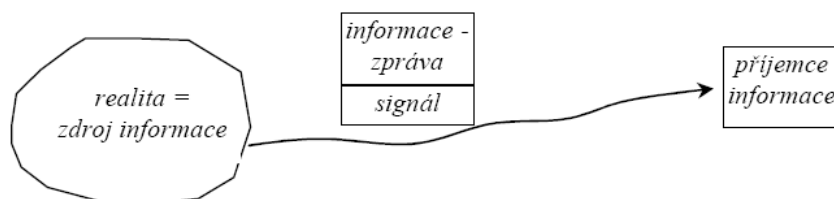


# 1 ZÁKLADNÍ POZNATKY Z TEORIE INFORMACE

## Informace, zpráva, signál

Získávání informací je proces probíhající mezi příjemcem informace (člověkem, případně strojem) a zdrojem informace (okolní realitou). Je-li konečný příjemcem člověk, pak má informace obvykle charakter zprávy (tj. sdělení v určité formě). Zpráva se šíří daným prostředím díky nosiči – signálu.



Obr. 1. Zjednodušené znázornění procesu přenosu informace od zdroje k příjemci.

### Příklad 1: Přenos informací kouřový mi signály:

Souvislý tenký kouř: ahoj – chci Ti ně co říct.

Přerušovaný tenký kouř: ulovili jsme mamuta.

Souvislý čadivý kouř: sně dli jsme mamuta.

V 1. sloupci je uveden signál, který představuje pro příjemce zprávu (informaci) uvedenou v 2. sloupci.

Signál může příjemce interpretovat různě – může vnímat barvu kouře, jeho „vlně ní“ na horizontu atd. Pro přenos informace jsou však důležité jen ně které atributy: zda je kouř tenký nebo čadivý, souvislý nebo přerušovaný. Myšlenkově tedy může příjemce původní signál nahradit jiným beze změny informačního obsahu přenášené zprávy, např.:

|            |                            |
|------------|----------------------------|
| _____      | ahoj – chci Ti ně co říct. |
| - - - - -  | ulovili jsme mamuta.       |
| ██████████ | sně dli jsme mamuta.       |

Z hlediska vysílání, přenosu, příjmu a uchovávání zpráv lze obecně definovat **signál** jako fyzikální veličinu(y), v jejíž ně kterých parametrech je zakódována daná zpráva.

Z uvedeného vyplývá, že obvykle je potřeba na straně příjemce provést závěrečnou konverzi přijatého signálu na přijatou zprávu (informaci). To je úkol koncového zařízení (TV, reproduktor, dekodér), v případě kouřového signálu dochází ke konverzi přímo „v hlavě“ příjemce.

Z hlediska informace „nanesené“ na signálu není důležité, jak vlastní signál „vypadá“, z hlediska použitého prostředí šíření signálu však ano. Toho se běžně využívá při přenosu dat, kdy na trase od zdroje k příjemci signál často střídá řadu forem (analogový, digitální, elmag. vlna, akustická vlna, laserový paprsek...). Je však nutné zařídit, aby při konverzi jedné formy signálu v jinou zůstala zachována původní přenášená informace.

### **Sémantický a syntaktický význam informace.**

Informace je chápána ve dvojím významu: sémantickém (co zpráva říká, jaký je její obsah) a syntaktickém (jaká je forma zprávy).

#### **Příklad 2:** zpráva ULOVILI JSME MAMUTA

- sémantické pojetí: příjemce spěchá na oběd,
- syntaktické pojetí: příjemce konstatuje, že vidí na obzoru tenký přerušovaný kouř.

Teorie informace se zabývá pouze syntaktickým pojetím a nezajímá ji sémantika.

### **Základní tematické oblasti teorie informace**

Popis a řešení problémů spojených se sběrem, přenosem, zpracováním a archivací informace v syntaktickém smyslu.

Součástí teorie informace je teorie kódování.

Teorie informace je součástí kybernetiky.

Pozn.: V současné době jsme svědky globalizace – propojování informačních technologií, komunikačních technologií, poznatků z teorie zpracování signálů a teorie obvodů a systémů do jednoho celku.

### **Kvantifikace informace. Realita jako množina stavů.**

Jak popsat množství informace ve zprávě? Paradox: Musíme se odtrhnout od smyslu zprávy (sémantiky). Pak zbude jen forma, kterou lze popsat jako posloupnost dovolených stavů. Vysvětlení následuje. Zpráva je zakódována v určitých parametrech signálu.

**Příklad 3:** U primitivního kouřového signálu z Příkladu 1 těmito parametry byly: tloušťka kouře T (tenký nebo čadivý) a charakter kouře CH (souvislý nebo přerušovaný). Tyto parametry mohou nabývat určitého počtu stavů, konkrétně zde

$$N_T=2, N_{CH}=2.$$

Pro přenos zpráv je použito vzájemných kombinací obou parametrů (tenký souvislý ..). Celkový počet všech kombinací je

$$N=N_T \cdot N_{CH}=2 \cdot 2=4.$$

Zadání z příkladu 1 lze zapsat do přehledné tabulky. Stav č. 4 není využit, lze jej využít dodatečně po přiřazení konkrétní zprávy.

| stav č. | Tloušťka | CHarakter   | zpráva                   |
|---------|----------|-------------|--------------------------|
| 1       | tenký    | souvislý    | ahoj – chci Ti něco říct |
| 2       | tenký    | přerušovaný | ulovili jsme mamuta      |
| 3       | čadivý   | souvislý    | snědli jsme mamuta       |
| 4       | čadivý   | přerušovaný | ?                        |

Tab. 1. Informační model kouřového signálu z Př. 1.

**Příklad 4:** Ve Windows98 je zvukový klip *Zvuk Microsoft.wav* s parametry:

Velikost 693 212 bajtů, délka záznamu 7,859s, zvukový formát PCM, vzorkovací kmitočet 22050 Hz, kvantování na 16 bitů.

Signál je tedy možno chápat jako posloupnost  $(7.859 \times 22050) = 173\,291$  vzorků. Každý z vzorků může nabývat  $2^{16} = 65536$  hladin (stavů). Zvuková informace je uložena v jediném parametru signálu – v jeho výšce (a samozřejmě ve vzorkovacím kmitočtu).

Pokud by se jednalo o analogový nekvantovaný signál, byl by počet možných hladin (stavů) signálu teoreticky nekonečný. Z praktického hlediska je však potřebný počet stavů vždy omezen i u analogového zpracování (konečné rozlišení dílčích bloků přenosového řetězce, šum, ..).

**Zobecnění: V abstraktním pojetí** je signál množinou po sobě jdoucích povolených stavů (resp. kombinace stavů) dané fyzikální veličiny. Povolený stav je u číslicového přenosu vybírán vždy z diskrétní množiny stavů.

**Informačním modelem signálu** je množina po sobě jdoucích informačních prvků, pomocí nichž jsou určité m způsobem kódovány jednotlivé povolené stavy. Fyzickou realizací informačních prvků, resp. jejich kombinací (viz dále definici informačního slova) jsou tzv. **signálové prvky**.

### Sémantická a syntaktická abeceda

**Syntaktická abeceda** je množina všech možných informačních prvků signálu. Skupina po sobě jdoucích informačních prvků tvoří informační slovo. V případě binárních (dvoustavových) dat se informační prvek nazývá bit (nikoliv Shannon) a některá vyhrazená informační slova (např. osmibitová) byte (bajt).

**Sémantická abeceda** je množina všech možných prvků zprávy. Prvky zprávy se označují jako písmena. Skupina po sobě jdoucích písmen tvoří slovo zprávy.

V teorii informace se abecedou rozumí abeceda syntaktická. Někdy se hovoří ještě o fyzikální abecedě: je to množina všech možných signálových prvků.

### Při přenosu dat mohou nastat mimo jiné tyto případy:

1. Každému písmenu sémantické abecedy je přiřazen jeden informační prvek (atypické), který je fyzicky realizován signálovým prvkem.

2. Každému písmenu sémantické abecedy je přiřazeno povolené informační slovo (časté), které se nazývá **kódové slovo**. To je realizováno signálovým prvkem, případně jejich posloupností.

Obecně je možno říci, že informační model signálu se skládá z posloupnosti kódových slov (protože informační prvek je speciální – nejkratší možné – kódové slovo).

**Příklad 5:** Kouřový signál z Př. 3, Tab. 1:

Informační prvky jsou 4: tenký, čadivý, souvislý, přerušovaný. Tvoří syntaktickou abecedu. Prvky zprávy jsou tvořeny základními znaky české abecedy a znaky pomocnými (mezera, interpunkce,...).

**Příklad 6:** Zvukový signál z Př. 4, *Zvuk Microsoft.wav*:

Informační prvky jsou pouze dva: nula a jednička. Tvoří syntaktickou binární abecedu. Každá kombinace 16 po sobě jdoucích informačních prvků tvoří povolené kódové slovo. Informační model zvukové nahrávky se skládá z posloupnosti 173 271 šestnáctibitových kódových slov. Prvky zprávy je obtížné definovat, závisí na způsobu, jak se díváme na rozklad hudební nahrávky na nezávislé elementy (spektrální hledisko, LPC rozklad,...).

**Příklad 7:** Vyjádření zjednodušeného ASCII textu linkovým kódem.

Pro účely přenosu textu obsahujícího symboly z 32-prvkové sémantické abecedy {A B C D.. Z , . ? ! / \_} bipolárním RZ linkovým kódem po vedení jsou písmena zprávy průběžně převáděna na pětibitová slova. Každý bit je pak převáděn linkovým kódem na příslušný signálový prvek. Informační model linkového signálu se skládá z posloupnosti informačních prvků 0 a 1 z dvouprvkové syntaktické abecedy {0 1}. Fyzikální abeceda je tvořena známou dvojicí signálových prvků bipolárního kódu RZ.

## 1.6 Informační kapacita soustavy podle Hartleye. Aditivní vlastnost.

Metoda kouřových signálů popsaná v Př. 1 umožňuje přenos jen tří jednoduchých zpráv. Není například jasné, jak by se přenesla zpráva, že vzápětí byl uloven další mamut atd. K sdělení větších podrobností, např. jak je mamut veliký, by bylo nutné informační soustavu podstatně rozšířit. Intuitivně cítíme, že dané signály mají malou „informační kapacitu“.

Přejdeme-li na jiné příklady, které již mají blíže k současnému přenosu dat (např. Př. 6), pak je zřejmé, že informační kapacitu signálu můžeme zvyšovat jeho prodlužováním (čím více vzorků bude obsahovat zvukový klip, tím větší informaci „pojme“).

Nechť signál je složen z posloupnosti  $n$  kódových slov o celkové délce  $nI$  informačních prvků. Pak říkáme, že délka signálu je  $n_I$  informačních prvků, resp.  $n$  kódových slov. (Syntaktická) abeceda nechť obsahuje  $N$  informačních prvků. Pro  $N=2$  hovoříme o binární abecedě. Dále nechť celkový počet všech povolených kódových slov je  $N_K$ . Pak celkový počet  $N_Z$  všech navzájem různých zpráv, které je možné signálem vyjádřit, je

$$N_Z = N_K^n.$$

**Příklad 8:** Telegram využívá 32-prvkovou abecedu ( $N=32$ ). Kolik lze sestavit různých telegramů o délce 50 znaků ( $n=50$ )?

Zde každé písmeno abecedy odpovídá jednomu kódovému slovu, které je současně informačním prvkem. Proto

$$N_Z = 32^{50} = 10^{\log(32^{50})} \doteq 10^{75}$$

různých telegramů.

Poznámka: z hlediska sémantického, které je teorií informace ignorováno, je však většina z těchto telegramů nesmyslných.

**Příklad 9:** Kolik je možné vytvořit různých zvukových klipů o parametrech klipu *Zvuk Microsoft.wav* z Př. 4 (délka záznamu 7,859s, zvukový formát PCM, vzorkovací kmitočet 22050 Hz, kvantování na 16 bitů)?

$N = 2$ ,  $N_K = 2^{16}$ ,  $n = 7,859 \times 22050 = 173\,291$ ,  $N_Z = (2^{16})^{173291} = 10^{834652}$  různých klipů.

Poznámka: V tomto nepředstavitelném počtu jsou kromě znělky Windows zahrnuty všechny možné segmenty dané délky všech existujících hudebních nahrávek i těch, které teprve budou vymyšleny, a všech možných i nemožných výkřiků, skřeků a jiných zvuků a jejich vzájemných kombinací.

**Příklad 10:** Odhadněte počet různých půlminutových telefonních hovorů. Předpokládejte, že telefonní signál je kmitočtově omezen do  $FM=3,4\text{kHz}$  a přenášen technikou PCM, tj. vzorkován 8000krát za sekundu, přičemž každý vzorek je kvantován 8 bity na 256 úrovní.  $N=2$ ,  $N_K=2^8=256$ ,  $n = 30 \times 8000 = 240000$ ,  $N_Z = 256^{240000} = 10^{577978}$  různých telefonních hovorů.

Výsledky příkladů 7 až 9 poskytují číselné údaje o jakési „informační kapacitě“ daného signálu (kolik různých zpráv umožňuje vyjádřit).

Informační kapacita soustavy podle Hartleye (1928). Do pojmu soustava zahrnoval Hartley kromě signálů v našem „informačním“ pojetí i sdělovací kanály a zprávy, vůbec vše, co se může nacházet v množině diskrétních stavů.

Informační kapacita soustavy

$$C = \log_2 N_S$$

kde  $N_S$  je počet všech možných stavů soustavy. Původní jednotka informační kapacity byla bit, nyní (bohužel) Shannon (čti Šenon) [Sh].

**Příklad 11:** Jestliže je za soustavu považován telegram z Př. 8, pak počet jeho všech možných stavů  $N_S$  je roven počtu všech různých telegramů  $N_Z = 32^{50}$ . Informační kapacita telegramu je  $\log_2 32^{50} = 250$  Sh.

### Entropie a redundance zdroje zpráv

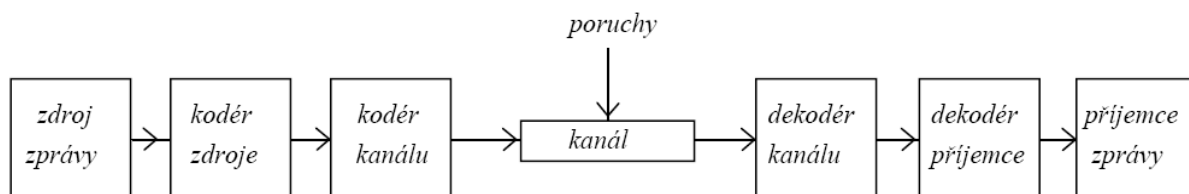
Na počátku sdělovacího řetězce obvykle stojí zdroj zprávy, který může mít mnoho forem (senzor, přehrávač, počítač, člověk..). Navzdory různorodému charakteru zpráv je možné nalézt jejich společný rys: vždy existuje určitá množina možných „sdělení“ spolu s pravděpodobnostmi jejich výskytu. Pak lze ovšem použít entropii k ohodnocení informačního

obsahu generovaných zpráv. U diskrétních zdrojů zpráv je pak jednoduše entropie zdroje rovna entropii používané abecedy.

Entropii zdroje můžeme určovat jednak klasicky v Sh/znak, nebo také v Sh/sekundu. Přepočet je snadný – entropie v Sh/znak násobená počtem generovaných znaků za sekundu je rovna entropii v Sh/s. Druhá z uvedených entropií tak souvisí s přenosovou rychlostí v bitech/s. Z entropie zdroje lze vypočítat jeho redundanci, která vyjádří jeho „informační rezervu“.

### Shannonova koncepce komunikačního systému

Shannon ukázal v 50. letech, že všechny komunikační systémy používané v minulosti, přítomnosti později vytvořené jsou pouze zvláštní případy obecného komunikačního systému na obr. 4.



Obr. 4. Shannonovo schéma obecného komunikačního systému.

Ú kolem kodéru zdroje je provést kódování zprávy s maximální hospodárností tak, aby pro přenos zprávy byl použit co nejmenší počet znaků. Jinými slovy, je třeba minimalizovat redundanci zprávy a zvýšit tak její entropii, tj. množství informace na jeden znak. Příkladem je komprese textových souborů před jejich přenosem.

Častým úkolem kodéru zdroje je převést původní signál – zdroj informace na signál elektrický, případně transformovat jej do digitální podoby (AD převodník).

Ú kolem kodéru kanálu je zabezpečit spolehlivost přenosu tím, že doplňuje informační znaky o přidavné znaky podle určitého algoritmu bezpečnostního kódu. Ten může být buď detekční (příjemce je schopen zjistit, že při přenosu došlo k chybě), nebo korekční (příjemce je navíc schopen lokalizovat místo chyby a opravit ji).

Ú kolem dekodéru kanálu je detekovat či opravovat případné chyby při přenosu a rekonstruovat signál tak, aby odpovídal výstupnímu signálu kodéru zdroje.

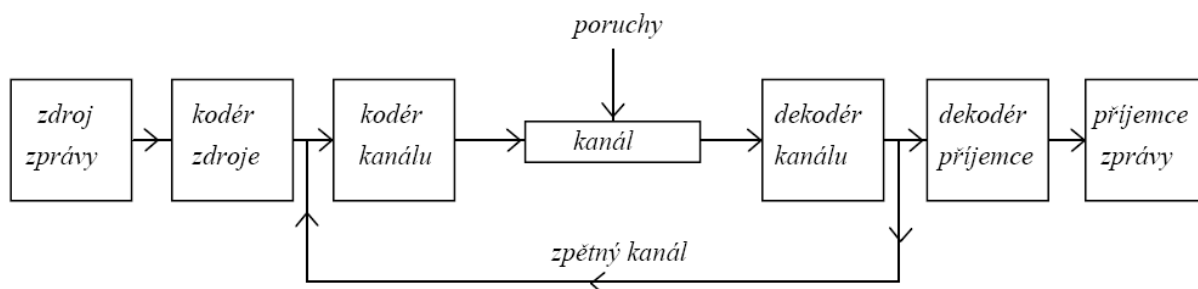
Ú kolem dekodéru příjemce je upravit dekódovanou zprávu na tvar vhodný pro příjemce.

Do kanálu jsou zahrnuty ostatní transformace signálu při přenosu (modulátor a demodulátor, přenosové médium, působení rušení atd.).

Jsou ukázány příklady moderních komunikačních systémů, které byly vyvinuty až daleko po vzniku Shannonovy koncepce a přesto jsou jejími speciálními případy: Systém digitální družicové televize a digitální veřejný celulární radiotelefonní systém GSM.

Není-li extrémní požadavek na spolehlivost přenosu zprávy (netrváme-li na správném přenosu „každého bitu“, např. při přenosu řeči) nebo je-li úroveň rušení při přenosu relativně malá, vystačíme s koncepcí na obr. 4 při současném zabezpečení dat korekčním kódem. Takové systémy přenosu se nazývají FEC (Forward Error Correction, dopředná korekce chyb).

Požadavky na vysoce spolehlivý přenosu dat (např. přenos binárních souborů pomocí Internetu) vedly k doplnění schématu na obr. 4 o tzv. zpětnovazební kanál (viz obr. 5). Data jsou zde většinou zabezpečena jen detekčním kódem. Zpětnovazební systémy se pak označují zkratkou ARQ – Automatic Request for Repetition (automatická žádost o opakování přenosu). Jsou dvojího druhu:



Obr. 5. Shannonovo schéma obecného komunikačního systému doplněné o zpětnovazební kanál.

Systémy s rozhodovací zpětnou vazbou DFB (Decision Feedback): Příjímač vyhodnocuje zprávu po daných slovech a posuzuje její věrnost s využitím detekčního kódu. Není-li zjištěna chyba, vyšle příjímač zpětný m kanálem vysílači tzv. poděkování ACK (Acknowledgment). Je-li výsledek prověrky negativní, zpětnovazebním kanálem je vyslán příkaz NACK (Negative Acknowledgment – negativní poděkování) k opakování přenosu daného slova.

Rozhodnutí o případném opakování přenosu tedy vzniká na straně *příjímače*. Zpětný kanál přenáší pouze jednoduché řídicí příkazy, a proto může být pomalý. Nevýhodou je, že nejsou opraveny chyby, které daný kód není schopen detekovat. Druh kódu je proto třeba volit velmi pečlivě s ohledem na charakter rozložení chyb.

Systémy s informační zpětnou vazbou IFB (Information Feedback): Přímým kanálem jsou vysílána pouze nezabezpečená slova zprávy. Zabezpečující část je ponechána v paměti vysílače. Na základě přijatého slova (které může být narušeno) je na straně příjímače vypočtena zabezpečující část, která je vysílána zpětný m kanálem k příjímači. Zde dojde k porovnání s údajem v paměti. Je-li výsledek porovnání negativní, vysílání se opakuje. V

opačném případě vyšle vysílač pokyn k uvolnění dat v paměti přijímače a pokračuje ve vysílání dalšího slova.

Zpráva, která se posílá zpět a která je odvozena od přijatého slova, se nazývá kvitance. V nejjednodušším případě může být kvitancí celé přijaté slovo. Rozhodnutí o případném opakování přenosu tedy vzniká na straně *vysílače*. Nevýhodou je, že zpětný kanál musí zabezpečit přenosovou rychlost srovnatelnou s přenosovou rychlostí dopředného kanálu. Další nevýhodou je případné zbytečné opakování vysílání, dojde-li k chybě ve zpětném kanálu. Výhodou je však vysílání pouze nezabezpečených dat. Protože k rozhodování o případné chybě dochází na straně vysílače na základě porovnání atributů vyslaného a přijatého slova, tento systém je značně spolehlivý.

Systémy bez zpětného kanálu jsou úspornější co do požadavků na přenosovou rychlost, resp. šířku pásma dopředného kanálu, účinnost zabezpečení přenosu je však menší. Používají se tam, kde je realizace zpětného kanálu obtížná nebo nemožná (např. družicová komunikace). V praxi se rovněž používají systémy kombinované, kdy se zpětný kanál vytváří adaptabilně v závislosti na momentální chybovosti spoje.

### **Druhy sdělovacích kanálů**

Kanál je souhrn prostředků pro přenos signálu od zdroje k příjemci. Diskrétní/spojité kanály jsou určeny pro přenos diskrétních/spojitých zpráv.

Odpovídá-li informační prvek přijatého signálu za všech okolností informačnímu prvku vyslaného signálu, hovoříme o bezhlukovém (bezšumovém) kanálu. V opačném případě připouštíme výskyt chyb při přenosu, pak se jedná o hlukový (šumový) kanál.

Diskrétní kanál bez paměti má tu vlastnost, že výsledek přenosu znaku ze vstupu na výstup nezávisí na předchozích znacích na vstupu. V opačném případě jde o kanál s pamětí. Jestliže přenosové vlastnosti kanálu jsou časově nezávislé, je kanál stacionární, jinak je nestacionární.

## **2 KÓDOVÁNÍ V SYSTÉMECH PRO PŘENOS INFORMACE**

### **Klasifikace kódů podle typu aplikace**

Kódování plní v různých místech sdělovacího řetězce různorodé funkce. Od toho se odvíjí následující možná klasifikace kódů:

*Kódy pro přizpůsobení informačního zdroje na kanál.*

Používají se při změně syntaktické abecedy zprávy. Úkolem těchto kódů je zároveň maximalizace entropie abecedy před vstupem zprávy do přenosového kanálu.



*Kódy pro snižování nadbytečnosti a kompresi dat.*

Ú kolem je „zhuštění“ zprávy snížením její redundance tak, aby byl její přenos co nejefektivnější.

*Kódy pro zabezpečení dat proti chybám.*

Informační slova se zabezpečují korekčním nebo detekčním kódem s cílem zajištění definované chybovosti spoje.

*Šifrovací kódy.*

Takové zabezpečení zprávy, aby představovala zdroj informace pouze pro oprávněné příjemce.

*Kódy pro zrovnoměrnění spektra datových signálů (skramblování...).*

Při přenosu dat analogovým médiem, např. telefonním kabelem, je důležité efektivní využití jeho kmitočtové šířky pásma. Kvaziperiodický charakter přenášeného signálu však způsobuje, že spektrum je shlukováno zejména v okolí určitých kmitočtů a kanál je tak využíván neefektivně. Tomu lze odpomoci *skramblováním*, kdy se posiluje náhodný charakter signálu jeho slučováním s pseudonáhodnou posloupností. Spektrum přenášeného signálu se pak zrovnoměrní. V přijímači se pak za demodulátorem provede inverzní proces – deskramblování za účelem získání původních dat.

*Kódy pro zabezpečení procesu modulace v modemech (Trellis klíčování..).*

Používají se různé speciální metody zabezpečení, které bojují jak proti tzv. osamoceným chybám, tak proti shlukům chyb. Některé metody: prokládání (interleaving), trellis klíčování, řetězové kódování.

### **Shannonovy teorémy zdrojové ho a kanálové ho kódování**

Z Shannonovy koncepce komunikačního kanálu vyplývá další klasifikace kódů na zdrojové a kanálové kódy. Příklad zdrojového kódu je kompresní kód, kanálové kódy jsou např. kódy bezpečnostní. Poznatky z předchozích kapitol je možné slovně shrnout do dvou teorémů. První z nich říká, že vhodným kódováním je možné „zhustit“ každou zprávu tak, že se její informační obsah může libovolně přiblížit její teoretické informační kapacitě podle Hartleye. Druhý teorém je vlastně Shannonova věta o kódování v šumovém kanále.

Teorém zdrojového kódování: Počet bitů, nezbytných k jednoznačnému popisu určitého zdroje dat, se může vhodným kódováním blížit k odpovídajícímu informačnímu obsahu tak těsně, jak je požadováno.

Teorém kanálového kódování: Frekvence výskytu chyb v datech přenášených pásmově omezeným kanálem se šumem může být vhodný m kódováním dat redukována na libovolně malou hodnotu, pokud je rychlost přenosu informace menší než činí kapacita přenosového kanálu.

V dalším textu se budeme zabývat metodami zdrojového a posléze kanálového kódování.

### **Zdrojové kódování - kódy pro snižování nadbytečnosti**

*Kódová ní jako předpis.*

V úvodu definujme pojem kódování. Předpokládejme následující struktury:

A .. množina znaků tzv. primární (zdrojové) abecedy.

Posloupnost znaků primární abecedy tvoří primární (zdrojovou ) zprávu, kterou je třeba kódovat, např. DOBRY\_DEN.

B.. množina znaků tzv. sekundární (kódové) abecedy. Znakům sekundární abecedy se též říká kódové znaky. Příkladem je binární kódová abeceda, kde  $B=\{0\ 1\}$ . Jak uvidíme následně , většinou se tyto znaky nevyskytují v sekundární zprávě samostatně , nýbrž pouze v povolených kombinacích (tzv. kódových slovech).

$B^*$  množina tzv. kódových slov. Kódové slovo, ně kdy též nazývané značka, je povolená posloupnost určitého počtu kódových znaků. Například pro binární abecedu může být množina kódových slov následující:  $B^*=\{0\ 10\ 111\}$ . Počet kódových znaků v kódovém slovu se nazývá délka kódového slova.

Definice kódování: Kódování je předpis, který každému prvku z množiny A přiřazuje právě jedno kódové slovo z množiny  $B^*$ .

Kód  $k$  je tedy zobrazení

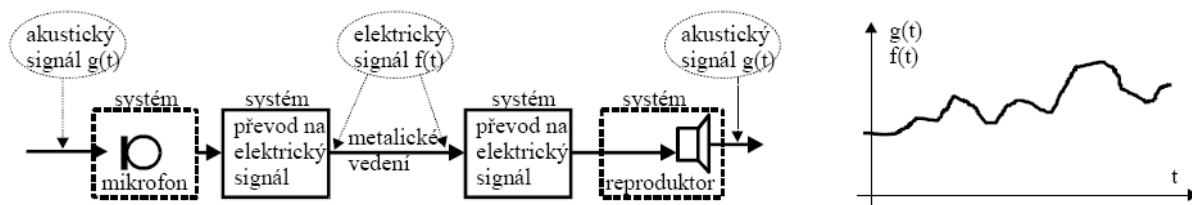
$k: A \rightarrow B^*$ .

Jestliže je kódování v souladu s definicí prováděno jednoznačně , tzn. jestliže různým znakům n primární abecedy přísluší různá kódová slova, pak říkáme, že kódování je prosté.

### **Signály a systémy**

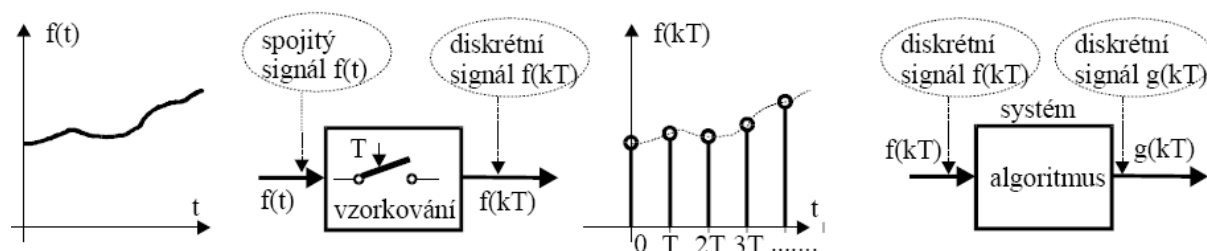
S pojmem „signál“ a „systém“ se setkáváme téměř denně aniž si to nějak uvědomujeme. Když například telefonujeme, potom náš hlas (což je akustický signál) je převeden mikrofonom (tj. systémem) na signál elektrický. Tento elektrický signál je pak dále přenášen např. po metalickém vedení k protější stanici, kde je opět převeden reproduktorem (opět systém) zpět na signál akustický. Situace je ukázána v levé části obrázku **Obr. 2-1**. V pravé části obrázku je pak naznačen časový průběh akustického i elektrického signálu. Oba tyto signály jsou definovány pro všechny časové okamžiky (pro spojitý úsek na časové ose) a jsou proto

nazývány **signály se spojitým časem** nebo zkráceně **spojité signály**. Systémy, vyskytující se v tomto řetězci zpracovávají tyto spojité signály a jsou proto nazývány **systémy se spojitým časem** nebo zkráceně **spojité systémy**.



**Obr. 3-1:** Signály a systémy se spojitým časem

Často jsou spojité signály převáděny do diskrétní podoby pomocí tzv. vzorkování tj. ze spojitého signálu jsou v pravidelných časových intervalech  $T$  odebírány vzorky (spínač na **Obr. 3-2** spíná v pravidelných časových intervalech na krátký okamžik). Tyto vzorky mohou být dále zpracovávány, přenášeny nebo ukládány (např. v paměti počítače nebo na CD) v digitální podobě ve formě posloupnosti čísel. Situace je v tomto případě schematicky ukázána na **Obr. 3-2**. Takto vzorkované signály nejsou (na rozdíl od spojitých signálů) definovány na spojitém časovém úseku, ale jsou definovány jen na diskrétní množině vzorkovacích okamžiků  $kT$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) a jsou proto nazývány **signály s diskrétním časem** nebo zkráceně **diskrétní signály**. Systémy, pomocí kterých jsou tyto diskrétní signály zpracovávány, se potom nazývají **systémy s diskrétním časem** nebo zkráceně **diskrétní systémy**.

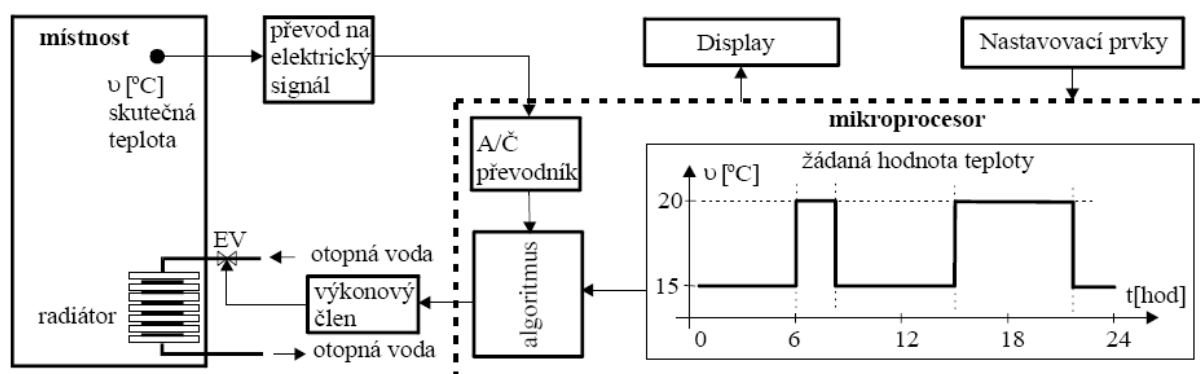


**Obr. 3-2:** Signály a systémy s diskrétním časem

Diskrétní systém představuje v podstatě nějaký algoritmus, pracující s posloupností čísel (navzorkovaných hodnot signálu  $f(kT)$   $k=0, 1, 2, \dots$ ). Tento algoritmus bývá často realizován na nějakém počítači nebo mikroprocesoru a jeho výslednými hodnotami (výstupem diskrétního systému) je opět diskrétní signál tj. posloupnost čísel.

Teorie signálů i systémů má četné aplikace v různých oblastech. Často jsou systémy (jak spojité tak i diskrétní) používány pro řízení různých fyzikálních zařízení nebo soustav. Jeden

takový příklad za všechny je uveden na následujícím **Obr. 3-3**. Tento příklad reprezentuje tzv. programovatelné řízení teploty v nějaké místnosti. Z ekonomických důvodů (místnost je využívána jen v určitých hodinách dne) je žádoucí, aby teplota v místnosti během dne měla časový průběh takový, jak je naznačeno na obrázku. Skutečná teplota v místnosti je měřena teploměrem, jehož signál (údaj o teplotě  $\nu$  [°C]) je převeden na signál elektrický (opět systémem, který je tvořen převodníkem fyzikální veličiny). Tento signál je potom pomocí analogově- číslicového převodníku A/Č (bývá obvykle součástí mikropočítače) diskretizován (tj. převeden na číslo, uložené v počítači). Tato hodnota, měřená (přesněji řečeno diskretizovaná) v časových okamžicích  $kT$   $k=0,1,2,\dots$  vstupuje do algoritmu (do diskrétního systému, realizovaného programem mikropočítače). Do algoritmu dále vstupuje ve stejných časových okamžicích i hodnota požadovaná (získaná pro daný časový okamžik z požadovaného časového průběhu teploty). Výstup algoritmu (výstup diskrétního systému) potom ovládá pomocí výkonového členu elektromagnetický ventil EV a tím řídí množství otopné vody, procházející radiátorem.



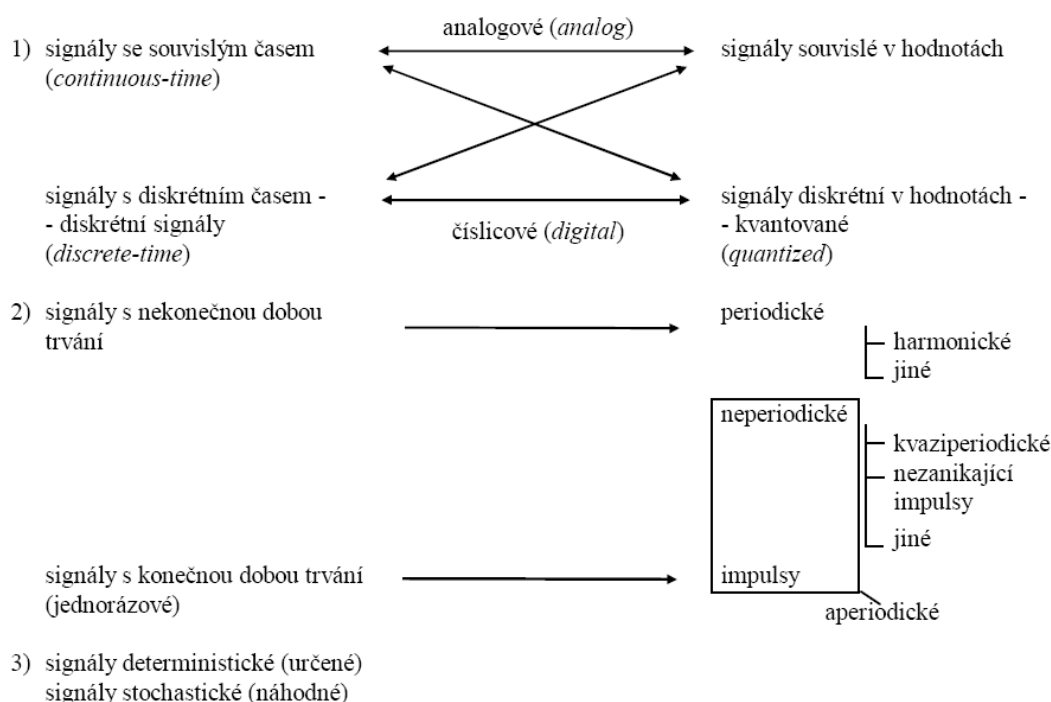
**Obr. 3-3:** Programovatelné řízení teploty v místnosti

## ELEKTRICKÉ SIGNÁLY

Komunikace mezi lidmi - ať už přímá nebo zprostředkovaná stroji - je založena na přenosu **informace**. Informace je produkována zdrojem obvykle v neelektrické podobě, které se říká **zpráva** nebo **sdělení** (řeč, hudba, obraz, text ...). Zpráva se pro účely přenosu na dálku, uchovávání, zabezpečení atd. převádí na **signál**, což je fyzikální vyjádření zprávy. Často se signálem zúženě chápeme časový průběh fyzikální veličiny, nesoucí informaci. Je-li fyzikální veličinou napětí nebo proud, hovoříme o **elektrických signálech**.

Každý pokus o popis skutečně existujícího signálu v matematické nebo grafické formě vede na tvorbu jeho **modelu**. Analýzou modelu pak zjišťujeme vlastnosti skutečného signálu více či méně přesně podle toho, s jak přesným modelem pracujeme.

### Dělení signálů a jejich modelů:



Výše uvedené kategorie signálů nejlépe objasníme na příkladech.

Napětí snímané z mikrofону je signálem souvislým v čase i v hodnotách: v průběhu doby trvání je tento signál definován pro všechny časové okamžiky a v rozsahu hodnot tohoto signálu jsou všechny úrovně „povoleny“ (signál může nabýt libovolné hodnoty z intervalu hodnot). Jedná se tedy o signál analogový.

Záznam o teplotě motoru, snímané v minutových intervalech, je možno považovat za signál diskretní v čase: signál existuje pouze v izolovaných (diskretních) okamžicích odečítání. Pokud je velikost teploty vyjádřena s konečnou přesností na určitý počet desetinných míst, znamená to, že v daném signálovém rozsahu může signál nabývat pouze omezený počet diskretních hodnot. Pak se jedná o signál diskretní v hodnotách (kvantovaný). Signál diskretní v čase i v hodnotách se nazývá číslicový.

Signály diskretní v čase se často získávají ze signálů analogových tzv. **vzorkováním**. **Kvantováním** hodnot těchto vzorků a jejich převodem do určitého kódu pak získáme signál číslicový.

Důležitým modelem reálných signálů je signál **periodický**, který je tvořen opakováním určitého signálového segmentu. Speciálním periodickým signálem velkého významu je signál **harmonický**, který je matematicky popsán funkcemi typu sinus a kosinus.

Při modelování přechodových dějů nebo dějů s časově omezeným působením jsou užitečné některé neperiodické signály, například různé impulsy.

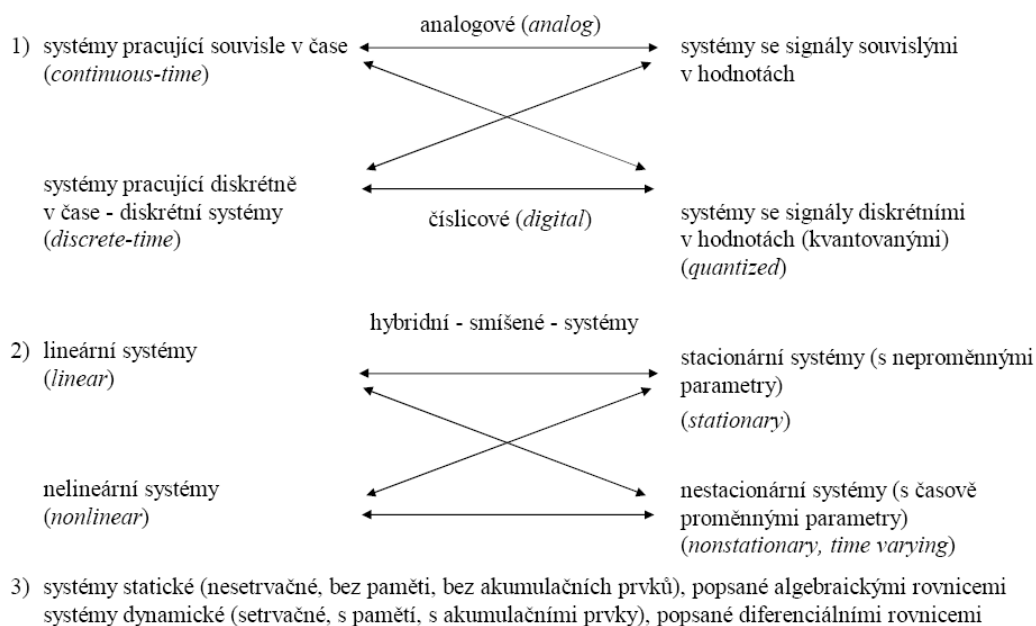
Často vystačíme s **deterministickými** modely signálů, které nám umožňují přesně popsat budoucí průběh signálu již v přítomnosti. Signál, jehož průběh v budoucnu lze předpovědět jen s určitou (ne stoprocentní) pravděpodobností, je signál **náhodný** (stochastický). Reálné signály jsou většinou náhodné, protože parametry technicky generovaných signálů jsou náhodně ovlivňovány prostředím. S velkou přesností je však mnohdy můžeme nahradit deterministickými modely, např. modely periodických signálů. Stochastickým modelům se nevyhneme například při rozboru šumových vlastností systémů.

## 5 ELEKTRICKÉ SYSTÉMY A OBVODY

Signál nemůže existovat bez prostředí, v němž vzniká, šíří se, je uchováván nebo se přeměňuje na jiný typ signálu. Takovému prostředí se říká **systém**.

Systémy mohou být nejrůznější povahy – mechanické, elektrické, informační, sociální. Speciálním systémem je elektrický obvod, složený z vzájemně propojených podsystémů – součástek, a komunikující s okolím pomocí vstupů a výstupů.

### *Dělení systémů a jejich modelů:*



První rovina klasifikace se odvíjí od typů signálů, které v systému působí. Příklady typických systémů: Analogový – tranzistorový zesilovač, číslicový – číslicový filtr. Křížové kombinace (souvislý čas-diskrétní hodnoty a diskrétní čas-souvislé hodnoty) se používají zejména k modelování etap analogově«číslíkového převodu (vzorkování, kvantování). Této klasifikaci se vymykají smíšené – hybridní systémy, které pracují jak s analogovými, tak i s číslicovými signály.

Druhá klasifikační rovina dělí všechny systémy na lineární a nelineární, stacionární a nestacionární. Systém se chová jako **lineární**, jestliže mezi jeho výstupem a vstupem platí proporcionální závislost (zdvojnásobením vstupního signálu dojde k zdvojnásobení výstupního signálu) a princip superpozice (odezva na součet dvou signálů je rovna součtu odezev na tyto signály, působící samostatně). Ostatní systémy jsou **nelineární**. Typickým představitelem lineárního systému je stejnosměrný zesilovač, jehož výstupní napětí je 10x větší než napětí vstupní. Nelineárním systémem je například diodový usměrňovač.

V praxi se často vyskytují systémy, fungující na principu **linearizace**. Typickým představitelem je tranzistorový zesilovač pracující ve třídě A. Vstupně-výstupní charakteristika zesilovače je sice nelineární, vstupní signál je však natolik slabý, že využíváme jen jejího úseku, který je prakticky přímkový.

**Stacionární** systémy (s neproměnnými parametry) zachovávají své systémové parametry konstantní v čase. Například výše uvedený zesilovač je stacionární systém, protože jeho systémový parametr – zesílení, je neměnný. Budeme-li mít možnost zesílení elektronicky nastavovat a budeme-li jej v průběhu zesilování měnit (např. za účelem modulace), stane se ze zesilovače **nestacionární** systém (s proměnným parametrem). Je zřejmé, že oba druhy klasifikace (lineární-nelineární, stacionární-nestacionární) dávají čtyři typy systémů.

Třetí klasifikační rovina rozlišuje systémy, které nemají vnitřní paměť, a proto se vstup přímo kopíruje na výstup přes příslušnou lineární či nelineární charakteristiku (systémy **statické**, nesesetvačné), a systémy s pamětí, kde výstup v daném okamžiku je odvozen nejen bezprostředně ze vstupu, ale bude záviset i na stavu paměti, a ta je dána chováním systému v minulosti (systémy **dynamické**, setrvačné).

V analogových elektrických obvodech zastávají úlohu paměti akumulární prvky typu kapacitor a induktor, v číslicových obvodech jsou to paměťové registry, v magnetických obvodech jsou to jádra z magneticky tvrdých materiálů apod.

Obecně vzato většina existujících systémů patří do kategorie systémů nelineárních, nestacionárních dynamických. V řadě případů jsou však některé projevy, např. nelinearita či nestacionarita, tak slabé, že je možné od nich abstrahovat a modelovat zkoumaný systém v rámci jednoduchého modelu, např. lineárního stacionárního.

## 6 ELEKTRICKÉ SIGNÁLY

### PERIODICKÉ SIGNÁLY

Signál  $s(t)$  je periodický, jestliže pro každý čas  $t$  platí vzorec

$$s(t) = s(t + T_1).$$

Nejmenší kladné číslo  $T_1$  [s], splňující shora uvedený vzorec, je **opakovací perioda** signálu.

Reciproká hodnota

$$F_1 = \frac{1}{T_1} [\text{Hz}]$$

je **opakovací kmitočet**, tj. počet period za sekundu.

$$\Omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} = 2\pi F_1 [\text{rad/s}]$$

je **kruhový opakovací kmitočet**, tj. počet period  $2\pi$  radiánů za sekundu.

Periodický signál můžeme popsat buď přesně pomocí jeho časového průběhu v rámci jedné periody (vzorcem nebo obrázkem), nebo přibližně pomocí jeho některých tzv. globálních charakteristik. V některých aplikacích totiž není podstatné, „jak signál vypadá“, nýbrž jakou má například střední nebo efektivní hodnotu. Pak postačí k stanovení účinků signálu na spotřebič zjistit příslušnou globální charakteristiku namísto detailního popisu celého časového průběhu.

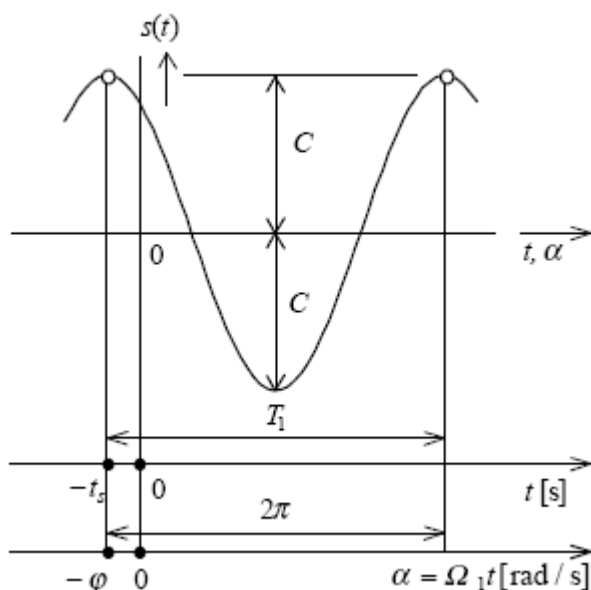
**Globální charakteristiky periodických signálů** - energie, výkon, střední hodnota, efektivní hodnota. Vyčísľují se integrálem signálu přes jednu opakovací periodu, přičemž je lhostejné, kde zvolíme počáteční bod integrace.

#### Harmonický signál

Patří k důležitým periodickým signálům. Časový průběh je matematicky popsán funkcemi typu sinus a kosinus.

Signál je určen třemi parametry: amplitudou  $C$  ( $C \geq 0$ ), opakovací frekvencí  $F$  [Hz], počáteční fází  $\varphi$  [° nebo rad].





**Obr.6.1.** Harmonický signál a jeho základní parametry.

Další související parametry: velikosti kosinové a sinové složky  $A$  a  $B$ , kruhová opakovací frekvence  $\Omega_1$ , opakovací perioda  $T_1$ , časový posuv  $t_s$ .

*Pravoúhlý impuls* je složen z čela, temene a týlu impulsu. Ideální pravoúhlý impuls je tvořen dvěma jednotkovými skoky násobenými veličinami se stejnou absolutní hodnotou udávající výšku impulsu a různými znaménky, časově vzájemně posunutými o dobu představující šířku impulsu  $t_i$ . U tohoto impulsu je čelo i tyl skokové a temeno má konstantní výšku. V praxi se však za pravoúhlé označují impulsy, které se ideálním pravoúhlým impulsům jen více méně blíží. Odlišnost reálného pravoúhlého impulsu od ideálního se vyjadřuje pomocí *parametrů* impulsu (**Obr. 6.2**):

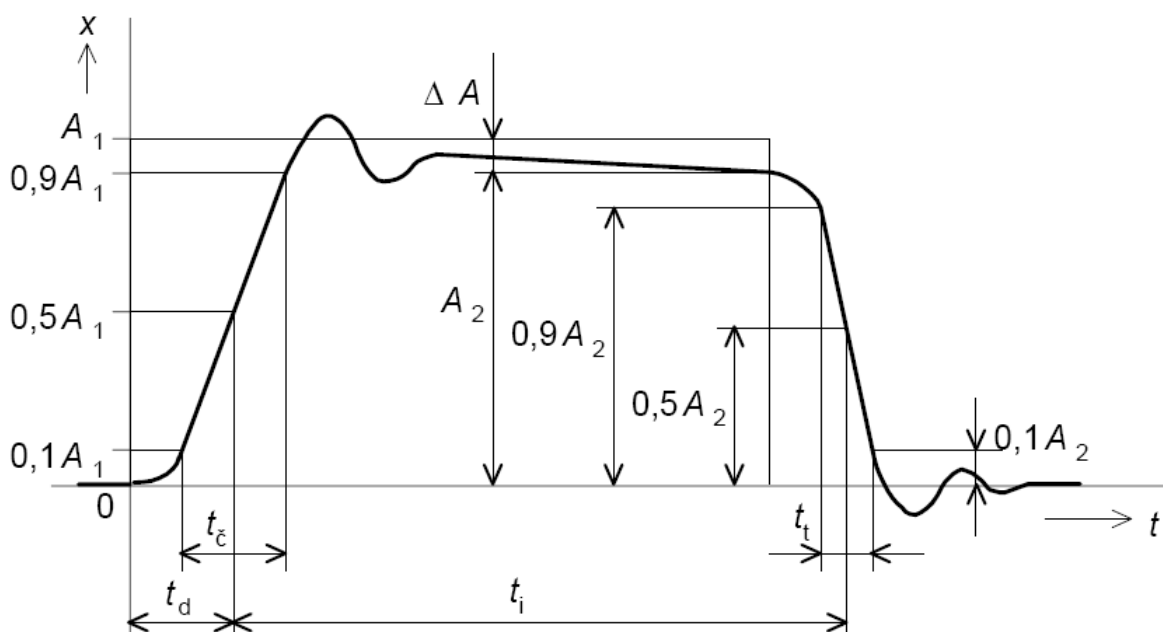
*doba čela*  $t_c$

*doba týlu*  $t_t$

*zpoždění impulsu*  $t_d$  (delay time)

*pokles temene*  $\Delta A = A_1 - A_2$

Často se setkáme se signálem, který můžeme pokládat za složený z pravoúhlých impulsů, u něhož však není účelné jednu úroveň pokládat za ustálenou a druhou za přechodnou. Takový signál označujeme za *pravoúhlý signál*. Místo o čelu a týlu zde pak mluvíme o *vzestupné*, resp. *sestupné hraně*, a o době příslušné hrany –  $t_r$  (rise time), resp.  $T_f$  (fall time), popř. o době hrany  $t_e$  (edge time), nerozlišujeme-li její směr.



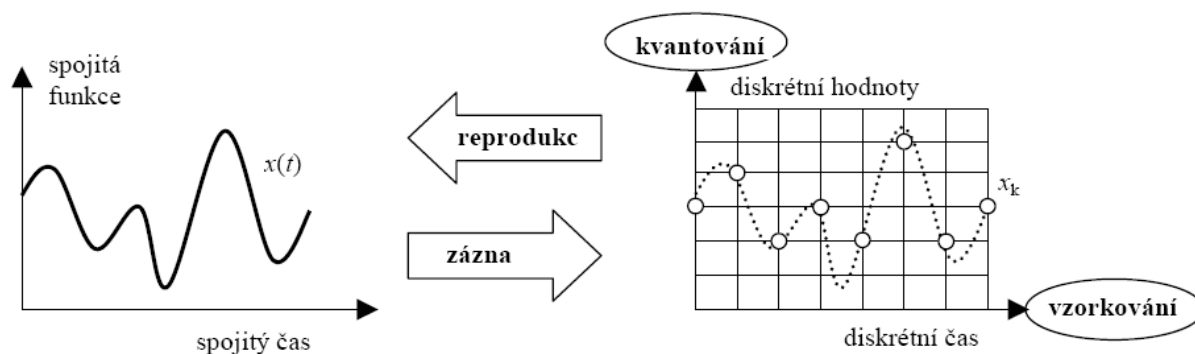
**Obr. 6.2.** Ideální (čárkovaně) a reálný (plně) pravoúhlý impuls a jeho parametry

### Přenos impulsového signálu lineárními články

Pro zpracování impulsových signálů se používají přenosové články s lineárním nebo nelineárním charakterem. Lineární články určené pro zpracování impulsů na rozdíl od přenosových článků určených pro zpracování rádiových signálů propouštějí široké kmitočtové pásmo. Nemohou však přenést nekonečně široké pásmo kmitočtů. Omezení přenášeného kmitočtového pásma způsobuje, že při přenosu dochází k *lineárnímu zkreslení*. Toto zkreslení je charakteristické kmitočtově závislým přenosem jednotlivých kmitočtových složek přenášeného signálu, nevznikají však přitom kmitočty, které v přenášeném signálu nebyly původně přítomny. Ve člancích, v nichž se projevují nelineární vlastnosti jejich prvků, dochází ke *zkreslení nelineárnímu*, přičemž dochází ke vzniku nových složek kmitočtového spektra přenášených signálů.

### Vzorkování spojitých signálů a jejich obnova

Signály přístupné měření v reálném prostředí jsou obecně funkce spojitého času a nabývají obvykle nekonečného počtu hodnot. Nazývají se analogové veličiny nebo analogové signály. Záznam těchto signálů pro jejich zpracování nebo jen prostou reprodukci v číslicových systémech (číslcových počítačích nebo signálových procesorech) nelze bez jejich vzorkování a kvantování.



Obr. 6.3 Záznam a reprodukce signálů

Schématicky je vzorkování a kvantování znázorněno v obr. 1. Funkce spojitého času  $x(t)$  je nahrazena posloupností kvantovaných vzorků  $x_k$ . Vzorkování znamená vynechání úseků záznamu a kvantování znamená náhradu přesných hodnot vzorků za zaokrouhlené hodnoty. Obě zmíněné operace způsobují ochuzení informačního obsahu signálu.

Převod analogového signálu na číslicový (digitální) zajišťuje A/D převodník (anglicky Analog to Digital Convertor - ADC). Zpětnou reprodukci digitálního signálu na analogový signál zase D/A převodník (anglicky DAC).

### Zpracování signálů

Signály jsou staré jak lidstvo samo. Slovo *signum*, tvořící jeho základ, je totiž v latině obvyčejné a jakékoli znaménko nebo znamení. Dáme-li někomu znamení kouřem, bubnem či zlomeným stéblem, pak patrně preferujeme indiánské signály. Používání řeči, pohybu očí, mimiky obličeje, startovací pistole, zrcátka, telegrafu, textu a prstů na ruce se osvědčuje jako metoda předávání signálů v klasické civilizaci. V matematice a technice raději definujeme abecedu, reprezentaci pomocí kódu, posíláme nuly a jedničky po drátech, bezdrátově a optoelektronicky a rovněž spojitý analogový signál má smysl šířit pomocí elektrických i neelektrických veličin. Přesně měřit fyzikální veličiny umíme jen několik málo století, takže je jasné, že na počátku civilizace byly využívány pouze diskrétní signály. Teprve novověk nás naučil používat ty analogové včetně jejich převodu na elektrické veličiny. V současnosti se však snažíme co nejrychleji a nejpresněji transformovat naměřený signál do digitální podoby, aby s ním měly informační technologie co nejméně práce. Pro ucelenější přehled slouží opět anglická klíčová slova v tabulce.

### Historická role diskrétních signálů

Významným počinem sloužícím pro předávání informací mezi lidmi je zavedení abecedy. Nejde zdaleka jen o latinku, ale například i o různá obrázková písma starověkých i novověkých civilizací. Na konci této vývojové řady pak nalézáme Brailovo písmo, Morseovu

abecedu, binární znaky (0, 1) a kód ASCII. Všechny abecedy mají jeden společný rys – konečný počet dovolených znaků, jejichž posloupnost nese potřebnou informaci. Konkrétní abecedy se liší pouze počtem dovolených znaků a jejich provedením – grafickým vzhledem nebo technickou realizací. Zatímco technika dává přednost abecedám s malým počtem znaků (dvojkový, osmičkový, desítkový, šestnáctkový kód) a spojování znaků do menších skupin (kód BCD či např. ASCII), obrázkové abecedy východní Asie obsahují tisíce znaků a pohybují se až na hranici výtvarného umění. Většina ostatních abeced obsahuje desítky až stovky znaků, takže se lépe učí nazpaměť. Z pohledu zpracování signálů je přirozené jednotlivé znaky  $N$  prvkové abecedy nahradit celými čísly 0, 1, 2, ...,  $N - 1$ . Jakýkoli text v libovolné abecedě se tak vlastně chová jako diskretní signál (posloupnost v prostoru nebo v čase), který je kvantován do  $N$  úrovní, a už jsme doma. Zde by se hodilo zdůraznit, na co je to vlastně v praxi dobré. Především to umožňuje archivaci a editaci textů prostřednictvím informačních technologií.

K tomu navíc patří tři základní operace s diskretním kvantovaným signálem: komprese, šifrování a bezpečnostní kódování. Kompresi (nejen textů) ocení všichni ti, kdo potřebují šetřit místem pro archivaci nebo časem pro přenos signálu. Komprese není nic jiného než zobrazení, které ze signálu vytvoří signál pokud možno kratší s tím, že délku signálů měříme v bitech. Takových zobrazení je celá řada, ale je nutné, aby k němu existovalo inverzní zobrazení, které umožní zpětnou rekonstrukci signálu.

Vzhledem k tomu, že komprese textů (signálů) zhoršuje jeho přímou čitelnost, zdálo by se, že tímto způsobem můžeme chránit text (signál) před neoprávněným přístupem. Naštěstí již od dob Caesarových (Starý Řím) se zprávy utajují šifrováním, jež je o 1900 let mladší než komprese signálu. Jde rovněž o invertovatelné zobrazení, které z textu vytváří nepřehledný text stejné délky. Rozdíl je v tom, že metoda šifrování i dešifrování je utajena ostatním subjektům, čímž se zhoršují podmínky pro nežádoucí čtení. Šifrování dospělo k prvému vrcholu dokonalosti za Napoleona, kdy byly zavedeny šifrovací a dešifrovací knihy, což je metoda platná dodnes. Ve druhé polovině 20. století byly objeveny dokonce šifrovací metody s veřejným klíčem, kde psát může (i anonymní udání) každý, ale číst jen vyvolení, neboť metoda šifrování není utajena, ale k dešifraci to stejně nikomu nepomůže.

Bezpečnostní kódování stejně jako komprese je až produktem 20. století. Jde opět o zobrazení, které z původního signálu vytváří tentokrát delší signál, který je však chráněn proti poruchám při přenosu a archivaci dat. Příslušné inverzní zobrazení opět existuje a je robustní vůči ojedinělým chybám při přenosu digitálního signálu. Opět existuje celá řada metod od kódů s kontrolními znaky a součty až po sofistikované optimální kódy. Bez těchto ošetřených

signálů si nelze představit digitální přenos dat nezávisle na technických možnostech realizace. Vše, co bylo řečeno o kompresi, šifrování a bezpečnostním kódování textů, platí pro práci s libovolným digitálním kvantovaným signálem nezávisle na jeho zdroji. V dnešní době vzniká digitální signál jako výsledek činností systémů využívajících IT, jejichž součástí může být i měření elektrických a neelektrických veličin.

### **Konverze spojitého signálu**

Rozvoj fyzikálních měření v uplynulém století způsobil, že jsme schopni pomocí nejrůznějších čidel měřit elektrické i neelektrické veličiny a jejich časové změny. V této souvislosti hovoříme o spojitém signálu, který je reprezentován funkcí spojitou v čase. Klasická měřicí technika nás zásobuje spojitými signály v elektrické, pneumatické či mechanické podobě. Pro uvedené signály se též používá název analogový signál. Vzhledem k omezené přesnosti analogového signálu se v dnešní době dává přednost jeho převodu do digitální podoby. K tomu využíváme vzorkování a kvantování.

Vzorkování nejčastěji chápeme jako měření s pravidelnou periodou opakování. Tak dostaneme z časového průběhu posloupnost reálných hodnot zachycených příslušným senzorem. Platí zde jedno základní omezení, které se týká periody vzorkování. Tu volíme tak, aby byla srovnatelná s časovými konstantami sledovaných dějů. Podle Shannonova teorému tím však přijdeme o všechny frekvence obsažené v signálu, které jsou vyšší než polovina vzorkovací frekvence. Předností moderních systémů je velmi krátká doba vzorkování, která umožňuje zajistit kvalitní zpracování signálů v dalších operacích.

Při zpracování spojitého signálu vzorkováním vzniká ještě jeden problém, a to digitální uchování naměřených hodnot. Zde je velmi typické, že původní, nejčastěji neelektrická, veličina je převedena na elektrický proud nebo napětí a dále zpracována analogově číslicovým převodníkem, který převede elektrický signál na osmi až šestnáctibitové číslo. Přitom se zcela nutně nevyhneme zaokrouhlování reálných veličin na celočíselné hodnoty. Proces zaokrouhlování neprobíhá v původních fyzikálních jednotkách, ale v elektrických veličinách za senzorem. Z toho plyne, že chyba takto vzniklých údajů může dosahovat až poloviny kvantovací úrovně použitého převodníku. Následně nás čeká transformace signálu do fyzikálních jednotek, při níž používáme obecně nelineární vztahy, které tuto chybu v různých částech pracovní charakteristiky mohou ještě zvětšit nebo zmenšit. Přitom v počítači vznikají reálná čísla, která mohou působit mylný dojem, že například teplotu měříme na tisícinu stupně Celsia, ale skutečnost je obvykle méně prozaická. Je vidět, že nejen vzorkováním, ale i kvantováním a fyzikálními převody můžeme signál vzniklý v dokonalém

senzoru snadno znehodnotit a učinit jej nepoužitelným.

Z hlediska samotného měření a přenosu signálu analogovou cestou je nutné si uvědomit systematickou i náhodnou chybu měření. Zatímco systematickou chybu můžeme snadno eliminovat kalibrací, s náhodnou chybou musíme počítat jako s faktorem, který hraje roli v dalším zpracování. Takto vzniklý náhodný šum signálu může škodit i pomáhat. Vzorkujeme-li například signál s vysokou úrovní šumu pomocí velmi přesného převodníku AD, pak je velmi obtížné vypočítat derivaci signálu pomocí diferencí v časové řadě. Takové difference potřebujeme například v číslicovém PSD regulátoru, a pokud jsme příliš precizní při vzorkování, pak často nezbyvá, než vyřadit složku D. Existuje však i opačný případ, kdy šum může pomáhat při zpracování dat pomocí „levných“ několikabitových převodníků AD. V takovém případě je počet digitálních úrovní malý a při krátké periodě vzorkování tak můžeme získat desítky až stovky hodnot v daném časovém intervalu. Při dostatečně vysoké úrovni šumu nejde o konstantní signál, ale o náhodnou směs dvou nebo tří celočíselných hodnot. Prostým průměrováním těchto hodnot získáme přesnější signál, než kolik odpovídá kvantovací úrovni převodníku nebo původnímu šumu. Přitom nejde o nic jiného než o zneužití matematické statistiky v praxi.

Digitální signál z jednoho senzoru je tak pouze posloupností naměřených hodnot, kde index odpovídá časovému kroku. Takový signál nazývá jednorozměrný (1D). Vzorkovat však nemusíme pouze v čase, neboť i prostorové souřadnice ovlivňují hodnotu naměřené veličiny. Vzpomeňme na různé ustálené teplotní, rychlostní, tlakové nebo koncentrační profily, které lze snadno mapovat pomocí senzorového pole nebo opakovaného měření. V případě jednorozměrných systémů takto získáme opět 1D diskrétní signál, jehož hodnota odpovídá naměřené veličině a posloupnost hodnot jednotlivým pravidelně rozmístěným měřicím místům, neboť vzorkování se týkalo jedné prostorové souřadnice. Na rozdíl od času máme prostorových souřadnic v klasické fyzice několik. Tak při mapování dvojrozměrného systému pomocí dvou souřadnic získáme dvojrozměrný diskrétní signál, který určitě znáte například z digitálního fotoaparátu. Zde první prostorová souřadnice odpovídá vzorkovanému azimutu v horizontálním směru a druhá souřadnice elevačnímu úhlu ve vertikálním směru. Každé měřicí místo sleduje intenzitu osvětlení v daném bodě. Tak vznikne klasická černobílá digitální fotografie jako „pouhá matice“ naměřených hodnot.

Postup směrem k barevnému obrazu znamená pouze rozšíření počtu takových matic na tři (červená, zelená, modrá). Pracujeme-li například se satelitními snímky v různých frekvenčních oblastech viditelného a neviditelného elektromagnetického spektra, pak jednomu obrazu odpovídá několik matic. Dvojrozměrný obraz vzniká i jiným způsobem než

fotografováním. Stačí připomenout celou řadu technických a biomedicínských metod, které jsou založeny na odrazu nebo průchodu vlnění daným materiálem. Jde například o rentgenovou nebo ultrazvukovou defektoskopii, o použití ultrazvuku v medicíně a o speciální metody založené na principu počítačové tomografie (CT, MRI, PET, SPECT). Pokud nás zajímá průhled sledovaným materiálem nebo pacientem v jednom směru, pak obdržíme 2D signál ekvivalentní černobílé fotografii. Stejný typ signálu vzniká i prostorovou rekonstrukcí v jedné rovině, avšak obraz je mnohem názornější a zachycuje více detailů. Z hlediska technické i medicínské diagnostiky se velmi často setkáváme i s trojrozměrným obrazem, který vzniká úplnou prostorovou rekonstrukcí z opakovaných měření.

Při zpracování signálu je důležité nejen zajistit správnost zjištěných hodnot ve fyzikálním slova smyslu, ale i návaznost dalších operací, proto je nezbytné umět diskrétní signály různých typů archivovat. K tomu slouží celá řada standardních formátů pro archivaci dat na disku. Přitom vždy záleží na tom, o jaký typ signálu jde a na znalosti jeho vlastností. Například pro archivaci akustického signálu se využívají formáty umožňující významnou kompresi dat. Přitom se využívají vlastnosti signálů ve frekvenční oblasti, a tak se docílí významného kompresního poměru při malé ztrátě informací. Jiná situace je při archivaci hodnot signálů vzniklých přesným měřením. Pak dáváme přednost formátům, které sice zabírají mnoho místa na disku, ale nezpůsobí ztrátu informace a jsou připraveny k rychlému čtení historických dat.

### **Základní operace s diskrétním signálem**

Pokud chápeme signál jako výsledek našich experimentů nebo pozorování, který chceme pouze archivovat pro jakékoli budoucí použití, pak jsme se zpracováním signálů již hotovi. Chceme-li signál dále přímo využít pro on-line řízení, off-line řízení nebo rozhodování, pak jsme teprve v půli cesty. Ke standardním metodám dalšího zpracování signálu patří nejrozumnější postupy pro zvýšení jeho kvality a vypovídací schopnosti.

V první řadě se snažíme zmenšit úroveň šumu nejmenší možnou mírou tak, abychom příliš nedeformovali užitečný signál. Jde o jistý druh kompromisu, při kterém sledujeme poměr signál/šum (SNR) a užíváme dvě techniky: filtraci a vyhlazování. Při digitální filtraci 1D signálu předpokládáme, že jednotlivé členy posloupnosti odpovídají časové řadě. Filtrace je postup, který vychází z právě naměřené hodnoty (poslední v řadě) a několika předchozích hodnot. Filtr je pak pouze funkcí, která z uvedených několika hodnot vytváří příslušný kompromis pomocí lineárních nebo nelineárních operací. Lineární filtry jsou velmi populární, neboť jejich realizace je velmi snadná a jsou rozvinuty i teorie jejich návrhu založené analýze

ve frekvenční oblasti. Nevýhodou lineárních filtrů je však zveličování impulzního šumu, jehož následky zbytečně dlouho přetrvávají na výstupu filtru. Od nelineárních filtrů proto požadujeme, aby se chovaly robustně vůči takovým odlehlým hodnotám za cenu zvýšení jejich složitosti. Nelineární filtr může být realizován pomocí robustních statistik, fuzzy operací nebo umělé neuronové sítě.

Podobnou operací je vyhlazování dat. Zde však smíme použít nejen hodnoty předcházející danou hodnotu, ale i hodnoty po ní následující. V případě časové posloupnosti by to znamenalo, že známe nejen přítomnost a minulost, ale i budoucnost vývoje signálu, což není možné. Proto se vyhlazování používá ve dvou případech. První z nich souvisí se signály, které jsou vzorkovány prostorově (2D a 3D obrazy). Pokud je signál vzorkován v časové oblasti, pak se vyhlazování používá tam, kde provádíme zpracování signálu až po ukončení měření, kdy je celá časová řada k dispozici jako jeden celek.

Doposud uvedené metody filtrace a vyhlazování lze chápat též jako nízkofrekvenční filtry. Pokud chceme naopak zdůraznit rozdíly ve zjištěném signálu, pak použijeme filtry vysokofrekvenční, což jsou také jen funkce. U jednorozměrného signálu pak hovoříme o získání jeho vysokofrekvenční části. Ve 2D a 3D obrazech pak tímto způsobem získáme přehled o náhlých změnách intenzity obrazu, což pomáhá například při detekci hran. Hranový detektor obvykle spojuje tři operace za sebou. Nejprve je provedeno vyhlazení signálu nízkým filtrem, pak následuje zpracování signálu vysokým filtrem zakončené nelineární transformací a prahováním. Tak dostaneme představu o hranách a rozhraních v obrazu. Vysokofrekvenční filtry mají ještě jednu užitečnou aplikaci. Pokud k signálu přičteme vhodný násobek vysokofrekvenčního filtru, dojde k jevu zvanému ostření obrazu. Takový postup najde uplatnění tam, kde je nízká úroveň šumu, ale obraz je rozmazaný vlivem fyzikální filtrace (fotografie v oparu).

Hrany v obrazu umožňují jeho následnou segmentaci na samostatné části, které je možné dále analyzovat, a porozumět tak obrazu jako celku. Segmentace však nemusí být založena pouze na detekci hran. Velmi perspektivní je metoda rozvodí (watershed).

Samostatnou kapitolu tvoří metody digitální morfologie 2D a 3D obrazů, jež byly původně vyvinuty pouze pro lineární obrazy. Jsou založeny na realizaci počítačové eroze, dilatace, podmíněné eroze, podmíněné dilatace, metodě tref či miň (hit or miss) a operacích s množinami. Později byly uvedené operace rozšířeny i na černobílé obrazy s využitím fuzzy logiky. Skládáním morfologických operací můžeme získat například otevření nebo uzavření obrazu, které slouží k morfologické filtraci. Pomocí podmíněné eroze můžeme získat ztenčené formy obrazu nebo jejich kostry, které usnadňují další analýzu. Pomocí morfologie můžeme



dokonce zaostřit původně rozptýlený obraz.

Z hlediska vnějšího efektu je třeba 2D a 3D signály vizualizovat, tj. převést do formy, která bude příznivá vnímání lidským okem. Přitom hrají roli tři důležité operace: změna jasu, změna kontrastu a volba barevné palety. První dvě operace důvěrně známe z ovládání TV přijímače nebo digitálního fotoaparátu. Je však třeba upozornit na to, že pokud hodnota intenzity obrazu odpovídá fyzikálnímu měření, pak změna jasu a kontrastu vede k porušení vypovídací schopnosti, což znesnadní jak technickou, tak biomedicínskou analýzu. Důležitější roli hraje volba barevné palety. V celé řadě aplikací je paleta zvolena záměrně jako pevná, neboť její barvy mají fyzikální či medicínský význam. Často odpovídají například teplotě v daném místě, koncentraci jisté látky, hustotě materiálu, aktivitě protonů nebo jiné veličině, která přesně charakterizuje dané místo v obrazu. Máme-li možnost volit barevnou paletu sami, pak třeba upozornit, že přechod mezi černou a bílou barvou přes různé úrovně šedi není zcela ideální pro vizualizaci detailů. Chceme-li realizovat systém založený na dvou barvách, pak je výhodné použít tmavomodrou barvu jako extrém a světle žlutou jako její opak. Tak docílíme mnohem citlivějšího zvýraznění struktur. Častým zvykem je využívat vícebarevné palety, které odpovídají například geografickým zvyklostem (modrá, zelená, žlutá, červená, hnědá). Ve speciálních aplikacích vytváříme barvu obrazového elementu uměle s tím, že k danému obrazu vytvoříme jeho deriváty pomocí transformací, a ty následně využijeme ke generování barev.

### **Pokročilé operace s diskrétním signálem**

Možná, že si položíte otázku, proč vlastně děláme základní operace se signálem uvedené v předchozí kapitole. Není to jen kvůli tomu, „abychom lépe viděli“ a mohli se rozhodnout jako uživatelé. Chceme-li celý proces dále automatizovat, pak je nutné použít pokročilé operace, které konečně zajistí plnou odezvu systému. V první řadě jde o funkcionální transformace signálů. Používání rychlé Fourierovy transformace (FFT) se již za ta léta vžilo. Získáme tak cenné informace o výskytu charakteristických frekvencí v časové řadě nebo obrazu, a to může k diagnostice již stačit. Mnohdy nechceme přijít o časovou nebo prostorovou informaci a chceme se dozvědět něco o frekvencích. Pak volíme krátkou Fourierovu transformaci (STFT) nebo vlnkovou transformaci (wavelet). Další postupy nám umožní zpracování signálů s chaotickým průběhem. Tak můžeme prokázat existenci chaosu, odhadnout jeho parametry a navrhnout diagnózu nemoci (chaos v EEG nebo v EKG) nebo opatření k eliminaci chaosu v řízeném systému. U 2D a 3D obrazů je často požadována fraktální analýza struktur, jejímž výsledkem je fraktální dimenze jako číselná charakteristika členitosti hran v obrazu. Na

základě takové charakteristiky můžeme opět diagnostikovat problémy nebo zavést zpětnou vazbu.

Při finální zpracování signálů si musíme položit zásadní otázku: Do jaké míry dovolíme řídicímu systému ovlivňovat realitu pomocí akčních orgánů? Pokud jsme příznivci on-line řízení, pak si musíme uvědomit, že stabilita a spolehlivost jsou na prvním místě a všechno ostatní jde tak trochu stranou. V takovém případě budeme patrně velmi opatrní při zavádění nových metod zpracování signálů, a to i v situacích, kdy to možná není nutné. Celá řada nelineárních filtrů a pokročilých operací má příznivé dynamické vlastnosti, a proto mohou být zapojeny do zpětné vazby. Vyžaduje to však jejich podrobnou analýzu předcházející praktickou realizaci.

Jednodušší situace je při off-line řízení, kdy řídicí systém pouze doporučuje lidskému operátoru akční zásahy. Pak můžeme být „trochu méně odpovědní“ a více moderní při návrhu řídicího algoritmu. Jistě jste slyšeli o moderních možnostech využitíází pravidel, fuzzy systémů, procesních databází a umělých neuronových sítí v řízení. Pokud uvažujete o zpracování signálů tímto způsobem, doporučuji nejprve zkušební provoz off-line, a pak teprve definitivní rozhodnutí o přímém řízení.

Zdánlivě nejjednodušší situace je informačních systémů, které pouze poskytují podklady pro rozhodování. Zde je odpovědnost pouze na expertovi, který takový systém využívá jako doplňkový nástroj. Pak obvykle nevádí, že systém zpracovává signály několika různými metodikami a dospěje k několika různým doporučením a expert preferující jednu nebo několik metod si nakonec sám subjektivně nebo objektivně vybere, k čemu se přikloní. Tím vzniká dostatečný manévrovací prostor pro zavádění nových metod zpracování signálů a rozhodování za rizika a neurčitosti.

Letmo jsme se dotkli problematiky zpracování signálů, ať již je tím míněno cokoli. Kouřové signály, nuly, jedničky i naměřená analogová data, 2D fotografie či trojrozměrné biomedicínské obrazy je možné nejen pořídit, archivovat a předávat dál. Stále má smysl signál modifikovat, vylepšovat, transformovat a analyzovat, neboť se tím dostaneme o krok vpřed. K tomu nám pomáhají klasické i moderní metody zpracování signálu, jejichž výsledkem je jiný signál, který má v dané aplikaci vyšší užitnou hodnotu než pozorováním či měřením zjištěný originál. Tak se stává, že bez sofistikovaného zpracování signálu daná aplikace ještě nefunguje tak, jak by měla, nebo naopak nevhodná metoda zpracování signálu systematicky narušuje chod dané aplikace. Proto v praxi nezbyývá, než ušít zpracování signálů na míru, což vyžaduje nápaditost a trpělivost řešitele.