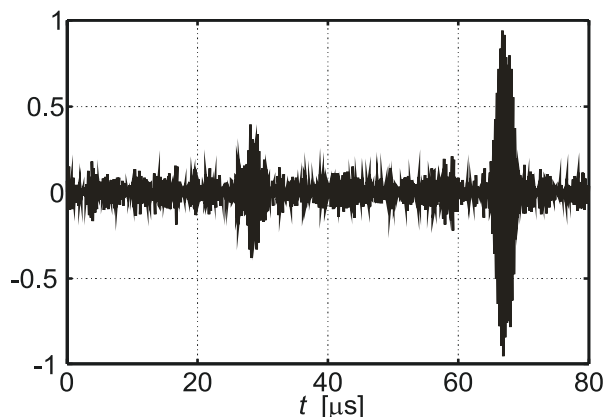


Analýza a zpracování ultrazvukových signálů

Tato kapitola se zaměřuje zejména na metody číslicového zpracování a analýzy ultrazvukových signálů. V dnešních ultrazvukových přístrojích převažuje číslicové zpracování díky dostupnosti levných a výkonných signálových procesorů, jednočipových mikropočítačů, specializovaných obvodů (integrujících analogově-číslíkové převodníky, mikropočítač, obvody rozhraní a ostatní pomocné obvody) a výkonných osobních počítačů. Dále se uplatňují zásadní přednosti, které zpracování v číslicové formě má: možnost realizovat operace v analogové formě neproveditelné, možnost změny algoritmu zpracování je na rozdíl od analogové provedení jednoduchá, absolutní stálost číslicových parametrů algoritmů (vyloučení teplotních, časových driftů apod.), snadný přenos signálů v číslicové podobě.



Obr. 6.1 Typický ultrazvukový signál obsahující echa a šum

6.1. ULTRAZVUKOVÉ SIGNÁLY

Ultrazvukové signály obvykle obsahují více elementárních signálů - složek, které mají různé vlastnosti. Signály obecně lze podle různých hledisek orientačně dělit do skupin. Podle náhodnosti jejich průběhů je lze rozdělit do několika následujících kategorií na:

- signály deterministické, jejichž časový vývoj odpovídá určitému funkčnímu předpisu a které lze dále rozdělit na
 - periodické signály – jsou složeny z harmonických signálů o frekvencích, které jsou celistvým násobkem jedné základní frekvence,
 - kvaziperiodické signály – jsou složeny z harmonických signálů o frekvencích, které jsou násobky nejméně dvou základních frekvencí a současně jsou v poměru určeném iracionálním číslem,
 - přechodné signály – jejich nenulová část je narozdíl od předchozích kategorií časově omezena; typicky jde o přechodné děje, odezvy na impulzní vybuzení apod.,
 - pseudonáhodné – periodické signály, které jsou vytvářeny tak, aby se svými statistickými vlastnostmi podobaly signálům náhodným; perioda musí být tak veliká, aby se z pohledu konkrétní délky signálu jevíly jako stochastické,
- náhodné (stochastické) signály
 - stacionární signály – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se nemění s časem. Velkou podskupinou jsou signály stacionární

v širším smyslu nebo také slabě stacionární (*wide-sense stationary*), u kterých nezávisí na čase střední hodnota a disperze a u kterých autokorelační funkce nezávisí na počátku záznamu signálu. Druhou podskupinou jsou signály stacionární v užším smyslu nebo také silně stacionární, u kterých kromě předchozích podmínek nezávisí na čase také hustoty pravděpodobnosti všech řádů. Jinou skupinou jsou signály ergodické, u kterých se statistické parametry vypočtené z jednoho úseku signálu rovnají parametrům vypočteným ze souboru mnoha úseků,

- nestacionární – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se v průběhu času mění. Hranice mezi nestacionárními a stacionárními signály je nutno určovat s přihlédnutím ke zkoumané délce signálu, přičemž původně nestacionární signál může být z pohledu několikanásobně delší doby stacionární,
- cyklostacionární – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se v průběhu času cyklicky mění.

Pro popis náhodných signálů se používají buď číselné charakteristiky jako jsou obecné a centrované statistické momenty (např. střední hodnota a rozptyl) nebo funkční závislosti jako je hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce z pohledu rozdělení amplitud, korelační a kovarianční funkce z pohledu časového průběhu nebo výkonová spektrální hustota z pohledu frekvenčního.

Z pohledu energie signálu lze odlišit dvě skupiny:

- signály energetické, které mají konečnou energii a
- signály výkonové, nemají konečnou energii (například trvají nekonečně dlouho v čase).

Metody zpracování číslicových signálů lze podle způsobu získávání výsledku v čase rozdělit na

- metody pracující v reálném čase (on-line), kdy je další vzorek výsledku znám po obdržení vzorku zpracovávaného signálu a
- metody, kdy je před vlastním provedením operace k dispozici ucelená část vzorků signálu, tzv. záznam (metody off-line); protože bývá k dispozici časová historie i budoucnost signálu, lze realizovat i nekauzální zpracování.

6.2. DIGITALIZACE SIGNÁLŮ

V dalším textu budeme většinou mluvit o diskrétních signálech, které jsou na počátku řetězce zpracování získány digitalizací, tj. analogově-číslcovým převodem (pomocí analogově-číslcového převodníku, *Analog-to-Digital Converter*, ADC). Takto získaný

signál představuje z matematického hlediska posloupnost. Přechod od analogových signálů k těmto posloupnostem se provádí operacemi nazvanými vzorkování v čase a kvantování v amplitudě (velikost napětí se rozdělí na určitý počet dílů např. 256 dílů pro osmibitový převodník).

6.2.1. Aliasing

První operací při přechodu od spojitého signálu (například výstupní napětí senzoru vibrací) k signálu číslicovému je vzorkování. Při vzorkování signálů v čase může dojít k nežádoucímu jevu zvanému aliasing, který vzniká v případě, kdy frekvence odebrání vzorků není dostatečně velká v porovnání s maximální frekvencí signálu.

V praxi je nejčastější vzorkování s pevnou vzorkovací frekvencí nazývané také periodické nebo sekvenční. Ostatní typy jako například vzorkování adaptivní nebo náhodné se užívají zřídka a jejich rozbor přesahuje rámec tohoto textu.

Podmínka, která určuje, kdy se při vzorkování signálu neztratí informace, bývá nazývána jako Shannon-Kotělnikovova vzorkovací věta. Tato věta říká, že spojitý signál obsahující pouze frekvenční složky s frekvencemi menšími než $f_{\max}$ může být ze vzorků jednoznačně rekonstruován jen tehdy, pokud je vzorkovací frekvence větší než dvojnásobek $f_{\max}$, neboli

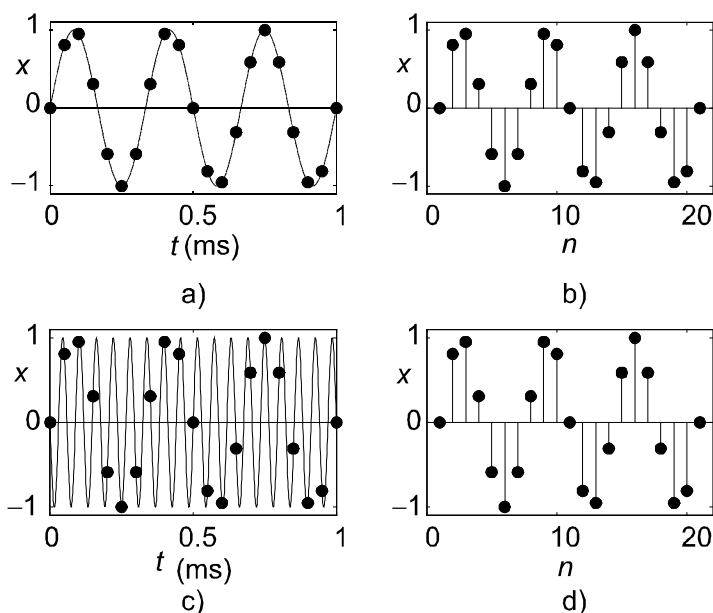
$$f_{\text{vz}} > 2f_{\max} \cdot \quad (6.1)$$

Hraniční frekvence $f_{\text{vz}}/2$ se nazývá Nyquistova frekvence. Podmínka je teoretickou hranicí, v praxi je nutné pro vzorkování použít čtyř nebo vícenásobek maximální frekvence signálu.

Ilustrace vzniku aliasingu je uvedena na obr. 6.2, který ukazuje, že při nesplnění podmínky lze obdržet vzorky identické se vzorky signálu s úplně jinou frekvencí.

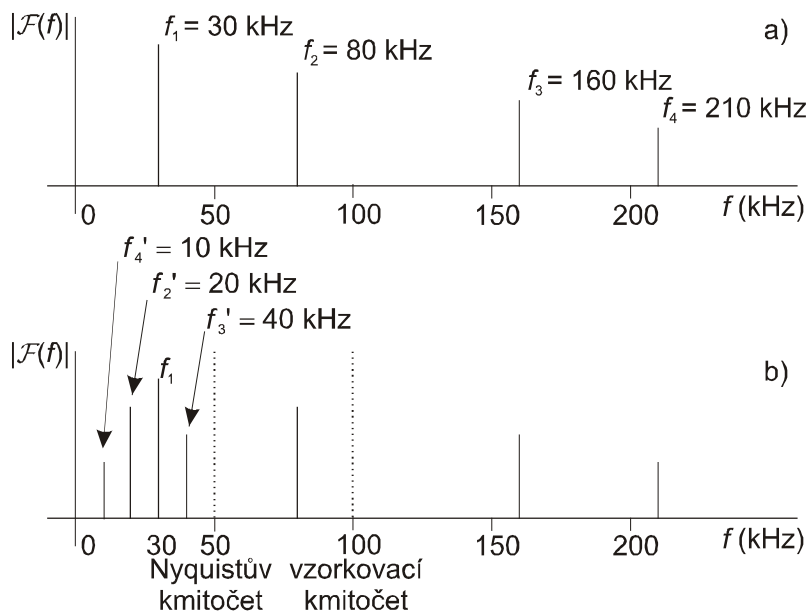
Problém aliasingu lze zkoumat i z frekvenčního pohledu, který je důležitý zejména při spektrální analýze vzorkovaných signálů. Na obr. 6.3 je uveden příklad signálu, který obsahuje několik sinusových složek a je chybně vzorkován frekvencí, která dovoluje korektní vzorkování pouze složky f_1 . U ostatních složek dojde díky efektu, který je patrný z obr. 6.2, k tzv. překládání frekvencí, například frekvence složky f_2 se překlápí kolem poloviny vzorkovací frekvence (Nyquistovy frekvence), složky f_3 a f_4 adekvátně projdou překlápením kolem všech odpovídajících celistvých násobků Nyquistovy frekvence.

Splnění podmínky je možné zajistit několika způsoby, buď je maximální frekvence signálu přirozeně zajištěna například dynamickým chováním senzoru a stačí použít dostatečně vysokou vzorkovací frekvenci AD převodníku, nebo můžeme omezit maximální frekvenci signálu pomocí vhodného analogového filtru typu dolní propust předřazeného AD převodníku, tzv. antialiasingový filtr.



Obr. 6.2 Vznik aliasingu při vzorkování, a) sinusový signál s frekvencí 3 kHz vzorkovaný kmitočtem 20 kHz, b) odebrané vzorky pro signál a), c) sinusový signál s frekvencí 17 kHz vzorkovaný kmitočtem 20 kHz, d) odebrané vzorky pro signál c)

Jako antialiasingové filtry bývají používány analogové eliptické filtry z důvodu velké strmosti v přechodovém pásmu. Kromě použití jednoho antialiasingového filtru v analogové podobě před AD převodníkem, který musí být pro více vzorkovacích frekvencí nastavitelný, se může použít kombinace filtru analogového s číslicovým. Nejprve je signál filtrován pevně nastaveným analogovým filtrem (např. se strmostí 6 dB na oktávu), vzorkován a digitalizován dostatečně vysokou vzorkovací frekvencí. Pak se číslicový signál s respektováním Nyquistovy frekvence zdecimuje (při tzv. decimaci se z původní posloupnosti vybere každý M -tý vzorek, často každý druhý – decimace dvěma) za pomoci číslicového filtru na nižší vzorkovací frekvenci potřebnou pro další zpracování. Toto uspořádání má výhodu ve snadné změně frekvence filtru, která se děje číslicově a ve využití filtrů s mnohem větší strmostí, než lze realizovat v analogové podobě.



Obr. 6.3 Projev aliasingu: a) původní signál obsahující čtyři harmonické složky, b) fiktivní spektrální složky f' vzniklé při vzorkování s nedostatečně vysokým kmitočtem

Při návrhu antialiasingového filtru je nutné kromě příslušných frekvencí vhodně zajistit minimální amplitudové i fázové ovlivnění signálu v propustném pásmu filtru a dostatečný útlum v pásmu nepropustném. Požadovaný útlum lze odvodit z rozlišovací schopnosti následného AD převodníku.

Se vzorkovanými signály se často provádějí operace, které mění signál vypouštěním nebo přidáváním vzorků. Při vypouštění vzorků může dojít k porušení vzorkovací věty, neboť dochází k roztažení spektra původního signálu. Před blok decimace je tedy někdy nutné zařadit číslicový filtr typu dolní propust, který zabrání možnému aliasingu.

6.2.2. Analogově číslicový převod

Dalším krokem v procesu digitalizace je přiřazení číselné hodnoty (vyjádřené obvykle v binární soustavě) konkrétnímu časovému vzorku původního spojitého signálu. Toto přiřazení provádí blok (součástka) zvaný analogově číslicový převodník (*Analog-to-Digital Converter*, ADC), který často obsahuje na svém vstupu i vzorkovací jednotku.

Analogově číslicový převod je obvykle kritickou částí celého řetězce zpracování signálu a jeho parametry ovlivňují vlastnosti celého diagnostického systému. Mezi

základní parametry AD převodníků nebo AD modulů patří:

- maximální dosažitelná vzorkovací frekvence (omezuje možné frekvenční pásmo převáděného signálu),
- rozsah amplitudy vstupního signálu,
- počet vstupů a způsob vzorkování více kanálů (pro nenáročné aplikace se používá přepínání několika vstupů k jednomu AD převodníku, pro aplikace náročné na fázový souběh kanálů je nutné použít samostatné vzorkovače nebo jednotlivé převodníky pro každý vstup),
- rozlišení, které udává jakou nejmenší změnu napětí na vstupu převodník rozpozná. Tento nejmenší „krok“ převodu je nazván LSB (*Least Significant Bit*). Rozlišení lze vyjádřit v procentech rozsahu (% FS, *Full Scale*) nebo počtem diskretních úrovní, na které je rozdělen vstupní rozsah v bitech (typický rozsah je 8-24 bitů). Efektivní rozlišitelnost, která je pro reálný AD převodník vždy nižší než hodnota nominálního rozlišení se udává obvykle pomocí efektivního počtu bitů (ENOB, *Effective Number of Bits*). Efektivní počet bitů je frekvenčně závislý a přibližně vyjadřuje kolik bitů v číslicovém výstupu převodníku nese informaci o velikosti signálu.

Jedním z hlavních faktorů způsobujících zkreslení signálu zanesené AD převodem je kvantovací šum převodníku, který vzniká z principu vyjádření spojitého signálu pomocí omezeného počtu diskretních hodnot a obvykle převyšuje zaokrouhlovací a jiné chyby v následném výpočetním zpracování signálu. Bývá kvantifikován pomocí poměru signálu k šumu (SNR) a definován jako poměr efektivní hodnoty užitečného signálu k efektivní hodnotě kvantovacího šumu v decibelech. Pro ideální převodník je dán vztahem [19]:

$$SNR = 6,02n + 1,76, \quad (6.2)$$

kde n je počet bitů.

Pro běžné počty bitů jsou hodnoty SNR uvedeny v tabulce:

Tab. 6.1 Kvantovací šum ideálního převodníku

počet bitů	SNR (dB)	počet bitů	SNR (dB)
8	50	20	122
16	97	24	146

Současné maximum dynamického rozsahu AD převodu (pro frekvenční oblast do 40kHz) dosahuje 160 dB s využitím několika 24-bitových převodníků, které pokrývají určité části rozsahu a jejichž výstupy jsou zpracovány s přihlédnutím ke kompenzaci nelinearit a driftů.

Velký dynamický rozsah dovoluje snížit nutnost přepínání vstupních rozsahů a v některých aplikacích zrušit potřebu analogového předzpracování signálu. Například při měření užitečné složky s amplitudou o několik řádů menší než jiné, z pohledu aplikace nezajímavé složky, může nastat situace, kdy je vstupní rozsah využit naplno a přesto je pro konkrétní dynamický rozsah zařízení amplituda užitečné složky menší než 1 LSB. V případě, kdy není možné použít digitalizátor s vyšším rozlišením, je nutné analogově odstranit neužitečné složky signálu, případně užitečnou složku zesílit.

Současné přístroje nastavují automaticky vstupní rozsah (funkce *Autorange*) tak, aby vůči špičkové hodnotě signálu měl přístroj amplitudovou rezervu cca 3 až 6 dB; překročení hodnoty cca 0,71 z plného rozsahu je pak indikováno jako přetížení vstupu (*overload*).

6.3. AMPLITUDOVÉ POPISY SIGNÁLŮ

Pro popis vlastností signálů z hlediska amplitudy existuje celá řada přístupů. V následujícím textu je uveden přehled vybraných metod s přihlédnutím k aplikacím v diagnostice. Protože jsou některé metody používány pro popis jak deterministických tak náhodných signálů, nebudeme jejich výklad dělit.

Mezi základní energetické veličiny řadíme výkon a energii signálu. Zjednodušeně můžeme výkon P diskrétního signálu $x(n)$ konečné délky N definovat vztahem

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) . \quad (6.3)$$

Obdobně energie diskrétního signálu $x(n)$ konečné délky N je definována vztahem

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) . \quad (6.4)$$

Stejně jako u spojitých signálů je výkon energie za určitý čas. Tímto časem je u periodických signálů doba periody, u signálů konečné délky je to délka signálu. Tato délka je u konečného diskrétního signálu rovna NT_{vz} , kde T_{vz} je vzorkovací interval.

Šumy bývají obvykle popisovány dle několika hledisek:

1. Rozložení amplitud; z tohoto pohledu bývá šum charakterizován například jako šum s normálním rozložením – tzv. Gaussovský nebo šum rovnoměrně rozložený.
2. Průběh spektrální hustoty; z tohoto pohledu bývá šum charakterizován

například jako šum bílý tj. s rovnoměrně rozloženou spektrální hustotou, šum růžový jehož spektrální hustota je nepřímo úměrná frekvenci (tedy se stoupající frekvencí klesá velikost spektrální hustoty) nebo obecně šum barevný tj. s nerovnoměrnou spektrální hustotou.

3. Vztah k dalšímu signálu významnému v dané úloze, např. šum korelovaný/nekorelovaný.
4. Vybrané statistické vlastnosti signálu, např. šum stacionární/ nestacionární.

Efektivní hodnota šumu s nulovou střední hodnotou je rovna druhé odmocnině rozptylu, tedy směrodatné odchylce (standardní odchylce) šumu. V případě šumu s nenulovou střední hodnotou je efektivní hodnota rovna geometrickému součtu střední hodnoty a směrodatné odchylky.

Často bývá rozložení hodnot (i náhodného) signálu charakterizováno pomocí několika hodnot, tzv. momentů prvního řádu. Obecný k -tý moment prvního řádu pro náhodnou diskrétní veličinu x je dán:

$$\mu_k = \sum_{i=1}^N x_i^k P_i \quad (6.5)$$

a centrální k -tý moment prvního řádu

$$\mu_k^c = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^k P_i, \quad (6.6)$$

kde P_i je pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty x_i^k pro obecný moment a hodnoty $(x_i - \mu_x)^k$ pro centrální moment.

První obecný moment μ_1 je tzv. střední hodnota označovaná jako $\bar{x}$, kterou můžeme také odhadnout pomocí výpočtu

$$\hat{\bar{x}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (6.7)$$

Druhý obecný moment představuje střední hodnotu kvadrátu a jeho odmocnina je rovna efektivní hodnotě signálu. Druhý centrální moment je tzv. rozptyl (variance nebo disperze). Jeho druhá odmocnina představuje střední kvadratickou odchylku (nebo též směrodatnou odchylku nebo standardní odchylku).

Mezi parametry, které popisují tvar rozdělení a jsou určeny z momentových popisů

patří šikmost rozdělení (*skewness*) definovaná jako míra asymetrie rozdělení vůči průměru:

$$s = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (6.8)$$

kde σ je směrodatná odchylka. Když je šikmost záporná, data jsou rozložena více doleva od průměru a naopak.

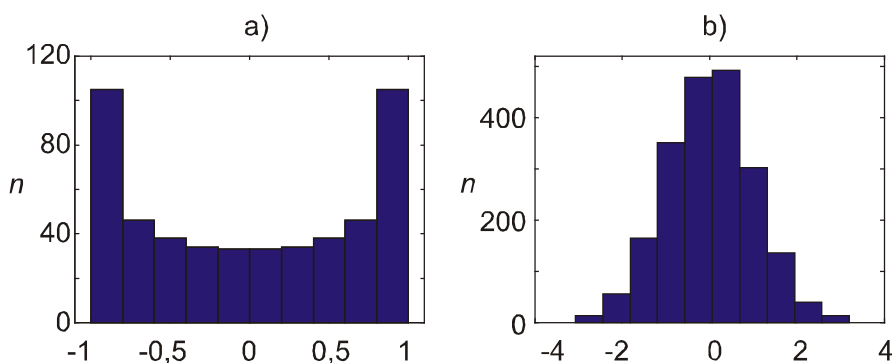
Špičatost (*kurtosis*) popisuje „šířku“ rozdělení vůči normálnímu rozdělení. Definována bývá jako

$$k = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \quad (6.9)$$

Je-li špičatost větší než nula, je hustota na koncích větší než hustota normálního rozdělení se stejnou střední hodnotou a stejným rozptylem. Pro normální rozdělení je špičatost nulová. Někdy bývá použita alternativní definice bez odečtení 3, pro normální rozdělení je pak $k = 3$.

Mezi momenty druhého řádu patří korelační a kovarianční funkce, které jsou popsány dále.

Mezi další veličiny charakterizující signál z amplitudového pohledu patří efektivní hodnota (RMS, *Root Mean Square*), absolutní špičková hodnota, kladná (příp. záporná) špičková hodnota, rozkmit signálu (*peak-to-peak value*), činitel tvaru (*form factor*) jako poměr efektivní ku střední hodnotě a činitel výkyvu nebo výkmitu (*crest factor*) jako poměr špičkové ku efektivní hodnotě. Vizuální posouzení rozložení amplitud signálu dovoluje histogram, který udává průběh četnosti výskytu amplitud v jednotlivých amplitudových pásmech, viz obr. 6.4.



Obr. 6.4 Histogram (a – sinusový signál, b – šum s normálním rozložením)