

Software-Defined Radio en fysica-onderwijs

Lezing WND-conferentie dec. 2024, Noordwijkerhout

Pieter-Tjerk de Boer
(Universiteit Twente / PA3FWM)
p.t.deboer@utwente.nl

Over mij

- ▶ werkzaam als universitair hoofddocent aan de Universiteit Twente, afd. informatica
- ▶ natuurkunde gestudeerd (Twente)
- ▶ winnaar Nederlandse Natuurkunde Olympiade 1990
- ▶ actief als radio-amateur (PA3FWM)



<https://www.nrc.nl/nieuws/2024/10/30/>

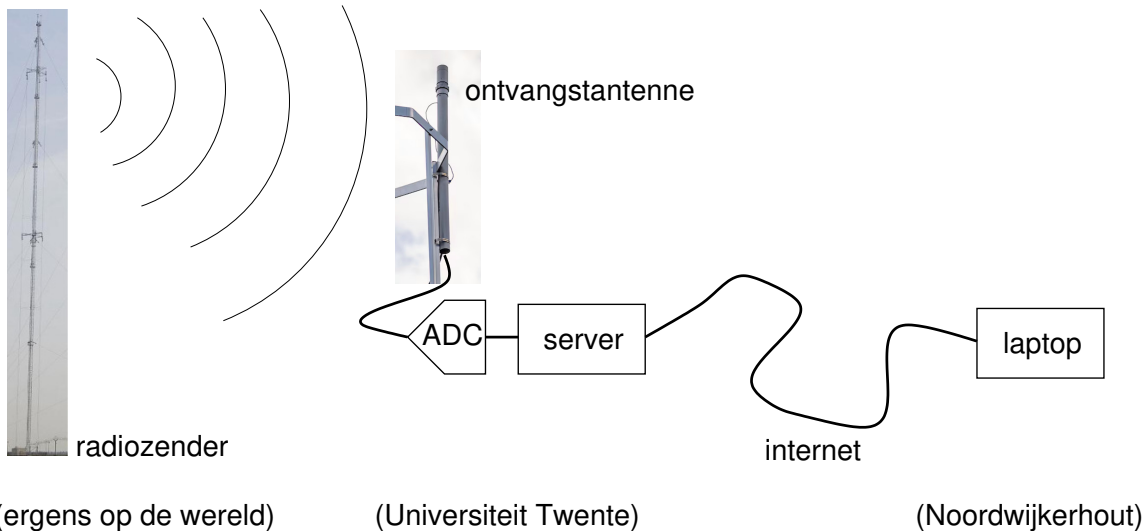
Software-defined radio en fysica-onderwijs

- ▶ Demonstratie van de WebSDR
- ▶ Basisprincipes:
 - ▶ analoog/digitaal-omzetting
 - ▶ digitale signaalverwerking
 - ▶ Fourier-transformatie
- ▶ Praktisch:
 - ▶ Goedkope SDR-hardware
 - ▶ Ontvangst van vliegtuigsignalen
 - ▶ GNU Radio
- ▶ Mogelijkheden in het onderwijs

Demo WebSDR

`http://websdr.ewi.utwente.nl:8901`

Opzet van de demo



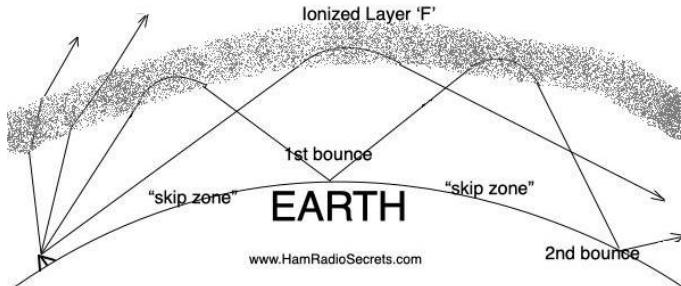
Propagatie van radiogolven

3G/4G/5G, WiFi, Bluetooth, LoRa etc.:

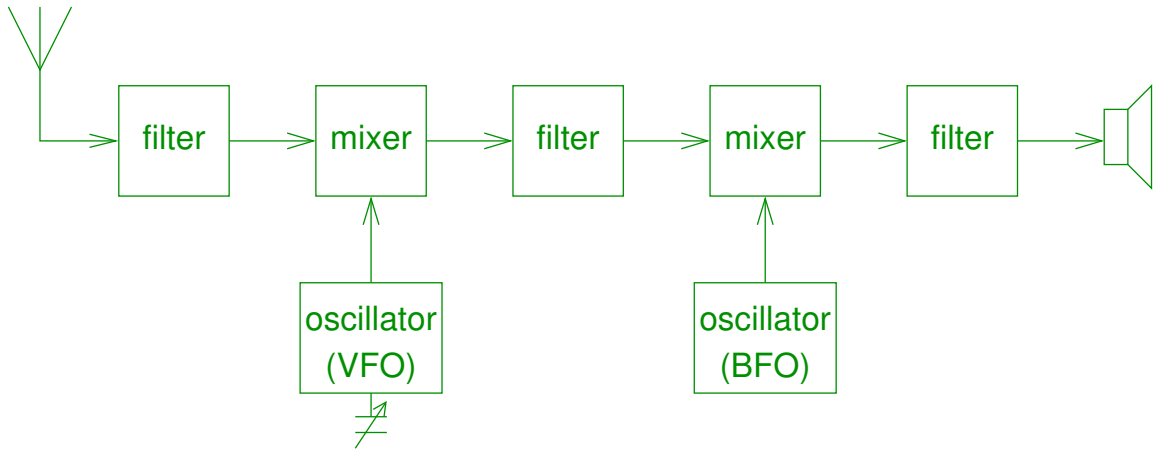
- ▶ vooral UHF/microgolf: frequenties 300 MHz – 300 GHz, golflengte 1 m ... 1 mm
- ▶ propagatie beperkt tot (bijna) direct zicht

Lange/midden/kortegolf:

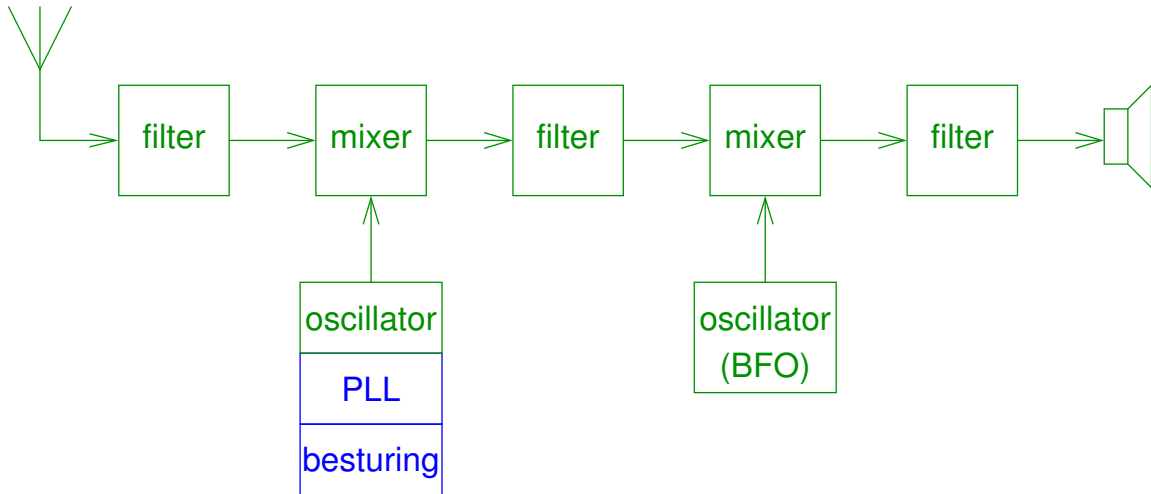
- ▶ frequenties 0 ... 30 MHz, golflengtes 10 m ... 10 km
- ▶ gereflecteerd door de ionosfeer, afhankelijk van tijd, seizoen, zonneactiviteit
- ▶ → grote afstanden mogelijk



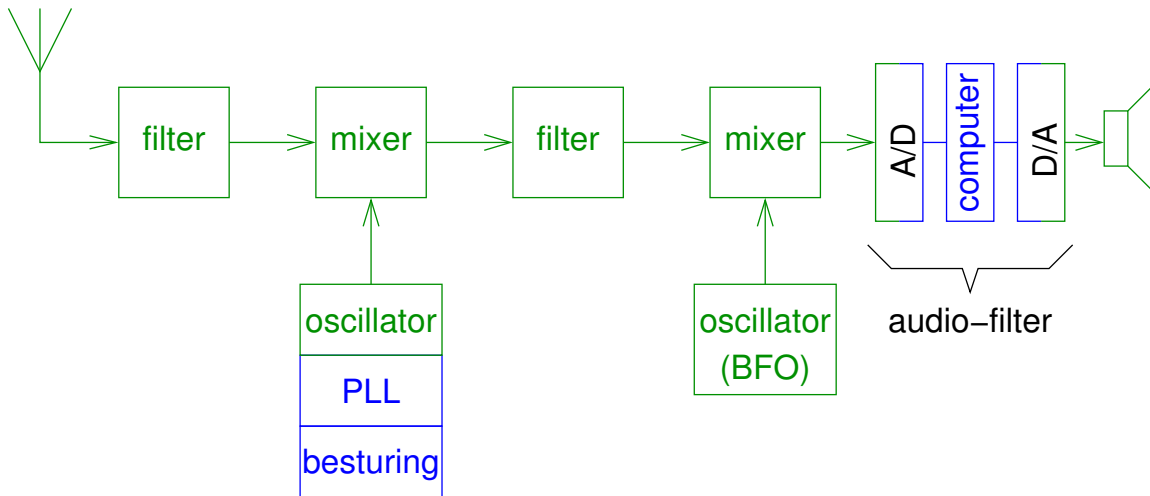
Prehistorie: alles analoog



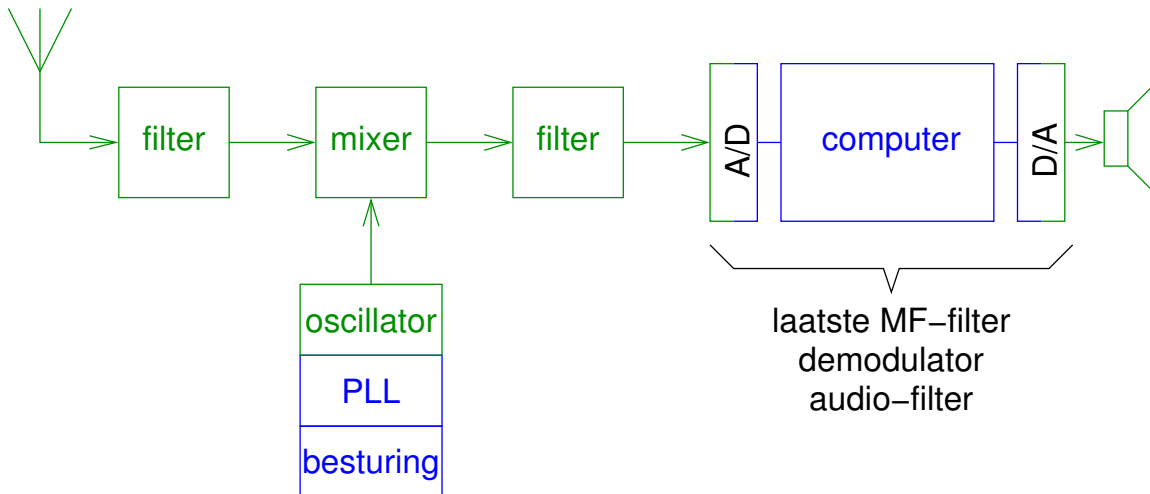
Vanaf ca. jaren '80: digitale besturing



Vanaf ca. jaren '90: digitale audio-filtering



Vanaf ca. eeuwwisseling: digitale MF-filtering



Ideaalbeeld



Inmiddels haalbaar (en zinvol) voor frequenties tot bijv. 30 MHz.

Op hogere frequenties wordt vaak nog een analoge eerste frequentieomzetting gebruikt.

Digitale signaalverwerking

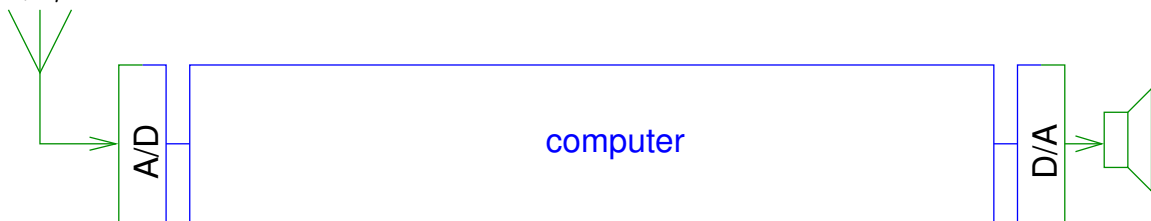
Voordelen digitale signaalverwerking:

- ▶ **exacter** dan analoge signaalverwerking:
 - ▶ geen verloop door temperatuur of veroudering
 - ▶ steilere filters
- ▶ **geavanceerdere** technieken mogelijk:
 - ▶ adaptieve filters passen zich aan omstandigheden aan
 - ▶ nieuwe soorten signalen (vooral t.b.v. digitale data)
- ▶ **experimenteren** eenvoudiger
 - ▶ programmeren i.p.v. solderen
 - ▶ makkelijk kopiëren
 - ▶ tegenwoordig is PC krachtig genoeg

Ideaalbeeld

0 ... 30 MHz

0,1 μV ... 100 mV



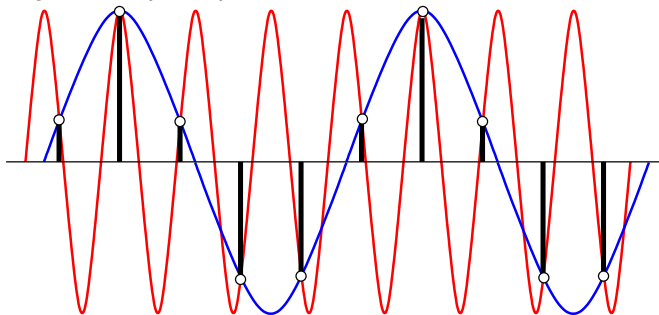
A/D-omzetter “meet” periodiek de antennespanning; eisen hieraan:

- vaak genoeg per seconde
- voldoende nauwkeurig

Analoog-digitaal-omzetter : tijd-kwantisatie

AD-omzetter “meet” signaal op bepaalde tijden

- ▶ Signaal **tussen** metingen is in principe **onbekend**

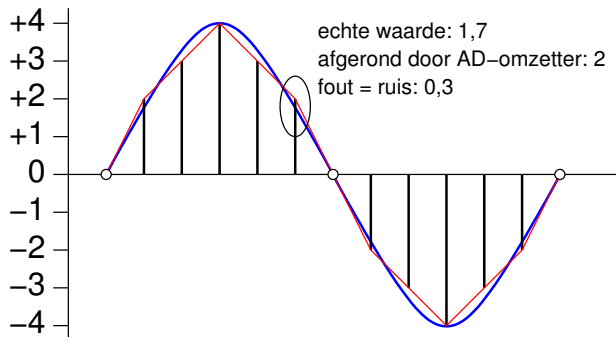


- ▶ Nyquist zegt: als je sample-snelheid f Hz is, is signaal ertussen te reconstrueren mits frequenties niet hoger zijn dan $f/2$.

Analoog-digitaal-omzetter : amplitude-kwantisatie

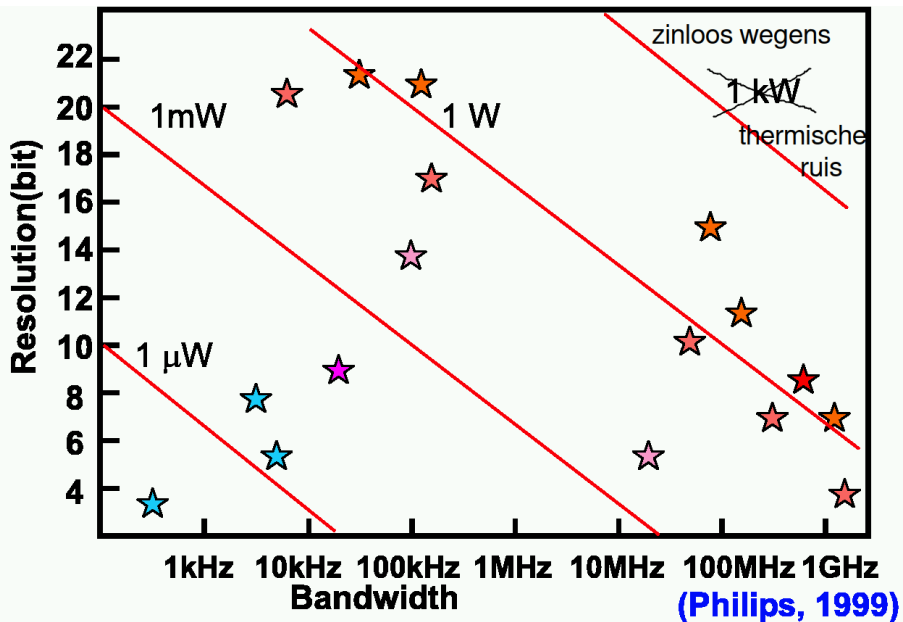
AD-omzetter “meet” signaal met beperkt aantal bits

- ▶ Moet dus afronden:



- ▶ Afrondfout is in feite extra ruis.
- ▶ Signalen kleiner dan 1 bit zijn onzichtbaar.
(Hoewel... door uitmiddeling kun je wel kleinere signalen zien.)

Analoog-digitaal-omzetter: compromis

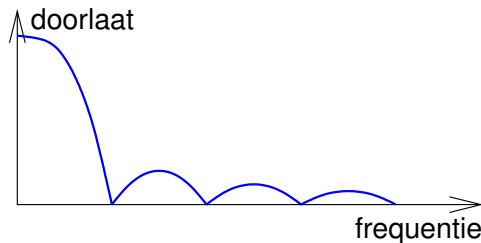
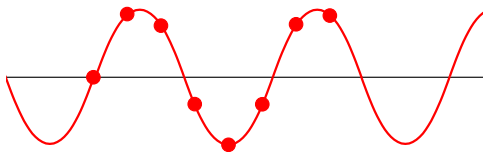
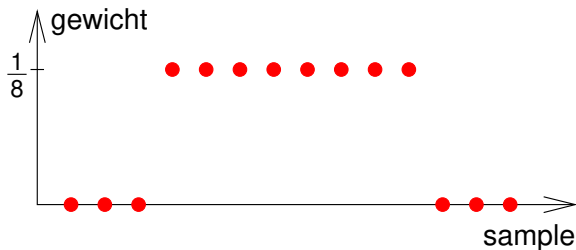


Signaalverwerking

Verschillende soorten bewerkingen:

- ▶ frequentieverschuiving
= vermenigvuldigen met een sinus: $\cos(2\pi f_1 t) \cdot \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_1 + f_2)t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_1 - f_2)t)$
- ▶ filtering (bepaalde frequentiegebieden doorlaten)
gewogen gemiddelde van veel opvolgende samples
- ▶ samplerate aanpassen (m.n. verlagen om rekenwerk te besparen)
- ▶ demoduleren/decoderen (informatie uit het radiosignaal halen)
- ▶ enz.

FIR filter ('Finite Impulse Response')



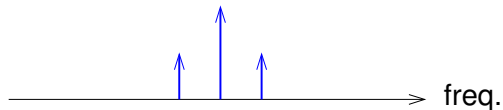
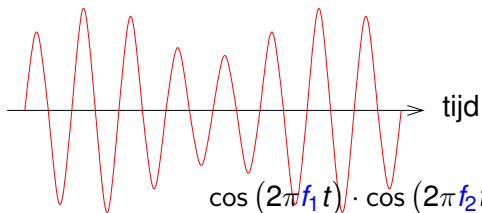
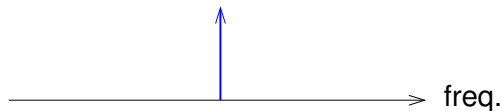
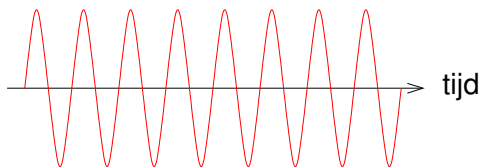
(Alle gewichten gelijk is maar een voorbeeld. Als je ze verschillend kiest, krijg je andere, mogelijk 'mooiere', doorlaatkarakteristieken. Goede keuze vereist een stapel wiskunde.)

Signaalverwerking

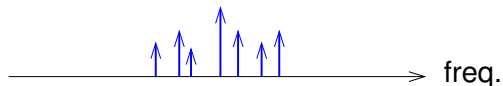
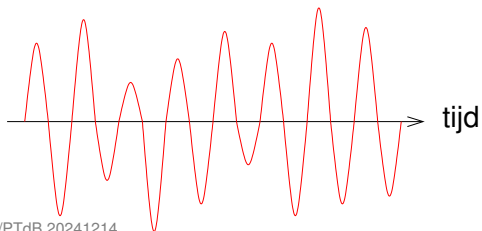
Verschillende soorten bewerkingen:

- ▶ frequentieverschuiving
= vermenigvuldigen met een sinus: $\cos(2\pi f_1 t) \cdot \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_1 + f_2)t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_1 - f_2)t)$
- ▶ filtering (bepaalde frequentiegebieden doorlaten)
gewogen gemiddelde van veel opvolgende samples
- ▶ samplerate aanpassen (m.n. verlagen om rekenwerk te besparen)
samples weggooien, maar houd rekening met Nyquist
- ▶ demoduleren/decoderen (informatie uit het radiosignaal halen)
bijv. amplitude of frequentie 'meten'
- ▶ enz.

Tijd-domein en frequentie-domein



$$\cos(2\pi f_1 t) \cdot \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_1 + f_2)t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_1 - f_2)t)$$



De Fourier-transformatie

Joseph Fourier (1768–1830):

‘elke’ functie kan worden geschreven als som van sinussen.



Fourier-transformatie in continue tijd:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t} dt$$

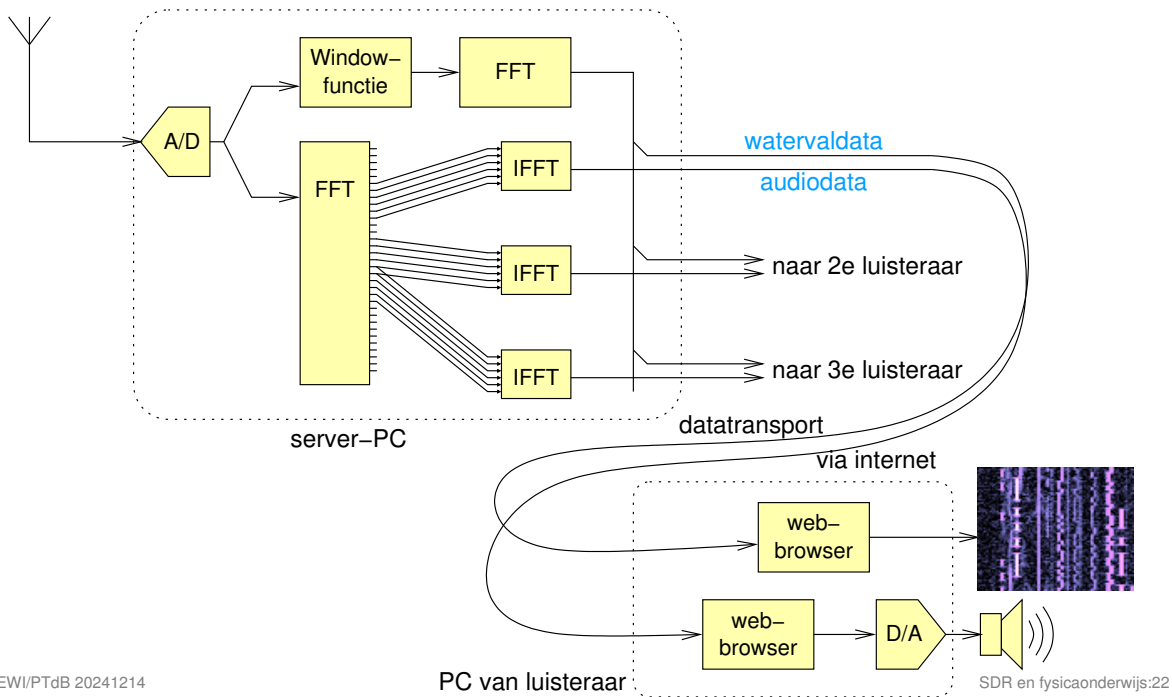
Discrete Fourier Transform: zelfde, maar met *discrete* tijd en een *eindig* tijdsinterval:

$$X(j) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k \cdot \Delta t) \cdot e^{-2\pi i \cdot j \cdot k / N}$$

FFT = Fast Fourier Transform = efficiënte implementatie van DFT

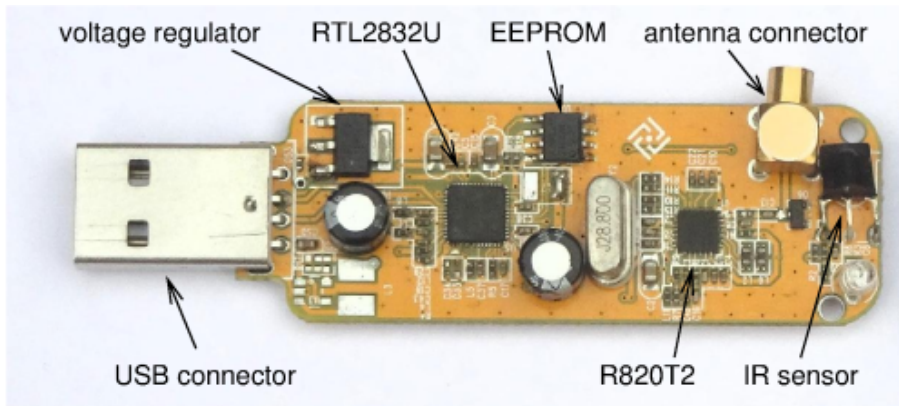
Rekentijd orde $N \cdot \log(N)$ i.p.v. N^2

Vereenvoudigd blokschema WebSDR



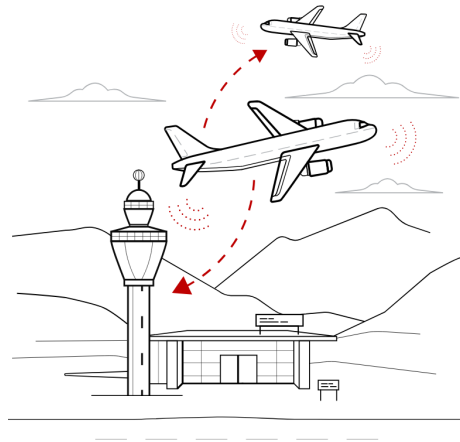
Goedkoop experimenteren met SDR: de RTL-dongle

- ▶ RTL-SDR: een USB-dongle voor in je pc
- ▶ Oorspronkelijk bedoeld om digitale TV te ontvangen, waarbij de dongle de hele signaalverwerking doet.
- ▶ Hobbyisten ontdekten dat de RTL2832-chip ook als 'doorgeefluik' kan worden geprogrammeerd, om de signalen in software te bewerken. Er is software voor ontvangst van veel verschillende soorten signalen.



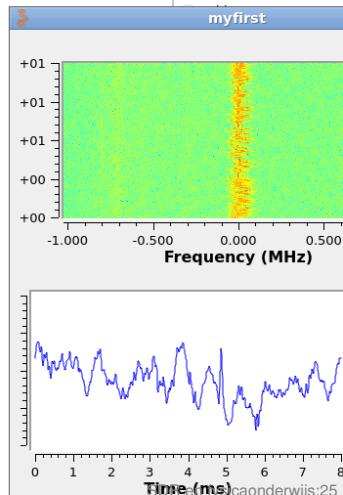
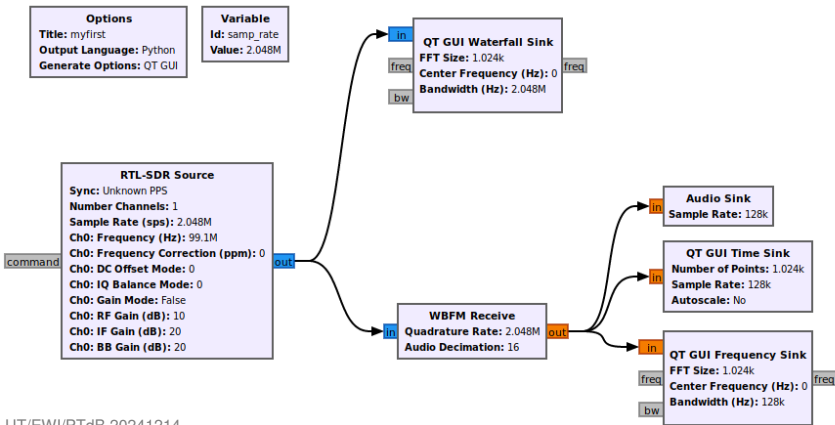
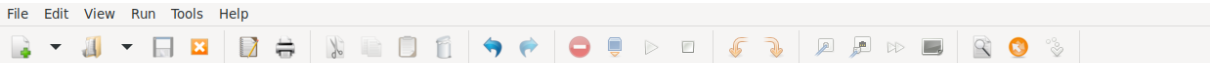
Demo: ADS-B-ontvangst

- ▶ Op 1090 MHz zenden vliegtuigen periodiek hun positie uit.
- ▶ 'Automatic Dependent Surveillance – Broadcast'
- ▶ Gemakkelijk te ontvangen met een RTL-SDR.



GNU Radio

- ▶ Open-source raamwerk om met software-defined radio te experimenteren
- ▶ <https://www.gnuradio.org/>
- ▶ Kan grafisch worden geconfigureerd:



(Wilde?) Ideeën voor in het onderwijs

In de klas:

- ▶ Gebruik WebSDR ter illustratie van radiocommunicatie, het 'spectrum'-concept, etc.
- ▶ Demonstreer radiotechniek met RTL-SDR en een zendertje (bijv. autodeuropener)
- ▶ (Niet SDR maar wel leuk: demo van Marconi's experimenten (vonkzender, coherer))

Profielwerkstuk: (maar dat was er in mijn tijd nog niet, dus wellicht zit ik er volkomen naast...)

- ▶ Propagatieonderzoek: hoe hangt signaalsterkte af van afstand in ADS-B?
- ▶ Propagatieonderzoek: analyseer WSPR- of FT8-ontvangst
- ▶ Iets maken met GNU radio
- ▶ Datatransmissie d.m.v. geluid

Conclusie

- SDR is hoe tegenwoordig radioapparatuur wordt gebouwd
- SDR biedt een manier om radiosignalen te visualiseren
- SDR gebruikt (deels) dezelfde technieken als digitale verwerking van geluid
- Digitale signaalverwerking vereist vaak stevige wiskunde
- SDR leent zich voor experimenteren, dankzij goedkope hardware en beschikbare software

Vragen?

p.t.deboer@utwente.nl