

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Využití RFID duplexního přenosu signálu na rychle se
pohybující prostředky

Zdeněk Španěl

Diplomová práce
2014

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk Španěl**
Osobní číslo: **I11359**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Využití RFID duplexního přenosu signálu na rychle se pohybující prostředky**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V teoretické části popište technologii RFID a proveďte popis datové struktury přenášených informací a rádiového signálu v pásmu 2,4 GHz. Popište možnosti generování a analýzy signálu pomocí laboratorního vybavení. Navrhněte měřicí sestavu (přístrojové vybavení, antény) pro záznam z rychle se pohybujícího se mobilního prostředku s rychlostí min. 50 m/s.

V praktické části proveďte simulaci a reálné generování signálů podle norem pro technologii RFID v pásmu 2,4 GHz. Porovnejte výsledky softwarových simulací s generovanými signály v časové a frekvenční oblasti. Pomocí navržené měřicí sestavy realizujte záznam signálu pro fixní spoj a mobilní spoj RFID. Proveďte analýzu zaznamenaných signálů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

SMITH, Joshua R. Wirelessly powered sensor networks and computational RFID. London: Springer, 2010, xiv, 271 p.
<http://www.ieee-rfid.org/>

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

16. května 2014



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Simeon Karamazov".

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

L.S.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Zdeněk Němec".

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2013

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci 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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 5. 9. 2013

Zdeněk Španěl

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Němcovi, Ph.D., za rady, připomínky a návrhy týkající se diplomové práce. Také bych zde rád poděkoval Ing. Tomáši Zálabskému za rady a připomínky při laboratorních měřeních. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat rodině a přátelům, kteří mi v průběhu celého studia na vysoké škole pomáhali a podporovali mé úsilí.

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou přenosu signálu technologie RFID v pásmu 2,4 GHz při vysokých rychlostech pohybu. V jednotlivých kapitolách jsou probrány faktory ovlivňující šíření signálu, je navržena sestava pro vysílání, příjem a analýzu signálu a simulaci šíření signálu. V rámci praktické části jsou uvedeny vyzařovací charakteristiky použitých antén, pomocí kterých je následně vytvořen model pro simulaci šíření signálu v programu Matlab. V závěru diplomové práce jsou vyhodnoceny výsledky laboratorních měření a simulací.

Klíčová slova

RFID; mobilní komunikace; generování signálu; normy RFID

Title

RFID Duplex Signal Transmission for Fast-moving Vehicles

Annotation

This thesis deals with the problem of RFID signal transmission in the 2.4 GHz band for fast moving vehicles. There are discussed factors influencing the signal propagation and the configuration of laboratory equipment for signal generating, propagation, receiving and recording. In the practical part characteristics of antennas were measured for creating the model for simulating the signal propagation in Matlab environment. Evaluated results of laboratory measurements and simulations are in conclusion.

Keywords

RFID; mobile communication; RFID signal generating; RFID standards

Obsah

Seznam zkratek	8
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
Úvod	14
1 Technologie RFID	15
1.1 ID Tag.....	17
1.1.1 Typy Tagů.....	18
1.1.2 EPC.....	19
2 RFID na pásmu 2,4GHz	22
2.1 Pracovní režimy RFID.....	22
2.1.1 Režim IM.....	22
2.1.2 Režim RTLS.....	22
2.2 Komunikace mezi bránou a tagem.....	25
2.2.1 Mód 1.....	25
2.2.2 Mód 2.....	25
2.3 Datová struktura.....	27
2.4 Modulace použité ve standardu RFID.....	27
3 Šíření signálu z mobilních prostředků	32
3.1 Využití radiokomunikační rovnice.....	32
3.2 Blízká a vzdálená zóna antény.....	34
3.3 Vícecestné šíření signálu.....	36
3.4 Vliv Dopplerova jevu na šíření signálu.....	38
4 Návrh měřicí sestavy	40
5 Měření charakteristik antén	50
5.1 Přístroje.....	53
5.2 Ostatní příslušenství.....	58
5.3 Měření vyzářovacích charakteristik.....	61
5.4 Měření frekvenčních charakteristik.....	67
6 Generování, simulace a zpracování signálu	72
6.1 Měřicí sestava.....	72
6.2 Generování dat, simulace signálu a analýza odrazů.....	74

6.3 Generování reálných dat a měření signálu při přenosu mezi anténami.....	76
6.4 Simulace chování signálu při vysokých rychlostech pohybu přijímače	78
Závěr	86
Literatura	87
Příloha A – Zdrojový kód souboru pro převod dat do polárních souřadnic	90

Seznam zkratek

RFID	Radio Frequency Identification
ID	Identification
LF	Low Frequency
HF	High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
MW	Micro Wave
R/W	Read/Write
R/O	Read/Only
R/O HS	Read/Only High Speed
TTF	Tag Talk First
RTF	Reader Talk First
EPC	Electronic Product Code
GS1	global standardization organization for identification
IM	Item Management
RTLS	Radio Tag Location System
ITF	Integrator Talks First
BPSK	Binary Phase Shift Keying
ERP	Effective radiated power
ISO	International Organization for Standardization
IEC	International Electrotechnical Commission
ASK	Amplitude Shift Keying
CRC	Cyclic redundancy check
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
OOK	ON OFF Keying

NRZ	Non Return to Zero
RZ	Return to Zero
CPFSK	Continuous Phase Frequency Shift Keying
MSK	Minimum Shift Keying
PEP	Peak Envelope Power
PC	Personal Computer
USB	Universal Serial Bus
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LAN	Local Area Network
SW	Software
CW	Carrier Wave
AM	Amplitude Modulation
FM	Frequency Modulation
RF	Radio Frequency
OS	Operating System
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
FIR	Finite Impulse Response
FFT	Fast Fourier Transformation
LC	Liquid Crystal
TFT	Thin Film Transistor
DVI	Digital Visual Interface
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
RMS	Root Mean Square
GUI	Graphical User Interface
CD	Compact Disc

WiFi

Wireless Fidelity

Seznam obrázků

Obr. 1 – Průmyslová RFID brána ve skladu [1].....	15
Obr. 2 – Bezpečnostní rámy v obchodě [6].....	15
Obr. 3 – Mobilní čtečka RFID tagů [5].....	16
Obr. 4 – Ukázky RFID tagů [2,9,10].....	18
Obr. 5 – Struktura kódu EPC.....	20
Obr. 6 – Schéma systému RTLS	23
Obr. 7 – Tag pro připevnění k přístroji [24].....	23
Obr. 8 – Tag jako visačka [24]	24
Obr. 9 – Struktura datového rámce.....	27
Obr. 10 – konstelační diagram ASK modulace	28
Obr. 11 – Konstelační diagram modulace Backscatter.....	28
Obr. 12 – Modulační pulz REC	29
Obr. 13 – Gaussův modulační pulz.....	29
Obr. 14 – Konstelační diagram modulace OOK.....	30
Obr. 15 – Konstelační diagram modulace BPSK	30
Obr. 16 – Antény vysílající v ose	32
Obr. 17 – Antény vysílající odchýleně od své osy	33
Obr. 18 – Rušení užitečného signálu	33
Obr. 19 – Vícecestné šíření signálu	36
Obr. 20 – Extrémní případy fázového posuvu	37
Obr. 21 – Amplitudová deformace přijatého signálu	37
Obr. 22 – Vektorový generátor – přední panel.....	40
Obr. 23 – Vektorový generátor zadní – panel	41
Obr. 24 – Grafické prostředí WinIQSIM2	43
Obr. 25 – Zobrazení generátoru v internetovém prohlížeči	44
Obr. 26 – ARB Toolbox PLUS	45
Obr. 27 – Signálový analyzátor – přední panel	45
Obr. 28 – Signálový analyzátor – zadní panel.....	46
Obr. 29 – Osciloskop	48
Obr. 30 – Anténa Yagi	50
Obr. 31 – Prutová anténa.....	51
Obr. 32 – Anténní řada pro RFID	52
Obr. 33 – Signálový generátor.....	53
Obr. 34 – Spektrální analyzátor FSL	54
Obr. 35 – Otočná věž	56
Obr. 36 – Spektrální analyzátor FSH8.....	57
Obr. 37 – SW pro měření charakteristik antén	59
Obr. 38 – Zdroj Diametral.....	60
Obr. 39 – Sestava pro měření vyzařovacích charakteristik antény Yagi	61
Obr. 40 – Vysílací část sestavy pro měření vyzařovacích charakteristik antény Yagi	62
Obr. 41 – Přijímací část sestavy pro měření vyzařovacích charakteristik antény Yagi.....	63

Obr. 42 – Horizontální polarizace antény na frekvenci 2,4 GHz	64
Obr. 43 – Vertikální polarizace antény na frekvenci 2,4 GHz	64
Obr. 44 – Horizontální polarizace antény na frekvenci 2,45 GHz	65
Obr. 45 – Vertikální polarizace antény na frekvenci 2,45 GHz	65
Obr. 46 – Horizontální polarizace antény na frekvenci 2,5 GHz	66
Obr. 47 – Vertikální polarizace antény na frekvenci 2,5 GHz	66
Obr. 48 – Měření frekvenční charakteristiky přenosu z Yagi antény do anténní řady pro RFID	67
Obr. 49 – Graf frekvenční charakteristiky přenosu z Yagi antény do anténní řady pro RFID	68
Obr. 50 – Měření frekvenční charakteristiky přenosu z prutové antény do anténní řady pro RFID	69
Obr. 51 – Graf frekvenční charakteristiky přenosu z prutové antény do anténní řady pro RFID	69
Obr. 52 – Měření frekvenční charakteristiky přenosu mezi anténami Yagi	70
Obr. 53 – Graf frekvenční charakteristiky přenosu mezi anténami Yagi	70
Obr. 54 – Graf porovnání frekvenčních charakteristik jednotlivých přenosů	71
Obr. 55 – Měřicí sestava	72
Obr. 56 – Vrchní a spodní část kvadraturního demodulátoru	73
Obr. 57 – Signál v časové oblasti	74
Obr. 58 – Signál ve frekvenční oblasti.....	75
Obr. 59 – Charakteristika útlumu cihlové zdi	75
Obr. 60 – Charakteristika útlumu betonové zdi.....	76
Obr. 61 – Spektrum přijímaného signálu anténní řadou pro RFID	77
Obr. 62 – Přijímaný signál	78
Obr. 63 – Propady úrovně signálu na frekvenci 860 MHz	80
Obr. 64 – Propady úrovně signálu na frekvenci 2,45 GHz	80
Obr. 65 – Pokles mezi sousedními bity.....	81
Obr. 66 – Pokles mezi dvěma bity se vzájemnou vzdáleností 100 bitů.....	82
Obr. 67 – Propady signálu na vzdálenosti 3 m až 500 m s lineárním měřítkem.....	82
Obr. 68 – Propady signálu na vzdálenosti 3 m až 500 m s logaritmickým měřítkem	83
Obr. 69 – Propady signálu ve vzdálenosti 1 m až 10 m.....	83
Obr. 70 – Propady signálu ve vzdálenosti 3 m až 100 m.....	84

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Základní vlastnosti standardních RFID pásem [1,34]	17
Tabulka 2 - Parametry EPC kódu [3].....	20
Tabulka 3 – Třídy EPC [12].....	20
Tabulka 4 – Typy GS1 kódování [3]	21
Tabulka 5 – Parametry RTLS přenosu [15]	24
Tabulka 6 – Parametry vektorového generátoru.....	42
Tabulka 7 – Parametry signálového analyzátoru.....	47
Tabulka 8 – Parametry osciloskopu.....	49
Tabulka 9 – Parametry antény Yagi	50
Tabulka 10 – Parametry prutové antény	51
Tabulka 11 – Parametry anténní řady pro RFID	51
Tabulka 12 – Parametry signálového generátoru	54
Tabulka 13 – Parametry spektrálního analyzátoru FSL.....	55
Tabulka 14 – Parametry spektrálního analyzátoru FSH8	58
Tabulka 15 – Parametry kvadrurního demodulátoru	74
Tabulka 16 – Propady signálu ve vzdálenosti 3 m až 100 m	85

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou využití technologie RFID v pásmu 2,4 GHz u rychle se pohybujících objektů, v našem případě budou objekty představovány vozidly. Jako první bude popis, obecné seznámení a představení, jaký význam má dnes technologie RFID. Jsou zde popsána možná vysílací pásma, jejich charakteristiky případné využívání a také přijímače a jejich jednotlivé rozdělení. Poté se zaměřuji na vybranou část pásma 2,4 GHz, která bude pro tuto práci hlavní, a tu proberu podrobněji.

Dále je v teoretické části popsána problematika přenosu signálu RFID v pásmu 2,4 GHz, a to jak z pohledu norem pro tento signál a z toho vyplývajících omezení a charakteristik, tak z pohledu datové struktury, tvorby signálu a různých ovlivňujících faktorů. Jako příklad uvádím Dopplerův jev, který zde bude mít velký vliv na signál vzhledem k tomu, že se v této práci budu zabývat přenosem signálu při vysokých rychlostech pohybu, dále vícestředné šíření a také šíření signálu z mobilních prostředků. Jsou zde také popsány možnosti generování tohoto signálu. U obou zjištěných možností se vychází z generování základního namodulovaného signálu v programu Matlab. Při simulaci v programu Matlab ho pouze doplníme o funkci pro simulaci přenosu signálu, ale při použití pro simultánní měření v laboratorních podmínkách je potřeba ho upravit pro daný hardware od firmy Rohde & Schwarz pomocí firemního software.

V praktické části je uvedeno nejprve měření vyzařovacích charakteristik Yagiho antén pro pásmo 2,4 GHz, poté měření frekvenčních charakteristik Yagiho antény, prutové antény a anténní řady pro RFID. Výsledky toho měření jsou následně vloženy do simulačního programu v programu Matlab. Zde bude simulováno ovlivnění signálu při průchodu anténami a odrazem od zdi. Dále bude provedeno měření signálu a sledování jeho zkreslení a ovlivnění dat při průchodu volným prostorem. Následně bude provedena simulace chování signálu při vysokých rychlostech pohybu vysílače. Signály jsou generovány dle norem pro technologii RFID v pásmu 2,4 GHz, aby bylo docíleno výsledků, které se budou co nejvíce blížit podmínkám možného běžného používání této technologie.

1 Technologie RFID

RFID je zkratka z anglického názvu Radio Frequency Identification, což v překladu znamená Identifikace pomocí rádiové frekvence. Je to technologie pro identifikaci objektů bez nutnosti přímé viditelnosti. Tato technologie je považována za nástupce technologie čárových kódů. U zrodu obou technologií stála největší americká maloobchodní společnost Wall-Mart Corporation. Tato společnost plánovala původní využití technologie RFID jako jednoduchý bezpečnostní systém pro zamezení krádeží ve svých řetězcích. S postupným vývojem této technologie se začaly ukazovat její přednosti a možnosti využití.

V dnešní době se tato technologie používá velice hojně, především tam, kde jsou kladeny nároky na rychlý a důkladný přenos informací a jejich následné bezprostřední zpracování. Našla využití ve skladech ke sledování a inventarizaci zásilek, v imobilizérech automobilů, při výběru elektronického mýtného i v parkovacích kartách. Dále pro evidenci a povolení vstupu do budov a zařízení, v chytrých etiketách, při bezkontaktním placení elektronickými peněženkami. V letecké přepravě slouží k identifikaci zavazadel. Ve zdravotnictví k evidenci pacientů a léků. V obchodních řetězcích je stále využívána k zabezpečení proti krádežím, což bylo jejím původním účelem.



Obr. 1 – Průmyslová RFID brána ve skladu [1]



Obr. 2 – Bezpečnostní rámy v obchodě [6]

Hlavní výhodou technologie RFID oproti čárovým kódům je, že zde nemusí být přímá viditelnost. S tím souvisí i faktor minimální požadované vzdálenosti, který může být u RFID tagů mnohonásobně větší. Důsledkem vnějších vlivů může dojít k poškození nebo nečitelnosti čárového kódu, což u RFID tagů je málo pravděpodobné. Ty bývají obvykle uschovány v ochranném pouzdře, které je připevněno k objektu. Také mohou být umístěny přímo na obalu nebo v krabici s daným objektem.

Na rozdíl od čárového kódu lze data z tagů číst i za pohybu. Další výhodou je možnost čtení více tagů najednou. Některá čtecí zařízení tak dokážou přečíst i několik set až několik tisíců tagů za minutu. U některých typů tagů lze informace nejen vyčíst, ale také je zapisovat nebo aktualizovat.

Celý systém pro přenos dat pomocí technologie RFID se skládá z brány (vysílače a přijímače), ID tagu (paměťového identifikačního čipu) a software pro příjem a zpracování dat. Brána může být fixní, v průmyslové hale nebo obchodním centru, viz Obr. 1 a 2, anebo mobilní, jako datový terminál nebo snímač, viz Obr. 3.



Obr. 3 – Mobilní čtečka RFID tagů [5]

Tato technologie se standardně používá ve čtyřech frekvenčních pásmech, a to LF (Low Frequency) 125 – 134 kHz, HF (High Frequency) 13,56 MHz, UHF (Ultra High Frequency) 850 – 960 MHz a MW (Micro Wave) 2,45 – 5,8 GHz. Pásmo UHF se dále dělí na tři části podle příslušných regionů: 1. Evropa a Afrika: 865 až 869 MHz; 2. USA, Kanada a Mexiko: 902 až 928 MHz; 3. Japonsko a Asie: 950 až 956 MHz. V pásmu UHF se používá i frekvence 433MHz, která je určena pro aktivní tagy s velkým dosahem.

Podrobnější informace o pásmech, jejich vlastnostech a využitích jsou uvedeny v Tabulce 1. Udávané vzdálenosti platí pro čtení tagů ve volném prostřanství a s absencí rušení.

Pásmo	LF	HF	UHF	MW
Frekvence	125 – 134 kHz	13,56 MHz	860 – 930 MHz 433 MHz	2,45 – 5,8 GHz
Maximální dosah pasivních tagů	= < 0,3 m *	= < 1,5 m	= < 12 m **	= < 10 m
Maximální dosah aktivních tagů			= < 500 m	= < 140 m
Rychlost čtení	malá	průměrná	velká	extrémně velká
Využití	- kontrola přístupu - identifikace a sledování zvířat - imobilizéry automobilů	- bezkontaktní placení - označení zavazadel při přepravě - záznam a přenos naměřených dat	- sledování ve skladech - současná identifikace více zabalených produktů - parkovací karty	- elektronické mýtné - bezdrátový záznam a přenos dat v reálném čase

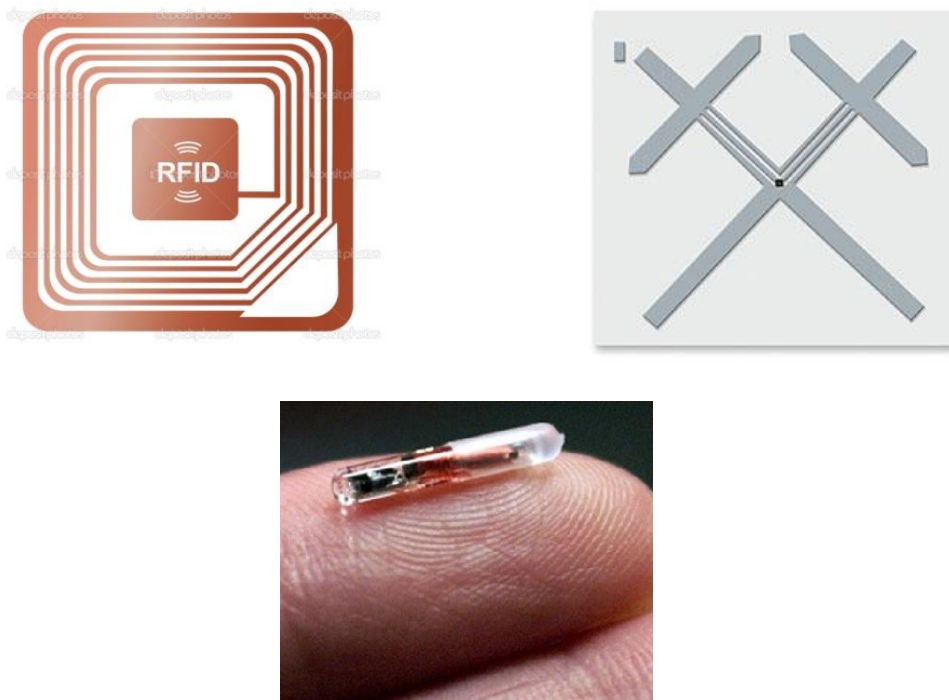
Tabulka 1 – Základní vlastnosti standardních RFID pásem [1,34]

* při použití standardních velikostí tagů; ** druhá generace tagů

1.1 ID Tag

ID Tag je malý rádio-frekvenční čip s plochou cívkou, která plní funkci antény. Jedná-li se o pasivní tag, slouží cívka také jako zdroj. Pokud se ocitne v elektromagnetickém poli brány, začne se generovat energie, která se následně použije pro vyslání identifikačního čísla. V případě polo-pasivního tagu je cívka zdrojem pro vyslání svého kódu.

Tagy mohou nabývat mnoha podob, a to podle umístění a typu využití. Mohou být umístěny v produktu, nalepeny jako štítek na paletě, kartonu nebo být zatavené v plastovém obalu, který je připevněn na produktu. Také mohou vypadat jako náramek, plastová kartička nebo pilulka.



Obr. 4 – Ukázky RFID tagů [2,9,10]

1.1.1 Typy Tagů

Tagy můžeme rozdělit do několika skupin, a to podle typu paměti nebo stylu napájení.

Podle paměti je můžeme rozdělit do tří skupin. První jsou tagy typu R/W (Read/Write), z těch je možné jak vyčítat data, tak do nich můžeme data i zapisovat. Velikost paměti je tu stanovena minimálně na 2 kB. Do druhé skupiny zařadíme typ R/O (Read/Only), který má data zapsaná už od výrobce bez možnosti přepsání nebo jejich změny. Ve třetí skupině je k dispozici typ R/O HS (Read/Only High Speed). Tyto tagy jsou určeny pro vysokorychlostní aplikace a mají zkrácené ohlašování. U R/O a R/O HS tagů se může pohybovat velikost paměti od 32 do 160 bitů.

Z pohledu napájení rozlišujeme dvě obecné skupiny - aktivní a pasivní. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma skupinami je princip komunikace tagu a brány. U aktivních tagů se jedná o princip TTF (Tag Talk First), kde má tag vlastní napájení a neustále vysílá svůj kód. Pasivní tag nemá vlastní napájení. Proto se pro napájení využívá elektromagnetické pole brány. Zde je užita metoda RTF (Reader Talk First). Tyto dvě skupiny tagů se dále dělí na čtyři základní skupiny, a to aktivní, polo-aktivní, polo-pasivní a pasivní.

- **Aktivní**

Tyto tagy mají vlastní napájení, proto jsou nezávislé na příjmu energie z vysílací brány. Vysílají svoje informace neustále. Z tohoto důvodu jsou často využívány k aktivní lokalizaci. Vzdálenost aktivního tagu od brány může při čtení být až 500 m. Paměť, kterou tag obsahuje, může dosahovat velikosti až 100 Kb. To má ovšem za následek větší složitost na konstrukci a tím i vyšší cenu. Další nevýhodou je nutnost měnit zdroj energie, což většinou bývají baterie. Ty vydrží napájet tag 1 až 5 let, a to podle četnosti použití a lokace tagu.

- **Polo-aktivní**

Tento tag má stejnou konstrukci jako aktivní tag, liší se ovšem ve využití energie z baterií. Polo-aktivní tag vysílá stále pouze svůj kód. Doplnkové informace jsou vysílány pouze, pokud si to brána vyžádá. Díky tomu je zde dosažena delší životnost baterií.

- **Polo-pasivní**

Tento typ tagu je obdobný jako polo-aktivní, s tím rozdílem, že baterie slouží výhradně pro napájení vnitřní části. Díky tomu může mít tag delší kód s více informacemi, protože veškerá generovaná energie z elektromagnetického pole brány je využita pouze pro vysílání kódu.

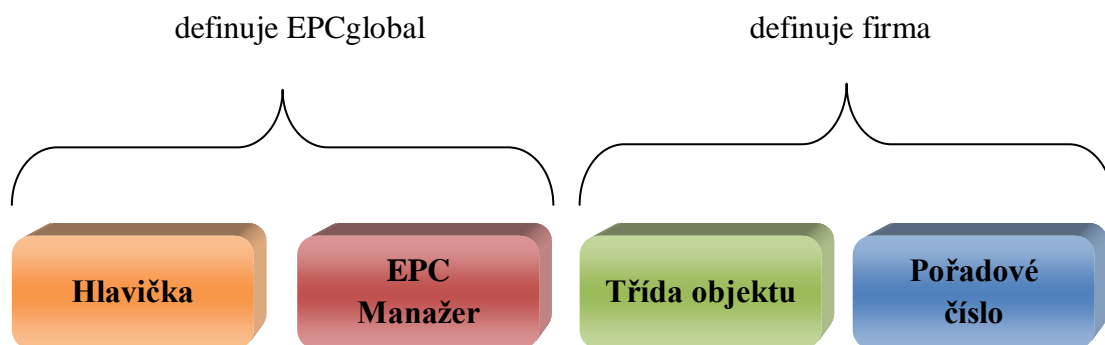
- **Pasivní**

Tyto tagy nemají pro napájení vlastní baterii. Využívají elektromagnetické pole brány, které nabije jejich napájecí obvod. Vzdálenost tagu od čtečky se může pohybovat od centimetrů až do 12 metrů¹, v závislosti na zvoleném frekvenčním pásmu. Díky absenci stálého vlastního zdroje napájení jsou jednoduché na konstrukci, velice odolné a díky tomu i levné. Dnes jsou nejpoužívanějším typem tagů.

1.1.2 EPC

EPC je zkratka pro elektronické označení produktu (Electronic Product Code). Byla vyvinuta pro potřebu rozlišení označení jednotlivých produktů při stále se rozšiřujícím použití RFID tagů. Proto byla založena společnost EPCglobal, která definovala jednotnou strukturu, typy a standardy pro EPC.

¹ U druhé generace tagů



Obr. 5 – Struktura kódu EPC

Parametr	Obsah
Hlavička	délka, typ, struktura, verze a generace EPC kódu
EPC Manažer	společnost zodpovědná za následné oddíly
Třída objektu	typ a druh výrobku
Pořadové číslo	konkrétní výrobek v rámci jedné třídy

Tabulka 2 - Parametry EPC kódu [3]

Typy tříd EPC	Vlastnosti	Typ Tagu
Třída 0	Pouze čtení	Pasivní (pouze 64 bitů)
Třída 1	Jednou zápis, dále jen čtení	Pasivní (minimálně 96 bitů)
Třída 2	Zápis i čtení	Pasivní (minimálně 96 bitů)
Třída 3	Čtení i zápis, s baterií pro zvýšení rozsahu	Polo – aktivní
Třída 4	Čtení i zápis, aktivní vysílač	Aktivní

Tabulka 3 – Třídy EPC [12]

Jedinečný identifikační kód každého fyzického objektu obsahuje odpovídající identifikační GS1 klíč, ten určuje třídu objektu.

Klíč GS1	EPC Schéma	Použití
GTIN	sgtin	Obchodní položka
SSCC	sscc	Logistická jednotka
GLN	sgln	Lokalizace
GRAI	grai	Vratné, opakovaně použitelné položky
GIAI	giai	Fixní položky
GDTI	gdti	Dokumenty
GSRN	gsrn	Provozní komunikace

Tabulka 4 – Typy GS1 kódování [3]

Přínosem EPC kódu je to, že dokáže odlišit 2 totožné produkty. Jeden EPC kód nám může poskytnout informace o datu výroby, šarži anebo původu výrobku.

2 RFID na pásmu 2,4GHz

Použití pásma umožňuje identifikaci na delší vzdálenosti. Ty se pohybují u pasivních tagů v řádech jednotek metrů, teoretický maximální dosah zde činí přibližně až patnáct metrů. U aktivních tagů je tato vzdálenost v řádech desítek metrů a teoretická maximální vzdálenost při ideálních podmínkách činí až 140 m. Data z těchto tagů lze číst i ve vysokých rychlostech. Identifikace zde probíhá bez časové prodlevy, je zde také větší benevolence pro umístění tagu na objektu, jeho pohybu a poloze vůči bráně při jeho identifikaci.

2.1 Pracovní režimy RFID

Systém zde zpravidla pracuje ve dvou režimech, a to buď IM (Item Management) nebo RTLS (Radio Tag Location System). Tyto dva režimy mají zcela odlišný přístup ke komunikaci tagu s bránou.

2.1.1 Režim IM

Tento režim slouží pro sledování, řízení a kontrolu tagů. Pracuje ve dvou módech.

- **Mód 1**

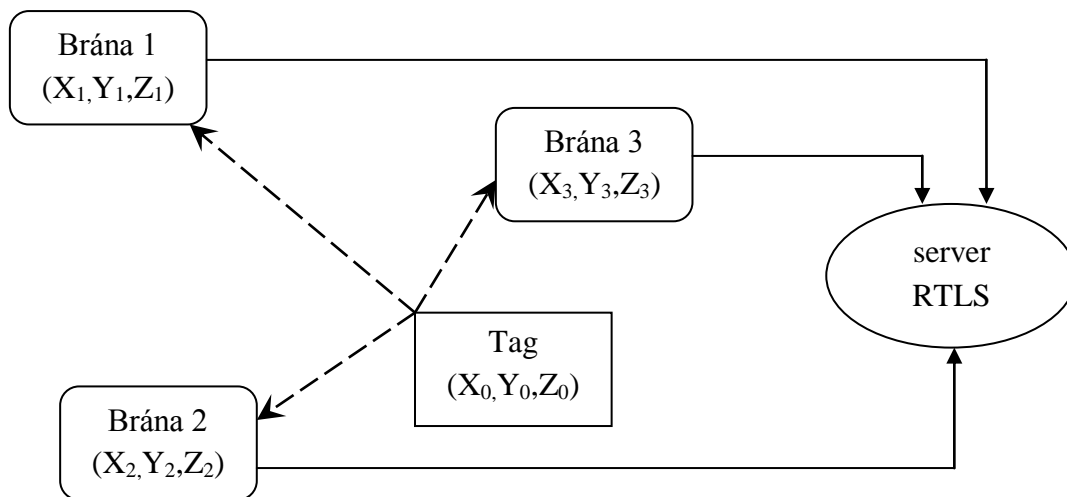
Slouží pro kratší dosah a menší rychlosti. Systém zde pracuje v režimu ITF (Integrator Talks First), tag zde čeká, dokud brána nevyšle žádost, až poté začne tag vysílat svoje identifikační údaje, případně doplňková data.

- **Mód 2**

Využívá se pro větší vzdálenosti a vyšší rychlosti. Zde systém pracuje v režimu TTF (Tag Talks First). Brána kontinuálně vysílá nosnou vlnu na frekvenci daného kanálu. Když se tag dostane do elektromagnetického pole čtečky, vyšle svoji notifikační, neboli upozorňující sekvenci. Brána se sesynchronizuje a vyšle žádost. Ta může být o zaslání identifikačních údajů a doplňkových dat z tagu, anebo o zápis dat do paměti tagu. Následně provedená operace záleží na použitém tagu, má-li možnost pouze vyčítat data z paměti anebo umí i zapisovat data vyslané z brány do své paměti.

2.1.2 Režim RTLS

Režim RTLS je používán pro vysokorychlostní komunikaci, podávání definovaných informací a pro určování vzdálenosti a polohy tagů v reálném čase. Nejčastěji je využíván uvnitř budovy anebo v uzavřeném prostoru. Je zde umožněna komunikace brány s tagem a zároveň měření jejich vzájemné vzdálenosti. Následně se získaná data o vzájemných vzdálenostech odešlou do serveru RLTS, kde je z nich vypočtena poloha daného tagu. Čím více bran máme v dosahu daného tagu, tím bude vypočtená poloha přesnější.



Obr. 6 – Schéma systému RTLS

Tagy jsou zde připevněné k objektům nebo zařízením, u kterých potřebujeme znát jejich polohu.



Obr. 7 – Tag pro připevnění k přístroji [24]

Pokud je lokalizovaný objekt osoba, mívají podobu visačky, přívěšku anebo náramku. Podoba náramku je nejčastěji použita v nemocničních zařízeních.



Obr. 8 – Tag jako visačka [24]

Nejčastější využití tohoto systému můžeme nalézt ve skladech, pro monitorování pohybu nejen palet s mnoha jednotlivými zásilkami, ale také pro kontrolu pohybu osob a strojů ve skladovacím prostoru. Dále je zde možnost širokého využití ve zdravotnictví, pro monitorování pohybu pacientů, lékařů, či zdravotnického vybavení.

Protože při komunikaci a paralelně s ní jdoucím určováním polohy ze zpoždění přijatého signálu je potřeba velká šířka pásma, je vysílaný signál vysoce širokopásmový ve srovnání s klasickými signály v technologii RFID.

Parametr	Třída 1	Třída 2
Frekvence	2 441,75 MHz	
Modulace	Diferenčně kódovaná BPSK	
Rozložení spektra	Přímé rozprostření spektra	
Vysílaný výkon	< 10 mW ERP	500 mW ERP
Dosah	40 m	300 m
Šířka pásma	60 MHz	

Tabulka 5 – Parametry RTLS přenosu [15]

2.2 Komunikace mezi bránou a tagem

Jakožto i u jiných systému, kde je komunikace realizována volným prostorem, tak i zde tato komunikace podléhá určitým pravidlům a normám. Norma zabývající se technologií RFID nese označení ISO/IEC 18000 (Information technology — Radio frequency identification for item management) a skládá se ze sedmi částí, přičemž problematika komunikace na frekvenci 2,4 GHz je popsána ve čtvrté části.

2.2.1 Mód 1

V tomto módu se pro komunikaci jdoucí z brány do tagu používá modulace ASK, modulační index je zde 99% a střída 50%. Data jsou kódována kódem Manchester, logická jednička je reprezentována silným signálem. Nejprve je vysílána po dobu 400 μ s konstantní nosná, poté následuje preambule která má tvar „01 01 01 01 01 01 01 01“, za ní je oddělovač „1100111010“, poté následuje pole pro příkaz, pole pro parametry příkazu a nakonec samotné datové pole.

Pro komunikaci od tagu k bráně je použita Backscatter modulace. Kódování je zde použito FM0. Logická jednička je reprezentována stavem nízké impedance a logická nula stavem vysoké impedance obvodu antény tagu. Preambule pro synchronizaci zde má tvar „00 00 01 01 01 01 01 01 01 01 00 01 10 11 00 01“.

V obou směrech jsou data vysílána rychlostí 30 – 40 kb/s. Zabezpečení je zde pomocí CRC součtu o délce 16 bitů. Ten je počítán z datových bitů zprávy jako zbytek po dělení polynomem $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$.

2.2.2 Mód 2

Protože tag neobsahuje místní oscilátor, používá se pro správné odvození signálu pro vysílání dvou kmitočtů vysílaných bránou, které jsou od sebe vzdáleny o 13 kanálů, neboli o 10,6496 MHz. Vzdálenost dvou sousedních kanálů je 819,2 kHz a šířka pásma pracovního kanálu je 1 MHz. Nižší z této dvojice signálů se označuje jako referenční nosná, ta zde není modulovaná. Vyšší signál se nazývá komunikační nosná, ta je modulovaná modulací GMSK s činitelem $BT_b = 0,5$. Kmitočet pro komunikaci je možné měnit dle volného kanálu v rozsahu od 0 do 99 při dodržení podmínky, že nosné budou od sebe vzdáleny o 13 kanálů. Brána nevysílá referenční nosnou stále, ale pouze v určitých intervalech, a to z důvodů zamezení případného rušení jiných zařízení pracujících na téže frekvenci. Výpočty pro jednotlivé nosné jsou uvedeny v následujících rovnicích.

$$f_v = f_s * 13, \quad (2.1)$$

$$f_v = 819,2 \text{ kHz} * 13,$$

$$f_v = 10,6496 \text{ MHz},$$

kde:

f_v = odstup komunikační nosné od referenční nosné,

f_s = odstup mezi jednotlivými kanály.

$$f_r = (2931 + m) * f_s, \quad (2.2)$$

kde:

f_r = referenční nosná,

m = číslo kanálu.

Tag nekontroluje přítomnost v elektromagnetickém poli brány stále, ale pouze v periodických intervalech, a to z důvodů úspory energie. Dostane-li se tag do pole čtečky a je-li aktivní signál referenční nosné, vyšle ohlašovací sekvenci. Ta se skládá ze synchronizační části a ID tagu. Tagy mají různou dobu pro opakované vysílání ohlašovací sekvence při neúspěšném pokusu o ohlášení z důvodu možného současného ohlašování více tagů. Zachytí-li brána ohlašovací sekvenci tagu, zasynchronizuje se na jeho data. Brána posléze dokončí ohlášení tagu tak, že podle synchronizační části určí, o jaký typ tagu jde, akceptuje ho a zařadí ho do evidence.

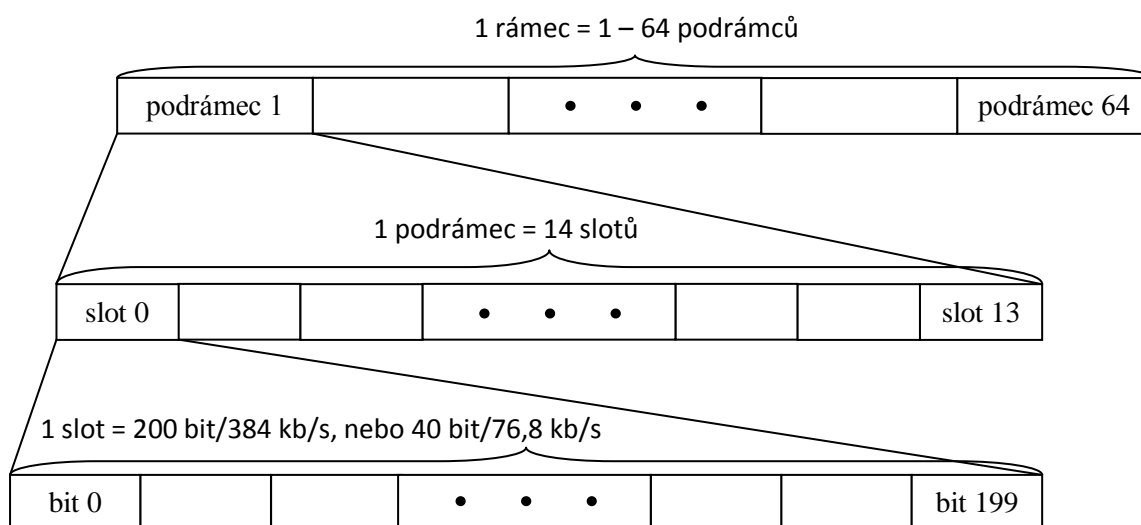
Rychlost ohlašovací sekvence je 76,8 kb/s. Je zde použita pomocná nosná 153,6 kHz a data jsou kódována dvojitým Manchesterem. Celý vysílaný signál je modulován metodou DBPSK nebo OOK.

Když brána posléze posílá data do tagu, nejsou tato data kódována kódem Manchester, ale operací XOR, neboli na každém bajtu je provedena operace XOR s hodnotou B9H. Tato operace ošetřuje možnost, pokud by data obsahovala samé nuly. Stejná operace se provádí i s daty příchozími z tagu. Přenosová rychlost komunikace z brány do tagu je 384 kb/s. Přesnost je zde požadována 200 ppm.

Při odpovídání tagu na dotaz brány musí být opět aktivní referenční nosná. Rychlost je zde 384 kb/s a pomocná nosná je 384 kHz. Kódování je prováděno jednoduchým Manchesterem a signál je modulován metodou DBPSK

2.3 Datová struktura

Jeden rámeček notifikační zprávy v Módu 2 na frekvenci 2,45 GHz má délku 7,291 ms – 0,466 s a obsahuje 1 až 64 podrámčů dle množství dat, která obsahuje. Z toho je pro tréninkovou sekvenci vyčleněno 520,8 μs (1 slot) u tagů s možností jak čtení, tak zápisu a 1,0416 ms pro tagy s možností pouze čtení. Podrámce se dále dělí na sloty, ty mají velikost podle užití přenosové rychlosti. Pro rychlost 76,8 kb/s má jeden slot velikost 40 bitů, a pro rychlost 384 kb/s je tato velikost 200 bitů. Hierarchie rámečkové struktury je zobrazena na následujícím obrázku.



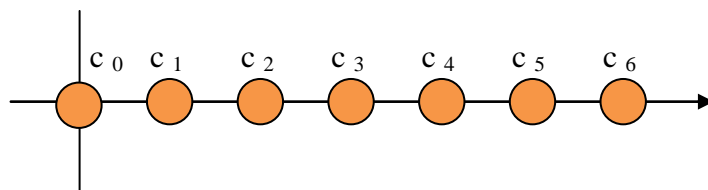
Obr. 9 – Struktura datového rámečku

2.4 Modulace použité ve standardu RFID

Pro technologii RFID se používá několik typů modulací, a to podle toho, o jaký jde Mód, typ tagu a směr komunikace.

- **Modulace ASK**

ASK (Amplitude-Shift Keying), je digitální amplitudová modulace pásmového signálu, která provádí klíčování nosné amplitudy. Je lineární a bez paměti. Její výhoda spočívá v demodulaci, při níž nemusíme znát fázi nosné vlny a můžeme ji tak demodulovat nekoherentně. Mohou se s ní modulovat binární a vícestavové signály. Kanálové symboly jsou umístěny pouze na reálné ose konstelačního diagramu, takže signál je ryze reálný.

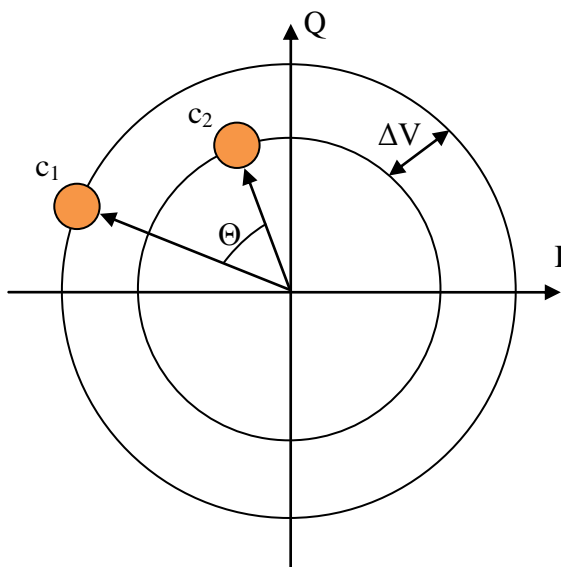


Obr. 10 – konstelační diagram ASK modulace

Z toho vyplývá, že je z důvodů energetické účinnosti výhodnější pro signály s menším počtem datových stavů. Při modulaci binárního signálu se používá při kódování signálu kódem NRZ, RZ a Manchester.

- **Modulace Backscatter**

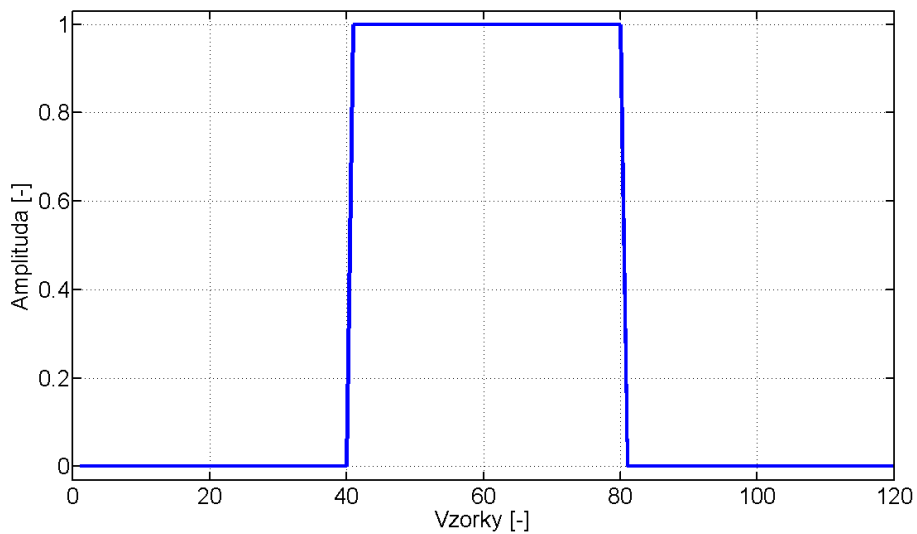
Jedná se o modulaci zpětným rozptylem, pracuje na principu skokově měnící se impedance v obvodu antény tagu. Logickou jedničku reprezentuje stav nízké impedance a logickou nulu stav vysoké impedance v obvodu antény tagu. Jelikož se impedance skládá z reálné a imaginární části, tag reálně provádí modulaci jak amplitudy, tak i fáze zpětně vysílaného signálu.



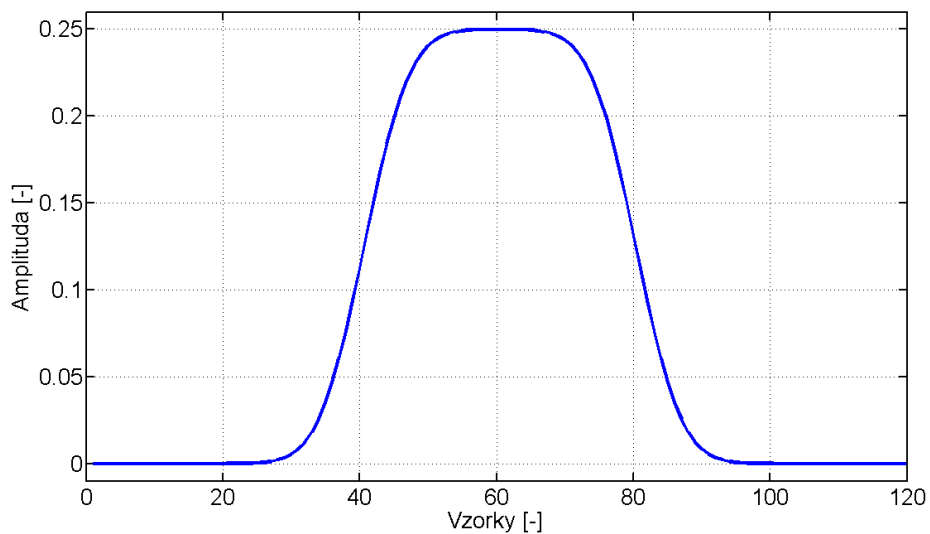
Obr. 11 – Konstelační diagram modulace Backscatter

- **Modulace GMSK**

Je to nelineární frekvenční modulace se spojitou fází. Principiálně vychází z modulací CP FSK a MSK (Minimum Shift Keying). Finálního tvaru impulzu dosáhneme užitím Gaussova filtru. Kontinuity signálu docílíme použitím specifických kmitočtů s minimálním vzájemným rozdílem a s počtem půlvln, které v symbolovém intervalu obsahují násobky π . Fázová spojitost je dosažena pomocí 50% redundance a paměti, proto i když se zde nachází čtyři modulační funkce, přenáší se v jednom symbolovém intervalu pouze jeden bit.



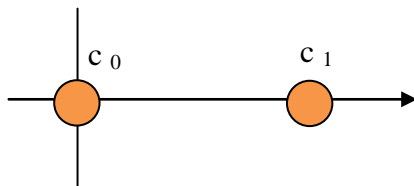
Obr. 12 – Modulační pulz REC



Obr. 13 – Gaussův modulační pulz

- **Modulace OOK**

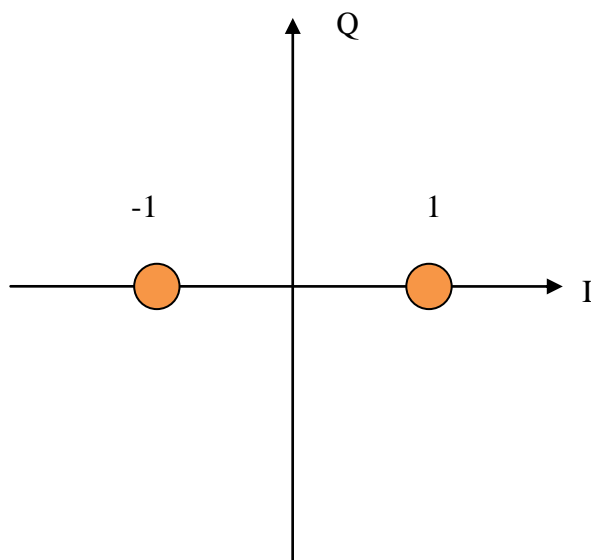
Modulace OOK (ON OFF Keying) je nejjednodušší varianta modulace ASK. Má pouze dva stavy, logickou nulu a jedničku. Ty jsou reprezentovány vypnutým nebo zapnutým generátorem nosné frekvence. Má nesymetrickou konstelaci a používá se pro binární signály.



Obr. 14 – Konstelační diagram modulace OOK

- **Modulace DBPSK**

Jedná se o lineární dvoustavovou diferenční modulaci se symetrickou konstelací. Stejně jako BPSK má 2 stavy, které mají vzájemný fázový posun o 180° . Zde ale neznázorňují aktuální informaci o fázi, ale pouze informaci o změně fáze. Z toho důvodu je zde zavedena paměť pro kontrolu předchozích stavů.



Obr. 15 – Konstelační diagram modulace BPSK

Díky přenášení informace pouze o změně fáze je tato modulace odolnější nejen proti rušení a chybám vznikajících při přenosu signálu, ale i proti možnosti fázového

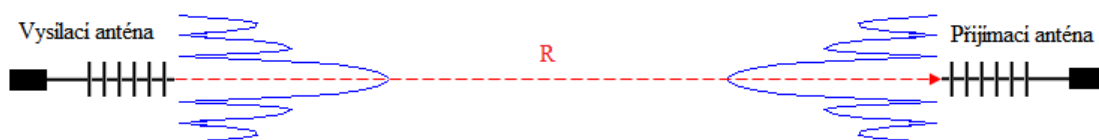
posuvu při přenosu komunikačním kanálem. Dále je zde výhoda jednodušší konstrukce demodulátoru.

3 Šíření signálu z mobilních prostředků

Šíření signálu z mobilních prostředků je ovlivněno mnoha faktory. Může to být rychlost, poloha vysílače nebo přijímače vůči pohybujícímu se objektu. Dále prostředí, ve kterém se objekt pohybuje anebo schopnost rušení či příjmu signálu samotného pohybujícího se objektu.

3.1 Využití radiokomunikační rovnice

Radiokomunikační rovnice je základem pro zkoumání přenosu výkonu signálu v prostoru. Popisuje změny velikosti výkonu signálu mezi vysílací a přijímací anténou v závislosti na jejich parametrech a elektromagnetických vlastnostech, jejich vzájemné poloze, směru vysílání a přijímání a také na vlastnostech prostoru, ve kterém dochází k samotnému přenosu.



Obr. 16 – Antény vysílající v ose

Obrázek č. 16 popisuje ideální případ přenosu, kdy antény mají přímou viditelnost a jsou natočeny přímo proti sobě. Vyzařovaný i přijímaný výkon prochází středem hlavního laloku, ve kterém má anténa největší zisk. Radiokomunikační rovnice má následující tvar:

$$P_p = P_v * G_p * G_v * \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 * L, \quad (3.1)$$

kde:

P_p = přijatý výkon,

P_v = vysílaný výkon,

G_p = zisk přijímací antény,

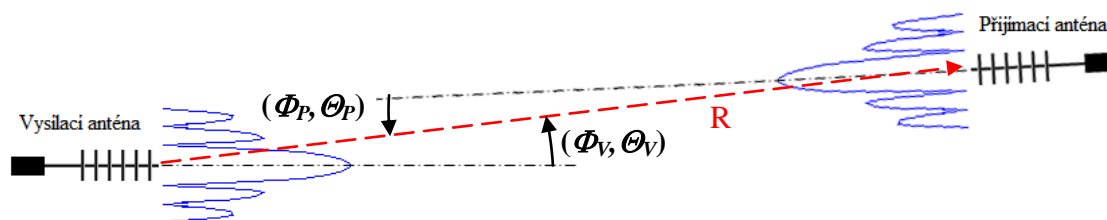
G_v = zisk vysílací antény,

λ = vlnová délka,

R = vzájemná vzdálenost antén,

L = ztráty v daném prostoru.

Tato situace se avšak v reálných podmínkách vyskytuje jen zřídka. Často jsou antény vychýleny od ideálního směru vysílání, ať už z důvodů příjmu signálu z více vysílacích antén nebo jiných důvodů (viz Obr. 17).



Obr. 17 – Antény vysílající odchýleně od své osy

To má za následek, že signál je vyslán a přijímán ve směru nižšího zisku antény. Radiokomunikační rovnici proto musíme takto rozšířit.

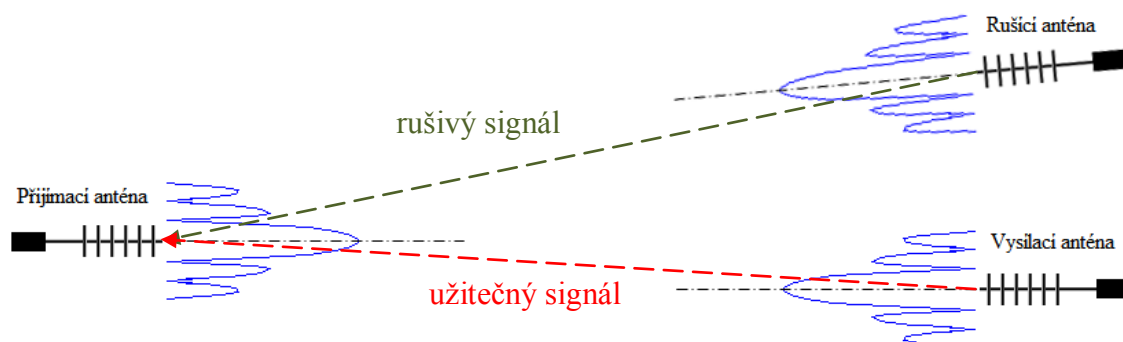
$$P_P = P_V * G_P * G_V * f_P^2(\Phi_P, \Theta_P) * f_V^2(\Phi_V, \Theta_V) * \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 * L, \quad (3.2)$$

kde:

$f_P^2(\Phi_P, \Theta_P)$ = výkonové charakteristiky přijímací antény,

$f_V^2(\Phi_V, \Theta_V)$ = výkonové charakteristiky vysílací antény.

Tento tvar radiokomunikační rovnice se také používá při zjišťování rušení našeho zkoumaného signálu dalšími vysílací. Zde hodně záleží na vzájemném směru natočení všech antén a jejich vysílaných výkonech. I když bude výkonově větší rušivý signál vyslán ve směru nižšího zisku než signál užitečný, může dojít k významnému rušení, i pokud by byl hlavní signál vyslán ve směru hlavního laloku, ale nižšího než maximálního zisku. Zde potom velice záleží na odstupu signálu od šumu, který je schopna rozeznat přijímací anténa.



Obr. 18 – Rušení užitečného signálu

3.2 Blízká a vzdálená zóna antény

Pro měření vlastností a charakteristik antén si můžeme prostor kolem antén pomyslně rozdělit na 3 typy. Reaktivní zóna, blízká zóna a vzdálená zóna. Reaktivní zóna má obvykle vnější hranici ve vzdálenosti R_r , ta je určena vztahem:

$$R_r < \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (3.3)$$

kde:

R_r = vnější hranice reaktivní zóny,

λ = vlnová délka.

Druhá, tedy blízká zóna je určena na vnitřní hranici vzdáleností R_b a na vnější hranici vzdálenosti R_b , tu určuje vztah:

$$R_b < \frac{2 \cdot d^2}{\lambda}, \quad (3.4)$$

kde:

R_b = vnější hranice blízké zóny,

d = největší rozměr antény.

Jak měření v blízké zóně, tak měření ve vzdálené zóně se dají v dnešní době dobře zautomatizovat, podobně jako v našem případě, kdy byla použita programovatelná otočná věž, která byla propojena s notebookem. Na něm byl spuštěn program pro řízení vysílání, posuvu natočení antény připevněné k věži a sběr dat.

Volba, v jaké zóně antény bude probíhat měření, závisí na mnoha faktorech. Například na možnosti výběru lokace pro měření, obsáhlosti zařízení pro měření, nákladech na provedení měření a dalších faktorech.

Měření v blízké zóně je výhodnější, pokud získáváme kompletní charakteristiky antén, chceme mít minimální nebo zcela vyloučený vliv počasí, potřebujeme mít měření časově nenáročné, nemáme možnost lokace s velkým prostranstvím a měříme na vyšších frekvencích. Naproti tomu měření ve vzdálené zóně se považuje za výhodnější, měříme-li nižší frekvence a stačí-li nám jen určité části měření.

- **Vzdálená zóna a měření v zóně**

Při měření vyzařovacích charakteristik antén ve vzdálené zóně, se měří amplituda vektoru elektrického pole E . Amplituda a fáze se zde měří jako funkce úhlu. Z těchto dat se následně sestavuje vyzařovací diagram. Aby bylo umožněno měřit amplitudu a fázi jako funkci úhlu, je měřená anténa připevněna ke konstrukci, která umožňuje její úhlové natáčení, případně otáčení vůči vysílací anténě.

Pro některé případy se doporučuje použít spíše měření ve vzdálené zóně než měření v blízké zóně. Týká se to například antén s vysílací frekvencí pod 1 GHz a případů, kdy jsou požadovány amplitudové a fázové charakteristiky jen pro některé roviny.

Hlavní podmínky tohoto měření jsou, aby mezi vysílací anténou, která zde slouží jako referenční zářič, a přijímací měřenou anténou byl dostatečně velký odstup pro měření ve vzdálené zóně. Ta je určena rovnicí (3.4). Dále by prostředí, ve kterém se bude provádět měření, mělo být co možná nejvíce autentické s prostředím, ve kterém bude anténa pracovat. Měřicí pracoviště může být umístěno jak v budově, tak mimo ni. To, kde se bude nacházet měřicí pracoviště je ovlivněno mnoha faktory. Ať už jde o velikost antény, stav počasí, požadavku na přesnost měření, lokaci která je k dispozici, finanční náročnosti celého procesu měření, možnostech přesunu veškerého vybavení a v neposlední řadě na možnostech jeho zprovoznění.

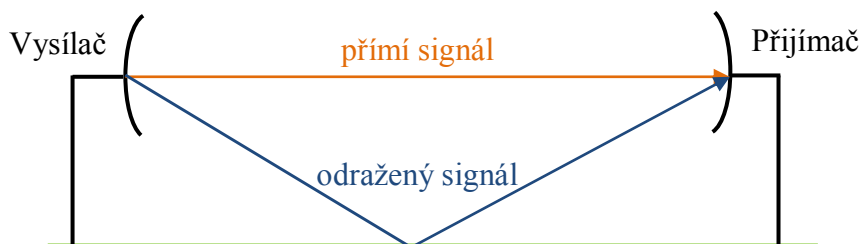
- **Blízká zóna a měření v zóně**

Základní princip měření v blízké zóně je stejný jako při měření v zóně vzdálené. Obecně se dá říct, že měření v blízké zóně je výhodnější, pokud měříme na vyšších frekvencích.

Měření zde má však řadu výhod. Získáváme kompletní charakteristiku antény. Máme možnost velké variace s lokalizací umístění měřicího pracoviště. Můžeme ho umístit například i do laboratoře. Tím nám odpadá vliv počasí. Máme zde také eliminované vícecestné šíření odrazy od podlahy či jiných předmětů v okolí, případně můžeme použít útlumové desky nebo jehlany. Měření v blízké zóně také vybízí, pokud je to možné, k měření v bezodrazové komoře. Toto měření bývá také časově a finančně méně náročné. Výjimku tvoří měření v bezodrazové komoře.

3.3 Vícecestné šíření signálu

Je to jev, při kterém přijímač zachytí v daný moment signály, které přišly od vysílače různými cestami. Každá cesta vysílaný signál deformuje určitým způsobem. K deformaci signálu dochází odrazem od překážek či terénu a útlumem prostředí, kterým signál prochází. Přijatý signál může být deformován jak fázově tak i amplitudově.



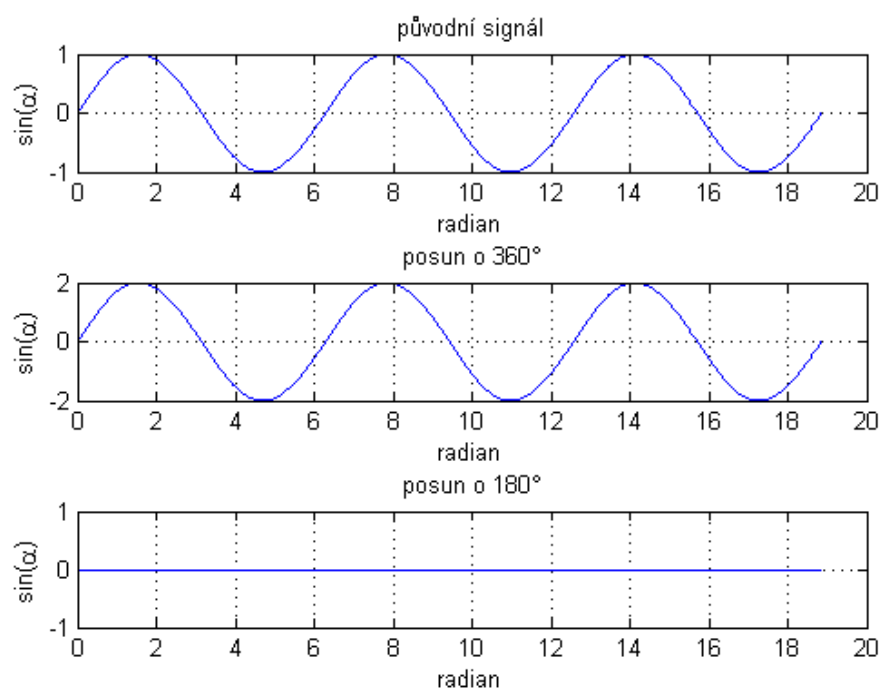
Obr. 19 – Vícecestné šíření signálu

Vícecestné šíření má za následek zeslabení, případně úplné vyrušení části spektra vysílaného signálu. To způsobuje problémy při vyšších přenosových rychlostech. Další problém nastává při skládání vln na přijímači. Zde dochází k nerovnoměrnému rozložení intenzity elektromagnetického pole. Nejvíce tento jev pocítíme při komunikaci z a do mobilních prostředků, kde dochází k rychlému kolísání intenzity elektromagnetického pole.

Toto kolísání signálu nazýváme rychlými úniky. Při komunikaci z a do mobilních prostředků ho pocítujeme nejvíce právě proto, že dochází k rychlému pohybu antén vůči sobě a rychle se měnícímu prostředí, ve kterém se nachází přenosová cesta vysílaného signálu.

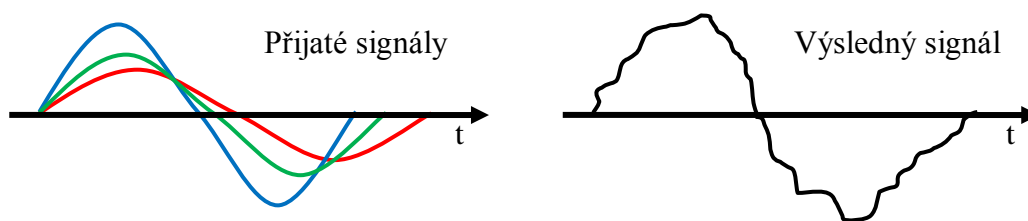
Existují i pomalé úniky. Ty jsou ale nejčastěji způsobeny statickými překážkami jako je bytová zástavba, stromy, přírodní porost a další. Dochází i k hodně velkým poklesům signálu. Kolísání intenzity elektromagnetického pole je zde však pomalé a dá se s jistou mírou pravděpodobnosti předvídat.

Extrémní případy vícecestného šíření mohou nastat při vzájemném fázovém posuvu přijímaných vln o 180° , případně 360° a zároveň při vzájemně blízcích se velikostech amplitud. Při fázovém posuvu pohybujícího se kolem 180° se výsledný signál bude blížit k nule a přijímač nebude schopen signál detekovat. Pokud se bude fázový posuv pohybovat v okolí 360° bude signál zesílen, a to až na dvojnásobek.



Obr. 20 – Extrémní případy fázového posuvu

Amplitudová deformace nastává utlumením signálu při průchodu prostředím a při odrazech od překážek a terénu. Při výsledném součtu různých velikostí amplitud a různých fází může být pak výsledný signál silněji či slaběji deformován.



Obr. 21 – Amplitudová deformace přijatého signálu

Bránit se proti vícecestnému šíření signálu můžeme například použitím rozprostřeného spektra anebo přizpůsobenou filtrací.

3.4 Vliv Dopplerova jevu na šíření signálu

Dopplerův efekt neboli Dopplerův jev popisuje změnu vlnové délky a frekvence daného signálu v případech, kdy mezi vysílačem a přijímačem existuje vzájemný pohyb. Ten existuje v těchto případech. Vysílač se pohybuje a přijímač je statický, vysílač je statický a přijímač se pohybuje anebo pohybuje-li se jak vysílač, tak přijímač. Při Dopplerově efektu dochází ke dvěma jevům, a to ke zdánlivému zvýšení anebo snížení frekvence zdroje.

Protože tag vysílaný signál odvozuje od přijatého, může být signál vysílaný tagem ovlivněn vzájemným pohybem brány a tagu. Následkem toho by mohlo dojít k posuvu nosného kmitočtu.

- **Pohyb vysílače**

Pokud budeme mít vysílač pohybující se směrem k přijímači, bude každá vlna vysílána z bližšího místa vůči přijímači. Ten bude tudíž přijímat vlny s menší periodou než jsou vysílány a bude mít dojem, že frekvence vysílání je vyšší než ve skutečnosti.

$$f_p = \frac{v}{v-v_v} * f_v, \quad (3.5)$$

kde:

f_p = frekvence přijímaná,

f_v = frekvence vysílaná,

v = rychlost pohybu vln v daném prostředí,

v_v = rychlost pohybu vysílače.

V případě pohybu vysílače ve směru od přijímače musí každá další vlna urazit delší vzdálenost. To zapříčiní, že perioda přijatých vln bude větší než ve skutečnosti a přijímač bude mít dojem, že vysílaná frekvence je nižší podle následujícího vztahu:

$$f_p = \frac{v}{v+v_v} * f_v. \quad (3.6)$$

- **Pohyb přijímače**

Budeme-li mít vysílač pevně umístěn a přijímač se bude pohybovat k němu, bude čas mezi přijetím každé následující vlny kratší. Přijímači se bude zdát, že zdroj vysílá s vyšší frekvencí než je skutečná vysílací frekvence.

$$f_p = \frac{v+v_p}{v} * f_v, \quad (3.7)$$

kde:

v_p = rychlost pohybu přijímače.

Naopak při pohybu přijímače od pevně umístěného vysílače, bude čas přijetí každé následné vlny vždy větší, z čehož plyne dojem nižší frekvence vysílání:

$$f_p = \frac{v-v_p}{v} * f_v. \quad (3.8)$$

- **Pohybuje-li se přijímač i vysílač**

Třetí a poslední možností je jejich vzájemný pohyb. Zde mohou nastat čtyři situace. Je to pohyb vysílače i přijímače stejným směrem, a to buď ve směru přijímače nebo vysílače. Dále pohyb vysílače a přijímače k sobě, anebo pohyb vysílače a přijímače od sebe. Výsledné vztahy vzniknou kombinacemi obou předchozích pravidel.

Budou-li se vysílač i přijímač pohybovat stejným směrem ve směru k přijímači, výsledná rovnice bude mít tvar:

$$f_p = \frac{v-v_p}{v-v_v} * f_v. \quad (3.9)$$

Naopak při pohyb stejným směrem ve směru k vysílači bude výsledný vztah vypadat takto:

$$f_p = \frac{v+v_p}{v+v_v} * f_v. \quad (3.10)$$

Pohybují-li se však vysílač a přijímač k sobě, vypadá rovnice následovně:

$$f_p = \frac{v+v_p}{v-v_v} * f_v. \quad (3.11)$$

Pohybovaly by se však od sebe, bude mít rovnice tvar:

$$f_p = \frac{v-v_p}{v+v_v} * f_v. \quad (3.12)$$

4 Návrh měřicí sestavy

Přístroje v měřicí sestavě byly vybrány dle schopnosti pracovat na frekvenci 2,4 GHz s tím, že byl brán ohled na dostupné nabídky přístrojů na fakultě a následně byla zvolena nejvýhodnější kombinace přístrojů. Měřicí sestava je složena ze čtyř základních komponentů. Jedním z nich je vektorový generátor, který slouží pro vytvoření daného signálu, jeho modulaci na nosnou frekvenci a následně vysílání. Pro samotné vysílání a příjem signálu byly zvoleny dvě antény typu Yagi. Zpracování signálu a jeho následné vyhodnocení je prováděno na signálovém analyzátoru. Pro zpracování signálu je zde také použit osciloskop. Ten slouží pro rychlou, jednoduchou a přehlednou kontrolu signálu.

- **Vektorový generátor**

Pro tuto práci byl zvolen programovatelný vektorový generátor SMBV 100A od firmy Rohde&Schwarz. Pro vysílání nosného kmitočtu má frekvenční rozsah od 9 kHz do 3,2 GHz a šířku pásma 90 MHz. S tímto generátorem lze vytvářet většinu signálů složených z I a Q složek. Ty můžeme namodulovat na nosný kmitočet anebo si je vyvést ven a dále s nimi pracovat externě. Velikost výstupního výkonu lze regulovat od -145 dBm až po 30 dBm. Absolutní chyba přitom není větší jak 0,5 dB.



Obr. 22 – Vektorový generátor – přední panel

Ovládat tento přístroj můžeme několika způsoby. Základním je ovládání přes jeho ovládací panel. Dále pak můžeme propojit generátor s PC nebo notebookem pomocí USB, IEEE nebo LAN kabelu. K tomu si musíme nainstalovat SW pro komunikaci a pro dálkové ovládání. Ovládání generátoru je také možné přímo prostřednictvím programu Matlab

pomocí definovaných příkazů. Jak SW, tak vzorové příklady pro program Matlab jsou zdarma dostupné na stránkách výrobce. U vzorových příkladů je však nutné nastavit správnou specifikaci a konfiguraci připojení, které budeme realizovat.

Zadní strana přístroje obsahuje velkou škálu BNC konektorů pro možnost přivedení nebo vyvedení signálu a jeho případnou kontrolu. Jsou zde také vyvedeny všechny konektory pro propojení s PC a napájecí konektor.



Obr. 23 – Vektorový generátor zadní – panel

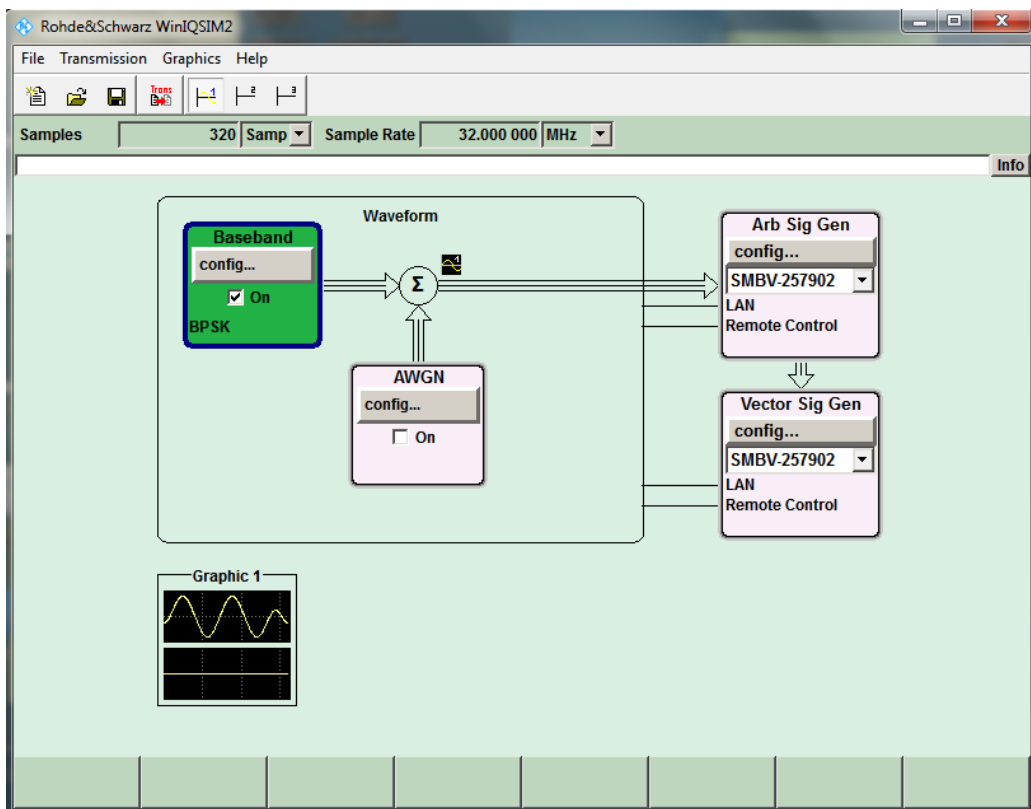
Frekvence		
Rozsah	CW mód	9 kHz až 3,2 GHz
	I/Q mód	1 MHz až 3,2 GHz
Úroveň		
Maximální výstupní výkon	1 MHz < f = 6 GHz	>+18 dBm (PEP)
Podporované analogové modulace	AM, FM, φM	

I/Q modulace		
Šířka pásma I/Q modulátoru	interní	60 MHz, 120 MHz nebo 160 MHz, v závislosti na volbě základního pásma
	externí	>500 MHz
Maximální délka průběhu	32 Msamplů	
Konektivita		
Vzdálené ovládání		IEC/IEEE, Ethernet (LAN), USB
Periferie		USB 2.0

Tabulka 6 – Parametry vektorového generátoru

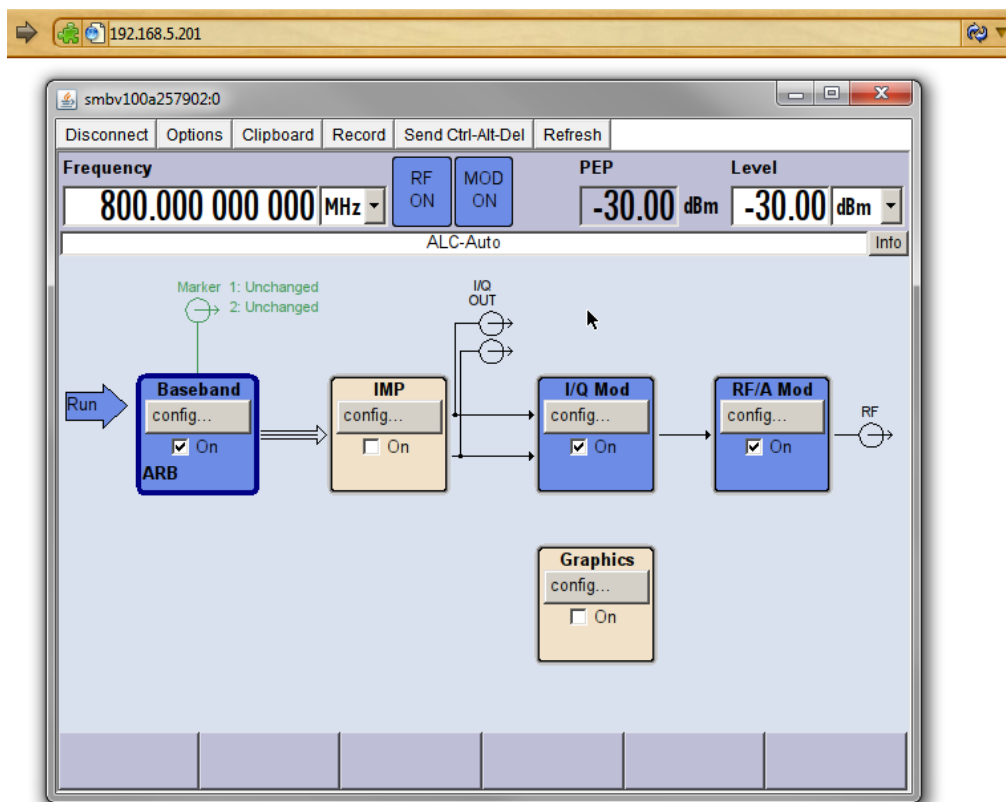
- **SW k vektorovému generátoru**

Software se skládá ze dvou programů, první WinIQSIM2 slouží k ovládání a samotné práci s generátorem. Nabízí dvě možnosti ovládání generátoru. První možností je ovládání přes grafické rozhraní, kde si volíme základní nastavení a vlastnosti signálu, který budeme generovat.



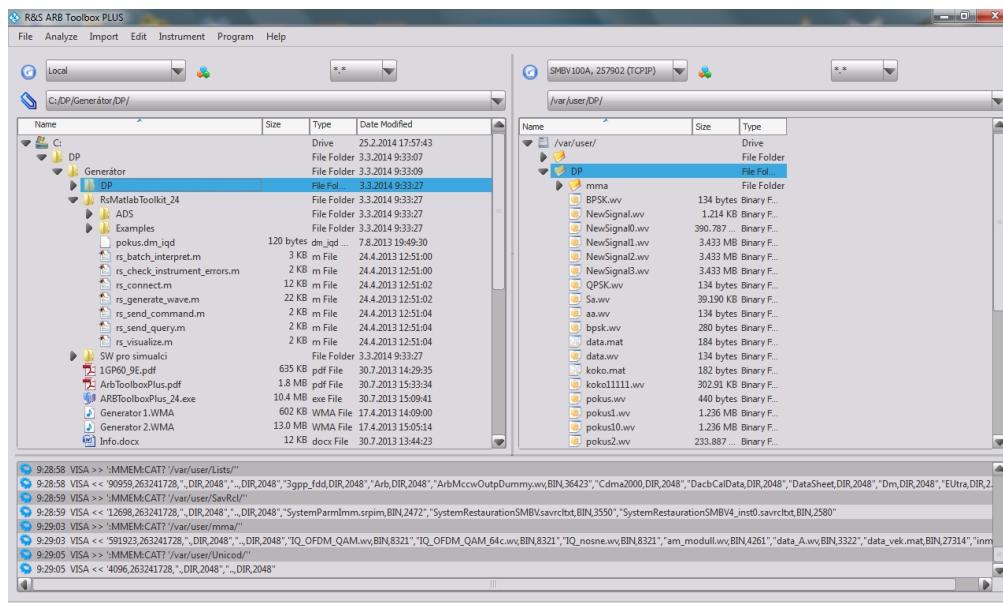
Obr. 24 – Grafické prostředí WinIQSIM2

Alternativně se můžeme přepnout do zobrazení v internetovém prohlížeči. Zde se nám zobrazí zmenšený základní panel vektorového generátoru, přes který ho můžeme ovládat, jako bychom byli přímo u něj.



Obr. 25 – Zobrazení generátoru v internetovém prohlížeči

V grafickém rozhraní můžeme také posílat do generátoru předpřipravené signály ve správném formátu. Pro převod signálu do formátu podporovaného generátorem nám slouží druhý program, tím je ARB Toolbox PLUS. V tom je možné si vybrat z relativně široké nabídky podporovaných formátů, z kterých můžeme signál převést. Samotný převod je jednoduchý a uživatelsky velice přívětivý. Program ARB Toolbox PLUS slouží i pro případnou správu souborů s generovanými signály ve vektorovém generátoru a následnou práci s nimi.



Obr. 26 – ARB Toolbox PLUS

- **Signálový analyzátor**

Zde byl použit přístroj PXA Signal analyzer N9030A-508 od společnosti Agilent Technologies. Tento přístroj má frekvenční rozsah vstupního signálu od 3 Hz do 8,4 GHz. Dokáže zpracovávat, analyzovat, zobrazovat a dekodovat signál jak ve frekvenční tak i v časové oblasti, a to paralelně a v reálném čase. Toto nám umožňuje dodávaný SW, který je nainstalován do OS Windows Embedded, jenž je základem tohoto signálového analyzátoru.



Obr. 27 – Signálový analyzátor – přední panel

Port pro vstupní signál je realizován pomocí vysokofrekvenčního R – SMA konektoru, nad kterým se nalézají dva USB porty pro připojení USB Flash disku pro následné nahrání nebo uložení naměřených dat.



Obr. 28 – Signálový analyzátor – zadní panel

Jelikož je základem OS Windows, doporučil bych připojit na zadní panel přes USB porty dodávanou klávesnici a myš pro lepší ovládání přístroje. Pokud bychom chtěli zobrazovat více oken najednou, hrozilo by, že data na malém vestavěném monitoru by mohla být hůře čitelná a práce s nimi by byla obtížnější. Z tohoto důvodu bych doporučil připojit ještě externí monitor pro lepší přehlednost a pro komfort zobrazování požadovaných dat a informací.

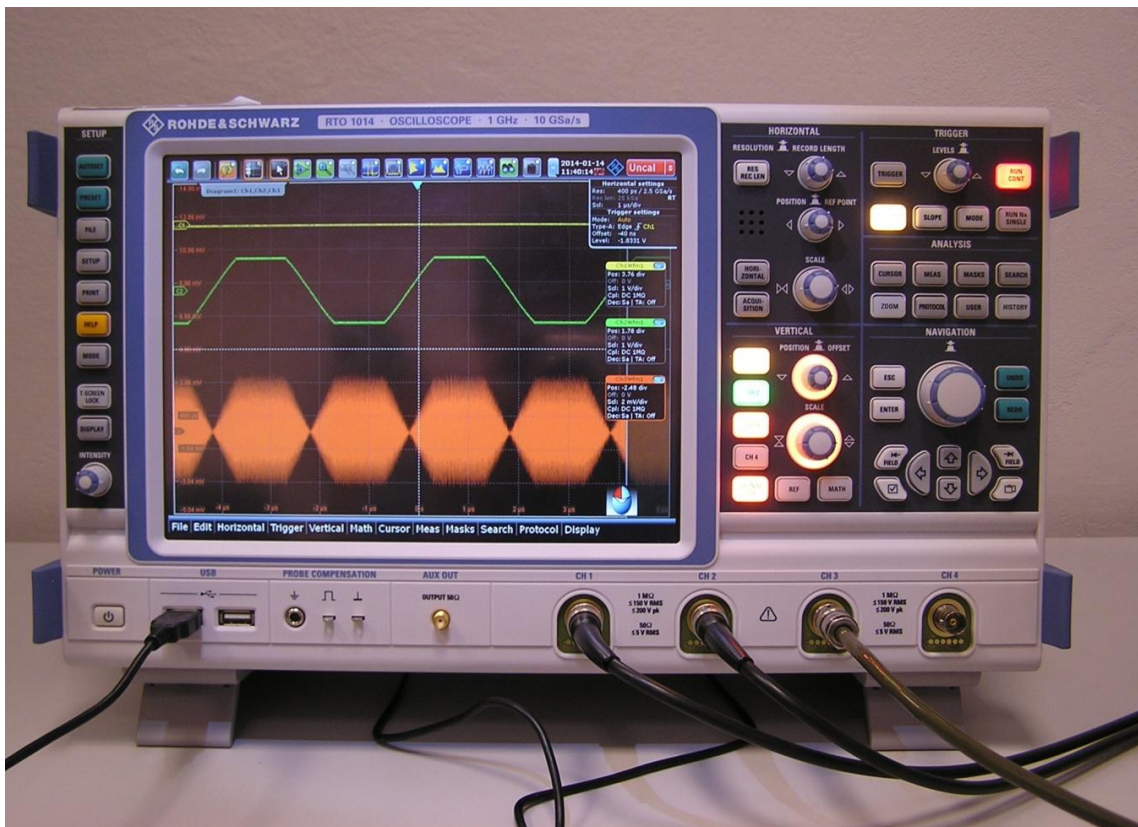
Frekvenční rozsah	AC – 10 MHz až 8,4 GHz DC – 3 Hz až 8,4 GHz
Pásmo	3 Hz do 3,6 GHz 3,5 GHz do 8,4 GHz
Šířka pásma	25 MHz
Vstupní impedance	50 Ω
Frekvenční rozpětí	10 Hz do 25 MHz

Pásma a přesnosti	
1 Hz do 100 kHz	± 0,5% (± 0,022 dB)
110 kHz to 1,0 MHz (< 3,6 GHz CF)	± 1,0% (± 0,044 dB)
1,1 MHz do 2 MHz (< 3,6 GHz CF)	± 0,07 dB jmenovitý
2,2 MHz to 3 MHz (< 3,6 GHz CF)	± 0,10 dB jmenovitý
4 MHz to 8 MHz (< 3,6 GHz CF)	± 0,20 dB jmenovitý
šířka pásma video signálu	1 Hz do 3 MHz (10% krok), 4, 5, 6, 8 MHz
Rozlišení šířky pásma (měření spektra)	
Celkový rozsah	100 mHz až 3 MHz
Typy oken	Flat Top, Uniform, Hanning, Hamming, Gaussian, Blackman, Blackman-Harris, Kaiser Bessel
šířka pásma pro analýzu a měření průběhu	10 Hz to 25 MHz
Základní data	
Displej	8.4" TFT barevný 1024 x 768 (XGA)
Konektivita	1 Gbit/s LAN, 4 x USB 2.0, DVI, externí trigr, výstup trigrů, BNC, SMA, GPIB

Tabulka 7 – Parametry signálového analyzátoru

- **Osciloskop**

Toto zařízení je předně určeno ke sledování signálů v časové oblasti. Jemnost a přesnost zobrazení závisí na šířce pásma a na rozlišovací schopnosti přístroje. Pro měření a následné zpracování signálu na frekvenci 2,4 GHz by byl potřeba přístroj s šířkou pásma minimálně 2,5 GHz. Takový přístroj ale nebyl k dispozici, proto byl použit osciloskop RTO1014 od společnosti Rohde&Schwarz. Ten disponuje šířkou pásma 1 GHz a vzorkovací frekvencí přijímaného signálu 10 GSa/s. Z tohoto důvodu musí dojít při měřeních s osciloskopem ke snížení nosné frekvence pod 1 GHz.



Obr. 29 – Osciloskop

Výhodou tohoto osciloskopu je možnost připojení až čtyř na sobě nezávislých vstupních signálů. Udávaná vzorkovací frekvence 10 GSa/s se zde ovšem dělí počtem použitých kanálů. Při využití všech čtyř vstupů se tato frekvence zmenší na 2,5 GSa/s na kanál.

Vertikální systém		
Počet vstupních kanálů	4	
Analogová šířka pásma (-3 dB) při 50 Ω	1 GHz	
Vstupní impedance	50 Ω ±1,5 %	
	1 MΩ ±1 % s 15 pF (střední hodnota)	
Vstupní citlivost	maximální šířka pásma ve všech rozsazích	50 Ω: 1 mV/dílek až 1 V/dílek
		1 MΩ: 1 mV/dílek až 10 V/dílek
Vzorkovací systém		
Vzorkování v reálném čase	maximálně 10 Gsamplů/s na kanál	
Hloubka paměti	dle počtu kanálů	4 kanálový model 20 /80 Msamplů
Maximální vzorkovací rozsah	spojité vzorkování a zobrazování 10 Gsamplů/s, 1 ksampl	1 000 000 průběhů/s
Horizontální systém		
Rozsah časové základny	25 ps/dílek až 50 s/dílek	
Přesnost časové základny	±5 ppm	
Základní data		
Displej	10.4" LC TFT barevný dotykový XGA s rozlišením 1024 x 768	
Konektivita	1 Gbit/s LAN, 4 x USB 2.0, DVI, externí trigr, trigrovací výstup	

Tabulka 8 – Parametry osciloskopu

5 Měření charakteristik antén

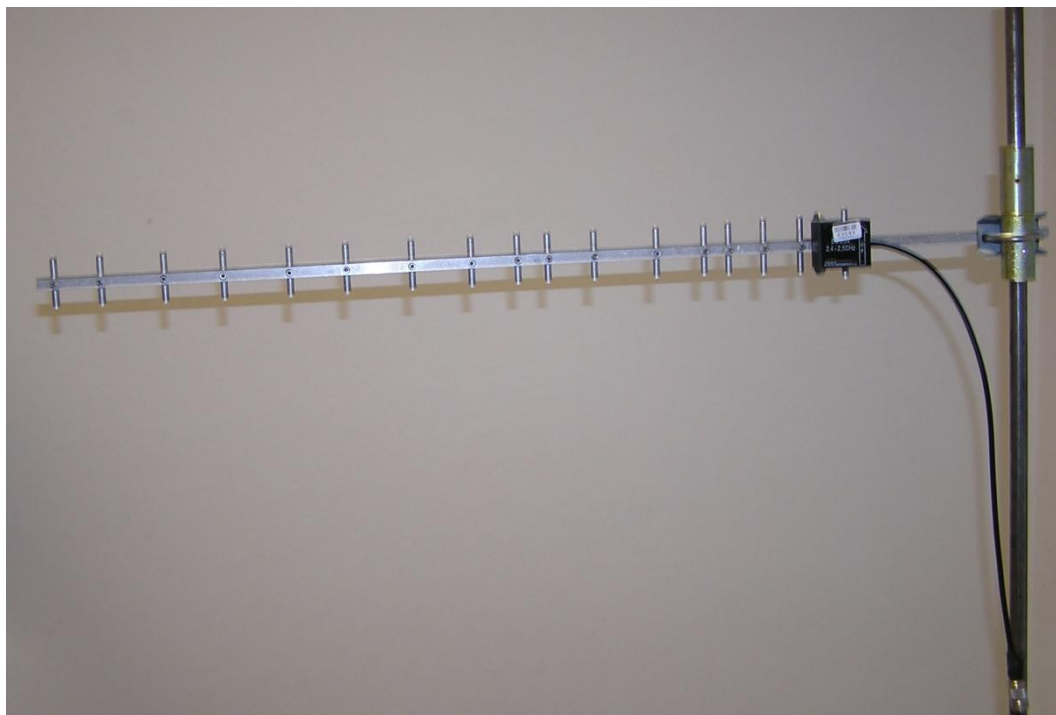
Jedním z prvních úkolů bylo změřit vyzařovací a frekvenční charakteristiky antén. Ty budou následně použity v simulaci v programu Matlab, kde budou prováděny simulace chování signálu při průchodu anténami a daným prostředím.

- **Antény**

Pro měření vyzařovacích charakteristik byla zvolena dvojice antén BD 2G4. Tyto antény jsou typu Yagi a pracují v pásmu 2,4 GHz – 2,5 GHz. Mají poměrně velký zisk a úzkou šířku vyzařovacího svazku.

Výrobce	RCD Radiokomunikace s.r.o.
Typ	Yagi
Frekvenční rozsah	2,4 GHz – 2,5 GHz
Zisk	16 – 17 dBi
Impedance	50 Ω

Tabulka 9 – Parametry antény Yagi



Obr. 30 – Anténa Yagi

Měření frekvenčních charakteristik probíhalo na třech typech antén, a to jak na už zmíněné Yagi anténě tak na prutové anténě a dále na anténní řadě pro RFID. Ta byla vyrobena v rámci jiných činností na Fakultě elektrotechniky a informatiky. Součástí anténní řady je také Wilkinsonův dělič výkonu, který byl vyroben na míru pro správné fungování antény.

Výrobce	TP-LINK
Typ	Prutová anténa
Frekvenční rozsah	2,4 GHz – 2,4835 GHz
Zisk	8 dBi
Impedance	50 Ω

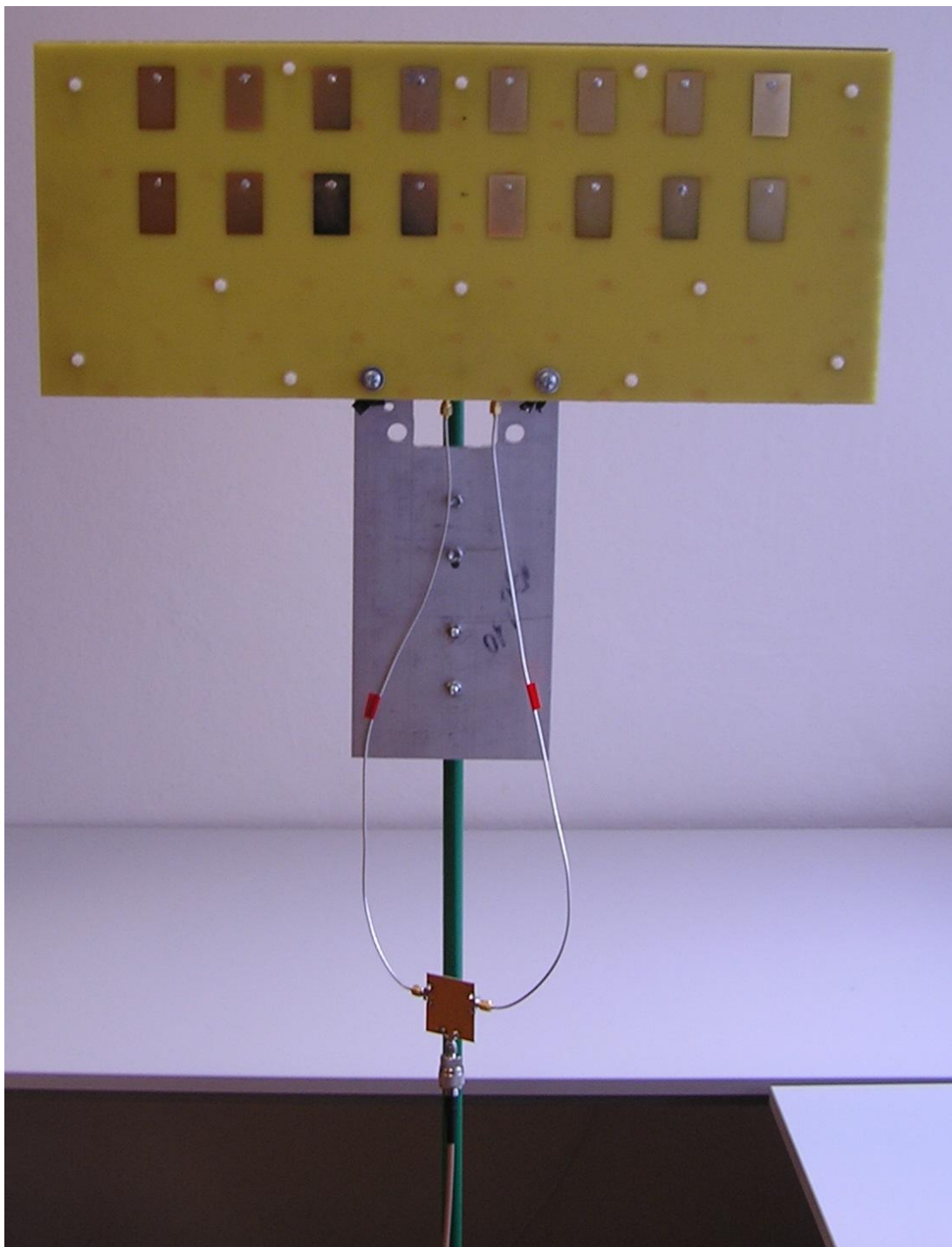
Tabulka 10 – Parametry prutové antény



Obr. 31 – Prutová anténa

Výrobce	Univerzita Pardubice
Typ	Anténní řada pro RFID
Frekvenční rozsah	2,425 GHz – 2,475 GHz
Zisk	13,4 – 15,5 dBi
Impedance	50 Ω

Tabulka 11 – Parametry anténní řady pro RFID



Obr. 32 – Anténní řada pro RFID

5.1 Přístroje

Pro měření vyzařovacích charakteristik Yagi antén byl použit signálový generátor SMC 100A od firmy Rohde&Schwarz a spektrální analyzátor FSL3 model .03 od téže firmy. Parametry přístrojů jsou uvedeny v následujících tabulkách.

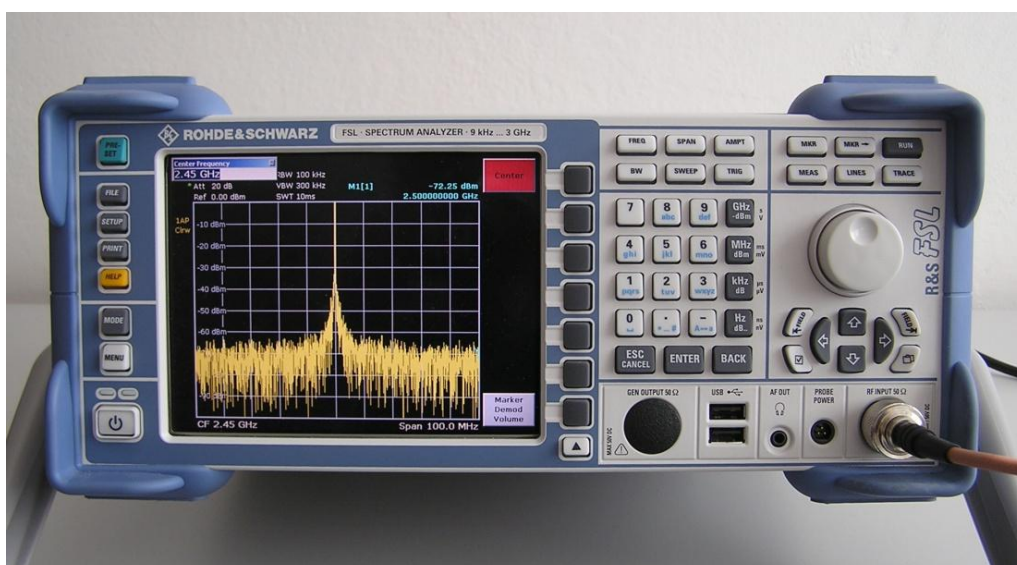


Obr. 33 – Signálový generátor

Frekvence		
Rozsah	9 kHz až 3,2 GHz	
Úroveň		
Maximální výstupní výkon	f = 200 kHz až 3,2 GHz	>+13 dBm
	f ≥500 kHz	typicky >+17 dBm v módu překročení
Chyba úrovně	f = 200 kHz až 3,2 GHz	<0,9 dB
Podporované modulace	AM, FM, φM, pulzní	

Konektivita	
Vzdálené ovládání	Ethernet (TCP/IP), USB
Periferie	USB

Tabulka 12 – Parametry signálového generátoru



Obr. 34 – Spektrální analyzátor FSL

Frekvence	
Rozsah	9 kHz až 3 GHz
Šířka pásma	
Standardně	300 Hz až 10 MHz v 1/3 sekvencích, dodatečné nulové rozpětí 20 MHz
Šířka pásma video signálu	10 Hz až 10 MHz
Šířka pásma signálové analýzy	28 MHz

Konektivita	
Vzdálené ovládání	Ethernet (TCP/IP), USB
Periferie	USB

Tabulka 13 – Parametry spektrálního analyzátoru FSL

Dále byla použita programovatelná otočná věž, která byla vyrobena na Univerzitě Pardubice pro výzkumné účely. Základem věže je krokový motor s převodovými stupni, díky kterým je možno anténu pootáčet po velmi malých krocích. Na poslední stupeň je namontována tyč pro uchycení antény. Celý systém je řízený mikroprocesorem. Ovládání je možné pomocí ovládacího panelu, který je umístěn na otočné věži nebo pomocí PC, které se připojí přes USB port, a je vybaveno příslušným SW.



Obr. 35 – Otočná věž

Měření frekvenčních charakteristik antén probíhalo na přenosném spektrálním analyzátoru FSH8 model .28 od firmy Rohde&Schwarz. Tento spektrální analyzátor může být použit samostatně pro měření frekvenčních charakteristik antén, protože disponuje vlastním generátorem pro buzení vysílací antény.



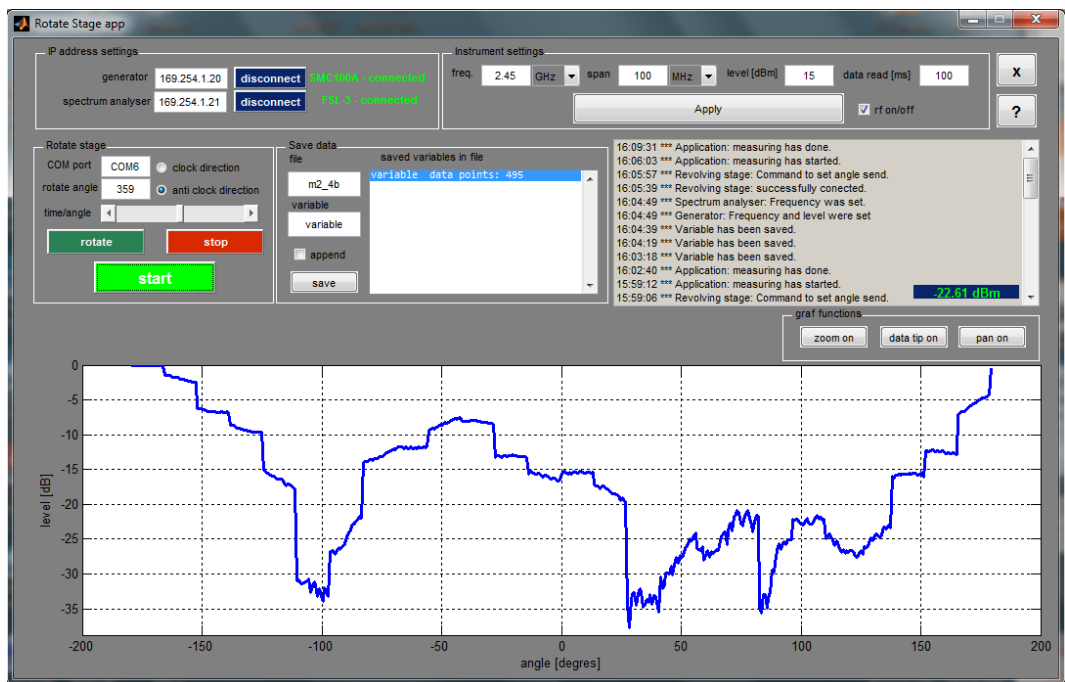
Obr. 36 – Spektrální analyzátor FSH8

Frekvenční rozsah	100 kHz až 8 GHz
Rozlišení šířky pásma	1 Hz až 3 MHz
Detektory	vzorky, max. a min. špička, automatická špička, RMS
Základní data	
Provozní doba na baterii (bez použití tracking generátoru)	až 3 hodiny
Displej	6.5" barevný LCD s VGA rozlišením
Konektivita	LAN, SD Card, USB, mini USB

Tabulka 14 – Parametry spektrálního analyzátoru FSH8

5.2 Ostatní příslušenství

Jedním z hlavních příslušenství pro měření vyzařovacích charakteristik byl SW pro záznam naměřených dat útlumu na anténě v měřeném rozsahu od 0° do 360°. SW byl vytvořen na Univerzitě Pardubice. Program byl vytvořen na platformě Matlab a pracuje v jeho GUI prostředí. Umožňuje ovládat podporované měřicí přístroje a následně z nich zaznamenávat data. K tomu jsou využívány porty USB a LAN. Samotná komunikace s porty je realizována pomocí Instrument Control Toolboxu v programu Matlab a Visa knihovnami od společnosti National Instrument.



Obr. 37 – SW pro měření charakteristik antén

Program je přehledný a uživatelsky přívětivý, nabízí také rychlý náhled naměřených dat a intuitivní nastavení připojených přístrojů.

Dalším příslušenstvím byl regulovatelný laboratorní zdroj Diametral R124R50E, který sloužil pro napájení rotační věže.

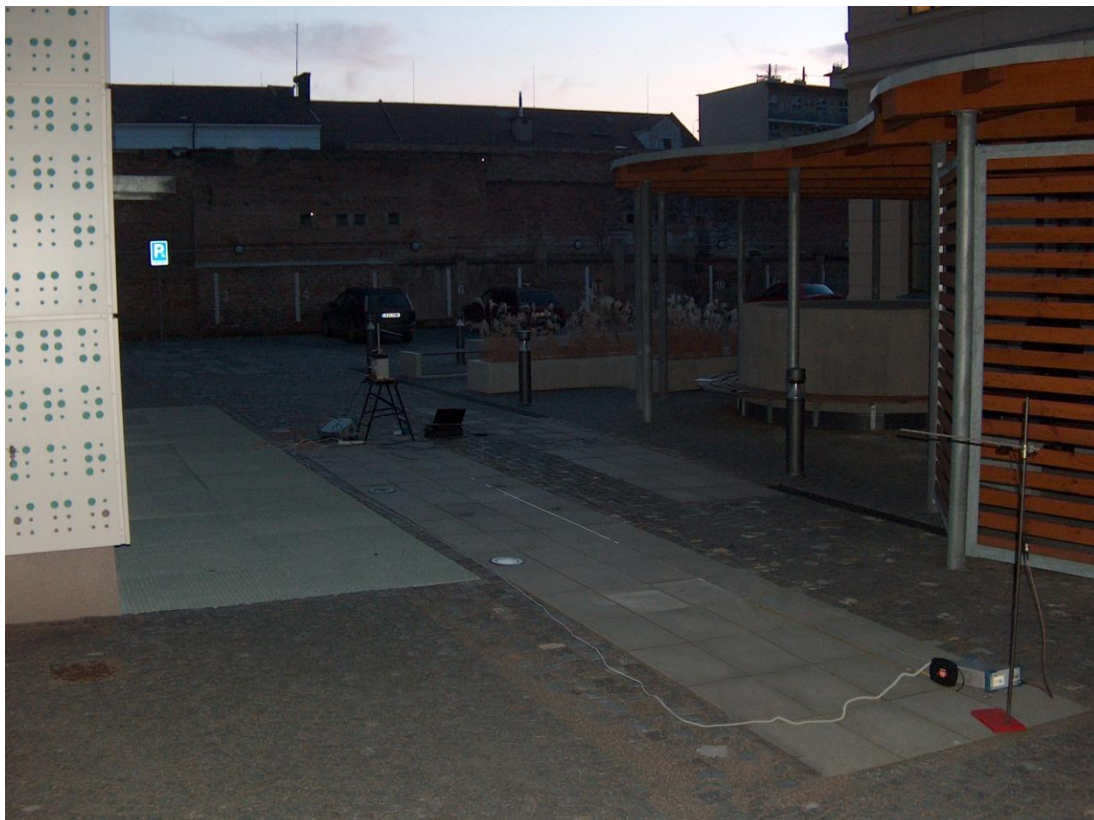


Obr. 38 – Zdroj Diametral

Pro propojení jednotlivých přístrojů byly použity stíněné koaxiální kabely s impedancí 50 ohmů zakončené konektory BNC nebo RSMA, podle konektoru na daném přístroji. Pro spojení notebooku, generátoru a spektrálního analyzátoru byl použit switch a LAN kabely. Rotační věž byla spojena s notebookem přes USB kabel s konektory A a B.

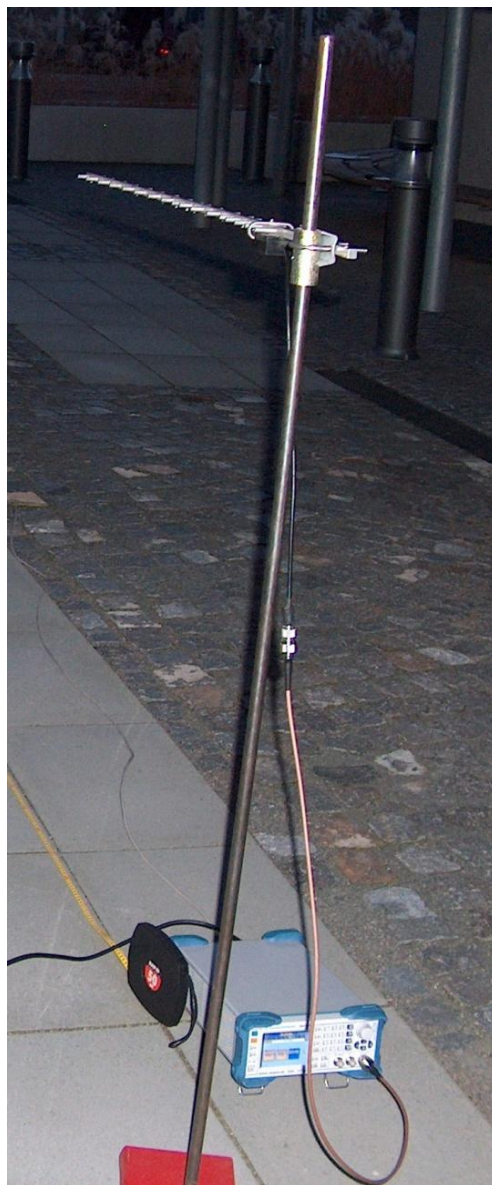
5.3 Měření vyzařovacích charakteristik

Měření bylo realizováno v areálu Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice. Měření byla provedena na frekvencích 2,4 GHz, 2,45 GHz a 2,5 GHz. Měřila se jak horizontální, tak i vertikální vyzařovací charakteristika antén Yagi. Antény byly umístěny ve výšce 1 m a vzájemná vzdálenost jejich hrotů byla přibližně 8 m.



Obr. 39 – Sestava pro měření vyzařovacích charakteristik antény Yagi

Vysílací část byla složena z antény Yagi a signálového generátoru SMC 100A, spojení bylo realizováno pomocí koaxiálního kabelu s RSMA konektory. Generátor byl připojen pomocí LAN kabelu do switchu a dále do notebooku.



Obr. 40 – Vysílací část sestavy pro měření vyzářovacích charakteristik antény Yagi

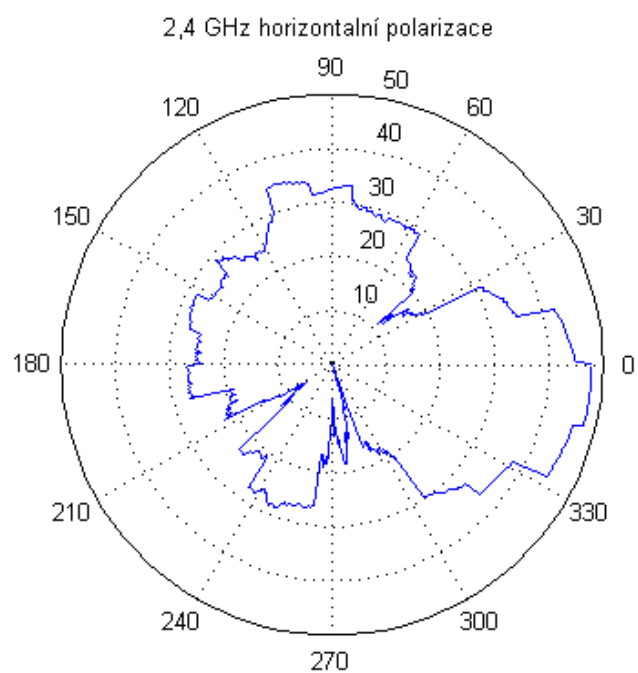
Přijímací část obsahovala opět anténu Yagi upevněnou na rotační věži. Anténa byla pomocí koaxiálního kabelu s RSMA konektory propojena se spektrálním analyzátozem FSL3 model .03. Ten byl pomocí LAN kabelu propojen se switchem a dále s notebookem. Věž byla napájena stabilizovaným laboratorním zdrojem a propojena pomocí USB kabelu také s notebookem. V něm byl spuštěn příslušný SW, který ovládal pohyb věže a přes připojený LAN kabel zaznamenával data jak z generátoru, tak ze spektrálního analyzátoru. Data byla po každém měření uložena do souboru s příponou .MAT a připravena pro následné vyhodnocení a zpracování.



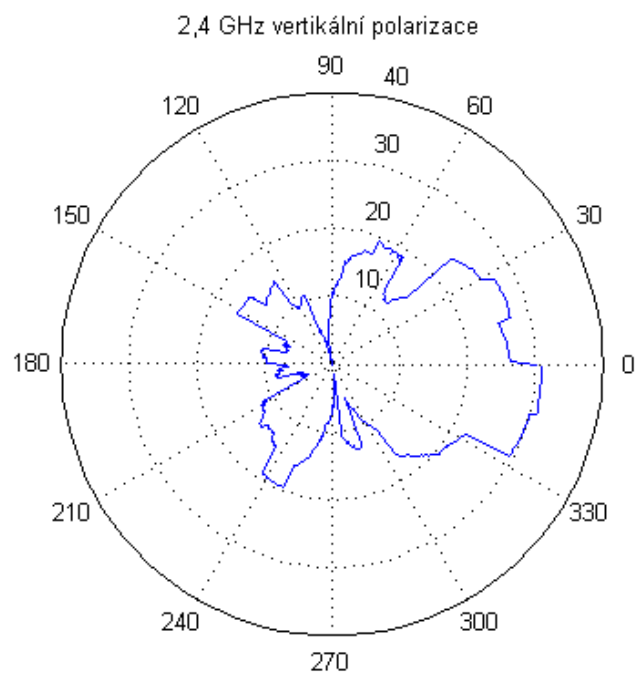
Obr. 41 – Přijímací část sestavy pro měření vyzařovacích charakteristik antény Yagi

Pro získání přehledných výsledných grafů v polárních souřadnicích bylo nutné provést úpravu hodnot v programu Matlab. Data získaná z měření byla ve formátu tabulky o dvou sloupcích s hodnotou kroku rotační věže a příslušnou hodnotou útlumu. Ty jsou obsaženy na přiloženém CD. Skript pro konverzi dat do polárních souřadnic je přiložen v příloze A.

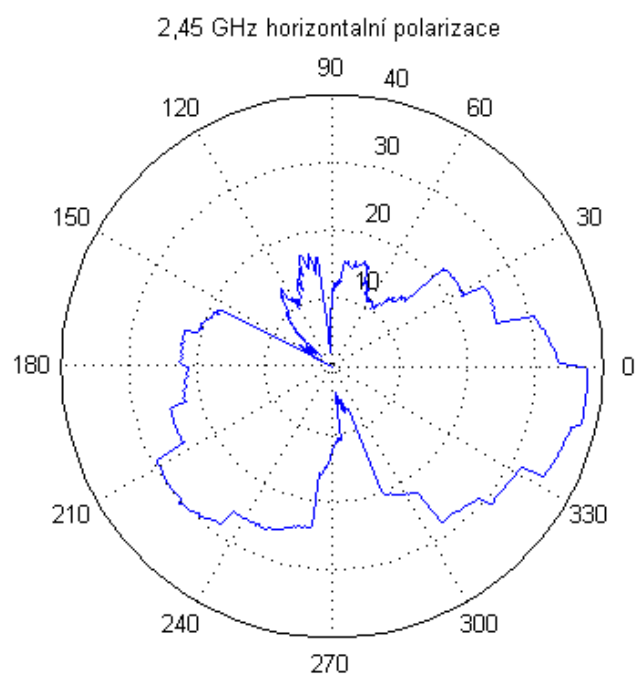
Výsledné charakteristiky mohly být ovlivněny odrazy a vícecestným šířením z důvodů umístění měřicího pracoviště. Dále zde mohlo dojít k rušení od WiFi sítě, kterou disponuje Fakulta elektrotechniky a informatiky i její okolí.



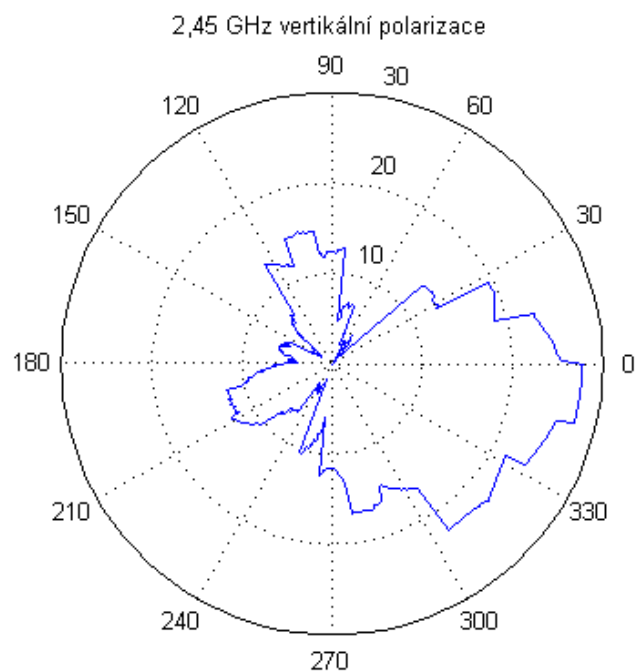
Obr. 42 – Horizontální polarizace antény na frekvenci 2,4 GHz



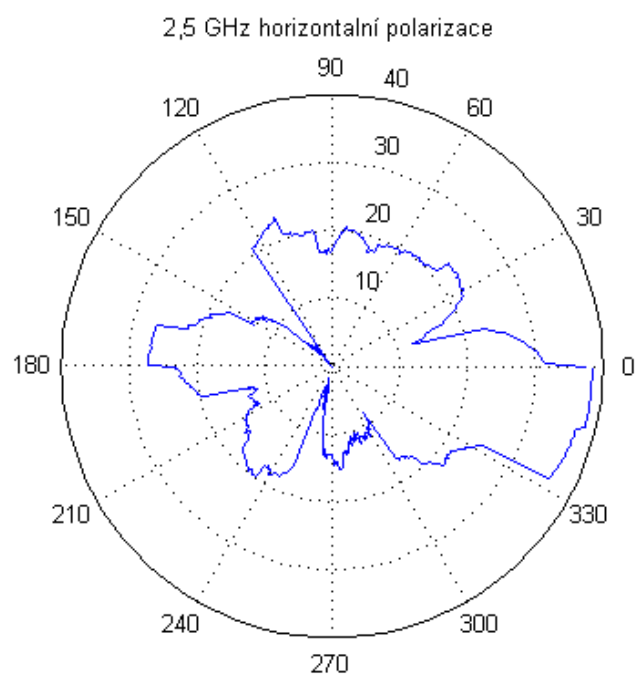
Obr. 43 – Vertikální polarizace antény na frekvenci 2,4 GHz



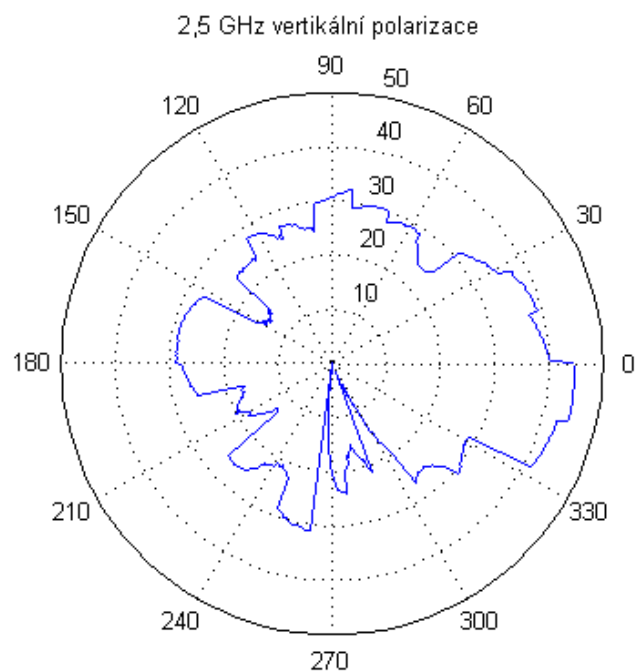
Obr. 44 – Horizontální polarizace antény na frekvenci 2,45 GHz



Obr. 45 – Vertikální polarizace antény na frekvenci 2,45 GHz



Obr. 46 – Horizontální polarizace antény na frekvenci 2,5 GHz



Obr. 47 – Vertikální polarizace antény na frekvenci 2,5 GHz

5.4 Měření frekvenčních charakteristik

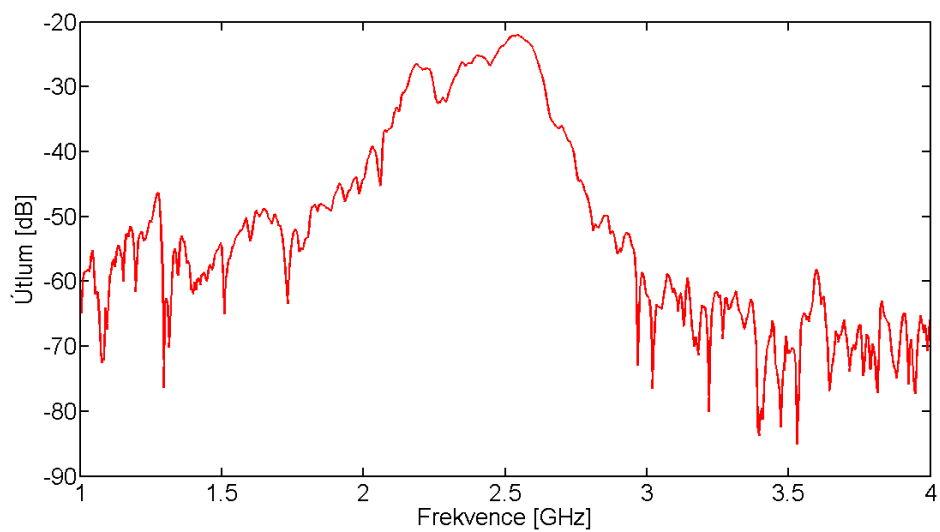
Měření probíhalo v laboratoři Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice. Měření byla prováděna ve frekvenčním rozmezí mezi 1 GHz a 4 GHz s centrální frekvencí na 2,5 GHz. Jako přijímací anténa byla vždy použita anténní řada pro RFID, jako vysílací anténa byla nejprve použita anténa Yagi a poté prutová anténa.

Měření bylo realizováno pouze jedním přístrojem, a to spektrálním analyzátozem FSH8. Ten byl použit z důvodu integrovaného generátoru a tím možnosti budít vysílací anténu na výstupu a zároveň zpracovávat data z přijímací antény na vstupu. Spektrální analyzátor byl dále propojen pomocí kabelu LAN s notebookem, kde byla spuštěná aplikace od firmy Rohde&Schwarz pro zaznamenávání a ukládání dat z měření spektrálními analyzátoři. Data z obou měření byla dále převedena do programu Matlab a zde následně zpracována.

Pro první měření byla vysílací anténa umístěna do výšky 1,48 m, přijímací do výšky 1,53 m při vzájemné vzdálenosti hrotů antén 0,7 m.

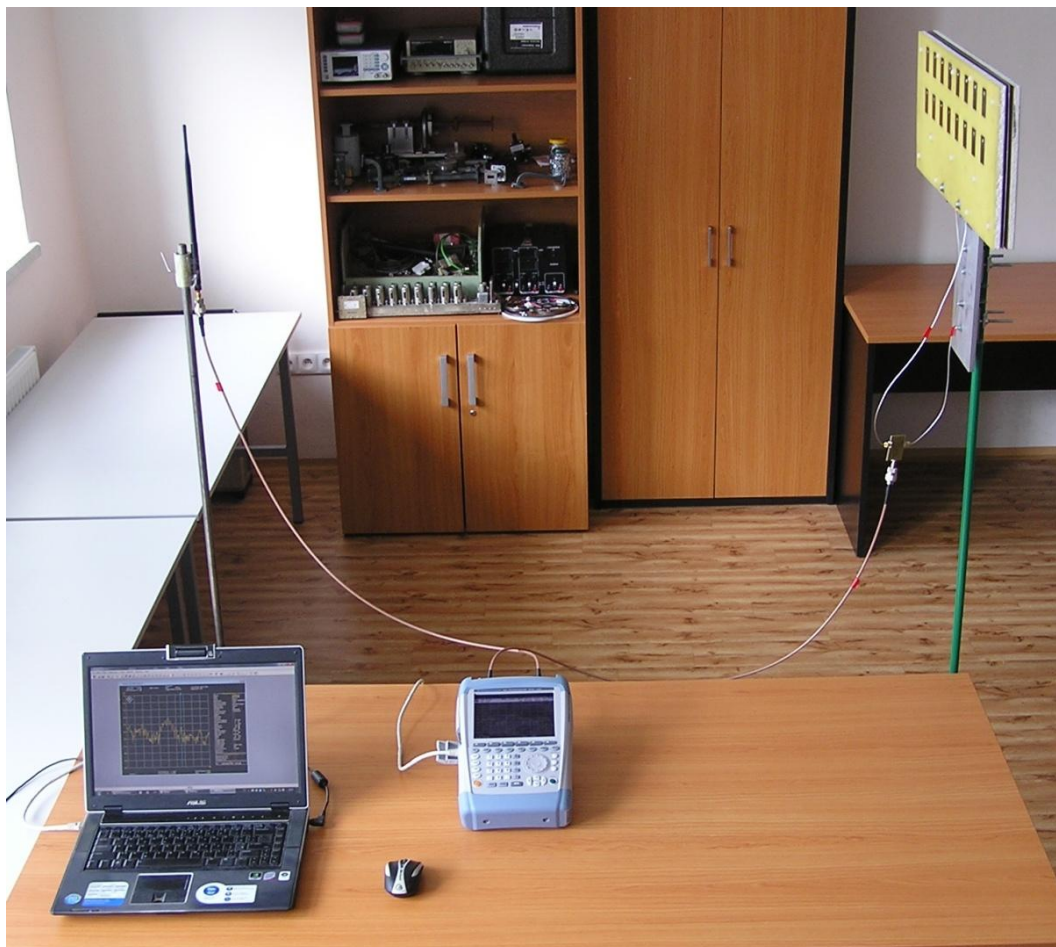


Obr. 48 – Měření frekvenční charakteristiky přenosu z Yagi antény do anténní řady pro RFID

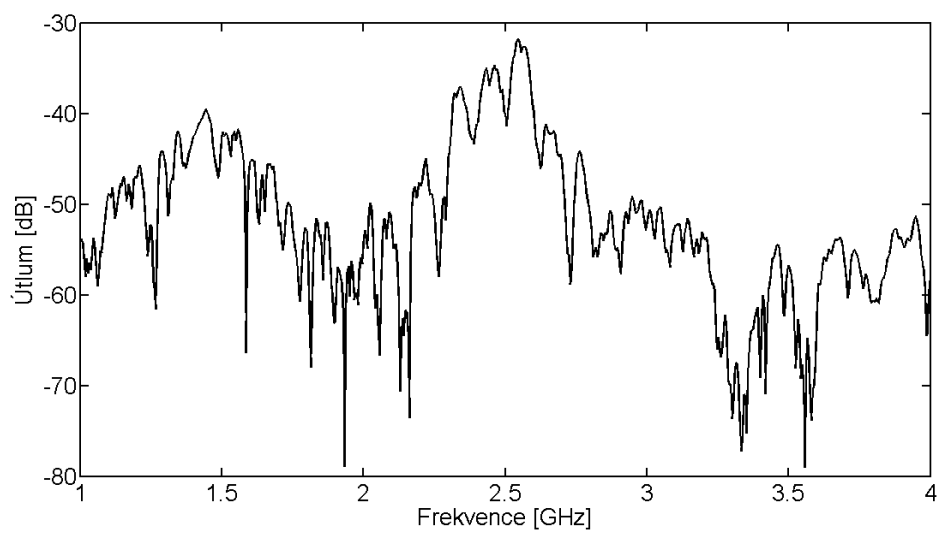


Obr. 49 – Graf frekvenční charakteristiky přenosu z Yagi antény do anténní řady pro RFID

Při druhém měření byla vysílací anténa umístěna ve výšce 1,45 m, přijímací anténa ve výšce 1,6 m při vzájemné vzdálenosti antén 1,4 m.



Obr. 50 – Měření frekvenční charakteristiky přenosu z prutové antény do anténní řady pro RFID

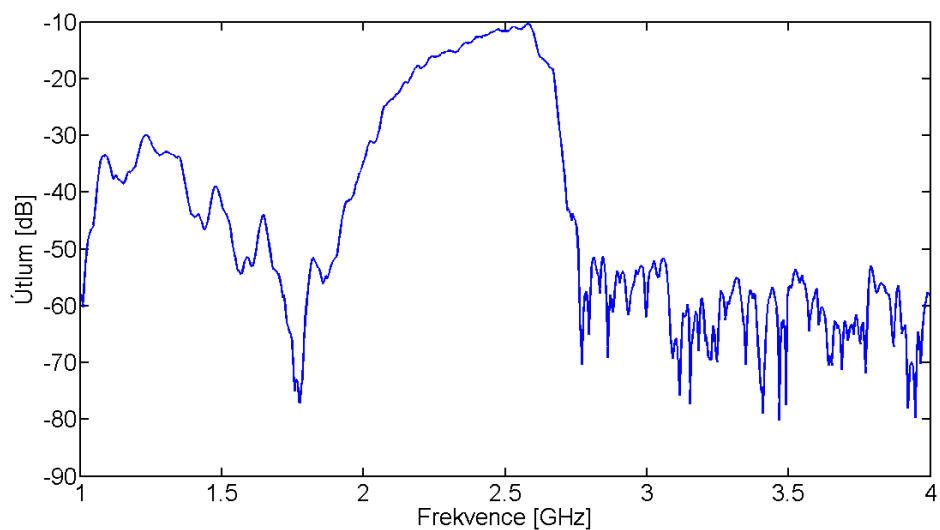


Obr. 51 – Graf frekvenční charakteristiky přenosu z prutové antény do anténní řady pro RFID

Pro porovnání bylo provedeno ještě jedno měření, kde byla jako přijímací i vysílací anténa použita Yagi. Zde byly antény umístěny do výšky 1,5 m při vzájemné vzdálenosti hrotů obou antén 0,15 m.

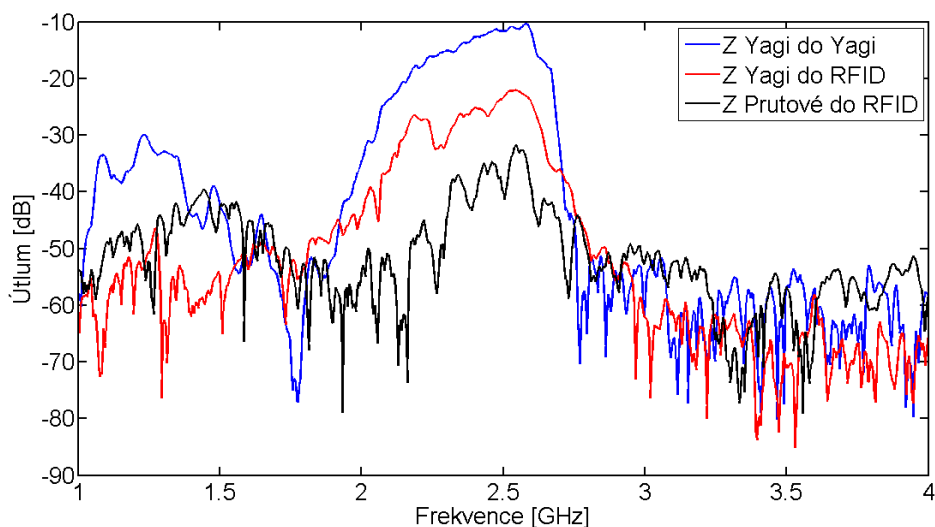


Obr. 52 – Měření frekvenční charakteristiky přenosu mezi anténami Yagi



Obr. 53 – Graf frekvenční charakteristiky přenosu mezi anténami Yagi

Pro výsledné porovnání a vyhodnocení frekvenčních charakteristik byly všechny průběhy vykresleny do jednoho grafu.



Obr. 54 – Graf porovnání frekvenčních charakteristik jednotlivých přenosů

Z grafů vidíme, že nejlepší frekvenční charakteristiky v pásmu od 2 GHz do 3 GHz má přenos mezi dvěma Yagi anténami, které mají úzce směrový hlavní svazek. Je zde sice nárůst zisku signálu mezi 1 GHz a 1,5 GHz, ten však pro nás není až tak podstatný, neboť naše oblast zájmu je kolem frekvence 2,45 GHz. Přenos mezi Yagi anténou a anténní řadou pro RFID má v oblasti našeho zájmu zisk asi o 10 dB nižší. Poklesy postraních laloků se pohybují kolem 25 dB až 30 dB. U přenosu z prutové antény je v naší zkoumané oblasti zisk tohoto signálu při porovnání s předchozími měřeními nejnižší. A v porovnání s celým měřeným úsekem není až tak výrazný.

6 Generování, simulace a zpracování signálu

Pro analýzu přenosu signálu bylo provedeno jedno měření a dvě simulace v programu Matlab. Při měření bylo pozorováno chování signálu po celou dobu jeho vytváření od generování dat přes modulaci, přenos až po jejich zpětnou demodulaci. Simulace měly oproti tomu za úkol zkoumat ovlivnění signálu anténami a chování signálu při vysokých rychlostech.

6.1 Měřicí sestava

Měřicí sestava navržená ve čtvrté kapitole prošla od původního návrhu změnami. Místo příjmu, zpracování a vyhodnocení přijatého signálu vektorovým analyzátozem PXA N9030A-508 byl použit spektrální analyzátor FSL3 model .03, kvadrurní demodulátor ADL 5382 a osciloskop RTO1014. Přijímací anténa Yagi byla vyměněna za anténní řadu pro RFID signály, jejíž zhotovení bylo výsledkem jiných činností. Dále zde byl použit signálový generátor SMC 100A pro vysílání referenčního signálu, který byl propojen s generátorem SMBV 100A kvůli synchronizaci.

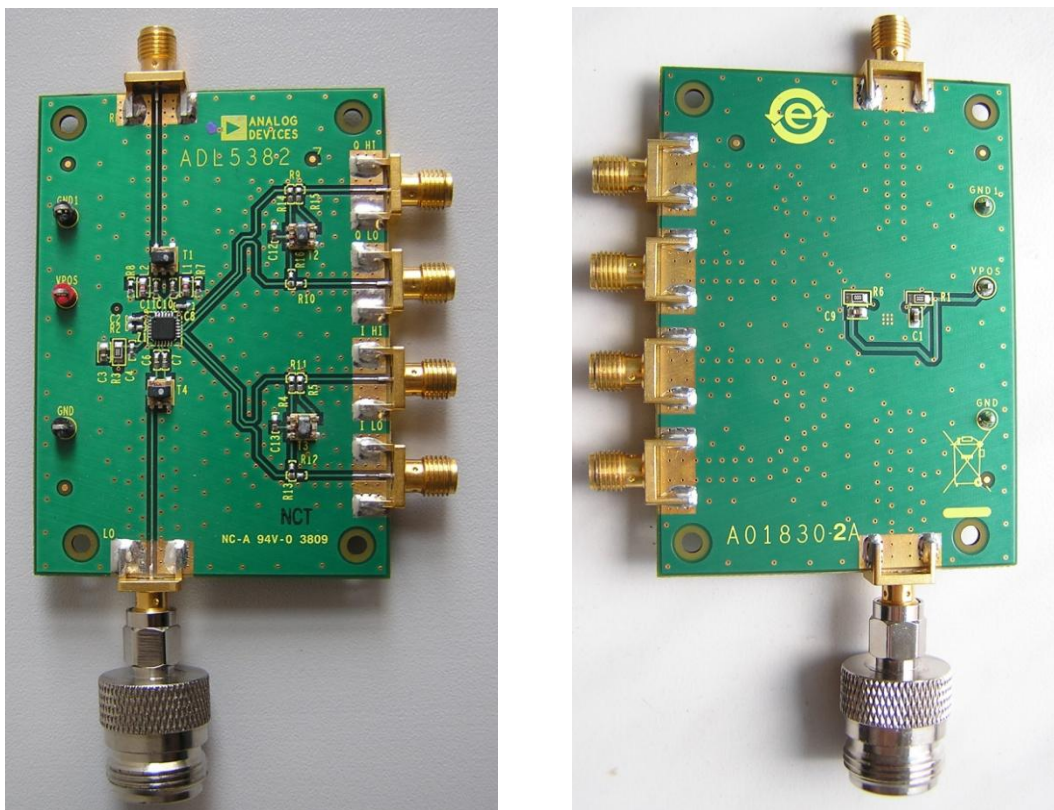


Obr. 55 – Měřicí sestava

Změna v měřicí sestavě byla provedena z důvodu možnosti využití kvadrurního demodulátoru ADL 5382, jeho jednoduchosti a menší časové náročnosti na obsluhu.

- **Kvadrurní demodulátor**

Širokopásmový kvadrurní demodulátor ADL 5382 od firmy Analog Devices umožňuje demodulovat signál do IQ složek na mezifrekvenci. Umožňuje demodulovat signál z nosné frekvence v rozmezí od 700 MHz až do 2,7 GHz. Šířka pásma demodulovaného signálu může být až 370 MHz. Napájen je stejnosměrným napětím 5 V. Na výstupu nabízí jak klasické hodnoty I a Q složek, tak i jejich diferenční hodnoty.



Obr. 56 – Vrchní a spodní část kvadrurního demodulátoru

Frekvenční rozsah referenční a vstupního signálu	700 MHz až 2,7 GHz
Úroveň referenčního signálu	Min. -6 dBm Max. +6 dBm (typicky 0 dBm)
Napájení	Min. 4,75 V Max. 5,25 V
Šířka pásma demodulovaného signálu	při 1V p-p 370 MHz
Šumové číslo	14,0 dB při 900 MHz
	15,6 dB při 1900 MHz

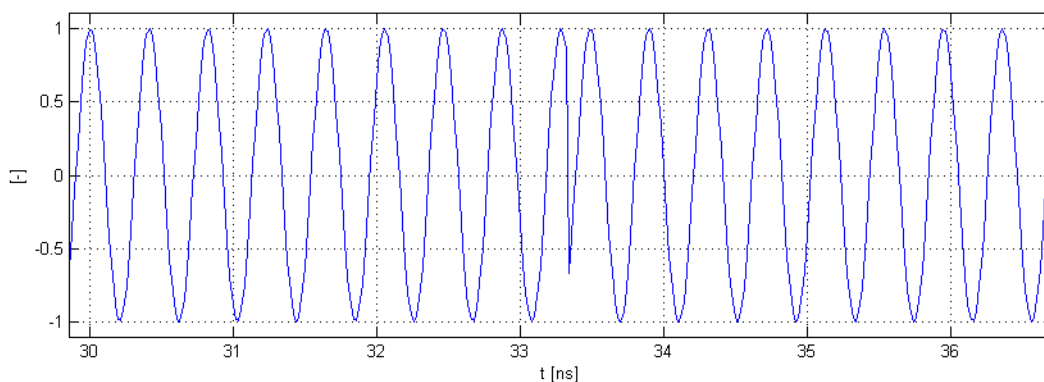
Přesnost kvadraturní demodulace	
Přesnost fáze	0,2°
Amplitudová bilance	0,05 dB

Tabulka 15 – Parametry kvadraturního demodulátoru

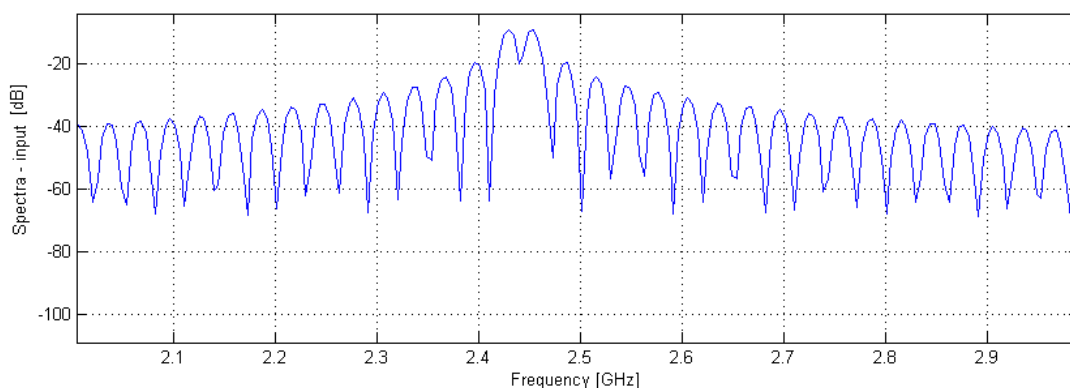
6.2 Generování dat, simulace signálu a analýza odrazů

Změřené frekvenční charakteristiky antény Yagi a anténní řady pro RFID byly importovány do simulačního programu v prostředí Matlab. Simulační program umožňuje analýzu chování signálu při průchodu vysílací anténou, odrazu od překážky nebo průchodu překážkou a následném průchodu přijímací anténou.

Byl vytvořen jednoduchý signál DBPSK. Šířka pásma vysílaného signálu a frekvence nosné vlny byla zvolena dle specifikací komunikace RTLS. Nosná frekvence tudíž činila 2,441 GHz a šířka pásma byla 60 MHz, z té byla následně vypočtena délka vysílaného bitu na 66,66 ns.

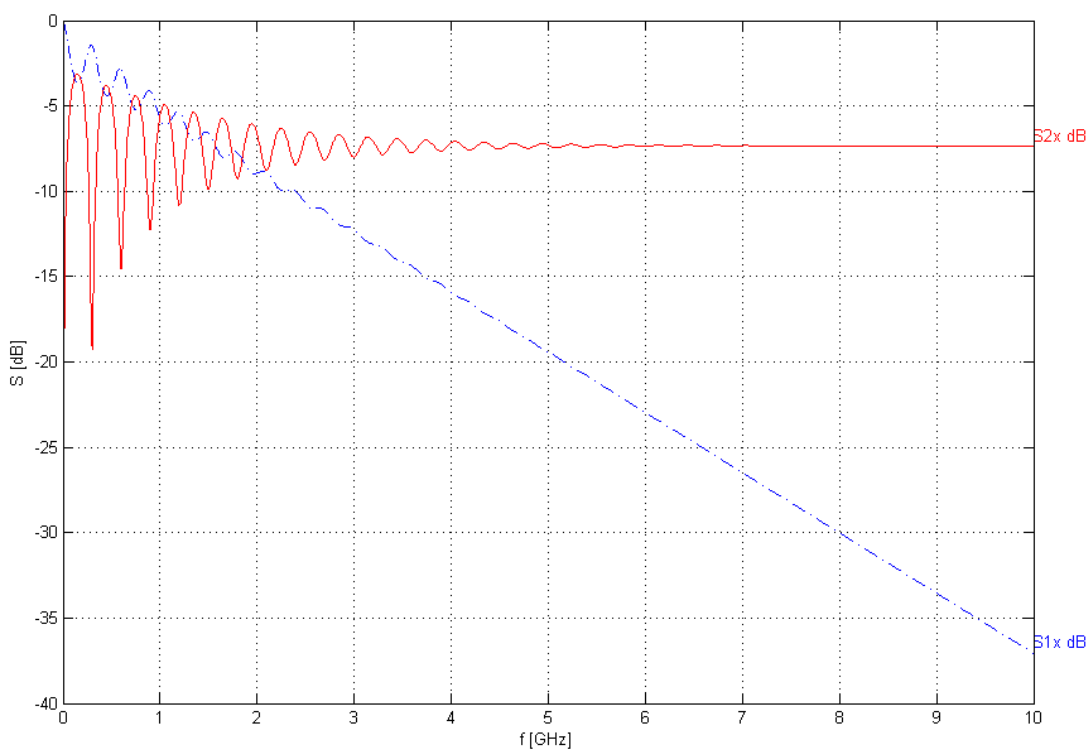


Obr. 57 – Signál v časové oblasti

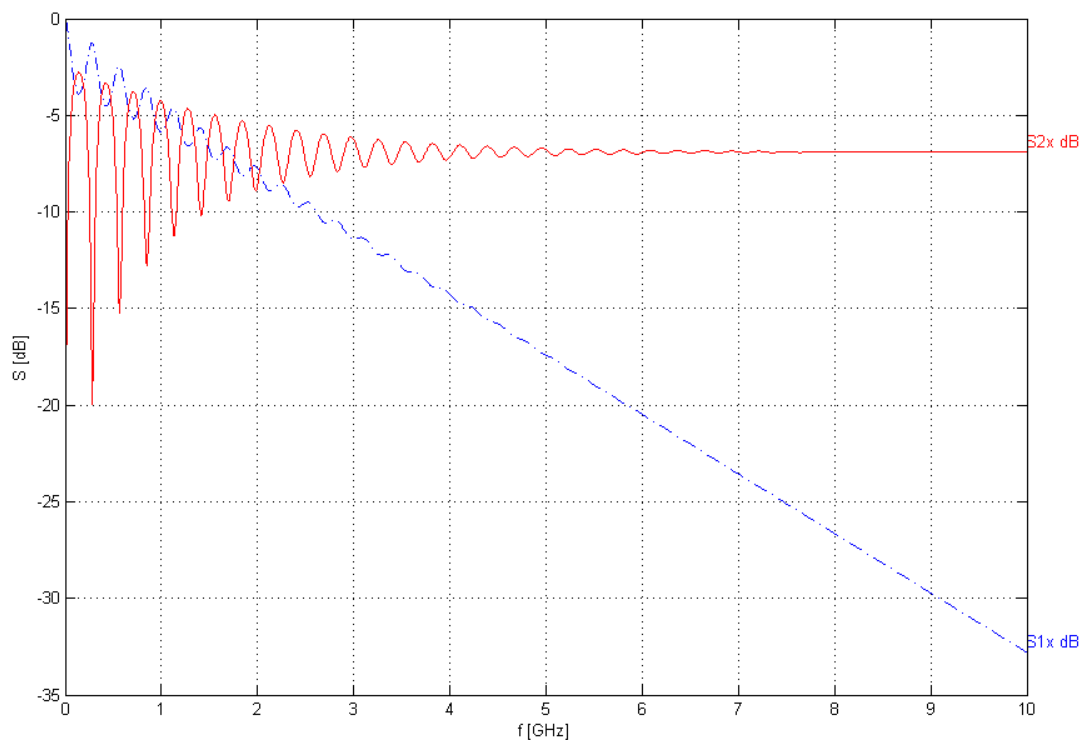


Obr. 58 – Signál ve frekvenční oblasti

Jako překážky byly zvoleny dvě zdi, cihlová a betonová. Při porovnání vlastností obou zdí dobře vidíme, jak skladba materiálu a tloušťka zdi ovlivňuje průchody a odrazy signálu. Čím má materiál větší hustotu a celistvější strukturu, tím více dochází k odrazům na čelní stěně a tím méně proniká do materiálu. Tam je signál zeslabován, dokud nedojde k zadní stěně. Zde dochází opět k odrazu a případně výstupu zbylého signálu ven ze zdi.



Obr. 59 – Charakteristika útlumu cihlové zdi



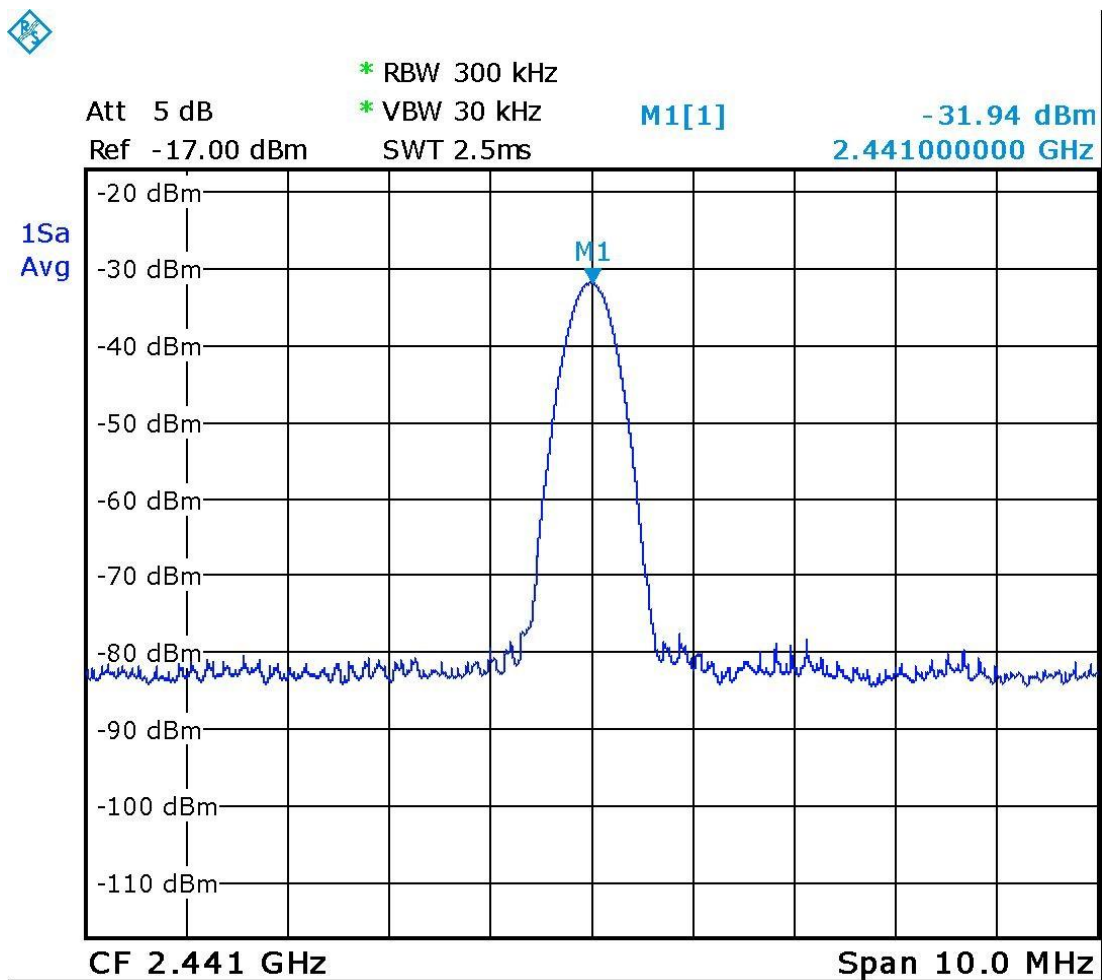
Obr. 60 – Charakteristika útlumu betonové zdi

Aby bylo docíleno ovlivnění signálu pouze námi definovanými překážkami, nebyl v simulaci brán v úvahu útlum signálu volným prostorem a odrazy od země a jiných překážek. Abychom docílili co největšího zpětného odrazu, byl zvolen kolmý dopadový úhel. Efektivní plocha antény a vzorkovací frekvence byly ponechány na výchozích hodnotách, které činily 0,25 pro efektivní plochu antény a 50 GHz pro vzorkovací frekvenci.

6.3 Generování reálných dat a měření signálu při přenosu mezi anténami

Následující měření bylo realizováno výše zmíněnou měřicí sestavou. V prostředí Matlab byla vygenerována náhodná data, ta byla modulována modulací DBPSK a výsledkem byl signál v komplexním tvaru.

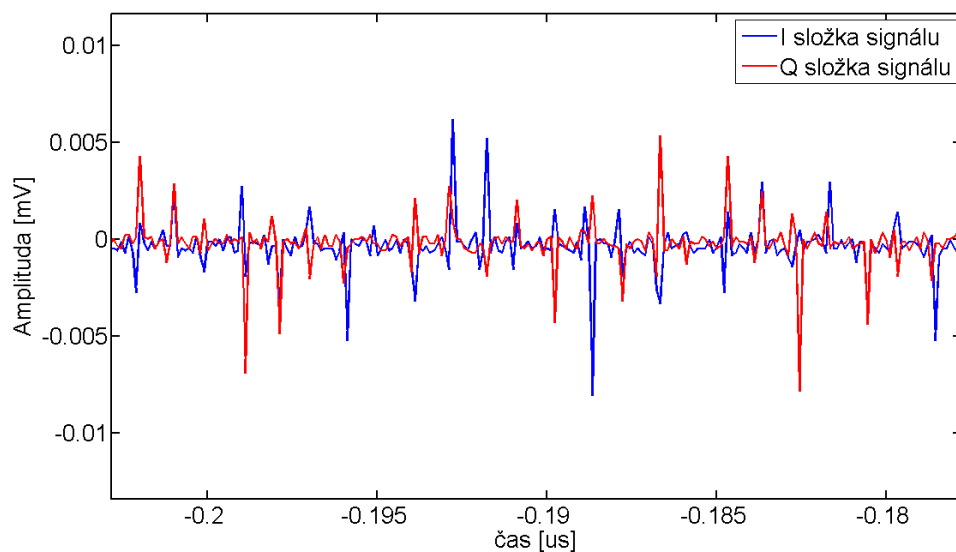
Poté byl signál rozdělen na samostatnou I a Q složku. Ty byly následně vyslány do vektorového generátoru, kde byly namodulovány na nosnou frekvenci 2,441 GHz a vysílány anténou Yagi, umístěnou ve výšce 1,48 m.



Obr. 61 – Spektrum přijímaného signálu anténní řadou pro RFID

Přijem signálu zajišťovala anténní řada pro RFID na frekvenci 2,45 GHz, ta byla umístěna ve výšce 1,53 m. Přes Wilkinsonův dělič výkonu byla anténa připojena na spektrální analyzátor FSL3 model .03. Zde byla umístěna odbočka do kvadrurního demodulátoru. K tomu byl také připojen signálový generátor, ve kterém byla generována referenční frekvence. Z kvadrurního demodulátoru byly posílány do osciloskopu I a Q složky, které byly následně zobrazeny a uloženy do souborů ve formátu CSV.

Z těchto souborů byla data převedena do programu Matlab, kde byla zpracována. Závěrem bylo vyhodnoceno zkreslení signálu a ovlivnění dat při průchodu volným prostorem.



Obr. 62 – Přijímaný signál

6.4 Simulace chování signálu při vysokých rychlostech pohybu přijímače

Analýza signálu při rychlém pohybu přijímače byla opět realizována pomocí simulace v programu Matlab. Byl vytvořen skript, ve kterém je použit vztah pro výpočet chování energie signálu v závislosti na vzdálenosti, frekvenci a výšce vysílací a přijímací antény. Vztah pro výpočet amplitudy signálu je:

$$E = E_1 * 2 * \left| \sin \left(\frac{2 * \pi * h_1 * h_2}{\lambda * D} \right) \right|, \quad (6.1)$$

kde:

E = energie signálu v dané vzdálenosti,

E_1 = energie vysílaného signálu,

h_1 = výška vysílací antény,

h_2 = výška přijímací antény,

D = vzdálenost,

λ = vlnová délka.

Tato rovnice vychází ze vztahu o rozdílu drah přímé a odražené vlny přijaté přijímací anténou při šíření signálů nad rovinou země:

$$\Delta S = \frac{2 \cdot h_1 \cdot h_2}{D}. \quad (6.2)$$

Té odpovídá fázový rozdíl:

$$\Delta \varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot D}. \quad (6.3)$$

Výsledný fázor intenzity elektrického pole tedy odpovídá rovnici:

$$E = E_1 \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot S_1}}{S_1} + E_1 \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot S_2}}{S_2} \cdot R \cdot e^{-j \cdot \Psi}, \quad (6.4)$$

kde:

S_1 = vzdálenost uražená přímou vlnou,

S_2 = vzdálenost uražená odraženou vlnou,

k = konstanta šíření,

$R \cdot e^{-j \cdot \Psi}$ = komplexní činitel odrazu od země,

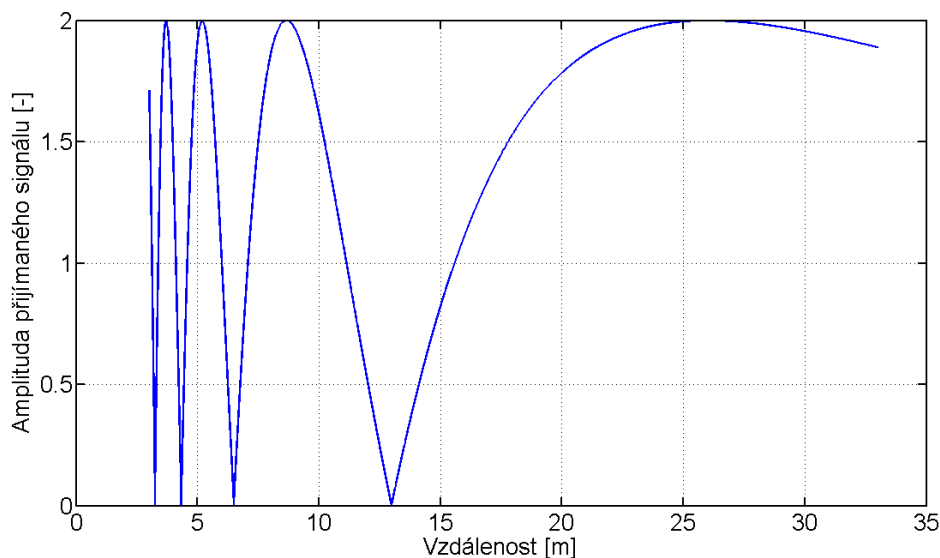
$\frac{e^{-j \cdot k \cdot S}}{S}$ = změna amplitudy a fáze při šíření kulové vlny.

Budeme-li uvažovat, že amplitudy obou přijatých vln jsou stejné, můžeme rovnici zjednodušit na tvar:

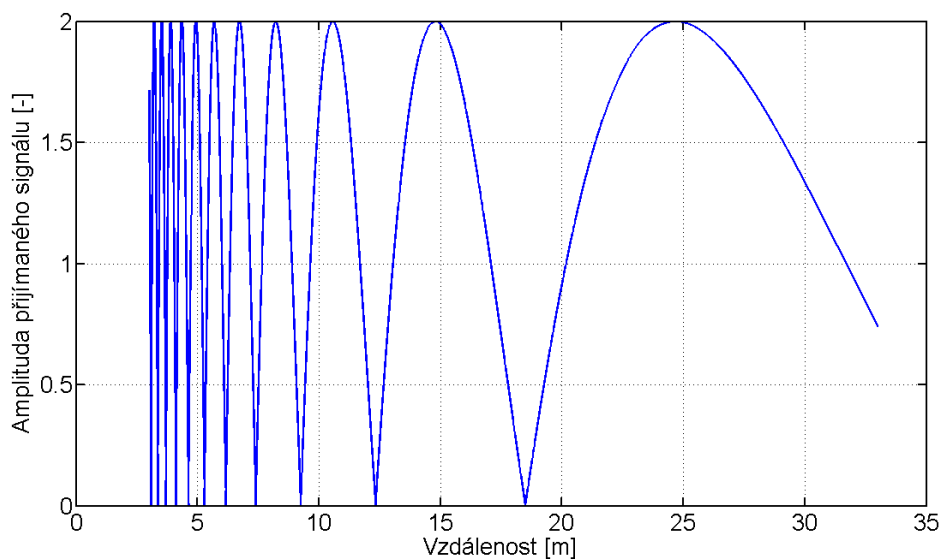
$$E = E_1 \cdot \left| 1 + e^{-j \cdot \Delta \varphi} \cdot R \cdot e^{-j \cdot \Psi} \right|. \quad (6.5)$$

Pokud vezmeme v úvahu nepatrné elevační úhly a vodivou zem, můžeme rovnici dále zjednodušit. A to tak, že za činitele odrazu R dosadíme hodnotu 1 a za Ψ dosadíme π . Tím nám vznikne výsledná rovnice (6.1).

Nejdříve byly simulovány průběhy na dvou frekvencích, které jsou používány technologií RFID, a to 860 MHz a 2,45 GHz. Výšky antén byly použity jako v předchozí simulaci, to je 1,48 m u vysílací antény a 1,53 m u přijímací antény. Vzájemné vzdálenosti byly stanoveny předpokládaným rozsahem vysílání signálu.



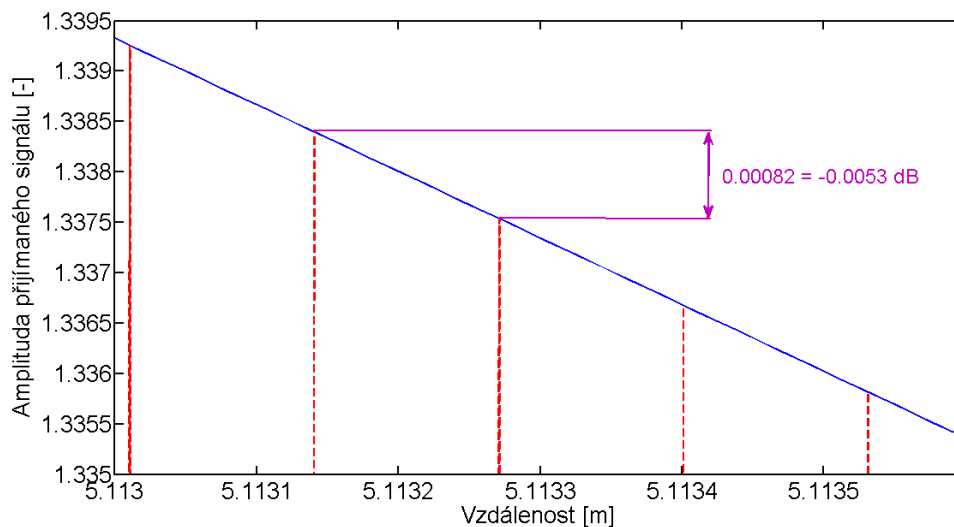
Obr. 63 – Propady úrovně signálu na frekvenci 860 MHz



Obr. 64 – Propady úrovně signálu na frekvenci 2,45 GHz

Při porovnání obou průběhů vidíme velké propady úrovně signálů. Na frekvenci 860 MHz mají propady při stejné vzdálenosti menší hustotu, což je dáno vlnovou délkou. Čím máme vyšší frekvenci, tím budou propady četnější a nejbližší maximum se bude nacházet ve větší vzdálenosti.

Na následujících dvou obrázcích byly porovnávány poklesy amplitud na dvou vysílaných bitech. Nejprve na dvou sousedních bitech a pak na dvou bitech se vzájemnou vzdáleností 100 bitů.

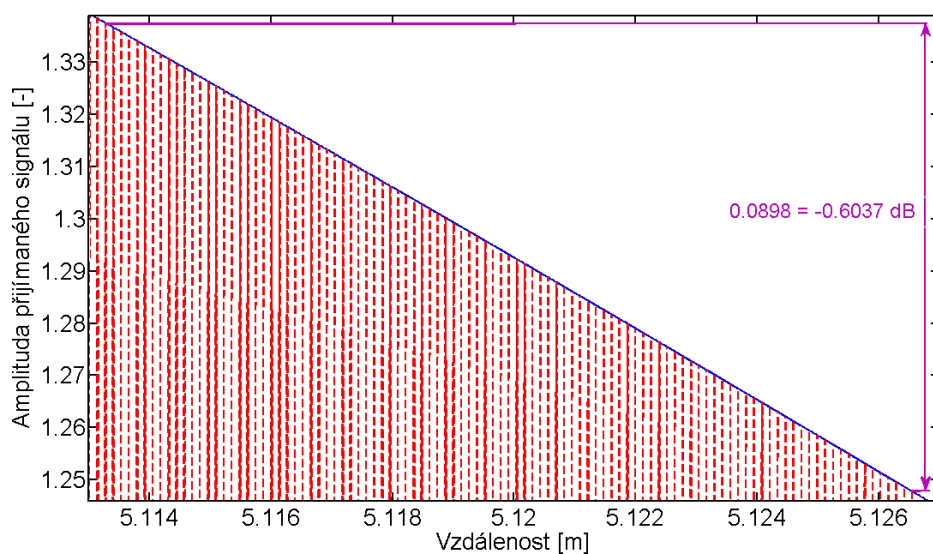


Obr. 65 – Pokles mezi sousedními bity

U případu dvou sousedních bitů je vidět, že rozdíl úrovně amplitud signálu je velice malý a pokles signálu zde probíhá velice pozvolna. V této situaci by mohlo uškodit, pokud by nastal rychlý únik signálu anebo pokud by se tag při jeho dotazování nalézal v úrovni propadu signálu brány.

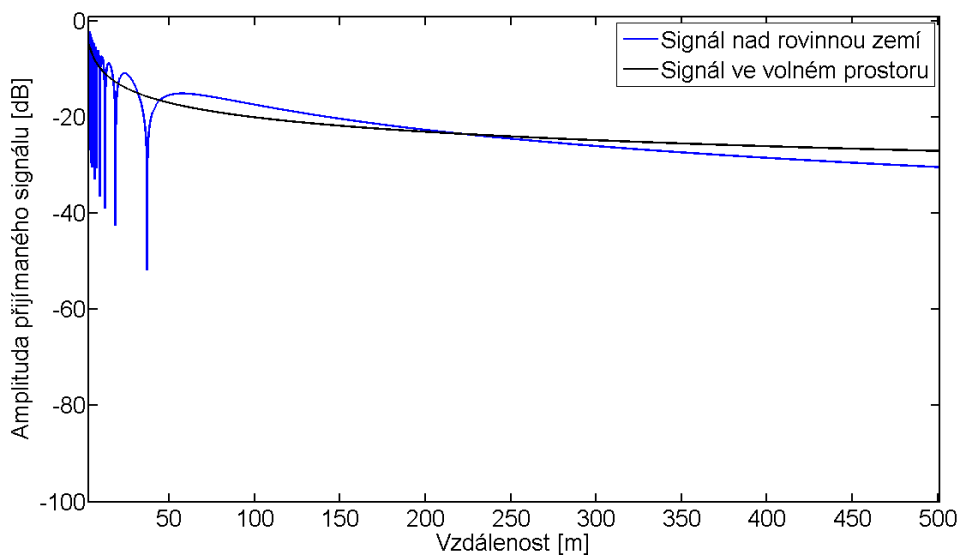
Pokud však budeme uvažovat rychlost pohybu 50 m/s (téměř 200 km/h), ve které se bude přijímač pohybovat okolo vysílače, dojde mezi sousedními bity k posunu mobilního prostředku o přibližně 0,1 mm vzhledem k vysílači. Z průběhu závislosti výkonu na vzájemné vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem vyplývá, že v absolutní hodnotě přijímaného výkonu nedojde ke zřetelným změnám. Ani změna fáze uvnitř jednotlivých bitů nepovede u jednoduchých modulací k potížím s demodulací.

Pokud se ale podíváme na rozdíl úrovně amplitud u dvou bitů, které jsou od sebe vzdáleny 100 bitů, je zde pokles již významnější a mohlo by se na první pohled zdát, že může vznikat chybovost. Avšak při takové vzdálenosti již bude působit normování amplitudy na vstupu přijímače, které se snaží tyto rozdíly kompenzovat.



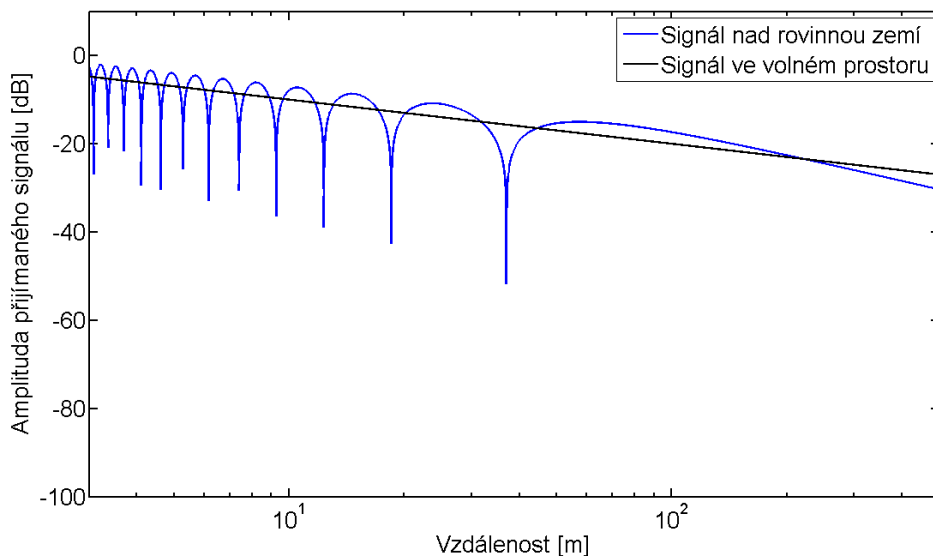
Obr. 66 – Pokles mezi dvěma bity se vzájemnou vzdáleností 100 bitů

Na následujícím obrázku již vidíme reálný průběh úrovně signálu, v závislosti na vzdálenosti, pokud bude udávaná vzdálenost v klasickém lineárním měřítku. Pro názornost byl zvolen interval vzdálenosti od vysílače do 500 m.



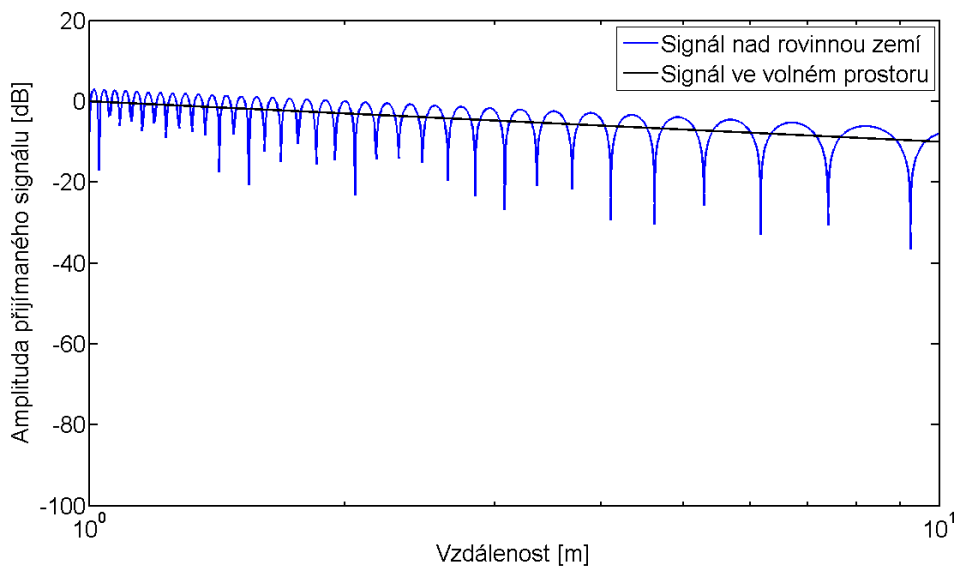
Obr. 67 – Propady signálu na vzdálenosti 3 m až 500 m s lineárním měřítkem

Na obrázku 68. je uveden průběh úrovně signálu s logaritmickým měřítkem na obou osách, které nám zajistí lepší přehlednost. Je zde vidět, jak zvětšující se vzdálenost mezi propady, tak i zprvu kolísající a později zvětšující se intenzita propadů. Za nejvzdálenějším maximem intenzita klesá s pomalu zvyšující se strmostí.



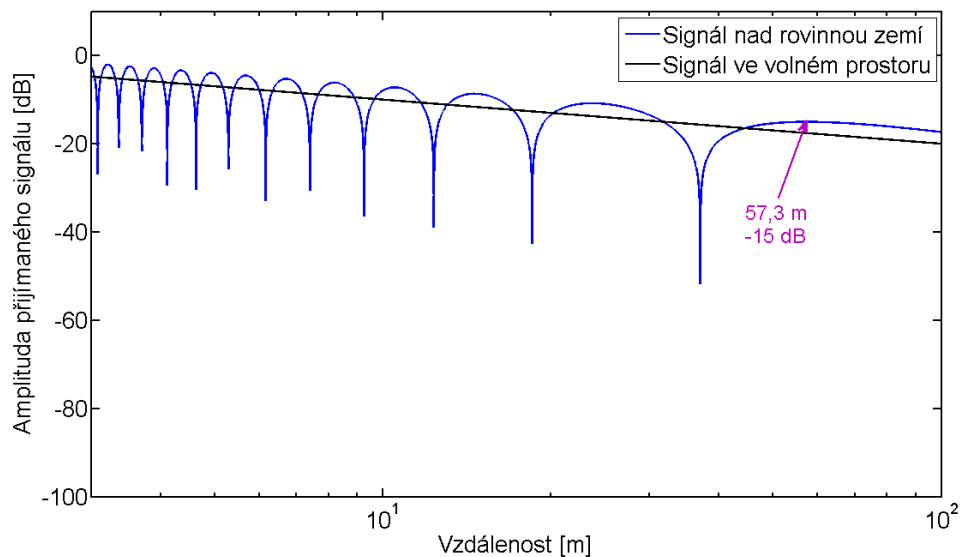
Obr. 68 – Propady signálu na vzdálenosti 3 m až 500 m s logaritmickým měřítkem

Mezi 1 m a 1,5 m od vysílače se propady pohybují přibližně kolem -7 dB, propady avšak závisí na koeficientu odrazu. Od 1,5 m do 2 m se tato hodnota zvedne na přibližných -15 dB. Až na výjimky se ale do vzdálenosti 5 m propady pohybují do -20 dB s mírným poklesem maxima.



Obr. 69 – Propady signálu ve vzdálenosti 1 m až 10 m

Obrázek 70. ukazuje pokles maxim do vzdálenosti 100 m. Závislost kopíruje pokles intenzity signálu při průchodu volným prostorem. Do vzdálenosti 10 m se pokles dostane jen výjimečně na hodnotu větší než -20 dB. Poslední maximum se nachází ve vzdálenosti 57,3 m a činí -15 dB, od této vzdálenosti už intenzita vykazuje pozvolna zrychlující se klesání.



Obr. 70 – Propady signálu ve vzdálenosti 3 m až 100 m

Vzdálenost [m]	Hloubka propadu [dB]
3,082	-26,80
3,364	-20,78
3,700	-21,61
4,109	-29,34
4,623	-30,38
5,282	-25,61
6,164	-32,90
7,396	-30,57
9,246	-36,45
12,33	-38,96
18,49	-42,49
36,99	-51,64

Tabulka 16 – Propady signálu ve vzdálenosti 3 m až 100 m

Závěr

V diplomové práci byl proveden základní popis technologie RFID. Byly probrány jednotlivé varianty komunikace, jejich využití a specifikace. Dále jsem se zaměřil na komunikaci na frekvenci 2,45 GHz a na faktory ovlivňující šíření signálu při komunikaci z a do mobilních prostředků na této frekvenci.

Na frekvenci 2,45 GHz je popsána datová struktura komunikace mezi bránou a tagem, typy komunikace a jednotlivé modulace, které se používají na této frekvenci. Je zde také popsána přesná struktura komunikace, která odpovídá čtvrté části normy ISO/IEC 18000.

Cílem diplomové práce bylo navrhnout měřicí sestavu pro měření signálu z rychle pohybujících se objektů, ty zde měly představovat mobilní prostředky. Součástí práce bylo také měření vyzařovacích a frekvenčních charakteristik antén. Vyzařovací charakteristiky byly měřeny v běžném externím prostředí, protože bezodrazová komora nebyla k dispozici. Jelikož má areál Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice dobré pokrytí signálem WiFi, který vysílá na frekvenci 2,4 GHz, a měření probíhala na frekvencích 2,4 GHz až 2,5 GHz, projevilo se částečně náhodné rušení. Frekvenční charakteristiky přenosu byly měřeny v laboratoři budovy Fakulty elektrotechniky a informatiky.

Změřené frekvenční charakteristiky byly importovány do simulačního programu v prostředí Matlab. Zde byl vytvořen jednoduchý signál modulovaný DBPSK modulací. Dále bylo pozorováno ovlivnění signálu při průchodu anténami a chování signálu při odrazu od zdí. Simulovány byly cihlová a betonová zeď o tloušťce 20 cm.

Poté bylo provedeno měření pro analýzu ovlivnění a zkreslení dat při přenosu volným prostorem. Zde byla v prostředí Matlab generována náhodná data, která byla posléze namodulována modulací DBPSK s výsledným signálem v komplexním tvaru. Z něj byly vytvořeny samostatné I a Q složky, které byly vyslány do vektorového generátoru. Přijímaný signál byl demodulován kvadraturním demodulátorem a zobrazen na osciloskopu, následně byl převeden do prostředí Matlab.

V poslední části byla provedena simulace chování signálu při vysokých rychlostech pohybu přijímače. V našem případě byla rychlost nastavena na 50 m/s. Byly pozorovány hluboké propady signálu v závislosti na vzdálenosti. Pro srovnání byly zvoleny frekvence 2,45 GHz a 860 MHz, obě používané pro komunikaci ve standardu RFID. Dále zde byly zkoumány poklesy amplitud na vysílaných bitech, a to ve variantách dvou sousedních bitů a bitů vzdálených sto bitů. Provedené analýzy ukazují, že ani velmi vysoké rychlosti vzájemného pohybu přijímače a vysílače nevedou k výraznému zhoršení parametrů signálu jak z pohledu změn amplitudy nebo fáze. Významné změny v parametrech signálu nenastávají ani ve výrazně odrazném prostředí.

Literatura

- [1] Identifikace založená na rádiové frekvenci – RFID. *ElektroPrůmysl.cz* [online]. ElektroTrh.cz, 18.6.2012 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/automatizace-rizeni-a-regulace/identifikace-zalozena-na-radiove-frekvenci-rfid-3>
- [2] Základní informace o technologii RFID. *RFID portal* [online]. [2006] [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: http://www.rfidportal.cz/index.php?page=rfid_obecne
- [3] EPC Information. *EPC - RFID INFO* [online]. © 2013 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.epc-rfid.info/>
- [4] RFID/EPCglobal. *GSI Czech Republic* [online]. © 2012 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.gsi.cz.org/rfid-epcglobal/>
- [5] Motorola MC9090-G RFID. *KODYS* [online]. © 2009 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.kodys.cz/produkty/ctecy-rfid/mobilni-ctecy/motorola-mc9090-g-rfid.html>
- [6] Bezpečnostní brány. *Cosmotron* [online]. [2008] [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.cosmotron.cz/produkty/rfid/bezpecnostni-brany>
- [7] L., Vojtěch. RFID - technologie pro internet věcí. *České vysoké učení technické, FEL* [online]. 12.2.2009 [cit. 2014-01-24]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2009020001>
- [8] RFID Selection Guide. *RFID ELEC Freaks* [online]. September 2010, č. 1, s. 24 [cit. 2014-01-24]. Dostupné z: http://elecfreaks.com/store/download/datasheet/NFC/rfid_guide.pdf
- [9] Identification Systems. *Pro-curo Software Ltd* [online]. [25 October 2012] [cit. 2014-01-24]. Dostupné z: <http://www.pro-curo.com/identification.php>
- [10] Pentagon Studies Human Microchip Implants. WEINBERGER, Sharon WEINBERGER. *WIRED* [online]. 8.1.2007 [cit. 2014-01-24]. Dostupné z: <http://www.wired.com/dangerroom/2007/08/washington-a-ne/>
- [11] MAREK, Josef a Ladislav ŠTĚPÁNEK. SIMULÁTOR R/O RFID TAGU PODLE ISO/IEC 18000-4. *Perner's Contacts* [online]. 2012, roč. 7, III, s. 13 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/27_2012/MarekJ.pdf
- [12] HUANG, Chia-hung. *An Overview of RFID Technology, Application, and Security/Privacy Threats and Solutions*. Fairfax, 2009. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.175.9165&rep=rep1&type=pdf> Masters in Computer Engineering. George Mason University. Vedoucí práce Dr. Jens-Peter Kaps.

- [13] TURNER, Chris. Backscatter modulation of Impedance Modulated RFID tags. *RF IP* [online]. 2003 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: http://www.rfip.eu/downloads/backscatter_tag_link_budget_and_modulation_at_reader_receiver.pdf
- [14] SCHEJBAL, Vladimír. ŠÍŘENÍ VLN V BLÍZKÉ A VZDÁLENÉ ZÓNĚ ANTÉNY. *webpark* [online]. 2009, č. 10, s. 21 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://hajny.webpark.cz/RADAR/Schejbal.pdf>
- [15] NĚMEC, Z. *Materiály k přednáškám z předmětu Mobilní komunikační systémy*. Univerzita Pardubice
- [16] BEZOUŠEK, P. *Materiály k přednáškám z předmětu Modulátory a demodulátory*. Univerzita Pardubice
- [17] BEZOUŠEK, P. *Materiály k přednáškám z předmětu Technika rádiových komunikačních systémů*. Univerzita Pardubice
- [18] PIŽL, Tomáš. *Anténní řada pro RFID* [online]. Pardubice, 2013 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/53956/3/PizlIT_AntenniRada_PB_2013.pdf. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce prof. Ing. Pavel Bezoušek, CSc.
- [19] KOČÁRNÍK, Jiří. *Měření a analýza přenosových charakteristik bezdrátových spojů v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz* [online]. Pardubice, 2011 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/41959/3/KocarnikJ_Mereni_a_analyza_ZN_2011.pdf. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
- [20] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln: pro plánování pozemních rádiových spojů*. 1. vydání. Praha: Ben – technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [21] ROHDE&SCHWARZ. *ROHDE&SCHWARZ* [online]. © 2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.rohde-schwarz.cz/cz/>
- [22] Agilent Technologies: Primer Laboratory Partner for a Better World. *Agilent Technologies* [online]. © 2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.agilent.com/cs/ContentServer?c=Page&pagename=Sapphire/Page/HomePage>
- [23] RTLS (Real-Time Locating system). In: *SVĚT V BEZPEČÍ: BEZPEČNOST ZE VŠECH STRAN* [online]. 2013 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://svetvbezpeci.cz/2013/06/rtls-real-time-locating-system/>

- [24] Technology Overview: What is RTLS? How does it work? Find out here. *Versus: Locating Advantages for Healthcare* [online]. © 2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.versustech.com/rtls-technology/>
- [25] Advanced RFID Measurements: Basic Theory to Protocol Conformance Test. *National Instrument* [online]. © 2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/6645/en/>
- [26] Design How-To: RFID Basics: Backscatter Radio Links and Link Budgets. In: *EE Times: Connecting the Global Electronics Community* [online]. 2007. vyd. © 2013 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1276306
- [27] What is RFID?. In: *RFIDIOM: Specialist RFID Consultancy Services* [online]. © 2009 - 2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.rfidiom.com/rfid-technology-introduction/>
- [28] HRON, Jan. Seminární práce: Dopplerův jev v akustice. *Gybugando la Física* [online]. 2008, s. 18 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: http://gybugandofisica.scienceontheweb.net/Materiales/Fyzika_sem_JanHron.pdf
- [29] Doppler Effect. *HyperPhysics* [online]. © 2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/dopp.html>
- [30] Dopplerův jev (efekt). REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/175-doppleruv-jev-efekt>
- [31] ADL5382 Datasheet: Analog Devices. *ALLDATASHEET.COM: Electronic Components Datasheet Search* [online]. © 2003 - 2014, s. 28 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/226739/AD/ADL5382.html>
- [32] SCHEJBAL, Vladimír, Zdeněk NEMEC, Dušan CERMAK a Pavel BEZOUSEK. Numerical simulation of uwb radar propagation effects. *2006 First European Conference on Antennas and Propagation* [online]. IEEE, 2006, s. 1-6 [cit. 2014-08-20]. DOI: 10.1109/EUCAP.2006.4584737. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4584737>
- [33] SMĚROVÁ ANTÉNA: BD 2G4. *RCD Radiokomunikace* [online]. © 1993-2012, s. 1 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.rcd.cz/user-files/tinymce/files/bd2g4-cz.pdf>
- [34]]RFID Tag Maximum Read Distance. *SkyRFID Inc.* [online]. ©2007 - 2014 [cit. 2014-08-21]. Dostupné z: http://www.skyrfid.com/RFID_Tag_Read_Ranges.php

Příloha A – Zdrojový kód souboru pro převod dat do polárních souřadnic

```
%% převod dat do polárních souřadnic a jejich následné  
vykreslení  
load('m245.mat')      % Načtení naměřených hodnot  
theta = 0:.0127:2*pi; % Přepočítání kroků na úhel  
minim = min(variable); % Určení minima  
maxim = -1*minim;     % Určení maxima  
variable2 = maxim+[variable]; % Převod z útlumu na zisk  
figure(1);  
polar(theta,variable2); % Vykreslení v polárních  
souřadnicích  
title('2,45 GHz horizontální polarizace'); % Název grafu
```