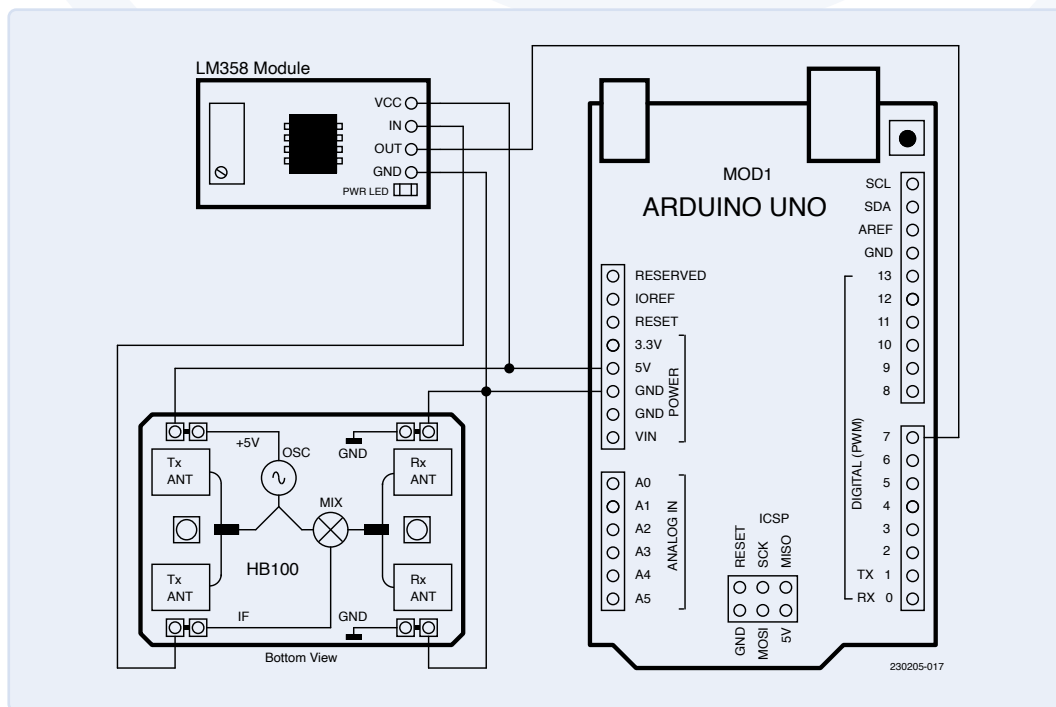


De doppler- bewegingssensor HB100

theorie en praktijk



Stefano Lovati (Italië)

Om de beweging van mensen, andere dieren of allerhande objecten te detecteren, zijn geschikte bewegingssensoren nodig. Dit artikel gaat in op een specifiek type sensor, dat bekend staat om zijn unieke mogelijkheden en educatieve betekenis: de microgolfsensor. Deze bewegingsdetector werkt volgens het dopplereffect, hetzelfde principe als in moderne radarsystemen wordt gebruikt.

In tegenstelling tot infrarood-bewegingsdetectoren, detecteren microgolfsensoren de beweging van een voorwerp door het analyseren van microgolven die door het voorwerp worden gereflecteerd. Vergeleken met andere soorten sensoren blijven de soorten objecten die kunnen worden gedetecteerd niet beperkt tot levende wezens. Bovendien wordt de microgolfsensor niet beïnvloed door de omgevingstemperatuur, heeft hij een groot meetbereik en een dito gevoeligheid. Vanwege zijn eigenschappen wordt hij veel gebruikt in industriële apparatuur, transport, automatische deuren, parkeersensoren en als snelheidsmeter. Omdat hij verschillende soorten objecten kan detecteren, wordt deze sensor in veel praktische toepassingen gecombineerd met een ander type sensor voor een gerichte en foutloze detectie. De microgolfsensor kan bijvoorbeeld worden gecombineerd met een infrarood-aanwezigheidssensor (PIR) om de doorgang of aanwezigheid van een persoon effectiever te bepalen en mogelijke storingsbronnen te elimineren.



Over het dopplereffect

Het dopplereffect heeft betrekking op de verandering in frequentie, of toonhoogte, die optreedt wanneer een geluidsbron de waarnemer nadert of zich van hem verwijderd, of omgekeerd, wanneer de waarnemer de geluidsbron nadert of zich ervan verwijderd. Ieder van ons heeft dit ongetwijfeld al eens bemerkt aan het geluid van een sirene (waarvan we gemakshalve aannemen dat die monotoon is en een vaste frequentie heeft) dat verandert wanneer de bron ons nadert of zich van ons verwijderd. Dit principe, beschreven door de Oostenrijkse natuurkundige Christian Doppler, geldt niet alleen voor geluidsgolven, maar ook voor radiogolven (elektromagnetische straling). Deze schijnbare verandering in frequentie tussen de bron van een golf en de ontvanger wordt exact bepaald door de relatieve beweging van bron en ontvanger ten opzichte van elkaar.

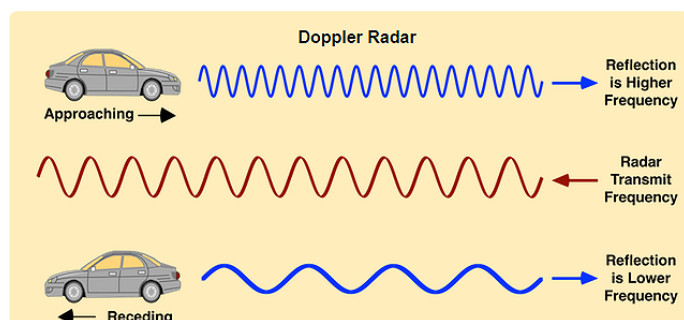
Om het dopplereffect beter te begrijpen, nemen we aan dat de frequentie en de golflengte van een geluid van een bron constant blijven. Wanneer zowel de bron als de ontvanger stilstaan, zal de ontvanger dezelfde geluidsfrequentie horen als door de bron wordt geproduceerd. Dit komt doordat de ontvanger hetzelfde aantal door de bron geproduceerde golven per seconde waarneemt. Als daarentegen de bron, de ontvanger of beide naar elkaar toe bewegen, zal de ontvanger een geluid met een hogere frequentie waarnemen. Dit komt doordat de ontvanger meer geluidsgolven per seconde waarneemt en dit interpreteert als geluid met een hogere frequentie. Als de bron en de ontvanger daarentegen van elkaar af bewegen, zal de ontvanger minder geluidsgolven per seconde waarnemen en een geluid met een lagere frequentie waarnemen.

Figuur 1 geeft een grafische voorstelling van het zojuist beschreven verschijnsel. Wanneer het voertuig de bron (de zender) nadert, neemt de frequentie van de gereflecteerde golf toe; wanneer het voertuig zich er echter van verwijderd, neemt de frequentie van de gereflecteerde golf af ten opzichte van de oorspronkelijke golf.

Een beetje rekenwerk

Voor een radarsysteem is de waarde van de frequentieverschuiving f_D in hertz, de zogenaamde dopplerfrequentie, te berekenen met de formule

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \quad [1]$$



Figuur 1. Voorbeeld van de toepassing van het dopplereffect (bron: physicsopenlab.org, CC BY 4.0).

waarin v de snelheid van het gedetecteerde object is in m/s en λ de golflengte in meters. Deze formule is geldig wanneer de snelheid v uitsluitend in de lengterichting ligt en dus geen dwarscomponenten heeft, zoals het geval is bij zijwaartse beweging van het te detecteren object (wat het signaal reflecteert) en de bron (de zender). In het meest algemene geval is de bovenstaande vergelijking als volgt opgebouwd

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos \alpha \quad [2]$$

waarbij α de hoek is tussen de richting van het uitgezonden/gereflecteerde signaal en de bewegingsrichting van het te detecteren voorwerp. Opmerking: wanneer het te detecteren object zich alleen haaks op de richting van het uitgezonden signaal beweegt, dan is er geen dopplereffect ($f_D = 0$). Dit verklaart waarom in *Top Gun*-achtige luchtgevechten, waar geavanceerde radars worden gebruikt die juist van het dopplereffect gebruik maken, piloten in netelige situaties altijd proberen haaks op de richting van de tegenstander te vliegen, wat de radardetectie en het volgen van positie en snelheid bemoeilijkt.

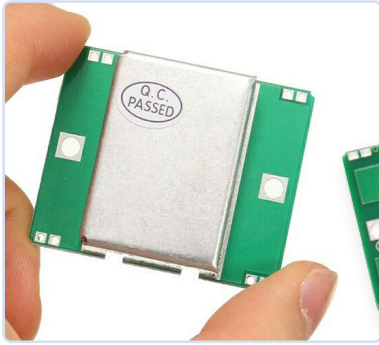
In het specifieke geval van een radar die elektromagnetische golven uitzendt (zoals in de voor dit artikel gebruikte sensor), luidt de formule die de modulus (absolute waarde) van de dopplerfrequentie f_D geeft, als volgt:

$$|f_D| = \frac{2 \cdot v_r}{\lambda} = \frac{2 \cdot v_r \cdot f_{TX}}{c_0} \quad [3]$$

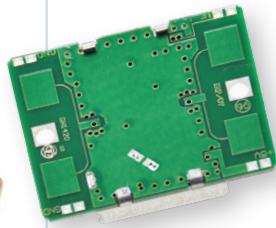
waarbij v_r de radiale snelheid is, f_{TX} de frequentie van het uitgezonden signaal en c_0 de lichtsnelheid.

De HB100-module

In dit artikel bekijken wij de eigenschappen van een van de goedkoopste aanwezigheidssensoren gebaseerd op het dopplereffect: de HB100. Het is in feite een geïntegreerde module met een X-band microgolvenzender, een ontvangerschakeling, een mixer en het hele RF-gedeelte, gemonteerd op een uiterst compacte print. Ter geruststelling van de lezer merk ik op dat, hoewel de betreffende frequenties vrij hoog zijn (ongeveer 10 GHz), er geen gezondheidsrisico's bestaan omdat het zendvermogen zeer gering is. Het werkingsprincipe van deze module, die voor een paar euro gemakkelijk verkrijgbaar is bij grote distributeurs van elektronische componenten, is niet alleen zeer interessant maar ook belangrijk vanuit een educatief oogpunt. De door de module gebruikte superheterodyne schakeling vormt namelijk de basis van moderne radarsystemen; het betreft een klassieke opzet die in veel RF-ontvangers wordt aangetroffen. **Figuur 2** toont de buitenkant van de uiterst compacte module, met een metalen behuizing die dient als afscherming van het RF-gedeelte. **Figuur 3** toont ter vergelijking de achterkant van de module, die in feite als zendantenne dienst doet. De HB100-bewegingssensor in miniatuurformaat is een dopplerzend/ontvangermodule die werkt in de X-band op een frequentie van 10,525 GHz. Binnenin bevindt zich een oscillator op basis van een diëlektrische resonator (DRO) en een paar antennes, die rechtstreeks op



Figuur 2. Bovenaanzicht van de HB100-module (bron: [6]).



Figuur 3. Onderaanzicht van de HB100-module (bron: [7]).

de print zijn geëtst. Deze module is een ideale oplossing om het aantal valse alarmen in inbraakdetectiesystemen te verminderen, vooral in combinatie met een conventionele passief infrarood-sensor (PIR). De sensor kan ook worden gebruikt in automatische deuropeningssystemen en snelheidsmeters voor voertuigen. De belangrijkste voordelen van de HB100-module zijn:

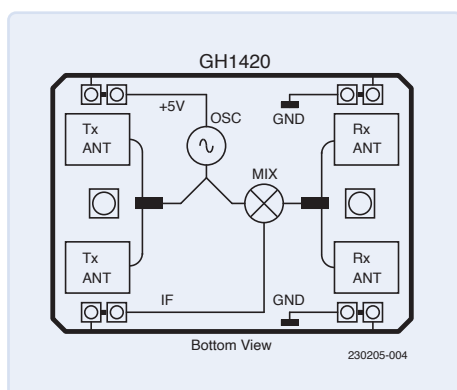
- > contactloze bewegingsdetectie;
- > de meting wordt niet beïnvloed door temperatuur, luchtvochtigheid, geluid, lucht, stof; de sensor is ook geschikt voor bijzonder ruwe omgevingsomstandigheden;
- > uitstekende immuniteit voor radio-interferentie;
- > gering uitgangsvermogen: de module vormt geen gevaar voor mensen en voldoet aan de voorschriften van de Federal Communication Commissions (FCC);
- > grote detectieafstand (tot 20 meter);
- > mogelijkheid om de beweging van verschillende objecten te detecteren, niet alleen van personen;
- > sterk gebundelde radiogolven;
- > gering stroomverbruik;
- > kan zowel in CW-modus (Continuous Wave, dat wil zeggen continue transmissie van het radiosignaal) als puls-modus (transmissie van korte opeenvolgende pulsen) werken;
- > compacte afmetingen en zeer dun.

In **figuur 4** zien we het blokschema van de module, wat we nu in detail zullen doornemen. Laten we beginnen met de al genoemde oscillator, een DRO die is afgestemd op de frequentie van 10,525 GHz. Een keramische schijf, gewoonlijk gemaakt van bariumtitaanaat ($\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$) fungeert als resonantieholte voor de RF-energie. De resonantiefrequentie is

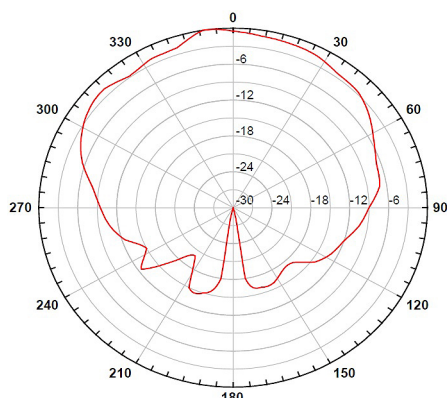
afhankelijk van de grootte en de vorm van het materiaal en de resonantieholte. Dit is precies de frequentie van het signaal dat door de module wordt uitgezonden via de twee rechthoekige antennes (geëtst op de print) die links in figuur 4 zichtbaar zijn. Elk obstakel in de richting van de uitgezonden golfbundel zal een gereflecteerde golf veroorzaken, waarvan de frequentie varieert afhankelijk van de beweging van dat voorwerp ten opzichte van de zendmodule. In ieder geval zal de gereflecteerde golf een frequentie hebben die enigszins afwijkt van de uitgezonden golf. De omgang met een RF-sigitaal bij deze frequenties is voor iedereen een moeilijke opdracht, niet alleen op hardwareniveau maar vooral ook op softwareniveau. De oplossing voor dit probleem wordt gevormd door de superheterodyne schakeling, om precies te zijn de RF-mixer die we in figuur 4 zien. De functie daarvan is het 'combineren' van het uitgezonden signaal met het signaal dat wordt ontvangen via de twee rechthoekige antennes rechts in figuur 4. Over het algemeen heeft een mixer twee ingangssignalen en produceert hij twee uitgangssignalen die respectievelijk de som en het verschil van de beide ingangssignalen zijn. In ons geval worden dus twee signalen gegenereerd: één met een frequentie in de orde van grootte van 20 GHz (som van het uitgezonden signaal en het ontvangen signaal) en één met een frequentie van enkele Hertz (verschil tussen het uitgezonden en het ontvangen signaal). Dit mechanisme biedt een elegante oplossing voor ons probleem, aangezien het probleem van het meten van een X-bandsigitaal (tientallen GHz) wordt omgezet in het meten van een laagfrequent signaal (tot enkele honderden Hz, afhankelijk van de snelheid van het bewegende voorwerp), dat gemakkelijk kan worden verwerkt door een gewone en goedkope microcontroller zoals een Arduino.

Het IF-uitgangssignaal van de mixer is precies dat verschilsignaal. Dit proces, dat in veel RF-schakelingen voorkomt, wordt ook wel 'omlaagconversie' wordt genoemd: het doel ervan is in feite een hoge frequentie om te zetten naar een lagere frequentie om de verwerking ervan te vereenvoudigen. De aldus verkregen frequentie wordt de 'intermediate frequency' (IF) of ook wel middenfrequentie genoemd om deze te onderscheiden van de oorspronkelijke of 'basisband'-frequentie. We kijken nog even verder naar figuur 4 en zien niet meer dan 4 aansluitingen om de module op een microcontroller of meetschakeling aan te sluiten: 2 massa-aansluitingen, 1 pin voor de positieve 5V-voeding en 1 pin voor het laagfrequent IF-uitgangssignaal. In wezen hebben we hier een signaal met een frequentie van slechts enkele Hertz ter beschikking, waarbij de 'moeilijke' verwerking van het microgolfsigitaal wordt overgelaten aan de hardware die in de HB100-module is ingebouwd. Er resteert nog het probleem van de vrij kleine amplitude van het signaal op de sensoruitgang; we zullen later zien hoe dit kan worden aangepakt.

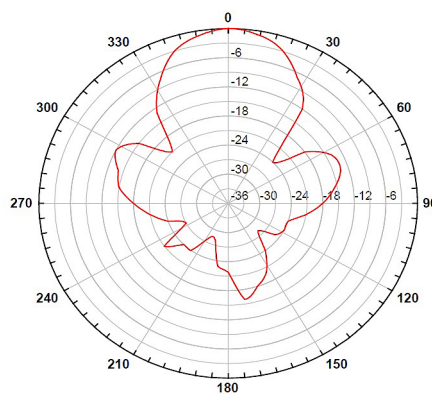
Voor praktisch gebruik moet de module worden gemonteerd met de antennes (zie figuur 3) gericht op het gebied dat men met het afgestraalde uitgangssignaal wil bestrijken, en wel zo dat de beste dekking wordt verkregen. De stralingsdiagrammen van de antennes (in het horizontale en verticale vlak) zijn getekend in **figuur 5**.



Figuur 4. Blokschema van de sensor (bron: [5]).



Azimuth



Elevation

*Figuur 5.
Stralingsdiagrammen
van de antenne
(bron: [1]).*

Uitgangssignaal

De IF-pin levert het uitgangssignaal van de module, dat correspondeert met de frequentieverschuiving die wordt veroorzaakt door de grootte van de beweging van een door de antenne aangestraald voorwerp. De amplitude van deze frequentieverschuiving ten gevolge van het dopplereffect is evenredig met de gereflecteerde energie en ligt in de orde van enkele microvolt (μV). Daarom wordt gewoonlijk een laagfrequent-versterker met hoge versterkingsfactor op de IF-pin aangesloten om het uitgangssignaal op te voeren. Meer precies is de frequentie van de dopplerverschuiving evenredig met de bewegings-snelheid. Om je een indruk te geven: een normaal lopend mens veroorzaakt een frequentieverschuiving van minder dan 100 Hz. De ontvangen signaalsterkte (RSS) komt overeen met de spanning op de IF-uitgang. De dopplerfrequentie kan worden berekend met behulp van de eerder gegeven vergelijkingen. Wanneer het door de sensor aangestraalde voorwerp alleen in de radiale richting beweegt, hetzij naderend of zich verwijderend, kan de vorige formule worden vereenvoudigd en krijgt deze de volgende vorm, waarbij v_r de radiale snelheid is, uitgedrukt in km/h:

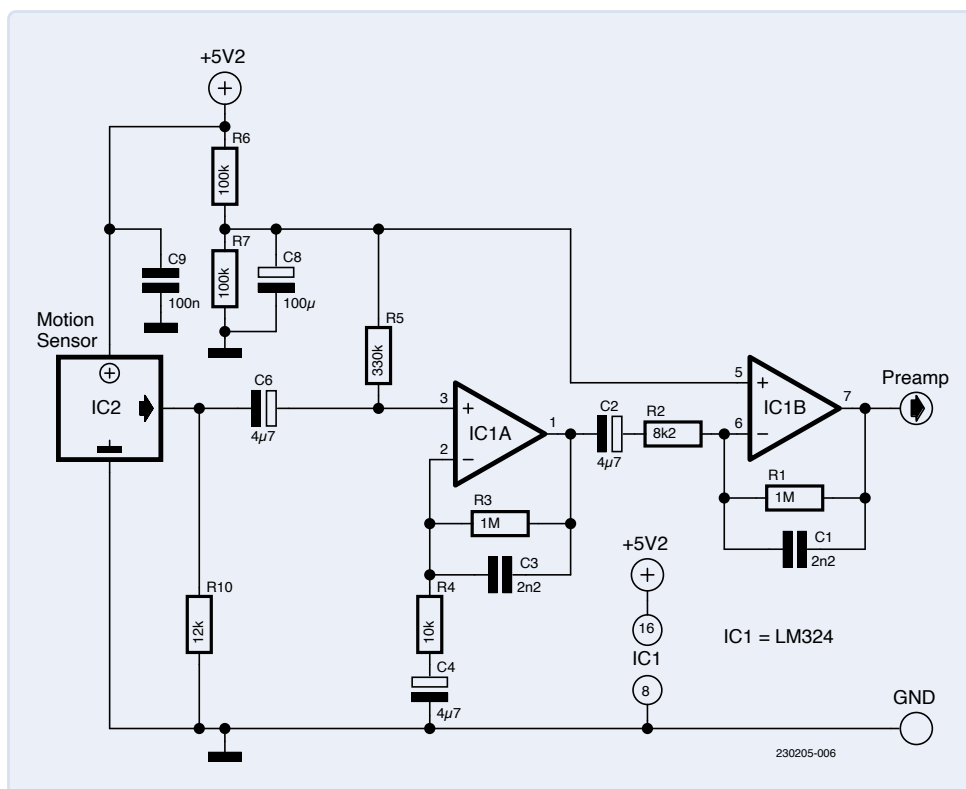
$$f_D = 19.49 \cdot v_r \quad [4]$$

De technische specificaties van de module kunnen als volgt worden samengevat:

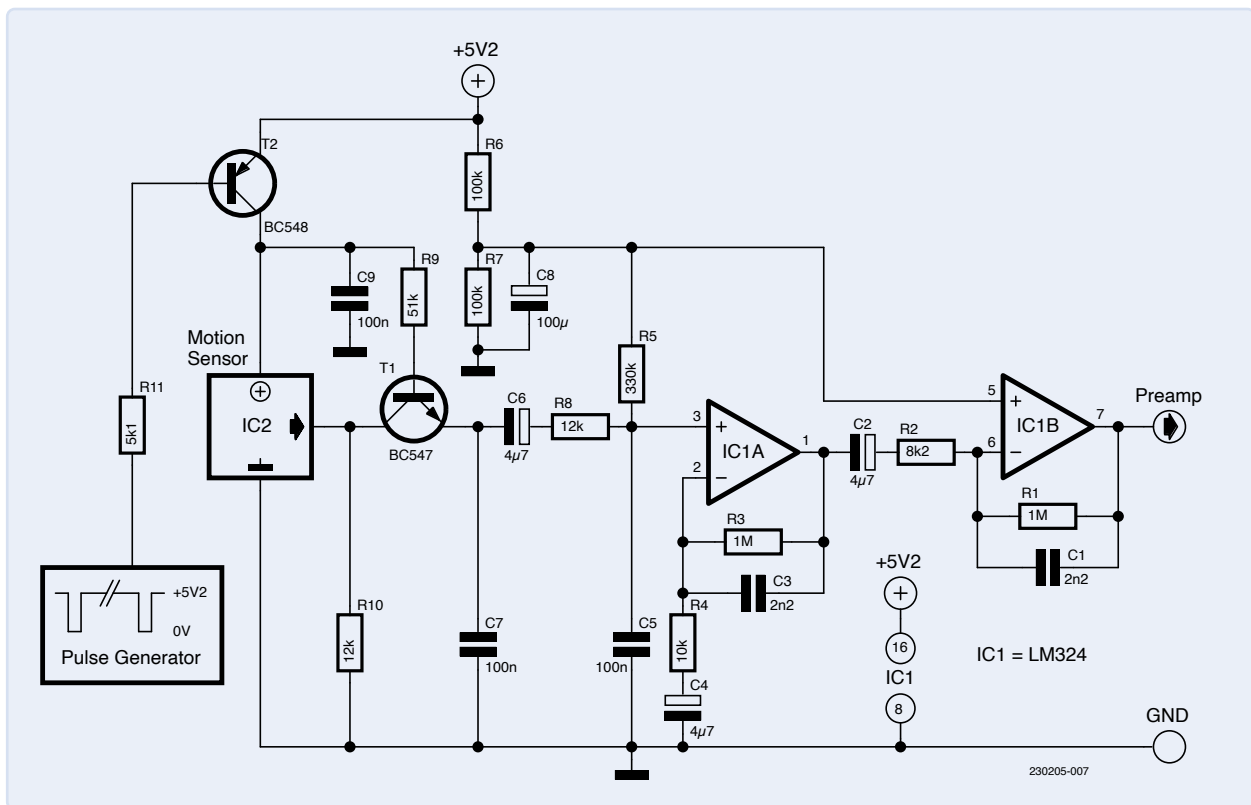
- > voedingsspanning: $5\text{ V} \pm 0,25\text{ V}$;
- > stroomopname (in CW-modus): 60 mA maximaal, 37 mA typisch;
- > afmetingen: $61,2 \times 61,2\text{ mm}$;
- > detectieafstand: tussen 2 m en 16 m;
- > zendfrequentie: 10,525 GHz;
- > frequentie nauwkeurigheid: 3 MHz;
- > minimaal uitgangsvermogen: 13 dBm EIRP;
- > harmonische emissie: $< -10\text{ dBm}$;
- > gemiddelde stroom: 2 mA typisch;
- > minimale pulsbreedte (zenden): 5 μs ;
- > minimale duty cycle: 1%.

Signaalconditionering

De uitgang van de HB100-sensor, beschikbaar op de IF-pin, is een laagfrequent signaal dat evenredig is met de frequentieverschuiving die door het ontvangen signaal wordt veroorzaakt. Het probleem is dat het signaal op deze uitgang niet versterkt is en een zeer kleine amplitude (enkele μV) heeft; daarom is in praktische toepassingen een forse versterking nodig, bij voorkeur in combinatie met een laagdoorlaat-filter om alle ongewenste frequenties boven een paar honderd hertz te elimineren. Zowel de datasheet [1] als de application note [2] van de sensor zijn in dit opzicht zeer nuttig. Met name die laatste toont twee mogelijke schakelingen voor de signaalconditionering. De eerste, te zien in **figuur 6**, is van toepassing op de CW-modus en is gebaseerd



Figuur 6. Signaalconditionering voor de CW-modus (bron: [5]).



Figuur 7. Signaalconditionering voor de puls-modus (bron: [5]).

op de operationele versterker LM324 van Texas Instruments, die een forse versterking biedt.

De tweede schakeling, te zien in **figuur 7**, wordt gebruikt in de puls-modus, waarbij de zender een reeks pulsen uitzendt met een bepaalde frequentie (bekend als PRF, kort voor Pulse Repetition Frequency) en met een bekende duty cycle. De fabrikant van de HB100-module adviseert $PRF = 2 \text{ kHz}$ en $duty \text{ cycle} = 4\%$.

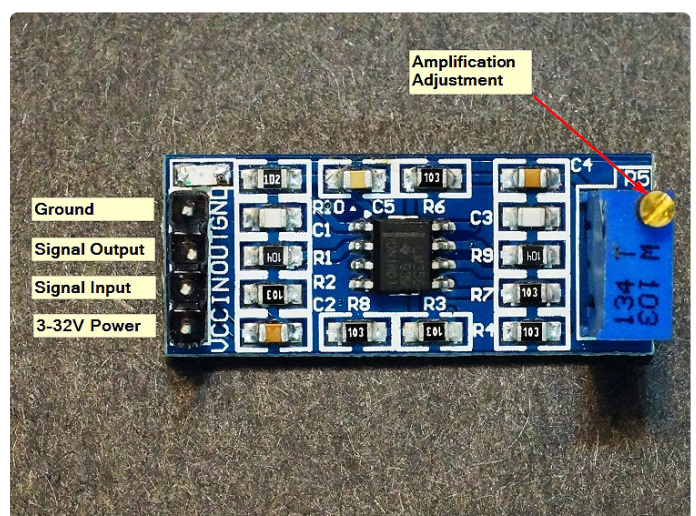
Deze schakeling heeft, naast de operationele versterker LM324 met hoge versterking, twee transistoren. Zoals te zien in de linkerbenedenhoek van **figuur 7**, kan de pulsmodus worden toegepast door middel van een pulsvormige voedingsspanning voor de module, en wel zodanig dat de door de fabrikant genoemde aanbevolen PRF en duty cycle worden aangehouden. Met andere woorden, in de pulsmodus schakelt de extra serie-schakeltransistor elke 0,5 ms (2 kHz) de module in met een duty cycle van 4% (4% van de tijd AAN).

Om de tests met de sensor te vereenvoudigen, is echter gekozen voor een universele opamp die al op een print is gemonteerd, compleet met pinheader en potmeter voor het instellen van de versterking. De module, die zeer goedkoop en gemakkelijk verkrijgbaar is, is gebaseerd op de LM358 en is afgebeeld in **figuur 8**. De LM358 zorgt voor een eenkanaals-versterking met een 1x en 100x instelbare versterking: door de potmeter op het printje rechtsom te draaien wordt de versterking verkleind en wanneer deze linksom wordt gedraaid wordt de versterking groter. Verder bevat de module een LED die aangeeft dat de voedingsspanning aanwezig is. De LM358 opamp kan signalen verwerken met frequenties tot 700 kHz (dus ruim boven het bereik waarin wij geïnteresseerd zijn) en kan gevoed worden met spanningen tussen 3 V en 32 V. **Figuur 8** toont de aansluitingen van de module: V_{CC} , GND, ingang en uitgang.

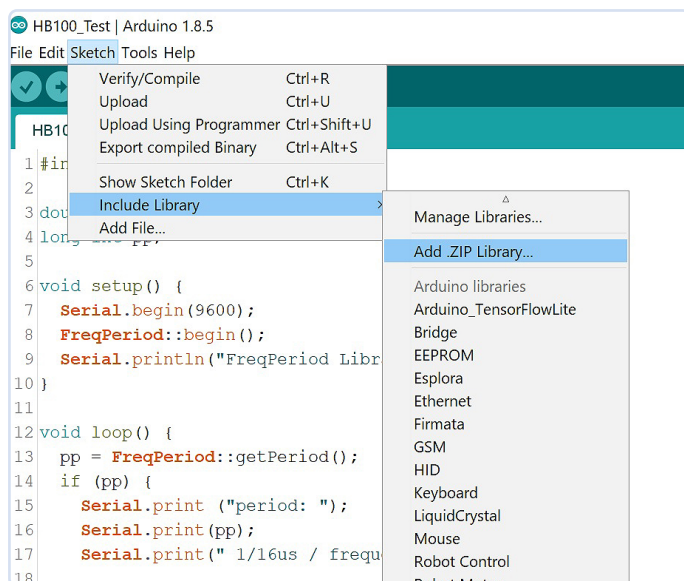
Test met de Arduino

Om de HB100-dopplersensor te testen, kunnen we gebruik maken van een gewoon Arduino UNO-board en de LM358-versterker-

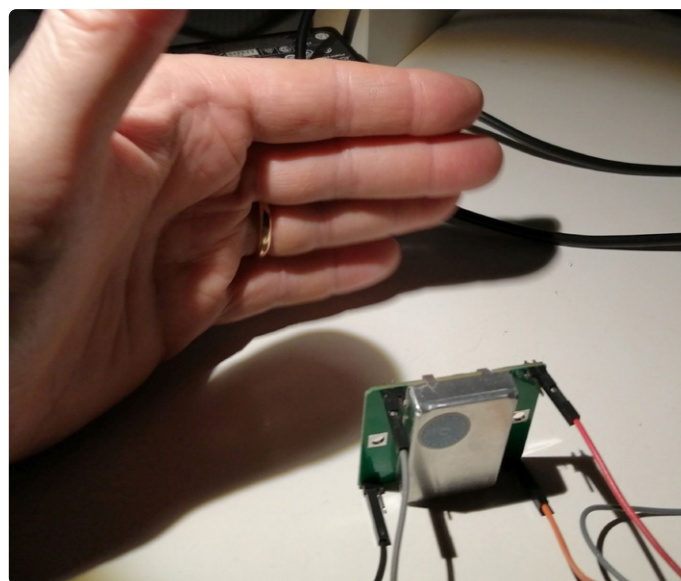
module – of als alternatief, een andere eenkanaal-versterker met hoge versterking, weinig ruis en met een enkele voedingsspanning. Op het Arduino UNO-board draait een speciale sketch die de frequentie van het signaal van de module kan detecteren, en daaruit eventueel de snelheid kan afleiden waarmee het potentiële 'doelwit' beweegt. Deze sketch maakt gebruik van een bibliotheek die speciaal is ontwikkeld voor nauwkeurige frequentiemetingen. Voor het meten van frequenties in de audioband of lager moet namelijk de periodetijd van hetingangssignaal zeer nauwkeurig worden bepaald. Hiervoor gebruikt de bibliotheek een uiterst nauwkeurige 'Counter and Capture'-module die beschikbaar is in de hardware-architectuur van de ATmega-microcontroller. De bibliotheek laat de tijdsduur zien, uitgedrukt als een



Figuur 8. De LM358-versterkermodule.



Figuur 9. Installatie van de FreqPeriod-bibliotheek.



Figuur 10. Snelle handbewegingen voor de sensorantenne.

geheel getal met een resolutie van $1/16 \mu\text{s}$. Om de frequentie af te leiden deel je eenvoudigweg de klokfrequentie door de waarde die de bibliotheek retourneert. In ons geval wordt de klokfrequentie ingesteld op 16.000.400 om eventuele onnauwkeurigheden van het Arduino-board te compenseren. De bibliotheek is momenteel niet opgenomen in de officiële Arduino-bibliotheek, maar kan gemakkelijk worden geïnstalleerd in de IDE na het downloaden van het .zip-bestand dat beschikbaar is op [3]. Open hiertoe de Arduino IDE, selecteer het menuonderdeel *Sketch -> Include Library -> Add .ZIP Library...*, zoals getoond in **figuur 9**. Selecteer vervolgens het .zip-bestand van de bibliotheek die je hebt gedownload. Sluit de IDE af en herstart die weer om de nieuwe bibliotheek beschikbaar te maken in de Arduino-omgeving. De sketch is te zien in **listing 1**. Hij is zeer compact en relatief eenvoudig. In de `setup()`-functie worden de seriële verbinding (9600 bps) en de *FreqPeriod*-bibliotheek geïnitieerd via de `begin()`-methode. In de `loop()`-functie wordt eerst herhaaldelijk de tijdsduur van het ingangssignaal gemeten via het aanroepen van de `getPeriod()`-methode. Vervolgens worden de bijbehorende waarden van de frequentie (in hertz) en de radiale snelheid (in km/h) berekend en weergegeven. Om de werking van de sketch te controleren moeten we de HB100-sensor en de LM358-versterkermodule aansluiten op het Arduino-board. De aansluitingen zijn te zien op de kopillustratie van dit artikel. Vervolgens schakelen we het geheel in en activeren de seriële monitor van Arduino IDE om de geproduceerde logs te bekijken. Door een voorwerp, bijvoorbeeld je hand (zie **figuur 10**), voor de HB100-sensorantenne te bewegen (die, zoals bekend, aan de achterkant van de print zit, aan de andere kant van de metalen behuizing), zouden we een verandering moeten zien in de snelheid die de sketch berekent. Een voorbeeld van de uitvoer via de seriële interface is te zien in **figuur 11**.

Op basis van deze snelheidswaarden kunnen we dan zelfs zeer complexe algoritmen construeren met toepassingen als deurbediening



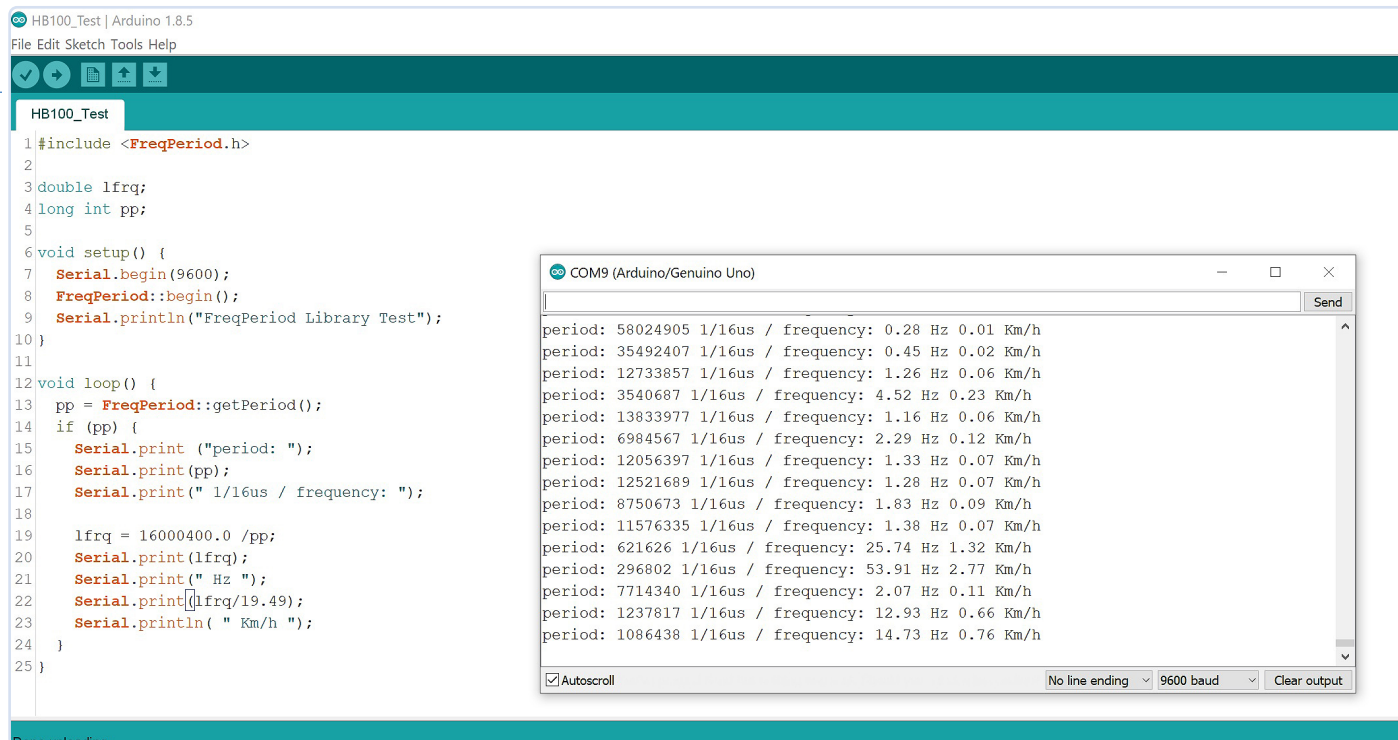
Listing 1. Arduino-sketch.

```
#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 ");
    }
}
```



Figuur 11. Weergave in de seriële monitor.

(inclusief schuifdeuren), automatische lichtschakelaars in trappenhuizen, het openen van toegangspoorten voor voetgangers, inbraakdetectiesystemen, videobewaking en meer. De gevoeligheid van de module zelf is goed genoeg, mits hij binnen zijn maximale bereik van ongeveer 20 meter wordt gebruikt. De prestaties kunnen worden verbeterd door een versterkerschakeling te gebruiken met een hogere versterking dan die van de LM358 (100x).

Conclusie

Het doel van dit artikel was de introductie van een erg interessante en niet erg bekende HB100 doppler-bewegingssensor. De HB100 is goedkoop en gemakkelijk aan te sluiten op een microcontroller en biedt de mogelijkheid om te experimenteren met belangrijke concepten en technieken voor signaaldetectie die ten grondslag liggen aan geavanceerde en dure commerciële radars. Aan toepassingen voor de sensor is geen gebrek, ongetwijfeld denken veel makers al na over verdere, toekomstige projecten die ermee gerealiseerd kunnen worden. 

vertaling: Hans Adams — 230205-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Over de auteur

Na zijn studie Elektrotechniek aan de Politecnico di Milano begon Stefano zijn carrière als firmware- en softwareontwikkelaar. In de loop der jaren heeft hij de transformatie van de embedded wereld meegemaakt, van de eerste 8bit-microprocessoren – alleen programmeerbaar in assembler – tot de meest recente SoC, FPGA, DSP en programmeerbare logica met uitstekende prestaties en functies. Hij heeft een brede belangstelling voor technologie en elektronica en wijdt een deel van zijn vrije tijd aan het bestuderen van nieuwe componenten en het realiseren van kleine projecten.



Gerelateerde producten

- > **YDLIDAR X2 Lidar – 360-degree Laser Range Scanner (8 m)**
www.elektor.nl/18941
- > **Arduino Uno Rev3**
www.elektor.nl/15877
- > **Arduino Uno Mini (Limited Edition)**
www.elektor.nl/20098

WEBLINKS

- [1] Datasheet HB100-module: https://limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Module_Datasheet.pdf
- [2] Application Note HB100: https://limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Application_Note.pdf
- [3] Bibliotheek frequentiemeting: <https://github.com/Jorge-Mendes/Agro-Shield/tree/master/OtherRequiredLibraries/FreqPeriod>
- [4] Software op de webpagina bij dit project: <https://elektormagazine.com/230205-01>
- [5] Schema's: https://mantech.co.za/Datasheets/Products/MSAN-001_AGILSENSE.pdf
- [6] Foto bovenzijde HB100: https://mantech.co.za/Datasheets/Products/HB100_RADAR.pdf
- [7] Foto onderzijde HB100: <https://kuongshun-ks.com/uno/uno-sensor/hb100-microwave-doppler-radar-wireless-module-moti.html>