

ИЗИСКВАНИЯ КЪМ ТАКТИЛНИЯ ИНТЕРНЕТ И ПОДХОДИ ЗА РЕАЛИЗАЦИЯ

Цветелина Симеонова

REQUIREMENTS TO THE TACTILE INTERNET AND APPROACHES FOR IMPLEMENTATION

Tsvetelina Simeonova

Резюме: Цел на настоящата работа е да се очертае спецификата на параметрите на обслужване в мрежите, както и основните технически изисквания при тактилен Интернет, базиран на мобилни мрежи, които са основа за разработването на неговата системна и функционална архитектура, компоненти и взаимодействия в архитектурата. Дадени са приетите интерфейси в мрежата на тактилен Интернет и е направен анализ на протоколи, предложени за използване за тактилен Интернет. Резултатите са свързани с обособяване на особеностите на архитектура, интерфейси и протоколи на тактилен Интернет. Приноси от работата са комплексното разглеждане и анализ относно развитието на тактилен Интернет, като са очертани някои възможни актуални насоки на изследване, както и съществуващи акценти и отворени въпроси.

Ключови думи: тактилен Интернет, изисквания при тактилен Интернет, протоколи за тактилен Интернет.

Abstract: The aim of this paper is to outline the specifics of network service parameters, as well as the basic technical requirements for the tactile Internet based on mobile networks, which are the basis for developing its system and functional architecture, components and interactions in architecture. The accepted interfaces in the tactile Internet network are given and an analysis of protocols proposed for use for tactile Internet is made. The results are related to the differentiation of the features of architecture, interfaces and protocols of the tactile Internet. Contributions from the work are the comprehensive consideration and analysis of the development of the tactile Internet, outlining some possible current directions of research, as well as existing highlights and open questions.

Key words: tactile Internet, requirements for tactile Internet, protocols for tactile Internet

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните мобилни комуникации и тактилният Интернет (ТИ) имат уникални характеристики, но между тях има и съществено припокриване. Основните разлики са най-добре изразени по отношение на базовите комуникационни принципи и на устройствата, осигуряващи функционалността, особено в периферията. 5G поддържа традиционния комуникационен принцип - от човек към човек H2H (Human-to-Human), за конвенционални услуги или за тройна услуга (глас, видео, данни), с нарастваща интеграция с други безжични технологии (най-вече WiFi), децентрализация, както и M2M комуникации. Тактилният Интернет е фокусиран върху комуникацията човек-машина H2M (Human-to-Machine), използвайки хаптични (tactile/haptic) устройства. [1, 2]

По-същественото е, че въпреки спецификата си, 5G и тактилен Интернет, се сближават по отношение на общ набор от важни дизайнерски изисквания:

- много ниска латентност, от порядъка на 1 ms;
- ултрависока надеждност с гарантирана наличност 99,999 % (за определени случаи);
- интеграция на технологии, ориентирани към данни;
- сигурност.

Най-важно е да се осигури ниска латентност "от край до край", както и възможно най-висока надеждност, при реакция в реално време. Трябва да се гарантира сигурността на данните и надеждността на системите, без да се нарушава изискването за ниско закъснение, поради допълнителни закъснения от криптиране [3, 4, 5]. Тези ключови изисквания, свързани с дизайна на тактилния Интернет, могат да бъдат постигнати само чрез поддържане близо до потребителите на локални тактилни приложения, което изисква разпределена (и децентрализирана) архитектура на платформата за услуги, базирана, например, на облачета (cloudlets) и мобилен достъп в периферията. Освен това са необходими мащабируеми процедури на всички протоколни слоеве, за да се намали закъснението "от край до край", от сензорите към изпълнителните механизми (actuators).

Съществено е, че в резултат, при тактилния Интернет се поставят строги изисквания към мрежите за достъп, по отношение на закъснение, надеждност, а също и капацитет (например висока скорост на предаване на данни от видео сензори). Мрежите с кабелен достъп частично отговарят на тези изисквания, но мрежите за безжичен достъп все още не са проектирани да отговарят на тези нужди. Според доклад на ITU-T за тактилния Интернет [1], фокусирането на научните изследвания в тази област е от съществено значение, въвеждайки нови идеи и концепции за отчитане на присъщите за мрежите за достъп разнообразие и резервиране, за да се отговори и на строгите изисквания към приложенията на тактилния Интернет относно латентност и надеждност.

В известен смисъл терминът „Тактилен Интернет“ може да е малко неточно наименование, тъй като усещането за допир (tactile) е само един от двата типа хаптична обратна връзка (haptic feedback), отнасящ се до неща, които човек може да почувства при докосване на повърхността, като натиск, текстура, вибрации, температура. Другият тип хаптична обратна връзка е кинестетична, отнасяща се до сили (напр. гравитация, придърпване), които действат върху „изпълнителен механизъм“ също както на мускулите, ставите и сухожилията на ръка, допринасяйки (заедно с други неща) за усещане с осъзнаване на позицията. И двата типа хаптична обратна връзка са важни за приложенията при работа в мрежа. [6]

Комуникации, включващи единия или и двата вида хаптична обратна връзка, наричаме „хаптична комуникация“ (Haptic Communications).

ТИ е претърпял различни "тълкувания" от различни внедрители, като всеки е имал различни цели за използването на технологията. Приета е следната дефиниция за ТИ (в рамките на IEEE 1918.1): „Мрежа (или мрежа от мрежи) за отдалечен достъп, възприемане, манипулиране или управление на реални или виртуални обекти или процеси, във възприемано от хора или машини реално време.“ [7]

Във връзка с контекста на функциониране и взаимодействията при ТИ, може да се опишат основните аспекти на ТИ. [7]

- Дистанционно осъществяване на физическо взаимодействие - посредством осигуряване на среда от ТИ и обмен на хаптична информация;

- Взаимодействие - може да бъде между хора или машини или хора и машини;

- Терминът „обект“ (в контекста на операция на ТИ) - отнася се до всяка форма на физическа единица (physical entity), вкл. хора. Машините могат да включват роботи, мрежови функции, софтуер или друга свързана единица;

- Физическо взаимодействие на човек в цикъл с тактилна обратна връзка - представлява "двустранна хаптична телеоперация". Целта на ТИ в такива сценарии е хората да не могат да правят разлика между локално изпълнение на манипулативна задача в сравнение с дистанционно изпълнение на същата задача чрез ТИ;

- Еквивалентност - резултатите от физическо взаимодействие на машината в цикъл с тактилна обратна връзка (в идеалния случай) са същите, както ако машината взаимодействат с обект директно или близо до неговото местоположение;

- Категории хаптична информация - тактилна и кинестетична, или комбинация от тях;
 - Тактилна информация е информацията, възприемана от различните механорецептори на човешката кожа, като повърхностна текстура, триене и температура.
 - Кинестетична информация е информацията, възприемана от скелета, мускулите и сухожилията на човешкото тяло, като сила, въртящ момент, позиция и скорост.
 - "Възприемано реално време" - може да се различава за хората и машините и е специфично за всеки конкретен случай.

2. СПЕЦИФИКА НА ПАРАМЕТРИ НА ОБСЛУЖВАНЕ В МРЕЖИТЕ ПРИ ТАКТИЛЕН ИНТЕРНЕТ

С развитието на технологиите и услугите, по отношение на потребителите, изискванията в мрежите за качество на обслужване (QoS) еволюционно се разширяват до изисквания за качество на опита (QoE) и до изисквания за качество на физическото/ потребителското изживяване (QoPE), пряко свързано с TI.[6]

2.1. Ултраниска латентност (Ultra-low latency): Латентността е особено важна за постигането на висока точност в мрежите на TI. Например, максималната латентност, която остава незабелязана от човешките очи, е до 5 ms. За да протича гладко и многомерна комуникация при TI, при този нов принцип се изисква латентност при тактилна обратна връзка "от край до край" дори под 1 ms. Въпреки, че варира в зависимост от случая на използване, като цяло TI предвижда латентност "от край до край" обикновено в диапазона 1-5 ms.

Според ITU-T, латентност (Latency) на мрежата има различен смисъл в различните мрежови равнини - в потребителската равнина означава абсолютно закъснение (забавяне) във времето (delay), а в управляващата равнина означава периода от време за преход от пасивно в активно състояние на управлението (реактивността):

- Латентността на потребителската равнина е закъснението във времето, например, на пакет в радиомрежата (от момента на изпращането от източника, до момента на получаване от получателя), ако се приеме, че мобилната станция е в активно състояние.
- Латентността на управляващата равнина се отнася до времето за преход от пасивно състояние "на празен ход" (idle state, при което има "най-ефективно използване на батерията") към активно състояние (active state, т.е. към началото на "непрекъснат трансфер на данни").

2.2. Ултивисока надеждност (Ultra-high reliability)/ Ултраниска загуба на пакети (Ultra-low packet loss): За критични приложения загубата на информация/пакети означава загуба на надеждност в системата. Освен това, ретранслацията обикновено не е приемлива поради възможно увеличаване на латентността. Следователно, загубата на пакети трябва да се минимизира винаги, доколкото е целесъобразно.

2.3. Ултивисока честотна лента (Ultra-high bandwidth): Изискването за честотна лента е особено важно в случай на дистанционно наблюдение, тъй като увеличаването на обема информация при предаване на видео (от 360 градуса видео до холограми) предизвиква драстично нарастване на необходимата честотна лента. Това се отнася и до разделителната способност на видеото (4K - 8K). Обемът информация се увеличава също

така с броя на потоците. Например, за предаване на VR е необходима пропускателна способност 5 Gbps, а за холограми се увеличава до 1 Tbps.

2.4. Строга синхронизация (Strict synchronization): Човешкият мозък има различно време за реакция при различни сензорни входове (тактилни 1ms, визуални 10ms или аудио 100ms). Сами по себе си, някои потоци (например аудио) могат да позволят малко по-висока латентност от други потоци (например тактилен). Независимо от това, синхронизирането е важно, дори при наличие на свръхниска латентност, тъй като синхронизацията трябва да бъде във времеви мащаб, който е значително по-кратък от латентността.

Освен това мрежата трябва да може да дава приоритет на потоци въз основа на тяхната непосредствена значимост. Например, тъй като визуалното предаване обикновено включва множество изгледи (при многомерна медия), трябва да се има предвид значимостта на всеки от тези различни потоци, като тези с по-голямо значение за изгледа на оператора и съобразно текущата задача, трябва да имат по-висок приоритет.

3. ОСНОВНИ ТЕХНИЧЕСКИ ИЗИСКВАНИЯ ЗА ТАКТИЛЕН ИНТЕРНЕТ, БАЗИРАН НА МОБИЛНИ МРЕЖИ

Интерес представляват изискванията за тактилният Интернет при очакваното масово използване на мобилни мрежи. В тази връзка, в базовия стандарт за 5G, за да може 5G да се използва като надстройка над други мрежи (или комбинации от мрежи), в 5G се разглежда например функционалността URLLC на 5G, както и свързаните изисквания към мобилни мрежи на които стандартът трябва да отговаря. [8, 9, 10].

3.1. Ултраотзивчива свързаност (Ultra-responsive Connectivity): Повечето приложения на 5G изискват латентността "от край до край" (общото закъснение при двупосочно предаване) да бъде от порядъка на около 1 ms. Латентността "от край до край" се отнася до сумиране на:

- времето за предаване, необходимо при изпращане на информацията от сензор/устройство (или човек, в случай на хаптична комуникация) чрез комуникационната инфраструктура към управляващ сървър,
- времето за обработка на информацията в сървъра,
- времето за обработка от различни комуникационни устройства (рутери, комутатори),
- времената за повторно предаване чрез комуникационната инфраструктура обратно към крайното устройство (или човек).

3.2. Ултранадеждна свързаност (Ultrareliable Connectivity): Друго важно изискване за 5G е свръх-надеждната мрежова свързаност, при която надеждността като вероятност се отнася до гарантиране на необходима производителност при дадени системни ограничения и определени условия за определен интервал от време. Например, в сценарий за фабрична автоматизация в интелигентна фабрика се изисква надеждност от около 99,999% при около 1 ms латентност [11].

Едно от потенциалните решения за повишаване на надеждността на приложенията на 5G, е да се използва едновременна успоредна свързаност с множество връзки [12], а също и да се използват множество пътища за свързване (съгласно граф на топологията) за да се избегне единична точка на отказ.

Този подход обаче зависи от динамиката на канала и наличието/достъпността на информация за състоянието на канала CSI (Channel State Information).

Включването на по-високи граници на съотношението сигнал/ шум SNR (Signal-to-Noise Ratio) в бюджета на връзката и използването на по-силно кодиране на каналите също са важни фактори за повишаване на надеждността на комуникационната връзка. Подобряването на надеждността ще помогне също и за намаляване на латентността, поради по-малкия брой резултативни препредавания.

3.3. Разпределена интелигентност в периферията (Distributed Edge Intelligence): Необходимо е да бъдат проучени подходящи техники на изкуствен интелект AI (Artificial Intelligence) или машинно обучение ML (Machine Learning), които да може да бъдат използвани в периферията на безжичните мрежи на ТІ, за да се улесни интерполацията/екстраполацията на човешките дейности и предсказуемостта на кеширане с цел намаляване на латентността "от край до край". Освен това, трябва да бъдат изследвани предсказващи методи за задействане, базирани на AI/ML, за да може да се разшири обхватът на тактилните услуги/приложения.

3.4. Предаване и обработка на тактилни данни (Transmission and Processing of Tactile Data): За да е коректно предаването на тактилна информация през мрежи с пакетна комутиация, са необходими механизми за нейното кодиране. Също така, в съответствие с многомерната природа на човешкото възприятие, трябва да бъде проучен ефективен механизъм за аудио-визуална и тактилна сензорна обратна връзка.

3.5. Сигурност и поверителност (Security and Privacy): Други ключови изисквания на ТІ са сигурността и поверителността, при строги ограничения на латентността. За да се изпълнят тези изисквания, трябва да бъдат проучени техниките, с ниски изчислителни потребности (режийни разходи), отнасящи се за:

- защита на физическия слой,
- защита чрез кодиране,
- надеждни и с ниска латентност методи за идентифициране на легитимни приемници.

4. СИСТЕМНА И ФУНКЦИОНАЛНА АРХИТЕКТУРА НА ТАКТИЛЕН ИНТЕРНЕТ

4.1. Основни принципи

Системната и функционална архитектура на ТІ е дефинирана в рамките на базовия стандарт IEEE 1918.1, с отчитане на случаите на използване и техните изисквания, както и на други основни аспекти.[7, 13, 14]

Архитектурата трябва да бъде консолидирана и модулна, за да може да поддържа широк спектър от случаи на използване на ТІ. Архитектурата трябва да бъде оперативно съвместима с различни опции за мрежова взаимосвързаност, включително кабелни и безжични, съобразно специализирани и споделени мрежови технологии.

За да може да отговори на строгите изисквания, свързани с QoE "от край до край" (E2E), архитектурата трябва да осигурява също така разширени функции за функциониране и управление, като например:

- опростени протоколи за сигнализация,
- разпределен компютинг и кеширане, с възможност за прогнозни анализи,
- интелигентно адаптиране към натоварването и мрежовите условия,
- интеграция с външни доставчици на услуги на приложения ASPs (application service providers).

Архитектурата на ТІ, съгласно IEEE P1918.1, е обобщена на фиг. 1 и фиг. 2, които принципно илюстрират различните начини на взаимосвързаност на мрежови домейн между две тактилни периферии (tactile edges).

➤ Всяка от перифериите се състои от едно или множество тактилни устройства TDs (tactile devices). Съобразно изискванията на даден случай на използване на ТІ, TDs в периферия А комуникират (т.е. обменят тактилна/хаптична информация) с TDs в периферия В, чрез мрежов домейн.

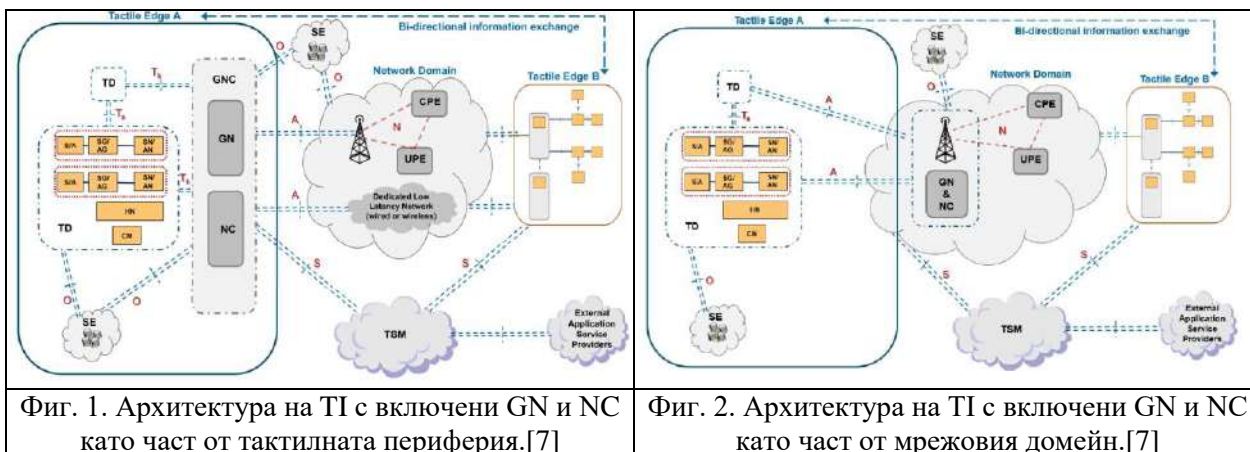
➤ Мрежов домейн може да бъде:

- споделена безжична мрежа (напр. 5G радиодостъп и основна мрежа),
- споделена кабелна мрежа (напр. Интернет основна мрежа),
- специална безжична мрежа (напр. "от точка до точка" връзки с микровълнови или милиметрови вълни),
- специализирани кабелни мрежа (напр. "от точка до точка" наета линия или оптична връзка) [7].

Мрежовият домейн включва точка за радиодостъп или базова станция, свързани логически в мрежовото ядро към обекти на управляващата равнина CPEs (control plane entities) и към обекти на потребителската равнина UPEs (user plane entities) - фиг. 1 и фиг. 2.

Тази гъвкавост на мрежовия домейн обаче се съпътства от големи предизвикателства за постигане на изискванията за качество, при случаите на използване на ТІ. Вследствие на това се изискват иновативни решения и ефективна вградена интелигентност на възлите в тактилната периферия.

Освен това се предполага, че мрежовият домейн е в състояние да осигури адекватно ниво на производителност при определени условия; в противен случай изпълнението на изискванията "от край до край" E2E може да стане невъзможно.



4.2. Компоненти на архитектурата [7]

4.2.1. Тактилно устройство TD (tactile devices): TD може да служи като възел на интерфейс човек-система, който може да преобразува входен сигнал от човек в хаптичен изход. Всяко TD може да поддържа една или няколко от следните функции:

- усещане (sensing),
- задействане (actuation),
- хаптична обратна връзка (haptic feedback),
- управление (control) чрез един или множество съответни обекти (entities).

4.2.2. Сензор (S) или задействащ механизъм/актуатор (A): устройство, което изпълнява съответно сензорни или задействащи функции (без модул за свързаност към мрежата). Тези устройства могат да бъдат от доставчици трети страни, независимо от спецификациите на стандарта IEEE P1918.1.

4.2.3. Сензорен възел SN (sensor node) или задействащ възел AN (actuator node): устройство, което изпълнява съответно сензорни или задействащи функции, и което работи с модул за свързаност към мрежата чрез въздушен интерфейс на IEEE P1918.1. За да се свърже S към SN или A към AN, трябва да се използват шлюзове, съответно за сензор или за задействащ механизъм.

Тези шлюзове осигуряват граничен/общ интерфейс за свързване към сензори и задействащи устройства на трети страни, както и друг интерфейс за свързване към SNs и ANs, съвместим със стандарта IEEE P1918.1.

4.2.4. Възел контролер CN (controller node): TD може също да служи като CN, който изпълнява алгоритми за управление с цел обслужване на работата на система от SN и AN, с необходимия IEEE P1918.1 модул за свързаност към мрежата.

4.2.5. Шлюзов възел GN (gateway node): обект с подобрени мрежови възможности, който се намира в интерфейса между тактилната периферия и мрежовия домейн и изпълнява функции главно за препращането на данни в потребителската равнина (user plane). GN работи съвместно с мрежов контролер NC (network controller).

4.2.6. Мрежов контролер NC: изпълнява функции за обработката на данни в управляващата равнина (control plane), включващи:

- интелигентни функции за контрол на достъпа и претоварването,
- за предоставяне на услуги,
- за мениджмънт и оптимизация на ресурси,
- за мениджмънт на връзката, с цел да се постигне необходимото QoS за дадена сесия на TI.

4.2.7. GN и CN (с общо обозначени GNC): в зависимост от мрежовия дизайн и конфигурация, могат да се намират или от страната на тактилната периферия (фиг. 1), или от страната на мрежовия домейн (фиг. 2). GNC е централизиран възел, с което улеснява оперативната съвместимост за мрежовия домейн (с различните възможни опции). Това е от съществено значение за съвместимостта, например между стандарта IEEE P1918.1 и спецификациите на 3GPP за 5G NR, както и с други нововъзникващи стандарти. Възможността GNC да присъства в мрежовия домейн (например при 5G), означава също и възможност (като опция) за включване на неговата функционалност във функциите за мениджмънт и конфигуриране (orchestration), които вече са там.

4.2.8. Възел за поддръжка SE (support engine): възел, който осигурява както компютинг (изчислителни възможности), така и ресурси за съхранение, с цел подобряване на производителността на тактилните периферии и постигане на изискванията за забавяне (delay) и надеждност (reliability) на комуникациите „от край до край“ E2E.

Предвижда се SE да работи с усъвършенствани алгоритми, използвайки техники на изкуствен интелект, наред с други, за разтоварване на операции по обработка, които са ресурсно и/или енергийно твърде интензивни, за да бъдат извършени в TD (напр.

тълкуване на хаптични сигнали, прогнозиране на траекторията на движение и сензорна компенсация).

Целта е да се даде възможност за възприемане на свързаност в реално време с помощта на предсказуем анализ, като същевременно се преодоляват предизвикателствата и несигурността по пътя между TDs на източника и на местоназначението, динамично да се оценяват мрежовото натоварване и вариациите на скоростта във времето, за да се оптимизира използването на ресурсите и да се даде възможност за споделяне на научения опит за околната среда между различните TDs.

От друга страна, SE също така се предвижда да осигури интелигентни възможности за кеширане, които може да имат съществено въздействие за намаляване на натоварването при обслужване на трафика при връзки "от край до край" E2E, и по този начин за намаляване на закъсненията (delays) при предаване на данни.

SE може да се намира локално в рамките на тактилната периферия, за да подобри скоростта на отговор за заявки от TDs или GNC, и/или може да се намира отдалечено в облака, като същевременно предоставя услуги на тактилната периферия и мрежовия домейн.

От друга страна, SE може да бъде с централизирани или разпределени функции. Всяка от тези опции има своите плюсове и минуси по отношение на забавяне (delay), надеждност (reliability), възможности, цена и практическа осъществимост.

4.3. Взаимодействия в архитектурата на ТИ [7]

➤ Всяка тактилна периферия може да включва множество TDs, които могат да комуникират и сътрудничат помежду си за допълнително подобряване на производителността.

Примерите може да включват директни комуникации от TD до TD без преминаване през GNC или мрежовия домейн, например в случаи на използване, които изискват споделяне на информация между близки TDs.

Това може също така да включва сътрудничество под формата на препредаване/ретранслиране (relaying), по такъв начин, например, TD, което е близо до GNC, може да действа като реле (relay) към друг отдалечен TD за намаляване на закъсненията (delays) при предаване, или под формата на разпределен компютинг за намаляване на закъсненията при обработка.

Тази свързаност от TD до TD е отразена в архитектурата чрез дефиниран интерфейс и ще се менажира от централния GNC възел, тъй като изисква тясна координация и мениджмънт с цел оптимизиране на ползите за производителността.

➤ Комуникациите между двете тактилни периферии могат да бъдат еднопосочни или двупосочни, могат да се основават на модели „клиент-сървър“ (client– server) или „от точка до точка“ (peer-to-peer) и могат да принадлежат към различни случаи на използване, със съответните им изисквания за надеждност (reliability) и забавяне (delay). В тази връзка, мениджърът на тактилни услуги TSM (tactile service manager) играе съществена роля при дефинирането на характеристиките и изискванията на услугата между двете тактилни периферии и в разпространението на тази информация до ключови възли в тактилната периферия и мрежовия домейн. Също така TSM поддържа функции като регистрация (registration) и удостоверяване (authentication), а също и предоставя интерфейс към външни доставчици на приложения ASPs (application service providers) на ТИ.

➤ Приложенията на ТИ могат да се предоставят или като услуги с добавена стойност от мрежовите оператори или като външни услуги от ASPs; в последния случай TDs ще трябва да се абонират и удостоверяват с външни сървъри, за да могат да се стартират и изпълняват съответните приложения и да се иницират сесии "от край до край" E2E.

➤ По отношение на мащабируемост, предложената архитектура може да поддържа повече от две тактилни периферии, комуниращи помежду си през общ мрежов домейн, като част от даден случай на използване на TI.

Две тактилни периферии могат да комунират помежду си през множество мрежови домейни едновременно, което може значително да подобри надеждността поради излишъка (redundancy) и да намали латентността поради разделяне на трафика.

Това е дадено на фиг. 1, където, например, тактилна периферия А може да комунира с тактилна периферия В, използвайки едновременно два интерфейса, домейн на 5G безжична мрежа и специално предназначен (dedicated) домейн на кабелна мрежа с ниска латентност.

Възелът GNC е отговорен за мениджмънта и координирането на разделянето на трафика при такава мултимрежова свързаност, с цел да се оптимизира повишаването на производителността и да се постигне целевото качество на опита QoE.

4.4. Интерфейси в мрежата на TI [7]

Дефинирани са основни интерфейси, които да обслужват взаимодействията между основните обекти в архитектурата на TI (фиг. 1 и фиг. 2). Дефинираните физически интерфейси са следните:

4.4.1. Интерфейс за достъп А (Access): осигурява свързаност между тактилна периферия и мрежовия домейн. Интерфейсът е основната референтна точка за обмен на информация между мрежовия домейн и тактилната периферия, за потребителската и за управляващата равнина. В зависимост от архитектурния дизайн, интерфейсът А може да бъде между TD или GNC, и мрежовия домейн.

4.4.2. Тактилен интерфейс Т (Tactile): Осигурява свързаност между обекти в рамките на тактилната периферия. Интерфейсът е основната референтна точка за обмен на информация между обектите на тактилната периферия, за потребителската и управляващата равнина.

Интерфейсът Т е разделен на два подинтерфейса, Та и Тб, за да поддържа различни режими на свързаност на TD:

- Та се използва за TD-to-TD комуникации,
- Тб се използва за TD-to-GNC комуникации, в случай когато GNC се намира в тактилна периферия.

4.4.3. Отворен интерфейс О (Open): Интерфейсът осигурява свързаност между всеки обект в архитектурата и блока за поддръжка SE (support engine).

4.4.4. Интерфейс за обслужване S (Service): Интерфейсът осигурява свързаност между TSM и GNC, само за управляващата равнина.

4.4.5. Интерфейс от страна на мрежата N (Network Side): Интерфейс от страна на мрежата N е всеки интерфейс, осигуряващ вътрешна свързаност между обектите на мрежовия домейн. Такава функционалност обикновено се покрива като част от стандартите на мрежовия домейн и може да включва подинтерфейси, както за обекти (entities) на потребителската равнина (user plane), така и за обекти на управляващата равнината (control plane).

Заб.:

1. По отношение на изискванията за производителност, постигането на целите за качество на обслужване "от край до край" (E2E QoS) за активни сесии на TI, налага специфични изисквания към всеки от интерфейсите по пътя от източника до дестинацията на TDs.
2. Връзката между изискванията за свързаността "от край до край" и изискванията за всеки интерфейс, е сложна поради статистическата променливост за всеки интерфейс и взаимозависимостта между различните интерфейси.

5. АНАЛИЗ НА ПРОТОКОЛИ, ИЗПОЛЗВАНИ ЗА ТАКТИЛЕН ИНТЕРНЕТ [15, 16, 17]

Тактилният интернет (TI) се очаква да измести принципите на използване на Интернет от предоставяне на съдържание към предоставяне на умения.

За да е възможно това, в IEEE 1918.1 е дадена стандартизацията на TI за реализация и внедряване на различни случаи на използване, включващи различни хаптични приложения. В IEEE 1918.1 се дефинира архитектурата на TI и свързаните елементи и интерфейси.

Стандартът IEEE 1918.1 се счита за наслагване върху 5G и други мрежи. Това наслагване обаче се нуждае от някои възможности за оперативна съвместимост, които не са дефинирани в стандарта и са оставени отворени за операторите, в зависимост от разгърнатите случаи на използване на TI.

Има определени предимства от съвместното използване на 5G и стандарта IEEE 1918.1. 5G с новия радио интерфейс поддържа вертикални приложения, които изискват много ниска латентност и свръхнадеждност. Стандартът IEEE 1918.1 предоставя различни случаи на употреба и приложения за TI.

Като част от TI, хаптичната (Haptic) технология разглежда усещането за физическо докосване и използва механизъм с принудителна хаптична обратна връзка, за да предостави пълноценно интерактивно потребителско изживяване с виртуални/отдалечени обекти, като ги направи осезаеми.

Телехаптичните приложения могат включват и други мултимедийни типове заедно с хаптичните данни. Всеки тип има собствен набор от изисквания за QoS, които трябва да бъдат съгласувани от управлението на мрежата, за да се осигури безпроблемно предаване на непрекъснатата медия. Нарушаването на параметрите на QoS води до лошо възприемане на медията от крайния потребител.

Максимално допустимо еднопосочна латентност и джитер:

Максимално допустимо еднопосочно	Хаптични данни	Аудио	Видео
латентност, ms	30	150	400
джитер, ms	10	30	30

В тази връзка, за мултимедийното приложение е необходимо проектиране на мултиплексор за поддържане на QoS, който във всеки един момент от време препраща само един от конкуриращите се медийни канали към комуникационната връзка, така че всички изисквания за QoS да бъдат удовлетворени.

Типичното телехаптично приложение работи при честота на дискретизация на тактилния сигнал от 1 kHz. Едно от най-важните предизвикателства в такава комуникация е поддържането на обща латентност при двупосочно предаване под 60 ms, в противен случай възникват проблеми, свързани с адекватност на хаптичното възприятие и стабилността на глобалния управляващ контур.

Конвенционалната техника да се избегнат такива проблеми, е да се извърши пакетиране с честотата на дискретизация на хаптичния сигнал, като сигналът се предава в мрежата със

скорост 1000 пакета/сек. От друга страна, включването на множество хаптични проби в един пакет не е възможно поради проблеми с латентността.

В тази връзка, хаптичните протоколи е необходимо да доставят данни при много ниски обхвати на латентност, както и да регулират скоростта на пакетите, без да внасят забележимо влошаване на възприятието, което е необходимо за постигането на ефективна хаптична комуникация на данни между взаимодействащи обекти.

Също така, като цяло, когато се работи с хаптични данни, е важно да се използва подходящ протокол за хаптичното приложение, тъй като протоколът има ключова роля за осигуряване на изискванията за QoS.

Хаптичното взаимодействие изисква едновременно и интерактивно въвеждане и извеждане на данни с хаптичното устройство при значително висока скорост на актуализиране (1 KHz). В идеалния случай тези актуализации трябва да се предават със същата скорост, с която се генерират.

Проектирани са много малко хаптични комуникационни протоколи, тъй като е трудно да се обхванат широко различни изисквания на различните хаптични приложения в един общ протокол.

Като цяло комуникационният протокол служи за две основни цели.

- позволява стандартизиране на комуникацията между участващите крайни точки на мрежата.
- позволява на разработчиците на приложения да избягват повтарящото се внедряване на една и съща функционалност в подобни приложения.

5.1. Използване за ТП на съществуващи протоколи

Съществуващите общи протоколи на транспортния слой (TCP и UDP), които не са специално проектирани за телехаптични приложения, не са подходящи за използване от тях. Разработени са други протоколи на транспортния слой, за да компенсират недостатъците на TCP и UDP:

- Протоколът за синхронно сътрудничество SCTP (Synchronous Collaboration Transport Protocol) и опростеният TCP (Light TCP) използват концепцията за надеждна доставка на пакети на ключови актуализации (с помощта на последователни номера) и ненадеждна доставка на нормални актуализации. Този механизъм за надеждност води до повишена обща латентност в комуникационната система. Smoothed SCTP се основава до голяма степен на SCTP, като осигурява механизъм за изглаждане на джитера.

- Протоколът в реално време за интерактивни приложения RTP/I (Real Time Protocol for Interactive Applications), който е протокол на приложния слой за отдалечени интерактивни приложения, добавя заглавие с дължина 28 байта към всяка хаптична извадка. За типична честота на дискретизация на хаптичния сигнал от 1 kHz, този протокол е крайно неефективен.

5.2. Протоколи, специално проектирани за хаптични приложения

Съществуват и протоколи, които са специално проектирани за хаптични приложения:

- Протоколът на приложния слой за хаптична мрежа ALPHAN (Application Layer Protocol for Haptic Networking) не включва възможността за намаляване на скоростта на пакетите, генерирани от приложението.

- В базирания на възприятието адаптивен хаптичен комуникационен протокол РАНСП (Perception based Adaptive Haptic Communication Protocol) не се вземат предвид времевите вариации на човешкото хаптично възприятие.¹

Тези протоколи за хаптични приложения не извършват подробен анализ на закъсненията при обработката и функционират недостатъчно ефективно.

Протоколът на приложния слой за хаптична комуникация на данни ALPHAN се характеризира с три отличителни характеристики:

- проектиран е на слоя на приложението, за да даде възможност на приложението да дефинира и контролира мрежовите параметри.
- адаптивност с помощта на XML-базирани описания.
- поддържа многобуферни механизми за приоритизиране на информацията.

В областта на мрежовите виртуални среди за TI се използва C-HAVE (Collaborative Haptic Audio Visual Environments) с множество приложения. При използването на приложения C-HAVE трябва да се решат проблеми, както на ниво приложение, така и на ниво комуникация (мрежа):

- на ниво приложение: осигуряване на последователност, контрола на достъпа, прозрачност и стабилност;
- на ниво комуникация: параметри на качеството на услугата (QoS), като латентност на мрежата, джитер, загуба на пакети, мащабируемост и компресия.

Протоколът ALPHAN (Application Layer Protocol for Haptic Networking) е проектиран с оглед на гореспоменатите цели, като предоставя обща рамка, чрез която приложенията C-HAVE могат да комуникират. Протоколът е стратегически поставен в слоя на приложението, което позволява лесното му персонализиране, за да отговори на различните изисквания на приложението.

Параметрите на QoS, свързани със специфично хаптично приложение, са изброени и дефинирани с помощта на XML-базирания HAML формат (като максимално допустимо време за реакция, джитер и загуба на пакети, приоритети на споделени обекти, сигурност, надеждност и наличност). HAML е базиран на XML, технологично неутрален език за описание на хаптични модели и взаимодействия. Протоколът анализира HAML файла и съответно настройва комуникационната сесия. Предполага се, че описанията на HAML се предоставят от самото приложение, което може да включва други аспекти на приложението, като например графични и осезателни модели и изобразяване, описания на хаптични интерфейси и др.

Протоколът ALPHAN работи върху UDP, тъй като последният не налага никакви схеми за надеждност или контрол на потока, които не отговарят на изискванията на приложението C-HAVE.

Протоколът ALPHAN поддържа широко използваната от повечето протоколи на хаптичния комуникационен транспортен слой идея за ключови (с механизъм за надеждност) и нормални актуализации.

ALPHAN използва схема за множествено буферизиране MB (Multi-Buffering), като всеки обект в средата C-HAVE се приписва на изпращащ буфер. Разпределянето на буфер за всеки обект позволява отделяне на предаването на актуализации за различни обекти, особено ако те са независими един от друг или трябва да бъдат приоритизирани въз основа на предпочитанията на потребителя и/или приложението.

¹ Базираният на възприятието адаптивен хаптичен комуникационен протокол РАНСП (Perception based Adaptive Haptic Communication Protocol) използва закона на Вебер за адаптивна извадка от данните, без да се вземат предвид времевите вариации в JND (Just Noticeable Difference) на човешкото хаптично възприятие.

Направена е оценка на производителността на протокола ALPHAN чрез внедряване на приложение за игри C-HAVE, което работи върху ALPHAN.

Много аспекти на протокола се нуждаят от допълнително тестване и оценка, например, оценка на ефективността на протокола в случай на трима или повече сътрудници в средата, както и в медицински приложения като съвместна телехирургия или теле-наставничество.

По отношение на протокола на приложния слой с ниска латентност HoIP (Haptics over Internet Protocol) (усъвършенствана версия) интерес представлява изследването на неговата производителност в концептуален казус за "телеоперация", при доставяне и ефективна обработка на хаптични, аудио и видео данни между две отдалечени периферии, чрез тяхното подходящо мултиплексиране в хибридни съобщения на приложния слой, за да се проучи възможността да се осигури надеждна комуникация, базирана на архитектура IEEE 1918.1 и на 5G NR (5G ново радио) като технология за достъп до мрежата, по отношение на скоростта на предаване и латентността "от край до край" E2E.

Управлението на системата за "телеоперация" изисква ниска латентност "от край до край" (E2E), за да се гарантира стабилна работа на системата и правилна тактилна обратна връзка.

Производителността на протокола HoIP е проучена по отношение на латентността "от край до край" E2E в контекст на телехирургия в кабелна мрежа.

HoIP не нарушава изискванията за качество на услугата (QoS) (базирано на числен анализ и симулации).

Протоколът отговаря на предизвикателствата в телехаптичните приложения.

- HoIP прецизно планира предаването на медийни фрагменти, като гарантира, че нито една медия не претърпява ненужни забавяния и удовлетворява изискванията за QoS.
- Функцията за мултимодална обработка на данни на HoIP създава проста платформа за разработчиците на телехаптични приложения да добавят бъдещи подобрения.
- HoIP предоставя готова за използване мрежова хаптична, аудио и видео среда за провеждане на широк спектър от експерименти за множество телехаптични приложения.

6. СПЕЦИФИКА И ИЗИСКВАНИЯ КЪМ ХАПТИЧНИ КОДЕЦИ

Хаптични кодеци може да се използват в различни сценарии на приложение:

- с човек в контура (например при телеоперации/приложения за отдалечено манипулиране);
- за дистанционно управление на машини, като се дефинират възприети алгоритми за намаляване на данните - в схеми на комуникация при контур с кинестетичен обмен на информация и при контур с тактилен обмен на информация.

Основно предизвикателство в контекста на тактилния Интернет е разработването на семейство стандартни хаптични кодеци, подобно на съществуващите аудио (ITU-T H.264) и видео (ISO/IEC MPEG -4) кодеци [18].

Обхващайки както кинестетична, така и тактилна информация, такова семейство кодеци би било ключов фактор за мащабируемост в периферията на мрежата. Изискванията към хаптични кодеци са [19]:

6.1. Протоколи за удостоверяване (Handshaking Protocols):

Протоколът за удостоверяване трябва да включва синтаксис за заявки, отговори и регистрация.

- Механизмът за заявка инициира комуникация между две хаптични устройства за установяване, контролиране и прекратяване на сесии.
- Механизмът за отговор обработва резултата от получена заявка.
- Механизмът за регистрация предава IP адресна информация на устройствата, която може да се обработва от сървър (или да се излъчва по мрежата, ако връзките са ad-hoc). Освен това той отговаря за възможностите за обмен на мета данни.

6.2. Кинестетични кодеци Kinesthetic Codecs:

Кинестетичните кодеци са разработени да поддържат стабилна и прозрачна за възприемане телеоперация със (или без) забавяне на комуникацията. Кодекът трябва да може да намали скоростта на пакетите, без да внася значително видимо изкривяване, тоест да поддържа прозрачност.

6.3. Тактилни кодеци Tactile Codecs:

Обменът на тактилна информация е по-малко критичен към времето в сравнение с кинестетичния аналог. Следователно предизвикателството на тактилните кодеци се крие в моделирането и компресирането на данни. Структурата на кодека трябва да бъде независима от това как са представени тактилните сигнали. Например, трябва да можем да представим тактилна информация във всяка позиция на повърхността на изследвания обект по отношение на времето като $F(x; y; t)$, където $(x; y)$ дефинира конкретна точка на повърхността. В допълнение, тактилният кодек трябва да изследва пространственото сходство на тактилните стойности между дадена позиция (т.е. едноточкова) и съседните ѝ позиции (многоточкова).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Във връзка с поставената цел са разгледани спецификата на параметрите на обслужване в мрежите при тактилен Интернет, както и основните технически изисквания за тактилен Интернет (също и изискванията към хаптични кодеци), базиран на мобилни мрежи, които са основа за разработването на системна и функционална архитектура на тактилен Интернет. Разгледани са компонентите на архитектурата, взаимодействията в архитектурата на тактилния Интернет. Също така са дадени приетите интерфейси в мрежата на тактилния Интернет и е направен анализ на протоколи, предложени за използване за тактилен Интернет.

На база на комплексното разглеждане и анализ относно развитието на TI, може да се очертаят някои възможни актуални насоки на изследване, както и съществуващи акценти и отворени въпроси:

- закъснението в безжичните връзки в голяма степен се дължи на традиционната централизирана облачно-базирана инфраструктура; това закъснение може съществено да се намали с използването на концепцията за Edge/Fog/MEC компютинг в периферията, така че локалните тактилни приложения да са възможно най-близо до крайния потребител.
- при условията на изискванията за високи скорости на данни и динамично преко конфигуриране на мрежови ресурси, гарантиране на надеждност "от край до край" и удовлетворяване на изискване за под 1 ms латентност в основната мрежа и мрежата за радио достъп (RAN) на 5G мрежите, може да се постигне с концепцията за преход от хардуерно към софтуерно базиран дизайн, с използване на софтуерно дефинирани мрежи SDN и виртуализация на мрежовите функции NFV.
- допълнително подобряване на параметрите, като надеждност и латентност, може да се постигне с използване на специфично, на база разделяне на мрежата (network slicing), персонализиране и изолиране на производителността на ресурсите, което води до по-ефективно предоставяне на възможности на различни приложения и гарантиране на ефективното използване на ресурсите, както на основната мрежа, така и на мрежата за радио достъп.

- при реализацията на ТІ трябва да се имат предвид някои основни компоненти на закъснението (предизвикано на различни протоколни слоеве), като например закъснението при предаване и закъснението от чакане в опашки; за тяхното намаляване са необходими ефективни техники на физическия слой и на MAC-слоя, а също така, за да се намали закъснението "от край до край", на всички протоколни слоеве са необходими мащабируеми процедури.

- за да се отговори на строгите изисквания към приложенията на тактилния Интернет относно латентност и надеждност, е от съществено значение отчитането на присъщите за мрежите за достъп разнообразие и резервиране,

- необходимо е да бъдат проучени подходящи техники на изкуствен интелект AI (Artificial Intelligence) или машинно обучение ML (Machine Learning), които да може да бъдат използвани в периферията на безжичните мрежи на ТІ, за да се улесни интерполацията/екстраполацията на човешките дейности и предсказуемостта на кеширане с цел намаляване на латентността "от край до край". Освен това, трябва да бъдат изследвани предсказващи методи за задействане, базирани на AI/ML, за да може да се разшири обхватът на тактилните услуги/приложения.

- архитектурата на мрежата трябва да бъде консолидирана и модулна, за да може да поддържа широк спектър от случаи на използване на ТІ. Архитектурата трябва да бъде оперативно съвместима с различни опции за мрежова взаимосвързаност, включително кабелни и безжични, съобразно специализирани и споделени мрежови технологии.

- за да може да отговори на строгите изисквания, свързани с QoE "от край до край" (E2E), архитектурата на ТІ трябва да осигурява разширени функции за функциониране и управление, вкл.: опростени протоколи за сигнализация; разпределен компютинг и кеширане, с възможност за прогнозни анализи; интелигентно адаптиране към натоварването и мрежовите условия; интеграция с външни доставчици на услуги на приложения.

- стандартът IEEE 1918.1 може да се счита за "наслагване" върху 5G и други мрежи. Това наслагване обаче се нуждае от някои възможности за оперативна съвместимост, които не са дефинирани в стандарта и са оставени отворени за операторите, в зависимост от разгърнатите случаи на използване на ТІ.

- протоколите за телехаптични приложения трябва да включват възможности за мултимодална обработка на данни и за прецизно планиране на предаването на медийни фрагменти, като се гарантира, че нито една медия не претърпява ненужни забавяния и като цяло удовлетворява изискванията за QoS;

- синхронизирането на данни от различни типове модалности, във всички случаи на използване на ТІ, винаги е от първостепенно значение за качеството на изживяването QoE (quality of experience) на потребителите (синхронизацията трябва да бъде във времеви мащаб, който е значително по-кратък от латентността, т.е. да е с точност в мащаб на наносекунда).

ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ (REFERENCES):

[1] The Tactile Internet: ITU-T Technology Watch Report August 2014. *ITU* [online]. Geneva, 2014 [viewed November 2020]. Available from: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf

[2] СИМЕОНОВА, Цветелина. *Развитие на перспективните технологии в „Интернет на свързаните неща“ IoT (Internet of Things)*. София: Асеневци, 2021. ISBN 978-619-7586-25-1. [СИМЕОНОВА, Tsvetelina. *Razvitie na perspektivnite tehnologii v „Internet na svarzanite neshta“ IoT (Internet of Things)*. Sofia: Asenevtsi, 2021. ISBN 978-619-7586-25-1.]

- [3] ПАСАРЕЛСКИ, Росен и Теодора ПАСАРЕЛСКА. Анализ, мониторинг и контрол на мрежовия трафик в интернет. *Сборник доклади от Годишна университетска научна конференция 03 - 04 юли 2014 г. на Национален военен университет „Васил Левски“: Научно направление „Технически науки“*. Т. 9. Велико Търново: ИК на НВУ „Васил Левски, 2014, с. 53-66. ISSN 1314-1937. [PASARELSKI, R. i T. PASARELSKA. Analiz, monitoring i kontrol na mrezhovia trafik v internet. *Sbornik dokladi ot Godishna universitetska nauchna konferentsia 03 - 04 yuli 2014 g. na Natsionalen voenen universitet „Vasil Levski“: Nauchno napravlenie „Tehnicheski nauki“*. Т. 9. Veliko Tarnovo: IK na NVU „Vasil Levski, 2014, s. 53-66. ISSN 1314-1937.]
- [4] ПЕТРОВ, Георги Костадинов. *Развитие на Интернет и отворените системи*. Ч. 1. София: Авангард Прима, 2017. ISBN 978-619-160-834-8. [PETROV, Georgi Kostadinov. *Razvitiie na Internet i otvorenite sistemi*. Ch. 1. Sofia: Avangard Prima, 2017. ISBN 978-619-160-834-8.]
- [5] IVANOVA, Yoana. Assessment of the probability of cyberattacks on transport management systems. Publication of Union of Scientists in Bulgaria. *International Journal on Information Technologies and Security (IJITS)* [online]. 2018, vol. 10(4), pp. 99-106 [viewed 10 January 2023]. ISSN 1313-8251. Available from: <https://ijits-bg.com/contents/IJITS-No4-2018/N4-10.pdf>
- [6] New Services and Capabilities for Network 2030: Description, Technical Gap and Performance Target Analysis. Focus Group on Technologies for Network 2030. *International Telecommunication Union* [online]. 2019 [viewed November 2020]. Available from: https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Documents/Deliverable_NET2030.pdf
- [7] HOLLAND, O., et al. The IEEE 1918.1 „Tactile Internet“ Standards Working Group and its Standards. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2019, vol. 107(2), pp. 256-279 [viewed January 2023]. ISSN 0018-9219. Available from: DOI 10.1109/JPROC.2018.2885541
- [8] SHARMA, Shree Krishna, Isaac WOUNGANG, Alagan ANPALAGAN, and Symeon CHATZINOTAS. Towards Tactile Internet in Beyond 5G Era: Recent Advances, Current Issues and Future Directions. *IEEE Access* [online]. 2020, vol. 8, pp. 56948 - 56991 [viewed 10 January 2023]. ISSN 2169-3536. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9034103>
- [9] SIMSEK, M., A. AIJAZ, M. DOHLER, J. SACHS, and G. FETTWEIS. 5G-enabled tactile internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* [online]. 2016, vol. 34(3), pp. 460-473 [viewed 18 January 2023]. eISSN 1558-0008. Available from: DOI: 10.1109/JSAC.2016.2525398
- [10] ANTONAKOGLU, K. et al. Toward haptic communications over the 5G tactile internet. *IEEE Communications Surveys Tutorials* [online]. 2018, vol. 20(4), pp. 3034-3059 [viewed 18 January 2023]. eISSN 1553-877X. Available from: DOI: 10.1109/COMST.2018.2851452
- [11] LI, C. et al. 5G-based systems design for tactile internet. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2019, vol. 107(2), pp. 307-324 [viewed 18 January 2023]. eISSN 1558-2256. Available from: DOI: 10.1109/JPROC.2018.2864984
- [12] YILMAZ, O. N. C. et al. Analysis of ultra-reliable and low-latency 5G communication for a factory automation use case. *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)* [online]. 2015, pp. 1190-1195 [viewed 18 January 2023]. ISSN 2164-7038. Available from: DOI: 10.1109/ICCW.2015.7247339
- [13] Tactile Internet. *IEEE Standard 1918.1. Standards Working Group* [online]. July 2016 [viewed 18 January 2023]. Available from: <http://ti.standards.comsoc.org>
- [14] Tactile Internet. *Standard IEEE 1918.1. Project Authorization Request, Standards Working Group* [online]. January 2016 [viewed 18 January 2023]. Available from: <https://development.standards.ieee.org/get-file/P1918.1.pdf?t=88785900003>
- [15] GOKHALE, V., S. CHAUDHURI, and O. DABEER. HoIP: A Point-to-Point Haptic Data Communication Protocol and Its Evaluation. *Twenty First National Conference on Communications (NCC)* [online]. March 2015. [viewed 18 January 2023]. ISBN 978-1-4799-6619-6. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7084908>
- [16] MONNET, W. and T. YAHIYA. HoIP Performance for Tactile Internet over 5G Networks: A Teleoperation Case Study. *11th International Conference on Network of the Future (NoF)* [online]. October 2020 [viewed 18 January 2023]. ISBN 978-1-7281-8055-7. Available from: DOI: 10.1109/NoF50125.2020.9249097
- [17] OSMAN, H. A., M. EID, and A. El SADDIK. Evaluating ALPHAN: A Communication Protocol for Haptic Interaction. *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* [online]. 31 March 2008 [viewed 18 January 2023]. ISBN 978-1-4244-2005-6. Available from: DOI: 10.1109/HAPTICS.2008.4479972
- [18] SARATHCHANDRA, C., K. HAENSGE, S. ROBITZSCH, M. GHASSEMIAN, and U. OLVERA-HERNANDEZ. Enabling Bi-directional Haptic Control in Next Generation Communication Systems: Research, Standards, and Vision. *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)* [online]. 28 January 2022 [viewed 18 January 2023]. eISBN 978-1-6654-2349-6. Available from: <https://arxiv.org/pdf/2104.04297.pdf>
- [19] TACTILENet, Towards Agile, efficient, autonomous and massively Large Network of things. *European Commission. CORDIS EU Research Results* [online]. [viewed 18 January 2023]. Available from: <https://cordis.europa.eu/project/id/690893>

Информация за автора:

ас. д-р инж. Цветелина Симеонова, НБУ, департамент "Телекомуникации", ул. Монтевидео № 21, Тел.: 02 8110609, tsvsimeonova@nbu.bg

Contacts:

Assist. Prof. Tsvetelina Simeonova, PhD, New Bulgarian University, Department "Telecommunications", Tel.: 02 8110609, e-mail: tsvsimeonova@nbu.bg

Дата на постъпване на ръкописа (Date of receipt of the manuscript): 15.02.2022

Дата на приемане за публикуване (Date of adoption for publication): 30.09.2022