

NIEKTORÉ FYZIKÁLNE ASPEKTY SLUCHOVÉHO VNÍMANIA A ICH VYUŽITIE PRE MULTIMEDIÁLNE APLIKÁCIE

Marek Čandík, Štefan Chudý

Abstrakt

Článok popisuje prehľad niektorých základných fyzikálnych princípov ľudského sluchového vnímania. Pochopenie týchto princípov je považované u študentov učiteľstva so zameraním na technickú, resp. informačnú výchovu ako základný predpoklad k ich ďalšiemu štúdiu zameranému na tvorbu multimediálnych edukačných materiálov.

Kľúčové slová

Sluchové vnímanie, fyzikálne princípy, vlastnosti sluchu.

Abstract

Some physical aspects of auditory perception and their usability for multimedia applications

This paper gives an overview of the basic physical principles of human auditory perception. Understanding these principles by teacher trainees specializing in technical or IT education is regarded as a prerequisite for their following study involving the creation of multimedia educational materials.

Key words

Auditory perception, physical principles, hearing properties.

1 Úvod

Základným faktorom pri tvorbe multimediálnych materiálov a ich použití je vnímanie človeka. Kvalitne vypracovaný materiál ešte nemusí byť zďaleka dobre pochopením. V učiteľskom povolani musíme na tieto aspekty brať ohľad už v „skorom“ období prípravy ďalšej generácie učiteľov, najmä technických predmetov. V príspevku sa pokúsime o prehľad základných vlastností sluchového systému človeka a prehľad aktuálnych možností využitia týchto vlastností v pedagogickej praxi.

2 Štruktúra ľudského ucha

Človek vníma sluchové informácie prostredníctvom sluchových orgánov, ktorými sú uši. Štruktúra ľudského ucha je znázornená na obr. 1. Ľudské ucho sa skladá z troch častí (Hupka, Š., 1978), a to:

- vonkajšieho ucha,
- stredného ucha,
- vnútorného ucha.

Obr. 1 Štruktúra ľudského ucha



Vonkajšie ucho sústreďuje zvuky a vonkajším zvukovodom ich vedie do strednej a vnútornej časti ucha.

Na hranici vonkajšieho a **stredného ucha** sa nachádza tenká blanka - ušný bubienok. Ako rýchlo a silne sa bubienok rozkmitá, závisí od toho, či sú zvuky vysoké alebo nízke, hlasné alebo tichšie. Z bubienka sa vibrácie prenášajú na sústavu troch jemných kostičiek - kladivko, nákovku a strmienok.

Vnútročné ucho je uložené v skalnej časti spánkovej kosti. Vnútročné ucho má okrem sluchových funkcií ešte jednu dôležitú úlohu - vytvára **pocit rovnováhy**,

ktorý človek potrebuje, aby mohol udržať rovnováhu, stáť a pohybovať sa. Vo vnútornom uchu sú polkruhové kanáliky vyplnené kvapalinou, ktorá sa pri pohybe hlavou pohne a predáva správu o pohybe vlásokom. Cez ne sa správa vysiela prostredníctvom nervov do mozgu, ktorý spätne vyšle telu správu, akú polohu má zaujať. Tento proces sa deje ustavične bez toho, aby si to človek uvedomoval.

Vlastnú sluchovú časť vnútorného ucha tvorí slimák. Vo vnútornom uchu (v slimákovi) je kanál slimáka, ktorý rozdeľuje dutinu slimáka na dve časti: na predsieňovú chodbičku (scala vestibuli) a na bubienkovú chodbičku (scala tympani). Tieto dve časti sú spojené na vrchole slimáka malým priechodom (helikotrémou).

Kanál slimáka oddeľuje od bubienkovej chodbičky spodinová platnička (membrána bazialis). Hornú stenu slimákovho kanála tvorí haditá blana (Reissnerova membrána). Spodinová platnička sa skladá z jemných priečných väzivových vlákien. Smerom k vrcholu slimáka sú tieto vlákna dlhšie. Bubienková chodbička sa končí blankou slimákovho (okružleho) okienka.

Na bazálnej membráne je Cortiho ústroj. Je to zmyslový ústroj sluchu. Nad Cortiho ústrojom v slimákovom kanále je krycia blana (tektoriálna membrána). Bazálna membrána je veľmi úzka na bazálnom konci slimáka pri predsieňovom okienku (0.05 mm), najširšia je na vrchole slimáka (0.4–0.5 mm). Tu je aj hrubšia a uvoľnenejšia, čo tvorí anatomický predpoklad frekvenčného rozloženia zvukovej vlny vo vnútornom uchu. Transformácia mechanického kmitania na bioelektrické deje sa uskutočňuje v bunkách ležiacich na bazálnej membráne v Cortiho ústroji. Senzorickým receptorom Cortiho ústroja sú vláskové bunky. Je ich asi 19 000 a na ne sa pripája asi 30 000 nervových buniek. Každá vlásková bunka je uložená jednou stranou na bazálnej membráne, druhým koncom sa vláskové bunky dotýkajú tektoriálnej membrány. Kmitaním membrány sa vláskové bunky stláčajú a pritom sa kmity menia na bioelektrické impulzy. Bioelektrické impulzy vznikajú až v sluchovom nerve, ktorý sa končí v Cortiho ústroji a zbiera senzorické podnety z vláskových buniek. Sluchový nerv prenáša bioelektrické impulzy do mozgu.

3 Vlastnosti sluchu

Významnými parametrami sluchového vnímania sú hlasitosť zvuku, výška tónu, skreslenie v sluchovom orgáne, citlivosť sluchu, adaptácia a únava sluchu, maskovania, binaurálne počutie a smerové a priestorové počutie. Týmto vlastnostiam sa budeme venovať trochu podrobnejšie.

3.1 Hlasitosť zvuku

Hlasitosť zvuku je definovaná ako miera subjektívneho vnemu zvuku súvisiaca s intenzitou zvuku, ale aj s frekvenčnou skladbou zvuku. Ak intenzita zvuku narastá nad sluchový prah, potom narastá aj množstvo podráždení, ktoré tento zvuk vyvoláva – vzrastá teda **hlasitosť** (Kolmer, F., Kyncl, J., 1980).

Veľkosť postrehnuteľnej zmeny intenzity zvuku je závislá na počiatkovej hodnote intenzity a je definovaná ako pomer prírastku intenzity dI k počiatkovej intenzite I podľa vzťahu (Smetana, C., 1981):

$$dI / I = \text{konštanta} \quad (1)$$

Potom prírastok hlasitosti dH je úmerný relatívnej zmene intenzity zvuku:

$$dH = b \cdot (dI / I) \quad (2)$$

pričom b je konštanta.

Úpravou tohto výrazu bude pre hlasitosť platiť:

$$H = 10 \cdot \log (I / I_0) [\text{dB}, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3)$$

Referenčná prahová intenzita (pre 1 000 Hz) je $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Tieto vzťahy ale uvažujú z hľadiska subjektívneho vnímania iba logaritmickú závislosť medzi hlasitosťou a intenzitou zvuku a nerešpektujú frekvenčnú závislosť citlivosti ľudského sluchu. Platia iba pre tóny s frekvenciou 1 kHz. Pre tóny s inou frekvenciou sa ich hlasitosť určuje subjektívnym porovnaním hlasitostí týchto tónov s referenčným tónom 1 kHz. Týmto spôsobom sa získajú hladiny hlasitosti, ktoré vyjadrujú veľkosť akustického tlaku na rôznych frekvenciách, ktorý spôsobí rovnaký vnem hlasitosti ako referenčný tón a nazývame ich **krivky hladín rovnakej hlasitosti**.

Jednotkou hladiny hlasitosti je **fón (Ph)** (na frekvencii 1 kHz je veľkosťou rovný 1 dB) a používa sa len v prípadoch, keď bola hladina hlasitosti zistená subjektívnym porovnaním (Smetana, C., 1981).

Hladina hlasitosti vo fónoch však nevyjadruje správne subjektívne vnímané zmeny hlasitosti, napr. rozdiel 5 fónov pri sluchovom prahu je takmer nepozorovateľný, na vyšších hladinách je však táto zmena hlasitosti značná. Aj pri vnímaní zvuku, ktorý sa skladá z niekoľkých rôznych tónov, nie je pre určenie výslednej hladiny hlasitosti smerodajný súčet intenzít, ale súčet jednotlivých hlasitostí, ktoré by spôsobili jednotlivé tóny. Preto bola experimentálne zave-

dená čisto subjektívna stupnica hlasitosti, ktorej jednotka bola nazvaná **son**. (Smetana, C., 1981).

Hlasitosti I son zodpovedajú tóny s hladinou hlasitosti 40 fónov. Vzťah medzi hladinou hlasitosti $LN(Ph)$ a hlasitosťou N (son) vyjadruje relácia (4).

$$N = 2^{(L_N - 40) / 10} [\text{son}; Ph] \quad (4)$$

Potom pre hladinu hlasitosti bude platiť:

$$L_N = 33,22 \cdot \log N + 40 \quad (5)$$

Z tejto závislosti vyplýva, že ak sa zvýši hladina hlasitosti o $10 Ph$, zväčší sa hlasitosť dvojnásobne.

3.2 Výška tónu

Výška tónu (zvuku) je fyziologický pojem, ktorý závisí na frekvencii tónu alebo zvuku. Je však do istej miery závislý aj na intenzite, aj keď pre subjektívne určenie výšky tónu je frekvencia zvuku najdôležitejšia.

Podľa frekvenčného rozsahu rozlišujeme oblasti:

- do 16 Hz - *infrazvuk*,
- 16 Hz až 16 kHz - *zvuk*,
- 16 kHz až 1 GHz - *ultrazvuk*,
- nad 1 GHz - *hyperzvuk*.

Vnímaný frekvenčný interval je pre rôzne osoby rozdielny a zároveň sa mení u tej istej osoby aj vekom. Vo všeobecnosti sa udáva rozsah počuteľných frekvencií medzi 16 Hz a 16 000 Hz (v detstve je to až 20 000 Hz, v starobe sa horná hranica rozsahu znižuje na 10 000 Hz).

Pre človeka sú počuteľné zvuky významným zdrojom informácií, ale aj pozitívnym faktorom priaznivo pôsobiacim na životné funkcie človeka, hlavne tiché a melodické zvuky – šum lesa, tichá hudba. Tieto pozitívne účinky sa využívajú v liečebných procesoch nazývaných *muzikoterapia*.

Subjektívna výška tónu je daná frekvenciou čistého tónu, ktorý má pri subjektívnom hodnotení rovnakú výšku ako skúmaný zvuk – túto výšku označujeme ako *absolútna výška*. Ľudia, ktorí sú schopní určiť takto presne subjektívne výšku tónu, majú absolútny hudobný sluch a túto absolútnu výšku zvuku si pamätajú neobmedzene dlho. Človek s pomerne dobrým sluchom je schopný rozoznať

len *relatívnu výšku* tónu, ktorá je vyjadrená hudobnými intervalmi. Tieto hudobné intervaly si väčšina ľudí môže pamätať dlhodobou.

Jednotkou relatívnej výšky je jeden **tón**, ktorý sa mení na zlomky (poltón, štvrttón, apod.) alebo násobky (prima, sekunda, ..., oktava).

Jednotka subjektívnej výšky tónu bola nazvaná **1 mel**. Tón $1\ 000\ \text{Hz}$ na hladine hlasitosti $40\ \text{dB}$ (je rovný hlasitosti $1\ \text{son}$) má subjektívnu výšku $1\ 000\ \text{melov}$.

Pre proces záznamu a reprodukcie zvuku je dôležitá *minimálna rozpoznateľná zmena frekvencie tónu*, ktorá je daná pomerom $dfff$ a je závislá na frekvencii zvuku. Ľudský sluch je najviac citlivý na zmenu frekvencie pri frekvencii okolo $2\ \text{kHz}$ a intenzite zvuku $60\ \text{dB}$, kedy je minimálna rozpoznateľná zmena frekvencie len asi $0,0017$. Pri prahu počuteľnosti sú zmeny frekvencie rozpoznateľné ťažšie.

Na to, aby si človek uvedomil výšku tónu nejakého zvukového vnemu, musí zvukový podnet trvať určitý čas. Ak má príliš krátke trvanie, tak subjektívny vnem výšky tónu je nižší ako zodpovedá frekvencii.

3.3 Skreslenie v sluchovom orgáne

Ucho nie je dokonalý orgán, a preto vykazuje určité skreslenie. Skreslenie je spôsobené najmä zmenou reprodukcie vlnenia, ktoré sa šíri tekutinou v labirinte a vo vnútornom uchu pri premene mechanických vibrácií na nervové impulzy. V podstate rozoznávame tri druhy skreslenia: amplitúdové, útlmové a fázové. Tieto skreslenia sa môžu vzájomne vyvolávať.

Amplitúdové skreslenie je pre fyziológiu ucha najvýznamnejšie. Pri tomto skreslení sa nelineárne prenášajú rôzne amplitúdy frekvencií. Pri nízkych hodnotách intenzity (do $40\ \text{dB}$ nad prahom počuteľnosti) je prenos lineárny, bez zistiteľného skreslenia. Pri väčšej intenzite (nad $70\ \text{dB}$) je privedený čistý tón reprodukovany prevodovým systémom ako *základný tón* a rad harmonických tónov, ktoré nazývame *aurálne harmonické tóny*.

Útlmové skreslenie vzniká tým, že tóny s rôznymi frekvenciami sú prenášané s rôznou amplitúdou (v súlade s krivkami rovnakej hlasitosti). Pre väčšie intenzity je ale útlmové skreslenie menšie, lebo citlivosť sluchu sa pre rôzne tóny do istej miery vyrovnáva.

Fázové skreslenie spočíva v nesprávnom prenášaní fázy kmitov, tj. v rôznom časovom posunutí jednotlivých zložiek oproti pôvodnému zvuku. Tvar čistého sínusového kmitu sa fázovým skreslením nemení. Naopak pri zložených tónoch

sa posúva každá sínusová zložka o iný uhol, takže vlnenie dostáva úplne iný tvar.

Pre sluchové vnemy majú veľký význam **kombinačné tóny**. Vznikajú v prevodovom systéme a vo vnútornom uchu intermoduláciou pri súčasnom prenose dvoch alebo viacerých čistých tónov. Kombinačné tóny menia charakter subjektívneho vnemu zmesi tónov a rozširujú skutočné spektrum zvuku smerom hore a dole.

Citlivosť ucha k vonkajšiemu skresleniu je rôzna – závisí na usporiadaní pokusu. Ak porovnáme dva tóny – čistý a s premenlivým skreslením, je možné rozoznať skreslenie menšie ako 0,3 %. Pri bežnej reprodukcii (napr. hudby) nie je možnosť porovnávať tóny týmto spôsobom, čo má za následok, že poslucháč nie je schopný skreslenie menšie ako 5% rozoznať.

3.4 Citlivosť sluchu

Citlivosť sluchu je určená minimálnou intenzitou zvuku, ktorú je človek s normálnym sluchom schopný vnímať a označujeme ju ako **prah počuteľnosti zvuku**, ktorý je ale pre čisté tóny odlišný ako prah počuteľnosti pre širokopásmový šum, pásmo šumu, reč, a pod.

Prah počuteľnosti je závislý na frekvencii a na spôsobe, akým zvuk meriame. Ucho je najviac citlivé na frekvencie v blízkosti 4kHz. Úrovně akustického tlaku, ktoré je možné rozoznať pri 4 kHz, sa nedajú rozoznať pri iných frekvenciách. Čiže dva tóny rovnakých výkonov ale rôznych frekvencií neznejú rovnako hlasno.

Rozsah hlasitosti sluchového vnemu je zhora obmedzený toleranciou sluchového orgánu vzhľadom k zvuku. Pri určitej hodnote intenzity zvuku sú podráždené nielen sluchové zakončenia, ale aj hmatové telieska – okrem sluchového vnemu vzniká aj vnem hmatový, ktorý registrujú aj osoby úplne hluché. Intenzita, pri ktorej dochádza k hmatovému vnemu, sa nazýva **hmatový prah** (asi 120 dB). Pri ďalšom náraste intenzity sú dráždené mnohé nervové zakončenia pre vnímanie bolesti a v tomto prípade hovoríme o **prahu bolestivosti** (okolo 130 dB). Pri dosiahnutí prahu hmatového a prahu bolestivosti dochádza v krátkom čase k poškodeniu sluchového orgánu, ktorý je na takéto veľké hodnoty intenzity veľmi citlivý. Sluchovým prahom, prahom hmatovým a prahom bolestivosti je vymedzené tzv. *sluchové pole*.

Pri dlhodobom pôsobení zvukov veľkých intenzít následne dochádza k trvalému poškodeniu sluchu hlukom.

3.5 Adaptácia a únava sluchu

Medzi dôležité vlastnosti ľudského sluchu, na ktoré musíme pamätať najmä pri subjektívnych skúškach, patrí adaptácia a únava sluchu.

Adaptácia sluchu je vyvolaná predchádzajúcim zvukovým podráždením a prejavuje sa ako zmena citlivosti sluchu. Pri hladinách hlasitosti nad 80 dB vzniká s oneskorením 10 ms v strednom uchu reakcia, pri ktorej sa sťahujú napínače bubienka a strmienkového svalu. To má za následok zväčšenie tuhosti a tým aj impedancie prevodovej sústavy stredného ucha pre hlboké tóny. Tento jav môže byť vyvolaný tónmi rôznych frekvencií a ucho sa takýmto spôsobom chráni pred silnými zvukovými podnetmi. Vo vnútornom uchu sa adaptácia sluchu uskutočňuje tým, že sa zvyšuje prah podráždenia zmyslových buniek, čím sa prah sluchu zvýši a hluk vnímame so zníženou hlasitosťou. Po dobu trvania zvuku je adaptácia určená veľkosťou maskovania. Po skončení zvukového podnetu je sluch schopný vrátiť citlivosť do predchádzajúceho stavu v priebehu $0,5$ až 1 s . Ak je ale podráždenie sluchu vyvolané zvukom veľkej intenzity, zvyšuje sa doba návratu citlivosti sluchu do pôvodného stavu až na niekoľko sekúnd.

Únava sluchu je spôsobená prekročením fyziologickej hranice a prejavuje sa pri zvukoch s hladinou hlasitosti 90 dB a viac, a to aj pri ich krátkom trvaní. Ak je sluch exponovaný zvukom dlhší čas, môže nastať prípad, že citlivosť sluchu je znížená aj na hodinu, deň a viac. Ak sa únava sluchu neopakuje, vracia sa sluch po tejto dobe na svoju prahovú úroveň. Pri pôsobení spojitého hluku sa znižuje citlivosť sluchu pre frekvencie okolo 4 kHz . V prípade, že je sluch vystavovaný častej únave a dlhým expozíciám hluku, nedôjde po dobu odpočinku k úplnej úprave posunu sluchového prahu a môže dôjsť k poškodeniu sluchu. Najprv býva postihnuté počutie vysokých tónov v oblasti 4 až 6 kHz , ktoré sa často prejavuje ako *subjektívne šelesty*. Neskôr dochádza k strate sluchu pri šepote a frekvenciách dôležitých pre zrozumiteľnosť reči. Pri práci v hluku nie sú po prvých rokoch zmeny sluchu výrazné. Pri hlukoch do 100 dB sa obvykle objavuje rýchlejší postup sluchovej poruchy po 7 až 10 rokoch. Vo veku človeka okolo 50 rokov sa proces zhoršovania sluchu opäť spomaľuje. Ak ale tento proces poškodzovania sluchu pokračuje, vedie to k stupňu zhoršenia, pri ktorom človek začína mať problémy so *zrozumiteľnosťou reči*.

3.6 Maskovanie

V situácii, pri ktorej prichádzajú do sluchového orgánu súčasne dva zvuky, môže dosiahnuť podráždenie od jedného z nich hodnotu, pri ktorej je vnem

druhého zvuku čiastočne alebo úplne potlačený. Tomuto javu hovoríme **maskovanie**.

Maskovací jav je daný spôsobom činnosti nervových buniek a vlákien na bazálnej membráne. Maskovací tón rozochveje určitý počet vlákien a nasýti ich, čím spôsobí, že nie sú schopné určitý čas reagovať na ďalší podnet. Maskovanie je ale podmienené tým, že maskovaný a maskujúci zvuk musia zasiahnuť rovnaké miesto na bazálnej membráne – musia byť frekvenčne blízke. **Simultánne maskovanie** sa vyskytuje, ak sa vyskytujú dva zvukové signály v rovnakom čase, napr. nejaká konverzácia (*maskovaný signál*) je vlastne nepočuteľná kvôli prechádzajúcemu vlaku (*maskovač*). Maskovací účinok je možné dosiahnuť nielen za súčasnej prítomnosti dominantného tónu, ale aj určitú dobu pred jeho výskytom – *spätne maskovanie* a po jeho doznení – *predné maskovanie*. Ide o intervaly niekoľko desiatok až stoviek milisekúnd a je jasné, že maskovací účinok klesá so vzdialenosťou od výskytu dominantného tónu.

Maskovanie sa stáva výraznejšie, ak dva zvukové signály sú blízko seba v časovej aj frekvenčnej oblasti. Maskovací účinok čistého tónu je najväčší na jeho vlastnej frekvencii. Pri slabších tónoch (*40 dB* nad prahom počuteľnosti) je maskovací účinok rozložený na obe strany. Pri zväčšovaní intenzity sú tóny vyššie ako maskovacie maskované viac. Účinok maskovania čistých tónov a pásiem šumu pri rovnakej hlasitosti sa líši.

Čistý tón je charakteristický tým, že na bazálnej membráne zasahuje len jedno miesto, naopak *biely šum* zasahuje celú bazálnu membránu, a preto maskuje v celom rozsahu počuteľných frekvencií. Najviac je to ale v oblasti okolo *4 kHz*, čo súvisí s maximálnou citlivosťou sluchu v tejto oblasti. Pri maskovaní čistého tónu bielym šumom je využitá len úzka časť frekvenčného pásma šumu – frekvencie blízke maskovanému tónu. Šírku tohto aktívneho frekvenčného pásma nazývame **kritická šírka pásma** šumu pre danú frekvenciu. Čistý tón bude maskovaný šumom kritického pásma, ak toto pásmo zasahuje tú oblasť na bazálnej membráne ako čistý tón.

Koncept kritických frekvenčných pásiem vychádza z experimentov s ľudskou počuteľnosťou a z myšlienky, že ucho analyzuje počuteľný frekvenčný rozsah použitím súboru *frekvenčných subpásiem*. Kritické frekvenčné pásma môžu byť uvažované ako frekvenčné mierky – vyjadrujú selektivnosť sluchu pre rôzne tóny.

3.7 Binaurálne počutie

K veľkému analytickému potenciálu ľudského sluchu patrí aj možnosť prijímania informácií, ktoré spočíva v zdvojení sluchového orgánu – počúvanie oboma ušami, t.j. **binaurálne počutie**.

Binaurálne počutie je podobne ako zdvojený zrakový orgán využité pre priestorové vnímanie, čo má v spojení so zrakom veľkú biologickú hodnotu. Okrem toho prináša počutie oboma ušami ďalšie možnosti v sluchovej analýze, ako sú javy: zvýšenie sluchovej ostrosti, zvýšenie hlasitosti zvuku, zlepšenie výberu signálu zo šumu, zlepšenie výberu signálu z dozvuku, lateralizácia sluchového vnemu, smerové a priestorové počutie.

Prvé dva javy – zvýšenie ostrosti sluchu a hlasitosti zvuku, vznikajú jednoduchým zdvojením nervového podráždenia, ktoré sa vlastne z oboch sluchových orgánov sčíta. Ostatné javy vznikajú spracovaním binaurálnych rozdielov zvuku, ktoré sú veľmi nepatrné, ale sú citlivo spracovávané nervovým systémom. Prirodzené binaurálne rozdiely vznikajú šírením zvuku, vlastnosťami vonkajšieho ucha a z priestorových akustických pomerov.

K tomu, aby vznikol dojem prirodzeného umiestnenia zdroja zvuku, je potrebné, aby sa k základným faktorom (rozdiel času a intenzity) priradili ešte ďalšie faktory, ktoré sú podstatou tzv. *smerového a priestorového počutia*.

3.8 Smerové a priestorové počutie

Smerové počutie nám umožňuje určenie umiestnenia (lokalizáciu) zdroja zvuku v priestore, a to pomocou určenia smeru a odhadom vzdialenosti.

Ak je zdroj zvuku umiestnený stranou od poslucháča, zvukové vlny prichádzajú k jednému uchu o nejaký časový okamih skôr ako k druhému. Čím viac je tento zdroj umiestnený stranou, tým je časový rozdiel dopadu vln na sluchové orgány väčší, a tým sa nám zdá vychýlenie zdroja z roviny súmernosti oboch uší väčšie. Človek dokáže oveľa lepšie rozoznať, či je zvukový zdroj od neho vľavo alebo vpravo, ako určiť, či je pod ním alebo nad ním.

Pri vnímaní krátkodobého zvukového signálu je pre určenie smeru dôležitý časový rozdiel medzi okamihmi dorazenia zvukových vln k ľavému a pravému uchu. Ak je tento časový rozdiel nulový, je zrejmé, že zvukový zdroj leží v normálovej rovine. Človek je schopný rozoznať pri slede krátkych časových impulzov veľmi malý časový rozdiel – asi 50 ms.

Pri vnímaní dlhotrvajúcich zvukových signálov sa musia počítať časové rozdiely v okamihoch, keď sa zvuk objaví v oboch ušiach v rovnakej fáze, čím sa vlastne časový rozdiel prevádza na fázový. Ľudský sluch dokáže výrazne cit-

livejšie určiť smer pomocou fázových rozdielov pre hlbokotónové zvuky (až do 800 Hz). Pre vysoké tóny sa blíži polovica ich vlnovej dĺžky vzdialenosti oboch uší, čím vzniká fázový rozdiel 180° a zvuk dopadá na druhé ucho.

Dôležitým parametrom smerového vnímania je aj **intenzitný rozdiel zvuku**. V prípade, že zdroj zvuku sa nachádza v strednej rovine (rovina určená stredom spojnice oboch uší), dopadá zvuková energia na obe uši v rovnakej intenzite. Ak sa zdroj vychýli zo strednej roviny, intenzita zvuku sa pre obe uši zmení a zdroj je lokalizovaný v smere väčšej intenzity. Vnem rôznych intenzít je pre blízke zdroje následkom väčšieho priblíženia zdroja k jednému uchu a pre vzdialené zdroje akustickým tienením hlavy. Akustický tieň sa môže uplatniť len pri vysokých tónoch, pre ktoré je hlava dostatočnou prekážkou, tj. v prípadoch, keď sa vlnová dĺžka blíži alebo je menšia ako rozmer hlavy. Pre nízke tóny sa tento jav nevyskytuje a tóny do 200 Hz prichádzajú do uší s rovnakou intenzitou. Od 500 Hz do 3 kHz je intenzitný rozdiel okolo 7 dB, ale potom sa rýchle zväčšuje a pri frekvencii 5 kHz dosahuje 25 dB a pri 10 kHz dokonca 30 dB.

Na rozpoznávanie smeru v strednej rovine, tj. či zvuk prichádza spredu, zozadu alebo zhora, sú ale intenzitné a časové rozdiely nedostatočné. Lokalizáciu zvuku v tejto rovine umožňuje pohyb hlavy, ktorý človek pri posluchu vykonáva mimovoľne. Každé takéto pootočenie je zdrojom sledu meniacich sa časových rozdielov medzi oboma ušami, ktoré presne vymedzujú polohu zvukového zdroja.

Odhad vzdialenosti zdroja zvuku je oveľa náročnejší a aj menej presný ako určenie smeru a závisí na tom, či ide o bezodrazový priestor alebo priestor s odrazmi. V bezodrazovom priestore je dôležitá znalosť intenzity zdroja, ktorá je ovplyvňovaná frekvenciou zvuku a vlhkosťou vzduchu tak, že s narastajúcou frekvenciou a vlhkosťou narastá aj útlm zvuku na jednotku dĺžky. V priestore s odrazmi sa odhad vzdialenosti zlepšuje vďaka zložitému spracovaniu sluchových vnemov a vyhodnoteniu prvých odrazov, ktoré sú následne takisto spracovávané nervovým systémom.

Priestorový zvukový vnem je teda tvorený odrazmi zvuku od stien a dozvukom, ktorý je, ako je uvedené v predchádzajúcej kapitole, spracovávaný v nervovom systéme s diferencovaným útlmom. To má za následok jeho potlačenie, a preto vystupuje len ako súčasť zvukového pozadia, čiže je to zvuková kulisa užitočného signálu. Táto dozvuková kulisa je dôležitým doplnkom k zvukovému vnemu, čím sa odstraňujú veľmi neprijemné dojmy z tiesnivej uzavretosti alebo naopak prázdnej rozľahlosti. Zvlášť pri umeleckom prejave môže mať dozvuk veľmi emocionálny účinok na celkový sluchový vnem.

4 Využitie vlastností sluchového vnímania v technických aplikáciách

V súčasnosti rastúca snaha o zvyšovanie kvality spracovania, prenosu a reprodukcie zvukových dát má za následok zväčšené nároky na množstvo spracovávanej informácie (Sokolowsky, P., Šedivá, Z., 1994). V oblasti záznamu zvuku je to hlavne prípad *digitálnych záznamových médií*, ktoré poskytujú vysokú kvalitu reprodukcie, ale aktuálna je tu otázka efektívneho využitia pamäťovej kapacity. V oblasti prenosu zvuku napr. v perspektívnom *rozhlasovom vysielaní DAB (Digital Audio Broadcast)*, ktoré umožňuje šírenie rozhlasových programov so zvukovou kvalitou kompaktných diskov, je tento problém spojený so znížením bitovej rýchlosti, ktorá zabezpečí efektívne využitie kapacity prenosového kanálu.

Tieto požiadavky je možné splniť zmenšením objemu spracovávaných dát – **kompresiou**, ktorá musí zaručiť zachovanie kvality (Polec, J., Pavlovičová, J., Oravec, M., 1996). V zásade sa rozlišujú tieto kompresné techniky:

- *bezstratové* – umožňujú dokonalú rekonštrukciu pôvodného dátového toku, pričom je možné dosiahnuť len nízke kompresné pomery (2 až 3), závislé na charaktere signálu,
- *stratové* – nie je možné vrátiť sa k pôvodnej podobe dátového súboru, ponúkajú však vysoké kompresné pomery (6 až 25).

Druhá metóda kompresie zaznamenáva v súčasnosti obrovský rozvoj, najmä vďaka **psychoakustickým metódam kódovania**. Tieto metódy využívajú nedokonalosť ľudského sluchu a odstraňujú detaily, ktoré sú pre ucho nepostrehnuteľné.

Asi najviac sa využíva *jav maskovania* založený na tom, že ľudské ucho nie je schopné rozlíšiť v prítomnosti silného signálu signál slabší, ktorý preto zanikne. Metóde využívajúcej tento jav hovoríme **Frequency Masking** (Bezucha, P., 1993).

Existuje aj metóda **Temporal Masking**, ktorá je založená na *zotrvačnosti vnemu zvuku*. Napr. pri prehrávaní signálu 2 kHz hlasitosti 70 dB a súčasne tónu 2,1 kHz hlasitosti 50 dB bude druhý tón prekrytý, a preto nepočuteľný. V prípade, že bude silnejší signál vypnutý, bude tón ešte asi 5 ms nepočuteľný, čo je možné využiť v procese kódovania tohto zvukového signálu.

Tieto javy využíva v súčasnosti najrozšírenejší formát kompresie video a audio dát – **MPEG (Moving Picture Experts Group)**.

Iná, moderná oblasť aplikácií fyzikálnych vlastností zvuku je oblasť zvukovej steganografie (Ivanka, J., Čandík, M., 2004). Steganografia sa zaoberá metó-

dami utajenia komunikácie, tj. realizuje skrytý prenos informácie vložением dát do iných (tzv. krycích) dát tak, aby modifikácia pôvodných dát bola zmyslovo nepostrehnuteľná. (V porovnaní s kryptografickými technikami, ktoré utajujú obsah dát ich transformáciou do inej, nezrozumiteľnej podoby, samotnú komunikáciu, prenos tejto „šifrovanej“ správy neutajujú). Rozvoj elektronických steganografických techník bol stimulovaný publikovaním koncepcie Emila Hembrooka v roku 1954, ktorý ako zdrojové (krycie) dáta použil práve zvukové signály. V prípade zvukových krycích dát steganografické techniky využívajú pre vkladanie (tajných) dát tieto techniky:

- *Modifikáciu najmenej významových bitov* (low bit encoding) zvukových signálov – pre digitálne reprezentované zvukové signály,
- *Fázové kódovanie* (phase coding), ktoré modifikujú niektoré časti (fázy) segmentov audio signálov pomocou iných, referenčných častí (vzoriek), ktoré predstavujú ukrývané dáta.
- *Rozprestreté spektrum* (spread spectrum), ktoré sa snaží rozšíriť frekvenčné spektrum krycích (zvukových) signálov na čo najväčšiu možnú šírku,
- *Ukrývanie dátovej odozvy* (echo data hiding), ktoré realizujú ukrytie dát do zvukových signálov zavedením odozvy signálu.

Systémy využívajúce psychoakustické redukčné princípy priniesli kvalitatívny skok v oblasti rozhlasového prenosu a umožnili vývoj záznamových nosičov a zariadení. S ich využitím sa počíta v digitálnom rozhlasovom vysielaní v pásme $1,5\text{ GHz}$, určeným aj pre kvalitný príjem mobilnými prijímačmi a v prenose viackanálového televízneho doprovodu systému s vysokou rozlišovacou schopnosťou (HDTV) v pásme 20 GHz . Úspora bitovej rýchlosti pri zachovaní najvyššej možnej kvalite je zrejma – dosahuje pomer $1:4$ až $1:7$. Pokiaľ by bol týmto spôsobom upravený záznam na kompaktnom disku, dosahovala by jeho záznamová doba päť hodín. Systém minidisk (MD) využíva podobné princípy a jeho záznamová kapacita je až 74 minút pri priemere disku 63 mm.

5 Záver

Cieľom príspevku bolo uviesť prehľad základných princípov a vlastností ľudského sluchového vnímania a poukázať na „vrstvitosť“ a zložitosť danej oblasti. Je nutné si uvedomiť, že len kvalitne spracovaný obsah predkladaných informácií a obsah učiva, ktorý spĺňa nielen formálne ale i obsahové „kontú-

ry“ vnímania, dá študentom či širokej verejnosti šancu získať nové vedomosti a „precvičiť“ svoje zručnosti.

Literatúra

- Bezucha, P. Psychoakustické redukční principy pro digitální přenos záznamu zvuku. *Sdělovací technika*, 4/1993, s. 144-146. ISSN 0036-9942
- Hupka, Š. a kol. *Základy biofyziky I*. Bratislava: LF UK Bratislava, 1978, ISBN 80-902318-5-3.
- Ivanka, J. - Čandík, M. Techniky ukryvání dat a steganografie. In: *Security magazin*, 2004, roč. XI, vyd. 57, 1/2004, vyd. Familymedia Praha, str. 2-3, ISSN 1210-8723.
- Kolmer, F. - Kyncl, J. *Prostorová akustika*. Praha: SNTL/ALFA, 1980. ISBN 80-7146-107-5
- Polec, J. - Pavlovičová, J. - Oravec, M. *Vybrané metody komprese dát*. Bratislava: FABER, 1996. ISBN 80-223-1392-0
- Sokolowsky, P. - Šedivá, Z. *Multimédia - současnost budoucnosti*. Praha: Grada, 1994. ISBN 80-7169-081-3.

Ing. Marek Čandík, PhD.
Ústav elektrotechniky a měření
Institut řízení procesů a aplikované informatiky
Fakulta technologická
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Ul. Nad stráněmi 4511
760 01 Zlín
candik@ft.utb.cz

Mgr. Štefan Chudý
Ústav pedagogických věd
Univerzitní institut
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Ul. Mostní 5139
760 01 Zlín
chudy@uni.utb.cz