



PE1HVVH



LoRa Modulatie

Technische Documentatie

Van OSI-model tot radiosignaal

Chirp Spread Spectrum, Spreading Factors en Demodulatie

Versie 1.0 - Januari 2026

Door PE1HVVH / ChatGPT / Claude.ai



Inhoudsopgave

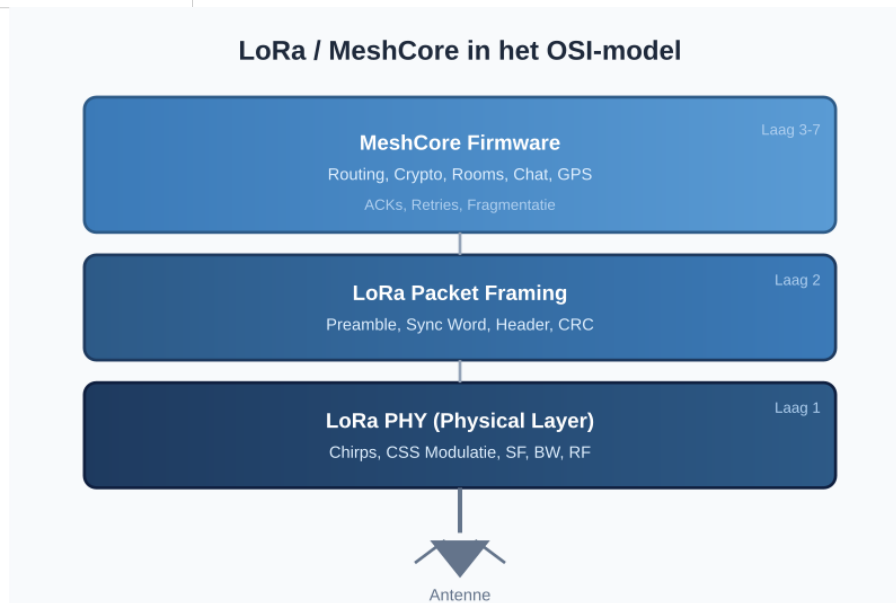
Table of Contents

1. LoRa in de Netwerklagen.....	3
1.1 Handshaking per laag.....	3
2. Synchronisatie zonder Handshake.....	4
2.1 Wat de ontvanger leert uit de preamble.....	4
2.2 Synchronisatie stappen.....	4
3. Demodulatie: Down-chirp Mixing.....	5
3.1 Demodulatie stappen.....	5
3.2 Symboolwaarde uit frequentie.....	5
4. SF Orthogonaliteit.....	6
4.1 Chirp-duur per Spreading Factor.....	6
5. Chirp Spread Spectrum (CSS).....	7
5.1 De diagonale lijn.....	7
5.2 Modulatie vergelijking.....	7
6. De Encoding Pipeline.....	8
6.1 De zeven encoding stappen.....	8
7. Bits, Symbolen en Chips.....	9
7.1 Spreading Factor en chips.....	9
8. Noodnetwerken en SF-keuze.....	10
8.1 Regionale presets.....	10
8.2 Voorbeeld noodnet configuratie.....	10

1. LoRa in de Netwerklagen

LoRa en MeshCore kunnen worden ingepast in het bekende OSI-model. De onderstaande tabel toont hoe de verschillende componenten zich verhouden tot de netwerklagen.

OSI-laag	LoRa/MeshCore equivalent
7. Applicatie	MeshCore Companion App, chat, GPS
6. Presentatie	— (niet echt aanwezig)
5. Sessie	— (geen persistente sessies)
4. Transport	MeshCore ACKs, retries, fragmentatie
3. Netwerk	MeshCore routing, hops, Room-adressering
2. Datalink	LoRa packet: preamble, sync word, header, CRC
1. Fysiek	LoRa PHY: chirps, SF, BW, de radio zelf



Figuur 1: LoRa en MeshCore in het OSI-lagenmodel

1.1 Handshaking per laag

Net als bij Ethernet of TCP is er een duidelijke scheiding tussen de fysieke laag en de hogere lagen:

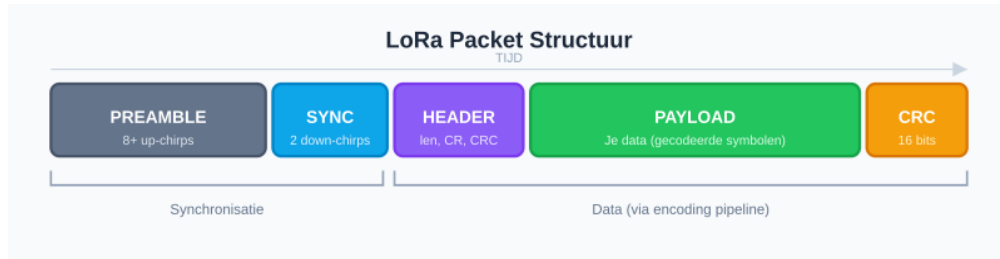
Protocol	Laag 1-2 (fysiek)	Laag 3+ (netwerk)
Ethernet	Geen handshake, broadcast	ARP, IP, TCP handshake
WiFi	Beacon/probe	TCP/IP doet de rest
LoRa	Preamble sync, geen handshake	MeshCore ACKs, routing

De fysieke laag is altijd "dom" — gewoon bits de lucht in. De intelligentie (betrouwbaarheid, adressering, bevestiging) zit in de lagen erboven.



2. Synchronisatie zonder Handshake

Er is geen handshaking bij LoRa. De zender zendt, en wie luistert, luistert. Synchronisatie gebeurt via de preamble — een reeks identieke chirps aan het begin van elk packet.



Figuur 2: LoRa packet structuur met preamble, sync word, header, payload en CRC

2.1 Wat de ontvanger leert uit de preamble

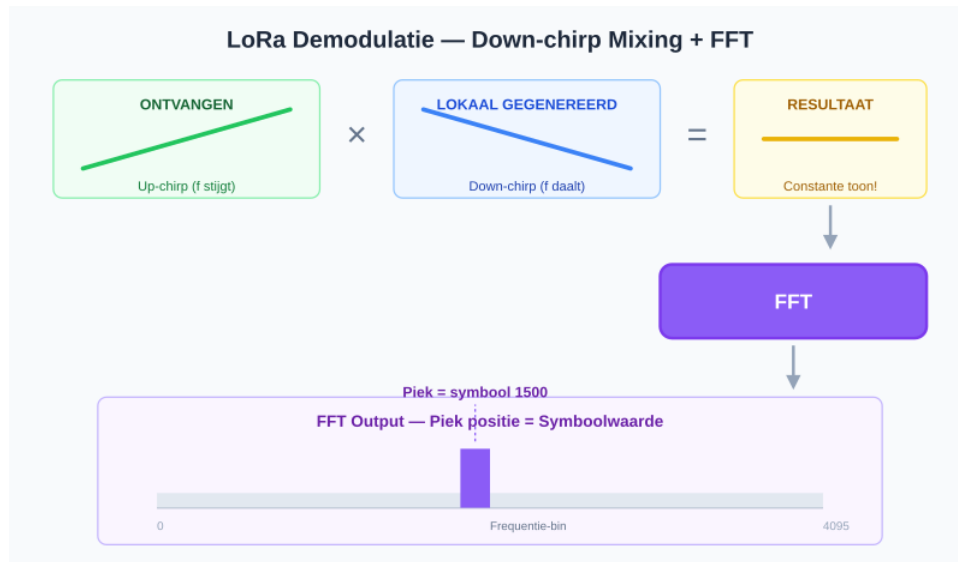
Informatie	Hoe
Timing	Chirps komen op regelmatige intervallen
Frequentie-offset	Preamble-chirps zijn symbool 0, afwijking = drift
SF bevestiging	Chirp-lengte matcht verwachte SF
Netwerk-ID	Sync word moet kloppen

2.2 Synchronisatie stappen

1. Luister naar ruis...
2. Detecteer: "hé, dit lijkt op een chirp"
3. Detecteer: "nog een chirp, zelfde timing"
4. Tel 8 chirps → "ik ben gesynchroniseerd"
5. Wacht op sync word (2 down-chirps)
6. Sync word klopt → "dit packet is voor mijn netwerk"
7. Nu komen de data-symbolen → decodeer

3. Demodulatie: Down-chirp Mixing

De ontvanger vermenigvuldigt het ontvangen signaal met een lokaal gegenereerde down-chirp (omgekeerde sweep). Als je een stijgende frequentie vermenigvuldigt met een dalende frequentie van dezelfde snelheid, heffen de veranderingen elkaar op. Wat overblijft is een constante toon.



Figuur 3: Demodulatie via down-chirp mixing en FFT

De frequentie van de resulterende toon hangt af van de startpositie van de chirp. De ontvanger doet een Fast Fourier Transform (FFT) op dat resultaat. De positie van de piek in het spectrum is de symboolwaarde.

3.1 Demodulatie stappen

8. Ontvang up-chirp
9. Vermenigvuldig met lokale down-chirp
10. Resultaat = constante toon
11. FFT → vind de frequentie
12. Frequentie-bin = symboolwaarde

3.2 Symboolwaarde uit frequentie

Na de FFT correspondeert elke frequentie-bin met een symboolwaarde:

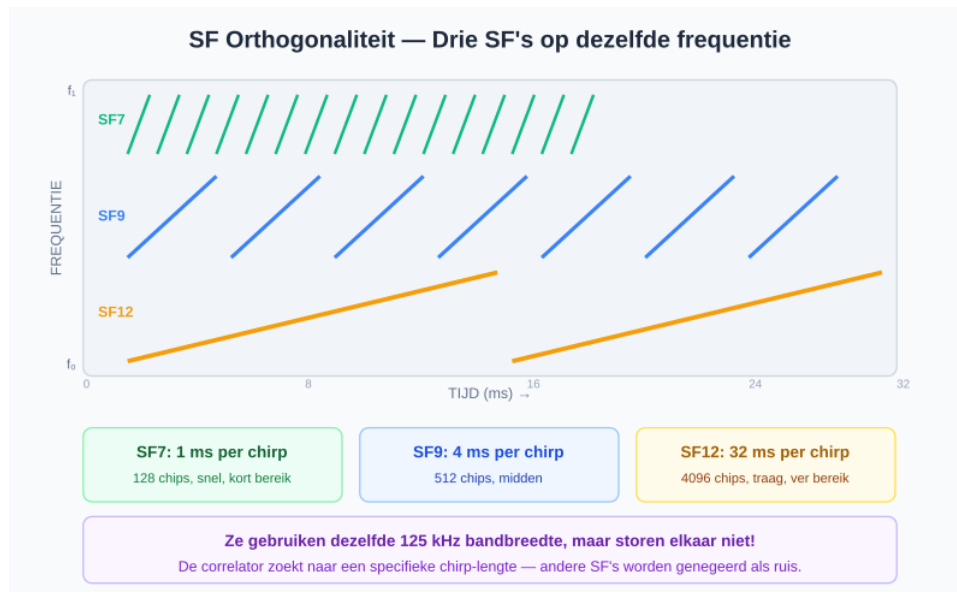
Symbool	Resulterende toon
Symbool 0	0 Hz (DC)
Symbool 1000	~244 Hz
Symbool 2048	~500 Hz
Symbool 4095	~999 Hz



4. SF Orthogonaliteit

Verschillende Spreading Factors (SF7, SF9, SF12) kunnen tegelijkertijd op dezelfde frequentie bestaan zonder elkaar te storen. Ze zijn orthogonaal — ze "zien" elkaar niet.

Orthogonaal betekent "haaks op elkaar" — twee dingen die elkaar niet beïnvloeden, ook al bestaan ze in dezelfde ruimte. Net als de X-as en Y-as in een grafiek: bewegen langs X verandert niets aan Y.



Figuur 4: SF7, SF9 en SF12 tegelijkertijd op dezelfde 125 kHz bandbreedte

4.1 Chirp-duur per Spreading Factor

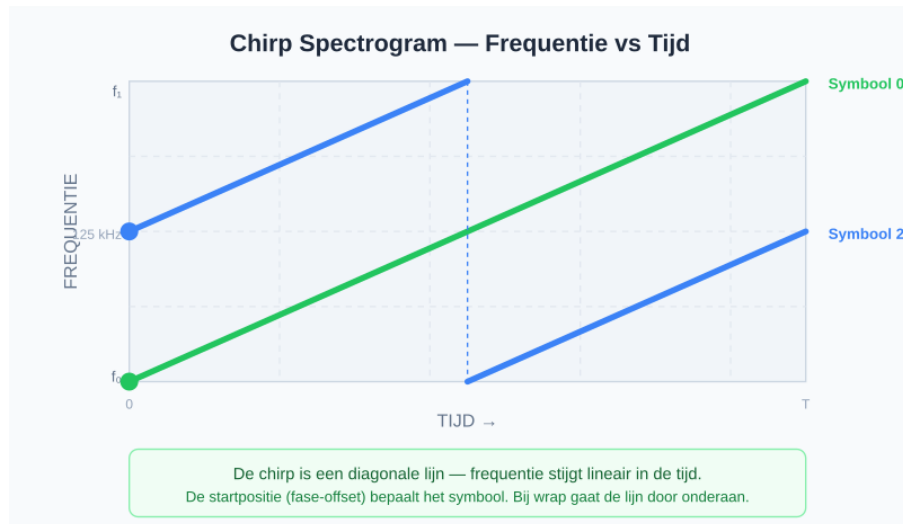
SF	Chirp-duur (125 kHz BW)	Chips per symbool
SF7	~1 ms	128
SF9	~4 ms	512
SF12	~32 ms	4096

De correlator in de ontvanger zoekt naar een specifieke chirp-lengte. Een SF7-ontvanger zoekt naar snelle chirps van 1 ms. Een SF12-chirp van 32 ms ziet er voor hem uit als langzame ruis — de wiskundige correlatie is vrijwel nul.

Belangrijk: Voor MeshCore betekent dit dat alle nodes in je mesh dezelfde SF moeten gebruiken. Wie een andere SF kiest, is onzichtbaar voor het netwerk.

5. Chirp Spread Spectrum (CSS)

LoRa gebruikt geen AM of klassieke FM, maar CSS-modulatie — Chirp Spread Spectrum. Bij LoRa is de amplitude constant, de frequentie sweept altijd van laag naar hoog, en alleen waar de sweep begint is data.



Figuur 5: Spectrogram — de chirp als diagonale lijn, fase-offset bepaalt het symbool

5.1 De diagonale lijn

In een spectrogram (frequentie vs tijd) is een chirp een diagonale lijn. De symboolwaarde bepaalt waar de diagonaal begint. Bij een andere startpositie "wrapt" de chirp — hij gaat door onderaan wanneer hij bovenaan aankomt.

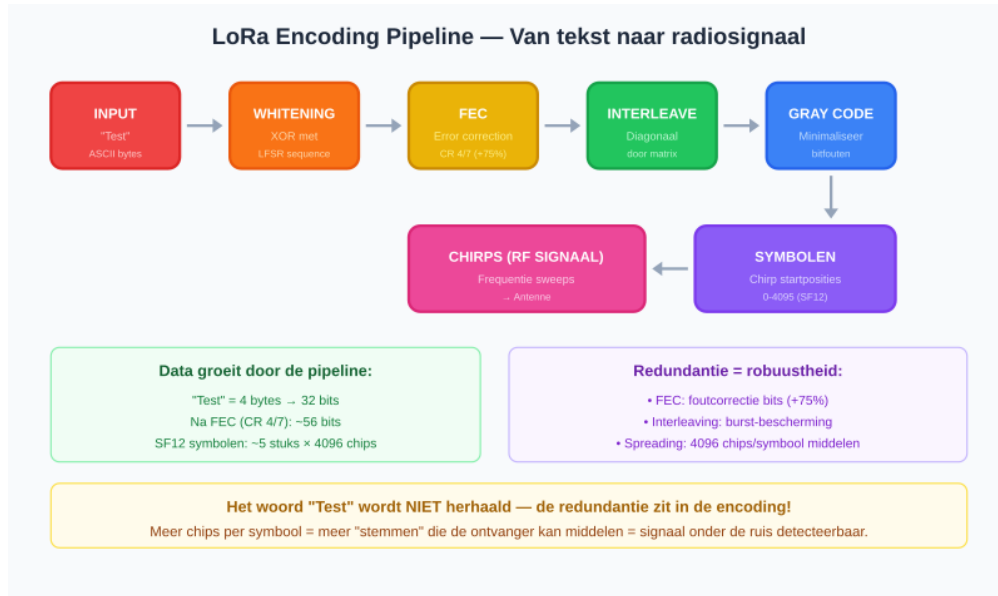
5.2 Modulatie vergelijking

Modulatie	Wat varieert
AM	Amplitude
FM	Instantane frequentie
PM	Fase
CSS/LoRa	Fase van een chirp (startpositie in de sweep)



6. De Encoding Pipeline

Van tekst naar radiosignaal doorloopt de data zeven stappen. Elke stap voegt redundantie toe voor robuustheid.



Figuur 6: De complete encoding pipeline van "Test" naar radiosignaal

6.1 De zeven encoding stappen

13. **Input** — ruwe ASCII bytes ("Test" → 0x54, 0x65, 0x73, 0x74)
14. **Whitening** — XOR met pseudo-random reeks
15. **FEC** — Forward Error Correction (CR 4/7 = 75% overhead)
16. **Interleaving** — bits diagonaal door matrix
17. **Gray coding** — minimaliseer bitfouten
18. **Symboelen** — chirp-startposities (0-4095 bij SF12)
19. **Chirps** — het radiosignaal naar de antenne



7. Bits, Symbolen en Chips

- **Bit:** wat je wilt verzenden (je data)
- **Symbool:** een groep bits die samen worden gecodeerd
- **Chip:** de kleinste tijdseenheid van het radiosignaal

7.1 Spreading Factor en chips

SF	Chips per symbool	Bits per symbool
SF7	128 (2^7)	7
SF8	256 (2^8)	8
SF10	1024 (2^{10})	10
SF12	4096 (2^{12})	12

Meer chips per symbool betekent meer redundantie. De ontvanger correleert alle chips samen en kan daardoor signalen uit de ruis halen — tot 20 dB onder de ruisvloer.



8. Noodnetwerken en SF-keuze

Alle nodes in een mesh moeten dezelfde SF gebruiken. Dit is vergelijkbaar met analoge radio waar je ook FM vs AM van tevoren afsprekt.

8.1 Regionale presets

Regio	Preset	SF	BW
EU868	LongFast	SF11	125 kHz
EU868	VLongSlow	SF12	125 kHz
US915	MedFast	SF9	250 kHz

Een noodnetwerk definieert vooraf: frequentie, preset (die SF/BW/CR vastlegt), en optioneel een sync word voor scheiding tussen groepen.

8.2 Voorbeeld noodnet configuratie

NOODNET NEDERLAND
Frequentie: 869.525 MHz
SF: 12
BW: 125 kHz
CR: 4/7
Sync Word: 0x12

— Einde Document —