

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Fyzikální principy přenosových médií v oblasti  
počítačových sítí

Martin Kořínek

Bakalářská práce  
2014

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Kořínek**  
Osobní číslo: **I11103**  
Studijní program: **B2646 Informační technologie**  
Studijní obor: **Informační technologie**  
Název tématu: **Fyzikální principy přenosových médií v oblasti počítačových sítí**  
Zadávající katedra: **Katedra informačních technologií**

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

Práce popíše základní fyzikální principy přenosových médií. V teoretické části využije fyzikální popis přenosu dat pomocí měděných vodičů a optických vláken. V této části budou využity zásadní fyzikální vztahy a jejich odvození pro podrobný popis a pochopení dané problematiky. Na základě podrobného popisu fyzikálních principů budou vybrány zásadní parametry, které je nutno měřit na metalické kabeláži a optických vláknech. V praktické části práce bude provedeno testování několika vybraných měřicích přístrojů pro měření metalické a optické kabeláže.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

**ELLIOTT, Barry a Prasad BAGAL. Fiber optic cabling: the essential guide to Oracle automatic storage management. 2nd ed. Oxford: Newnes, 2002, 318 s. ISBN 07-506-5013-3**

**BARNETT, David, David GROTH, Jim MCBEE a David GROTH. Cabling: the complete guide to network wiring. 3rd ed. San Francisco: Sybex, c2004, xxiv, 693 p., [16] p. of plates. ISBN 07-821-4331-8**

**GERSHENFELD, Neil, David GROTH, Jim MCBEE a David GROTH. The physics of information technology: the complete guide to network wiring. 1st pbk. ed. Cambridge: Cambridge University Press, c2004, xxiv, 693 p., [16] p. of plates. ISBN 978-052-1210-225**

Vedoucí bakalářské práce:

**Mgr. Josef Horálek**

Katedra softwarových technologií

Datum zadání bakalářské práce:

**20. prosince 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce:

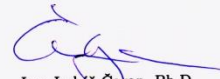
**9. května 2014**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Lukáš Čegan, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2014

## **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 22. 4. 2014

Martin Kořínek

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé práce Mgr. Josefu Horálkovi Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky při vytváření této práce. Dále děkuji Ing. Soně Neradové za poskytnutí materiálů, z nichž jsem při tvorbě této práce čerpal. Rovněž děkuji Ing. Jaroslavu Mecovi a společnosti ČD – Telematika a.s. za pomoc při vypracování praktické části. V neposlední řadě děkuji také své rodině za podporu nejen během studia.

## **Anotace**

Práce se zabývá základními fyzikálními principy přenosových médií. V teoretické části jsou popsány jednotlivé typy přenosových médií. Následuje popis nejčastěji používaných metod kódování signálu. Poslední kapitola teoretické části se zabývá vlastnostmi jednotlivých přenosových médií. Tyto vlastnosti jsou popsány zejména z pohledu informatiky. V praktické části jsou porovnány 2 měřicí přístroje, které slouží k testování přenosových médií. Na závěr je provedeno shrnutí, které udává zejména možnosti použití obou přístrojů.

## **Klíčová slova**

bezdrátové médium, elektromagnetismus, koaxiální kabel, kódování signálu, kroucená dvoulinka, optické vlákno, počítačová síť, přenosové médium, strukturovaná kabeláž, testovací přístroj

## **Title**

Physical principles of transmission media in computer networks.

## **Annotation**

This bachelor's thesis deals with basic physical principles of transmission media. In the theoretical part are described different types of transmission media. The following is a description of the most commonly used methods of signal encoding. The last chapter of the theoretical part deals with the characteristics of the individual transmission media. These characteristics are described mainly in view of informatics. In the practical part are compared two measuring devices that are used to test the transmission media. Finally is made a summary, which shows mainly the possibility of using both of the devices.

## **Keywords**

Wireless medium, electromagnetism, coaxial cable, signal encoding, twisted pair, optical fiber, computer network, transmission medium, structured cabling, test device

# Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Přenosová média</b> .....	<b>11</b>
1.1 Rozdělení přenosových médií .....	11
1.1.1 Drátová média .....	12
1.1.2 Bezdrátová média .....	19
<b>2 Kódování signálu</b> .....	<b>25</b>
2.1 Druhy signálu .....	25
2.2 Metody kódování signálu .....	25
<b>3 Základní vlastnosti přenosových médií</b> .....	<b>28</b>
3.1 Kroucená dvoulinka.....	28
3.2 Koaxiální kabel.....	32
3.3 Optické vlákno.....	33
3.3.1 Disperze .....	34
3.3.2 Nelineární jevy .....	35
3.3.3 Ztráty v optických vláknech .....	36
<b>4 Praktická část</b> .....	<b>39</b>
4.1 LANTEK Category 6 tester .....	39
4.2 aTen ACT6000 .....	48
4.3 Vyhodnocení.....	51
<b>Závěr</b> .....	<b>52</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>53</b>

## Seznam zkratek

ACR	Attenuation to Crosstalk Ratio
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ANSI	American National Standards Institute
DH	Display Handset
DSL	Digital Subscriber Line
EIA	Electronic Industries Association
ELFEXT	Equal Level Far-End Crosstalk
EMI	Electromagnetic interference
FEXT	Far-End Crosstalk
HDSL	High-bit-rate Digital Subscriber Line
IBM	International Business Machines Corporation
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
LAN	Local Area Network
LED	Light-Emitting Diode
MLT-3	Multi-Level Transmit 3
NA	Numerická apertura
NEXT	Near-End Crosstalk
NRZ	Non Return to Zero
NRZI	Non Return to Zero Inverted
NVP	Nominal Velocity of Propagation
PSACR	Power Sum Attenuation to Crosstalk Ratio
PSD	Power Spectral Density
PSELFEXT	Power Sum Equal Level Far-End Crosstalk
PSNEXT	Power Sum Near-End Crosstalk
RH	Remote Handset
SDSL	Symmetric Digital Subscriber Line
SHG	Second Harmonic Generation
STP	Shielded Twisted Pair
TDR	Time Domain Reflectometry
TIA	Telecommunications Industry Association
USB	Universal Serial Bus
UTP	Unshielded Twisted Pair
VDSL	Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line
WAN	Wide Area Network



## Seznam obrázků

Obr. 1.1 – Princip optického vlákna	14
Obr. 1.2 – Vlnová délka	15
Obr. 2.1 – Kódování Manchester	26
Obr. 2.2 – Kódování MLT-3	27
Obr. 4.1 – LANTEK Category 6 tester	39
Obr. 4.2 – Kalibrace	41
Obr. 4.3 – Ukázka naměřených hodnot	42
Obr. 4.4 – Výsledek Wire Map	43
Obr. 4.5 – Výsledek Return Loss (text)	44
Obr. 4.6 – Výsledek Return Loss (Graf)	45
Obr. 4.7 – Výsledek Power Sum ELFEXT (Text)	46
Obr. 4.8 – Výsledek Power Sum ELFEXT (Graf)	47
Obr. 4.9 – aTen ACT6000	48
Obr. 4.10 – Automatic Copper Pair Qualification	48
Obr. 4.11 – TDR fault locator	49
Obr. 4.12 – Spectral noise	49
Obr. 4.13 – PSD	50

## Seznam tabulek

Tab. 1.1 – Kroucená dvoulinka (kategorie)	13
Tab. 2.1 – Kódování metodou Manchester	25
Tab. 2.2 – Tabulka kódů pro kódování 4B/5B	26
Tab. 4.1 – Přehled parametrů u přístroje LANTEK Category 6 tester	40
Tab. 4.2 – Porovnání přístrojů	51

## Úvod

Život bez počítačových sítí si v současné době téměř nelze představit. Veškerá elektronická komunikace probíhá na základě přenosu signálu pomocí těchto sítí. Tato práce se zabývá tzv. přenosovými médii, která signál přenášejí mezi jednotlivými síťovými uzly, a jejím hlavním cílem je popis přenosu dat pomocí přenosových médií z pohledu informatiky. Tento cíl zahrnuje popis kódování signálu a vlastností jednotlivých přenosových médií. Dalším cílem práce je popis několika měřících přístrojů, které slouží k testování strukturované kabeláže. Práce je rozdělena do dvou částí - teoretické a praktické.

Teoretická část nejprve popisuje přenosová média obecně a poté se zaměřuje na jejich jednotlivé typy. Rozděluje je podle typu přenosu signálu na drátová a bezdrátová. Tyto typy jsou následně dále rozděleny. Je zde uveden princip funkce, použití a stavba těchto médií. Další část se zabývá kódováním signálu. Jsou zde zmíněny nejpoužívanější metody kódování. Popis některých metod obsahuje i názornou ukázkou. Poslední pasáž teoretické části se zaměřuje na vlastnosti a parametry jednotlivých typů přenosových médií. Ze souhrnu všech parametrů jsou vytknuty dva a to přenosová a modulační rychlost. Tyto vlastnosti jsou společné pro všechna přenosová média.

V praktické části jsou předešlé poznatky použity při testování měřících přístrojů, které slouží k měření vlastností síťové kabeláže. Jednotlivé přístroje jsou porovnány z hlediska možných měřících parametrů a z hlediska rozsahu hodnot těchto parametrů. Další porovnání se týká zpracování výsledků měření.

# 1 Přenosová média

Přenosové médium obecně značí látku, která šíří energetické vlny. Příkladem takovéto látky může být vzduch, který šíří zvukové vlny. V případě elektromagnetických vln může být přenosovým médiem dokonce vakuum.

V případě této práce je přenosovým médiem označováno technické zařízení, které umožňuje šíření a ovlivňování vln, zejména elektromagnetického záření. Příkladem tohoto typu přenosového média je optické vlákno nebo koaxiální kabel. Dále se tato práce bude zabývat pouze tímto typem přenosových médií, tedy typem, který je využíván v počítačových sítích. Více o přenosových médiích se lze dočíst v [13, 14, 19, 20].

## 1.1 Rozdělení přenosových médií

Přenosová média rozdělujeme na drátová a bezdrátová. Toto rozdělení vychází z typu přenosu signálu. Drátová média poskytují fyzicky omezené šíření signálu. Bezdrátová média šíření signálu neomezují.

Drátová média jsou dále rozdělena na vodivá a nevodivá. Jak již z názvu vypovídá, vodivá média obsahují vodič, kterým prochází elektromagnetické vlny. Příkladem vodivých médií je kroucená dvoulinka. Nevodivá média vodič neobsahují, nicméně jimi elektromagnetické vlny také procházejí. Nevodivým médiem je např. optické vlákno.

Bezdrátová média využívají k přenosu signálu odlišný princip, než média drátová. Mají své výhody oproti drátovým médiím. Zejména odpadá nutnost fyzického propojení jednotlivých síťových prvků pomocí kabelů. Nevýhodou je možnost rušení signálu vnějšími interferencemi. Příkladem bezdrátových médií může být infračervený přenos, přenos pomocí rádiových vln a přenos pomocí mikrovln.

- Drátová média
  - Vodivá
    - Kroucená dvoulinka
    - Koaxiální kabel
  - Nevodivá
    - Optické vlákno
- Bezdrátová média
  - Infračervená média
  - Rádiová média
  - Mikrovlnná média

### 1.1.1 Drátová média

#### Historie

První počítačové systémy, zejména sálové počítače, byly propojeny pomocí nestrukturovaných kabelů. Tyto kabely nebyly nijak standardizované a umožňovaly spolupráci pouze se specifickými zařízeními. Potřeba standardizace se projevila v 80. letech 20. století, když se objevily první lokální sítě (LAN). Tyto sítě byly opět limitovány pouze některými typy síťových zařízení, se kterými byly kabely kompatibilní. Vzhledem k rozmanitosti zařízení bylo třeba používat různé typy síťových kabelů. Proto nové sítě LAN byly založeny na systému nestíněné kroucené dvoulinky, tedy na telefonních kabelech. V této době vznikaly standardy v rámci společností. První obecný standard byl vydán v roce 1991 společnostmi American National Standards Institute (ANSI)<sup>1</sup>, Electronic Industries Association (EIA)<sup>2</sup>, a Telecommunications Industry Association (TIA)<sup>3</sup> pod názvem ANSI/EIA/TIA-568-1991. Tento standard byl několikrát upraven, zejména z důvodu zvyšování nároků na rychlost komunikace.

#### Typy drátových médií

Drátová média se rozdělují na 4 hlavní typy: nestíněná kroucená dvoulinka (UTP), stíněná kroucená dvoulinka (STP), koaxiální kabel a optické vlákno. Existují i další typy, jako například hybridní kroucená dvoulinka (kombinace stíněné a nestíněné dvoulinky).

Dále jsou kabely rozděleny podle použití na páteřní a horizontální. Páteřní nebo také vertikální kabely propojují síťová zařízení jako servery, switche nebo routery a také slouží k propojení jednotlivých místností. Naproti tomu horizontální kabely souží k propojení jednotlivých počítačů do síťových zástrček umístěných ve zdech. Páteřní kabely jsou dnes zastoupeny zejména optickými vlákny. Pro horizontální kabely se nejvíce používají nestíněné kroucené dvoulinky. Více o drátových médiích se lze dočíst v [23].

---

<sup>1</sup> ANSI je americká standardizační organizace, která vytváří standardy v USA.

<sup>2</sup> EIA je americká standardizační organizace, která v USA vydává standardy pro elektrotechnický průmysl.

<sup>3</sup> TIA je americká standardizační organizace, která vydává globální standardy pro oblast informačních a komunikačních technologií.

## Kabely založené na měděných vodičích

Existuje celá řada kabelů založených na měděných vodičích. Tyto kabely ovšem nebývají vhodné pro datovou komunikaci. Častěji se používají pro přenos audia, domovní zvonky nebo pro ovládání elektrických zařízení. Kabely užívané pro datovou komunikaci musí splňovat nároky na vysokou přenosovou rychlost a propustnost. Kabely, které tyto nároky splňují, jsou používány pro horizontální rozvody.

## Kroucená dvoulinka

Tento typ kabelu s impedancí  $100 \Omega \pm 15\%$  je zejména používán v horizontálních rozvodech. Skládá se ze 4 párů kroucených měděných drátků a pláště, který tyto páry obaluje. Hlasová komunikace může využívat až 100 kroucených párů. Jednotlivé páry jsou od sebe barevně odlišeny k zjednodušení identifikace. Drátky v páru jsou od sebe také odlišeny. Jeden je pokryt souvislou barvou, druhý střídavě danou barvou a bílou. Čtyř párový kabel je složen z drátků těchto barev: modrá, oranžová, zelená, hnědá. Důvodem kroucení jednotlivých párů je zlepšení elektrických vlastností kabelu. Zejména se omezuje možnost přeslechu a snižuje se schopnost ovlivnit kabel okolím. Princip kroucení je založen na elektromagnetické indukci. Dva souběžné vodiče při průchodu střídavého proudu vyzařují elektromagnetické vlny. Právě pravidelné kroucení těchto vodičů snižuje vyzařované vyzařování na takovou míru, která neovlivňuje jiná elektrická zařízení ani jiné přenosové cesty. Kroucenou dvoulinku rozdělujeme na 2 druhy a to na stíněnou a nestíněnou. Stíněná kroucená dvoulinka (STP) byla vyvinuta společností IBM k podpoře aplikací jako např. Token Ring. STP má kroucené vodiče obaleny měděným stínítkem. Toto stínítko napomáhá vyrušovat vnější interference. STP se vyrábí ve dvou provedeních a to s jednotlivými páry obalenými zvlášť nebo se všemi páry obalenými dohromady. Nevýhodou stíněné dvoulinky je větší tloušťka kabelu a také vyšší pořizovací cena. Více o kroucené dvoulince se lze dočíst v [16].

Kroucená dvoulinka se vyrábí v několika kategoriích. Tyto kategorie zachycuje následující tabulka.

Tab. 1.1 – Kroucená dvoulinka (kategorie). Zdroj [3]

Kategorie	Vlastnosti	Použití
1	použití do 100 kHz, nízká rychlost přenosu	analogový zvuk, domovní zvonky, alarm
2	použití do 4 MHz	digitální zvuk, Apple LocalTalk, ISDN
3	propustnost do 16 MHz, útlum 13,1 dB na 100 m	analogový a digitální zvuk, 10Base-T Ethernet, ISDN, DSL
4	frekvence do 20 MHz, dnes se již nepoužívá	Ethernet, 16Mb/s Token Ring
5	propustnost do 100 MHz, útlum 8,2 dB na 100 m dnes nejpoužívanější kategorie	Fast Ethernet, Gigabit Ethernet
5e	vylepšená verze kategorie 5	stejně jako předchozí kat.
6	propustnost až do 250 MHz	stejně jako kategorie 5
7	stále ve vývoji, propustnost až 600 MHz	páteří síť

## Koaxiální kabel

Koaxiální kabel byl nejvíce využíván v počátcích místních počítačových sítí. Byl vybrán původními designéry Ethernetu jako „ether“ pro dobré stínění, vysokou propustnost, nízký útlum a snadnost instalace. Koaxiální kabel se skládá z jádra, které je buď celistvé, nebo složené z vláken. Impedance tohoto typu kabelu se pohybuje v hodnotách 50, 75 nebo 92  $\Omega$ . Kromě jádra se koaxiální kabel skládá ještě z vnitřní izolace, stínítka (měděné mřížky) a vnější izolace. Vnější izolace je také používána jako uzemnění. V dnešní době je koaxiální kabel využíván zejména k přenosu videa. Pro přenos dat se již nehodí.

## Důvody používání měděných vodičů

Kabely založené na měděných vodičích jsou stále ve vývoji a podporují i nejnovější technologie, pro které původně nebyly určeny. Takovouto technologií je například Gigabit Ethernet. Důvodů pro používání těchto kabelů, zejména UTP je několik. Jsou to zejména nízká cena a snadná montáž.

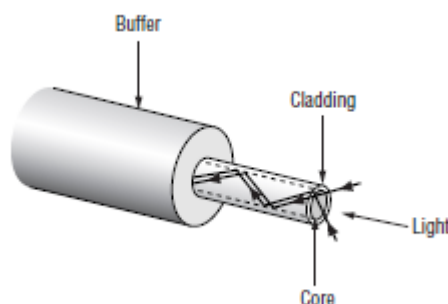
## Kabely založené na optických vláknech

Optická vlákna jsou síťová přenosová média, která pro přenos dat využívají světelné impulzy na rozdíl od měděných vodičů, kde se využívá elektrický proud. V současné době jsou tyto kabely velice populární a používají se zejména v páteřních síťových rozvodech. Další informace lze nalézt v [24].

## Princip

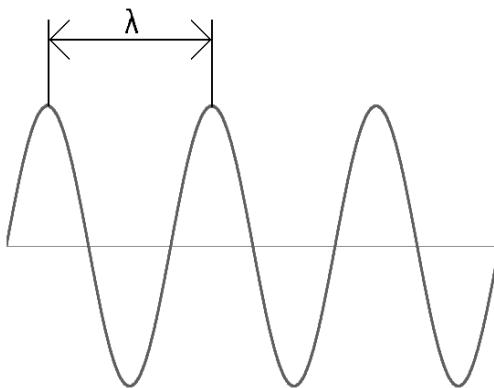
Jednotlivé bity jsou generovány pomocí světelného zdroje, kterým bývá nejčastěji LED-dioda. Jedničky jsou vyjadřovány světlem, nuly tmou. Světelné impulzy se pohybují optickým vláknem z jednoho konce na druhý. Světlo se ovšem nešíří přímočaře. Odráží se od vnitřní vrstvy vlákna, jak je znázorněno na obr. 1. 1. Čím více se světelný paprsek odráží od vnitřku vlákna, tím je pravděpodobnější ztráta signálu a jeho útlum. Další možnost ztráty signálu může nastat v konektorech. Proto každý konektor musí být dokonale instalován.

Protože se světlo nemůže šířit oběma směry současně, používají se pro oboustrannou komunikaci 2 vlákna. Jedno pro odesílající zařízení a druhé pro přijímající.



Obr. 1.1 – Princip optického vlákna. Zdroj [3]

Optická vlákna jsou typicky optimalizována pro určitou vlnovou délku světla ( $\lambda$ ). Ta vyjadřuje (v nanometrech) vzdálenost mezi vrcholy světelných vln, jak ukazuje obr. 1. 2. Optická vlákna typicky pracují s vlnovou délkou mezi 800 a 1500 nm. Nejvíce optických vláken pracuje na vlnové délce 700 až 1100 nm, tedy v rozsahu infračerveného světla.



**Obr. 1.2 – Vlnová délka**

V okamžiku dosažení koncového bodu vlákna světelným pulzem je tento pulz zachycen senzorem, který jej transformuje na elektrický signál.

### **Výhody optických vláken oproti jiným přenosovým médiím**

- Imunita vůči elektromagnetickému rušení
- Vyšší přenosové rychlosti
- Delší maximální vzdálenosti mezi síťovými prvky
- Lepší bezpečnost

### **Imunita vůči elektromagnetickému rušení**

Všechny síťové kabely založené na měděných vodičích postihuje jeden závažný problém a tím je elektromagnetické rušení (EMI). Všechny elektrické kabely generují okolo své osy magnetické pole. Pokud tímto polem prochází vodič, vzniká v tomto vodiči elektrický proud. Pokud jsou tedy 2 kabely umístěny blízko u sebe, EMI způsobuje přeslech. Tento jev je způsobován i přítomností jiných elektrických zařízení v blízkosti síťových kabelů. Optická vlákna tímto problémem netrpí, protože namísto elektrického proudu používají světelné signály, které elektromagnetismem nejsou ovlivňovány.

### **Vyšší přenosové rychlosti**

Protože světlo je imunní vůči EMI a šíří se téměř okamžitě do cíle, je možné používat vyšší přenosové rychlosti. Tyto rychlosti se pohybují v řádu gigabitů za sekundu.

## **Delší maximální vzdálenost mezi síťovými prvky**

Protože světlo netrpí degradací signálu s narůstající vzdáleností, je možné používat optická vlákna o délce až 70 km, na rozdíl od kroucené dvoulinky, která může mít maximální délku okolo 90 m. Tímto u optických vláken odpadají náklady na signál zesilující opakováče.

## **Lepší bezpečnost**

Měděné kabely jsou náchylné k odposlechu signálu pomocí zařízení zvaných tap (zkratka z wiretap). Toto zařízení narušuje vnější vrstvu kabelu a dotýká se vnitřních vodičů. Tím je signál přerušen a poslán na jiné umístění. Stejná zařízení, ale pracující na elektromagnetickém principu kabel nenarušují, ale využívají jeho elektromagnetického pole ke zkopírování signálu a jeho následnému zesílení a odeslání do jiné lokace. Optická vlákna jsou proti těmto technikám odposlechu chráněna 2 způsoby. Již princip, na kterém optická vlákna pracují, tedy přenos signálu pomocí světla a nikoliv pomocí elektromagnetického pole, vylučuje odposlech. Druhý způsob ochrany znemožňuje odposlech pomocí narušení kabelu. Pokud je kabel narušen, světelný signál je blokován nešíří se dál.

## **Nevýhody optických vláken**

- Vyšší náklady
- Obtížná instalace

### **Vyšší náklady**

Problém vyšších nákladů nespočívá ve výrobní ceně optických vláken ani ve výrobní ceně konektorů. Ta se v současné době téměř shoduje s cenou kabelů založených na měděných vodičích. Problém nastává u zařízení, která podporují práci s optickými vlákny. Tato zařízení bývají několikrát dražší než zařízení pracující například s UTP. Právě drahá síťová zařízení udržují cenu optických vláken vyšší a znemožňují jejich masové rozšíření.

### **Obtížná instalace**

U kabelů využívající měděné vodiče nemusí být konektory připojeny až tak precizně jako u optických vláken. U nich rozhodují o funkčnosti či nefunkčnosti kabelu jen malé rozdíly. Další nevýhodou při montáži optických vláken je jádro. To je vytvořeno ze skla nebo z plastu. Při řezání vlákna vznikají v místě řezu drobné střepy, které rozptylují světelný signál a zabraňují jeho správnému šíření k přijímajícímu konektoru. Proto se uříznutý konec vlákna musí vyleštit. To opět ztěžuje instalaci a navyšuje náklady.

### **Stavba optických vláken**

Typický kabel založený na optickém vláknu se skládá z několika komponent. Jsou to optické vlákno, buffer, pevný člen, ochrana před mechanickým poškozením a vnější plášť.



## **Optické vlákno**

Optické vlákno je základní stavební kámen těchto kabelů a zajišťuje přenos světelného signálu. Typicky se skládá z 3 vrstev a to z jádra, obkladu a povlaku. Jádro je nejčastěji tvořeno sklem nebo plastem. Použité materiály se liší svým indexem lomu a ovlivňují kvalitu a rychlost přenosu signálu. Obklad zabezpečuje prvotní ochranu pro jádro. Jeho další funkcí je odraz světelného paprsku, který je umožněn nižším indexem lomu. Povlak se nepodílí na přenosu signálu. Slouží pro ochranu jádra a povlaku před fyzickým poškozením.

## **Buffer**

Buffer slouží k ochraně optického vlákna uvnitř kabelu před projevy vnějšího prostředí. Používá se na těsný nebo trubičkový. Těsný buffer je použit pro každé vlákno zvlášť a je vhodný zejména pro vnitřní použití. Trubičkový buffer, jak již z názvu napovídá je trubička s průměrem okolo 3 mm. Uvnitř může být umístěno jedno nebo více vláken. Trubička může být naplněna ochrannou (např. voděodolnou) látkou. Proto je vhodné používat tento typ bufferu ve venkovních prostorech.

## **Pevný člen**

Pevný člen slouží zejména k posílení odolnosti kabelu v tahu. Kabely s těsným bufferem jako pevný člen využívají aramidová vlákna a zejména kevlar. Pro trubičkový buffer se využívá laminát nebo ocelový drát.

## **Ochrana před mechanickým poškozením**

Tato ochrana se využívá u kabelů použitých venku, popřípadě u vnitřních kabelů, které jsou mechanicky namáhány. Je umístěna pod vnějším pláštěm a skládá se z velice tenké (asi 0,015 mm) vrstvy oceli. Nevýhodou této ochrany je nutnost uzemnění na obou koncích kabelu z důvodu ochrany před zásahem elektrickým proudem.

## **Vnější plášť**

Vnější plášť slouží k ochraně všech vnitřních komponent kabelu před prostředím. Často je vyroben z odolného plastového materiálu. Vyrábí se v různých barevných variacích pro přehlednost jednotlivých kabelů. Při vnitřním použití kabelů musí splňovat nároky na nehořlavost.

## **Typy optických vláken**

Optické kabely se liší zejména v druhu použitého vlákna. Z tohoto pohledu jsou rozděleny na jednovidová a mnohovidová. Vid vyjadřuje cestu světelného paprsku skrz vlákno.

## **Jednovidová vlákna**

Jednovidová vlákna jsou tenčí než vlákna mnohovidová. Umožňují přenos signálu na větší vzdálenosti. Zdrojem světla pro tento typ vláken proto musí být intenzivní laser. Využívají se zejména pro páteřní síťové rozvody nebo pro přenos signálu na velmi velké vzdálenosti.

## **Mnohovidová vlákna**

Mnohovidová vlákna umožňují přenos i méně intenzivnímu světlu, které je obvykle vyzařováno LED diodou. Oproti předchozímu typu vláken je jejich instalace jednodušší z důvodu jejich většího průměru. Vzdálenost a propustnost jsou více omezeny než u jednovidových vláken. Tato vlákna se využívají zejména ve vnitřních LAN sítích.

Druhé rozdělení optických kabelů je podle počtu jednotlivých optických vláken uvnitř kabelu. Od tohoto počtu se také odvíjí jejich použití. Jsou rozděleny na simplexové, duplexové a vícevláknové.

Simplexové kabely obsahují pouze jedno vlákno.

Duplexové kabely obsahují dvě vlákna. Na obou stranách kabelu je umístěno právě jedno. To umožňuje současnou oboustrannou komunikaci. Proto jsou tyto kabely velmi využívány v páteřních rozvodech.

Vícevláknové kabely obsahují více než 2 optická vlákna. Často se používají sudé počty vláken a to opět z důvodu současné oboustranné komunikace.

### **1.1.2 Bezdrátová média**

Bezdrátová jinak také neomezená média k přenosu signálu nevyžadují žádný kabel ani vlákno. Využívají například rádiové vlny nebo mikrovlny. Dnes se používají zejména v domácích LAN sítích nebo tam, kde je obtížné použít kabel. V této části jsou zmíněny 3 typy bezdrátových médií.

- Média založená na infračerveném přenosu
- Radiofrekvenční systémy
- Mikrovlnná komunikace

#### **Bezdrátová média založená na infračerveném přenosu**

Princip těchto médií je založen na infračerveném záření, které je součástí elektromagnetického spektra. Má větší energii a kratší vlnovou délku než viditelné světlo. Zdrojem tohoto záření je vysílač, nejčastěji laserová dioda. Od klasického laseru se tato dioda liší především svou jednoduchostí, malými rozměry a nižším výkonem. Vzhledem k menšímu výkonu se signál šíří pouze na kratší vzdálenosti přibližně do 150 m. každé zařízení, které je schopné komunikovat pomocí infračerveného světla, musí obsahovat přijímač. Tím je nejčastěji fotodioda nebo jiné zařízení, které je schopno převádět infračervený signál zpět na digitální. Vysílač i přijímač mohou tvořit jedno zařízení, které je označováno jako vysílač (transceiver). Příkladem takového zařízení je například dálkové ovládání. Pro dálkové rozvody infračerveného signálu je třeba používat výkonnější zařízení. Těmi jsou nejčastěji výkonné lasery. Aby přenos fungoval správně, je třeba, aby zařízení byla vzájemně vyrovnaná. Pokud by vyrovnaná nebyla, paprsek vyslaný vysílačem by minul přijímač.

#### **Typy infračerveného přenosu**

Infračervený přenos může být realizován pomocí dvou různých modelů. Prvním je point to point a druhým broadcast.

##### **Point to point**

Tento model infračerveného přenosu je nejčastější. Jak již z názvu napovídá, jedná se o přenos signálu mezi dvěma zařízeními, přičemž jedno je vysílač a druhé přijímač. Typickým příkladem tohoto modelu je právě dálkový ovladač. Dalším příkladem je spojení sítí v jednotlivých budovách pomocí infračerveného přenosu. Výhodou tohoto modelu je redukce útlumu a malá možnost odposlechu.

##### **Broadcast**

Systémy založené na tomto modelu šíří signál do okolí a umožňují jeho příjem více přijímači. Velkou výhodou oproti předchozímu modelu je mobilita. Jednotlivá zařízení mohou být snadno přemísťována. Tento systém ale nemá tak velkou propustnost jako point to point. Ta je limitována typicky na 1Mb/s oproti 16Mb/s u point to point. Proto se dnes tato technologie v oblasti počítačových sítí nevyužívá.

## **Výhody médií založených na infračerveném přenosu**

Relativně nízké pořizovací náklady oproti ostatním bezdrátovým médiím. Počítače a přenosná počítačová zařízení většinou obsahují vestavěný infračervený port, proto jej není nutné pořizovat zvlášť. Provozní náklady jsou také nízké.

Vysoká propustnost. Model point to point podporuje přenosové rychlosti okolo 1,544 Mb/s. Pro tuto rychlost a také pro účinnost se tento model často používá v rozsáhlých (WAN) sítích.

Není potřeba licence ohledně frekvenčního pásma. Frekvence infračervených médií nespadá do rozsahu, který je licencován. Proto potřeba licence odpadá, čímž se ušetří čas a náklady.

Snadná instalace. Instalace většiny infračervených médií je velmi snadná. Stačí pouze připojit vysílač a namířit jej na druhý vysílač. U modelu broadcast zaměřování odpadá, což ještě zjednodušuje instalaci. Při použití infračerveného přenosu na větší vzdálenosti je zaměření druhého média složitější, ale stále pracuje na stejném principu.

Vysoká bezpečnost u modelu point to point. Pokud je paprsek přerušen, nepokračuje dále. Toto zabezpečuje nemožnost odposlechu. Signál nemůže být přerušen bez znalosti vysílajícího zařízení.

Přenositelnost. Infračervená média jsou vhodná pro počítačové sítě, které se často přemísťují, například počítače v kanceláři. Není tím ovšem myšleno, že jednotlivá zařízení mohou být v pohybu. Tato přenositelnost je dána především malými rozměry, nízkou hmotností a malými nároky na napájení.

## **Nevýhody médií založených na infračerveném přenosu**

Přímá viditelnost mezi jednotlivými zařízeními. Princip infračervených médií je stejný jako princip šíření světla. Proto mezi jednotlivými zařízeními nesmí být umístěny žádné překážky. Těmito překážkami infračervený paprsek neprojde.

Vliv počasí. Infračervený signál se šíří vzduchem. Proto je tento signál ovlivňován vlastnostmi vzduchu. Každá změna počasí způsobuje degradaci signálu. Uvnitř budov ovlivňují signál zejména teplota, vlhkost nebo okolní světlo. Vně budov signál narušuje především déšť, sníh nebo mlha.

## **Příklady médií založených na infračerveném přenosu**

Kromě oblasti počítačových sítí se tento typ přenosových médií využívá v IrDa portech a infračervených laserových zařízeních.

## **Radiofrekvenční systémy**

Radiofrekvenční systémy využívají k přenosu signálu rádiové vlny. Jejich užívání začalo být populární zejména koncem minulého tisíciletí. Radiofrekvenční systémy řeší problém s mobilitou sítě. Toto a také jejich relativně nízká cena a snadná instalace způsobily jejich velkou oblibu.

Radiofrekvenční systémy pracují na frekvencích v rozmezí 10 kHz až 1 GHz, tedy v té oblasti elektromagnetického spektra, které se nazývá rádiové vlny. Některé frekvence jsou regulovány. To znamená, že v dané oblasti zabezpečují svou unikátnost. Zařízení, která pracují s neregulovanými frekvencemi, mohou mít výkon pouze do 1 W. Tento nízký výkon snižuje možnost vzájemného ovlivňování, na druhou stranu také omezuje datovou propustnost daných médií.

Jako vysílače se u radiofrekvenčních systémů využívají antény. Typ a velikost antény udávají sílu rádiového signálu. Rozlišují se 3 typy přijímačů: jednofrekvenční s nízkým výkonem, jednofrekvenční s vysokým výkonem a vícefrekvenční.

### **Jednofrekvenční vysílače s nízkým výkonem**

Tyto vysílače, pracují pouze na jedné frekvenci. Vzhledem k jejich nízkému výkonu má jejich signál kratší dosah (okolo 20 až 30 m). Naproti tomu, nízkofrekvenční rádiové vlny mohou procházet nějakými materiály. Vzhledem k jejich nízkému výkonu se tyto vysílače používají v menších otevřených prostorech. Nižší výkon umožňuje přenos dat rychlostí od 1 do 10 Mb/s. Nevýhodou těchto vysílačů je jejich náchylnost k rušení a útlumu.

### **Jednofrekvenční vysílače s vysokým výkonem**

Tyto vysílače jsou podobné předchozím. Liší se pouze v dosahu signálu. Ten je u těchto vysílačů větší. Využívají se zejména ve venkovním prostředí například ve vozidlech nebo letadlech. Cena samotných vysílačů je téměř shodná s vysílači s nízkým výkonem. Co jí ovšem navyšuje, jsou náklady na další podpůrná zařízení, například na antény nebo opakovače. Na rozdíl od předchozího typu vysílačů tento typ netrpí útlumem signálu. Přenosové rychlosti a náchylnost k rušení jsou stejné jako u vysílačů s nízkým výkonem.

### **Vícefrekvenční vysílače**

Vícefrekvenční vysílače pracují se stejným rozsahem frekvencí jako předchozí 2 typy vysílačů, ale používají více frekvencí zároveň. Pro přenos signálu se používají 2 modulační schémata: modulace pomocí přímé frekvence a frekvenční přeskokování.

Modulace pomocí přímé frekvence umožňuje rozdělit původní data na více malých částí, které jsou dále vysílány na jednotlivých frekvencích. Vysílač a přijímač jsou spárovány. Proto pouze tato 2 zařízení vědí, které frekvence jsou platné. Na neplatných frekvencích může být vysílán falešný signál. To spolu s rozdělením původních dat znesnadňuje odposlech. Po přijetí jednotlivých částí přijímač složí dohromady původní data, přičemž vynechává falešné části. Toto modulační schéma umožňuje přenášet data rychlostí okolo

2 až 6 Mb/s při frekvenci 900 MHz. Čím je vyšší frekvence, tím vyšší rychlostí mohou být data přenášena.

Frekvenční přeskokování rychle přepíná mezi jednotlivými frekvencemi. Pro správnou funkčnost musí být vysílač a přijímač vzájemně synchronizovány. Pro navýšení rychlosti přenosu je možné vysílat na více frekvencích zároveň.

#### **Výhody radiofrekvenčních systémů**

- Není potřeba přímá viditelnost mezi vysílači.
- Nízké náklady
- Možnost práce za pohybu

#### **Nevýhody radiofrekvenčních systémů**

- Náchylnost k rušení a odposlechu způsobená všesměrovým vysíláním (broadcast)
- Omezený dosah

#### **Příklady radiofrekvenčních systémů**

**Ad hoc rádiové sítě** – propojení více zařízení pomocí rádiových přijímačů. Tato technologie vytváří připojení „každý s každým“ (peer-to-peer).

**Multipoint** – propojení více zařízení pomocí centrálního prvku (např. pomocí bezdrátového bridge).

## **Mikrovlnná komunikace**

Mikrovlnná komunikace využívá frekvence, které jsou vyšší než rádiové vlny. Tyto frekvence zajišťují vyšší propustnost a výkon než jaký poskytují ostatní bezdrátová média. Mikrovlnnou komunikaci rozdělujeme na pozemní a satelitní.

### **Pozemní mikrovlnná komunikace**

Tento typ komunikace využívá jako vysílač a přijímač směrové parabolické antény. Signál mezi anténami prochází přímo a nesmí jej blokovat žádné překážky. Signál je předáván na větší vzdálenosti pomocí relé věží. Pozemní mikrovlnné systémy se používají zejména v případě, pokud jsou kabelové rozvody cenově nedostupné nebo není možné kabeláž vůbec umístit. Například při spojení dvou budov, které jsou odděleny pozemní komunikací.

Vzhledem k tomu, že mikrovlnná zařízení často podléhají licencím, jsou pořizovací náklady navyšovány licenčními komisemi nebo vládními organizacemi.

### **Vlastnosti pozemní mikrovlnné komunikace**

Tento typ komunikace využívá frekvence v rozsahu 4 – 6 GHz a 21 – 23 GHz. Na frekvenci také závisí přenosová rychlost. Nejběžněji se pohybuje od 1 do 100 Mb/s. Kvalitu signálu ovlivňuje vnější prostředí, zejména déšť nebo mlha. Dále ji ovlivňuje frekvence a velikost antény. Mikrovlnný signál je také náchylný k elektromagnetickému rušení a snadno se odposlechne. Proto mikrovlnná komunikace bývá zpravidla šifrovaná.

### **Satelitní mikrovlnná komunikace**

Stejně jako u pozemní mikrovlnné komunikace je přenos realizován pomocí směrových parabolických antén. Rozdíl spočívá v umístění antén. Jedna anténa je umístěna na Zemi a druhá na satelitu obíhajícímu na geosynchronní orbitě ve výšce okolo 50000 km. Vzhledem k této vzdálenosti, kterou musí signál urazit, není tento typ komunikace okamžitý. Nastává zde zpoždění mezi odesláním a přijetím signálu. Toto zpoždění se typicky pohybuje od 0,5 do 5 s.

### **Princip satelitní mikrovlnné komunikace**

Zařízení odesílá signál do antény. Z té je signál odeslán satelitu, který jej pošle jinému zařízení v dosahu. Pokud zařízení v dosahu není, satelit signál posílá dalšímu satelitu. Tento proces se opakuje, dokud není signál doručen přijímajícímu zařízení.

### **Vlastnosti satelitní mikrovlnné komunikace**

Oproti předchozímu typu komunikace jsou využívány frekvence od 11 do 14 GHz. Náklady na stavbu a vypuštění satelitu jsou oproti nákladům pozemní komunikace obrovské. Ovšem při porovnání s drátovými médii je tato komunikace levnější, vzhledem k vzdálenosti mezi jednotlivými zařízeními. Rychlost přenosu se pohybuje od 1 do 10

Mb/s. Útlum, rušení, odposlech a kvalita signálu jsou ovlivňovány stejnými faktory jako pozemní mikrovlnná komunikace.

### **Výhody mikrovlnné komunikace**

- Vysoká propustnost
- Přenos na velké vzdálenosti
- Komunikace může být typu point to point nebo broadcast

### **Nevýhody mikrovlnné komunikace**

- Vysoké náklady
- Nutnost přímé viditelnosti
- Útlum signálu vlivem atmosférických jevů
- Delší doba odezvy
- Nízká úroveň bezpečnosti

Mikrovlnná komunikace se zejména kvůli vysokým nákladům a relativně vysoké rychlosti přenosu oproti ostatním bezdrátovým médiím používá primárně ve WAN sítích. V LAN sítích se tento typ přenosových médií využívá zřídka, už jen kvůli nutnosti používat velkou parabolickou anténu.



## 2 Kódování signálu

Aby mohla data proudit po síti, musí být určitým způsobem kódována. K tomuto účelu se používá kódování (encoding) signálu, které spočívá v převodu jednotlivých bitů na hodnoty specifických fyzikálních veličin. Například na elektricky vodivých přenosových médiích je signál reprezentován pomocí napětí elektrického proudu, který médiem protéká.

### 2.1 Druhy signálu

Signál se rozděluje na analogový a digitální. Analogový signál je takový signál, který je po celou dobu svého trvání spojité. Naproti tomu digitální signál je reprezentován pomocí sekvencí diskrétních hodnot. Analogový signál je více náchylný k rušení než digitální signál. Proto lze digitální signál používat pro přenos na větší vzdálenosti.

### 2.2 Metody kódování signálu

#### NRZ (Non Return to Zero)

Toto kódování využívá rozdílné hodnoty napětí pro reprezentaci 0 a 1. Kladná hodnota je použita pro 1 a záporná pro 0. Hodnota napětí se mění skokově během pulzů. Během jednoho pulzu lze zaznamenat jednu hodnotu napětí. Pokud se vyskytne sekvence po sobě jdoucích nul nebo jedniček, tak se hodnota napětí nemění. Výhodou tohoto kódování je především jednoduchost. Další výhodou je možnost zvýšit frekvenci pulzů a tím zvýšit i objem přenášených dat. Nevýhodou tohoto kódování jsou problémy s obnovením bitové synchronizace při delší sekvenci nul nebo jedniček. Toto kódování se používá zejména při přenosu nízkého počtu dat na krátké vzdálenosti.

#### Invertované NRZ (NRZI)

Toto kódování je úpravou původního NRZ. Rozdíl spočívá v reprezentaci 0 a 1. Jedničky jsou reprezentovány jako změna napětí, nuly jako stálé napětí. Výhody a použití zůstávají stejné. Na rozdíl od předchozího kódování je nevýhoda zredukována pouze na dlouhé sekvence nul.

#### Kódování Manchester

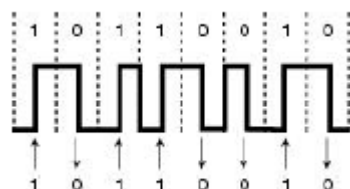
Princip tohoto kódování spočívá v zakódování bitů do změny hodnoty napětí. 0 představuje klesající napětí, 1 narůstající. Výsledné bity jsou dále kódovány a to podle tabulky 2.1.

Tab. 2.1 – Kódování metodou Manchester.  
Zdroj [22]

Bit	Změna napětí	Kód
0	Klesající	10
1	rostoucí	01

### Příklad kódování metodou Manchester

Je dána posloupnost bitů 10110010. Po zakódování se velikost zprávy zdvojnásobí. Výsledek vypadá takto: 0110010110100110. Reprezentace zakódování této posloupnosti je zobrazena na obrázku 2.1.



Obr. 1.1 – Kódování Manchester. Zdroj [22]

Výhodou tohoto typu kódování je maximální počet 2 stejných hodnot, které následují bezprostředně po sobě. To nastává, pokud jsou 2 původní po sobě jdoucí bity různé. Nevýhodou je zvětšení délky přenášených dat na dvojnásobek.

### Kódování 4B/5B

Toto kódování je založeno na nahrazení posloupnosti 4 bitů posloupností 5 bitů tak, aby ve výsledné pětici bylo co nejvíce jedniček (nejméně 2), na počátku každé pětice nejvýše 1 nula a na konci nejvýše 2 nuly. Jednotlivé kódy udává tabulka 2.2.

Tab. 2.2 – Tabulka kódů pro kódování 4B/5B.  
Zdroj [22]

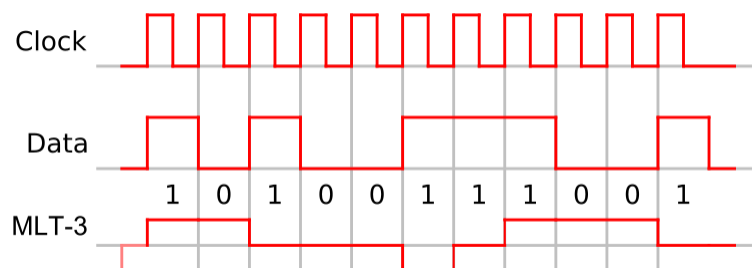
4B	5B	4B	5B
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

### Příklad kódování metodou 4B/5B

Stejně jako u metody Manchester je dána posloupnost 10110010. Při použití tohoto kódování se velikost také zvětší, ale ne na dvojnásobek, ale pouze o 2 bity. Výsledná posloupnost bitů je poté 1011110100.

### Kódování MLT-3

Oproti kódování NRZ a Manchester využívá MLT-3 tři stavy napětí: záporné, nulové a kladné. Jednička je vyjádřena změnou napětí, 0 stálým napětím, stejně jako je tomu u kódování NRZI. Ukázka kódování MLT-3 je zobrazena na obrázku 2.2. Toto kódování se často používá společně s kódováním 4B/5B, které předzpracovává daný signál.



Obr. 2.2 – Kódování MLT-3. Zdroj [9]

Další metody kódování jsou uvedeny v [6]. Obecné informace o kódování lze nalézt v [19].

### 3 Základní vlastnosti přenosových médií

Různá přenosová média disponují různými vlastnostmi a parametry. Zde jsou uvedeny 2 společné parametry a to přenosová a modulační rychlost.

#### Přenosová rychlost

Přenosovou rychlostí se rozumí objem dat (počet bitů), která jsou přenesena daným přenosovým médiem za jednotku času. Základní jednotkou této veličiny jsou b/s. Násobky této jednotky jsou kb/s, popř. Mb/s. Typické přenosové rychlosti se pohybují v řádu desítek, stovek až tisíců Mb/s.

#### Modulační rychlost

Tato veličina vyjadřuje počet stavových změn přenosového média za jednotku času. Počet stavových změn představuje počet bitů, které jsou modulovány. Jednotkou modulační rychlosti je Bd/s (Baud/s).

Pro svou správnou funkčnost musí přenosová média splňovat požadavky na nejrůznější parametry. Jedná se o různé fyzikální veličiny (například odpor nebo útlum signálu) a také o další vlastnosti (například délka nebo mapa zapojení). Tyto parametry jsou pro jednotlivé typy médií popsány níže. Detailní informace o parametrech kroucené dvoulinky a koaxiálního kabelu lze nalézt v [2, 10].

#### 3.1 Kroucená dvoulinka

##### Mapa zapojení (Wire Map)

Mapa zapojení je parametr, který popisuje zapojení jednotlivých vodičů (párů) v kabelu. Důležité není jen zapojení jednotlivých vodičů, ale také jejich nepřerušenosť. Přerušenosť vodiče může být způsobeno zejména elektrickým zkratem a způsobuje neprůchodosť signálu. Zapojení vodičů vyjadřuje, jak jsou jednotlivé vodivé páry zapojeny. Kontroluje se zejména, jestli nejsou jednotlivé páry prohozeny nebo překříženy. U kabelů typu STP se do mapy zapojení zahrnuje také nepřerušenosť a propojení stínění. Mapu zapojení je možné kontrolovat i pomocí jednoduchých měřících přístrojů.

##### Odpor (Resistance)

Odpor je fyzikální veličina, která ovlivňuje další parametry zkoumaného kabelu. Jednotkou odporu je Ohm ( $\Omega$ ). Při testování kabelu se měří odpor na smyčce stejnosměrného proudu na jednotlivých párech. Odpor vodivého páru je dán integritou kontaktů v konektoru, délkou vodičů a průřezem vodiče. Jak již bylo zmíněno, odpor ovlivňuje další měřené parametry kabelu. Je to zejména zpětný odraz. Další problémy může odpor způsobovat u dlouhých vodičů. Dlouhé vodiče mají velký odpor, a proto může test na délku vodičů vyhodnotit kabel jako nevyhovující.

### **Charakteristická impedance (Characteristic impedance)**

Charakteristická impedance představuje impedanci, kterou by měl měřený kabel, pokud by byl nekonečně dlouhý. Samotná impedance je komplexní odpor složený ze dvou složek. Složka reálná se nazývá rezistance a složka imaginární reaktance. Pokud je reaktance kladná, nazývá se reaktance induktivní (induktance) a pokud je záporná, nazývá se reaktance kapacitní (kapacitance). Jednotkou impedance je stejně jako u odporu Ohm. Více o impedanci lze nalézt v [12]. Charakteristická impedance lze měřit pouze na kabelech delších než 4 m. Při měření se získává přibližná charakteristická impedance pro každý vodičový pár. Správná funkce přenosového média je ovlivněna konstantní charakteristickou impedancí kabelu a konektorů. Náhlé změny charakteristické impedance se nazývají anomálie a způsobují odraz signálu. Ten může způsobit chyby v síťové komunikaci.

### **Délka (Length)**

Délka, jinak také elektrická délka, vyjadřuje skutečnou délku vodičů uvnitř kabelu. Ta se z důvodu kroucení jednotlivých vodičových párů liší od délky kabelu (fyzické délky) až o 5%. Každý vodičový pár může mít jinou délku. To spolu s různou rychlostí šíření signálu způsobuje různé doby šíření signálu. Délka velmi úzce souvisí s útlumem signálu. Platí mezi nimi přímá úměrnost. Měření délky vodičů spočívá ve vyslání pulzu z jednoho konce kabelu na druhý. Čas přenosu pulzu je zaznamenán a následně pomocí NVP (Nominal Velocity of Propagation neboli procentuálního poměru rychlosti signálu v kabelu k rychlosti světla ve vakuu) je vypočítána délka měřeného segmentu. Tato technika měření délky se nazývá TDR (Time Domain Reflectometry).

### **Zpoždění signálu (Propagation Delay)**

Zpoždění signálu je parametr, který vyjadřuje dobu, kterou signálu trvá rozšíření z jedné části kabelu na část druhou. Jednotkou zpoždění signálu je nanosekunda (ns). U kabelu kategorie 5e se zpoždění signálu pohybuje okolo 5 ns na 1 m. Limit je stanoven na 5,7 ns na 1 m. Zpoždění signálu se může na jednotlivých vodičových párech lišit v důsledku malých rozdílů v elektrické charakteristice a délce vodičů. Je ovlivňován také elektromagnetickým rušením. Tento parametr slouží k výpočtu dalšího parametru a tím je rozdíl zpoždění.

### **Rozdíl zpoždění (Delay Skew)**

Rozdíl zpoždění vyjadřuje rozdíl ve zpoždění signálu mezi nejkratším zpožděním a ostatními zpožděními. Jednotkou tohoto parametru je opět nanosekunda. Velký rozdíl zpoždění může způsobovat chybnou interpretaci dat v síťových zařízeních. Stejně jako zpoždění signálu je i rozdíl zpoždění ovlivňován rozdílnou délkou vodičů, elektrickými vlastnostmi vodičů a elektromagnetickým rušením prostředí.

## Útlum (Insertion Loss, Attenuation)

Útlum je parametr, který udává ztrátu signálu během jeho průchodu kabelem. Útlum je způsobován odporem měděného drátu, propojovacím hardwarem, zejména konektory, a také únikem elektrické energie skrz kabelovou izolaci. S vyšší frekvencí se útlum signálu zvyšuje. To je způsobeno tendencí signálu procházet vodičem blízko jeho povrchu. Útlum je také ovlivňován induktancí a kapacitancí. Další vlastnost, která útlum ovlivňuje je průměr kabelu. Čím je průměr menší, tím se útlum zvětšuje. Jednotkou útlumu je decibel na metr (db/m), popřípadě pouze decibel (db). Útlum lze také vyjádřit následujícím vztahem.

$$IL = 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right) \quad (3.1)$$

$IL$  - Útlum

$P_o$  - Výstupní energie

$P_i$  - Vstupní energie

## Přeslech signálu na blízkém konci (NEXT – Near-End Crosstalk)

NEXT vyjadřuje množství rušivého signálu, které je přeneseno z jednoho vodivého páru na jiný pár. Jinými slovy se jedná o rozdíl v amplitudě mezi přeneseným signálem a přeslechem zjištěným na stejném konci kabelu. Čím je hodnota NEXT vyšší, tím je kabel kvalitnější. Jednotkou tohoto parametru je decibel. Z důvodu útlumu je přeslechový signál slabší ve větší vzdálenosti od zdroje signálu a proto způsobuje menší problémy než přeslech blíže ke zdroji. Z tohoto důvodu se parametr NEXT měří na obou koncích testovaného kabelu. V rámci jednoho kabelu se měří vždy všechny kombinace (celkem 6) vodivých párů.

## Odstup přeslechu na vzdáleném konci (ACR - Attenuation to Crosstalk Ratio)

Tento parametr se neměří, ale počítá se jako rozdíl 2 jiných parametrů. Jedná se o parametry NEXT a útlum. Jednotkou tohoto parametru je tedy opět decibel. ACR porovnává amplitudu signálu naměřenou na vzdáleném konci s amplitudou přeslechu naměřenou na blízkém konci. Pokud je úroveň útlumu blízká úrovni přeslechu, je signál ztracen. Proto by hodnota ACR nikdy neměla být nižší než 10 db. Jinými slovy, pokud je hodnota ACR vysoká, znamená to, že signál je silnější než přeslechový signál. Proto čím vyšší je hodnota ACR, tím je kabel kvalitnější výkonnější.

## Zpětný odraz (Return Loss)

Zpětný odraz je jev, který je dán rozdílnou impedancí uvnitř kabelu. Princip zpětného odrazu spočívá v návratu části odeslané energie zpět k vysílači. Zpětný odraz tedy negativně ovlivňuje kvalitu signálu. Signál totiž může být zpětným odrazem rušen. Jednotkou zpětného odrazu je opět decibel. Čím je hodnota zpětného odrazu větší, tím méně energie se vrátí k vysílači a tím je kabel méně náchylný k chybám. Toto je důležité zejména pro vysokorychlostní systémy, jako je například Gigabit Ethernet. Také

obousměrná komunikace je tímto jevem ovlivňována. Obousměrné (Full Duplex) vysílače využívají při své činnosti směrové spojky k rozlišení odchozího a příchozího signálu. Právě tyto spojky jsou náchylné k chybám, protože silný zpětný odraz mohou reprezentovat jako příchozí signál.

### **Výkonový součet přeslechu na blízkém konci (PSNEXT - Power Sum Near-End Crosstalk)**

Parametr PSNEXT se stejně jako parametr ACR neměří, ale počítá. Jedná se o rozdíl mezi signálem naměřeným na daném vodivém páru a přeslechem způsobeným ostatními páry. Stejně jako parametr NEXT se i u tohoto parametru počítá s hodnotami naměřenými na stejném konci kabelu. Jednotkou je opět decibel. Hodnota PSNEXT je typicky jen o několik decibelů nižší (horší) než nejhorší hodnota parametru NEXT. Tento parametr je důležitý zejména pro technologie, které přenáší signál pomocí všech čtyř vodivých párů. Takovou technologii je například Gigabit Ethernet.

### **Výkonový součet odstupů přeslechu na blízkém konci (PSACR - Power Sum Attenuation to Crosstalk Ratio)**

Tento parametr porovnává amplitudu signálu naměřenou na vzdáleném konci testovaného vodivého páru se společnou amplitudou přeslechového signálu způsobeného ostatními vodivými páry na blízkém konci. Jednotkou je decibel. PSACR se také neměří, ale počítá. Jedná se o rozdíl PSNEXT a útlumu. Jinak lze PSACR vyjádřit jako rozdíl útlumu každého vodivého páru a kombinovaného přeslechu způsobeného ostatními vodivými páry. Vyšší hodnota PSACR znamená, že naměřený signál je silnější než přeslech způsobený ostatními vodivými páry. Čím je hodnota PSACR vyšší, tím je kabel výkonnější.

### **Přeslech signálu na vzdáleném konci (FEXT – Far-End Crosstalk)**

Parametr FEXT je téměř shodný s parametrem NEXT. Jednotka je také shodná a to decibel. Jediný rozdíl spočívá v různě umístěných bodech měření. Zatímco NEXT se měří na stejném konci, FEXT se měří na rozdílných koncích kabelu. Vzhledem k tomu, že měřený signál i přeslech musí urazit stejnou vzdálenost, jsou také oba ovlivňovány útlumem. To znamená, že všechny přeslechy představují stejný šum na vzdáleném konci. Při měření na vzdáleném konci se přeslech projevuje mnohem více než při měření na stejném konci. Stejně jako u parametru NEXT se testují všechny kombinace vodivých párů. Parametr FEXT se využívá zejména jako základ následujícího parametru.

### **Odstup přeslechu na vzdáleném konci (ELFEXT - Equal Level Far-End Crosstalk)**

Vzhledem k tomu, že parametr FEXT je ovlivňován délkou kabelu (na delších kabelech je menší) byl zaveden parametr ELFEXT. Ten délku kabelu zanedbává a hodnotu FEXT normalizuje. Jedná se o obdobu parametru ACR. Stejně jako tento parametr se ani ELFEXT neměří, ale počítá. ELFEXT je výsledek rozdílu parametru FEXT a útlumu. Jednotkou ELFEXT je tedy opět decibel. Vzhledem k tomu, že všechny signály měřené na vzdáleném konci musí urazit stejnou vzdálenost, mají tendenci se sčítat ve fázi. Proto je

parametr ELFEXT kriticky důležitý pro technologie přenášející signál na více vodivých párech současně (například Gigabit Ethernet). Vysoká hodnota ELFEXT znamená, že signál naměřený na vzdáleném konci je silnější než přeslech naměřený na vzdáleném konci. Čím je hodnota ELFEXT vyšší, tím je kabel kvalitnější. Hodnoty parametrů NEXT a ELFEXT bývají podobné v rámci kabelu, ale velmi se mohou lišit v propojovacích prvcích. Některé konektory jsou optimalizovány k dobré hodnotě parametru NEXT vyrovnáváním induktivních a kapacitních proudů, které způsobují přeslech. Tyto proudy jsou navzájem otočeny o 180°. To způsobuje jejich vyrušení na blízkém konci. Naneštěstí, proudy, které se vyruší na blízkém konci, se sčítají na vzdáleném konci. To způsobuje velký přeslech na vzdáleném konci a nízkou kvalitu kabelu.

### **Výkonový součet odstupu přeslechu na vzdáleném konci (PSELFEXT - Power Sum ELFEXT)**

Parametr PSELFEXT udává stejně jako PSNEXT jak je měřený vodivý pár ovlivňován přeslechem způsobeným ostatními páry. Rozdíl opět spočívá pouze v různých měřicích bodech. Jednotkou je opět decibel. Vyjádřit PSELFEXT je možné ještě vyjádřit jako rozdíl mezi testovaným signálem a přeslechem od ostatních párů naměřeném na vzdáleném konci. PSELFEXT se stejně jako PSNEXT pouze počítá. Výchozí hodnotou pro výpočty je parametr ELFEXT. Čím je hodnota PSELFEXT vyšší, tím je testovaný kabel kvalitnější. Samotná hodnota bývá typicky o něco menší než nejhorší hodnota parametru FEXT.

Překlady anglických názvů daných parametrů do češtiny jsou převzaty z [17].

## **3.2 Koaxiální kabel**

U koaxiálního kabelu se měří a testuje méně parametrů. Ty, které se testují, jsou shodné jako u kroucené dvoulinky. Liší se pouze princip měření u některých z nich, což lze odvodit již z odlišností mezi těmito typy kabelů.

### **Odpor (Resistance)**

Stejně jako u kroucené dvoulinky se i u koaxiálního kabelu měří odpor. Ten ovlivňuje další vlastnosti kabelu. Odpor se měří na stejnosměrné smyčce mezi středovým vodičem a stíněním. Jednotkou je Ohm. Většina standardů nemá stanovené limity pro odpor. Proto naměřenou hodnotu většinou není možné porovnat s daným limitem.

### **Impedance**

Impedance představuje hodnotu charakteristické impedance ve vzdálenosti přibližně 4 metry od měřicího přístroje. Proto by délka kabelu měla být minimálně 4 m. Pokud je kabel kratší, přístroj zobrazuje impedanci jako neznámou. Stejně jako u kroucené dvoulinky představuje charakteristická impedance impedanci, kterou by kabel měl, pokud by byl nekonečně dlouhý. Vzhledem k tomu, že se jedná o naprosto stejnou veličinu jako u kroucené dvoulinky, je i jednotka stejná a to Ohm. Kvalitní kabely mají charakteristickou impedanci relativně konstantní po celé délce kabelu včetně konektorů. Změny



v charakteristické impedanci způsobují odraz signálu uvnitř kabelu. To způsobuje problémy jak v počítačových sítích tak při přenosu videa. V počítačových sítích způsobují odraz signálu síťové poruchy, u přenosu videa je snížena kvalita příjmu signálu.

### **Délka (Length)**

Parametr délka představuje délku kabelu. Měří se v metrech. Mezi naměřenou hodnotou a skutečnou délkou kabelu mohou být rozdíly. Ty jsou způsobeny rozdílnou hodnotou NVP u různých kabelů. Ovlivňuje ji zejména typ a výrobce kabelu. Tento rozdíl ovšem často bývá velice malý a proto se při návrhu strukturované kabeláže zanedbává.

### **Zpoždění signálu (Propagation Delay)**

Zpoždění signálu udává dobu, kterou signálu trvá přesun z jednoho konce kabelu na druhý. Měří se v nanosekundách.

### **Útlum (Insertion Loss, Attenuation)**

Útlum je na kabelu způsoben zejména jeho odporem, propojovacími konektory a také úbytkem elektrického proudu skrz kabelovou izolaci. Představuje úbytek síly signálu při jeho přenosu kabelem. Jednotkou útlumu je decibel. Útlum je zejména ovlivňován frekvencí signálu. To je popsáno již v části zabývající se kroucenou dvoulinkou.

## **3.3 Optické vlákno**

Optická vlákna mají odlišné parametry než kabely založené na měděných vodičích. Detailní informace a celkový přehled o optických vláknech podává [8, 18, 24].

### **Index lomu (Refractive Index)**

Index lomu ( $n$ ) je bezrozměrná veličina, která vyjadřuje, kolikrát je světlo v dané látce pomalejší než ve vakuu. Proto jeho hodnota je vždy vyšší než 1. Vzhledem k tomu, že samotné vlákno má jiný index lomu než obklad, jako parametr optických vláken slouží rozdíl těchto hodnot. Vztah pro výpočet indexu lomu je uveden níže.

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.2)$$

$c$  - rychlost světla ve vakuu [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$v$  - rychlost světla v dané látce [ $m \cdot s^{-1}$ ]

Index lomu lze také vyjádřit jako poměr sinu úhlu mezi vstupním světelným paprskem a kolmicí vedenou na povrch předmětu (normálou), kterým paprsek prochází (úhel incidence -  $i$ ), k sinu úhlu mezi výstupním světelným paprskem a normálou (úhel lomu -  $r$ ).

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (3.3)$$

## Numerická apertura (Numerical Aperture)

Jak již bylo zmíněno výše, jako parametr optických vláken se udává rozdíl v indexech lomu mezi vláknem a obkladem. Častěji se ovšem používá veličina nazvaná numerická apertura (NA). Ta je definována jako největší možný úhel, pod který může světelný paprsek vstupovat do vlákna, aby byl ještě vláknem přenášen. Numerická apertura je vyjádřena následujícím vztahem.

$$NA = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_v^2 - n_o^2} \quad (3.4)$$

$n_0$  - index lomu okolí vlákna (typicky vzduch)

$n_v$  - index lomu vlákna

$n_o$  - index lomu obkladu vlákna

Vyšší hodnota numerické apertury má za důsledek zejména větší schopnost vést světlo. Proto mnohovidová vlákna mají hodnotu numerické apertury vyšší. Naopak u jednovidových vláken se požaduje co nejnižší numerická apertura. Vyšší hodnota numerické apertury také snižuje ztráty způsobené ohybem vlákna.

Numerická apertura a index lomu jsou dále popsány v [11].

### 3.3.1 Disperze

Vidové vlákno je disperzní prostředí. To znamená, že pro různé vlnové délky světly a pro různé vidy má různé vlastnosti. To je způsobeno samotným principem šíření světla v daném vlákně. Světlo se totiž obecně při průchodu vláknem rozloží do několika vidů a v rámci těchto vidů se dále rozkládá na několik složek. Každá složka přitom má odlišnou vlnovou délku. Disperze obecně způsobuje deformaci impulzu. Je snížena jeho amplituda a naopak zvýšena jeho šířka. Disperze se rozděluje na 3 části:

- Disperze vidová
- Disperze chromatická
- Disperze polarizační

#### Disperze vidová

Tato složka disperze se projevuje u mnohovidových vláken. Projevuje se zejména změnou tvaru a amplitudy impulzu. Dále se projevuje různou dobou, kterou světelný paprsek stráví přesunem z jednoho konce vlákna na druhý. Vidová disperze omezuje zejména přenosovou rychlost a délku vlákna. U jednovidových vláken vidová disperze odpadá.

#### Disperze chromatická

Chromatická disperze vzniká z důvodu odlišných rychlostí šíření jednotlivých spektrálních složek světelného paprsku. Odlišné rychlost těchto složek je způsobena jejich rozdílnou vlnovou délkou. Odlišná není jen rychlost těchto složek, ale i jejich trajektorie. Ta je opět

dána jejich vlnovou délkou. Chromatická disperze je charakterizována tzv. koeficientem chromatické disperze ( $D$ ), který je uveden níže.

$$D = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad (3.5)$$

Tento koeficient udává změnu (derivaci) skupinového zpoždění signálu ( $t_g$ ) při průchodu vláknem v závislosti na vlnové délce ( $\lambda$ ) při délce vlákna 1 km. Jednotkou tohoto koeficientu je  $\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$ . Více o chromatické disperzi se lze dočíst v [4].

### Disperze polarizační

Světelný signál se v optickém vlákně šíří ve dvou navzájem kolmých polarizačních rovinách neboli polarizačních videch. Při zachování podmínek šíření se světlo šíří v obou videch stejnou rychlostí. Vzhledem k tomu, že se impulz šíří oběma vidy současně, dochází k jeho časovému rozšiřování. To zvyšuje chybovost a omezuje maximální přenosovou rychlost. Polarizační disperze závisí na velkém množství okolností. Zejména na kruhové nesymetričnosti a různém vnitřním složení vlákna. Tyto vlastnosti ovlivňuje jak výroba vlákna, tak i manipulace s ním. Deformace, ohyb nebo mechanické poškození zhoršují kvalitu vlákna. Polarizační disperzi ovlivňuje i vnější prostředí vlákna. Hodnota polarizační disperze se liší v různých úsecích vlákna. Proto se měří velmi obtížně a není ji možné stanovit s dostatečnou přesností. Jednotkou polarizační disperze je  $\frac{\text{ps}}{\text{km}^{1/2}}$ . Hodnota se typicky pohybuje okolo  $0,1 \frac{\text{ps}}{\text{km}^{1/2}}$ , což umožňuje přenos rychlostí 10 Gb/s na vzdálenost několika set kilometrů. Polarizační disperze je detailně popsána v [21].

### Volba typu vláken z hlediska disperze

Vzhledem k tomu, že vidová disperze je řádově větší než chromatická disperze, se v telekomunikaci a oblasti počítačových sítí využívají zejména jednovidová optická vlákna.

#### 3.3.2 Nelineární jevy

Podstatou nelineárních jevů je skutečnost, že světlo není vláknem jen vedeno, ale také na něj působí a tím mění podmínky pro vedení ostatních signálů. Nelineárních jevů existuje velké množství. V této práci jsou zmíněny a popsány ty nejvýznamnější. Detailní popis nelineárních jevů je uveden v [15, 25].

### Generování druhé harmonické (Second Harmonic Generation - SHG)

Tento jev je způsoben průchodem světla vláknem. Důsledkem je změna vlnové délky procházejícího paprsku na polovinu. Tento jev byl objeven v roce 1961.

### **Třívlenný proces**

Tento jev způsobuje směšování 2 světelných paprsků o různých frekvencích. Při průchodu opticky nelineárním prostředím z něho vychází součtová nebo rozdílová složka daných paprsků.

### **Automodulace fáze**

Při tomto jevu světelný signál prochází nelineárním optickým prostředím a mění svou vlastní fázi. Změna fáze je dána indexem lomu, délkou dráhy, kterou paprsek prochází, výkonem daného signálu a průřezem vlákna. K tomuto jevu dochází zejména při rychlých změnách výkonu signálu.

### **Křížová modulace**

Tento jev nastává, pokud dva nebo více intenzivních světelných paprsků prochází vláknem současně. První z paprsků způsobí změnu indexu lomu. Tím jsou poté ovlivněny i ostatní paprsky. Důsledkem křížové modulace v optických vláknech může být přeslech.

### **Čtyřvlenné směšování**

Čtyřvlenné směšování je nejvýznamnější nelineární jev, který nejvíce ovlivňuje přenos signálu. Tento jev vzniká, pokud se 2 elektromagnetické vlny šíří současně vláknem. Elektromagnetická síla, kterou tyto vlny na vlákno působí, jej ovlivňuje. Atomy vlákna na tuto sílu reagují posunem elektronů i jader a důsledkem je změna optických vlastností vlákna.

### **Brillouinův rozptyl**

Tento jev vzniká, pokud akustická vlna ve vlákně způsobí lokální změnu indexu lomu. V tomto místě se z šířícího se světelného signálu oddělí foton, který se následně šíří v opačném směru než původní signál. Důsledkem je posun frekvence původního signálu. Zpětný signál, který je vytvořen odraženým fotonem, ovlivňuje stabilitu a šum světelného zdroje.

### **Ramanův rozptyl**

Tento jev vzniká při interakci mezi fotony a atomy vlákna. Fotony těmto atomům předávají část své energie a tím se mění vlnová délka původního záření. Tímto způsobem je ovšem rozptylován jen jeden foton z několika milionů až miliard.

#### **3.3.3 Ztráty v optických vláknech**

Optická vlákna jsou z hlediska přenosu optického signálu prostředí disperzní a ztrátová. Tyto ztráty lze rozdělit do několika kategorií. Jsou to:

- Ohybové ztráty - způsobeny přílišným ohybem vlákna
- Rozptylové ztráty - dány výrobou. Vznikají díky nečistotám a deformacím v krystalové mřížce

- Absorpční ztráty - způsobeny přeměnou světelné energie na energii tepelnou
- Disperzní ztráty - jevy, které znehodnocují vlastnosti optických vláken

Tyto ztráty a obecné vlastnosti, které ztráty popisují, jsou uvedeny a přiblíženy v následující části.

### Útlum optického vlákna (A)

Útlum představuje veličinu, která shrnuje veškeré ztráty, které ovlivňují kvalitu a sílu optického signálu. Jednotkou je decibel. Útlum je vyjádřen jako podíl výstupního světelného výkonu (P1) a vstupního světelného výkonu (P2). Celý vztah je uveden níže.

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3.6)$$

### Měrný útlum (a)

Tato veličina představuje útlum vztažený na jednotku délky (L). Jednotkou je decibel na kilometr (db/km). Následuje vztah pro výpočet měrného útlumu.

$$a = \frac{A}{L} = -\frac{1}{L} \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3.7)$$

Obě tyto veličiny jsou velice důležité parametry optického vlákna. Vyjadřují kvalitu vlákna a umožňují vypočítat maximální délku optického spoje bez použití opakovačů. Výpočet maximální délky vlákna následuje.

$$l = \frac{1}{a} 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3.8)$$

### Ohybové ztráty

Jak již z názvu napovídá, jedná se o ztráty způsobené ohybem optického vlákna. Pokud je vlákno příliš ohnuto, světelný paprsek může dopadat pod větším než maximálním přípustným úhlem a láme se poté do pláště. Ohybové ztráty dále ovlivňuje tzv. fotoelastický jev. Ten spočívá v rozdílných indexech lomu ve vlákně. Index lomu je totiž funkcí tlaku. Při ohnutí vlákna vzniká na jeho vnitřní straně tlak a na straně vnější tah. Tím se změny indexy lomu v jádře a plášti a také se změny mezní úhel šíření světelného signálu ve vlákně. Ohybové ztráty lze snížit dvěma způsoby. Buď ohýbáním kabelu ve velkých poloměrech, nebo zkrácením vlnové délky vedeného světla. Nejčastěji se používá kombinace těchto dvou metod.

### Rozptylové ztráty

Tento typ ztrát lze rozdělit na 3 skupiny.

- Rayleigho rozptyl
- Mieův rozptyl
- Rozptyl na nečistotách

### **Rayleigho rozptyl**

Tento jev, který nelze zcela odstranit vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky vlákna. Světlo se vlivem těchto kmitů ohýbá a vznikají ztráty rozptylem. Tento typ rozptylu lze částečně odstranit posunutím frekvence světelného signálu do infračervené oblasti.

### **Mievův rozptyl**

Tento rozptyl vzniká v důsledku nehomogenní struktury optického vlákna. Ta je dána již jeho výrobou. Je ovlivněn zejména mikroskopickými bublinkami ve vlákně, napětím vlákna, kolísáním průměru vlákna nebo nečistotami.

### **Rozptyl na nečistotách**

Tento typ rozptylu je velmi podobný předchozímu typu. Lze zcela odstranit správnou technologií výroby vlákna.

### **Absorpční ztráty**

Tento typ ztrát spočívá v přeměně elektromagnetické energie na energii tepelnou. Tento jev se projevuje zejména u optických vláken, která se používají k přenosu velkých energií (např. laserové skalpely). U telekomunikačních technologií jsou tyto ztráty velice špatně měřitelné.

### **Disperzní ztráty**

Disperzní ztráty na rozdíl od ostatních typů ztrát nezpůsobují úbytek energie. Způsobují pouze rozprostření světelného signálu v čase, tedy jeho zkreslení. Jednotlivé typy disperze byly již popsány výše.

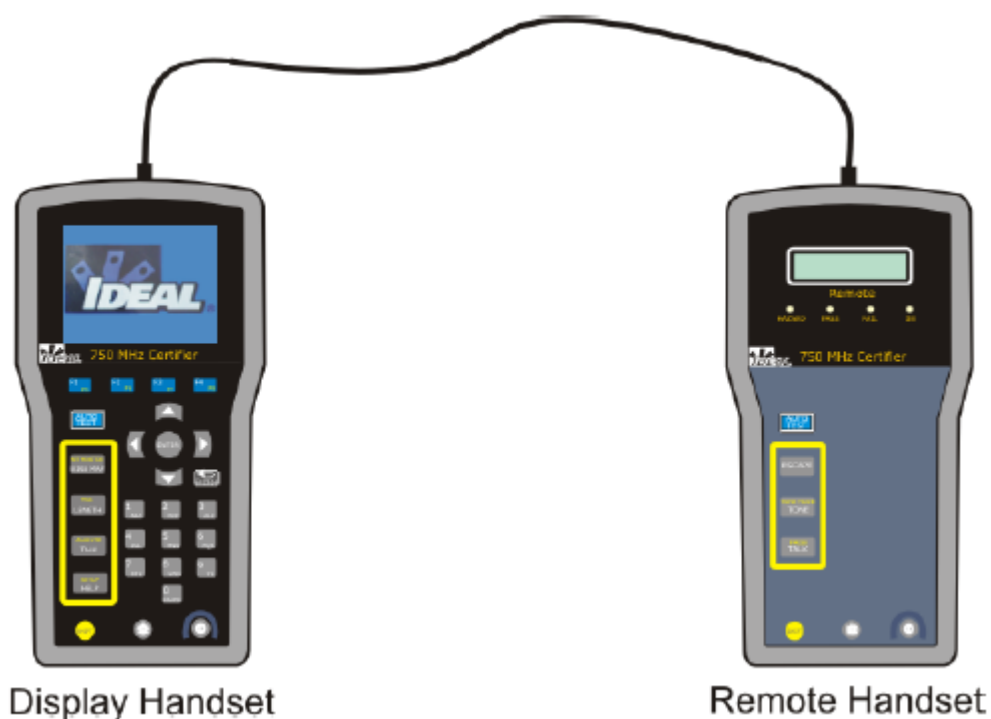
## 4 Praktická část

Jak již bylo uvedeno výše, přenosová média, zejména kabely, musí splňovat vysoké nároky na parametry pro přenos signálu. Tyto parametry musí být určitým způsobem měřeny a porovnávány s vzorovými hodnotami. Z tohoto důvodu se využívají nejrůznější měřicí a testovací přístroje. Následující kapitola se těmito přístroji blíže zabývá.

Výrobci měřících přístrojů určených k testování strukturované kabeláže je celá řada. Každý přístroj se liší množstvím testovacích parametrů, rozsahem těchto parametrů, způsobem zpracování výsledků a dalšími vlastnostmi. Některé přístroje slouží k měření metalických kabelů, jiné k měření optických vláken. Některé přístroje jsou schopné měřit obojí, například použitím speciálních nástavců.

### 4.1 LANTEK Category 6 tester

Tento tester vyráběný firmou Lantek slouží primárně k měření kroucené dvoulinky a koaxiálního kabelu. V případě kroucené dvoulinky je možné testovat kategorie 5, 5e, 6 a 7 při frekvenci 350 MHz. Přístroj splňuje standardy TIA/EIA 568 a ISO 11801. Pomocí modulu TRACETEK lze testovat i optická vlákna. Veškeré parametry, které lze pomocí tohoto testeru měřit u kroucené dvoulinky, jsou uvedeny v následující tabulce 4.1.



Obr. 4.1 – LANTEK Category 6 tester. Zdroj [5]

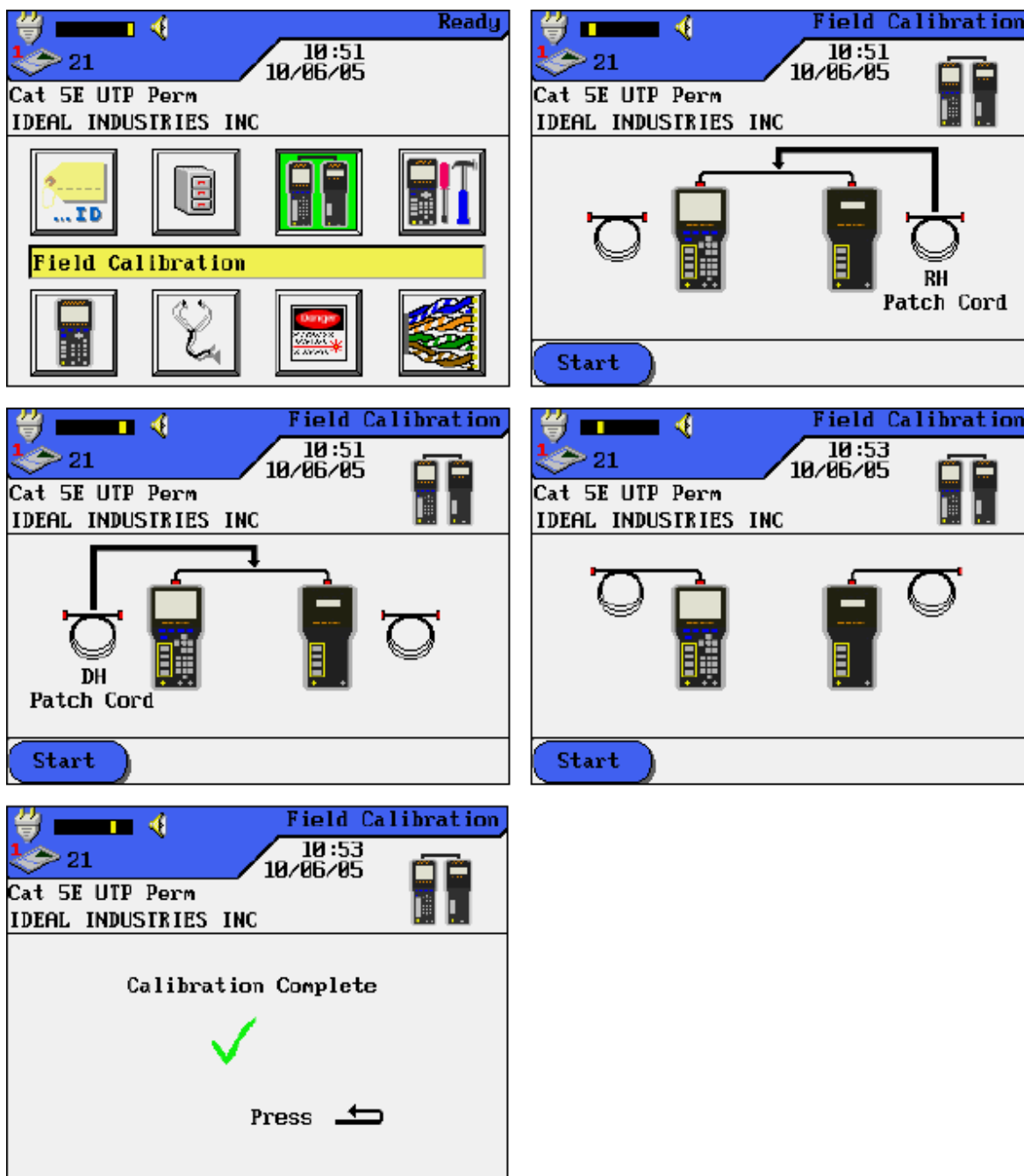
Tab. 4.1 – Přehled parametrů u přístroje LANTEK Category 6 tester. Zdroj [5]

Parametr	Specifikace	Hodnoty
Zpoždění	Rozsah měření Rozlišitelný krok Přesnost měření	0 - 8000 ns 1 ns ± (3% + 1 ns)
Délka	Rozsah měření Rozlišitelný krok Přesnost měření Šíření	610 m (2000 stop) 1 stopa 3% + 3 stopy 0,5 - 0,99 c
Kapacitance kabelu	Rozsah měření Rozlišitelný krok Přesnost měření	0 - 100 nF 3 ° ± (2% + 20 pF)
Odpor	Rozsah měření Rozlišitelný krok Přesnost měření	0 - 200 Ω 0,1 Ω + (1% + 2 Ω)
Útlum	Frekvenční rozsah Rozsah měření Dynamický rozsah Velikost frekvenčního kroku [kHz] Rozlišitelný krok Přesnost	1 - 350 MHz 0 - 90 dB 55 dB k 700 MHz 150, 250, 500, 1000 0,1 dB Vyšší než úroveň 3 (dle TIA)
NEXT	Frekvenční rozsah Rozsah měření Dynamický rozsah Velikost frekvenčního kroku [kHz] Zbytkový NEXT Rozlišitelný krok Přesnost	1 - 350 MHz 20 - 100 dB 70 dB k 700 MHz 150, 250, 500, 1000 72 dB 0,1 dB Vyšší než úroveň 3 (dle TIA)
Zpětný odraz	Frekvenční rozsah Rozsah měření Velikost frekvenčního kroku [kHz] Rozlišitelný krok Přesnost	1 - 350 MHz 0 - 30 dB 150, 250, 500, 1000 0,1 dB Vyšší než úroveň 3 (dle TIA)
Čas testování	Kategorie 5e Kategorie 6	< 25 s < 30 s
ELFEXT	Frekvenční rozsah Rozsah měření Dynamický rozsah Velikost frekvenčního kroku [kHz] Zbytkový FEXT Rozlišitelný krok Přesnost	1 - 350 MHz 20 - 100 dB 70dB k 700 MHz 150, 250, 500, 1000 72 dB 0,1 dB Vyšší než úroveň 3 (dle TIA)

Samotný tester se skládá ze dvou přístrojů, tzv. vzdáleného měřiče (Remote Handset - RH) a měřiče s displejem (Display Handset - DH). DH se chová jako řídicí člen (master) a RH jako podřízený člen (slave). RH také ukončuje kabel a komunikuje s DH. Při měření je RH automaticky aktivován pomocí signálu, který vysílá DH. Tento signál je poslán po měřeném kabelu, který oba přístroje spojuje. Před každým měřením je třeba provést kalibraci, která je popsána níže.

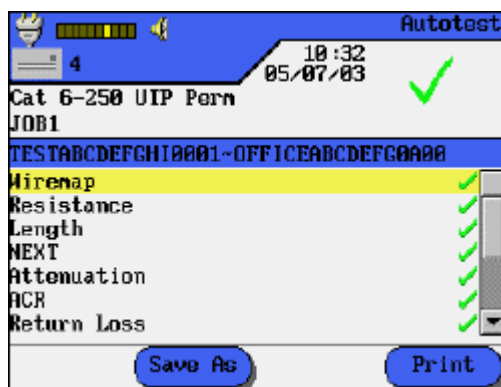


Kalibrace se provádí pomocí speciální kalibrační kroucené dvoulinky, která je součástí měřicí sady. Postup kalibrace je následující. Nejprve se pomocí tlačítka F3 na DH spustí režim kalibrace. Poté se DH a RH propojí výše zmíněnou kroucenou dvoulinkou a stiskne se tlačítko START. RH se automaticky aktivuje. Po úspěšném testu se přístroje propojí druhým kalibračním kabelem. Opět se stiskne tlačítko START. Poté se odpojí DH a připojí se k němu první kalibrační kroucená dvoulinka. Na obou přístrojích se následně stiskne tlačítko AUTOTEST. Po skončení testu je kalibrace dokončena a je možné s přístroji měřit. Celý postup kalibrace je znázorněn na obrázku 4.2.



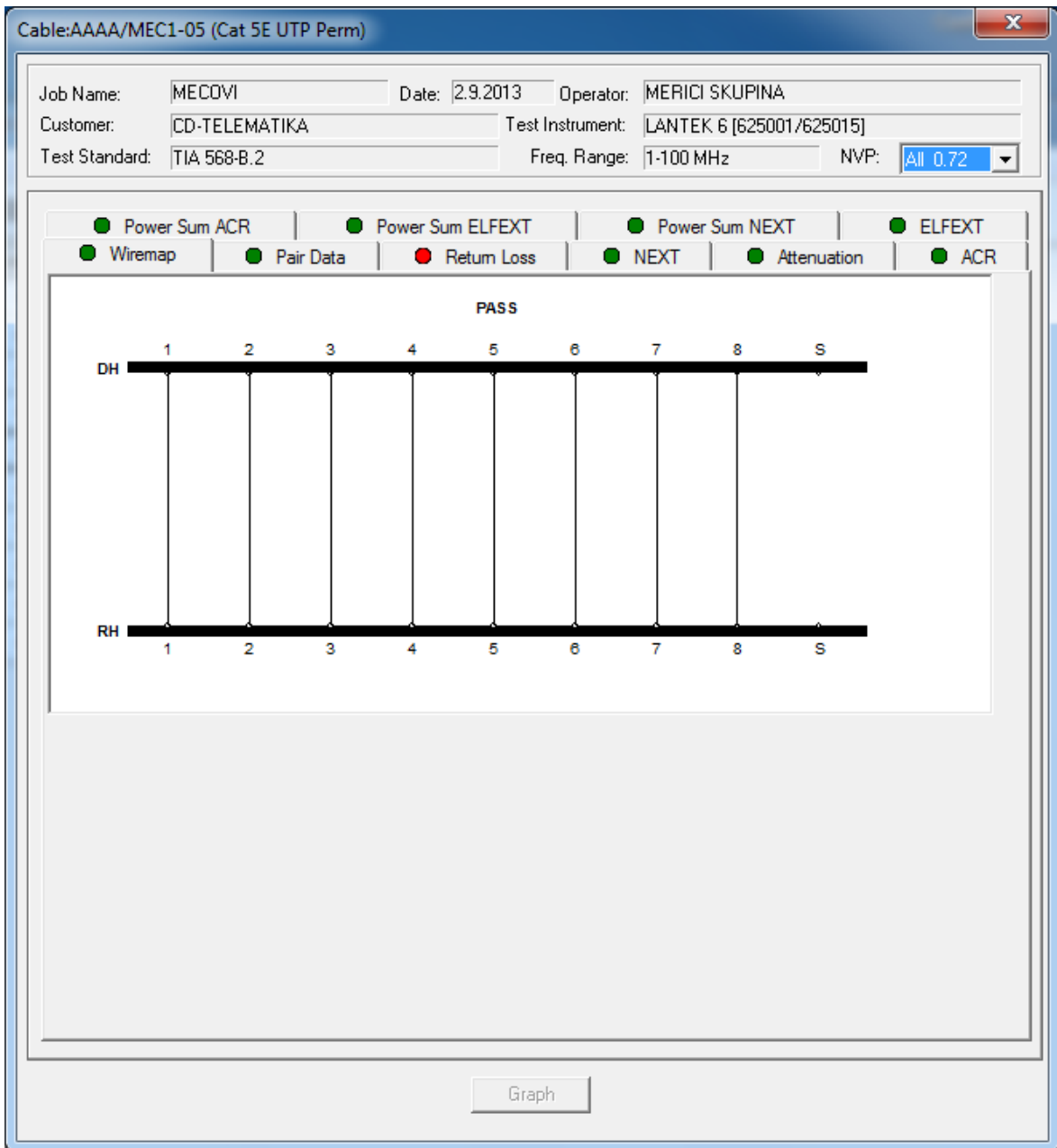
Obr. 4.2 – Kalibrace. Zdroj [7]

Samotné měření je velice jednoduché. Spočívá v prostém stisknutí tlačítka AUTOTEST na DH. Jak bylo zmíněno výše, jak DH, tak i RH musí být propojeny testovaným kabelem. Toto je nutné pro samotnou podstatu testování. DH vysílá kabelem signál a RH na něj odpovídá. Na tomto principu je založeno veškeré testování. Po ukončení testů jsou výsledky zobrazeny na displeji a uloženy do vnitřní paměti přístroje. Ukázka je zobrazena na obrázku 4.3.

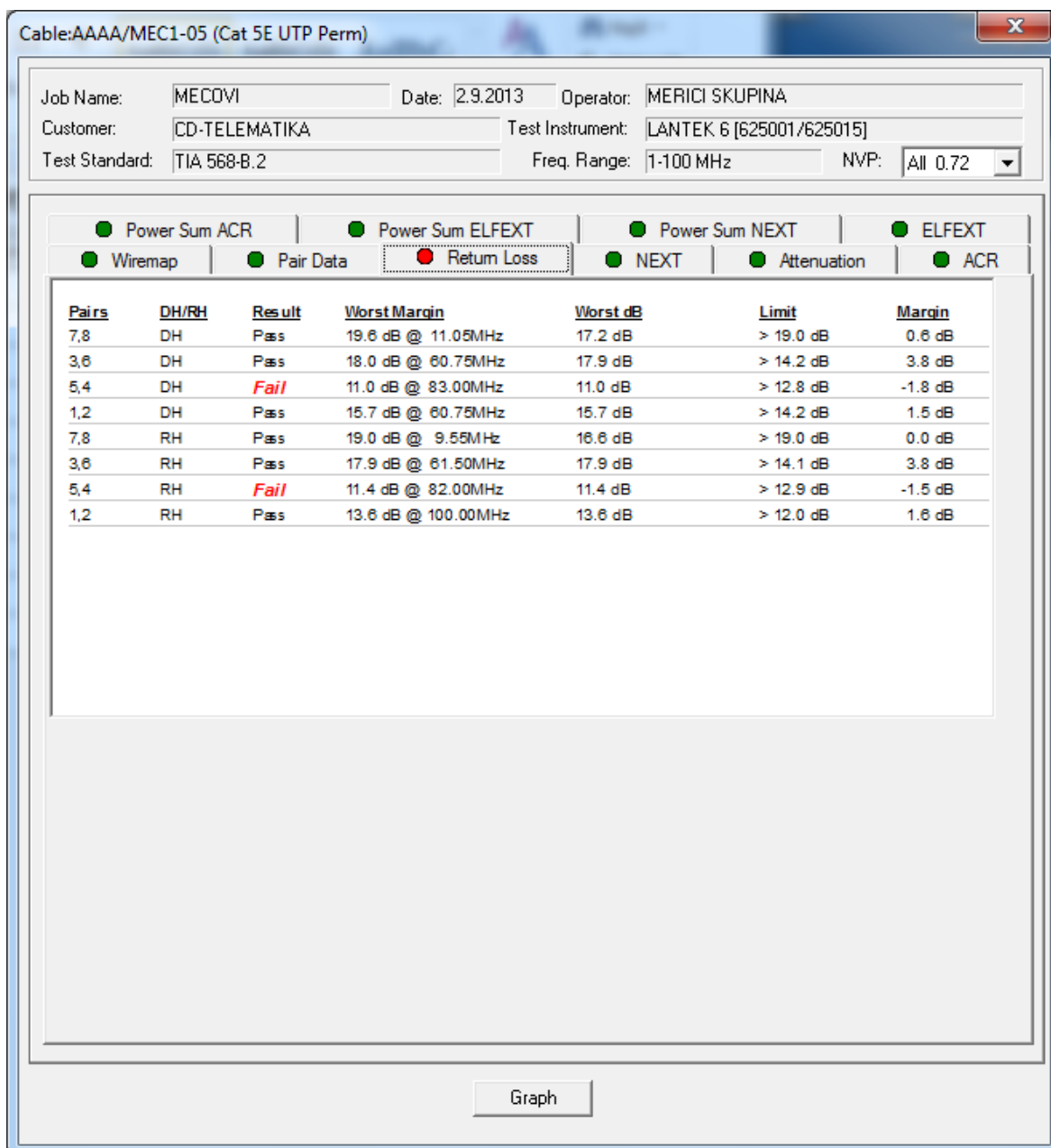


Obr. 4.3 – Ukázka naměřených hodnot. Zdroj [7]

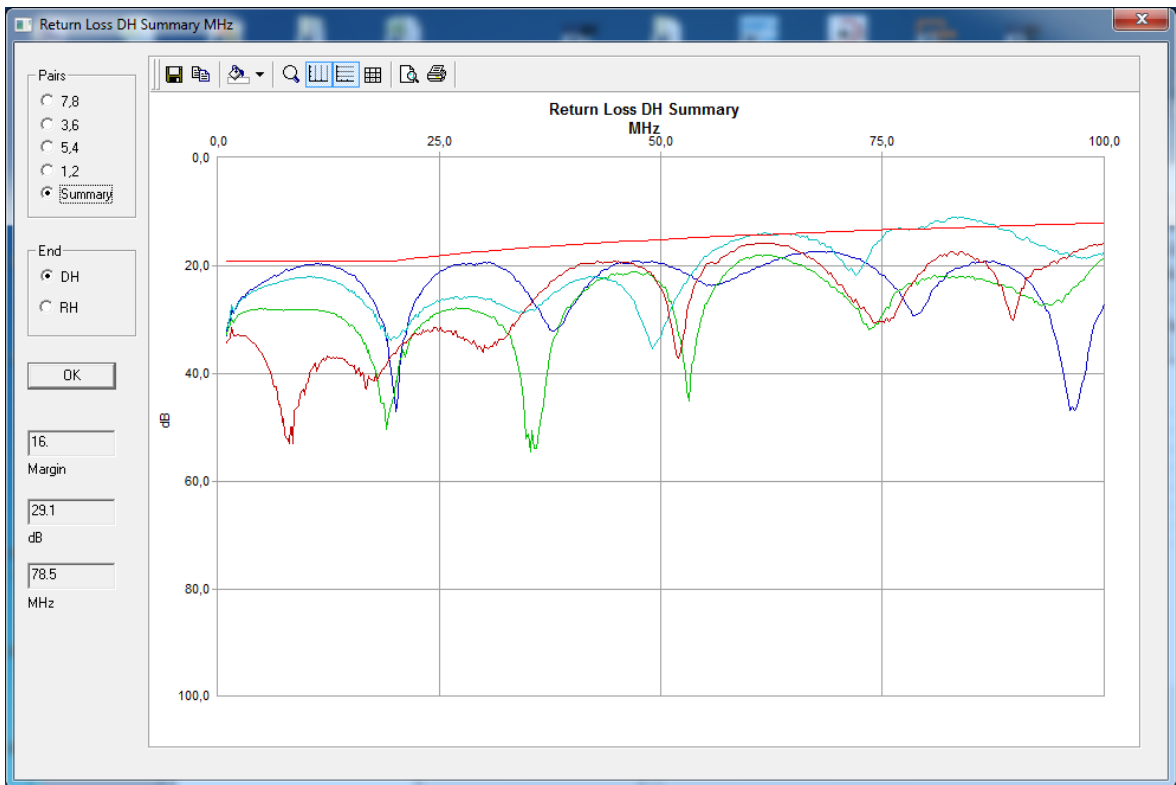
Výsledky je také možné exportovat do PC pomocí USB portu nebo tisknout na tiskárně pomocí sériového portu. V PC se výsledky zobrazují a zpracovávají v nástroji LANTEK Reporter. Tento nástroj je dodáván společně s testerem a musí být na PC nainstalován. Následují ukázky výsledků, které LANTEK Reporter poskytuje. Tyto výsledky je možné zobrazit buď textovou formou, nebo graficky.



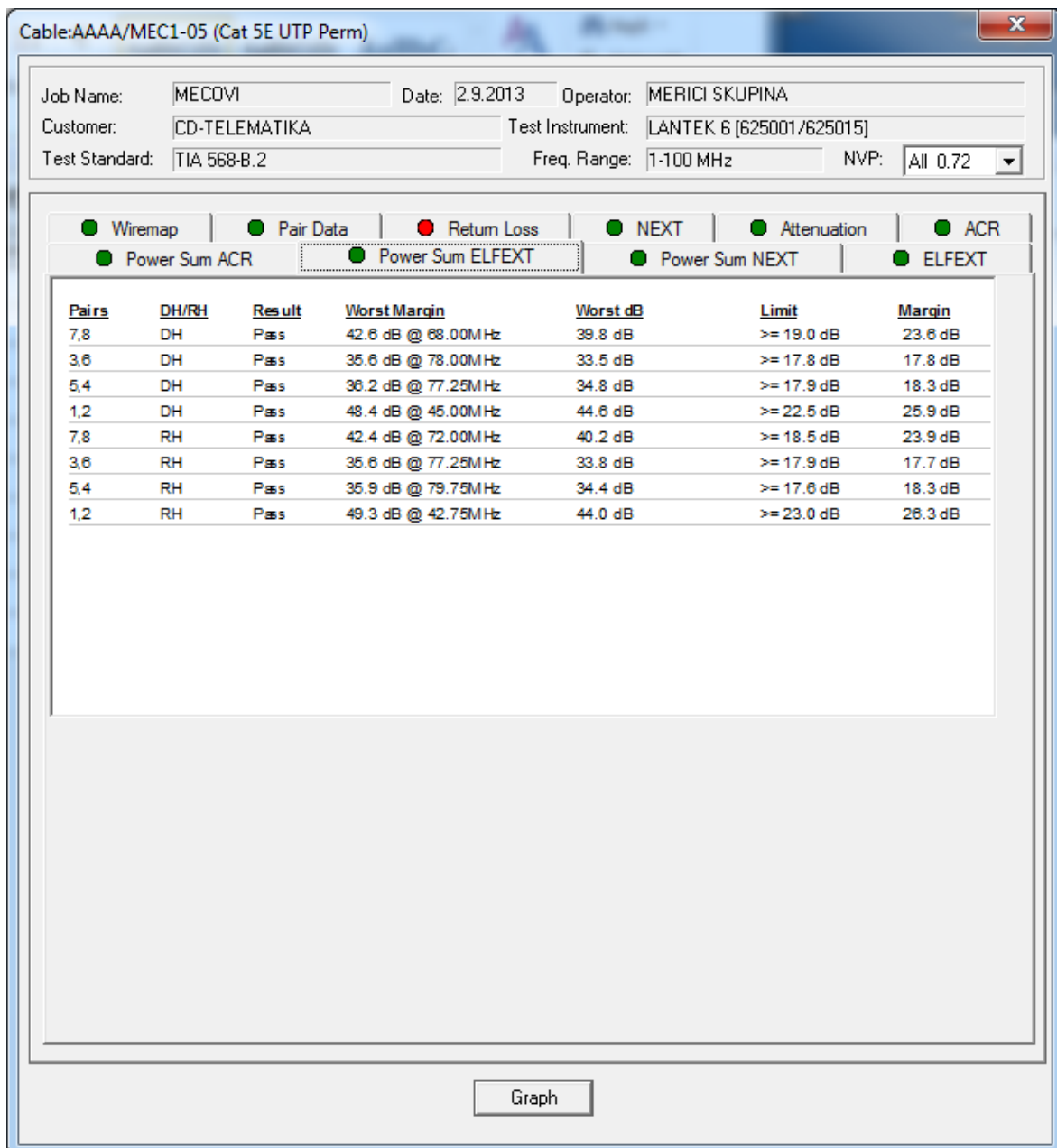
Obr. 4.4 – Výsledek Wire Map



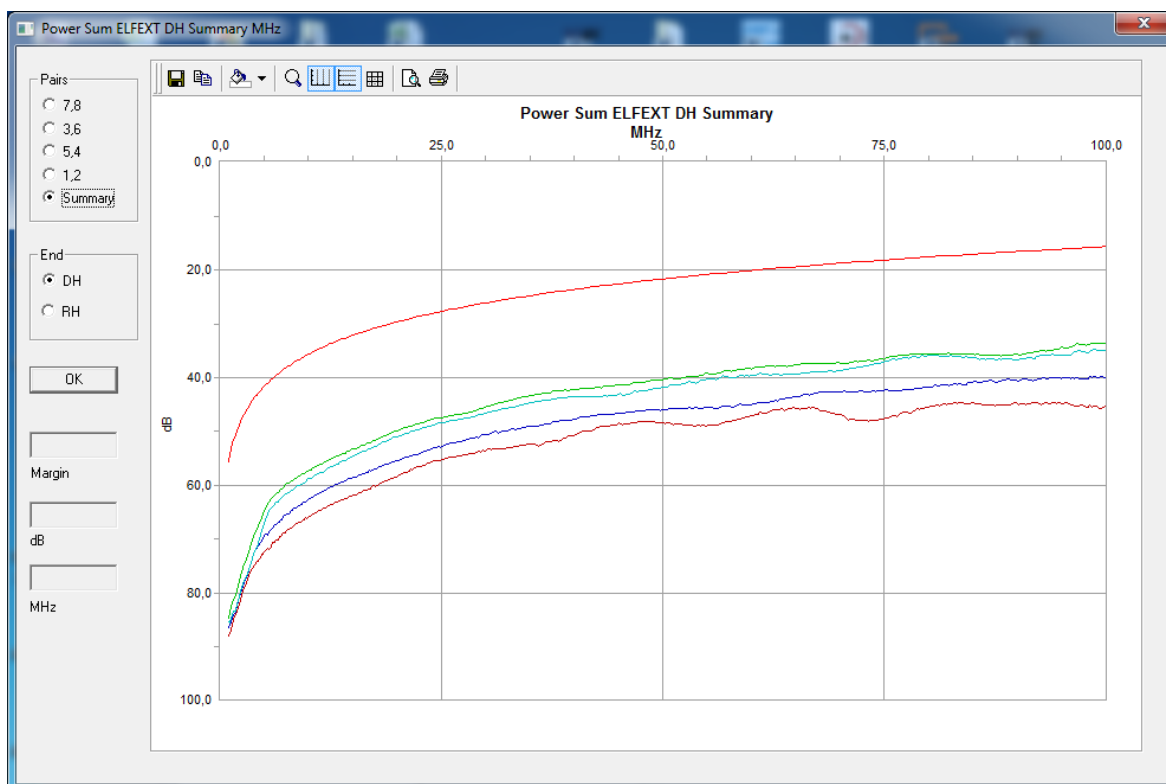
Obr. 4.5 – Výsledek Return Loss (text)



Obr. 4.6 – Výsledek Return Loss (Graf)



Obr. 4.7 – Výsledek Power Sum ELFEXT (Text)



**Obr. 4.8 – Výsledek Power Sum ELFEXT (Graf)**

Z obrázků vyplývají charakteristické vlastnosti kroucené dvoulinky. Jak lze vypožorovat, jeden parametr testy neprošel. Je jím zpětný odraz (Return Loss). Ten neprošel při dvou měřeních. Dále lze z obrázků vyvodit, že tester měří danou vlastnost vždy dvakrát pro každý pár. Toto je důležité zejména při potvrzení, jestli se jedná opravdu o neúspěch v testu nebo jen o chybu při měření.

Ve výsledcích je také uvedeno datum měření, frekvenční rozsah a standard, pomocí kterého bylo měření prováděno. Tento standard, a celá řada dalších, je již v přístroji obsažen. Proto před začátkem měření je ze seznamu vybrán standard, který odpovídá danému kabelu. Ten je na něm přímo uveden výrobcem. Správná volba standardu je kritická pro správnost měření. Pokud se standard kabelu nebude shodovat se standardem použitým v přístroji, výsledky se stanou nesprávnými a tím pádem také nepoužitelnými.

Pomocí funkce AUTOTEST lze změřit veškeré parametry, které je přístroj schopen otestovat. Pokud je potřeba změřit jen určité veličiny, AUTOTEST se nepoužívá, ale v nastavení přístroje se vyberou pouze požadované parametry. Stejně tak lze před měřením nastavit název měření, pracovní skupinu, jednotky, ve kterých se bude měřit (metry nebo stopy), nebo paměťové médium, na které se budou výsledky ukládat.

## 4.2 aTen ACT6000

Tento přístroj, výrobcem definovaný jako soukromá laboratoř, slouží ke komplexnímu měření různých elektromagnetických veličin. Stejně jako předchozí přístroj je i tento tester schopen změřit veškeré parametry strukturované kabeláže. Navíc poskytuje možnost měřit i další vlastnosti. Některé typy měření jsou zobrazeny a popsány níže.



Obr. 4.9 – aTen ACT6000. Zdroj [1]

### Automatic Copper Pairs Qualification

Tento test slouží k určení kvality kroucené dvoulinky. Před samotným měřením je třeba nastavit typ kabelu (dvou nebo čtyř párový) a typ služby: Hlas, ISDN, HDSL, SDSL, ADSL, ADSL2+ nebo VDSL 1/2. Po otestování jsou výsledky zobrazeny na displeji.

The image is a screenshot of the SELT Line Measures display on the aTen ACT6000. It shows a list of electrical and communication parameters for a line. The display is organized into columns for 'Measure', 'ADSL2+', 'Cen.Office', and 'Subscriber'.

Measure	ADSL2+	Cen.Office	Subscriber
AC Voltage		0.02 Vac	
DC Voltage		0.12 Vdc	
Insulation		218.7 MΩ	
AC Capacitance		97.3 nF	
DC Capacitance		104.7 nF	
Return Loss		-17.4 dB	
Noise		-73.4 dBm	-84.7 dBm
Long. Balance		-61.2 dB	
Crosstalk			
End of Line		2124 m	
Attenuation		-24.3 dB	
Bit-Rate		480 kbps	6112 kbps

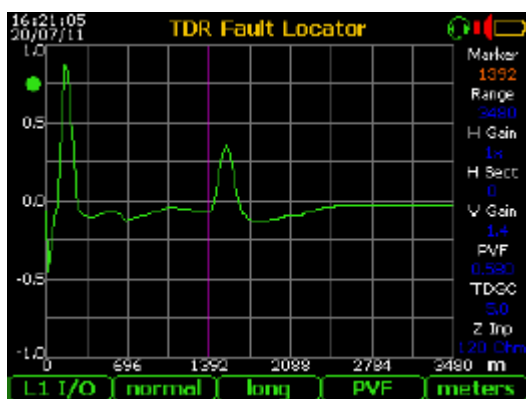
At the bottom of the screen, there are 'Save' and 'View' buttons.

Obr. 4.10 – Automatic Copper Pair Qualification. Zdroj [1]



## TDR fault locator

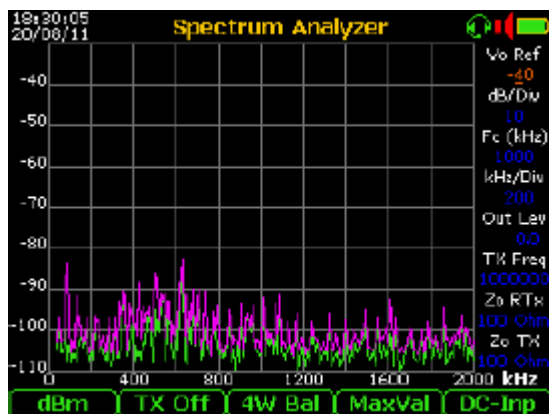
Toto měření umožňuje zjistit odchylky impedance uvnitř kabelu. Tyto odchylky jsou na displeji zobrazeny jako pulsy. Výchylka směrem nahoru představuje nárůst impedance a přerušovaný obvod. Výchylka směrem dolů znamená zkrat nebo také úbytek impedance. Tento typ měření poskytuje také představu o celkové délce kabelu. Ta je na displeji vyjádřena fialovou svíslicí. Ukázka tohoto typu měření je znázorněna na obrázku 4.11.



Obr. 4.11 – TDR fault locator. Zdroj [1]

## Spectral noise

Pomocí spektrálního analyzátoru lze měřit spektrální šum a jiné veličiny. Na obrázku 4.12 je zachyceno měření spektrálního šumu na kroucené dvojlince použité s technologií ADSL2+, kde se šířka pásma pohybuje od několika kHz do 2 MHz.



Obr. 4.12 – Spectral noise. Zdroj [1]

## Power Spectral Density

Power Spectral Density (PSD) neboli spektrální hustota výkonu může být měřena pouze v omezené šířce pásma. V tomto případě, na obrázku 4.13, je PSD měřena pro klasické ADSL. Útlum v pravé části grafu je způsoben velkou délkou kabelu (asi 3 km).



Obr. 4.13 – PSD. Zdroj [1]

Přístroj ACT6000 je dále schopen měřit přeslech, útlum, napětí, slabě izolovaná místa, odpor, ale i další veličiny. Stejně jako předchozí přístroj tak i tento umožňuje export dat. Data ovšem není možné uložit přímo do PC, ale pouze na USB Flashdisk. Výsledky měření lze ukládat jako soubory formátu .CSV. Lze také ukládat snímek obrazovky a to jako obrázek formátu .BMP.

### 4.3 Vyhodnocení

Oba testované přístroje lze použít k měření strukturované kabeláže, protože jsou schopny změřit všechny parametry přenosového média, konkrétně kroucené dvoulinky. Přístroj od společnosti Lantek je schopen navíc testovat i optická vlákna pomocí speciálního modulu. Tuto funkcionalitu sice přístroj aTen ACT6000 nemá, ale zato je schopen změřit velké množství elektromagnetických veličin. Obecné použití obou přístrojů se tedy liší. Zatímco přístroj Lantek se hodí výhradně pro měření strukturované kabeláže, přístroj aTen nalezne své využití například při testování telefonních rozvodů nebo elektrických vlastností daného kabelu. Stručné porovnání parametrů strukturované kabeláže, které jsou schopny oba přístroje změřit je uvedeno v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 – Porovnání přístrojů. Zdroj [1, 5]

Parametr	Specifikace	Přístroje a hodnoty	
		Lantek Category 6 tester	aTen ACT6000
Přeslech	Frekvenční rozsah	1 - 350 MHz	200 Hz - 6MHz
	Přesnost	Není přesně uvedeno	asi 2 dB
	Vlastní přeslech	72 dB	< 90 dB
Zpětný odraz	Frekvenční rozsah	1 - 350 MHz	200 Hz - 6MHz
	Přesnost	Není přesně uvedeno	asi 2 dB
Útlum	Frekvenční rozsah	1 - 350 MHz	20 kHz - 30 MHz
	Přesnost	Není přesně uvedeno	asi 1,5 dB
Délka	Rozsah	610 m	0 - 99,999 km
	Rozlišitelný krok	1 stopa	1 m
Kapacitance kabelu	Rozsah	0 - 100 nF	0,1 - 3000 nF
	Rozlišitelný krok	3°	0,1 nF
	Přesnost	± (2% + 20pF)	asi 3% + 1 nF

## Závěr

Cílem teoretické části práce byl popis jednotlivých typů přenosových médií. Tato média se dělí na drátová a bezdrátová. Drátová média se dále dělí na vodivá a nevodivá. Největší důraz byl kladen na média drátová. Jejich jednotlivé typy byly popsány z hlediska svých vlastností a možností použití. Popsána byla také stavba jednotlivých médií. Dále byly popsány také 3 typy médií bezdrátových a to média založená na infračerveném přenosu, radiofrekvenční systémy a mikrovlnná komunikace.

Jedna kapitola byla také vyhrazena pro kódování signálu. To je nedílnou součástí přenosu dat v počítačových sítích. V této kapitole byl signál rozdělen na analogový a digitální. Dále byly popsány některé nejpoužívanější metody kódování. Patří mezi ně zejména NRZ, NRZI, Manchester, 4B/5B nebo MLT-3. Bylo zjištěno, že každý typ kódování pracuje na jiném principu a má jiné výhody a nevýhody oproti ostatním metodám.

Poslední kapitola teoretické části se zabývala základními vlastnostmi drátových přenosových médií. Nejprve byly popsány 2 společné parametry a to přenosová a modulační rychlost. Poté následoval popis parametrů, kterými se vyznačují jednotlivá přenosová média. Tyto parametry byly zvláště popsány pro kroucenou dvoulinku, koaxiální kabel a optické vlákno. Bylo zjištěno, že kroucená dvoulinka a koaxiální kabel mají některé tyto parametry společné. Optické vlákno disponuje parametry odlišnými. To je dáno již samotným principem přenosu signálu pomocí těchto médií. Zatímco kroucená dvoulinka a koaxiální kabel přenášejí signál elektrický, optické vlákno přenáší signál světelný. Zejména u optického vlákna byly některé jeho vlastnosti popsány i fyzikálními vztahy.

V praktické části byly předešlé poznatky využity k porovnání některých měřících přístrojů sloužících k testování přenosových médií. Porovnány a popsány byly 2 přístroje a to LANTEK Category 6 tester a aTen ACT6000. Přístroje byly porovnány z hlediska měřících parametrů, způsobu použití a možnosti měření dalších veličin. Oba přístroje lze použít k měření parametrů kroucené dvoulinky. Přístroj firmy Lantek je navíc schopen také testovat optická vlákna a koaxiální kabel. Bylo zjištěno, že první přístroj lze využít zejména při měření strukturované kabeláže, zatímco přístroj druhý nalezne využití zejména v testování telefonních rozvodů a měření elektromagnetických veličin. Velkou výhodou přístroje firmy Lantek je možnost exportu výsledků měření do PC, kde jsou data snadněji čitelná a také graficky znázorněna. Obecně cílem praktické části bylo popsat vlastnosti jednotlivých přístrojů a určit jejich možnosti použití.

## Literatura

- [1] ATEN SISTEMI ELETTRONICI. *ACT6000 Advanced Communication Tester: User Guide*. 2014
- [2] FLUKE NETWORKS. *DTX Series Cable Analyzer: Technical Reference Handbook*. 3. vyd. duben 2004. Dostupné z:  
[http://www2.warwick.ac.uk/services/its/servicessupport/cabling/activities/man\\_techref\\_r3\\_dtxseriescableanalyzer\\_us.pdf](http://www2.warwick.ac.uk/services/its/servicessupport/cabling/activities/man_techref_r3_dtxseriescableanalyzer_us.pdf)
- [3] GROTH, David, Jim MCBEE a David BARNETT. *Cabling: the complete guide to network wiring*. 2nd ed. San Francisco: Sybex, c2001, xxxii, 808 p. ISBN 07-821-2958-7.
- [4] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. Chromatická disperze jednovlákenných optických vláken a její měření. *Mikrokom* [online]. 2003 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/chrom-disperze.pdf>
- [5] IDEAL INDUSTRIES, INC. *LANTEK Cable Tester User's Guide*. San Diego, 2003
- [6] Kódování dat pro přenos. [online]. 2012 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z:  
[http://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=53406](http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=53406)
- [7] LIZAMA, Michael. IDEAL INDUSTRIES, Inc. *LANTEK 6/6A/7G Tester CAT 5E Setup Procedure*. 2006
- [8] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna*. Ostrava, 2006. Dostupné z:  
<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroniky a sdělovací techniky.
- [9] MLT-3 encoding. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-27]. Dostupné z:  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/MLT3encoding.svg>
- [10] ODVÁRKA, Petr. Měření kabeláže. In: *Svět sítí: Informace ze světa počítačových sítí* [online]. 28. června 2001 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z:  
<http://www.svetsiti.cz/clanek.asp?cid=Mereni-kabelaze-2862001>
- [11] PASCHOTTA, Rüdiger. Fibers. In: *RP Photonics: Encyclopedia* [online]. 2014 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.rp-photonics.com/fibers.html>
- [12] Seriál na pokračování: Antény a impedance. In: *OK2BUH* [online]. 2006 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://ok2buh.nagano.cz/first/impedance.html>
- [13] POMYKACZ, Ivan. *Počítačové sítě*. 2004.
- [14] *Přenosová média*. 2006. Dostupné z:  
[www.bakal06.chytrak.cz/2006\\_K46\\_Prenosova-media.doc](http://www.bakal06.chytrak.cz/2006_K46_Prenosova-media.doc)
- [15] Ramanova spektroskopie. *Ústav chemie přírodních látek* [online]. 2012 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/lam/new/SpAnalPL-3.pdf>

- [16] Rozdíly mezi kabely dle jejich označení. In: *KABELÁŽSTRUKTUROVANÁ.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.kabelazstrukturovana.cz/utp-ftp-nebo-stp-kabel>
- [17] Strukturovaná kabeláž. In: *MIRICOM* [online]. 2008 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: [http://www.miricom.cz/strukturovana\\_kabelaz.html](http://www.miricom.cz/strukturovana_kabelaz.html)
- [18] SÝKORA, J. Typy a vlastnosti optických vláken. In: *Access server* [online]. 28. 07. 2004 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072802>
- [19] THIBEN, Dirk. Layer 1 – Physical Layer. *Lehrstuhl für Informatik 4: Kommunikation und verteilte Systeme* [online]. 2004 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: [http://www-i4.informatik.rwth-aachen.de/content/teaching/lectures/sub/datkom/WS04-05/02\\_Layer1.pdf](http://www-i4.informatik.rwth-aachen.de/content/teaching/lectures/sub/datkom/WS04-05/02_Layer1.pdf)
- [20] Transmission Media. [online]. 2003 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.di.unisa.it/~vitsca/RC-0809I/ch04.pdf>
- [21] ŤUPA, Martin, Miloslav FILKA a Otto DOSTÁL. Polarizační vidová disperze - PMD. *Elektrorevue* [online]. 2014, roč. 14, č. 2 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/45/polarizacni-vidova-disperze---pmd/>
- [22] VAVREČKOVÁ, Šárka. *Počítačové sítě a decentralizované systémy*. Opava, 13. dubna 2010. Dostupné z: <http://fpf.slu.cz/~vav10ui/opsys.html>
- [23] Wired Transmission Media. In: *Computer Networking Lecture Notes* [online]. 2013 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://bluehawk.monmouth.edu/~rclayton/web-pages/s13-cn/phlrm.html>
- [24] ZELNÍČEK, Petr. Strukturovaný kabelážní systém: optická kabeláž - příručka. *VARIANT plus* [online]. 2011 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: [http://www.variant.cz/soubory-ve-skladu/Karty/Spol\\_Zarazene/01-MANU%C3%81LY%20CS/SKS%20prirucka%20-%20man-a4.pdf](http://www.variant.cz/soubory-ve-skladu/Karty/Spol_Zarazene/01-MANU%C3%81LY%20CS/SKS%20prirucka%20-%20man-a4.pdf)
- [25] ŽÁČEK, Martin. *Nelineární charakter optického prostředí*. Brno, 2008. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=7994](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7994). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.