

Navigace záchranných složek v reálném čase s prvky rozšířené reality v sítích 5G

Utilizing AR devices for real-time navigation of emergency services within 5G networks

Kryštof Zeman, Martin Štůsek, Pavel Mašek, Petr Mlýnek

zemank@vut.cz

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně

DOI: -

Abstract: Utilization of augmented reality within the emergency services presents a unique innovation for mission time reduction and increases the safety of the field units. The utilization of smart headsets, together with the integration of 5G communication networks, empowers us to implement scenarios where additional information is not only shared between the field units but can also be shared with the whole rescue team and its remote leader or command center. This paper is dedicated to (i) a comprehensive overview of selected smart glasses, (ii) a definition of real-time communication parameters based on measurements performed with the HoloLens 2, and (iii) measurements of 4G and 5G SA (standalone) network parameters required by the real-time emergency services navigation systems. The results gathered from private 5G SA infrastructure confirm the suitability of 5G heterogeneous systems for augmented/mixed reality scenarios, where it is necessary to keep round trip time under 25ms. Furthermore, even though the 100 Mbps median of 5G aggregated uplink throughput presents a moderate upgrade, the 800 Mbps measured for downlink indicates a significant gain compared to predeceasing mobile networks.

Navigace záchranných složek v reálném čase s prvky rozšířené reality v sítích 5G

Kryštof Zeman, Martin Štůsek, Pavel Mašek, Petr Mlýnek

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně
Email: zemank@vut.cz

Abstrakt – Využití prvků rozšířené reality pro systémy integrovaných záchranných složek představuje zcela zásadní inovaci pro urychlení zásahu a zvýšení bezpečnosti zasahujících složek. Využití chytrých brýlí a integrace komunikačních technologií 5. generace umožňuje realizaci scénářů, kdy jsou dodatečné informace nejen zobrazovány jednotlivým hasičům, ale je možné veškerá data sdílet mezi všemi členy záchranného týmu a s velitelem zásahu, který celý zásah vzdáleně monitoruje. V tomto článku je pozornost soustředěna na: (i) detailní popis vybraných chytrých brýlí, (ii) definici komunikačních parametrů pro přenosy v reálném čase na základě praktických měření s brýlemi Hololens 2 a (iii) měření komunikačních parametrů sítí 4G a 5G SA (standalone) pro účely navigace záchranných složek v reálném čase. Výsledky z měření v privátní 5G SA infrastruktuře potvrzují vhodnost 5G heterogenních systémů pro použití v rámci smíšené/virtuální reality, kdy latence při měření obousměrného zpoždění nepřesáhla 25 ms. Medián agregované propustnosti 5G systému ve směru uplink s hodnotou 100 Mb/s představuje mírný posun, nicméně ve směru downlink bylo dosaženo propustnosti až 800 Mb/s, což indikuje výrazný nárůst v porovnání s předchozími generacemi mobilních sítí.

1 Úvod

Vývoj komunikačních technologií pro bezdrátový přenos dat akceleruje řadu odvětví. Jedním z nich jsou složky IZS (integrovaného záchranného systému), konkrétně hasičských záchranných sborů. Přestože je princip hasičských zásahů obdobný již řadu let, prvky rozšířené a virtuální reality nabízí možnosti výrazného zrychlení zásahu a zároveň umožňují zvýšení bezpečnosti hasičů v místě zásahu. Umístění displeje, tzv. HMD (head-mounted display) v rámci ochranného obleku/helmy záchrannáře (hasiče) primárně slouží ke zvýšení rychlosti navigace, například v případech, kdy je místo zásahu zahaleno kouřem a orientace v prostoru pouze na základě zraku není možná. Navigace záchrannáře probíhá pomocí vizualizace dodatečných prvků skrze HMD, kdy se jedná o výrazné zrychlení v porovnání s předchozími způsoby navigace, které vycházely pouze ze stovební dokumentace a (evakuačních) plánů budovy [1], [2].

Integrace prvků rozšířené reality AR (augmented reality) je realizována pomocí konceptu chytrých brýlí, které pomocí HMD umožňují přidání dodatečných objektů do

reálné scény. Přestože mají současná řešení chytrých brýlí řadu omezení, je zde vidět výrazný technologický vývoj. V případě prvních verzí chytrých brýlí byla klíčovým nedostatkem pro nasazení v případě venkovních zásahů nízká úroveň jasu. Nicméně současná verze již disponují úrovní jasu až 2000 nitů. Hlavní výzvou tak představuje synchronizace mezi všemi členy záchranného sboru a také rozměry zařízení, které musí být dostatečně kompaktní, aby bylo možné uvažovat integraci v rámci ochranného oděvu/helmy.

Možnost bezdrátového přenosu v reálném čase umožňují nově nastupující heterogenní komunikační technologie v rámci mobilních sítí 5. generace (5G). V porovnání s tzv. „legacy“ mobilními sítěmi 2G, 3G, či 4G jsou sítě 5G navrženy s cílem zvýšení přenosových rychlostí a zejména výrazného snížení komunikačního zpoždění (latence) [3], [4]. Zlepšení je dosaženo: (i) alokací větší šířky pásma pro datové přenosy ve frekvenčním spektru, (ii) využitím nově definovaných frekvenčních pásem, např. 3,4 GHz - 3,8 GHz či 24,25 GHz - 27,5 GHz a (iii) navýšením počtu základnových stanic a tím snížení komunikační vzdálenosti v rádiovém prostředí [5].

Pro ověření teoretických předpokladů je v tomto článku proveden rozbor aktuálně dostupných chytrých brýlí, kdy jsou vlastnosti jednotlivých zařízení diskutovány zejména pro použití v případě složek IZS. Následně je provedeno reálné ověření komunikačních parametrů (zpoždění) v případě chytrých brýlí Hololens 2. Získané hodnoty jsou dále diskutovány z pohledu požadavků na mobilní infrastrukturu, kdy jsou uvedeny komunikační parametry mobilních sítí od jednotlivých telekomunikačních operátorů v České republice. Jelikož jsou v současné době dostupná data zejména pro sítě 4G a 5G v režimu NSA (non-standalone) bylo přistoupeno k doplňujícím měřením v privátní infrastruktuře 5G SA (standalone), ke které mají autoři přístup.

Získané výsledky potvrzují teoretické předpoklady pro nasazení prvků rozšířené reality v případě hasičských zásahů, kdy:

- Aktuálně dostupné chytré brýle nabízí bezdrátovou konektivitu pro přenos dat v bezlicenčním (standardy IEEE 802.11x) či licenčním (mobilní sítě 4G) frekvenčním spektru s variabilním datovým tokem.
- Tzv. „legacy“ mobilními sítě nedosahují komunikačních parametrů (přenosová rychlost, komunikační zpoždění), které jsou vyžadovány pro synchronizaci v reálném čase.

- Využití mobilních sítí 5G SA v pásmu „C-band“ umožňuje dosažení agregované přenosové rychlosti ve směru Uplink (od zasahující jednotky směrem k centrále) až 100 Mb/s s dedikovaným komunikačním zpožděním nižším než 25 ms.

2 Technické požadavky

Pro využití rozšířené reality v rámci záchranných složek bylo nutné definovat technické požadavky pro samotná zařízení a pro přenosovou síť. Většina požadavků se odvíjí od prostředí, ve kterém budou zařízení pracovat – tedy venkovní prostory, kde lze očekávat sníženou dostupnost vysokorychlostních sítí. Dále se odvíjí od vnitřních prostor budov, kde naopak mohou být tyto sítě lépe dostupné, avšak stále se bude jednat primárně o bezdrátové mobilní sítě v podobě např. femtocell buněk. Vnitřní prostory také zamezují použití lokalizačních technologií GNSS (global navigation satellite system) což vede zařízení k využívání podpůrných mechanismů pro lokalizaci v rámci mobilních sítí, případně k lokalizaci výhradně pomocí AR zařízení.

Prvním klíčovým požadavkem na výsledné zařízení je možnost jeho propojení s dohledovým/velicím centrem. Pro tuto komunikaci lze předpokládat bezdrátové spojení přenášející polohu nasazených jednotek v reálném čase + volitelné služby přenosu hlasu a obrazu. Dle charakteru zásahů se může lišit četnost této komunikace, nicméně lze předpokládat, že minimálně 50 % z času zásahu bude probíhat komunikace směrem od zařízení či z velicího centra [6]. V závislosti na standardním předpokládaném datovém toku 100 kb/s pro jedno hlasové spojení se však jedná o zanedbatelné množství dat. Naopak u přenosu obrazových dat se standardní datový tok FullHD videa enkodovaného pomocí kodeku H.264 pohybuje kolem 6 Mb/s, případně 3 Mb/s u H.265 [7]. Zde je tedy již vhodné na základě volných kapacit aktuálně dostupných sítí v případě nutnosti video stream omezovat na kvalitě či přerušovat. Samotná komprese videa přidává end-to-end zpoždění v případě H.264 okolo 8 ms při využití specializovaných čipů [8]. Pro H.265 se udává 3x delší doba komprese pro stejný datový tok [9]. Ostatní přenášené informace ze senzorů zařízení jako jsou gyroskopy, či tepelná čidla lze očekávat v řádech stovek b/s [10].

Dalším kritickým požadavkem je tzv. form-factor samotného zařízení. Pro úspěšné nasazení do praxe je nutné zabránit omezení pohybu a zorného pole uživatele ze strany zařízení. V případě, že zařízení bude cíleno na hasičské záchranné sbory budou tyto požadavky ještě striktnější z hlediska nutnosti integrace do standardizovaných ochranných prostředků (nejspíše helem). Pro tyto účely je tedy nutné co nejmenší tělo přístroje a co nejširší FOV (field of view) AR obrazu. Tyto požadavky jsou však v ostrém kontrastu s nutnou délkou provozu na baterii, kde se v průmyslu počítá minimálně se 4–6 hodinami, tedy polovinou pracovní doby po které se vymění baterie, případně celé zařízení [11]. Posledním kritériem pro výběr výsledného zařízení je možnost modifikace jeho softwaru či vytváření apli-

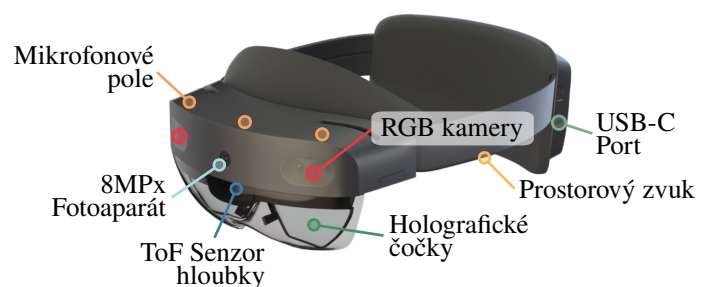
kací na míru pro jednotlivé oblasti využití. Toto kritérium zajistí možnost adaptace zařízení dle aktuálních požadavků záchranných sborů i případnou rozšiřitelnost o nové funkcionality v budoucnosti.

3 Dostupná zařízení

V současné době se stále zvyšuje počet AR zařízení dostupných na trhu. Většina z nich však cílí na konkrétní segment (nejčastěji zábavní průmysl) či nedisponuje všemi parametry pro imersivní zážitek. V této sekci budou shrnuty zařízení od nejvýznamnějších firem společně s několika zástupci menších firem nabízejících pokročilá AR zařízení. Cílem je srovnat jejich parametry z hlediska dostupnosti senzorů, kvality zobrazovačů či dostupných přenosových technologií, na jejichž základě bude možné zvolit ideální zařízení pro záchranné složky, viz tabulka 1.

3.1 Hololens 2

Aktuálně nejznámějším a nejrozšířenějším AR zařízením jsou brýle Microsoft Hololens 2 vyobrazené na obrázku 1. Jedná se o druhou generaci brýlí vydanou v roce 2019 jako nástupce brýlí Hololens. Nejvýznamnějším vylepšením je rozšíření zorného pole brýlí na 52° (oproti původním 34°). Mezi další přednosti patří průhledné holografické čočky (vlnovody) s rozlišením více jak 2,5 tisíc radiantů (světelných bodů na radián) a jasem až 500 nitů. Z hlediska dostupných senzorů brýle nabízí 4 kamery pracující s viditelným světlem, 2 IR (infrachervené) kamery, 1-megapixelový (Mpx) ToF (time-of-flight) hloubkový senzor, a tři senzory pro měření pohybu – akcelerometr, gyroskop a magnetometr. Pro záznam videa a zvuku je připravena 8 Mpx kamera a pětikanálové pole mikrofonů společně s vestavěnými reproduktory podporující prostorový zvuk.



Obrázek 1: Microsoft Hololens 2.

Zařízení disponuje vysokým výpočetním výkonem, který zajišťuje procesor Qualcomm Snapdragon 850 společně s holografickou výpočetní jednotkou druhé generace navrženou společností Microsoft. Tomuto procesoru sekunduje 4 GB LPDDR4x operační paměť a 64 GB velké UFS (universal flash storage) 2.1 úložiště. Pro přenos dat ze zařízení lze využít bezdrátových technologií Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac 2x2) a Bluetooth verze 5, či drátového USB-C.

Ze softwarové výbavy lze vyzdvihnout možnosti pro sledování pohybu rukou (plnohodnotný model obou rukou

s přímou manipulací) a očí v reálném čase. Zařízení též obsahuje senzory pro rozpoznávání duhovky, je schopno monitorovat okolní prostředí v 6 osách volnosti, tj., 6DoF (6 degrees of freedom) a v reálném čase vytvářet síť mapující okolní objekty. V neposlední řadě také umožňuje pořizovat videa a fotografie na kterých zachycuje jak reálné prostředí tak vložené virtuální objekty. Pro vývoj aplikací v rámci tohoto zařízení lze využívat standardních frameworků pro práci s 3D objekty – Unity či Unreal Engine a tudíž je možné vytváření scénářů dle specifických oblastí nasazení [12], [13].

3.2 Magic Leap 2

Společnost Magic Leap se od roku 2010 zabývá vývojem AR zařízení. Aktuálně nabízí druhou generaci AR brýlí nazvanou Magic Leap 2 jež je vidět na obrázku 2 a navazuje na první, nepříliš úspěšný, model. Stejně jako u Hololens i zde je jedním z nejvýznamnějších vylepšení rozšíření zorného pole – zde konkrétně na 70° oproti 50° u první verze. Samotné holografické čočky mají rozlišení 1440×1760 px, obnovovací frekvenci 120 Hz a jas až 2000 nitů. Zde je nutné zmínit, že jako jediný zástupce podporuje tzv. dynamic dimming, tedy zatmavování pouze části zorného pole dle potřeby. Dostupné senzory zahrnují 3 širokoúhlé kamery pro snímání okolí, hloubkovou kameru, RGB kameru, senzor osvitů a 4 kamery pro snímání očí. Z podpůrných senzorů nabízejí 4x IMU (inertial measurement unit), 3-osý akcelerometr a gyroskop, 2x 3-osý magnetometr a 2x výškoměr. Pro práci s médii a jejich zaznamenávání zařízení disponuje 12,6 Mpx RGB kamerou s automatickým ostřením a možností nahrávat 4k 30 fps (frames per second) či 1920×1080 60 fps video, 4 mikrofony a stereo reproduktory.



Obrázek 2: Magic Leap 2.

Pro zajištění dostatečného výkonu zařízení disponuje externí výpočetní jednotkou spojenou kabelem se samotnými brýlemi. Jejím srdcem je čtyřjádrový processor AMD 7nm Zen 2 X86 core (osmivláknový) s maximální frekvencí 2,4 GHz a 14-jádrovým koprocесорem pro zpracování počítačového vidění. O zpracování a vykreslování obrazových dat se stará grafická karta AMD RDNA 2. Zařízení

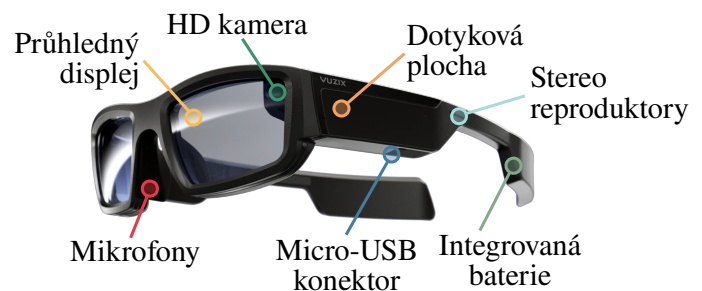
dále disponuje 16 GB operační paměti doplněné o 256 GB velké úložiště pro dlouhodobé uchovávání dat. Pro odesílání dat lze využít bezdrátových technologií Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) a Bluetooth 5, případně drátového spojení s konektorem USB-C [14], [15].

Zařízení také obsahuje software pro snímání očí (2 kamery pro každé oko, snímací frekvence 90 Hz), rukou – specifické API (application programming interface) snímající s frekvencí 60 Hz umožňující rozeznávání jak předdefinovaných gest, tak pozice prstů pomocí 23 klíčových bodů, či hlavy (pracuje s daty od IMU) [16]. Výrazným rozdílem oproti předchozímu zařízení je využívání ovladače pro ovládání brýlí, respektive práci s nimi. Tento ovladač poskytuje přesnější 6DoF optické monitorování, haptickou odezvu a trackpad. Dle dostupných informací se jedná o zařízení „zdeděné“ z předchozí verze, které bude nejspíše časem nahrazeno snímáním rukou, avšak aktuálně je stále potřeba k ovládání zařízení.

Magic Leap 2 využívá Magic Leap OS, což je vlastní operační systém odvozený z AOSP (Android open source project). Dle dostupné dokumentace lze pro vývoj aplikací využít hned tři programovacích jazyků: C++, C# a JavaScript a stejného počtu frameworků: Unity, Unreal Engine a MagicScript. I zde lze předpokládat jednoduché vytváření aplikací, ačkoli samotná komunita či znalostní databáze firmy Magic Leap nedosahují rozměrů Microsoft produktů.

3.3 Vuzix Blade 2

Společnost Vuzix je na trhu od roku 1997 a specializuje se na výrobu pokročilých displejů a odolných brýlí pro armádu a průmysl. Aktuálně nejvyspělejším modelem, který Vuzix nabízí, je Vuzix Blade 2 viditelný na obrázku 3. Samotná filozofie těchto brýlí se liší od ostatních výše uvedených příkladů, kde vždy šlo o binokulární zobrazovače s širokým zorným polem. Vuzix Blade 2 má pouze jeden displej o rozlišení 480×480 px pro pravé oko. Jeho svítivost je více jak 2000 nitů a šířka zorného pole je 20°. Integrované jsou senzory pro sledování polohy hlavy, konkrétně senzor 3 os volnosti (3 DoF), 3-osý gyroskop, 3-osý akcelerometr a 3-osý kompas. Pro práci s médii jsou brýle vybaveny 8 Mpx kamerou s automatickým ostřením a integrovanou čtečkou čárových kódů, duálním mikrofonom s potlačením okolního šumu a stereo reproduktory [17].



Obrázek 3: Vuzix Blade 2.

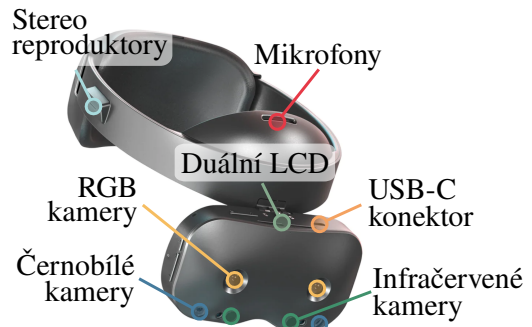
Zařízení disponuje čtyřjádrovým procesorem Qualcomm Snapdragon 429, kterému sekunduje 1 GB RAM a pro data je připraveno úložiště o velikost 40 GB. Pro připojení k ostatním zařízením lze využít bezdrátové technologie Wi-Fi (blíže nespecifikované, pouze možnost využití 2,4 GHz a 5 GHz pásem) a Bluetooth 5, případně drátové připojení pomocí USB 2.0 s konektorem Micro-B.

Zařízení využívá operační systém Android verze 11, čímž je omezen vývoj pouze na aplikace fungující s tímto systémem. Dle oficiální dokumentace společnosti Vuzix je předpokládán vývoj ve standardním jazyce pro Android, tedy v Javě, nicméně z principu jazyka Kotlin lze předpokládat možnost využití i jeho. Samotná dokumentace ze strany Vuzix je poměrně strohá a vědomostní databáze či komunita není rozsáhlá. Stejně tak zařízení neumožňuje pokročilé vkládání virtuálních objektů do reálného prostředí a chová se tedy spíše jako průhledný displej pro zobrazování AR objektů v rámci vyhrazené plochy. Z těchto důvodů lze předpokládat složitější vývoj než u dříve zmíněných zařízení a sníženou možnost provázání AR objektů s reálným prostředím.

3.4 Lynx-R1

Lynx je jednou z mladších společností na trhu s AR zařízeními, avšak jejich výrobek reprezentuje mírně odlišný pohled na problematiku virtuální a rozšířené reality. Společně se společnostmi jako je např. HTC nabízí zařízení pro smíšenou realitu, tj., XR (extended reality), jehož primárním cílem je nabídnout v jednom zařízení jak čistě virtuální tak rozšířenou realitu. Toho je dosaženo pomocí tzv. průchozího režimu (passthrough), pracujícího na principu přenosu obrazu zachyceného vnějšími kamerami do obrazu uživatele v reálném čase. Samotné zařízení Lynx-R1, vyobrazené na obrázku 4, je osazeno dvěma LCD (displeji z tekutých krystalů) s rozlišením 1600×1600 px a obnovovací frekvencí 90 Hz. Obraz z těchto displejů je uživateli zobrazován skrze čtyřnásobný katadioptrický hranol volného tvaru zvyšující kvalitu obrazu a poskytující šířku zorného pole 90° . Svítivost displeje bohužel výrobce neuvádí, avšak na rozdíl od klasické AR se zde nejedná o vážný problém, jelikož displeje nejsou průhledné a tudíž ovlivněny okolním prostředím. Pro práci s médií zařízení obsahuje dvě RGB kamery, dvoukanálový mikrofon a dva stereo reproduktory [18].

Zařízení je osazeno procesorem Qualcomm Snapdragon XR2 Gen1 společně s 8 GB LPDDR5 RAM a úložištěm o velikosti 128 GB, které lze dále rozšířit pomocí micro SD karty. Pro přenos dat je zařízení vybaveno bezdrátovými technologiemi Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) a Bluetooth 5.0, případně drátovým USB-C. Z hlediska softwarové výbavy lze vyzdvihnout SLAM (současné lokalizování a mapování okolí) v 6 DoF podporující světové kotvy (world anchors) a sledování pohybu rukou, pro což je využíván systém od firmy Ultraleap. Srdcem celého zařízení je operační systém Android 12 v rámci kterého je pro vytváření aplikací možné využívat jak Unity3D tak OpenXR frameworků.



Obrázek 4: Lynx-R1.

3.5 Ostatní zařízení

Na trhu jsou samozřejmě dostupná i další zařízení spadající do této kategorie, např. (i) Nreal, (ii) Moverio, (iii) Lenovo, či (iv) Meta [19]. Pro samotné porovnání aktuálně dostupných technologií by nicméně zástupci popsaní výše měly být dostatečně reprezentativním vzorkem, jelikož zastupují všechny dnes dostupné druhy AR zařízení, tedy binokulární poloprůhledné čočky i passthrough zařízení. Stejně tak jsou porovnány i způsoby náhledu na form-factor zařízení pokrývající skupiny od all-in-one headsetů po lightweight brýle s dedikovanou výpočetní jednotkou, která je připojena pomocí kabelu. Další variantou mohou být zařízení se specificky navrženými ovladači (nevyužívá se detekce končetin uživatele či standardního dotykového rozhraní známého např. z mobilních telefonů). Zástupci chytrých brýlí také integrují většinu běžně dostupných bezdrátových sítí ať již v licenčním či bezlicenčním frekvenčním pásmu a tudíž jsou kandidáty pro použití v reálném prostředí i pro náročnější scénáře (primárně pro záchranné složky).

4 Měření propustnosti a latence

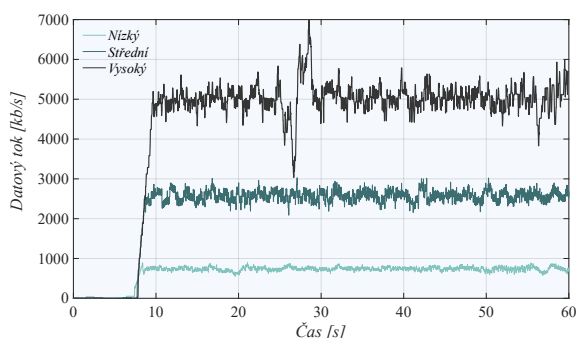
Jak již bylo zmíněno v úvodu, aktuální situace při misích záchranných složek stále představuje relativně staromódní přístup k řízení operací a sdílení dat mezi účastníky. Často je jediným způsobem komunikace mezi jednotlivými jednotkami rádiové spojení, jež nejenže může být rušeno okolním prostředím, ale také neumožňuje sdílet obrazová data. Pro navigaci v terénu tedy slouží kombinace místních znalostí zasahujících složek společně s papírovými mapovými podklady a již zmíněnou rádiovou komunikací (kdy velitel zásahu může hlasově navádět jednotky v terénu, pokud je to nezbytně nutné). V rámci vize digitální budoucnosti zásahů se očekává využívání AR zařízení, jež poskytnou řešení na oba tyto nedostatky – tedy jsou schopny jak autonomně navigovat uživatele pomocí instalovaných mapových podkladů tak sdílet nespočet dat z přidružených senzorů a multimediální toky pro zvuk i obraz současně a v reálném čase. I zde jsou však stále patrné překážky z hlediska síťových prostředků mobilních bezdrátových sítí. V rámci této sekce budou představeny měření těchto pro-

Tabulka 1: Základní parametry AR/VR headsetů.

Název zařízení	Hololens 2	Magic Leap 2	Vuzix Blade 2	Lynx R-1
Zorné pole [°]	52	70	20	90
Rozlišení	2048x1080	1440x1760	480x480	1600x1600
Obnovovací frekvence [Hz]	60	120	-	90
Jas [nit]	500	2000	>2000	-
Váha [g]	566	260	90	500
RAM [GB]	4	16	1	8
Úložiště [GB]	64	256	40	128, rozšiřitelné pomocí SD karty
Konektivita	Wi-Fi 5, Bluetooth 5, USB-C	Wi-Fi 6, Bluetooth 5 BLE, USB-C	Wi-Fi, Bluetooth, USB 2.0 Micro-B	Wi-Fi 6, Bluetooth 5.0, USB-C
Sledování pohybu hlavy/rukou	4 kamery, plně artikulovaný model rukou a přímé manipulace s nimi	sledování pohybu hlavy pomocí kombinace senzorů, API pro sledování rukou s frekvencí 60 Hz	snímání hlavy pomocí 3 DoF a ostatních senzorů	6 DoF, systém sledování rukou od firmy Ultraleap
Sledování pohybu očí	2 IR kamery, sledování v reálném čase	2 kamery pro každé oko, 90 Hz snímací frekvence	-	-
Senzory	Hlubkový, Akcelerometr, Gyroskop, Magnetometr	Hlubkový, 4xIMU, akcelerometr, gyroskop, 2x magnetometr a 2x výškoměr	Gyroskop, akcelerometr, kompas	Akcelerometr, gyroskop
Multimédia	8 Mpx kamera, 5-kanálové pole mikrofonů, reproduktory s prostorovým zvukem	12.6 Mpx kamera, 4 mikrofony, 2 stereo reproduktory	8 Mpx kamera, duální mikrofony s potlačením šumu, stereo reproduktory	2 RGB kamery, dvoukanálové pole mikrofonů, stereo reproduktory

středků a diskutovány jejich dopady na proveditelnost přenosu dat potřebného pro standardní zásah.

Ověření datového toku poskytovaného přímo z API brýlí Microsoft Hololens 2 bylo zaměřeno na rozptyl v přenosové rychlosti a zpoždění přenosu videa v reálné komunikační infrastruktuře. Na obrázku 5 jsou vidět tři datové toky, každý odpovídající určité přenosové rychlosti a rozlišení: (i) nízký – 0,6 Mb/s, 428x240p, (ii) střední – 2,5 Mb/s, 854x480p a (iii) vysoký – 5 Mb/s, 1280x720p. Dle výsledků měření lze potvrdit výrobcem udávaný průměrný datový tok, který i přes relativně nízkou kvalitu videa (720p maximálně) dosahuje značné hodnoty (5 Mb/s) z hlediska vytížení mobilní sítě.

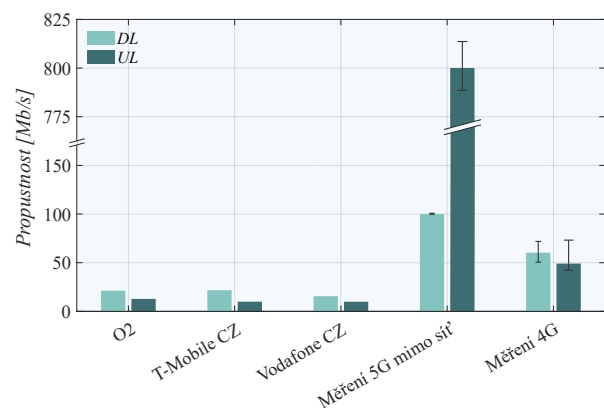


Obrázek 5: Datový tok videa.

Pro uvedení tohoto vytížení do kontextu přenosu multimediálních dat v rámci zásahu byly provedeny měření propustnosti aktuálně dostupných mobilních sítí, konkrétně sítí 4G a 5G.

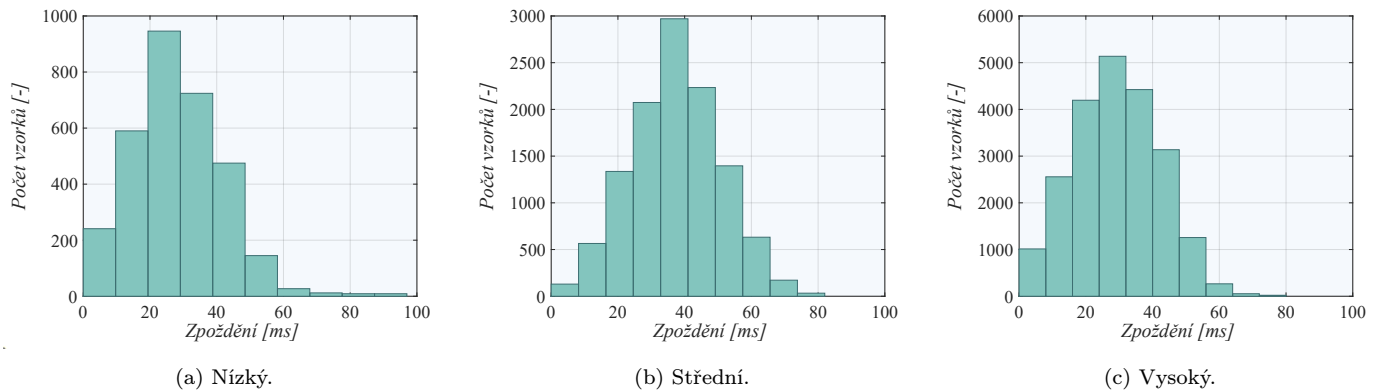
4.1 Sítě 4G

Výsledky měření parametrů mobilních sítí 4G, tj., LTE-A (long-term evolution advanced) jsou vyobrazeny na obrázku 6, kde je vidět měření získané společností CZ.NIC pro každého z mobilních operátorů za poslední 2 roky a následně naše měření v reálné síti Vodafone [20]. Pro vlastní měření bylo provedeno 10 nezávislých měření, jejichž výsledky jsou zprůměrovány do grafu. Z těchto výsledků lze bez udání jakýchkoli dalších parametrů vyvodit, že pro plné vytížení sítě O2 je potřeba 4 paralelních toků videa v 720 p kvalitě, a v případě T-Mobile a Vodafone CZ síť kapacitně vytíží již 2-3 toky.



Obrázek 6: Propustnost mobilní sítě.

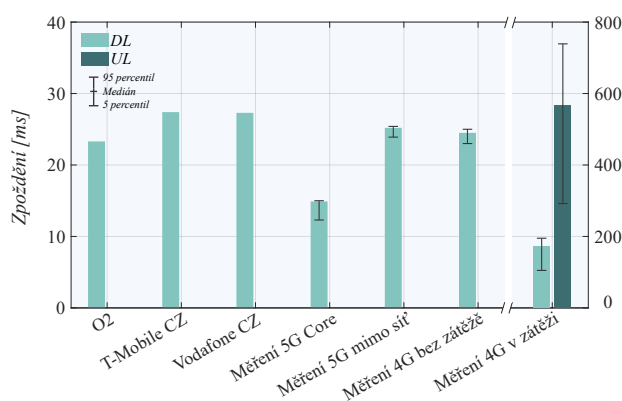
V případě, že změříme pouze kolísání zpoždění přenosu videa, získáme data viz obrázek 7. Zde je patrné, že zpoždění kolísá o ± 20 ms okolo střední hodnoty a na sa-



Obrázek 7: Zpoždění přenosu videa.

motné kolísání nemá vliv velikost přenášených dat a s ní spojená kvalita videa. Rozptýl v této velikost nezpůsobuje žádné artefakty v obraze ani znatelné sekání obrazu.

Pokud však zaměříme pozornost na samotné zpoždění v rámci přenosu dat získáme hodnoty viz obrázek 8. Zde je patrné, že v případě nevytížené sítě je zpoždění přibližně 24 ms shodně pro všechny operátory. V případě, že síť vytížíme na maximum, zpoždění rapidně naroste na více jak 500 ms což značně sníží kvalitu uživatelského zážitku z hlediska komunikace mezi zasahující jednotkou a velitelem zásahu / operačním centrem.

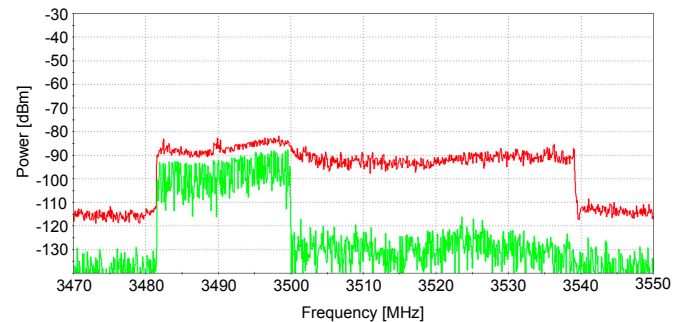


Obrázek 8: Zpoždění v mobilní síti.

4.2 Síť 5G

Cílem měření bylo ověření komunikačních parametrů 5G routeru v roli koncového zařízení, konkrétně od společnosti Robustel (model R5020) využívající modul Quectel RM502Q-AE. Testovaný 5G router byl připojen do privátní 5G SA komunikační infrastruktury dle 3GPP (3rd generation partnership project) ve vydání č. 15.

V průběhu testování datových přenosů bylo přistoupeno k ověření aktivity ve frekvenčním spektru. Z provedených měření viz obrázek 9 je zřejmé, že datové přenosy probíhaly v pásmu 3480 MHz až 3540 MHz, tedy ve frekvenčním pásmu o šířce 60 MHz. V případě, že nebyl generován datový provoz, nebyla zaznamenána aktivita v tomto pásmu a lze tedy potvrdit, že pásmo je privátní.



Obrázek 9: Úroveň zachyceného signálu ve frekvenčním spektru 3480 MHz až 3540 MHz.

Klíčovým ověřením v rámci testování bylo zjištění hodnot obousměrného komunikačního zpoždění RTT (round trip time) pro scénáře: (i) „router ↔ core“ a (ii) „router ↔ veřejný server/centrála zásahu“.

Celkový průběh RTT do core části 5G SA sítě napříč všemi body byl na základě zprůměrování jednotlivých měření stanoven na 14,93 ms viz obrázek 8. Tyto hodnoty jsou validní pro „worst case“; tedy pro payload 1470 B. Pro celkové porovnání lze uvést, že průměrná hodnota pro všechny testované zařízení s výchozí velikostí zprávy, tj., 32 B byla 10 ms.

Průměrná hodnota RTT pro testování scénáře „Router ↔ veřejný server (Google DNS)“ byla 25,98 ms, viz obrázek 8. Medián agregované propustnosti systému ve směru uplink se pohybuje v okolí hodnoty 100 Mb/s. Ve směru downlink je pak vidět výrazný výkonnostní posun sítě 5G, v průběhu jehož měření bylo dosaženo propustnosti až 800 Mb/s.

5 Závěr

V rámci tohoto článku byly nejdříve definovány nejzásadnější výzvy v rámci přenosu informací mezi jednotkami záchranných sborů a nastíněny možnosti vylepšení efektivity pomocí zařízení rozšířené reality. Dále byl proveden rozbor aktuálně dostupných AR zařízení, kde byla pozornost zaměřena především na jejich hardwarovou a softwarovou výbavu, na jejímž základě lze zvolit nejvhodnější zařízení

pro implementaci u záchranných složek. Pro zhodnocení proveditelnosti této implementace a integrace v rámci reálných systémů byly provedeny měření bezdrátových mobilních sítí 4. a 5. generace, přesněji jejich propustnosti a zpoždění. Výsledky měření byly následně analyzovány z hlediska přenosové kapacity.

Pro standardní zásah hasičských záchranných sborů se uvažuje jako nejmenší jednotka požární ochrany (PO) tým 4 hasičů a tedy v ideálním případě 4 kontinuální datové toky videa směrem k velcímu centru [6]. Tyto toky vygenerují provoz minimálně 20 Mb/s v relativně nízké kvalitě videa (720p) což znamená plné vytížení buňky 4G sítě pouze provozem od záchranného sboru. Lze předpokládat, že zasahující jednotky nebudou jedinými, kdo bude využívat komunikační infrastrukturu mobilní sítě (tj., nebude využita privátní infrastruktura) a ve spojení s dramatickým nárůstem zpoždění při takovémto vytížení základnové stanice mobilní sítě již nelze hovořit o přenosu dat v reálném čase. Ztráta této vlastnosti je klíčovým nedostatkem přímo ovlivňujícím zachování co nejvyšší efektivity zásahu (jednotky při rychlém přesunu mohou ztrácet orientaci v závislosti na zpoždění informací).

Zjištěné kapacitní limity sítí 4G jednoznačně indikují nutnost využití sítí 5G, které dokáží obsloužit predikovaný datový tok i pro více než 4-násobný počet zasahujících hasičů při zachování nízké odezvy. I přestože naměřené komunikační parametry sítí 5G v rámci tohoto článku pocházejí z privátní infrastruktury, lze je považovat za validní i pro síť veřejnou, kde se předpokládá využití ještě širšího pásma (až 100 MHz frekvenční blok) a tudíž i dosažení vyšších přenosových rychlostí.

Cílem tohoto článku bylo demonstrovat proveditelnost nasazení AR zařízení v rámci záchranných složek jak z hlediska kvality samotných zařízení a jejich senzorů, tak z hlediska dostatečnosti sítě. Na základě informací uvedených v sekcích 3 a 4 lze konstatovat, že aktuálně dostupné technologie jsou připraveny k nasazení v tomto odvětví.

Poděkování

Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci Programu TREND č. FW01010200.

Literatura

- [1] Katelynn A Kapalo, Patricia Bockelman a Joseph J LaViola Jr. ““Sizing Up” Emerging Technology for Firefighting: Augmented Reality for Incident Assessment”. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Sv. 62. 1. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA. 2018, s. 1464–1468.
- [2] Manish Bhattarai. “Integrating Deep Learning and Augmented Reality to Enhance Situational Awareness in Firefighting Environments”. In: *arXiv preprint arXiv:2107.11043* (2021).
- [3] Ramy Mohamed, Sofiane Zemouri a Christos Verikoukis. “Performance Evaluation and Comparison Between SA and NSA 5G Networks in Indoor Environment”. In: *2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)*. IEEE. 2021, s. 112–116.
- [4] Sachinkumar Bavikatti Mallikarjun et al. “Performance Analysis of a Private 5G SA Campus Network”. In: *Mobile Communication-Technologies and Applications; 26th ITG-Symposium*. VDE. 2022, s. 1–5.
- [5] Guangyi Liu et al. “5G Deployment: Standalone vs. Non-standalone From the Operator Perspective”. In: *IEEE Communications Magazine* 58.11 (2020), s. 83–89.
- [6] Hasičský záchranný sbor České republiky. *Jednotky PO*. URL: <https://www.hzscr.cz/clanek/jednotky-po-961839.aspx?q=Y2hudW09Mg%5C%3D%5C%3D>.
- [7] DVDfab. *H.264 vs H.265 with Statistical Comparison & Major Difference*. URL: https://www.dvdfab.cn/resource/video/h.264-vs-h.265#part1_6.
- [8] CAST. *Understanding - and Reducing - Latency in Video Compression Systems*. URL: <https://www.design-reuse.com/articles/33005/understanding-latency-in-video-compression-systems.html>.
- [9] Nabajeet Barman a Maria G. Martini. “H.264/MPEG-AVC, H.265/MPEG-HEVC and VP9 codec comparison for live gaming video streaming”. In: *2017 Ninth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*. 2017, s. 1–6. DOI: 10.1109/QoMEX.2017.7965686.
- [10] Muhammad Alam. “Strategies for Optimal MAC Parameters Tuning in IEEE 802.15.6 Wearable Wireless Sensor Networks”. In: *Journal of Medical Systems* (čvc. 2015). DOI: 10.1007/s10916-015-0277-4.
- [11] Lawrence Smith et al. “Industrial Shift Systems”. In: *Applied Ergonomics* 29.4 (1998), s. 273–280. ISSN: 0003-6870. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(97\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(97)00059-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687097000598>.
- [12] Unity Technologies. *Unity*. URL: <https://unity.com/>.
- [13] Epic Games, Inc. *Unreal Engine*. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US>.
- [14] Magic Leap. *Magic Leap 2*. URL: <https://www.magicleap.com/magic-leap-2>.
- [15] Magic Leap. *Magic Leap 2: Product Specs*. URL: https://www.magicleap.com/hubfs/docs/MagicLeap-2_Product-Spec-Sales-Sheet_09.30.2022_Version-English-4.0.pdf?hsLang=en.

- [16] Magic Leap. *Hand Tracking*. URL: <https://m1-developer.magicleap.com/en-us/learn/guides/lumin-sdk-handtracking>.
- [17] Lynx. *Mixed-Reality for Professionals & Consumers*. URL: <https://www.lynx-r.com/>.
- [18] Vuzix. *Vuzix Blade 2 Smart Glasses*. URL: <https://www.vuzix.com/products/vuzix-blade-2-smart-glasses>.
- [19] XRToday. *Most Popular AR Smart Glasses Reviews 2022*. URL: <https://www.xrtoday.com/augmented-reality/most-popular-ar-smart-glasses-reviews-2022/>.
- [20] CZ.NIC. *NetMetr: nástroj pro měření aktuální kvality služeb přístupu k Internetu*. URL: <https://www.netmetr.cz/cs/statistiky.html>.