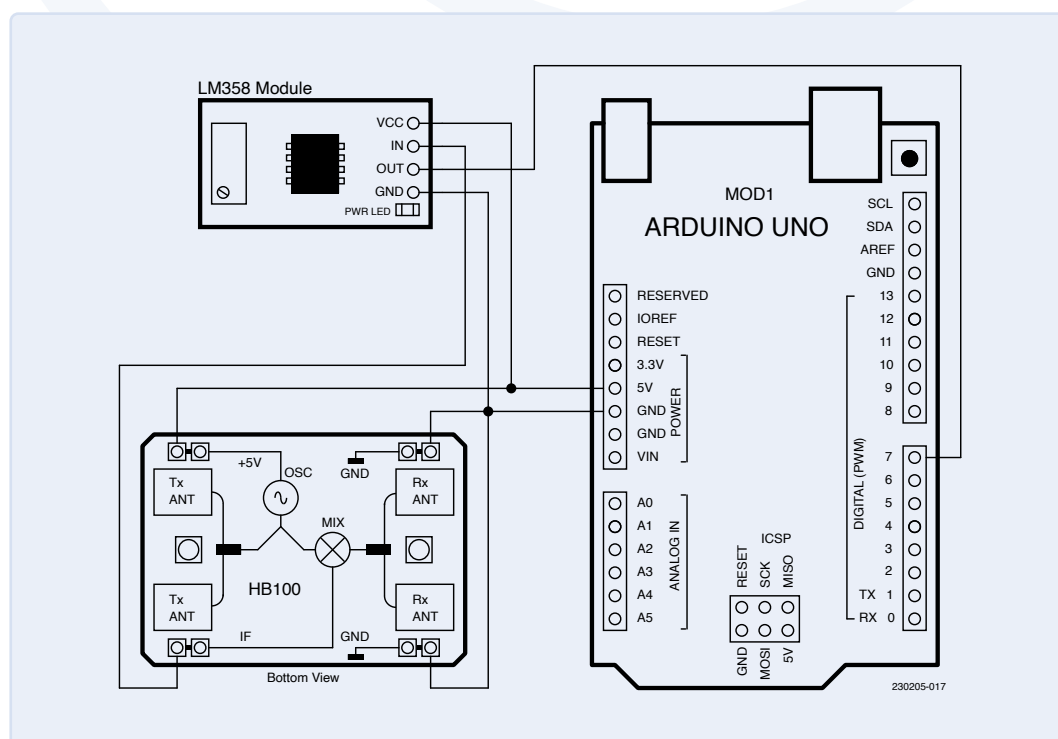


détecteur de mouvement

Doppler HB100

théorie et pratique



Stefano Lovati (Italie)

La détection des mouvements d'êtres humains, d'animaux ou d'objets utilise des capteurs appropriés dits « de mouvement ». Nous étudions ici un type de capteur spécifique, apprécié pour ses capacités uniques et sa valeur pédagogique : le capteur à micro-ondes. Ce dispositif de détection de mouvement repose sur l'effet Doppler, déjà utilisé dans les systèmes radar modernes.

Le détecteur à infrarouge fonctionne par détection des infrarouges émis par l'objet tandis que le capteur à μ -ondes est émetteur et analyse les réflexions sur l'objet. Le capteur à μ -ondes a l'avantage de pouvoir détecter d'autres objets que des corps chauds. En outre, il n'est pas affecté par la température ambiante, possède une large plage de mesure et une grande sensibilité. Grâce à ses caractéristiques, il est très utilisé dans l'industrie, le transport, le contrôle automatique des portes, les détecteurs de stationnement et comme compteur de vitesse. Comme il peut détecter différents types d'objets, dans de nombreuses applications réelles, combiné à un autre type de capteur il permet une détection ciblée et infaillible. Par ex., associé à un capteur de présence à infrarouge (PIR), le capteur à μ -ondes permet de déterminer à coup sûr le passage ou la présence d'une personne, en éliminant les possibles sources de perturbation.



Remarques sur l'effet Doppler

Considérons une source sonore : l'effet Doppler désigne la variation de fréquence (hauteur) du son perçu par un auditeur quand, soit elle se rapproche ou s'éloigne de lui, soit l'auditeur se rapproche ou s'éloigne d'elle. En pratique, chacun de nous a pu expérimenter cet effet, en remarquant comment le son produit par une sirène (que pour simplifier, nous supposons monotone et de fréquence fixe) est modifié lorsque la source se rapproche ou s'éloigne de nous. Cet effet, formalisé par le physicien autrichien Christian Doppler, s'applique à toutes les ondes qu'elles soient de nature électromagnétique (radio, lumière, rayons X), matérielle (son, vagues), etc.). Ce changement apparent de fréquence entre source d'onde et récepteur est déterminé par le mouvement relatif entre eux.

Pour mieux comprendre l'effet Doppler, supposons qu'une source émette un son de longueur d'onde et de fréquence constantes. Si la source et le récepteur sont immobiles, le récepteur « entend » une fréquence sonore identique à celle que la source émet. Le récepteur perçoit chaque seconde le nombre exact de périodes que la source produit. En revanche, en cas de déplacement relatif de l'un vers l'autre, le récepteur en perçoit plus car il va à la rencontre des ondes émises en se rapprochant de la source. Il interprétera cette variation comme un son de fréquence plus élevée. Inversement, si la source et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre, ce dernier percevra moins de périodes sonores chaque seconde et donc un son de fréquence plus basse.

Voyez la représentation graphique de ce concept (**figure 1**). Si le véhicule s'approche de la source (l'émetteur), l'onde réfléchie a une fréquence plus élevée ; cependant, si le véhicule s'éloigne, l'onde réfléchie a une fréquence moins élevée que l'onde d'origine.

Quelques équations

Pour un système radar, la formule ci-après donne la valeur en Hertz du décalage de fréquence f_D appelé fréquence Doppler.

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \quad (\text{Équation 1})$$

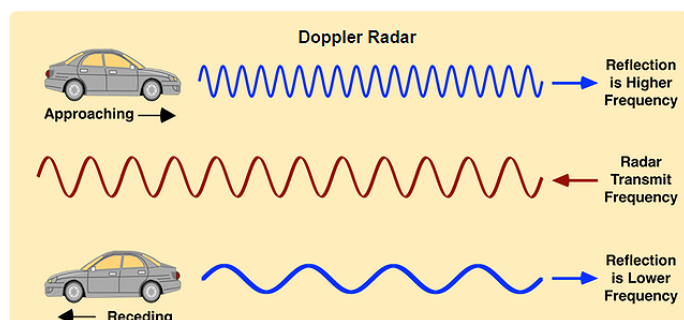


Figure 1. Exemple d'application de l'effet Doppler. (Source : physicsopenlab.org, CC BY 4.0)

où v est la vitesse de l'objet détecté en m/s et λ la longueur d'onde en mètres. Cette formule n'est valable que si la vitesse v est radiale, c.-à-d. sans composante transversale, comme c'est le cas si l'objet à détecter (celui qui réfléchit le signal) et la source (l'émetteur) se déplacent latéralement. Dans le cas le plus général, l'équation ci-dessus prend la forme ci-après.

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos \alpha \quad (\text{Équation 2})$$

où α est l'angle que forme la direction du signal transmis/réfléchi avec la direction du mouvement de l'objet à détecter. On remarquera que si l'objet à détecter ne se déplace que perpendiculairement à la direction du signal émis, l'effet Doppler est nul ($f_D = 0$). C'est pourquoi, dans les combats aériens de type *Top Gun*, où l'on utilise des radars sophistiqués exploitant précisément l'effet Doppler, les pilotes menacés par un radar tentent toujours d'adopter une trajectoire perpendiculaire à celle de l'ennemi, ce qui complique la détection radar et le suivi de leurs position et vitesse.

Dans le cas spécifique d'un radar transmettant des ondes électromagnétiques (comme celui du capteur utilisé pour cet article), la formule ci-après exprime la valeur absolue (le module) de la fréquence Doppler f_D :

$$|f_D| = \frac{2 \cdot v_r}{\lambda} = \frac{2 \cdot v_r \cdot f_{TX}}{c_0} \quad (\text{Équation 3})$$

où v_r est la vitesse radiale, f_{TX} la fréquence du signal transmis et c_0 la vitesse de la lumière.

Le module HB100

Cet article étudie les caractéristiques de l'un des capteurs de détection de présence à effet Doppler les moins chers : le *HB100*. En bref, c'est un module intégré monté sur un circuit imprimé de taille extrêmement compacte comprenant un émetteur de μ -ondes (bande X), un circuit récepteur, un mélangeur et toute la section RF. Pour rassurer nos lecteurs, je précise que même si les fréquences concernées sont assez élevées (environ 10 GHz), il n'y a pas de risque pour la santé en raison de la très faible puissance d'émission. Le principe de fonctionnement de ce module, vendu quelques euros par les grands distributeurs de composants, est très intéressant sur le plan technique et pédagogique. En effet, le module utilise un circuit superhétérodyne sur lequel reposent les systèmes radar modernes et son schéma classique se retrouve dans de nombreux récepteurs RF. La **figure 2** montre l'aspect extérieur du module, qui est très compact, avec le boîtier métallique qui sert d'écran de protection pour la partie RF. La **figure 3** montre l'arrière du module qui quant à lui, sert d'antenne émettrice-réceptrice

The HB100 miniature motion sensor is a e détecteur de mouvement miniature HB100 est un module émetteur-récepteur Doppler opérant à 10,525 GHz, donc en bande X. Il abrite un oscillateur à résonateur

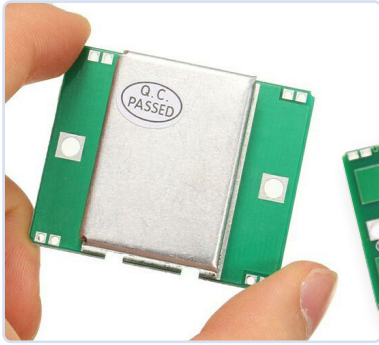


Figure 2. Vue de dessus du module HB100. (Source : [6])

diélectrique (DRO) et une paire d'antennes, gravées directement sur la carte imprimée. Ce module est idéal pour réduire l'incidence des fausses alarmes dans les systèmes de détection d'intrusion, en particulier s'il est associé à un capteur infrarouge passif (PIR) classique. Les systèmes d'ouverture automatique de porte et compteurs de vitesse de véhicule peuvent aussi utiliser ce capteur. Les avantages principaux du module HB100 sont les suivants :

- détection de mouvement sans contact ;
- mesure non affectée par la température, l'humidité, le bruit, l'air, la poussière ; adaptation à des conditions environnementales particulièrement difficiles ;
- excellente immunité aux interférences radio ;
- faible puissance rayonnée = absence de risque pour l'homme et conformité aux réglementations de la Federal Communication Commission (FCC) ;
- distance de détection élevée, jusqu'à 20 m ;
- détection non limitée aux humains, mais étendue aux objets froids ;
- haute directivité des ondes radio ;
- faible consommation d'énergie ;
- capacité à fonctionner en mode CW (*Continuous Wave*, c.-à-d. transmission continue du signal radio) et en mode Pulse (transmission de courtes impulsions périodiques) ;
- compacité, faible épaisseur.

Nous passons à l'analyse détaillée du module en lien avec son schéma-bloc (figure 4). Commençons par l'oscillateur qui, comme déjà indiqué, est un DRO accordé à la fréquence de 10,525 GHz. Un disque céramique, généralement en titanate de baryum ($\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$) sert de chambre de résonance pour l'énergie RF. La fréquence de résonance dépend de

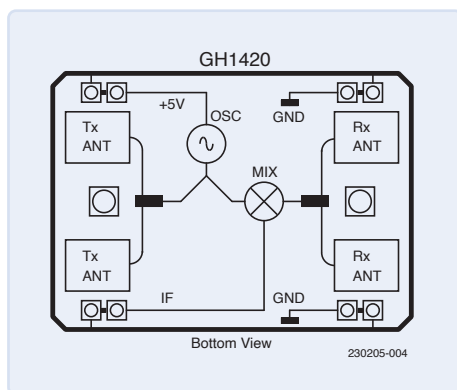


Figure 4. Schéma-bloc du capteur. (Source : [5])

Figure 3. Vue inférieure du module HB100. (Source : [7])

sa taille et de sa forme. C'est justement la fréquence du signal que le module envoie aux deux antennes rectangulaires gravées sur le circuit imprimé et visibles du côté gauche de la figure 4. Tout obstacle se trouvant sur le chemin du faisceau émis le réfléchira avec une différence de fréquence fonction du mouvement de l'objet par rapport au module d'émission. Aux vitesses ordinaires, cette différence reste faible. La manipulation d'un signal RF en bande X est très ardue, sur le plan matériel, mais surtout pour le logiciel. La solution à cet écueil est justement apportée par le circuit superhétérodyne et, plus précisément, par le mélangeur RF (v. fig. 4). Sa fonction est de « combiner » le signal transmis avec celui reçu par les deux antennes rectangulaires, visibles à droite (v. fig. 4). Si un mélangeur reçoit deux signaux d'entrée de fréquences f_{e1} et f_{e2} , il produit deux signaux de sortie de fréquences f_{s1} et f_{s2} respectivement égales à $f_{e1} + f_{e2}$ et $f_{e1} - f_{e2}$. Ainsi, dans notre cas, deux signaux l'un à 20 GHz environ (somme des fréquences émise et reçue) et l'autre en BF (différence des dites fréquences). Ce mécanisme résout élégamment notre problème, car il transforme le problème de la mesure d'un signal en bande X en la mesure d'un signal BF facilement gérable par un μ contrôleur courant à faible coût, par ex. Arduino. En mouvement radial, selon la vitesse de l'objet on aurait par ex. 1 kHz à 185 km/h (vitesse très élevée) et 30 Hz à 5,5 km/h (homme qui marche).

Le signal appelé FI (Fréquence Intermédiaire) en sortie du mélangeur est justement le signal de différence. Ce processus courant en RF, est aussi dit abaisseur de fréquence (down-conversion en anglais) : son but est de réduire une fréquence élevée pour simplifier sa manipulation. La fréquence ainsi obtenue est appelée « fréquence intermédiaire » pour la distinguer de la fréquence d'origine, dite de « bande de base ».

L'examen de la figure 4 révèle aussi la présence de 4 broches seulement. Elles sont nécessaires pour connecter le module à un μ contrôleur ou à un circuit de mesure : 2 broches de masse, 1 broche pour l'alimentation positive en 5 V et 1 broche pour le signal de sortie FI en BF. Le but est de traiter un signal dont la fréquence n'est que de quelques Hz ou kHz, en laissant la tâche ardue du traitement matériel du signal μ -ondes au module HB100. Il reste cependant un problème : le signal de sortie du capteur a une faible amplitude. Nous verrons plus loin comment le traiter.

Pour une utilisation pratique, le module doit être monté avec les antennes (v. figure 3) dirigées vers la zone à couvrir par la sortie rayonnée, en les orientant de manière à obtenir la meilleure couverture. Les diagrammes de rayonnement des antennes, en azimut et en élévation sont donnés (v. figure 5).

Signal de sortie

La broche IF représente le signal de sortie du module, correspondant au décalage de fréquence déterminé par la vitesse et la direction de tout objet éclairé par l'antenne. L'amplitude du signal de décalage de fréquence Doppler, est proportionnelle à l'énergie reçue et réfléchi en partie par l'objet. Elle vaut quelques μ volts (μ V). Pour cette raison un amplificateur BF à gain élevé est normalement connecté à la broche

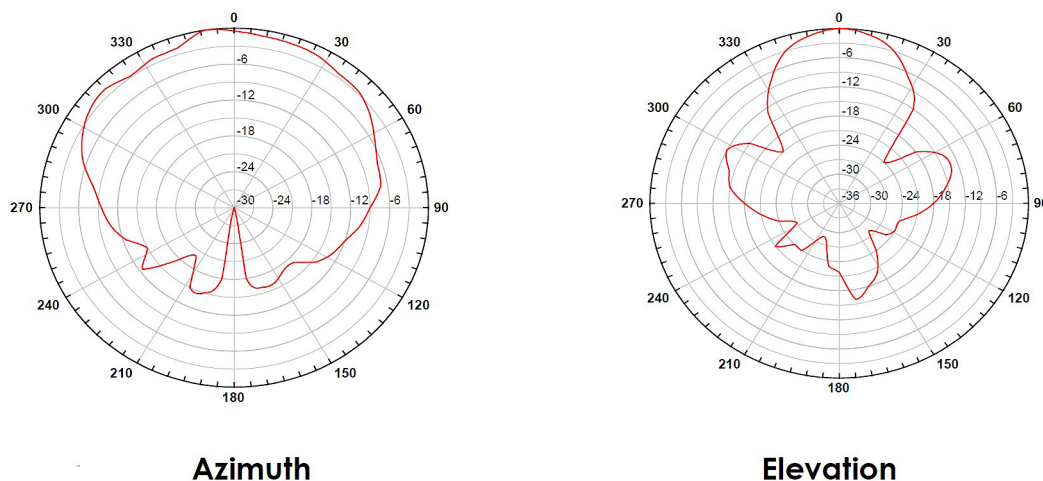


Figure 5. Diagrammes de rayonnement de l'antenne. (Source : [1])

FI afin d'amplifier le signal de sortie. Par ailleurs, la fréquence du décalage Doppler est proportionnelle à la vitesse du mouvement. Rappelons l'ordre de grandeur : une marche humaine type (5 à 6 km/h en direction du capteur) produit un décalage de fréquence de l'ordre de 30 Hz. La tension BF sur la broche de sortie IF est proportionnelle à l'intensité du signal reçu (RSS). Les équations données ci-dessus permettent de calculer la fréquence Doppler. Si le sujet éclairé par le capteur approche ou recule **le long** de la ligne radiale, la formule précédente est simplifiée et prend la forme suivante, où v_r est la vitesse radiale, exprimée en km/h :

$$f_D = 19.49 \cdot v_r \quad (\text{Équation 4})$$

Les caractéristiques techniques du module principale sont :

- > tension de fonctionnement :
5 V \pm 0,25 V ;
- > courant type absorbé en mode transmission continue : 60 mA maximum, 37 mA ;
- > taille : 61,2 x 61,2 mm ;
- > portée de détection : entre 2 m et 16 m ;
- > fréquence d'émission : 10,525 GHz ;
- > précision de fréquence : 3 MHz ;
- > puissance de sortie min. : 13 dBm EIRP ;
- > niveau des harmoniques : < -10 dBm ;
- > courant moyen type : 2 mA ;
- > largeur minimale de l'impulsion d'émission : 5 μ s ;
- > cycle de fonctionnement minimal : 1 %

Circuit de traitement du signal

La sortie du capteur HB100 (broche IF), est un signal BF reflétant le décalage Doppler de fréquence du signal reçu. La difficulté est qu'un signal non amplifié de

quelques μ V d'amplitude apparaît sur cette sortie. Dans les applications pratiques, il est obligatoire de l'amplifier suffisamment, de préférence en insérant un filtre passe-bas éliminant toutes les fréquences parasites au-delà de quelques centaines de Hertz. La fiche technique [1] et la note d'application [2] du capteur sont très utiles à cet égard. Cette dernière, présente deux schémas possibles de circuit de conditionnement du signal. Le 1^{er} (v. **figure 6**), s'applique au mode d'émission en continu (CW) et est basé sur l'AOP à gain élevé **LM324** de Texas Instruments.

Le 2^e circuit, (v. **figure 7**), s'applique au mode Impulsion, dans lequel l'émetteur émet des impulsions successives selon une fréquence de répétition donnée et avec un rapport cyclique donné (en anglais PRF,

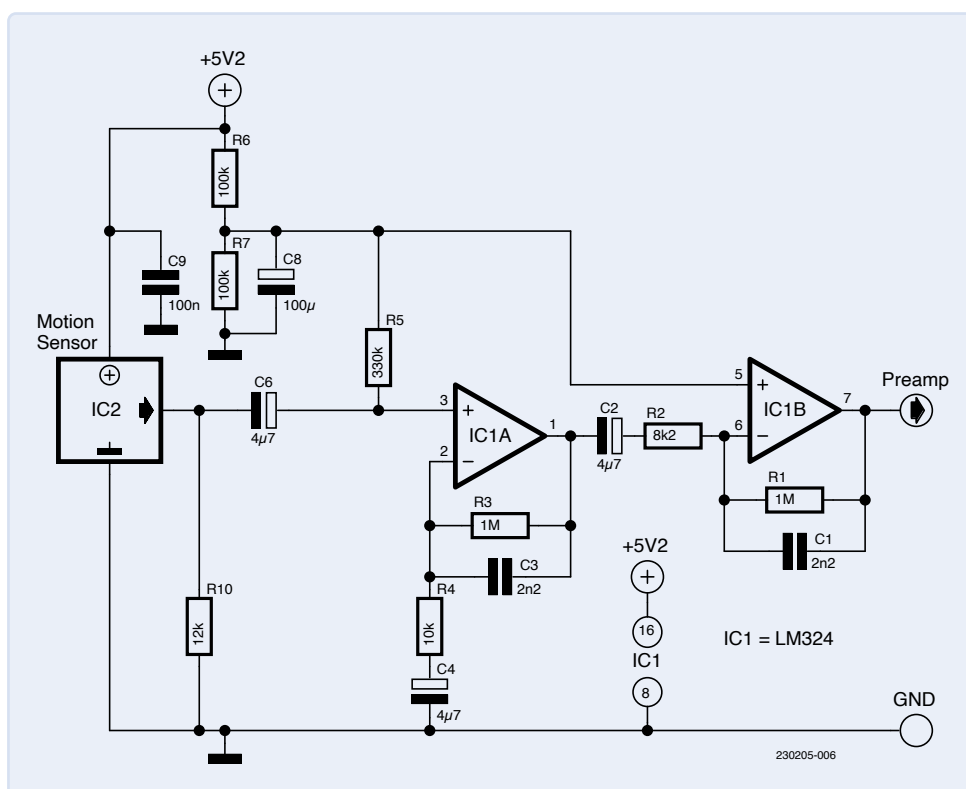
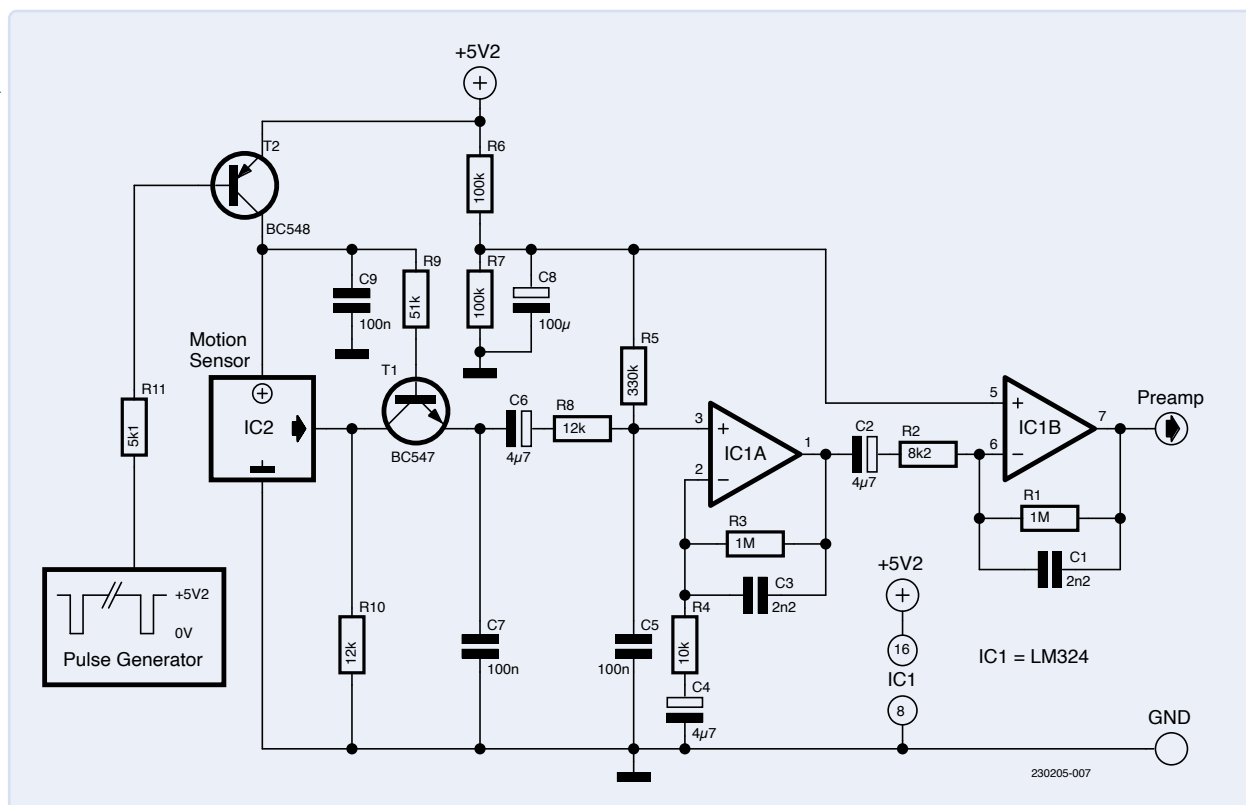


Figure 6. Circuit de conditionnement pour le mode CW. (Source : [5])



abréviation de *Pulse Repetition Frequency*). À ce sujet, le fabricant du HB100 suggère d'utiliser une PRF de 2 kHz et un rapport cyclique de 4 %.

Outre l'AOP à gain élevé LM324, ce circuit utilise deux transistors. Comme on le voit en bas à gauche (**figure 7**), le mode impulsion peut être produit en agissant directement sur l'alimentation du module, de manière à respecter la PRF et le rapport cyclique suggérés ci-dessus par le fabricant. C.-à-d. que dans ces conditions, le transistor de commutation ajouté en série est passant toutes les 0,5 ms (2 kHz) et le reste seulement 4 % de ce temps soit 0,02 ms.

Toutefois, pour simplifier l'utilisation du capteur, un AOP à usage général, a été choisi. Il est livré monté sur un circuit imprimé avec un connecteur et un potentiomètre de réglage du gain. Le module, très bon marché et facilement disponible, est basé sur le LM358, (**figure 8**). Le LM358 fournit une amplification monovoie avec un gain variable entre $1\times$ et $100\times$, réglable à l'aide du potentiomètre : tourner la vis dans le sens horaire diminue le gain ; tourner la vis dans le sens antihoraire augmente le gain. En outre, le module est équipé d'un témoin LED de présence de l'alimentation du module. L'AOP LM358 peut traiter des signaux jusque 700 kHz (donc bien au-dessus de la bande qui nous intéresse) et peut être alimenté avec une tension comprise entre 3 V et 32 V. Le module comporte 4 broches d'interface : *VCC*, *GND*, *Signal In* et *Signal Out* (**figure 8**).

Essais avec Arduino

Pour l'essai du capteur Doppler HB100, une classique carte Arduino UNO et le module amplificateur LM358 (ou bien, tout autre amplificateur à grand gain et faible bruit, à voie et alimentation uniques) conviennent. En exécutant un croquis spécifique, une carte Arduino UNO peut détecter la fréquence du signal fourni par le module, et le cas échéant

en déduire la vitesse à laquelle la « cible » potentielle se déplace. Le croquis en question utilise une bibliothèque spécifique développée pour la mesure précise des fréquences. En effet, pour mesurer une fréquence en bande audio ou inférieure, il faut déterminer la période du signal d'entrée avec une grande précision. Pour ce faire, la bibliothèque utilise un module *Counter and Capture* (Compteur et capture) très précis, fourni par l'architecture matérielle du μ contrôleur ATmega. La bibliothèque renvoie la période mesurée sous forme de nombre entier avec 1/16 μ s de résolution. Déduire la fréquence, se résume à diviser la fréquence de l'horloge par la valeur renvoyée par la bibliothèque. Dans notre cas, nous fixons la fréquence d'horloge à 16 000 400 pour compenser les possibles imprécisions de la carte Arduino.

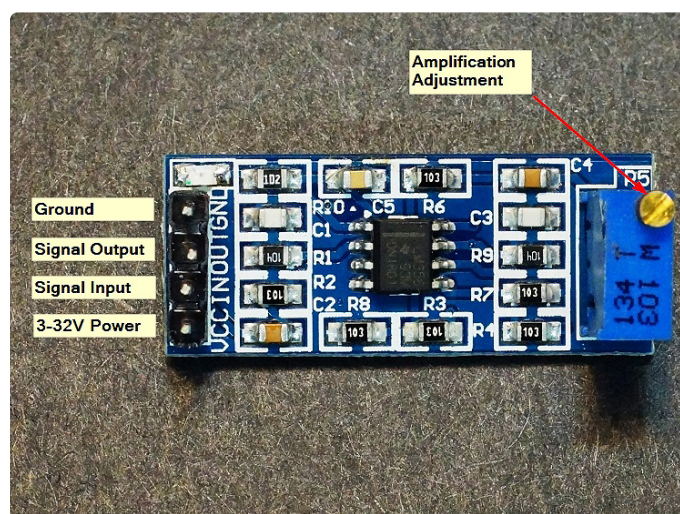


Figure 8. Le module d'amplification LM358.

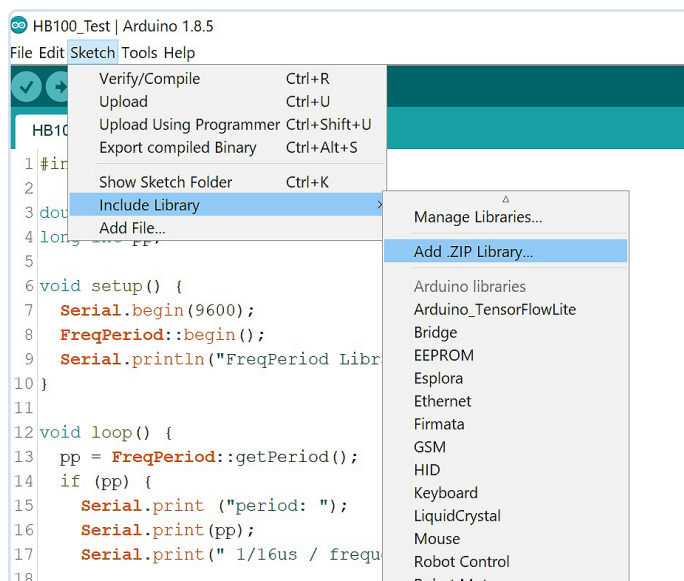


Figure 9. Installation de la bibliothèque *FreqPeriod*.

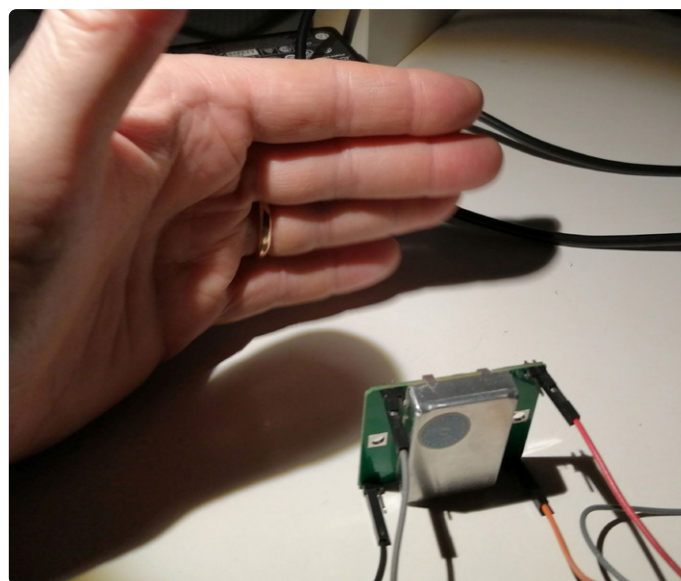


Figure 10. Mouvements rapides de la main devant l'antenne du capteur.

Cette bibliothèque n'est pas incluse dans la bibliothèque officielle Arduino, mais elle s'installe facilement dans l'EDI une fois le fichier .zip disponible à l'adresse [3] téléchargé. À cet effet, ouvrez l'EDI Arduino, sélectionnez l'élément de menu *Sketch Include Library Add .ZIP Library...* (v. **figure 9**). Puis sélectionnez le fichier .zip de la bibliothèque téléchargée ci-avant. Fermez et redémarrez l'EDI : la nouvelle bibliothèque y est alors disponible.

Le croquis est présenté ici (**listage 1**). Il est très compact et relativement simple. La fonction `setup()`, initialise la ligne série (à 9600 bps) et la bibliothèque *FreqPeriod* par la méthode `begin()`. La boucle `loop()`, acquiert en 1^{er} la période du signal d'entrée en appelant la méthode `getPeriod()`. Elle calcule et affiche ensuite les valeurs correspondantes de la fréquence (en Hertz) et de la vitesse radiale (en km/h).

Pour vérifier le fonctionnement du croquis, il faut connecter le capteur HB100 et le module amplificateur LM358 à la carte Arduino. Les connexions sont visibles sur l'**illustration de tête** de cet article.

Mettons ensuite le circuit sous tension et activons le moniteur série de l'EDI Arduino et observons les résultats. En déplaçant par ex. la main (v. **figure 10**) devant l'antenne du capteur HB100 (dont on se souvient qu'elle est située à l'arrière de la carte imprimée, côté opposé au conteneur métallique), nous devrions voir une variation de la vitesse calculée par le croquis.

La sortie envoyée via l'interface série est illustrée (v. **figure 11**).

Le calcul de cette vitesse, permet de concevoir des algorithmes complexes pour des applications relatives au fonctionnement des portes (battantes ou coulissantes), à l'allumage automatique de l'éclairage des escaliers, à l'ouverture des portes piétonnes, à la détection



Listage 1. Croquis Arduino.

```
#include <FreqPeriod.h>
double lfrq;
long int pp;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    FreqPeriod::begin();
    Serial.println("FreqPeriod Library Test");
}

void loop() {
    pp = FreqPeriod::getPeriod();

    if (pp) {
        Serial.print("period: ");
        Serial.print(pp);
        Serial.print(" 1/16us / frequency: ");
        lfrq = 16000400.0 / pp;
        Serial.print(lfrq);
        Serial.print(" Hz ");
        Serial.print(lfrq/19.49);
        Serial.println(" km/h ");
    }
}
```

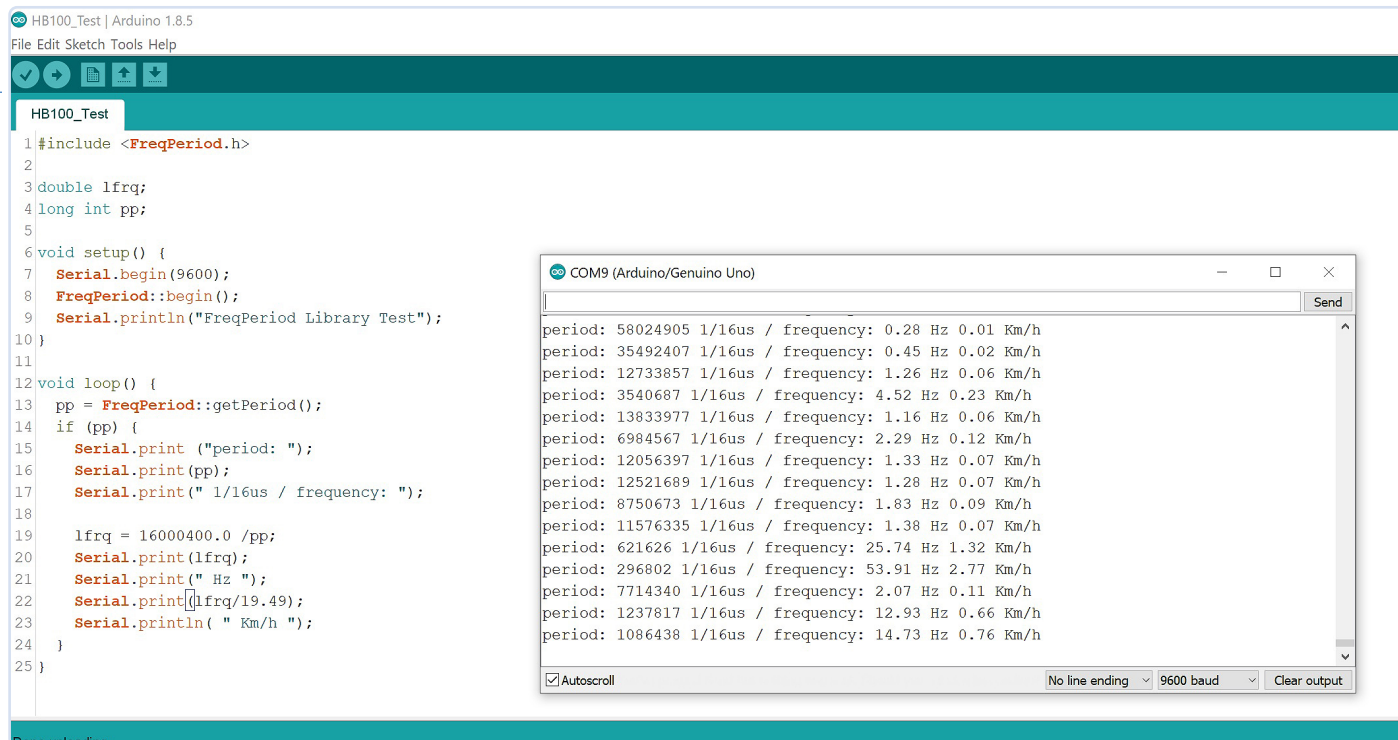


Figure 11. Sortie sur le moniteur série.

d'intrusion, à la vidéo-surveillance, etc. Le module fournit une assez bonne sensibilité s'il fonctionne dans sa limite de portée, soit environ 20 mètres. On peut améliorer les performances en utilisant un circuit amplificateur de gain plus élevé que celui offert par le LM358 (100x).

Conclusion

Cet article avait pour objet de présenter un capteur très intéressant et peu connu, le capteur Doppler de mouvement HB100. Particulièrement bon marché et facilement interfacé avec un µcontrôleur, le HB100 permet d'apprendre et d'expérimenter les techniques et concepts principaux de détection de signaux sur lesquels reposent les radars commerciaux sophistiqués et coûteux. Les applications de ce capteur ne manquent pas : il ne fait aucun doute que de nombreux électroniciens réfléchissent déjà à d'autres développements futurs. ◀

VF : Yves Georges — 230205-04

Des questions, des commentaires ?

Si vous avez des questions techniques, n'hésitez pas à envoyer un courriel à l'équipe éditoriale d'Elektor (redaction@elektor.fr).

À propos de l'auteur

Fort de son diplôme d'ingénierie électronique obtenu au Politecnico di Milano, Stefano entama une carrière de développeur de micrologiciels et de logiciels. Au fil des ans, il vécit de l'intérieur la transformation progressive du monde embarqué, depuis les premiers µprocesseurs 8 bits - programmables uniquement en assembleur - jusqu'aux plus récents Soc, FPGA, DSP et logiques programmables aux performances et caractéristiques exceptionnelles. Il s'intéresse à tout ce qui touche technologie et électronique et consacre ses loisirs en partie à l'étude de nouveaux composants et à la réalisation de petits projets.



Produits

- > **YDLIDAR X2 Lidar - Télémètre laser 360 degrés (8 m)**
<https://elektor.fr/18941>
- > **Arduino Uno Rev3**
<https://elektor.fr/15877>
- > **Arduino Uno Mini (édition limitée)**
<https://elektor.fr/20098>

LIENS

- [1] Fiche technique du module HB100 : https://limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Module_Datasheet.pdf
- [2] Note d'application HB100 : https://limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Application_Note.pdf
- [3] Bibliothèque de mesures de fréquence :
<https://github.com/Jorge-Mendes/Agro-Shield/tree/master/OtherRequiredLibraries/FreqPeriod>
- [4] Logiciel sur la page web de ce projet : <https://elektormagazine.fr/230205-04>
- [5] Schémas des circuits : https://mantech.co.za/Datasheets/Products/MSAN-001_AGILSENSE.pdf
- [6] Source de la photo de la vue de dessus : https://mantech.co.za/Datasheets/Products/HB100_RADAR.pdf
- [7] Source de la photo de vue de dessous :
<https://kuongshun-ks.com/uno/uno-sensor/hb100-microwave-doppler-radar-wireless-module-moti.html>