

Высоконадежные сети с ультра малыми задержками

Лекция

Передача данных в тактильном интернете

Владимиров С.С.

При построении системы тактильного интернета, как и любой другой системы передачи и обработки данных, необходимо определить, какие технологии должны использоваться на каждом из элементов системы для того, чтобы в совокупности обеспечивать выполнение всех требований, поставленных ко всей системе в целом. Важным параметром в случае Тактильного Интернета является требование к круговой задержке, которая для обеспечения тактильности не должна превышать 1 мс [1–3]. Значит, выбираемые для построения системы передачи технологии и протоколы должны минимизировать ее значение. Свои дополнительные требования к системе передачи вносят и сопутствующие задачи и подзадачи, решаемые в системах Тактильного Интернета [1, 2, 4].

В рамках существующих сетевых инфраструктур для задач Тактильного Интернета может использоваться определенный набор технологий, протоколов и готовых систем передачи, которые соответствуют по своим техническим характеристикам требованиям передачи тактильной информации. Достаточно большой объем стандартов МСЭ-Т и RFC рассматривает значительный круг уже решенных задач для систем реального времени и систем предоставления услуг с нормируемыми задержками, составляя основу для практического решения перспективных задач Тактильного Интернета.

Статья рассматривает вопросы построения систем передачи данных Тактильного Интернета на базе существующих сетей и протоколов с учетом новых требований.

Общая структура системы передачи в Тактильном Интернете

Рассмотрим общую структуру системы передачи Тактильного Интернета с точки зрения обработки и передачи данных в рамках сетевых моделей OSI и TCP/IP (рис. 1). В полную систему Тактильного Интернета помимо представленной системы передачи входят субъект воздействия — оператор системы, который взаимодействует с контроллером, и объект воздействия, на который воздействует манипулятор.

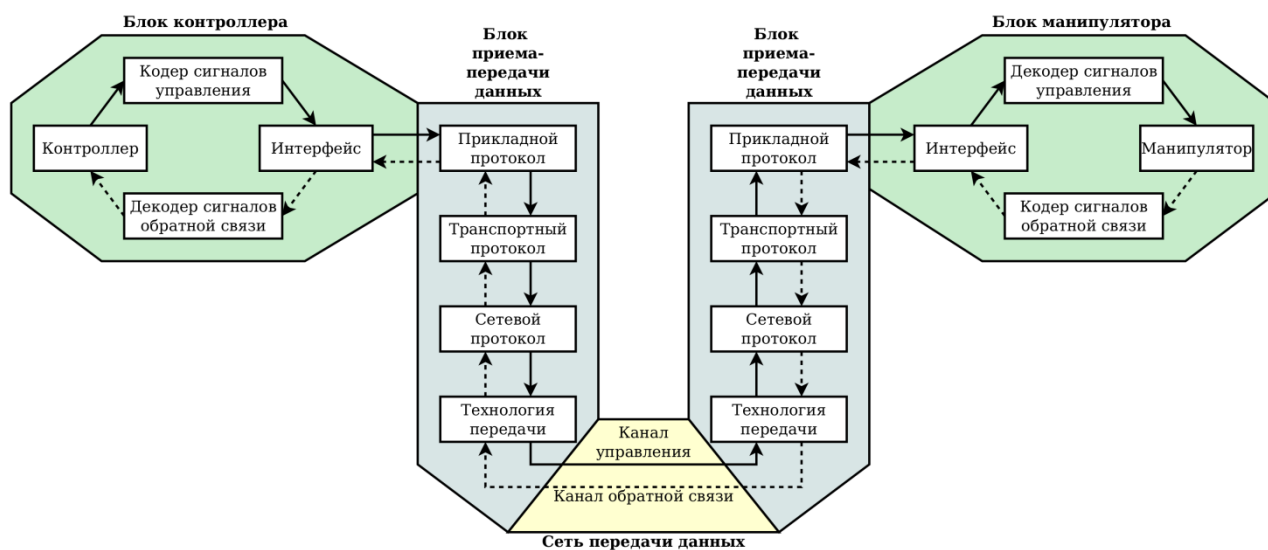


Рисунок 1. Структура системы ТИ в рамках сетевых моделей OSI и TCP/IP

Система передачи Тактильного Интернета состоит из четырех основных частей:

1. Блок контроллера, который формирует и кодирует сигналы управления, создаваемые оператором системы при помощи команд контроллера, принимает сигналы управляющей и тактильной обратной связи, декодирует и воспроизводит их с целью доведения до оператора. Данный блок в совокупности с блоком приема-передачи данных формирует устройство управления.
2. Блоки приема-передачи данных на стороне контроллера и стороне манипулятора реализуют протоколы передачи управляющих и

тактильных сигналов и сопрягают систему передачи Тактильного Интернета с сетью передачи данных. Блок приема-передачи данных может быть реализован двумя способами:

- как отдельное приложение или составная часть операционной системы отдельного вычислительного устройства общего применения (например, персонального компьютера или микрокомпьютера), к которому посредством стандартного интерфейса подключается блок контроллера или блок манипулятора;
 - как специализированный программно-аппаратный универсальный модуль на основе микроконтроллера, встраиваемый в блок контроллера или блок манипулятора.
3. Сеть передачи данных, которая в общем случае может быть любой, удовлетворяющей требованиям передачи тактильной информации. Система Тактильного Интернета строится таким образом, чтобы минимально зависеть от используемой сети передачи данных.
 4. Блок манипулятора, который принимает и декодирует сигналы управления, передает их на манипулятор, считывает тактильные сигналы с датчиков, расположенных на манипуляторе, формирует и кодирует сигнал обратной связи и передает его назад на устройство управления. В совокупности с блоком приема-передачи данных блок манипулятора формирует дистанционно-управляемый модуль.

С точки зрения передаваемых данных система передачи разделяется на две части:

1. Канал управления, предназначенный для передачи управляющих сигналов от контроллера до манипулятора. Эта часть системы преимущественно решает задачу дистанционного управления.
2. Канал обратной связи, по которому передается два вида данных:

1. Сигналы управляющей обратной связи, т. е. данные о позиционировании манипулятора, служащие для проверки соответствия его перемещений командам оператора и, при необходимости, его динамической калибровки. Эти данные относятся к задачам позиционирования и дистанционного управления.
2. Сигналы тактильной обратной связи от датчиков, размещенных на манипуляторе. Эта часть системы реализует задачу тактильности.

Необходимо помнить, что такое разделение по задачам очень условно и в конечном итоге все задачи должны решаться в совокупности. Для их решения могут быть использованы два подхода:

1. Разработка специализированной системы передачи, предназначенной исключительно для решения задач тактильного интернета. Такой подход может быть оправдан при реализации высоконадежных систем с предельно минимальными задержками. Тем не менее, при этом сложно создать действительно универсальную систему передачи, не привязанную к конкретному оборудованию. К тому же, такая система требует разработки и реализации всех элементов: от датчиков контроллера и манипулятора, до сети передачи данных и ее протоколов, что делает такой подход крайне дорогостоящим.
2. Использование комбинации существующих технологий, подходов и протоколов вкупе со специализированными технологиями и протоколами там, где существующие подходы образуют узкое место с точки зрения основного критерия — задержек. В дальнейшем будем рассматривать решение поставленных задач с точки зрения именно этого подхода, как потенциально более универсального и перспективного для возможной будущей практической реализации.

Далее отдельно рассмотрим элементы системы передачи, исходя из их функционала.

Кодер/декодер управляющих сигналов и сигналов обратной связи

Начнем с элементов, отвечающих за кодирование и декодирование сигналов управления и сигналов тактильной обратной связи. Здесь рассматриваются две задачи:

1. Получение информации от датчиков контроллера/манипулятора и их преобразование в цифровой вид (в том случае, если датчики возвращают информацию в аналоговом виде). Эта задача зависит от вида используемых контроллера и манипулятора, а также от количества и вида размещенных на них датчиков.
2. Кодирование этой информации с целью обнаружения или исправления ошибок для обеспечения требований по достоверности передаваемых данных.

В рамках первой задачи необходимо рассмотреть ряд подзадач:

1. Частота опроса датчиков. От частоты опроса зависит нагрузка на систему передачи, а также точность работы связки оператор/контроллер/манипулятор/объект. Чем чаще производится опрос датчиков при перемещении контроллера, тем точнее будет соответствие между перемещениями контроллера и манипулятора, и тем большее число пакетов будет отправлено по системе передачи, т. е. возрастет нагрузка на все элементы системы.
2. Способ оцифровки информации от датчиков. Во многих источниках, посвященных теме тактильного интернета и вопросам дистанционного управления, предлагается использовать при оцифровке адаптивную дифференциальную импульсно-кодую модуляцию¹ (АДИКМ), которая позволяет обеспечить увеличение точности оцифровки при малых изменениях амплитуды сигнала ценой падения точности при больших изменениях [5, 6].

1 Adaptive Differential Pulse-Code Modulation (ADPCM)

3. Способ группирования оцифрованной информации в случае одновременного использования нескольких датчиков. В рамках этой подзадачи необходимо рассмотреть приоритетность информации. Данные получаемые от некоторых датчиков могут иметь большую важность и должны обрабатываться первыми как на передаче, так и на приеме. Следовательно, должен быть обеспечен порядок следования информации от различных датчиков либо их идентификация. Каждый из этих подходов имеет свои плюсы и минусы. Так, использование определенного порядка следования позволяет избавиться от дополнительной служебной информации в виде идентификаторов, однако в некоторых случаях это может наоборот привести к избыточности. Действительно, привязка к порядку следования требует передавать информацию от всех датчиков независимо от того, приходили ли данные. Например, контроллер имеет датчики, отвечающие за считывание изменения его положения в пространстве по трем узлам-«суставам», в каждом из которых может происходить радиальное или угловое перемещение. Если в какой-то момент времени происходит только угловое перемещение в одном суставе, то передача информации от оставшихся датчиков избыточна, и использование идентификаторов как раз и позволяет от нее отказаться. Также стоит отметить, что задача группирования оцифрованной информации может как решаться на уровне блоков контроллера и манипулятора, так и возлагаться на прикладной протокол блока приема-передачи. Это является одним из основных моментов, характерных для передачи такого рода данных.

Вторая задача — задача кодирования — не зависит или минимально зависит от вида передаваемых данных, и должна представлять собой универсальный интерфейс для реализации контроллеров и манипуляторов. Основной задачей кодирования является борьба с возможными ошибками, не обнаруженными на уровне протоколов передачи канального, сетевого и

транспортного уровня. Поскольку ключевым критерием системы передачи тактильного интернета являются задержки, необходимо использовать помехоустойчивые коды с быстрым кодированием и декодированием. Таким требованиям удовлетворяют, например, классические или расширенные коды Хэмминга, исправляющие однократные ошибки [7, 8], и эквивалентные циклические коды BCH и Рида–Соломона при использовании параллельных декодеров на основе двойственного базиса [9–12]. Коды Хэмминга имеют меньшую избыточность, но низкую исправляющую способность, что делает их удобными для работы в каналах связи хорошего качества. Оптимальным при этом представляется использование расширенных кодов Хэмминга в гибридном режиме исправления/обнаружения ошибок [7]. Использование эквивалентных кодов BCH и Рида–Соломона и декодеров на основе двойственного базиса представляется оптимальным для каналов плохого и неравномерного по времени качества, поскольку они ценой большей избыточности и увеличенной сложности декодера позволяют быстро исправлять пакеты ошибок [9–12]. И в том, и в другом случае имеет смысл использовать быстрые аппаратные схемы кодеров и декодеров с максимально возможным распараллеливанием процессов обработки информационных и кодовых комбинаций.

Интерфейс подключения блоков контроллера и манипулятора

Интерфейс между контроллером/манипулятором и блоком приема-передачи данных зависит от их конкретной реализации. Например, контроллер/манипулятор, выполненный как отдельное устройство, можно подключать к персональному компьютеру или микрокомпьютеру, выполняющему роль блока приема и передачи данных, по одному из стандартных интерфейсов. Скорее всего, таким интерфейсом будет USB, ставший в последние годы стандартом де-факто для подключения периферийных устройств. Также можно использовать радиоинтерфейсы, предназначенные для подключения периферии, например, Bluetooth. В случае

реализации блока приема-передачи как встраиваемого в контроллер/манипулятор модуля, интерфейсом сопряжения, скорее всего, будет один из типовых последовательных UART интерфейсов: USB, TTL, SPI, RS-232, RS-485. Во всех случаях, благодаря тому, что системы дистанционного управления и Тактильного Интернета не предполагают передачи данных большого объема (если не брать в расчет мультимедийную обратную связь), выбор интерфейса вряд ли станет узким местом с точки зрения задержек и будет в первую очередь обуславливаться предпочтениями разработчика и возможностями микроконтроллеров, использованных при построении контроллера/манипулятора и блока приема-передачи.

Протоколы передачи данных

Далее рассмотрим протоколы и технологии, реализуемые в блоках приема-передачи. При решении задачи построения универсальной концепции системы передачи Тактильного Интернета имеет смысл рассматривать ее независимо, но обязательно с учетом существующих технологий передачи данных. Таким образом, с учетом разделения задач технология передачи данных, т. е. физический и канальный уровни модели OSI, может быть практически любой. Учитывая, что системы Тактильного Интернета критичны к задержкам, имеет смысл разделить технологии канального уровня на «быстрые» и «медленные» с точки зрения задержек, возникающих при передаче данных. «Быстрые» технологии, которые обладают минимальными задержками, можно использовать при развертывании систем Тактильного Интернета на больших расстояниях, а «медленные» могут использоваться при развертывании систем, работающих на коротких расстояниях.

Учитывая, что в настоящее время наиболее распространенным протоколом сетевого уровня, практически стандартом «де-факто», являются протоколы IPv4 и IPv6, и подавляющее большинство сетей передачи данных ориентированы на использование именно этих протоколов, имеет смысл рассматривать для

применения именно их. Применение иных протоколов сетевого уровня может привести к дополнительным задержкам на преобразование пакетов передачи данных на уровне шлюзов между сегментами сети, использующими новый протокол, и сегментами, работающими на основе протокола IP. Исходя из все того же критерия минимизации задержек, имеет смысл ориентироваться на использование протокола IPv6, поскольку в нем отсутствует необходимость преобразования адресов на уровне шлюзов (NAT), а также отсутствует необходимость пересчета контрольной суммы на каждом промежуточном маршрутизаторе, что приводит к значительным задержкам при передаче пакетов [13, 14].

Протоколы транспортного и прикладного уровней необходимо рассматривать в совокупности, поскольку некоторые требуемые для системы передачи тактильного интернета функции могут возлагаться либо на один, либо на другой уровень. Поэтому вначале разберем некоторые моменты, на которые необходимо обратить первоочередное внимание.

Во-первых, передача тактильных ощущений и команд дистанционного управления относится к задачам реального времени, поэтому использование транспортных протоколов, реализующих надежную передачу данных, таких как TCP, в этом случае приведет к значительным задержкам на анализ заголовков пакетов, на повторную передачу и на ожидание подтверждений. В системе тактильного интернета та же ситуация, что и в случае передачи потоковой аудио и видео информации. К тому же, задача управления манипулятором имеет некоторую инерционность, что приводит к тому, что, зная предыдущие перемещения контроллера/манипулятора, мы можем в ближней перспективе предсказать дальнейшее его перемещение [15]. Следовательно, потеря одного или даже нескольких пакетов не приведет к сильному расхождению в перемещении манипулятора. В случае критичных задач или при потере большого числа пакетов перемещение манипулятора может быть просто остановлено до получения новых пакетов управления от контроллера. В рамках

решения задачи предсказания положения манипулятора необходимо обеспечить хранение предыдущих его состояний и возможных типовых шаблонов перемещения. В том случае, когда манипулятор используется для проведения однообразной работы, это позволит обеспечить улучшенное качество предсказания.

Во-вторых, как следует из рис. 1, помимо пакетов управления, передаваемых по прямому каналу, требуется и передача пакетов обратной связи, переносящих сигналы тактильных ощущений и подтверждающих правильность перемещения манипулятора.

В-третьих, необходимо обеспечить нумерацию пакетов, что позволит восстанавливать на приеме последовательность передаваемых данных, отбрасывать пакеты, пришедшие с опозданием, и позволит качественнее проводить интерполяцию сигналов перемещения манипулятора.

В-четвертых, перед началом работы контроллера и манипулятора требуется осуществить процедуру установления соединения, чтобы согласовать начальное положение устройств и параметры их работы.

Исходя из представленных особенностей информационной передачи в Тактильном Интернете, были выбраны два возможных варианта использования протоколов транспортного уровня с учетом того, что протокол прикладного уровня несомненно потребует новой разработки как и специализированный кодек для передачи тактильных ощущений.

1. Первый вариант основан на использовании транспортного протокола UDP, который будет отвечать только за передачу данных и контроль ошибок. Вопросы нумерации пакетов, процедура управления соединением и формирование пакетов обратной связи при этом возлагаются на протокол прикладного уровня.
2. Вторым вариантом предлагается использовать перспективный протокол DCCP, в котором реализованы функции управления соединениями нумерации пакетов. Соединение протокола DCCP представляет собой два

симметричных полусоединения, что хорошо накладывается на концепцию прямого канала управления и обратного канала тактильной обратной связи. В DCCP существует возможность ограничить объем данных, используемых для расчета контрольной суммы. Учитывая, что на уровне данных предполагается использование быстрых схем помехоустойчивого кодирования, можно будет ограничить контроль ошибок лишь заголовком протокола DCCP и, при необходимости, заголовком прикладного протокола, что приведет к сокращению времени на вычисление контрольной суммы.

Список литературы

1. The Tactile Internet. Technology Watch report — Geneva : ITU-T, 2014. 24 p.
2. **Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Киричек Р.В.** Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. — 2016. — № 1. — С. 44–46.
3. **Кучерявый А.Е., Выборнова А.И.** Тактильный Интернет // Сборник трудов V Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». — 2016. — Т.1. — С. 6–11.
4. **Владимиров С.С., Кучерявый А.Е.** Механизм компенсации задержек для приложений Тактильного Интернета // Электросвязь. — 2018. — №3
5. **Liu X., Dohler M., Mahmoodi T., Liu H.** Challenges and Opportunities for Designing Tactile Codecs from Audio Codecs // 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC) — 2017. — P. 1–5. — DOI: 10.1109/EuCNC.2017.7980643.
6. ITU-T Recommendation G.726. 40, 32, 24, 16 kbit/s Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM). — Geneva: ITU-T, 1990. — II, 57 p.
7. **Берлекэмп Э.** Алгебраическая теория кодирования. — М. : Мир, 1971.

8. **Adamek J.** Foundations of Coding: Theory and Applications of Error-Correcting Codes with an Introduction to Cryptography and Information Theory. — New York : John Wiley & Sons, Inc., 1991. — 352 p.
9. **Когновицкий О.С., Кукунин Д.С.** Метод декодирования эквидистантных кодов с использованием двойственного базиса поля Галуа // Труды учебных заведений связи. — 2006. — № 174. — С. 45–52.
10. **Когновицкий О.С.** Двойственный базис и его применение в телекоммуникациях. — СПб.: Линк, 2009. — 423 с.
11. **Владимиров С.С.** Исследование алгоритма мажоритарного декодирования кода Рида-Соломона на основе двойственного базиса в канале с памятью // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2015. — № 1 (9). — С. 19–26.
12. Патент 2613760 Российская Федерация, МПК H03M 13/15, H03M 13/43. Устройство мажоритарного декодирования кода Рида-Соломона по k-элементным участкам кодовой комбинации / Когновицкий О.С., Владимиров С.С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО СПбГУТ.
13. **Fiuczynski M.E., Lam V.K., Bershad B.N.** The Design and Implementation of an IPv6/IPv4 Network Address and Protocol Translator // Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference (NO 98) New Orleans, Louisiana, June 1998. — 1998. — P. 1–11.
14. **Sailan M.K., Hassan R., Patel A.** A Comparative Review of IPv4 and IPv6 for Research Test Bed // 2009 International Conference on Electrical Engineering and Informatics 5–7 August 2009, Selangor, Malaysia. — 2009. — P. 427–433.
15. **Dohler M.** Internet of Skills – where robotics meets AI, 5G and the Tactile Internet. IEEE ComSoc Technology News 2017 [cited 28.11.2017]; Available from: <http://www.comsoc.org/ctn/global-reach-will-tactile-internet-globalize-your-skill-set>.