

# Латентност на мобилната мрежа при управление на сервизен робот в здравеопазването

Искрен Върбанов  
NRAIL, Институт по Роботика  
Българска Академия на Науките  
София, България  
iskren@robotics.bg

Георги Ангелов  
NRAIL, Институт по Роботика  
Българска Академия на Науките  
София, България  
george@robotics.bg

Ясен Паунски  
NRAIL, Институт по Роботика  
Българска Академия на Науките  
София, България  
yasen@robotics.bg

**Резюме:** При разработката и реализацията на управление на сервизен робот за здравеопазването, основен проблем е реализацията на управление, което е да работи без компромис по отношение на надеждност и ефективност. Тези изисквания налагат да се разработят и използват достатъчно надеждни средства в комуникационния, които да осигурят двупосочно взаимодействие в реално време. Тази статия представя изследване на латентността на връзката през мобилните оператори при различни поколения мрежи.

**Ключови думи** - мобилни мрежи, 5G, сервизен робот, латентност

## I. ВЪВЕДЕНИЕ

При проектирането на даден сервизен робот за здравеопазването се избира комбинация от контролни модули, според обработката на сигналите от необходимите сензори, нужните комуникационни адаптери, управлението на задвижващите системи и манипулатори.

Всяка промяна (събитие) трябва да бъде регистрирана от робота и това да породи отговор, който включва последователност от процедури. Този отговор трябва да бъде своевременен.

Като цяло управлението на сервизните роботи е възможно в следните режими:

- Ръчно управление: чрез джойстик/клавиатура и видео обратна връзка от камерата - този режим има най-високите възможни изисквания за латентност. Голямото закъснение може да доведе до невъзможност за изпълнение на задачите или дори до колизии.
- Полуавтономно управление: Операторът задава дестинации чрез картата, като се използва навигационният стек ROS, като за някои операции може да е необходимо ръчно управление. За предпочитане е бърза комуникационна връзка с ниска латентност.
- В напълно автономен режим: операторът определя целта, а роботът самостоятелно изпълнява всички необходими стъпки за изпълнение на задачата. В този режим зависимост от приложението и изискванията за предаване на телеметрията на

робота, изискванията за комуникация в реално време могат да бъдат занижени.

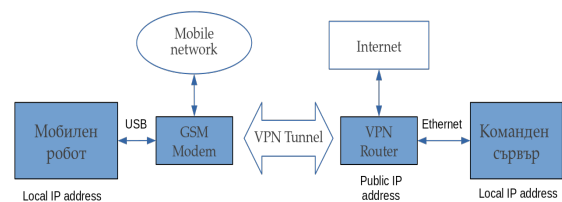
Ниската латентност с една от най-важните характеристики на последните поколения мобилни мрежи (4G, 5G). По стандарт латентността при 5G може да достигне до една милисекунда [1], но реалистичните оценки са за стойности около 1-20 ms [2]. В тази статия описваме метода, който разработихме за измерване на латентността на връзката за управление на сервизен робот, както и инструментите, използвани при реализацията му.

Анализирахме резултатите, получени в 4G/5G мрежи, и направихме сравнителна таблица.

## II. МЕТОД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ЛАТЕНТНОСТТА

### A. Схема

Опитната установка за проверка на параметрите латентност и скорост на връзката, които могат да се постигнат от различните мобилни оператори е показан на фиг. 1.



Фиг. 1. Блок схема на опитната установка за измерване.

Тя се състои от :

- Сервизен робот свързан към интернет чрез мобилна мрежа с помощта на едно от двете комуникационни устройства мобилен модем или смартфон;
- Командния сървър е разположен в дейта център, свързан с основната национална peering-ва мрежа, като така се постига латентност на порядъци по-ниска от латентността на мобилните мрежи;
- Софтуерен VPN (Virtual Private Network) тунел с ниска латентност гарантира че сервизния робот и

командния сървър се намират в един мрежови сегмент;

### *B. Сервизен робот*

За това изследване използвахме робот, разработен в нашата лаборатория. Той представлява четириколесна мобилна платформа, която може да се надгражда с необходимите манипулатори за извършване на определени задачи в здравеопазването и има възможност за дистанционно наблюдение. Той има възможност да работи в режим на ръчно управление, както и в полуавтоматичен режим с възможност за само навигация. Роботът работи под операционна система ROS (Robot Operating System) инсталиран на сингъл борд компютър Raspberry Pi 4. Той използва 2,4GHz/5GHz Wi-Fi модул с външна антена за локална комуникация [3]. За отдалечена комуникация използваме USB модем за мобилна мрежа. Това решение позволява управлението на работи в отдалечени райони чрез мобилните мрежи.

### *C. Комуникационни устройства*

Устройство 1: 4G LTE модем Huawei E3276 Cat 4 LTE модем с параметри:

- Комуникационен чипсет: HiSilicon Chipset Hi9620
- Максимална скорост на изтегляне: 150 Mbps,
- Максимална скорост на качване: 50Mbps;
- 4G LTE Band 1/3/7/8/20 FDD (800/900/1800/2100/2600 MHz)
- 3G UMTS 900/1900/2100 MHz - DC-HSPA+ at up to 43.2 Mbit/s
- GSM 850/900/1800/1900 MHz
- Външни антени: CRC-9 with 2x2 MIMO Support.

Устройство 2: Смартфон Mi 11 Lite 5G произведен от фирмата Xiaomi, изграден на базата на Snapdragon 778G 5G Mobile Platform на фирмата Qualcomm със следните комуникационни спецификации [4]:

- Комуникационен чипсет: Snapdragon® X53 базиран 5G модем-RF система;
- Максимална скорост на изтегляне: до 3,7 Gbps;
- Максимална скорост на качване: до 1,6 Gbps;
- Спецификации на клетъчния модем-RF: 100 MHz честотна лента (под-6 GHz), 400 MHz честотна лента (mmWave).
- -Работи се с клетъчна технология: 5G NR, HSPA, под-6GHz, споделяне на динамичен спектър (DSS), CDMA1x, EVDO, LTE поддръжка за CBRS, LTE, GSM/EDGE, WCDMA, mmWave.

### *D. Софтуерни компоненти*

#### 1. „Netperf“

Програмният пакет „Netperf“ спада към категорията мрежови измерителни инструменти. Той може да се използва за изследване и оценяване на различни аспекти на мрежовата производителност. Основните фокуси са групов (известен още като еднопосочен) трансфер на данни и производителност на заявка/отговор, използвайки TCP или UDP [5]. Netperf е инструмент, който измерва производителността на мрежа или система.

Той може да измерва производителността на различни мрежови протоколи TCP, UDP и SCTP, както и пропускателната способност, латентността, загуба на пакети и други показатели.

Той е проектиран да се използва като инструмент за сравнителен анализ, позволяващ на потребителите да измерват как се представя тяхната мрежа или система спрямо други системи и мрежи.

Може да се използва за измерване на производителността на локални мрежи (LAN), широкообхватни мрежи (WAN) и безжични мрежи.

Също така е изключително полезен за измерване на производителността на защитни стени, рутери и други мрежови устройства, както и за отстраняване на проблеми и оптимизиране на производителността на мрежи и системи.

В сравнение с ping, който използва ICMP за измерване на закъснението, netperf позволява по-голяма гъвкавост със своите опции, а и е за предпочитане да се използва TCP пред ICMP. TCP е по-често използван случай и следователно има тенденция да бъде по-представителен за приложения от реалния свят [5].

2. Програмни инструменти на ROS за измерване на латентността

Rostopic е софтуерен инструмент на ROS, който може да предоставя информация за отстраняване на грешки по ROS темите (topic), както и да дава информация за съобщенията, податели, абонати. Rostopic delay връща разлика от времето на създаване на съобщението, което се записва в хедъра му и времето на ROS мастера при публикуване му по темата [6]. Това ни позволява с точност да определим времето на забавянето на командата от софтуера за управление на робота на командния сървър до даден контролер на робота. За да получим коректни данни ни е нужна синхронизация на времето на контролния център и ROS ядрото.

#### 3. „Chrony“

Програмният инструмент „Chrony“ е NTP (Network Time Protocol) клиент и сървърен пакет за UNIX-подобни системи [7]. Той е проектиран да осигурява точна синхронизация на времето както за клиенти, така и за сървъри и може да работи на системи без външна справка за време, като например GPS или радио часовник. Chrony може да се използва и за синхронизиране на времето с други системи в мрежа или през Интернет.

Той е проектиран да бъде надежден, сигурен и бърз и предлага функции като: автоматично синхронизиране на времето между сървъри и клиенти; поддръжка на множество източници на време и протоколи, като NTP и PTP; възможност за регулиране на времето въз основа на скоростта на отклонение на системния часовник; поддръжка за регистриране и отстраняване на грешки.

#### 4. VPN (виртуална частна мрежа)

За управлението на робота и провеждане на измерванията е необходимо робота и управляващия сървър да се намират в един и същ мрежови сегмент. Мобилните оператори не предлагат статични IP адреси на своите потребители, за това се налага да използваме VPN

връзка, за да може контролният център и ROS-ядрото да са в една мрежа.

Отделен мрежов маршрутизатор, MIKROTIK NAP AC LITE (архитектура MIPSBE, процесор QCA9531/650Mhz, безжична максимална скорост на предаване на данни 300 Mbit/s/433 Mbit/s)[8], създава виртуална мрежа между мобилния робот и командния сървър.

Виртуалната частна мрежа (VPN) позволява на отдалечен потребител да се свърже чрез публична инфраструктура (интернет) до частна мрежа имайки отдалечен достъп до всички нейни услуги и ресурси. VPN е частен и защитен тунел за връзка, по който цялата комуникация е криптирана.

За реализация на VPN мрежата е използван Point to Point Tunnel Protocol (PPTP), който има висока скорост и добра софтуерна поддръжка от различните операционни системи.

Управлението на мобилния робот е реализирано под ОС „Debian“, която осигурява отлична поддръжка на различните видове модеми за мобилна връзка и мрежови протоколи за комуникация. При включването на робота ОС осигурява автоматично активиране на мобилната връзка и свързване към виртуалната мрежа. На командния сървър е инсталиран софтуера за управление на робота и различни мрежови инструменти за анализ на мрежовата свързаност.

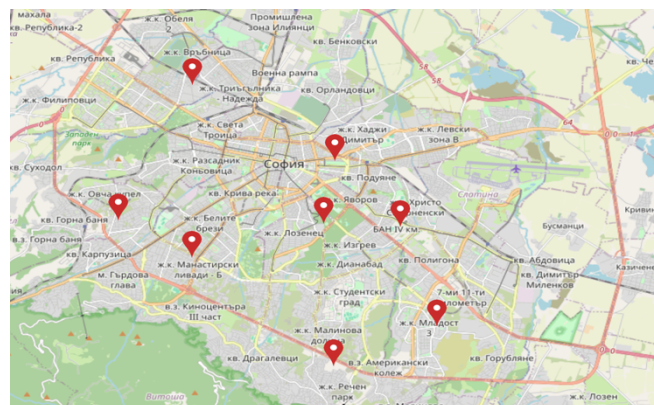
#### Е. Метод на измерване

С помощта на мрежовия инструмент „Netperf“ измерваме латентността на връзката в двете посоки между мобилния робот и командния сървър. При измерването на латентността на връзката се използва изкуствен мрежов трафик под формата на отделни пакети с фиксирана големина и интервал между тях. Софтуера „Netperf“ използва клиент-сървър комуникация която позволява прецизно да се измери време закъснението във всяка една посока, като същевременно се извършва статистическа обработка на получените данни. Това ни дава възможност да получим точна информация за латентността на връзката, нейната средна стойност, гранични стойности и стандартното отклонение на измерването.

Наличието на инструмент в ROS за измерване на латентност позволи да получим втори независим набор от измервания. Измерването на реалната латентност на връзката за управление на мобилния робот става в среда на операционната система ROS и чрез нейния софтуерен инструмент „rostopic“. Преди старта на измерването се извършва синхронизация на часовниците на робота и сървъра със софтуера Chrony, като за целите на измерването е необходимо отклонението между двата системни таймера да бъде под 1ms. В началото на измерването стартираме изпращането на командни пакети за управление към сервизния робот, като всеки пакет е маркиран с времеви код (timestamp). При получаването на данните в сервизния робот се изчислява време закъснението на отделните пакети на базата на времето за изпращане и получаване. Софтуера също така извършва статистическа обработка на получените данни, което позволява да получим точна оценка на реалната латентност на канала за управление в ROS среда.

Измервания бяха направени и за трите мобилни оператора за 3G, 4G и 5G мобилна връзка, като с

устройство 1 (не поддържащо 5G) за 3G и 4G. За да бъдат сравними получените данни измерванията бяха направени на различни локации в София. (Фиг.2) отговарящи на изискването нивата сигнала на и на трите оператора да е в рамките на добър/много добър.



Фиг.2 Локации на измерванията

За 3G мрежи това съответства на RSCP (Received Signal Code Power) в диапазона от -70dbm до -80dbm, а за 4G и 5G мрежи, нива на RSRP (Reference Signal Received Power) в диапазона от -80dbm до -90dbm [9].

### III. РЕЗУЛТАТИ

Получените резултати за средни стойности на латентността и средно квадратичните им отклонения за Uplink и Downlink каналите представени в таблици I, II и III, съответно за трите мобилни оператора. Резултатите са представени и в обща сравнителна графика на фиг. 3.

Таблица I. РЕЗУЛТАТИ ОТ МОБИЛЕН ОПЕРАТОР 1

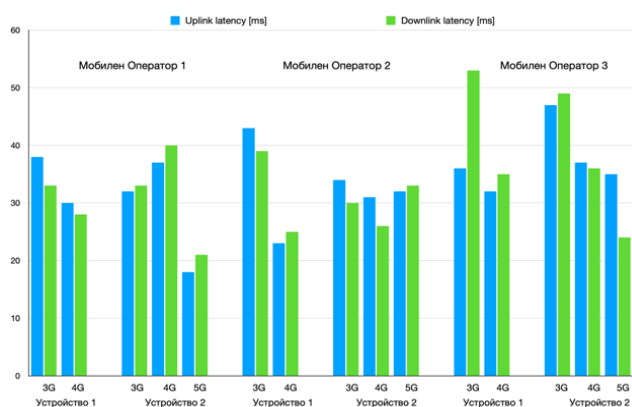
Устройство /мрежа	Латентност					
	Uplink [ms]	Uplink std. dev.	Down link [ms]	Down link std. dev.	ROS Down link [ms]	ROS Down link std. dev.
уст.1 /3G	38	7	33	8	26	7
уст.1 /4G	30	3	28	4	25	4
устр.2 /3G	32	7	33	8	34	8
устр.2 /4G	37	3	40	4	42	4
устр.2 /5G	18	7	21	8	25	7

Таблица II. РЕЗУЛТАТИ ОТ МОБИЛЕН ОПЕРАТОР 2

Устройство /мрежа	Латентност					
	Uplink [ms]	Uplink std. dev.	Down link [ms]	Down link std. dev.	ROS Down link [ms]	ROS Down link std. dev.
уст.1 /3G	43	3	39	3	41	4
уст.1 /4G	23	2	25	2	27	3
устр.2 /3G	34	7	30	6	35	7
устр.2 /4G	31	4	26	3	33	6
устр.2 /5G	32	6	33	6	38	8

ТАБЛИЦА III. РЕЗУЛТАТИ ОТ МОБИЛЕН ОПЕРАТОР 3

Устройство /мрежа	Латентност					
	Uplink [ms]	Uplink std. dev.	Down link [ms]	Down link std. dev.	ROS Down link [ms]	ROS Down link std. dev.
уст.1 /3G	36	10	53	13	53	5
уст.1 /4G	32	8	35	8	37	3
устр.2 /3G	47	19	49	11	49	7
устр.2 /4G	37	8	36	7	36	5
устр.2 /5G	25	5	24	6	30	6



Фиг. 3. Графично представяне на резултатите

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на изследователския процес и извършените експериментални измервания бяха направени няколко основни заключения:

- И двата метода на измерване показват сходни резултати и стандартни отклонения.
- Реално постижимата латентност на връзката на мобилната мрежа от пето поколение (5G) в България все още не са значително по-добра от тези на предишното поколение 4G.
- Въпреки, че измерваната латентност показва относително широки граници на вариабилност, във всички случаи максималната стойност не надвиши 50ms и в двете посоки. Това позволява стабилно управление на работа дори в ръчен режим.

- Получените експериментални резултати послужиха като отлична основа за оценка на текущото ниво на развитие на мобилните мрежи в България.
- Създадените в процеса на работа методика и набор от апаратни и програмни средства за измерване, могат да бъдат използвани като база за нови разширени бъдещи изследвания. Методиката позволява провеждане на измервания и на други мобилни оператори, различни зони на покритие, както и оценка на ефективността на различни конфигурации от комуникационни устройства, антени и комуникационни протоколи.

#### БЛАГОДАРНОСТ

АВТОРИТЕ БЛАГОДАРЯТ ЗА ФИНАНСОВОТО ПОДПОМАГАНЕ НА ПРОЕКТА С АДМИНИСТРАТИВЕН ДОГОВОР № КП-06-Н57/8 ОТ 16.11.2021 Г. „МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ФУНКЦИОНАЛНИТЕ ПАРАМЕТРИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МОБИЛЕН КОЛАБОРАТИВЕН СЕРВИЗЕН РОБОТ АСИСТЕНТ В ЗДРАВЕОПАЗВАНЕТО“, ФИНАНСИРАНА ПО „КОНКУРС ЗА ФИНАНСИРАНЕ НА ФУНДАМЕНТНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ – 2021 Г.“ ОТ ФОНД НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ БЪЛГАРИЯ.

#### РЕФЕРЕНЦИИ

- [1] Mike Wood, Assessment and impact of Electromagnetic Energy associated with 5G, 2018
- [2] Reiner Ludwig, Who cares about latency in 5G?, <https://www.ericsson.com/en/blog/2022/8/who-cares-about-latency-in-5g>
- [3] Rasbberypi Datasheet, <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>, pp6-7.
- [4] <https://www.qualcomm.com/products/mobile/snapdragon/smartphones/snapdragon-7-series-mobile-platforms/snapdragon-778g-5g-mobile-platform>
- [5] Netperf, <http://www.cs.kent.edu/~farrell/dist/ref/Netperf.html>
- [6] ROS, <https://wiki.ros.org/rostopic/>
- [7] Chrony, <https://chrony.tuxfamily.org/>
- [8] MikroTik, <https://mikrotik.com/product/RB952Ui-5ac2nD>
- [9] Richard Rudd, Selcuk Kirtay, Coverage thresholds for 5G services, 2021 Plum Consulting