

Radio logicielle 2/4 : corrélations pour la mesure de temps, application aux SDR-RADAR

J.-M Friedt

FEMTO-ST/département temps-fréquence, Besançon

`jmfriedt@femto-st.fr`

transparents à `jmfriedt.free.fr`

16 janvier 2025

Principe du RADAR

RADAR : RAdio-frequency Detection And Ranging

- ▶ émission d'un signal électromagnétique réfléchi par des cibles dont on veut connaître la distance (temps de vol) et la vitesse (Doppler)
- ▶ résolution temporelle de la mesure $dt \simeq 1/B \Rightarrow dR \simeq \frac{c}{2B}$
- ▶ diverses solutions pour atteindre la bande passante B
 - ▶ impulsion brève (impulsionnel)
 - ▶ balayage de fréquence et transformée de Fourier inverse (FSCW)
 - ▶ balayage de fréquence continue linéaire et mélange (FMCW) – convertit un signal radiofréquence balayant Δf en un temps Δt en un battement¹ audiofréquence $\delta f = \frac{\Delta f}{\Delta t} \delta t$ pour une cible à δt
 - ▶ **émission d'une séquence sans répétition** étalée sur B (bruit)

1. sous réserve que la fréquence émise évolue **linéairement** avec le temps de balayage

Corrélation pour la recherche d'un motif retardé

Un motif $p(t)$ est reçu, retardé de τ , dans un signal bruité $s(t) = p(t + \tau) + n(t)$

Filtre adapté : corrélation de $s(t)$ avec $p(t)$

$$\text{xcorr}(s, p)(\tau) = \int s(t) \cdot p^*(t + \tau) dt \quad \xrightarrow{\substack{\text{temps} \\ \text{discret}}} \sum_k s_k \cdot p_{k+n}^*$$

- ▶ Recherche du retard τ pour lequel le motif émis est reproduit après avoir été rétrodiffusé par la cible : $\text{argmax}(\text{xcorr}(s, p))$
- ▶ linéarité de la corrélation :
 - ▶ $\text{xcorr}(ax + by, p) = a \cdot \text{xcorr}(x, p) + b \cdot \text{xcorr}(y, p)$
 - ▶ $\text{xcorr}(x \exp(j\varphi), p) = \exp(j\varphi) \text{xcorr}(x, p)$
- ▶ Algorithme de complexité N^2 , mais

$$FT(\text{xcorr}(s, p)) = FT(s) \cdot FT^*(p)$$

devient de complexité $N \cdot \log_2(N)$ grâce à la FFT

Principe du RADAR passif

- ▶ Une source de signaux radiofréquence *non-coopérative* illumine la scène
- ▶ Une antenne de *référence* observe le signal direct de la source
- ▶ Une antenne de *surveillance* observe les signaux réfléchis par les cibles
- ▶ Cible statique : retard pur
- ▶ Cible mobile : retard + décalage Doppler

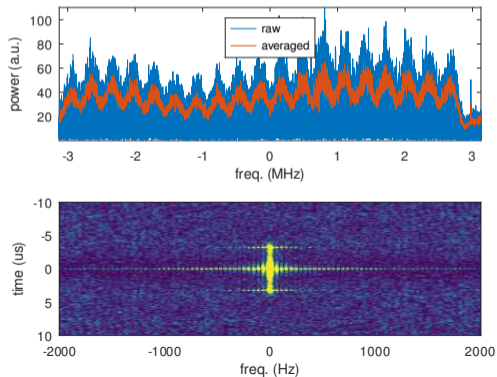
Fonction d'ambiguïté :

$$A_{\text{ambiguïté}} F_{\text{unction}}(\tau, \omega) = \int s(t) \cdot s^*(t + \tau) \cdot \exp(j\omega t) dt$$

pour identifier les structures internes aux signal qui se répètent dans le temps (τ) ou en fréquence (ω)

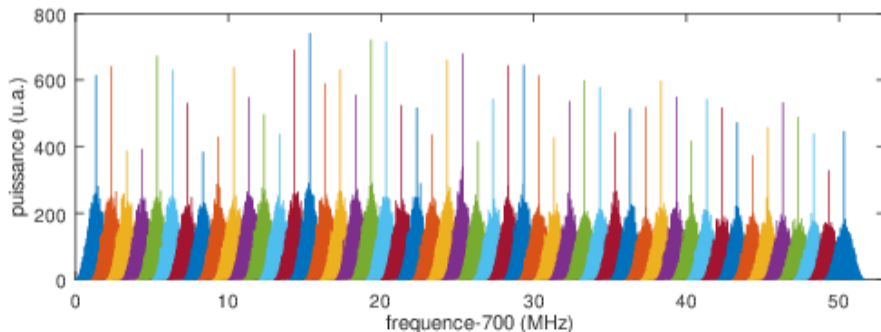
```
pkg load signal
fs=6.25e6;
N=length(x);
% freq=linspace(-fs/2, fs/2-fs/N, N);
temps=[0:length(x)-1]'/fs;
m=1;
freq0=-2e3:10:2e3
for freq=freq0
    nco=exp(j*2*pi*freq*temps);
    sol(:,m)=abs(xcorr(x,x.*nco,200));
    m=m+1;
end
imagesc(freq0, [-199:199]/6.25, sol, [0 9])
```

Exemple : 2,4 GHz Wi-Fi (802.11b/g)
3,2 μ s A/R=480 m

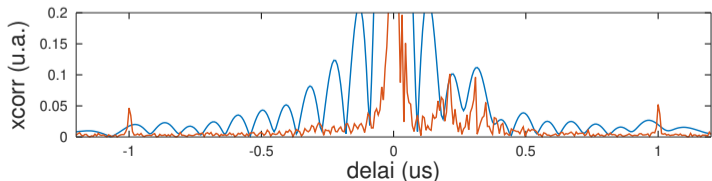
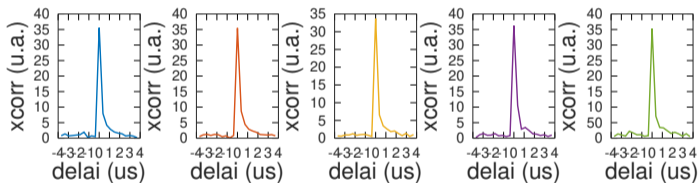
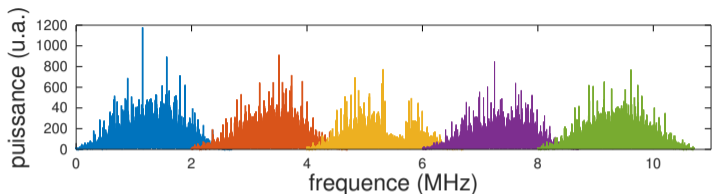


Mise en œuvre sur SDR

- ▶ Flux interlacé entre référence et mesure
- ▶ Pas nécessairement de flux continu, peut être un flux intermittent ...
- ▶ ... tant que la phase est conservée d'une mesure à l'autre \Rightarrow UDP ou ZeroMQ-Pub(lish)
- ▶ Extension de la fréquence mesurée : accumulation de spectre (*frequency stacking*) pour améliorer la résolution en distance (rappel : calcul de la corrélation par produit de transformées de Fourier !)
- ▶ Compatible avec le déplacement des antennes réceptrices pour la résolution azimutale (SAR)



Amélioration de la résolution en distance par accumulation de spectres



- ▶ Chaque FFT sur N points s'étend de $-f_s/2$ à $+f_s/2 - f_s/N$
- ▶ Créer un vecteur de $(P \times N)$ points
- ▶ Accumuler les spectres dans les emplacements $[n \times N : (n + 1) \times N]$, $n \in \mathbb{N}$ pour la voie de référence et pour la voie de mesure
- ▶ produit du premier spectre par le complexe conjugué du second
- ▶ iFFT du résultat produit un signal de résolution spectrale $c/(2B)$ avec $B = P \times f_s$

Mise en pratique de la corrélation : GNU Radio

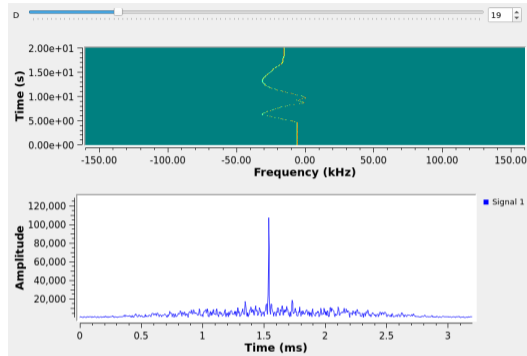
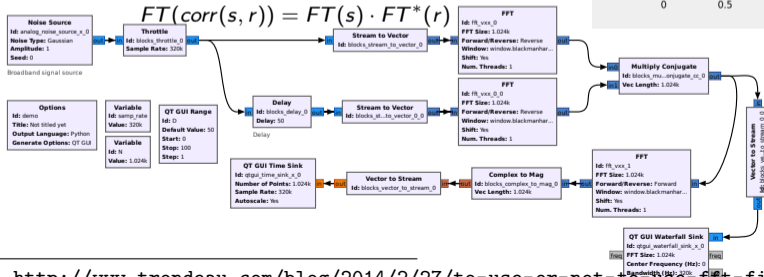
De la convolution à la corrélation :

- ▶ Convolution : $conv(s, r)(\tau) = \int s(t)r(\tau - t)dt$
- ▶ Mise en œuvre pratique de la convolution pour un “grand” nombre d'échantillons²

$$FT(conv(s, r)) = FT(s) \cdot FT(r)$$

- ▶ Correlation : $corr(s, r)(\tau) = \int s(t)r(t + \tau)dt$
- ▶ Convolution → corrélation : time reversal
- ▶ since $\exp(j\omega t)^* = \exp(-j\omega t)$, we conclude

$$FT(corr(s, r)) = FT(s) \cdot FT^*(r)$$

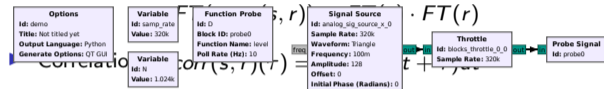


Mise en pratique de la corrélation : GNU Radio

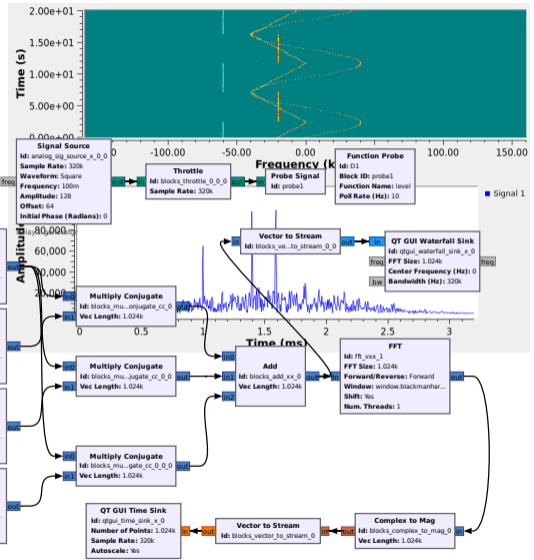
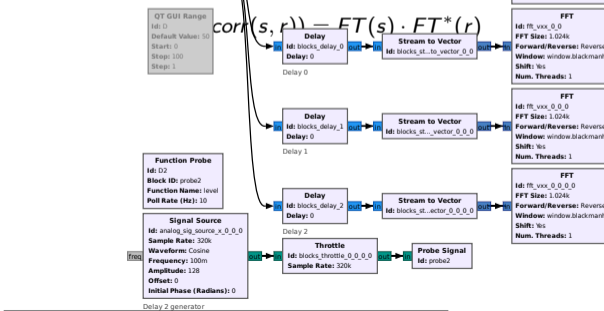
De la convolution à la corrélation :

► Convolution : $conv(s, r)(\tau) = \int s(t)r(\tau - t)dt$

► Mise en œuvre pratique de la convolution pour un "grand" nombre d'échantillons²

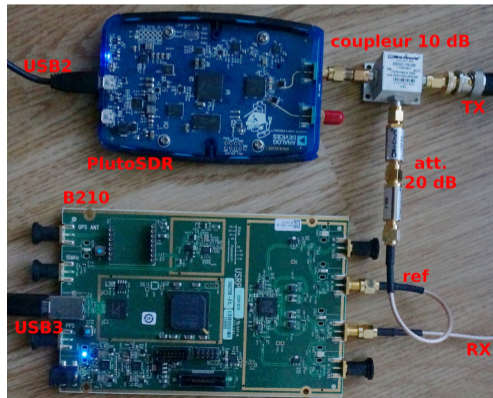
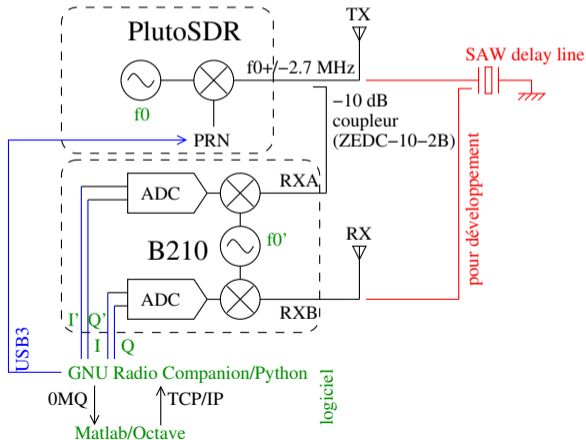


Correlation : time reversal
 $exp(j\omega t) = exp(-j\omega t)$, we conclude



Principe du SDR-RADAR actif

- ▶ Très difficile de synchroniser émission et réception (nécessite de manipuler le flux dans le FPGA et de maîtriser les latences du *frontend* RF)
 - ▶ Nombre de récepteurs SDR proposent deux entrées cohérentes (cadencées par le même oscillateur local)
- ⇒ coupler le signal émis vers une voie de réception de référence (cf RADAR passif)



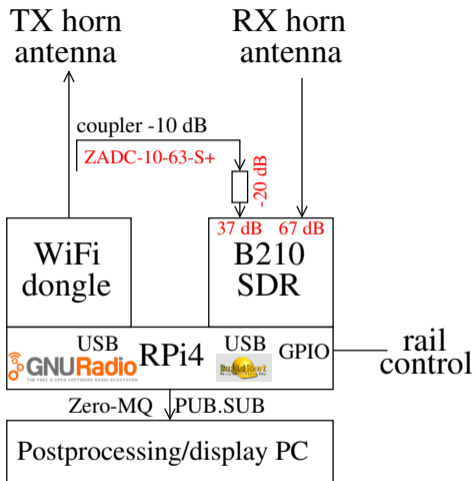
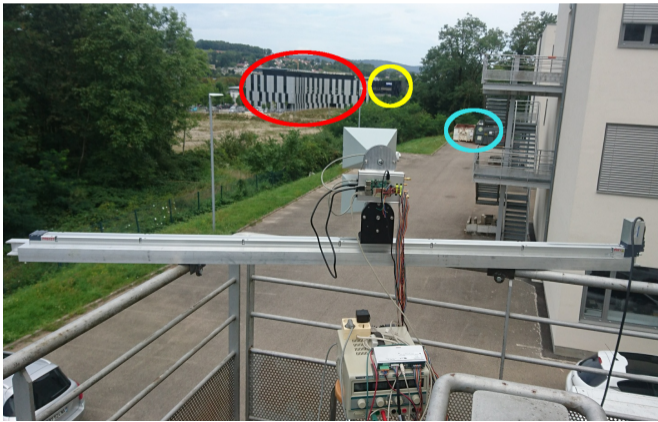
Paramètres

- ▶ Longueur de corrélation détermine la distance de la cible la plus lointaine \simeq Pulse Repetition Interval (**PRI**) du RADAR impulsionnel
- ▶ Ambiguïté si un cible se trouve plus loins que $c \cdot PRI/2$ puisque deux impulsions se propagent en même temps
- ▶ Cependant, grand PRI réduit le taux de rafraîchissement de l'information
- ▶ **Hypothèse** : Doppler constant pendant le temps d'intégration
- ▶ Le pas de fréquence est "**petit**" devant l'inverse de la durée d'intégration ($\langle \sin \rangle = \langle \cos \rangle = 0$)
- ▶ Au contraire, grande résolution en vitesse nécessite observations longues
- ▶ ISAR³ : recherche des mouvements au sein de la cible, après avoir retranché son mouvement moyen, pour en déterminer la forme avec une résolution qui n'est pas limitée par la résolution en distance

3. *Inverse Synthetic Aperture RADAR*, ne pas confondre avec *InSAR Interferometric Synthetic Aperture RADAR*

Compléter distance par azimuth : cas du MIMO et SAR

- ▶ **Diversité spatiale** pour ajouter la direction d'arrivée (azimuth)
- ▶ Codes orthogonaux pour séparer les sources reçues par les récepteurs (MIMO)
- ▶ Déplacer séquentiellement la position de la mesure
- ▶ si TX et RX bougent en même temps : pas de déplacement est $\leq \lambda/4$
- ▶ si TX statique et RX bouge : pas de déplacement est $\leq \lambda/2$

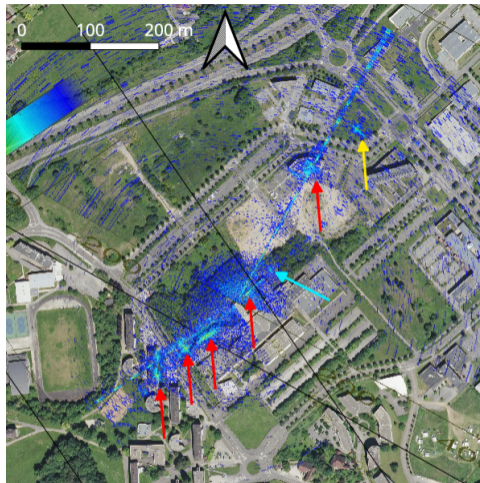
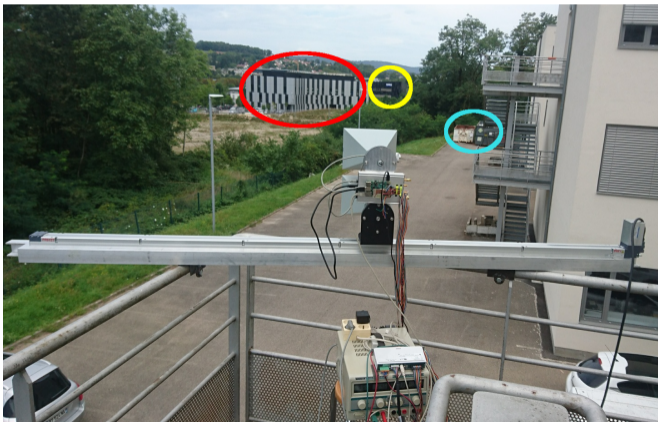


Exemple :

<https://github.com/jmfriedt/SDR-GB-SAR/>

Compléter distance par azimuth : cas du MIMO et SAR

- ▶ **Diversité spatiale** pour ajouter la direction d'arrivée (azimuth)
- ▶ Codes orthogonaux pour séparer les sources reçues par les récepteurs (MIMO)
- ▶ Déplacer séquentiellement la position de la mesure
- ▶ si TX et RX bougent en même temps : pas de déplacement est $\leq \lambda/4$
- ▶ si TX statique et RX bouge : pas de déplacement est $\leq \lambda/2$

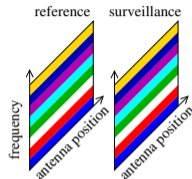


Exemple :

<https://github.com/jmfriedt/SDR-GB-SAR/>

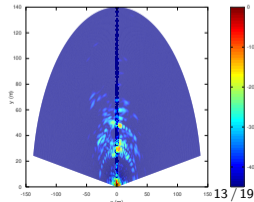
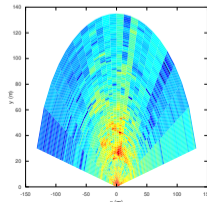
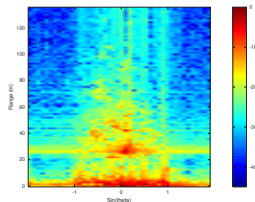
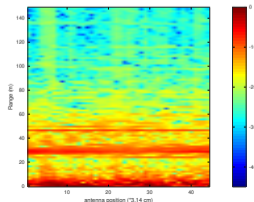
Déplacement de l'antenne pour ajouter résolution en azimuth

- ▶ Un émetteur et un récepteur = une ellipse de positions de cibles possibles (cercle si émetteur et récepteur colocalisés)
- ▶ Afin d'ajouter la résolution en azimuth : déplacer récepteur, émetteur ou les deux
- ▶ Chaque déplacement se traduit par une phase additionnelle : $\varphi = N \times d/\lambda \sin \vartheta$
- ▶ Matrice de mesures {temps, position antenne} → compression en azimuth & distance
- ▶ Passage à {fréquence, vecteur d'onde} par FFT 2D



$$A(x) \exp(j2\pi \frac{nd \sin \vartheta}{\lambda}) \xrightarrow{\text{iFFT}} d \sin \vartheta / \lambda$$

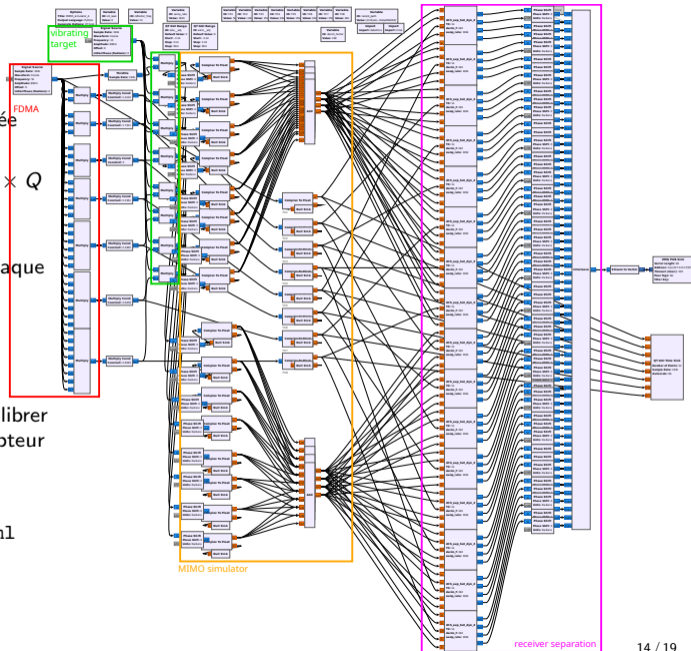
- ▶ produit des matrices {fréquence, vecteur d'onde} pour effectuer la corrélation selon l'axe du temps
- ▶ Projection $\{R, \sin \vartheta\} \rightarrow (x, y)$ par "migration"



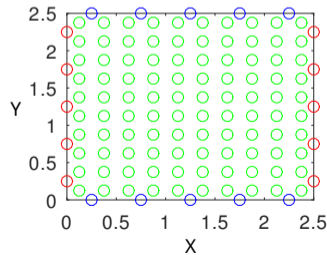
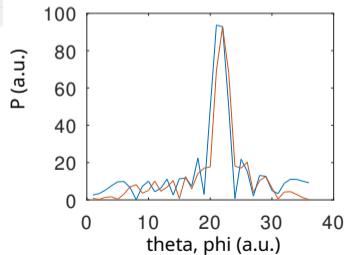
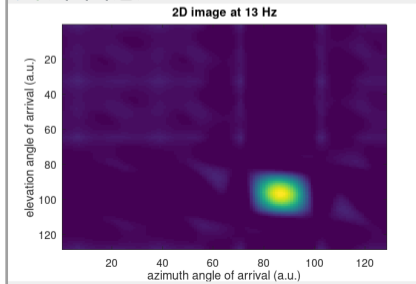
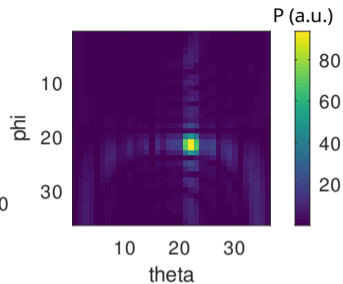
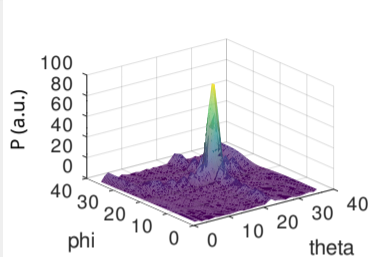
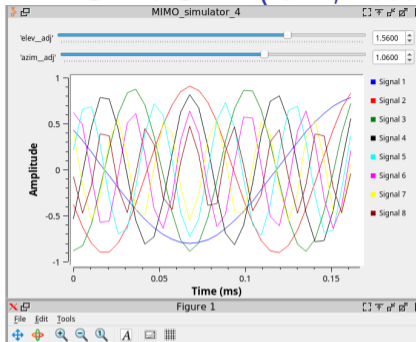
MIMO v.s SAR

- ▶ SAR : résolution azimutale uniquement déterminée par la longueur du rail/chemin parcouru
- ▶ MIMO : P émetteurs et Q récepteurs forment $P \times Q$ transceivers virtuels placés au milieu du couple émetteur-récepteur^a
- ▶ chaque émetteur MIMO doit être identifié par chaque récepteur qui reçoit la somme des réflexions \Rightarrow CDMA, FDMA ...
- ▶ Avantage du MIMO v.s SAR : rapide, pas de déplacement
- ▶ Inconvénient du MIMO v.s SAR : nécessite de calibrer le déphasage de chaque émetteur et chaque récepteur individuellement

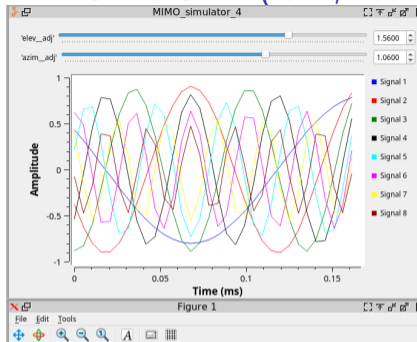
a. <https://hforsten.com/mimo-radar-antenna-arrays.html>



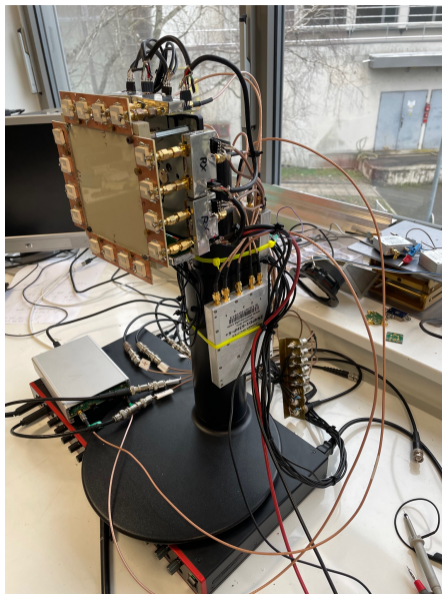
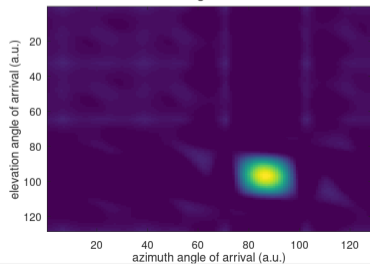
MIMO v.s SAR (CW, réception par carte son → GNU Radio)



MIMO v.s SAR (CW, réception par carte son → GNU Radio)



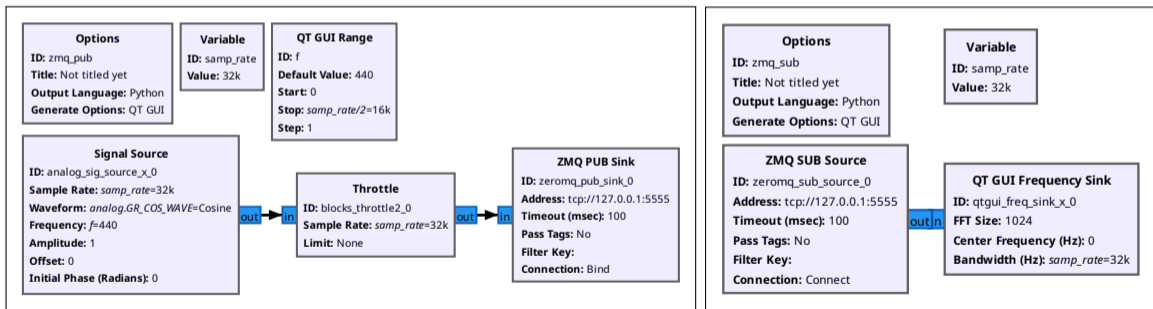
2D image at 13 Hz



Zero-MQ Publish-Subscribe

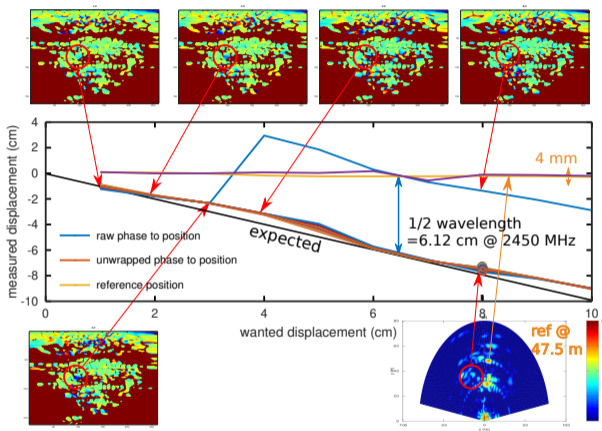
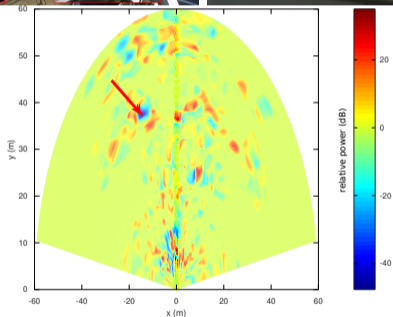
Problème : ne **pas arrêter** le flux de données entre deux positions des antennes

- ▶ Zero-MQ : bibliothèque de communication supportée par de nombreux langages (Python, C(++), Octave/Matlab ...)
- ▶ Publish-Subscribe (comme UDP) : mode datagram (perte de données en l'absence de récepteur)
- ▶ Request-Reply (comme TCP) : mode connecté (garantit l'intégrité des échanges)



- ▶ Si traitement \gg transfert : fermer et ouvrir la socket pour vider le tampon (Octave)

Exploitation de la phase : InSAR (*Interferometric SAR*)

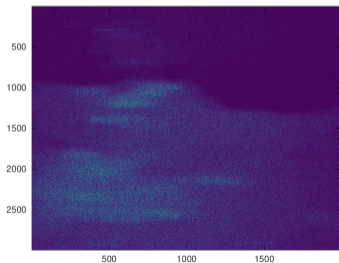


- Identification du pixel dans lequel se trouve une cible
- Exploitation de la phase de la corrélation dans ce pixel après compression en azimuth et en distance – aucun degré de liberté, $\delta d = \frac{\delta\varphi}{2\pi} \lambda$ mais incertitude modulo λ

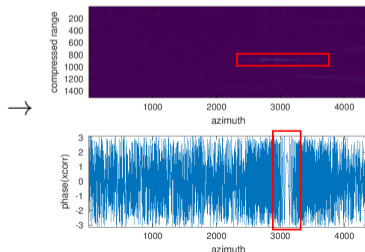
Conclusion SDR-RADAR

- ▶ La radio logicielle comme outil de prototypage de diverses architectures de RADAR
- ▶ RADAR passif : uniquement en écoute, pas d'émission
- ▶ RADAR actif : utilisation de sources certifiées (e.g. émetteur Wi-Fi) pour une mise en œuvre discrète
- ▶ Enregistrement des mesures pour **post-traitement** : pas de contrainte sur la vitesse d'exécution des algorithmes, permet de retraiter avec autant d'algorithmes que nécessaire les mêmes mesures
- ▶ Exemple pratique : mesures brutes de niveau 0 de Sentinel-1 (RADAR spatioporté en bande C) ⁴ disponibles à <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>

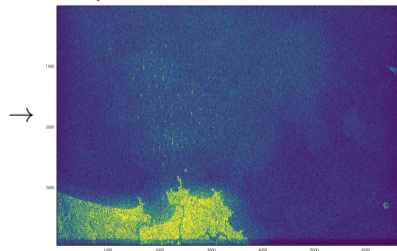
Données brutes



Compression en distance



Compression en azimuth



4. données IQ acquises par ESA : https://github.com/jmfriedt/sentinel1_level0