

## Măsurarea distanțelor prin metoda ultrasunetelor

### Viteza sunetului

Într-un gaz ideal viteza sunetului este în funcție de temperatură. Din fericire pe pământ comportamentul aerului este foarte aproape de comportamentul unui gaz ideal, dacă temperatura și presiunea se mențin la un nivel standard aflat la nivelul mării.

De aceea viteza sunetului "c" în cazul unui gaz ideal în cazul nostru este:

$$c = \sqrt{\gamma * R * T} \quad (1.1)$$

unde:

c = viteza sunetului în metri pe secundă

$\gamma$  = constanta de temperatură, pentru aer uscat  $\gamma = 1.4$

R = constanta gazului, pentru aer uscat  $R = 286.9 \text{ N*m / (kg*K)}$

T = temperatura absolută (Kelvin), unde  $0^\circ\text{C} = 273.16 \text{ K}$

Pentru exemplu, viteza sunetului la temperatura unei camere ( $22^\circ\text{C}$ ) este de :

$$c = \sqrt{1.4 * (22 + 273.16) * 286.9} = 344.31 \text{ Metri/secundă} \quad (1.2)$$

Viteza sunetului depinde și de tipul gazului. De exemplu atmosfera de pe Marte este compusă din 95.3% dioxid de carbon ( $\text{CO}_2$ ) atunci constanta de temperatură  $\gamma=1.29$ , iar constanta gazului  $R=188.9 \text{ N*m / (kg*K)}$  atunci avem:

$$c = \sqrt{1.29 * (295.16) * 188.9} = 268 \text{ Metri/secundă} \quad (1.3)$$

### Detecția prin comparare cu o tensiune de prag

Majoritatea sistemelor de măsură cu ultrasunete se bazează pe determinarea timpului de zbor (TOF = intervalul de timp dintre momentul emisiei și momentul recepției unui puls sonor).

Momentul emisie,  $t_E$ , fiind cunoscut, rămâne de estimat momentul recepției,  $t_R$ , pentru a putea determina TOF.

$$TOF = t_R - t_E \quad (1.4)$$

Metoda folosită pentru determinarea  $t_R$  constă în compararea semnalului recepționat,  $x$ , cu o valoare de prag,  $V_P$ , așa cum se prezintă în figura 3.1. Momentul,  $t_{RP}$ , în care  $x$  depășește pentru prima dată valoarea de prag se consideră a fi  $t_R$ .

După cum rezultă din figura 1.1 această metodă oferă un estimat deplasat pentru TOF. Deplasarea:

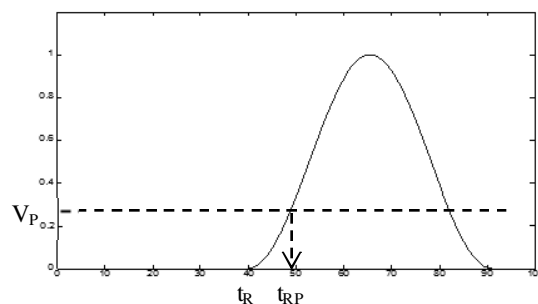
$$\mathcal{E} = t_{RP} - t_R \quad (1.5)$$

depinde de  $V_P$ , dar și de forma semnalului recepționat.

Pentru că deplasarea să fie 0 ar trebui îndeplinită cel puțin una din următoarele două condiții:

*Condiția 1*,  $V_P = 0$  nu se poate realiza din cauza zgomotului propriu al receptorului.

*Condiția 2*, timpul de creștere al semnalului recepționat să fie 0, nu se poate realiza din cauza răspunsului în domeniul timp al sistemului de transductoare electroacustice (emittor - receptor).



**Figura 1.1.** Măsurarea TOF prin metoda comparării cu o tensiune de prag.

## Nivelul de presiune sonoră și sensibilitatea

Nivelul de presiune sonoră (SPL) caracterizează performanța acustică a traductorului emițător în timp ce sensibilitatea (engl. sensitivity) caracterizează performanța electrică a traductorului receptor.

Dacă notăm cu  $P$  presiunea sonoră într-un punct și cu  $P_{REF}$  o valoare de presiune sonoră de referință, nivelul presiunii sonore se poate exprima în dB cu relația:

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_{REF}} \quad (1.6)$$

În acustică se obișnuiește a se lua drept valoare de referință pentru presiunea sonoră corespunzătoare pragului de audibilitate:

$$P_{REF} = 0.0002 \times 10^{-6} \text{ bar} \quad (1.7)$$

Conform [4], pentru o tensiune de excitație de 40kHz și 10V<sub>ef</sub> la distanța de 30cm față de traductor nivelul presiunii sonore va fi de minimum 120dB. Din (1.6) și (1.7), valoarea absolută a presiunii sonore, va fi în aceste condiții:

$$P = 0.0002 \text{ bar} \quad (1.8)$$

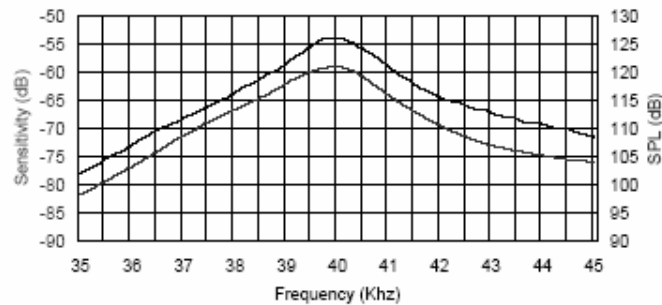


Fig 1.2. Dependenta de frecvență a sensibilității

În figura 1.2 se poate urmări dependența de frecvență a SPL pentru MA 400 ST (curba din partea de sus a graficului). Se poate remarca faptul că în jurul frecvenței centrale ( $40 \pm 0,5 \text{ kHz}$ ), nivelul presiunii sonore este de peste 125dB, în timp ce pentru o abatere față de  $f_c$  de  $\pm 2,5 \text{ kHz}$ , aceasta se reduce deja la 115dB. Pentru un randament bun de conversie a energiei electrice în energie acustică este important că traductorul să fie excitat la o frecvență cât mai apropiată de frecvența centrală.

Nivelul presiunii sonore va fi cu atât mai mare cu cât valoarea efectivă a tensiunii de excitație va fi mai mare. Într-adevăr, dacă notăm cu  $I$  intensitatea sonoră avem:

$$P \propto \sqrt{I} \quad \wedge \quad I \propto V_{ef}^2 \quad \Rightarrow \quad P \propto V_{ef} \quad (1.9)$$

Dependența dintre SPL și distanță nu este la fel de simplă. Atenuarea sunetului în aer depinde de umiditate și temperatură și poate fi determinată pe baza unor relații empirice, cum ar fi relația (1.10), dedusă pe baza rezultatelor experimentale de Knudsen și Harris:

$$\alpha_A = \left( \frac{f}{1000} \right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{0.283}{20 + \Phi_t} \quad (1.10)$$

unde:  $\alpha_t$  este coeficientul de atenuare în dB/m

$f$  este frecvența în Hz

$$\Phi_t = \Phi_{20}(1 + 0,067\Delta t)$$

$\Phi_{20}$  este umiditatea relativă la 20°C în %

$\Delta t$  este diferența de temperatură față de 20°C.

A doua curbă (ce din partea de jos) din figura 1.3 reprezintă graficul variației sensibilității în funcție de frecvență.

Sensibilitatea este un parametru caracteristic traductoarelor receptoare (MA 400 SR). Ea se definește la frecvența centrală și este amplitudinea tensiunii de mers în gol la bornele traductorului pentru o presiune acustică dată. În [4] este specificată valoarea -65dB la 40kHz și valorile de referință de 1V pentru tensiune și 1μbar pentru presiune.

Această informație se interpretează în felul următor : tensiunea de ieșire, în gol, la bornele MA 400 SR pentru 1μbar presiune acustică la intrare va fi dată de relația:

$$\frac{20 \log \left( \frac{v_0}{1V} \right)}{1\mu bar} = \frac{-65 dB}{1\mu bar} \Rightarrow 20 \log \frac{v_0}{1V} = -65 dB \Rightarrow v_0 = 0.562 mV \text{ la } 1\mu bar \quad (1.11)$$

Pe baza relațiilor (1.10) și (1.11) se poate deduce valoarea tensiunii de mers în gol a receptorului la distanța de 30cm față de emițător, acesta din urmă fiind excitat la 40kHz cu o tensiune de 10V<sub>ef</sub>. În aceste condiții presiunea exercitată asupra receptorului este de 200μbar (vezi relația 1.9) și prin urmare:

$$\frac{20 \log\left(\frac{v_0}{1V}\right)}{200\mu\text{bar}} = \frac{-65}{200} \Rightarrow v_0 = 10^{\frac{-65}{20 \cdot 200}} \Rightarrow v_0 = 0.963 V \text{ la } 200\mu\text{bar} \quad (1.12)$$

Această valoare a fost confirmată de rezultate experimentale .

### Unghiul de emisie / recepție

Unghiul de emisie pentru traductoarele MA 400 ST este parametrul care caracterizează traductorul din punctul de vedere al variației SPL în funcție de abaterea față de normala dusă în centrul traductorului.

Considerând ca valoare de referință (0dB) nivelul presiunii într-un punct situat la distanța  $x$  pe normala dusă în centrul traductorului, în conformitate cu datele de catalog, un punct situat la aceeași distanță  $x$  față de traductor dar pe o dreaptă care face cu normala un unghi de  $\pm 30^\circ$  va avea SPL cu 6dB mai mic. Acesta este sensul în care, în catalog, este specificat un unghi de emisie de  $60^\circ$  la -6dB.

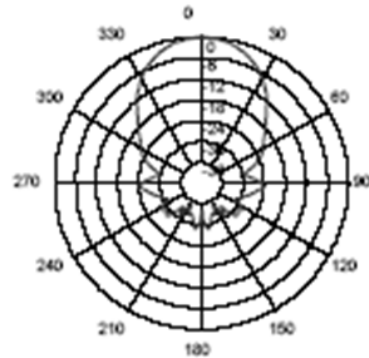


Figura 1.3. Unghiul de emisie / recepție pentru traductoarele MA 400 ST (D)

Unghiul de recepție, pentru traductoarele MA 400 SR, caracterizează traductorul din punctul de vedere al variației tensiunii de ieșire în funcție de abaterea sursei față de normala dusă în centrul traductorului. Considerând ca valoare de referință (0dB) nivelul de răspuns la o sursă situată la distanța  $x$  pe normala dusă în centrul traductorului, în conformitate cu datele de catalog, o sursă situată la aceeași distanță  $x$  dar pe o dreaptă care face cu normala un unghi de  $\pm 30^\circ$  va produce un nivel de ieșire cu 6dB mai mic.

Acesta este sensul în care în catalog este specificat un unghi de recepție de  $60^\circ$  la -6dB. Graficul variației SPL respectiv al sensibilității în funcție de unghi este prezentat în figura 1.3.

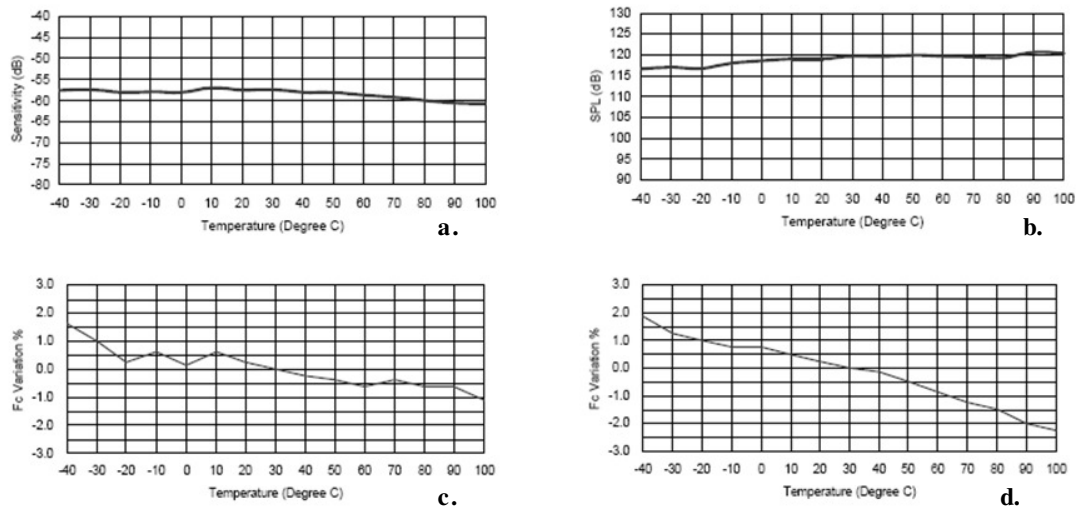
## Influența temperaturii asupra parametrilor traductoarelor

Temperatura influențează valorile SPL, sensibilitatea și frecvența centrală. Modul de variație al acestor parametri se prezintă în figura 1.4.

După cum se poate vedea în figura 1.4.a, influența temperaturii asupra sensibilității receptorului nu este semnificativă. Se constată o scădere a sensibilității cu 2 – 3dB pe tot domeniul de temperaturi (-30°C ... +80°C) de funcționare admis [4]. Tendința de scădere este mai accentuată la temperaturi mai mari decât 50°. În cazul utilizării în aer liber atingerea acestui prag este improbabilă.

În cazul MA 400 ST, după cum se vede din graficul 1.4.b, SPL este practic constant în intervalul de temperaturi 30°...80°C. În afara acestui interval, se constată o scădere a nivelului presiunii sonore o dată cu scăderea temperaturii. În intervalul de temperaturi de funcționare admis, (-30°C ... +80°C), diferența de nivel nu depășește 3dB.

Temperatura influențează de asemenea și valoarea frecvenței centrale a traductoarelor. Atât pentru MA 400 ST cât și pentru MA 400 SR, frecvența centrală



**Figura 1.4.** Influența temperaturii asupra: **a.** sensibilității MA 400 SR **b.** frecvenței centrale MA 400 SR **c.** SPL MA 400 ST **d.** frecvenței centrale MA 400 ST scade cu creșterea temperaturii. Variația relativă maximă a frecvenței nu este mai mare de +1,5%...-0,5% pentru receptor respectiv +2%...-2,5% pentru traductorul emițător. În intervalul de temperaturi de utilizare recomandat de producător [4], această variație se încadrează în limitele +1%...-0,5% pentru MA 400 SR, respectiv +1,5%...-1,5% pentru MA 400 ST.

Pe baza celor prezentate se pot trage următoarele concluzii cu privire la utilizarea traductoarelor din seria MA400 la măsurarea nivelului prin metoda puls-ecou.

1. Traductoarele din seria MA400 sunt destinate să lucreze în aer, într-un mediu normal, necontaminat (ne-coroziv). Frecvența lor centrală este de 40kHz iar banda la -6dB este de  $\pm 2$ kHz pentru traductoarele MA400ST respectiv  $\pm 2,5$ kHz pentru traductoarele MA400SR. Sunt prin urmare traductoare de bandă îngustă. Din punctul de vedere al utilizării acest lucru este important deoarece ele pot fi excitate cu (pot genera) semnale de frecvență constantă și foarte apropiată de frecvența centrală. Este prin urmare exclusă posibilitatea utilizării unor semnale speciale ( secvențe codate) de bandă largă pentru excitarea acestor traductoare.

2. Banda mai largă a traductoarelor MA400SR impune folosirea lor ca receptoare în timp ce banda mai îngustă a traductoarelor MA400ST le recomandă ca emițătoare. Altfel, efectul piezoelectric fiind reversibil, oricare dintre cele două traductoare poate fi folosit pe post de emițător sau receptor, mai mult, un singur traductor poate fi folosit alternativ pentru emisie și recepție. Utilizarea lor conform destinației date de fabricant, (T – emițător, R - receptor) conduce, așa cum s-a demonstrat experimental în primul referat la cel mai bun raport de conversie electric – acustic – electric.

3. Nivelul presiunii sonore care se obține la 30cm de emițător, în condițiile în care acesta este excitat pe frecvența centrală cu o tensiune de  $10V_{ef}$  este de 120dB. Din acest parametru de catalog se poate calcula care ar fi nivelul presiunii sonore la altă valoare a tensiunii de excitație (așa cum s-a demonstrat în paragraful 1 există o relație de proporționalitate între valoarea efectivă a tensiunii de excitație și presiune). Din păcate această informație nu este suficientă pentru a determina nivelul presiunii sonore la altă distanță față de emițător. Mai ales în condițiile în care propagarea are loc în spații închise și presiunea într-un punct este dată de suma mai multor reflexii defazate, acest nivel nu poate fi dedus din datele de catalog. Determinările experimentale reprezintă singura soluție.

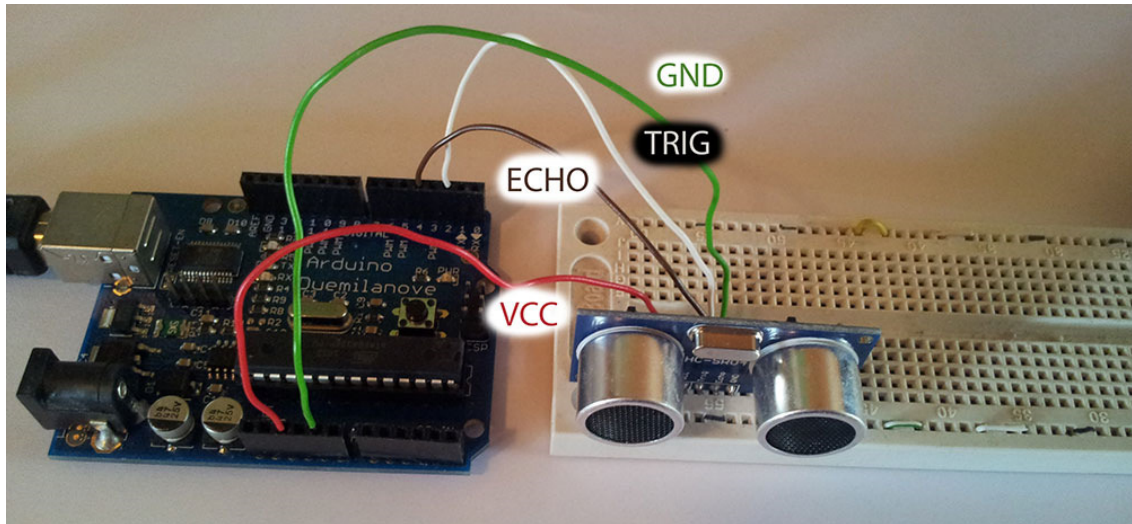
4. Sensibilitatea receptorului este un parametru foarte important de care depinde în ultimă instanță raza maximă de acțiune a sistemului. Nivelul de -65dB dat de catalog se raportează la o tensiune de referință de 1V și la o presiune de referință de  $1\mu\text{bar}$ . Această dublă raportare face ca parametrul să fie greu de utilizat deoarece nu se

cunoște distanța la care emițătorul (cel puțin în anumite condiții) este capabil să asigure această presiune. Prin urmare acest parametru este util numai pentru compararea diferitelor tipuri de receptoare între ele. Raza de acțiune a unui sistem de emisie recepție în anumite condiții date se poate determina cu precizie numai experimental.

5. Unghiul de emisie (recepție) al acestor traductoare este larg (aproximativ  $60^\circ$  la -6dB) ceea ce face ca în cazul utilizării în spații închise unda emisă respectiv recepționată să fie compusă din foarte multe vibrații de aceeași frecvență dar de amplitudini și faze diferite. Pe lângă dezavantajele evidente pe care ecourile suprapuse le produc din punctul de vedere al detecției, acest fenomen prezintă și avantaje: în conformitate cu legea numerelor mari, dacă numărul reflexiilor este suficient de mare, amplitudinea și faza vibrațiilor care se însumează poate fi considerată aleatoare, cu distribuția normală, și în consecință probabilitatea de recepție a unui ecou este aceeași în orice punct de pe suprafața unei secțiuni transversale a tubului. Aceasta face ca poziționarea traductoarelor să nu fie critică.



Pentru laborator se va utiliza un modul HC-SR04, modul care conține și emițătorul de ultrasunete și partea de recepție (microfonul), circuitul fiind proiectat să lucreze cu semnale logice TTL, astfel se poate conecta direct la pinii platformei Arduino



Senzorul se conectează conform figurii de mai sus, respectiv:

CC de la senzor se cuplează la +5V de pe sistemul Arduino Uno.

TRIG de la senzor se cuplează la unul din pinii digitali de pe sistemul Arduino Uno (în cod este setat pinul 2)

ECHO de la senzor se cuplează la un alt pin digital de pe sistemul Arduino Uno (în cod este setat pinul 3)

GND de la senzor se cuplează la unul din pinii GND de la Arduino Uno.

Programul de testare este descris mai jos, furnizarea valorilor măsurate și a distanței calculate fiind realizate prin intermediul comunicației seriale cu calculatorul.

Se vor realiza conexiunile descrise anterior urmând a fi copiat programul de mai jos în Arduino IDE, se va compila și încărca programul rezultat și se vor urmări valorile rezultate, testând pentru diferite distanțe. Domeniul de măsură este de 10cm – 400cm, experimental rezultând o precizie mai mare în intervalul 30cm – 300cm.

```

/*
 * Senzor: HC-SR04
 * Pini senzor | Conectare la platforma Arduino
 * VCC la 5V
 * TRIG la Digital pin 2
 * ECHO la Digital pin 3
 * GND la GND
Acest program realizeaza masurarea distantei pina la cel mai apropiat obiect si
returneaza valoarea distantei
*/
/*
A fost preluat si adaptat de la:
Original code for Ping))) example was created by David A. Mellis
Adapted for HC-SR04 by Tautvidas Sipavicius
This example code is in the public domain.
*/
// https://www.tautvidas.com/blog/2012/08/distance-sensing-with-ultrasonic-sensor-and-arduino/
//definirea pinilor
const int trigPin = 2;
const int echoPin = 4;

void setup() {
// se seteaza pinii de intrare si de iesire
pinMode(trigPin, OUTPUT);
pinMode(echoPin, INPUT);
// se initializeaza comunicatia seriala
Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
//variabilele pentru durata impulsului
// si pentru rezultatul distantei in centimetri
long duration, cm;

//Procesul de masurare este pomit prin generarea unui impuls HIGH cu o durata
//de minim 10 microsecunde
//pentru a fi asigurata o forma corecta a impulsului, pinul de Trigger este adus in starea LOW
digitalWrite(trigPin, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(trigPin, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW);

//masurarea timpului de la emiterea impulsului pina la receptionarea ecoului
//durata este masurata in microsecunde

//pulseIn() este o functie definita in Arduino Ide care permite masurarea duratei unui impuls
//masoara cu acuratete mai mare impulsuri cu o durata mai mare de 10usec pina la 3 minute
//returneaza valoarea in microsecunde

duration = pulseIn(echoPin, HIGH);

// conversia timp in distanta
cm = microsecondsToCentimeters(duration);

Serial.print(cm);
Serial.print("cm");
Serial.println();

```

```
    delay(100);  
  }  
  
  long microsecondsToCentimeters(long microseconds)  
  {  
    //viteza sunetului este de 340m/s sau 29 microsecunde / 1cm  
    //impulsul parcurge distanta de masurat de doua ori, dus si intors  
    //prin urmare durata pina la aparitia ecoului presupune distanta  
    //de la emitator – obiect – receptor, adica se va masura dublul distantei  
    //pina la obiect  
    return microseconds / 29 / 2;  
  }  
  
  //
```

Se vor realiza măsurători pentru mai multe distanțe (pentru referință se va utiliza o ruletă) iar ulterior se va schimba durata impulsului semnalului ultrasonor și se vor compara rezultatele (pentru o aceeași distanță, practic se va fixa senzorul într-o poziție, urmând a se schimba doar programul din sistemul Arduino Uno).