

# Radarová technika pro 21. století

Jan Hrach

[jenda@hrach.eu](mailto:jenda@hrach.eu)

<https://jenda.hrach.eu/>

Smršť 2024  
2024-11-30

# O mně

- Informatika na matfyzu
- Linuxový sysadmin
- Moderní využití rádiových vln (digitální komunikace, radary)
- Startup na radary (Meteopress)

# Osnova

- Pasivní/sekundární radar
  - Tamara, Věra, a jak jsem to stavěl z rtl-sdr



- Aktivní/primární radar
  - jak to děláme na počasí



- Elektronicky skenované antény
  - budoucnost



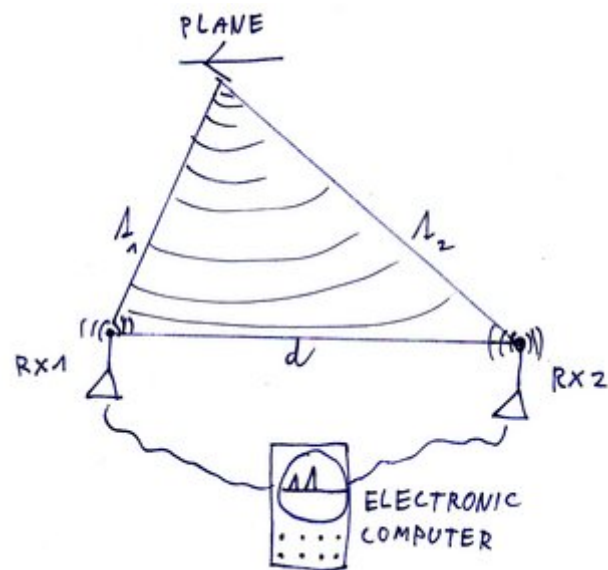
- není: FMCW radary na krátké vzdálenosti (parkovací, měření rychlosti), SAR (bohužel)

# Sekundární radar na civilní letadla

- Motivace: primární radar ukazuje jen “tečky”
- Odpovídače letadel: ADS-B
  - Interrogation svazek → odpověď “ID letadla” a trochu metadat
- ~2010: levné přijímače → FlightRadar24, FlightAware
- Neoznamování polohy
  - snaha o skrytí, nebo prostě nemají ten HW a SW

# Sekundární radar na civilní letadla

- Neoznamování polohy
  - snaha o skrytí, nebo prostě nemají ten HW a SW
- Chceme vidět letadla, ŘLP nám to nedá a vlastní ADS-B interrogator nám nepovolí :)
- Multilaterace!



# Jak získat čas

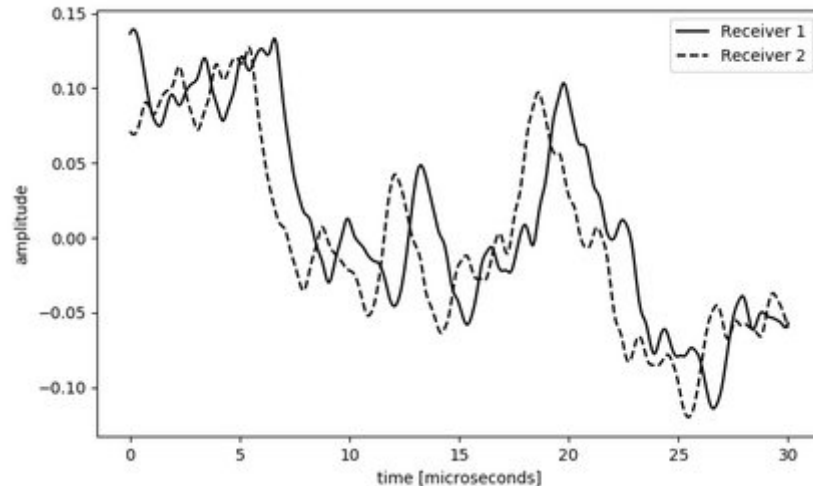
- 100ns = 30m (síťový čas/NTP bez šance, navíc USB)
- Občas nějaké letadlo polohu pošle → synchronizace streamu!
- OSS implementace: <https://github.com/mutability/mlat-server>
- Instance: <https://adsbexchange.com/>

# Sekundární radar na obecné signály

- Jak získat čas again... nemáme ta známá letadla
- GPS PPS (pulse per second)
  - problémy s připojením do SDR
  - custom HW, <https://www.blitzortung.org/>, drahé SDR
- Vysílač se známým umístěním → známým  $\Delta t$ 
  - přijímat současně s cílem (dvoukanálový přijímač)
  - přeladit se s udržením synchronizace
    - funguje!

# Sekundární radar na obecné signály

- Obecné signály – neumíme nutně demodulovat



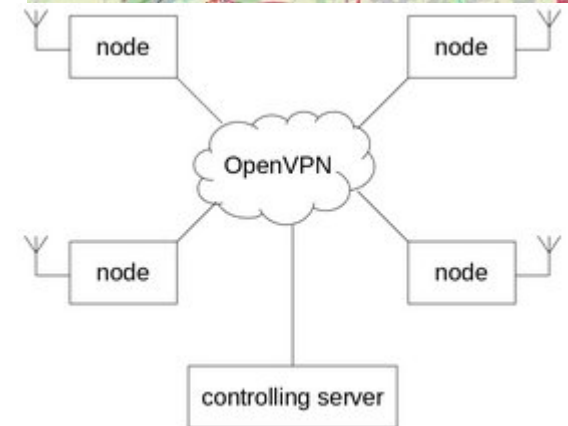
$$\text{distance}(\text{transmitter}, \text{receiver1}) - \text{distance}(\text{transmitter}, \text{receiver2}) = \Delta tc$$

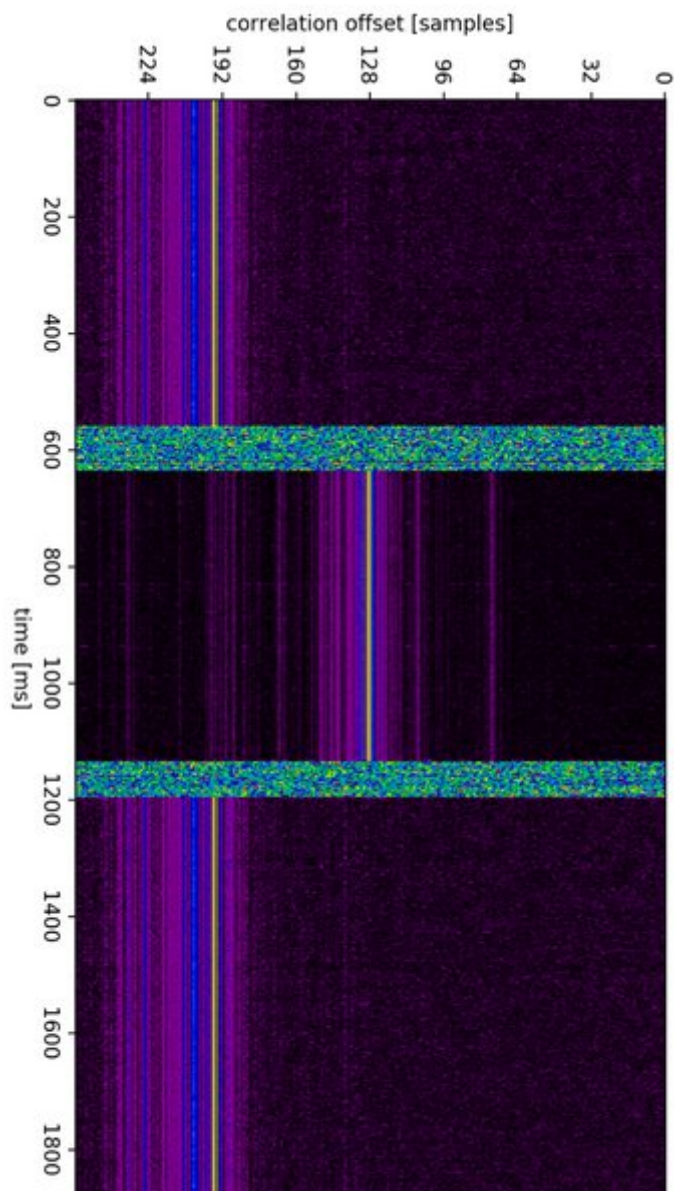
- crosscorrelation (korelace) přímo na nahrávkách  
– (asymptoticky rychlá implementace s FFT)



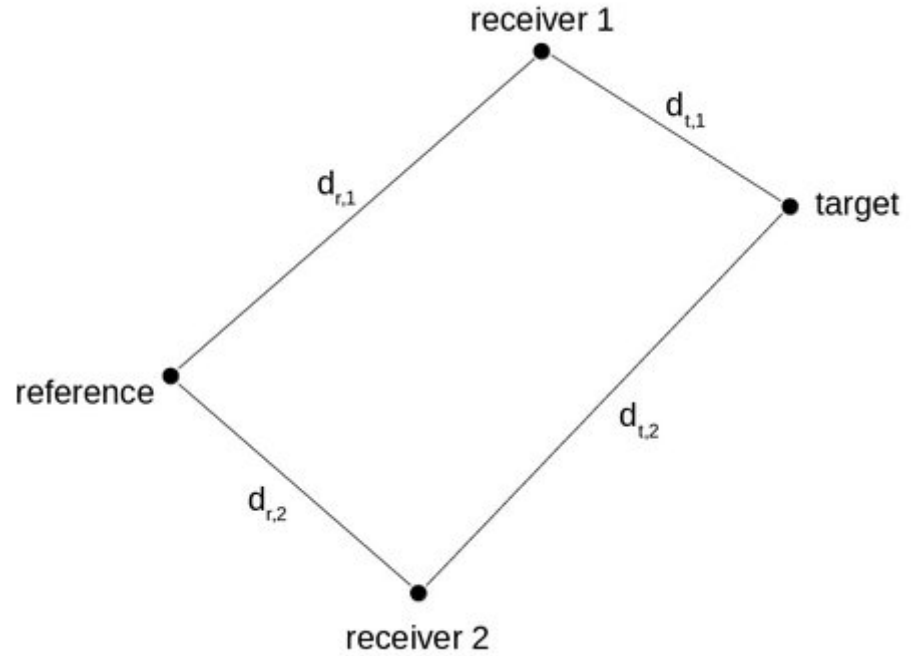
# Sekundární radar na obecné signály

- Současně na všech nodech:
  - naladit se na Žižkov
  - 1s počkat
  - naladit se na cíl
  - 1s počkat
- Zkopírovat k sobě
- <trocha inženýrství viz InstallFest 2020 nebo moje diplomka>
- Nakreslit korelaci

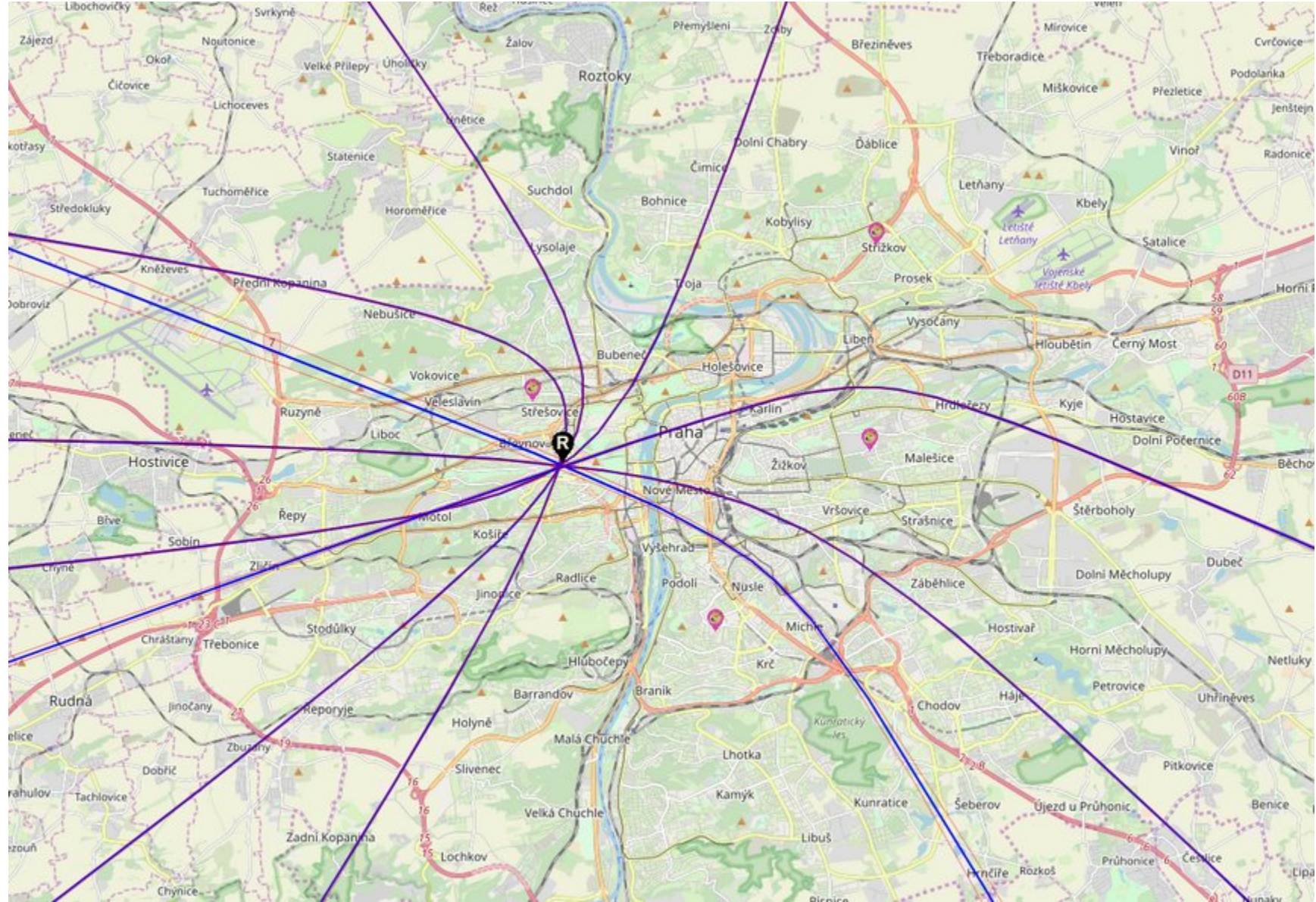


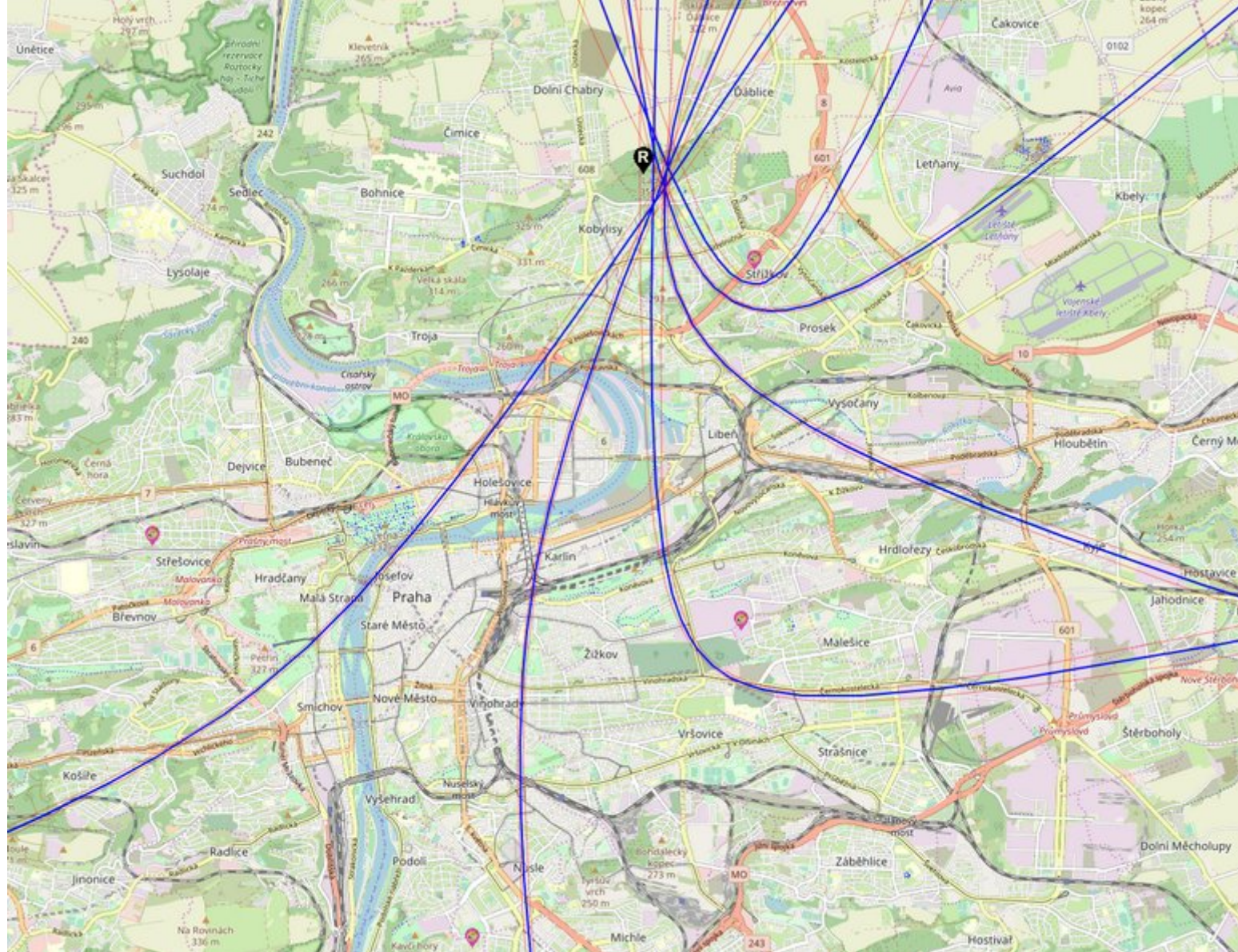


barva = abs(dot(bloček z přijímače 1, bloček z přijímače 2 posunutý o offset))



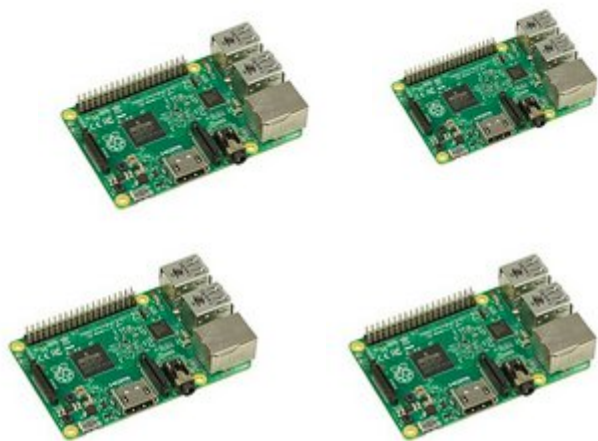
- Odhadneme, že  $\Delta t$  je 66 samplů, což při vzorkování našeho rádia 2.25 MHz = 8.8 km
- Vlezeme na ctu.cz a ty vysílače tam najdeme
- Změříme na mapě kolik to jako mělo vyjít
- A ono je to správně!





# Sekundární radar na obecné signály

- Jo a celé to běželo na clusteru ze 4 RaspberryPi a rtl-sdr :-P
  - (obhájeno a oceněno jako diplomka 2019)



# Sekundární radar na mírně nespolupracující letadla

- Vojenská letadla na misi vypnou ADS-B
- Letadlo má palubní radar, vysílačku...
  - a další zdroje signálu které mi nechtějí říct
- Udělat tohle
- Komplikace:
  - radary na různých frekvencích, mikrovlny (=lepší přijímač než rtl-sdr)
  - radary jen chvíli
  - vysílačky nízký bandwidth
  - komunikace jen nahoru s družicí
- Dělá ERA (Věra) <https://www.era.aero/>

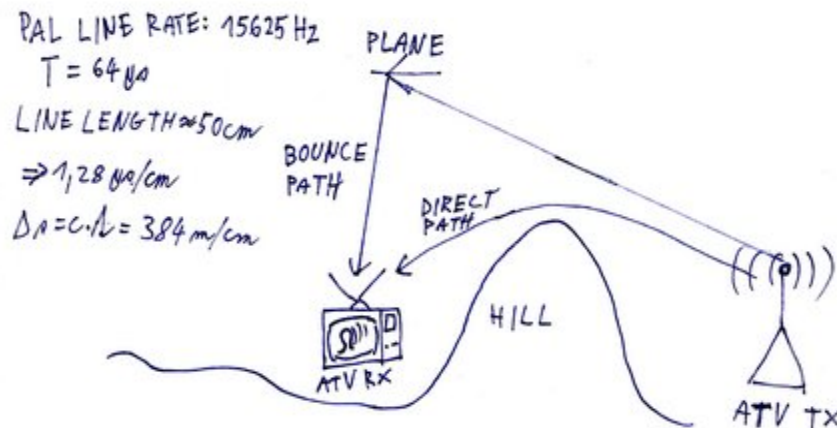
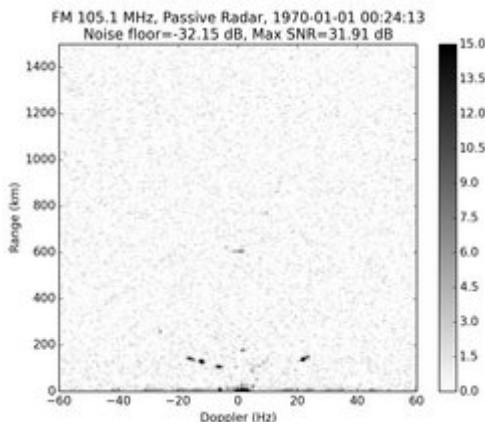


# Sekundární radar na hodně nespolupracující letadla

- Letadlo udržuje rádiové ticho
- Bonus: letadlo je stealth
- ...analogová televize(?!)



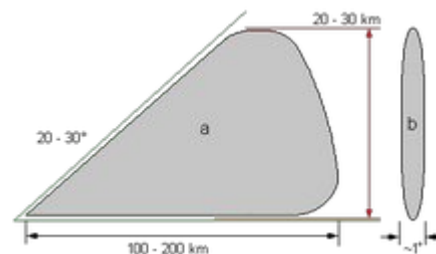
- Typicky dvě směrové antény (direct + surveillance)
- Extrémní dynamika
- Falešné cíle kvůli Doppleru
- DVB-T2 SFN (mnoho vysílačů přes sebe)
- Složitě
- Hustě



- <http://kaira.sgo.fi/2013/09/passive-radar-with-16-dual-coherent.html>

# (Typické) aktivní radary

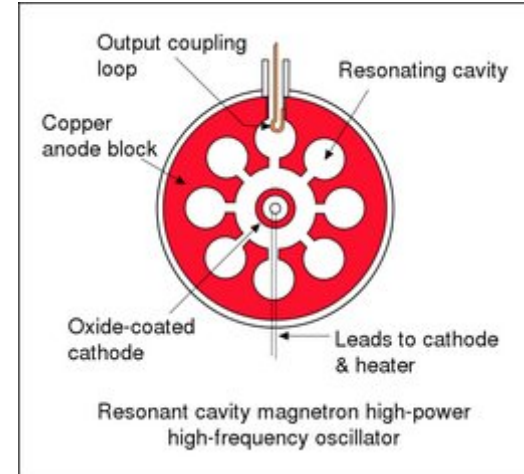
- Velká anténa (metry)
- Fan/pencil beam
  - letadla / počasí / počasí s plochou dráhou letu
- 2-10 GHz
- Pulzní
- kW až MW peak power
  
- Letadla
- Počasí





# Vysílač

- Chceme stovky W průměrný výkon
  - představa: abychom se spolehlivě dovolali na 200km
- Magnetron
  - elektronka
  - výkonový oscilátor
  - dutiny, přivede se napětí, elektrony se stáčí v mag. poli, osciluje
  - nemedulovaná nosná
  - typický provoz 1 $\mu$ s TX, 1ms RX
    - pulse (TX) length = rozlišení, RX length = dosah
      - 1ms = 300km = 150km dosah (vlna letí tam a zpět)
  - $\rightarrow$  střída 1/1000, pro 300W average power chceme 300kW peak
  - např. 300kW = 30kV \* 30A (účinnost ~30%)
  - IGBT spínač 1kV \* 1kA a trafo 1:30
  - pain provozovat (HV, výkony)
  - křehké
  - opotřebování
- Klystron: výkonový zesilovač na bázi urychlovače elektronů
  - ještě horší na provoz, ale super signál (když funguje)



# Vysílač – solid-state (tranzistorový)

- Tranzistor  $\sim 400\text{W}$ , kombinace několika  $\rightarrow$  pár kW
- Nižší špičkový výkon
  - dlouhá pseudonáhodná sekvence a její hledání v přijatém signálu
    - a.k.a. pulse compression, „spread spectrum“ (znáte z telco)
- $250\text{kW magnetron} * 1\mu\text{s} = 0.25\text{J/pulz}$
- $2.5\text{kW solid-state} * 1\mu\text{s} * 100$  pseudonáhodných „bitů“ =  $0.25\text{J/pulz}$ 
  - v praxi correlation gain  $< 1$ , ale zase magnetron má hnusné spektrum a ztráty
- Bonus třeba u nás: montáž přímo na anténu
  - vyplácet libovolně mnoho času povídáním o tom jak je to skvělé

# Jak to postavit

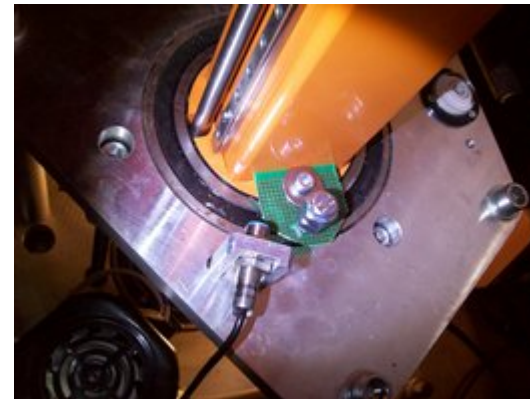
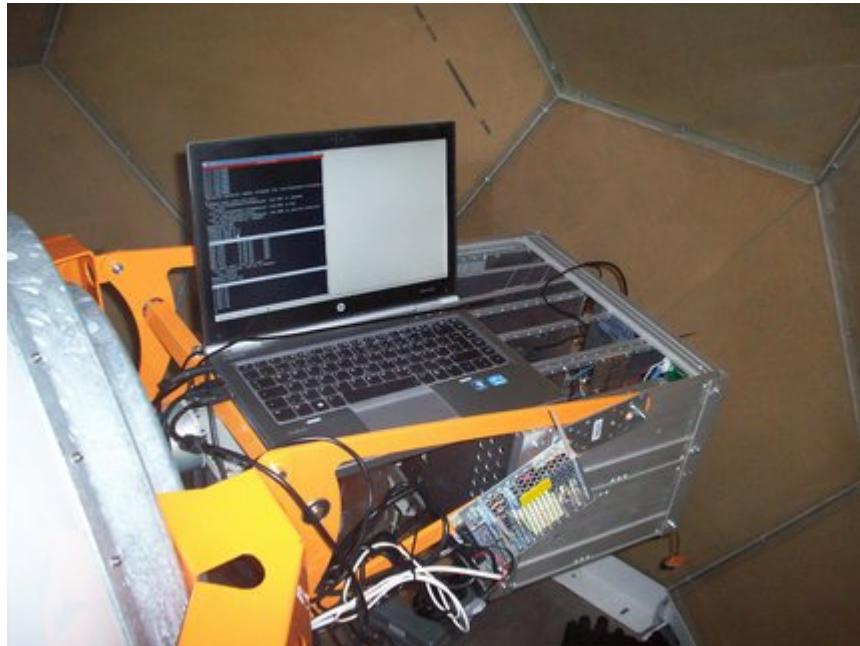
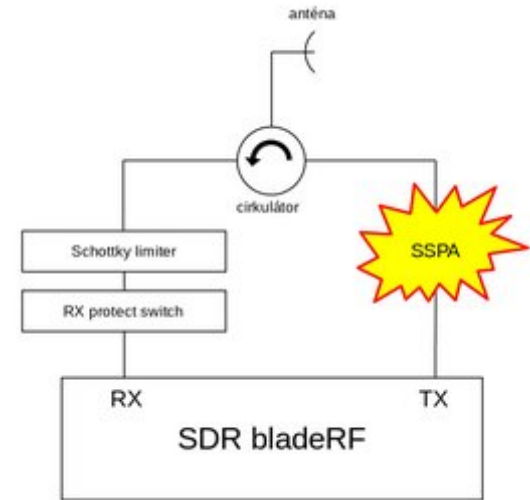
- OK, slíbil jsem DIY

From Jan Hrach <jan.hrach@meteopress.cz> ★  
Subject **Wifi anténa**  
To Jan Jirous <jan@jirous.com> ★

**JIROUS ANTÉNY**  
BEZPEČÍ PRO VAŠE VLNY

Dobrý den,  
objednáváme úplně nejvíc největší anténu na 5.6GHz.

S pozdravem,  
Jan Hrach



- problémy viz InstallFest 2022, SDR viz Smršť 2022

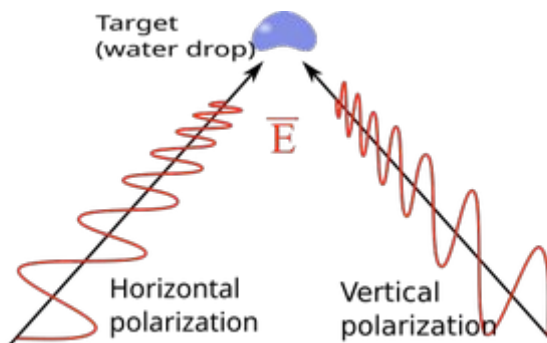
# Hejt na trh se SSPA

- Hotové moduly: drahé, neopravitelné, dlouhé dodání
  - Tranzistory: exportní povolení dle stavu války
  - Zapojení tranzistorů: defaultně otevřené
  - Kombinace výkonu: RF magie
- 
- MP-SSPA, thx Vojta Jeník a Milan OK2MMO



# Misc. a inženýrské problémy

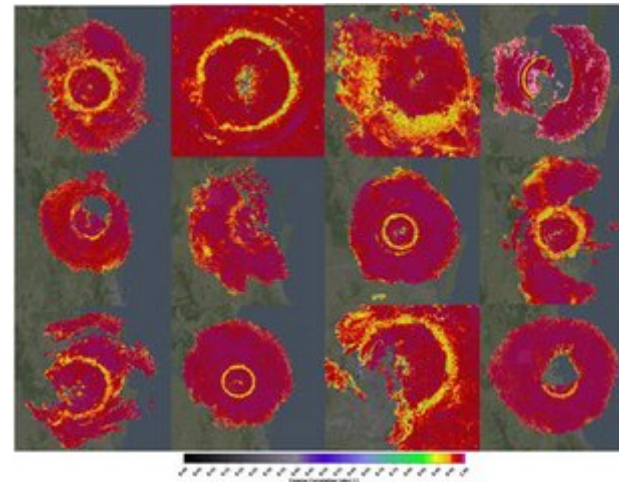
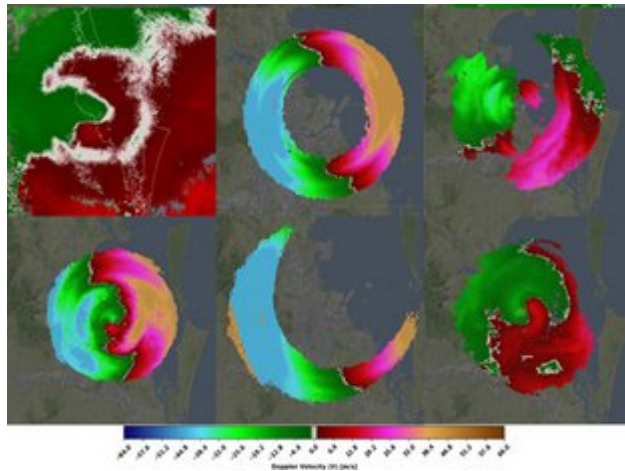
- Dvojitá polarizace

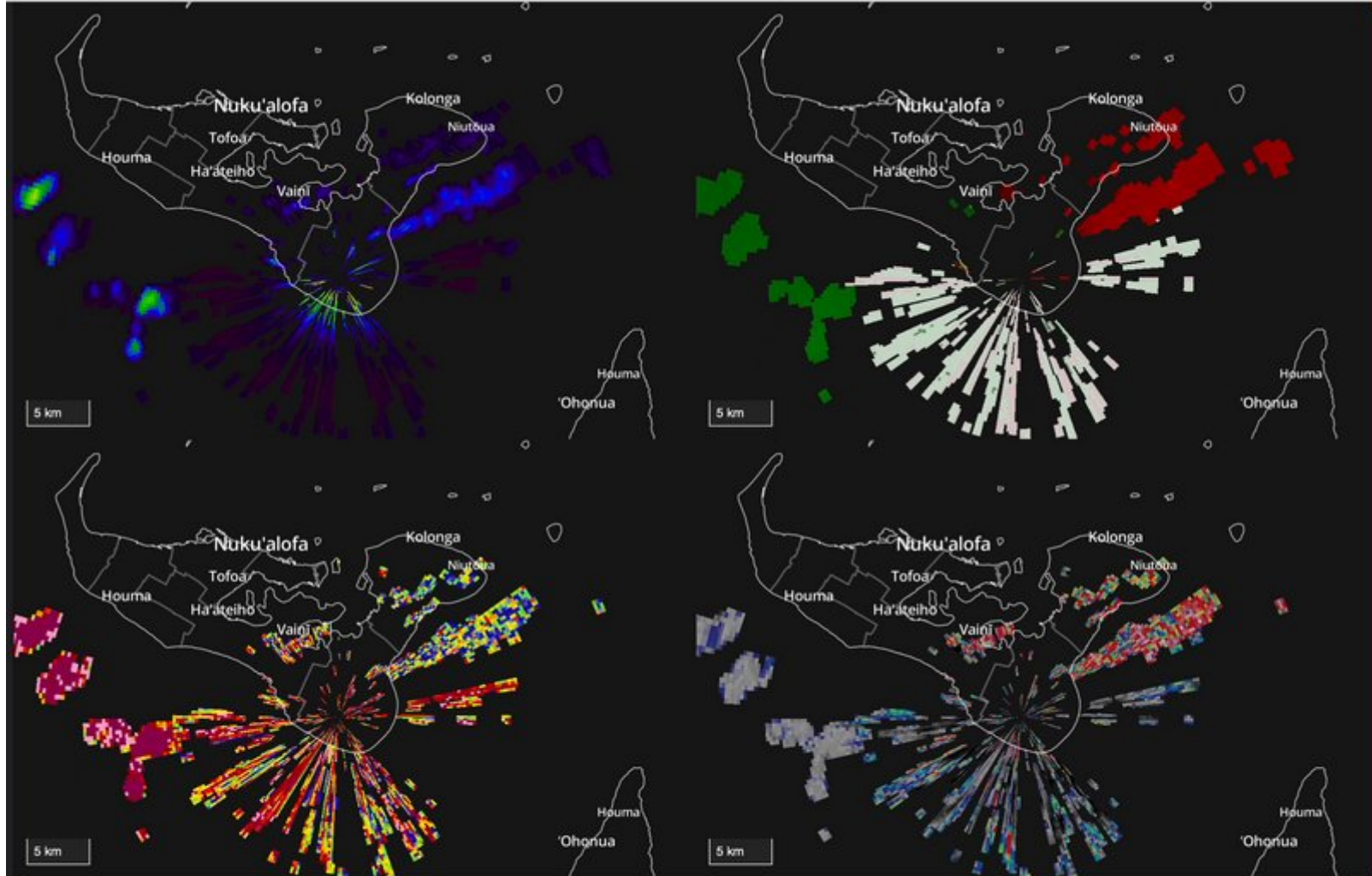


- SW – celé to tak nějak musí fungovat (točení, vyslání pulzu, přijetí dat, zpracování)
- Kvalita vysílaného a přijímaného signálu
  - šum
  - citlivý zesilovač vs. kW výkon vedle
  - dynamický rozsah
  - ASP tady nevybrali tak InstallFest 2025? :)

# Zpracování signálu radaru

- Korelace, částečná korelace pro blízké cíle
- Plnění range-azimuth (fast time/slow time) polí
  - Ukázat: pole pro jednu polarizaci, Z, V, obrázky pro W next slide, pole pro druhou polarizaci
  - vyplácet libovolně času vysvětlováním KDP
  - identifikace cílů (u nás teda hydrometeorů, požáry, hmyz, chaff)

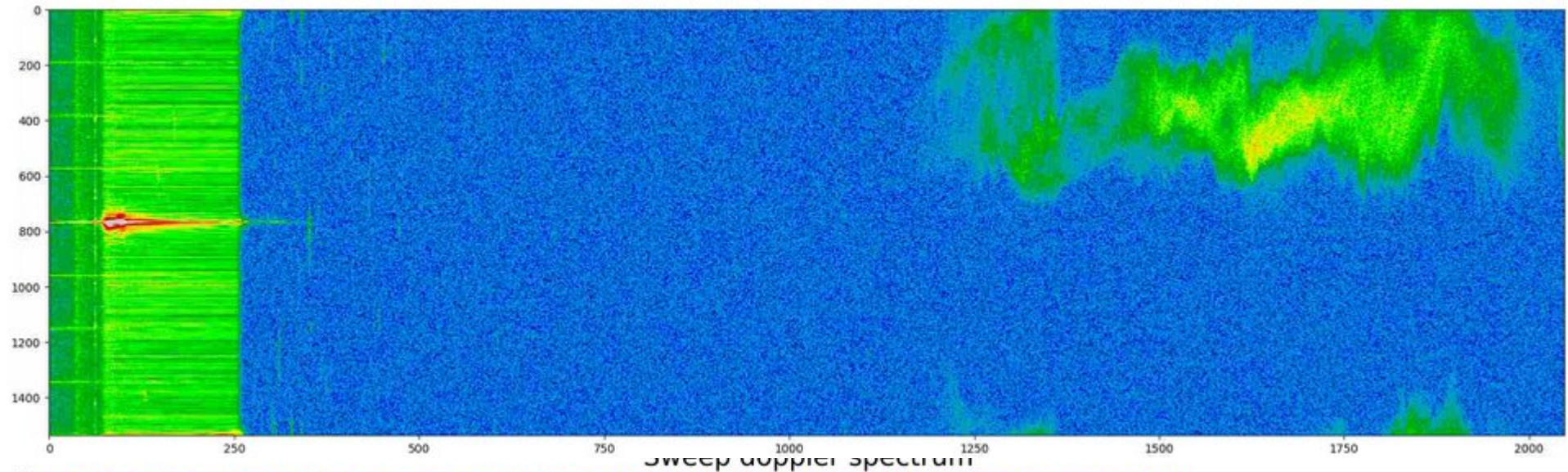




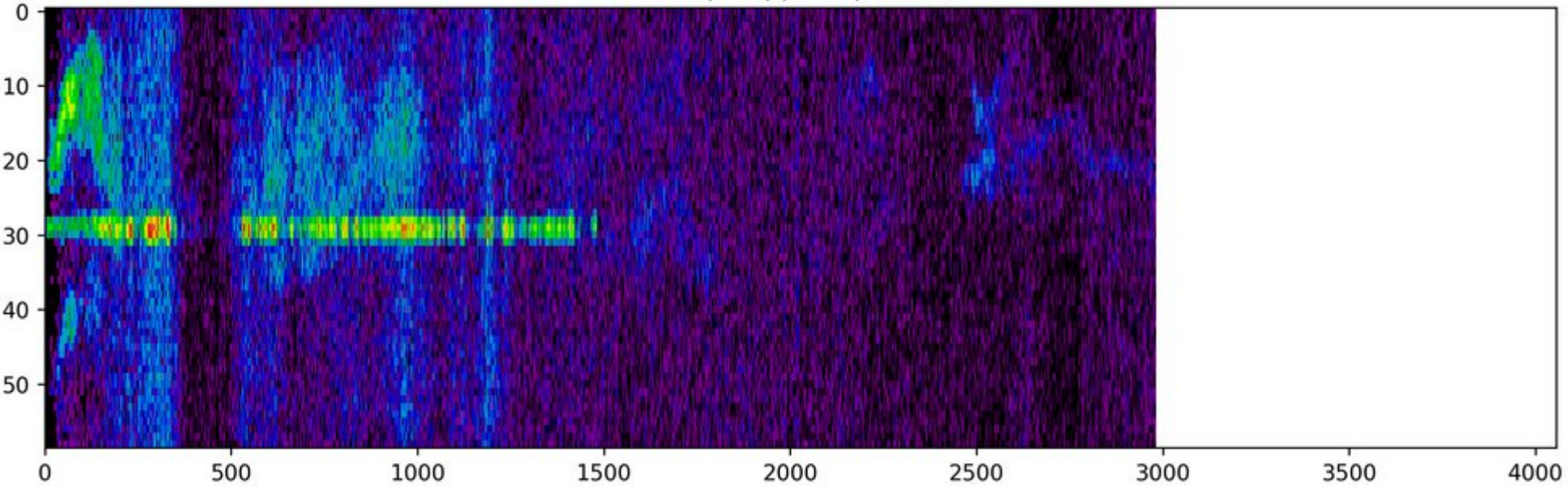
Layer ● distance: - height: - azimuth: - range: 325 km elevation: 1° PRF: 390 / 520 Hz range bin: 250 m pulse: 94 μs rpm: 3.33

Navigation and control icons: zoom in, zoom out, Reset, map, edit, back, delete, share, and other interface elements.

2024-08-06 14:54:52



sweep doppler spectrum





2024-10-18\_09-28-12

Max colorscale value: 20

Full span

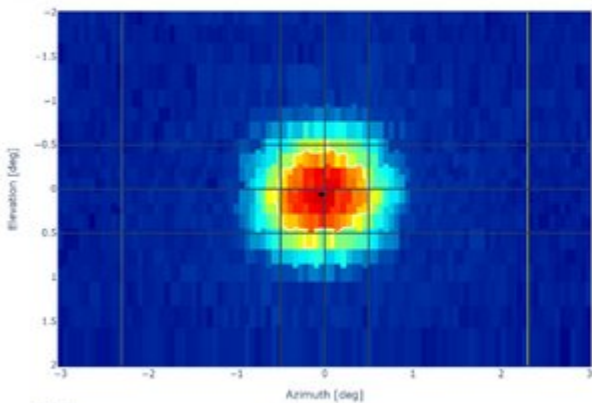
Sun finder mode

Suncal 2024-10-18\_09-28-12

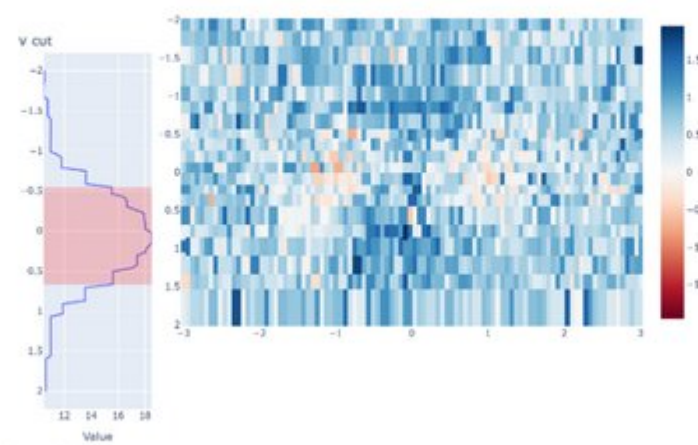
{'body': 'sun', 'direction': 'up', 'radar\_name': 'radar-ghana', 'target\_az': '157.9', 'target\_el': '27.8', 'func': 'block\_min', 'rsgain1': None, 'rsgain2': None, 'comment': ''}

### Channel 1

Space median 9.9 q25 9.7 sun 17.7/18.5 SNR 7.9/8.6/8.8  
Adjust: north\_offset 50.80 → 50.84, zero\_elevation 6.70 → 6.64



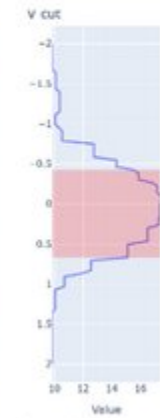
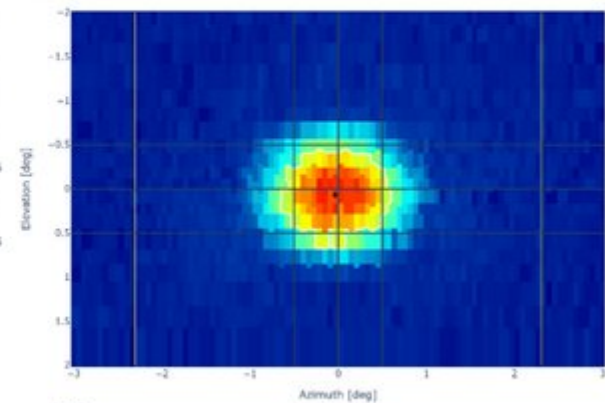
### ZDR



hspan: -0.52, 0.52  
vspan: -0.55, 0.67  
max: ele 0.02, azim -0.09

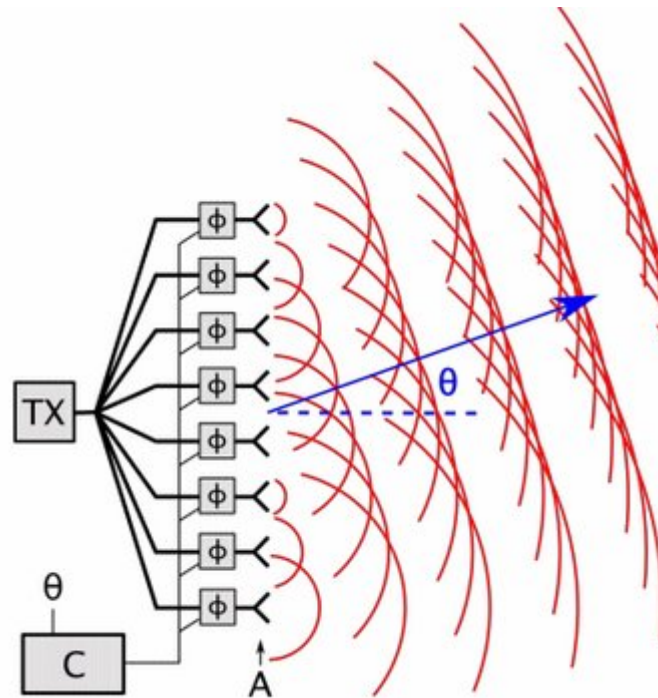
### Channel 2

Space median 9.2 q25 9.1 sun 17.1/17.4 SNR 7.9/8.2/8.3  
Adjust: north\_offset 50.80 → 50.83, zero\_elevation 6.70 → 6.63



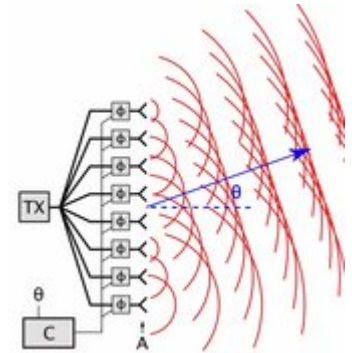
hspan: -0.64, 0.58  
vspan: -0.42, 0.67  
max: ele -0.10, azim -0.2

# Elektronicky skenované antény



# Elektronicky skenované antény

- Mechanické skenování:
  - pomalé prohledávání prostoru (řeší PESA)
  - mechanika (vítr, mráz) (řeší PESA)
  - vysílání a příjem mnoha směrů současně (řeší AESA)
- Pasivně elektronicky skenované pole (PESA)
  - programovatelné analogové fázovače
  - Starlink terminal (a samozřejmě spouta letadlových a vojenských radarů)
  - levné
- Aktivně elektronicky skenované pole (AESA)
  - každý element kompletně vlastní vysílač/přijímač a elektronika
  - “stop-and-stare”
  - $O(n^2)$  \$\$\$



Mechanical radar  
search pattern

VS

AESA radar  
search pattern



# Odkazy

- Moje:
  - <https://www.youtube.com/watch?v=QD0uz-fPz8Y> - InstallFest 2020 – pasivní radar
  - <https://www.youtube.com/watch?v=4MdeKS9rCDc> - InstallFest 2022 – aktivní radar
  - <https://www.youtube.com/watch?v=8-xhA6WkWC8> - Smršť 2022 – zpracování rádiových signálů na počítači
- Literatura:
  - Bezoušek, Šedivý: Radarová technika (skripta 2004)
  - <https://www.radartutorial.eu/index.en.html>
  - Miroslav Kasal: Slabé signály (modrá kniha s parabolou, 2023)
- <https://www.meteopress.com/> - chcete taky dělat tyhle věci?

