа робота будут изменяться пропорционально усредненным значениям RTT и ДПП, рассчитанных за период времени по формуле (3), который соизмерим с постоянной времени всей замкнутой системы управления.

$$(3) \quad f(t) = (A_0 \int_0^t p(\tau) d\tau + A_1 p + A_2 \dot{p} + A_3 \ddot{p}) + A_4 \cdot RTT \cdot ДПП \cdot \frac{p}{\|p\|},$$

где A_4 – коэффициент влияния среды передачи данных на силомоментное оцувствление. В результате при увеличении задержек величина силового воздействия на рукоятку ЗМ не позволит оператору осуществлять быстрое изменение его положения. Это обстоятельство хотя и уменьшит скорость перемещения робота, но позволит оператору корректировать результаты отработки операций, анализируя данные об управляющих воздействиях, несмотря на то, что эти данные станут доступны оператору с задержкой.

6. Особенности реализации

Рассмотренная организация системы телеуправления предназначена для наземной отработки алгоритмов и отладки программного обеспечения научной аппаратуры для космического эксперимента «Контур 2». На стенде параметры коммуникационной системы и программного модуля Транспортёр [4], модифицированы с учетом ограничений, накладываемых S-band каналом связи, пропускная способность которого оценивается

исходя из необходимости выполнения условий телеприсутствия, что требует передавать каждые 2 мс IP пакеты, содержащие 22 байта прикладных данных. Эти требования позволят модифицировать формат сообщений и учесть свойства, отражающие специфику сетевых процессов [5,6,7] с целью сокращения разрядности поля нумерации пакетов и меток времени с помощью разделения номеров передаваемых пакетов на четные и нечетные. Четные пакеты используются для передачи изохронного трафика (5 величин в 32-битном формате с плавающей точкой), нечетные – для передачи асинхронных сообщений и служебной информации, обеспечивающей определение параметров канала с реализацией сетевых протоколов и использованием «облегченного» стека LwIP.

Согласно требованиям билатерального управления, программное обеспечение двухконтурной системы телеуправления является симметричным, а именно – структура программных модулей на стороне ЗМ и робота совпадают. Локальные контроллеры как ЗМ, так и робота реализованы в виде ПИД-регуляторов и отличаются друг от друга лишь параметрами настройки. На рис. 5 приведена структура разработанного программного обеспечения задающего манипулятора джойстика, для реализации которого используется 32-х разрядный ARM микроконтроллер.

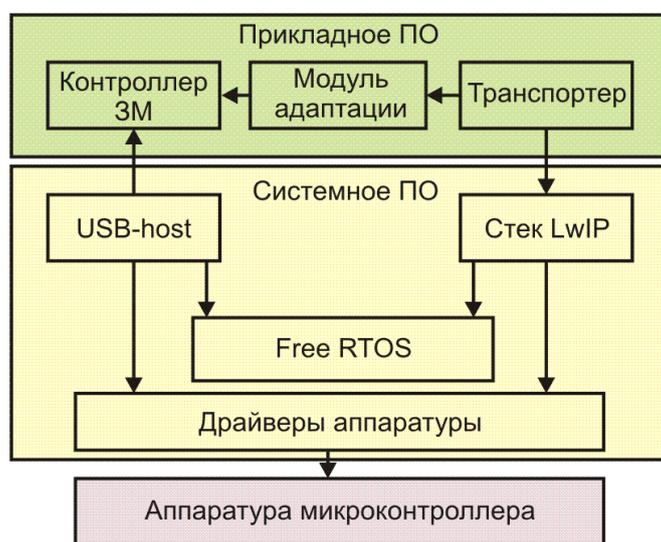


Рис. 5. Структура ПО задающего манипулятора.

Программный модуль контроллера ЗМ обеспечивает чтение текущих координат и состояния кнопок джойстика, а также формирование и подачу команд управления силовым воздействием. Модуль реализует функции ПИД-регулятора, для которого входная величина и коэффициенты в законе управления формируются программным модулем адаптации.

Модуль Транспортера осуществляет регулярный прием и передачу данных из сети, обращаясь к модулю адаптации для преобразования векторов управления и телеметрии, а также обработки текущей информации о задержках в канале передачи данных.

Модуль адаптации осуществляет преобразования, обеспечения устойчивости замкнутой системы и показатели качества управления. Системное программное обеспечение ARM микроконтроллера формирует среду исполнения и включает в себя следующие компоненты: USB-host, LwIP, FreeRTOS, а также набор драйверов для настройки и использования сетевых интерфейсов.

Модуль Free RTOS используется для обеспечения совместного выполнения задач перечисленными далее модулями (рис 4, 5):

- сервер управления роботом, принимающий команды от ПКУ и формирующий встречный поток данных для управления 3D-моделью робота и регистрации (режим осциллографирования) параметров процессов управления;
- USB-host, обеспечивающий регулярный опрос координат джойстика и подачу команд управления силой;
- стек LwIP, осуществляющий первичную обработку IP пакетов (контрольные суммы, подсчет статистики и пр.) и постановку их во входную очередь программного модуля Транспортер;
- Транспортер, обеспечивающий двусторонний обмен изохронными пакетами и асинхронными сообщениями.

Модуль Транспортер активизируется с удвоенной частотой обмена данными, что позволяет вызывать модуль адаптации, попеременно передавая ему на обработку, то вектор телеметрии, полученный от робота, то вектор управления, полученный от контроллера джойстика. Результат работы модуля адаптации, соответственно, передается контроллеру джойстика или отправляется по сети объекту управления. Если в нужный момент времени во входной очереди сообщений нет, то в этом случае модуль адаптации формирует управляющее воздействие на основе предсказанного с использованием (3) вектора значения жесткости виртуальной пружины и скорости перемещения исполнительного органа робота.

7. Заключение

В работе описывается структура программно-алгоритмического обеспечения системы удаленного силомоментного управления роботом, находящимся на поверхности Земли, с борта МКС. Особенностью предложенного решения является использование двухконтурной системы, в которой киберфизические объекты (робот и задающий манипулятор со своими контурами управления) связаны сетевым каналом с пакетной коммутацией, вносящим переменную дискретность и существенные задержки в контур управления. Применение силомоментного оцувствления позволяет оператору получать информацию о состоянии управляемого устройства и канала передачи данных, что позволяет сигнализировать о возможном небезопасном дальнейшем управлении. Предложен метод управления и архитектура программного обеспечения для его реализации. В качестве операционной системы для сетевых узлов выбрана система реального времени Free RTOS, позволяющая обеспечить высокую частоту циклов в локальных контурах управления и сетевое интерактивное взаимодействие оператора с роботом. Программное обеспечение сетецентрической системы интерактивного телеуправления используется в билатеральном режиме, как для задающего манипулятора, так и для киберфизического объекта управления, что позволяет эффективно отрабатывать алгоритмы формирования сигналов силомоментной обратной связи для различных вариантов организации сетевой инфраструктуры.

Список литературы

1. Заборовский В.С., Кондратьев А.С., Силененко А.В., Мулюха В.А., Ильяшенко А.С., Филиппов М.С. Удаленное управление робототехническими объектами в космических экспериментах серии «Контур» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. №6 (162). С. 23-32

2. Artigas Jordi, Jee-Hwan Ryu, Preusche C., and Hirzinger G. Network representation and passivity of delayed teleoperation systems // Intelligent Robots and Systems IROS '2011. IEEE/RSJ International Conference. 25-30 September, 2011. P. 177-183.
3. Niemeyer G., Slotine J.-J.E. Telemanipulation with time delays // Int. Journal of Robotics Research. 2004. Vol. 23, No. 9. P. 873-890
4. Гук М.Ю., Селезнев К.С., Балицкий В.И., Колесник А.М. Реализация алгоритмов взаимодействия с удаленными робототехническими объектами через ненадежные каналы связи. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012619599.
5. Zaborovsky V., Lukashin A., Kupreenko S., and Mulukha V. Dynamic Access Control in Cloud Services // International Transactions on Systems Science and Applications. 2011. Vol. 7, No. 3/4. P. 264-277.
6. Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С. Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Часть 1 // Программная инженерия: 2012. № 2. С. 22-28.
7. Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С. Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Часть 2 // Программная инженерия: 2012. № 3. С. 21-29
8. Zaborovsky V., Zayats O., Mulukha V. Priority Queueing With Finite Buffer Size and Randomized Push-out Mechanism // Proceedings of The Ninth International Conference on Networks ICN '2010. Menuires, The Three Valleys, French Alps, 11-16 April 2010. Published by IEEE Computer Society. 2010. P. 316-320.