

Experimentálna identifikácia parametrov ultrazvukového diaľkomeru

Jaroslav Hanzel, Ladislav Jurišica

Abstrakt

Príspevok sa venuje problematike spracovania signálu z inteligentného ultrazvukového meracieho systému. Merací systém vyvinutý na našom pracovisku je určený ako súčasť senzorového vybavenia mobilného robotického systému. Jedná sa o ultrazvukový diaľkomer umiestnený na rotačnej základni vybavenej jednočipovým mikroprocesorom. Konceptia meracieho systému umožňuje jeho využitie pre širokú škálu úloh navigácie v mobilnej robotike. Dôraz sa kladie na modelovanie a reprezentáciu prostredia mobilného robota. Spomenuté sú niektoré nedostatky a problémy spojené s využitím ultrazvuku na lokalizáciu prekážok v pracovnom prostredí mobilného robota. Ďalej je opísaná metóda umožňujúca určiť kľúčový parameter ultrazvukového diaľkomeru, ktorým je šírka vyžarovacieho kužeľa. Uvedený algoritmus je overený na údajoch získaných meraním v reálnom prostredí.

Kľúčové slová: mobilný robot, ultrazvukový diaľkomer, vyžarovacia charakteristika,

Úvod

Ultrazvukové (UZ) systémy bezdotykového merania vzdialenosti sú v mnohých technických odboroch často používanými zariadeniami na meranie relatívnych vzdialeností. Vyznačujú sa radom výhodných vlastností ako jednoduchosťou použitia, relatívne nízkou cenou, bezpečnosťou, efektivitou a nenáročnou realizáciou. Vzhľadom na tieto vlastnosti preto nachádzajú široké možnosti potenciálneho využitia v rôznych oblastiach vedy a priemyslu. Ultrazvukové diaľkomery (sonary) sú v mobilnej robotike používané na meranie vzdialenosti k prekážkam v okolí robota pre zabezpečenie bezkolízneho pohybu a navigáciu v známom alebo neznámom prostredí. Napriek všetkým vyššie uvedeným výhodám je použitie UZ systémov na meranie relatívnej vzdialenosti robota od prekážky spojené s radom problémov. Tieto vyplývajú zo samotnej fyzikálnej podstaty princípu činnosti týchto systémov, a z toho dôvodu si ich efektívne využitie vyžaduje podrobnú analýzu ich vlastností a návrh vhodných spôsobov riešenia týchto problémov.

Vlastnosti ultrazvukového meracieho systému

Ultrazvukom nazývame akustický signál s frekvenciou nad hranicou počuteľnosti. Princíp činnosti ultrazvukových (UZ) diaľkomerov je založený na vyslaní balíka ultrazvukových vln do priestoru v snímanom smere a meraní doby letu signálu. Uplynutý čas medzi vyslaním a prijatím odrazeného signálu od prekážky je priamo úmerný vzdialenosti k prekážke. Pri určovaní prítomnosti objektu a meraní jeho relatívnej vzdialenosti existuje viacero príčin spôsobujúcich neúspešnosť merania a v zásade rozlišujeme tri hlavné zdroje neurčitosti merania. Prvým zdrojom neurčitosti merania je chyba nameranej vzdialenosti r , spôsobená najmä vplyvom prostredia. Dominantné veličiny

ovplyvňujúce šírenie UZ vln vzduchom možno zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- teplota
- vlhkosť
- turbulencia
- tlak
- útlm

Z týchto veličín má najväčší vplyv na presnosť merania prúdenie vzduchu a teplota. Základná rovnica pre rýchlosť šírenia zvuku c vo vzduchu je daná [12]:

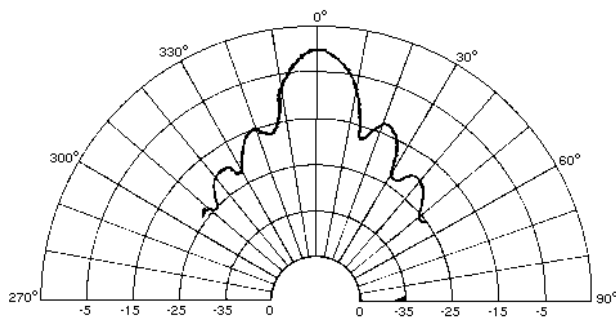
$$c = c_0(1 + \gamma \tau)(1 + A_V \eta) \quad (1)$$

kde

- c_0 - je rýchlosť šírenia zvuku pri 0°C a 0% relatívnej vlhkosti ($c_0 = 331.46 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$),
- γ - teplotný koeficient rýchlosti šírenia (okolo 0°C)
 $\gamma = 1.83 \cdot 10^{-3} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$,
- A_V - vlhkosťná konštanta (medzi $50 \div 200 \text{ kHz}$)
 $A_V = 2.2 \cdot 10^{-4}$,
- η - relatívna vlhkosť vzduchu [%],
- τ - teplota vzduchu [$^\circ\text{C}$].

Ďalšia neurčitnosť merania vyplýva zo spôsobu šírenia sa ultrazvukového signálu priestorom. Určitú predstavu o spôsobe šírenia UZ signálu zo snímača do priestoru si môžeme urobiť na základe tzv. *vyžarovacej charakteristiky* snímača. Na Obr.1 je zobrazená rovinná vyžarovacia charakteristika nami použitého snímača Polaroid [10]. Táto charakteristika znázorňuje pokles amplitúdy akustického signálu s narastajúcou uhlovou vzdialenosťou od osi vyžarovania. Útlm signálu je v dB a je normalizovaný vzhľadom na os vyžarovania. Z obrázku je zrejmé, že UZ signál sa šíri v rôznych smeroch s rozdielnou intenzitou. Môžeme konštatovať, že signál sa šíri vo vyžarovacích zväzkoch, takzvaných *lalokoch* (lobe), pričom podstatná časť akustického signálu je v primárnom laloku, ktorý je iba

jeden a rozkladá sa približne rovnako na obe strany osi vyžarovania. Podstatne menej signálu sa šíri sekundárnymi a vyššími lalokmi, ktoré sú párové a ležia ďalej od osi vyžarovania po oboch jej stranách.



Obr.1 Vyžarovacia charakteristika snímača Polaroid na frekvencii 50 kHz [10]

Fig.1 Polaroid sensor radiation characteristics at 50 kHz [10]

Pre praktické účely stačí brať do úvahy len hlavný vyžarovací zväzok charakteristiky. Za tohto predpokladu sa vyslaný vlnový balík šíri do priestoru v tvare kužeľa, ktorého vrchol je umiestnený na vysielači a os kužeľa leží v smere snímania. Uhol vo vrchole kužeľa je zároveň uhlom rozptylu ultrazvukového signálu a nazývame ho *vyžarovacím uhlom* snímača. Keďže našou úlohou je určiť rozmiestnenie prekážok v okolí robota, stačí nám preto ďalej pracovať iba s priemetom vyžarovacieho kužeľa do horizontálnej roviny podlahy. Vyžarovací uhol snímača môže byť v skutočnosti pomerne veľký, a preto spôsobuje značnú neurčitost' uhlovej polohy objektu odrážajúceho signál na kružnicovom oblúku s polomerom nameranej vzdialenosti. Za účelom analýzy vlastností UZ signálu sa uvažuje ideálny vysielač ako plochý piest s daným polomerom. Následne možno vyjadriť takzvanú *smerovú funkciu* udávajúcu zmenu akustického tlaku UZ signálu ako funkciu uhlovej vzdialenosti od osi radiačného kužeľa [3], [10]

$$P(\vartheta) = 2 \frac{J_1(ka \sin(\vartheta))}{(ka \sin(\vartheta))} \quad (2)$$

kde

- k - je vlnové číslo a $k = 2\pi / \lambda = 2\pi f / c$,
- a - polomer aktívnej plochy snímača (polomer piesta),
- ϑ - azimutálny uhol vzhľadom na os vyžarovania,
- J_1 - Besselova funkcia prvého rádu.

A nakoniec posledným, tretím zdrojom neurčitosti merania je možnosť vzniku viacnásobných odrazov. Tento fenomén nastáva v prípade dopadu UZ signálu na povrch prekážky pod uhlom väčším ako je takzvaný *kritický uhol*. Tento uhol je silne závislý od vlastností povrchu objektu odrážajúceho UZ signál. Signál sa od povrchu objektov môže odraziť dvoma spôsobmi. Ak sú nerovnosti povrchu porovnateľné s vlnovou dĺžkou signálu, nastáva takzvaný *difúzny* odraz, pri ktorom sa signál odrazí viac-menej do všetkých smerov. Týmto spôsobom sa značná časť energie vyslaného signálu vráti k vysielaču priamo a nameraná vzdialenosť je skutočnou vzdialenosťou k prekážke. Kritický uhol v prípade povrchov s difúznym odrazom má relatívne veľké hodnoty blízke sa v niektorých prípadoch až k hodnote 90°. V prípade, že nerovnosti povrchu objektu sú zanedbateľne malé vzhľadom na vlnovú dĺžku signálu, to znamená, že povrch sa javí vzhľadom na signál ako hladký, dochádza k takzvanému *zrkadlovému* odrazu. Pri tomto type odrazu sa signál odrazí od povrchu pod uhlom rovnajúcim sa uhlu dopadu. Hodnota kritického uhla pri povrchoch so zrkadlovým odrazom je relatívne malá. Takto sa môže signál buď úplne stratiť v priestore, alebo sa vrátiť k

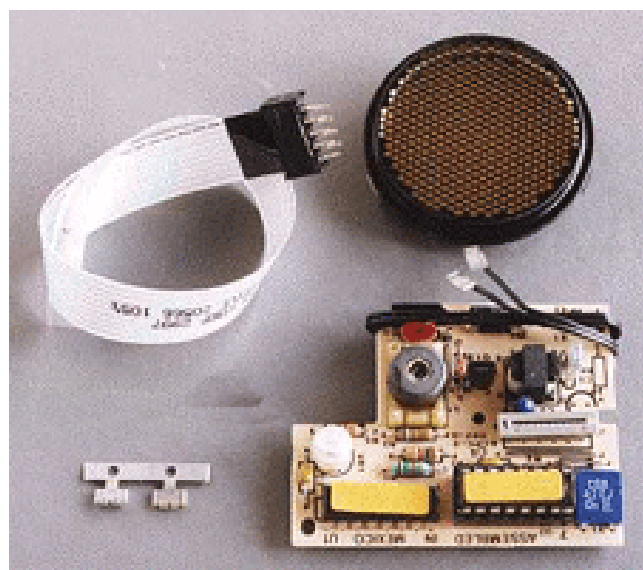
vysielaču po niekoľkých odrazoch, a preto nameraná vzdialenosť nie je skutočnou vzdialenosťou k prekážke v snímanom smere. Takémuto meraniu sa hovorí aj *dlhé čítanie* (long reading). Na získanie platného merania vzdialenosti je potrebné, aby bol uhol dopadu na povrch objektu menší ako kritický uhol.

Praktická realizácia inteligentného ultrazvukového meracieho systému

Navrhnutý inteligentný ultrazvukový merací systém je určený ako súčasť senzorového vybavenia mobilného robota. Tento systém pozostáva z dvoch hlavných častí. Prvou je vlastný ultrazvukový snímač a druhou je plne ovládateľná inteligentná otočná základňa slúžiaca ako nosič UZ snímača. V našej práci budeme pracovať s dvomi rozdielnymi UZ snímačmi vzdialenosti. Prvým z nich je dobre známy a v mobilnej robotike často a úspešne používaný ultrazvukový merací systém Polaroid [10]. Druhým je UZ systém postavený z voľne dostupných a finančne nie veľmi nákladných komponentov postavený na našom pracovisku v rámci riešenia úloh senzorového vybavenia konštruovaného MR [6].

Ultrazvukový merací systém Polaroid

Prvým nami využívaným UZ snímačom je komerčné ultrazvukové meracie zariadenie firmy Polaroid. Nosnou časťou celého systému je UZ snímač Polaroid série 600 pracujúci vo funkcii vysielača aj prijímača akustického signálu. Snímač predstavuje elektrostatický menič, ktorý je schopný premeniť privedenú elektrickú energiu na mechanickú energiu vo forme krátkych ultrazvukových impulzov a následne túto energiu po zachytení jej odrazu previesť späť na elektrickú. Snímač má priemer približne 4 cm, váži 8,2 g a pracuje na frekvencii 49,4 kHz. Rozsah snímania je zhruba od 0,15 m do 10,7 m. Výrobcom udávaná presnosť je +/- 1% z nameranej vzdialenosti v celom rozsahu snímania [10]. K snímaču je štandardne dodávaný elektronický modul série 6500. Snímač spolu s elektronickým modulom je zobrazený na Obr.2. Tento vykonáva predspracovanie elektrického signálu zo snímača a umožňuje pracovať v dvoch režimoch, single-echo-mode a multi-echo-mode [10]. V našom prípade sme využívali snímač v single-echo móde.



Obr.2 Snímač Polaroid série 600 a elektronický modul série 6500

Fig.2. Polaroid sensor series 600 and 6500 series ranging module

Experimentálny UZ merací systém

Tento merací systém bol navrhnutý ako súčasť senzorového systému vyvíjaného mobilného robota a preto musí spĺňať viaceré požiadavky zviazané s možnosťami predpokladanej platformy robota. Jednou z požiadaviek bolo, aby nemal príliš veľký odber prúdu z napájacieho zdroja. Ďalšou bol predpokladaný merací rozsah asi od 10 až 15cm do 3 až 4m. Jednou z možností bolo využiť komerčné meracie systémy poskytujúce rad výhod, medzi iným okamžitú možnosť aplikácie a zaručené rozsahy parametrov systému. Každopádne toto riešenie je finančne náročnejšie oproti vlastnej konštrukcii a nedáva možnosť prispôbovať si parametre systému pre naše potreby. Preto sme sa zamerali na riešenie obsahujúce vysielateľ a prijímač T40-16 a R40-16, od firmy Nippon Ceramic [7]. Tieto sú dostupné aj u nás v prijateľnej cenovej hladine a dajú sa s nimi dosiahnuť uspokojivé výsledky.

Základná jednotka ultrazvukového meracieho systému (sonaru), obsahuje obvod vysielateľa a obvod prijímateľa, ktoré sú prepojené programovateľným integrovaným obvodom (PIC16F873) riadiacim vysielanie a čiastočné spracovávanie prijatého signálu. Ultrazvukový senzor (Obr.3) sa skladá zo samostatného vysielateľa (T40-16) a prijímateľa (R40-16), kde každý má tvar valčeka s priemerom 16mm a výškou 12mm.

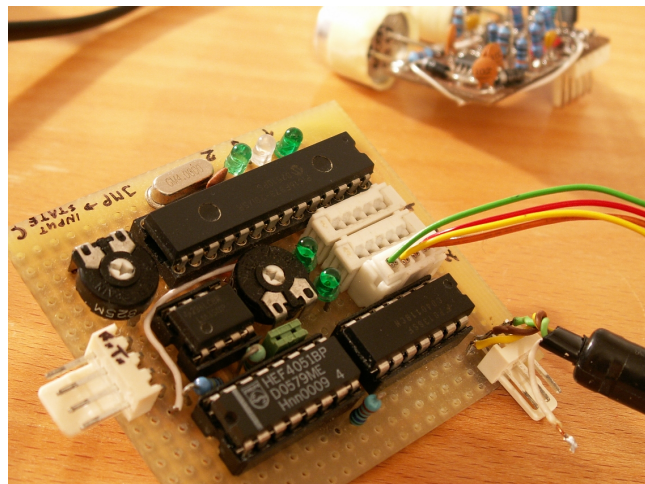


Obr.3 Vysielač T40-16 a prijímač R40-16
Fig.3 Transmitter T40-16 and receiver R40-16

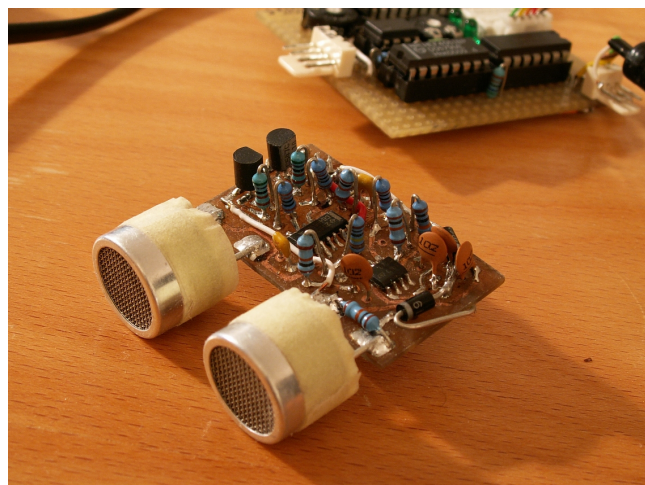
Rezonančná frekvencia snímača je 40kHz. Pri meraní sa vysiela 12 impulzov po sebe, ale pre meranie väčších vzdialeností je vhodné tento počet zväčšiť. Čas do návratu impulzu je meraný pomocou špeciálnej funkcie "capture" na procesore PIC, ktorá priamo po nastavení vstupu na úroveň logickej jednotky uloží zmeraný čas do jedného z registrov [6].

Technické riešenie UZ dial'komera bolo zamerané na jednoduchosť, spoľahlivosť a presnosť. Merací systém je hierarchicky rozdelený na dve časti, a to riadiacu jednotku a snímaciu jednotku vysielateľa a prijímateľa (Obr.4, Obr.5). Hlavná jednotka, spravujúca vysielaný rádiový impulz a prijímanie upraveného signálu vo forme TTL logiky, pozostáva z procesora PIC16F873 taktovaného na 4 MHz. S týmto RISC-ovým procesorom je možné flexibilne ovládať až tri snímacie jednotky. Riadiaca jednotka ovláda vysielateľ a meria čas, za ktorý prijímač zaznamená ozvenu vyslaného impulzu. Časovač inkrementovaný každú mikrosekundu a špeciálna funkcia *capture* fungujú ako stopky. Vzápätí,

ako sa vyšle impulz, sa spustia stopky a zastavia sa automaticky po zachytení ozveny generujúcej prerušenie programu riadiaceho mikropočítača. Riadiaca jednotka následne vyšle údaj o nameranej vzdialenosti po sériovej linke do PC.



Obr.4 Riadiaca jednotka UZ dial'komera
Fig.4 Control unit of the ultrasonic rangefinder



Obr.5 Snímacia jednotka UZ dial'komera
Fig.5 Sensing unit of the ultrasonic rangefinder

Pre spracovanie odrazeného signálu riadiacou jednotkou treba výstup zo samotného piezokeramického meniča (prijímateľa) vhodne upraviť. Prijatý východiskový signál sa najprv filteruje jednoduchým filtrom prvého rádu pre zníženie úrovne prijatých šumov. Následne sa privádza na vstup zosilňovača, ktorý tvoria dva operačné zosilňovače zapojené do kaskády. Zosilnenie je približne 60dB, čiže 1000-krát. Vstupný signál zachytenej ultrazvukovej vlny má dostatočne veľkú amplitúdu na to, aby sa výstup zosilňovača dostal až do saturácie, čo zodpovedá hodnote rovnej napájaciemu napätiu 9V. Za zosilňovačom je zapojený jednoduchý jednocestný usmerňovač, ktorý odreže zápornú polperiódu, kondenzátorom vyhladí kmity, a takto získame obálku prijatého signálu. Takto pripravený signál môže vstúpiť do komparátora, ktorý je riešený taktiež pomocou operačného zosilňovača. Referenčné napätie komparátora je vytvorené napäťovým deličom a určuje minimálnu hodnotu napätia, ktorá je schopná vyvolať na výstupe komparátora skok na úroveň napájacieho napätia. Hodnota výstupného napätia komparátora sa následne zníži na 5V, čo je logická 1 TTL logiky, a takto upravený signál následne vyvolá prerušenie v programe procesora. Pre

potreby merania vzdialeností v relatívne veľkom rozsahu je hodnota referenčného napätia komparátora realizovaná dvojúrovňovým prepínačom, ktorý pomocou jedného logického výstupu procesora spína medzi dvoma úrovňami napätia. Prvá, vyššia úroveň je vhodná počas budenia vysielачa a v krátkom čase po zapnutí detekcie, keď je ešte sila signálu prípadného odrazu dostatočne veľká. Po čase 0,8ms sa referenčné napätie prepne na druhú, nižšiu úroveň, ktorá ostáva až do konca detekcie. Hodnoty referenčného napätia komparátora sú určené experimentálne a v prípade potreby môžu byť vhodne zmenené.

Po vyslaní UZ impulzu je potrebné zabezpečiť na určitý čas ignorovanie prijímaného signálu za účelom zníženia chybnej detekcie, ktorá je spôsobená vplyvom presluchu od vyslaného signálu. Doba vypnutej detekcie prijímaného signálu samozrejme určuje minimálnu merateľnú vzdialenosť. Jej bezpečná hodnota bola experimentálne určená na čas približne 1.5ms, čomu zodpovedá najmenšia merateľná vzdialenosť asi 25cm. V prípade potreby môžeme tento čas znížiť, čo nám umožní dostať sa pod hodnotu 25cm, ale zároveň sa zvýši riziko chybnej detekcie prekážky. Tak isto je možné nastaviť maximálny čas čakania na spätnú vlnu, ktorý zase určuje maximálnu merateľnú vzdialenosť. Tento čas vyplýva z predpokladaných rozmerov prostredia, v ktorom sa robot bude nachádzať. Zapnutie a vypnutie detekcie signálu je realizované jednoduchým klopným obvodom typu RS. Po úspešnej detekcii signálu alebo po uplynutí doby čakania na odrazený signál sa môže celý cyklus merania zopakovať. Detailnejšie informácie o samotnej realizácii experimentálneho ultrazvukového meracieho systému možno nájsť v práci [6].

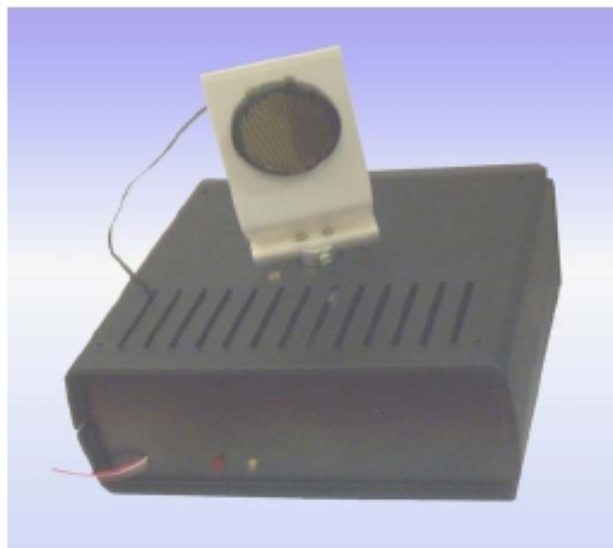
Pri návrhu UZ diaľkomeru bolo potrebné brať do úvahy aj nutnosť kalibrácie systému vzhľadom na parametre pracovného prostredia. Kedže rýchlosť šírenia sa ultrazvukovej vlny závisí od značného počtu rôznych vplyvov prostredia, presnosť merania si vyžaduje kalibráciu, ktorá by eliminovala chyby vzniknuté zmenou rýchlosti šírenia ultrazvuku. Jednoduchý kalibračný systém prepočítavajúci nameranú vzdialenosť vzhľadom na parametre prostredia podľa vzťahu (1) je možné realizovať na riadiacej jednotke meracieho systému alebo na samotnom riadiacom počítači. Z pohľadu jednoduchosti riešenia vzhľadom na možnosť výpočtov s reálnymi číslami sa javí výhodnejšia druhá možnosť a do riadiaceho počítača posielat iba údaj o dobe letu UZ signálu.

Inteligentná otočná základňa

Pre potreby automatizovaného zberu údajov v reálnom prostredí bolo potrebné UZ diaľkomery doplniť o ďalšie zariadenie umožňujúce takúto činnosť. Dôležitou požiadavkou pri návrhu systému bola schopnosť merania v celom okolí robota, t.j. v rozsahu 360°. Medzi ďalšie požiadavky kladené na otočnú platformu možno spomenúť možnosť synchronizovať pripevnený snímač s požadovanou orientáciou, a teda určiť východziu polohu pre následné merania, možnosť nastavenia do ľubovoľnej polohy a vykonanie postupnosti aj viacnásobných meraní vzdialenosti v určených smeroch. Navyše vyššie opisovaný ultrazvukový snímač Polaroid s dodávaným elektronickým modulom nie je priamo použiteľný na meracie účely, pretože elektronický modul 6500 je potrebné riadiť externými povelmi. Tento modul vyžaduje nastavovať a nulovať jednotlivé jeho vstupy pre spúšťanie merania, blokovanie a povolenie detekcie prijímaného signálu v určitom časovom rozpätí a rovnako aj sledovať výstup spracovaného prijatého signálu. Zároveň bolo treba pre tento snímač vyriešiť otázky súvisiace s vyhodnocovaním doby letu signálu, výpočet vzdialenosti k prekážke a jej korekciu vzhľadom na aktuálnu teplotu a

vlhkosť vzduchu. Kalibráciu meracieho systému vzhľadom na aktuálne parametre prostredia je samozrejme možné výhodne riešiť aj na samotnom riadiacom počítači. Ďalej bolo potrebné zabezpečiť obojsmernú komunikáciu s riadiacim počítačom pre potrebu ovládania snímača a zber nameraných údajov. Všetky uvedené požiadavky merania pre snímač Polaroid sme vyriešili pomocou druhej časti UZ meracieho systému, ktorou je otočná platforma riadená jednočipovým mikropočítačom Atmel AT 89C2051 zobrazená spolu so snímačom Polaroid na Obr.6. Pohon otočnej základne je realizovaný krokovým motorom. Krokový motor potrebuje na realizáciu jednej otáčky 400 krokov s veľkosťou 0.9°. Mikropočítač zabezpečuje riadenie krokového motora a jeho nastavenie do potrebného smeru. Ďalej vyhodnocuje signál z elektronického modulu 6500 a vypočítava nameranú vzdialenosť s jej následnou korekciou pomocou vzťahu (1). Nakoniec zabezpečuje komunikáciu s riadiacim počítačom mobilného robota cez sériové rozhranie RS 232. Z riadiaceho počítača prijíma informácie o požadovanom smere natočenia snímača a počte meraní. Naspäť posielá údaje o nameraných vzdialenostiach v daných smeroch.

Ako sme už uviedli v predchádzajúcej kapitole, v prípade navrhnutého experimentálneho UZ diaľkomeru zabezpečuje väčšinu potrebných operácií jeho vlastný riadiaci mikropočítač spolu s riadiacim počítačom robota. Otočná platforma preto zabezpečuje pri jeho použití len polohovanie snímača.

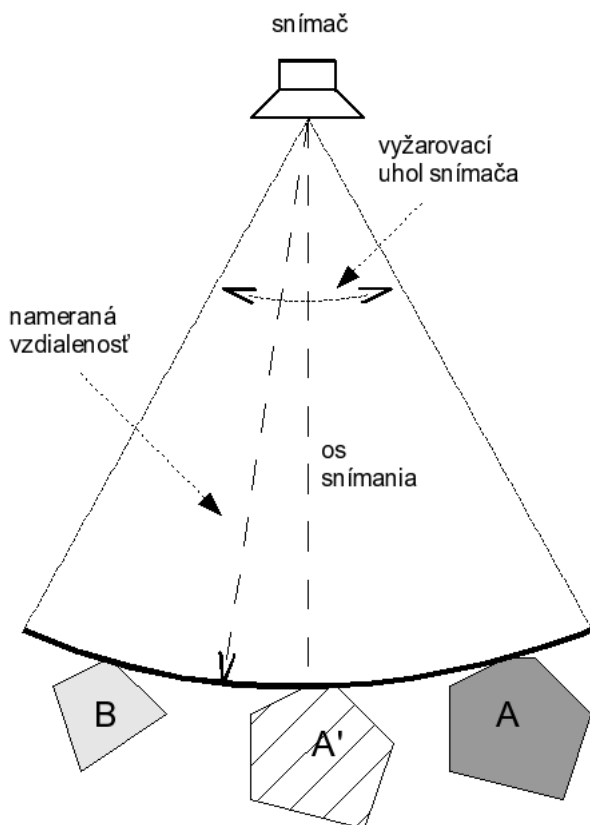


Obr.6 Otočná platforma so snímačom Polaroid
Fig.6 Rotary platform with Polaroid sensor

IDENTIFIKÁCIA PARAMETROV VYŽAROVACEJ CHARAKTERISTIKY UZ SNÍMAČA

Ako už bolo spomenuté, ultrazvukové snímače napriek častému využívaniu v oblasti mobilnej robotiky najmä pre ich širokú paletu výhodných a užitočných vlastností majú aj niekoľko relatívne nepríjemných charakteristík. Tieto ich nevhodné vlastnosti pomerne značne sťažujú ich plnohodnotné a efektívne využitie. Jedná sa najmä o neurčitost' uhlového umiestnenia objektu odrážajúceho ultrazvukový signál. Táto neurčitost' spôsobuje nemožnosť presne určiť polohu prekážky na kružnicovom oblúku

s veľkosťou uhla rovnajúceho sa vyžarovaciemu uhlu a polomerom rovnajúcim sa nameranej vzdialenosti. Na Obr. 7 je znázornená situácia, pri ktorej po nameraní vzdialenosti nie je možné určiť polohu objektu **A**, a dokonca ani počet objektov odrážajúcich UZ signál. Objekt **A** odrážajúci signál môže byť umiestnený na kružnicovom oblúku s polomerom nameranej vzdialenosti v ľubovoľnom mieste, napríklad v polohe **A'**. Dokonca nie je možné nijakým spôsobom zistiť, či odraz nespôsobil iný predmet **B**, alebo obidva súčasne. Po vykonaní merania je potom vzhľadom na túto neurčitosť nutné uvažovať o možnosti umiestnenia prekážky pozdĺž celého tohto kružnicového oblúka. Preto sa následne v mriežke aktualizujú všetky bunky nachádzajúce sa na tomto oblúku hodnotou presvedčenia o prítomnosti prekážky v závislosti na ich uhlovej vzdialenosti od osi vyžarovacieho kužela. Samozrejme veľkosť hodnoty, ktorou sa bunky aktualizujú, takto zohľadňuje klesajúci akustický tlak vyslaného UZ signálu smerom k okrajom vyžarovacieho kužela. Takto dostaneme po aktualizácii v mriežke relatívne veľký počet buniek s novou informáciou o ich obsadenosti. Možností, ako túto neurčitosť minimalizovať, nie je veľa a v podstate spočívajú v použití presnejších snímačov s užším vyžarovacím kuželom, ktorých cena je samozrejme omnoho vyššia. Druhou možnosťou je zúženie vyžarovacieho uhla lacnejších snímačov pomocou mechanickej modifikácie ich vyžarovacieho kužela alebo použitím väčšieho počtu snímačov a ich vhodným vzájomným rozmiestnením za účelom zúženia ich vyžarovacieho kužela využitím ich vzájomnej akustickej interferencie [1].



Obr. 7 Neurčitosť polohy objektu odrážajúceho UZ signál

Fig. 7 Position uncertainty of the object echoing the ultrasonic signal

Pre potreby modelovania neurčítostí UZ snímačov je nutné poznať pomerne presne určité parametre použitého snímača. Matematický model uhlovej neurčitosti ako

hlavného zdroja nepresnosti merania vyžaduje poznať uhlový rozsah, v ktorom je snímač schopný detekovať prekážku. Túto hodnotu možno určiť analyticky z vyžarovacej charakteristiky (Obr.1) nameranej výrobcom a dodanej spolu so snímačom [10] alebo jej identifikáciou. Táto druhá možnosť je navyše aj jediným spôsobom získania hodnoty tejto veličiny v prípade, ak výrobca charakteristiku neposkytol alebo sa jedná o vlastnú konštrukciu ultrazvukového snímacieho systému.

V nasledujúcej kapitole uvedieme metódu, pomocou ktorej je možné zmerať veľkosť uhla vyžarovacej charakteristiky, a takto zistenú hodnotu úspešne využiť na tvorbu matematického modelu snímača.

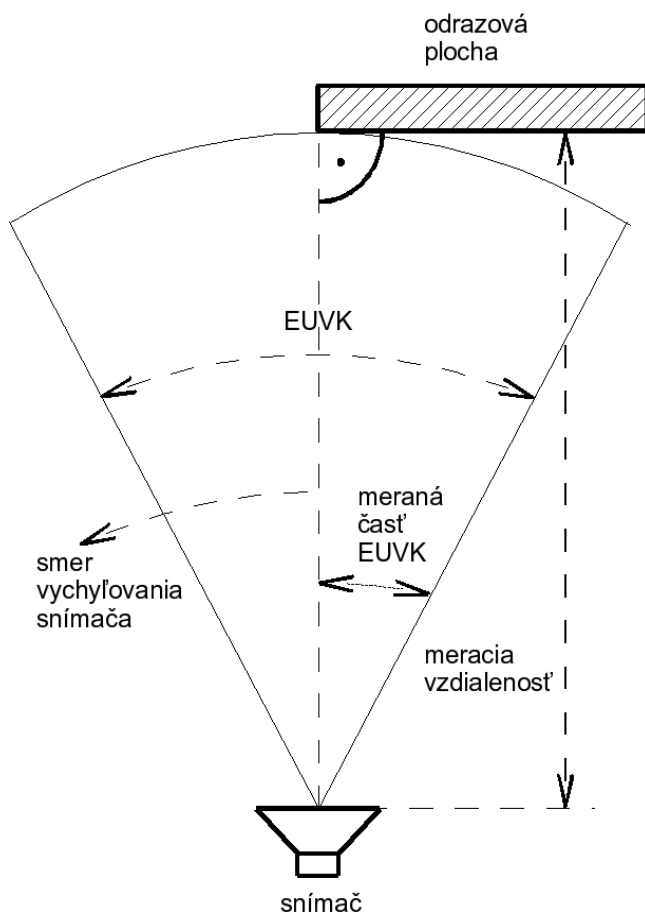
Metóda merania veľkosti vyžarovacieho uhla

Spôsob presného určenia vyžarovacej charakteristiky UZ snímačov sa nám v dostupnej literatúre nepodarilo nájsť a nebol uvedený ani v materiáloch dodaných výrobcom snímača [10]. Zobrazená bola iba zmeraná vyžarovacia charakteristika, ktorú sme uviedli na Obr.1. Z údajov uvedených na tomto obrázku sa môžeme iba domnievať, akým spôsobom sa uvedená charakteristika získala. V dodanom manuále [10] nie je uvedené, akým spôsobom sa experimentálne zmerala. Samozrejme tým pádom sme nemali možnosť overiť túto dodanú charakteristiku. Vo výpočtoch sme následne v prípade snímača Polaroid používali v literatúre všeobecne používanú hodnotu veľkosti vyžarovacieho uhla 25°. Snáď jediným publikovaným pokusom overiť túto hodnotu bolo meranie uvedené v práci [1] s výsledkom, ktorý túto všeobecne používanú hodnotu nepotvrdil.

Metódu merania vyžarovacieho uhla ultrazvukového snímača sme realizovali s cieľom overiť v literatúre ([4], [8], [11]) používanú hodnotu jeho veľkosti 25° pre snímač Polaroid, a rovnako aj pre prípadnú identifikáciu vyžarovacích uhlov iných snímačov. Vývoj metódy vychádzal z podrobnej analýzy výrobcom publikovanej rovinnej vyžarovacej charakteristiky [10] zobrazenej na Obr.1. Z tohto obrázku je zjavné, že charakteristika sa skladá z viacerých „lalokov“, nazvime ich primárnym, sekundárnym, atď., pričom vyžiarovaný akustický signál je šírený najmä primárnym lalokom. Primárny lalok je iba jeden, na rozdiel od lalokov vyšších rádov, ktoré sú symetricky zdvojené podľa osi vyžarovania. Nachádza sa v strede charakteristiky symetricky rozdelený na dve polovice osou vyžarovacieho kužela. Našou snahou bolo určiť parameter snímača, ktorý nazvime *efektívnym uhlom vyžarovacieho kužela (EUVK)*. Pod týmto názvom rozumieme šírku vysielačieho kužela, ktorá sa v skutočnosti uplatňuje pri snímaní vzdialenosti ku prekážkam. V tomto prípade nebudeme rozlišovať či je vysielač kužeľ tvorený len primárnym alebo aj sekundárnym, príp. lalokmi vyšších rádov (čo je však už dosť nepravdepodobné, viď. Obr.1), a zaujímať nás bude iba prakticky využiteľný uhol vyžarovania UZ signálu.

Pri experimentálnom určovaní šírky vyžarovacieho kužela máme v podstate dve možnosti jej praktického určenia. Tieto možnosti vychádzajú z dvoch základných spôsobov činnosti UZ diaľkomerov. Prvým prípadom je meranie vzdialenosti pomocou priamej vlny, kedy využívame vysielač a prijímač oddelene, t.j. vysielačom vyšleme do priestoru signál a prijímačom ho zachytávame vo vysielačom smere. Čas od vyslania signálu vysielačom po jeho prijatie prijímačom je takto priamo úmerný vzdialenosti vysielač – prijímač. V prípade snímačov kombinujúcich v sebe vysielač aj prijímač, čo je aj prípad snímača Polaroid, sú samozrejme potrebné dva kusy, pričom prvý sa zapojí ako vysielač a druhý ako prijímač. Druhým prípadom je meranie vzdialenosti pomocou vlny odrazenej od prekážky. Tento spôsob merania vzdialenosti sa uplatňuje aj pri

mapovaní priestoru mobilným robotom. Pri určovaní veľkosti EUVK sa preto budeme snažiť vychádzať s podmienok, ktoré sa čo najviac približujú takémuto použitiu UZ snímača. Takýmto prístupom zameraný vyžarovací uhol je v podstate totožný s uhlom, ktorý sa uplatňuje pri samotnom mapovaní neznámeho priestoru s množstvom prekážok rozličnej kvality a charakteru. Schému merania vyžarovacieho uhla sme zvolili tak, aby zistená hodnota uhla bola maximálna možná, a teda z pohľadu mapovania priestoru je to najhorší prípad uplatnenia sa neurčitosti v uhle. V reálnom prípade sú odrazové podmienky v porovnaní s podmienkami pri meraní v drivej väčšine prípadov horšie a pri odraze sa uplatní menšia šírka vyžarovacieho kužeľa. Samozrejme prípady porovnateľné s našim sa stávajú, a preto je nami zistená šírka kužeľa hľadaným parametrom snímača. Princíp identifikácie EUVK je nasledovný a zobrazený je na Obr.8.



Obr.8 Schéma identifikácie veľkosti efektívneho uhla vyžarovacieho kužeľa

Fig.8 Scheme for identification of effective radiation cone angle

Ultrazvukový diaľkomer sme umiestnili tak, aby smeroval do voľného polpriestoru. Ďalším cieľom bolo zmerať veľkosť EUVK v rozličných vzdialenostiach, a takto zistiť, či sa veľkosť vyžarovacieho uhla mení so vzdialenosťou. V týchto vzdialenostiach sme potom umiestnili odrazovú plochu, od ktorej sa mal odraziť vyslaný ultrazvukový signál. V prípade mapovania priestoru sa vyslaný signál odraža od prekážok, ktoré majú rôzne veľkosti a tvary. Navyše prekážky majú v skutočnosti aj rôzny povrch, čo je veľmi dôležitým parametrom ovplyvňujúcim odraz signálu od prekážky. Odras signálu od prekážky silne súvisí s touto materiálovou konštantou, a takisto je závislý od uhla, pod ktorým na odrazovú plochu prekážky signál dopadol. V princípe sa

signál odrazí smerom k vysielacu, ak dopadol pod uhlom, ktorý je menší ako takzvaný kritický uhol. V opačnom prípade sa signál odrazí od prekážky smerom od vysielacu. Tieto dôležité skutočnosti bolo pri návrhu metódy identifikácie potrebné nejakým spôsobom zohľadniť. Aby sme odstránili vlastnosti povrchov prekážok a ich vplyv na odras UZ signálu, zvolili sme vzájomné umiestnenie snímača a odrazovej plochy tak, aby signál dopadol na plochu počas celého merania kolmo na jej povrch. Takto sa efektívne eliminujú vlastnosti povrchu odrazovej plochy, a navyše sú tieto podmienky pre odras ideálne. V takomto prípade sa späť k snímaču vráti maximálne možné množstvo energie vyslanej do daného smeru. Samozrejme, povrch odrazovej plochy hrá svoju rolu aj pri takejto vzájomnej konfigurácii snímač - prekážka. Ak vykazuje povrch prekážky určité absorpčné vlastnosti vzhľadom na UZ signál, tak naspäť k snímaču sa vráti iba nejaká zostatková časť signálu, ktorá nebola prekážkou absorbovaná. Rovnako, ak má povrch prekážky schopnosť rozptyľovať UZ signál, takisto sa vráti k prijímaču len časť signálu. Preto sme zvolili za odrazovú plochu pevný a hladký materiál.

Ďalším parametrom ovplyvňujúcim množstvo odrazeného signálu je samozrejme veľkosť odrazovej plochy prekážky. Plocha musí byť dostatočne veľkou, aby odrazila také množstvo akustického signálu, ktoré je prijímač schopný po jeho prijatí identifikovať ako echo. Na druhej strane signál prijatý prijímačom po odraze od hladkého povrchu sa odrazil od prekážky v nie príliš veľkom okolí bodu jeho kolmého dopadu na povrch prekážky. Nami zvolená veľkosť odrazovej plochy sa aj z tohto pohľadu javila dostatočnou a simulovala takto ideálny prípad odrazu, kedy sa maximálne možné množstvo akustickej energie vyslanej k prekážke vráti k prijímaču.

Ako už bolo uvedené, UZ signál sa šíri do priestoru vo forme vln zoskupených do zväzkov a primárny zväzok (lalok) má približne tvar guľového vrchlíka. Množstvo akustickej energie šírenej priestorom postupne klesá smerom od osi vyžarovania (osi snímania), ktorá tvorí zároveň os kužeľa, ku hraniciam kužeľa. Princíp určenia hraníc vyžarovacieho kužeľa spočíva v postupnom zmenšovaní množstva energie vyslanej smerom k prekážke. Takýmto postupným zmenšovaním akustického signálu je možné dospieť do bodu, kde už odrazený signál v žiadnom prípade nie je schopný vybudieť prijímač, a teda tento bod je zároveň hraničným bodom efektívneho využitia diaľkomera na snímanie prekážok. Podmienka kolmého dopadu iba tohto postupne zmenšovaného množstva UZ signálu vyžaduje nechať šíriť zbytok signálu ďalej do voľného priestoru. Toto dosiahneme postupným vychýľovaním snímača do oboch strán po dostatočne malých krokoch. V každom kroku merania vyšleme signál smerom do priestoru a určitá časť dopadne samozrejme kolmo na odrazovú plochu. Odrazený signál zaznamenávame. Prijímač je schopný zachytiť echo po určitý krok merania, a tento krok určuje zároveň aj hraničnú hodnotu vychýlenia snímača, a teda aj hraničný uhol, pri ktorom je ešte snímač schopný detekovať prítomnosť prekážky. Tento hraničný uhol sa prejaví absenciou echa, resp. nameraním vzdialenosti značne väčšej ako je vzdialenosť k odrazovej ploche, v prípade ak sa signál odrazil od nejakého objektu umiestneného niekde za odrazovou plochou. Preto je meranie vhodné vykonávať v dostatočne rozľahlom prostredí pre bezpečnú identifikáciu zdroja odrazu. Samozrejme meranie zistí iba veľkosť vyžarovacieho uhla na jednu stranu od osi snímača. Druhá časť EUVK možno určiť obdobne, s tým, že premiestnime odrazovú plochu na opačnú stranu osi snímania kolmej na rovinu odrazovej plochy a snímač budeme vychýľovať taktiež na opačnú stranu. Druhou možnosťou je spoľahnúť sa na symetrickosť vyžarovacej charakteristiky snímača a experimentálne zistenú hodnotu pre jednu časť použiť aj pre druhú.

Zámerné neuvádzame výraz druhá polovica charakteristiky, čo by sa dalo pri predpoklade symetrickosti vyžarovacieho kužela podľa osi vyžarovania očakávať, pretože ako bude uvedené ďalej, predpokladaná symetria vyžarovaneho signálu je len teoretická. Takýmto spôsobom je možné teda experimentálne spoľahlivo určiť veľkosť efektívneho uhla vyžarovacej charakteristiky pre ľubovoľný ultrazvukový diaľkomer s postačujúcou presnosťou. V ďalšej kapitole budú popísané vykonané experimenty a zistené výsledky z identifikácie parametra EUVK pre nami používané dva rôzne snímače.

Experimentálne určovanie efektívneho vyžarovacieho uhla ultrazvukového snímača

Vyššie spomínaný postup identifikácie efektívneho uhla vyžarovacieho kužela sme overovali na skutočnom UZ snímači. Cieľom bolo určiť EUVK snímačov potenciálne využiteľných pri návrhu senzorového vybavenia konštruovaného MR. Druhým cieľom bolo zistiť, ako sa mení šírka vyžarovacieho uhla v závislosti od vzdialenosti snímača k prekážke odrážajúcej signál. Predpokladali sme útlm signálu v prostredí na okrajoch vysielačieho kužela s nárastom vzdialenosti, pretože akustický signál je práve na okrajoch kužela najslabší. Ako dôsledok tohto útlmu sme predpokladali zužovanie EUVK so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od prekážky. Praktické overenie metodiky identifikácie EUVK sme realizovali na dvoch typoch UZ diaľkometerov. Prvým z nich je už vyššie spomínaný snímač od firmy Polaroid [10]. Druhým snímačom je jednoduchý diaľkometer zostrojený na našom pracovisku. Zber údajov sme realizovali pomocou vyššie opísanej otočnej platformy s využitím popísanej metódy identifikácie UZ snímačov.

Cieľom experimentu bolo overiť v literatúre [2], [4], [5], [8], [9], [11] všeobecne používanú hodnotu šírky vyžarovacieho uhla snímača Polaroid [10]. Väčšina autorov pri mapovaní priestoru a navigácii mobilným robotom s využitím tohto snímača uvažovalo hodnoty $\pm 12.5^\circ$, čo je hodnota vyplývajúca zo vzťahu (2), ako aj z analýzy vyžarovacej charakteristiky dodanej výrobcom (Obr.1). Z teoretických poznatkov o elektroakustických meničoch pracujúcich v ultrazvukovej oblasti frekvencií a šírení nimi emitovaných ultrazvukových vln sa predpokladá symetria vyžarovaneho zväzku vln vzhľadom na os vyžarovania. Z toho vyplýva aj rovnako symetrická vyžarovacia charakteristika. Preto teoreticky stačí zmerať ľubovoľnú jednu polovicu EUVK. Tento predpoklad však vychádza z ideálneho elektroakustického meniča. A preto sme sa rozhodli prakticky overiť aj symetriu vyžarovacej charakteristiky reálneho UZ snímača zmeraním oboch polovic EUVK.

Experiment sme vykonali v pomerne rozsiahlom voľnom prostredí chodby nášho pracoviska. Konfigurácia experimentu pozostávala z rozmiestnenia základných pomôcok podľa Obr.8. Za odrazovú plochu sme zvolili hladkú dosku o rozmeroch 1.5×0.6 m. Merací systém bol umiestnený vo výške 1 m nad podlahou, čo sa ukázalo byť dostatočnou výškou vzhľadom na teoretickú možnosť zachytiť odraz od nerovností podlahy. Odrazovú plochu sme umiestnili v pravidelných intervaloch s krokom 0.5 m v rozsahu vzdialeností 0.5 až 4.5 m v prípade snímača Polaroid. V prípade experimentálneho snímača sme začali meranie vo vzdialenosti 0.5 m, a postupne sme ju zväčšovali s krokom 0.25 m až po vzdialenosť 3 m. Snímač sme vychyľovali z nulovej polohy, kedy je os snímania kolmá na rovinu odrazovej plochy (Obr.8), do výchylky 90° s krokom 0.9° . Získané údaje o nameranej vzdialenosti sme zaznamenávali do súboru. Pri jednom meraní sme snímali odrazy pri vychyľovaní smerom od nulovej polohy do maximálnej výchylky 90° , ako aj pri návrate z polohy maximálnej výchylky smerom do nulovej polohy, a takto sme získali dva súbory údajov. Tento postup sme

zopakovali 10-krát. Celkový počet množín údajov pre danú vzdialenosť bol teda 20. Za hraničnú hodnotu uhlového rozsahu EUVK sme považovali uhol vychýlenia snímača, pri ktorom došlo k strate odrazeného signálu. Vyššie uvedeným spôsobom sme teda získali 20 hodnôt vzdialenosti pre každý krok vychýlenia snímača. Pre výchylky v okolí hranice EUVK sme zaznamenali nepravidelný príjem odrazu, čo sa prejavovalo rôznym počtom hodnôt zodpovedajúcich odrazu, ako aj strate signálu v danom súbore nameraných údajov. Preto sme pre určenie hranice EUVK potrebovali pre každú výchylku určiť z 20 nameraných údajov hodnotu reprezentujúcu tieto merania pre daný uhol. Za takúto reprezentačnú hodnotu sme zvolili medián danej množiny, pretože tento nám určoval prevládajúci počet nameraných vzdialeností. Týmto spôsobom filtrované údaje nám už jasne umožnili identifikovať výchylku reprezentujúcu hraničnú hodnotu veľkosti EUVK. Pre overenie symetrie EUVK podľa osi snímania sme experiment vykonali aj pre druhú časť vyžarovacieho kužela. Následne sme teda dostali dve hodnoty ohraničujúce EUVK v danej vzdialenosti od snímača, jednu naľavo a druhú napravo od osi snímania.

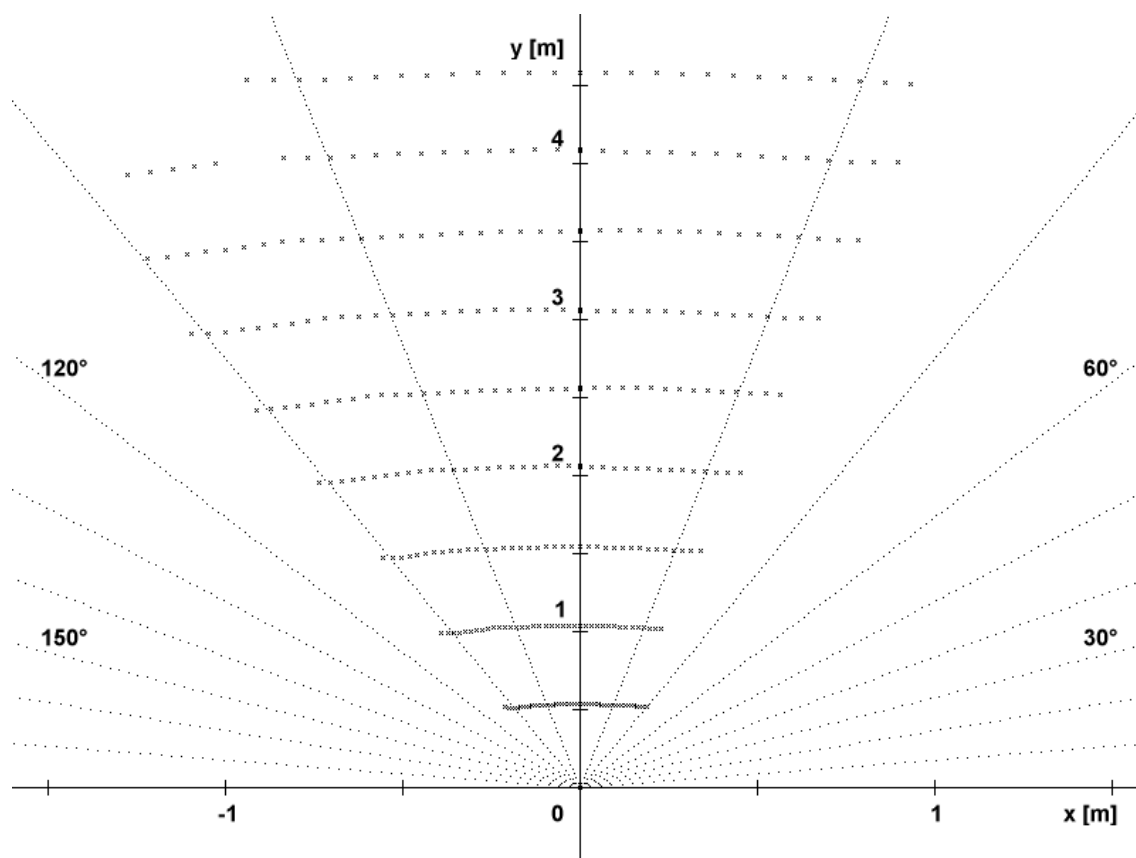
Namerané hodnoty hraničných uhlov snímača Polaroid sú uvedené v Tab.1, a pre experimentálny snímač v Tab.2. Mediány množín nameraných údajov sú zobrazené na Obr.9 a Obr.10.

Meracia vzdialenosť [m]	Ľavý hraničný uhol $[\circ]$	Pravý hraničný uhol $[\circ]$
0.5	22.5	19.8
1.0	21.6	12.6
1.5	20.7	12.6
2.0	20.7	12.6
2.5	20.7	12.6
3.0	20.7	12.6
3.5	19.8	12.6
4.0	18.0	12.6
4.5	11.7	11.7

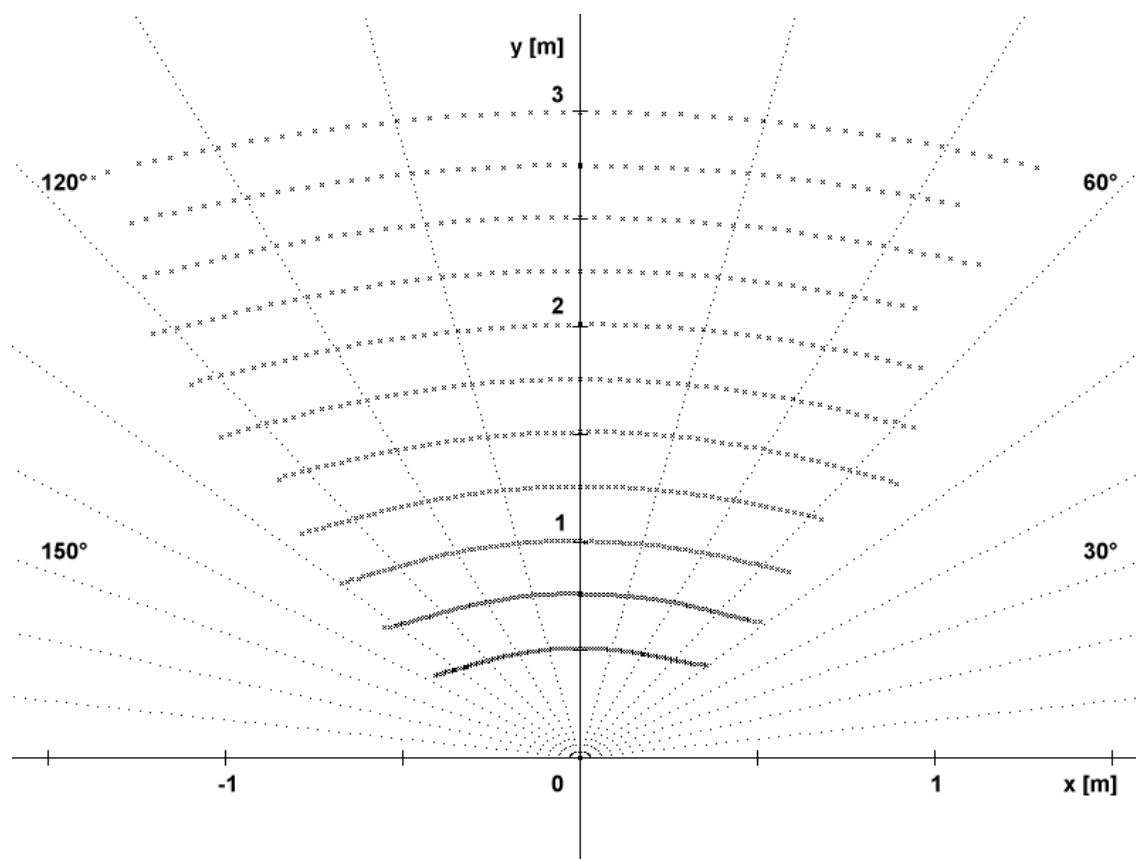
Tab.1 Hraničné uhly snímača Polaroid

Meracia vzdialenosť [m]	Ľavý hraničný uhol $[\circ]$	Pravý hraničný uhol $[\circ]$
0.50	46.8	39.6
0.75	42.3	38.7
1.00	39.6	34.2
1.25	36.9	31.5
1.50	33.3	35.1
1.75	34.2	31.5
2.00	32.4	27.9
2.25	31.5	24.3
2.50	28.8	26.1
2.75	27.0	22.5
3.00	27.0	25.2

Tab.2 Hraničné uhly experimentálneho snímača



Obr.9 Mediány súborov nameraných údajov pre snímač Polaroid
Fig.9 Medians of measured data sets for Polaroid sensor



Obr.10 Mediány súborov nameraných údajov pre experimentálny snímač
Fig.10 Medians of measured data sets for experimental sensor

Zhrnutie výsledkov

Namerané výsledky nám dávajú jasnú predstavu o vlastnostiach nami používaných sonarov. Z tabuľky Tab.1 ako aj z Obr.9 je možné zistiť, že snímač Polaroid má vyžarovací kužeľ značne nesymetrický. Pravá časť kužeľa je oproti ľavej jasne širšia. Pri vzdialenosti 0.5 m je však rozdiel minimálny a hraničné hodnoty uhlov sú približne 20°. Túto skutočnosť si vysvetľujeme vplyvom sekundárnych lalokov, ktoré majú ešte dostatočnú energiu a spôsobujú spoľahlivý odraz od prekážky. Sekundárny lalok sa uplatňuje aj vo väčšej vzdialenosti, avšak už iba na pravej strane kužeľa, a tým ho deformuje do stredovo nesymetrického tvaru. Ľavá strana kužeľa je široká 12.6°, a teda skoro presne sa zhoduje s hodnotou používanou v literatúre. Do nami meranej vzdialenosti sme v podstate nezaznamenali žiadne zužovanie EUVK s rastúcou vzdialenosťou. Mierny pokles bol až pri vzdialenosti 4.5 m. Overiť postupný pokles vo väčšej vzdialenosti však už nebolo možné vzhľadom na priestorové obmedzenia. Pre praktickú navigáciu mobilného robota je však vzdialenosť do 5 m podľa nášho názoru postačujúca a v tomto rozsahu sa snímač správa konštantne. Pri druhom snímači sme vopred hodnotu EUVK nepoznali. Zistené hodnoty nám naznačujú, že zhotovený snímač má vyžarovací kužeľ značne široký (Tab.2, Obr.10). Hodnoty jeho šírky postupne klesajú s narastajúcou vzdialenosťou a pohybujú sa v rozsahu približne 40° až 25°. Z toho možno usúdiť, že vysielaný akustický signál je slabší ako pri snímači Polaroid a značná časť signálu po okrajoch kužeľa sa s narastajúcou vzdialenosťou ku prekážke pohlcuje v prostredí. Snímač teda nevykazuje konštantnosť parametra EUVK so zmenou meranej vzdialenosti, ako to bolo pri snímači Polaroid, a je preto vhodnejší na meranie menších vzdialeností. Zistené hodnoty naznačujú, že vyžarovací kužeľ je symetrický približne podľa osi vysielania.

Záver

Navrhnutou metódou boli experimentálne zistené a overené údaje potrebné pri matematickom modelovaní neurčitosti snímania ultrazvukovým diaľkomerom. Tieto modely snímačov budú následne použité pri autonómnej navigácii mobilného robota. Ich využitie umožní presnejšie a spoľahlivejšie modelovať pracovné prostredie a skvalitniť aj proces samotnej navigácie.

Literatúra

- [1] Cao A.- Borenstein J.: Experimental Characterization of Polaroid Ultrasonic Sensors in Single and Phased Array Configuration, Proceedings of the UGV Technology Conference at the 2002 SPIE AeroSense Symposium, Orlando, FL, April, 1-5, 2002.
- [2] Elfes A.: Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, Computer Magazine, June 1989, pp. 46-57.
- [3] David J.- Cheeke N.: Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, CRC Press, April 18, 2002, pp. 480, ISBN 0-8493-0130-0
- [4] Gambino F.- Oriolo G. - Ulivi G.: A comparison of three uncertainty calculus techniques for ultrasonic map building, 1996 SPIE International Symposium on Aerospace/Defense Sensing and Control-Applications of Fuzzy Logic Technology III, pp. 249-260, Orlando, USA, 1996.
- [5] Howard A. - Kitchen L.: Generating Sonar Maps in Highly Specular Environments, Proceedings of the Fourth

International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, December 1996.

- [6] Klubal M.: Ultrazvukový senzorový systém mobilného robota, Diplomová práca, Katedra automatizácie a regulácie FEI STU, Bratislava, 2006.
- [7] NIPPON CERAMIC CO., LTD., Air Transmission Ultrasonic sensor, Catalog, 2002, http://www.nicera.co.jp/pro/ut/html_e/ut-001e.htm
- [8] Oriolo G. - Ulivi G. - Vendittelli M.: Fuzzy maps: A new tool for mobile robot perception and planning, Journal of Robotic Systems, vol.14, no. 3, pp. 179-197, 1997.
- [9] Oriolo G. - Ulivi G. - Vendittelli M.: Real-time map building and navigation for autonomous robots in unknown environments, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics, vol. 28, no. 3, pp. 316-333, 1998.
- [10] Polaroid ultrasonic ranging system handbook – application note/technical papers, 1992.
- [11] Ribo M. - Pinz A.: A comparison of three uncertainty calculi for building sonar-based occupancy grids, Robotics and Autonomous Systems, vol. 35, no. 3-4, pp. 201-209, July 2001.
- [12] Toman, M.: Ultrazvuk pre priestorové merania. In: *AT&P JOURNAL plus2*, roc. 7, 2001, s. 66-75.

Abstract

The contribution deals with processing of data obtained with the intelligent ultrasonic ranging system. The measuring system is intended as a component of a sensory system for mobile robot, which was developed at KAR FEI STU. Measuring system is composed of two basic parts as follows: ultrasonic rangefinder and intelligent rotating base actuated by stepper drive controlled by microcontroller. The conception of ranging system enables its use for wide scale of tasks in mobile robotics, like mapmaking, obstacle avoidance or localization. The attention is also paid to, from mobile robotics point of view, serious unsuitable properties of the sonars. There is experimental method for identification of the width of the ultrasonic rangefinder radiation cone introduced. The method was tested on the number of measurements realised with ultrasonic ranging system.

Ing. Jaroslav Hanzel

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, SK
Tel.: 02/60 29 18 64
E-mai: jaroslav.hanzel@stuba.sk

prof. Ing. Ladislav Jurišica, PhD.

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, SK
Tel.: 02/60 29 13 51
E-mail: ladislav.juristica@stuba.sk