

Высоконадежные сети с ультра малыми задержками

Лекция

Понятие Тактильного Интернета. Компенсация задержек в ТИ

Владимиров С.С., Кучерявый А.Е.

Идея передачи тактильных ощущений на большое расстояние уже давно была озвучена многими писателями-фантастами и, как многие подобные идеи, с развитием технологий начала переходить из области чистой фантастики в область перспективных технологий, которые могут получить полноценную практическую реализацию в ближайшие десятилетия, а возможно и годы. В течение многих лет различные компании пытались разрабатывать системы, в той или иной мере реализующие эту идею. Системы виртуальной и дополненной реальности [1–4], удаленно-управляемые манипуляторы на опасных производствах [5, 6], роботы-саперы, применяемые военными и правоохранительными структурами, и роботы-спасатели [7, 8] — все это разные стороны и примеры реализации этих идей. Однако целостной системы, единого взгляда на вопрос передачи тактильных ощущений не было выработано.

Считается, что началом реального развития Тактильного Интернета, как единой и открытой к обсуждению концепции системы передачи ощущений на расстояние, стал август 2014 года, когда группа специалистов МСЭ-Т опубликовала обзорный отчет «The Tactile Internet», в котором опубликована концепция Тактильного Интернета, варианты его применения в быту, на производстве и в сфере услуг, с общими требованиями к задержкам в сетях и системах, предназначенных для передачи такого рода данных [9].

Среди предъявляемых к системам передачи тактильных ощущений требований необходимо отметить задержку распространения данных по сети передачи. Согласно отчету МСЭ-Т задержка прохождения данных от контроллера к манипулятору и обратно должна составлять не более 1 мс [9].

Считается, что лишь в этом случае может быть обеспечено взаимодействие, сравнимое по ощущениям с использованием собственных рук оператора. Реализация прочих требований к системе передачи (например, надежности и безопасности передачи информации) должна выстраиваться именно исходя из задержек. В отчете отмечается, что даже если учесть только время прохождения сигналов, то распространяющиеся со скоростью света $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с сигналы при круговой задержке 1 мс обеспечивают передачу данных на расстояние между контроллером и манипулятором, равное максимум $300/2 = 150$ км [9–11]. Скорость прохождения сигнала по среде передачи, как правило, значительно меньше скорости света. Согласно рекомендации ITU-T G.114, скорость распространения сигнала в медных линиях и радиорелейных системах с учетом задержки в ретрансляторах и регенераторах составляет порядка 4 мкс/км, а аналогичный показатель для оптических линий равен 5 мкс/км. Таким образом, максимальное расстояние между контроллером и манипулятором с учетом требуемой круговой задержки составит от 100 до 125 км. В реальной системе передачи присутствуют задержки, вызванные обработкой и кодированием сигналов управления и обратной связи, задержки протоколов передачи данных, задержки маршрутизации пакетов и многое другое. Значит, реальная дальность передачи тактильных ощущений будет ещё меньше. А вот, насколько меньше, зависит от протоколов и технологий, применяемых во всей системе передачи в целом.

Фактически, несмотря на название «Тактильный Интернет», в отчете МСЭ-Т к этой области отнесли все виды сетевых услуг и технологий, требующих задержку не хуже 1 мс. Например, системы автоматического управления промышленным оборудованием; технологии дополненной реальности; беспроводные сети VANET для связи движущихся автомобилей, решающие задачу управления дорожным движением; системы управления энергоснабжением, так называемые «интеллектуальные энергосистемы»¹;

1 Smart grid (англ.)

дистанционное управление БПЛА [9, 10, 12]. К собственно системам передачи тактильной информации можно отнести следующие услуги, упомянутые в отчете: удаленное управление роботизированными мобильными комплексами, рассматриваемое, как перспективное направление при использовании на опасных производствах, например в условиях химического или радиоактивного загрязнения или при работах в безвоздушном пространстве; системы телеприсутствия, совмещенные с использованием дистанционно управляемых манипуляторов; системы виртуальной реальности с тактильной обратной связью; перспективные медицинские системы для удаленной диагностики пациентов, использующие дистанционно-управляемые манипуляторы для проведения пальпации [9]. В статье концептуально рассмотрены вопросы построения систем тактильного интернета для передачи собственно тактильной информации.

Общая схема системы Тактильного Интернета в решаемых задачах

В системе Тактильного Интернета можно выделить пять основных функциональных составляющих:

1. Оператор системы.
2. Блок управления.
3. Сеть передачи данных.
4. Дистанционно-управляемый модуль.
5. Объект воздействия/управления.

Эти составляющие и их связи показаны на рис. 1.

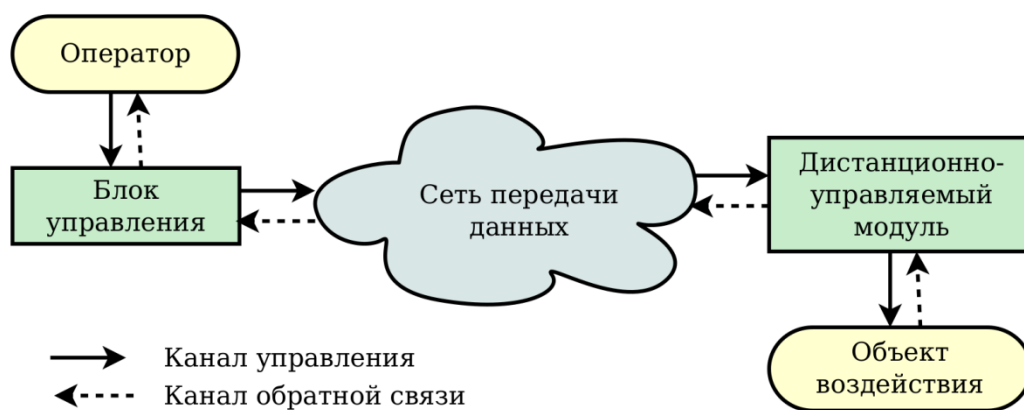


Рисунок 1. Общая схема системы тактильного интернета.

Оператор системы посредством блока управления формирует команды, передающиеся по каналу управления (прямому каналу) на дистанционно-управляемый модуль, который перемещается или перемещает подвижные элементы согласно полученным командам и воздействует на объект управления. В дальнейшем, будем называть ту часть модуля, которая перемещается и непосредственно воздействует на объект управления, — манипулятором. В результате перемещения манипулятора и его воздействия на объект формируется обратная связь. Выделяется несколько видов обратной связи:

1. Управляющая обратная связь, которая содержит отклик дистанционно-управляемого модуля на команды оператора и сигналы позиционирования манипулятора, которые в дальнейшем используются на стороне оператора для контроля правильности воздействия на объект.
2. Тактильная обратная связь, получаемая при взаимодействии манипулятора и объекта воздействия. Сигналы тактильной ОС используются для контроля управления манипулятором и взаимодействия с объектом (получение ощущений непосредственного управления объектом). В ряде случаев могут передаваться дополнительные данные для уточнения позиционирования манипулятора.

Согласно получаемым по каналу ОС блоком управления сигналам управляющей и тактильной ОС оператор получает информацию о воздействии

на объект и принимает решение о корректности работы и дальнейших действиях. При необходимости блок управления содержит отдельный вычислительный модуль и видеоинтерфейс, на котором формируется интерактивная графическая модель работы системы с отображением перемещений манипулятора и объекта и параметрами их взаимодействия.

Дополнительно может применяться мультимедийная обратная связь, которая включает в себя видео и, при необходимости, аудио сигналы от отдельного блока аудио/видео передачи, которые в дальнейшем отображаются на экране оператора и позволяют в реальном времени (с учетом синхронизации данных) контролировать ход работ. Как правило, этот вид обратной связи заменяет или дополняет формируемую в блоке управления интерактивную графическую модель.

Необходимо отметить, что на работу системы Тактильного Интернета в ряде случаев будет оказывать влияние окружающая среда, состояние которой может (и в большинстве случаев будет) оказывать влияние на объект управления, манипулятор и, соответственно, на передаваемые оператору сигналы тактильной обратной связи.

Из приведенного описания системы Тактильного Интернета видно, что в общем случае решаемые задачи и система передачи данных Тактильного Интернета неразрывно связаны с вопросами дистанционного управления, которое, в свою очередь, увязано с задачей позиционирования управляемого объекта в соответствии с командами управляющего устройства. Передаваемые тактильные ощущения являются фактически реакцией (обратной связью) на воздействия, инициируемые оператором системы дистанционного управления манипулятором или иным дистанционно управляемым прибором и производимые манипулятором. Таким образом, Тактильный Интернет складывается из трех задач: дистанционное управление, позиционирование манипулятора и передача тактильных ощущений (рис. 2).

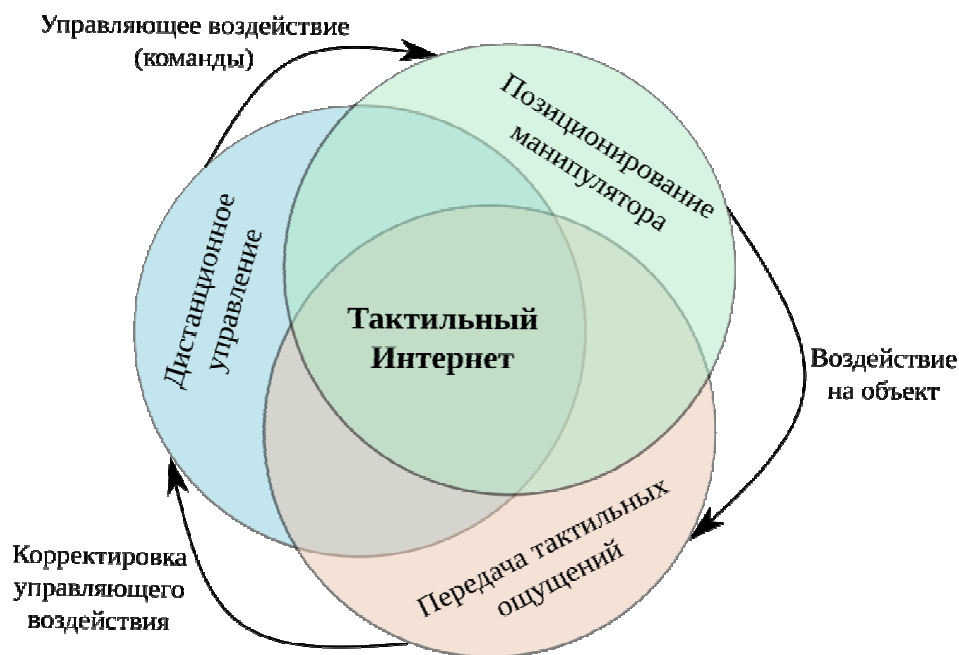


Рисунок 2. Представление Тактильного Интернета в совокупности задач дистанционного управления, позиционирования манипулятора и передачи тактильных ощущений.

В рамках отмеченных основных задач возникает и должно решаться большое количество подзадач, включая способы и правила кодирования и представления передаваемой информации, преобразование сигналов обратной связи в вид, удобный для оператора, контроль параметров сигналов обратной связи и многое другое с учетом конечного результата. Часть этих подзадач должны быть решены для обеспечения требуемой в системах тактильного интернета 1 мс задержки, часть — для обеспечения удобного, осязаемого и безопасного интерфейса пользователя.

Среди подзадач особо выделяется вопрос безопасности оператора, связанный с воспроизводством ощущений тактильной обратной связи. Можно представить себе ситуацию, когда возникающая при взаимодействии манипулятора, объекта и окружающей среды «отдача» может быть такой, что полноценное ее воспроизведение на стороне оператора может привести к травмам или повреждениям контроллера. С другой стороны, оператор должен получать точную информацию о состоянии манипулятора. В этом случае

необходимо сочетать механизмы воспроизведения тактильной обратной связи с дополнительным информированием. То есть, ограничить воспроизведение сигнала тактильной обратной связи максимальным безопасным для оператора и контроллера уровнем, дополнив его индикатором, показывающим наличие опасного уровня тактильной «отдачи».

Классификация задач Тактильного Интернета по удаленности от оператора

Весь спектр приведенных задач и подзадач, решаемых в системах Тактильного Интернета, можно разделить на две части, в зависимости от того, на какой стороне они выполняются — на стороне оператора или на стороне объекта. Задачи, выполняемые на стороне оператора, будем называть локальными или задачами ближнего конца. Задачи на стороне объекта назовем удаленными или задачами дальнего конца.

К задачам ближнего конца отнесем формирование управляющих сигналов в блоке управления, обработку и анализ сигналов управляющей и тактильной обратной связи. К задачам дальнего конца отнесем позиционирование манипулятора согласно управляющим сигналам и формирование сигналов управляющей и тактильной обратной связи.

Случай виртуальности отдельных элементов системы Тактильного Интернета

Отдельно рассмотрим случай построения системы Тактильного Интернета, при котором один или несколько элементов системы являются виртуальными объектами. Такая ситуация возникает в системах виртуальной и дополненной реальности или в многопользовательских играх, использующих элементы этих технологий. Простым примером может служить так называемая виртуальная клавиатура, которая отображается перед пользователем через очки виртуальной реальности, и взаимодействие с которой производится с помощью

контроллера/манипулятора выполненного в виде перчатки. В этом случае контроллер и манипулятор объединены в одном устройстве, а объект воздействия является виртуальным. Строго говоря, такая система только частично относится к Тактильному Интернету, поскольку вся работа производится в рамках программно-аппаратного комплекса, размещённого в одном месте, а составляющие его элементы связаны на уровне интерфейсов периферийного оборудования. В этом примере деление задач на локальные и удаленные достаточно условно и все решаемые задачи можно считать задачами ближнего конца. Тем не менее, фактически единственной подзадачей Тактильного Интернета, не решаемой в рамках данного комплекса, является передача информации по сети передачи данных. К тому же, тот же тип контроллера/манипулятора можно использовать и для дистанционного управления манипуляторами, и в многопользовательских играх, а это уже примеры услуг и применений Тактильного Интернета. Таким образом, системы виртуальной и дополненной реальности, обчислимые локальным вычислительным комплексом, можно считать частным случаем систем Тактильного Интернета.

В случае виртуальности объекта формирование тактильных ощущений, как результата взаимодействия с объектом, возлагается на вычислительное устройство, непосредственно моделирующее объект. В этом случае при вычислении круговой задержки прохождения сигнала необходимо учитывать не время работы датчиков на манипуляторе, а время выполняемого вычислительным устройством моделирования воздействия на объект.

Подходы к уменьшению задержки доступа к сервисам в мобильных сетях доступа

Для минимизации задержки доступа к сервисам в мобильных сетях другими авторами на сегодня предлагается несколько подходов, к которым относятся программно-конфигурируемые сети SDN, механизмы виртуализации

сетевых функций NFV [13] и семейство технологий Mobile-Edge Computing, основанное на широком использовании облачных технологий [14, 15]. В частности, в рамках последнего подхода в работах [15, 16] предлагается использование четырехуровневой облачной архитектуры, в которой сеть связи состоит из четырех уровней облачных платформ, выполненных с возрастанием вычислительных мощностей:

1. Микро-облака, подключаемые к отдельным базовым станциям мобильной сети доступа и обеспечивающие высокую доступность вычислительной системы.
2. Мини-облака, каждое из которых связано с несколькими микро-облаками по высокоскоростному каналу.
3. Основная облачная платформа, подключенная к опорной сети связи. На нее сводятся высокоскоростные каналы от всех мини-облаков.
4. Публичные облачные сервисы с доступом через сеть Интернет.

В зависимости от сложности выполняемой задачи, процесс передается от уровня к уровню. Указывается [15, 16], что использование такой архитектуры позволяет разгрузить сеть и сократить среднее время предоставления услуги вследствие уменьшения среднего числа переходов между облачными сервисами и потребителями их услуг. В Тактильном Интернете этот подход может быть использован на начальном уровне для формирования коротких маршрутов между службами управления и мобильными абонентами услуги при условии их нахождения в сотах размещения микро-облаков.

Механизмы аппроксимации сигнала тактильности как мера компенсации критичных задержек

Узким местом при реализации системы Тактильного Интернета является требование к соблюдению круговой задержки в 1 мс, которое сильно ограничивает максимальную дальность работы такой системы. Возможным решением является полное или частичное формирование первичного отклика на

передающей стороне, используя имеющуюся информацию о состоянии на стороне приемника. В этом случае сигнал тактильных ощущений на контроллере начинает формироваться сразу после отправки сигнала управления на основе предыдущего состояния манипулятора и будет скорректирован позднее по приходу сигнала обратной связи с реальными показаниями датчиков манипулятора. Таким образом, у оператора будет формироваться впечатление о том, что задержка отсутствует, а относительная точность соответствия состояния контроллера и манипулятора будет обеспечиваться математическими алгоритмами аппроксимации, предсказывающими их потенциальное состояние. Этот механизм можно сравнить с использованием искусственного фонового шума в системах цифровой телефонии и IP-телефонии, который обеспечивает психологический комфорт при разговоре, показывая, что соединение не разорвано, даже в случае молчания собеседника. Пример временной диаграммы, показывающей принцип работы системы компенсации критичных задержек тактильных ощущений, показан на рис. 3.

На ближнем конце формируется первый сигнал воздействия, который по сети передается к дальнему концу с временем распространения $\tau_{\text{пр.канала}}$, которая заведомо больше 1 мс, что не позволяет получить в системе ощутимую тактильность. Для компенсации этой задержки на ближнем конце запускается механизм имитации тактильности. Далее по приходу первого сигнала тактильности от удаленного конца через время $\tau_{\text{круг.задержки}}$ корректируем на ближнем конце сигнал тактильности на величину ΔA , убеждаемся в том, что получен сигнал изменения позиционирования, и вся система отработала первый сигнал воздействия корректно, и формируем следующие сигналы тактильности ближнего конца повтором полученного сигнала тактильности. Формируем следующий сигнал воздействия и ожидаем соответствующие сигналы тактильности и позиционирования от дальнего конца, продолжая имитировать сигналы тактильности на ближнем конце. После получения второго сигнала тактильности корректируем его и с учетом посланного третьего сигнала можем

включать механизм имитации тактильности на ближнем конце с интерполяцией по реальным данным, что в свою очередь дает уменьшение ошибки сигнала тактильности ΔA .

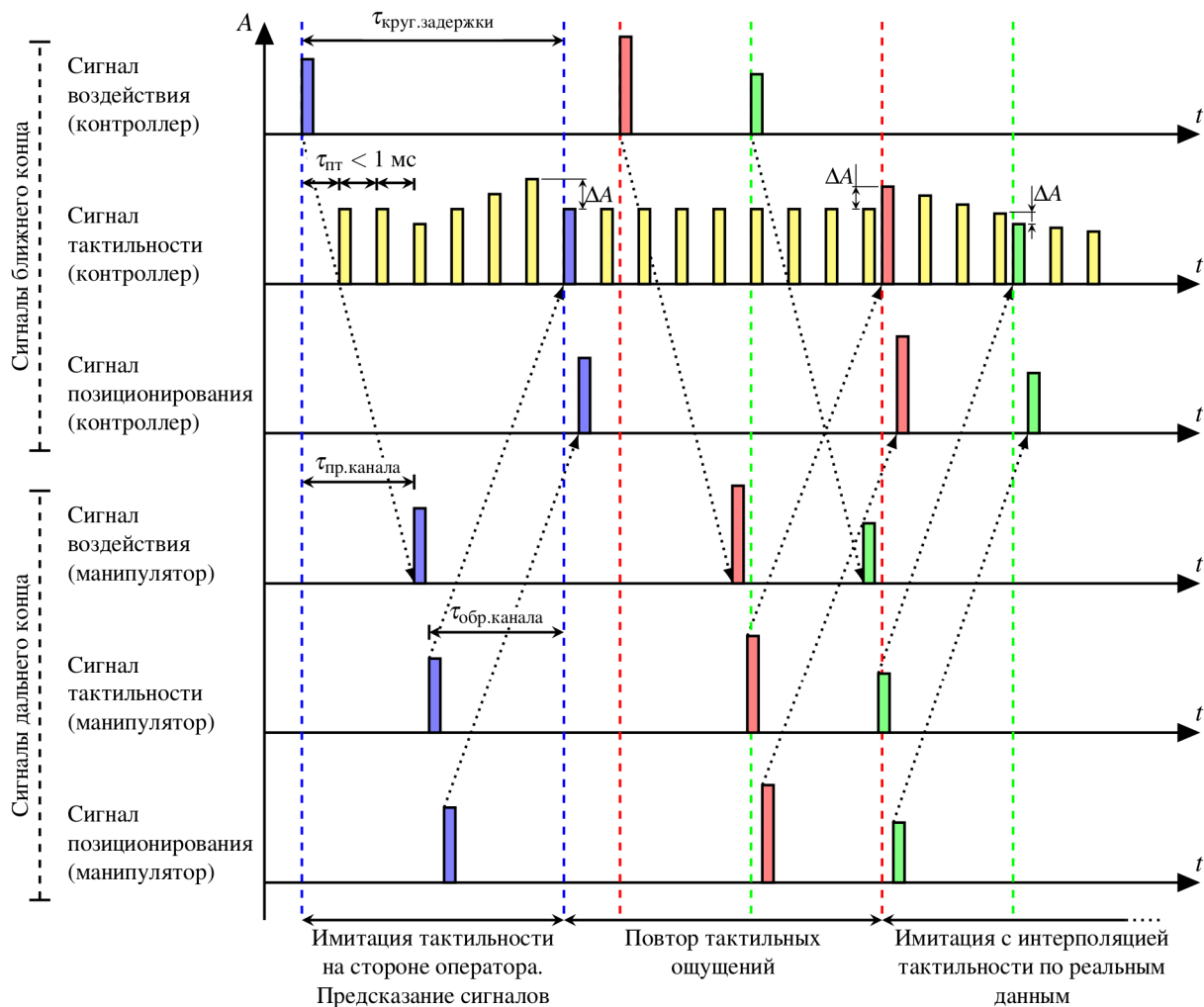


Рисунок 3. Работа механизмов компенсации критичных задержек ТИ.

Таким образом, учитывая абсолютную величину общего времени круговой задержки, и в зависимости от типа решаемой задачи и свойств передаваемых данных или параметров, в качестве механизма компенсации значащих критичных задержек возможно использование следующих вариантов:

1. *Имитация тактильности на стороне оператора.* Для формирования предсказаний ответных сигналов используются известные физические законы в зависимости от свойств передаваемых параметров.

2. *Имитация с интерполяцией тактильности по реальным данным.*
Производится первичное формирование предответного сигнала до прихода реального с последующей реализацией интерполяционного алгоритма для компенсации значимой критичной задержки в периодах ожидания.
3. *Повтор тактильных ощущений.* Предответ и интерполяция не используется, сигнал тактильности появляется с приходом первого от удаленной стороны, компенсация значимой критичной задержки в периодах ожидания производится повтором предыдущего сигнала.

Задача синхронизации данных

Принимая во внимание разнородность передаваемых в системах Тактильного Интернета данных и параметров, в качестве одной из ведущих задач необходимо рассматривать задачу синхронизации данных, — в первую очередь по параметрам, зависимым и синхронным по времени, а также с учетом того, что актуальность даже линейно независимых по событию данных с ходом времени будет теряться или пропадать вовсе.

Способы достижения синхронности известны и планируются к использованию для задач Тактильного Интернета — это синхрометки, кадрирование и контейнерная упаковка данных, поэтому в данной статье уделять им особого внимания не предполагалось. Тем не менее при последующей проработке этот важнейший фактор необходимо учитывать, тогда как количество и характер требуемых исследований по нему покажет ход дальнейшей работы.

Список литературы

1. **Mazuryk T., Gervautz M.** Virtual Reality: History, Applications, Technology and Future. Technical Report TR-186-2-96-06. Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology. — 1996. — 72 p.
2. **Gobbetti E., Scateni R.** Virtual Reality: Past, Present, and Future // Studies in health technology and informatics. — 1998. — Vol. 58. — P. 3–20.
3. **Giraldi G.A., Silva R., Oliveira J.C.** Introduction to Virtual Reality. LNCC Research Report #06/2003. National Laboratory for Scientific Computation. — 2003. — 19 p.
4. **Silva R., Oliveira J.C., Giraldi G.A.** Introduction to Augmented Reality. LNCC Research Report #25/2003. National Laboratory for Scientific Computation. — 2003. — 11 p.
5. **Sachdev S.S., Fuller B.R.** The Shuttle Remote Manipulator System and Its Use in Orbital Operations // The Space Congress Proceedings. 1983 (20th) Space: The Next Twenty Years. Paper 3. — 1983. — P. 29–49.
6. **Kim K., Lee J., Park B., Kim S., Yu S., Ryu D., Han J., Cho I.** Remote manipulator systems for pyroprocessing facility application // 2013 44th International Symposium on Robotics, ISR 2013. — 2013. — P. 1–5. — DOI: 10.1109/ISR.2013.6695644.
7. **Миронов Д.Н., Евдокимов Д.А.** Создание робота-сапера повышенной живучести и проходимости для обнаружения и обезвреживания взрывоопасных предметов // Наука и техника. — 2012. — № 2. — С. 7–10.
8. **Bartnicki A., Sprawka P., Rubiec A.** Remote Control System for Rescue Robot // Solid State Phenomena. — 2013. — Vol. 210. — P. 294–300.
9. The Tactile Internet. Technology Watch report. Geneva : ITU-T, 2014. 24 p.
10. **Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Киричек Р.В.** Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. — 2016. — № 1. — С. 44–46.

11. **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.
12. **Маколкина М.А.** Развитие услуг дополненной реальности в рамках концепции тактильного интернета // Электросвязь. — 2017. — № 2. — С. 36–40.
13. **Maier M., Chowdhury M., Rimal B.P., Van D.P.** The Tactile Internet: Vision, Recent Progress, and Open Challenges // IEEE Communications Magazine. — May 2016. — Vol. 54, № 5. — P. 138–145.
14. Mobile Edge Computing A key technology towards 5G. – ETSI White Paper. — September 2015. — № 11.
15. **Атея А.А., Выборнова А.И., Кучерявый А.Е.** Многоуровневая облачная архитектура для услуг тактильного интернета // Электросвязь. — 2017. — № 2. — С. 26–30.
16. **Ateya A.A., Vybornova A., Samouylov K., Koucheryavy A.** System Model for Multi-level Cloud Based Tactile Internet System // Lecture Notes in Computer Science. — 2017. — Vol. 10372. — P. 77–86.