

Pavel Dytrych - 527565

Seminární práce

ISKB30 Informace, komunikace a identita

Komparace analogového a digitálního přenosu dat.

Autor: Pavel Dytrych, UČO: 527565

Ročník: 2.

Typ studia: kombinované

Počet znaků: 17155

Obsah

Seminární práce.....	1
ISKB30 Informace, komunikace a identita	1
.....	1
Úvod	3
Úvod do tématu komparace analogového a digitálního přenosu dat	3
Analogový přenos dat.....	5
Výhody a nevýhody analogového přenosu a jeho zpracování	5
Využití analogového přenosu dat	7
Digitální přenos dat	8
Závěr	10
Bibliografie	11

Úvod

Úvod a historie analogového a digitálního přenosu dat

Sběr a přenos dat je nedílnou součástí současné společnosti a defacto se dá říct, že moderní společnost je na sběru a přenosu dat postavena. Způsobů, jak data přenášet, existuje celá řada, v této seminární práci se však zaměřuji pouze na přenos za pomoci elektrické energie, respektive elektrických signálů a zaměřuji se na porovnání jejich analogové a digitální formy, a to jak z hlediska technického provedení, tak z hlediska jejich využití v současnosti.

V seminární práci se zabývám převážně přenosem pomocí metalických sítí, tedy za pomoci drátů, bezdrátové komunikaci se v práci nevěnuji, neboť problematika bezdrátového přenosu dat je velmi rozsáhlá a její rozbor přesahuje rámec této práce.

Myšlenky na přenos dat a informací za pomoci elektrického proudu se objevili na začátku 19. století, kdy tato postupně docházelo k popisování jednotlivých elektrických veličin, jako je například elektrický náboj anebo napětí.

První skutečný přenos dat za pomoci elektřiny na velkou vzdálenost byl uskutečněn Samuelem Morsem a Alfredem Vailem za pomoci telegrafu 24. května 1844 a to mezi americkými městy Washington a Baltimore¹.

Vývoj v odvětví přenosu dat pak dále pokračoval vynálezem telefonu A. G. Bellem v roce 1877 a prvním uskutečněným dálkovým hovorem mezi městy Boston a New York v roce 1884,²³. Za velký milník pak lze označit první bezdrátové přenosy dat, a to za pomoci bezdrátového telegrafu vynalezeného Guglielmem Marconim v roce 1896⁴ a následný první přenos lidského hlasu v roce 1900 Kanaďanem R. A. Fessendenem, který tak položil základ rozhlasovému vysílání v podobě, jakou známe dodnes.⁵

Všechny tyto dosavadní úspěchy byly realizovaný za pomoci analogového přenosu dat, byť v případě telegrafu, který k přenosu dat využíval Morseův kód, by bylo možné jej z určitého hlediska označit za přenos digitální. Signál byl však stále vyhodnocován analogovým způsobem a samotná data nebyla kromě překladu do Morseova kódu nijak kódována a jednalo se tak pouze o přepis do jiného typu abecedy, který měl za úkol standardizovat formát přenášených dat.

Digitální přenos se začíná objevovat koncem první poloviny 20. století a je spjat s nástupem výpočetní techniky, která z pravidla fungovala již na digitálním principu a pracovala ve dvojkové soustavě, jedním z prvních počítačů pracujících na těchto základech byl například počítač Z1 vyvinutý Konradem Zusem ve 30. letech⁶.

¹ Morse Code & the Telegraph. Dostupné z: <https://www.history.com/topics/inventions/telegraph>.

² Historie vývoje telefonů. Dostupné z: <https://www.algotech.cz/novinky/2018-02-26-historie-vyvoje-telefonu>.

³ RANDALL, Eric. Throwback Thursday: The First Phone Calls from New York to Boston.

⁴ SKRZECZKOVA, Lenka. 12. prosince Marconi uskutečnil první bezdrátový přenos zvuku přes oceán. O osm let později zachránil život 2 000 lidem.

⁵ FRY, Mervyn C. Radio's First Voice...Canadian!.

⁶ Zuse Z1 built by Konrad Zuse. Dostupné z: <http://www.computinghistory.org.uk/det/6170/Zuse-Z1-built-by-Konrad-Zuse/>.

Pro doplnění je vhodné zmínit, že existovali také počítače založené na analogovém principu, které určitou dobu koexistovali s počítači digitálními, například analogový počítač MEDA se v Československé republice vyráběl ještě v 70. letech⁷.

Spolu s vývojem nových typů počítačů docházelo i k postupnému vývoji digitální komunikace, a to jak té velké vzdálenosti, tak naopak i té, která sloužila velmi specifickým účelům, jako je například komunikace mezi jednotlivými periferiemi počítače a která tak byla realizovaná na velmi krátkou vzdálenost.

Velkými milníky v digitální komunikaci na velké vzdálenost lze označit rok 1940, kdy profesor G. Stibitz zrealizoval komunikaci za pomoci standardní telefonní linky mezi dvěma pracovišti Dartmouth College v New Yorku. O tři roky později se společnosti IBM podařilo tuto technologii vylepšit a za pomoci automatických telegrafů a tiskáren dřevných štítků dosáhnout rychlosti až 25 bitů za sekundu.⁸ To vývojové kroky postupně vedli ke zdokonalování komunikace a budování komunikačních sítí až ke spuštění sítě ARPANET v roce 1969, která je předchůdcem dnešního internetu.⁹

Co se týče komunikace na krátké vzdálenosti, tak překotný vývoj začal na přelomu 50. a 60. let, kdy se začali prosazovat polovodiče a s nimi integrované obvody, které umožňovali snadnou rozšiřitelnost těchto počítačů. Z tohoto důvodu byla potřebná standardizace dat, která mohl počítač svými vstupy přijímat, což vedlo ke vzniku počítačových protokolů neboli předpisů a formátů, které definují, jakým způsobem mají data komunikačními cestami proudit. Z této doby tak pochází i několik protokolů a komunikačních rozhraní, které jsou dodnes využívány, jako je například rozhraní RS-232 z roku 1962¹⁰.

Digitální forma komunikace postupně vytlačila analogu vyjma několika oblastí, kde se s analogovou formou můžeme stále setkat, jako je například vysílání rozhlasu, které sice již také přechází na digitální formu, její analogová varianta však ještě stále funguje a její vypnutí se v nejbližší době neočekává.¹¹

Jiná situace je ovšem v případě sběru dat, kde vzhledem k fyzikálním principům stále dominuje analogový přenos, a to z toho důvodu, že měření neelektrických veličin pomocí elektrického proudu je nejsnáze realizovatelné právě převodem hodnoty dané veličiny na veličinu elektrickou.¹²

⁷ Analogové a hybridní počítače. Dostupné z: <https://historiepocitacu.cz/analogove-a-hybridni-pocitace.html>.

⁸ A Brief History of Data Communications. Dostupné z: <https://www.incognito.com/blog/a-brief-history-of-data-communications-2/>.

⁹ A Brief History of Data Communications. Dostupné z: <https://www.incognito.com/blog/a-brief-history-of-data-communications-2/>.

¹⁰ DORSCH, Jeff. Older Communication Standards Still Compete with USB.

¹¹ Konec analogového FM vysílání v Česku nehrozí, DAB+ se může rozvíjet vedle něho. Dostupné z: <https://digital.rozhlas.cz/konec-analogoveho-fm-vysilani-v-cesku-nehrozi-dab-se-muze-rozvijet-vedle-neho-8600827>.

¹² BHATIA, A. Principles and Methods of Temperature Measurement.

Analogový přenos dat

Analogovým přenosem se rozumí takový přenos, který je přenášen kontinuálním neboli spojitým signálem, který se v čase neustále mění. Veličinou přenášející data, je tak v případě přenosu pomocí elektřiny hodnota aktuálního napětí, popřípadě proudu, z principu však není problém přenášet analogové hodnoty i za pomoci jiných médií, jako je například voda, či vzduch uzavřený v potrubí, přičemž samotné přenášené hodnoty mohou být přenášeny pomocí tlaku.¹³

Jak již bylo zmíněno v úvodu, dříve byly analogové signály využívány zejména v komunikaci, odkud jsou však postupně vytlačovány signály digitálními. Analogové signály však i dnes nachází uplatnění ve specifických aplikacích, jako je již zmíněné měření neelektrických veličin, kdy je měřená veličina převedena na jednu ze základních elektrických veličin, jako je například odpor (využívá se např. měření teploty¹⁴), elektrická kapacita (např. tloušťka materiálu, přítomnost¹⁵) anebo napětí (např. rychlost měřená pomocí tachometru¹⁶). Hodnoty těchto veličin se následně převedou na napětí (v případě například odporu pomocí napěťového děliče) a takto získaný spojitý signál již udává velikost měřené veličiny ve zpracovatelné formě, přičemž velikost měřené veličiny se určí jako poměr napětí, ku hledané veličině. Tento poměr pak závisí na metodě samotného převodu na napětí.¹⁷

Výhody a nevýhody analogového přenosu a jeho zpracování

Velkou výhodou analogového přenosu dat je jeho přirozený charakter, který v určitých aplikacích usnadňuje jeho zpracování.

Pokud tedy analogově přenášíme například zvuk, jedná se pouze o převod akustických vln do vln elektrických, typicky se tak děje pomocí mikrofону, kdy akustická vlna rozkmitává membránu s magnetem a ta následně generuje odpovídající napětí v cívce, po patřičném zesílení jej pak můžeme inverzním procesem přehrát.¹⁸

Velkým problémem analogového přenosu je však jeho velká náchylnost k rušení, kdy externími vlivy dochází k indukci náhodných proudů, které znehodnocují přenášená data. V případě analogového přenosu je pak následná oprava dat velmi náročná a spíše nemožná.¹⁹

Další komplikací související s používáním analogového signálu je pak jeho zpracování výpočetní technikou, která je dnes výhradně digitální. Převod analogového signálu na digitální se děje v AD převodníku (z angl. Analog-digital converter), kdy je velikost

¹³ *Fundamentals of Analog & Digital Signal Processing* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333224643_Fundamentals_of_Analog_Digital_Signal_Processing/related.

¹⁴ BHATIA, A. Principles and Methods of Temperature Measurement.

¹⁵ USING CAPACITANCE SENSORS FOR NON-CONDUCTIVE MATERIAL MEASUREMENT. Dostupné z: <https://mtiinstruments.com/non-conductive-material-measurement/>.

¹⁶ GROVER, Jasmine. Measurement of Speed: Definition, Units, & Applications.

¹⁷ BHATIA, A. Principles and Methods of Temperature Measurement.

¹⁸ SHARMA, Shabbu. Digital signal and Analog signal | Difference between Digital and Analog signal | Advantages and Disadvantages.

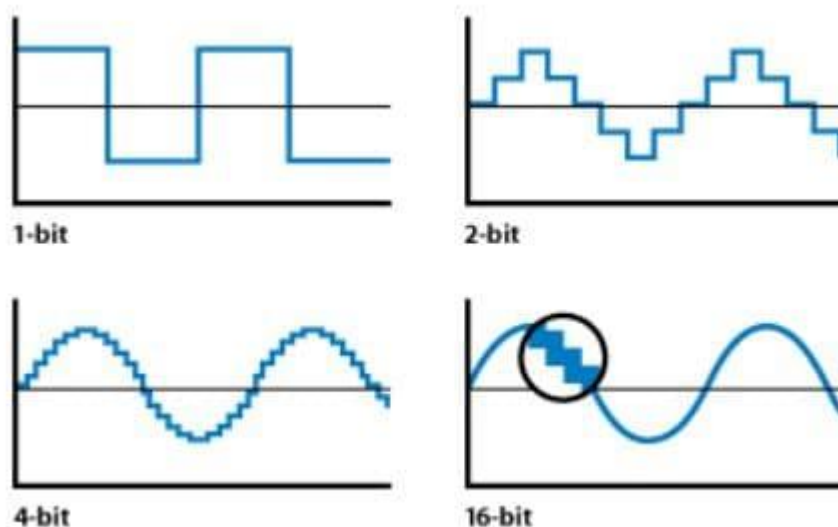
¹⁹ SHARMA, Shabbu. Digital signal and Analog signal | Difference between Digital and Analog signal | Advantages and Disadvantages.

analogového signálu periodicky měřena ve stejně velkých, po sobě jdoucích časových úsecích, tento časový úsek se označuje jako perioda měření a jeho převrácená hodnota udává vzorkovací frekvenci [Hz], která udává počet změřených vzorků za sekundu [S/s], což je jeden z hlavních parametrů určujících přesnost měření.²⁰ Zde je dobré zmínit, že pokud chceme při konverzi zachovat původní frekvenci analogového signálu, je jej dle Shannon-Nyquistova teorému nutné vzorkovat s dvojnásobnou frekvencí, než má původní signál, pro přesné zaznamenání amplitudy, pak musí být měřicí frekvence ještě mnohonásobně vyšší (dle složitosti signálu).²¹

Dalším důležitým parametrem AD převodníku je pak jeho rozlišení, které se udává v bitech a zjednodušeně určuje, kolik hodnot dokáže na měřeném rozsahu AD převodník naměřit, čímž udává i nejmenší měřitelný rozdíl napětí. Například pro rozsah měřeného napětí 0-5V a přesnost AD převodníků 10 bitů, pak výpočet přesnosti vypadá následovně:

$$\frac{\text{Rozsah [V]}}{\text{rozlišení ADC [-]}} = \frac{5}{2^{10}} \cong 0.0049V$$

Pro tento AD převodník a daný rozsah měření je tak nejmenší měřitelná hodnota přibližně 0.0049V, problémem ovšem je, že z důvodu již zmíněného rušení je tato hodnota v praxi většinou podstatně větší.



Obrázek 1 - Přesnost měření v závislosti na frekvenci

Obrázek č.1 pak zobrazuje rozdíl v naměřených hodnotách pro různé rozlišení AD převodníku, z grafů je patrné, že rozlišení značně ovlivňuje výsledný naměřený signál a při příliš malých hodnotách rozlišení jeho průběh absolutně neodpovídá realitě.

Analogickým procesem k AD převodu je převod mezi digitálním a analogovým signálem, děje se tak inverzím způsobem za pomoci DA převodníku (z angl. Digital-analog converter) s tím rozdílem, že na výstupu je vhodné signál dodatečně vyhladit, neboť výstup není spojitý, což by mohlo některým analogovým zařízením působit problémy. Vzhledem k

²⁰ GUDINO, Miguel. Analog-to-Digital Converters Basics.

²¹ WRIGHT, Gavin. Nyquist theorem.

tomu, že DA převod je poněkud technicky komplikovanější než AD převod, existují i zjednodušující metody, jako je například pulsně šířková modulace (PWM)²².

Z výše uvedených informací plyne, že velkou nevýhodou takto zpracovaného signálu je určitá míra ztrátovosti dat při převodu. Typickým příkladem je například digitalizace zvuku, kdy není možné vzorkovat s nekonečně velkou vzorkovací frekvencí a rozlišením.

Využití analogového přenosu dat

Jak již bylo několikrát zmíněno, hlavní využití analogových signálů je v současnosti spojeno s měřením neelektrických veličin, kde s největší pravděpodobností nedojde v nejbližší době k žádné velké změně.

Velké využití stále nacházejí v audio technice, kde má i přes probíhající digitalizaci analogový signál stále převahu, která je dána fyzikálním principem šíření zvuku, a tak lze očekávat, že i zde nedojde k žádné větší změně.

Co se komunikace týče, tak zde již převažují zejména digitální systémy, a i přes například stále fungující analogové rozhlasové vysílání lze očekávat, že dojde k jeho postupnému úplnému vypnutí.

Analogový signál však stále hraje velkou roli v amatérském rádio vysílání, takzvaném HAM rádiu, což je zkratka pro „Hobby amatérské rádio“, kterým se propojují radioamatéři po celém světě.²³

²² HEATH, Janet. PWM: Pulse Width Modulation: What is it and how does it work.

²³ Co je HAM Radio?. Dostupné z: <https://www.crk.cz/CZ/CJHRC>.

Digitální přenos dat

Digitální neboli číslicový přenos se od toho analogového odlišuje zejména svojí diskrétní charakteristikou a formátem přenášených dat. Diskrétní charakteristika znamená, že signál není spojitý a data jsou během přenosu zakódována do zpravidla dvoustavových hodnot, které se nazývají bity, přičemž možné hodnoty přenášené jedním bitem jsou log. 0 anebo log. 1²⁴, bit tak představuje základní jednotku přenášené informace.

Zde je však nutné doplnit, že bit, jakožto nejmenší jednotka informace se využívá z důvodu binárního charakteru dnešních počítačů, dříve se experimentovalo například s ternárními počítači, ale v současné době se nikterak nevyužívají. Možnou změnou tohoto paradigmatu však může být nástup kvantových počítačů a jednotky qubit, v tomto případě se ale jedná o kompletní změnu chápání funkce počítače.²⁵

Reálná reprezentace bitu a jeho hodnot pomocí napětí je pak určena typem využitě logiky, kdy například TTL logika vyhodnocuje napětí 0-0.8V jako log.0 a napětí 2-5V jako log.1.^{26 27}

Pro samotný přenos se využívá větších datových struktur, jako je například byte (osm po sobě jdoucích bitů), které definují základní přenosovou jednotku samotného komunikačního rozhraní.²⁸

Při převedení dat do číslicové podoby je možné správnou volbou kódování informací detekovat chyby, ke kterým může dojít vlivem rušení během přenosu a v určitých případech je i snad opravit. Pro tyto účely se využívají různé matematické metody, jako je například metoda paritního bitu, kdy je každý přenášený byte (anebo jiný základní segment) doplněn o jeden další bit, který zajišťuje, že například počet jedniček v přenášeném bytu bude v případě sudé parity vždy sudý, pokud by tedy během přenosu došlo vlivem rušení k poškození přenášených dat, je v případě chyby na jedné pozici možné odhalit, že tento byte byl doručen špatně a vyžádat si jeho opětovné zaslání.²⁹

Pokročilejšími metodami, jako je například Hammingův kód, je pak možné nejen detekovat chybu v přenášených datech, ale i přímo objevit, na kterém bitu se nachází a tím jej následně opravit.³⁰ Díky kódování je také možná data zabezpečit, aby nebylo možné je číst třetí stranou.

²⁴ *Fundamentals of Analog & Digital Signal Processing* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333224643_Fundamentals_of_Analog_Digital_Signal_Processing/related.

²⁵ Kvantové počítače – principy.

²⁶ *Fundamentals of Analog & Digital Signal Processing* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333224643_Fundamentals_of_Analog_Digital_Signal_Processing/related.

²⁷ Logic Signal Voltage Levels. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-3/logic-signal-voltage-levels/>.

²⁸ *Fundamentals of Analog & Digital Signal Processing* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333224643_Fundamentals_of_Analog_Digital_Signal_Processing/related.

²⁹ Paritní bit. Dostupné z: https://tech-lib.eu/definition/parity_bit.html.

³⁰ PANDEY, Harshita. Hamming Code in Computer Network.

Z výše uvedeného vyplývá, že digitální přenos zaručuje vysokou odolnost pro proti poškození vlivem rušení během přenosu dat, dále volba vhodného kódování umožňuje přenášet data ve vyšší kvalitě, neboť při digitální přenosu můžeme přenášet data bez ohledu na jejich časovou závislost.

Závěr

V celkovém srovnání analogového a digitálního přenosu dat tedy můžeme říct, že analogový přenos vykazuje oproti digitálnímu zvýšenou citlivost na rušení, jeho zpracování současnými počítači je komplikované a velmi zaostává v otázce konzistence a bezpečnosti přenášených dat, mezi jeho výhody pak patří zejména velmi jednoduchá technická realizace a fakt, že obecně se data vyskytují právě v analogové formě. Z tohoto důvodu analogový přenos jako takový nikdy nepřestane být využíván.

Oproti analogovému typu řeší digitální přenos většinu jeho neduhů a data je tedy možné různě komprimovat, zabezpečovat proti poškození anebo cizímu přístupu. Na druhou stranu je velmi komplikované taková data vygenerovat anebo zpracovat bez patřičné techniky a znalosti jejich struktury, navíc převod z analogových dat je už z principu ztrátový, a tak mohou být digitální data nepřesná již od svého vzniku.

Závěrem by se dalo říci, že digitální přenos dat nyní dominuje nad analogovým, ve skutečnosti však oba přenosy koexistují v určité symbióze, neboť naše výpočetní technika sice pracuje výhradně s digitálním typem přenosu a dat, ale její interakce s okolním světem je z velké části realizována právě pomocí analogových dat a jejich přenosu, byť velmi často na krátkou vzdálenost, dnes typicky pouze v rámci jednoho integrovaného obvodu, kde se požadovaná data zdigitalizují.

Bibliografie

A Brief History of Data Communications. In: *Incognito* [online]. Vancouver, 2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.incognito.com/blog/a-brief-history-of-data-communications-2/>

Analogové a hybridní počítače. In: *Historie výpočetní techniky v Československu* [online]. c2005–2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://historiepocitacu.cz/analogove-a-hybridni-pocitace.html>

BHATIA, A. Principles and Methods of Temperature Measurement. *Continuing Education and Development, Inc.* [online]. Woodcliff Lake [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Principles%20and%20Methods%20of%20Temperature%20Measurement-R1.pdf>

Co je HAM Radio?. In: *Český radioklub* [online]. Praha, 1997 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.crk.cz/CZ/CJHRC>

DORSCH, Jeff. Older Communication Standards Still Compete with USB. In: *Mouser electronics* [online]. 2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/applications/article-rs232-still-competes/>

FRY, Mervyn C. Radio's First Voice...Canadian!. In: *IEEE* [online]. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://ewh.ieee.org/reg/7/millennium/radio/radio_birth.html

Fundamentals of Analog & Digital Signal Processing [online]. Káhira: Hakim Press, 2015 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333224643_Fundamentals_of_Analog_Digital_Signal_Processing/related

GROVER, Jasmine. Measurement of Speed: Definition, Units, & Applications. In: *Collegedunia* [online]. Gurgaon, 2022 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://collegedunia.com/exams/measurement-of-speed-definition-units-and-applications-physics-articleid-3444#Me>

GUDINO, Miguel. Analog-to-Digital Converters Basics. In: *Arrow* [online]. 2018 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/engineering-resource-basics-of-analog-to-digital-converters>

HEATH, Janet. PWM: Pulse Width Modulation: What is it and how does it work. In: *Analog IC Tips* [online]. WTW Media LLC, 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.analogictips.com/pulse-width-modulation-pwm/>

Historie vývoje telefonů. In: *Algotech* [online]. 2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.algotech.cz/novinky/2018-02-26-historie-vyvoje-telefonu>

Konec analogového FM vysílání v Česku nehrozí, DAB+ se může rozvíjet vedle něho. In: *Český Rozhlas* [online]. Praha, 2021 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://digital.rozhlas.cz/konec-analogoveho-fm-vysilani-v-cesku-nehrozi-dab-se-muze-rozvijet-vedle-neho-8600827>

Kvantové počítače – principy. *Aldebaran bulletin*. **15**(37). ISSN 1214-1674.

Logic Signal Voltage Levels. In: *All about circuits* [online]. Boise: EETech Media, LLC, 2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-3/logic-signal-voltage-levels/>

Morse Code & the Telegraph. In: *History.com* [online]. 2009 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.history.com/topics/inventions/telegraph>

PANDEY, Harshita. Hamming Code in Computer Network. In: *Geeks for Geeks* [online]. Noida, 2022 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/hamming-code-in-computer-network/>

Paritní bit. In: *TechLib* [online]. 2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: https://tech-lib.eu/definition/parity_bit.html

RANDALL, Eric. Throwback Thursday: The First Phone Calls from New York to Boston. In: *Boston magazine* [online]. Boston, 2014 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.bostonmagazine.com/news/2014/03/27/throwback-thursday-first-phone-calls-new-york-boston/>

SHARMA, Shabbu. Digital signal and Analog signal | Difference between Digital and Analog signal | Advantages and Disadvantages. In: *Physics wave* [online]. 2022 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://physicswave.com/digital-signal-and-analog-signal/>

SKRZECZKOVA, Lenka. 12. prosince Marconi uskutečnil první bezdrátový přenos zvuku přes oceán. O osm let později zachránil život 2 000 lidem. In: *Frekvence 1* [online]. 2022 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.frekvence1.cz/clanky/koktejl/12-prosince-marconi-uskutecnil-prvni-bezdratovy-prenos-zvuku-pres-ocean-o-osm-let-pozdeji-zachranil-zivot-2-000-lidem.shtml>

USING CAPACITANCE SENSORS FOR NON-CONDUCTIVE MATERIAL MEASUREMENT. In: *MTI Instruments Inc.* [online]. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://mtiinstruments.com/non-conductive-material-measurement/>

WRIGHT, Gavin. Nyquist theorem. In: *TechTarget* [online]. 2022 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/Nyquist-Theorem>

Zuse Z1 built by Konrad Zuse. In: *The Centre for Computing History* [online]. Cambridge [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <http://www.computinghistory.org.uk/det/6170/Zuse-Z1-built-by-Konrad-Zuse/>