par Claude BREESE Lycée J. Rostand - 67084 Strasbourg

INTRODUCTION

Cet article est la synthèse d'un travail présenté dans le cadre des premières Olympiades de la Physique (mars 1993). Le sujet a été choisi après une visite du laboratoire Vibrations et Propagations de M. Michel BADER, maître de conférences et chercheur de l'Université Louis Pasteur, qui accepta de mettre à la disposition d'un groupe d'élèves de terminale F_5 , ses compétences sur l'imagerie ultrasonore. Le montage proposé utilise et met en œuvre différentes fonctions électroniques simples ainsi que les lois de propagation et de réflexion des ondes, étudiées dans les classes de lycée ; il illustre aussi les apports de l'informatique comme outil de la physique.

Les sigles RADAR et SONAR sont bien connus du grand public, contrairement à celui de SODAR (SOund Detection And Ranging) qui est presque ignoré. Ils sont introduits ici parce qu'ils permettent de distinguer le milieu de propagation : l'air dans le cas du RADAR et du SODAR, l'eau pour le SONAR et le corps humain lorsqu'il s'agit de l'échographie médicale.

Les ultrasons utilisés dans la présente étude ont une longueur d'onde de l'ordre du centimètre.

Par rapport au RADAR, le SODAR offre l'avantage d'un mode de propagation lent, celui du son, dont la célérité est environ 8.10^5 fois inférieure à celle des ondes hertziennes.

Avec un tel dispositif, il devient possible, dans un local de dimensions habituelles, de simuler le fonctionnement d'un RADAR qui couvrirait toute l'Europe. En outre un tel SODAR est réalisable avec une électronique et des transducteurs basse fréquence facile à mettre en œuvre et bon marché.





Une première étape de la réalisation, le SODAR analogique, illustre l'échographie en mode A sur un oscillographe conventionnel, et l'échographie en mode B avec un oscillographe à mémoire et à modulation de brillance. Le substrat d'archivage de l'image est une photographie de l'écran.

La seconde réalisation, un SODAR numérique, variante du précédent, utilise pour l'affichage un écran de micro-ordinateur et comme substrat d'archivage le papier d'une imprimante ou d'une table traçante.

RÉALISATION D'UN SODAR PÉDAGOGIQUE

La figure 1 indique la structure du montage et de la description qui en sera faite :

1) Production d'un train d'ondes ultrasonores.

2) Propagation, réflexion, puis détection des échos.

3) Obtention d'un signal électrique (signal Z) permettant la mesure de la durée de propagation t_p .

4) Branchement de l'oscillographe pour visualiser à l'écran la distance et la position angulaire des objets détectés.

Remarques préliminaires :

- les allures des signaux électriques aux différentes étapes du montage sont représentées à gauche du schéma synoptique,

- la fonction alimentation qui ne demande pas d'explications particulières, apparaît clairement sur le schéma de détail.

1. PRODUCTION D'UN TRAIN D'ONDES ULTRASONORES

La mesure de distance se fait par émission d'impulsions ultrasonores de durée suffisamment courte pour qu'elles n'interfèrent pas avec leurs échos issus de l'objet sur lequel elles se réfléchissent ; ces impulsions sont répétées périodiquement afin de pouvoir mettre en évidence une variation de la distance mesurée. Un tel train d'ondes ultrasonores est obtenu par excitation d'une capsule transductrice piezoélectrique par une tension en créneaux E, de fréquence porteuse f_0 de l'ordre de 40 kHz, et d'une fréquence de modulation f_1 (de l'ordre de 100 Hz) ou f'₁ (de l'ordre de 10 Hz) selon que la distance des objets à détecter soit de l'ordre du mètre ou de la dizaine de mètres.



Oscillogramme 3 : Signal E

336



Schéma de détail

Le générateur permettant d'obtenir le signal E apparaît dans le schéma de détail sous la forme des trois fonctions FP_1 , FP_2 et FP_3 .

Les fonctions FP_1 et FP_2 sont des multivibrateurs astables qui génèrent l'onde de modulation, à base de portes NON-ET (circuits CMOS 4011 avec une tension d'alimentation de 12 V). Le schéma de l'oscillateur astable est classique ; il présente la possibilité de régler le rapport cyclique par le potentiomètre P, et ainsi de choisir la durée des impulsions qui seront émises.

La fonction de commutation entre FP_1 et FP_2 est réalisée à partir d'un interrupteur inverseur qui permet de sélectionner la période du signal de modulation (T_1 ou T'_1).

La fonction FP₃ génère l'onde porteuse : c'est toujours le même montage, mais avec un rapport cyclique fixe et une fréquence ajustable à la valeur précise de la fréquence de résonance du transducteur f_0 (de l'ordre de 40 kHz) ; de plus une entrée d'inhibition permet de commander ce multivibrateur par le signal de modulation.

2. PROPAGATION, RÉFLEXION PUIS DÉTECTION DES ÉCHOS

Le dispositif d'émission et de réception s'apparente à celui d'un RADAR, la capsule émettrice étant sensiblement située au foyer d'une parabole. Le récepteur, constitué d'un transducteur ultrasonore de même nature que l'émetteur, est dirigé vers les objets à détecter ; sa position au fond d'un tube améliore la directivité, puisqu'il n'est sensible qu'aux échos provenant des réflecteurs situés dans un angle solide de faible ouverture.

Le signal d'émission part du transducteur émetteur E vers le sommet O' de la parabole sur laquelle il se réflechit, et repart parallèlement à l'axe principal puisque E est sensiblement placé au foyer F.

Les ondes sont alors réfléchies par un catadioptre C constitué de deux plans placés à angle droit : elles sont donc réfléchies deux fois à 90 degrés, puis se propagent à nouveau vers le transducteur récepteur R. L'intérêt de ce choix de réflecteurs est d'avoir une réflexion selon le même axe que celui de l'émission, et cela, quelle que soit l'orientation de ces réflecteurs.



Distance parcourue: $2F + 2d \approx C \bullet tp \approx d_0'c$





Figure 3 : Schéma de l'antenne.

• Mesure de la distance

340

L'onde émise par l'émetteur subit donc deux réflexions successives en O' puis en C, avant de revenir en R. Le temps t_p entre l'émission E et la réception R correspond à la durée de propagation du signal entre O' et le catadioptre C, multipliée par deux (l'onde faisant un aller-retour), si l'on néglige la distance entre E et R par rapport à d_{O'C}. La distance de O' à C peut ainsi être obtenue à partir d'une mesure de t_p , la vitesse de propagation étant égale à la célérité du son dans l'air dans les conditions de l'expérience :

$$d_{O'C} = (Cs \times t_p) / 2$$

Les distances maximales et minimales que l'on pourra éventuellement mesurer seront imposées par les paramètres du signal E :

- la période T_1 (ou T'_1) du signal de modulation limitera la portée maximale puisque, après sa réflexion en C, le signal R correspondant à l'émission de la première impulsion E_1 , devra être parvenu au récepteur, avant émission d'une nouvelle impulsion E_2 .

Il faut donc se restreindre à $t_p < T_1$ (ou T'₁).

– le réglage du rapport cyclique du signal de modulation imposera la distance minimale mesurable puisque le signal d'émission devra être plus court que t_p sous peine de voir se recouvrir les pics correspondant à E_1 et à R. Le réglage convenant le mieux correspond à une durée de l'ordre de la milliseconde pour le signal E. D'où la condition $t_p > 1$ ms.

	T (s)	t _{p min} (s)	t _{p max} (s)	c _{l min} (m)	c _{1 max} (m)
T'1	0,1	1.10 ⁻³	0,1	0,17	17
T ₁	0,01	1.10^{-3}	0,01	0,17	1,7



Figure 4 : Pics d'émission et de réception.

Remarque : Le potentiomètre représenté à la base de l'antenne permet une mesure de la position angulaire des catadioptres par rapport à un axe passant par O', choisi comme référence. Ce potentiomètre placé en O' et alimenté entre ses deux extrémités A et B constitue un simple diviseur de tension, fournissant une tension $U(\theta)$ entre son curseur et B. Le potentiomètre étant de type linéaire, la tension $U(\theta)$ est proportionnelle à l'angle θ :

$$\theta = \text{Cste.}^{*}U(\theta)$$



Figure 5 : Capteur angulaire (diviseur de tension).

3. OBTENTION D'UN SIGNAL ÉLECTRIQUE (SIGNAL Z) PERMETTANT LA MESURE DE LA DURÉE DE PROPAGATION T_{D}

Ce sont les fonctions FS₁, FS₂ et FS₃ du schéma de détail qui assurent l'amplification du signal de sortie du transducteur récepteur, son addition avec le signal d'émission et la mise en forme pour obtenir le signal Z sur lequel apparaît proprement le temps de propagation t_p de l'onde, grandeur que nous cherchons à mesurer pour en déduire la distance $d_{O'C}$.

a - Étage d'amplification FS₁

Le signal de réception étant de faible amplitude (6 mV pour une distance de l'ordre du mètre), il est nécessaire de l'amplifier environ cent fois (voir oscillogramme 4).

Nous avons donc utilisé un montage amplificateur inverseur autour d'un amplificateur opérationnel LF 357. Le coefficient d'amplification est imposé par les valeurs des résistances R_1 et R_2 , suivant la fonction de transfert du montage :

$$V_{S} = (-R_{2} / R_{1})$$
. $V_{e} = -100$. V_{e} avec $R_{1} = 1 k\Omega$, $R_{2} = 100 k\Omega$

L'inconvéniant de ce montage est qu'il amplifie aussi les imperfections du signal de réception (parasites, échos divers, fluctuations...). Un montage comparateur à seuil de l'ordre de 0.6 V ne retiendra que la partie de la tension amplifiée supérieure à cette valeur (voir oscillogramme 5).

Cette tension de seuil est obtenue à partir d'un diviseur de tension à vide :

$$V_{seuil} = (R_2/(R_1 + R_2)) \cdot V_1 = 0.6 V \quad R_1 = 15 k\Omega \quad R_2 = 1 k\Omega \quad V_1 = 10 V$$

Ce deuxième amplificateur fonctionnant en régime saturé, l'amplitude du signal de réception ne dépend plus de la distance du point C.

Seules les valeurs positives de la tension de sortie étant à retenir, $(V_s = + V_{sat} \text{ lorsque la tension amplifiée est supérieure au seuil du comparateur) une diode est branchée entre S₂ et S pour éliminer toute partie négative (voir oscillogramme 6).$

Remarque : La fréquence de 40 kHz du signal à amplifier ne permet pas d'utiliser un AOP 741 pour obtenir une amplification de 100 avec un seul étage. De plus, des condensateurs de découplage d'alimentation de 100 nF au tantale se sont révélés indispensables au bon fonctionnement du montage.

b - Montage additionneur FS₂

Ce module permettra d'additionner les signaux E et R afin de pouvoir mesurer le temps de propagation t_p sur une seule voie d'oscillo.

Afin de se restreindre aux montages classiques bien connus des élèves, deux amplificateurs opérationnels sont utilisés : le premier jouant le rôle de sommateur inverseur et le second le rôle d'inverseur ou éventuellement d'inverseur réducteur de tension afin de pouvoir régler l'amplitude de V_S à 10 V ou à 5 V (tension d'entrée maximale pour l'interface ORPHY) selon les applications envisagées.





Figure 6 : Montage additionneur $V_S = V_E + V_R$

c - Monostable FS_3

La tension de sortie du module additionneur permet une mesure approximative de la durée t_p , mais les signaux R ont une durée qui dépend encore de la distance du catadioptre C et du réglage du rapport cyclique de l'onde de modulation ; de plus, ils contiennent encore la fréquence porteuse f_0 . A l'aide d'un circuit intégré CD 4538 contenant deux monostables, nous pouvons affiner ces signaux par une mise en forme donnant des créneaux de durée T_{mono} de l'ordre du dixième de milliseconde.

La tension de sortie de l'additionneur commande le premier monostable connecté en mode redéclenchable.

Il se déclenche sur chaque front montant du signal d'entrée et ne se désenclenche qu'après son dernier front montant, avec un retard T_{mono} Ceci nous donne l'enveloppe des signaux E et R prolongée d'une durée $T_{mono} = R.C$ (association Résistance-Condensateur imposant la durée du monostable : dans notre cas, $R = 12 \ k\Omega$ et C = 15 $nF \Rightarrow T_{mono} = 0,2 \ ms$).

Ce signal de sortie commande le deuxième monostable en mode non-redéclenchable. Les créneaux sont ainsi affinés, donnant le signal Z. Il présente des impulsions E et R de front parfaitement raide, de durée indépendante du réglage du rapport cyclique égale à T_{mono}



L'oscillogramme 7 montre les différentes étapes pour la mise en forme du signal Z :

a) Signal après l'étage sommateur ; la porteuse est encore présente.

b) Le premier monostable redéclenchable ne garde que l'enveloppe du signal.

c) Le deuxième monostable affine les impulsions du signal précédent.

4. BRANCHEMENT DE L'OSCILLOGRAPHE

Le signal Z sert à commander le whenelt* d'un oscillographe à modulation de brillance ainsi que le déclenchement de la base de temps ; une tache brillante apparaît sur l'écran :

- à chaque signal d'émission E, à l'instant t_o, pris comme origine des temps, à gauche de l'écran, puisque ce signal déclenche le balayage horizontal,

– à chaque signal de réception R aux instants $t_o + t_p$ à condition de choisir une base de temps permettant de visualiser t_p à l'écran. Ces taches sont donc plus ou moins éloignées des taches d'émission, selon la distance du catadioptre réflecteur.

La tension U_{θ} est appliquée sur la voie Y de façon à obtenir une déviation proportionnelle à l'angle θ .

Si l'oscillographe présente en plus une fonction mémoire, les taches représentatives des objets détectés restent à l'écran. Il est ainsi possible

^{*} N.D.L.R. : La broche est le plus souvent disponible à l'arrière de l'oscilloscope, quand elle est disponible.

346

d'obtenir une image de la position de plusieurs réflecteurs dans un plan (distance en abscisse et angle en ordonnée).

Exemple d'application : Le premier enregistrement réalisé a été photographié (polaroid) à l'échelle 1. Pour faciliter l'étude quantitative du document, la photo a été agrandie trois fois par photocopie ; le début des taches correspondant au début de l'émission et au début de la réception a été pris en compte pour les mesures.



Figure 7

- En ordonnée (tableau 1), la correspondance entre la tension mesurée et le nombre de divisions est obtenue sachant qu'une rotation de 90 de l'antenne correspondait à quatre divisions sur l'écran de l'oscillographe soit $3 \times 4 = 12$ cm sur le papier millimétré, d'où l'échelle indiquée : 1 cm \Leftrightarrow 7.5 degrés.

Point	Tension $u(\theta) \leftrightarrow 7,5^{\circ}$	Angle °	
1	1.5	11	
2	3.5	26	
3	5.9	44	
4	8.9	67	
5	10.9	82	

- En abscisse (tableau 2), la base de temps étant de 1 ms par division,

une division (c'est-à-dire 3 cm sur le papier) correspond à un temps de propagation de 1 ms.

 Point
 Durée 1 cm \leftrightarrow 1/3 ms
 tp (s)
 Distance calculée en cm

 1
 11.6
 3.87
 66

1	11.0	5.07	00
2	14.4	4.80	82
3	9.7	3.23	55
4	13.1	4.37	74
5	16.2	5.40	92

Tableau 2

La durée en abscisse permet d'obtenir le temps de propagation de l'onde et de calculer la distance entre le sommet de 0' de la parabole et le catadioptre réflecteur.

Les tableaux de mesures précédents permettent de représenter la position des 5 catadioptres C détectés à partir de leurs coordonnées polaires (d0'C; θ). La précision par rapport aux positions réelles des catadioptres est de l'ordre de 5 cm pour une distance de 1 m, et de environ 2° pour un champ de balayage de 90°.

Pour retrouver l'équivalence d'une vue de dessus du champ balayé par le SODAR, il est toutefois encore nécessaire de transformer l'information obtenue en coordonnées polaires.



Figure 8

BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS

Pour éviter cette exploitation manuelle de l'enregistrement obtenu d'abord sur écran puis sur papier après une prise de vue photograhique de l'écran d'oscillographe, il paraît avantageux d'adapter à ce premier dispositif une possibilité d'interfaçage (par exemple avec l'interface ORPHY-GTS) ; le traitement des grandeurs mesurées pourra alors se faire à l'aide du logiciel REGRESSI qui offre la possibilité d'avoir directement une représentation en coordonnées polaires. De plus, l'ordinateur se trouve plus facilement dans les salles de T.P. du lycée qu'un oscillographe analogique à mémoire et à modulation de brillance !

5. DISPOSITIF SODAR NUMÉRIQUE

348

Le seul complément à apporter à ce qui précède consiste à ajouter un module simple qui permet un traitement électronique du signal Z ; il s'agit d'obtenir une tension U(d) directement proportionnelle à la distance à mesurer ; celle-ci permettra à la fois un affichage digital de la distance et un interfaçage de la manipulation.

5.1. Conversion du temps tp en une tension u(d) ; fonction FT1

Les signaux E et R de même période mais décalés dans le temps de la durée t_p , constituent les signaux d'entrée de la plaquette FT₁.





a - Mise en forme des signaux d'entrée

La bascule RS nécessite des signaux logiques équivalent à ceux des oscillogrammes Q_e et Q_r représentés sur la figure 10, à partir des

trains d'ondes d'émission et de réception. On utilise pour cela des C.I. monostables 4538.



Figure 10

b - Bascule RS

Le rôle de la bascule RS est d'obtenir une tension Q en créneaux dont la durée de l'état haut (Q = 1) correspond à t_p . (cf. oscillogramme Q). La bascule RS étant réalisée à partir de deux portes NON ET, la sortie Q_e est appliquée à l'entrée S (la sortie Q bascule à l'état logique 1) et la sortie Q_r est appliquée à l'entrée R (la sortie Q bascule alors à l'état logique 0). Ainsi, la durée de l'état haut du créneau obtenu correspond au temps qui sépare les pics d'émission et de réception.

c - Filtre passe-bas

On utilise un filtre passe-bas pour transformer le signal Q en une tension dont la valeur moyenne est proportionnelle au rapport cyclique du signal Q, et donc à la durée t_p .

d - Les amplificateurs operationnels IC_1 et IC_2

Les circuits IC₁ et IC₂ forment un amplificateur d'étalonnage grâce au potentiomètre de 10 k Ω . Il permet d'obtenir une tension de sortie de 1,00 V pour une distance mesurée de 1,00 m et offre ainsi une possibilité de lecture directe très simple sur un voltmètre à affichage numérique. Le signal est noté U(d).

e - Le comparateur IC₃

La tension étalonnée est comparée à une tension de référence de 2 V par le comparateur IC₃. Il permet de distinguer la détection d'un objet situé à moins de 2 m, de l'état de saturation résultant de l'absence de détection, lorsqu'il n'y a aucun objet dans le champ, ou lorsqu'il est hors de portée. On utilise ensuite un transistor fonctionnant en bloqué-saturé pour commander une LED, témoin visuel de détection d'un objet. Ce transistor pourrait aussi commander un petit buzzer qui jouerait le rôle d'un dispositif d'alarme se déclenchant dès qu'un intrus entrerait dans une zone de surveillance de rayon ajustable.

5.2. Reconstitution par un ordinateur d'une image en coordonnées polaires d'objets détectés par ultrasons

Les tensions $U(\theta)$ et U(d) étant comprises entre 0 et 5 V, elles peuvent être appliquées aux entrées analogiques EA_0 et EA_1 de l'interface ORPHY-GTS.

a - Préparation de l'acquisition

La programmation de l'interface et le traitement des données se fait à l'aide du logiciel REGRESSI :

– les voies EA_0 et EA_1 sont nommées respectivement θ (angle en degrés) et d (distance en m).



Figure 11

BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS

Par un étalonnage interactif de la voie EAO, on fait correspondre un angle de 0 degré à la tension mesurée lorsque l'antenne est dirigée dans la direction choisie comme axe de référence, et un angle de 90 degrés à la tension mesurée après avoir tourné l'antenne d'un quart de tour.

L'étalonnage de la voie EA₁ est inutile puisque le potentiomètre de la plaquette de conversion de t_p en tension permet d'avoir 1,00 V pour une distance d_{O'C} de 1,00 m. Par contre, il est maintenant possible de corriger l'erreur systématique qui consistait à prendre le point O', sommet de la parabole qui décrivait lui-même un petit arc de cercle, comme origine des coordonnées polaires : en créant la nouvelle variable d = d_{O'C} + d_{OO'}, où d_{OO'} est la distance constante de l'axe de rotation de l'antenne au sommet O' de la parabole, le logiciel fera systématiquement le calcul correctif nécessaire.

La durée d'enregistrement est choisie de l'ordre de la seconde et le déclenchement se fait par la barre d'espace.

Les couples de paramètres d et θ sont enregistrés dans cinq pages correspondant aux cinq catadioptres à détecter.

b - Acquisition des données

L'antenne prospecte le quart de plan sondé par rotation manuelle ; dès que la LED de détection signale la présence d'un catadioptre, la barre d'espace est actionnée et l'enregistrement de la page courante est validé. L'opération est poursuivie de la même façon jusqu'à ce que la position des cinq objets ait été mesurée.

c - *Exploitation* (voir la copie d'écran, figure 12)

Après une sauvegarde des données, il est possible de créer la variable d corrigée, comme indiqué ci-dessus et d'observer le graphique par superposition des différentes pages en coordonnées polaires.

Les légères fluctuations des tensions $U(\theta)$ et $U(t_p)$ entraînent des dimensions de quelques millimètres pour les cinq points représentatifs, ce qui n'est pas génant en soit puisque la vision de l'ensemble en est facilitée. Sur un écran VGA couleur, ces points apparaissent de façon très visible avec une parfaite correspondance avec la disposition réelle des catadioptres.



Figure 12 : Image échographique reconstituée en coordonnées polaires.

CONCLUSION

L'image obtenue donne entière satisfaction puisqu'elle apparaît en coordonnées polaires, sans distortion, comme sur un vrai RADAR. Il est inutile d'être un érudit pour reconnaître du premier coup d'œil la vue de dessus du champ prospecté par ce SODAR numérique. De plus l'exploitation quantitative de l'image est très aisée sur l'écran, où les coordonnées des objets détectés apparaissent numériquement par simple déplacement du curseur par la souris. La précision des mesures permet d'imaginer de nombreuses applications sur une table de travaux pratiques puisque la précision est de l'ordre de quelques millimètres pour une portée supérieure au mètre. En plus de la possibilité d'interfaçage espéré, cette plaquette permet aussi une mesure de distance avec affichage en lecture directe du résultat sur un voltmètre numérique avec une sensibilité de l'ordre du millivolt correspondant au millimètre.

La réalisation de ce nouvel outil a passionné les élèves et leur a permis de développer leurs connaissances et de laisser libre cours à

354 BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS

leur esprit d'initiative. L'intérêt du montage est qu'il met en œuvre les différentes fonctions qui sont habituellement étudiées en cours et en T.P. et qu'elles se trouvent ici associées entre elles pour une application réelle spectaculaire.

BIBLIOGRAPHIE

P. CAMMISAR, S. CHÉRIF, D.GARROY, P.PHILIPPE et R.SCHNAI-TER - Rapport Imagerie ultrasonore des olympiades 1993.

M. BADER - «Ondes centimétriques ultrasonores dans l'air», article du B.U.P. n°617

J. PERRIN - «Ultrasons», Encyclopédie Universalis.

Mesure de distances sans contact, par ultrasons, Encyclopédie Weka, Electronique.