

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**SYSTÉM RFID AKTIVNÍCH
TECHNOLOGIÍ PRO ZVYŠOVÁNÍ
BEZPEČNOSTI VE SPECIFICKÝCH
DRUZÍCH DOPRAVY**

Ing. Martin Řezáč

Disertační práce
2025

Doktorand

Ing. Martin Řezáč

Studijní program

Technika a technologie v dopravě

Studijní obor

Technologie a management v dopravě

Školitel

prof. Ing. Radovan Soušek, Ph.D.

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Prostějově dne 10. dubna 2025

Ing. Martin Řezáč

Poděkování

Děkuji svému školiteli panu prof. Radovanu Souškovi za rady, podněty a vstřícný přístup při zpracovávání disertační práce. Dále děkuji rodině a přátelům za jejich podporu.

Martin Řezáč

Anotace

Cílem disertační práce je vytvoření funkčního modelu systému využívajících technologie lokalizace objektů v reálném čase RTLS pro zvýšení bezpečnosti ve specifických druzích dopravy. Specifickými druhy dopravy se rozumí provozy, kde není možné využít standardně dostupné technologie, případně infrastrukturu jako jsou sítě GPS, GSM atd. Pro návrh takového systému jsou využity technologie, založené především na principu Aktivní rádiové komunikace a identifikace A-RFID. Práce je založena také na dlouholetých zkušenostech s vývojem a nasazováním obdobných aplikací v reálném prostředí.

Klíčová slova

Lokalizace, RFID, bezpečnost, UWB

Title

Possibilities of removing barriers in rail freight transport through data sharing

Annotation

The aim of the dissertation is to create a functional model of a system using RTLS real-time object localization technologies to increase safety in specific types of transport. Specific modes of transport are understood as operations where it is not possible to use standard available technologies, or infrastructure such as GPS, GSM networks, etc. For the design of such a system, technologies based primarily on the principle of Active radio communication and A-RFID identification are used. The work is also based on many years of experience with the development and deployment of similar applications in a real environment.

Keywords

Location, RFID, safety, UWB

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam symbolů a zkratek.....	11
1 Úvod.....	12
2 Přehled stavu poznatků v oblasti systémů aktivního RFID	13
2.1 Současný stav výzkumu a zdrojů informací	13
2.2 Definice a výběr specifických druhů dopravy	14
2.2.1 Důlní prostředí a hlubinné liniové stavby	14
2.2.2 Povrchové stavby a otevřené průmyslové provozy	14
2.2.3 Indoor a outdoor logistická centra.....	15
2.3 Analýza technologie RFID	15
2.3.1 Pasivní RFID	15
2.3.2 Aktivní RFID	16
2.4 Legislativní rámec využití RFID	16
2.4.1 Technické normy	17
2.4.2 Využití kmitočtového spektra.....	17
2.5 Využití RFID pro bezpečnost.....	18
2.5.1 Legislativa	18
2.5.2 Prevence.....	18
2.5.3 Aktivní řízení procesů.....	19
2.5.4 Krizové řízení	19
2.6 Aplikace využívající aktivní RFID v dané problematice	19
2.6.1 Zkušenosti v provozu z ČR.....	19
2.6.2 Zkušenosti z provozů v zahraničí	20
2.7 Shrnutí analýzy.....	21
3 Cíl disertační práce	23
4 Koncept řešení.....	24
4.1 Analýza současného stavu	24
4.2 Provedení experimentů a měření v reálném provozu	25
4.3 Návrh modelu.....	25
4.4 Dílčí závěry	25
5 Přehled metod použitých k dosažení cíle práce.....	26
5.1 Empirické metody	26
5.2 Aplikovaný výzkum.....	26
5.3 Akční výzkum	26
5.4 Logické metody	26
5.4.1 Abstrakce – konkretizace.....	26

5.4.2	Analýza – syntéza	27
5.4.3	Indukce – dedukce	27
5.5	Modelování	27
5.6	Teorie grafů	28
5.7	Simulace	29
6	Vlastní řešení	31
6.1	Definice případů využití Aktivních technologií RFID pro zvyšování bezpečnosti.....	31
6.2	Vytvoření obecných modelů systému pro zvyšování bezpečnosti	31
6.2.1	HW infrastruktura	31
6.2.2	Obecná infrastruktura	33
6.2.3	Use-case.....	33
6.2.4	Návrh modelu systému prevence kolize	34
6.3	Experimenty.....	35
6.4	Lokalizace v důlním prostředí pomocí technologie měření RSSI v důlním prostředí.....	36
6.4.1	Informační systém pro identifikaci – ISI	36
6.4.2	Zónová lokalizace	37
6.4.3	Elektronická průjezdová brána – EPB.....	42
6.5	Bezpečnostní systém WAS – Worker Area Safety	44
6.5.1	Popis procesu komunikace a rozhodování systému WAS	45
6.5.2	Experimenty v reálném stavebním provozu.....	47
6.5.3	Experimenty v důlním prostředí.....	47
6.6	Lokalizační systém CarRFID	48
6.6.1	Detekce a vizualizace kritických stavů.....	50
6.7	Definice základní úlohy – obecný princip řešení	52
6.8	Zadání experimentální úlohy a ověření předpokladů	56
6.9	Testování v běžném průmyslovém prostředí.....	56
6.9.1	Antikolizní funkce z pohledu VNA.....	58
6.9.2	Antikolizní funkce z pohledu AGV	59
6.10	Návrh technického řešení pro ověření vlastností v reálném prostředí.....	60
6.10.1	Instalace pevné infrastruktury v rámci experimentálního provozu	61
6.10.2	Montáž a propojení s VNA a GVN.....	62
6.10.3	Statistické vyhodnocení lokalizačních dat.....	68
6.11	Diskuse o výsledcích návrhů	70
7	Závěr.....	72
	Summary.....	74
	Literatura	76

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklad využití jazyka UML pro modelování procesů a toků datových packetů (zdroj autor)	28
Obr. 2 Využití teorie grafů pro definice možných cest a pohybu objektů v důlních provozech (zdroj autor)	29
Obr. 3 Využití metod simulace pro simulaci rozložení síly elektromagnetického pole (zdroj autor).....	30
Obr. 4 Využití metod simulace pro optimalizaci rozležení kotev bez nutnosti předchozího měření na základě předpokládaných tras dopravních prostředků v omezených trasách (zdroj autor).....	30
Obr. 5 Obecný návrh HW části pevné infrastruktury lokalizačního systému pro zvyšování bezpečnosti (zdroj autor).....	32
Obr. 6 Návrh modelu infrastruktury antikolizního systému (zdroj autor)	33
Obr. 7 Návrh modelu infrastruktury antikolizního systému (zdroj autor)	34
Obr. 8 Návrh modelu systému prevence kolize (zdroj autor)	35
Obr. 9 Lokalizace osob v rámci těžebního porubu – reprezentace pomocí síťového diagramu (zdroj autor)	37
Obr. 10 Úprava přístupu systému – možnost jednosměrného přemístění osoby do zcela oddělené zóny (zdroj autor).....	39
Obr. 11 Zobrazení konfiguračního rozhraní pro definici jednotlivých zón jako vrcholů síťového grafu a přechodů mezi nimi jako hran (zdroj autor).....	39
Obr. 12 Typické zobrazení sledovaného důlního díla – porubu (zdroj autor)	40
Obr. 13 Model procesu lokalizace tagu systémem ISI (zdroj autor)	41
Obr. 14 Čtecí zařízení – kotva lokalizačního zařízení systému ISI.....	41
Obr. 15 Datový koncentrátor systému ISI navržený a montovaný autorem disertace (zdroj autor)	42
Obr. 16 Experiment s multianténním systémem pro detekci přítomnosti osoby na hřeblovém dopravníku – umístění na povrchu (zdroj autor)	43
Obr. 17 Experiment s multianténním systémem pro detekci přítomnosti osoby na hřeblovém dopravníku – umístění na povrchu, test kovového stínění (zdroj autor)	44
Obr. 18 Sekvenční diagram procesu rangingu a vyhodnocení systému WAS (zdroj autor).....	46

Obr. 19 Umístění majáku a externí antény systému WAS – železnorudný hlubinný důl (zdroj autor).....	47
Obr. 20 Umístění signalizační jednotky (zdroj autor)	48
Obr. 21 Základní pohled na výstup vizualizační část CarRFID (zdroj autor)	50
Obr. 22 Zobrazení podle doby stání v jednotlivých zónách (zdroj autor)	51
Obr. 23 Sekvenční model komunikace v jednotlivých vrstvách systému (zdroj autor)	52
Obr. 24 Schematické zobrazení výchozí situace (zdroj autor).....	53
Obr. 25 Schematické zobrazení výchozí situace – řešení pomocí technologie UWB – ranging (zdroj autor)	53
Obr. 26 Schematické zobrazení výchozí situace – řešení pomocí technologie UWB – metoda RTLS (zdroj autor)	54
Obr. 27 Schematické zobrazení výchozí situace – řešení pomocí technologie UWB – RTLS/ranging (zdroj autor)	55
Obr. 28 Schematické zobrazení výchozí situace – skladové prostředí s uličkami – detail potenciálně kolizní situace (zdroj autor).....	57
Obr. 29 Schematické zobrazení výchozí situace – skladové prostředí s uličkami – rozšíření detailu (zdroj autor)	58
Obr. 30 Zobrazení základních zón přední a zadní lokalizační antény (zdroj autor).....	59
Obr. 31 Detaily měření vlastností a vyzařování (zdroj autor)	60
Obr. 32 Měření charakteristiky spektra vysílaného signálu vysílače UWB (zdroj autor)	61
Obr. 33 Základní návrh rozmístění antén (žluté body) a čtecí zařízení s interními anténami (zelené) (zdroj autor).....	62
Obr. 34 Příklad umístění přední UWB antény na VNA (zdroj autor).....	63
Obr. 35 Schéma základního připojení jednotky WAS k AGV (zdroj autor).....	64
Obr. 36 Prvotní záznam průjezdů VNA (zdroj autor)	65
Obr. 37 Záznam průjezdu VNA za 48 hodin (zdroj autor).....	65
Obr. 38 Heatmapa průjezdů VNA s gridem 0,05 m x 0,05 m (zdroj autor).....	66
Obr. 39 Heatmapa průjezdů VNA s gridem 0,15 m x 0,15 m.....	67
Obr. 40 Síťový graf reprezentující experimentální prostředí (zdroj autor)	68
Obr. 41 Histogram počtu přítomnosti VNA v daných zónách „Ulička x“ (zdroj autor)	69

Obr. 42 Y-souřadnice VNA přítomného v uličce v časovém grafu za 24 hodin (zdroj autor)	69
Obr. 43 Histogram událostí dle doby setrvání v jednotlivých uličkách (zdroj autor).....	70

Seznam symbolů a zkratek

RFID	Radio Frequency Identification
UWB	Ultra Wide Band
BT	Blue Tooth
BLE	Blue Tooth Low Energy
OKD	OKD, a.s.
ISI	Informační Systém pro Identifikaci
CarRFID	Systém pro lokalizaci automobilů ve výrobě
RTLS	Real Time Location System
RF	Radio Frequency
CE	Označení výrobku o shodě
EMC	Electro Magnetic Compatibility
ISM	Industrial Scientific Mediacal
SRD	Short Range Device
SÚJB	Státní Úřad pro Jadernou Bezpečnost
UML	Universal Modeling Language
TOF	Time of Flight
TDOA	Time Difference of Arrival
E-UTM	Methods of Enterprise Unmanned Traffic Managem
AGV	Automated Guided Vehicle
VNA	Very Narrow Aisle

1 Úvod

Využití RFID v různých průmyslových oblastech, v dopravě a logistice je moderním trendem a je jednoznačně na vzestupu. Hlavními motivy využití RFID technologií jsou však v obecné rovině z větší části spíše ekonomické, zaměřující se na zefektivnění logistických a přepravních procesů, eliminace lidské práce a tím možnosti vzniku chyb. Neoddiskutovatelným faktem je ale také neustále rostoucí tlak na zvyšování bezpečnosti, a to platí i pro dopravu a logistiku. V rámci disertační práce budou analyzovány jak obecné principy a funkce RFID, tak konkrétní aplikace. Bude navržen model, který lze aplikovat například v důlních a těžebních provozech.

Tyto provozy mají celou řadu specifíků, která je řadí mezi kritické z hlediska bezpečnosti pracovníků. To je způsobeno několika základními faktory, kterými jsou kromě obecně těžkých podmínek také značný pohyb personálu, materiálu, manipulačních a přepravních prostředků. Nemalá část pracovních úrazů pak vzniká ve spojení s dopravou lidí nebo materiálu. I v těchto provozech je kladen stále větší a větší důraz na bezpečnost, na rozdíl od „běžných“ provozů v tomto prostředí existuje celá řada technických a legislativních překážek pro nasazování nových technologií.

V praxi tak bývá běžné, že to, co lze naprosto přirozeně použít v povrchových provozech, v hlubinném prostředí prostě použít nelze, např. protože v daném prostředí není dostupná na nových technologiích založená komunikační infrastruktura. Dalšími omezeními jsou technicko-legislativní požadavky na provoz zařízení, především pak normy spojené se Evropskou směrnicí ATEX (2014/34/EU) [1], která značně komplikuje nasazování nových technologií. Tématem práce je využití moderních technologií z oblasti RFID při řešení otázek bezpečnosti provozu, dopravy a logistiky v náročných provozech.

2 Přehled stavu poznatků v oblasti systémů aktivního RFID

Kapitola se zabývá aktuálním stavem v dané oblasti, možnostech využití v dopravě a logistice. Součástí kapitoly je také obecný popis technologií, jejich rozdělení a popis základních metod pro identifikaci a lokalizaci.

2.1 Současný stav výzkumu a zdrojů informací

Protože hlavním tématem je řešení otázek bezpečnosti důlních a jiných těžkých provozů, lze danou tematiku v obecné rovině rozdělit do dvou oblastí – oblast důlního a těžebního průmyslu a oblast RFID a IT technologií. První oblast je z hlediska řešené problematiky v relativně velmi ustáleném stavu. Vzhledem k tomu, že se jedná o tradiční odvětví, je dostupná velmi rozsáhlá informační základna.

Druhou oblastí je oblast RFID a s tím spojených IT technologií. Vzhledem k tomu, že předmětem disertační práce je především velice specifická podoblast aktivního RFID, která je – na rozdíl od pasivního RFID – v prudkém rozvoji, je tato podoblast z hlediska informačních zdrojů značně dynamická. V závislosti na konkrétní technologii je pak většina zdrojů závislá na výrobcích konkrétních komponent, bez jejichž existence by byla informační základna silně teoretická. Konkrétní relevantní informace lze pak čerpat nejvíce z materiálů publikovaných výrobcem nebo společnostmi, jež vytvořili konkrétní aplikace a nasadili je v reálném provozu.

V rámci analýzy současného stavu informací bylo studována řada zdrojů z odborné literatury. V obecné rovině je popsán vývoj systémů RFID od počátku, přes současný stav až pro predikci vývoje RFID v budoucnu v [2]. Dokument se ale věnuje především vývoji RFID jako takového s malým přesahem do aplikací RTLS. Přesto je dokument pro danou problematiku relevantní.

Návrh typické aplikace s danou řešící danou problematiku popisují CAVUR, Mahmut a DEMIR, Ebubekir v [3]. Výstupem je ale systém indoor lokalizace založený na technologii Aktivního RFID s algoritmem predikce polohy na základě analýzy RSSI. To je doposud známý a funkční systém, nelze ale zcela obecně přijmout tvrzení autorů, že lze dosáhnout požadované přesnosti lokalizace s požadovanou spolehlivostí a v daných podmínkách. U systému založeného na zpracování RSSI nelze postavit některé ze zamýšlených aplikací systému, jako např. anti kolizní systém.

Využití nových technologií, včetně RFID v těžebních provozech je popsáno také v práci zabývající se E-UTM [4]. Zde se jedná ale především obecně o zvyšování efektivity výroby a dále o zvyšování bezpečnosti nahrazování pracovníků neživou silou.

Způsoby nasazení Industry 4.0 v těžebním průmyslu, které principiálně využítí technologií RFID, potažmo RTLS popisuje LÖÖW, Joel; ABRAHAMSSON, Lena a JOHANSSON [5]. Jedná se ale opět spíše na provoz zaměřenou práci, která bezpečnosti pracovníků detailněji neřeší.

SALIM, Omar; DEY, Shuvashis; MASOUMI, Hossein a KARMAKAR, Nimai Chandra pak popisují aplikaci pro zvýšení bezpečnosti v důlním průmyslu v oblastech dopravy pomocí pásových přepravníků [6]. Jedná se o práci, která zavádá staro-nové téma bezpečnosti přepravy pomocí osob. V ČR byla přeprava osob pomocí pásových dopravníků využíváných i pro přepravu materiálu v podstatě zakázána. V celé řadě zemí je ale tento způsob hojně využíván pro přepravu pracovníků na a z pracoviště, a to i na poměrně velké vzdálenosti. Z této práce lze tedy částečně vycházet i v rámci řešeného tématu.

ZARE, Masoud; BATTULWAR, Rushikesh; SEAMONS, Joseph a SATTARVAND, Javad pak popisují celou řadu komunikačních technologií, více či méně použitelných v cílovém prostředí [7]. V obecné rovině se ale jedná spíše o větší a nákladnější systémy.

Pro komplexnost byla provedena analýza stávajícího stavu informací v různých oblastech využití RFID s ohledem na prostředí [23], [24], na způsob zpracování dat a lokalizační algoritmy [18], [20], [25], na způsob řešení hardwarových částí systémů, jako anténní část [21], [28], případně periferie a senzorickou část [21].

2.2 Definice a výběr specifických druhů dopravy

Specifickými druhy dopravy se rozumí takové provozy a prostředí, v rámci kterých je doprava omezena fyzikálním prostředím, legislativou, případně jinými překážkami. V rámci této práce bylo vybráno několik prostředí, kdy všechna mají tu společnou vlastnost, že se není možné spolehnout na využití jinak běžných moderních prostředků a telekomunikačních sítí, jako je např. GPS, GSM a v některých případech i pokrytí signálem WiFi. Pro práci byla vybrána tři specifická prostředí.

2.2.1 Důlní prostředí a hlubinné liniové stavby

Toto prostředí je specifické především nedostupností standardních bezdrátových sítí a velmi těžkými podmínkami v jakých musí být jakékoliv technické prostředky provozovány. V důlních provozech je dále ve většině případů také nutné zohledňovat možnost přítomnosti výbušné atmosféry, proto je ve většině případů nutné všechny systémy provozovat v souladu s požadavky směrnice ATEX. Dalším specifikem je také to, že toto prostředí nelze považovat za stabilní – vždy je nutné v rámci návrhu a provozu jakéhokoliv systému počítat s tím, že se prostředí neustále mění. Například v důlních provozech je většina prostorů budována jako „pohyblivá“ a všechny technické prostředky, včetně veškeré infrastruktury tedy musí být navrženy jako mobilní. V rámci důlních provozů pak bývá využití různých druhů elektronických systémů pro zvyšování bezpečnosti zakotveno v legislativě.

2.2.2 Povrchové stavby a otevřené průmyslové provozy

Těmito provozy se rozumí především rozsáhlé stavby, kde je předpoklad pohybu dopravních a stavebních prostředků. Dále se jedná o povrchové doly a lomy. V prostředí těchto provozů byla řešena především otázka kolize dopravních a stavebních strojů a kolize těchto prostředků

s pracovníky. Typickým příkladem je řešení bezpečnosti pracovníků v pracovní zóně strojů jako je rýpadlo, dozer apod.

2.2.3 Indoor a outdoor logistická centra

Vnitropodniková logistika je specifická především tím, že je ve většině případů kladen vysoký důraz na efektivitu, která je ovlivněna jak plánováním, tak především rychlostí jednotlivých procesů. V rámci tohoto tlaku, kdy pracovníci mohou z vlastní vůle zvyšovat efektivitu především zkracováním času jednotlivých operací, tedy zvyšováním rychlosti, dochází velice často k rizikovým situacím a nebo nehodám. V těchto typech provozů je pak zvyšování bezpečnosti za použití prostředků jako jsou antikolizní systémy velmi výhodné.

2.3 Analýza technologie RFID

Technologie RFID je možné rozdělit na pasivní a aktivní. Existují také kategorie na pomezí těchto dvou základních [27], jako například semi-aktivní nebo semi-pasivní, ty ale vzhledem k faktu, že se práce z principu věci zabývá kategorií aktivní, nebudou do popisu zahrnuty.

2.3.1 Pasivní RFID

Pasivní RFID je kategorie, která je charakterizována především tím, že identifikační tag ve své konstrukci nezahrnuje napájecí zdroj (např. primární článek nebo akumulátor). Napájení tagu je pak realizováno bezdrátovým přenosem elektrické energie za čtecího zařízení (dále jen čtečky) do tagu, a to především indukční nebo radiofrekvenční vazbou.

Napájení indukční vazbou je realizováno především u systémů pracujících ve frekvenčních pásmech 125 kHz nebo 13,5 MHz [8]. Systémy této kategorie se vyznačují svou jednoduchostí, proto jsou značně rozšířené. Poskytují ale poměrně malou čtecí vzdálenost, maximálně desítky centimetrů. Nejčastějším využitím pro tyto systémy jsou různé druhy přístupových a identifikačních systémů a v současné době také platební systémy.

Napájení tagu prostřednictvím vysokofrekvenčního rádiového přenosu je realizováno u systémů UHF, pracujících v pásmu 868 MHz (region I) [9]. Tyto systémy jsou na straně čteček konstrukčně složitější, poskytují ale výrazně větší čtecí vzdálenost, prakticky až malé desítky metrů. Využití této technologie je v současné době především v průmyslu, dopravě a logistice, především pak v automatizaci procesů identifikace objektů. Některé systémy v této kategorii nejsou v této práci popsány, protože se nedotýkají řešené problematiky.

Společným rysem pasivních systémů z pohledu řešené problematiky je především to, že nejsou vhodné pro aplikace řešící bezpečnost lidí. Zásadním důvodem je to, že pro spolehlivou funkci je třeba vytvářet, případně aktivně upravovat podmínky.

Tuto skutečnost lze popsat také tak, že pro správnou funkci například platebního či přístupového systému musí člověk mít vůli pro jeho použití. Pokud chce člověk projít dveřmi, tak vyvine snahu systém použít a upraví podmínky (například přiblíží kartu blíže ke čtečce, případně změní úhel,

vytáhne kartu z peněženky). Naopak u systému bezpečnostního, monitorovacího musí být funkčnost zaručena i za předpokladu, že člověk vyvine určitou míru snahy pro to, aby systém funkční nebyl.

Z výše uvedeného je patrná nevhodnost technologie pasivního RFID pro bezpečnostní aplikace, protože je velice snadné pozměnit podmínky tak, aby systém spolehlivě nefungoval, a to jak úmyslně, tak neúmyslně.

Dalším kritickým nedostatkem pasivních technologií je omezená nebo žádná možnost určovat polohu tagu vůči čtečce jinak než prostou detekcí přítomnosti tagu ve čtecí oblasti. Vzhledem k popsaným nevýhodám a nedostatkům nejsou další vlastnosti těchto systémů, jako je kapacita paměti tagů atd. pro tuto práci relevantní.

2.3.2 Aktivní RFID

Systémy aktivního RFID se vyznačují především tím, že tagy ve své konstrukci zahrnují zdroj napájení. Zdrojů může být řada typů, kritickou vlastností pro tuto práci je pak především to, že tag může pracovat bez ohledu na přítomnost nebo nepřítomnost čtečky. Může tak vykonávat celou řadu činností bez ohledu na to, jestli je nebo není v dosahu infrastruktury.

Tagy aktivního systému mohou přenášet data oboustranně ve smyslu komunikace se čtečkou, mohou komunikovat také mezi sebou. To jsou pro zamýšlený model kritické vlastnosti.

Systémy aktivního RFID jsou konstruovány pro celou řadu frekvenčních rádiových pásem. Od velmi nízkých frekvencí v řádu jednotek kHz, které jsou využívány např. v systémech detekce osob zavalených lavinou či horninou až po systémy pracující na velmi vysokých kmitočtech v řádu GHz s velmi širokým spektrem.

Pro disertační práci jsou důležité systémy pracující v pásmu 868 MHz, protože se jedná o pásmo využití ve velmi rozšířeném systému ISI – systému [10], jenž pro sledování polohy pracovníků a dopravních prostředků v ohrožených oblastech využívá mimo jiné OKD. Tento systém v některých parametrech odpovídá předpokládaným vlastnostem vytvářeného modelu, nicméně využívá pro lokalizaci objektů metodu založenou na RSSI. To je metoda velmi vhodná pro daný účel, ale neposkytuje zdaleka požadované výsledky pro použití v modelu systému pro zvyšování bezpečnosti v dopravě.

2.4 Legislativní rámec využití RFID

Obecně se využití RFID řídí legislativními předpisy a nařízenými v několika rovinách. Jedná se především o technické řešení a vlastnosti řídicí se národními normami, jež jsou rozdílné dle jednotlivých regionů a v rámci EU jsou harmonizovány, dále pak licenčními ujednáními, které řeší využití rádiového spektra a dále pak dle určení a využití technologie, kde legislativa řeší především jak budou data ze systémů RFID zpracována, využita a jaké z tohoto vyplývají pro všechny zúčastněné práva a povinnosti.

2.4.1 Technické normy

Z hlediska základních technických vlastností každého výrobku uváděného na trh v rámci EU, musí být každý výrobek opatřen tzv. prohlášením o shodě a označen značkou CE. Toto označení dokládá, že byl výrobek před uvedením na trh Evropského hospodářského prostoru podroben posouzení, zda splňuje všechny legislativní požadavky, jež jsou na něj kladeny [11]. Analogicky k tomuto přistupují i další světové regiony, i když se svými specifiky.

V rámci EU je základním dokumentem pro posuzování technických vlastností výrobku, případně skupiny výrobků sestavených do funkčního celku (systému), evropská harmonizovaná norma. V případě některých norem pak musí být prohlášení o shodě parametrů s touto normou vystavena pouze na základě zkoumání a vystavenému protokolu tzv. notifikovanou osobou. V případě RFID se toto týká především v souvislosti s parametry vysokofrekvenčních a rádiových částech systému. Dále pak v oblasti vzájemných interakcí a EMC [12], [30], [31], [33], [34], [35], [37], [38] a následně také bezpečnost informačních systémů [36].

V případě systému nebo výrobku v prostředí s možností přítomnosti výbušné atmosféry je nezbytné také prokázat shodu s požadavky směrnice ATEX. Zde je již zcela nezbytné posouzení (certifikace) notifikovanou osobou a striktní dodržení všech souvisejících předpisů ve všech úrovních od výrobce až po uživatele systému nebo výrobku, a to s plnou trestně právní odpovědností.

V oblasti bezdrátové rádiové komunikace je nutné respektovat technické normy týkající se využití rádiového spektra [43], a dále kapitola 1.3.2. Protože se jedná o zařízení elektrotechnická, je třeba respektovat řadu technických norem řešících bezpečnost elektrických systémů [32], [39], [40]. Problematika bezpečnosti elektrotechnických zařízení je však mnohem komplexnější. Kromě ryze technických norem je pak třeba zohlednit také celou řadu evropských a národních směrnic [41], [42].

2.4.2 Využití kmitočtového spektra

Tato část legislativního rámce vychází především z národních norem a nařízení. V obecné rovině ale lze svět rozdělit do několika regionů (nejčastější dělení je Region 1 až 3) z hlediska využití kmitočtového spektra. Toto dělení je ale zásadní především pro pásmo UHF, tj oblast 800 MHz – 900 MHz. V rámci EU toto definuje především norma ETSI EN 300 220 [13], která upravuje provoz zařízení RFID a SRD. Pro UWB je to pak především sada norem ETSI EN 302 065 [14], pro kmitočtové pásmo 2,4 GHz pak [29] pro využití širokopásmové technologie pro lokalizaci.

Je třeba zdůraznit, že v rámci těchto norem se jedná především o technické specifikace zařízení využívající dané části kmitočtového spektra, popisující technické požadavky a metodiky a provedení testování těchto technických parametrů. V rámci našeho regionu a především pak EU lze situaci považovat za relativně přehlednou a v rámci jednotlivých zemí harmonizovanou. nad touto technickou částí ještě leží licenční podmínky využití daných kmitočtových pásem a ty se řídí

národní legislativou. V rámci té je pak určen národní regulátor, který nad touto legislativou dohlíží na provoz systémů v rámci dané země.

V případě ČR je národním regulátorem ČTÚ. Zásadním pro systémy RFID a RTLS (v obecné rovině) je pak všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2021-4 [15], které upravuje provozování SRD v rámci ČR. Jedná se o opatření, které upravuje práva a povinnosti provozovatelů jednotlivých systémů tak, aby byla zaručena jejich práva na toto provozování, zároveň ale ČTÚ provádí praktický dohled nad dodržováním povinností v rámci tohoto oprávnění a dodržování technických parametrů zařízení a systémů dle příslušných technických norem. Kritickými faktory v rámci tohoto dohledu jsou pak vzájemné kolize systémů využívající stejné kmitočtové úseky a dále pak kolize s jinými systémy a službami.

2.5 Využití RFID pro bezpečnost

Využití RFID pro bezpečnostní aplikace lze rozdělit do několika zásadních rovin. Tyto roviny, jež budou stručně popsány, nesouvisí s technickým provedením ani řešením a podobnost nebo shodnost použitých pojmů je v tomto bodě kontraproduktivní, ale nelze se jí zcela vyhnout. Proto je problematika používané terminologie jedním z důležitých aspektů při sestavování nového modelu. Následující podkapitoly nastiňují rozložení jednotlivých rovin v oblasti bezpečnostních aplikací. Dělení na tyto roviny se pak v určitých oblastech překrývá.

2.5.1 Legislativa

V této rovině je řešena legislativa využití RFID. Pro některé specifické případy existuje legislativa, která jednoznačně definuje využití technických prostředků pro řízení bezpečnosti. V takových případech je využití RFID přímým důsledkem existence takové legislativy. Jedná se především o oblasti, kde je legislativou vyžadována

- Restrikce – především pak restriktivní řízení přístupu do potenciálně nebezpečných prostorů
- Kontrola – případy, kdy je nutná kontrola přístupu nebo přítomnosti osob, objektů nebo prostředků
- Evidence – z legislativních důvodů je nezbytná evidence a archivace o pohybech a událostech

2.5.2 Prevence

V této rovině je využití RFID spíše pasivního charakteru (nemá spojitost s pasivní technologií RFID). Cílem použití RFID v bezpečnostních aplikacích je pak především předcházení vzniku škodlivých událostí.

Kritickými prvky takové aplikace jsou pak především

- Evidence – evidence událostí

- Analýza – analytické procesy nad získaným souborem dat a na základě těchto analýz vytvořená opatření
- Řízení – provádění a kontrola provádění vytvořených opatření

2.5.3 Aktivní řízení procesů

Jedná se o rovinu, kdy se snižování rizik děje automatickými zásahy do procesů. Takovými příklady může být omezení přístupu nežádoucích osob nebo objektů, zamezení vjezdu vozidla nebo také varování před nadcházející kolizí. Jedná se tedy o takové využití, kde dochází k přímému ovlivnění procesu tak, aby ke škodlivé události nedošlo.

2.5.4 Krizové řízení

Jedná se o rovinu, která definuje (případně ovlivňuje) postupy v okamžiku, kdy ke kritické události už došlo. Jedná se například o možnosti řízení záchranných složek na základě získaných informací před vznikem kritické události, případně využití informací pro řízení záchranných složek v reálném čase, pokud je systém i po vzniku kritické situace nadále funkční [26].

2.6 Aplikace využívající aktivní RFID v dané problematice

V disertační práci budou využity pro sestavení nového modelu zkušenosti a data z aplikací, které jsou již v reálném prostředí v provozu. Je třeba podotknout, že popisované zkušenosti vycházejí z největší části z autorovy praxe, případně praxe týmů, jejichž byl součástí a vzhledem k rozsáhlosti je lze považovat za zcela relevantní.

2.6.1 Zkušenosti v provozu z ČR

Zkušenosti autora z provozu v ČR lze rozdělit do dvou průmyslových provozů. Důlní těžební a automobilový průmysl. V případě důlního těžebního průmyslu se jedná o zkušenosti s vývojem, nasazením a provozováním systému ISI v rámci průmyslového těžebního podniku. Systém ISI je v ČR vyvinutý a vyráběný systém provozovaný od roku 2010 v dolech společnosti OKD. V následujícím roce se stal systém ISI (nebo jeho technické obdoby) legislativně nezbytným pro provoz důlních děl v oblastech 3. stupně nebezpečí důlních sesuvů. Systém byl či je provozován na dolech ČSA, Darkov, 9. květen, Lázy, ČSM sever a jih, Paskov. Jeho provoz je vyžadován a kontrolován BÚ.

Jedná se o systém RTLS založený na principu měření RSSI v pásmu 868 MHz. Systém dohlíží na polohu pracovníků v kritických oblastech, přičemž zajišťuje především evidenci pohybu konkrétních osob v daných zónách, jejich počet v těchto zónách a oprávnění se v těchto zónách pohybovat.

V provozním režimu také zajišťuje dispečerské řízení pohybu pracovníků jako přidanou hodnotu k tomuto jinak bezpečnostnímu systému. Vzhledem k tomu, že z principiálního hlediska lze pomocí tohoto systému sledovat v podstatě jakýkoliv objekt, je tento systém druhotně využíván také ke sledování objektů řešících podpovrchovou logistiku. I když se jedná o systém robustní

a značně rozšířený, využitý princip lokalizace umožňuje pouze omezenou aplikaci v otázkách bezpečnosti pracovníků v podpovrchové dopravě a logistice. Je to dáno především rozlišením a přesností lokalizace. V obecné rovině systém dosahuje relativního rozlišení určení polohy v oblasti ± 5 m a přesnost je udávána v oblasti ± 10 m. To zcela jistě dostačuje pro řešení bezpečnostních otázek v případě důlních nehod.

Nemalá část zranění důlních pracovníků je ale spojena přímo s podpovrchovou dopravou. Pokud se jedná o incidenty spojené s nebezpečným přiblížením nebo nebezpečným pohybem pracovníků v pracovních zónách pracovních nebo dopravních prostředků, byla v průběhu cca 10 let provedena řada experimentů v reálném provozu, které měly za cíl řešit možnosti zvýšení bezpečnosti podpovrchové i povrchové dopravy pomocí tohoto systému.

Bohužel téměř všechny modely využití tohoto systému byly na základě těchto experimentů zavrženy a opatření na základě těchto modelů nebyla zavedena do praxe. Z těchto závěrů pak vychází autorova motivace k vytvoření nového modelu využití RTLS systémů pro zvýšení bezpečnosti podpovrchové, případně povrchové dopravy v důlních těžebních provozech. Na základě zkušeností z projektů v automobilovém průmyslu pak jako jedna z možných technologických komponent tohoto modelu je využití aktivního RFID a lokalizace v reálném čase s využitím technologie UWB.

Z hlediska zkušeností z automobilového průmyslu se jedná o projekt CarRFID provozovaný ve výrobních závodech společnosti Škoda. Projekt CarRFID je soubor technických prostředků využívající RTLS systém postavený na technologii UWB, určený pro lokalizaci automobilů, výrobních a logistických prostředků a osob.

Jedná se o systém primárně určený pro řízení efektivitu výroby, řízení kvality výroby. Vzhledem k ohromnému vzorku získaných zkušeností existují předpoklady pro využití těchto zkušeností i v zamýšleném modelu.

2.6.2 Zkušenosti z provozů v zahraničí

Tyto zkušenosti lze rozdělit do dvou základních skupin. V první se jedná o zkušenosti, kde se autor účastnil přímo, ve druhém případě se nejedná o přímou zkušenost, ale zkušenost zprostředkovanou.

Zkušenosti v reálném provozu byly získány s nasazováním a provozem systému ISI v Turecku a Polsku. V Turecku je v provozu přibližně 40 instalací tohoto systému, v disertační práci ale budou využity především zkušenosti z dolu Imbat, který je jedním z největších provozů tohoto systému vůbec. Vzhledem k úrovni řízení bezpečnosti v této zemi, a především pak některým tragickým událostem v nedávné minulosti je zde značný prostor pro vytváření opatření, která by vedla ke zvýšení bezpečnosti. Jen v tomto dole se jedná o desítky kilometrů důlních děl, kde se pohybuje v reálném provozu několik stovek kusů prostředků dopravy a logistiky a řádově tisíce lidí. To v kombinaci s velice složitými a náročnými podmínkami zavrhuje vysoké míře pravděpodobnosti vzniku nehod.

Dalším zdrojem informací a zkušeností pak budou experimenty s nasazením systému založeném na technologii UWB. Tento systém má za úkol eliminovat nebezpečné přiblížení pracovníků. Experimenty byly prováděny v reálném provozu v ruském železnorudném dole společnosti KMA Ruda, a to v průběhu roku 2019.

Prováděné experimenty v obecné rovině prokázaly použitelnost tohoto systému v některých kritických situacích, které zahrnovaly především neúmyslné nebezpečné přiblížení pracovníků k pohybujícím se dopravním prostředkům, především pak nakladačům a nákladním automobilům. Vzhledem k období těsně před restrikcemi spojenými s pandemií CoVid19 a k tomu, že se dílo nachází v Belgorodské oblasti v Ruské federaci, nelze v dohledné době předpokládat dokončení započatých experimentů v tomto místě. Získané zkušenosti lze ale s výhodou použít při vytváření nového modelu.

Další zkušenosti pak pocházejí z nasazení systému ISI v Íránu, Indii, Zimbabwe. Tyto zkušenosti jsou sice zprostředkované, rozšiřují ale pohled na jiné vnímání otázek bezpečnosti provozu a možnosti využití vytvářeného modelu i v širším světovém měřítku.

2.7 Shrnutí analýzy

Na základě analýzy lze tvrdit, že problematika využití systémů RFID a RTLS pro zvyšování bezpečnosti v důlních provozech je u nás i ve světě řešená. Nicméně jak z dostupných materiálů a publikací, tak z autorových vlastních zkušeností vyplývá, že se jedná pouze o okrajové téma. Je velice obtížné nalézt ucelené informace o tom, jak taková řešení ovlivňují bezpečnost jako takovou.

Naprostá většina dostupných materiálů se zabývá spíše technickými vlastnostmi komerčního produktu, případně naopak zase vlastnosti použitých technologií. V případě reálného nasazení se pak interní dokumentace podniků zabývá především ohraničenými případy a v obecné rovině pak především tím, aby nasazením takového systému bylo formálně vyhověno legislativním a bezpečnostním požadavkům.

Dalším aspektem je to, že v důlních provozech je v rámci velmi striktním technickým a legislativním požadavkům obtížné prosazovat nové technologie. V praxi je tak běžné, že ty systémy, které nemají přímý a jednoduše měřitelný pozitivní vliv na produkci jsou upozadovány a tlak na inovace je buď čistě formální nebo přichází až s příchodem kritických případně fatálních situací [16].

V současné době jsou řešeny především ohraničené úlohy z hlediska zvyšování bezpečnosti. V rámci důlních provozů se jedná z větší části o řešení legislativních požadavků. V ostatních případech jsou pak řešeny především otázky zvyšování efektivity, a to na základě následného pracování získaných dat (logistika atd.). To, co je novostí v rámci této práce je především kombinace všech těchto požadavků tak, aby výsledný model přinesl primárně zvýšení bezpečnosti ve specifických druzích provozů, ale zároveň poskytoval investorovi i ekonomickou perspektivu s využitím takového řešení. Toto je zásadní překážka v rychlejší nasazování moderních systémů

založených na technologiích aktivního RFID. Novostí je především využití kombinace několika režimů lokalizace, nikoliv využití samotné technologie.

Z výše uvedeného vyplývá, že lze najít opodstatnění pro vznik disertační práce. Jak z pohledu potřeby popisu současného stavu a jeho hodnocení, tak z pohledu potřeby technického pokroku v daném oboru.

3 Cíl disertační práce

Cílem práce je vytvoření modelu a jeho popisu, který bude s využitím technologií aktivního RFID pozitivně ovlivňovat bezpečnost pracovníků v podpovrchové dopravě. Model je vytvořen na základě zkušeností získaných z reálných provozů a ze zkušeností z experimentů s novými technologiemi v oblasti aktivního RFID. Jádrem experimentů je založeno na testech technologií aktivního RFID, především pak založených na principech UWB ve složitých podmínkách podpovrchové dopravy a logistiky, zejména důlního průmyslu.

Model je strukturován do několika úrovní. První úroveň zahrnuje fyzickou vrstvu samotného rádiového systému. Zde je definována vhodná technologie pro spolehlivou rádiovou identifikaci všech zahrnutých objektů, jako je pevná infrastruktura, prostředky realizující pohyb, manipulaci a dopravu a sledované osoby.

Druhá vrstva modelu stanovuje propagaci získaných informací napříč jednotlivými prvky systému. Protože se předpokládá model s decentralizovaným zpracováním a vyhodnocením dat, jedná se o klíčovou část. U výstupu se předpokládá, že získaná data jsou primárně zpracována v centrálním uzlu a propagována dispečerským způsobem, zároveň jsou ale určité kritické funkce realizovány v koncových bodech systému a vyhodnocovány v reálném čase bez nutnosti navázaného spojení s centrálním uzlem. Tuto situaci lze nejlépe demonstrovat na příkladu signalizace nebezpečného přiblížení pracovníka k dopravnímu prostředku, případně nebezpečného vzájemného přiblížení dvou dopravních prostředků.

Třetí vrstva řeší zpracování dat v centrálním uzlu. Toto zahrnuje zpracování evidence jednotlivých identifikovaných objektů, jejich lokalizaci v reálném čase, propagaci informací v dispečerských pracovištích a následnou archivaci těchto dat. Jedná se ve své podstatě vstupní analýzu pro vytvoření IT infrastruktury nezbytné pro provoz takového systému v reálném provozu.

Čtvrtá vrstva popisuje integraci navrženého modelu do reálné organizační struktury. Jak již bylo uvedeno, vzhledem k získaným zkušenostem existuje nízká připravenost organizační struktury pro zavádění nových opatření a vysoká míra přirozeného odporu všech dotčených pracovníků. Proto je analýza postupu při zavádění těchto opatření do reálného provozu kritická a naprosto nezbytná.

4 Koncept řešení

Kritickou úvahou pro dosažení stanoveného cíle je navržení modelu bezpečnostního systému a všech jeho zásadních součástí s využitím technologie aktivního RFID v kombinaci systému RTLS s využitím technologie UWB. K dosažení stanovených cílů byly stanoveny základní rámce pro jednotlivé etapy.

4.1 Analýza současného stavu

Pro vytvoření fungujícího modelu je třeba v první řadě analyzovat současný stav. Ten je třeba hodnotit v mnoha rovinách:

- Současný legislativní rámec
- Skutečný stav v jednotlivých provozech
- Požadavky a připomínky dotčených pracovníků
- Požadavky a připomínky středního managementu

Na základě této analýzy lze sestavit rámec požadavků pro výsledný model. Na základě těchto požadavků je vybrána nejvhodnější technologie pro realizaci systému, který by tyto požadavky naplňoval. Poté je sestaven soubor požadavků, na základě kterého je prováděno místní šetření a experimentální ověření použitelnosti a vhodnosti vybrané technologie.

Z hlediska provádění experimentů a pozorování v reálném provozu je třeba analyzovat legislativní a provozní podmínky pro tyto kroky. Vzhledem ke zvolenému cílovému prostředí je třeba důkladně zvážit, jaký druh experimentů a testování je vůbec možné v daném prostředí provést. Pro demonstraci takového omezení lze uvést příklad, kdy bude třeba do reálného provozu vnést elektronické měřicí zařízení (např. měřicí rádiový přijímač) a k tomu nezbytné IT vybavení (např. počítač nebo tablet). Pokud je experiment s takovým vybavením prováděn v podzemí v prostředí, které není definováno jako prostředí s možností výskytu výbušné atmosféry, nejsou tomuto kladeny žádné překážky. Pokud ale bude třeba takový experiment provádět například v černouhelném hlubinném dole – a toto je také cílovým prostředím – tak nastává kritický problém. Černouhelné doly jsou z principu klasifikovány jako prostředí s možností výskytu výbušné atmosféry a obecně platí zákaz vnosu jakéhokoliv elektrického zařízení, s výjimkou zařízení splňujících směrnice ATEX. Taková zařízení jsou ale jednak velice nákladná a v některých případech ani nejsou reálně dostupná – např. zmíněná měřicí zařízení.

V takovém případě bylo nutné o krátkodobé povolení vnosu zařízení do tohoto prostředí formálně požádat vedení dolu, které musí zajistit potřebné podmínky pro takový experiment nebo měření. Součástí těchto opatření pak musí být dostatečné personální zajištění, kontinuální dohled nad stavem lokální atmosféry a koncentrací jednotlivých plynných složek, případná účast složek záchranného systému. Toto s sebou nese značnou organizační i finanční zátěž.

V případě potřeby dlouhodobého umístění takového zařízení je třeba zpracovat veškeré provozní a bezpečnostní otázky a žádat o povolení vyšší autoritu, v případě ČR Báňský úřad. Toto je zcela kritické pro návrh experimentů a měření v reálném prostředí tak, že mohly být realizovány.

4.2 Provedení experimentů a měření v reálném provozu

Předpokladem k dalšímu postupu je výběr a ověření funkčnosti všech vybraných komponent budoucího systému a ověření jejich funkčnosti v reálném prostředí. Na rozdíl například od IT systémů, kde lze pro vytváření modelu využít snadno dostupné nástroje, hardwarová část, především pak komponenty vysokofrekvenční lze simulovat nebo modelovat jen velice obtížně a vše je nutné ověřit reálnými experimenty.

Pro naprostou většinu experimentů byla vybrána pracoviště společnosti OKD, kde jsou v současné době již provozovány elektronické systémy zajišťující monitoring osob a dopravních prostředků pomocí systému založeného na aktivním RFID, ale na technologii RTLS generačně starší, než je technologie vybraná pro sestavovaný model systému, a to technologie založená na měření RSSI.

4.3 Návrh modelu

Modelem uvažovaného systému je kompletní návrh a popis všech jeho součástí založený jak na požadavcích, tak na výsledcích provedených experimentů a měření. Pro vytvoření modelu jsou vybrány vhodné a dostupné nástroje, zejména popis modelu a UML.

4.4 Dílčí závěry

V průběhu analýzy, experimentů i návrhu modelu byly výstupy jednotlivých etap diskutovány s dotčenými pracovníky, členy managementu dolu a vývojovými pracovníky z dotčených oborů. Na základě těchto diskusí jsou také vytvářeny dílčí závěry, které jsou stěžejní při rozhodování o klíčových vlastnostech modelu. Model jako takový musí být použitelným základem pro následný vývoj a realizaci systému pro zvýšení bezpečnosti.

5 Přehled metod použitých k dosažení cíle práce

Technologie a systémy využívající prvků aktivního RFID je možné následně použít pro aplikaci v modelu provozu některého z vybraných důlních děl. V systému lokalizace osob a dopravních prostředků je kladen důraz na řešení bezpečnosti osob v rámci dopravních a logistických procesů. Z toho vyplývá nutnost provádění výzkumných prací v terénu ve značně ztížených podmínkách a s omezenými možnostmi sběru dat.

Je to zapříčiněno především prostředím, ve kterém existují dotčené provozy, kde je z bezpečnostních důvodů značně omezeno použití elektronických systémů a zařízení. To značně ovlivňuje výběr metod, které lze pro dosažení cíle disertační práce použít a do značné míry budou využívány a upravovány především metody empirické v kombinaci s dalšími metodami aplikovaného výzkumu. Pro zpracování výsledků a vytvoření modelu jsou využity párové logické metody vědecké práce [17].

5.1 Empirické metody

Pro dosažení cíle disertační práce bylo třeba velké množství pozorování skutečného stavu. V daném prostředí a v rámci zkoumaných procesů není vše jednoduše popsatelné a kvantifikovatelné. Navíc v rámci zkoumání vyplynuly některé okolnosti a vlastnosti systému, které nebylo v počáteční fázi výzkumu dost dobře možné předpokládat.

5.2 Aplikovaný výzkum

Cílem je zvýšit míru bezpečnosti určitých procesů. Základem aplikačního výzkumu je stanovení použití příslušné technologie a jakými způsoby je možné je v daném prostředí a procesech využít, vzhledem k jejich omezením tak, aby model pracoval správně.

5.3 Akční výzkum

Bylo třeba zjistit, jak lze vybranou technologii z jejich použití vzniklé procesy zajistit organizačně. Ze zkušenosti a experimentů lze s velkou mírou jistoty tvrdit, že zavedení opatření, která by měla zajistit zvýšení míry bezpečnosti nezbytně souvisí s přirozenou neochotou dotčených pracovníků a organizačních složek tato opatření přijmout.

5.4 Logické metody

5.4.1 Abstrakce – konkretizace

Tyto metody jsou využity především pro vytvoření myšlenkového modelu systému, vydělení jeho podstatných vlastností a oddělení od těch, které nejsou v důsledku zásadní a podstatné.

5.4.2 Analýza – syntéza

Metoda analýzy byla využita pro rozbor a rozdělení získaných poznatků, a to jak ze studia dostupných materiálů a vědeckých prací, tak získaných jinými vědeckými metodami. Metoda syntézy je pak využita při spojování těchto poznatků a informací do dílčích funkčních celků a v důsledku pak samotného modelu.

5.4.3 Indukce – dedukce

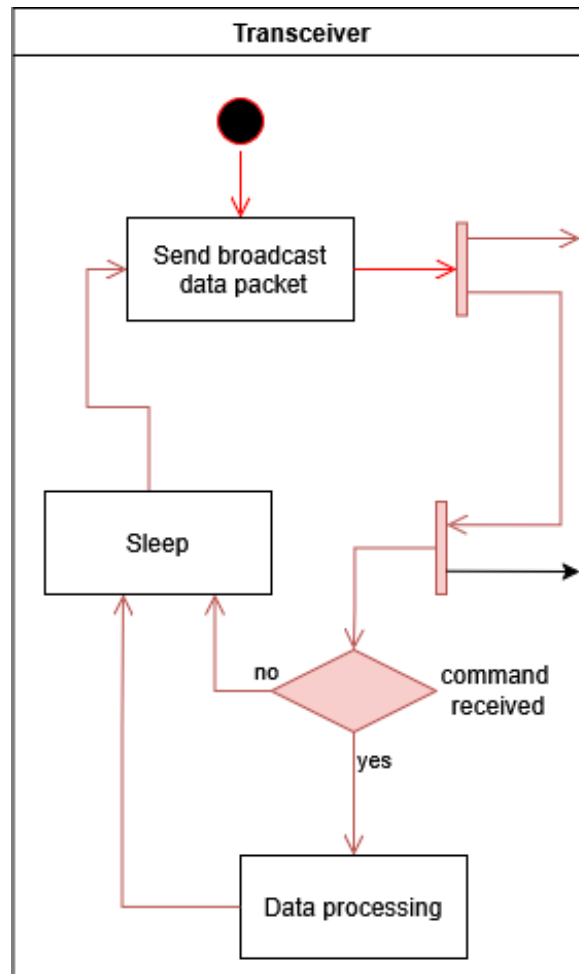
Indukce patří mezi logické metody a je využita pro vytvoření vlastního pohledu na daný systém na základě získaných dat a informací vytváření dílčích hypotéz. Tyto hypotézy vznikaly především při vytváření otázek ohledně vlastností a chování pozorovaného systému.

Lze konstatovat, že dedukce je opačným postupem než indukce. V disertační práci je dedukce využita při zpracování výsledků a ověřování jednotlivých hypotéz.

5.5 Modelování

Cílem práce je vytvoření funkčního modelu v praxi použitelného systému. Pro účely modelování jsou využity moderní prostředky, v tomto případě jazyk UML (obr. 1).

UML (Unified Modeling Language) je v podstatě grafický jazyk, který se používá pro snadnou vizualizaci, specifikaci, navrhování a dokumentaci softwarů a informačních systémů. [44], [45] UML definuje standardy pro strukturu diagramů a její jednotnost, lze tak realizovat nejrůznější schémata napříč procesy. Navržený model je zjednodušením reality, kdy se zaměřuje na důležité faktory z různých pohledů nastavení a lze jim navrhnout komplexní systémy, což je užitečné i pro důlní provoz a zvyšování bezpečnosti v nich. Jedním z nejrozšířenějších využití UML je modelování objektově orientovaných systémů.

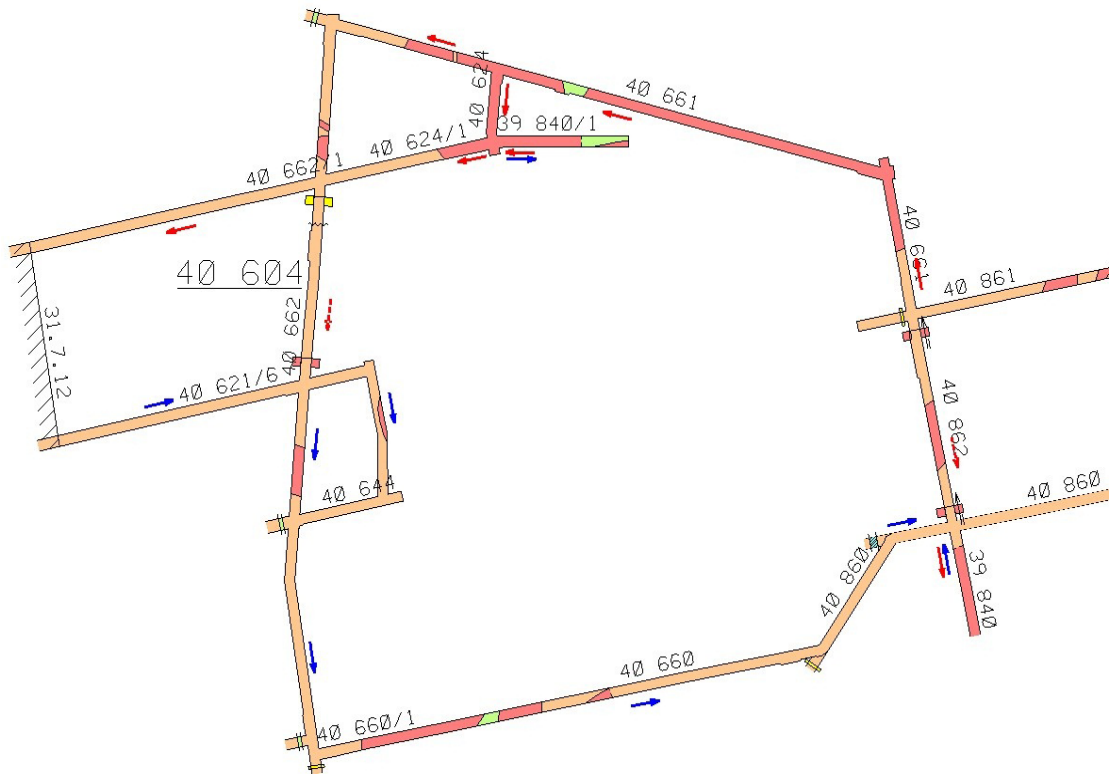


Obr. 1 Příklad využití jazyka UML pro modelování procesů a toků datových packetů (zdroj autor)

5.6 Teorie grafů

Algoritmy teorie grafů jsou využitelné jak v logistice, tak v dopravě. Metody disponují aparátem, kterým lze relativně snadno vyjadřovat vzájemné „vzdálenosti“ jednotlivých dvojic vrcholů zhmotněné do modelu reálné sítě. Na sítích jsou následně provádět různé úlohy, zejména výpočty hledání nejkratších tras, kapacity cest. Vytvořené modely jsou využité k tvorbě softwaru.

Jak je z obrázku zřejmé, jedná se o klasické grafové struktury, na kterých lze provádět příslušné úlohy s respektováním specifického prostředí důlních provozů. Je možné hrany a vrcholy definovat standardním způsobem, jak je zřejmé z následujícího obrázku (obr. 2) a tyto převádět do maticových zápisů s příslušnými parametry a začleňovat je do navržených algoritmů, které jsou součástí navrženého modelu a jeho přepis do Softwaru/informačního systému.



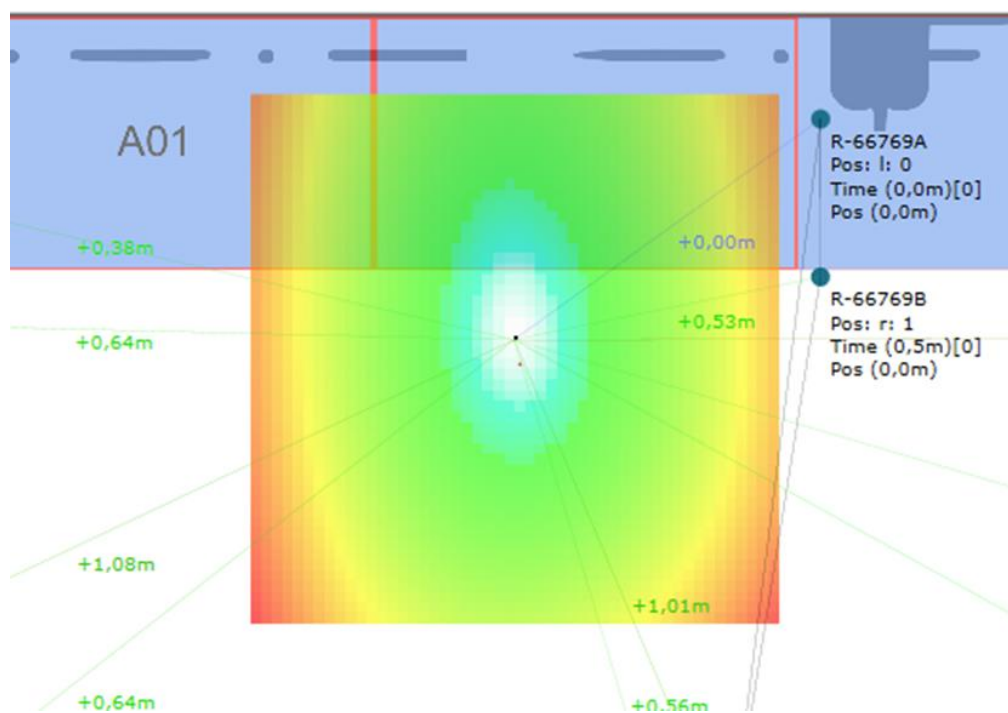
Obr. 2 Využití teorie grafů pro definice možných cest a pohybu objektů v důlních provozech (zdroj autor)

5.7 Simulace

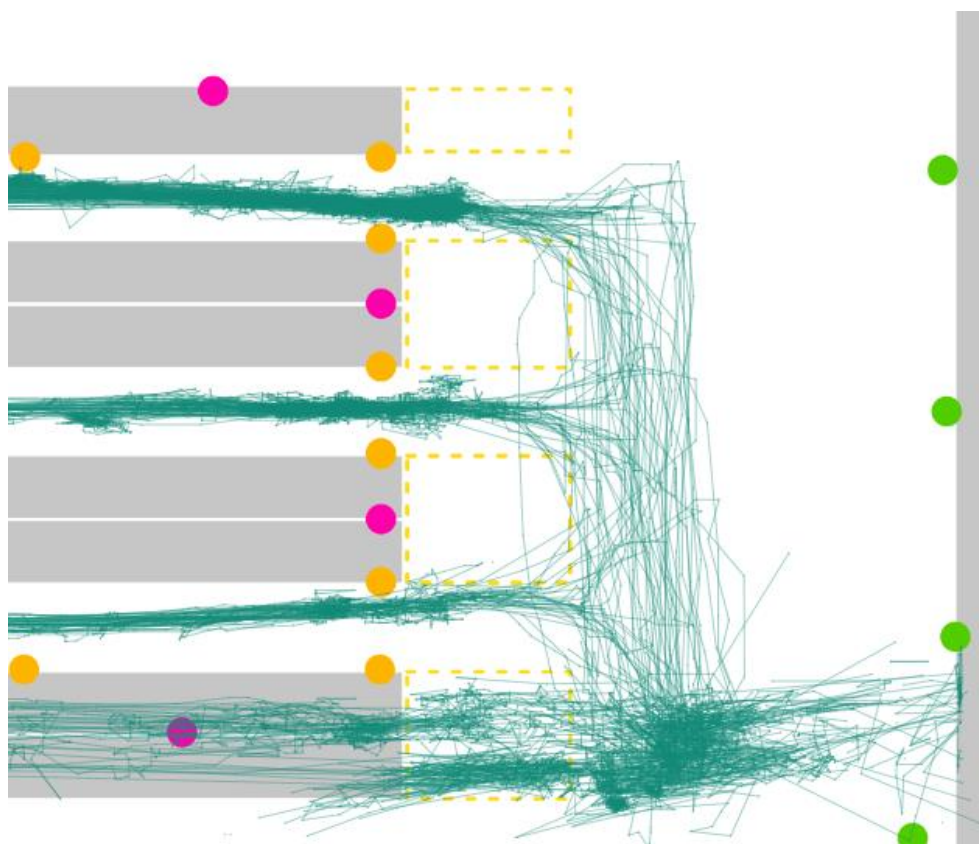
Pro ověření funkčnosti a použitelnosti se využívají metody simulace, které ověří validitu modelu. Výběr nástrojů pro simulaci a předpokladem jejich použití je však především to, že simulací je třeba použít v případech, kdy nebylo možné využít experimentů. Typickým příkladem možnosti nebo nutnosti využití simulace je časové využití rádiového pásma při nadměrné prostorové koncentraci vysílačů, například při nahromadění osob a dopravních prostředků v malém prostoru při vzniku kritických situací. Dalším příkladem je simulace rozložení síly elektromagnetického pole (obr. 3)

Parametry takového stavu nelze v rámci disertační práce ověřit experimentem, vzhledem k neúnosné nákladnosti takového experimentu (jak finančního, tak organizačního, časového atd.). Byly však s výhodou využít metody simulace, které byly schopny poskytnout informace o hraničních parametrech. Jejich porovnání s výsledky analýzy současného stavu se pak s výhodou využily při výběru vhodného přístupu k řešení daného problému a zahrnuly tyto výsledky do sestavovaného modelu.

Počítačový program je modelem pro počítačovou simulaci, kde je cílem simulovat abstraktní model určitého systému a zjistit jeho chování (např. obr. 4). Cílem simulačního programu není provést optimalizaci procesů, ale cílem je zjistit očekávané výsledky pro různá nastavení vstupní dat a charakteristik. Lze následně využít k nastavení pro získání optimálních nebo suboptimálních řešení problému.[46]



Obr. 3 Využití metod simulace pro simulaci rozložení síly elektromagnetického pole (zdroj autor)



Obr. 4 Využití metod simulace pro optimalizaci rozložení kotev bez nutnosti předchozího měření na základě předpokládaných tras dopravních prostředků v omezených trasách (zdroj autor)

6 Vlastní řešení

6.1 Definice případů využití Aktivních technologií RFID pro zvyšování bezpečnosti

V rámci analýzy bylo stanoveno několik obecných zadání a možností, jak zvýšit primárně bezpečnost pracovníků v dopravě ve specifických provozech pomocí RFID. Jak již bylo uvedeno výše, pasivní RFID není pro bezpečnostní aplikace obecně vhodné. Využití aktivních technologií pak závisí na potřebách konkrétních provozů.

Pro práci byly obecně zvoleny 3 oblasti, kde se nabízí zvyšování bezpečnosti a to jsou:

- důlní provozy
- těžké průmyslové provozy
- vnitropodniková logistika.

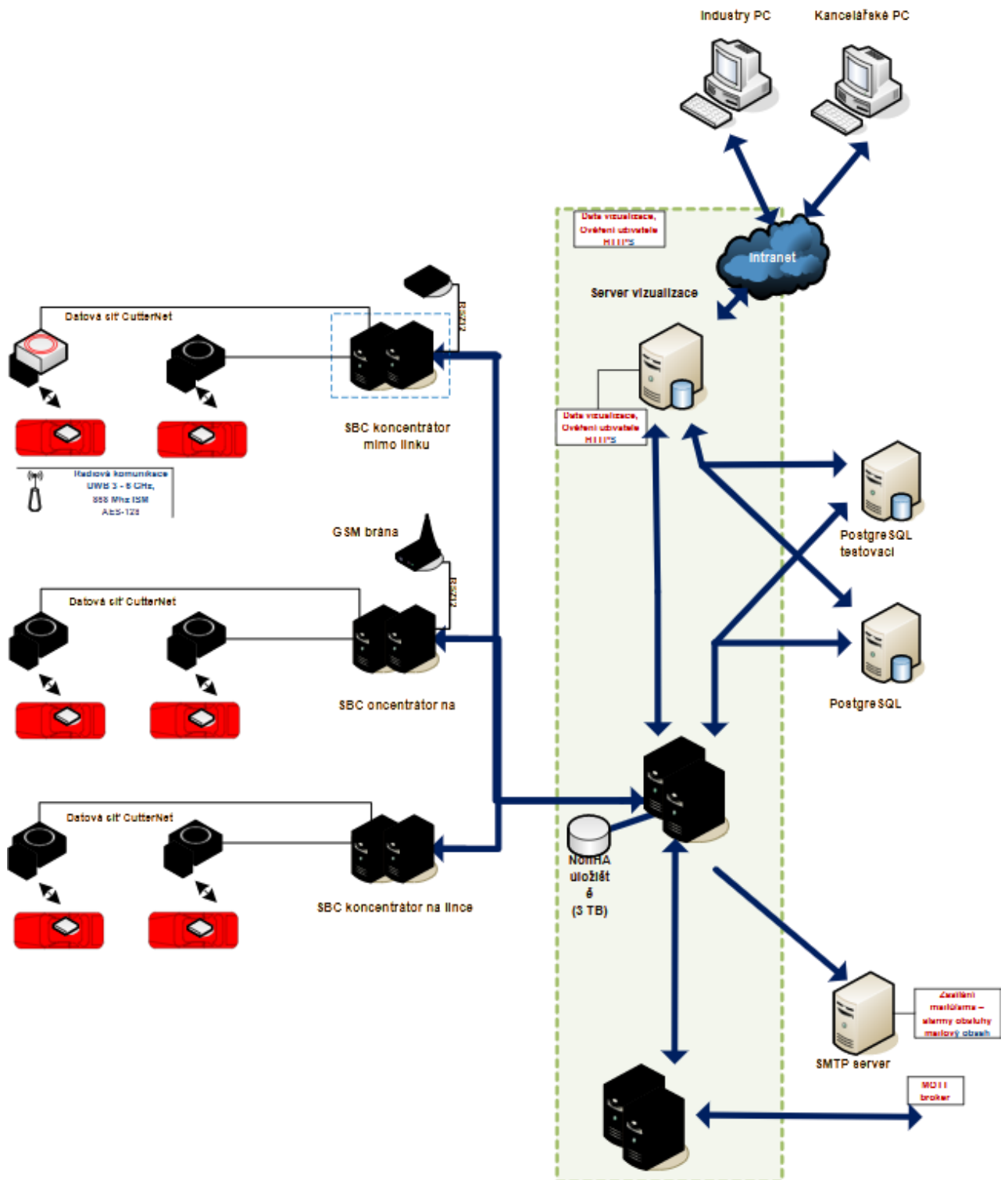
6.2 Vytvoření obecných modelů systému pro zvyšování bezpečnosti

Cílem disertační práce je především vytvoření obecných modelů a principů, na základě, který bude možné postavit reálný systém, případně realizovat na základě těchto modelů experimenty. Obecný model systému se dělí na jednotlivé vrstvy.

- Infrastrukturu
 - Hardwarovou
 - Softwarovou
- Komunikační a lokalizační vrstva
- Use Case

6.2.1 HW infrastruktura

Na následujícím diagramu (obr. 5) je znázorněna HW infrastruktura, a to především s ohledem na komunikační vrstvu. Do systému jsou zahrnuty všechny prvky komplexního informačního systému, a to i s ohledem na redundantní komunikační kanály a komponenty.



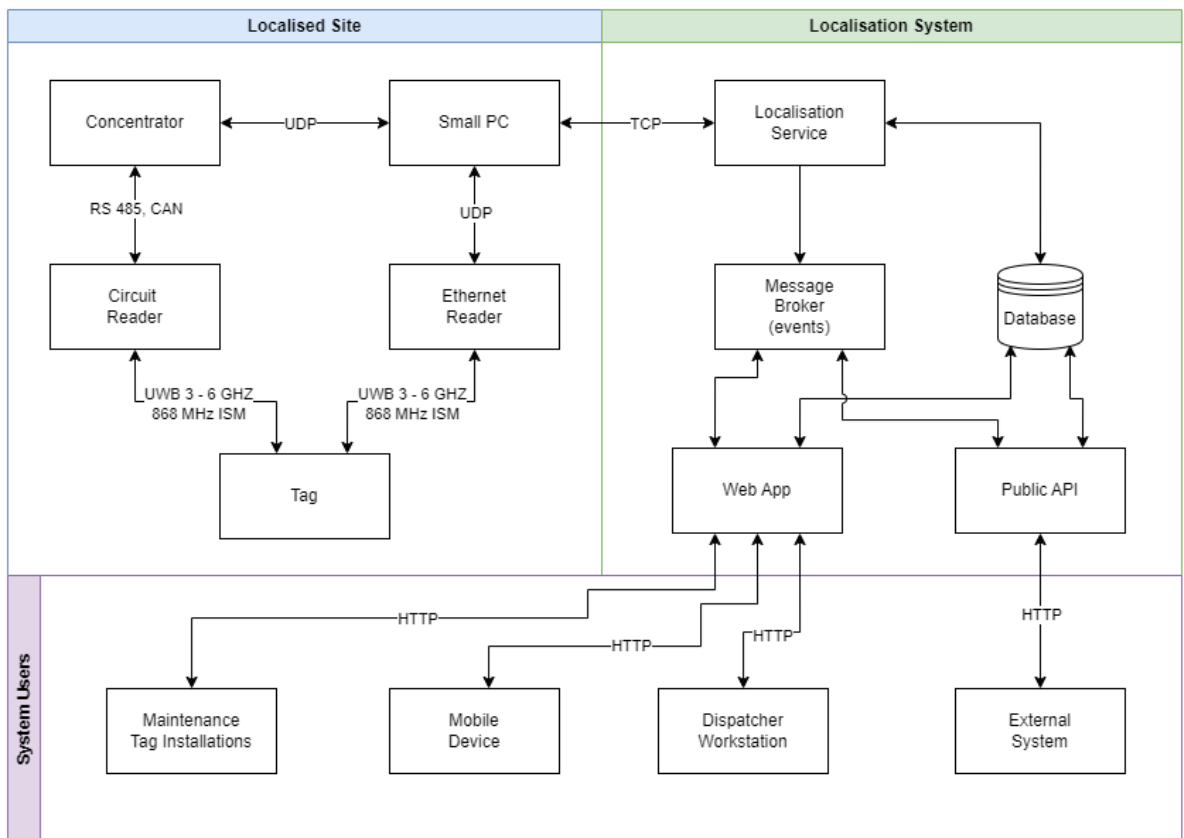
Obr. 5 Obecný návrh HW části pevné infrastruktury lokalizačního systému pro zvyšování bezpečnosti (zdroj autor)

6.2.2 Obecná infrastruktura

Na následujícím obrázku (obr. 6) je zobrazen návrh obecné infrastruktury systému pro zvyšování bezpečnosti – antikolizního systému.

Návrh obsahuje zejména:

- prvky místní infrastruktury
- SW komponenty systému
- uživatelské stanoviště a konektory externích systémů

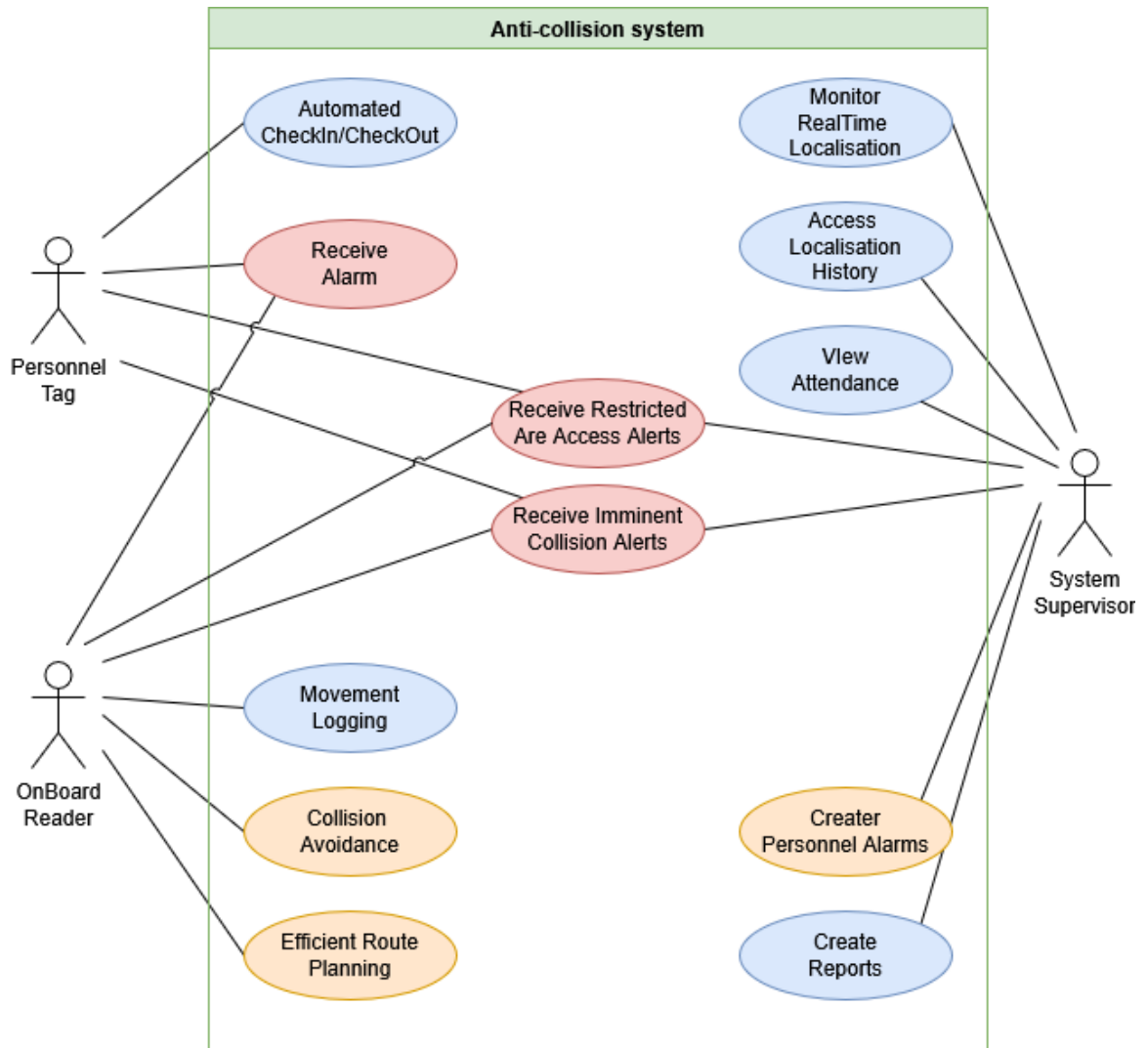


Obr. 6 Návrh modelu infrastruktury antikolizního systému (zdroj autor)

6.2.3 Use-case

V rámci vytváření obecného modelu bylo nutné vytvoření konkrétního use-case, tzn. případu využití takového systému a jeho modelu. Pro co největší zjednodušení byl modelový příklad velmi zjednodušen, a to na tři uživatele, kdy dva z nich jsou součástí provozu a jeden je účastníkem pouze dohledového a řídicího procesu. Jsou to tyto uživatelé:

- pracovník s osobním tagem
- vozidlo s palubním zařízením (zařízení WAS)
- dohledový pracovník



Obr. 7 Návrh modelu infrastruktury antikolizního systému (zdroj autor)

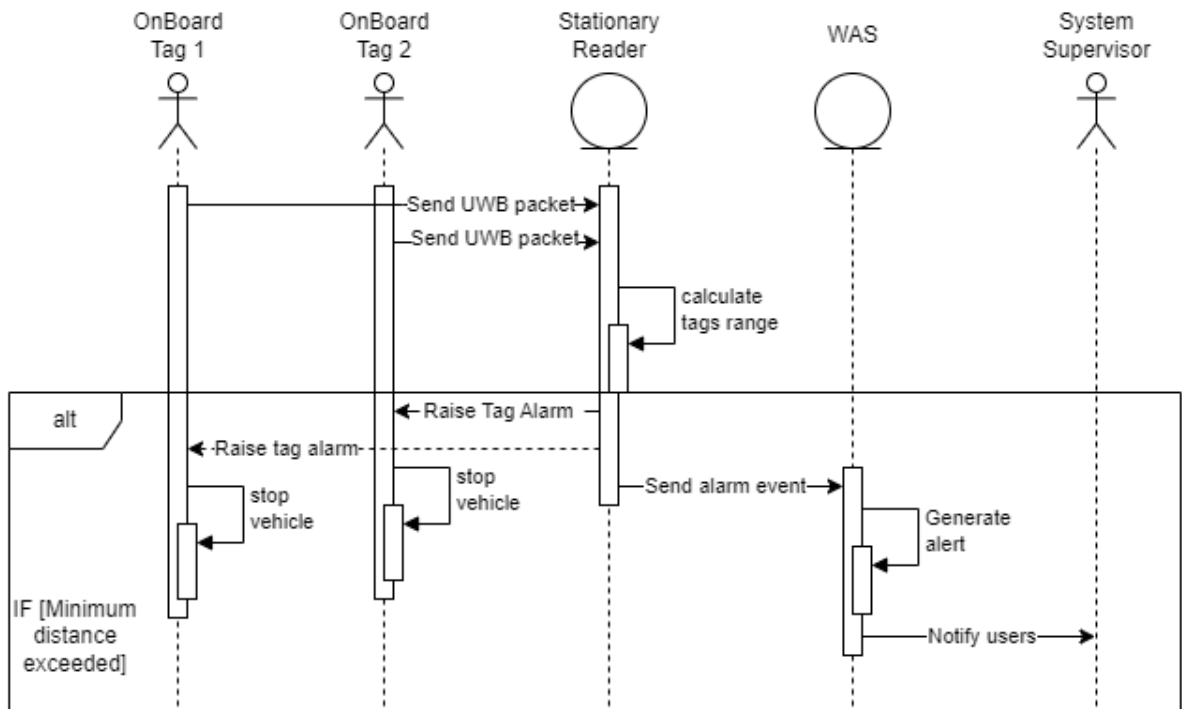
Tento modelový příklad (obr. 7) popisuje situaci s jedním operátorem (např. řidičem), pracovníkem v provozu a pracovníkem managementu.

6.2.4 Návrh modelu systému prevence kolize

Model tohoto systému (obr. 8) má za úkol snižovat pravděpodobnost vzniku kolize dvou dopravních nebo pohybujících se výrobních prostředků. Jedná se o modelový příklad, na němž jsou založeny experimenty popsané v následujících kapitolách zabývajících se experimenty v reálném prostředí pro eliminaci vzniku kolize mezi AGV a VNA. Ve strukturovaném slovním popisu procesu lze situaci vyjádřit takto:

1. "palubní" jednotky (WAS) zabudované ve vozidlech (VNA nebo AGV) vysílají UWB maják (broadcastový packet)
2. čtečka (kotva) fixní infrastruktury výpočtem UWB rangingu zjistí překročení minimální kritické vzdálenosti
3. čtečka zašle notifikaci jednotkám na kolizní dráze

4. každá jednotka automatizovaně zastaví vozidlo a zabrání kolizi
5. čtečka pošle událost do nadřazeného systému
6. systém vytvoří alarm
7. systém zašle notifikaci uživatelům na dohledovém pracovišti



Obr. 8 Návrh modelu systému prevence kolize (zdroj autor)

6.3 Experimenty

Experimentální část probíhala v rámci celého období, ale částečně vychází i z experimentů, které autor prováděl i před zahájením prací na disertaci. Větší část experimentů je zaměřena na těžká průmyslová prostředí, především pak na důlní průmysl. Jak dokazují průběžné výsledky simulací, jsou simulační metody pouze velmi omezeným prostředkem pro tato prostředí. Pozitivní výsledek simulace bohužel většinou indikuje pouze možnost úspěšného řešení, zdaleka nikoliv však s velkou pravděpodobností na úspěch.

Z těchto důvodů se z použitých vědeckých metod jeví experiment jako zcela nezbytný a zásadní. V následujících kapitolách jsou podrobněji popsány tři reálné systémy, které jsou již nyní v praxi již v provozu a jichž je autor disertační práce autorem z pozice vývojového pracovníka nebo z pozice tvůrce koncepce těchto systémů a vedoucího vývojového týmu. Na základě těchto zkušeností pak byl sestavena jak koncepce zadání, tak popis modelu samotného cíle disertační práce.

6.4 Lokalizace v důlním prostředí pomocí technologie měření RSSI v důlním prostředí

V rámci prací k dosažení cíle disertační práce byla provedena řada experimentů s cílem využít systémy aktivního RFDI pro zvýšení bezpečnosti v dopravě a logistice.

6.4.1 Informační systém pro identifikaci – ISI

System ISI je autorův vývojový projekt, který je primárně určený pro elektronickou evidenci osob v ohrožených oblastech důlního provozu. V první etapě vývoje systému bylo zadáním pouze identifikovat jednotlivé pracovníky v zónách, které jsou označeny jako ohrožené a kontrolovat jak jejich identitu, tak také počet v těchto zónách pro evidenci dle platné legislativy a nařízení báňského úřadu.

Jak se ale postupem času ukázalo, nebyl tento stručný požadavek a zadání formulovaný Báňským úřadem dostatečný z hlediska běžného provozu. Po úspěšném pilotním provozu, došlo po sérii nehod na dole ČSA společnosti OKD, a.s. k překotnému nasazení tohoto systému v takové podobě, že každý pracovník nacházející se v podzemním provozu musel být vybaven identifikátorem kompatibilním se systémem ISI. V rámci OKD byl tento požadavek realizován tak, že každý „fárající“, bez ohledu na jeho zařazení a funkci je vždy vybaven důlním přenosným svítidlem s integrovaným RFID transpondérem A-RFID systému ISI. Tento požadavek byl a doposud je realizován za pomoci Hlavní Báňské Záchrané Stanice, která spravuje provoz důlních osobních svítidel.

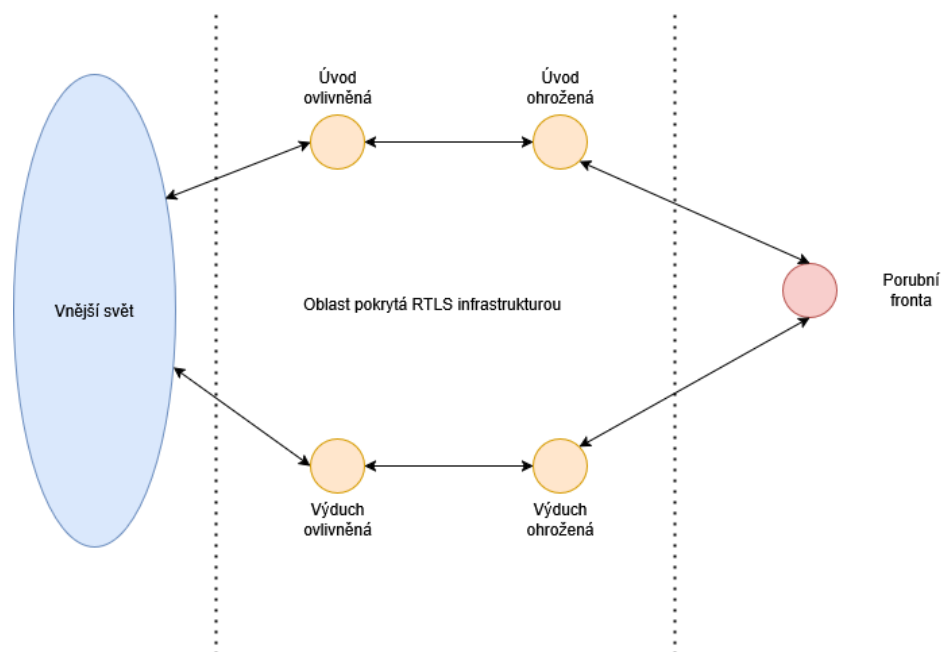
System byl v prvopočátku koncipován jako ryze zónový, tzn. neřešil reálnou polohu důlního pracovníka v mapovém systému, nicméně se postupem času prokázalo, že tento zjednodušený systém – i když je plně v souladu s formálními požadavky – není vhodný z hlediska běžného provozu. Především pak nevyhovoval z pohledu provozního dispečerského řízení, a i přes relativní značný technologický posun neposkytoval dostatečné prostředky pro systém krizového řízení v případě krizových situací. Proto byl tento systém postupně doplňován o další funkce a rozšíření, které kromě čistě formálních požadavků vyhovovalo také požadavkům reálného prostředí.

Přestože se původně jednalo o systém pro automatickou evidenci osob přepravující se pouze lidskou chůzí, naprosto přirozeně postupně začal zasahovat i do oblasti mechanizované přepravy jak osob, tak materiálu. I když se již nejedná o čistě bezpečnostní aplikaci z pohledu legislativy a předpisů Báňského úřadu, v obecné rovině jsou požadavky podřízeny především bezpečnosti v dopravě pracovníků. Z tohoto pohledu posloužil systém ISI a jeho reálné aplikace pro provedení řady experimentů.

V době největšího rozšíření tohoto systému bylo systémem ISI v rámci důlních děl v ČR republice obsluhována 7 velkých hlubinných dolů a přibližně 15.000 pohybujících se objektů, především důlních pracovníků. Dalších 50 důlních děl je tímto systémem obsluhováno v zahraničí, především v Turecku.

6.4.2 Zónová lokalizace

Jak již bylo zmíněno, primárním určením pro systém ISI byla zónová lokalizace. Ta je zaměřena především na kontrolu počtu konkrétních osob v ohrožených oblastech důlních provozů, které jsou obecně považovány uzavřené systémy – to znamená, že v rámci těchto systémů existuje pouze omezený a striktně definovaný výčet vstupně výstupních zón. Tuto úlohu lze demonstrovat na mapě v následujícím obrázku (obr. 9). Zde je zobrazena mapa standardního porubu, který sestává z porubní fronty a na ní dvou ohrožených oblastí (zón) nacházejících se na výdušné a úvodní třídě ukončených vstupně výstupními zónami – v tomto případě zónami ovlivněnými.



Obr. 9 Lokalizace osob v rámci těžebního porubu – reprezentace pomocí síťového diagramu (zdroj autor)

Reprezentace takové situace je znázorněna na tomto obrázku. Tuto zcela banální situaci lze popsat následujícím způsobem. Porubní fronta jako taková nemůže být z technických důvodů pokryta lokalizační infrastrukturou, tudíž nelze v reálném čase sledovat počet přítomných pracovníků v této zóně. Protože ale existují pouze dvě cesty vedoucí z a do této zóny přes zóny pokryté, lze jednoduše dopočítat, kolik a kterých lidí se v zóně porubní fronty v každém okamžiku nachází. Protože je prostředí známé, lze předpokládat, že fyzicky nemůže ze zóny porubní fronty existovat jiná cesta, tudíž lze na základě tohoto předpokladu postavit systém – a to i bezpečnostní.

V reálném provozu se ale ukázal být tento předpoklad nedostatečný, aby na něm mohla být postavena bezpečnostní aplikace. Problémy tohoto systému jsou v obecné rovině dva:

1. Předpoklad 100% technické funkčnosti systému
2. Důvěryhodnost lidského tvrzení

Tento systém vychází z předpokladu „nultého stavu“ a následného nepřetržitého provozu. To znamená, že se zná počáteční stav systému a od tohoto okamžiku je počítáno s nepřetržitým

provozem systému a z toho vychází představa, že se zná počet a identita lidí nacházejících se v zóně porubní fronta. Toto je zásadní předpoklad a jakýkoliv systém musí mít prostředky na to, aby bylo možné průběžně takový stav korigovat.

Co se ale v průběhu provozu ukázalo jako největší problém – a s tím je spojená architektura jakéhokoliv bezpečnostního systému nebo systému zvyšujícího bezpečnost, to je důvěryhodnost lidského tvrzení. V tomto případě se lze domnívat, že skutečně při technické funkčnosti systému není nutné předpokládat, že existuje jiná cesta ze zóny porubní fronta než cesta přes monitorované zóny, nicméně zkušenost je jiná.

V průběhu reálného provozu, kdy již byly stanoveny všechny tyto předpoklady, vznikla situace, která se v teoretické rovině zdála být téměř nereálná. V rámci dokončování vytěžení porubu v dole ČSA vznikla situace, kdy ve vedlejším porubu, který byl v přípravě ve stejné sloji paralelně s vytěžovaným porubem došlo k neočekávanému fyzickému průrazu výdušné a úvodní třídy těchto dvou porubů. Tím vznikla v rámci konfigurace systému zónové lokalizace nezohledněná hrana síťového diagramu, která umožňovala pracovníkům v rámci bezpečnostního systému opustit zónu porubní fronty bez registrace systémem. Vzhledem k tomu, že zóna porubní fronta je z pohledu legislativy zónou 2. stupně nebezpečí důlního otřesu, nebyl automaticky vyhlášen žádný alarm z pohledu přítomnosti osob v této zóně.

Po vystřídání 3 směn ale došlo k „nahromadění“ cca 60 pracovníků v porubu, což jednoznačně neodpovídalo reálné situaci, protože většina zobrazovaných pracovníků již prokazatelně opustila pracoviště i důlní prostory.

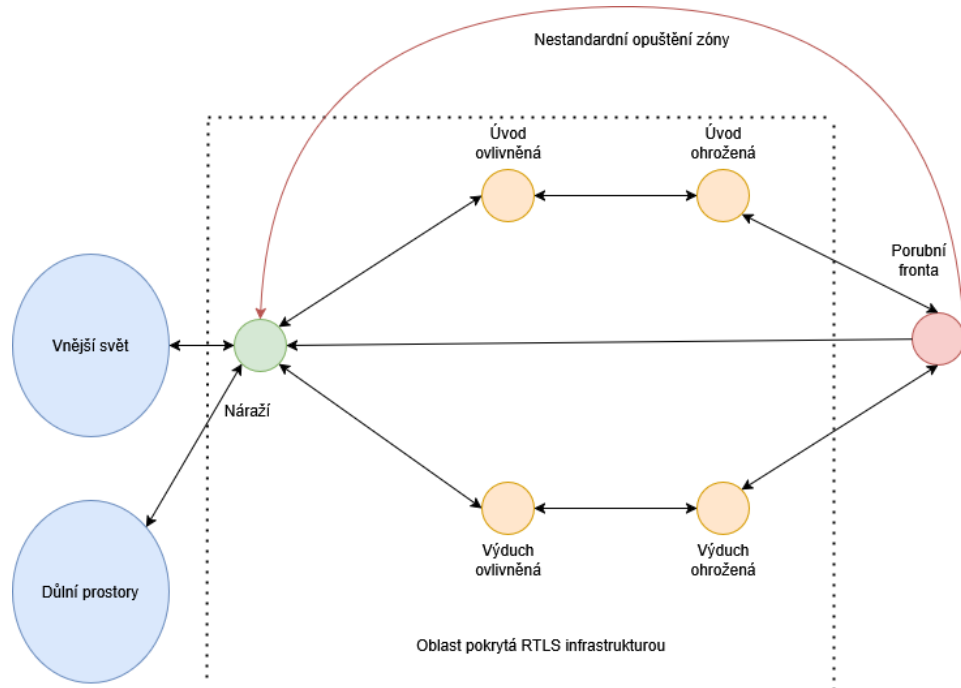
Tato zdánlivě banální situace ale vedla k oprávněnému prohlášení dispečera provozu (inspekčního) o nefunkčnosti celého bezpečnostního systému a musely být zavedeny náhradní postupy pro registraci osob. V případě nevyřešení tohoto problému by celá situace vedla k odstavení veškerého provozu do 48 hodin, což by vedlo ke značným ekonomickým ztrátám. Autor tuto situaci zmiňuje pro ilustraci toho, k jakým extrémním situacím může vést zanedbání modelování, byť zcela jednoduchých situací.

V tomto případě došlo k logické úpravě modelu, kde do modelu reprezentovaného grafem na následujícím obrázku (obr. 10). V tomto modelu jsou jednotlivé hrany váhovány dle hodnot nastavené hysterezní smyčky síly přijímaného signálu (RSSI), kde nový vrchol grafu představuje zónu (zóny), kterou z již velmi vysokou pravděpodobností musí pracovník projít, aby opustil sledovanou oblast.

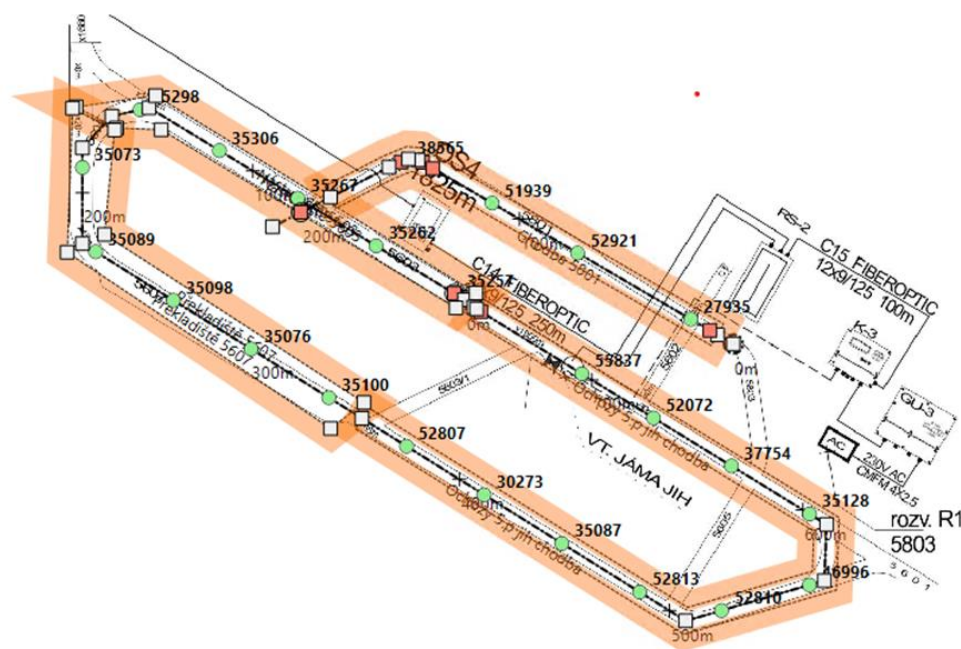
V tomto případě jde také o vytvoření nové orientované hrany grafu, která popisuje jednosměrnou možnost pracovníka opustit sledovaný prostor, které sice není očekáván, ale reálný předpoklad zde existuje. Tato hrana grafu je orientovaná (na rozdíl od zbývajících) ze dvou zásadních důvodů:

1. Využití této hrany jednoznačně indikuje, že systém jako takový se stal nekonzistentním – a to ať z důvodu změny reálného prostředí, která do modelu nebyla zahrnuta nebo z důvodů nefunkčnosti některé z částí systému

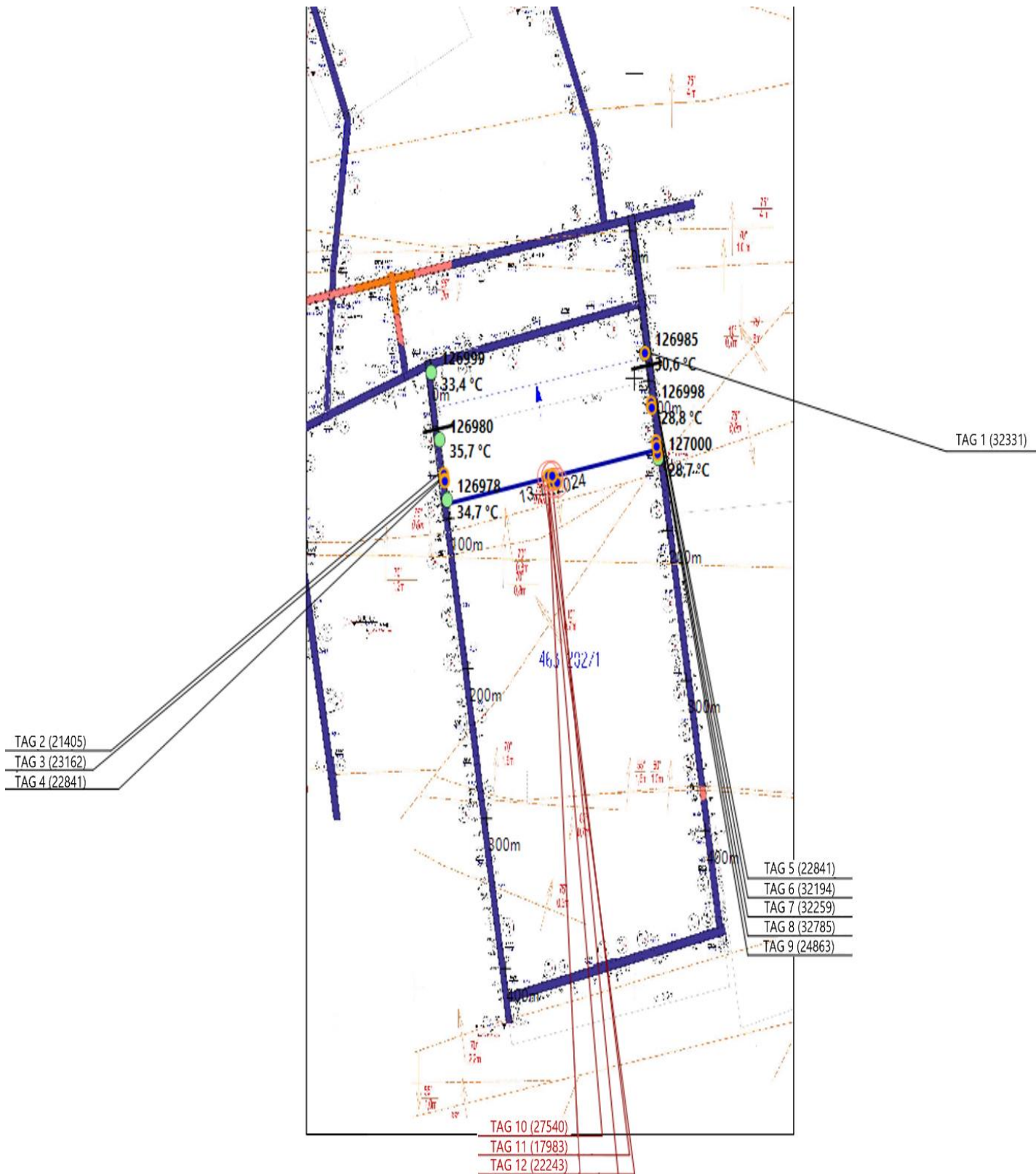
2. Pokud existuje jakákoliv cesta (hrana grafu), která je spojnicí mezi vrcholem porubní fronta a důlní prostory (bez pokrytí RTLS infrastrukturou), nelze využití této cesty nijak detekovat a celý systém se musí této možnosti přizpůsobit – v takovém případě zcela odlišnými prostředky, mimo systém lokalizace, ale zcela jinými prostředky, jako je fyzické zabránění průchodu atd. Další možností je rozšíření systému o infrastrukturu v takové podobě, která tyto hrany odstraní.



Obr. 10 Úprava přístupu systému – možnost jednosměrného přemístění osoby do zcela oddělené zóny (zdroj autor)



Obr. 11 Zobrazení konfiguračního rozhraní pro definici jednotlivých zón jako vrcholů síťového grafu a přechodů mezi nimi jako hran (zdroj autor)



Obr. 12 Typické zobrazení sledovaného důlního díla – poruby (zdroj autor)



Obr. 15 Datový koncentrátor systému ISI navržený a montovaný autorem disertace (zdroj autor)

6.4.3 Elektronická průjezdová brána – EPB

Jedním z požadavků, který v průběhu existence systému ISI vyplynul, bylo řešení bezpečnosti v podpovrchové dopravě materiálu a pracovníků pomocí pásových dopravníků. Z hlediska dopravy materiálu se u pásových dopravníků různých typů jedná a nejrozšířenější způsob dopravy materiálu v podpovrchovém prostředí. V určitých konkrétních situacích pak vyvstává problém, jak detekovat nežádáný průjezd pracovníka na dopravníkovém páse, případně hřeblovém dopravníku.

U dopravy materiálu na pásech, kde může rychlost dopravy překračovat i $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byla již před lety doprava osob v důlních provozech zakázána. I tak byl Báňským úřadem definován požadavek na detekci průjezdu osob na tomto páse pomocí technologie RFID, případně A-RFID. Dalším požadavkem bylo detekování pomocí obdobné technologie průjezdu osob na hřeblovém dopravníku vlivem nehody nebo stržením osoby dopravovaným materiálem.

Na základě těchto požadavků byla zkonstruována detekční jednotka kompatibilní se systémem ISI, pracujícím v pásmu 868 MHz pro detekci osob. Návrh jednotky vycházel z předpokladu, že lze na základě měření síly signálu spolehlivě určit polohu identifikačního TAGu v konkrétním kontrolovaném místě s přesností cca 1 m.



Obr. 16 Experiment s multianténním systémem pro detekci přítomnosti osoby na hřeblovém dopravníku – umístění na povrchu (zdroj autor)

Tento předpoklad vycházel také z měření prováděného prostřednictvím systému ISI, jako je vzorový příklad průchodu pracovníka chodbou, kde lze poměrně spolehlivě detekovat průchod pracovníku z jedné zóny do druhé. Nicméně se jedná o případy, kdy je rozhraní zón definováno i s více než 10 m hysterezí.

I když se u hřeblových dopravníků jedná o rychlosti pod 1 m.s^{-1} , bylo prokázáno, že technologie RSSI v pásmu 868 MHz je pro aplikace tohoto typu zcela nepoužitelná, obzvláště s ohledem na to, že jakákoliv disfunkce může způsobit ohrožení života pracovníků. Obdobných výsledků pak bylo dosaženo i u obdobných experimentů, např. při experimentech s antikolizní funkcí u zařízení pro těžbu metodou room and pillar.



Obr. 17 Experiment s multianténním systémem pro detekci přítomnosti osoby na hřeblovém dopravníku – umístění na povrchu, test kovového stínění (zdroj autor)

6.5 Bezpečnostní systém WAS – Worker Area Safety

Systém WAS (Worker Area Safety) je navržen na obecný požadavek z těžkých průmyslových odvětví jako jsou stavební a těžební na zvýšení bezpečnosti provozu. Systém je založen primárně na technologii UWB a metodě lokalizace ranging, tzn. měření vzdálenosti jednotlivých pohybujících se objektů na principu TOF.

Vývojové práce na byly realizovány od roku 2018 autorem disertační práce. Výstupem je ucelený soubor prostředků pro redukci rizika úrazů na pracovištích. Primární úlohou je zvýšení ochrany pracovníků v pracovních zónách stavebních strojů a dopravních prostředků. Experimenty s technologií UWB a ranging byly v rámci práce testovány v několika stavebních a těžebních provozech.

Systém se skládá z několika částí:

- Identifikační osobní TAG
- Mobilní jednotka WAS
- Vyhodnocovací a diagnostický SW

Základní sestava je určena pro instalace na pracovní stroj, typicky rýpadlo, buldozer nebo jiný pracovní stroj nebo nákladní dopravní prostředek. Systém slouží primárně pro detekci vstupu

pracovníky do pracovního prostoru stroje, signalizaci a varování operátora pracovního stroje v případě vzniku potenciálně nebezpečné situace.

Primární funkcí systému je upozornit nebo varovat operátora pracovního stroje, že do jeho pracovní zóny vnikl pracovník a naopak. Každý pracovník nebo pracovní stroj pak musí být vybaven příslušným lokalizačním zařízením. Systém jako takový řeší pouze relativní pozici v jedné nebo dvou (v případě pracovního stroje) půdorysně kruhových zón, které jsou definovány poloměrem těchto zón.

6.5.1 Popis procesu komunikace a rozhodování systému WAS

Proces fungování lokalizace a vyhodnocení stavů systému WAS lze popsat následujícím způsobem:

1. Ranging

- WAS čtečka poslouchá na DW (TRX Decawave UWB CH3) a SX (TRX Semtech, frekvence 866,3MHz)
- tag vysílá broadcastové UWB majáky v nastavených intervalech
 - v majáku posílá mj. informaci o přiřazení timeslotů čtečkám a o volných timeslotech (přiřazuje tag)
- WAS jednotka přijme maják a v timeslotu, který je jí přiřazen, odpoví
 - pokud čtečce dosud nebyl tagem přiřazen žádný timeslot, vybere si některý z volných timeslotů na konci rangovacího okna
- tag postupně v jednotlivých timeslotech přijme odpovědi od všech čteček, se kterými je možné se domluvit
- po skončení všech timeslotů odešle poslední UWB packet (opět broadcast) a jednotky, které jej zachytí a účastnily se předchozí komunikace, z dat v něm obsažených (a z vlastních časových známek) spočítají vzdálenost k danému tagu
- pokud je vzdálenost kratší než nastavené meze, provede jednotka předem definovanou akci alarm (warning / critical), jako například aktivaci některého z výstupů
- v dalším rangovacím cyklu (po příjmu nového UWB majáku od tohoto tagu) předá jednotka informaci o případném alarmu tagu
 - ten případně spustí zvukovou a vibrační signalizaci
- informace o výsledku rangování se může zalogovat a/nebo odeslat na nastavené rozhraní (LTE, RS232), kde jej zpracuje buď CIS WAS nebo jiný SW

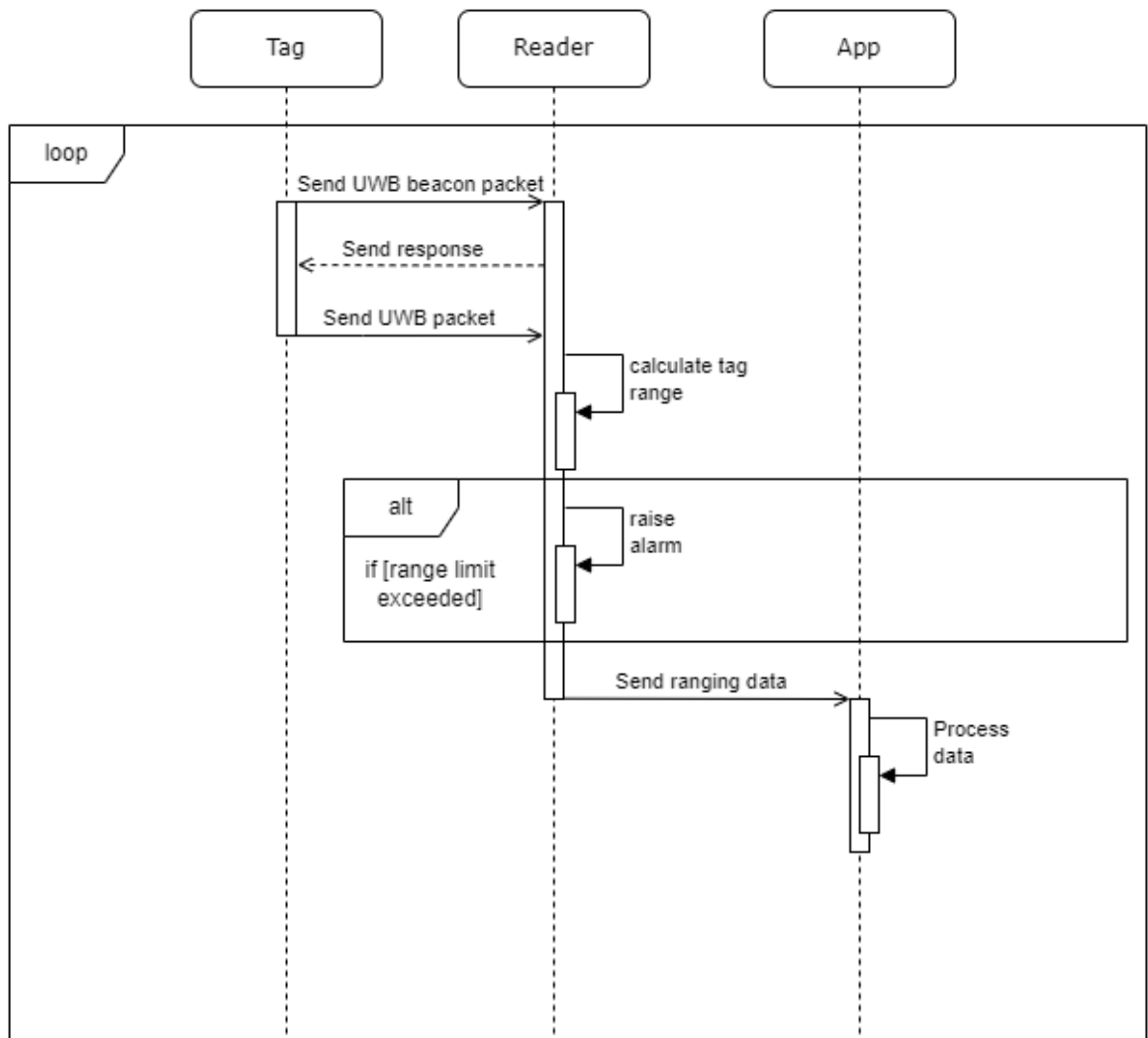
Tohle se děje pro všechny tagy. Délka rangovacího okna standardně cca 17ms, interval vysílání 250 ms / 500 ms / 1 s

2. Komunikace s tagem z nadřazeného systému

- uživatel odešle jednotce (WAS, ŠA) požadavek na komunikaci s tagem (z nadřazeného systému – Commtestu, Clusteru, jiného SW)

- jednotka požadavek uloží a čeká na příjem SX majáku od tagu (timeout jednotky sekund)
- tag odešle SX maják (typicky jej odesílá "zároveň" s UWB majákem)
- po odeslání zapne poslouchání (pokud je povoleno v konfiguraci)
- jednotka po zachycení majáku odešle tagu požadavek (nastaveno tak, aby se trefila do poslouchacího okna)
- tag vykoná požadovanou akci (předání dat, změna nastavení / stavu) a odešle jednotce odpověď
- jednotka vrátí odpověď nadřazenému systému

Diagram zobrazující proces rangingu a vyhodnocení systému WAS je zobrazen na následujícím obrázku (obr. 18).



Obr. 18 Sekvenční diagram procesu rangingu a vyhodnocení systému WAS (zdroj autor)

6.5.2 Experimenty v reálném stavebním provozu

Experimenty probíhaly v několika typech provozů, především na velkých liniových stavbách. Experimentální provoz prokázal, že systém je schopen reagovat s latencí menší než 1 s, a to s rozlišením menším než 0,5 m. Při simulaci kritických situací v reálném prostředí byly výsledky ne vždy jednoznačné a velmi těžko kvantifikovatelné, nicméně lze s vysokou mírou jistoty prohlásit, že systém varování zvyšuje povědomí pracovníků o skutečné situaci, a to i za ztížených podmínek.

6.5.3 Experimenty v důlním prostředí

Vzhledem k tomu, že v ČR bylo umožněno autorovi práce s technologií UWB experimentovat pouze v hlubinných černouhelných dolech společnosti OKD, omezili se prvotní experimenty pouze do oblastí s minimálním stupněm ohrožení, typicky náraží, případně úvodní části překopů. Takové experimenty byly sice hodnotné, nicméně nedostatečné pro přijetí konkrétních závěrů o využitelnosti technologie UWB v opravdu těžkých provozech.

Experimenty v odpovídajícím prostředí byly umožněny až v provozech v zahraničí, především v Rusku a Turecku. Do vypuknutí pandemie COVID-19 se podařilo provést řadu velmi cenných experimentů, které prokazují reálnou funkčnost a použitelnost zvolené technologie v daném prostředí. Na následujících fotografiích (obr. 19, obr. 20) je pak zdokumentováno provádění experimentů v železorušném dole – v prostředí dolu není pravděpodobnost výskytu výbušné atmosféry, proto bylo možné provádět experimenty i bez certifikátu ATEX, případně s obtížně sjednatelnou výjimkou.



Obr. 19 Umístění majáku a externí antény systému WAS – železorušný hlubinný důl (zdroj autor)

V dané situaci je osádka dopravního prostředku vícečlenná a pro řidiče bylo třeba připravit upravenou signalizační jednotku, která názorně a přehledně informovala o situaci před a za vozidlem.



Obr. 20 Umístění signalizační jednotky (zdroj autor)

V rámci provedených experimentů bylo prokázáno, že systém je z čistě technického hlediska v důlním provozu reálně použitelný. Nicméně o to více se projevila největší nedokonalost systému, a to zejména neschopnost predikovat potenciální kolizi v situacích křížení chodeb. V těchto situacích se systém ukázal jako zcela nepoužitelný, v některých ohledech i kontraproduktivní, protože v uživatelích (operátorech a řidičích mohl vyvolávat falešný pocit bezpečí).

I přes výše uvedené neúspěchy lze považovat za značný přínos provedených experimentů to, že bylo prokázáno, že lze systémy založené na technologii UWB provozovat v takto těžkých podmínkách.

6.6 Lokalizační systém CarRFID

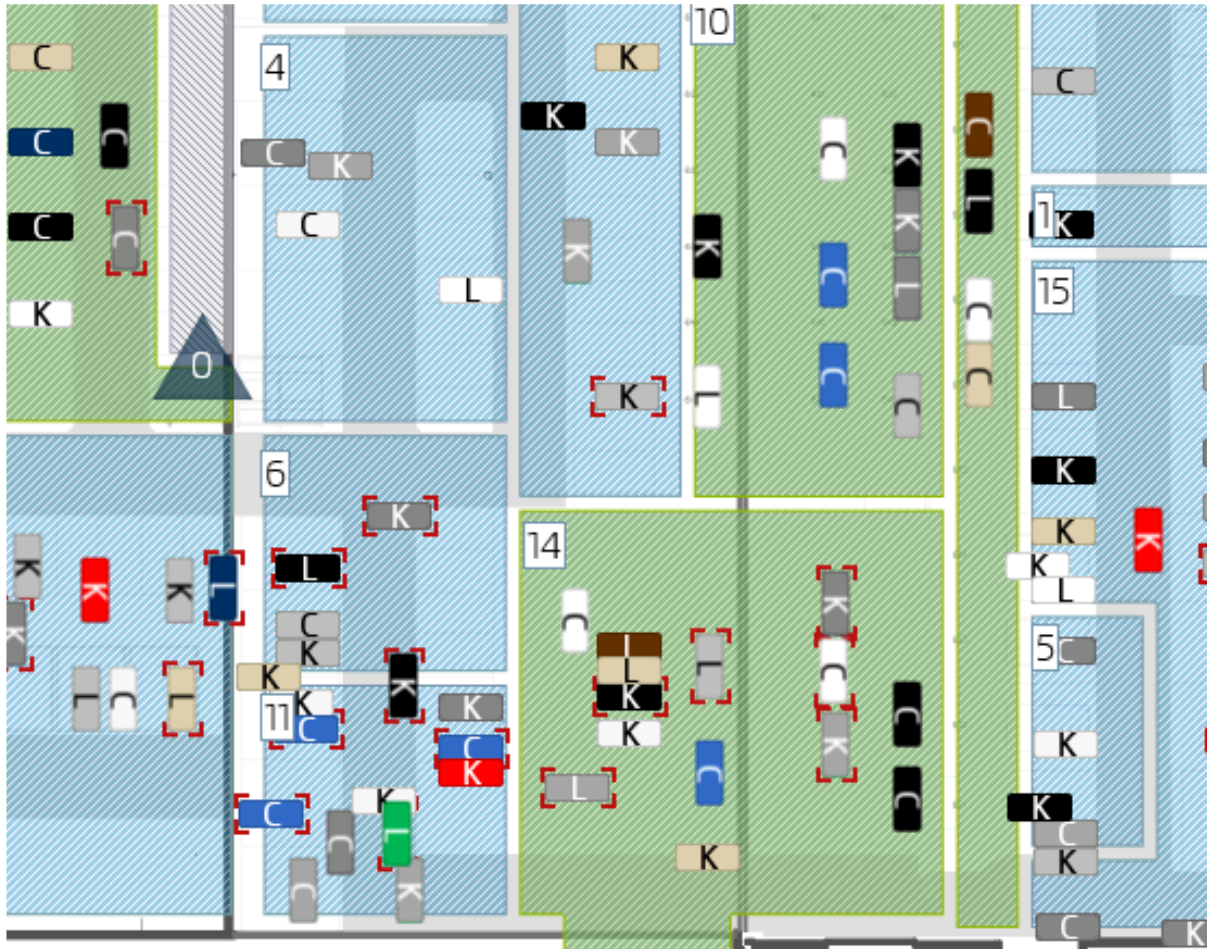
Systém vznikl na základě požadavků automobilového průmyslu autorem disertační práce. Primárně se nejedná o bezpečnostní systém, ale o RTLS systém pro řízení a optimalizaci výroby s bezpečnostními prvky. Základem celého řešení je RTLS založeného na bázi technologie UWB pracující v kmitočtovém pásmu 3 GHz – 8 GHz, která poskytuje informace o poloze a stavu jak výrobků, tak výrobních prostředků a pracovníků. Systém je možné postavit na principu co největší

redundance tak, aby byla zajištěna jeho co nejvyšší spolehlivost, a tedy provozní bezpečnost. Jedním z kritických parametrů, který definuje vlastnosti systému CarRFID je to, že musí být schopen v určitých lokalitách poskytovat informaci o poloze výrobku (např. karoserie automobilu) s přesností lepší než $\pm 0,5$ m, a to se statistickou spolehlivostí vyšší než 99,96 % vůči jednotlivým ohraničeným výrobním jednotkám. Systém CarRFID je tedy primárně určen jako systém výrobní, ale respektuje bezpečnostní požadavky praxe.

V první etapě vývoje systému CarRFID byly stanoveny požadavky a následně testovány technologie založené na měření RSSI, ale vzhledem k předchozím výsledkům a požadavkům na systém bylo již od počátku předpokládáno využití technologií využívajících principy TOF, TOA atd. Pro nasazení systému lze s úspěchem využít technologie pracující v ISM pásmu 2,4 GHz, která umožnila realizovat prvotní fáze CarRFID. I když testování s touto technologií byly technicky úspěšné, tak jejich rozšíření by postupně znamenalo následné zvyšování nároků, především pak na přesnost a rozlišení lokalizačního systému. Postupně pak bylo od systému v pásmu 2,4 GHz upuštěno a byl realizován přechodem na systém, jehož základem je právě technologie UWB, která se jeví jako ideální a v současné době je potvrzena i praktickým využitím.

Vizualizace celé montážní lze koncipovat tak, že musí poskytovat přehledné zobrazení celého provozu. Jednotlivá auta v obrázcích jsou reprezentovány obdélníky, jejichž barva v základním zobrazení koresponduje s barvou reprezentovaného auta. Tato informace je získávána při spojování TAGu a konkrétní karoserie. Orientace obdélníku ve vizualizaci může být vertikální nebo horizontální, a to dle předpokládané polohy auta na pracovišti. Orientace lze určovat na základě posledního známého pohybu a předem definované masky ve vizualizaci. Tím lze výrazně zlepšit intuitivnost celé vizualizace pro uživatele.

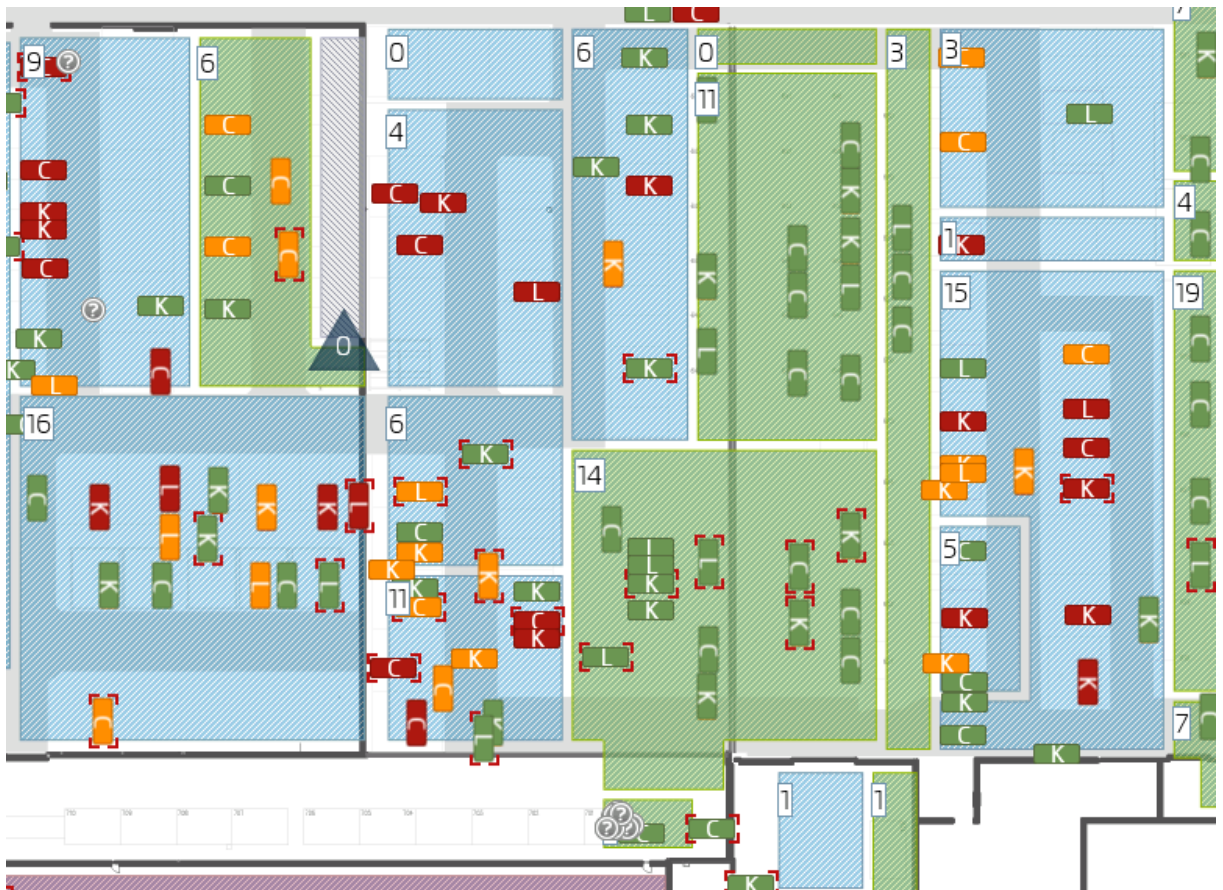
Jak dokládají zkušenosti autora z výzkumnou a vývojovou činností v rámci disertace, samotná vizualizace poskytuje mocný nástroj pro operativní řízení provozu, což potvrdila praxe a je zajímavé například v časovém bodě výměny pracovních směn a rychlejší organizace přejímání aktuálního stavu. Zobrazení lze rozdělit do jednotlivých zón, kdy algoritmus automaticky vyhodnocuje počet aut v jednotlivých zónách, což je znázorněno na následujícím obrázku (obr. 21). Maximální počet aut v zóně lze pak využít k indikaci přetížení místa a je pak jedním z parametrů, který může aktivovat problematický stav upozorňující na nestandardní situaci. Zobrazení polohy a pohybu jednotlivých aut je pro dozorující osobu vhodné pouze jako náhled nebo v případě sledování konkrétního auta nebo sledování velice malé oblasti. Při současném zobrazení stovek automobilů a například nějaké veliké plochy, což u automobilek je běžné a hodnoty celkové plochy přes 50.000 m² nejsou výjimečné, pak je není možné lidskými schopnostmi zachytit všechny a také vyhodnotit kritické stavy a předcházet jim bez vhodných systémů.



Obr. 21 Základní pohled na výstup vizualizační část CarRFID (zdroj autor)

6.6.1 Detekce a vizualizace kritických stavů

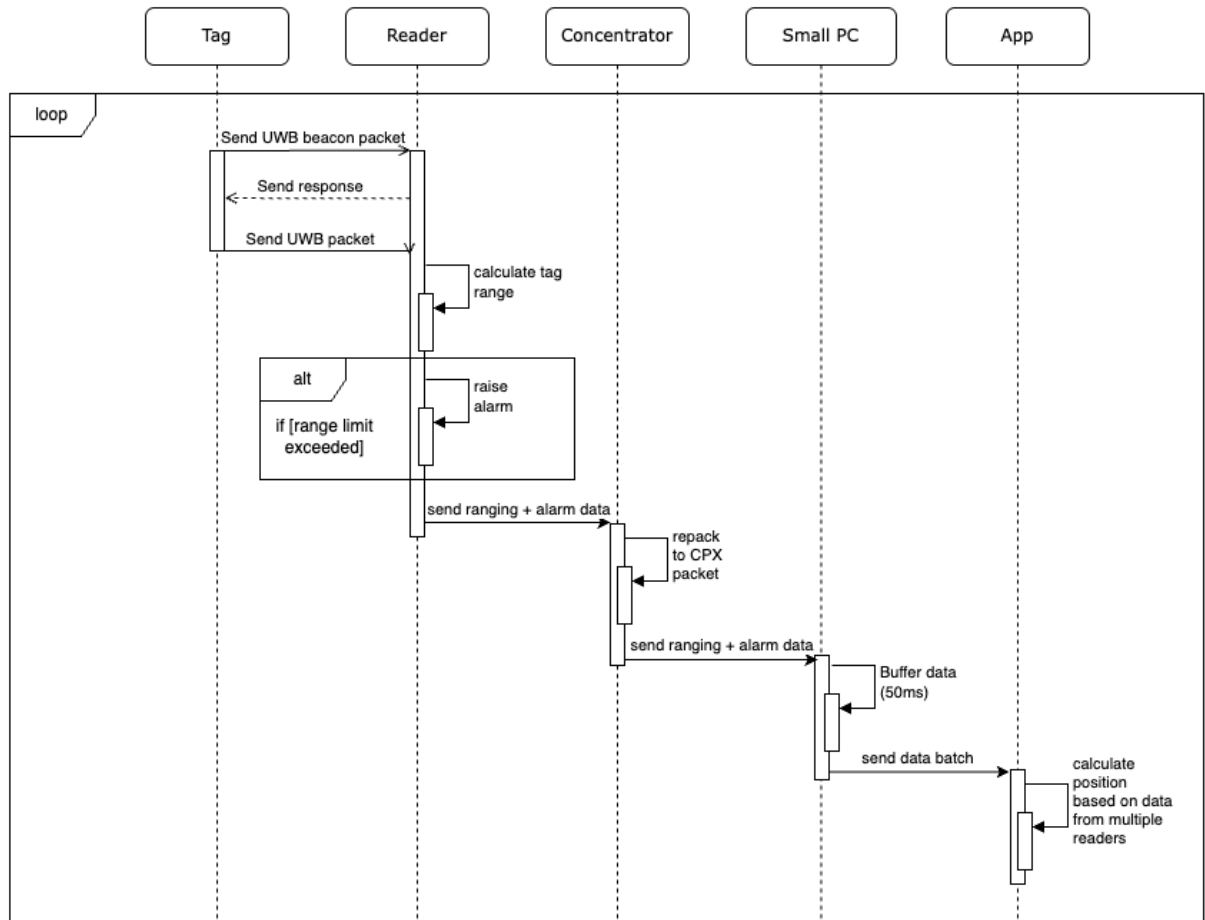
Na následujícím obrázku (obr. 22) je zobrazen pohled na výrobní plochu, kde jsou jednotlivé karoserie obarveny podle doby stání v dané zóně. Typickým příkladem kritického stavu je snížení kapacity některé z průchozích zón nebo naopak překročení kapacity dané zóny. Jako zónu si lze představit pracoviště, kde je vykonáván nějaký druh výrobního nebo servisního úkonu. V prvním případě se jedná například o situaci, kdy nastane porucha na části technologie v dané zóně, případně dojde lokálnímu úbytku pracovní síly a tím se sníží průchozí kapacity dané zóny. V druhém případě dojde k překročení průchozí kapacity dané zóny (pracoviště) vlivem vzrůstu počtu vstupujících aut. Tuto situaci lze efektivně detekovat pomocí zobrazení, které zohledňuje dobu setrvání každého auta v dané zóně. Při správě definovaných časů pak lze pohledem rozlišit zóny, kde probíhá normální provoz a zóny, kde dochází ke snižování průchodnosti. Barevné rozlišení doby setrvání lze nastavit například jak je tomu u semaforů (zelená – v pořádku, oranžová – varování, červená – problém), pak pro řízení umožňuje takto nastavený program/system velice rychlé určení, jestli se ve sledované oblasti nachází zóna, jejíž průchodnost je již saturována.



Obr. 22 Zobrazení podle doby stání v jednotlivých zónách (zdroj autor)

V rámci návrhu a postupně i realizace projektu CarRFID byly zúročeny předchozí zkušenosti ze systému ISI, především pak v přístupu k logice vazeb jednotlivých prostorových zón a vazeb mezi nimi.

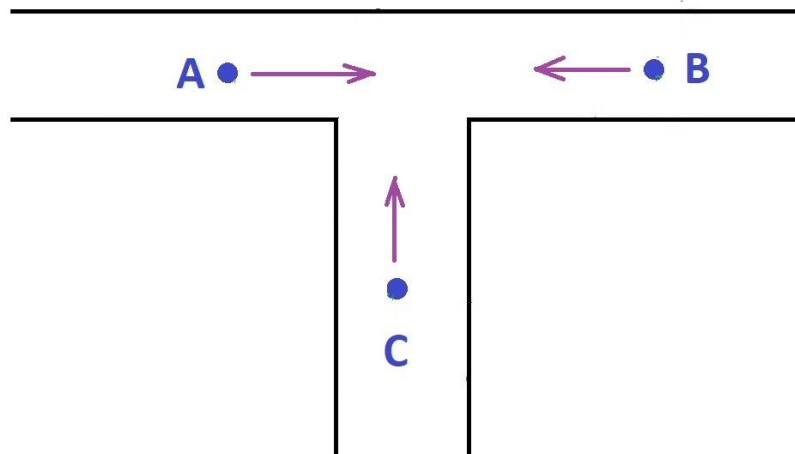
Systém CarRFID využívá pro lokalizaci technologii UWB a pro určení a výpočet polohy metodu TDOA. Pro účely dalšího postupu a k dosažení cíle byl vytvořen model popisující lokalizační proces z pohledu datové komunikace mezi pevným a lokalizovaným bodem. Schéma je zobrazeno na následujícím obrázku (obr. 23).



Obr. 23 Sekvenční model komunikace v jednotlivých vrstvách systému (zdroj autor)

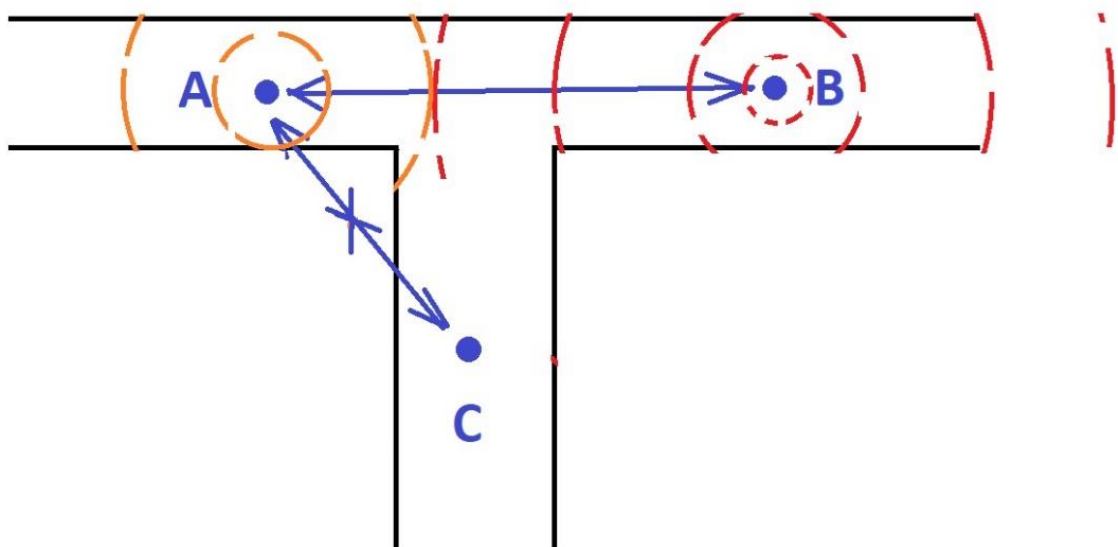
6.7 Definice základní úlohy – obecný princip řešení

Z uvedených experimentů v disertační práci, a především pak z místního šetření a diskuse s managementem několika klíčových podniků, vznikl obecný popis základní úlohy, která není v současné době dostatečně řešená. Jedná se o problém bezpečnosti pracovníků a bezpečnosti dopravy v obtížných průmyslových podmínkách. V rámci experimentální části práce byly vyhodnoceny jednotlivé metody a požadavky a z nich vyplynulo, že je třeba řešit obecnou situaci ve vnitropodnikové dopravě, která je modelová naznačena schematicky v následujícím obrázku (obr. 24).



Obr. 24 Schematické zobrazení výchozí situace (zdroj autor)

Na zobrazeném schématu jsou zobrazeny 3 pohybující se objekty v systému jedné „T“ křižovatky. V reálném prostředí lze předpokládat, že z hlediska rádiové komunikace jsou objekty A a B v přímé viditelnosti, kdežto objekt C není v přímé viditelnosti s dalšími objekty. Vzhledem k naznačenému vektoru pohybu všech objektů hrozí kolize jakékoliv kombinace z nich. Základním úkolem navrhovaného systému je pak predikce, případně aktivní zásah do této situace tak, aby takové kolizi bylo zabráněno.



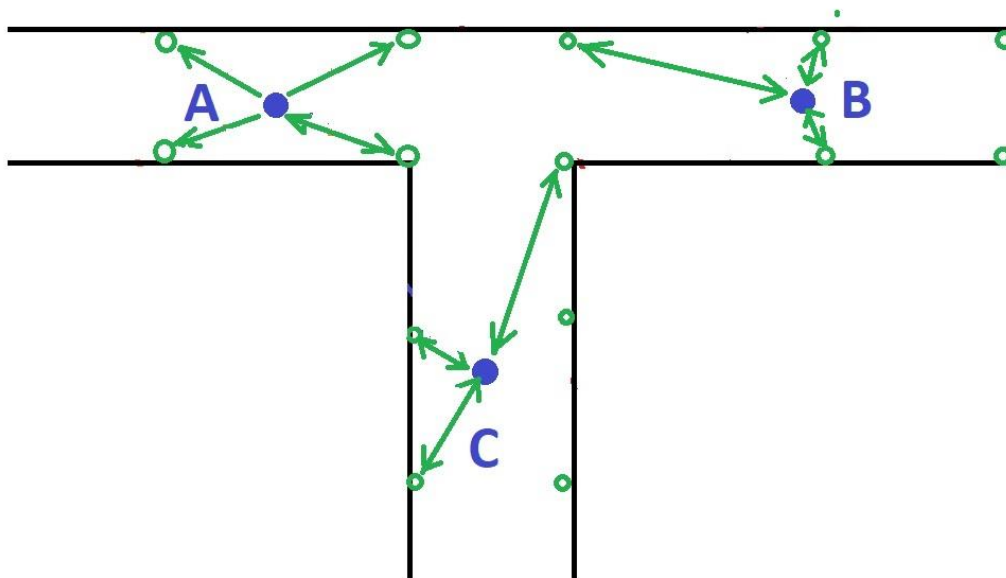
Obr. 25 Schematické zobrazení výchozí situace – řešení pomocí technologie UWB – ranging (zdroj autor)

V rámci tohoto modelu je pro danou situaci využít systém přímého měření vzdálenosti pomocí technologie UWB a metody ranging (obr. 25). Velkou výhodou takového řešení je pak především to, že zde není využita žádná stabilní infrastruktura. Nicméně, jak je ze schematického zobrazení patrné, v případě objektu C není možné ve většině běžných situací predikovat potenciální kolizi s objekty A a B.

Vzájemná kolize objektů A a B je pak predikovatelná s ohledem na vzájemnou rychlost obou objektů a s ohledem na stanovení bezpečnostních limitů systému. Co je ale jedním ze zásadních problémů je rychlost vůči vztažné soustavě, kterou je v tomto případě v prostředí, ve kterém se objekty pohybují. Pokud je rychlost obou objektů stejná, ale vektory právě opačné (objekty se k sobě přibližují), jsou nároky na brzdovou dráhu u obou objektů stejné.

Pokud se jedná ale o případ, kdy je relativní rychlost stejná jako v případě předešlém, jeden objekt ale stojí na místě a druhý se pohybuje dvojnásobnou rychlostí, nemůže stojící objekt případně kolizi nijak zabránit, naopak druhý, pohybující se objekt, musí mít brzdovou dráhu minimálně dvojnásobnou.

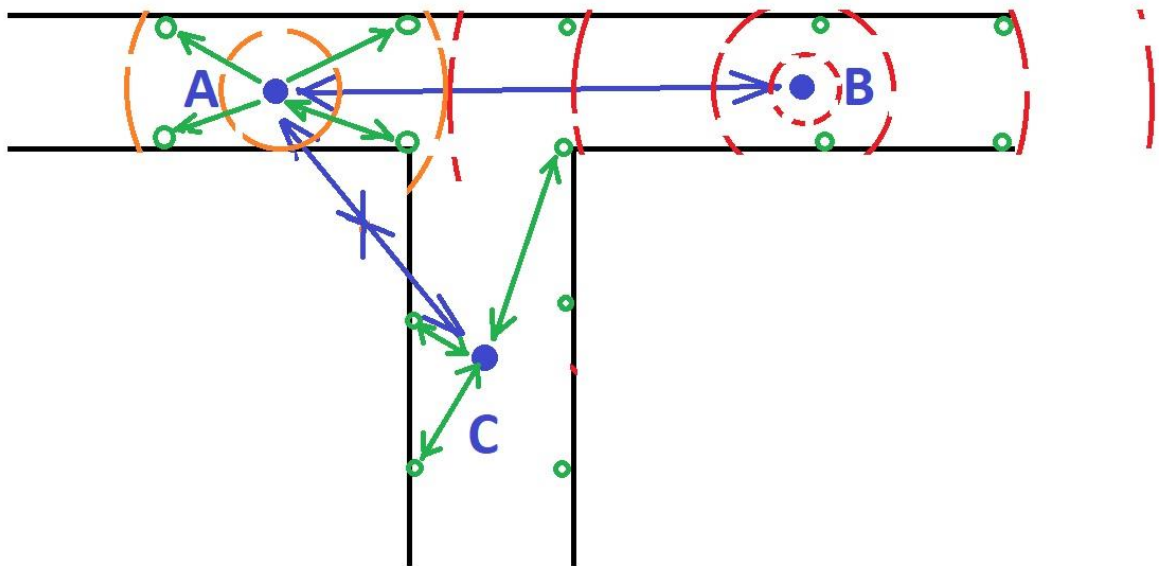
Tento na první pohled banální problém zcela zásadně ovlivňuje návrh řešení takové situace. Jednou z možností je zvětšení bezpečnostních zón, což značně ovlivňuje efektivitu provozu, druhou pak doplnění rozhodovací algoritmus o další vstupní veličinu, jakou je rychlost objektu vůči vztažné soustavě – v případě dopravních prostředků pak například pomocí odometrie. Nicméně ani tato doplňková informace neřeší modelovou situaci objektu C.



Obr. 26 Schematické zobrazení výchozí situace – řešení pomocí technologie UWB – metoda RTLS (zdroj autor)

Na předchozím obrázku (obr. 26) je zobrazena výchozí modelová situace řešená pomocí UWB prostorové lokalizace RTLS. Tato metoda zdánlivě řeší všechny výše popsané problémy. Jsou k dispozici všechny potřebné informace o situaci, a tudíž je možné provést predikci většiny potenciálních kolizních situací. Vzhledem k provedeným praktickým experimentům je toto řešení ale také ne zcela vyhovující jako obecné.

Prvním kritickým problémem takového řešení je samotná nutnost pevné infrastruktury. Pevná infrastruktura je problémem jak technickým, tak především ekonomickým. Jedná se totiž o to, že takto koncipovaný systém vyžaduje pokrytí pevnou infrastrukturou ve všech prostorách, včetně otevřených a rozlehlých, kde není přítomnost takového systému možné realizovat.



Obr. 27 Schematické zobrazení výchozí situace – řešení pomocí technologie UWB – RTLS/ranging (zdroj autor)

V rámci prováděných experimentů a analýz byla v konečném řešení navržena jako nejvhodnější metoda pro řešení obecných kolizních situací v dopravě kombinace obou předchozích řešení (obr. 27). Základem takového řešení pak musí být:

- možnost řešení antikolizního systému v otevřených prostorách i bez nutnosti přítomnosti pevné infrastruktury,
- možnost lokalizace a tím predikce potenciální kolize v komplikovaných prostředích – tzn. především predikce v křižovatkách.

Tato kombinace, která je v dostupných řešení do současnosti nikde nebyla použita. Výhodou je, že řeší většinu definovaných požadavků a je novým přístupem k dané problematice a eliminuje problémy v současné době používaných přístupů z obrázků předešlých principů možných řešení.

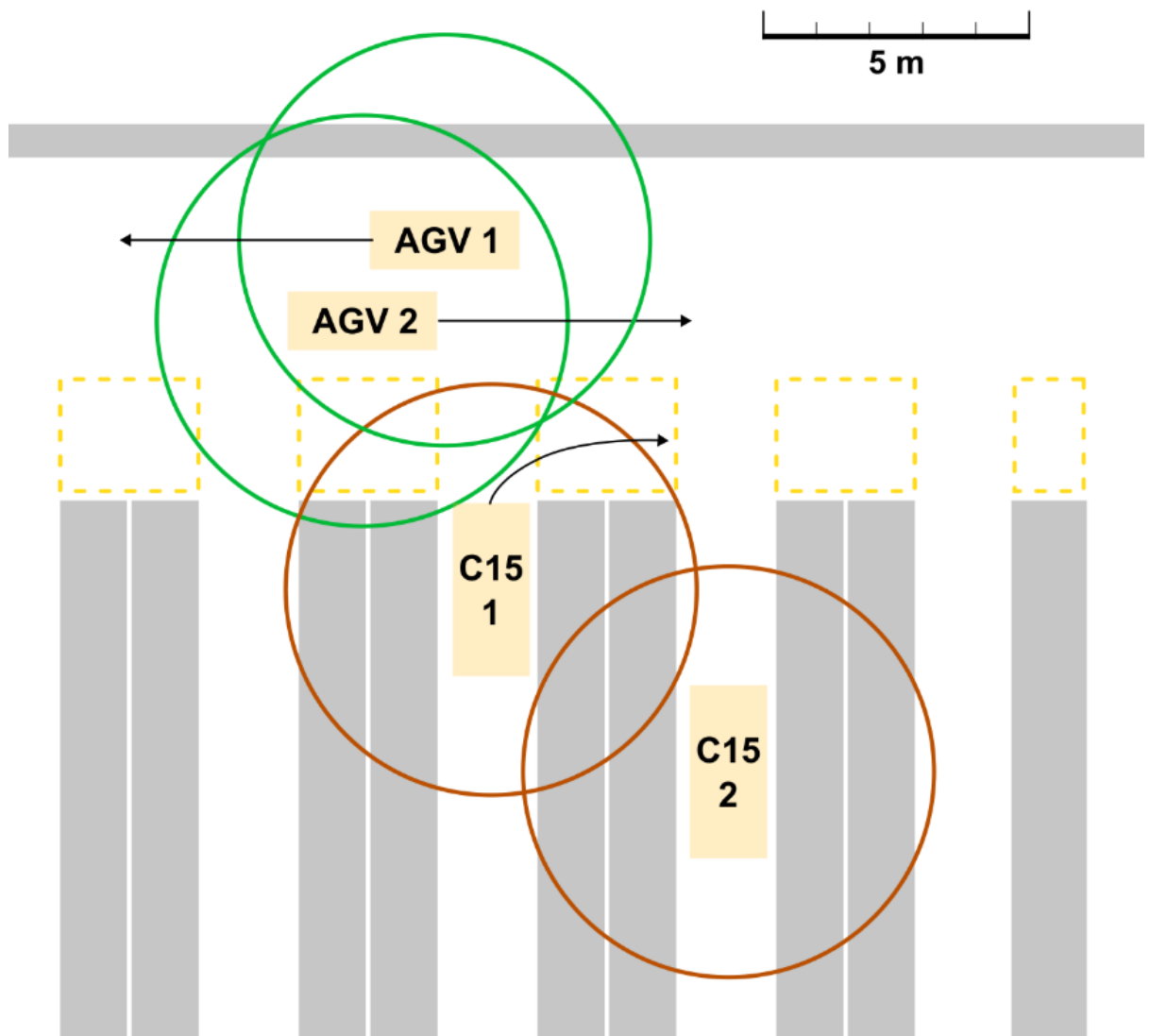
6.8 Zadání experimentální úlohy a ověření předpokladů

Jak již bylo uvedeno, simulace v dané úloze tak, aby její výsledky mohly být považovány za komplexní a natolik vážené, že by bylo možné na jejím základě navrhnout model systému by byla v současných podmínkách a dostupnými prostředky velmi těžko realizovatelná. Proto byla jako hlavní metoda ověření správnosti navrhovaného řešení zvoleno experimentální ověření v reálném prostředí. Cílovým prostředím by měly být především těžké a důlní provozy. Vzhledem ke komplikovanosti cílového prostředí byla experimentální úloha postupně rozdělena na několik na sebe navazujících etap.

3. Ověření použitelnosti technologie UWB v důlním prostředí
4. Ověření funkčních vlastností jednotky WAS v důlním prostředí bez nebezpečí výbuchu (bez nutnosti používat zařízení podléhající certifikaci ATEX)
5. Testování v běžném průmyslovém prostředí s ekvivalentními funkčními požadavky

6.9 Testování v běžném průmyslovém prostředí

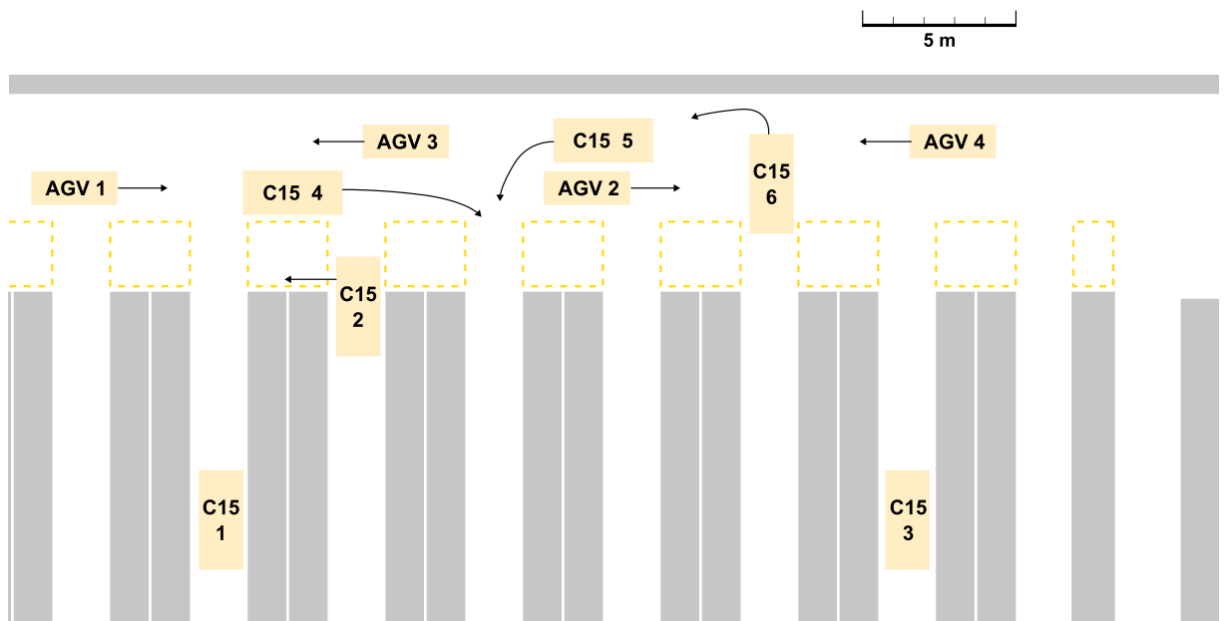
Pro ověření základního modelu systému bylo zvoleno řešení, kde se kombinují vlastnosti jednotky WAS pro lokalizaci systémem ranging (tedy jednotky vůči sobě navzájem) a zařízení fixní infrastruktury systému CarRFID, které umožňují lokalizaci pohybujících se objektů vůči vztažnému systému. V rámci experimentu v reálném prostředí bylo realizováno testování antikolizního systému na jednotkách AGV a pomocí lokalizační infrastruktury pak byla naměřena data, která mají poskytnout základní informace pro splnění předpokladu nasazení RTLS pro antikolizní funkce. Jednotka WAS tak, jak je postavena vyžadovala jisté úpravy tak, aby bylo možné ji propojit s napájecí sítí a některými řídicími signály AGV pro testování funkce antikolize.



Obr. 28 Schematické zobrazení výchozí situace – skladové prostředí s uličkami – detail potenciálně kolizní situace
(zdroj autor)

Ve skladových prostorách v testovacím prostředí se pohybují zakladače VNA C15 a automatické vozíky AGV, dále též manuální vozíky SP. Zadáním je řešit potenciálně kolizní situace, které při provozu vznikají (obr. 28). Mezi nejvýznamnější z nich patří:

- výjezd VNA ze skladové uličky, kde řidič má v určitých případech významně omezený rozhled a nemusí vidět příježdějící AGV,
- protisměrné míjení VNA a AGV v hlavní ulici (AGV může jet rychlostí až 8 km/h, VNA až 12 km/h),
- AGV zakladá do překládacích pozic na kraji regálové uličky a VNA pracuje v blízkosti.



Obr. 29 Schematické zobrazení výchozí situace – skladové prostředí s uličkami – rozšíření detailu (zdroj autor)

Na vozících AGV a VNA jsou instalovány jednotky WAS, které v pravidelných intervalech měří vzájemnou vzdálenost pomocí komunikace v pásmu UWB (tzv. ranging). Na základě takto změřené vzdálenosti jsou ovládány signály pro zpomalení, případně zastavení vozíku.

6.9.1 Antikolizní funkce z pohledu VNA

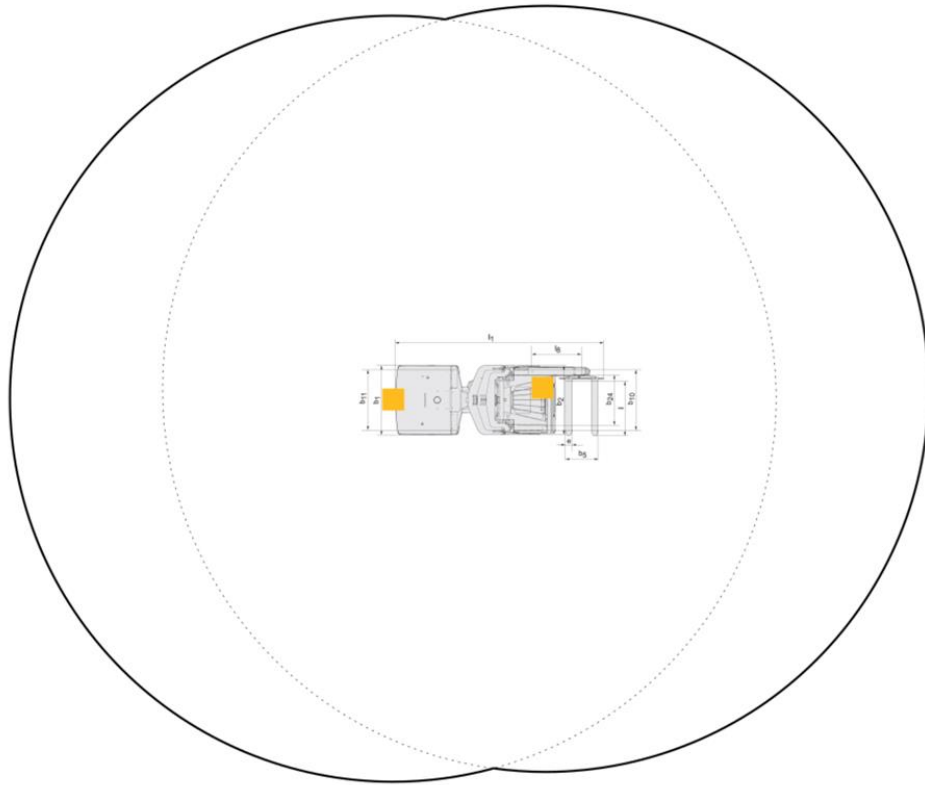
Chování jednotky ve VNA se liší podle přítomnosti VNA ve skladové uličce (indikováno signálem z vozíku, navázaným na přítomnost vozíku nad indukční smyčkou uličky):

1. VNA ve skladové uličce

- Při přiblížení AGV na vzdálenost 12 m indikuje maják na palubní desce VNA varování řidiči pomalu blikající žlutou barvou. Rychlost VNA není v tomto stavu ovlivněna.
- Při přiblížení AGV na vzdálenost 5 m dojde k zastavení VNA a maják indikuje tento stav rychle blikající červenou barvou.
 - V této situaci se VNA nemůže pohybovat směrem k AGV, ale může z kolize odjet pohybem v opačném směru (indikováno pomalu blikající červenou) – směr ke kolizi je rozlišený podle příjmu na přední a zadní anténě (viz obr. 30) a požadovaný směr pohybu vozíku je rozlišen pomocí signálů z ŘJ vozíku indikujících jízdu vpřed/vzad.
- Jakmile se vzdálenost mezi VNA a AGV zvýší nad 4 m a zároveň se dále zvyšuje, pokyn k zastavení je uvolněn a VNA se může opět rozjet kterýmkoliv směrem.
- Pokud se v blízkosti VNA nenachází žádné AGV, případně pokud se vzdálenost již zvětšuje a pohyb VNA není blokován, potom na majáku svítí barva zelená.

2. VNA mimo uličku

- Na indikačním majáku svítí barva bílá a pohyb VNA není omezen.



Obr. 30 Zobrazení základních zón přední a zadní lokalizační antény (zdroj autor)

- Výše uvedené hodnoty jsou orientační, parametry jsou konfigurovatelné.
- Je možné využít i funkci zpomalení, ale s ohledem na to, že v místě možné kolize již je VNA zpomalené svým vlastním systémem, tak asistenční antikolizní systém možnost zpomalení VNA nevyužívá.
- Antikolizní jednotka ve VNA nijak nereaguje na ostatní zakladače VNA.

6.9.2 Antikolizní funkce z pohledu AGV

Chování jednotky v AGV se liší podle přítomnosti VNA, které je v antikolizní zóně AGV, ve skladové uličce:

1. VNA v zóně je ve skladové uličce
 - Při přiblížení VNA na vzdálenost 8 m dojde ke zpomalení AGV na 50 % standardní rychlosti a maják na sloupu indikuje varování pomalu blikající žlutou barvou.
 - Při přiblížení VNA na vzdálenost 4 m dojde k dalšímu zpomalení AGV na 20 % standardní rychlosti a maják na sloupu indikuje tento stav rychle blikající červenou barvou.
 - Jakmile se vzdálenost mezi AGV a VNA zvýší nad 4 m a zároveň se dále zvyšuje, pokyn k zastavení je uvolněn a AGV může jet znovu plnou rychlostí.
 - Pokud se v blízkosti AGV nenachází žádné VNA, případně pokud se vzdálenost již zvětšuje a pohyb AGV není nijak omezen, potom na majáku svítí barva zelená.

2. VNA v zóně je mimo uličku

- Při přiblížení VNA na vzdálenost 8 m dojde ke zpomalení AGV na 50 % standardní rychlosti a maják na sloupu indikuje varování pomalu blikající žlutou barvou.
- Při přiblížení VNA na vzdálenost 4 m dojde k zastavení AGV a maják na sloupu indikuje tento stav rychle blikající červenou barvou.
- Jakmile se vzdálenost mezi AGV a VNA zvýší nad 4 m a zároveň se dále zvyšuje, pokyn k zastavení je uvolněn a AGV se může rozjet a jet znovu plnou rychlostí.
- Pokud se v blízkosti AGV nenachází žádná VNA, případně pokud se vzdálenost již zvětšuje a pohyb AGV není nijak omezen, potom na majáku svítí barva zelená.

Pozn.:

- Výše uvedené hodnoty jsou orientační, parametry jsou konfigurovatelné.
- Antikolizní jednotka v AGV nijak nereaguje na ostatní vozíky AGV.

6.10 Návrh technického řešení pro ověření vlastností v reálném prostředí

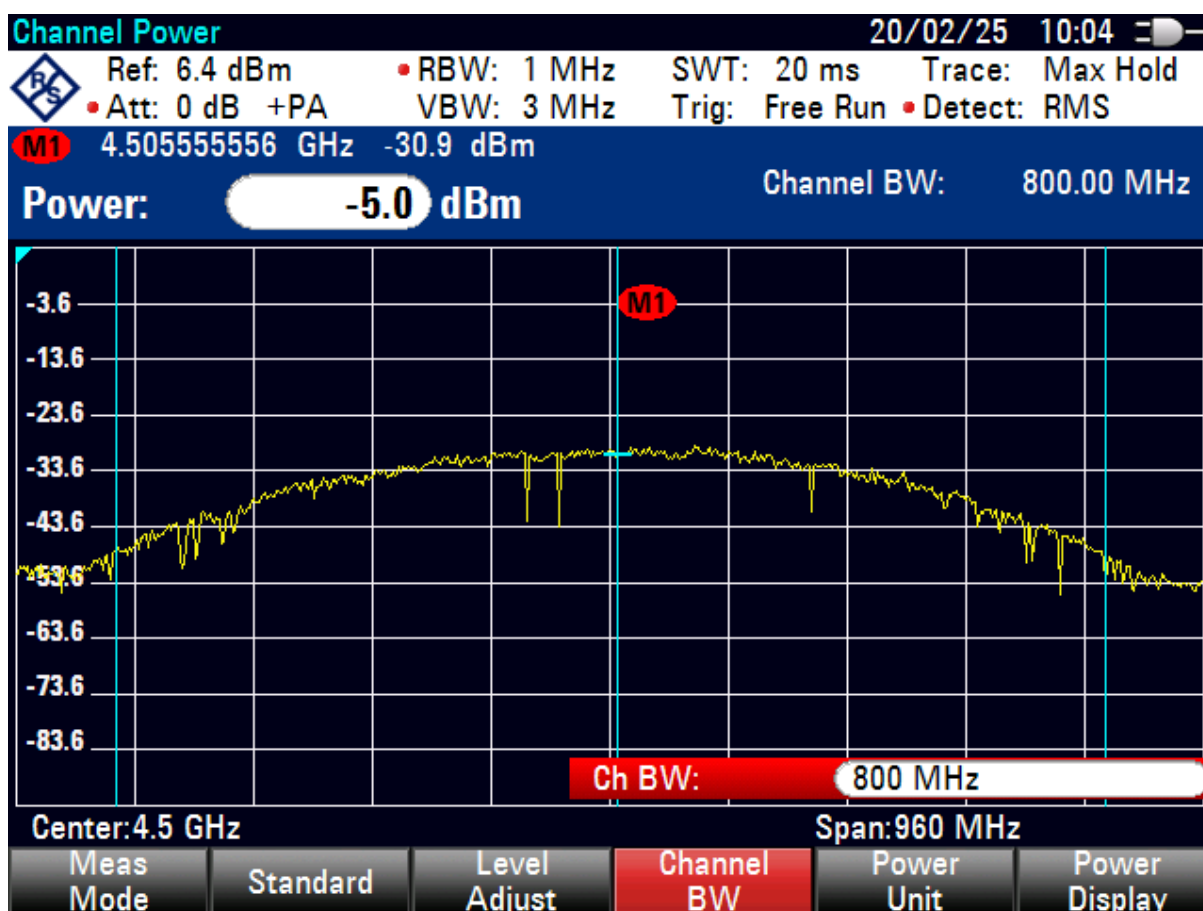
Pro experimentální ověření vlastností byla zvolena kombinace zařízení CarRFID a WAS. Ani v jednom případě se nejedná o instantní řešení, protože na zařízení každého ze systémů byly pro zamýšlený cíl stanoveny odlišné podmínky použití, především pak v oblasti využití rádiového spektra technologie UWB.

Pro tyto účely bylo nutné provést dílčí změny v konfiguraci rádiových modulů a posléze ověřit, jestli se jedná o změny, které budou v praxi použitelné s ohledem na platnou legislativu. Ověřování probíhalo v prostředí bezodrazové komory (obr. 31). Kritické jsou především hodnoty maximální vyzářené energie.



Obr. 31 Detaily měření vlastností a vyzářování (zdroj autor)

Měření probíhalo v ideálním prostředí tak, aby bylo možné ověřit všechny zásadní parametry. Pro splnění obecně platných norem bylo nezbytné splnit podmínky technických norem, především pak dle [14] a [15]. Všechna použítá zařízení obsahují kromě modulů UWB také transceiver pracující v pásmu ISM 868 MHz. Protože docházelo v rámci experimentů s částí UWB, především pak s nastavením a realizací anténního bloku, bylo nutné ověřovat také vlastnosti vysílače a přijímače v tomto pásmu. Ten je používám pro komunikaci v rámci předávání telemetrických dat, protože má v tomto ohledu daleko lepší přenosové vlastnosti, především pak dosah a odolnost proti rušení v otevřených prostorech. Průběh měření charakteristiky spektra vysílaného signálu zobrazuje obr. 32.



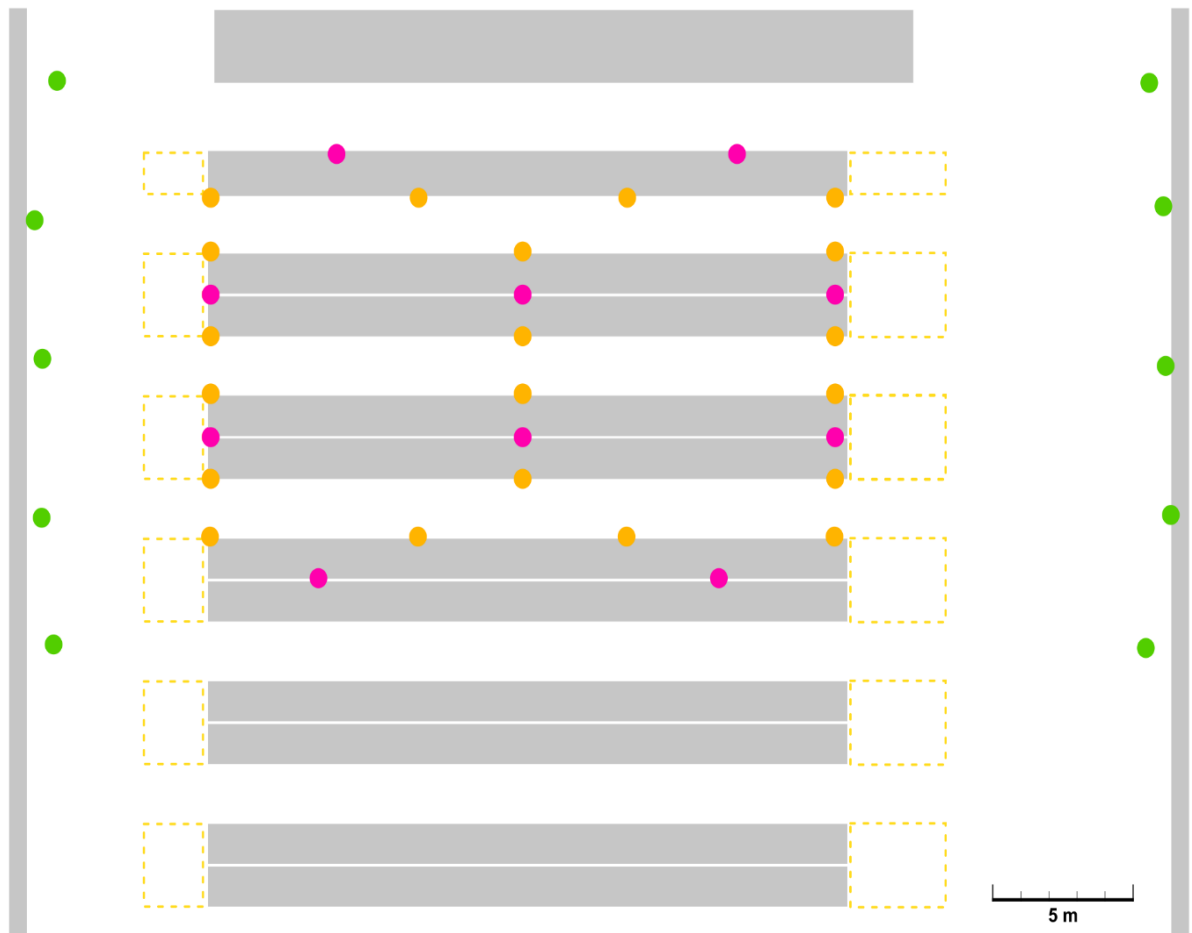
Obr. 32 Měření charakteristiky spektra vysílaného signálu vysílače UWB (zdroj autor)

6.10.1 Instalace pevné infrastruktury v rámci experimentálního provozu

Základní návrh umístění antén, které reprezentují kotvy systému je zobrazen na obr. 33. Jedná se o pokrytí celkem 3 uliček o šířce přibližně 2 m a délce regálové uličky cca 22 m. Umístění antén kotev je ve výšce 3–4 m, což je z hlediska rádiové viditelnosti optimální umístění vzhledem k umístění antén jednotek WAS na VNA.

Jako pevná infrastruktura bylo zvoleno 10 čtecích zařízení (kotev) systému CarRFID, každá s dvěma externími anténami a dalších 10 čtecích zařízení s dvojitou interní anténou pro diverzitní příjem. Jako agregátor připojení je pak využit PoE LAN switch pro datovou komunikaci a napájení

těchto zařízení. V rámci experimentu byl využit základní lokalizační engine systému CarRFID, který poskytl základní výstupní data.



Obr. 33 Základní návrh rozmístění antén (žluté body) a čtecí zařízení s interními anténami (zelené) (zdroj autor)

6.10.2 Montáž a propojení s VNA a GVN

Propojení WAS s VNA:

- Napájení 48 V oddělené DC/DC měničem
 - Signály indikující stav vozíku
 - Signál „Pohyb vpřed“
 - Signál „Pohyb vzad“
 - Signál „Ulička“
 - ŘJ vozíku indikuje pohyb sepnutím signálu do GND (48 V-), signály jsou snímány vstupy jednotky WAS Reader s interními pull-upy
- Dva signály pro ovládání zpomalení a zastavení
 - Signál „Zpomalení“ a signál „STOP“
 - Signály jsou ovládány dvěma nezávislými N/O kontakty signálových relé SPDT oproti napájení 48 V z vozíku
 - Pro oba signály platí, že při sepnutí kontaktu (přivedení napětí) dojde ke zpomalení, resp. zastavení

- Ovládací signály jsou přivedeny na samostatný konektor jednotky antikolizního systému

Příklad instalace přední UWB lokalizační antény je patrný z obr. 34.

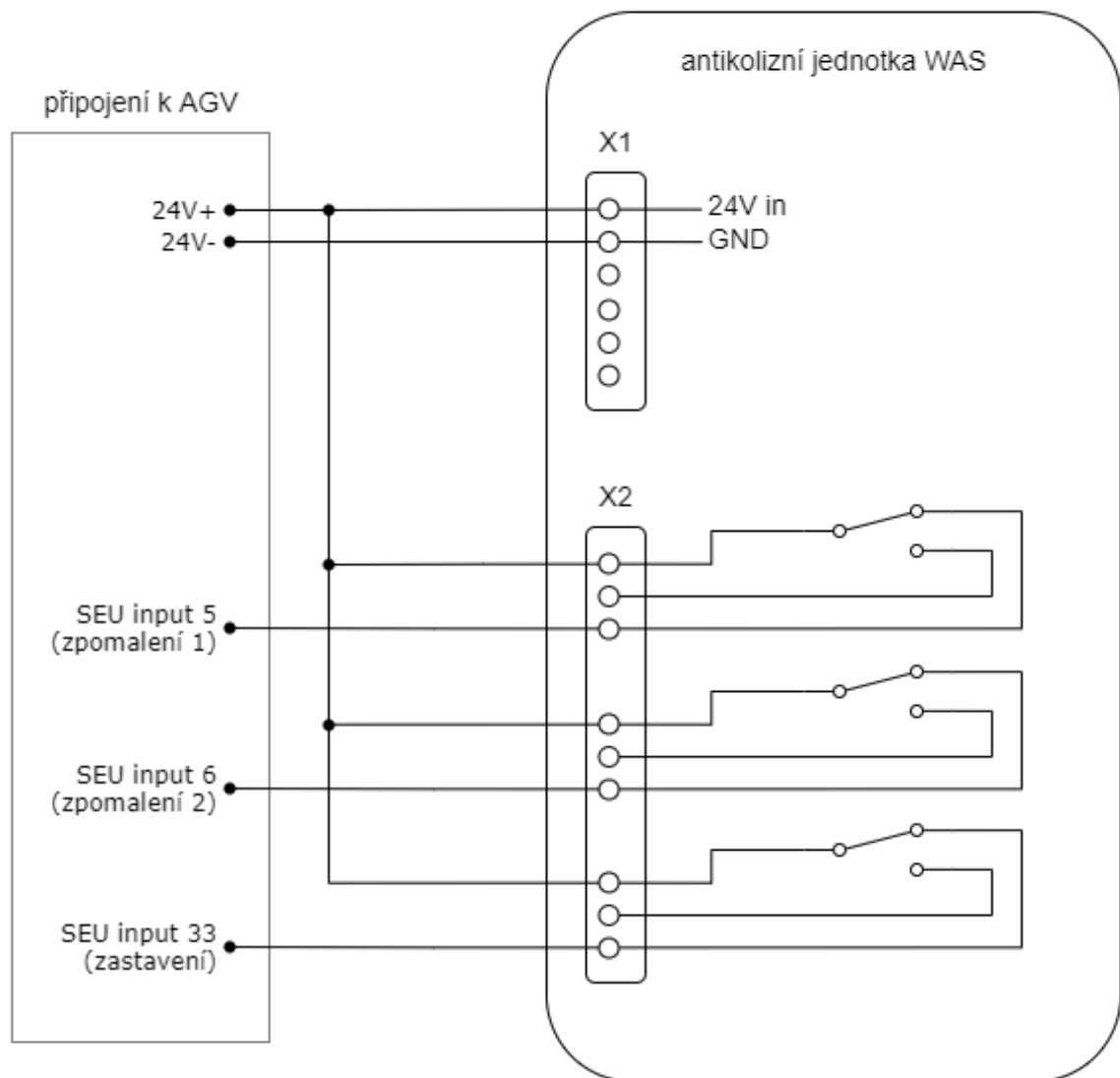


Obr. 34 Příklad umístění přední UWB antény na VNA (zdroj autor)

Pro propojení s AGV byla zvolena složitější cesta pro možnost případného testu přímého zásahu do řízení AGV. Propojení s AGV je definováno:

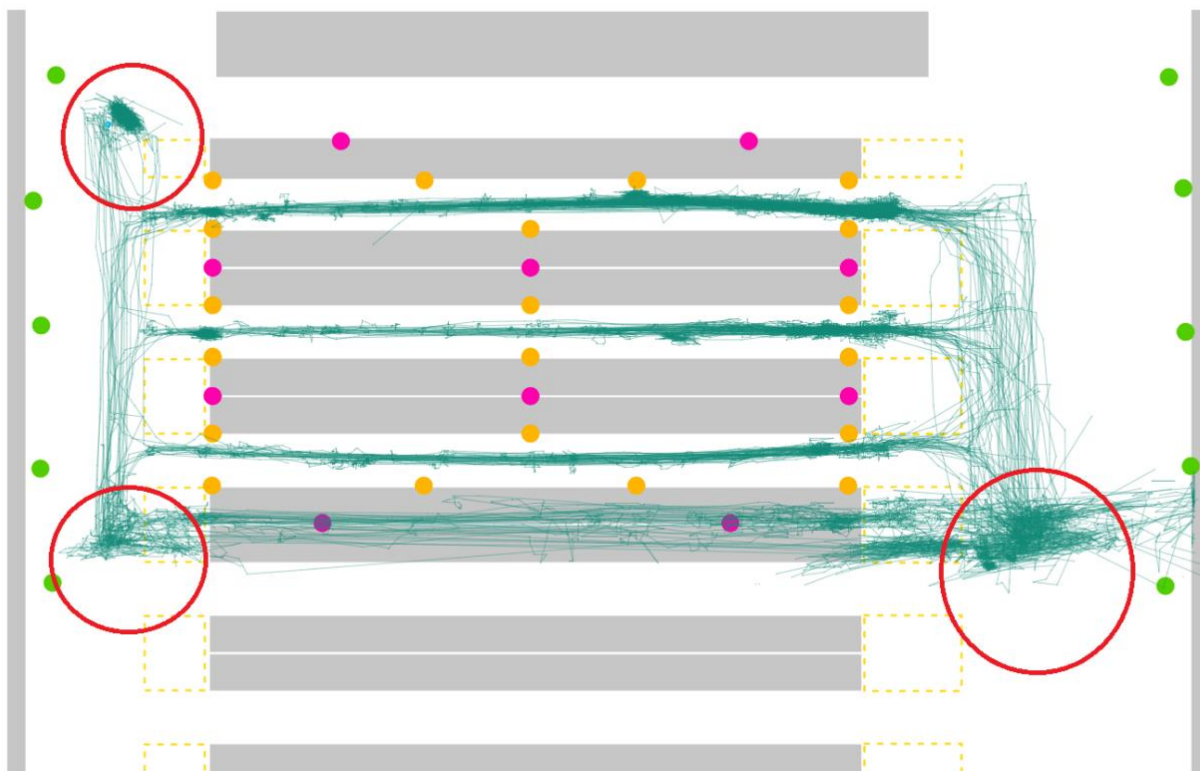
- Napájení 24 V oddělené DC/DC měničem.
- Tři signály pro ovládání zpomalení/zastavení
- Jednotlivé signály jsou ovládány třemi nezávislými N/C kontakty třech signálových relé SPDT oproti napájení 24 V z vozíku.
- Pro všechny tři signály platí, že při připojení na 24 V (sepnutý kontakt) není pohyb stroje nijak omezen, při rozeznutí kontaktu dojde ke zpomalení nebo zastavení.
- Signály jsou přivedeny na samostatný konektor jednotky antikolizního systému, tzn. při případném odpojení napájení od jednotky zůstane vozík v provozu (nebude zablokovaný).

Schéma základního připojení jednotky WAS je patrné z následujícího obrázku (obr. 35):

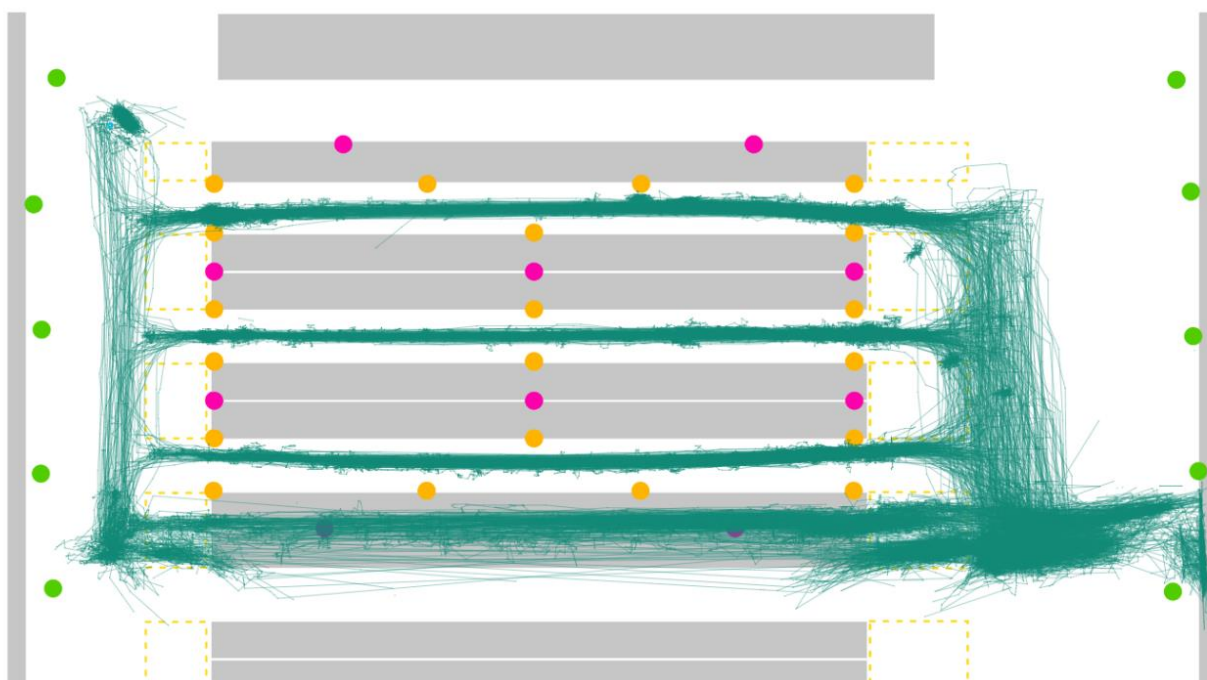


Obr. 35 Schéma základního připojení jednotky WAS k AGV (zdroj autor)

Z hlediska vzájemné lokalizace jednotek WAS byla jako optimální perioda měření relativní vzdálenosti zvolena 0,5 s. To umožňuje počítat s lokálním systémem pro 20 jednotek VNA a 20 jednotek AGV. Toto rozpořzení bylo částečně simulováno, ale výsledky simulací vycházely přibližně 2 x optimálnější. Vzhledem k provozní bezpečnosti bylo zvolena výše uvedený maximální počet jednotek v jedné oblasti, a i tak lze počítat s možností zpomalení reakce systému v případě, že dojde ke shluku více než poloviny maximálního počtu jednotek ve vzájemné rádiové viditelnosti.



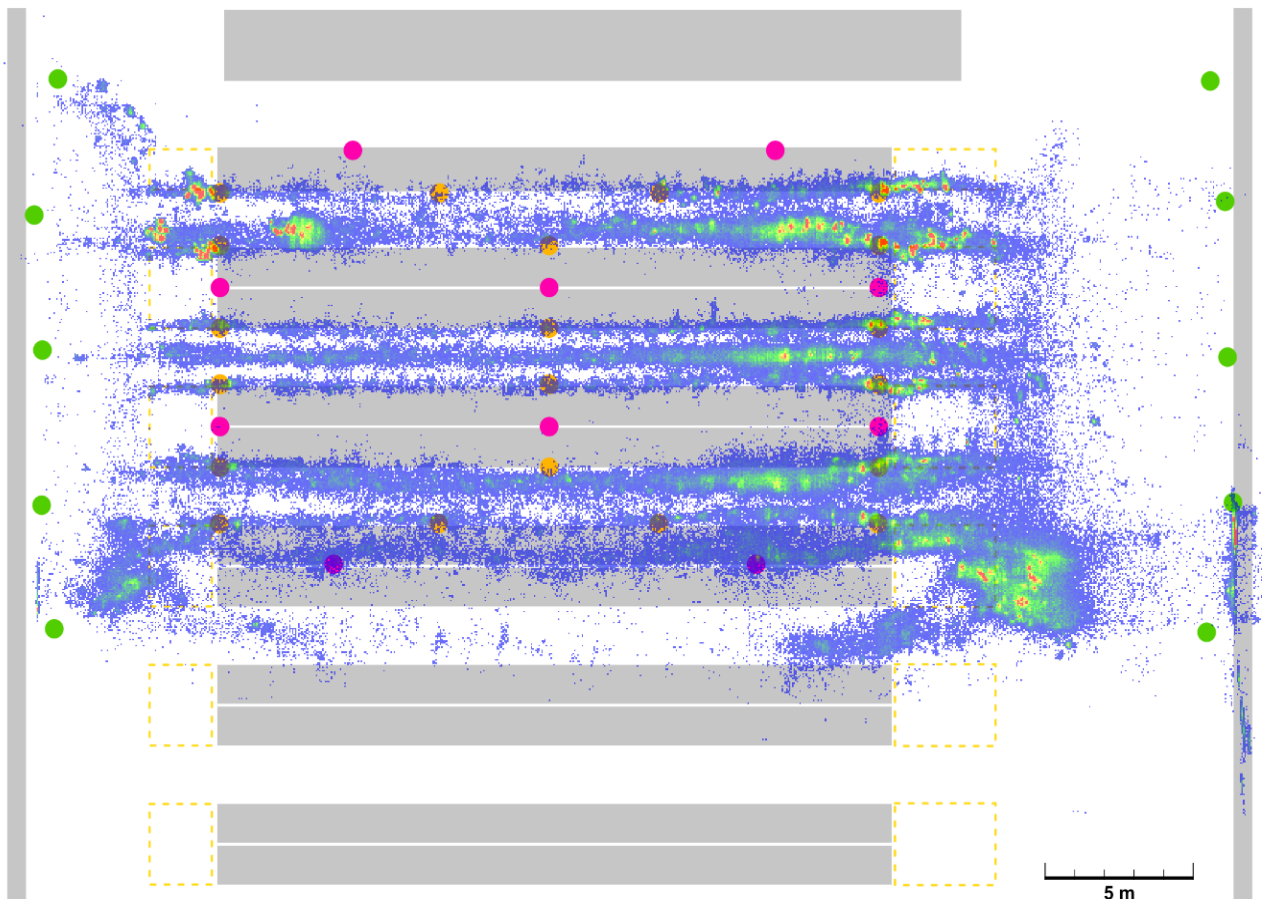
Obr. 36 Prvotní záznam průjezdů VNA (zdroj autor)



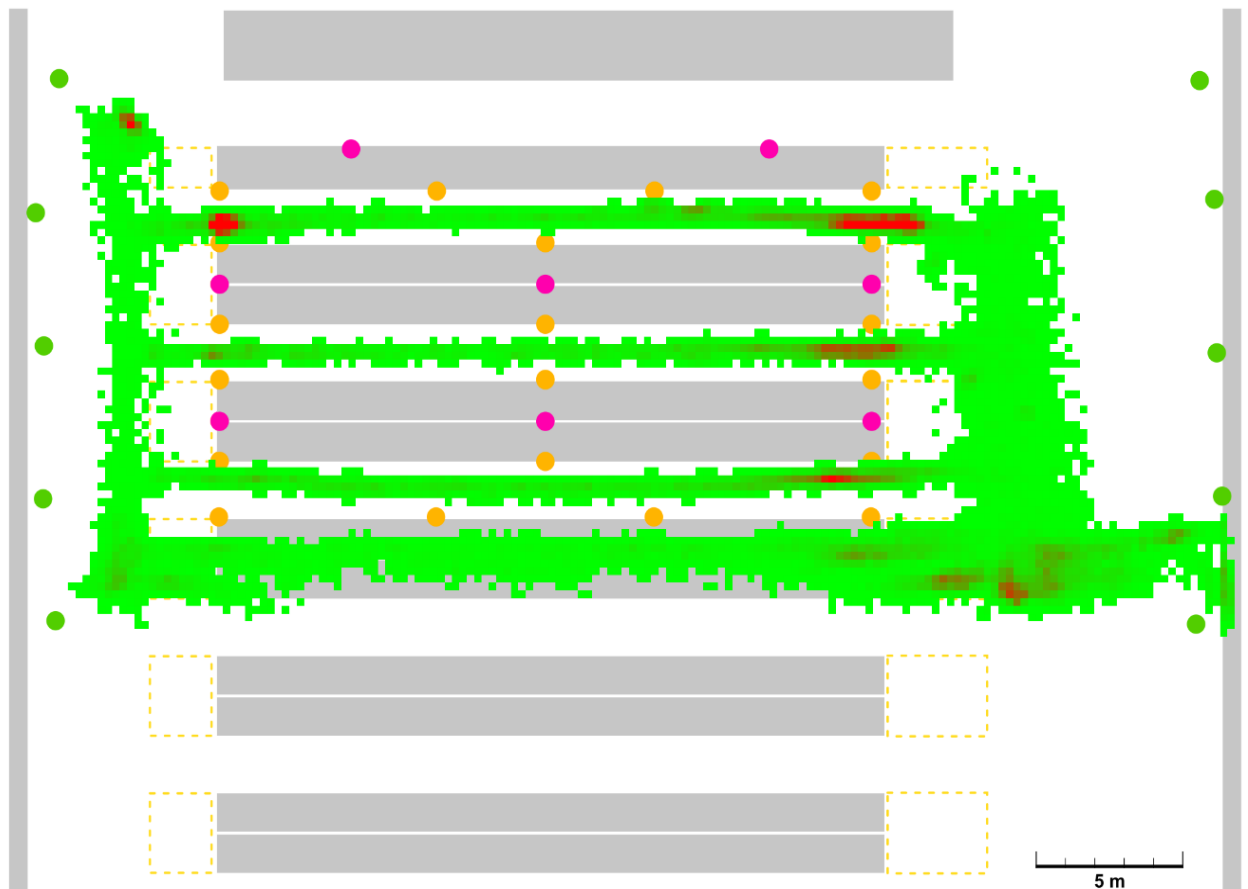
Obr. 37 Záznam průjezdu VNA za 48 hodin (zdroj autor)

Prvotní testy lokalizace po dílčích změnách poskytly relativně uspokojivé výsledky, jak ukazuje kumulativní mapa průjezdů na obr. 36. V červeně zvýrazněných oblastech pak lze pozorovat oblasti, kde dochází ke značnému zkreslení výstupu lokalizace. V těchto případech se jedná naprosto zjevně o oblasti, kde dochází k přechodu z oblasti pokryté lokalizační infrastrukturou do oblasti bez pokrytí. Tato situace se projevuje zdánlivě nesmyslným pohybem lokalizovaného VNA v přechodové oblasti.

V reálné aplikaci by bylo nutné tento jen ošetřit systémově, vzhledem k tomu, že se ale jedná především o experimentální fázi, postačí, pokud je tento jev identifikován a z výsledného hodnocení eliminován. Jiným pohledem jsou pak heatmapy na následujících dvou obrázcích (obr. 38, obr. 39), první s gridem 0,05 m a druhá s gridem 0,5 m. Tyto pohledy slouží pro analytickou činnost a návrh postupu další experimentální a teoretické práce. Zobrazené výsledky nejsou prvotním produktem experimentů, nýbrž výsledkem experimentů především s umístěním antén, a to jak na lokalizovaných VNA, tak na regálovém systému, kde jsou umístěny antény fixní infrastruktury.



Obr. 38 Heatmapa průjezdů VNA s gridem 0,05 m x 0,05 m (zdroj autor)



Obr. 39 Heatmapa průjezdů VNA s gridem 0,15 m x 0,15 m

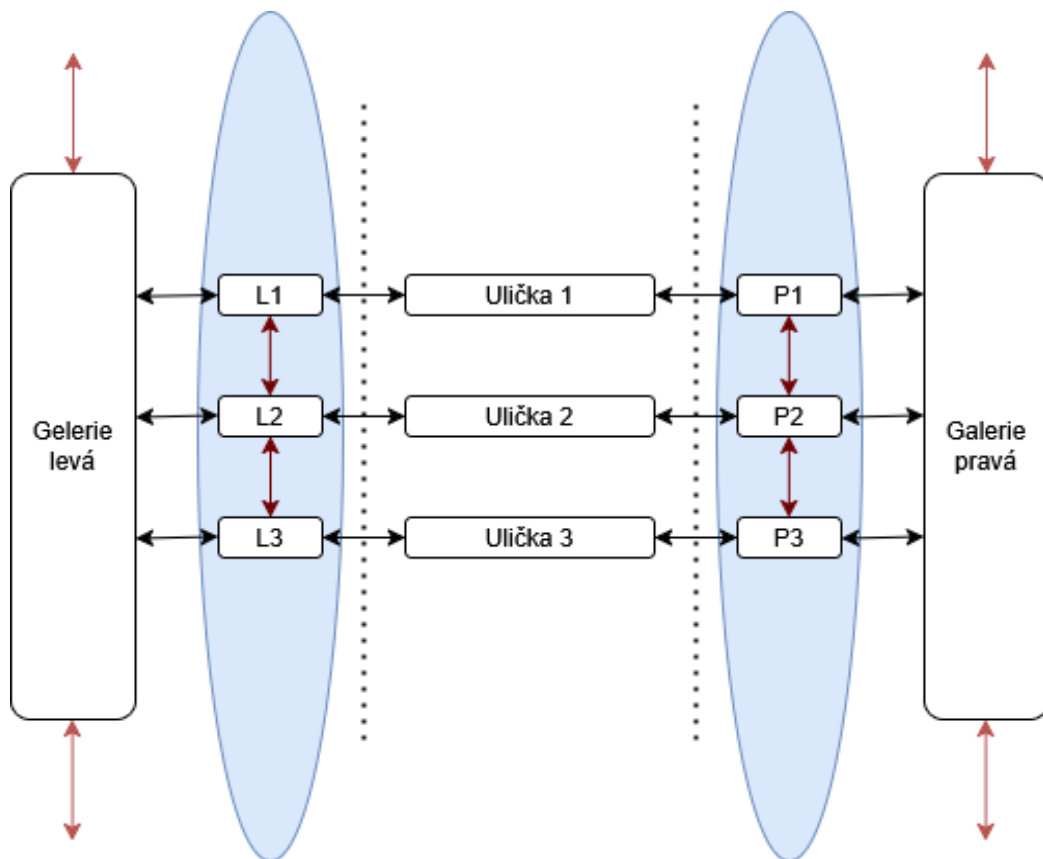
Po provedení řady experimentů s umístěním antén byla metodou prosté indukce definována kritická úloha pro pokračování v prostředí prováděného experimentu. A tou se stalo paradoxně určení přesné polohy v rámci vztažného systému a především v rámci modelu existujících cest. Tím paradoxem je právě to, co bylo popsáno v kapitolách zabývajících se zónovou lokalizací. V těchto kapitolách byl popsán problém nejistoty příslušnosti k jednotlivým lokalizačním zónám s ohledem na nedostatek vstupních informací. Ten musel být řešen poměrně exaktními způsoby tak, aby bylo zaručeno, že vždy dojde k vyřešení nejasností určitým „tvrdým“ způsobem, jako je například přemístění lokalizovaného objektu (pracovníka) do zóny, která je jednoznačně fyzicky oddělena od zbytku systému a není v takové situaci pochyb, kde se lokalizovaný objekt jednoznačně nenachází.

Pro tuto úlohu je ale kritické právě to, kde se lokalizovaný objekt v dané situaci nachází, pro zjednodušení v kontextu popisovaného experimentu, ve které uličce regálového systému se nachází. To se ukázalo jako zásadní úlohou, která ovlivňuje použitelnost výsledného modelu. Tento kritický rozdíl oproti předpokladu je ten, že na rozdíl od systémů v důlním prostředí, kde je zásadní útlum rádiového signálu technologie UWB v místech přechodu mezi jednotlivými zónami (velmi často reprezentovanými úzkými chodbami nebo tunely), v tomto modelovém prostředí je zásadním vlivem parazitní přeslech mezi jednotlivými zónami.

I když se na rozdíl od systému ISI nejedná primárně o 1-D (jednorozměrný lokalizační systém), nýbrž 2-D nebo 3-D systém, rozdělení lokalizovaného prostoru do jednotlivých zón a vytvoření vzájemných vazeb mezi těmito zónami je základním předpokladem pro spolehlivou funkci budoucího systému.

6.10.3 Statistické vyhodnocení lokalizačních dat

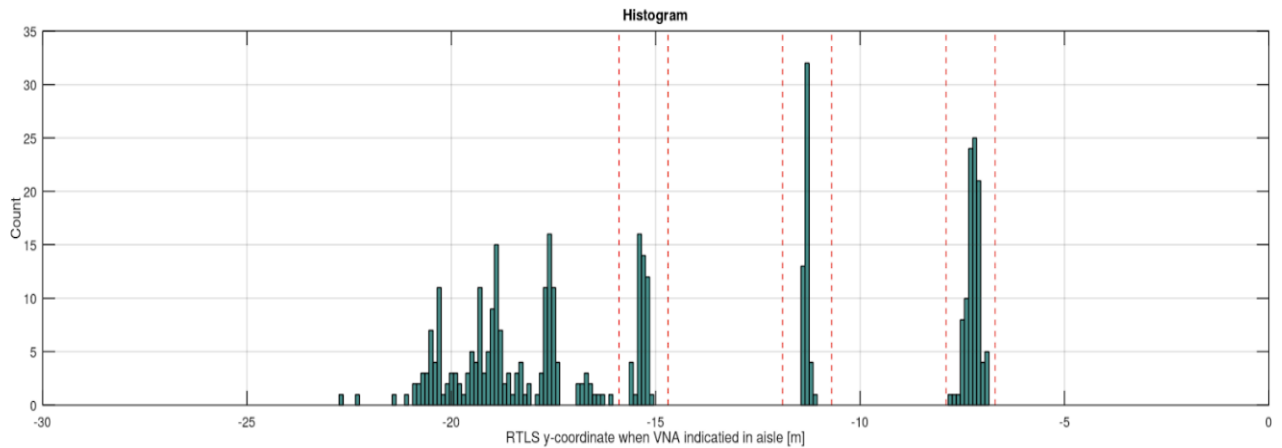
Jak již bylo řečeno výše, pro návrh modelu systému je nutné získat jistotu, že získávaná data umožní v co největší možné míře dosáhnout stanoveného cíle. Ten sice není přesně kvantifikován, nicméně v obecné rovině jde o predikci kolizních situací a na základě těchto predikcí pak provedení zásahů do probíhajících procesů tak, aby byly minimalizovány případné škody na zdraví nebo majetku. Pro účely ověření bylo prostředí prováděného experimentu nahrazeno teoretickým modelem sledovaného dopravního systému zobrazeného na následujícím obrázku (obr. 40).



Obr. 40 Sítový graf reprezentující experimentální prostředí (zdroj autor)

Potenciální kolize je nejvíce pravděpodobná v zónách (vrcholech síťového grafu) L_x a P_x , protože se jedná o zóny, kde se protínají cesty VNA a AGV. Proto byla jako jedna ze stěžejních úloh prováděných experimentálních měření určena spolehlivost systému v zařazování lokalizovaných objektů (v tomto modelovém případě VNA) do jednotlivých uliček. Pro potřeby dalšího zpracování dat, byly uličky definovány v kartézském souřadném systému osou y a pozicemi dle pořadí uliček přibližně souřadnicí -8 m; -11 m; -16 m, dle prvních 3 vrcholů histogramu zprava na následujícím grafu.

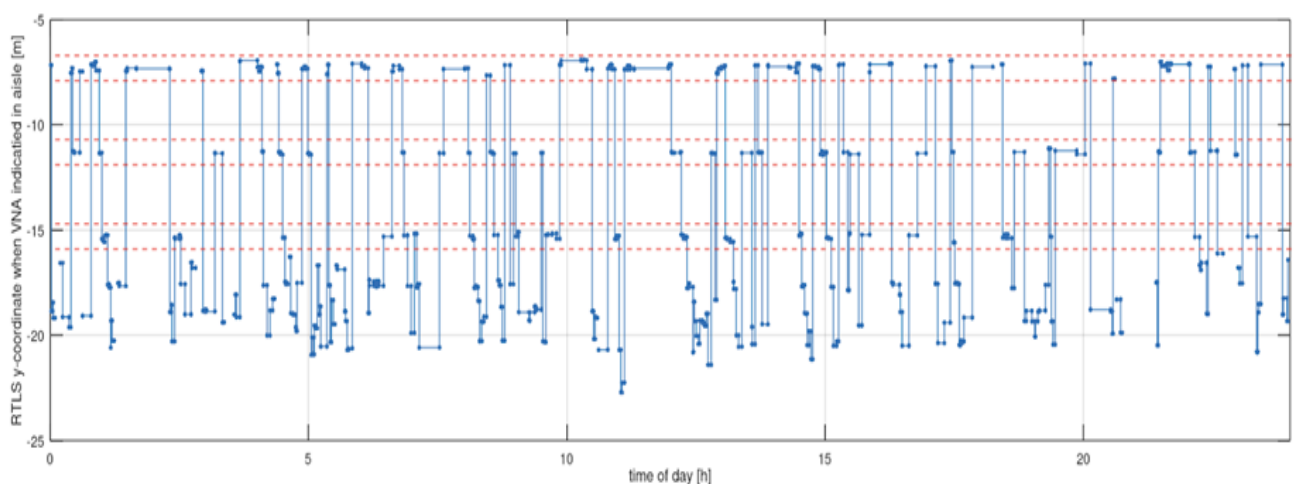
Pro vyhodnocení správnosti byl využit signál „Ulička“ z řídicí jednotky VNA, který díky dalším navazujícím systémům je schopen určit, jestli je VNA v uličce. Informace o tom, ve které uličce a v jaké konkrétní poloze je pak úkolem lokalizačního systému.



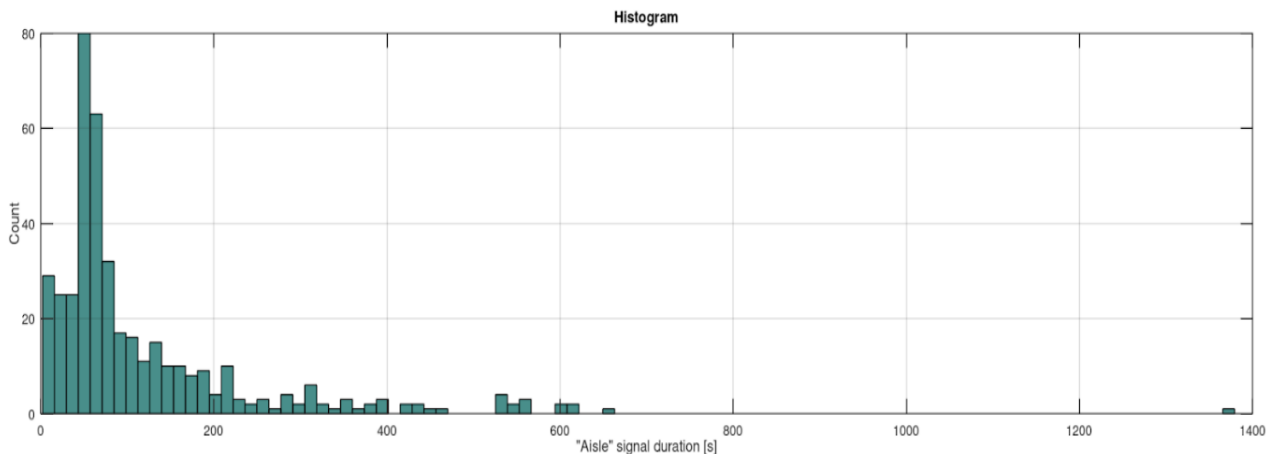
Obr. 41 Histogram počtu přítomnosti VNA v daných zónách „Ulička x“ (zdroj autor)

Pro vyhodnocení bylo využito vzorku dat získaných v časovém okně 48 hodiny. V tomto okně bylo detekováno 480 párových událostí „vstoupil do uličky – vystoupil z uličky“. Z tohoto vzorku byl sestaven histogram zobrazený na obr. 41, kde je při rozdělení oblasti v souřadném systému v ose y na jednotlivé uličky o šířce 2,5 m patrné, že se rozdělení událostí do jednotlivých uliček dá s více než 99% pravděpodobností určit, ve které uličce se VNA nachází.

Události v oblasti -17 m až -30 m jsou parazitními událostmi vznikajícími pohybem sledovaného VNA na hranici prostoru pokrytého lokalizační infrastrukturou a lze je v rámci tohoto řešení zanedbat. Na následujících obrázcích (obr. 42, obr. 43) jsou pak zobrazeny z jiných pohledů.



Obr. 42 Y-souřadnice VNA přítomného v uličce v časovém grafu za 24 hodin (zdroj autor)



Obr. 43 Histogram událostí dle doby setrvání v jednotlivých uličkách (zdroj autor)

6.11 Diskuse o výsledcích návrhů

V rámci provedených výzkumných a experimentálních prací, jejichž cílem je zvyšování bezpečnosti v dopravě byla vytvořena řada návrhů a modelů. Již v zárodku těchto úvah bylo pro tento účel zcela vyloučeno využití pasivních RFID technologií, a to zejména pro jejich zjevně vyčerpaný potenciál. Proto se jimi práce nezabývá.

V rámci výzkumné a experimentální části byla ale vyloučena z dalšího rozvoje i technologie aktivního RFID, která pro lokalizaci využívá metodu měření síly přijímaného signálu – RSSI. Tato technologie má své nezastupitelné místo v aplikacích náročných na prostředí s vysokým důrazem na ekonomiku, v bezpečnosti dopravy ale svůj potenciál s největší pravděpodobností také vyčerpala. V rámci experimentální části práce bylo učiněno několik pokusů a zdokonalení této technologie, především pak v oblasti pásová dopravníkové technologie, bohužel teoretické předpoklady, z nichž vycházely prováděné experimenty se v praxi neukázaly být využitelné. Tyto experimenty jen definitivně potvrdili autorovo přesvědčení o vyčerpání potenciálu těchto řešení v dané oblasti.

V následující části teoretických i praktických úvah následovalo využití technologie UWB, a to za využití několika metod využití této technologie, jako například TOF (ranging) metody TDOA. V rámci vstupní rešerše a analýzy aktuálního stavu poznání bylo shledáno, že využívání těchto technologií je v současné době na vysoké úrovni. Co se ale také prokázalo je to, že využití těchto technologií ve specifických druzích dopravy, jako je především těžký a těžební průmysl, kde toto řešení nebylo použito a ukazuje se jako velmi vhodné.

Příčiny nevyužití jsou spatřovány v technické náročnosti, tím pádem i ekonomické náročnosti. Proto nasazení těchto technologií do těžkých provozů je v současné době nepreferované, přičemž lze předpokládat, že i tyto přístupy se změní. Další příčinou nepoužití v současné době je i to, že

co může být výhodné v běžných podmínkách i jako parciální řešení, je v některých specifických druzích provozu nepoužitelné.

V rámci dizertační práce bylo nakonec navrženo obecné řešení, které kombinuje vlastnosti metody lokalizace v reálném čase vůči vztažné soustavě (RTLS) a rangingu. Tato kombinace umožňuje řešit kolizní situace jak v uzavřených, tak v otevřených prostorech. Ranging samotný poskytuje využívat funkce antikolizního systému i v případech, kdy není k dispozici lokalizační infrastruktura. Tento systém však není vhodný do uzavřených prostor, jako jsou například skladové a manipulační plochy nebo podpovrchové provozy.

RTLS systémy naopak mohou poskytnout informace o poloze objektů bez ohledu na jejich přímou vzájemnou interakci. Nevýhodou je pak především nutnost existence lokalizační infrastruktury, závislost na ní a některé její nevhodné vlastnosti, jako je například čas potřebný pro detekci potenciálně nebezpečné situace a čas potřebný pro reakci na ni. Tento systém ale poskytuje možnosti pro těžbu dat, která mohou pomoci pro další zefektivňování výrobních a logistických procesů.

Byl tedy navržen model systému pro zvyšování bezpečnosti v dopravě, jenž je kombinací několika režimů využívání technologie aktivního RFID, jehož základní vlastnosti byly ověřeny v rámci provedených experimentů. Autor dosáhl přesvědčení, že cílů dizertační práce bylo dosaženo.

7 Závěr

Obsahem disertační práce je analýza základních teoretických oblastí a posouzení stavu současného poznání v oblasti technologií rádiové identifikace a lokalizace se zaměřením na technologie aktivního RFID a s tím spojeného návrhu informačního systému ke zvýšení bezpečnosti ve specifických druzích dopravy a návazných provozech. Jedná se o relativně mladé a značně progresivní odvětví, které si i do budoucna zaslouží příslušnou pozornost a rozvoj s cílem zvyšování bezpečnosti dopravy v důležitých provozech a zvyšování bezpečnosti pracovníků pohybujících se v těchto provozech.

Hlavním motivem práce bylo rozvíjet možnosti zavádění nových technologií v oblastech, kde je vysoká míra rizika ohrožení lidského zdraví a života a tyto nové technologie mají velký potenciál tato rizika snižovat. Jedním ze základních motivů disertační práce byla snaha rozvíjet i v podpovrchových provozech dispečerské metody řízení provozu, které jsou v dnešní době v povrchových provozech zcela standardní, ale v podpovrchových provozech je jejich zavádění komplikováno nepřítomností jinak běžné komunikační a lokalizační infrastruktury, což je velký problém a nesl s sebou mnohá úskalí, které bylo nutné překonat, aby návrhy nebyly pouhou teorií bez možnosti uplatnění v praxi.

V některých případech nebylo možno provádět všechny potřebné experimenty v reálném prostředí z důvodů technických, ekonomických ale také legislativních překážek. Toto se podařilo překonat prováděním části experimentů v cílovém prostředí a následný přenos do prostředí, kde bylo možno experimentální činnost dokončit.

V disertační práci je zohledněna autorova letitá praktická zkušenost z důležitých provozů, teoretické poznatky a používání vhodných metod, které byly doplněny mnohými experimenty respektující příslušné přísné oborové normy a také reálná vhodnost použitých metod respektujících specifické prostředí, kterým bezpochyby důležitý provoz jsou.

V disertační práci je navržen model antikolizního systému, popsán UML diagramy s vysvětleními funkce. Byly vytvořeny a vyzkoušeny technické prostředky lokalizace antikolizního systému s dlouhodobým ověřením potvrzujícím vysokou spolehlivost a zanedbatelnou chybovost navrženého řešení.

Vliv navrženého modelu systému na zvýšení bezpečnosti lze velmi těžko přesně kvantifikovat v současném stavu poznání.

Z hlediska současných zkušeností, lze konstatovat, že bezpečnost pracovníků lze použitím návrhů zvýšit v intervalu o 20-40 procent z evidovaných případů porušení bezpečnostních předpisů, které se nachází v intervalu 50-80 procent. Při využití antikolizního systému dopravních a pracovních strojů lze snížit počet problematických incidentů potenciálně vedoucích ke kolizím o 30-60 procent.

Z výše uvedeného lze kvalifikovaně odhadnout, že s využitím navrženého modelu bude možné snížit pravděpodobnost kombinovaných incidentů o cca 50 procent oproti původnímu stavu.

Ze zkušeností jak získaných v rámci vstupní analýzy, tak ze zkušeností, které získal autor v rámci výzkumu, lze ale jednoznačně tvrdit, že nasazení systému, který bez aktivní účasti pracovníků zasahuje do dopravních nebo výrobních procesů, má pozitivní vliv na bezpečnost. Vždy je třeba nastavení takového systému optimalizovat s ohledem na efektivitu zasažených procesů, to je však již úloha praktická, nikoliv teoretická.

Lze konstatovat, že cíl disertační práce byl naplněn a toto tvrzení je podpořeno i praktickými zkouškami a realizací v reálném prostředí. Z hlediska teoretického lze vyzdvihnout rozšíření využití a úpravy metod teorie grafů pro řešení situací spojených s lokalizací v reálném čase a vytváření postupů pro predikci a eliminaci kolizních stavů.

Z praktického hlediska lze vyzdvihnout možnost reálného nasazení navrženého řešení nejen v tuzemském prostředí, ale také v zahraničí, protože podmínky jsou podobné. Zajímavým výsledkem je zejména úspěšný testovací provoz, který navázal na praktické experimenty, přičemž se také podařilo ověřit funkčnost a spolehlivost navrženého antikolizního systému, což zvyšuje a rozvíjí poznání v aplikacích aktivního RFID.

Summary

The content of the dissertation is an analysis of the basic theoretical areas and an assessment of the current state of knowledge in the field of radio identification and localization technologies with a focus on active RFID technologies and the associated design of an information system to increase safety in specific types of transport and related operations. It is a relatively young and highly progressive industry that deserves appropriate attention and development in the future with the aim of increasing the safety of transport in mining operations and increasing the safety of workers moving in these operations.

The main motive of the work was to develop the possibilities of introducing new technologies in areas where there is a high level of risk to human health and life and these new technologies have a great potential to reduce these risks. One of the basic motives of the dissertation was the effort to develop traffic control dispatch methods in subsurface operations, which are quite standard in surface operations nowadays, but their implementation in subsurface operations is complicated by the absence of otherwise common communication and localization infrastructure, which is a big problem and brought with it many difficulties that had to be overcome so that the proposals were not just a theory without the possibility of application in practice.

In some cases, it was not possible to perform all the necessary experiments in a real environment due to technical, economic, but also legislative obstacles. This was overcome by performing part of the experiments in the target environment and subsequent transfer to an environment where the experimental activity could be completed.

The dissertation takes into account the author's many years of practical experience from mining operations, theoretical knowledge and the use of suitable methods, which were supplemented by many experiments respecting the relevant strict industry standards, as well as the real suitability of the methods used respecting the specific environment, which mining operations undoubtedly are.

In the dissertation, a model of the anti-collision system is proposed, described by UML diagrams with explanations of the function. Technical means of locating the anti-collision system were created and tested, with long-term verification confirming the high reliability and negligible error rate of the proposed solution.

The impact of the proposed system model on increasing safety is very difficult to accurately quantify in the current state of knowledge.

From the point of view of current experience, it can be stated that the safety of workers can be increased by the use of proposals in the interval of 20-40 percent of the recorded cases of violation of safety regulations, which is in the 50-80 percent interval. When using the anti-collision system of transport and work machines, the number of problematic incidents potentially leading to collisions can be reduced by 30-60 percent.

From the above, it can be qualifiedly estimated that with the use of the proposed model, it will be possible to reduce the probability of combined incidents by about 50 percent compared to the original state.

From the experience gained both in the initial analysis and the experience gained by the author in research, it can be clearly stated that the deployment of a system that intervenes in transport or production processes without the active participation of workers has a positive effect on safety. It is always necessary to optimize the settings of such a system with regard to the efficiency of the affected processes, but this is already a practical task, not a theoretical one.

It can be stated that the goal of the dissertation was fulfilled and this statement is also supported by practical tests and implementation in a real environment. From a theoretical point of view, one can highlight the expansion of the use and modification of graph theory methods for solving situations associated with real-time localization and creating procedures for the prediction and elimination of collision states.

From a practical point of view, the possibility of real deployment of the proposed solution can be highlighted not only in the domestic environment, but also abroad, because the conditions are similar. An interesting result is a particularly successful test operation, which followed on from practical experiments, while it was also possible to verify the functionality and reliability of the designed anti-collision system, which increases and develops knowledge in applications of active RFID.

Literatura

- [1] 2014/30/EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/30/EU ze dne 26. února 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se elektromagnetické kompatibility (přepracované znění). Praha: Evropský parlament; Rada Evropské unie, 2014
- [2] SU, Wei-Hao; CHEN, Kai-Ying; LU, Louis Y. Y. a WANG, Jen-Jen. Knowledge Development Trajectories of the Radio Frequency Identification Domain: An Academic Study Based on Citation and Main Paths Analysis. Online. Applied Sciences. 2021, roč. 11, č. 18. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11188254>. [cit. 2024-03-18].
- [3] CAVUR, Mahmut a DEMIR, Ebubekir. RSSI-based hybrid algorithm for real-time tracking in underground mining by using RFID technology. Online. Physical Communication. 2022, roč. 55. ISSN 18744907. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2022.101863>. [cit. 2024-03-18].
- [4] WOOLSEY, Aimee A. Novel Technology Methods of Enterprise Unmanned Traffic Management (E-UTM) Solutions for Mining. Online. Mining, Metallurgy & Exploration. 2022, roč. 39, č. 6, s. 2365-2378. ISSN 2524-3462. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00687-w>. [cit. 2024-03-18].
- [5] LÖÖW, Joel; ABRAHAMSSON, Lena a JOHANSSON, Jan. Mining 4.0—the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. Online. Mining, Metallurgy & Exploration. 2019, roč. 36, č. 4, s. 701-707. ISSN 2524-3462. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00104-9>. [cit. 2024-03-18].
- [6] SALIM, Omar; DEY, Shuvashis; MASOUMI, Hossein a KARMAKAR, Nemaï Chandra. Crack Monitoring System for Soft Rock Mining Conveyor Belt Using UHF RFID Sensors. Online. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021, roč. 70, s. 1-12. ISSN 0018-9456. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3069025>. [cit. 2024-03-18].
- [7] ZARE, Masoud; BATTULWAR, Rushikesh; SEAMONS, Joseph a SATTARVAND, Javad. Applications of Wireless Indoor Positioning Systems and Technologies in Underground Mining: a Review. Online. Mining, Metallurgy & Exploration. 2021, roč. 38, č. 6, s. 2307-2322. ISSN 2524-3462. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00476-x>. [cit. 2024-03-18].
- [8] ETSI EN 300 330. Short Range Devices (SRD); Radio equipment in the frequency range 9 kHz to 25 MHz and inductive loop systems in the frequency range 9 kHz to 30 MHz; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. V2.1.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2017. Dostupné také z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/300330/02.01.01_60/en_300330v020101p.pdf
- [9] ETSI EN 300 220-2. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 2: Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive. V2.4.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2012. Dostupné také

- z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/02.04.01_40/en_30022002v020401o.pdf
- [10] ZAM SERVIS S.R.O. ISI – Informační systém pro identifikaci v dole [online]. 2016 [cit. 2023-10-02]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwir2uum_qGCAXUS8bsIHVWycUEQFnoECBMQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.zam-servis.cz%2FKATALOG_DULNI%2FCZ%2FISI_CZ_V131231.pdf&usg=AOvVaw1GhMYaUDuXQdJTmmxDzr4q&opi=89978449
- [11] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 22/1997 Sb: Zákon o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů. In: . 1997.
- [12] ETSI EN 301 489-1. ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.1(b) of Directive 2014/53/EU and the essential requirements of article 6 of Directive 2014/30/EU. V2.1.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2017. Dostupné také z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301400_301499/30148901/02.01.01_60/en_30148901v020101p.pdf
- [13] ETSI EN 300 220-1. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 1: Technical characteristics and test methods. V2.4.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2012. Dostupné také z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/02.04.01_60/en_30022001v020401p.pdf
- [14] ETSI EN 300 065-1. Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU; Part 1: Requirements for Generic UWB applications. V2.1.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2016. Dostupné také z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/30206501/02.01.01_60/en_30206501v020101p.pdf
- [15] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2021-4 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. In: . 2021. Dostupné také z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjqlbaahaKCAxX-hf0HHb18CbAQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ctu.cz%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fobsah%2Fvo-r10-032021-4.pdf&usg=AOvVaw3iwwg-5u66B43A06AsqKgZc&opi=89978449>
- [16] Bánští záchranáři vyprostili další tři mrtvé z dolu ČSM, podle průzkumu stále hrozí výbuch. IRozhlas [online]. 2018 [cit. 2023-06-02]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/dul-csm-karvina-pozar-dulni-nestesti-hornici_1812231034_miz
- [17] MOLNÁR, Zdeněk. Pokročilé metody vědecké práce. [Zeleneč]: Profess Consulting, 2012. Věda pro praxi (Profess Consulting). ISBN isbn978-80-7259-064-3.

- [18] FOSSO WAMBA, Samuel, Marcelo CUNHA DE AZAMBUJA, Carlos FERNANDO JUNG, Carla SCHWENGBER TEN CATEN a Fabiano PASSUELO HESSEL. RFID-Env: methods and software simulation for RFID environments. *Business Process Management Journal* [online]. 2010, 16(6), 1014-1038 [cit. 2023-06-23]. ISSN 1463-7154. Dostupné z: doi:10.1108/14637151011093044
- [19] ABAD, Ismael, Carlos CERRADA, Jose A. CERRADA, Rubén HERADIO a Enrique VALERO. Managing RFID Sensors Networks with a General Purpose RFID Middleware. *Sensors* [online]. 2012, 12(6), 7719-7737 [cit. 2023-06-23]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s120607719
- [20] WANG, Zi Min, Bai Qing HE, J.C.M. KAO a W.-P. SUNG. RFID Location Algorithm. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2016, 63 [cit. 2023-06-23]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20166305007
- [21] ABDEL-RAOUF, Hany E., Abdi K.H. OBSIYE a Md. Rafiqul ISLAM. A novel printed antenna for ultrawideband RFID (UWB-RFID) tag. *Microwave and Optical Technology Letters* [online]. 2010, 52(11), 2528-2531 [cit. 2023-06-23]. ISSN 08952477. Dostupné z: doi:10.1002/mop.25536
- [22] GARBATI, Marco, Etienne PERRET, Romain SIRAGUSA a Christophe HALOPE. Ultrawideband Chipless RFID: Reader Technology From SFCW to IR-UWB. *IEEE Microwave Magazine* [online]. 2019, 20(6), 74-88 [cit. 2023-06-23]. ISSN 1527-3342. Dostupné z: doi:10.1109/MMM.2019.2904408
- [23] SIMONOFF, Joel, Jesse BERGER, Aidan ABDULALI, Osher LERNER, Lazaro Danny RODRIGUEZ a Patrick FINK. Intra-Spacecraft RFID Localization. In: 2021 IEEE International Conference on RFID (RFID) [online]. IEEE, 2021, 2021-4-27, s. 1-8 [cit. 2023-06-23]. ISBN 978-1-6654-4090-5. Dostupné z: doi:10.1109/RFID52461.2021.9444373
- [24] GENG, Li, Monica F. BUGALLO, Akshay ATHALYE a Petar M. DJURIC. Indoor Tracking With RFID Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* [online]. 2014, 8(1), 96-105 [cit. 2023-06-23]. ISSN 1932-4553. Dostupné z: doi:10.1109/JSTSP.2013.2286972
- [25] MAILLART, Lisa M., Akram KAMRANI, Bryan A. NORMAN, Jayant RAJGOPAL a Peter J. HAWRYLAK. Optimizing RFID tag-inventorying algorithms. *IEEE Transactions* [online]. 2010, 42(9), 690-702 [cit. 2023-06-23]. ISSN 0740-817X. Dostupné z: doi:10.1080/07408171003705714
- [26] Design of RFID Outdoor Localization System RFID Locator for Disaster Management. In: PROCEEDINGS 2015 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERNET OF THINGS (IOT). Seoul: IEEE, 2015, s. 4-11. ISBN 978-1-4673-8058-4.
- [27] Hybrid RFID System. In: 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVES, RADAR AND WIRELESS COMMUNICATIONS (MIKON-2010), VOL 1 AND VOL 2 Published: 2010. Vilnius: 4th Microwave and Radar Week (MRW)/18th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010. ISBN 978-1-4244-5914-8.
- [28] RFID Array Sensing. In: PROCEEDINGS OF THE FOURTH EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION. Barcelona: 4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2010. ISBN 978-84-7653-472-4.

- [29] ETSI EN 300 328. Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. V2.1.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2016. Dostupné také z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/300328/02.01.01_60/en_300328v020101p.pdf
- [30] ETSI EN 301 489-3. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 3: Specific conditions for Short-Range Devices (SRD) operating on frequencies between 9 kHz and 246 GHz. V1.6.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2013. Dostupné také z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301400_301499/30148903/01.06.01_60/en_30148903v010601p.pdf
- [31] ETSI EN 301 489-33. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 33: Specific conditions for Ultra Wide Band (UWB) communications devices. V1.1.1. Sophia Antipolis: ETSI, 2009. Dostupné také z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301400_301499/30148933/01.01.01_60/en_30130148v010101p.pdf
- [32] ČSN 33 2000-4-41. Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti - Ochrana před úrazem elektrickým proudem. Ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [33] ČSN EN 55022. Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření. Ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [34] ČSN EN 55024. Zařízení informační techniky - Charakteristiky odolnosti - Meze a metody měření. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [35] ČSN EN 55032. Elektromagnetická kompatibilita multimediálních zařízení - Požadavky na emisi. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [36] ČSN EN 60950-1. Zařízení informační technologie - Bezpečnost - Část 1: Všeobecné požadavky. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [37] ČSN EN 61000-1-2. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 1-2: Obecně - Metodika pro dosažení funkční bezpečnosti elektrických a elektronických systémů s ohledem na elektromagnetické jevy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [38] ČSN EN 61000-4-3. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-3: Zkušební a měřicí technika - Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti. Ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [39] ČSN EN 61439-1. Rozváděče nízkého napětí - Část 1: Typově zkoušené a částečně typově zkoušené rozváděče. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [40] ČSN EN 61439-2. Rozváděče nízkého napětí - Část 2: Výkonové rozváděče. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [41] 2011/65/EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU ze dne 8. června 2011 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. Praha: Evropský parlament; Rada Evropské unie, 2011.
- [42] 2014/35/EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/35/EU ze dne 26. února 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání elektrických zařízení určených pro používání v určitých mezích napětí na trh. Praha: Evropský parlament; Rada Evropské unie, 2014.
- [43] 2014/53/EU. Směrnice 2014/53/EU Evropského parlamentu a Rady ze dne 16. dubna 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání rádiových zařízení na trh a zrušení směrnice 1999/5/ES. Praha: Evropský parlament; Rada Evropské unie, 2014.
- [44] Rydval, Slávek. 30+3 pravidel UML. 1. vydání. Praha: Elebedial, 2021. 103 stran. ISBN 978-80-906968-6-0.
- [45] Lano, Kevin. Advanced systems design with Java, UML and MDA [online]. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005 [cit. 2021-06-14]. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/natl-ebooks/detail.action?docID=270039>.
- [46] Computer simulation. <http://www.sciencedaily.com> [online]. [cit. 2025-02-06].