



een Zwitsers zakmes

deel 1: het LoRa-protocol en zijn voordelen

Gilles Brocard (Frankrijk)

Dit artikel beschrijft de praktische toepassing van het LoRa-transmissieprotocol met behulp van Ebyte-modules gebaseerd op de LLCC68-transceiver van Semtech, met eenvoudige middelen en een beperkt budget. Dit eerste deel presenteert het LoRa-protocol en de voordelen daarvan.

Tegenwoordig is het verzenden en ontvangen van gegevens via radiogolven zo gewoon geworden dat we er eigenlijk niet meer bij stilstaan. 3G, 4G en nu 5G stellen ons in staat om informatie met hoge snelheid te verzenden en te ontvangen, maar dan wel over relatief korte afstanden (meestal een paar honderd meter). WiFi en Bluetooth zelfs nog minder. Maar soms willen we meer. Laten we het voorbeeld nemen van een boer die gegevens naar een centrale databank wil sturen voor het tellen van dieren, de lokale temperatuur (vorstbewaking) of een andere activiteit waarvoor metingen moeten worden gebruikt die door een sensor kilometers verderop worden geleverd. Om dat mogelijk te maken, zijn er oplossingen ontwikkeld met een aantal interessante innovaties. Je kunt meer over LoRa vinden in verschillende Elektor-artikelen, bijvoorbeeld in [1] en [2].

In essentie is LoRa een protocol voor de overdracht van radiosignalen dat een 'chirped' multisymbool-formaat gebruikt om gegevens te verzenden. LoRa-chips werken op de ISM-band en zetten radiofrequenties om in gegevens. Hiervoor gebruiken ze LoRa-technologie, een low-level fysieke laag. We komen zo terug op deze termen. Het gebruik van gebruiksklare modules is een eenvoudige oplossing voor gegevensoverdracht met lage snelheid tussen twee verafgelegen punten. De firma Semtech [3] bezit de LoRa-octrooien en heeft een hele reeks LoRa-transceiverschakelingen ontwikkeld.

Gebruiksklare modules

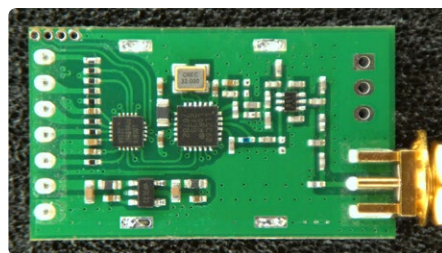
Momenteel is de best presterende schakeling de LLCC68, maar die is niet eenvoudig in het gebruik. Ten eerste is het een erg kleine SMD-component – 4x4 mm met 24 pinnen – en daarom erg moeilijk te solderen. Bovendien moet hij omringd worden door RF-componenten die geschikt zijn voor gigahertz-frequenties, en dat alles op een print die voor deze hoge frequenties op maat gesneden is. Het Chinese bedrijf Ebyte, gespecialiseerd in RF, heeft een hele reeks kleine modules ontwikkeld waarin de schakelingen van Semtech zijn geïntegreerd. De Ebyte-reeks is verkrijgbaar in vele modellen. De modellen E220-900T22D (**figuur 1**) en E220-900T30D (**figuur 2**) bevatten een LLCC68 met een microcontroller die zich tussen de UART-communicatiepoort en de LLCC68 bevindt. Deze microcontroller verhindert echter rechtstreekse communicatie met de LLCC68, wat de configuratiemogelijkheden ervan aanzienlijk beperkt. **Figuur 3** toont (zonder de afscherming) de LLCC68, de microcontroller (ARM CX32L003), een spanningsregelaar en een RX/TX RF-uitgangsschakelaar. Alle andere componenten zijn weerstanden of condensatoren en HF-smoorspoelen, evenals een 32MHz-oscillator met een kristal.



Figuur 1. De E220-900T22D module van Ebyte.



Figuur 2. De E220-900T30D module bevat een 8dB-vermogensversterker, die het zendvermogen verhoogt tot 30 dBm of 1 W.



Figuur 3. De E220-900T22D module zonder afscherming.



Figuur 4. Modules waarvan het typenummer eindigt op 'S' hebben een IPEX / U.FL antenne-uitgang.

Modules met een '30' in het typenummer hebben ook een 8dB-vermogensversterker, waardoor het zendvermogen wordt opgevoerd tot 30 dBm of 1 W. Ze zijn iets groter en verbruiken aanzienlijk meer stroom op vol vermogen (750 mA in plaats van de 150 mA van het model 22). Deze vermogensreserve kan van onschatbare waarde zijn bij het compenseren van allerlei verliezen veroorzaakt door HF-kabels en verbindingen in het gigahertz-bereik.

De twee bovenvermelde modellen hebben een antenne-uitgang met een female SMA-connector, maar deze modules zijn ook verkrijgbaar met een IPEX/U.FL antenne-uitgang; het typenummer eindigt dan op 'S' in plaats van op 'D' (figuur 4).

Zonder geïntegreerde microcontroller

De module die we gaan gebruiken, de E220-900M30S, is bijzonder interessant voor ons omdat deze geen microcontroller op de besturingslijnen heeft. In feite is de LLCC68 rechtstreeks toegankelijk via een SPI-verbinding (het model wordt aangeduid met de letter 'M'). Dit betekent dat alle parameters van de LLCC68 onbeperkt toegankelijk zijn, wat essentieel is als we de voordelen van LoRa ten volle willen benutten.

Dit model is, net als zijn voorgangers, verkrijgbaar voor verschillende frequentiebanden, van 150 MHz tot 930 MHz. Wij hebben gekozen voor het 900-model, dat de 868MHz-band dekt die in Frankrijk is toegestaan. Deze module kan eenvoudig worden gekocht bij grote distributeurs voor een bedrag tussen 3 en 10 euro, afhankelijk van model, vermogen en leverancier.

We combineren deze module, samen met wat 'klein grut', met een microcontroller waarvan we het programmeren onder de knie hebben en waarvoor we toepassingen kunnen schrijven. Op die manier kunnen we allerlei LoRa-verbindingen en interessante toepassingen bouwen. Deze module wordt je 'Zwitserse LoRa-zakmes'.

Iets meer over LoRa

Het LoRa-protocol maakt verbindingen mogelijk over relatief lange afstanden (meerdere kilometers) bij zeer laag vermogen (enkele tientallen tot enkele honderden mW), maar met het nadeel van een geringe datasnelheid. Zodra je de (instelbare) datasnelheid verhoogt, wordt het bereik kleiner. Dit betekent dat LoRa zeer effectief is voor toepassingen met een lage bitsnelheid, zoals draadloze toegangscontrole, afstandsbediening over zeer grote afstand en ontvangst van sensoren op afstand waar niet vaak updates nodig zijn.

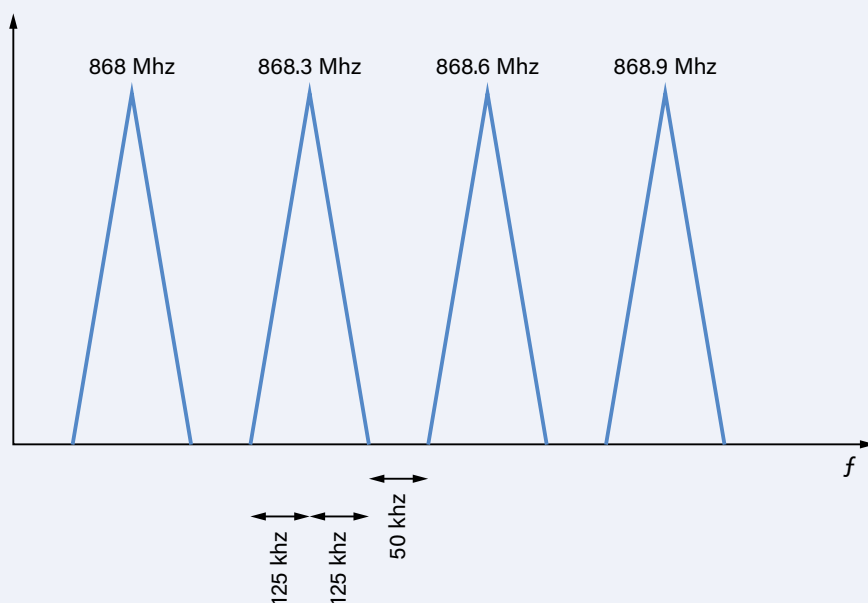
We hebben gekozen voor een frequentie van 868 MHz frequentie omdat deze in Europa niet de congestie van de 433MHz-band vertoont. Bovendien is het de frequentie die gekozen is voor het LoRaWAN-protocol. Het is ook gereguleerd, net als alle ISM-banden (Industrial, Scientific, Medical). Het voordeel van ISM-banden is dat je, zolang je voldoet aan de Europese regelgeving, radiosignalen kunt uitzenden zonder eerst toestemming te moeten vragen.

Radiospectrum delen

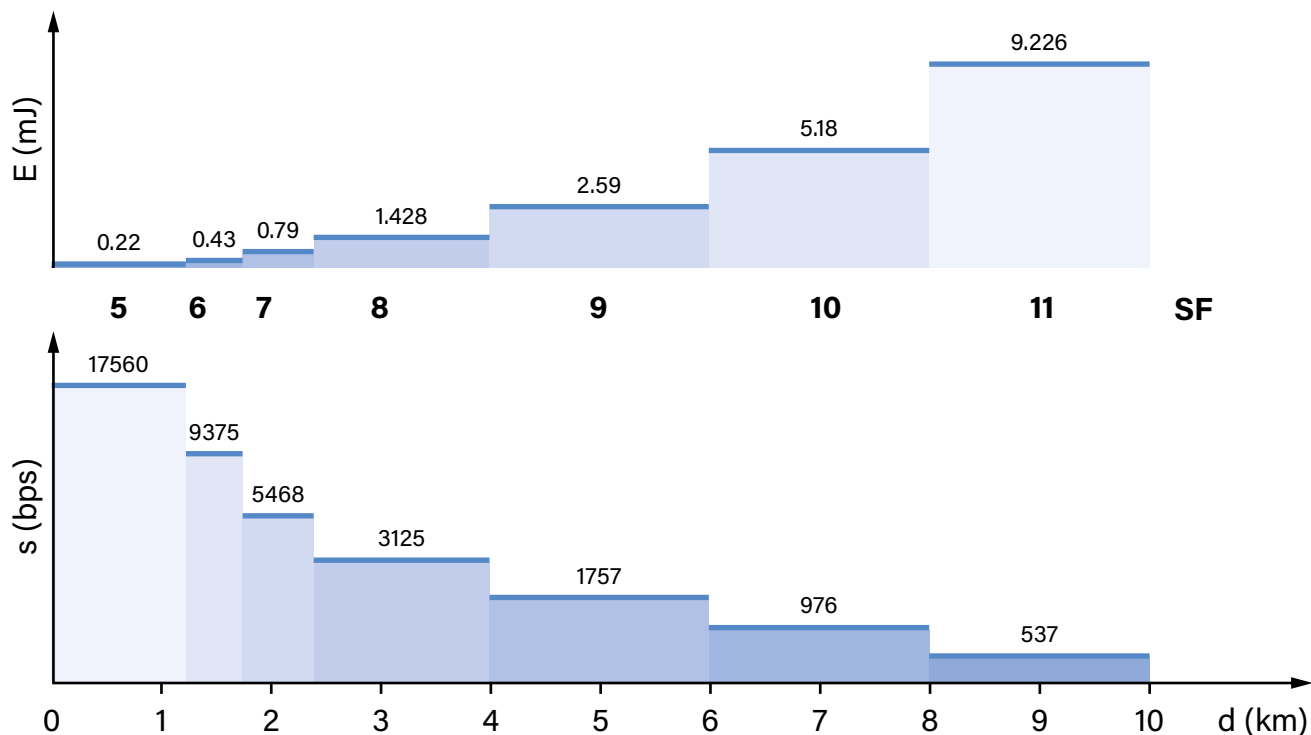
Het radiospectrum is een gemeenschappelijke bron, dus we moeten het delen zodat we anderen niet storen met onze uitzendingen en niet gestoord worden door die van anderen. LoRa gebruikt drie manieren om een frequentieband te delen.

Frequency sharing: de beschikbare frequentieband wordt opgesplitst in min of meer gelijkmatig verdeelde aangrenzende kanalen (figuur 5).

Time sharing: met LoRa kunnen en moeten transmissies van korte duur zijn en gespreid in de tijd. In dat geval kan dezelfde band achter-



Figuur 5. LoRa-modulatie vindt plaats met een instelbare bandbreedte. Dit voorbeeld toont een bandbreedte (BW) van 250 kHz, dus 125 kHz aan weerszijden van de middenfrequentie. De frequentievariatie loopt daarom van 868,175 MHz tot 868,425 MHz (voor de tweede frequentie van 868,3 MHz).



Figuur 6. De invloed van de spreading factor (SF, vetgedrukt) op de transmissiesnelheid en het bereik (onder) en het verbruik (boven).

eenvolgens gebruikt worden door verschillende apparaten. Hoewel deze techniek gevoelig is voor data-botsingen, wordt hij veel gebruikt bij LoRa-modulatie. Een manier om botsingen te beperken is om de frequentieband te monitoren en alleen te zenden wanneer de band niet in gebruik is. De LLCC68 maakt het eenvoudig om deze procedure te automatiseren (zie **RSSI** verderop).

Spread-spectrum sharing: deze modus is specifiek voor LoRa, dat het bericht digitaliseert met behulp van 'chirps' (frequentievariëaties) – vandaar de naam van deze modulatietechniek (CSS staat voor *chirp spread spectrum*). Bij de LLCC68 kun je kiezen uit zeven spreading-codes (spreading factor – 'SF' in de datasheet). De waarden, van 5 tot 11, zijn afhankelijk van de gekozen bandbreedte (**figuur 6**). De SF is een van de belangrijkste parameters in LoRa-modulatie. Deze bepaalt met name het bereik, de transmissiesnelheid en het stroomverbruik tijdens de transmissie. De bandbreedte (BW) en de CR (code rate/coderings-redundantie) zijn de twee andere belangrijke LoRa-parameters.

Link budget

Het link budget is het verschil tussen het maximale zendvermogen, in dit geval 30 dBm, en het minimale ingangsniveau om een bericht te ontvangen en decoderen (de gevoeligheid), in dit geval 129 dBm. Het geldt voor de meest gunstige instelling met BW = 125 kHz en met de voorversterker van de ontvanger ingeschakeld. Het maximale link budget is daarom $30 + 129 = 159$ dBm. De Europese regelgeving beperkt het zendvermogen tot 14 dBm, wat in ons voorbeeld een linkbudget oplevert van $14 + 129 = 143$ dB.

Het zal je misschien verwonderen dat we een module hebben gekozen die kan uitzenden met een vermogen van 30 dBm (1 W), terwijl de Europese regelgeving slechts maximaal 14 dBm (25 mW) toestaat. In feite is deze 14 dBm het vermogen dat door de antenne wordt uitgestraald. Maar tussen de HF-uitgang van de module en de antenne treedt verzwakking op, waardoor het vermogen dat de antenne bereikt,

kleiner wordt. Als je het geluk hebt dat je nog steeds een teveel aan zendvermogen hebt en je kunt het meten, dan kun je het met de instellingen van de LoRa-module reduceren.

Een praktisch voorbeeld

- Emissie: 14 dBm vermogen (beperkt door je instellingen).
- Versterking zendantenne: +2,15 dBi (voor een standaard 86 mm kwart-lambda ground plane-antenne).
- Maximale signaalverzwakking over een afstand van 11 km door de lucht: -111,2 dB (zie onderstaande formule voor het berekenen van deze waarde; een negatieve waarde geeft aan dat er sprake is van verzwakking).
- Winst ontvangstantenne: +2,15 dBi (voor een identieke 86 mm standaard kwart-lambda ground plane-antenne).
- Gevoeligheid ontvanger (LLCC68 met BW = 125 kHz, SF = 7), maximale ontvangstversterking: -124 dBm (gegevensblad, pagina 19, eerste regel van de paragraaf *Sensitivity LoRa*).
- Tel daar -5 dB bij op voor verliezen door verbindingen (kabels, connectoren enzovoort) voor de zendmodule en -5 dB voor verliezen in de ontvanger.

Het link budget kan worden verkregen door de waarden in dBm, dBi en dB bij elkaar op te tellen – dat is het voordeel van het werken met decibel:

$$14 + 2,15 - 111,2 + 2,15 - 5 - 5 = -102,9 \text{ dBm}$$

Deze waarde ligt ruim boven de drempel van 124 dBm (de LoRa-ontvangstdrempel voor deze module, de ontvangergevoeligheid). We hebben een marge van 21,1 dBm tussen de twee, waardoor we een bruikbaar signaal zouden moeten kunnen ontvangen.

Specifiek voor LoRa-specificiteit: de spreading factor (SF)

SF	Chirps	SNR	BW 125 kHz	BW 250 kHz	BW 500 kHz
5	32	-2,5	ja	ja	ja
6	64	-5	ja	ja	ja
7	128	-7,5	ja -124 dBm	ja -121 dBm	ja -117 dBm
8	256	-10	ja	ja	ja
9	512	-12,5	ja -129 dBm	ja	ja
10	1024	-15	nee	ja -129 dBm	ja
11	2048	-17,5	nee	nee	ja -127 dBm

Tabel 1. Samenvatting van de metingen op pagina 19 van de datasheet van de LLCC68 met betrekking tot de spreading factor.

Eerste kolom

De spreading factor SF hangt af van de bandbreedte BW. Bijvoorbeeld, voor BW = 125 kHz kan SF een waarde tussen 5 en 9 hebben; voor BW = 250 kHz kan ook de waarde 10 worden gebruikt; en voor BW = 500 kHz de waarde 11.

Derde kolom

De signaal/ruis-verhouding (SNR) als functie van de SF-parameter. Wees niet verbaasd als je negatieve SNR's ziet, want de LoRa-demodulator kan een signaal terugwinnen dat ver onder het RF-ruisniveau ligt. Bijvoorbeeld, bij BW = 500 kHz en SF = 11 kan het te herstellen signaal 17,5 dB onder het ruisniveau liggen. Dit betekent dat het signaal 56 keer zwakker kan zijn dan het ruisniveau...

Tweede kolom

De tweede kolom is een domper op de pret, want deze geeft de omvang van de transmissiecodering die nodig is om deze prestatie te bereiken. De zendtijd is recht evenredig met deze waarden, net als het stroomverbruik. Het momentane verbruik van de module blijft constant; het vindt gewoon plaats over een langere tijdsperiode.

Vierde, vijfde en zesde kolom

Voor BW = 125 kHz en SF = 7 is de LLCC68 in staat om de payload uit een ontvangen signaal van -129 dBm (79 nVRMS) te halen. Deze waarde is bijzonder laag: de LLCC68 is uiterst gevoelig voor het analoge deel en zeer efficiënt voor het digitale deel waar het LoRa-protocol wordt toegepast!

Evaluatie

Zonder rekening te houden met elektromagnetische interferentie in de omgeving, wat in de praktijk natuurlijk nooit voorkomt, is het mogelijk om de theoretische maximale afstand van een verbinding te berekenen. De betreffende formule luidt:

$$\text{distance} = \sqrt{\frac{10^{\left(\frac{\text{Link Budget}}{10}\right)}}{1755 \cdot \text{frequency}^2}}$$

Link Budget is het link budget van de module die in ons voorbeeld wordt gebruikt, conform de Europese norm van 143 dBm.

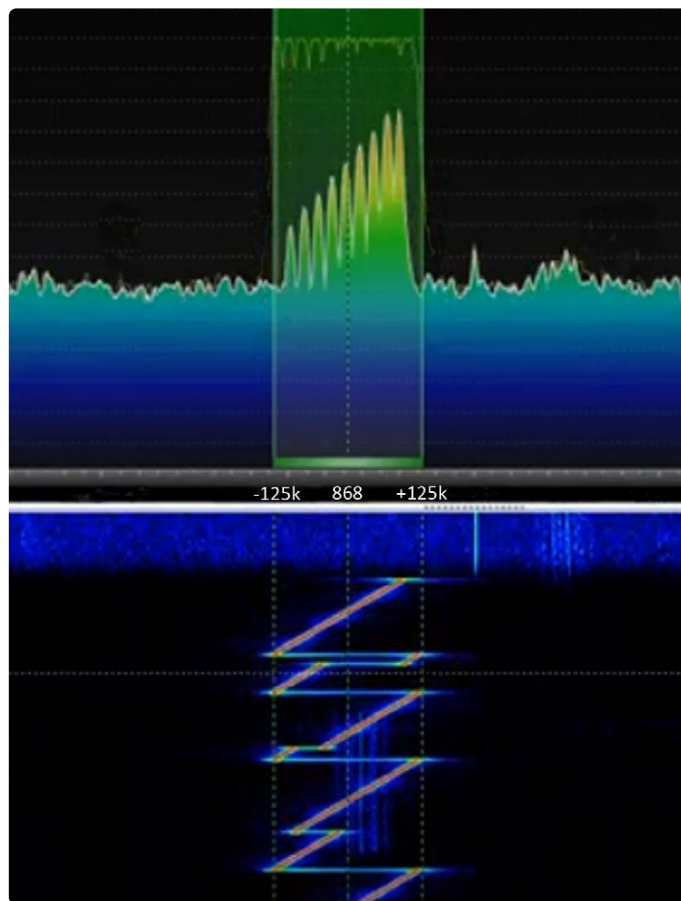


Frequency is de frequentie van de module: 868 MHz.

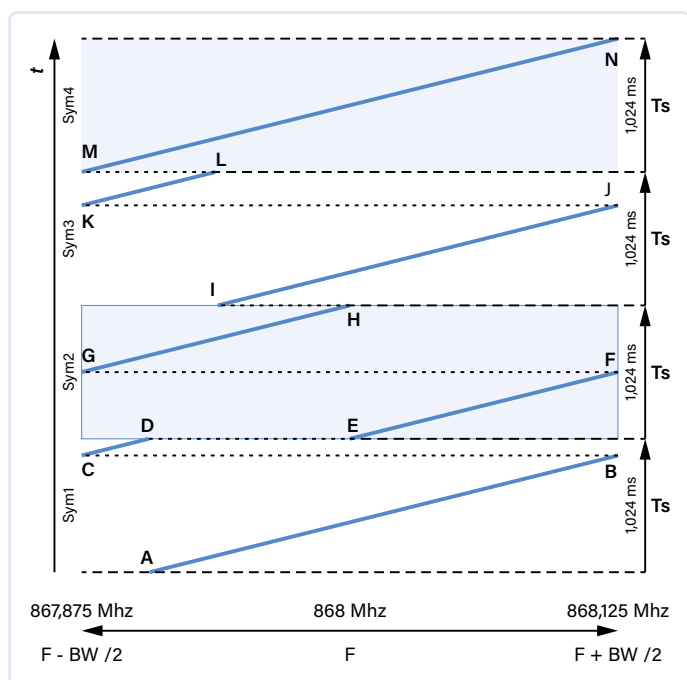
Distance is het bereik in kilometers (zonder HF-storingen).

In overeenstemming met de Europese regelgeving (een maximaal link budget van 143 dB met onze E220-900M30S in 14 dBm) komen we uit op een bereik van 388 km. Maar dat is een mooie droom; deze theoretische afstand zal in de praktijk nooit gehaald worden. Toch kan onder de juiste omstandigheden een maximaal bereik van 10...20 km worden gehaald, buiten stedelijke gebieden en wanneer zender en ontvanger elkaar zien.

Terzijde: in april 2020 werd een afstand van 832 km gehaald met een LoRa-module waarvan de prestaties vergelijkbaar zijn met die van LLCC68. De zend- en ontvangstomstandigheden waren echter extreem geoptimaliseerd. Er was namelijk een antenne bevestigd aan een weerballon op een hoogte van 38 km en de ontvangst vond plaats via een LoRaWAN-gateway die midden in een bergachtig gebied stond, dus vrij goed geïsoleerd van HF-storingen.



Figuur 7. LoRa-modulatie kan direct worden bekeken met SDR-software en een bijbehorende SDR-sleutel. Hier zien we de modulatie voor een frequentie van 868 MHz met een bandbreedte van 250 kHz. Dankzij de traagheid van de LoRa-transmissie kunnen we de modulatie van de symboolcodering zien. Boven in de afbeelding is de verticale as geschaald in gemiddeld signaalvermogen (dBm) en de horizontale as in frequentie. In het onderste deel van de afbeelding zie je de transmissiesequentie als functie van de tijd, met de frequentievariaties die kenmerkend zijn voor LoRa-modulatie.



Figuur 8. Deze grafiek toont de transmissie van vier symbolen met $SF = 8$ en $BW = 250$ kHz. Let op: de tijd is weergegeven op de verticale as, de frequentie op de horizontale as.

Overdracht van een symbool

LoRa-modulatie kan direct worden gevisualiseerd met SDR-software en een bijbehorende SDR-sleutel, zoals te zien in **figuur 7**.

Figuur 8 is een tijdlijn die de transmissie toont van vier LoRa-symbolen met $SF = 8$ en $BW = 250$ kHz. Als onze middenfrequentie 868 MHz is, bestaat de frequentieafwijking uit $2^8 = 256$ stappen om van de minimumfrequentie van 867,875 MHz naar de maximumfrequentie van 868,125 MHz te gaan.

De codering van de informatie van elk symbool ligt in de beginfrequentiewaarde van de lineaire sweep van deze frequentie. Bijvoorbeeld, voor symbool 1 ligt de beginfrequentie A bij $32/256$ van de totale frequentiesweep, zodat de codering van het verzonden symbool 32 is. Voor symbool 2 ligt de beginfrequentie E bij $128/256$, zodat de symboolcodering 128 is. Voor symbool 3 is de startfrequentie I $64/256$, zodat de symboolcodering 64 is – enzovoort. Voor symbool 4 is de startfrequentie M $0/256$ en is de symboolcodering 0. De waarden van de vier verzonden symbolen zijn dus achtereenvolgens 32, 128, 64 en 0. De frequentieafwijking bestaat uit kleine stapjes; de resolutie hangt af

van de SF-waarde. Voor $SF = 8$ is $2^{SF} = 2^8$, en dat betekent 256 intervallen; voor $SF = 11$ zouden dat er 2048 zijn. De duur van elk interval T_c hangt af van de bandbreedte. Voor $BW = 250$ kHz duren ze $4 \mu s$, voor $BW = 500$ kHz wordt dat gereduceerd tot $2 \mu s$. Het loopt op tot $8 \mu s$ bij 125 kHz. Daarom is bij LoRa de transmissietijd van een bericht omgekeerd evenredig met BW en verdubbelt deze voor elke toename van de SF-waarde met één.

Dit modulatieproces, geleend van RADAR-technologieën, omvat de transmissie van symbolen als een lineaire frequentieafwijking van een sinus rond een middenfrequentie. Deze frequentievariëaties worden CHIRP genoemd (compressed high-intensity radiated pulse). Voor LoRa worden alleen lineair toenemende chirps gebruikt voor symbooltransmissie, zoals die tussen de punten M en N. Lineair afnemende chirps worden alleen gebruikt aan het einde van de synchronisatie-preambule.

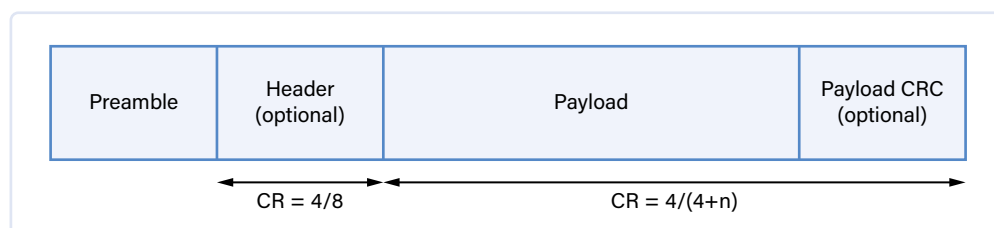
Het LoRa-pakket

Het verzonden bericht wordt geïntegreerd in een fysiek frame dat pakket (package) wordt genoemd. Het bestaat uit vier delen (**figuur 9**), waarvan sommige optioneel en/of configureerbaar zijn.

1. Een preamble, altijd verplicht, maar configureerbaar. Het is een opeenvolging van meerdere (meestal acht) oplopende en twee aflopende chirps. Deze preamble is essentieel voor de synchronisatie van de ontvanger.
2. Header (optioneel). Deze is standaard aanwezig als een expliciete modus wordt gekozen (afwezig bij impliciete modus). Hij wordt altijd verzonden met een CR (code rate) van $4/8$ om de maximale kans op ontvangst te hebben. Het geeft aan:

- Data-omvang (*payload*).
- Code rate (CR) gebruikt voor de rest van het frame, tussen $4/5$ en $4/8$, maar $4/5$ wordt het meest gebruikt. Een code rate van m/n betekent dat voor elke m bits nuttige informatie, de encoder in totaal n bits gegevens genereert, waarvan $m-n$ bits redundant zijn. Redundante bits maken de detectie van transmissiefouten mogelijk.
- Hij geeft aan of er een CRC (foutcode) aanwezig is of niet.

1. Gegevens (*payload*). De maximale grootte van het gegevenspakket is 256 bytes. Dit hangt af van de waarde van de spreidingsfactor en de bufferinstellingen. Hoe hoger de SF-waarde, hoe kleiner de pakketgrootte. De maximale duur van een bericht is beperkt.
2. Een optionele foutcontrole (CRC). Deze controleert of de ontvangen gegevens volledig en foutloos zijn.



Figuur 9. Het LoRa-pakket bestaat uit vier onderdelen, waarvan sommige optioneel en/of configureerbaar zijn.



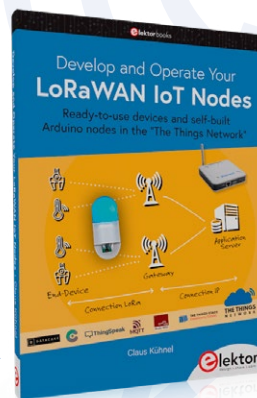
In het tweede deel van dit artikel presenteren we de print waarop de LoRa E220-900M30S module is geïntegreerd, onder besturing van een Arduino Nano. Een C++ programma maakt de volledige configuratie van de LLCC68 mogelijk, en vooral ook het gebruik voor het verzenden en ontvangen van berichten. Bereik- en autonomie-instellingen worden ook besproken, met SF, BW, CR, LDRO, evenals de waarden die door de ontvanger worden geretourneerd, RSSI, gemeten gevoeligheid, signaal/ruis-verhouding en ontvangststatistieken (foutpercentage). ◀

230140-03



Gerelateerde producten

- **Great Scott Gadgets HackRF One Software Defined Radio (1 MHz to 6 GHz)**
www.elektor.nl/18306
- **CircuitMess Chatter – DIY LoRa Communicator**
www.elektor.nl/20407
- **Claus Kühnel, Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes, Elektor 2023**
www.elektor.nl/20147



WEBLINKS

- [1] Norbert Schmidt, "LoRa, een kleine inleiding", Elektor september/oktober 2016:
<http://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-201607/29140>
- [2] Mathias Claussen, "LoRa GPS-tracker", Elektor november/december 2020:
<http://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-161/59164>
- [3] Semtech: <https://semtech.com>

YOUR KEY TO CELLULAR TECHNOLOGY



**WÜRTH
ELEKTRONIK**
MORE THAN
YOU EXPECT

WE are here for you!

Join our free webinars on:
www.we-online.com/webinars

Adrastea-I is a Cellular Module with High Performance, Ultra-Low Power Consumption, Multi-Band LTE-M and NB-IoT Module.

Despite its compact size, the module has integrated GNSS, integrated ARM Cortex M4 and 1MB Flash reserved for user application development. The module is based on the high-performance Sony Altair ALT1250 chipset. The Adrastea-I module, certified by Deutsche Telekom, enables rapid integration into end products without additional industry-specific certification (GCF) or operator approval. Provided that a Deutsche Telekom IoT connectivity (SIM card) is used. For all other operators the module offers the industry-specific certification (GCF) already.

www.we-online.com/gocellular

- Small form factor
- Long range/worldwide coverage
- Security and encryption
- Multi-band support

#GOCellular