Réception radar avec un RTL SDR

Angel Vilaseca HB99SLV *(avilaseca@bluewin.ch)*

Le récepteur SDR (Software Defined Radio) dont il est question dans le présent article coûte une dizaine de francs sur Ebay. On l'appelle RTL SDR, parce que le chipset sur lequel il est basé a été produit par la maison Realtek (RTL) de Taiwan. On peut connecter le RTL SDR a un ordinateur de type ordinaire, sur lequel tourne un programme disponible gratuitement, qui s'appelle SDR# ou SDR sharp. Ce récepteur et ce programme sont disponibles depuis plusieurs années. J'ai réalisé mes premiers essais en 2012. En faisant une recherche Google avec «RTL SDR», vous pouvez trouver une quantité d'informations, notamment sur le site RTL-SDR.com.

Avec une antenne de type courant, ce récepteur permet de capter une plage de fréquences entre 70 MHz et 1500 MHz. Le programme SDR sharp permet de démoduler tous les modes habituels: AM, FM large ou étroite, SSB, CW. SDR sharp présente sur son interface-utilisateur une analyse de spectre FFT qui peut être d'une finesse extrême, avec aussi une représentation en chute d'eau. C'est cette finesse d'analyse spectrale dont il est tiré parti dans l'application proposée dans cet article.

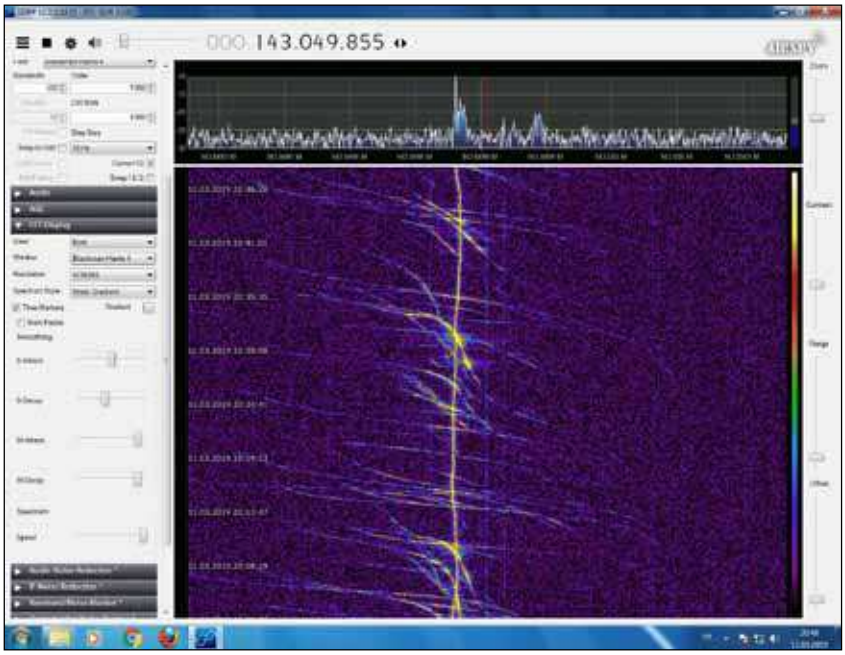

Fig. 1: L'écran SDR-Sharp

Je décris ci-dessous un type de réception SWL particulier, qui a ma connaissance, n'a encore jamais été décrit dans les publications radio-amateur. Il permet de fonctionner comme un radar, en détectant tous les avions qui passent dans le ciel entre l'émetteur, qui se trouve vers Dijon et mon QRA. Divers perfectionnements seraient possibles.

En utilisant une antenne omnidirectionnelle conçue pour le 2 mètres et un récepteur RTL SDR avec le software SDR Sharp, on peut recevoir ceci sur 143,050 MHz (***Fig. 1***).

Il s'agit du signal émis par GRAVES (ligne centrale), plus les échos générés par les avions. Ce qui est intéressant, c'est d'essayer d'interpréter cette image. D'abord un peu de théorie.

Le radar GRAVES

GRAVES (**G**rand **R**éseau ***A***dapté à la **VE**ille **S**patiale) est capable de détecter les satellites orbitant au-dessus de la France métropolitaine et situés à une altitude inférieure à 1'000 kilomètres. Il utilise un radar bistatique à balayage électronique et émission continue en bande VHF, sur 143,050 MHz, actif 24h/24h. Le système de réception est basé sur la détection Doppler et des calculs de traitement du signal effectués par un calculateur temps réel dédié. Il présente la particularité d'avoir le site d'émission dissocié du site de réception. En effet, le site d'émission (point rouge du haut sur ***Fig. 2***) 47° 20' 53" N, 5° 30' 54" E situé sur l'ancienne base aérienne de Broye-lès-Pesmes près de Dijon, est éloigné d'environ 400 km du site de réception (point rouge du bas, installé sur le plateau d'Albion 44° 04' 17" N; 5° 32' 05" E (2).

Mon QTH (***Fig. 2***) se trouve à Genève, proche de l'axe nord-sud du système GRAVES, mais GRAVES n'émet pas uniquement dans l'axe nord-sud, il émet de l'est à l'ouest, sur 180 degrés. Je puis donc compter sur une bonne réception, tout comme toute station qui se trouve au sud de l'émetteur, et même au nord. L'émetteur est puissant! GRAVES est intéressant pour le radio-amateur VHF aimant expérimenter. Il peut être utilisé comme balise pour tous les types d'expériences, par exemple

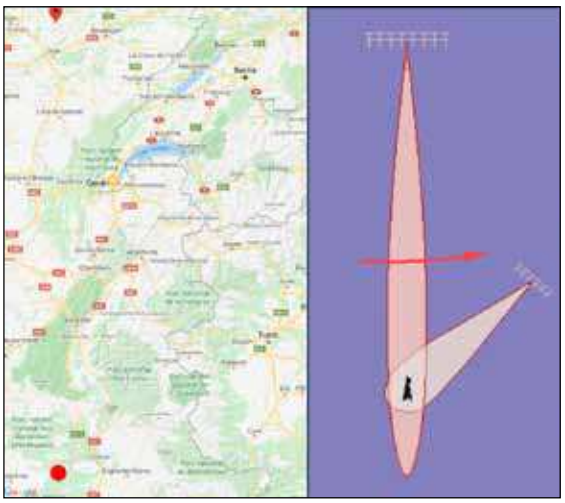

Fig. 2: Situation GRAVES par rapport à mon QTH à Genève

le Moonbounce, le meteorscatter, les études de propagation FAI, tropo, sporadique etc. Comme le radar fonctionne près de la bande de 144 MHz, l'équipement pour signaux faibles existant peut être utilisé tel quel.

Des échos lunaires peuvent être reçus lorsque la Lune se trouve dans la plage de balayage du radar, c'est-à-dire pendant une douzaine d'heures, avec seulement une petite yagi et un récepteur ssb. On raconte même que certains amateurs auraient réussi à capter ces échos avec une antenne discone.

L'antenne émettrice balaie en azimut en tournant son faisceau de 7,5 degrés toutes les 3,2 secondes. Cela se traduit par une fluctuation du signal, un QSB bien visible au niveau du récepteur.

Radar bistatique
Un radar bistatique est un radar dont l'émetteur et le récepteur sont séparés. La distance entre l'émetteur et le récepteur est de l'ordre de la distance théorique de la cible (3).

Dans le cas de GRAVES, avec une séparation de 400 km entre l'émetteur et le récepteur, les satellites orbitant à quelques centaines de kilomètres d'altitude seront bien visibles.

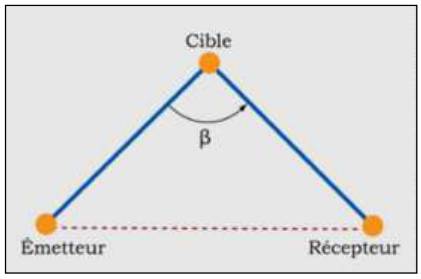

Fig. 3: L'l'angle bistatique

Mais ce n'est pas comme cela que nous allons utiliser GRAVES.

Dans certaines configurations, le radar bistatique - avec un angle bistatique de 180 degrés - peut fonctionner comme une barrière et détecter les cibles qui passent entre l'émetteur et le récepteur.

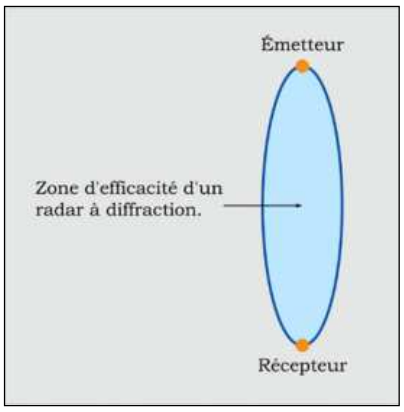

Fig. 4: Le radar à diffraction

Ceci est un cas particulier du radar bistatique que l'on nomme «radar à diffraction» en raison de son principe de fonctionnement qui veut que l'énergie transmise soit diffractée par la cible.

C'est ce type de fonctionnement que l'on utilise ici. La distance entre l'émetteur GRAVES et mon QRA est de 140 km. Les avions volent vers 11'000 mètres, donc l'angle Beta, l'angle bistatique est proche de 180 degrés.

Radar passif
Dans le cas d'un radar passif, il n'y a pas d'émetteur dédié. À la place, le récepteur utilise un émetteur d'opportunité - ne faisant pas partie de son système - et mesure la différence de marche (retard de phase) entre le signal qu'il reçoit directement de l'émetteur, et le signal réfléchi par la cible. Cette mesure permet de déterminer la «distance bistatique» de l'objet qui se présente sous form d'une ellipse, l'émetteur et le récepteur occupant respectivement les foyers de l'ellipse.

On peut déterminer la position de la cible simplement en calculant l'intersection de l'azimut (antenne directive) avec l'ellipse de la distance bistatique.

En plus de la distance bistatique, un radar passif permet de mesurer le décalage de fréquence de l'écho par effet Doppler La position de la cible étant connue, on peut alors calculer son cap et sa vitesse (1).

Dans mon système, l'antenne étant omnidirectionnelle, je ne peux pas mesurer l'azimut. La mesure du retard de phase serait possible théoriquement, mais très faible lorsqu'un avion se trouve proche de la ligne droite entre ma station et le QRA. En tout état de cause, SDR Sharp ne permet pas de faire une telle mesure. Une idée pour un nouveau développement?

Effet Doppler
Un radar Doppler est un radar qui utilise l'effet Doppler-Fizeau de l'écho réfléchi par une cible pour mesurer sa vitesse radiale. Le signal radio émis par l'antenne directionnelle du radar est réfléchi par la cible et comparé en fréquence avec le signal original. Il permet ainsi une mesure directe et extrêmement précise de la vitesse de la cible (4). Le décalage Doppler se calcule au moyen de la formule $F_D = 2\ V\ F_{TX}/c$, où

F_D = décalage doppler
V = vitesse de l'avion
F_{TX} = fréquence de l'émetteur
c = $3 \cdot 10^8$

Effet Doppler d'un radar bistatique
Dans le cas d'un radar bistatique, le décalage Doppler est dû à la composante de mouvement de l'objet dans la direction de l'émetteur, plus la composante de mouvement de l'objet dans la direction du récepteur. Une caractéristique remarquable de ce type de radar est que les objets se déplaçant le long de la ligne droite reliant l'émetteur et le récepteur auront toujours un décalage Doppler de 0 Hz, tout comme les objets se déplaçant le long d'une ellipse de plage bistatique constante (6). C'est-à-dire une ellipse dont lesdeux foyers seraient respectivement l'émetteur et le récepteur.

Interprétation des signaux reçus
Sur la copie d'écran de SDR Sharp, on voit d'abord (marqueurs de temps à gauche de 20 h 03 à 20 h 46) que la cascade a une durée de 45 minutes environ. Le défilement a été réglé le plus lent possible. Le trait central à peu près vertical représente le signal reçu directement de GRAVES.

La stabilité en fréquence du RTL SDR n'est pas des plus exemplaires. Mais cela dépend des exemplaires. J'avais un RTL SDR beaucoup plus stable, mais un beau jour, il a cessé de fonctionner. Dommage!

Fig. 5: Le récepteur RTL-SDR

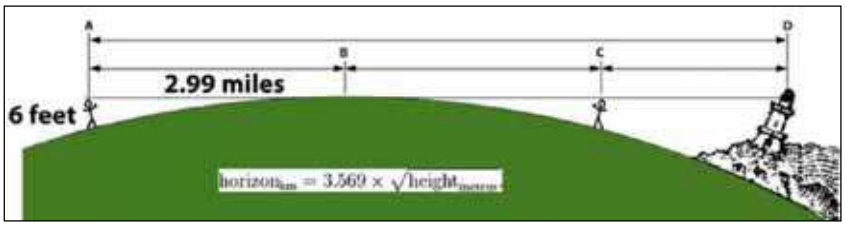

Fig. 6: À quelle distance l'horizon se trouve-t-il?

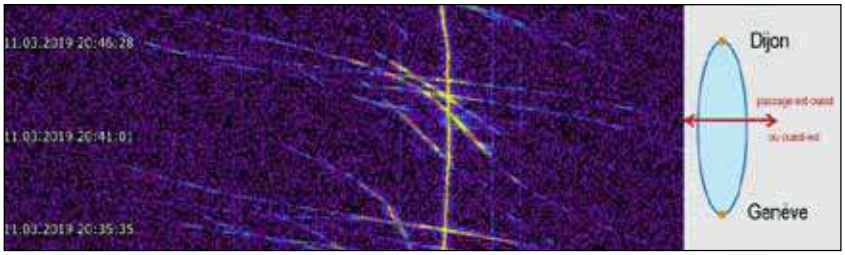

Fig. 7: Des traces rectilignes, mais de pentes différentes

Chacune des lignes transversales est un écho produit par un avion différent. J'en compte une cinquantaine en 45 minutes. Comme vous le voyez, cette image a été enregistrée le 11 mars 2019. Je peux vous dire qu'au moment où j'écris ces lignes, le 13 mai 2020, comme tous les avions de ligne sont cloués au sol, on ne voit qu'un seul avion de temps en temps.

On voit que toutes les lignes transversales présentent un pointillé. C'est à cause du QSB avec une période de 3,2 secondes, comme expliqué ci-dessus.

Sur la ***Fig. 1***, une trace d'un avion donné peut durer jusqu'à 11 minutes. En 11 minutes, un avion volant à 800 km/h parcourt 146 km. Cela donne un ordre de grandeur de la distance à laquelle peuvent se trouver les avions détectés. Coincidence? mon QRA se trouve précisément à 142 km de l'émetteur!

Tous les traces commencent par présenter une déviation Doppler vers les fréquences plus élevées, puis passent par la fréquence de l'émetteur et c'est aussi à ce moment-là que leur signal est le plus QRO, puis le signal dévie vers les fréquences plus basses et baisse progressivement en fréquence et en amplitude jusqu'à disparaître. C'est le même phénomène que l'on peut observer au bord d'une route. Le son des véhicules qui s'approchent est d'abord élevé, puis ensuite plus grave, que les véhicules aillent de gauche à droite ou de droite à gauche.

La pente des traces peut être constante dans sa partie centrale, mais elle présente toujours un aspect asymptotique vers 160 Hz, tant au-dessus qu'au dessous de la fréquence centrale, ce qui correspond bien à la valeur calculée de l'effet Doppler.

La question la plus intéressante est bien sûr: «Quelle est la position de ces avions?». Mon antenne étant omnidirectionnelle, est-il possible de répondre à cela?

Lorsque la trace est à son maximum d'intensité, cela signifie-t-il que l'avion est près de moi? Ou près de l'émetteur? Ou bien quelque part entre mon QRA et l'émetteur?

Mon QRA se trouve à 140 km de l'émetteur. Admettons que l'avion vole à 11'000 mètres, quelque part entre moi et l'émetteur. Pour lui, l'horizon se trouve à 374 Kilomètres. Je suis donc bien en vue directe de cet avion. Par contre, je ne suis pas en vue directe de l'émetteur. L'avion est, lui, en vue directe tant de l'émetteur, que de mon QRA.

Lorsqu'elle est constante, la pente d'une trace peut être plus ou moins prononcée. J'interprète ceci comme étant dépendant du cap de l'avion par rapport à la ligne droite allant de l'émetteur de GRAVES à mon QRA. Plus la trace de l'avion se rapproche de l'horizontale plus son cap est proche de la perpendiculaire à la ligne qui va de mon QRA à l'émetteur.

Si la trace est droite, c'est probablement que le cap de l'avion est constant. On voit aussi qu'il existe des traces qui ne sont pas rectilignes, mais ont une forme en S. Qu'est-ce que cela signifie? Des avions qui changent de cap? On voit plusieurs de ces traces qui présentent la même forme. Tous ces avions suivent- ils la même route aérienne? Et changent de cap aux mêmes endroits?

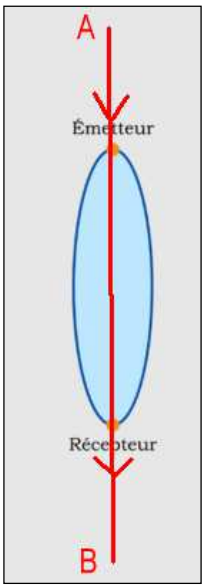

Fig. 8: Effet Doppler dans le cas d'un radar bistatique

Ou alors, y aurait-il une autre explication? Admettons qu'un avion suive la route de A vers B.

Il y a trois possibilités

1) Du point A jusqu'à l'émetteur, il se rapproche à la fois de l'émetteur et du récepteur. On aura un double décalage doppler (du rayon incident et du rayon réfléchi) vers les fréquences élevées.

2) Dès que l'avion a dépassé la position de l'émetteur, il s'éloigne de ce dernier et continue à se rapprocher du récepteur. Le décalage Doppler est une fois vers les basses fréquences (rayon incident) et une fois vers le haut (rayon réfléchi). Le décalage doppler total est donc nul.

3) Enfin, dès que l'avion a survolé le récepteur, il s'éloigne à la fois de l'émetteur et du récepteur.

Le décalage sera deux fois vers les basses fréquences.

La succession de ces trois étapes va nous donner sur le graphique chute d'eau, une trace en «S» (***Fig. 9***). Si les coudes du «S» que j'ai obtenu ne sont pas plus accentués, c'est que la trajectoire de l'avion ne survolait pas exactement GRAVES et mon QRA.

Notez aussi que lorsque le décalage doppler est proche du minimum, le signal réfléchi par l'avion peut être plus intense que celui du radar. C'est que l'émetteur du radar est au niveau du sol, donc pas en vue directe de ma station, contrairement à l'avion, qui lui, est bien en vue directe, puisqu'il est en altitude.

Voilà les quelques idées qui me sont venues. Il y a peut-être encore d'autres informations à tirer de l'analyse de ces traces. Si parmi les lecteurs de cet article, certains ont des idées, je serais ravi d'en discuter avec eux.

Il est certainement possible d'obtenir de meilleurs résultats de réception en utilisant un récepteur SDR plus performant et une antenne directive.

Pour ma part, j'ai essayé, hélas sans succès, de repérer des traces de météorites ou du passage de satellites, en particulier la Station spatiale internationale (ISS). Ces objets se déplacent à des vitesses de l'ordre de 25'000 Km/h, plus de 30 fois plus vite qu'un avion de ligne. On devrait donc avoir un effet Doppler de plusieurs KHz.

La Lune aussi. On devrait pouvoir observer un effet Doppler sur les échos lunaires. Certains l'ont fait.

Je serais ravi de correspondre avec d'autres amateurs intéressés par la lecture et l'interprétation des signaux de GRAVES.

Réglages recommandés pour SDR Sharp

Dans l'onglet qui s'ouvre en cliquant sur la roue dentée en haut à gauche, choisir:
Sample rate: 0,25 MSPS
RTL AGC coché
Tuner AGC non coché
RF gain: maximum

Un avion de ligne qui se déplace à 800 Km/h, va générer un effet doppler de ±160 Hz à 143 MHz. On va donc choisir la fréquence de 143,050 MHz , le démodulateur CW et on va zoomer (curseur en haut à droite de l'écran) de manière à voir 200 Hz à gauche et 200 Hz à droite de la fréquence centrale.

Régler les curseurs Range et Offset en bas à droite de l'écran, de manière à avoir le pic de la porteuse (-20 dB dans mon cas) au sommet du spectrogramme et le plancher de bruit (-50 dB dans mon cas) au bas de ce dernier.

Dans le menu de gauche FFT display, choisir Resolution 4194304 (le maximum) et Speed au minimum. Cocher Time Markers.

Pour en savoir plus

http://www.fas.org/spp/military/program/track/graves.pdf

Références

(1) https://www.wikiwand.com/fr/Radar_passif

(2) https://fr.wikipedia.org/wiki/GRAVES_(syst%C3%A8me)

(3) https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_bistatique

(4) https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_Doppler

(5) http://www.itr-datanet.com/~pe1itr/pdf/The%20143.050MHz%20Graves%20Radar%20a%20VHF%20Beacon.pdf

(6) https://en.wikipedia.org/wiki/Bistatic_Doppler_shift

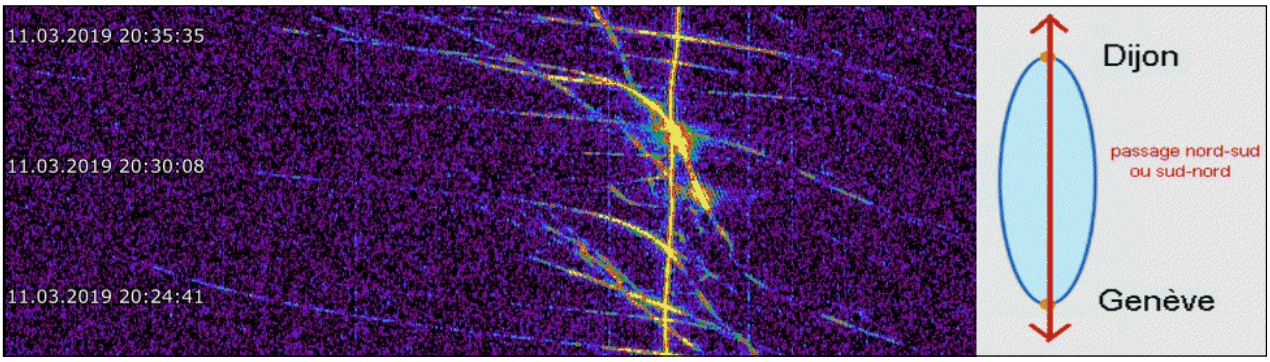

Fig. 9: L'énigme des traces en "S"