

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

# Optická sonda pro distribuované snímání mechanických vibrací na velké vzdálenosti

$G_{\text{funk}}$   
Dokumentace

Příjemce účelové podpory:  
Zodpovědná osoba:  
Rok evidence výsledku:

Vysoké učení technické v Brně  
doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.  
2020

Brno 2023

1. **Dokument:** Dokumentace k výstupu projektu
2. **ID projektu:** VI20172020078
3. **Název projektu:** Systém pro centralizovaný dohled nad komplexními a rozlehlými objekty kritické infrastruktury státu
4. **Příjemce účelové podpory:** Vysoké učení technické v Brně,  
Antonínská 548/1, 601 90 Brno,  
Fakulta podnikatelská – Kolejní 2906/4, 612 00 Brno
5. **Trvání projektu:** 01.10.2017 – 30.04.2021
6. **Kontaktní osoba:** doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.  
tel: +420 541142227  
novotnyv@vutbr.cz

## OBSAH

Obsah.....	2
Úvod.....	3
1 popis výsledku.....	4
1.1 Specifikace.....	4
1.2 Základní charakteristika optické sondy .....	4
1.3 Struktura sondy.....	5
1.4 Funkční schéma sondy.....	6
1.5 Hardware sondy.....	7
1.6 Softwarová architektura sondy .....	7
2 Zařazení sondy do komplexního dohledového systému .....	14
3 Technické řešení.....	16
3.1 Konstrukce skříně a napájení.....	16
3.2 Návrh bloku zpracování optického signálu .....	18
3.3 Část zpracování elektrického signálu .....	19
3.4 Technické parametry sondy.....	20
4 Realizace sondy.....	22
5 Testování sondy a měření v terénu.....	23
5.1 Testování systému na perimetru č. 1 .....	23
5.2 Dohled nad perimetrem č. 2 .....	26
5.3 Měření, detekce, lokalizace a identifikace událostí .....	29
SHRNUTÍ.....	30
DALŠÍ VÝVOJ SYSTÉMU .....	31
ZVEŘEJNĚNÍ VÝSLEDKŮ .....	31

## ÚVOD

Kritická infrastruktura státu je soustava funkčních prvků nezbytných pro bezproblémový chod státu jako celku, a často se jedná o rozsáhlé objekty s délkou zóny zabezpečení od jednotek po stovky či dokonce tisíce kilometrů. V tomto rozsahu se již vyskytuje pouze několik typů, z nichž většina pro pokrytí dostatečné délky vyžaduje vysoký počet jednotek, což jednak zvyšuje cenu a na druhou stranu snižuje spolehlivost systému zabezpečení jako celku. Řešení existují v nadzemním provedení (mikrovlnné či infračervené závory, tenzometrická a vibrační čidla, aj.) a v zemním provedení, kam se řadí např. štěrbinové kabelové systémy, seismická čidla, tlaková čidla a také optovláknové systémy. Štěrbínové kabelové systémy vyžadují položení dvojice kabelů (vysílací a přijímací) a vyznačují se snadnou detekovatelností (vyzařují a jsou kovové) i nízkým dosahem v řádu několika stovek metrů. Posledně zmíněné jsou v současnosti středem zájmu mnoha firem i výzkumných institucí, a to z mnoha důvodů, kam lze zařadit využití optického vlákna jako lokálního, mnohabodového a především jako distribuovaného senzoru, možnost měření řady fyzikálních veličin (tah, teplota, ohyb, vibrace, apod.) podél vlákna, minimální nároky na další komponenty podél položeného vlákna, velký dosah senzoru v rozsahu desítek km, minimální šanci odhalit položené vlákno, je-li použito jako zemní senzor, odolnost vůči vnějšímu elektromagnetickému rušení, možnost využití vláken standardních telekomunikačních kabelů, aj. V zahraničí již řada firem prezentuje své výrobky – distribuované senzory využívající optická vlákna. Nejznámějším řešením je od firmy Optasense® jenž patří do skupiny QinetiQ a zaměřuje se na snímání akustických vibrací podél vlákna, založené na reflektometrickém principu. Toto řešení umožňuje s jednou sondou obsáhnout úsek o délce až 40 km s rozlišením 10 m. Její řešení jsou instalována již v desítkách zemí po světě včetně ČR, kde je hlavním distributorem firma Trade Fides, a.s. Další firmou je Silixa s řešením iDAS pracující na stejné bázi jako řešení Optasense a mající dosah až 50 km s rozlišením 1 m. Firma nabízí také distribuovaný senzor teploty. Své řešení má i švýcarská firma Omnisens, která vyrábí distribuovaný senzor teploty a tahu. Německá společnost PiMON nabízí řešení distribuovaného akustického senzoru PMS2500-vibrO s dosahem 25 km a rozlišením 15 m. Německá společnost LIOS Technology GmbH vyrábí distribuovaný senzor teploty. Společnost Inventec nabízí distribuovaný akustický senzor s dosahem 50 km a rozlišením jednotek metrů. Ruská společnost AVTOMATIKA navrhla systém SOKOL, který monitoruje trasu do vzdálenosti 100 km s přesností lokalizace 10m, avšak po úspěšných zkouškách byl systém prohlášen za strategický a smí se exportovat jenom se souhlasem nejvyšších státních orgánů. Hlavní nevýhodou výše uvedených systémů je vysoká cena, statisíce až 1mil. Kč/1 km trasy, složitá příprava pro konkrétní nasazení a nízká variabilita identifikace událostí. Výzkumem optovláknových senzorů se zabývá řada univerzit a výzkumných ústavů po celém světě. V České republice se zabývá výzkumem v oblasti senzorických vlastností optických vláken také řada institucí i firem, např. Safibra, s.r.o. (ODiSI - senzor teploty a mechanického napětí; FBG senzory; projekt GuardSense), PROFIconms s.r.o. (FBG senzory), AV ČR, VŠB TUO, ČVUT

v Praze, TU Liberec, UTB Zlín, a v neposlední řadě i Vysoké učení technické v Brně. Důvodem našeho výzkumu a vývoje funkčního vzorku s názvem „Optická sonda pro distribuované snímání mechanických vibrací na velké vzdálenosti“ bylo vyvinout zařízení s co největším dosahem, včetně ostatních komponentů pro zajištění dohledu nad rozsáhlými oblastmi.

## 1 POPIS VÝSLEDKU

### 1.1 SPECIFIKACE

#### Název

Optická sonda pro distribuované snímání mechanických vibrací na velké vzdálenosti

#### Autoři

doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.

prof. Ing. Aleš Prokeš, Ph.D.

doc. Ing. Petr Sysel, Ph.D.

Ing. Jiří Přinosil, Ph.D.

Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

Ing. František John

#### Klíčová slova

optické vlákno, rozprostřený senzor, mechanické vibrace,  $\Phi$ -OTDR

#### Anotace

Optická sonda pro distribuované snímání mechanických vibrací na velké vzdálenosti je funkční vzorek distribuovaného optovláknového senzoru využívajícího principu snímání a zpracování Rayleigha zpětného rozptylu, a to současně ze dvou senzorických jednovláknových optických vláken. Jedinečnou vlastností je dlouhý dosah senzoru (přes 200 km) senzorické jednotky, jež je kromě jiného podpořen implementací distribuovaného způsobu zesilování optického signálu. Sonda je jednou ze součástí navrženého komplexního dohledového systému, ve kterém je možné jich nasadit více pro pokrytí rozsáhlých oblastí, a výstupy centralizovaně vyhodnocovat.

### 1.2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA OPTICKÉ SONDY

Optická sonda pro distribuované snímání mechanických vibrací na velké vzdálenosti je optovláknová senzorická jednotka ve formě funkčního vzorku vlastního návrhu využívajícího snímání a zpracování Rayleigha zpětného rozptylu současně ze dvou senzorických jednovláknových optických vláken v maximální celkové délce přesahující 200 km. Jedná se o

jeden z hlavních výstupů řešení projektu s názvem „Systém pro centralizovaný dohled nad komplexními a rozlehlými objekty kritické infrastruktury státu“ pod označením VI20172020078 získaného v rámci výzvy „Program bezpečnostního výzkumu České republiky 2015-2020 (BV III/1-VS)“ Ministerstva vnitra České republiky a řešeného v letech 2017-2021. Sonda byla navržena pro funkci současné vícečetné detekce, lokalizace a klasifikace zdrojů mechanických vibrací v reálném čase. Funkční vzorek představuje původní návrh a konstrukci sensorické jednotky (sondy), jež je součástí návrhu komplexního sensorického systému snímající a vyhodnocující výskyt mechanických vibrací podél sensorických tras představovaných pokládkou optických kabelů s jednovidovými optickými vlákny. Sensorický systém je navržen pro dohled i nad značně rozsáhlými oblastmi (tisíce kilometrů), v rámci něhož je použito více sond, které dohledují dílčí části a které zasílají informace o výskytu událostí do dohledového centra. Sondy i vlastní měření lze z řídicího centra konfigurovat a ovládat. Systém umožňuje zasílat výsledky i do dohledových systémů třetích stran k dalšímu vyhodnocení.

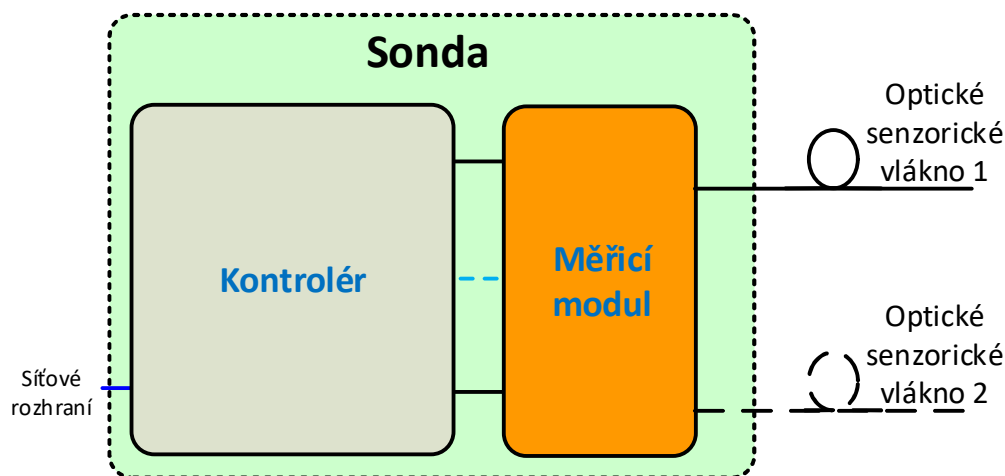
Vytvořený funkční vzorek sondy má formu přenositelného zařízení umožňující nasazení v terénu a zahrnuje jak potřebné optické prvky (především úzkopásmový laser, optický zesilovač a modulátor) pro generování měřicích signálů i prvky pro zpracování přijatého signálu (optoelektrický převodník, zesilovač), elektrické zesilovače, filtry, směšovač, apod.), takže je možné sondu přímo připojit k sensorickému optickému vláknu bez potřeby dalšího vybavení. Předností je značný dosah, v případě uložení do země neodhalitelnost senzoru a nevyžadování dodávky elektrické energie podél sensorické trasy. Dlouhý dosah (více než 200 km) je podpořen implementací distribuovaného způsobu zesilování optického signálu na sensorických vláknech.

Využití systému lze nalézt v různých oblastech civilního i bezpečnostního charakteru, jako jsou monitoring liniových staveb (železnice, produktovody – ropovody, plynovody, vodovody, rozvody el. energie), hraničních linií (např. státní hranice) či dohled nad perimetry rozsáhlých objektů, jako jsou sklady či zdroje strategických produktů (zásobárny pitné vody, zásobníky plynu, sklady zbraní, aj.), letiště nebo objekty představující klíčové uzly rozvodů médií či elektrické energie, kritické uzly elektronické komunikace, datové sklady a další. Schopnosti sondy byly ověřeny nasazením na dvou testovacích polygonech u zájemců o technologii. Pro tyto zájemce byly vypracovány zprávy o průběhu testování a dosažených výsledcích.

### 1.3 STRUKTURA SONDY

Optickou sondu pro distribuované snímání mechanických vibrací na velké vzdálenosti (dále jen sonda) tvoří dvě části, viz obr. 1.1, a to:

- ***Měřicí modul*** a
- ***Kontrolér***.



**Obr. 1.1: Základní bloková struktura dvouvláknové senzorní jednotky**

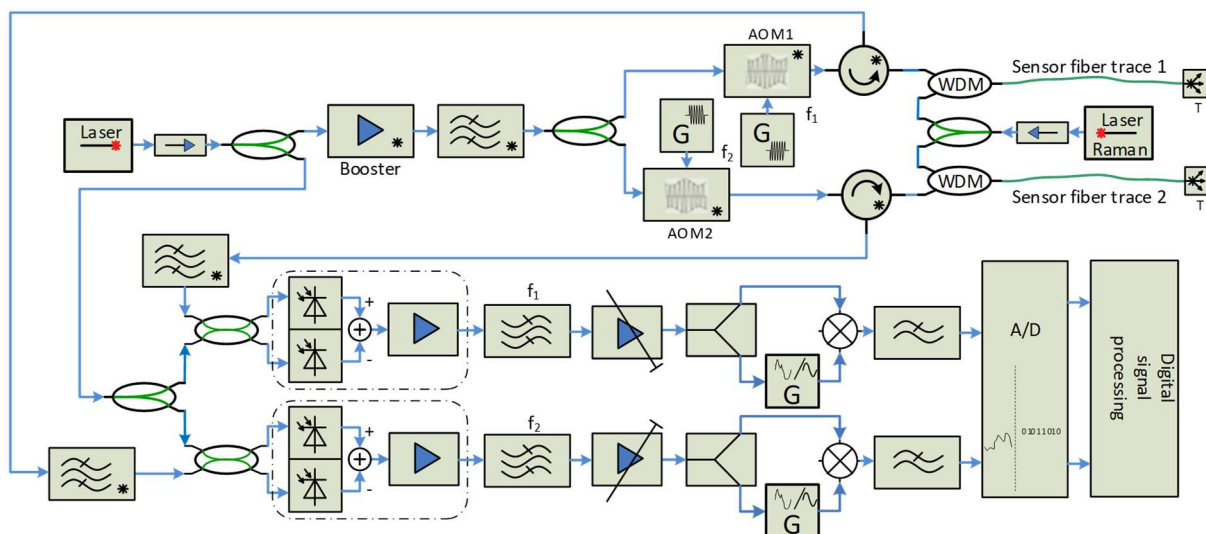
**Měřicí modul** generuje měřicí signály, přijímá odezvu senzorních prvků (optických vláken), kterou upravuje do podoby vhodné pro následnou digitalizaci a zpracování.

**Kontrolér** ovládá měřicí modul, řídí proces měření, digitalizuje odezvu senzorů, zpracovává zdigitalizovaný signál pro účely detekce, lokalizace a klasifikace událostí a komunikuje s dalšími částmi dohledového systému.

## 1.4 FUNKČNÍ SCHÉMA SONDY

Funkční schéma, viz obr. 1.2, tvoří tři hlavní části:

- **optický blok** – generuje optické měřicí signály a přijímá optickou odezvu ze senzoru. Je tvořený laserem výkonovým optickým zesilovačem, akustooptickými modulátory, cirkulátory, ramanovským zesilovačem, optickými filtry, optickými vazebními členy a balančními fotodektory.
- **elektrický blok** – převádí optický signál na elektrický a upravuje jej do formy vhodné pro digitální zpracování. Blok sestává z elektrických zesilovačů, filtrů, směšovačů a A/D převodníků.
- **blok digitálního zpracování** – upravuje zdigitalizovaný signál (filtrace), realizuje detekci, lokalizaci, případně i identifikaci jevů snímaných senzorem. Zasílá výsledky pro zobrazení a další zpracování v dohledovém centru.



Obr. 1.2: Funkční schéma sondy (senzoričké jednotky)

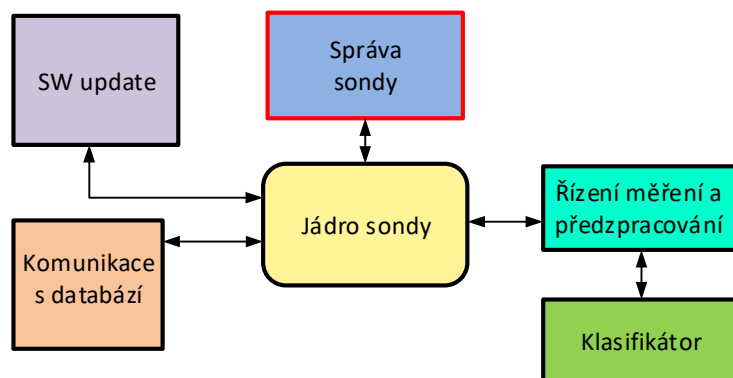
## 1.5 HARDWARE SONDY

Po hardwarové stránce sonda sestává z následujících částí:

- **Kontrolér** (do 19“ racku) obsahuje moduly:
  - Výkonný počítač (min 32 GB RAM, min 8 procesorových jader, podpora NVMe SSD disků, min 2 PCIe sloty),
  - A/D karta, 4 kanály
  - D/A karta, 4 kanály
  - Síťové rozhraní 10GE
- **Měřicí modul** obsahuje moduly:
  - Přístrojová skříň – šasi pro umístění funkčních komponentů, napájení a chlazení.
  - Optický blok – prvky generování a zpracování optického signálu,
  - Elektrický blok – prvky pro zpracování elektrického signálu.

## 1.6 SOFTWAREVÁ ARCHITEKTURA SONDY

Programové vybavení (software) je provozováno na kontroléru sondy. Základní moduly software sondy jsou uvedeny na obr. 1.3.

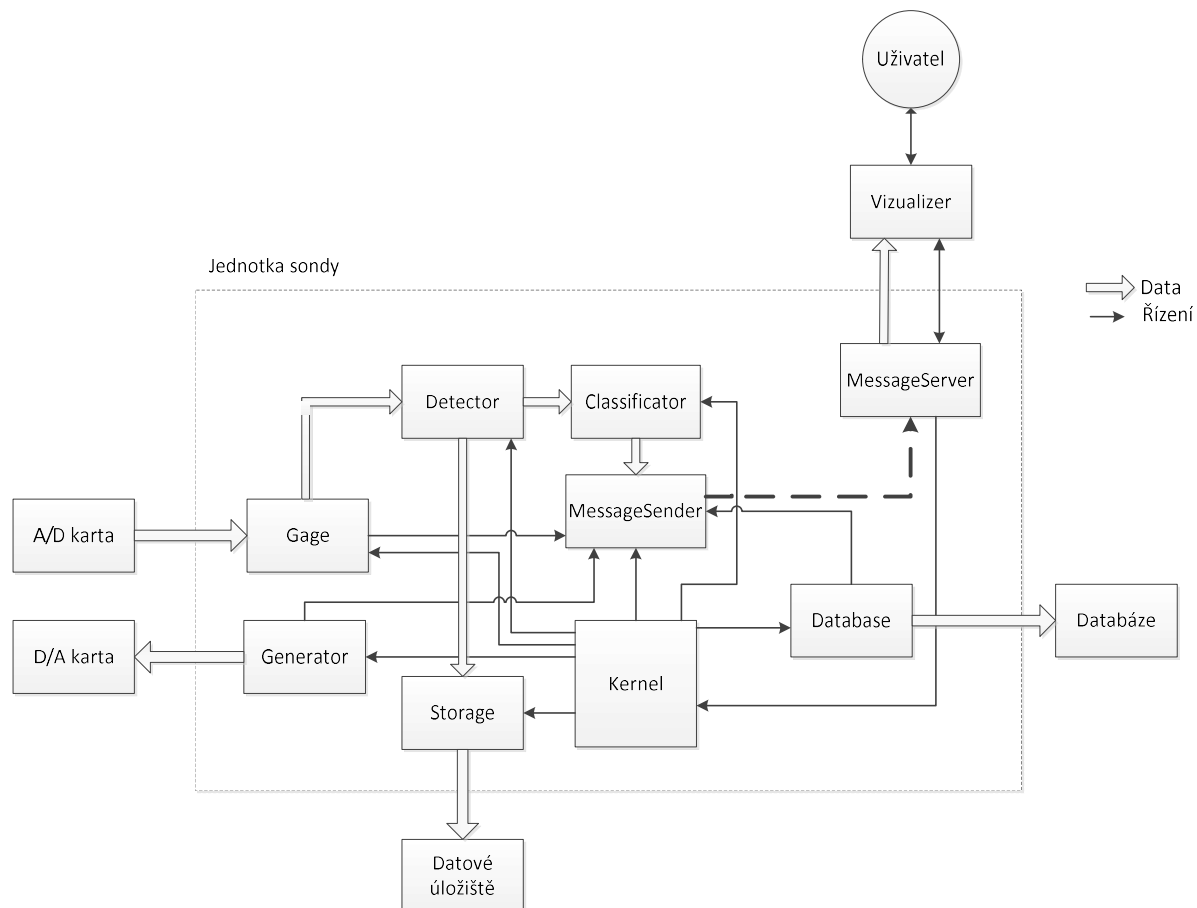


**Obr. 1.3: Softwarová architektura sondy**

- **Jádro sondy** – hlavní modul zajišťující součinnost běhu dalších částí a řešící komunikaci mezi dalšími moduly
- **Řízení měření a předzpracování** – spuštění/ukončení měření, generování ovládacích signálů, digitální předzpracování signálů ze senzoru, detekce a lokalizace událostí.
- **Klasifikátor** – identifikace zdrojů generujících události ve formě mechanických vibrací,
- **Komunikace s databází** – zasílání výsledků měření, stahování konfiguračních dat, zasílání stavových informací.
- **Správa sondy** – inicializace dalších softwarových částí, hardwaru (laser, optické zesilovače, AWG, DAQ)
- **SW update** – aktualizace sw modulů.



Podrobnější schéma softwarové architektury takto upravené jednotky sondy je zobrazena na obr. 2.5.



**Obr. 1.4: Modifikovaná SW architektura jednotky sondy.**

Byla navržena samostatná aplikace *Vizualizer*, kterou je možné spustit na nezávislém stroji a která komunikuje se softwarem jednotky sondy pomocí přenosu dat po síti. Komunikace probíhá prostřednictvím spolehlivého protokolu TCP. Pro komunikaci byl využit stávající modul *MessageSender*, který původně zprostředkoval vazbu jednotlivých modulů na hlavní řídicí modul *Kernel*. Z toho modulu zůstala zachována část, která přijímá data od jednotlivých modulů v jejich programovém vlákne a odesílá je na lokální smyčku prostřednictvím protokolu TCP. Zatímco druhá část obstarávající čtení dat a jejich předání modulu *Kernel* byla odstraněna. Výhodou tohoto uspořádání je, že nebylo nutné zasahovat do ostatních modulů, protože jejich vazba na modul *MessageSender* zůstala zachována beze změny. Na druhé straně bylo potřeba vytvořit nový modul, který by zachycená data předával jednak hlavnímu modulu *Kernel* a také nově vzniklé aplikaci *Vizualizer*. Tento modul se nazývá *MessageServer* a jeho úkolem je vytvoření TCP serveru na definovaném portu, který umožní připojení neomezeného počtu klientů. Každý registrovaný klient má právo na server zasílat zprávy v definovaném formátu a server zajistí, že tyto zprávy budou rozeslány všem registrovaným klientům. Jedná se v podstatě

o období chatovacího serveru. Modul *MessageSender* se tak v rámci softwaru jednotky sondy chová jako jeden z klientů, který je ihned při spuštění serveru zaregistrován, tak aby ostatní moduly mohly komunikovat s modulem *Kernel*. Jelikož modul *Kernel* může generovat vlastní zprávy (většinou stavové a chybové zprávy), byla rovněž vytvořena vazba tohoto modulu na modul *MessageSender* s možností zasílání zpráv.

Vytvořená aplikace s grafickým uživatelským rozhraním *Vizualizer* se pak k jednotce sondy připojuje ve formě klienta pomocí vlastní modifikace modulu *MessageSender*, kde kromě části pro zápis zpráv byla realizována i část pro jejich čtení, která běží v nezávislém programovém vlákne a umožňuje tak svižnou reakci ovládacích prvků samotného rozhraní. Mezi další výhody tohoto uspořádání patří:

- Bezproblémové připojení více uživatelů k jedné jednotce sondy, kdy ji je možné ovládat z různých míst bez nutnosti odpojení stávajících uživatelů.
- V rámci jedné instance aplikace *Vizualizer* je možné ovládat a získávat dat z libovolné aktivní jednotky sondy, kdy stačí zadat její IP adresu a port, na kterém je spuštěn modul *MessageServer*.
- Snížení výpočetní zátěže v rámci softwaru jednotky sondy.

Další úpravou softwaru pro řízení jednotky sondy pak byla realizace zpracování dat z více kanálů A/D jednotky, kdy tato data jsou ukládána prokládaně, tj. vzorek 1. kanálu, vzorek 2. kanálu, vzorek 1. kanálu atd. Vedle zpracování těchto dat tak bylo nutné řešit změny v rámci ukládání dat (modul *Storage*) a jejich vizualizace (původně modul *GUI*, nyní samostatná aplikace *Vizualizer*). Při vizualizaci dat bylo možné postupovat dvojím způsobem:

- a) V rámci vizualizačního SW mít volbu, který kanál bude zobrazen.
- b) Vytvořit více oken, kde v rámci každého okna bude zobrazen jeden datový kanál.

Jelikož maximální počet použitých kanálů je 4, jeví se s ohledem na nutný počet monitorů (ideálně jeden monitor – jeden kanál) varianta b) jako méně přehledná. Avšak existuje speciální případ, kdy ve dvou kanálech bude zaznamenávána stejná optická trasa, avšak na vstupu bude mít laserový paprsek s opačnou polarizací. V tomto případě je naopak výhodné mít zobrazeny oba kanály současně. V rámci těchto úvah tak byl navržen přístup, kdy v případě, že není využit systém s polarizační diverzitou, je zobrazován pouze jeden vybraný kanál, přičemž mezi kanály lze přepínat. V opačném případě je vytvořeno jednot pomocné okno, ve kterém jsou zobrazena data z kanálu s opačnou polarizací. Jelikož oba zobrazované kanály zaznamenávají stejnou optickou trasu, je důležité dodržet synchronizaci ve změně zobrazení (zoom, posun, zesílení úrovně signálu, a podobně). Z toho důvodu lze změnu zobrazení aplikovat pouze v rámci hlavního okna s tím, že okno pomocné se těmto změnám vždy přizpůsobí.

Jelikož modul *MessageServer* odesílá všechny aktivní datové kanály všem registrovaným klientům, je tak možné v rámci různých instancí aplikace *Vizualizer* mít zobrazeny různé kanály, dle potřeb uživatele.

Při používání software v reálných podmínkách se potvrdila funkčnost původního návrhu a implementace jednotlivých modulů a byly získány cenné zkušenosti s praktickým používáním softwaru. Přitom bylo nalezeno několik omezení nebo drobných chyb, které sice neměly vliv na funkčnost, ale mírně zhoršovaly přehlednost, možnosti dalšího rozšiřování programu, intuitivnost ovládání nebo praktické používání. Byla tedy provedena revize a úpravy zdrojových kódů jednotlivých modulů.

Mezi hlavní úpravy patří i doplnění několika zcela nových modulů, což vedlo k zpřehlednění kódu a hlavně zjednodušení dalšího rozšiřování programu. Mezi tyto moduly patří:

- `Module` – SW modul tvořící společný základ všech ostatních modulů vyžadujících spuštění samostatného vlákna.
- `Frame` – SW modul pro předávání rámců signálu mezi jednotlivými moduly.
- `Event` – SW modul pro předávání informací o událostech mezi jednotlivými moduly.
- `Conduit` – SW modul pro ucelené rozhraní k hardwaru sondy.

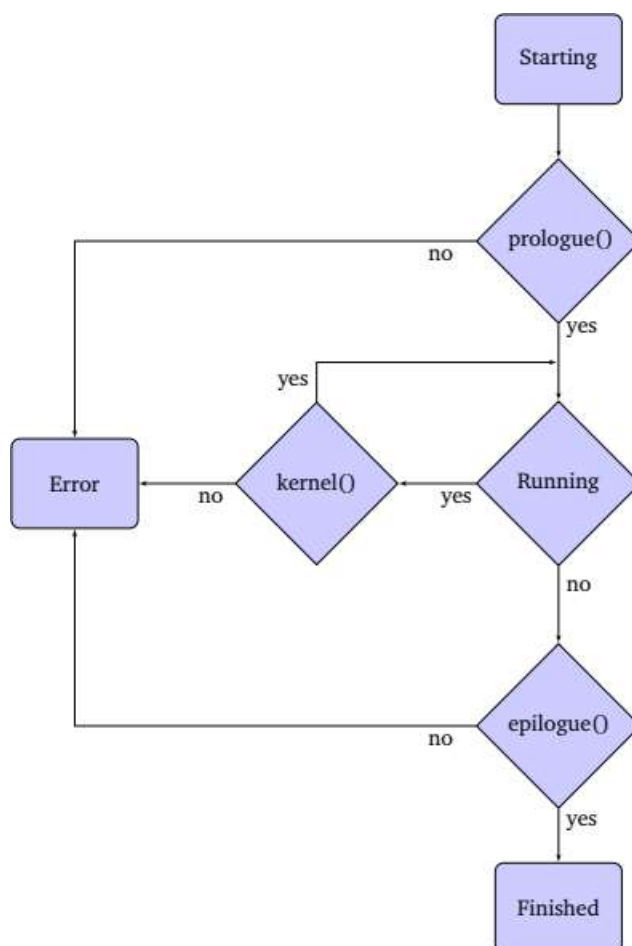
Původní moduly (např. `Detector`, `Storage`, apod.) často obsahovaly části kódu realizující podobné činnosti – spuštění samostatného vlákna, zastavení samostatného vlákna, kontrolu stavu vlákna, ukončení, atd. Proto byla implementována abstraktní třída `CModule`, která všechny tyto úkoly řeší jednotně a zároveň umožňuje přizpůsobení konkrétním činnostem. Třída např. obsahuje veřejnou řetězcovou konstantu `const std::string name`, která se inicializuje v konstruktoru a odvozené třídy tak mohou změnit název modulu podle příslušné činnosti (`detector`, `storage`, apod.). Stejný řetězec se automaticky používá při chybových hlášeních nebo pro pojmenování samostatného vlákna modulu, což usnadňuje orientaci při ladění programu (před tím byla všechna vlákna pojmenována stejně jako celý program).

Pro uchování aktuálního stavu modulu byl definován výčetový typ:

```
enum State {  
    Finished, // výchozí stav při inicializaci nebo po ukončení samostatného vlákna,  
    Starting, // zahájení činnosti a čekání na spuštění samostatného vlákna  
    Running, // modul provádí svoji činnost v samostatném vláknu  
    Stopping, // ukončování činnosti a čekání na ukončení samostatného vlákna  
    Error, // kdykoliv během činnosti modulu došlo k chybě  
};
```

Aby bylo možné odvozené třídy přizpůsobit konkrétním činnostem, je činnost modulu navržena univerzálně. Během volání členské funkce `startProcessing()` je stav modulu změněn na `Starting` a vytvořeno nové samostatné vlákno, které začne zpracovávat funkci virtuálního

operátoru `void operator() (void)`, jehož zjednodušený vývojový diagram je na obr. 1.5. Jako první je volána chráněná virtuální funkce `bool prologue()`, která má za úkol inicializovat vlákno a teprve po úspěšné inicializaci je stav modulu změněn na `Running`. V následujícím cyklu je opakovaně volána virtuální chráněná funkce `bool kernel()` dokud je stav modulu nastaven na `Running`. Během volání funkce `stopProcessing()` je stav nastaven na `Stopping`, což ukončí cyklus. Poté je volána virtuální chráněná funkce `bool epilogue()`, která má za úkol připravit vlákno na ukončení. Po úspěšném návratu z funkce je stav modulu nastaven na `Finished` a samostatné vlákno je ukončeno. V případě, že některá z uvedených funkcí skončí chybou, je stav modulu nastaven na `Error` a vlákno je rovněž ukončeno. Navržená struktura umožňuje pouhou změnou implementace virtuálních funkcí `prologue()`, `kernel()`, `epilogue()` zcela změnit prováděné činnosti při zachování jednoduchého spuštění, zastavení nebo kontroly spuštění.



**Obr. 1.5: Zjednodušený vývojový diagram samostatného vlákna modulu**

Podobně většina modulů buď přijímá rámce signálu od jiných modulů, nebo posílá zpracované rámce jiným modulům. Např. modul `Storage` přijímá rámce signálu z akviziční karty a podle

nastavení je ukládá do souboru. Rámce signálu z akviziční karty ale přijímá také modul `Detector`, který navíc zpracované rámce posílá modulu pro vykreslování. Při rozšiřování programu o další a další moduly narůstala složitost kontroly, zda rámec již zpracovaly všechny příslušné moduly a je možné ho uvolnit (nebo naplnit novými daty) nebo jeho obsah některé moduly ještě vyžadují.

Proto bylo navrženo, že při předávání bude využit sdílený ukazatel `std::shared_ptr`, který automaticky počítá počet odkazů a paměť uvolní až v případě nulového počtu odkazů. Odladění správného předávání se ukázalo jako ne zcela jednoduché, neboť po alokaci paměti potřebné pro rámec se nesmí k paměti přistupovat standardním přímým odkazem (ale výhradně a pouze přes sdílený ukazatel), protože v tom případě počítání odkazů nefunguje správně a může dojít k přístupu k již uvolněné paměti. Ale nakonec byl úspěšně implementován modul `Frame`, který se skládá v podstatě ze dvou tříd: zdroje `CSource`, který implementuje odesílání rámců, a spotřebiče `CSink`, který implementuje přijímání rámců.

Implementovanou třídu spotřebiče `CSink` tvoří především fronta (`queue`) sdílených ukazatelů na rámce. Nový sdílený ukazatel na rámec lze do fronty přidat veřejnou členskou funkcí `void send( const std::shared_ptr< > )`, přičemž se automaticky zvýší počet odkazů sdíleného ukazatele. Naopak ukazatel na nejstarší rámec lze vyzvednout (odstranit) z fronty členskou funkcí `std::shared_ptr< > recv()`, přičemž se automaticky sníží počet odkazů sdíleného ukazatele. Tím je zajištěno, že nedojde k uvolnění rámce dříve, než bude odstraněn z fronty všech spotřebičů.

Druhá implementovaná třída zdroje `CSource` tvoří především seznam (`list`) připojených spotřebičů, do/ze kterého se registrují/odregistrují jednotlivé spotřebiče zmíněnou funkcí `reset`. Odeslání nového rámce se provede voláním členské funkce `void send( const std::shared_ptr< > )`, která se vstupním parametrem volá funkci `send` všech spotřebičů `CSink` registrovaných v seznamu. Velkou výhodou zvolené implementace je, že registraci nebo odregistraci je možné provádět kdykoliv. Takže spotřebiče (moduly `Detector`, `Storage`, apod.) se mohou spouštět nebo zastavovat i v průběhu měření.

Jak je patrné z popisu, pro třídy `CSource` a `CSink` není vůbec důležitý datový typ, na který přenášený sdílený ukazatel ukazuje. Po úspěšném odladění modulu `Frame` tak byl vytvořen modul `Event`, který funguje obdobně, ale mezi zdrojem a spotřebičem se přenáší struktury informací o detekovaných událostech.

Dalším nově implementovaným modulem je modul `Conduit`, který tvoří ucelené rozhraní k měřenému vláknu, hardwaru sondy, atd. V původní implementaci moduly komunikovaly s modulem `Generator`, který ovládal D/A kartu pro generování řídicích signálů, a s modulem `Gage`, který ovládal A/D kartu snímající měřený signál, přímo. To by v případě výměny karty

nebo ovladačů znamenalo upravit všechny moduly. Proto byl nad oběma moduly implementován zmíněný modul *Conduit* implementující abstraktní rozhraní nezávislé na výrobci a ovladači karet. Dále zajišťuje nejrůznější přepočty zpoždění na délku vlákna, vzdálenost na vlákne na počet vzorků apod, které ostatní moduly potřebují a které přitom závisí na parametrech vlákna (index lomu, rychlost šíření). Díky této centralizaci jsou ostatní moduly nezávislé na použitém vláknu.

## 2 ZAŘAZENÍ SONDY DO KOMPLEXNÍHO DOHLEDOVÉHO SYSTÉMU

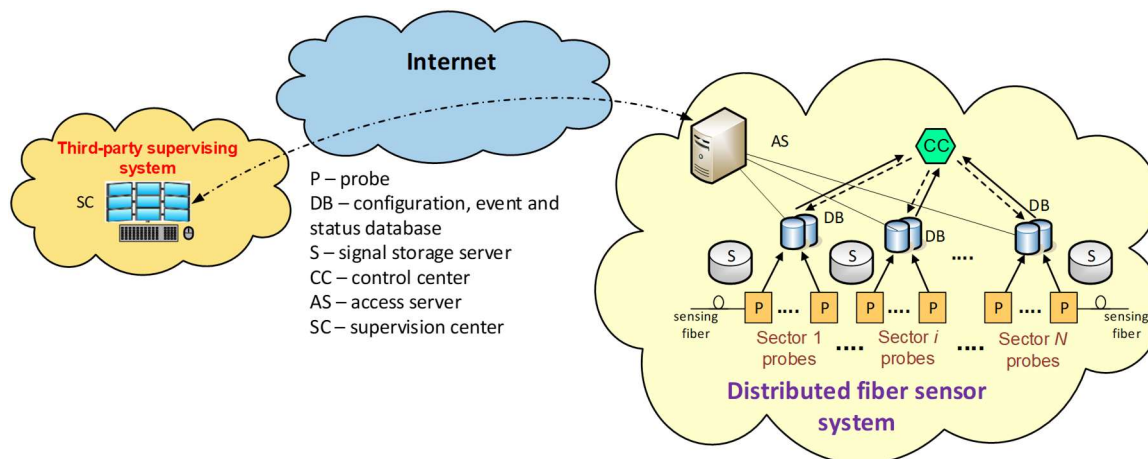
Navržený dohledový systém, jehož je sonda součástí, představuje hierarchicky uspořádaný, škálovatelný distribuovaný sensorický systém pro snímání mechanických vibrací. Vyznačuje se modulární architekturou a kontinuálním dosahem sensorického prvku od stovek metrů, přes desítky kilometrů až přes 200 kilometrů za použití jedné sensorické jednotky, tzv. „*Sondy*“, s možností zařazení více takovýchto sond do systému a adekvátním navýšením dosahu až na jednotky tisíců km.

Senzorický systém, viz obr. 2.1, v základu sestává z následujících funkčních prvků:

- **Optická sensorická trasa (sensing fiber trace)** – sensorickým prvkem trasy je optické vlákno, jedná se o pasivní prvek systému představovaný jednovidovým telekomunikačním optickým vláknem, na nějž působí různé vlivy z okolí jeho uložení – mechanické vibrace, tlak, teplota, záření, chemikálie, apod.
- **Sonda (P - Probe)** – aktivní prvek představující základní uzel systému napojený jednak na sensorický prvek a jednak do datové sítě, a sloužící k vlastní realizaci činností se snímáním jevů v okolí sensorického prvku, zpracováním informací a předáváním výsledků do dalších částí systémů přes datové komunikační rozhraní. Jedna sonda může obecně obsluhovat jeden či více sensorických prvků, tj. optických vláken.
- **Informační systém / Databáze (DB - Database)** – centrální informační uzel uchovávající informace pro činnost celého systému a informace o zjištěných událostech ve sledované oblasti.
- **Místní řídicí centrum (CC – Control Center)** – uzel sloužící k dohledu nad úseky pokryté sondami s optickými vlákny, ke konfiguraci vlastních měření a sledování stavových informací sond a databází
- **Přístupový server (AS – Access Server)** – uzel pro bezpečný přístup k informačním databázím optovláknového sensorického systému ze strany nadřazeného systému dohledu.
- **Úložiště naměřených dat (S – Storage)** – uzel sloužící k ukládání originálních, i částečně zpracovaných nebo zkomprimovaných dat. V řadě případů, hlavně v již zaběhnuté fázi nasazení se jedná o postradatelný prvek, který má uplatnění především ve fázích vývoje systému a adaptace systému na nové podmínky nasazení.

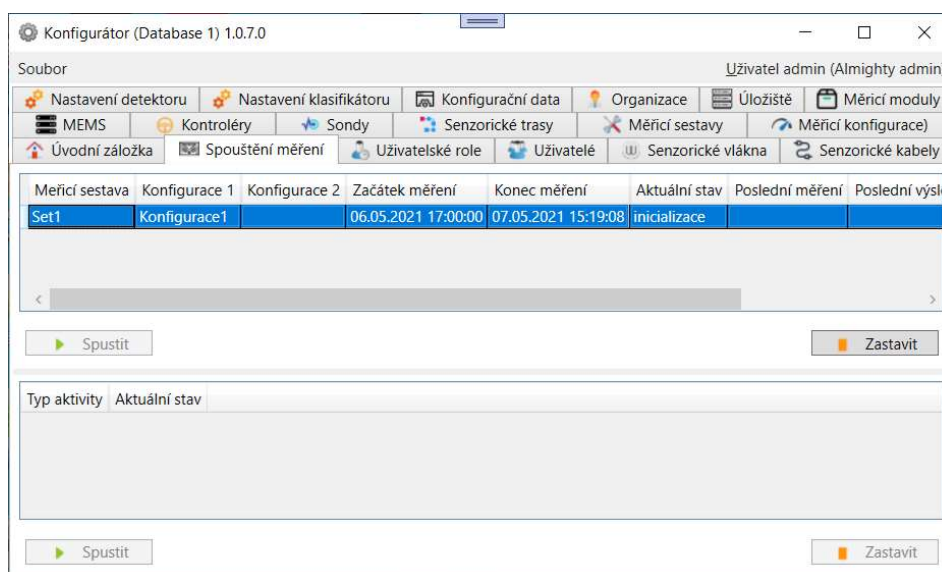


Architekturu celého hierarchického systému s možností napojení na dohledový systém třetích stran zachycuje obr. 2.1.

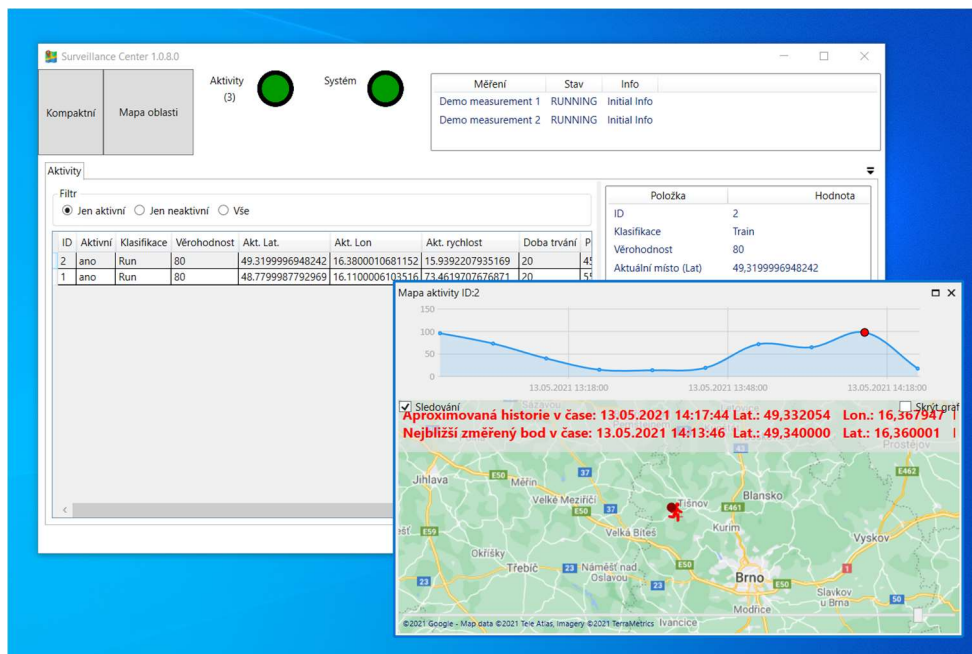


**Obr. 2.1: Architektura navrhovaného měřicího systému**

Sondy realizují vlastní sledování dění povahy mechanických vibrací v okolí pokládky sensorického prvku. Sondy provádějí i hlavní díl zpracování naměřených dat. Sondy komunikují s centrálními informačními uzly DB, které směrem k sondám poskytují konfigurační údaje pro vlastní měření (viz obr. 2.2). Do DB v opačném směru Sondy posílají výsledky zpracování naměřených dat. Výsledky pak mohou být zobrazovány buď lokálním řídicím uzlem CC (viz obr. 2.3) či mohou být odebírány přes přístupový server AS nadřazeným dohledovým systémem SC (viz obr. 2.1 levá část).



**Obr. 2.2: Aplikace pro konfiguraci databáze**



**Obr. 2.3: Aplikace dohledové centrum (CC)**

Dále pak lze vytvářet další aplikačně vázané výstupy, jako je například rychlostní profil pohybu zdroje vibrací, jak ukazuje obr. 2.4.



**Obr. 2.4: Rychlostní profil pohybujícího se zdroje vibrací**

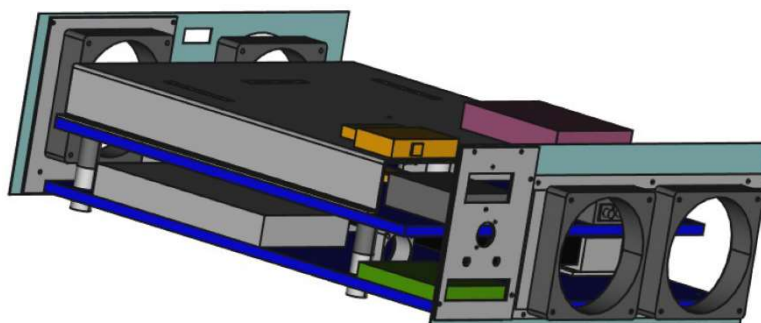
## 3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ

### 3.1 KONSTRUKCE SKŘÍŇE A NAPÁJENÍ

Základem pro konstrukci skříně pro měřicí modul se stala standardizovaná nakoupená racková skříň (rozměr 19“), u níž byly vyměněny přední a zadní panel a dodělaný vnitřní konstrukce pro upevnění součástek vláknové optiky a elektroniky. Skříň je opatřena lyžinami pro upevnění do rackové skříně.



Přehled vnitřního uspořádání je patrný z rozkladu modelu skříně a pohledu do sestavy skříně v částečně odkrytém modelu bez vnějších plechů na obr. 3.1. Chlazení zajišťují čtyři mohutné ventilátory umístěné po dvou na předním a zadním panelu, které profukují vzduch skrz vnitřní konstrukci a chladí obě platformy. Kromě toho přední a zadní panel obsahuje základní ovládací a signalizační prvky a konektory.

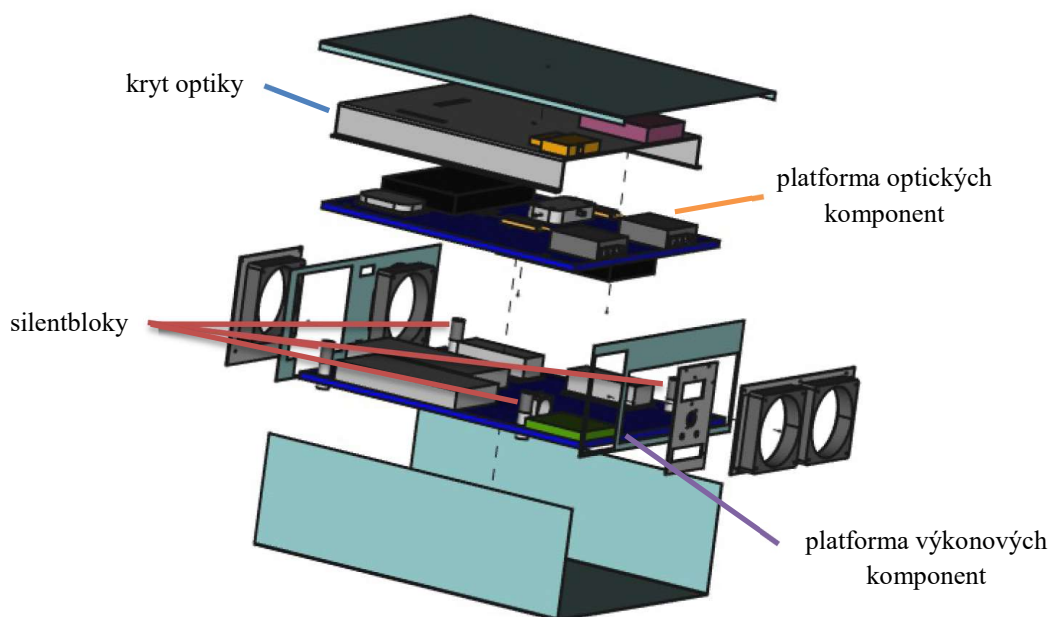


**Obr. 3.1: Model vnitřního uspořádání jednotky**

Hlavní část vnitřní konstrukce představují dvě hliníkové desky tloušťky 10 mm (platformy) sloužící pro upevnění prvků vláknové optiky a elektroniky (na obr. 3.2 vybarveny modře). Tyto desky slouží zároveň jako chladiče a mají také další funkci – díky své hmotnosti a uložení na silentblocích (viz oranžové úsečky na obr. 3.2) fungují jako tlumiče vibrací. Díky tomu prvky optické soustavy nejsou těmito vibracemi ovlivňovány a vibrační šum prostředí, kde je sonda umístěna, minimálně zkresluje měření. Z podobného důvodu je optická soustava před proudem vzduchu chráněna horním krytem optiky (modrá úsečka v obr. 3.2), který zároveň slouží pro umístění elektroniky zpracování.

Na dolní platformu označené PWR jsou namontovány prvky výkonové elektroniky (zdroje/měniče elektrické energie a budiče akustooptických modulátorů AOM). Měniče generují stejnosměrná napětí 24 V, 12 V, 5 V a 3,3 V o potřebných výkonech pro napájení jednotlivých částí jednotky. Tato platforma je největší a nese největší mechanickou a tepelnou zátěž.

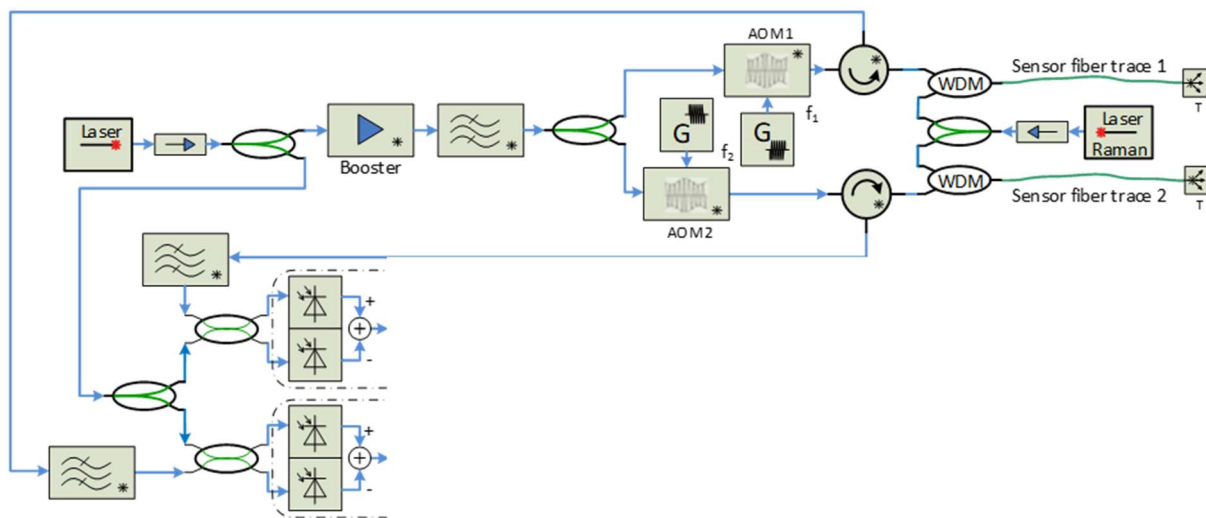
Na horní platformě je namontována celá optická soustava sondy (akusto-optické modulátory, EDFA - optický výkonový booster, EDFA - optický předzesilovač, ramanovský zesilovač, držáky množství optických spojek (cca 50ks), pasivní prvky optické soustavy uložené ve speciálně námi navržených kazetách pro válečky optických pasivních prvků a pro rezervy optických vláken. Kazety byly navrženy a vytištěny na 3D tiskárně.



Obr. 3.2: Rozložený 3D model vnitřního uspořádání

### 3.2 NÁVRH BLOKU ZPRACOVÁNÍ OPTICKÉHO SIGNÁLU

Schéma bloku zpracování optického signálu je zachyceno na obr. 3.1, a sestává z vysílací a přijímací části. Vysílací část tvoří zdroj optického signálu – laser, dále optický výkonový zesilovač – booster následovaný optickým filtrem a děličem optického výkonu. Jsou tak vytvořeny dvě větve, z nichž každá obsahuje akustooptický modulátor, cirkulátor a WDM coupler, za nímž následuje senzorické optické vlákno. Do WDM (Wavelength Division Multiplexer) coupleru vstupuje i čerpací signál ramanovské pumpy.

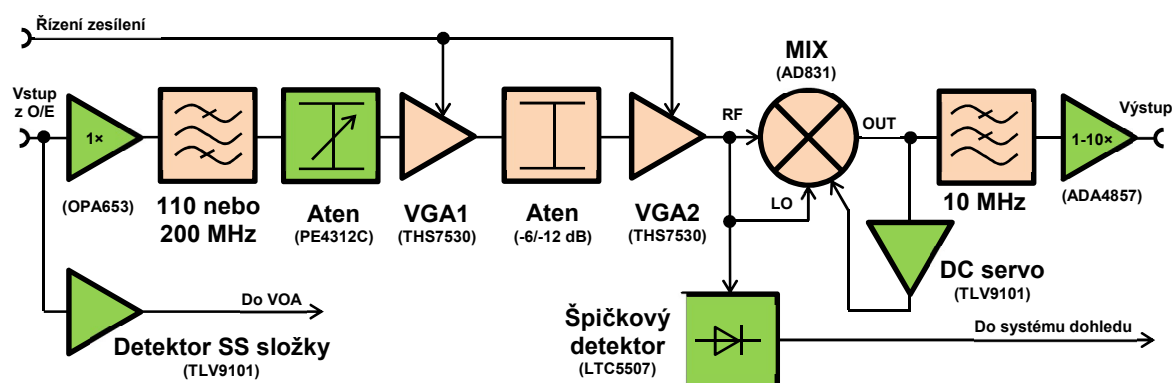


Obr. 3.1: Schéma bloku zpracování optického signálu

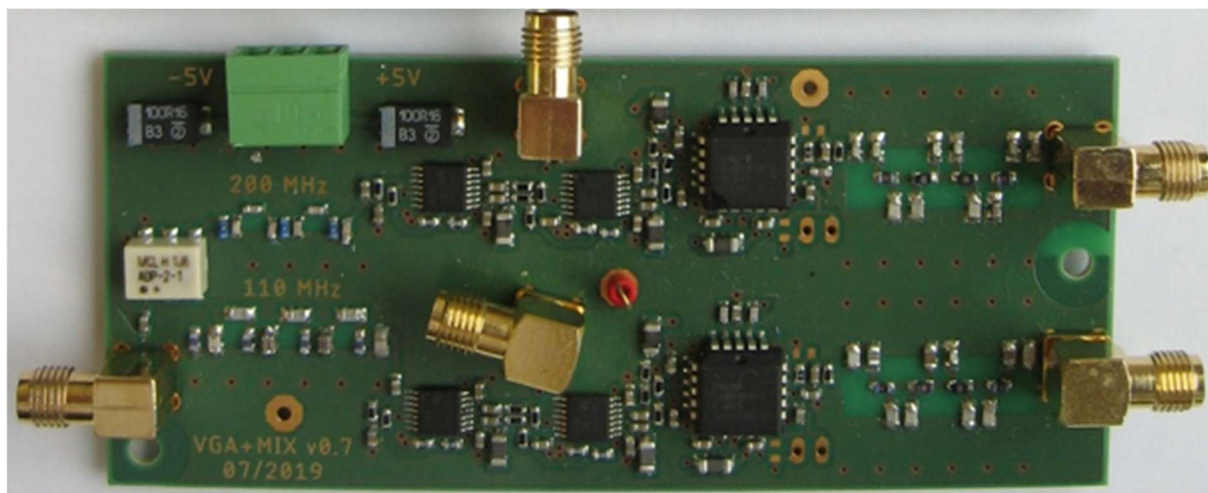
Přijímací optická část začíná třetím portem cirkulátoru následovaným optickým filtrem, jemuž může předcházet optický EDFA předzesilovač. Dále je signál sloučen s lokálním oscilátorem v coupleru 2x2 a výstupy vstupují do balančního o/e převodníku, kde dochází k převodu na elektrický signál.

### 3.3 ČÁST ZPRACOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO SIGNÁLU

Pro sondu dlouhého dosahu byla část zpracování elektrického signálu z jednoho sensorického vlákna integrována na jednu desku plošných spojů. Přitom je nutné pamatovat na to, že sonda má umožňovat zpracování dvou samostatných větví, takže všechny elektrické obvody musejí být nejméně 2× (jeden pro každý optický přijímač). Signál z každé větve může mít i radikálně odlišné úrovně a bylo nutné zajistit, aby při silném signálu nikde v elektrickém řetězci nedocházelo k saturaci aktivních prvků. Proto bylo rozhodnuto všechny obvody sloučit a miniaturizovat na jednoúčelovou desku plošného spoje, která by s touto variabilitou počítala. Výsledná deska byla vyrobena a otestována na základě zkušeností při reálných měřeních v terénu. Deska obsahuje obvody pro zpracování vysokofrekvenčních signálů z opto-elektrického převodníku. Konkrétně je to vstupní posilovač (buffer) a pásmová propust (110 nebo 200 MHz), detektor stejnosměrné složky, přepínatelný atenuátor, zesilovače s řízeným zesílením (VGA), směšovač s DC servem a výstupní dolní propustí (10 MHz), VF špičkový detektor a výstupní zesilovač. Na obr. 3.2 je blokové schéma jednoho kanálu, přičemž deska obsahuje dva kanály. Výsledné rozměry desky s osazenými součástkami jsou pouhých 122×56×28 mm, viz obr. 3.3.



Obr. 3.2: Blokové schéma desky elektrického zpracování signálu (jeden kanál)



Obr. 3.3: Osazená DPS elektrického zpracování signálu

### 3.4 TECHNICKÉ PARAMETRY SONDY

#### Technické parametry zařízení jako celku:

- Napájecí napětí: 230VAC ze standardní zásuvky dle ČSN
- Příkon: max. 500 W
- Rozsah pracovních teplot: 10°C až 30°C (klimatizovaná místnost)
- Rozměry: 2x 4U x 19“ (58 x 42.7 x 17.8 cm - H x Š x V)

#### Technické parametry optické části:

- Vlnová délka: 1550 nm
- Max. výstupní optický výkon: 30 dBm
- Typ optických konektorů: FC-APC
- Počet senzorických kanálů: 2

#### Technické parametry elektrické části:

- **Řízení modulátoru:**
  - Vstupní impedance: 50 Ω
  - Úroveň pulzů: TTL (0/5 V)
  - Šířka pulzu: 100 až 5000 ns
  - Konektor: SMA
  - Počet kanálů: 2
- **Řízení zesilovače:**
  - Konektor: SMA
  - Vstupní impedance: HIGH Z
  - Vstupní rozsah: 0 až 1 V

- Konektor: SMA
- Počet kanálů: 2
- **Výstupy:**
  - Výstupní impedance:  $50 \Omega$
  - Výstupní rozsah:  $\pm 1 \text{ V}$
  - Kmitočtový rozsah: 10 MHz
  - Konektor: SMA
  - Počet kanálů: 4

**Technické parametry digitálního řízení a dohledu:**

- **Typ rozhraní:** USB, Ethernet 1000BaseT, 10GBaseT



## 4 REALIZACE SONDY

Výsledný vzhled optické sondy dlouhého dosahu je zachycen na obr. 4.1. Levá skříň pod monitorem představuje měřicí jednotku a pravá skříň je kontrolér sondy. Tyto dva moduly jsou propojeny jednak USB kabelem (přenos digitálních ovládacích i některých měřicích signálů), tak i svazkem koaxiálních kabelů nesoucích řadu signálů směřujících z kontroléru do měřicího modulu (řídící analogové signály), i z měřicího modulu do kontroléru (odezvy ze sensorických optických vláken).

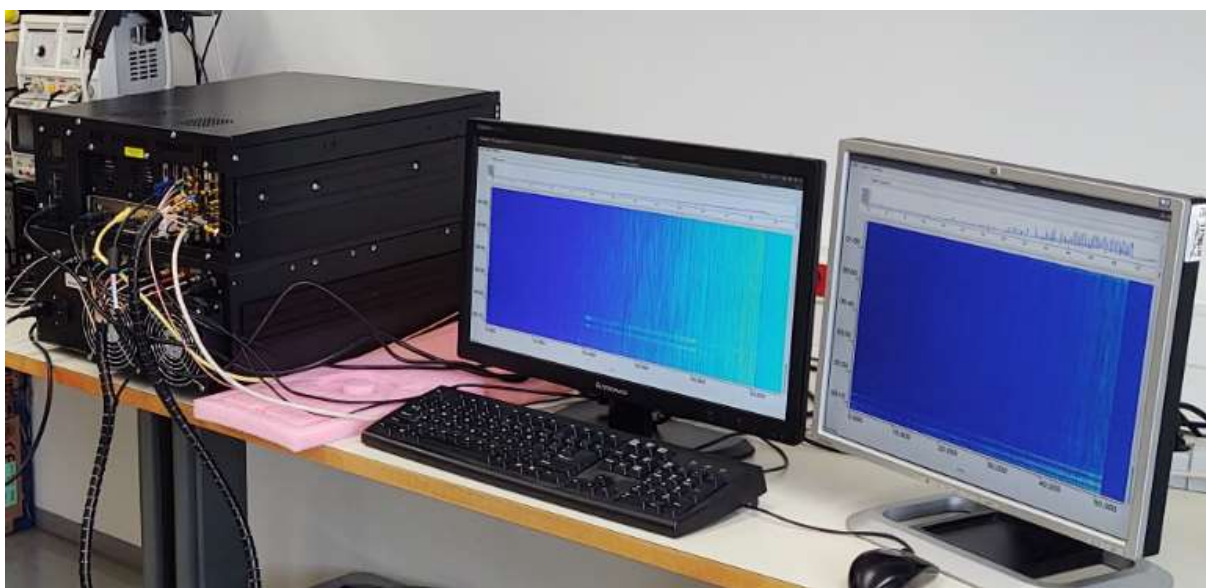


**Obr. 4.1: Sonda (senzorická jednotka) dlouhého dosahu – konfigurace měření**

Do sondy dlouhého dosahu byl implementován automatizovaný mechanismus vyrovnávání ss složky optického signálu před balančním fotodetektorem pro optimální detekci rozdílového signálu. Dále byly vyřešeny konstrukční záležitosti tak, aby bylo možné sondu převážet a testovat v reálném provozu.

Obr. 4.1 ukazuje sondu dlouhého dosahu připojenou současně ke dvěma trasám (dvě bílá vlákna v levé dolní části obrázku) ve fázi konfigurace měření. Dva monitory připojené ke kontroléru umožňují během měření zobrazení výstupů z obou vláken současně. V reálném nasazení na vzdáleném stanovišti monitory nejsou třeba a měření je možné ovládat vzdáleně. V případě vysokorychlostního datového připojení sondy do Internetu je možné sledovat průběh přijímaného signálu na dálku. V případě kvalitního mobilního datového připojení lze sledovat signál přímo na místě generování událostí (vzruchů povahy mechanických vibrací).

Obr. 4.2 zachycuje sondu v činnosti ve formě simultánního snímání odezvy senzorických vláken na dvou trasách, každé o délkách 50 km. Tyto trasy byly pro laboratorní testy tvořeny pomocí dvou 50 km cívek s jednovidovým vláknem s primární ochranou (akrylátovým lakem). Každý ze dvou monitorů zobrazuje tzv. waterfall znázorňující případný výskyt vibrací v čase a místě podél jednoho ze dvou vláken.



**Obr. 4.2: Spuštění měření a testování odezvy**

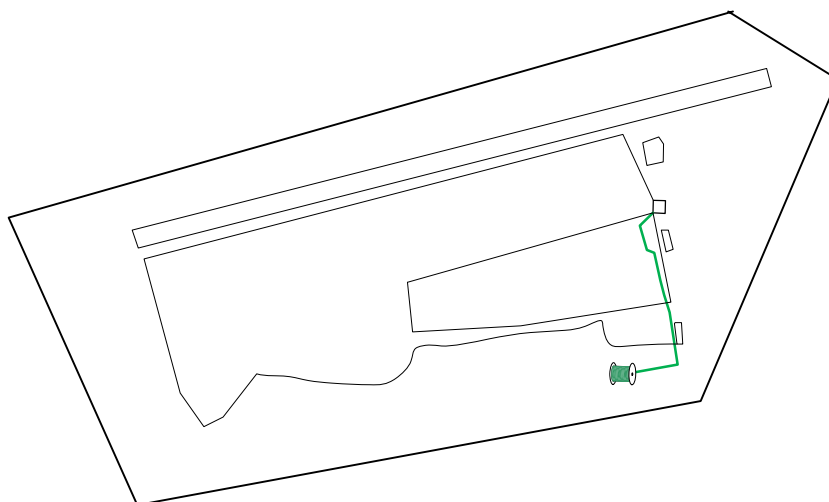
## **5 TESTOVÁNÍ SONDY A MĚŘENÍ V TERÉNU**

Sonda byla nejdříve po částech sestavována a testována v laboratoři. Po potvrzení funkčnosti základního schématu se přistoupilo k návrhu a realizaci integrovaného řešení, které již umožnilo i testovací nasazení v terénu.

### **5.1 TESTOVÁNÍ SYSTÉMU NA PERIMETRU Č. 1**

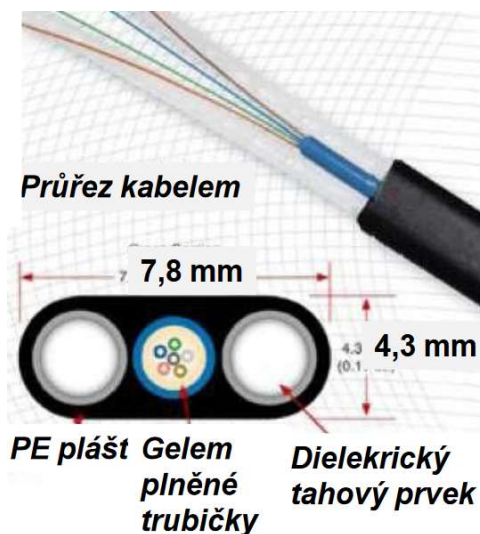
#### **5.1.1 Testovací polygon č. 1**

V prostoru areálu byl vytvořen testovací polygon v celkové délce 240 m (je třeba dále přičíst cca 10 m zavedení do budovy a 250 m stočeného kabelu na konci trasy pro případné rozšíření)



**Obr. 5.1: Testovací polygon v areálu č. 1**

Jako senzorický kabel byl položen optický kabel se SM vlákny typu Mini LT Flat Drop, 12 vl. AW FLEX – 9/125, viz obr. 5.2.



**Obr. 5.2: Použitý optický kabel**

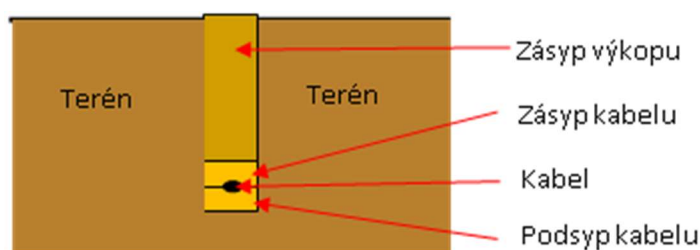
Kabel Mini LT Flat Drop 09/125 12vl je určen pro pokládku přímo do země. Z 12 SM vláken byla vybrána 4 vlákna, která byla označena čísly 1 – 4 a zakončena FC/APC konektory, viz obr. 5.3. Vlákna pod čísly 2 a 3 byla na vzdáleném konci propojena do smyčky, takže lze až tři vlákna zapojit sériově, čímž se události projeví až na 3 místech současně.





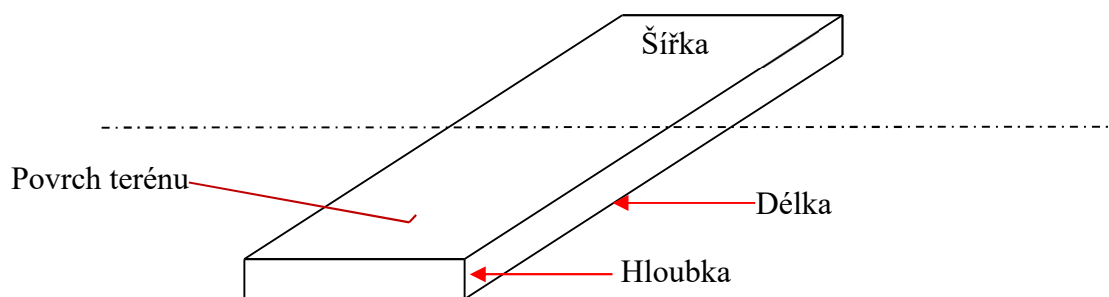
**Obr. 5.3: Zakončení optických kabelů v řídicí budově**

Uložení kabelu bylo provedeno v různých hloubkách, a to 30, 50 a 100 cm, řešení pokládky dle obr. 5.4.



**Obr. 5.4: Průřezy znázorňující pokládku optických kabelů**

Některá místa nad sensorickým kabelem byla zasypána jiným materiálem, než se nachází přirozeně v okolí, konkrétně štěrkem, aby bylo možné posoudit vliv materiálu na povrchu na přijímaný signál, viz obr. 5.5.



**Obr. 5.5: Náčres speciálních povrchových zásypů**

### 5.1.2 Zahájení testování a měření

V budově společných rozvodů byl umístěn měřicí systém sestávající z kontroléru a měřicího modulu. Probíhající měření je pak zachyceno na obr. 5.6.



**Obr. 5.6: Funkční Měřicí systém napojený na optickou trasu polygonu**

Výstupy z reálného měření pak byly využity pro optimalizaci zapojení a přesnější konfiguraci měření. Po vyladění systému pak následovala měření, jejichž cílem byl sběr vzorových dat pro následovné trénování klasifikátoru událostí. Za cíl je kladeno rozpoznání jevů typu chůze a běh jednoho či více lidí, úderů do předmětů, kopání do země, překonávání plotu či pohyb vozidla. V této fázi probíhal sběr vzorových dat, a v prostorách VUT pak jejich zpracování a analýza za účelem extrakce příznaků vhodných pro klasifikaci událostí. Na jejich základě pak probíhalo trénování klasifikátoru, jenž bude zakomponován do systému.

## **5.2 MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ SYSTÉMU NA PERIMETRU Č. 2**

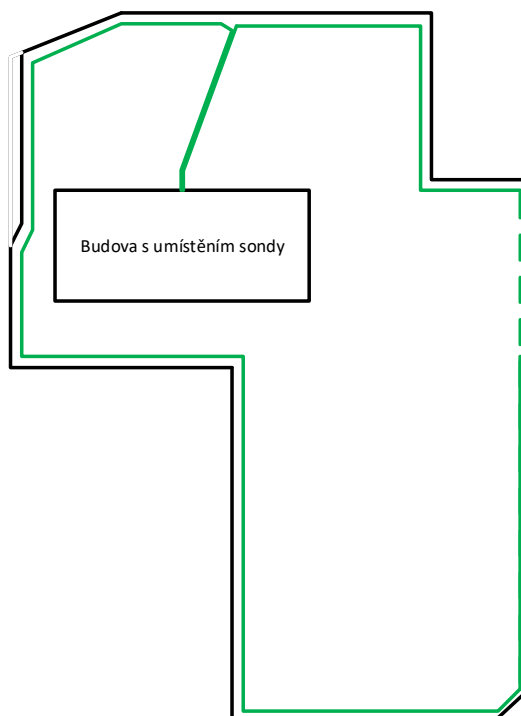
### **5.2.1 Příprava testovacího polygonu**

Ve spolupráci s další společností byl v areálu vybudován testovací polygon podél celého obvodu areálu (viz obr. 5.7) v celkové délce 449 m, sestávající ze dvou různých optických kabelů:

1. Mikrokabel MiDia CT 4 vl. AW FLEX – 9/125 uložen do mikrotrubičky
2. Mini LT Flat Drop, 6 vl. AW FLEX – 9/125 uložen přímo do země

Záměrně byly použity dva různé kabely, aby bylo možné analyzovat i vliv kabelu na funkci systému. Začátek a konec obou kabelů je přiveden do stejného místa v budově společných rozvodů a začátek a konec čtyř vláken z každého kabelu je opatřen konektory FC/APC pro připojení systému. Jednotlivá vlákna je možné použít samostatně nebo je zapojit sériově za sebou a celkovou délku reálné trasy zvýšit až na 3 592 m. Při sériovém zapojení více vláken se

každá událost projeví až na 8 místech (vzdálených o 449 m) současně, což lze využít ke zvýšení spolehlivosti detekce nebo ke zvýšení počtu událostí pro trénování klasifikátoru.



**Obr. 5.7: Areál č. 2 s umístěním pokládky senzorických kabelů**

### 5.2.1.1 Kalibrace měřicího systému

Při nasazení systému v nových podmínkách je nutné provést kromě základního ověření funkčnosti systému také kalibraci a optimalizaci systému. Zdroje vibrací totiž systém lokalizuje na základě optické vzdálenosti jejich signálu ve vlákne, zatímco uživatele zajímá geometrická vzdálenost, resp. geografická poloha. Optická a geometrická vzdálenost se přitom mohou i významně lišit, na vinně je nepřesně stanovený index lomu (nepřímo udávající rychlost šíření závislou na materiálu vlákna a vlnové délce použitého laseru), záhyby nebo rezervní smotky vlákna podél trasy, apod.

Pro kalibraci používáme snímání úmyslně prováděných vibrací na několika místech (např. v místech změn směru vlákna, v místech očekávaných rezervních smotků, apod.). Jako nejvhodnější definovaný zdroj vibrací (a dostatečně jednoduchý na realizaci) se osvědčilo zatloukání dřevěné tyče, které představuje snadno rozpoznatelný téměř bodový a impulsní zdroj vibrací. Fotografie z průběhu této kalibrace na polygonu jsou na obr. 5.8.

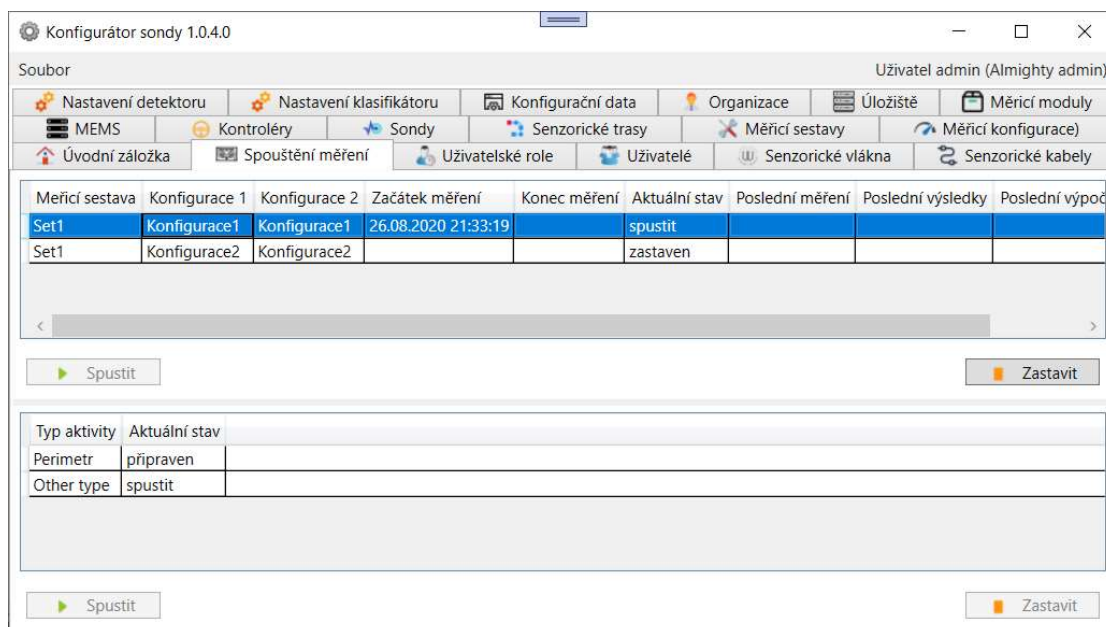


**Obr. 5.8: Generování mechanických vibrací a dálkové sledování činnosti sondy**

## 5.2.2 Konfigurace měření

Vlastní měření lze ovládat dvěma způsoby:

1. Lokálně – tato možnost je popsána v kap. „Realizace sondy“, viz obr. 4.1.
2. Na dálku – pomocí aplikace „Konfigurátor sondy“, viz obr. 5.9.

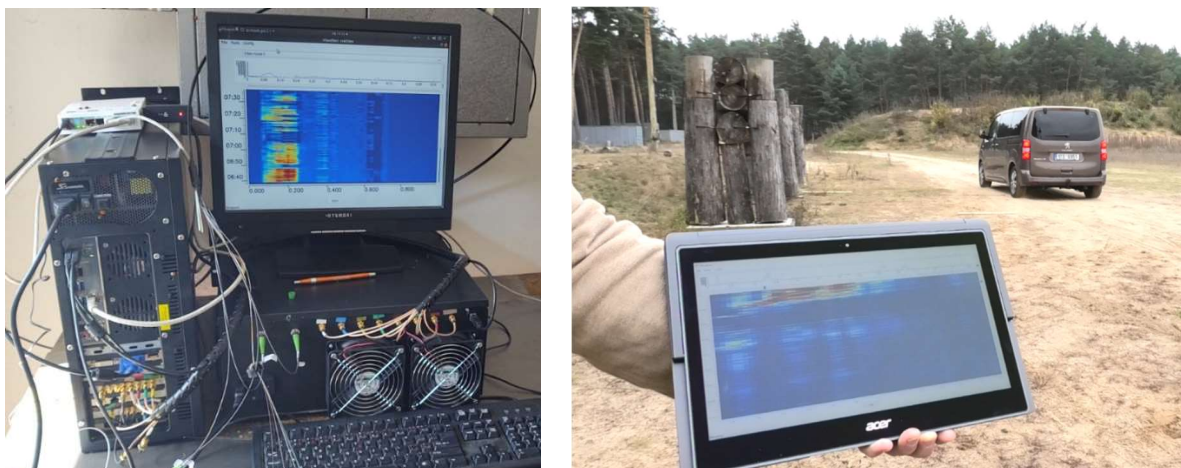


**Obr. 5.9: Konfigurační nástroj**

Obr. 5.10 prezentuje reálné nasazení sondy v terénu, kdy je zachycena možnost sledování průběhu měření (waterfallu) na dálku. Tablet je připojen do Internetu a přes vpn do



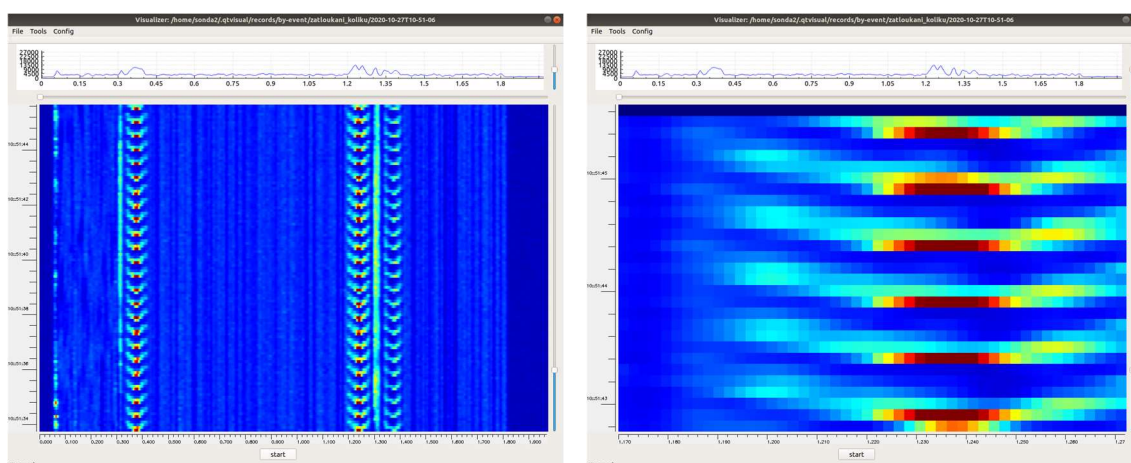
vnitřní síť senzorického systému pro komunikaci se sondou, která na tablet vysílá průběh měření.



**Obr. 5.10: Nasazení sondy v terénu - lokální i dálkové sledování průběhu měření: snímání signálu generovaného projíždějícím automobilem**

### 5.3 MĚŘENÍ, DETEKCE, LOKALIZACE A IDENTIFIKACE UDÁLOSTÍ

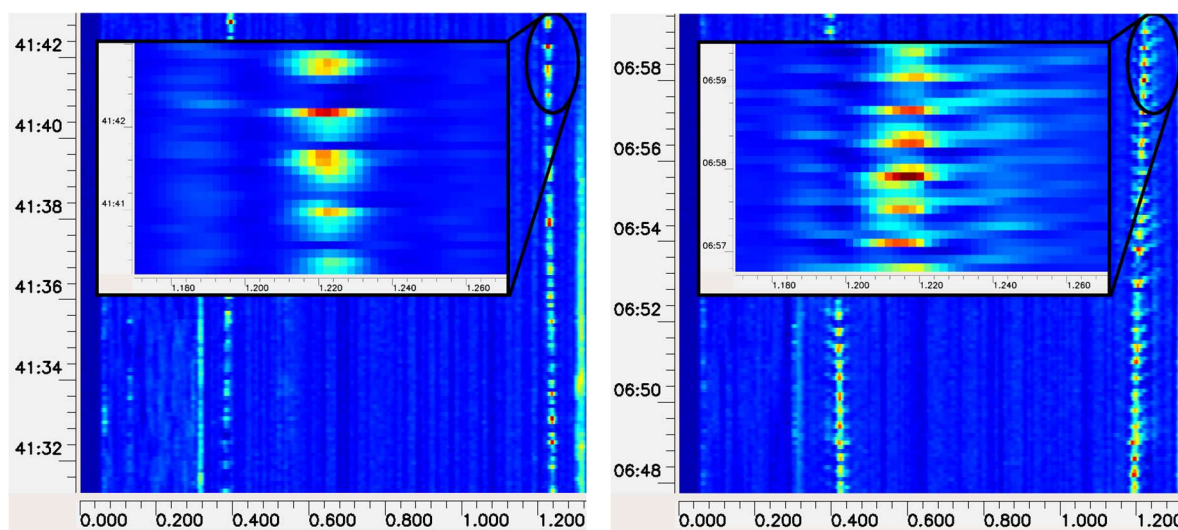
V případě bodového impulsního zdroje vibrací, jako je např. zatloukání kůlu či kopání do země, lze jednotlivé úderů snadno detekovat. Z bodu zdroje vibrací se navíc šíří kulová vlna, která se ve waterfallu projeví detekcemi ve tvaru písmene “V” rozšiřujícího se od místa zdroje vibrací na obě strany – ke konci i k začátku vlákna.



**Obr. 5.11: Ukázka snímání zatloukání kolíku do země v blízkosti senzorického kabelu**

Podobně v případě vibrací způsobených člověkem kráčejícím podél vlákna lze detekovat jednotlivé kroky. Ve waterfallu však při normální chůzi není patrné trychtýřovité šíření kulové

vlny ani není většina energie soustředěna do jediného bodu v prostoru a čase. Je to patrně způsobeno tím, že došlápnutí trvá mnohem delší dobu než úder či kop a díky větší ploše podrážky je tlak nohy na podloží rozložen v čase i v prostoru (do větší plochy), což se projeví i na průběhu detekovaného signálu.



a) chůze jednotlivců

b) běh jednotlivců

Obr. 5.12: Snímání pohybu člověka (chůze a běh)

U běhu, viz obr. 5.12 b) je energie nárazu na zem již větší než u chůze, takže na obrázku lze vidět stopu tvaru písmene „V“, respektive „J“, případně jeho zrcadlového obrazu, z čehož lze i ze záznamu jediného kroku usuzovat na směr pohybu běžící osoby.

## SHRNUTÍ

Při srovnání s ostatními senzory lze najít následující přednosti vyvíjeného systému využívající optického vlákna jako senzoru:

- **značný dosah** či **rozsah** oblasti snímání (>200 km),
- **kontinuita snímání v prostoru a čase** – distribuovaný (rozprostřený) senzor,
- **současné sledování a analýza mnoha událostí** na sledované trase,
- **detekce a lokalizace** událostí se **zpožděním stovek ms**,
- **neviditelnost a nedetekovatelnost senzoru** při umístění optického kabelu pod zemský povrch a zahlazení stop po instalaci,
- senzorická trasa **nevyžaduje** po celé délce **dodávku elektrické energie**,
- nezávislost na světelných podmínkách (den/noc),

- nízká závislost na povětrnostních podmínkách (závisí na instalaci, tj. na míře citlivosti akustické vazby mezi zdrojem vibrací a senzorickým vláknem na povětrnostní podmínky).

Mezi určité komplikované stránky nasazení a využívání navrženého systému v reálném prostředí jsou:

- **relativně vyšší pořizovací náklady** – minimálně vyšší statisíce korun českých (vysoké ceny optických komponentů na sestavení sondy) v případě využití optického vlákna již položeného optického kabelu, až po desítky milionů korun českých (hlavní položkou je pak vysoká cena instalace senzorické trasy v případě nutnosti nové pokládky senzorického optického kabelu – výkopové práce, optický kabel, řešení vhodného uložení kabelu, úprava okolí senzorické trasy, apod.),
- **nutnost adaptace systému** na aktuální požadavky zadavatele a na aktuální prostředí senzorické trasy - každé nasazení je do jisté míry jedinečné, což znamená, že jak pro správnou detekci, tak lokalizaci, ale především pro správné rozpoznávání (identifikaci/klasifikaci) zdrojů vibrací je nezbytné, aby se systém pro dané požadavky, cíle a podmínky nejdříve správně nastavil, natrénoval, případně doplnil, tedy, aby se systém celkově adaptoval na dané reálné podmínky nasazení.

## DALŠÍ VÝVOJ SYSTÉMU

Z výše uvedených závěrů vyplývá, že další vývoj systému je zapotřebí, a to především z hlediska požadavků na snížení ceny pro řešení s kratšími délkami senzorických tras. Také budou hledány sofistikovanější algoritmy pro zpracování signálů ze senzorických vláken za účelem menší chybovosti při hlášení incidentů a vyšší hladiny správnosti jejich klasifikace.

## ZVEŘEJNĚNÍ VÝSLEDKŮ

### Publikace

Poznatky byly využity i pro sepsání odborných publikací v časopisech, knihách i ve sbornících konferencí:

- NOVOTNÝ, V.; SYSEL, P.; PŘINOSIL, J.; MEKYSKA, J.; SLAVÍČEK, K.; LATTENBERG, I. Critical Infrastructure Monitoring System. In *2021 IEEE 17th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)*. Online: 2021. s. 165-170. ISBN: 978-1-6654-1484-5.

- KRÍŽ, J.; SEDLÁK, P.; LUHAN, J.; NOVOTNÝ, V.; KONEČNÝ, M., SVOBODA, V., STRACHOVÁ, Z. *Kybernetická (ne)bezpečnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2021. 430 s. ISBN: 978-80-7623-068-2.
- NOVOTNÝ, V.; SYSEL, P.; PROKEŠ, A.; HANÁK, P.; SLAVÍČEK, K.; PŘINOSIL, J. Fiber Optic Based Distributed Mechanical Vibration Sensing. *SENSORS*, 2021, roč. 21, č. 14, s. 1-19. ISSN: 1424-8220.
- NOVOTNÝ, V., SYSEL, P., PROKEŠ, A., et al. (2021) *Long-Range Optical Fiber Based Distributed Mechanical Vibration Sensing*. Preprints.org 2021., 2021040514. <https://doi.org/10.20944/preprints202104.0514.v1>. Google Scholar
- NOVOTNÝ, V.; SYSEL, P.; PROKEŠ, A.; HANÁK, P.; SLAVÍČEK, K. Efficient use of expensive components of optic vibration sensor. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, 2021, roč. 10, č. 1-3, s. 1-6. ISSN: 1805-5443.
- NOVOTNÝ, V.; SYSEL, P.; HANÁK, P.; JOHN, F. Optovláknový senzor mechanických vibrací. In *LA59 - Sborník příspěvků multioborové konference LASER59*. Brno, ČR: AV ČR, Ústav přístrojové techniky, 2019. s. 25-27. ISBN: 978-80-87441-26-8.
- NOVOTNÝ, V. Enhancement of Distributed Fiber Optic Vibration Sensors. In *Lecture notes in Electrical Engineering*. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG 2018, 2018. p. 201-209. ISBN: 978-3-319-69813-7. ISSN: 1876-1100.

## Ohlasy na publikace

NOVOTNÝ, V.; SYSEL, P.; PROKEŠ, A.; HANÁK, P.; SLAVÍČEK, K.; PŘINOSIL, J. Fiber Optic Based Distributed Mechanical Vibration Sensing. *SENSORS*, 2021, vol. 21, no. 14, p. 1-19. ISSN: 1424-8220.

Citace:

1. C. Chen, J. Li, Z. Qin, W. Zhang and S. Xu, "Influence of the Order of Phase Differentiation and Unwrapping on Retrieval of Temporal Waveforms in Phase-Demodulated  $\phi$ -OTDR," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 9, pp. 8522-8529, 1 May1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3161300.
2. WANG, Yilin, Yizhuo LI, Fengyi CHEN, Ruohui WANG a Xueguang QIAO. Resonant-Frequency-Adjustable Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Extra Transverse Force Loading. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2023, 2023-2-1, **23**(3), 2145-2152 [cit. 2023-09-22]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2022.3227732
3. LUO, Zhihui, Zhen YANG, Xiaoan CHEN, Changyan RAN, Jianglou HUANG a Yong YE. Separating method for multi-source vibration signals in ultra-weak fiber Bragg grating distributed acoustic sensors. *Optical Fiber Technology* [online]. 2023, **81** [cit. 2023-09-22]. ISSN 10685200. Dostupné z: doi:10.1016/j.yofte.2023.103501



4. GREJAR, David, Milan CUCKA, Miloslav FILKA, Karel SLAVICEK, Jiri VAVRA a Martin KYSELAK. Optical sensor based on birefringent fiber type PANDA used for tensile detection. In: *2022 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoT&IS)* [online]. IEEE, 2022, 2022-11-24, s. 57-63 [cit. 2023-09-22]. ISBN 979-8-3503-9645-4. Dostupné z: doi:10.1109/IoT&IS56727.2022.9975895
5. WANG, Zilin, Wei FAN, Hong GAO a Xueguang QIAO. Optical Fiber Grating Geophone Assisted With a Hollow Triangle Beam. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2021, 2021-12-15, **21**(24), 27489-27494 [cit. 2023-09-22]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2021.3122974

NOVOTNÝ, V., SYSEL, P., PROKEŠ, A., et al. (2021) *Long-Range Optical Fiber Based Distributed Mechanical Vibration Sensing*. Preprints.org 2021., 2021040514. <https://doi.org/10.20944/preprints202104.0514.v1>.

Citace:

1. TIAN, Ye, Jian LI, Guang YANG, Min ZHAO, Xiaohang WANG, Xiaotian LI a Manuel Filipe COSTA. Research on the application of sagnac interference combined with multimode interference in vibration measurement. In: *3rd International Conference on Laser, Optics, and Optoelectronic Technology (LOPET 2023)* [online]. SPIE, 2023, 2023-6-25, 80- [cit. 2023-09-22]. ISBN 9781510667624. Dostupné z: doi:10.1117/12.2690260

NOVOTNÝ, V.; SYSEL, P.; PŘINOSIL, J.; MEKYSKA, J.; SLAVÍČEK, K.; LATTENBERG, I. Critical Infrastructure Monitoring System. In 2021 IEEE 17th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA). Online: 2021. s. 165-170. ISBN: 978-1-6654-1484-5.

1. NTAFLOUKAS, Konstantinos, Liliana PASQUALE, Beatriz MARTINEZ-PASTOR, a Daniel P. MCCRUM. *A Vulnerability Assessment Approach For Internet Of Things Enabled Transportation Networks Subjected To CyberPhysical Attacks* [online]. In: . - [cit. 2023-09-22]. Dostupné z: doi:10.11159/icste23.172
2. ATANASOV, Ivaylo, Vasil VATAKOV a Evelina PENCHEVA. The Design of Critical Data Communication Applications for Railways: an Approach. In: *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT)* [online]. IEEE, 2023, 2023-6-6, s. 354-359 [cit. 2023-09-22]. ISBN 979-8-3503-9657-7. Dostupné z: doi:10.1109/MetroInd4.0IoT57462.2023.10180154
3. GREJAR, David, Jakub FROLKA, Karel SLAVICEK, Otto DOSTAL a Martin KYSELAK. Network Physical Layer Attack in the Very High Capacity Networks. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* [online]. 2023, 2023-05-14, **21**(1), 37 - 47 [cit. 2023-09-22]. ISSN 1804-3119. Dostupné z: doi:10.15598/aeec.v21i1.4973

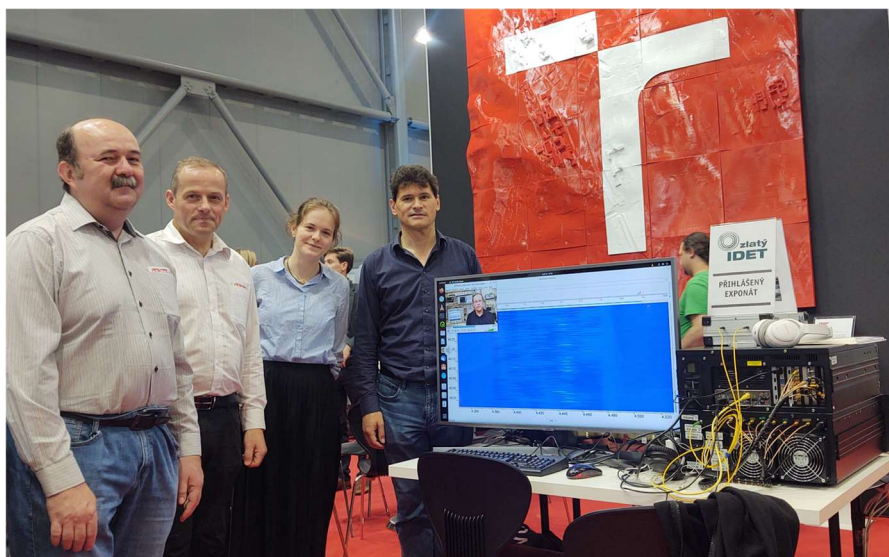
4. GRENAR, David, Ondrej SLADOK, Miloslav FILKA, Karel SLAVICEK, Jiri VAVRA a Martin KYSELAK. Optical polarization-based acoustic pressure detector. In: *2022 4th IEEE Middle East and North Africa COMMUNICATIONS Conference (MENACOMM)* [online]. IEEE, 2022, 2022-12-6, s. 65-70 [cit. 2023-09-22]. ISBN 978-1-6654-9411-3. Dostupné z: doi:10.1109/MENACOMM57252.2022.9998249

## Zájem z průmyslu

O výsledky výzkumu projevilo zájem několik institucí, a to z oblasti dopravy (železniční), kritické infrastruktury (rozvodny elektrické energie) i bezpečnostních složek. Tyto instituce nám také umožnily testování v terénu. Buď poskytnuly již vybudovanou optickou trasu, a nebo v rámci spolupráce jsme se podíleli na projektování trasy dle našich i jejich požadavků (viz kap. 5). Nasazení do ostrého průmyslu však musí předcházet úpravy realizující jednak kompaktní řešení (jeden modul do 19" rámu) a pro nasazení na krátkých trasách také výraznější zlevnění řešení.

## Prezentace na výstavách a veletrzích

Dále byl exponát vystavován v rámci akce „17. mezinárodní veletrh obranné a bezpečnostní techniky IDET“ ve dnech 24. - 27.5. 2023 na BVV v Brně a v rámci ní byl zařazen do soutěže o „Zlatý IDET“, viz obr. 5.5.



**Obr. 5.5: Účast na mezinárodním veletrhu IDET 2023**