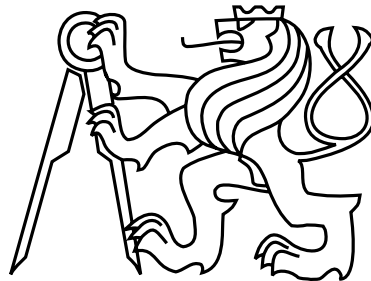


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky



Diplomová práce

**Komunikace zařízení v systémech
Internet of Musical Things**

Communication of Devices in Internet of Musical Things

Bc. Tomáš Vyšinský

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Zeman, Ph.D.

Studijní program: Elektronika a komunikace

Specializace: Audiovizuální technika a zpracování signálů

Praha, 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21. 5. 2020

.....

Bc. Tomáš Vyšinský

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vyšinský** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **457170**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Komunikace zařízení v systémech Internet of Musical Things

Název diplomové práce anglicky:

Communication of Devices in Internet of Musical Things

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši nového systému Internet of Musical Things (IoMusT). Navrhněte vhodnou konfiguraci zařízení, emulujte provoz mezi zařízeními, zaměřte se na problematická místa. Pomocí vhodného software (např. DAW OhmStudio) realizujte konkrétní systém IoMusT. Provedte vyhodnocení zjištěných vlastností. Zaměřte se na synchronizaci mezi zařízeními IoMusT v síťovém prostředí. Podle možností proveďte a vyhodnoťte experiment komunikace mezi hudebními nástroji a elektronickými zařízeními umístěnými na lidském těle nebo oblečení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] TURCHET, Luca, Carlo FISCHIONE, Georg ESSL, Damian KELLER a Mathieu BARTHET. Internet of Musical Things: Vision and Challenges. IEEE Access [online]. 2018, 6, 61994-62017 [cit. 2019-07-22]. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2872625. ISSN 2169-3536.
[2] TURCHET, Luca a Mathieu BARTHET. Co-Design of Musical Haptic Wearables for Electronic Music Performer's Communication. IEEE Transactions on Human-Machine Systems [online]. 2019, 49(2), 183-193 [cit. 2019-07-22]. DOI:10.1109/THMS.2018.2885408. ISSN 2168-2291.
[3] TURCHET, Luca. Smart Musical Instruments: Vision, Design Principles, and Future Directions. IEEE Access [online]. 2019, 7, 8944-8963 [cit. 2019-07-22]. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2876891. ISSN 2169-3536.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Zeman, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **31.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Tomáš Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Zemanovi, Ph.D., za možnost vytvořit diplomovou práci blízko mým zájmům. Rovněž mu děkuji za poskytnutí maximální podpory v průběhu složitého období a karanténním opatření způsobených pandemií COVID-19 v době psaní této práce. Děkuji Ing. Zbyňku Kocurovi, Ph.D., za zapůjčení a instruktáž přístrojů nezbytných pro praktickou část práce a vstřícnost při řešení problémů. Děkuji také doc. Ing. Lukáši Vojtěchovi, Ph.D. za přínosnou diskuzi ohledně cílů této práce. Rád bych poděkoval také Ing. Martinu Hanzalovi za pomoc při analýze a řešení problémů mé domácí sítě, kterou jsem vzhledem k opatřením byl nucen pro praktickou část využívat. V neposlední řadě děkuji svým dvěma spolužákům, Bc. Kristýně Žákové a Bc. Janu Vimrovi za asistenci při jednom z měření.

Summary

The thesis deals with the intersection of the Internet of Things area and electronic musical instruments, specifically the Internet of Musical Things (IoMusT) system. It is based on the analysis of current technologies, that are being used for the further development of means to ensure a satisfactory psychoacoustic feeling to the human listener. The chapter dedicated to the description of the concept and its main goals is followed by one's own several implementations, supplemented with the testing. Part of the work is also an analysis of several specific IoMusT applications with applicable technologies discussed. The aim is to create an initial analysis of current resources suitable for further development of this area.

Key words: music industry, Internet of Things, Internet of Musical Things, virtual reality, real-time communication, interactive concert

Anotace

Práce se zabývá průnikem oblastí internetu věcí (IoT) a elektronických hudebních nástrojů, a to konkrétně systémem Internet Of Musical Things (IoMusT). Vychází se z analýzy současných technologií sloužících pro další vývoj prostředků zajišťujících pro člověka uspokojivý psychoakustický počitek. Na kapitolu věnované popisu celého konceptu a jeho hlavních cílů navazuje řada vlastních realizací doplněných o jejich testování. Součástí práce je i vlastní rozbor několika konkrétních aplikací systému IoMusT s diskuzí použitelných technologií. Cílem je vytvořit úvodní analýzu současných prostředků vhodných pro další rozvoj této oblasti.

Klíčová slova: hudební průmysl, internet věcí, internet hudebních věcí, virtuální realita, komunikace v reálném čase, interaktivní koncert

Obsah

1	Úvod	11
2	Analýza současného stavu	12
2.1	Internet věcí	12
2.1.1	Dílčí oblasti Internetu věcí	12
2.1.2	Rozdělení sítí podle rozlehlosti	13
2.2	Protokoly a technologie pro datovou komunikaci mezi hudebními zařízeními	14
2.2.1	MIDI	14
2.2.2	RTP-MIDI	14
2.2.3	ZIPI	16
2.2.4	OSC	16
2.2.5	Audio Over Ethernet	17
2.3	CD/USB přehrávače a mixážní pulty	18
2.3.1	Mixážní pulty	18
2.3.2	CD/USB přehrávače	18
2.3.3	Synchronizace	18
2.4	Elektronické hudební nástroje	19
2.4.1	Syntezátory	19
2.4.2	MIDI kontroléry	20
2.5	Digital Audio Workstation	20
2.6	Osvětlovací technika	20
3	Popis systému Internet Of Musical Things	22
3.1	Komponenty systému	22
3.2	Technologické požadavky na realizaci	24
3.2.1	Komunikace v reálném čase	24
3.2.2	Standardy pro zajištění součinnosti zařízení	25
3.2.3	Multimodální obsah a jeho zpracování	27
3.2.4	Hudební věci	28
3.3	Právní aspekty	28
4	Realizace systémů IoMusT	30
4.1	Úloha A: Vlastní realizace systémů IoMusT a testování spolehlivosti komunikace	30
4.1.1	Využití prostředky	30
4.2	Úloha B: Testování komerčně dostupného systému pro tvorbu hudby v reálném čase	31
4.3	Úloha C: Aplikování IoMusT v praxi a úvod do analýzy proveditelnosti	32

5	Vyhodnocení naměřených dat	33
5.1	Úloha A1: Komunikace mezi hudebními věcmi	33
5.2	Úloha A2: Komunikace mezi hudebními interprety a hudebními věcmi	39
5.3	Úloha A3: Komunikace mezi hudebními interprety	40
5.4	Úloha B: Testování komerčně dostupného systému pro tvorbu hudby v reálném čase	45
5.5	Úloha C: Aplikování IoMusT v praxi a úvod do analýzy proveditelnosti	47
5.5.1	Interaktivní koncert	48
5.5.2	Virtuální koncert	51
5.5.3	Tvorba hudebního díla více vzdálenými účastníky v reálném čase . . .	52
6	Závěr	54
7	Literatura	56

Seznam obrázků

2.1	Diagram znázorňující proces synchronizace a odhadu aktuálního přenosového zpoždění Δt mezi dvěma zařízeními komunikujícími protokolem AppleMIDI	15
2.2	Architektura komunikace protokolem RTP-MIDI při inicializaci dvou komunikačních spojení (session) jedním zařízením. Červeně je vyznačena cesta předávání MIDI zpráv mezi posluchači dílčích spojení	15
2.3	Propojení mixážního pultu Pioneer DJM-900NXS se dvěma CD přehrávači Pioneer CDJ-2000NXS2 a notebookem rozhraním Ethernet pomocí switchu. Převzato z [91, s. 8]	18
2.4	Propojení mixážního pultu Pioneer DJM-2000NXS se dvěma CD přehrávači Pioneer CDJ-2000NXS2 a notebookem rozhraním Ethernet pomocí interní víceportové sběrnice. Převzato z [91, s. 21]	19
2.5	Vzájemné propojení klasických a bezdrátových DMX zařízení ovládaných DMX kontrolérem. Překresleno z [61]	21
3.1	Znázornění vlivu přenosové latence a jitteru při opakovaném vysílání Diracova impulsu $\delta(t)$ přenosovým kanálem na přijatý signál $x(t)$ po zprůměrování	24
5.1	Schéma zapojení měřicího pracoviště pro úlohu A1	33
5.2	Výpis příchozích zpráv protokolů AppleMIDI a RTP-MIDI rozhraním Wi-Fi pomocí programu Wireshark	34
5.3	Příklad výpisu zpráv společně s časovými značkami. Vlevo výpis sériové linky vysílače, vpravo výpis příchozích zpráv do počítače	35
5.4	Vývoj jitteru mezi odeslanými a přijatými zprávami RTP-MIDI velikosti 56 B pro bezdrátový standard 802.11 b (11 M) při různém zahlcení přenosového kanálu	38
5.5	Časová osa se zakreslenými značkami časů odeslání paketu (modře), přijmutí paketu (červeně) a odeslání ztraceného paketu (černě) při různém zahlcení přenosové trasy pro bezdrátový standard 802.11 g (54 Mbit/s)	39
5.6	Schéma zapojení měřicího pracoviště pro úlohu A2 se syntezátorem	40
5.10	Výpis příchozích zpráv protokolů AppleMIDI a RTP-MIDI při komunikaci se zvukovým procesem ve školní laboratoři rozhraním Ethernet pomocí programu Wireshark	40
5.7	Schéma obvodu převodníku MIDI - sériový port (COM)	41
5.8	Výpis příchozích zpráv protokolů AppleMIDI a RTP-MIDI při komunikaci se syntezátorem ve školní laboratoři rozhraním Ethernet pomocí programu Wireshark	42

5.9	Schéma zapojení měřicího pracoviště pro úlohu A2 se syntezátorem se zvukovým procesorem	42
5.11	Schéma zapojení měřicího pracoviště pro úlohu A3	43
5.12	Bezdrátový komunikační prostředek zastávající funkci nositelné hudební věci	44
5.13	Pozvánka k přístupu do projektu v programu OhmStudio	45
5.14	Modulární náhled v programu OhmStudio	46
5.15	Náhled uživatelského prostředí DAW OhmStudio	46
5.16	Prostorové uspořádání pódia pro koncert „Eric Prydz presents EPIC 6.0 HOLOS- LOSHERE“. Převzato z [10], autor kresby: Ross Chapple	49
5.17	Náhled pracovního prostředí pro reprodukci hudebního díla ve zvukovém formátu Dolby Atmos. Převzato z [30]	51
5.18	Schematické znázornění konceptu virtuálního koncertu s využitím centrálního odbavovacího serveru a vyznačením různých druhů datových přenosů	52

Seznam tabulek

5.1	Druhy a velikosti přenášených MIDI zpráv a porovnání velikostí paketů zpráv RTP-MIDI	34
5.2	Seznam zvolených přenosových rychlostí zahlcení sítě pro různé standardy bezdrátové komunikace	35
5.3	Výsledky měření různých druhů přenosů zpráv RTP-MIDI bezdrátovým standardem 802.11 g (54 Mbit/s)	37
5.4	Výsledky měření různých druhů přenosů zpráv RTP-MIDI bezdrátovým standardem 802.11 b (11 Mbit/s)	37
5.5	Dohodnuté signály pro komunikaci mezi hudebníky a jejich významy	43
5.6	Výsledky experimentu sledující úspěšnost komunikace mezi hudebníky s pomocí nositelné elektroniky	44

1. Úvod

Rozvoj v oblasti informačních technologií vnáší nevyhnutelný pokrok do všech příbuzných oborů. Hudební průmysl, po desetiletí silně ovlivňovaný technologickými novinkami v oblasti vývoje a propagace nových druhů nosičů, se stává být čím dál více závislejším na vývoji informačních technologií. Například streamingové služby, mající oblibu především u generace mileniálů, zaznamenávají ve druhé dekádě třetího tisíciletí strmý nárůst popularity, viz [51]. Stále více hudebních vydavatelství je tak nuceno, vzhledem k úbytku zájmu posluchačů o fyzické nosiče, vydávat svou hudbu v online prostředí [42]. Obdobné směřování pozorujeme i u hudebních nástrojů.

V 80. letech minulého století nastal velký rozmach protokolu MIDI umožňujícího propojení multimediálního počítače s elektronickými hudebními nástroji (EHN). Ten je sice z elektrického pohledu považován za spolehlivý, ale dnes již není schopen plně vyhovět všem technickým nárokům.

Stále častěji se také setkáváme s digitálními režijními zařízeními disponujícími funkcemi vzdáleného ovládání drátovým nebo bezdrátovým způsobem přenosu. Zcela běžné je i vzájemné propojování CD/USB¹ hudebních přehrávačů s digitálním mixážním pultem během djských vystoupení. V žádném z uvedených případů již nedostačují vlastnosti MIDI rozhraní, jehož hlavní nedostatky jsou nahrazeny připojením přes sběrnici Ethernet. Vzhledem k rozvoji internetu věcí (IoT) se nabízí využít tuto technologii i v oblasti EHN, čímž lze zefektivnit celé fungování architektury. Právě této vizi je věnována diplomová práce.

¹Universal Serial Bus

2. Analýza současného stavu

2.1 Internet věcí

System internetu věcí (IoT) lze chápat jako síť fyzických objektů. Těmito objekty nejsou jen počítače, ale zařízení všech typů, jako například vozidla, „chytré“ telefony, nositelná elektronika, domácí spotřebiče, hračky, videokamery, lékařská zařízení, stroje a přístroje, budovy, zvířata a lidé, ale i různé senzory, snímače, měřicí prvky apod. Veškerá komunikace a sdílení informací mezi těmito objekty probíhá na základě stanovených protokolů s cílem dosažení inteligentní kooperace, lokalizace, monitorování, řízení procesů a správy. [27]

2.1.1 Dílčí oblasti Internetu věcí

Ačkoli všechna zařízení v systému IoT tvoří jednu velkou a vzájemně propojenou síť, samotné realizace pro zajištění funkčnosti se vždy liší v závislosti na způsobu použití, možnostech komunikace s okolím, náročností oprav a výměny senzorů v daném umístění a vzájemnou vzdáleností jednotlivých elementů od sebe. Níže uvádím seznam několika významných podoblastí koncepce IoT, společně s uvedením jejich základních technických výzev.

- Internet of Media Things (IoMT) – síť je sestavena ze zařízení, která tvoří nebo pracují s multimediálním obsahem. Na vývoji standardů pracuje skupina *The Moving Picture Experts Group (MPEG)*. [82] [83]; Hlavní problematikou je zajištění kompatibility audiovizuálních formátů, odolnosti audio/videotoku a efektivní komprese. [67];
- Internet of Medical Things (IoMT / IoMedT) – souvisí s propojováním zdravotnických zařízení, slouží pro sledování zdravotního stavu pacienta v reálném čase pomocí senzorů, v budoucnu bude možné úspěšně předcházet nebo úspěšně léčit řadu onemocnění; Snímané signály jsou ovlivňovány množstvím rušení, je nutné zabezpečení dat a energetická nenáročnost [50];
- Internet of Underwater Things (IoUT) – systémy související s výzkumem dna vodních ploch (zejména oceánů), zkoumáním mořských živočichů, studií klimatických změn, dopravní logistikou autonomních plavidel a včasnou detekcí seismické aktivity (včasná detekce vln tsunami); Omezení komunikace útlumem (řeší se optickou bezdrátovou komunikací – více v [20]), problémová lokalizace senzorů z důvodu nepřítomnosti GPS signálů [34, s. 2 – 4];
- Internet of Underground Things (IoUGT) – komunikační systém vhodný pro řízení a kontrolu podzemní těžby nerostných surovin a sítě senzorů seismické aktivity; Komunikace jednotlivých senzorů je značně omezena, zejména útlumem signálů v zemském povrchu [34, s. 4 – 6] (řeší se použitím magnetické indukce – více v [39]);

- Internet of Vehicles (IoV) – označení pro komunikaci mezi vozidly, plánované plnohodnotné zavedení s nástupem autonomního řízení vozidel; Algoritmus musí být schopen bezpečného rozhodování v krizových situacích vzhledem k aktuální dopravní situaci [48, s. 10 – 12];
- Internet of Flying Things (IoFT) – obecné označení pro síť věcí pohybujících se ve vzdušném prostoru, včetně dronů (ostraha objektů; doručování zboží; monitorování pozemků pro zemědělské činnosti; lesní správa; objednání na vyžádání – například pro ochranu osoby pohybující se nočním městem apod.); Komunikace musí být stabilní při změnách počasí a odolná proti rušení (včetně efektivní komprese výstupního video-streamu v dostatečném rozlišení) [36];
- Internet of Space Things (IoST) – pro vzájemnou komunikaci satelitů a nanosatelitů (vhodných např. pro zpřesnění navigace autonomních vozidel) a pro budoucí systémy umožňující intergalaktickou komunikaci (např. při kolonizaci jiné planety); Hlavní technologickou výzvou je vyřešení zpoždění signálů a s ním související synchronizace, potřeba vzniku nového systému směrování zařízení [34, s. 6 – 9].

2.1.2 Rozdělení sítí podle rozlehlosti

Datovou síť lze charakterizovat jejím dosahem. Pro některé konkrétní aplikace IoT je vhodné využívat úspornější síť menšího dosahu, jindy se vyplatí používat rozlehlejší síť. Seznam sítí je řazen od největší po nejmenší. [8, s. 8] [13, s. 9 – 12] [17, s. 191]

- Global Area Network (GAN) – pokrytí většího počtu sítí WAN a satelitem pokrývaných oblastí (typicky pro mobilní zařízení);
- Wide Area Network (WAN) – pokrytí geografické oblasti o poloměru větším než 1 km [102];
- Radio Access Network (RAN) – pokrytí regionální sítě;
- Metropolitan Access Network (MAN) – pokrytí městské sítě;
- Campus Area Network (CAN) – pokrytí prostor areálu (speciální případ sítě MAN);
- Local Area Network (LAN)¹ – pokrytí malého geografického území;
- Personal Area Network (PAN) – pokrytí v blízkosti jedné osoby;
- Body Area Network (BAN) – pokrytí lidského těla a jeho nejbližšího okolí;
- Body Area NanoNetwork (BANN / BAN²) – pokrytí malých oblastí lidského těla.

¹Wireless Local Area Network (WLAN) - bezdrátová LAN

2.2 Protokoly a technologie pro datovou komunikaci mezi hudebními zařízeními

2.2.1 MIDI

Využitím přenosu informace protokolem MIDI lze vytvořit složitá propojení mnoha studiových zařízení. Během živé produkce lze uplatnit MIDI ovladače (tzv. MIDI kontroléry), tedy zařízení, která negenerují žádné vlastní zvuky. Takové nástroje se běžně užívají jak v tradiční formě, jako například elektronické klávesy a MIDI kytary, tak i v moderním provedení MIDI padů (tlačítkových kontrolerů), mezi něž patří produkty firem *Native Instruments* a *Ableton*, sloužící pro přímou práci s jejich vlastními Digital Audio Workstation (DAW) systémy (více v sekcích [MIDI kontroléry](#) a [Digital Audio Workstation](#)). Z dalších moderních zařízení jmenujme například sférický kontrolér *AlphaSphere* [55] nebo doplněk pro akustické kytary *ACPAD* [54]. Tato zařízení jsou podrobněji popsána v mém bakalářském individuálním projektu, viz [4].

Rychlost přenosu informace rozhraním MIDI je pouhých 31,25 kbit/s, z čehož plyne doba přenosu jednoho bajtu zpráv 320 μ s. Při připojení více zařízení na jednu MIDI sběrnici tak může snadno dojít k zahlcení sběrnice, což má za následek nezanedbatelné zpoždění v průběhu přenosu. Podrobněji je tato problematika popsána v mé bakalářské práci, viz [3]. MIDI zprávy lze také přenášet sběrnici USB² („MIDI přes USB“, viz [76]) nebo bezdrátově technologiemi Bluetooth („MIDI přes Bluetooth“, viz [72]) či Wi-Fi³ („MIDI přes Wi-Fi“). Technologie Wireless MIDI (WIDI) slouží pro bezdrátový přenos MIDI zpráv rádiovou komunikací v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz při zachování rychlosti přenosu MIDI. Uplatnění lze nalézt při živém vystupování na koncertech, kdy není hráč na elektronickou kytaru při svém pohybu omezován fyzickým kabelem.

2.2.2 RTP-MIDI

Tak jako multimediální prostředky využívají pro svou bezproblémovou funkci přenos dat protokolem RTP⁴, byl i pro přenos zpráv protokolu MIDI vyvinut vhodný síťový protokol pro užití v sítích LAN a WAN zprostředkovávající komunikaci v reálném čase. Protokol je součástí systému *Telemidi* [99] [9], který je odvětvím systému Networked Music Performance (NMP) [33]. Původní specifikace RFC 6295 (viz [96]) navrhuje pro vytvoření komunikační cesty mezi zařízeními využití protokolů SIP⁵ (viz [94]) a SDP⁶ (viz [95]), jako je tomu v systémech VoIP⁷. Firma Apple vytvořila pro správu komunikačních cest a jejich synchronizaci vlastní protokol *AppleMIDI*. Tento protokol využívá pro komunikaci dvou nezávislých UDP portů, a to „Control Port“ (řídící port) a „Data Port“ (datový port), přičemž čísla těchto portů musí nabývat hodnoty n a $n+1$. V rámci jedné komunikační cesty (session) lze mezi sebou propojit pouze dvě zařízení. Jedno ze zařízení plní funkci iniciátora spoje (Session Initiator) a je zodpovědné za distribuci pozvánky potřebné k zahájení komunikace řídicím

²Universal Serial Bus

³Wireless Fidelity

⁴Real-time Transport Protocol

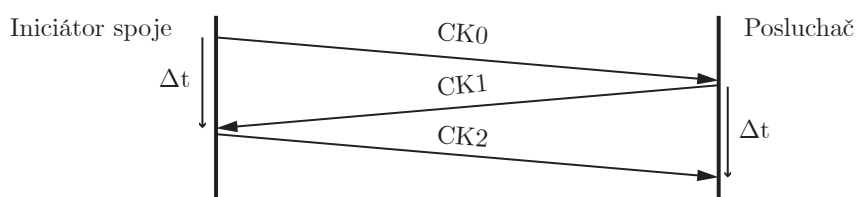
⁵Session Initiation Protocol

⁶Session Description Protocol

⁷Voice over IP

portem posluchačova spojení (Session Listener). Vytvoření spojení se posléze potvrzuje i na datovém portu.

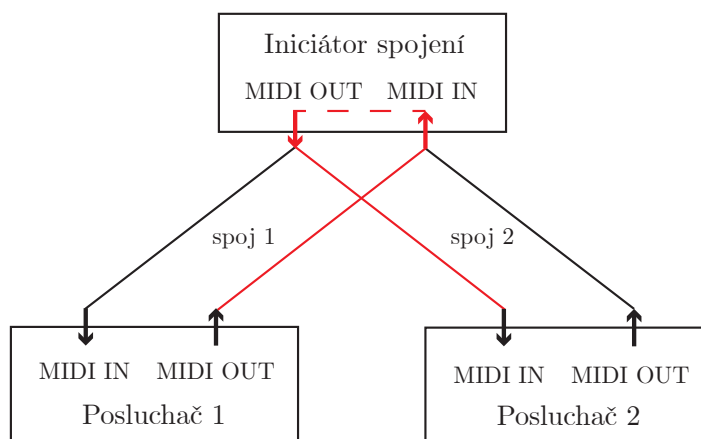
Po vytvoření komunikační cesty probíhá synchronizační sekvence, kterou spravuje vždy iniciátor spojení. Mechanismus stanovení průměrného síťového zpoždění mezi oběma účastněnými zařízeními je založen na výměně paketů CK0, CK1 a CK2 obsahujících časové značky (viz obr. 2.1, kde pakety CK0 a CK2 obsahují aktuální lokální čas iniciátora spojení a paket CK1 obsahuje aktuální lokální čas posluchače). Proces je v průběhu spojení cyklicky opakován zhruba pětkrát za minutu (v závislosti na konfiguraci systému) a slouží pro pravidelné sledování stavu sítě [16, s. 315 – 317].



Obr. 2.1: Diagram znázorňující proces synchronizace a odhadu aktuálního přenosového zpoždění Δt mezi dvěma zařízeními komunikujícími protokolem AppleMIDI

Pakety obsahují 32bitové časové značky, které jsou, podobně jako v MIDI souborech, zaznamenávány ve formě rozdílu lokálního času mezi poslední vyslanou a právě vyslanou zprávou. Touto metodou lze výrazně zmenšit obsah přenášené zprávy vynecháním redundantních nulových bajtů, a tím zefektivnit využití přenosového kanálu. Více MIDI zpráv lze také vyslat jako skupinu zpráv jedním paketem.

Směrování paketů v komunikačních cestách RTP-MIDI probíhá automaticky. Je-li zařízení v jednom čase účastníkem více spojení, protistrany všech komunikačních cest dostávají stejné MIDI zprávy. Odpadá tak nutnost využití MIDI THRU nebo MergeBoxu. Příklad přenosu je schematicky znázorněn na obrázku 2.2. Při požadavku na použití propojovací matrice (patchbay) lze využít více směrování cest na více IP adres.



Obr. 2.2: Architektura komunikace protokolem RTP-MIDI při inicializaci dvou komunikačních spojení (session) jedním zařízením. Červeně je vyznačena cesta předávání MIDI zpráv mezi posluchači dílčích spojení

Přenosové chyby v komunikačních spojích RTP-MIDI se dělí na dva typy: [96]

- Přechodné artefakty – krátkodobé chyby nepřesahující čas ukončení noty, u které chyba vznikla. Např. vynechání zprávy NoteOn způsobí krátkodobou chybu projevující se výpadkem jedné hrané noty.
- Dlouhodobé artefakty – dlouhodobé chyby přesahující čas ukončení noty, u které chyba vznikla. Např. vynechání zprávy NoteOff způsobí hraní dané noty bez definovaného ukončení, čímž dojde k závažným zkreslením probíhajícího MIDI streamu.

Protokol RTP-MIDI využívá obnovovací mechanismus mající za cíl transformovat dlouhodobé artefakty na přechodné. Z důvodu zpoždění a očekávaného zahlcení přenosové cesty se nevyužívá proces znovuvyslání paketu. Každý RTP-MIDI paket obsahuje část zvanou „Journal“ (žurnál). Ta obsahuje informace, které přijímač využije k obnově předchozích paketů při detekci jejich ztráty. Generování a kódování obnovovacích dat je velmi složité. Vyhodnocovací logika při detekci ztráty více not během krátkého časového úseku je nakonfigurována tak, aby vynechala provádění zpráv NoteOn, které by tak mohly způsobit dlouhodobé artefakty. Problematika využití žurnálu pro obnovu zpráv je detailně popsána v [23].

2.2.3 ZIPI

Náhradou protokolu MIDI měl být přenosový protokol s názvem *Zeta Instrument Processor Interface* firmy Zeta Instruments, využívající jazyk *Music Parameter Description Language* (MPDL). Protokol je rozdělen do vrstev vyhovujících OSI⁸ modelu a kromě využití odlišné topologie (hvězdicová s rozbočovačem uprostřed) a libovolného rozhraní (nejčastěji FDDI⁹ nebo Ethernet) přináší podrobnější popis jednotlivých událostí včetně zavedení popisů psychoakustických parametrů, jakými jsou například „ostrost“, „drsnost“ či charakter „náběhu“. Zprávy mohou být generovány přímo hudebním nástrojem nebo mohou být vytvořeny dodatečně zpracováním zaznamenaných audiosignálů [25]. Protokol byl představen v roce 1994 a vzhledem k jeho nevyužití komerčními výrobci byl jeho vývoj ukončen.

2.2.4 OSC

Na vývoji protokolu Open Sound Control (OSC) se podíleli někteří vývojáři protokolu ZIPI. Zprávy tohoto protokolu jsou koncipovány pro šíření lokálními sítěmi rozhraním Ethernet. Protokol OSC narozdíl od MIDI podporuje přenos různých datových typů zpráv (jako například 32bitových čísel, čísel s plovoucí řádovou čárkou, znakových řetězců apod.) a nabízí vyšší rozlišení časových značek pro synchronizaci. Zprávy jsou také definovány nikoliv binární posloupností (nebo jejich příslušnou hexadecimální interpretací), jako je tomu u MIDI protokolu, ale znakovým řetězcem. Díky přenosu rozhraním Ethernet se dosahuje vyšší rychlosti přenosu. Neomezený je počet kanálů. Protokol nalézá uplatnění také v robotice a videosystémech [46] [90].

⁸Open Systems Interconnection

⁹Fiber Distributed Data Interface

2.2.5 Audio Over Ethernet

Rozhraní Ethernet nabylo na významu s příchodem sítí sdílejících přenosové médium. Sdílení média představuje problémy s kolizemi jednotlivých datových paketů, pokud více zařízení v síti zahájí ve stejném okamžiku své vysílání. Ethernet proto využívá pro svou činnost protokol CSMA/CD. Funkce protokolu spočívá ve sledování přenosového média. Pokud není médium volné, zařízení vyčkává a vysílání zahajuje po uvolnění média. V průběhu vysílání datových rámců zařízení detekuje, zda došlo ke kolizi. Pokud k ní dojde, zařízení přeruší své vysílání a začne vysílat tzv. „jam signal“, kterým jsou i ostatní zařízení informována o kolizi. Po detekci tohoto kolizního signálu ostatní zařízení přeruší svá možná vysílání, tím uvolní komunikační kanál a vygenerují pseudonáhodný časový interval, po který nebudou uskutečňovat žádná další vysílání. Vzhledem k možnosti kolizí není protokol CSMA/CD vhodný pro aplikace vyžadující spolehlivý datový přenos v reálném čase. Přes tuto negativní vlastnost bylo rozhraní Ethernet využíváno pro AoE systémy již od 90. let minulého století. Příkladem jsou systémy *CobraNet* a *EtherSound*, které svého času našly uplatnění ve zvukových instalacích velkého rozsahu (např. haly veřejné dopravy, konferenční centra, zábavní parky). [19]

Novější systémy lze rozdělit do tří vrstev podle jednotlivých vrstev OSI modelu:

- *AoE Layer 1*: Komunikace ve fyzické vrstvě, tedy není možné využívat MAC¹⁰ adresu. Zástupcem první vrstvy je například systém firmy Sony *SuperMAC*, standardizovaný pod názvem *AES50* podporující připojení skrze Ethernet rychlosti 100 Mbit/s. Tento systém cílí na profesionální audio aplikace a umožňuje přenášet obousměrně 48 kanálů se vzorkovacím kmitočtem 48 kHz nebo 24 kanálů se vzorkovacím kmitočtem 96 kHz. Systém je navržen pro přímou komunikaci mezi dvěma zařízeními. Z důvodu chybějícího záhlaví obsahujícího MAC adresu není možné provádět adresování v síti, což způsobuje problém se switchem, pro něhož je tento datový tok nestandardní.
- *AoE Layer 2*: Větší možnosti využití mají systémy linkové vrstvy, mezi něž se řadí například *REAC* od firmy Roland, *ACE/dSNAKE* firmy Allen & Heath a *Sound Grid* firem Waves a Digico. Přenos je uskutečňován broadcastem a tedy hlavička MAC adresy v paketech obsahuje příslušnou broadcastovou adresu. Ačkoli systémy linkové vrstvy využívají MAC adresu, není použita pro samotné adresování v síti. Je zřejmé, že jakýkoli rušný asynchronní síťový provoz by mohl zcela narušit spolehlivou komunikaci mezi zařízeními. Proto tyto systémy vyžadují vlastní síťovou infrastrukturu, která není sdílena s žádnými dalšími typy datových přenosů. Taktovací mechanismus není robustní na velké vzdálenosti a pro velký počet síťových prepínačů.
- *AoE Layer 3* nebo *Audio over IP*: Pro trasování komunikace se využívají IP adresy a běžné síťové topologie. Komunikace může probíhat ve sdílených režimech. Výhodou je flexibilita kapacity kanálu a možnost výběru audio formátu. Příklady těchto technologií jsou *Ravenna* firmy ALC NetworX nebo *Livewire* firmy Telos Alliance. [15]

¹⁰Media Access Control

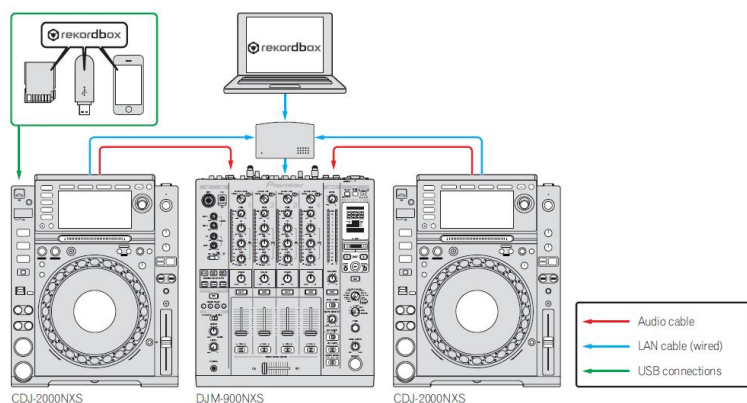
2.3 CD/USB přehrávače a mixážní pulty

2.3.1 Mixážní pulty

Současné mixážní pulty firem *Pioneer* a *Denon* umožňují propojení mixážních pultů skrze sběrnici Ethernet kabelem CAT5 nebo CAT6 do zásuvky RJ45. Starší typy mixážních pultů (např. *Pioneer DJM-900NXS*) disponují pouze jedním portem Ethernet. Pro propojení mixážního pultu s více zařízeními je proto nezbytné použít switch. Novější mixážní pulty (např. *Pioneer DJM-2000NXS* a *Denon X1800 Prime*) mají integrovanou víceportovou sběrnici, která usnadňuje konektivitu a umožňuje připojení více přehrávačů a notebooků přímo do pultu.

2.3.2 CD/USB přehrávače

Vzájemná konektivita pro předávání informací je u starších typů přehrávačů zajištěna pouze USB rozhraním. Připojením přehrávačů přes toto rozhraní do počítače lze používat přehrávače jako MIDI kontrolér. Přehrávaný obsah je však uložen a přehráván v počítači a přehrávače slouží jen jako externí ovladač k hudebnímu software, který přehrávání zajišťuje. Novější typy přehrávačů, jako například *Pioneer CDJ-2000NXS2* nebo *Denon SC5000 Prime*, již obsahují rozhraní Ethernet, kterým lze buď přímo propojit dva přehrávače mezi sebou, nebo propojit přehrávač se switchem anebo víceportovou sběrnici mixážního pultu.

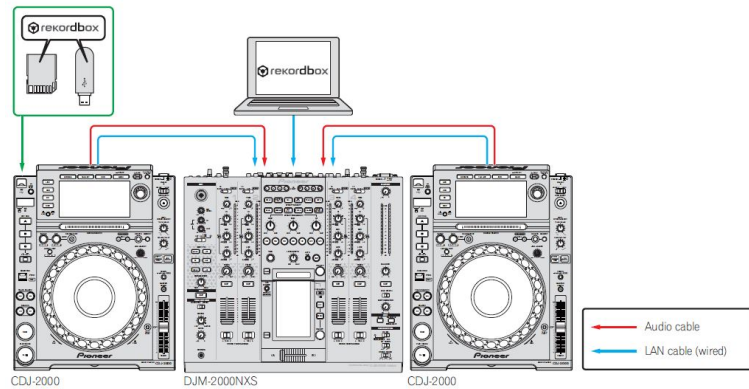


Obr. 2.3: Propojení mixážního pultu Pioneer DJM-900NXS se dvěma CD přehrávači Pioneer CDJ-2000NXS2 a notebookem rozhraním Ethernet pomocí switchu. Převzato z [91, s. 8]

2.3.3 Synchronizace

Synchronizace mezi zařízeními je u produktů firmy *Pioneer* řešena komunikačním protokolem *Pro DJ Link*. Pomocí něj lze spravovat současně až 5 přehrávačů. To lze využít pro sdílení obsahu vyměnitelných paměťových médií (typicky USB flash disků a SD¹¹ karet) mezi ostatními přehrávači. Protokol dovoluje sdílení informace o aktuálním počtu úderů za minutu (BPM) právě hrající hudby pro synchronizaci tempa (BPM Sync) na ostatních přehrávačích nebo pro korekci tempa efektové jednotky mixážního pultu. Informaci o BPM lze převést do formátů jako Linear Timecode (LTC), MIDI Timecode (MTC), MIDI Beat Clock nebo Ableton

¹¹Secure Digital



Obr. 2.4: Propojení mixážního pultu Pioneer DJM-2000NXS se dvěma CD přehrávači Pioneer CDJ-2000NXS2 a notebookem rozhraním Ethernet pomocí interní víceportové sběrnice. Převzato z [91, s. 21]

Link a propojit tak mixážní pult se softwarem třetích stran. V praxi se synchronizace využívá k propojení s technologiemi pro řízení osvětlovací techniky (např. *Lightkey*¹², *Sunlite*¹³, *MADRIX*¹⁴ a *grandMA*¹⁵) a pro vizualizační software (např. *Resolume*¹⁶) [43].

Obdobně je tomu u firmy *Denon* a jejím komunikačním protokolem *StageLinq*. Ten umožňuje vzájemnou komunikaci až 4 přehrávačů. Kromě sdílení obsahu vyměnitelných paměťových médií lze k mixážnímu pultu připojit počítač s vizualizačním softwarem (např. *Resolume*) nebo technologie pro řízení osvětlovací techniky (např. *SoundSwitch*¹⁷) [37].

2.4 Elektronické hudební nástroje

2.4.1 Syntezátory

Elektronické syntezátory od počátku třetího tisíciletí preferují kombinace vlastností analogových syntezátorů z důvodů jejich specifických zvukových vlastností, a také digitálních syntezátorů pro jejich stabilitu a konektivitu s ostatními zařízeními v audiořetězci. Stále častěji se na syntezátorech setkáváme i s dotykovými prvky a programovatelnými funkcemi jednotlivých ovládacích prvků. [4]

Mezi interaktivní druhy syntezátorů můžeme zařadit zařízení *Reactable*, které bylo zkonstruováno v roce 2003 v Barceloně. Jedná se o dotykový stůl, sloužící jako modulární syntezátor. Ovládání je prováděno uživatelem přemisťováním či otáčením fyzických bloků ve tvaru krychlí a kotoučů. Tyto bloky na sobě mají uvedeny identifikační symboly jednoznačně určující jejich hudební význam. Mezi bloky se nachází zvukové generátory, samplery¹⁸, filtry, modulátory, tvarovače, sekvencery apod. Na stůl se z vnitřní strany promítají vizualizace, které se dle dění na desce stolu v reálném čase mění. Identifikátory jednotlivých

¹²www.lightkeyapp.com

¹³www.sunlitepro.com

¹⁴www.madrix.com

¹⁵www.malighting.com

¹⁶www.resolume.com

¹⁷www.soundswitch.com/

¹⁸přehrávače krátkých hudebních vzorků

funkčních bloků jsou pro snímání pohybu z vnitřní strany stolu nasvíceny infračerveným světlem a snímány kamerou, jejíž obrazový snímač je schopen pracovat v infračerveném spektru. Snímání pohybu je řízeno open source systémem počítačového vidění ReacTIVision [92] a je přenášeno k aplikační vrstvě protokolem *TUIO*, kódovaným protokolem *OSC*. Zařízení Reactable se blíže věnuje má semestrální práce z předmětu *Hardware pro multimedia*, viz [5].

2.4.2 MIDI kontroléry

Jedná se o zařízení, jež negenerují a neobsahují žádné vlastní zvuky. Pro používání těchto zařízení je nezbytné připojení k softwaru v počítači nebo jinému EHN skrze komunikační rozhraní (např. MIDI, USB nebo Wi-Fi). MIDI kontrolérem pak lze řídit funkce tohoto softwaru nebo EHN. Jednotlivé MIDI kontroléry se liší počtem ovládacích elementů. Nejčtenější zastoupení mají tlačítka, tahové potenciometry a otočné potenciometry, které lze s využitím MIDI protokolu uživatelsky naprogramovat pro ovládání různých funkcí připojeného softwaru nebo EHN. Specifickým MIDI kontrolérem je stavebnicové zařízení *Special Waves Mine* [98], který umožňuje libovolné sestavení ovládacích bloků do konektorové sítě umístěné na desce zařízení. Zařízení je podrobněji popsáno v mém bakalářském individuálním projektu, viz [4]. MIDI kontroléry se mohou lišit tvarem (např. sférický kontrolér *AlphaSphere* [55]) nebo způsobem hraní (např. elektronické bicí firmy *Roland* [101]) [24, s. 46 – 49].

2.5 Digital Audio Workstation

Fyzické ovládání DAW lze uskutečnit pomocí MIDI kontrolérů připojitelných k počítači skrze rozhraní USB. Každý z DAW systémů stanovuje vlastní doporučení pro uživatelskou volbu konkrétního kontroléru. *Ableton* navrhl a vyrobil pro svůj produkt *Live* vlastní MIDI kontrolér *Ableton Push*, jež nelézá využití jak při živém hraní, tak hudební produkci. Tuto funkci mohou poskytnout i jiné MIDI kontroléry, jejichž funkčním blokům je před použitím s konkrétním DAW nutno přiřadit příslušnou ovládací funkci.

Současné DAW jako *Ableton Live*, *ProTools*, *Cubase* nebo *FL Studio* nenabízejí žádné jiné možnosti vlastního sdílení rozpracovaných projektů, než jejich umístění do cloudového úložiště. Spolupracuje-li na společném projektu více hudebníků, je potřeba daný projekt manuálně sdílet společně se všemi použitými smyčkami. Jiný přístup ke spolupráci na hudebních dílech přináší *OhmStudio*, první DAW s rozhraním umožňující spolupráci více hudebníků v reálném čase. Vlastní testování tohoto systému se nachází v kapitole 5.4.

2.6 Osvětlovací technika

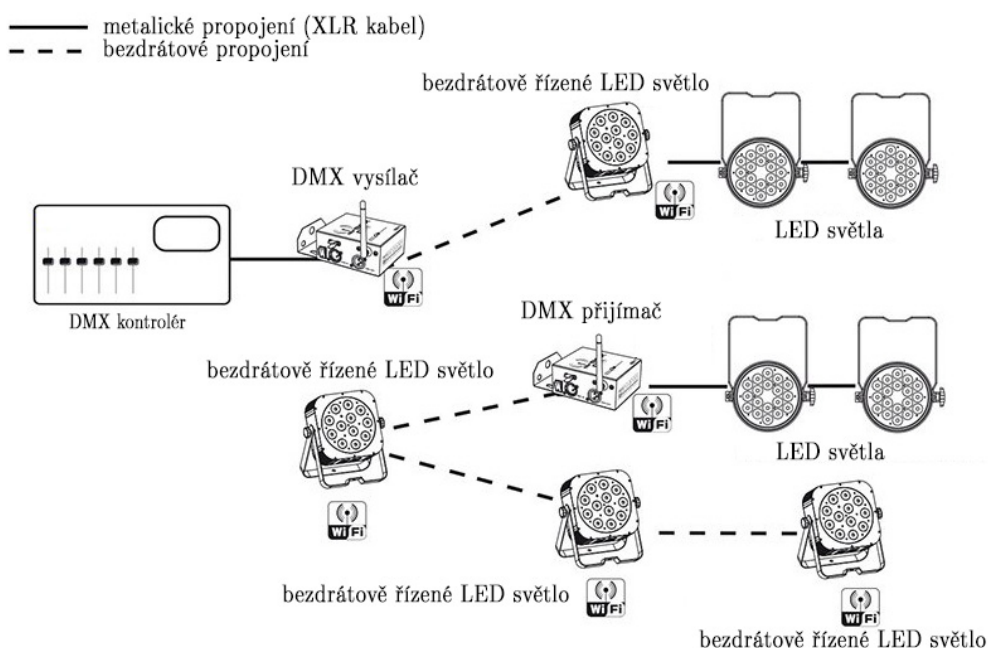
Digital Multiplex Protocol (DMX) je protokol využívaný ve scénické a osvětlovací technice. Z průmyslového standardu EIA/TIA-485¹⁹ vychází konkrétní specifikace *DMX512* [59]. Přenosová rychlost této specifikace je 250 kbit/s pakety s velikostí do 512 bajtů [62]. Každé

¹⁹Standard vytvořila organizace EIA (Electronic Industries Alliance) pod názvem RS-485. Později došlo k přeznačení na EIA-485. Správu specifikace získala asociace TIA (Telecommunications Industry Association) a standard byl přejmenován na EIA/TIA-485, více informací o standardu viz [60].

funkci jednoho zařízení v řetězci je přiřazena vlastní DMX adresa. Pokud se v řetězci nachází více zařízení a jejich funkce jsou adresovány totožně, budou na řídicí signál reagovat shodně. Pro individuální řízení je potřeba funkce jednotlivých zařízení v adresovém prostoru zřetězit za sebe, tedy přiřadit jim vlastní adresy. [28]

Zařízení se propojují sériově symetrickým kabelem s XLR²⁰ konektorem a impedancí 110 Ω. Konektory by měly být dle normy pětikolíkové, v praxi se velmi často používají konektory tříkolíkové. Pro prevenci odrazů řídicího signálu je na konec řetězce vhodné zapojit zakončovací rezistor 120 Ω, tzv. *DMX terminátor*. Komunikaci se zařízeními je možné uskutečnit i bezdrátově. Možné zapojení demonstruje obr. 2.5).

Řízení probíhá hardwarovými kontroléry nebo softwarovými aplikacemi se signálovými převodníky. [28] V praxi se často používají například systémy *MADRIX*²¹, *Lightkey*²², *Sunlite*²³, *SoundSwitch*²⁴ nebo *grandMA*²⁵.



Obr. 2.5: Vzájemné propojení klasických a bezdrátových DMX zařízení ovládaných DMX kontrolérem. Překresleno z [61]

²⁰External Line Return

²¹www.madrix.com

²²www.lightkeyapp.com

²³www.sunlitepro.com

²⁴www.soundswitch.com

²⁵www.malighting.com

3. Popis systému Internet Of Musical Things

Definicí Internet of Musical Things¹ (IoMusT) rozumíme rozšíření Internetu věcí do hudebního průmyslu. Lze ho považovat za podoblast Internet of Media Things (IoMT²). Oblasti technologického vývoje cílí na tři hlavní komponenty systému [1, s. 61995 – 61667].

3.1 Komponenty systému

- *Hudební věci (Musical Things)* – tvoří je nové technologie hudebních zařízení zásadně pozměňující dosavadní přístup k hudební tvorbě a produkci. Očekává se podílení hudebníků a posluchačů na hudební produkci a vzájemná interakce s hudebními nástroji pomocí sítě IoT. Hudební věci mohou být využity k produkci nebo k perceptuálnímu rozšíření vjemu z poslouchané hudby. Mohou fungovat jako vysílač či přijímač.

Příklady zařízení:

- „chytré“ hudební nástroje (SMI³),
 - „chytrá“ režijní zařízení,
 - nositelná elektronika,
 - náhlavní soustava pro virtuální realitu (VR);
- *Konektivita (Connectivity)* – bezdrátové a vícesměrové propojování věcí může probíhat lokálně i vzdáleně. Vlastnosti komunikace přes místní sítě jsou závislé na hardwarových a softwarových síťových prvcích a jejich komunikačních standardech vycházejících z koncepce systému IoT. Standardy budou muset splňovat technické nároky koncepce IoMusT pro RTC⁴ (komunikaci v reálném čase). Klíčové je nízké zpoždění přenášených dat, vysoká spolehlivost a dokonalá synchronizace zařízení.

¹Lze volně přeložit jako Internet hudebních věcí

²Zkratka IoMT se v literatuře používá nezávisle pro dvě různé definice podoblastí IoT. Internet of Media Things (Internet multimediálních věcí) a Internet of Medical Things (Internet lékařských věcí). Více v kapitole 2.1.1.

³Smart Musical Instruments

⁴Real-time communication

Požadavky na konektivitu:

- podpora bezdrátových a drátových sítí (při lokální i vzdálené komunikaci),
 - velmi nízké přenosové zpoždění,
 - vysoká propustnost a spolehlivost pro zachování kvality multimodálního multimedialního obsahu,
 - vlastní standardy a protokoly,
 - synchronizační mechanismy,
 - specifické antény,
 - Web of Things (WoT) zprostředkávající aplikační vrstvu IoT,
 - API (Application Programming Interface)⁵;
- *Aplikace a služby* – výsledné aplikace mohou být dle jejich typu cíleny na hudebníky, zvukové inženýry a cílové posluchače. Jejich povaha může být interaktivní (za podmínky RTC). Aplikace mohou být vytvořeny pomocí Web API a jsou součástí aplikační vrstvy *Web of Musical Things* zprostředkávající uživateli přímou komunikaci s hudebními věcmi.

Příklady služeb:

- Možnost připojení chytrého telefonu k SMI,
- připojení SMI k sociálním sítím,
- analýza obsahu,
- kombinované mapování snímaných dat s řídicími parametry hudebních věcí,
- služba pro synchronizaci obsahu mezi hudebními věcmi.

Příklady aplikací:

- pro posluchače:
 - * vylepšení perceptuálního vjemu z reprodukce hudby během živé produkce multisenzorickou stimulací posluchače hudebními věcmi,
 - * vzdálená součinnost posluchačů při tvorbě hudby během živého hraní;
- pro hudebníky:
 - * vzdálený nácvik hudebního vystoupení,
 - * přímé připojení SMI do cloudového úložiště;
- pro zvukové inženýry:
 - * „chytrá“ hudební produkce (živá i studiová) s využitím SMI;
- pro učitele:
 - * webová aplikace pro hodnocení studentů,
 - * možnost sledování pokroku ve studiu,
 - * komunikace se studenty pomocí SMI.
- Pro studenty:
 - * interaktivní e-learning.

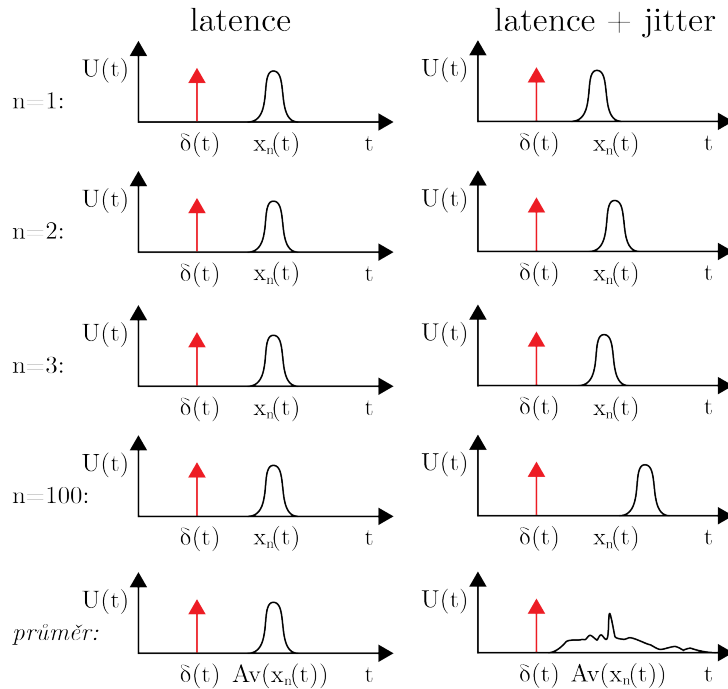
⁵rozhraní pro programování softwarových aplikací

3.2 Technologické požadavky na realizaci

V předchozích kapitolách 2.1.1 a 3.1 byly diskutovány požadavky k zajištění správné funkčnosti systému IoMusT a dalších specifických podoblastí IoT. Tato kapitola se věnuje diskuzi konkrétních problémů při realizaci systémů IoMusT.

3.2.1 Komunikace v reálném čase

Nejdůležitějšími podmínkami korektní funkce RTC systémů jsou nízké zpoždění datového přenosu, jejich stabilita a spolehlivost. Tyto podmínky musí být splněny pro bezdrátový způsob komunikace i pro komunikaci po vedení. V přenosu dat rozlišujeme dvě hlavní signálová zpoždění. Konstantní zpoždění, dáno především délkou přenosové trasy, množstvím síťových zařízení přeposílajících data a konstrukcí přenosové trasy. Toto zpoždění se označuje pojmem *latence*. Oproti tomu proměnné zpoždění, závislé na zahlcení přenosové trasy, se nazývá *jitter*. Jitter lze využít pro hodnocení kvality RTC systémů [69]. Srovnání obou typů zpoždění je znázorněno na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Znázornění vlivu přenosové latence a jitteru při opakovaném vysílání Diracova impulsu $\delta(t)$ přenosovým kanálem na přijatý signál $x(t)$ po zprůměrování

V přenosových systémech se vždy uvažuje nenulová latence l , ke které se přičítá hodnota jitteru j . Kompenzací jitteru je stanovení pevného časového intervalu T (za podmínky $T > l$), po který bude přijímač vyčkávat na příchozí paket před zpracováním dat. Přesáhne-li zpoždění t hodnotu T , považuje se paket za ztracený a při jeho zpožděném příjmu se neuvažuje. Výpadek většího množství paketů může způsobit problémovou rekonstrukci přenášených dat. Hodnota intervalu T se v praxi nastavuje v řádu jednotek milisekund.

Proměnné zpoždění je problémové zejména pro rigorózní synchronizaci signálů přenášených mezi zařízeními nesdílející hodinový signál *CLK*. K synchronizaci slouží řada proto-

kolů. Jedním z nich je například *Network Time Protocol* (NTP). Přesnost synchronizace tímto protokolem v běžné místní síti je zhruba 200 μ s. [47, s. 89] Pro interkontinentální komunikaci je navíc nutno uvažovat různá zkreslení. V menších oblastech (sítě typu MAN a menší) lze dosáhnout zpoždění v řádu milisekund. Přesnost se odvíjí od typu operačního systému a stavu sítě [86]. Řešením je vývoj protokolu využívající tzv. „synchronizaci fyzické vrstvy“ na komunikačním rozhraní, konkrétně metodu neortogonálního mnohonásobného přístupu (NOMA⁶) [41]. Podrobněji je tato metoda vysvětlena v [11].

3.2.2 Standardy pro zajištění součinnosti zařízení

Standardizace částí architektury a jednotlivých komunikačních protokolů je nutnou součástí funkcionality systémů IoT. Jedině tak lze dosáhnout globální kompatibility používaných zařízení, jejich spolehlivosti a efektivity přenosu dat. Pro práci s multimodálními multimedialními daty v rámci IoMusT je problematika standardizace zásadní. Zařízení musí být schopna tato data generovat, spontánně s nimi interagovat a dynamicky je získávat. K tomu je zapotřebí vyvinout příslušné protokoly a audiovizuální formáty, na jejichž funkci budou navrženy příslušné API.

Pro komunikaci mezi hudebními zařízeními a přenos hudebních informací existují v současné době nejrozšířenější protokoly MIDI (viz kapitola 2.2.1) a OSC [46, s. 194-195] (viz 2.2.4). Je několik důvodů, proč již široce uplatněný protokol MIDI není nahrazen protokolem OSC. V OSC neexistuje adresní prostor pro propojení hudebních zařízení využitelný při živém hraní – zařízení připojená přes rozhraní Ethernet, Wi-Fi nebo Bluetooth se navzájem neznají. OSC oproti MIDI také nemá definován vlastní souborový formát [46]. Protokol OSC je však oproti MIDI, který byl v 80. letech 20. století navržen pro přímou komunikaci hudebních nástrojů, flexibilnější. Cílem je vznik takového formátu pro přenos hudebních informací, který by kompenzoval všechny zmiňované nedostatky. Diskuze návrhů pro vývoj probíhá jak u protokolu OSC [89] (definice adresního prostoru, definice souborového formátu pro trvalé ukládání dat, řešení kompenzace jitteru bez synchronizace hodinového signálu apod. – více v [46, s. 198]), tak i u protokolu MIDI, který má být nahrazen protokolem s názvem *MIDI 2.0* (původní pracovní název byl *MIDI HD* [73]). Jeho vývoj je komplikovaný širokým uplatněním stávajícího protokolu. Nový protokol by měl přinést vyšší rozlišení dat, ovladače jednotlivých not, zjednodušení předávání zpráv a další funkce [74]. „Toho je však obtížné dosáhnout při zachování interoperability s miliony stávajících produktů, které MIDI používají.“⁷ Z prvních specifikací, které byly přijaty v roce 2020 Asociací vývojářů MIDI (MIDI Manufacturers Association), by kompatibilitu a inteligentní řízení měly zajišťovat zprávy mechanismu MIDI-CI (Capability Inquiry), díky němuž budou moci jednotlivá zařízení vyhovující standardu MIDI 2.0 společně komunikovat a automaticky se nakonfigurovat pro vzájemnou spolupráci. Automatická detekce je schopna určit, zda lze s připojeným zařízením komunikovat novým nebo původním protokolem. Tím je zachována kompatibilita. Protokol MIDI 2.0 předpokládá obousměrnou komunikaci a první specifikace má být cílena pro rozhraní USB. Prvním MIDI kontrolérem, který je připraven podporovat komunikaci standardem MIDI 2.0, je zařízení firmy Roland A-88MKII [97]. Specifikace vznikajícího protokolu jsou dostupné v [71].

Využití stávajících prostředků datové komunikace v současnosti neumožňuje vysílání protokolů jako MIDI nebo OSC přes WLAN standardy Wi-Fi nebo Bluetooth s nízkou latencí

⁶Non-orthogonal multiple access

⁷Příspěvek v diskuzním fóru [74] od zástupce Asociace vývojářů MIDI (MIDI Manufacturers Association)

při zachování vysoké spolehlivosti. [1, s. 62008], jak například vyplývá z testování MIDI protokolu v RTC systému [49].

Z hlediska synchronizace hudebních zařízení při zachování jejich interoperability je v současnosti vhodným protokolem Ableton Link, jehož schopnosti synchronizace jsou jen v sítích LAN a WLAN (vysíláním informace o aktuálním BPM a pozici přehrávané skladby) [53]. Cílem budoucího vývoje bude navrhnout funkční synchronizační řešení i pro síť WAN [1, s. 62008], potažmo GAN.

Definice nových souborových formátů je ve střednědobém horizontu nutná i u audio-signálů. Vývojáři skupiny *Moving Picture Experts Group* (MPEG) definovali roku 2009 standard *MPEG-A: Interactive Music Application Format* (IM AF) (viz [79]), který byl přijat mezinárodní standardizační organizací ISO⁸. Myšlenka IM AF spočívá ve využití vícestopého zvukového záznamu a doplňkových dat k interaktivní reprodukci. Jednotlivé stopy mohou tvořit dílčí hudební nástroje nebo pěvecké kanály. U elektronické hudby to mohou být postupně všechny stavební prvky dané nahrávky (podrobně je problematika popsána v mé bakalářské práci [3, s. 34]). Data jsou uložena ve formátu *ISO-Base Media File (ISO BMFF)*⁹ [84] podporujícím uložení časově závislých audiovizuálních dat pro jejich flexibilní a uživatelsky variabilní správu a prezentaci. V něm lze uchovávat data jako vícekanalovou zvukovou stopu, skupiny audiostop, data přednastavení (různé verze mixáže skladby), uživatelská mixážní data (pro nastavení hlasitostí jednotlivých kanálů), přidružená multimediální data (např. text skladby, obrázek alba, fotografie tvůrců apod.) a metadata (značky pro identifikaci skladby, např. jména interpretů, název skladby, název alba a další), dnes běžně ukládaných v kontejneru ID3 [18]. Pro přehrávání je nezbytný příslušný interaktivní přehrávač. Vývoj a vlastnosti návrhu jeho prototypu *HTML5 IM AF Player* pro správné fungování napříč platformami a internetovými prohlížeči dle starší verze zmiňovaného standardu ISO/IEC FDIS 23000⁸ jsou popsány v [14]. Využití ISO BMFF se také jeví jako vhodný způsob uložení trojrozměrných zvukových (i obrazových [38, s. 3]) děl (3D Audio) pro interaktivní vyhledávání posluchači i umělci [56, s. 34], jak je definováno standardem *MPEG-H: High Efficiency Coding and Media Delivery in Heterogeneous Environments* (viz [78]) přijatý mezinárodní standardizační organizací ISO¹⁰.

Na straně 62009 ve studii [1] je také zmíněn distribuovaný hudební formát *Dynamic Music Object (DYMO)*. DYMO je flexibilní a modifikovatelná jednotka, která zahrnuje svazek hudebních souborů, analytických dat extrahovaných ze souborů (pomocí technik pro získávání hudebních informací (MIR¹¹)), strukturální definice týkající se zvuku a analytických dat a také konfiguraci přehrávání zvanou „vykreslování“, která mapuje ovládání parametrů. Přehrávač *The Semantic Music Player* je poté schopen „přijímat rozhodnutí v reálném čase na základě strukturálních informací a analytických dat představovaných sémantickými webovými technologiemi a reagovat na signály senzorů a uživatelského rozhraní“¹². Proměnné parametry zvukových součástí DYMO mohou být tedy řízeny, např. akcelerometrem, kompasem, geolokací v mobilním telefonu nebo aktuální náladou posluchače. Povahou DYMO

⁸Současný standard nese označení: *ISO/IEC FDIS 23000-19, Information technology – Multimedia application format (MPEG-A) – Part 19: Common media application format (CMAF) for segmented media*, více informací o standardu viz [80] (standard je přepracováván a aktualizován v pětiletém cyklu).

⁹Struktura a obsah ISO BMFF jsou uvedeny v [68]

¹⁰Současný standard nese označení: *ISO/IEC 23090-2, Information technology – Coded representation of immersive media – Part 2: Omnidirectional media format*, více informací o standardu viz [81] (standard je postupně přepracováván a aktualizován).

¹¹Music information retrieval

¹²Abstrakt v [40, s. 1]

je, že audio „zní při každém poslechu jinak“¹³. Především díky své flexibilitě a síťovému charakteru je tento hudební formát vyhovující pro IoMusT.

3.2.3 Multimodální obsah a jeho zpracování

Pomocí metod umělé inteligence je možné popsat audiosignály na konceptuální úrovni (tzv. sémantický zvuk) tak, aby informace o audiosignálech byly strojově čitelné. Vznikají tak datové sady definující třídy a vlastnosti, které jsou popsány ontologickým jazykem *RDF Schema*¹⁴. Ten v maximální míře zachovává kompatibilitu napříč technologiemi reverzibilitou zpracovávaných údajů využíváním již definovaných tříd a vlastností. Ty jsou popsány *ontologickými modely*, které lze chápat jako slovníky sloužící k popisu daných dat [58]. Pro popis hudebních informací vznikl například ontologický model *The Music Ontology*¹⁵ (MO), který je postaven na slovnících *Friend of a Friend*¹⁶ (FOAF) popisující osoby, skupiny osob a organizace, *The Event Ontology*¹⁷ pro popis událostí souvisejících s procesem produkce a interpretace hudby, *The Timeline Ontology*¹⁸ zaměřující se na události (např. konání hudebních vystoupení v určitý den a určování jednotlivých částí skladby (stavba např. elektronického hudebního díla je popsána v mé bakalářské práci viz [3, s. 36])) a *FRBR Ontology*¹⁹ sloužící pro popsání vzniklých děl a s nimi souvisejících náležitostí [85]. Ontologickému modelu MO a vlastnostem ontologií spojených s hudbou se podrobněji věnuje [29]. Na tomto modelu byly dosud postaveny další modely, jako například *Audio Features Ontology*²⁰ pro popis zvukového obsahu či *Studio Ontology*²¹ popisující proces studiového nahrávání a mixáže hudebního díla [85].

Veškeré extrakce informací popsaných výše v současnosti fungují nezávisle na čase. V praxi bude zapotřebí tyto extrakce pomocí ontologických modelů provádět v reálném čase. Velkou výzvou je zajištění přesnosti rozpoznávacích algoritmů, které budou zpracovávat zvuky obsahující nežádoucí artefakty (např. šum, hluk okolí, nelinearity elektroakustických měničů, doba dozvuku místnosti a další vlastnosti prostorové akustiky apod.). S velkou výhodou lze využít provázanosti zařízení v rámci sítě IoMusT, kdy mohou daná zařízení dotazovat informace (např. o vlastnostech vibráta hraného tónu nebo době dozvuku hrané noty) získané přímo u SMI, jakožto zdroje této informace. Zpřístupněním takovýchto dat dalším aplikacím je možné vynechat proces rozpoznávání a předejít tak možným výpočetním chybám. V rychlé, stabilní síti lze dosáhnout i zvýšení rychlosti interakce.

Sdílení audiosignálů, extrahovaných informací ve formě sémantického audia a mnohých dalších hudebních informací přinese potřebu vývoje nových analytických nástrojů schopných pracovat s obrovským množstvím dat pro stanovení smysluplných závěrů plynoucích ze vzájemných, časově závislých, vlastností těchto dat. Tuto funkcionalitu v rámci IoMusT umožní technologie sémantického webu.

S příchodem systémů IoMusT bude možné sbírat a zpracovávat biometrická data ze senzorů posluchačů v průběhu hudebního představení. Tyto informace výrazně ovlivní obor

¹³ citováno z [40, s. 1], kapitola 2 – *Dynamic Music Objects*

¹⁴ www.w3.org/TR/rdf-schema/

¹⁵ www.musicontology.com

¹⁶ www.xmlns.com/foaf/spec/

¹⁷ www.motools.sourceforge.net/event/event.html

¹⁸ www.motools.sourceforge.net/timeline/timeline.html

¹⁹ www.vocab.org/frbr/core.html

²⁰ www.omras2.org/AudioFeatures

²¹ www.isophonics.net/content/studio-ontology

hudební psychologie, zaměřující se na perceptuální vnímání člověka při poslechu hudby, jeho reakce na různé zvukové podněty a hudební sentiment. [35, s. 17 – 18] Díky získaným znalostem tak bude možné například cíleně ovlivňovat atmosféru a aktuální náladu posluchačů hudebními projevy (plynoucích z metod strojového učení) vyvolávajících v posluchačích příslušné psychologické počitky. Dále bude možné studovat dlouhodobé změny v chování hudebních interpretů, krátkodobé změny v chování účastníků hudebních festivalů a další současné nejasnosti lidské psychologie.

3.2.4 Hudební věci

Všechna zařízení, která jsou schopna vytvářet či zpracovávat hudební informace přenášené sítí IoT, označujeme jako *hudební věci*. Příklady zařízení jsou uvedeny v kapitole 3.1.

Vývoj hudební nositelné elektroniky (MHW²²) vyžaduje miniaturizaci elektronických výpočetních jednotek a prvků, které je tvoří, při zachování požadavků elektromagnetické kompatibility. Z energetického hlediska musí být jednotlivé IoT elementy při dlouhodobém používání energeticky úsporné s bateriemi dostatečné kapacity šetrnými vůči životnímu prostředí. Kompletní zařízení musí mít nízkou hmotnost. Samostatnou kapitolou je problematika designu zařízení, která přímo závisí na typu výrobku a účelu použití a bude se odlišovat u jednotlivých výrobců.

Rozlišujeme čtyři způsoby komunikace s využitím nositelné elektroniky v koncepci systému IoMusT [2, s. 184]:

- Komunikace mezi hudebními interprety
- Komunikace mezi hudebními interprety a zvukovým technikem
- Komunikace mezi hudebními interprety a hudebními věcmi
- Komunikace mezi hudebními interprety a publikem

Vývoj prototypu zařízení a testování funkce při živé hudební produkci s více účastníky je uvedeno v [2]. Vlastnímu vývoji prototypu zařízení pro komunikaci mezi hudebními interprety a jeho měření s jedním účastníkem je věnována část 5.3.

Významný technologický rozvoj zaznamenává také oblast zabývající se výrobou tzv. e-textilií. Bezdrátová komunikace s ostatními zařízeními může být zajištěna vestavěnými anténami, jako například v [7]. Prostřednictvím nich lze přímo získávat data ze senzorů umístěných na lidském těle nebo na oblečení pro další zpracování. V konceptu IoMusT lze tento typ dat využívat k mnoha aplikacím souvisejících s audiovizuální technikou (podrobněji je vysvětleno v kapitole [Multimodální obsah a jeho zpracování](#)).

3.3 Právní aspekty

Podstatnou oblastí, které se v současnosti věnuje řada studií, je právní hledisko IoT z hlediska využívání osobních údajů. Teorie IoT je založena na idealizované představě, že všechna zařízení a senzory budou schopna komunikovat se všemi ostatními zařízeními a senzory. Základní problém však může nastat při nerespektování legislativních ustanovení pro ochranu

²²Musical haptic wearables

osobních údajů – v Evropské Unii platí nařízení *General Data Protection Regulation* (GDPR). S nástupem IoT technologií a začleněním nositelné elektroniky do běžného života je nutné stanovit jasné bezpečnostní metody a pravidla, podle kterých budou s osobními daty nakládat provozovatelé jednotlivých subsystémů. Některé možné postupy a metody zabezpečení jsou dále diskutovány v [6].

Další oblastí úzce související se systémy IoMusT, jsou autorská práva k hudebním dílům. Vzniknou-li prostřednictvím IoMusT systému hudební díla, kde zařízení tato díla vytvářející byla ovlivněna daty třetích osob získaných metodami získávání informací, může nastat právní spor o vlastnická práva. Stejně jako v předchozím případě je nutné stanovit jasná pravidla, která budou stanovovat vlastnickou situaci při využívání osobních dat k vzniku uměleckých děl.

U sdílené tvorby hudby v reálném čase více účastníky může dojít situaci, kdy se k veřejně dostupnému hudebnímu projektu připojí hudebník, který provede minimální nebo žádnou úpravu projektu a bude požadovat začlenění do seznamu vlastníků autorských práv. DAW OhmStudio (podrobně je popsán v kapitolách 4.2 a 5.4) doporučuje v [88] vytvoření dohody o vlastnictví s jednotlivými spolupracovníky. Zároveň potvrzuje, že vlastnictví projektu patřičným uživatelským účtem nemá žádný dopad na autorská práva. Ty si může nárokovat i uživatel, který projekt opustil, což lze v případě programu OhmStudio dokázat historií úprav daného projektu.

4. Realizace systémů IoMusT

Praktickou část diplomové práce jsem rozdělil do tří částí. První část se věnuje vlastním realizacím s důrazem na ověření funkčnosti na stávající infrastruktuře, druhá cílí na testování již zavedeného systému použitelného v IoMusT a třetí se věnuje hlubšímu rozboru několika aplikací IoMusT v praxi.

4.1 Úloha A: Vlastní realizace systémů IoMusT a testování spolehlivosti komunikace

Cílem měření v této úloze je navrhnout vhodnou konfiguraci zařízení systému IoMusT. Realizováno bylo několik konfigurací odpovídající způsobům komunikace dle seznamu v kapitole 3.2.4, na straně 28. Součástí bylo také testování spolehlivosti komunikace a stanovování mezních parametrů při přenosu s deterministickým zahlcováním přenosové trasy.

4.1.1 Využité prostředky

Při hledání vhodného prostředku pro realizaci komunikace jsem chtěl co nejvíce vyhovět nárokům na minimální rozměry zařízení. Svou pozornost jsem proto zpočátku zaměřil na vývojovou desku *Arduino Nano* s rozměry 43,18 mm × 18,54 mm. Bezdrátovou konektivitu by zajišťoval přídatný Wi-Fi modul *NRF24L01* s rozměry 29 mm × 15 mm. Toto řešení má však několik omezení, včetně problémové implementace *MIDI přes USB*, a to vzhledem k použití FTDI¹ čipu pro převod USB zpráv na signály TTL² pro komunikaci s mikroprocesorem ATmega328P. Ten tak nedisponuje přímou USB konektivitou.

Dalším uvažovaným prostředkem byla vývojová deska *ESP8266* osazená 32bitovým mikrokontrolérem *Tensilica Xtensa L106* s kmitočtem 80 MHz a vestavěným Wi-Fi modulem umožňující komunikaci ve standardech 802.11 b/g/n [65]. Ta však v době nouzového stavu na území České republiky nebyla v obchodech dostupná. Jako alternativu jsem nakonec zvolil vyšší verzi této vývojové desky *ESP32-WROOM-32* osazenou 32bitovým mikrokontrolérem *Tensilica Xtensa LX6* s kmitočtem 240 MHz, taktéž s vestavěným Wi-Fi modulem umožňující komunikaci ve standardech 802.11 b/g/n a Bluetooth 4.2 [64]. Tento čip je přímo navržen pro využití v mobilních zařízeních, nositelné elektronice a IoT aplikacích [63]. Možné je propojení s ethernetovým modulem *ENC28J60*, čímž lze rozšířit konektivitu o způsob komunikace po vedení. Jednotlivé implementace byly vytvářeny na kontaktním nepájivém poli.

¹Future Technology Devices International

²Transistor to transistor logic

V úloze zaměřující se na komunikaci mezi hudebními věcmi jsem jako komunikační prostředek využil běžný komerční Wi-Fi router *TL-WR543G* zprostředkovávající komunikaci ve standardech 802.11 g (s maximální rychlostí 54 Mbit/s na fyzické vrstvě s udávanou průměrnou propustností okolo 25 Mbit/s) a 802.11 b (s maximální rychlostí 11 Mbit/s) [100].

Využitým softwarem pro dílčí podúlohy bylo programovací prostředí *Arduino IDE*³ s využitím knihoven *WiFi*⁴, *WiFiClient*⁵, *WiFiUDP*⁶, *MIDI*⁷ a *AppleMIDI*⁸. Všechny vytvořené programy využitě v dílčích úlohách jsou k dispozici v příloze B. Pro monitoring sériových výstupů z vývojových desek bylo využito vestavěného sledovače sériové komunikace. Pro příjem a zpracování MIDI zpráv v počítači bylo využito programu *MIDI-OX*⁹. Tvorba RTP portu MIDI byla uskutečněna nástrojem *rtpMIDI*¹⁰. Pro odchytávání paketů na síťovém rozhraní a monitorování provozu sítě bylo využito prostředí *Wireshark*¹¹.

Zahlcování Wi-Fi routeru bylo provedeno zařízením pro měření parametrů komunikačních sítí *F-Tester*¹², jenž umožňuje provádět deterministické měřicí testy. Vzhledem ke karanténím opatřením nebylo možné měření uskutečnit s pomocí dvou fyzických zařízení v laboratoři Katedry telekomunikační techniky ČVUT FEL, měření bylo proto realizováno v domácích podmínkách s jedním fyzickým zařízením F-Tester zapůjčeným katedrou a jeho softwarovou implementací instalovanou ve virtuálním prostředí aplikace *VirtualBox*¹³ v počítači s operačním systémem Microsoft Windows 10 Home.

Úlohu zaměřenou na komunikaci mezi hudebními věcmi jsem již prováděl v laboratoři T2:B3-703 na Katedře telekomunikační techniky. Využil jsem navíc Wi-Fi router *TP-Link Archer C6* komunikující ve standardu 802.11ac (o rychlostech 867 Mbit/s a 300 Mbit/s) a syntezátor *Kurzweil K2000*.

Experiment se zaměřením na komunikaci mezi hudebními interprety jsem taktéž prováděl v laboratoři T2:B3-703. Z hardwarového vybavení (úplný seznam se nachází v mé bakalářské práci [3, s. 47]) jsem využil také syntezátor *X-Station 49*, zvukovou kartu *M-Audio FastTrack Pro* a mixážní pult *Xenyx 802*. Ze softwaru jsem využil DAW *Ableton Live 10 Intro*¹⁴ pro zaznamenávání grafické interpretace MIDI stop.

4.2 Úloha B: Testování komerčně dostupného systému pro tvorbu hudby v reálném čase

Jedním z volně dostupných DAW systémů je software *OhmStudio*¹⁵. *OhmStudio* firmy *Ohm-Force*¹⁶ bylo představeno v roce 2013 jako první DAW zprostředkovávající možnost společné

³www.arduino.cc/en/Main/Software

⁴www.arduino.cc/en/Reference/WiFi

⁵www.arduino.cc/en/Reference/WiFiClient

⁶www.arduino.cc/en/Reference/WiFiUDPConstructor

⁷[www.github.com/FortySevenEffects/arduino_midi_library](https://github.com/FortySevenEffects/arduino_midi_library)

⁸[www.github.com/lathoub/Arduino-AppleMIDI-Library](https://github.com/lathoub/Arduino-AppleMIDI-Library)

⁹www.midiox.com

¹⁰www.tobias-erichsen.de/software/rtpmidi

¹¹www.wireshark.org

¹²www.f-tester.fel.cvut.cz

¹³www.virtualbox.org

¹⁴www.ableton.com

¹⁵www.ohmstudio.com

¹⁶www.ohmforce.com

tvorby hudebního díla v reálném čase více účastníky. Cílem úlohy je otestovat vlastnosti tohoto systému umožňující vzájemnou spolupráci mezi více uživateli.

Zásadní přínos systému spočívá v jednoduchosti sdílení mezi účastníky. Veškerá data včetně všech provedených změn všemi účastníky jsou ukládána v cloudovém úložišti. Testování funkcionality jsem prováděl na dvou osobních počítačích disponujících programem OhmStudio. Na každém z počítačů jsem do programu vstoupil pod unikátním přístupovým účtem. Na jednom z počítačů byly nainstalovány plné verze zásuvných modulů *Sylenth1*¹⁷ a *FabFilter*¹⁸ (Creative Bundle).

4.3 Úloha C: Aplikování IoMusT v praxi a úvod do analýzy proveditelnosti

Úloha má za cíl propojit teoretické kapitoly 2 a 3. Půjde o nalezení vhodných aplikovatelných prostředků pro realizaci konkrétních scénářů fungování systémů IoMusT. V jednotlivých podkapitolách jsem vytvořil vize interaktivního koncertu (viz 5.5.1), virtuálního koncertu (viz 5.5.2) a vzdálené tvorby hudby více hudebníky (viz 5.5.3). V jednotlivých vizích provádím úvodní analýzu současné infrastruktury použitelné pro jednotlivé vize, kde vycházím především z diskutovaných částí v kapitole 2. Výsledkem jsou návrhy další výzkumné činnosti nebo návrhy pro detailní analýzy proveditelnosti tam, kde se jeví technologie ve střednědobém horizontu pro systém IoMusT jako využitelné.

¹⁷www.lennardigital.com/sylenth1

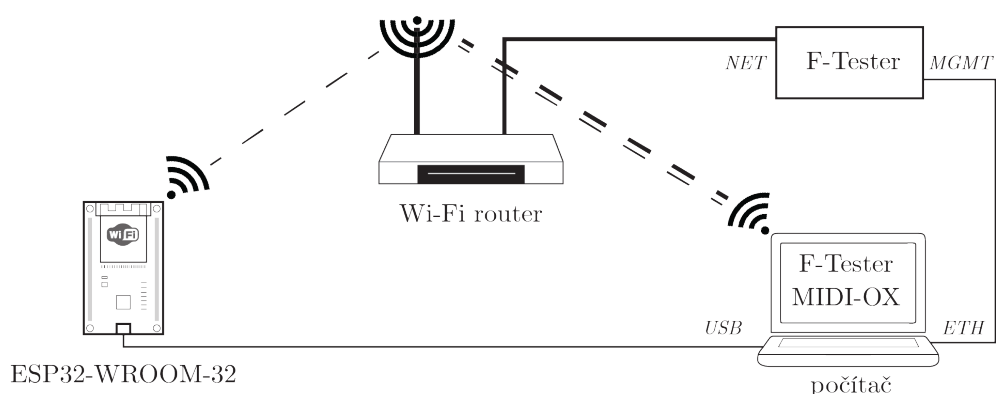
¹⁸www.fabfilter.com

5. Vyhodnocení naměřených dat

V této kapitole jsou diskutovány způsoby měření, úvahy, které byly řešeny v jejich průběhu a výsledky včetně popisu jejich zpracování.

5.1 Úloha A1: Komunikace mezi hudebními věcmi

Cílem úlohy bylo stanovit mezní parametry bezdrátového přenosu MIDI zpráv existujícím protokolem RTP-MIDI v reálné síti za využití současných prostředků. Schéma zapojení měřicího pracoviště je znázorněno na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro úlohu A1

V úloze jsem využil vývojovou desku ESP32-WROOM-32 pro implementaci hudební věci jako vysílače, připojenou k Wi-Fi routeru, přes který zařízení periodicky vysílá různé druhy zpráv protokolu RTP-MIDI. Záznam o odeslání zprávy byl zaznamenáván na výstup sériového portu desky. Původním úmyslem bylo využít jako druhé zařízení druhou vývojovou desku naprogramovanou jako přijímač zpráv RTP-MIDI, přičemž sledování síťového provozu mělo být uskutečněno programem Wireshark. Operační systém Windows bohužel neumožňoval přímou aktivaci monitorovacího režimu pro sledování datového provozu na bezdrátovém routeru, ani s pomocí konzolového nástroje *WLANHelper* programu *Npcap*. Dalším možným způsobem aktivace monitorovacího režimu pro Wireshark bylo využití virtuálního počítače aplikace VirtualBox s operačním systémem Ubuntu. Virtuální počítač však neměl přístup k adaptérům bezdrátových zařízení. Řešením mohla být duální instalace Ubuntu přímo do počítače, k té jsem však nepřistoupil. Rozhodl jsem se pro zprovoznění hudební věci jako přijímače v počítači programem *rtpMIDI*, který je schopen vytvořit RTP-MIDI port a programem *MIDI-OX*, který je schopen zpracovávané zprávy analyzovat. V

takovém případě je možné síťový provoz z bezdrátového rozhraní programem Wireshark bez nutnosti aktivace monitorovacího režimu analyzovat, neboť pakety jsou posílány do počítače.

Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
14:09:32,755094	192.168.1.103	192.168.1.101	AppleMIDI	78	Invitation: peer = "Arduino_transmitter"
14:09:32,868786	192.168.1.101	192.168.1.103	AppleMIDI	66	Invitation Accepted: peer = "rtpMIDI"
14:09:32,973120	192.168.1.103	192.168.1.101	AppleMIDI	78	Invitation: peer = "Arduino_transmitter"
14:09:32,973338	192.168.1.101	192.168.1.103	AppleMIDI	66	Invitation Accepted: peer = "rtpMIDI"
14:09:33,137468	192.168.1.103	192.168.1.101	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 0
14:09:33,137552	192.168.1.101	192.168.1.103	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 1
14:09:33,138282	192.168.1.103	192.168.1.101	RTP-MIDI	58	Note On (c=1, n=E0, v=55)
14:09:33,139995	192.168.1.103	192.168.1.101	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 0
14:09:33,140127	192.168.1.101	192.168.1.103	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 1
14:09:33,184595	192.168.1.103	192.168.1.101	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 2
14:09:33,187898	192.168.1.103	192.168.1.101	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 2
14:09:33,348994	192.168.1.103	192.168.1.101	RTP-MIDI	58	Note Off (c=1, n=E0, v=55)
14:09:33,539641	192.168.1.103	192.168.1.101	RTP-MIDI	58	Note On (c=1, n=F0, v=55)
14:09:33,754279	192.168.1.103	192.168.1.101	RTP-MIDI	58	Note Off (c=1, n=F0, v=55)
14:09:33,965144	192.168.1.103	192.168.1.101	RTP-MIDI	58	Note On (c=1, n=F#0, v=55)
14:09:34,037907	192.168.1.101	192.168.1.103	AppleMIDI	54	Receiver Feedback: seq = 6
14:09:34,139765	192.168.1.103	192.168.1.101	RTP-MIDI	58	Note Off (c=1, n=F#0, v=55)
14:09:34,140063	192.168.1.103	192.168.1.101	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 0
14:09:34,140191	192.168.1.101	192.168.1.103	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 1
14:09:34,144065	192.168.1.103	192.168.1.101	AppleMIDI	78	Synchronization: count = 2

Obr. 5.2: Výpis příchozích zpráv protokolů AppleMIDI a RTP-MIDI rozhraním Wi-Fi pomocí programu Wireshark

Iniciátorem připojení k RTP-MIDI portu je vysílač, který navazuje, udržuje synchronizaci a poté i ukončuje spojení zprávami protokolu AppleMIDI. Samotný přenos zpráv je uskutečňován protokolem RTP-MIDI. Tato komunikační posloupnost je vysvětlena obrázkem 5.2. Zpoždění mezi odeslanou a přijatou zprávou by pro zachování přirozeného vjemu nemělo přesahovat 20 ms [26]. Zprávy byly proto vysílány s periodou rovnou dvojnásobku tohoto časového intervalu, tedy 40 ms. V jednotlivých měřeních byly přenášeny tři druhy zpráv dle počtu datových bajtů protokolu MIDI, viz tabulka 5.1. Po vyslání zprávy vysílač odeslal přes sériovou linku zprávu do počítače s časovou značkou.

obsah MIDI zprávy	použité typy MIDI zpráv	velikost MIDI zprávy	velikost RTP-MIDI zprávy
1 stavový bajt	Start Stop	1 B	56 B
1 stavový bajt 1 datový bajt	Program Change Channel Pressure (AfterTouch)	2 B	57 B
1 stavový bajt 2 datové bajty	Note On Note Off	3 B	58 B

Tab. 5.1: Druhy a velikosti přenášných MIDI zpráv a porovnání velikostí paketů zpráv RTP-MIDI

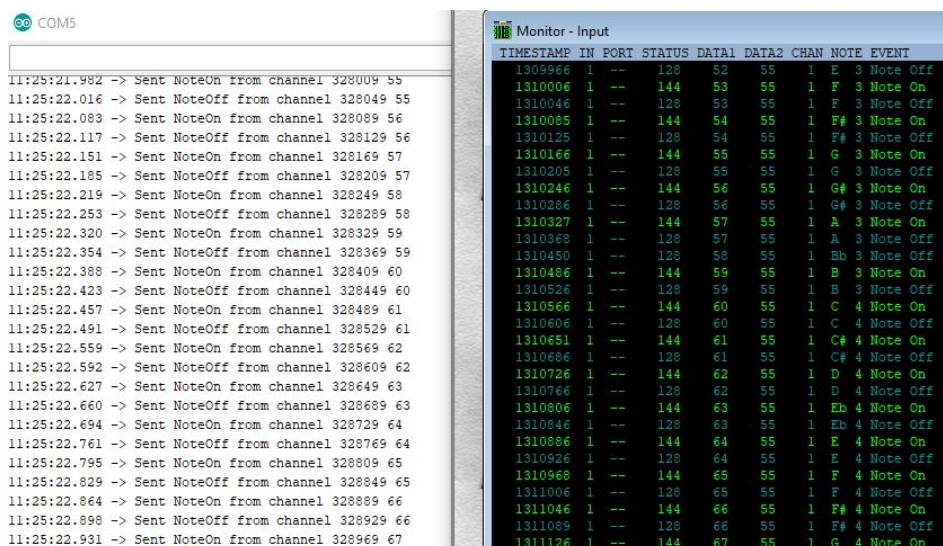
Během měření v průběhu přenosu zpráv byla přenosová cesta deterministicky zahlco-
vána daty ze zařízení F-Tester tesovacím nástrojem FlowPing, využívající protokol UDP
„flowping“. Nastaveny byly současně dvě varianty tohoto testu s totožnými parametry,
jedna pro dopředný (downlink) a druhá pro zpětný (uplink) směr přenosu. Velikost genero-
vaných paketů odpovídá velikostem přenášných RTP-MIDI paketů mezi vysílačem a příjí-
mačem v jednotlivých měřeních. Provedeno bylo úvodní testovací měření pro nalezení ide-
álního rozsahu zahlcení Wi-Fi routeru a na základě jeho výsledku byly provedeny tři sady

měření, vždy pro různé velikosti MIDI zpráv, s třemi různými časově konstantními zahlceními po dobu 30 sekund, opakovaně pro dva dostupné Wi-Fi standardy 802.11b a 802.11g. Přenosové rychlosti jednotlivých zahlcení jsou uvedeny v tabulce 5.2.

pořadí měření	802.11 g (54 M)	802.11 b (11 M)
1 – mírné zahlcení	10 kbit/s	10 kbit/s
2 – střední zahlcení	5 Mbit/s	200 kbit/s
3 – vysoké zahlcení	10 Mbit/s	220 kbit/s

Tab. 5.2: Seznam zvolených přenosových rychlostí zahlcení sítě pro různé standardy bezdrátové komunikace

Pakety byly přijímány programem MIDI-OX, který u každé zprávy zaznamenal časovou značku. Výpisy odeslaných zpráv vysílačem a přijatých zpráv přijímačem (viz obrázek 5.3) byly následně zpracovány v programovém prostředí MATLAB.



Obr. 5.3: Příklad výpisu zpráv společně s časovými značkami. Vlevo výpis sériové linky vysílače, vpravo výpis příchozích zpráv do počítače

Pro zpracování hodnot jsem implementoval a odladil algoritmus, který je schopen detekovat množství zpráv a vypočítat jejich jitter na základě proměnného zpoždění mezi přijatými pakety. Během zpracování jsem řešil tyto problémy:

- Bylo nutné uvažovat nemožnost stanovení latence (konstantního zpoždění) danou dobou trvání průchodu paketu přenosovou trasou k přijímači. Časová značka, kterou generuje sériový monitor programu Arduino IDE, je asynchronní vzhledem k programu MIDI-OX, který v měření slouží jako hudební věc, interagující na přijímané zprávy. Jedna instance programu Arduino IDE nedovoluje monitorovat současně dva sériové porty. Spuštění dvou instancí programu Arduino IDE nezaručuje synchronnost časové značky a není možné měnit její nastavení. Jiný volně dostupný software splňující nároky na měření jsem nenalezl.

Problém jsem vyřešil vlastní implementací testu odezvy, tzv. *ping* metody (provedenou podobně jako v počítačových sítích, viz [70]). Vysílač po nezahlcené síti periodicky vysílá jednobajtovou MIDI zprávu *MIDI Clock*. Níže je uvedena hlavní smyčka programu:

```
AppleMIDI.read(); //Listen to incoming notes
if (isConnected && (millis() - t0) >= 500){
    AppleMIDI.sendClock();
    t0 = millis(); //Write down actual timestamp
    Serial.println(F("Ping the packet"));
}
```

Přijímač po detekci příchozí zprávy okamžitě spouští příslušnou zpětnovazební (callback) funkci a vysílá totožný paket zpět vysílači. Níže je tato funkce uvedena:

```
void OnAppleMidiClock() {
    AppleMIDI.sendClock();
    Serial.println(F("Pong the packet"));
}
```

Po detekci paketu přijímačem dojde k zaznamenání druhé časové značky a výpočtu doby mezi vysláním a přijutím paketu. Měření jsem provedl v tisíci iteracích a za směrodatný jsem vzal nejkratší naměřený časový interval. Tuto dobu, kterou vydělíme dvěma, lze při dostatečném počtu realizací prohlásit za nejkratší dobu potřebnou k přenosu paketu mezi vysílačem a přijímačem. Jako konstantu jsem jí přičítel k naměřeným datům. Data jsem o tuto dobu korigoval tak, aby tak byla kompenzována nejistota měření způsobená nemožností stanovit latenci přímým měřením zahlcované sítě.

- Problémové se jevílo spárování odeslaných a přijatých paketů u jednobajtových zpráv. U vícebajtových MIDI zpráv jsem využil datové bajty k jednoznačné identifikaci odesílané zprávy a při zpětné analýze tak nenastal problém s detekcí ztracených zpráv. Oproti tomu zprávy jednobajtové neobsahují žádný proměnný parametr, který by bylo možno uživatelsky nastavit a algoritmus detekce zpráv jsem naprogramoval komplikovaněji. Pracuji přitom s odhadnutým absolutním časem mezi odesláním a přijatým paketem. Účinnost mého algoritmicizacího řešení na naměřených datech je zjevná. Při vyšších zahlceních sítě a dosažení vyšší hodnoty jitteru však principiálně není možné absolutně stanovit, kterému přijatému paketu přísluší ten který odeslaný paket. Hodnoty jitteru při vyšších zahlceních jsou tak pouze orientační, avšak výsledky zcela odpovídají teoretickým očekáváním.

Vypočtená je také ztrátovost paketů (packet loss) pro jednotlivá měření a standardní odchylka času odeslaných zpráv vysílačem. Výsledky pro komunikaci bezdrátovým standardem 802.11 g (54 Mbit/s) ukazuje tabulka 5.3. Výsledky pro komunikaci bezdrátovým standardem 802.11 b (11 Mbit/s) ukazuje tabulka 5.4. V těchto tabulkách jsou červeně vyznačeny naměřené hodnoty nevyhovující nárokům na maximální možnou latenci pro bezproblémové fungování systému IoMusT. Protokoly o průbězích zahlcování sítě zařízením F-Tester ze všech 18 měření jsou k dispozici v příloze A. Vyhodnocovací skript vytvořený programem MATLAB je v příloze C.

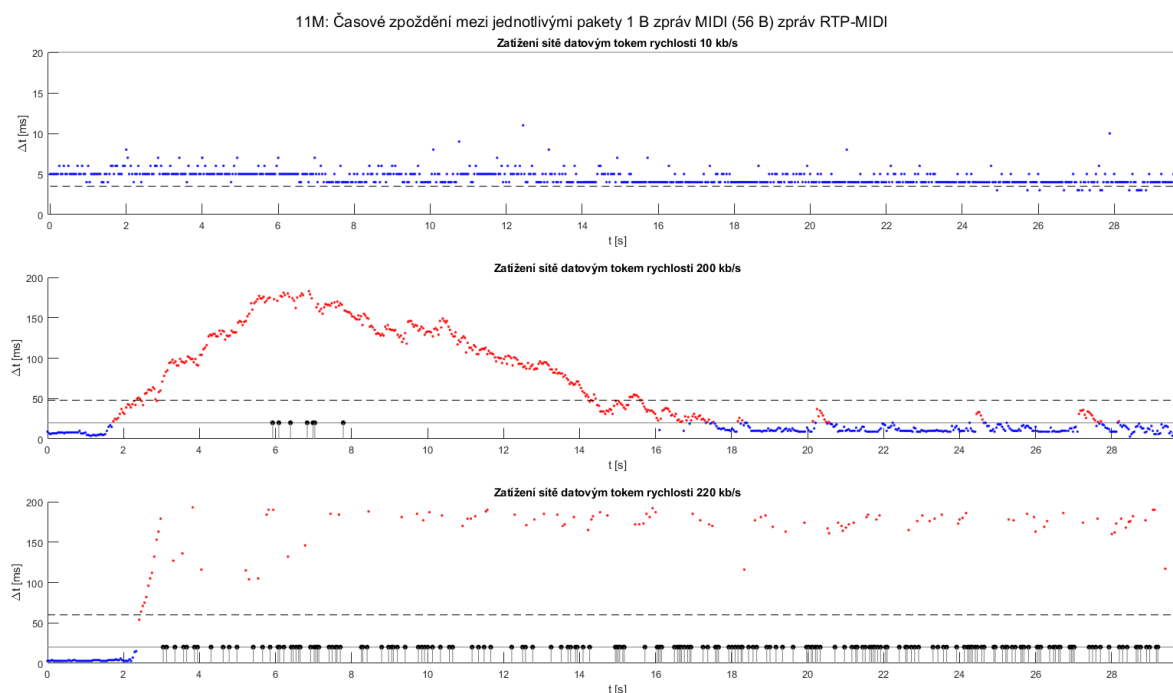
typ měření	měřená data	1	2	3
		Flowping 10 kbit/s	Flowping 5 Mbit/s	Flowping 10 Mbit/s
56 B zpráva RTP-MIDI (1 B zpráva MIDI)	<i>odeslaných paketů:</i>	848	910	899
	<i>ztracených paketů:</i>	9	2	0
	<i>ztrátovost:</i>	1,1 %	0,2 %	0 %
	<i>prům. zpoždění:</i>	4,82 ms	9,71 ms	11,56 ms
	<i>max. zpoždění:</i>	28 ms	34 ms	63 ms
	<i>odchylka vysílače:</i>	0,069 ms	0,047 ms	0,082 ms
57 B zpráva RTP-MIDI (2 B zpráva MIDI)	<i>odeslaných paketů:</i>	807	936	932
	<i>ztracených paketů:</i>	10	34	4
	<i>ztrátovost:</i>	1,2 %	3,6 %	0,4 %
	<i>prům. zpoždění:</i>	2,94 ms	15,45 ms	9,62 ms
	<i>max. zpoždění:</i>	23 ms	171 ms	50 ms
	<i>odchylka vysílače:</i>	0,070 ms	0,080 ms	0,099 ms
58 B zpráva RTP-MIDI (3 B zpráva MIDI)	<i>odeslaných paketů:</i>	932	918	894
	<i>ztracených paketů:</i>	19	49	43
	<i>ztrátovost:</i>	2,0 %	5,3 %	4,8 %
	<i>prům. zpoždění:</i>	3,80 ms	6,98 ms	7,41 ms
	<i>max. zpoždění:</i>	15 ms	31 ms	28 ms
	<i>odchylka vysílače:</i>	0,073 ms	0,087 ms	0,000 ms

Tab. 5.3: Výsledky měření různých druhů přenosů zpráv RTP-MIDI bezdrátovým standardem 802.11 g (54 Mbit/s)

typ měření	měřená data	1	2	3
		Flowping 10 kbit/s	Flowping 200 kbit/s	Flowping 220 kbit/s
56 B zpráva RTP-MIDI (1 B zpráva MIDI)	<i>odeslaných paketů:</i>	936	882	926
	<i>ztracených paketů:</i>	0	7	422
	<i>ztrátovost:</i>	0 %	0,8 %	45,6 %
	<i>prům. zpoždění:</i>	3,48 ms	47,96 ms	60,00 ms
	<i>max. zpoždění:</i>	10 ms	182 ms	192 ms
	<i>odchylka vysílače:</i>	0,065 ms	0,048 ms	0,000 ms
57 B zpráva RTP-MIDI (2 B zpráva MIDI)	<i>odeslaných paketů:</i>	903	922	890
	<i>ztracených paketů:</i>	0	0	308
	<i>ztrátovost:</i>	0,0 %	0,0 %	34,6 %
	<i>prům. zpoždění:</i>	3,05 ms	10,94 ms	91,17 ms
	<i>max. zpoždění:</i>	8 ms	53 ms	194 ms
	<i>odchylka vysílače:</i>	0,000 ms	0,047 ms	0,047 ms
58 B zpráva RTP-MIDI (3 B zpráva MIDI)	<i>odeslaných paketů:</i>	879	924	902
	<i>ztracených paketů:</i>	0	0	261
	<i>ztrátovost:</i>	0,0 %	0,0 %	28,9 %
	<i>prům. zpoždění:</i>	3,09 ms	8,61 ms	97,98 ms
	<i>max. zpoždění:</i>	8 ms	60 ms	192 ms
	<i>odchylka vysílače:</i>	0,000 ms	0,047 ms	0,000 ms

Tab. 5.4: Výsledky měření různých druhů přenosů zpráv RTP-MIDI bezdrátovým standardem 802.11 b (11 Mbit/s)

Součástí zpracování výsledků měření je i grafická interpretace. Nezbytnou podmínkou na počátku každé měřicí sekvence byla nulová etapa, kalibrace, tedy naměření několika přenášených paketů bez zatížení. Důvodem patrným z grafu 5.4 je zaznamenání změny ve zpoždění paketů (způsob kalibrace měřeného rozsahu). V tomto grafu je znázorněn vývoj zpoždění mezi odeslanými a přijatými pakety (jitter) pro různá zahlcení přenosové trasy. Subjektivní hranice přirozeného vnímání 20 ms [26] je reprezentována plnou čarou. Pakety přesahující tuto hranici jsou zakresleny červeně. Černě jsou v grafu zaneseny časy odeslání ztracených paketů. Aritmetický průměr zpoždění paketů je reprezentován přerušovanou čarou.

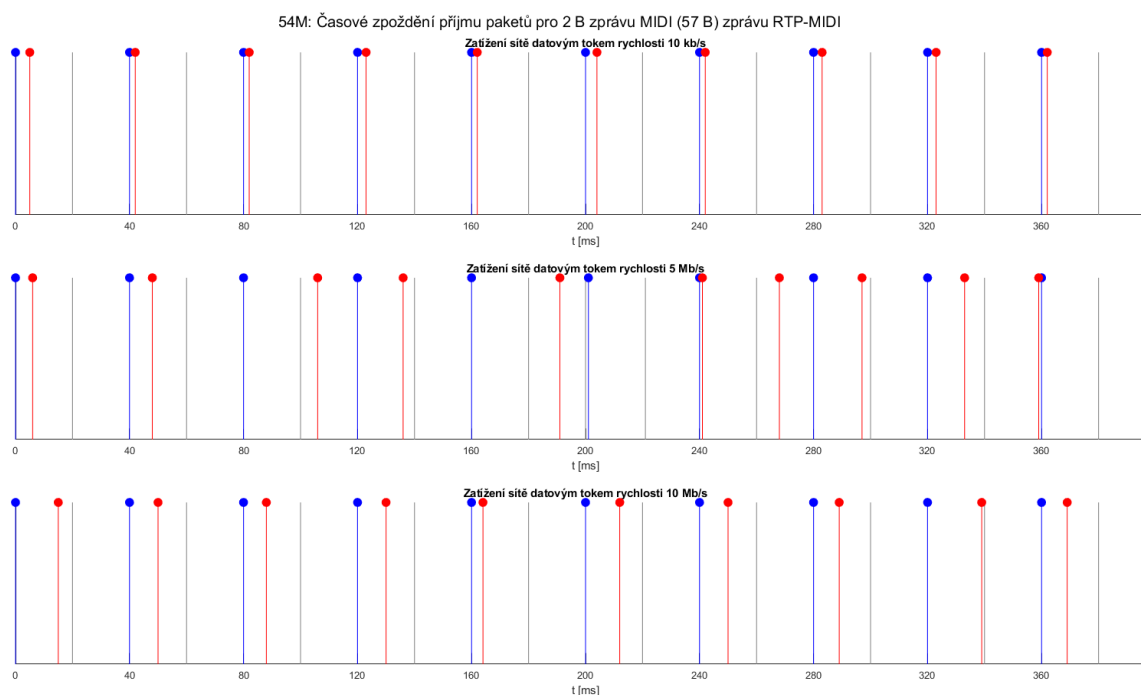


Obr. 5.4: Vývoj jitteru mezi odeslanými a přijatými zprávami RTP-MIDI velikosti 56 B pro bezdrátový standard 802.11 b (11 M) při různém zahlcení přenosového kanálu

V několika měřených sadách jsou patrná lokální zahlcení přenosové trasy s vyšší ztrátovostí paketů (viz prostřední graf na obr. 5.4). Tyto krátkodobé extrémní jsou způsobeny vhodným nastavením zahlcovacího průběhu na zařízení F-Tester (vycházejícím z kalibračního měření), tak, aby byl Wi-Fi router zahlčován na pokraji spolehlivé propustnosti. Tyto extrémní jsou důvodem, proč se celkový počet ztracených paketů v měření s bezdrátovým komunikačním standardem 802.11 g (tabulka 5.3) rovnoměrně nezvyšuje s rostoucí přenosovou rychlostí zahlcení přenosové cesty. Aby bylo možné tento trend zaznamenat, měření by muselo probíhat po výrazně delší dobu (například pro 20 000 odeslaných paketů), což by ovšem výrazně ztížilo detekci paketů během zpracování výsledků. Kompletní vygenerované grafy pro všechna měření jsou v příloze B.

V grafu 5.5 je znázorněna časová osa přenosu paketů. Modré značky reprezentují skutečné časy odeslání paketů vysílačem, červené značky reprezentují odhadnuté časy detekce paketu přijímačem. Černé značky značí skutečné časy odeslaných paketů, které byly ztraceny. Svislé značky v polovině intervalu mezi časy odeslání paketů značí interval přiroze-

ného vnímání 20 ms od odeslání zprávy. Při vyšších zatíženích můžeme pozorovat, že jsou pakety detekovány se zpožděním i několika period po odeslání dalšího paketu.



Obr. 5.5: Časová osa se zakreslenými značkami časů odeslání paketu (modře), přijmutí paketu (červeně) a odeslání ztraceného paketu (černě) při různém zahlcení přenosové trasy pro bezdrátový standard 802.11 g (54 Mbit/s)

5.2 Úloha A2: Komunikace mezi hudebními interprety a hudebními věcmi

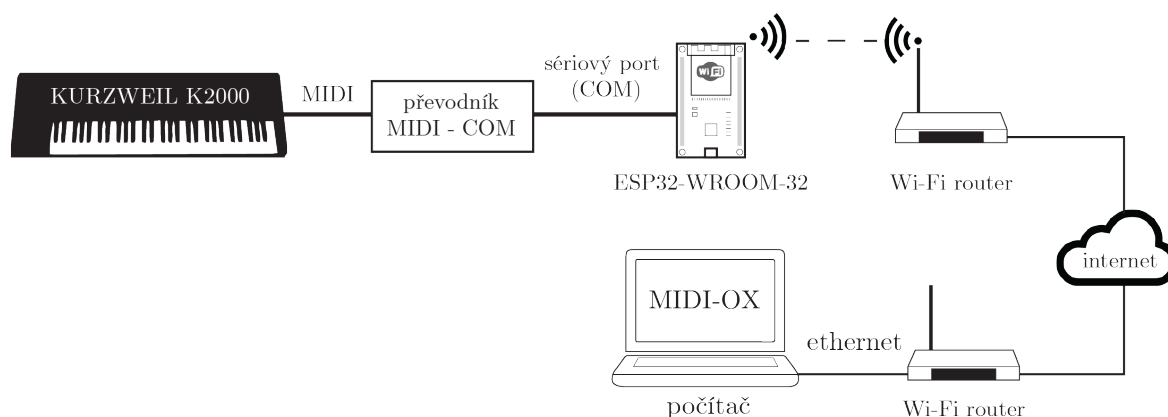
Cílem experimentu je vytvořit z MIDI syntezátoru Kurzweil K2000 síťový prvek schopný plnohodnotné interakce mezi hudebními věcmi a umožnit vzdálené ovládání nástroje protokolem RTP-MIDI. Schéma zapojení měřicího pracoviště je uvedeno na obrázku 5.6.

K ovládání syntezátoru jsem využil konektorů MIDI IN a MIDI OUT. K nim jsem přes 5kolíkové kabely DIN připojil vlastní MIDI předvodník, jehož elektrickou část jsem realizoval v souladu s technickou normou MIDI standardu, viz [75]. Schéma obvodu je znázorněno na obrázku 5.7. Tento převodník provádí vzájemnou konverzi mezi MIDI signály a signály UART¹ sériového portu (COM), komunikující s vývojovou deskou ESP32-WROOM-32.

Převodník jsem elektricky uzpůsobil pro napájení napětovou úrovní $U_{IN} = 3,3 V$, tedy při pracovním napětí používané vývojové desky. Hodnoty využitých součástek: $R_A = 33 \Omega$, $R_B = 280 \Omega$, $R_C = 10 \Omega$, $R_D = 470 \Omega$, $C_1 = 100 nF$. Typ využití diody D_1 : 1N4148.

V průběhu konstrukce převodníku bylo v jeden okamžik na napájecí vstupy vývojové desky nedopatřením přivedeno současně napájení z externího napájecího zdroje a sběrnice USB, čímž došlo ke zničení napěťového regulátoru na vývojové desce.

¹Universal Asynchronous Receiver / Transmitter



Obr. 5.6: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro úlohu A2 se syntezátorem

Správná funkce zařízení byla ověřena na bezdrátové lokální síti s využitím programu MIDI-OX. Propojení vývojové desky se vzdáleným počítačem probíhalo přes Wi-Fi router TP-Link Archer C6 (s nastavením rychlosti 300 Mbit/s). Vzdálený počítač přistupoval do internetu přes Wi-Fi router TL-WR543G (s rychlostí 54 Mbit/s). Na vzdáleném Wi-Fi routeru bylo nutné nastavit předávání portů 5004 a 5005 pro protokol UDP. Navázání komunikace, proces synchronizace a vysílání zpráv NoteOn a Note Off pro vzdálené ovládání syntezátoru je zaznamenáno na obrázku 5.8.

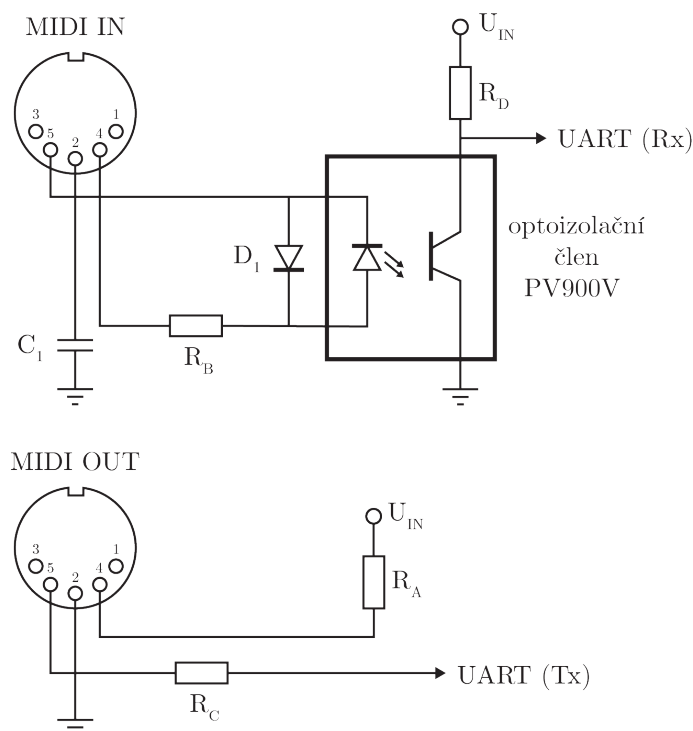
Tímto způsobem lze vzdáleně ovládat jakékoliv zařízení MIDI. K názorné demonstraci jsem využil zvukový procesor Behringer DEQ2496, jehož MIDI portem lze procesor vzdáleně ovládat. Schéma pracoviště je na obrázku 5.9. Navázání komunikace a vysílání ovládacích zpráv System Exclusive pro vzdálené ovládání zvukového procesoru je zaznamenáno na obrázku 5.10. Ovládací software DEQ2496remote při vyžádání aktuálního stavu ovládacích prvků však tato data není schopen zpracovat. Ostatní funkce fungovaly bez problémů a ze zvukového procesoru jsem tak vytvořil hudební věc.

13.207544	192.168.1.107	147.32.211.20	AppleM..	71 Invitation Accepted: peer = "Arduino_home"
13.254986	147.32.211.20	192.168.1.107	AppleM..	70 Invitation: peer = "Arduino_FEL"
13.255136	192.168.1.107	147.32.211.20	AppleM..	71 Invitation Accepted: peer = "Arduino_home"
23.742704	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI..	63 Full Sysex-Command
23.742744	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI..	63 Full Sysex-Command
23.805702	147.32.211.20	192.168.1.107	RTP-MI..	78 Full Sysex-Command
23.808975	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI..	78 Full Sysex-Command
23.809004	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI..	78 Full Sysex-Command
23.815062	147.32.211.20	192.168.1.107	RTP-MI..	78 Full Sysex-Command
23.816965	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI..	78 Full Sysex-Command
23.816997	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI..	78 Full Sysex-Command
23.966156	192.168.1.107	147.32.211.20	AppleM..	54 Receiver Feedback: seq = 3
28.661380	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI..	68 Full Sysex-Command
28.662304	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI..	68 Full Sysex-Command

Obr. 5.10: Výpis příchozích zpráv protokolů AppleMIDI a RTP-MIDI při komunikaci se zvukovým procesem ve školní laboratoři rozhraním Ethernet pomocí programu Wireshark

5.3 Úloha A3: Komunikace mezi hudebními interprety

Cílem úlohy je realizovat experiment komunikace hudebníků v průběhu hudebního vystoupení s využitím nositelné elektroniky. V rámci vyhodnocení experimentu je kladen důraz na



Obr. 5.7: Schéma obvodu převodníku MIDI - sériový port (COM)

lidské vnímání a na faktory ovlivňující správné rozpoznání domluvených povelů. Schéma měřicího pracoviště je znázorněno na obrázku 5.11.

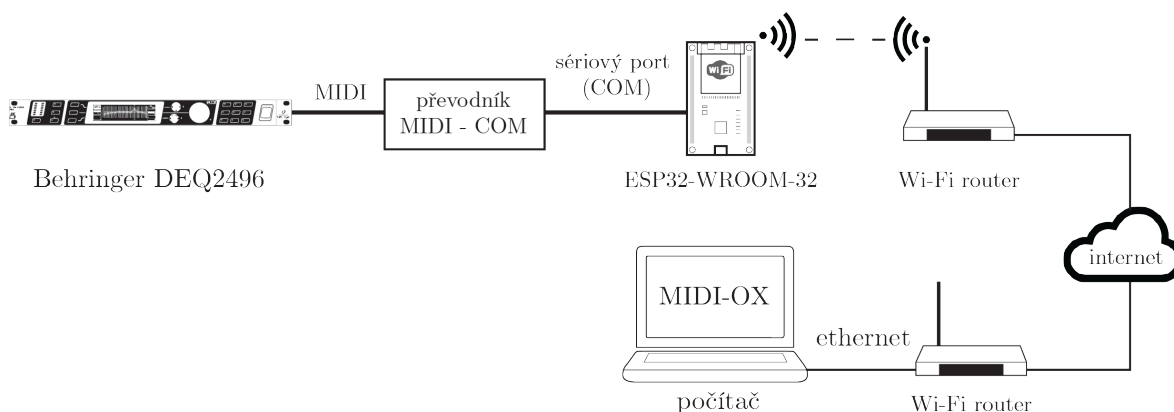
Pro úlohu jsem vyrobil bezdrátový komunikační prostředek, který plní účel nositelné hudební věci. Součástí je vývojová deska ESP32-WROOM-32, napájena ze dvou alkalických baterií. K desce je kabelem připojen vibrační elektromotor. Z důvodů karanténních opatření jsem byl nucen vyrobit vlastní ochrannou krabičku s otvory pro dvě kontrolní LED. Zhotovený přípravek je na obrázku 5.12.

Pro experiment jsem využil asistence vždy jednoho ze dvou svých spolužáků, muže a ženy, kteří zastávali pozici hudebního figuranta. Ani jeden z nich není hudebníkem, což považují za výhodu. Figurant má na své paži umístěn vibrační elektromotor, jehož přívody jsou vedeny do nositelné hudební věci. S ní jsem komunikoval protokolem RTP-MIDI prostřednictvím programu MIDI-OX v počítači, v jehož prostředí jsem manuálně generoval MIDI zprávy. Místo počítače jsem původně plánoval využít druhý bezdrátový komunikační modul. Ten však byl před zahájením experimentu nedopatřením zničen během práce na úloze A2. Nositelné komunikační zařízení bezprostředně po příjmu zpráv „Note On“ přivedlo napětí na přívod elektromotoru, což způsobilo jeho rozvibrování. Zpráva „Note Off“ vibrace ukončila. S využitím tohoto mechanismu bylo možné definovat sekvence zpráv, na jejichž významech jsem se vždy před zahájením experimentu s hudebníkem domluvil. Komunikaci jsem vytvořil o třech znacích (podobně jako u Morseovy abecedy), viz tabulku 5.5. Délky jednotlivých znaků: krátký puls (-): 0,5 s, dlouhý puls (-): 1,5 s, mezera (): 1 s.

V průběhu měření hudebník periodicky stiskává libovolnou výchozí klávesu na syntezátoru. Zároveň poslouchá hudbu sluchátky, připojenými přes mixážní pult Xenyx 802 (umožňující vhodnou regulaci úrovně hlasitosti) do sluchátkového výstupu počítače. Každému účastníkovi jsem přehrával rytmickou hudbu o tempu 126 BPM. Na mixážním pultu

15.688327	192.168.1.107	147.32.211.20	AppleM...	71 Invitation Accepted: peer = "Arduino_home"
15.772660	147.32.211.20	192.168.1.107	AppleM...	70 Invitation: peer = "Arduino_FEL"
15.772781	192.168.1.107	147.32.211.20	AppleM...	71 Invitation Accepted: peer = "Arduino_home"
34.483001	147.32.211.20	192.168.1.107	AppleM...	78 Synchronization: count = 0
34.483101	192.168.1.107	147.32.211.20	AppleM...	78 Synchronization: count = 1
34.492998	147.32.211.20	192.168.1.107	AppleM...	78 Synchronization: count = 2
45.017901	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI...	58 Note On (c=1, n=B3, v=100)
45.026366	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI...	58 Note Off (c=1, n=B3, v=64)
45.502991	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI...	58 Note On (c=1, n=B3, v=100)
45.511138	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI...	58 Note Off (c=1, n=B3, v=64)
46.972006	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI...	58 Note On (c=1, n=E4, v=100)
46.980128	192.168.1.107	147.32.211.20	RTP-MI...	58 Note Off (c=1, n=E4, v=64)
54.486838	147.32.211.20	192.168.1.107	AppleM...	78 Synchronization: count = 0
54.487031	192.168.1.107	147.32.211.20	AppleM...	78 Synchronization: count = 1
54.499651	147.32.211.20	192.168.1.107	AppleM...	78 Synchronization: count = 2

Obr. 5.8: Výpis příchozích zpráv protokolů AppleMIDI a RTP-MIDI při komunikaci se syntezátorem ve školní laboratoři rozhraním Ethernet pomocí programu Wireshark

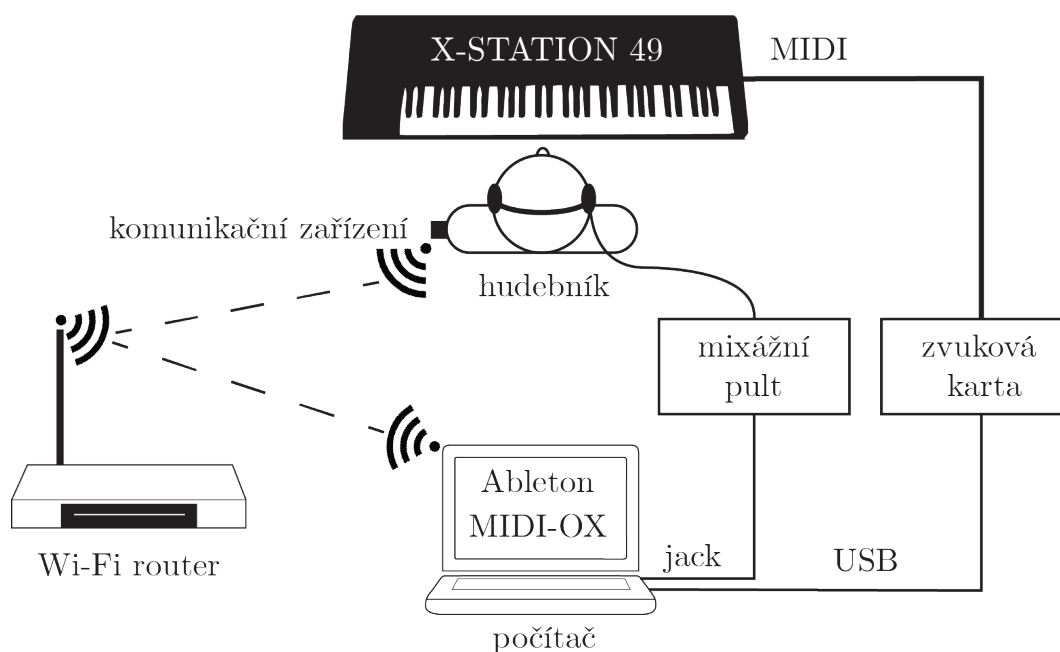


Obr. 5.9: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro úlohu A2 se syntezátorem se zvukovým procesorem

jsem třípásmovým ekvalizérem zesílil nízké kmitočty (mezní kmitočet $f_m = 80\text{Hz}$) do maximální výchylky potenciometru (+ 15 dB). Využití hudby napomáhá držení tempa během experimentu a umožňuje hudebníkovi lépe se soustředit na význam přijímaných povelů. Přebuzení nízkých kmitočtů věrněji demonstruje atmosféru při reálném hudebním vystupování. Seznam domluvených povelů měl figurant k dispozici v průběhu experimentu k nahlédnutí na stole před sebou.

Měření probíhalo ve třech sekvencích, první z nich byla trénovací a do výsledků jsem ji neuvažoval. Každá sekvence čítala 25 povelů a trvala zhruba 5 minut. Pro zahájení měření jsem figurantovi vyslal do nositelné hudební věci dlouhý puls, který signalizoval začátek experimentu. Záznam MIDI zpráv jsem prováděl s pomocí DAW Ableton. Vyhodnocení správnosti jsem prováděl v reálném čase. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 5.6.

Z výsledků experimentu plyne očekávaný genderový rozdíl ve schopnosti soustředění se na více smyslových vjemů zároveň. Figurant byl nucen se ve stejném čase koncentrovat na stisk kláves v daném tempu, na poslouchanou hudbu, které své hraní přizpůsoboval, na změny chvění elektromotoru a po příjmu povelu také na vizuální nalezení významu povelu ze seznamu (nepamatoval-li si figurant patřičný význam). Na konci měření byli oba figuranti dotazováni na vlastní dojmy z měření. Zajímavým poznatkem byl občasný výskyt taktilní halucinace. Ta je způsobena příjmem imaginárního hmatového vjemu lidským mozkiem. Tomuto syndromu se jako jedna z prvních podrobně věnuje studie Dr. M. B. Rothberga (viz



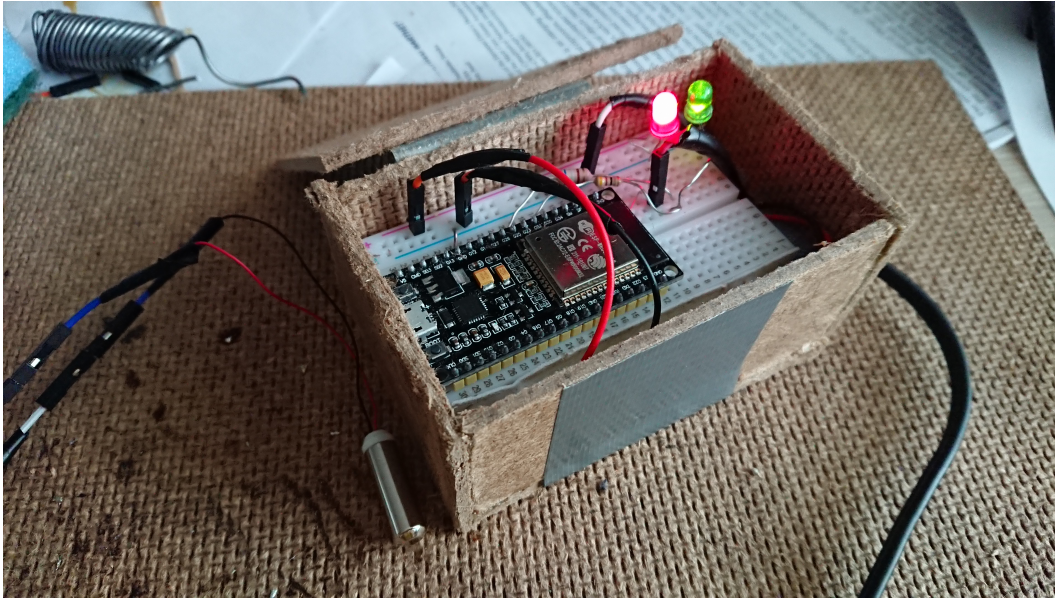
Obr. 5.11: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro úlohu A3

signál povelu	význam povelu
..	„zrychli tempo“
.-	„zpomal tempo“
-.	„hraj vyšší tón“
--	„hraj nižší tón“
...	„hraj akord“
..-	„nehraj akord“

Tab. 5.5: Dohodnuté signály pro komunikaci mezi hudebníky a jejich významy

[32]), který ji staví do souvislosti s užíváním mobilních telefonů a dalších zařízení schopných generovat vibrace. Výzkum Dr. M. Drouin [12] ukazuje, že se s tímto syndromem alespoň jednou v životě setkalo 89 % respondentů, přičemž zhruba polovina z nich tyto falešné pocity zažívá alespoň jednou týdně (viz tab. 1 v [12, s. 1493]). Výzkum také uvádí vzájemnou korelaci mezi typy osobností respondentů a četností výskytů syndromu. Z té vyplývá, že vyšší výskyt taktilní halucinace je u respondentů s neurotickými příznaky a extrovertů než u lidí svědomité povahy: „V souladu s našimi hypotézami, ti, kteří jsou svědomitější, zaznamenávají méně vibrací, a to nejspíše proto, že jsou pozornější k probíhajícím úkolům a skutečně či imaginární vibrace vnímají s menší pravděpodobností.“ [12, s. 1495].

Pro vyhodnocení použitelnosti sestaveného komunikačního řetězce v praxi je přínosné vzít v úvahu poznatky o psychologii hudebníků. U členů orchestru lze pozorovat rozdíly v osobnostech napříč jednotlivými nástrojovými sekcemi. Například hráči na strunné nástroje se jeví jako extrovertnější než hráči na dechové nástroje. Předpokládá se souvislost s mírou kreativity, a daným hudebním nástrojem. Extrovertnější se jeví také bubeníci [21,



Obr. 5.12: Bezdrátový komunikační prostředek zastávající funkci nositelné hudební věci

	sekvence	počet povelů	počet chybných zareagování	procentuální chybovost
muž	1.	25	3	12 %
	2.	25	3	12 %
žena	1.	25	2	8 %
	2.	25	1	4 %

Tab. 5.6: Výsledky experimentu sledující úspěšnost komunikace mezi hudebníky s pomocí nositelné elektroniky

s. 164]. V moderní hudbě se paradoxně přikládá vysoká míra extroverze hráčům na klávesové nástroje. Nejvyšší úroveň extroverze se pojí se zpěváky, u nichž je důvodem absence hudebního nástroje a nutnosti zaměřením se na práci s vlastním tělem [21, s. 181]. Z toho vyplývá, že komunikace taktilním způsobem má, vzhledem k vyššímu výskytu extroverze u hudebníků a z ní pramenícího vyššího výskytu taktilních halucinací, předpoklad k určité chybovosti.

Z důvodů karenténních opatření jsem experiment uskutečnil ve školní laboratoři ve zkrácené podobě pouze se dvěma účastníky a výsledky jsou proto pouze orientační. Mým původním úmyslem bylo provést praktický experiment s větším počtem figurantů a v místnosti určené pro hudební reprodukci (hudebním klubu). Výsledky experimentu by totiž ovlivnily mechanické vibrace způsobené nízkými kmitočty generované subwooferem. Toto nízkokmitočtové rušení je schopno interferovat s vibracemi generovanými elektromotorem. Výrazně zvyšuje také výskyt nezanedbatelných taktilních halucinací zapříčiněných vibrační oblečení.

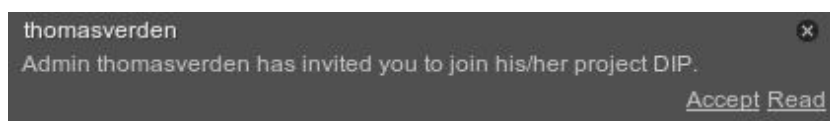
Hodnotným přínosem v této oblasti by mohl být rozšířený experiment s více figuranty hrajících na různé druhy hudebních nástrojů (podobný experimentu [2]), v reálném prostředí pro hudební reprodukci, se zaměřením na některá z nabízených témat:

- analýza chybovosti rozpoznání komunikačních povelů v závislosti na různých senzorních podnětech;
- analýza genderových rozdílů v perceptualitě rozpoznávání taktilních komunikačních povelů;
- analýza chybovosti rozpoznání taktilních komunikačních povelů v závislosti na umístění komunikačního prostředku na lidském těle;
- reálný experiment analyzující chybovost v průběhu živého hraní před publikem (zkoumání vlivu komunikace s publikem a stresového faktoru na celkové chybovosti);
- studie vlivu omamných látek a alkoholu na úspěšnost rozpoznávání senzorních komunikačních povelů.

Jedním z opatření minimalizující chybovost může být použití výkonnějšího vibračního elektromotoru nebo umístění tohoto elektromotoru na část těla s větším množstvím nervových zakončení (např. dlaně ruky, chodidla nohou apod.). Při využití v praxi je vhodné senzorní podněty kombinovat.

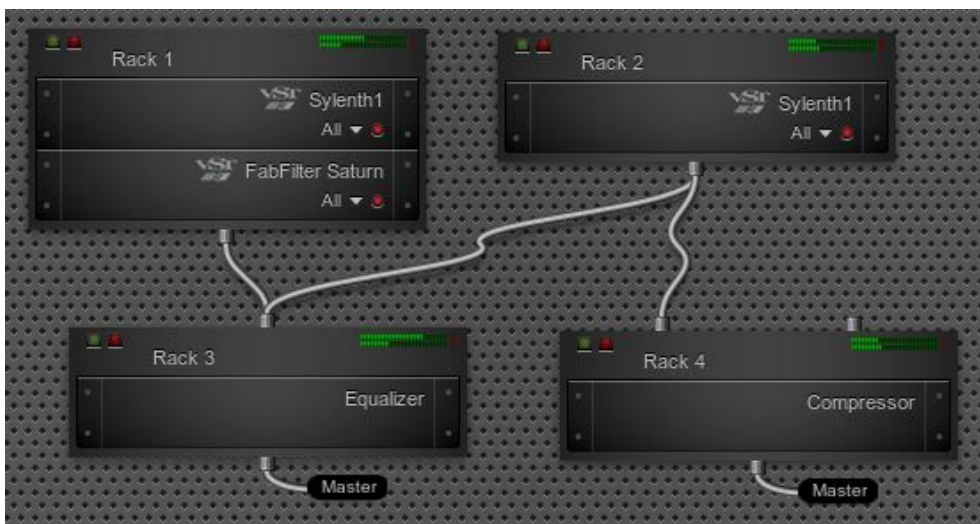
5.4 Úloha B: Testování komerčně dostupného systému pro tvorbu hudby v reálném čase

Po instalaci programu OhmStudio a vstupní registraci se zobrazí vstupní obrazovka zobrazující seznam právě aktivních uživatelů a hromadné diskuze. Nachází se zde také seznam vlastních projektů. Založení projektu provází nastavení průvodních metadat. Uživatel má možnost definovat, zda je projekt osobní či veřejný, otevřený nebo již dokončený, případně zda je dovoleno ostatním uživatelům projekt naklonovat a umožnit jim vytvořit vlastní remix. Dále je možné k projektu přiřadit příslušné hudební žánry a odpovídající „hudební náladu“. K projektu je možné přizvat jiného uživatele dle e-mailové adresy nebo uživatelského jména. Pozvaný obdrží žádost o spolupráci (viz obr. 5.13).



Obr. 5.13: Pozvánka k přístupu do projektu v programu OhmStudio

V projektu je umožněno přidávat a editovat jednotlivé zvukové či MIDI stopy. Program automaticky detekuje instalované zásuvné moduly (plug-iny) a efekty instalované v počítači a nabízí je k použití v příslušném okně. V době psaní diplomové práce byly podporovány jen 32bitové verze plug-inů, což považují za jednu z nevýhod oproti klasickým DAW systémům. Při použití zásuvného modulu, kterým nedisponují ostatní uživatelé, nejsou tyto uživatelé schopni měnit obsah MIDI stopy, které je přiřazen. Povolnou volbou je pohyb stopy po časové ose, ovšem bez možnosti náhledu na její obsah. Uvolnění vygenerovaného zvuku je pak možné vyexportováním nastaveného zvuku do audiostopy. Ta se zpřístupní ostatním



Obr. 5.14: Modulární náhled v programu OhmStudio

uživatelům, kteří jsou schopni ji poslechnout a aplikovat na ní další zásuvné moduly [57]. Tato metoda je reverzibilní, což považuji za přínos oproti jiným DAW.



Obr. 5.15: Náhled uživatelského prostředí DAW OhmStudio

Moduly a efektové procesory lze seskupovat do rackových jednotek, které lze variabilně spojovat. Snadno tak lze jedno nastavení určitého modulu aplikovat na více vstupních signálů. Modulární funkcionalita je podpořena vlastním grafickým ztvárněním, viz obr. 5.14, kterou hodnotím velmi kladně. Kromě ní je k dispozici také klasický mixážní náhled.

Pracovní prostředí je srovnatelné s klasickými DAW (viz obr. 5.15). Jednotliví uživatelé mají přiřazenou svou barvu a jimi vybrané prvky se zabarvují právě do této barvy. Ostatní uživatelé tak mají přehled, jaké části jsou daným uživatelem právě upravovány. Implementována je také možnost zobrazit si aktuální obrazovku jiného uživatele. Ve spodní části už

vatelského prostředí je k dispozici i diskuzní místnost, kde mohou mezi sebou spoluautoři projektu komunikovat.

Nahrávání MIDI či audiostop se provádí nejprve do místního úložiště, načež ukončením nahrávání se vzniklá stopa pošle na cloudový server v běžné síťové komunikaci spolehlivým protokolem TCP. Předchází se tím tak ztrátám či poškození dat související s RTC. Jádro programu je postaveno na technologii *Flip*², založené na okamžité synchronizaci prováděných změn přes serverovou kopii projektu a následně mezi více uživateli. Tento způsob předávání dat tak uchovává po celou dobu jednu kopii projektu a nedochází k větvení na dílčí pracovní verze [66]. Z toho pramení nutnost permanentního kontinuálního připojení k internetu po celou dobu užívání programu. Několik sekund po uvedení zařízení do offline režimu je přístup do programu odepřen a dojde k automatickému odhlášení.

V současnosti je vyvíjena druhá verze prostředí OhmStudio, která by měla nabídnout režim pro offline práci, umožní přidání video obsahu a další funkční vylepšení pro další vylepšení komunikace mezi uživateli [87].

DAW založený na přenosu zpráv některého z protokolů reálného času v současnosti není možné bezproblémově provozovat, a to z důvodu nevyhovující současné infrastruktury. V běžných datových sítích může zpoždění dat nabývat vyšší hodnoty než je 100 ms [93], které jsou pro takový systém pomyslnou hranicí subjektivně pohodlného fungování. Hranice pro optimální přirozené vnímání hudebních zpráv je však ještě nižší, a to 20 ms. OhmStudio pro komunikaci mezi cílovými stanicemi proto nevyužívá přímo RTC, ale lokální úložiště v kombinaci s výše diskutovaným systémem Flip, který přenáší data spolehlivým protokolem TCP. Toto řešení spolehlivě pracuje na současné technické infrastruktuře, dovoluje uživatelům pracovat současně na jednom projektu a nejvíce se blíží vizi budoucích RTC systémům IoMusT.

5.5 Úloha C: Aplikování IoMusT v praxi a úvod do analýzy proveditelnosti

Využití internetu hudebních věcí je možné pouze za splnění podmínek pro bezproblémové fungování. V kapitole [Analýza současného stavu](#) byl diskutován současný stav technologií využívaných ve studiové, scénické a multimediální praxi. Kapitola [Popis systému Internet Of Musical Things](#) se zabývala popisem komponent, které zajistí bezproblémové fungování systému. Tato úloha nabízí představení několika konkrétních aplikací systému IoMusT se stručným rozborem proveditelnosti za využití současných technologických prostředků.

²www.ohmstudio.com/flip

5.5.1 Interaktivní koncert

Před zahájením koncertu hudebníci získají informace o oblíbenosti svých skladeb v místě koncertu. Tyto informace jim pomohou ve výběru písní oblíbených publikem, před kterým budou vystupovat. Hudebníci na sobě mají umístěné MHW pro komunikaci mezi členy kapely a zvukovým technikem a hrají na SMI pro komunikaci s publikem. Účastníci koncertu si mohou na koncertu zakoupit e-textil a „chytré“ náramky s potiskem dané kapely. Vizualizace, promítané v průběhu koncertu, jsou navrženy i pro „chytré“ brýle, jimiž lze pozorovat přídavné trojdimenzionální vizuální prvky.

Během koncertu jsou SMI členů kapely schopny interagovat s MHW účastníků koncertu. „Chytré“ náramky mohou například vibrovat v tempu skladby díky komunikaci s „chytrou“ bicí soupravou nebo blikat při stisku kláves vybrané oktávy díky komunikaci s „chytrým“ syntezátorem. Kytarové sólo může být reprodukováno „chytrým“ zvukovým měničem umístěným na e-textilu. Na těchto „chytrých“ oděvech se mohou zobrazovat vizuální elementy související s vizualizacemi pro daný koncert. Vybraný účastník může být v průběhu vystoupení vyzván k dočasnému hraní nebo ovlivňování efektů určitého chytrého hudebního nástroje pomocí mobilní aplikace. Informace ze senzorů umístěných na lidském těle nebo oblečení budou sloužit ke komunikaci se scénickou technikou (např. výrobníky mlhy, výrobníky ohně, laserovými děly, LED světly apod.) a budou moci ovlivňovat i promítané vizualizace.

Lze předpokládat, že aplikováním IoMusT budou hudebníci cílit k unikátnosti každého svého koncertu. Popsaná unikátnost může být zavedena více způsoby. Jedním z nich je využití principu získávání informací o poslechovosti skladeb v lokalitě konání koncertu. V současnosti je možné tato data získávat například ze streamovacích platforem Spotify nebo Apple Music s vazbou na konkrétní stát.

Komunikace mezi hudebníky v průběhu koncertu je v současnosti založena na fyzických gestech a verbálních povelích. Komunikace mezi hudebníkem a zvukovým technikem je v současnosti uskutečňována buď fyzickými gesty, verbálními povely prostřednictvím mikrofonu (talkback), nebo využitím mobilní aplikace [77]. Vývoj zařízení MHW je ve fázi výzkumu [2].

Mezi chytré hudební nástroje je v současnosti možné přiřadit kupříkladu bezdrátové zařízení *Xkey Air*³ a zařízení *Phonotonic*⁴. Z chytrých režijních zařízení lze jmenovat například *ATDM-0604 Digital SmartMixer*⁵. S využitím mobilních aplikací bude možné zapojit účastníky koncertu do vystupování například uvolněním některého ovládacího prvku ze SMI do rozhraní mobilní aplikace s možností dočasně ovládní vybraným účastníkem z publika. Některým elektronickým hudebním nástrojům nedisponujících zabudovanou konektivitou, lze tuto konektivitu vytvořit dodatečně, podobně jako jsem v kapitole [Úloha A1: Komunikace mezi hudebními věcmi](#) vytvořil ze syntezátoru a hudebního procesoru síťový prvek disponující vzdáleným ovládním. U analogových hudebních nástrojů je možné vytvořit alespoň částečnou interaktivitu využitím senzorů nebo mikrofonů s dalšími prvky zpracovávajících nahrané signály. Lze tak monitorovat například úroveň vibráta, tremola nebo tóniny.

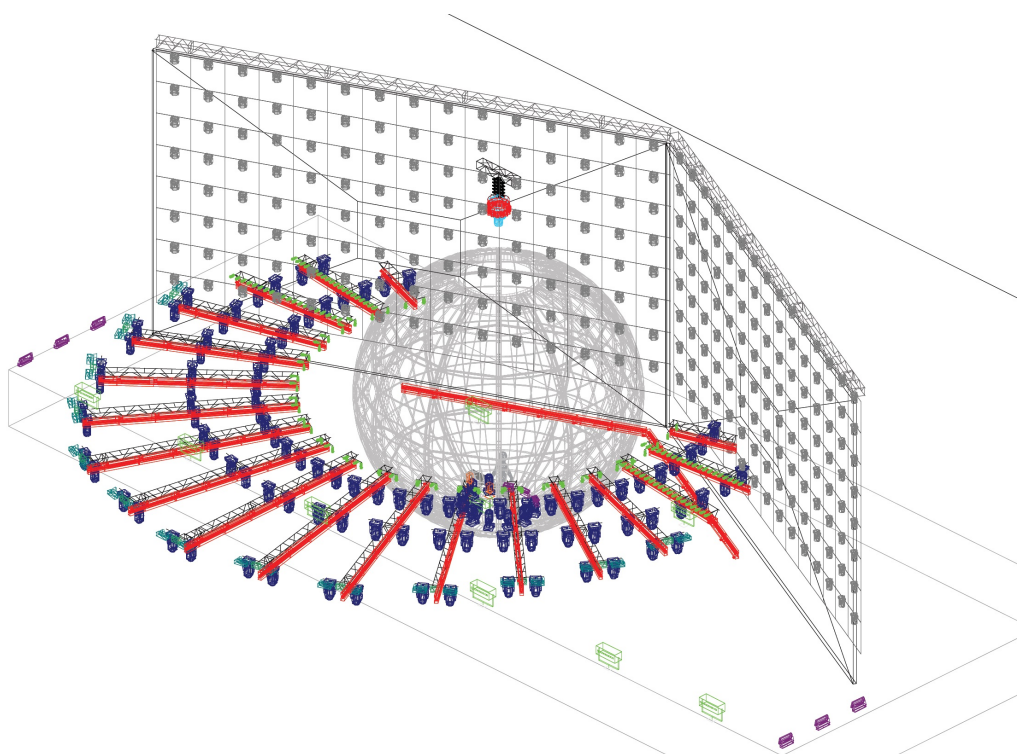
³www.xkeyair.com/xkey-air/

⁴www.phonotonic.net/phonotonic

⁵www.audio-technica.com/cms/mixers/0f35eb76702d65b3

Technologický vývoj v oblasti chytrých brýlí v současnosti nedosahuje požadavků systému IoMusT pro zobrazování přídavných vizuálních prvků. 3D vjem v místě konání koncertu lze v současnosti vytvořit několika způsoby:

- Jednou z realizovatelných možností by mohlo být využití technologie INFITEC⁶⁷ pro navození trojrozměrného vjemu. Tato technologie využívá vlnového multiplexu, kdy se každé základní barvě z barevného modelu RGB přiřadí dvě, vzájemně rozdílné, vlnové délky (rozdíl vlnových délek by měl činit nejméně 10 nm [22]). Separaci vlnových délek lidským očím zajišťují brýle s interferenčními filtry. Lidský mozek vnímá obě vlnové délky příslušící jedné ze základních barev RGB jako stejnou a díky tomu lze vytvořit stereoskopický vjem. Pro realizaci tohoto systému lze využít například výkonných laserových projektorů promítajících obraz na rovnou nebo mírně zakřivenou projekční plochu. Další možností je využití LED stěn, vyžadujících však technologickou modifikaci zdroje světla (emisní spektrum LED je tvořeno úzkopásmovým rozsahem vlnových délek dané barvy, kde je šířka pásma větší než 10 nm). Aplikace této technologie může být problémová při využití na moderních koncertech, a to z důvodu nutnosti nošení brýlí. Oproti technologii aktivního 3D se však využívají pasivní brýle, což výrazně usnadňuje jejich údržbu.
- LED stěny lze umístit libovolně do prostoru. Tím lze docílit vytvoření trojdimenzionální sítě bodových zářičů. Tohoto principu se využívá při koncertech s názvem „EPIC“ hudebníka Erica Prydze. Na obrázku 5.16 je znázorněno zhotovení pódia. Hudebník se nachází uvnitř kulové konstrukce.



Obr. 5.16: Prostorové uspořádání pódia pro koncert „Eric Prydz presents EPIC 6.0 HOLOSPHERE“. Převzato z [10], autor kresby: Ross Chapple

⁶www.infitec.net

⁷Interference Filter Technology

- Použití optické iluze zvané Pepperův duch. Projekci obrazu zajišťuje nad zemí zavěšený projektor. Promítané světlo se odráží od země, kde je umístěné zrcadlo. To odráží paprsky na čirou desku, umístěnou pod úhlem 45° od země. Deska je pokryta mikroskopickou vrstvou materiálu propouštějící světlo jen z určitých směrů. Světlo odrážené od desky směřuje k divákům [31]. Těto optické iluzi je také přezdíváno „nepravý hologram“. S využitím programů pro úpravu obrazu lze promítanému obrazu přidat více plasticity a tím zlepšit prostorový vjem.
- Technologickou výzvou je využití holografie. Ta pro navození stereoskopického vjemu nevyžaduje nošení brýlí. Holografický záznam obrazu se v současnosti využívá pouze pro zachycení statických snímků. Další vývoj holografie je budoucností pro věrné zobrazování 3D obrazu v digitální kinematografii.

Rozšíření prostorového vjemu je možné zajistit i s pomocí vhodného zvukového systému. V současných koncertech je reprodukována hudba jednokanálová (mono) nebo dvoukanálová (stereo). Stejně tak je tomu i u hudebních nahrávek. Na produkci dvoukanálové hudby jsou navíc kladeny nároky na monofonní kompatibilitu a kmitočtové vyvážení jednotlivých vrstev skladby (proces tvorby elektronické hudby je uveden v mé bakalářské práci, viz [3, s. 33]). Tato pravidla může značně ovlivnit zavedení trojdimenzionálního zvukového systému. Tím je například Dolby Atmos. Původně kinematografický zvukový systém byl vyvinut a poprvé instalován v londýnském hudebním klubu The Ministry Of Sound. Systém disponuje 22 zvukovými kanály a sestává ze soustavy 60 reproduktorů umístěných převážně na stropě místnosti [45]. Narozdíl od čistě kanálově orientovaných zvukových systémů (jako jsou 5.1, 7.1 apod) je systém Dolby Atmos objektově orientován. Poslechová místnost je kompletně ozvučena reproduktorovou sítí s rozlišením daným počtem kanálů (v rámci platných konfigurací systému závislých například na objemu prostoru). Reprodukované zvuky jsou seskupeny do objektů, kterými lze s pomocí příslušných softwarových aplikací volně pohybovat v prostoru ozvučeném reproduktorovou sítí. Poslechový vjem, tvořený množinou zvuků, je tak v čase produkován různými reproduktory, čímž lze vnímat pohyb objektu v prostoru.

Pro vznik hudební nahrávky schopné reprodukce ve formátu Atmos firma Dolby vyvinula *Dolby Atmos Panner Plug-In*, který dovoluje vytvořit z různých částí hudebního díla samostatné objekty a ty posléze umístit různě do prostoru. Umístění může být řízeno v reálném čase. Je zajištěna interoperabilita se současnými CD/USB přehrávači a mixážními pulty určenými pro hudební reprodukci (viz kapitolu 2.3) [30]. Náhled pracovního prostředí pro reprodukci hudebního díla ve zvukovém formátu Dolby Atmos je na obrázku 5.17.

Využití informací generovaných SMI k ovládní MHW účastníků je implementační záležitostí. Komunikace v místě konání koncertu probíhá v síti LAN a při využití vysokorychlostních směrovačů lze prostor konání koncertu pokrýt bezdrátovou sítí s vysokou kapacitou (pro 5 GHz Wi-Fi routery standardů 802.11n či 802.11ac je přenosová rychlost až 1,3 Gbit/s). Stanovení mezního počtu koncových zařízení pro zajištění RTC a zkoumání rušení signálu mobilními zařízeními je námětem pro další analýzy. Pro koncerty s vysokým počtem (v řádu několika stovek až tisíců) účastníků se nabízí využití příchodu páté generace mobilních sítí (5G), podporující systém internetu věcí. Zpoždění dat v předcházející generaci (4G) se pohybuje okolo 50 ms. První provedená měření 5G sítí v Německu zaznamenávají zpoždění 3 ms [52]. Očekává se, že 5G sítě budou schopny přenášet data s rychlostí mezi 10 – 20 Gbit/s se zpožděním menším než 1 ms [44], což je pro účely systému IoMusT dostačující.



Obř. 5.17: Náhled pracovního prostředí pro reprodukci hudebního díla ve zvukovém formátu Dolby Atmos. Převzato z [30]

Pro využití dat ze senzorů MHW pro ovlivňování funkcí scénické techniky je nutné vyvinout algoritmus zpracovávající velké množství dat v reálném čase a jejich začlenění do příslušných software pro ovládání scénické techniky.

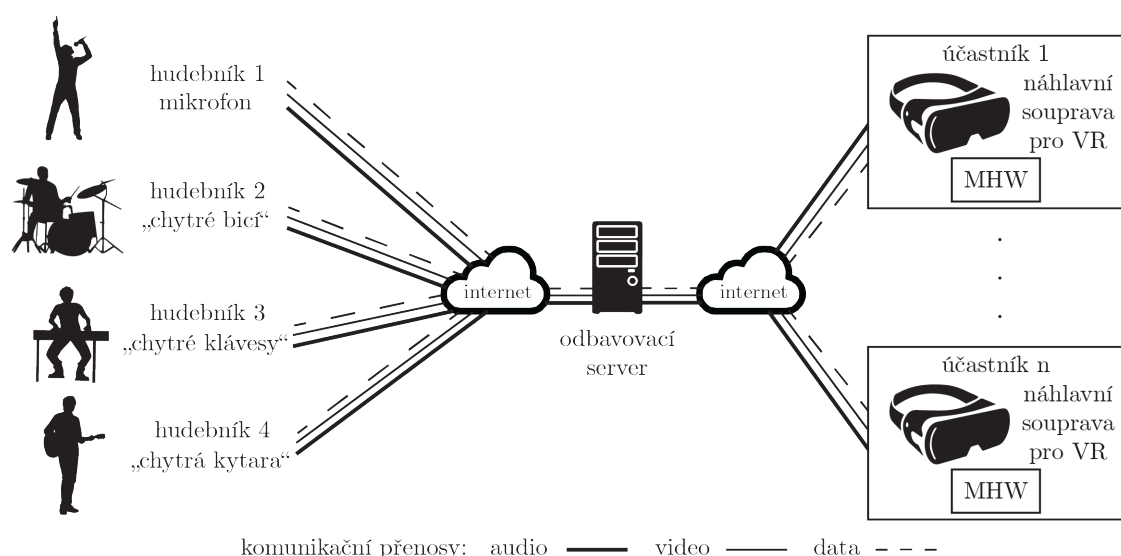
5.5.2 Virtuální koncert

Členové kapely jsou se svými nástroji na různých místech. Každý z hudebníků disponuje svým vlastním odposlechovým reproduktorem (pro monitorování hudby hrané ostatními účastníky) a je snímán stereoskopickým systémem kamer. Jednotliví účastníci koncertu se vzdáleně připojují do virtuálního prostoru s pomocí náhlavní soustavy pro virtuální realitu. V tomto virtuálním prostoru se objevuje obraz všech zúčastněných hudebníků na imaginárním pódiu v reálném čase. V průběhu koncertu se posluchačovi zobrazují trojdimenzionální vizualizace. S pomocí elektroakustických měničů a biometrických senzorů v MHW lze komunikovat s hudebníky podobně jako při skutečném koncertu a podílet se na ovlivňování vizualizací. Vybranému účastníkovi se v průběhu koncertu naskytne možnost s pomocí funkčních kláves své náhlavní soustavy ovlivňovat parametry vybraného SMI některého z hudebníků.

Technologicky je problematika přenosu audiovizuálních dat z více míst v reálném čase podobná videokonferencím. Výrazným rozdílem je předpokládaný přenos stereoskopického obrazu a zvuku ve vysoké kvalitě. Zvuk vytvářený hudebníkem je zapotřebí s minimálním zpožděním přenést mezi ostatní hudebníky (pro správnou, synchronní hudební produkci). Lze využít přímého spojení mezi účastníky. Nároky na maximální možnou latenci přenosu dat systému IoMusT jsou tak poloviční (10 ms).

Audiovizuální data od jednotlivých hudebníků je zapotřebí synchronizovat vhodným mechanismem a vložit do určených částí virtuálního prostoru. Odbavení celého virtuálního koncertu by mělo probíhat na výkonném serveru, schopným zpracovávat současně více obrazových toků bez dalších zpoždění na hardwarových jednotkách. Pro minimalizaci přenosové rychlosti obrazových toků je vhodné využít efektivních kompresních standardů.

Při zavedení komunikační zpětné vazby (přenos reakcí účastníků hudebníkům) v reálném čase, se tak hranice maximálního možného zpoždění přenosu dat v systému IoMusT opět snižuje na polovinu (5 ms). Těmto nárokům (za předpokladu nízkého zpoždění na odbavovacím serveru) vyhovují přenosové vlastnosti páté generace mobilních sítí (5G). Funkčnost této implementace v praxi je návrhem pro podrobnou studii. Celý koncept virtuálního koncertu je schematicky znázorněn na obrázku 5.18.



Obr. 5.18: Schematické znázornění konceptu virtuálního koncertu s využitím centrálního odbavovacího serveru a vyznačením různých druhů datových přenosů

5.5.3 Tvorba hudebního díla více vzdálenými účastníky v reálném čase

Hudebníci se připojí do systému umožňujícího tvorbu hudby více účastníky. Společně jsou schopni nejen přistupovat ke stopám a zásuvným modulům v offline režimu, ale tyto stopy společně i živě nahrávat.

V současnosti je vzájemná spolupráce mezi hudebníky založena na sdílení pracovního souboru používaného DAW. V jednu chvíli tak nemůže k projektu přistupovat jiný účastník. Hrozí nekompatibility projektů napříč verzemi DAW (děje se tak zejména u DAW FL Studio). Během sdílení projektu mezi více účastníky může dojít k větvení verzí projektu, vzhledem k předpokladu, že „poslední verze“ daného projektu existuje vždy jen jedna. Zmiňované nevýhody řeší vlastnosti DAW OhmStudio, diskutovaného v kapitole 5.4. OhmStudio však v současnosti neumožňuje živé nahrávání v reálném čase. Software, disponující touto funkcí, musí splňovat přísné nároky na synchronizaci zařízení a na minimalizaci zpoždění, podobně

jako v kapitole 5.5.2. Nutný je vývoj způsobu sdílení virtuálního metronomu pro udržení synchronizace jednotlivými hudebníky.

Vhodně řešeno musí být také snímání zvuku z analogových nástrojů, primárně nedisponujících funkcemi SMI. V běžných, vhodně akusticky upravených studiích, je problematika řešena vhodným ozvučením analogového nástroje studiovými mikrofony, mající patřičnou směrovou charakteristiku a citlivost. Je dobré si uvědomit, že nahrávání zvuku analogového nástroje nelze uskutečnit v akusticky neupravených místnostech s mikrofonom nesplňujícím kvalitativní nároky na výsledný audio výstup. Nahrávání proto musí probíhat ve vhodném studiu, disponujícím možností vzdáleného připojení k nahrávacímu software. Alternativou může být využití konverze zvukových dat do některého z protokolů určených pro přenos hudebních informací ideálně obsahující popis vlastností psychoakustických jevů. Takovým protokolem byl například [ZIPI](#), využívající jazyk MPDL. Zvuková data lze poté věrně syntetizovat a vytvořit tak původní zvuk se stejnými akustickými vlastnostmi.

„Chytré“ elektronické hudební nástroje a kontroléry generují data obsahující hudební zprávy (standards jsou popsány v kapitole 3.2.2 a příklady těchto zařízení jsou uvedeny v kapitole 5.5.1). Syntéza výsledných zvuků probíhá bez závislosti na prostoru, v kterém se hudebník nachází. Prostorové vlastnosti lze do audiostopy aplikovat dodatečně efektovanými procesory.

Propustnost síťové infrastruktury musí být vyhovující vzhledem k extrémním nárokům ve dvou protichůdných oblastech – stoprocentní spolehlivosti a (takřka nulové) rychlosti přenosu. Obdobně jako v předchozích kapitolách je jednou z možných technologií mobilní síť páté generace. Současně je také zapotřebí použít takový komunikační protokol, který zajistí spolehlivost přenosu (včetně řešení krátkodobého výpadku paketů) a synchronizace v extrémně krátkém čase.

6. Závěr

Příchod internetu věcí do běžného života je již nezvratný. Dříve nemyslitelné technologické možnosti se v současnosti stávají novými reálnými výzvami. Převratným změnám čelí i hudební průmysl, na technologiích takřka závislý. Nejspecifičtější vlastností konceptu internetu hudebních věcí jsou extrémní nároky na přenos audiosignálů (nebo hudebních informací) v reálném čase. Jak je uvedeno v kapitole 5.1, subjektivní hranice maximálního možného zpoždění pro uspokojivý psychoakustický počitek je 20 ms. Hudební data však v různých aplikacích musí projít více síťovými cestami a projít často i dodatečným zpracováním, což vnáší do vývoje další technické problémy.

V rámci své diplomové práce jsem provedl rešerši nového systému Internet of Musical Things (IoMusT). V kapitole 2 jsem se zaměřil na výběr současných technologií a systémů souvisejících s hudební a scénickou technikou. Kapitola 3 se zabývá přímým popisem důležitých oblastí IoMusT, ve kterých jsem vyjmenoval hlavní problémy, u kterých je potřeba dalšího vývoje vhodných prostředků zajišťujících správnou funkci systému, včetně diskuze výhod i nevýhod již existujících prostředků.

V kapitole 4.1 jsem se zaměřil na návrh a realizaci vlastních prvků systému IoMusT. Zařízení jsem navrhl, realizoval, konfiguroval, emuloval provoz mezi nimi a v kapitole 5.1 stanovil mezní parametry pro bezproblémovou funkci systému. Je nutné si uvědomit, že systémy internetu věcí nemohou spolehlivě fungovat na zastaralé infrastruktuře. Vycházím-li z rychlosti, s jakou je ve světě zaváděna 6. verze IP adres, obměna síťových prvků koncových uživatelů je obecně pomalá a může potrvát nejméně jedno desetiletí. Z mého měření vyplynulo, že Wi-Fi router pracující ve standardu 802.11 b není schopen spolehlivého přenosu dat už při obousměrném zahlcení datovým tokem rychlosti 200 kbit/s a Wi-Fi router pracující ve standardu 802.11 g dosahuje mezní hranice fungování při obousměrném zahlcení datovým tokem rychlosti 10 Mbit/s.

Pomocí software OhmStudio jsem v kapitole 4.2 realizoval konkrétní systém a testoval jeho funkce. V kapitole 5.4 jsem provedl vyhodnocení zjištěných vlastností a provedl porovnání s ostatními současnými DAW systémy a také s budoucími systémy plně splňujícími požadavky IoMusT. Z testování vyplývá, že OhmStudio v době psaní diplomové práce sice ještě nesplňuje všechny požadavky IoMusT (i s ohledem na současnou infrastrukturu), vývoj dalších verzí programu však stále pokračuje.

V kapitole 2.2.2 jsem se zaměřil na popis synchronizace a korekce chyb v datových přenosech protokolu RTP-MIDI, který jsem využil jako komunikační prostředek v praktické části práce. V kapitole 2.3.3 jsem se věnoval rozboru dalších protokolů a metod zajišťujících synchronizaci zařízení v síťovém prostředí a výčtu software a zařízení, která je používají. Tato problematika je obsáhlá a svým rozsahem by jistě vydala na samostatnou práci.

Provedl jsem experiment komunikace mezi hudebními nástroji a elektronickými zařízeními umístěnými na lidském těle. Z důvodu karanténních opatření v době psaní diplo-

mové práce byl experiment uskutečněn pouze v omezeném rozsahu v prostorách laboratoře Katedry telekomunikační techniky. I přesto z experimentu plyne řada hodnotných závěrů popsaných v kapitole 5.2. Ve vyhodnocení tohoto experimentu jsem také uvedl několik návrhů pro další studie či analýzy souvisejících s vývojem nositelné elektroniky sloužící pro komunikaci mezi hudebníky.

Klasický digitální syntezátor jsem úspěšně přeměnil na síťový prvek, viz 5.3. Využil jsem dostupných prostředků pro vzdálenou komunikaci v reálném čase a své řešení úspěšně ověřil. V kapitole 5.5 jsem provedl rozbor konkrétních aplikací systému IoMusT. Rovněž jsem naznačil analýzu proveditelnosti s přihlédnutím k současným technologiím. Právě detailní analýza proveditelnosti by byla dalším vhodným tématem pro pokračování této práce.

7. Literatura

- [1] TURCHET, L.; FISCHIONE, C.; ESSL, G.; aj.: Internet of Musical Things: Vision and Challenges. *IEEE Access*, ročník 6, 2018: s. 61994–62017, ISSN 2169-3536, doi:10.1109/ACCESS.2018.2872625, [online]. [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8476543>.
- [2] TURCHET, L.; BARTHET, M.: Co-Design of Musical Haptic Wearables for Electronic Music Performer’s Communication. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, ročník 49, č. 2, April 2019: s. 183–193, ISSN 2168-2305, doi:10.1109/THMS.2018.2885408, [online]. [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8585031>.
- [3] VYŠINSKÝ, T.: *Měřicí pracoviště pro elektronické hudební nástroje*. Bakalářská práce, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze, Katedra telekomunikační techniky, 2018, vedoucí práce: Ing. Tomáš Zeman, Ph.D.
- [4] VYŠINSKÝ, T.: *Moderní datová rozhraní pro elektronické hudební nástroje*. Projekt v týmu, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze, Katedra telekomunikační techniky, 2017, vedoucí práce: Ing. Tomáš Zeman, Ph.D.
- [5] VYŠINSKÝ, T.: HPM Wiki - Interaktivní syntezaátor Reactable. [online]. [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/a2b31hpm/index.php/U%C5%BEivatel:Vysinto1>.
- [6] BADI, C.; BELLINI, P.; DIFINO, A.; aj.: Smart City IoT Platform Respecting GDPR Privacy and Security Aspects. *IEEE Access*, ročník 8, 2020: s. 23601–23623, [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8966344>.
- [7] BARTONE, C. G.; MOORE, L.; KOHLI, M.: An e-textile antenna for body area network. 2016: s. 999–1000, [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7696208>.
- [8] BEZPALEC, P.: Úvod do datových sítí [přednáška], Praha: Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze, 6. 10. 2015. [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=3944>.
- [9] BRAY, M.: Telemidi - Creating music over The Internet in real-time. *MIDI Association*, [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.midi.org/articles-old/telemidi-creating-music-over-the-internet-in-real-time>.
- [10] DAHI, D.: Eric Prydz is going to DJ inside a giant glowing sphere — here’s how it was made. *The Verge*, 07 2019, [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné

z: <https://www.theverge.com/2019/7/9/20683461/dj-eric-prydz-epic-6-0-holosphere-tomorrowland>.

- [11] DING, Z.; YANG, Z.; FAN, P.; aj.: On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users. *IEEE Signal Processing Letters*, ročník 21, č. 12, Dec 2014: s. 1501–1505, ISSN 1558-2361, doi:10.1109/LSP.2014.2343971, [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6868214>.
- [12] DROUIN, M.; KAISER, D.; MILLER, D.: Phantom vibrations among undergraduates: Prevalence and associated psychological characteristics. *Computers in Human Behavior*, ročník 28, 07 2012: str. 1490–1496, doi:10.1016/j.chb.2012.03.013, [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563212000799>.
- [13] EDWARDS, J.; BRAMANTE, R.: *Networking Self-Teaching Guide: OSI, TCP/IP, LAN's, MAN's, WAN's, Implementation, Management, and Maintenance*. Wiley Publishing, 2009, ISBN 0470402385, 9-12 s.
- [14] HERRERO, G.; KUDUMAKIS, P.; TARDON, L.; aj.: An HTML5 Interactive (MPEG-A IM AF) Music Player. *ResearchGate*, 10 2013, [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/264314442_An_HTML5_Interactive_MPEG-A_IM_AF_Music_Player.
- [15] HILDEBRAND, A.: Overview on IP Audio Networking. [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://www.hs-rm.de/fileadmin/persons/khofmann/Gastvortraege/Vortragfolien/20180126-Hildebrand-IP_Audio_Standards.pdf.
- [16] HUNTINGTON, J.: *Control Systems for Live Entertainment*. Elsevier/Focal Press, 2007, ISBN 9780240809373, [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=MDuHZ_D_TGEC.
- [17] HUSSAIN, A.; IVANOVIC, M.: *Electronics, Communications and Networks IV: Proceedings of the 4th International Conference on Electronics, Communications and Networks (CECNET IV), Beijing, China, 12-15 December 2014*. USA: CRC Press, Inc., 2015, ISBN 1138028304, 191 s.
- [18] JANG, I.; KUDUMAKIS, P.; SANDLER, M.; aj.: The MPEG Interactive Music Application Format Standard [Standards in a Nutshell]. *IEEE Signal Processing Magazine*, ročník 28, č. 1, Jan 2011: s. 150–154, ISSN 1558-0792, doi:10.1109/MSP.2010.939073, [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5670634>.
- [19] JOHNS, I.: Ethernet Audio: Everything You Need To Know About Audio-Over-IP. *Sound On Sound*, [online]. [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://www.soundonsound.com/techniques/ethernet-audio>.
- [20] KAUSHAL, H.; KADDOUM, G.: Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, ročník 4, 2016: s. 1518–1547, ISSN 2169-3536, doi:10.1109/ACCESS.2016.2552538, [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7450595>.

- [21] KEMP, A.; KEMP, D.: *The Musical Temperament: Psychology and Personality of Musicians*. OUP Oxford, 1996, ISBN 9780198523628, [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780198523628.001.0001/acprof-9780198523628>.
- [22] KIM, S.-C.; KIM, E.-S.: Performance analysis of stereoscopic three-dimensional projection display systems. *3D Research*, ročník 1, 03 2010: s. 1–16, doi:10.1007/3DRes.01(2010)1, [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/227222193_Performance_analysis_of_stereoscopic_three-dimensional_projection_display_systems.
- [23] LAZZARO, J.; WAWRZYNEK, J.: A Case for Network Musical Performance. 06 2001, doi:10.1145/378344.378367, [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/378344.378367>.
- [24] McGUIRE, S.: *Modern MIDI: Sequencing and Performing Using Traditional and Mobile Tools*, ročník 1. Oct 20 2014, copyright - Copyright Ringgold Inc Oct 20, 2014; Poslední aktualizace - 2015-02-06.
- [25] McMILLEN, K. A.; SIMON, W. D.; WRIGHT, M.: A Summary of the ZIPI Network. *Computer Music Journal*, ročník 18, 1994: s. 74–80, doi:10.2307/3681359.
- [26] NISHIDA, T.: *Human-Harmonized Information Technology, Volume 2: Horizontal Expansion*. Springer Japan, 2017, ISBN 9784431565352, 63 s., [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=vEW4DgAAQBAJ>.
- [27] PATEL, K.; PATEL, S.; SCHOLAR, P.; aj.: Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges. 2016, [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/330425585_Internet_of_Things-IOT_Definition_Characteristics_Architecture_Enabling_Technologies_Application_Future_Challenges.
- [28] PRŮCHA, P.: DMX řízení techniky: za světlem s drátem i bez drátu. *Frontman: Magazín pro aktivní muzikanty*, [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://frontman.cz/dmx-rizeni-techniky-za-svetlem-s-dratem-i-bez-dratu>.
- [29] RAIMOND, Y.; ABDALLAH, S.; SANDLER, M.; aj.: The Music Ontology. *Proceedings of the 8th International Conference on Music Information Retrieval, ISMIR 2007*, 09 2007, [online]. [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/200688653_The_Music_Ontology.
- [30] ROBJOHNS, H.: Dolby Atmos At The Ministry Of Sound. *Sound On Sound*, [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.soundonsound.com/techniques/dolby-atmos-ministry-sound>.
- [31] ROSLAN, R.; AHMAD, A.: 3D Spatial Visualisation Skills Training Application for School Students Using Hologram Pyramid. *JOIV : International Journal on Informatics Visualization*, ročník 1, 11 2017: str. 170, doi:10.30630/joiv.1.4.61, [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323194599_3D_Spatial_Visualisation_Skills_Training_Application_for_School_Students_Using_Hologram_Pyramid.

- [32] ROTHBERG, M. B.; ARORA, A.; HERMANN, J.; aj.: Phantom vibration syndrome among medical staff: a cross sectional survey. *BMJ*, ročník 341, 2010, ISSN 0959-8138, doi:10.1136/bmj.c6914, [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.bmj.com/content/341/bmj.c6914>.
- [33] ROTTONDI, C.; CHAFE, C.; ALLOCCHIO, C.; aj.: An Overview on Networked Music Performance Technologies. *IEEE Access*, ročník 4, 2016: s. 8823–8843, [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7769205>.
- [34] SAAED, N.; ALOUINI, M.-S.; AL-NAFFOURI, T. Y.: Towards the Internet of X-things: New Possibilities for Underwater, Underground, and Outer Space Exploration. King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Makkah, Saudi Arabia. [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1903/1903.11996.pdf>.
- [35] SEDLÁK, F.; VÁŇOVÁ, H.: *Hudební psychologie pro učitele*. Karolinum, 2013, ISBN 9788024620602, 17-18 s., [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=Ynw4AwAAQBAJ>.
- [36] SENG, L.: The Internet of Flying-Things: Opportunities and Challenges with Airborne Fog Computing and Mobile Cloud in the Clouds. 07 2015, [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280104289_The_Internet_of_Flying-Things_Opportunities_and_Challenges_with_Airborne_Fog_Computing_and_Mobile_Cloud_in_the_Clouds.
- [37] SETTLE, M.: StageLinq, SoundSwitch, and Resolume – Denon DJ’s visual trinity. *DjWorx*, [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://djworx.com/stagelinq-soundswitch-resolume-denon-djs-visual-trinity/>.
- [38] SKUPIN, R.; SANCHEZ, Y.; WANG, Y.-K.; aj.: Standardization status of 360 degree video coding and delivery. Dec 2017: s. 1–4, ISSN null, doi:10.1109/VCIP.2017.8305083, [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8305083>.
- [39] SUN, Z.; AKYILDIZ, I. F.: Magnetic Induction Communications for Wireless Underground Sensor Networks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, ročník 58, č. 7, July 2010: s. 2426–2435, ISSN 1558-2221, doi:10.1109/TAP.2010.2048858, [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5452976>.
- [40] THALMANN, F.; PEREZ-CARRILLO, A.; FAZEKAS, G.; aj.: Navigating Ontological Structures Based on Feature Metadata with the Semantic Music Player. *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval*, 2015: s. 1–2, [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/handle/123456789/16154>.
- [41] THI NGUYEN, T.-T.; DO, D.-T.: Exploiting performance of two-way non-orthogonal multiple access networks: Joint impact of co-channel interference, full-duplex/half-duplex mode and SIC receiver. *Ad Hoc Networks*, ročník 97, 2020: str. 102032, ISSN 1570-8705, doi:<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.102032>, [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570870519300538>.

- [42] ČTK: Supraphon začne streamovat hudbu. Ale v Česku vyrobíme poslední fyzický hudební nosič, říká šéfka. *Hospodářské noviny*, [online]. [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <https://art.ihned.cz/hudba/c1-65843620-supraphon-streamovani-hudba-nosice-cd-lp-milerova>.
- [43] TORMO, T.: Pro DJ Link: How To Set Up Pioneer DJ Setups Properly. *Dj Techttools*, [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://djtechttools.com/2018/07/31/pro-dj-link-how-to-set-up-pioneer-dj-setups-properly/>.
- [44] VANÍK, O.: *Ověřování parametrů mobilních datových služeb*. Bakalářská práce, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze, Katedra telekomunikační techniky, 2018, vedoucí práce: Ing. Tomáš Zeman, Ph.D.
- [45] WILSON, S.: Fact: Ministry of Sound is getting a 22-channel soundsystem. [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.factmag.com/2015/12/03/ministry-of-sound-dolby-atmos/>.
- [46] WRIGHT, M.: Open Sound Control: An Enabling Technology for Musical Networking. *Org. Sound*, ročník 10, č. 3, Prosinec 2005: str. 193–200, ISSN 1355-7718, doi:10.1017/S1355771805000932.
- [47] XIAOYUAN GU; DICK, M.; KURTISI, Z.; aj.: Network-centric music performance: practice and experiments. *IEEE Communications Magazine*, ročník 43, č. 6, June 2005: s. 86–93, ISSN 1558-1896, doi:10.1109/MCOM.2005.1452835, [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1452835>.
- [48] YANG, F.; WANG, S.; LI, J.; aj.: An overview of Internet of Vehicles. *China Communications*, , č. 10, Oct 2014: s. 10–12, ISSN 1673-5447, doi:10.1109/CC.2014.6969789, [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6969789>.
- [49] YUAN, S.; LU, Y.; HE, H.: MIDI-Based Software for Real-Time Network Performances. Oct 2010: s. 226–230, ISSN null, doi:10.1109/CDEE.2010.51, [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5759372>.
- [50] ZHAO, W.; WANG, C.; NAKAHIRA, Y.: Medical application on internet of things. Oct 2011: s. 660–665, doi:10.1049/cp.2011.0751, [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6192948>.
- [51] ŽÁKOVÁ, K.: *Technologie streamingu a hodnocení kvality videa*. Bakalářská práce, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze, Katedra radioelektroniky, 2018, s. 32, Vedoucí práce: Ing. Karel Fliegel, Ph.D.
- [52] Telekom: 5G speed is data transmission in real time. [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.telekom.com/en/company/details/5g-speed-is-data-transmission-in-real-time-544498>.
- [53] Ableton Link - features, functions and FAQ. [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://help.ableton.com/hc/en-us/articles/209776125-Link-features-functions-and-FAQ>.
- [54] ACPAD — the electronic orchestra for your guitar. [online]. [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <https://www.acpad.com/>.

- [55] AlphaSphere – frequently asked questions. [online]. [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <https://www.alphasphere.com/faqs/>.
- [56] VR Industry Forum:Guidelines, Version 2.0draft004. [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.vr-if.org/wp-content/uploads/vrif2018.110.04-Guidelines-2.0-for-Community-Review-1.pdf>.
- [57] OhmStudio: Collaborative Freeze. [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.ohmstudio.com/doc/glossary/collaborative-freeze>.
- [58] Technické standardy vytváření datových schémat pro datové sady na stupni otevřenosti 5. [online]. [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://opendata.gov.cz/standardy:technicke-standardy-pro-vytvoreni-datovych-schemat-na-stupni-5>.
- [59] Lumenetix: DMX512-A Protocol Specifications. [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: https://lumenetix.com/wp-content/uploads/Lumenetix_DMX512-A-Protocol-and-Wiring-Specifications-1.pdf.
- [60] Contemporary Controls – The Extension: Understanding EIA-485 Networks. 1999, [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.ccontrols.com/pdf/ExtV1N1.pdf>.
- [61] Levenly: L'éclairage DMX, comment ça marche? [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.levenly.com/blog/dmx-512-comment-ca-marche.html>.
- [62] Texas Instruments – Interface Circuits for TIA/EIA-485 (RS-485), Application Report. [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slla036d/slla036d.pdf>.
- [63] Espressif: ESP32 - A Different IoT Power and Performance. [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview>.
- [64] ESP32-WROOM-32 Datasheet. [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.
- [65] ESP8266EX Datasheet. [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf.
- [66] OhmStudio: Flip Technology. [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.ohmstudio.com/flip>.
- [67] International Organization for Standardization: Internet of Media Things to Take Off With New Series of International Standards. *Targeted News Service*, [online]. [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.iso.org/news/ref2449.html>.
- [68] File in ISO base media file format as described in ISO/IEC 14496 Part 12 standard. [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <http://www.ipa.br/videos/phpvideotoolkit-0.1.8/adapters/ffmpeg-php/php-reader/docs/php-reader/ISO/ISO14496.html>.

- [69] Řešení degradace výkonu sítě - poznejte metriky NPM. *Flowmon: Driving Network Visibility*, [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.flowmon.com/cs/company/news/releases/reseni-degradace-vykonu-site-npm-metriky>.
- [70] Measuring latency with the ping utility. [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: http://homepage.smc.edu/morgan_david/cs70/assignments/ping-latency.htm.
- [71] Details about MIDI 2.0™, MIDI-CI, Profiles and Property Exchange. [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.midi.org/articles-old/details-about-midi-2-0-midi-ci-profiles-and-property-exchange>.
- [72] Bluetooth LE MIDI Specification. [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.midi.org/specifications-old/item/bluetooth-le-midi>.
- [73] MIDI Manufacturers Investigate HD Protocol. [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.midi.org/articles-old/midi-manufacturers-investigate-hd-protocol>.
- [74] Diskuzní fórum MIDI Manufacturers Association (MMA). [online]. MIDI Manufacturers Association [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.midi.org/forum/20-midi-hd-protocol>.
- [75] (CA-033) MIDI 1.0 Electrical Specification Update (2014). [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.midi.org/specifications-old/item/the-midi-1-0-specification>.
- [76] Basics of USB-MIDI. [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.midi.org/articles-old/basic-of-usb>.
- [77] Sound Girls: Monitor Engineer. [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://soundgirls.org/monitor-engineer/>.
- [78] MPEG-A: High Efficiency Coding and Media Delivery in Heterogeneous Environments. [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-h>.
- [79] MPEG-A: Interactive Music Application Format. [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-a/interactive-music-application-format>.
- [80] ISO/IEC FDIS 23000-19, Information technology – Multimedia application format (MPEG-A) – Part 19: Common media application format (CMAF) for segmented media. [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/79106.html>.
- [81] ISO/IEC 23090-2:2019, Information technology – Coded representation of immersive media – Part 2: Omnidirectional media format. [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/73310.html>.
- [82] MPEG-IoMT ISO/IEC 23093 Standards. [online]. [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-iomt>.

- [83] Introducing Media Things To The Internet Of Things. [online]. [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://mpeg.chiariglione.org/news/introducing-media-things-internet-things>.
- [84] MPEG-4: ISO Base Media File Format. [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-4/iso-base-media-file-format>.
- [85] The Music Ontology: FAQ. [online]. [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <http://musicontology.com/docs/faq.html>.
- [86] Network Time Protocol (NTP). [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.meinbergglobal.com/english/info/ntp.htm>.
- [87] Ohm Studio v2. [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.ohmstudio.com/version2>.
- [88] OhmStudio: Terms Of Use. [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.ohmstudio.com/doc/terms>.
- [89] Proposal for a standardized namespace within OSC. [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://github.com/fabb/SynOSCopy/wiki>.
- [90] What is the difference between OSC and MIDI? [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <http://opensoundcontrol.org/what-difference-between-osc-and-midi>.
- [91] Pioneer Pro Dj Link Setup Guide. [online]. [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <http://faq.pioneerdj.com/files/img/DRI1124C.pdf>.
- [92] reactIVision — a toolkit for tangible multi-touch surfaces. [online]. [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <http://reactivision.sourceforge.net/>.
- [93] Irisate: Real Time Collaboration Technology Roundup. [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://irisate.com/collaborative-editing-solutions-round-up/>.
- [94] Request for Comments: 3261; SIP: Session Initiation Protocol. [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc3261>.
- [95] Request for Comments: 4566; SDP: Session Description Protocol. [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc4566>.
- [96] Request for Comments: 6295; RTP Payload Format for MIDI. [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc6295>.
- [97] Roland:A-88MKII MIDI Keyboard Controller. [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.roland.com/global/products/a-88mk2/>.
- [98] Special Waves — The World's Most Versatile Modular Controller. [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://special-waves.com/>.
- [99] Telemidi. [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://telemidi.org/>.
- [100] TL-WR543G Datasheet. [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.tp-link.com/cz/support/download/tl-wr543g/>.

- [101] Roland — V-Drums Redefined: Ultimate Expression for Pro Performance and Studio Work. [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.roland.com/global/products/td-50kvx/>.
- [102] Cyber Metric Services: What is LAN, WAN, MAN, SAN, CAN, PAN and GAN? [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.cmscomputer.in/blog/what-is-lan-wan-man-san-can-pan-and-gan/>.

Seznam použitých zkratek

AoE Audio over Ethernet

API Application Programming Interface

BAN Body Area Network

BANN / BAN² Body Area NanoNetwork

BPM Beats per minute

CAN Campus Area Network

CD Compact Disc

CLK Clock

COM Communication port

CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

DAW Digital Audio Workstation

DIN Deutsches Institut für Normung

DMX Digital Multiplex Protocol

DYMO Dynamic Music Object

EHN elektronické hudební nástroje

FDDI Fiber Distributed Data Interface

FOAF Friend of a Friend

FTDI Future Technology Devices International

GAN Global Area Network

GDPR General Data Protection Regulation

IM AF Interactive Music Application Format

INFITEC Interference Filter Technology

IoMusT Internet of Musical Things

IoT Internet of Things

IoFT Internet of Flying Things

IoMT Internet of Media Things / Internet of Medical Things

IoMedT Internet of Medical Things

IoMusT Internet of Musical Things

IoST Internet of Space Things

IoUT Internet of Underwater Things

IoUGT Internet of Underground Things

IoV Internet of Vehicles

ISO International Organization for Standardization

ISO BMFF ISO–Base Media File

ISO/IEC International Organization for Standardization and the International Electrotechnical Commission

LAN Local Area Network

LED Light Emitting Diode

LTC Linear Timecode

MAC Media Access Control

MAN Metropolitan Access Network

MPDL Music Parameter Description Language

MHW Musical Haptic Wearables

MIDI Musical Instrument Digital Interface

MIDI Musical Instrument Digital Interface - Capability Inquiry

MIR Music Information Retrieval

MO The Music Ontology

MPEG Moving Picture Experts Group

MTC MIDI Timecode

NMP Networked Music Performance

NOMA Non-orthogonal multiple access

NTP Network Time Protocol

OSI Open Systems Interconnection

OSC Open Sound Control

PAN Personal Area Network

RAN Radio Access Network

RTC Real-time communication

RTP Real-time Transport Protocol

SD Secure Digital

SDP Session Description Protocol

SIP Session Initiation Protocol

SMI Smart Musical Instruments

TCP Transmission Control Protocol

TTL Transistor to transistor logic

TUIO Tangible User Interface Objects

UART Universal Asynchronous Receiver / Transmitter

UDP User Datagram Protocol

USB Universal Serial Bus

VoIP Voice over IP (Internet Protocol)

VR Virtual Reality

WAN Wide Area Network

WIDI Wireless MIDI

Wi-Fi Wireless Fidelity

WLAN Wireless Local Area Network

WoT Web of Things

XLR External Line Return

ZIPI Zeta Instrument Processor

Seznam příloh

- **Příloha A:** A_F-Tester_protocols.zip – Protokoly o průběhu testování zařízením F-Tester.

Názvy jednotlivých souborů podléhají následující názvové konvenci:

XXX_YY_Z_Flowping-*datum*-čas.zip

, kde:

- XXX – bezdrátový komunikační standard Wi-Fi routeru
 - * 11M – standard 802.11 b
 - * 54M – standard 802.11 g
- YY – velikost generovaných dat
 - * 56 – 56 bajtů
 - * 57 – 57 bajtů
 - * 58 – 58 bajtů
- Z – pořadí měření
 - * 1 – zahlcení 10 kbit/s
 - * 2 – zahlcení 200 kbit/s (pro 802.11 b) / 5 Mbit/s (pro 802.11 g)
 - * 3 – zahlcení 220 kbit/s (pro 802.11 b) / 10 Mbit/s (pro 802.11 g)
- *datum* – datum měření ve formátu YYYYMMDD
- *čas* – čas měření ve formátu HHMMSS

- **Příloha B:** B_figures.zip – Vygenerované grafy pro úlohu A1. Názvy jednotlivých souborů podléhají následující názvové konvenci:

XXX_YY_*typ*.png

, kde:

- XXX – bezdrátový komunikační standard Wi-Fi routeru
 - * 11M – standard 802.11 b
 - * 54M – standard 802.11 g
- YY – velikost generovaných dat
 - * 56 – 56 bajtů
 - * 57 – 57 bajtů
 - * 58 – 58 bajtů
- *typ* – typ grafu
 - * packets – časová osa se zakreslenými značkami odeslání paketů (modře), přijmutí paketu (červeně) a odeslání ztraceného paketu (černě) při různém zahlcení přenosové trasy pro daný bezdrátový standard
 - * jitter – vývoj jitteru mezi odeslanými a přijatými zprávami RTP-MIDI dané velikosti pro daný bezdrátový standard při různém zahlcení přenosového kanálu.

- **Příloha C:** C_matlab_A1.zip – vyhodnocovací skript programu MATLAB pro úlohu A1. Součástí archivu je i tabulka naměřených dat v souboru *01b_measurement.xlsx*.
- **Příloha D:** D_ESP32.zip – programy ve formátu *.ino* vytvořené v prostředí Arduino IDE pro vývojovou desku ESP32-WROOM-32 pro úlohy A1, A2 a A3.