

Radartutorial

Chapitre 4: Transmetteurs

(Éditeur: Christian Wolff, traduction en langue française et révision:
Pierre Vaillant, Version 1 janvier 2012)

Sommaire

Objectifs.....	1
INTRODUCTION.....	1
RADAR PSEUDO-COHERENT.....	4
COMPOSANTES DE TRANSMISSION	4
INCONVENIENTS DU RADAR PSEUDO-COHERENT	8
RADAR COHERENT.....	9
COMPOSANTES DE TRANSMISSION	9
MODULES DE TRANSMISSION D'UNE ANTENNE A COMMANDE DE PHASE ACTIVE	11
COMPRESSION D'IMPULSION.....	12
RAPPORT DE COMPRESSION D'IMPULSION.....	13
LOBES SECONDAIRES TEMPORELS	13
TYPES DE MODULATION	14
<i>Compression d'impulsions par modulation de fréquence linéaire.....</i>	<i>14</i>
<i>Compression d'impulsion par modulation non-linéaire</i>	<i>14</i>
<i>Compression de phase.....</i>	<i>15</i>
SOMMAIRE.....	16

Objectifs

Ce chapitre décrit les types de transmetteurs couramment utilisés dans les radars modernes, ce qui permettra :

- De connaître les tâches et les limites d'un tel appareil;
- D'introduire la notion de «cohérence»;
- De connaître et décrire le fonctionnement général des radars entièrement cohérents et pseudo-cohérents.
- De voir les types d'impulsions.

Introduction

Le transmetteur est un appareil électronique qui génère une impulsion électromagnétique de la gamme des ondes radio qui sera envoyé à l'antenne pour diffusion. Il doit pouvoir:

- Produire l'onde de radiofréquence à une puissance moyenne et de pointe désirée;
- Émettre des ondes sur une gamme de fréquences;
- Émettre de façon stable la ou les fréquences désirées afin de permettre un traitement reproductibles des données ;
- Être modulable en fréquence ou en phase pour les besoins de la formation de l'impulsion;
- Être fiable, facile à entretenir et efficace pour une très longue durée de vie.

Chapitre 4 Transmetteurs

Le transmetteur radar est construit en tenant compte des appareils qu'il alimente et ce chapitre décrira ceux-ci. Les types principaux de transmetteurs sont:

- Les **oscillateurs de puissance** : un tube à vide ou une cavité résonnante, habituellement un magnétron, génère une impulsion de radiofréquence lorsqu'il est excité par générateur de décharges de puissance de courant continu appelé modulateur. Ce type est utilisé dans les radars non-cohérents ou pseudo-cohérents (la cohérence étant la possibilité de toujours émettre des impulsions de même phase);
- Les **amplificateurs de puissance** : un générateur d'onde envoie une impulsion à un amplificateur de puissance comme un amplifitron, un klystron ou un amplificateur à semi-conducteurs. Les radars utilisant ce type sont la plupart du temps cohérents et plus récents. Un cas spécial est celui des antennes réseau actives où chaque éléments radiants ou chaque groupe d'éléments possède sont transmetteur.

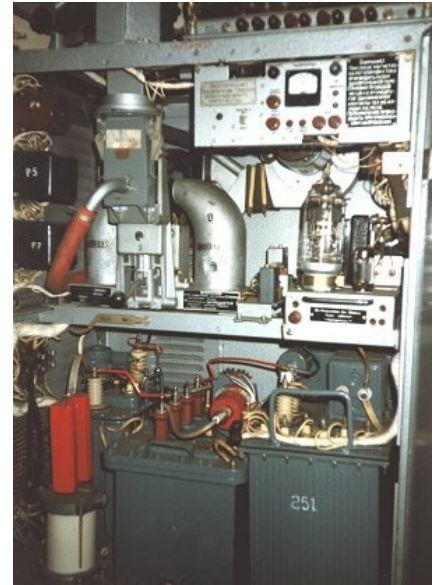


Figure 1 : Transmetteur à oscillateur de puissance d'un radar russe P-37 (code OTAN «Bar Lock»)

La Figure 1 montre un transmetteur à magnétron, au centre de l'image, avec une ligne coaxiale qui le joint au guide d'onde de transmission vers l'antenne. Habituellement, les magnétrons de puissance sont joints directement au guide d'onde. À côté du magnétron et de ses aimants, il y a un modulateur à thyatron. Le transformateur d'impulsion, le réseau conformateur d'impulsions avec la diode de charge et le transformateur de haute tension se trouvent dans le compartiment inférieur de l'image.

Les radars à antenne réseau à commande de phase utilisent encore le plus souvent des tubes à vide pour micro-ondes dans leur transmetteur, plutôt que des modules à semi-conducteurs de transmission et réception plus récents, pour leur plus grande puissance. Voici un sommaire des technologies de transmetteurs :

Technologie		Fréquence maximale	Puissance Maximale / Moyenne	Gain typique	Largeur de bande typique
OP	Magnétron	95 GHz	1 MW / 500 W ¹	-	Fixe ...10%
	diode Impatt	140 GHz	30 W / 10 W ¹	-	Fixe ...5%
	Oscillateur a interaction élargie (OIE)	220 GHz	1 kW / 10 W ²	-	0.2% (électrique) 4% (mécanique)
AP	Tube à onde progressive (TOP) Helix	95 GHz	4 kW / 200 W ¹	40...60dB	Octave/ multi-octave
	TOP à anneau	18 GHz	8 kW / 400 W ¹	40...60dB	5...15%
	TOP à cavité couplée	95 GHz	100 kW / 25 kW ¹	40...60dB	5...15%
	Klystron à interaction élargie (KIE)	280 GHz	1 kW / 10 W ²	40...50dB	0.5...1%
	Klystron	35 GHz	50 kW / 5 kW ¹	30...60dB	0.1...2% (inst.) 1...10% (mécanique)
	Amplificateur à champs croisées (ACC)	18 GHz	500 kW / 1 kW ¹	10...20dB	5...15%
	Transistor bipolaire à jonctions (BJT)	5 GHz	300 W / 30 W ³	5...10dB	10...25%
Transistor à effet de champ au GaAs (FET)	30 GHz	15 W / 5 W ¹	5...10 dB	5...20%	

¹ démontré en bande X

² démontré à 95 GHz

³ démontré à 1 GHz

Tableau 1 : Technologies différentes de transmetteurs radars à impulsions
(Source: Tracy V. Wallace, Georgia Tech Research Institute, Atlanta, Georgia.)

Concept de cohérence

Un radar cohérent est celui dont les impulsions transmises débutent toujours à la phase de leur cycle de référence. De façon inverse, un radar incohérent est celui dont les impulsions ont une phase aléatoire. La cohérence dépend de l'appareil dans le transmetteur qui produit l'onde.

Radar incohérent

Les transmetteurs utilisant **un oscillateur de puissance** (OP), comme le magnétron, ne sont pas cohérents. En effet, lorsque l'oscillateur est excité par l'envoi d'une onde carrée transmise par le modulateur, la phase de leur auto-oscillation est aléatoire et les impulsions successives ne sont pas corrélées entre elles.

Radar cohérent

Les transmetteurs à **amplificateurs de puissance** (AP) produisent quand à eux des impulsions ayant toujours la même phase de départ et sont dits entièrement cohérents. Dans ce cas, l'onde est générée à faible puissance par une source permanente de radiofréquences très stable, appelée un générateur d'ondes, dont le signal de sortie passera dans un amplificateur, tel un klystron.

Un changement de fréquence de répétitions des impulsions (FRI) n'affectera pas la cohérence, même si la radiofréquence porteuse (RF) est un multiple du FRI, comme c'est souvent le cas. La cohérence ne dépend cependant pas du ratio RF versus FRI, celui-ci peut être variable pour certaines utilisations, en autant que la RF est elle stable.

Cohérent versus incohérent

L'avantage le plus important des radars cohérents sur ceux incohérents est la possibilité de noter même la plus petite différence dans la phase entre l'impulsion transmise et le retour des cibles ce qui permet d'en extraire leur vitesse radiale de déplacement. Cela permet d'utiliser un traitement par effet Doppler du signal qui offre une grande résolution de vitesse et qui permet de filtrer les échos parasites stationnaires et le bruit.

Pour obtenir le même résultat avec un radar incohérent, il faut user d'un subterfuge, soit de noter la « signature » de chacune des impulsions et d'en faire l'auto-corrélation avec l'écho de retour. Il s'agit d'un processus plus complexe, et donnant des résultats moins fiables, qu'on utilise dans les radars pseudo-cohérents.

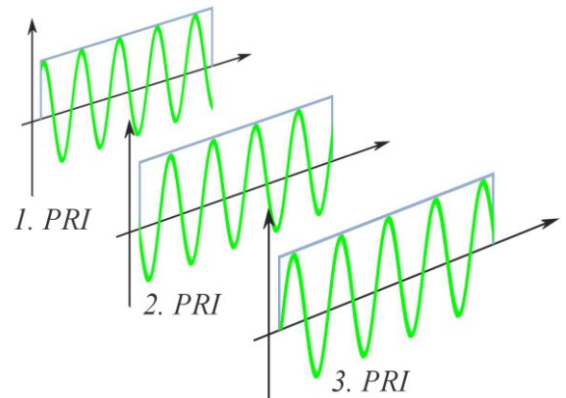


Figure 2 : Impulsions non-cohérentes à phase aléatoire. Il est à remarquer que l'onde ne commence pas au même point du cycle d'une impulsion à la suivante. (PRI = période de répétition des impulsions.)

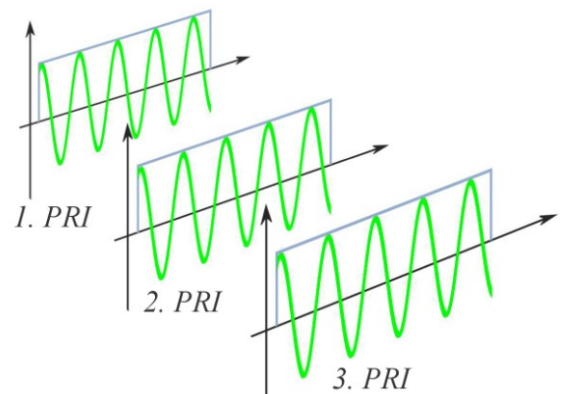


Figure 3 : Impulsions cohérentes dont chaque impulsion débute au même point du cycle.

Radar pseudo-cohérent

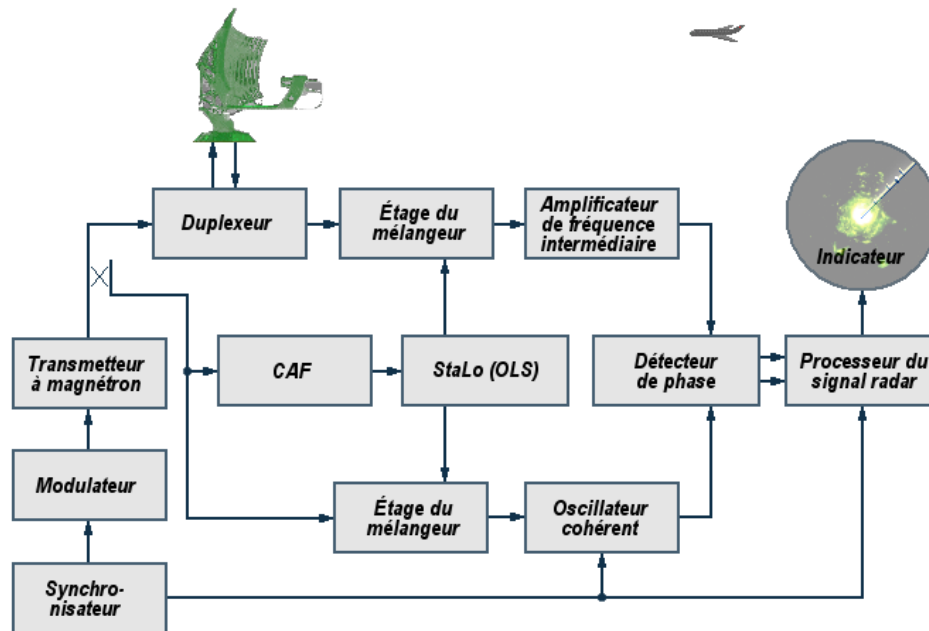


Figure 4 : Diagramme d'un radar pseudo-cohérent

Afin de pouvoir utiliser l'effet Doppler dans le traitement des données d'un radar, il est nécessaire que les impulsions émises par ce dernier soit cohérentes, c'est-à-dire qu'il leur phase à l'émission soit connu et stable. On peut ainsi être sûr que le décalage Doppler reliée au mouvement de la cible n'est pas contaminé par un changement de phase entre les impulsions subséquentes. Ce décalage permet deux choses : reconnaître les cibles dans un environnement où se trouvent des échos parasites fixes et calculer leur vitesse de déplacement instantané.

Si le transmetteur utilise un auto-oscillateur, comme un magnétron, l'impulsion émise aura une phase aléatoire. En détection cohérente, une onde provenant d'un oscillateur stable d'onde continue, servant de référence, sera ajoutée à un échantillon de chacune des impulsions émises pour produire un battement qui servira de « signature » à ces impulsions. Au retour de la cible, les échos seront mélangés avec l'onde de référence pour calculer le battement et donc de quelle impulsion particulière provient le retour. Les radars pseudo-cohérents sont ainsi appelés «cohérents à la réception».

Composantes de transmission

Synchronisateur

Ce circuit délivre le signal qui synchronise la transmission des impulsions, l'écran de visualisation et les autres circuits associés.

Modulateur

L'énergie radioélectrique transmise par un radar vient en courtes impulsions de 1 à plus de 50 microsecondes. L'impulsion émise par un radar pseudo-cohérent est déclenchée par le modulateur. Il s'agit de la source d'une impulsion de grande énergie en courant continu qui met sous tension le tube à vide d'oscillateur produisant le signal. Un modulateur spécial est nécessaire pour produire ces impulsions à haute puissance, le plus commun étant le thyatron à hydrogène.



Figure 5 : Modulateur à thyatron d'un P-18 russe.

Le modulateur utilise un réseau conformateur d'impulsions qui se charge lentement jusqu'à une haute tension puis se décharge soudainement dans une transformateur d'impulsions, grâce à un thyatron excitateur, pour donner l'impulsion. La forme et la durée de celle-ci dépendent des caractéristiques électriques du réseau et du transformateur.

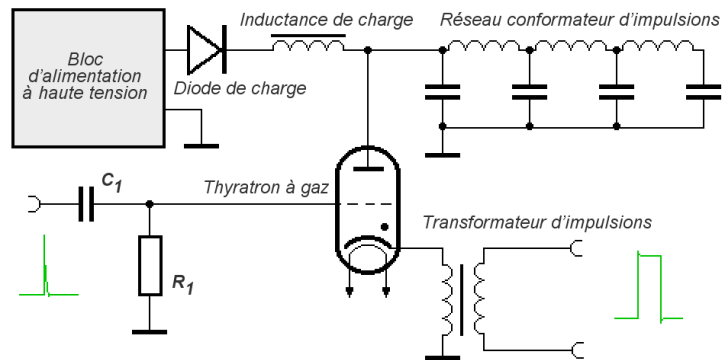


Figure 6: Schéma fonctionnel d'un modulateur à thyatron.

Le **réseau conformateur d'impulsion** du modulateur est une courte section de ligne à retard. Il se charge grâce à la tension du **bloc d'alimentation** et du champ magnétique de l'**inductance de charge**, cette dernière limitant le courant. La **diode de charge** empêche le réseau de se décharger dans la direction inverse.

Le **thyatron** est un tube à vide où l'on retrouve une grille électrifée entre la cathode et l'anode, dont la fonction est celle d'interrupteur électronique. Lors de l'application d'une tension positive sur l'anode vis-à-vis de la cathode, si la grille est maintenue au potentiel de la cathode, aucun courant ne circule et le circuit est « ouvert ». Si le potentiel de la grille de contrôle augmente par rapport à celui de la cathode, le gaz entre l'anode et la cathode s'ionise et conduit le courant. Une fois rendu conducteur, le thyatron est en position « fermée » et le restera tant qu'un courant suffisant circulera entre son anode et sa cathode. Lorsque le courant anodique ou la tension entre anode et cathode redescendent à une valeur très proche de zéro, le composant se bloque en position « ouverte », et la grille reprend le contrôle.



Figure 7 : Thyatron TGi2-400/16.

Le **circuit résistance-condensateur (R-C)** produit le courant continu (DC) qui électrifie la grille du thyatron. Il doit donner une montée et une chute abruptes de tension à la grille ce qui initie l'ionisation du gaz dans le thyatron et permet au réseau conformateur de se décharger dans le thyatron. L'ionisation permet la conduction entre le réseau conformateur et le transformateur d'impulsions. L'impulsion produite passe ensuite à un oscillateur tel un magnétron.

Circuit de charge

Le circuit de charge du modulateur se compose du bloc d'alimentation, de l'inductance de charge et du réseau conformateur d'impulsions. Le thyatron est en position « ouverte » à ce moment et apparaît comme un interrupteur ouvert dans la figure 3.

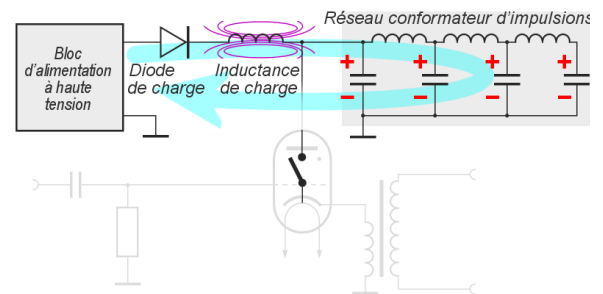


Figure 8 : Circuit de charge.

Lorsque le bloc d'alimentation en courant continu est allumé, le courant se déplace dans le circuit selon la flèche verte à travers la diode de charge et l'inductance de charge vers le réseau conformateur. L'énergie s'accumule ainsi dans les condensateurs du réseau. Les bobines du réseau n'agissent pas encore mais le courant passant dans l'inductance de charge procure une résistance par induction ce qui donne un puissant champ magnétique.

Chapitre 4 Transmetteurs

L'augmentation de la charge dans les condensateurs suit une fonction exponentielle (ligne en vert dans la figure 4). L'auto-induction des bobines s'ajoute à cela.

$$U_c = U_0 \cdot (1 - \cos \omega_r \cdot t)$$

$$\omega_r^2 = \frac{1}{L_{Ind} \cdot \sum C}$$

Le courant dans le circuit diminue donc à mesure que les condensateurs se chargent. Ceci fait diminuer le champ magnétique induit et génère un courant supplémentaire en rétroaction. Ce dernier poursuit le stockage d'énergie dans les condensateurs et la tension dans le réseau peut atteindre le double de celle du bloc d'alimentation. Comme la tension est plus grande dans le réseau, ce dernier devrait se décharger vers le bloc (ligne cyan) mais la diode de charge bloque le courant dans cette direction. Les condensateurs conservent donc la charge jusqu'à ce qu'un autre chemin de décharge s'ouvre.

Circuit de décharge

Quand une tension positive de décharge est appliquée à la grille du thyatron par le circuit R-C, les électrons émis par la cathode sont attirés vers l'anode ce qui ionise le gaz que le tube contient (il est «allumé»).

Le courant alimentant la cathode vient du réseau conformateur qui se décharge ainsi à travers le thyatron vers le circuit primaire du transformateur d'impulsions.

Le courant passant durant le temps PW à travers la bobine primaire du transformateur d'impulsions vers la mise à la terre induit un courant électrique dans la bobine du circuit secondaire. Ce courant passe dans un circuit relié à un oscillateur qui transformera le courant en une impulsion à une fréquence caractéristique.

Si l'impédance de l'oscillateur et du transformateur d'impulsions est bien ajustée à celle du réseau conformateur, la différence de voltage de l'impulsion sera la moitié de celle du réseau, l'autre moitié se dissipant dans la résistance interne du réseau.

À cause des propriétés inductives du réseau conformateur, la décharge positive aura tendance à être négative dans le circuit secondaire du transformateur d'impulsions.

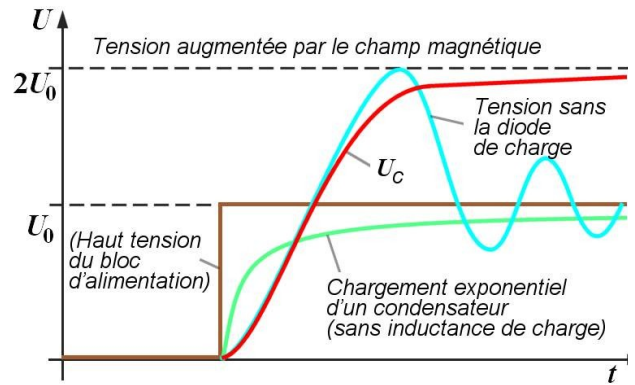


Figure 9 : Diagramme montrant la variation de tension dans le réseau conformateur.

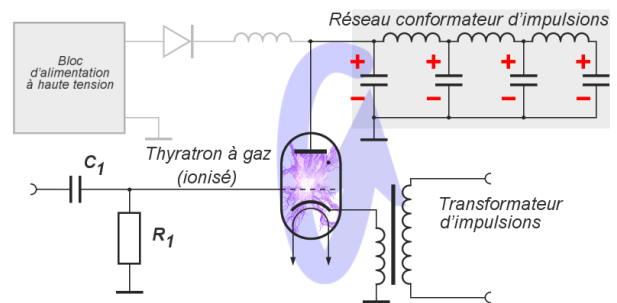


Figure 10 : Circuit de décharge.

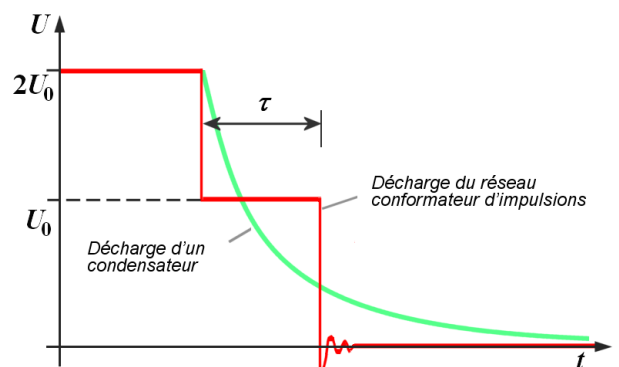


Figure 11 : Graphique montrant la variation temporelle de courant dans le circuit de décharge.

Oscillateur de puissance

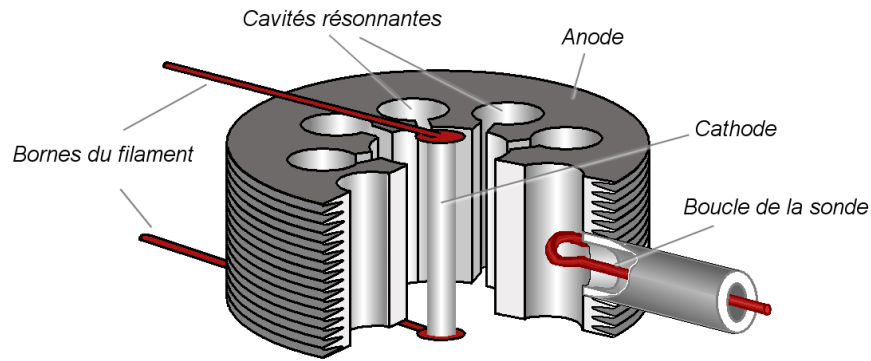


Figure 12 : Vue en coupe d'un magnétron.

Dans un radar pseudo-cohérent, la source de l'impulsion est un auto-oscillateur. Ce dernier reçoit le signal du modulateur qui définit le début et la fin de l'impulsion et l'utilise pour générer une impulsion puissante. Différents tubes à vides, diodes ou transistors peuvent être utilisés à cette fin (voir le tableau) mais le plus commun est le magnétron. En 1921, l'américain Albert Wallace Hull inventa ce tube à vide oscillateur à micro-ondes. Au début de la Seconde Guerre mondiale, cet appareil fut amélioré par les chercheurs britanniques John Randall et Henry Boot qui en firent une cavité résonnante. Il fut crucial au développement du radar durant le conflit.

Les magnétrons sont des auto-oscillateurs où les électrons émis par une cathode se dirigent vers l'anode mais sont déviés par un champ magnétique perpendiculaire au champ électrique. De conception relativement simple, ils permettent une émission d'ondes à haute puissance et sont utilisés dans les radars pulsés ou à ondes continues. Ils peuvent donner des fréquences allant de 600 à 30 000 MHz, selon la géométrie retenue. Les magnétrons ont cependant le désavantage d'émettre avec une phase aléatoire et à une fréquence fixe.

Coupleur directif, StaLO et Coho

Le coupleur directif est une jonction réciproque de deux guides d'ondes, quatre bras, dans laquelle l'énergie passant dans l'un des guides d'ondes est couplée à un bras seulement de l'autre guide d'ondes.

Ce dernier procure un échantillon de l'onde transmise à chaque impulsion pour l'ajustement de l'Oscillateur Local Stabilisé (StaLO ou OSL). Ce dernier est utilisé par le récepteur super hétérodyne et produit la fréquence intermédiaire (FI) qui servira à la réception, le plus souvent entre 30 et 74 MHz. Pour une opération efficace, il faut donc que l'OSL soit ajustable et très stable. Par exemple, si la fréquence d'un oscillateur de 3 000 MHz varie de 0,1 %, cela résulte en un changement de 3 MHz. Ceci est égal à la largeur de la bande passage de la plupart des récepteurs et diminuerait grandement le gain de réception si on le laisse se produire.

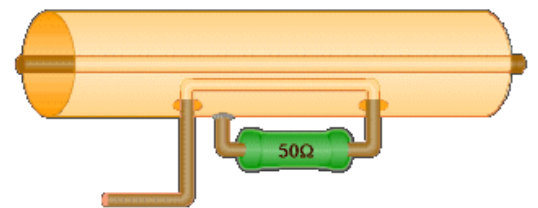


Figure 13 : Schéma d'un coupleur directif.

Le signal intercepté par le coupleur servira également à l'ajustement de l'oscillateur cohérent (Coho) pour le synchroniser avec le magnétron. Le Coho fournit une onde de radiofréquence continue et de faible puissance. Elle est utilisée pour la conversion du signal de retour des cibles dans le détecteur de phase en maintenant une fréquence de référence de base stable. La synchronisation de la phase entre l'impulsion émise et le Coho donne une « signature » particulière à chaque des impulsions que le Coho transmet au récepteur. C'est la raison pour laquelle les radars pseudo-cohérent sont appelés « cohérents à la réception ».

Duplexeur

Le duplexeur est un circuit électronique qui relie l'antenne alternativement avec le transmetteur et le récepteur dans le cas d'un radar monostatique. Il permet donc d'utiliser la même antenne lors de l'émission et de la réception. Après le basculement, le circuit doit être complètement étanche à toute fuite venant de l'autre contact. En effet, le récepteur traite de très faibles signaux et sera grillé par le signal provenant du transmetteur.

Aucun système mécanique ne peut faire un changement aussi rapide, c'est donc une pièce électronique qui remplit ce rôle. Il y a plusieurs sortes de duplexeurs, dont :

- Circulateurs à ferrite (duplexeur à cercle hybride);
- Cavité résonnante coaxiale ou guide d'onde
 - avec tubes TR et ATR;
 - ou avec diodes PIN

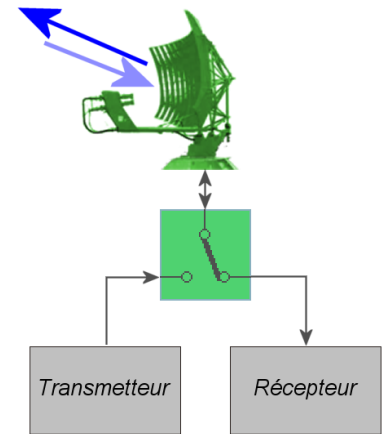


Figure 14 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un duplexeur d'un radar.

Inconvénients du radar pseudo-cohérent

Le radar pseudo-cohérent est peu commun aujourd'hui, surtout retrouvé dans les systèmes plus anciens et les radars peu coûteux, à cause de ses inconvénients :

- La synchronisation nécessaire pour obtenir la « signature » de chaque impulsion n'est pas aussi précise que l'utilisation d'un système entièrement cohérent, ce qui limite l'efficacité du processus de filtrage des échos parasites ;
- Il ne peut être utilisé pour les radars agiles en fréquence car la fréquence d'un magnétron se fait en modifiant mécaniquement les dimensions de la cavité d'un magnétron ce qui veut dire que la largeur de sa bande passante est très faible ;
- Il est peu flexible car on ne peut changer facilement la fréquence de répétition et la largeur des impulsions, ainsi que d'autres paramètres du signal, contrairement aux radars entièrement cohérents. Il est également impossible de moduler en fréquence l'impulsion, une technique utilisée dans la compression d'impulsions ;
- Les échos de second retour, ceux revenant d'au-delà de la portée maximale après qu'une seconde impulsion est émise, ne sont pas en phase avec la «signature» produite par l'oscillateur cohérent (Coho). Ils sont donc non seulement en ambiguïté de distance mais également ne peuvent être utilisés pour le traitement Doppler car ils ne sont pas corrélés avec la «signature». Cependant, cet effet peut être surmonté si la « signature » de chaque impulsion envoyée peut être conservée en mémoire et utilisée en post-traitement.

Radar cohérent

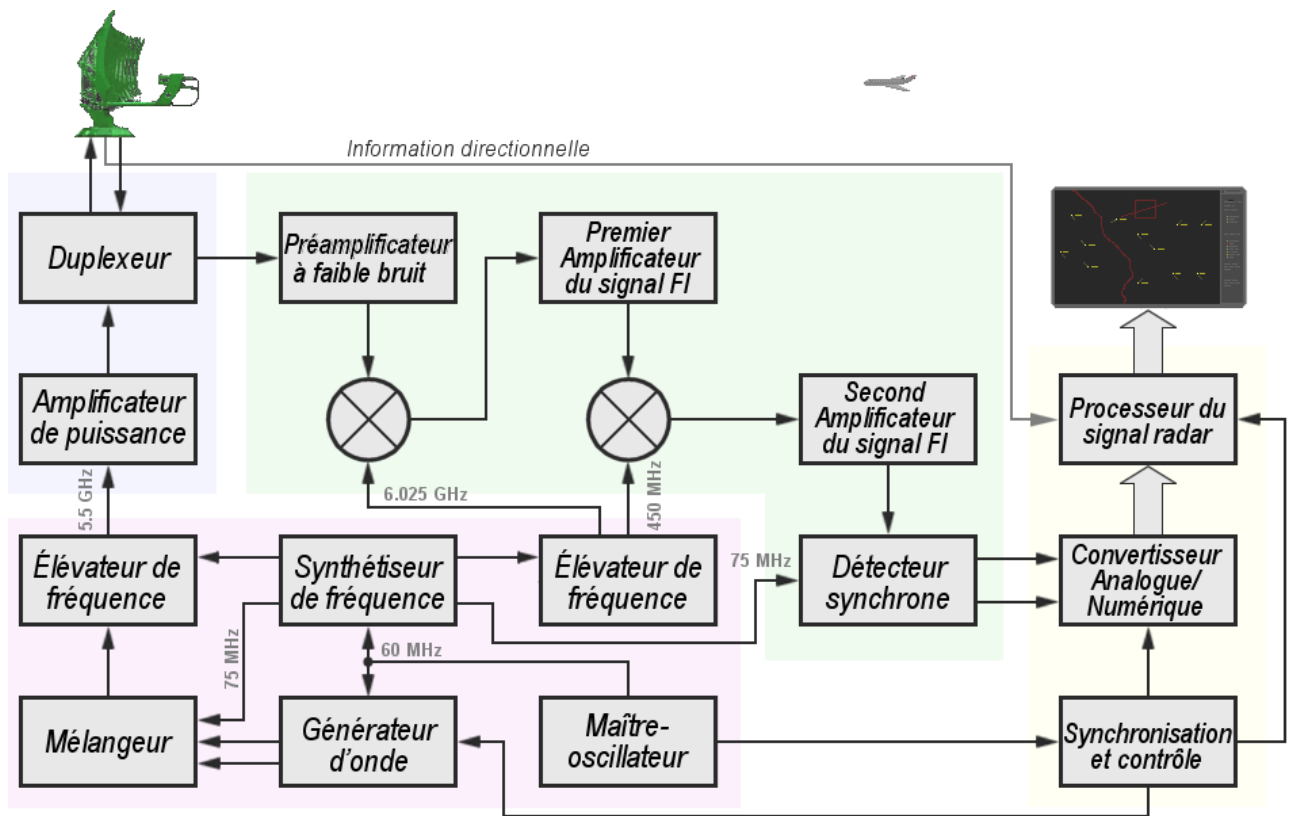


Figure 15 : Schéma opérationnel d'un radar cohérent.

Le diagramme montre le schéma opérationnel d'un radar cohérent dont la caractéristique principale est que tous les signaux sont produits à faible puissance et que le reste du circuit sert à son amplification. Les signaux sont générés par une horloge maîtresse, habituellement un synthétiseur, ce qui donne une cohérence optimale à tout le système. L'amplification finale se fait par un appareil de type klystron, tube à onde progressive (TOP) ou un amplificateur à semi-conducteurs.

Un radar cohérent comporte également des composants communs aux autres types de radars, soit un duplexeur, une antenne et un mélangeur de fréquences. Les radars cohérents n'ont pas les inconvénients des radars à pseudo-cohérence étudiés antérieurement.

Composantes de transmission

Maître-oscillateur

Le maître-oscillateur/générateur de fréquence est une horloge de très grande stabilité à partir de laquelle sont engendrés les signaux de synchronisation. Sa fréquence est en général de 60 à 100 MHz.

Générateur d'onde

Un générateur d'onde produit une impulsion à la fréquence intermédiaire (FI) à partir de paramètres prédéfinis d'amplitude et de phase. Ces signaux ont une structure complexe dans le cas d'une impulsion compressée. Ils servent également de « signature » de référence pour le récepteur afin de pouvoir trouver les échos de retour cohérents. Le générateur doit donc être de fréquence très stable.

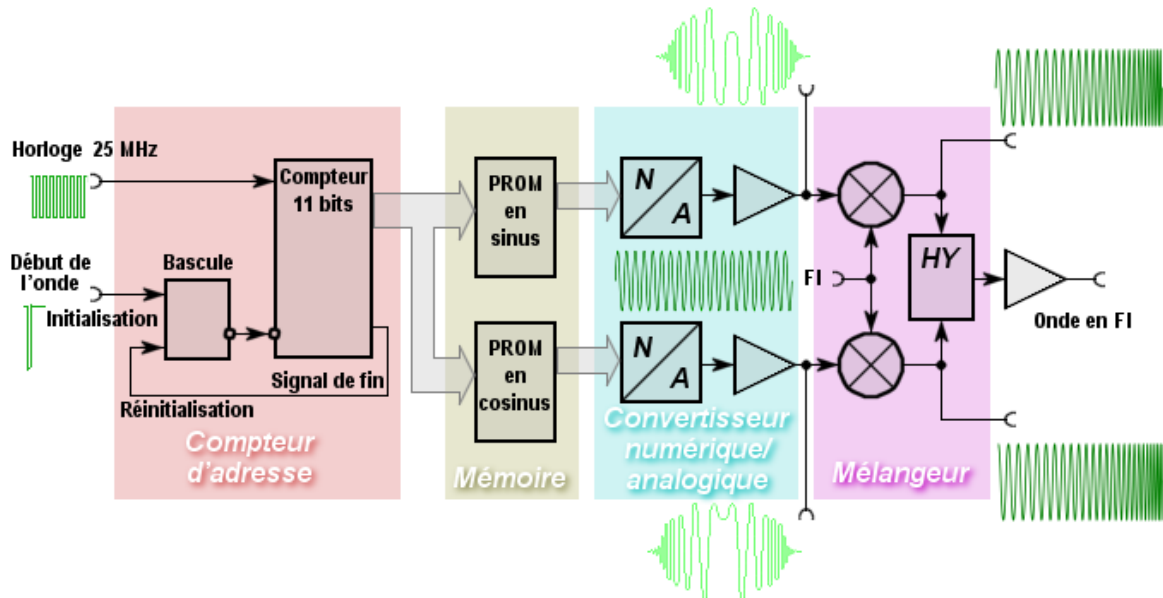


Figure 16 : Schéma fonctionnel d'un générateur d'ondes pour une impulsion compressée non linéaire.

Une **horloge** externe de 25 MHz est utilisée par le compteur pour l'échantillonnage de l'impulsion. Elle est fournie par le synchronisateur. La partie arrière de l'onde polarisée négativement **initie** la **bascule** bistable qui sert de déclencheur d'échantillonnage.

Le **compteur** en cascade égraine les cycles de l'horloge durant environ 41 microsecondes, soit la longueur de l'impulsion radar. Il donne à chacun des échantillons de l'onde une adresse informatique de **11 bits**. Une fois le nombre maximale programmé d'échantillons, le compteur émet un signal de fin. Ceci le remet à zéro et force la bascule bistable à «fermée».

Les **PROM** (mémoire morte programmable) en sinus et cosinus renferment chacune des valeurs de phase des 2048 échantillons de l'impulsion et les traduisent en tension de 8 bits. Le **convertisseur N/A** transforme la suite d'échantillons numériques en une onde analogique. Le voltage des échantillons comporte une partie fixe et une partie variable de telle sorte que la fréquence de l'impulsion qui sort peut varier de la fréquence de base (zéro) à 1 MHz. Le changement de fréquence (F) varie durant le temps de l'impulsion de $-\Delta F/2$ à $+\Delta F/2$ en passant par zéro, ce qui donne l'aspect caractéristique de l'impulsion.

Cette méthode d'élaboration des impulsions a l'avantage d'être entièrement numérique et programmable. Le processeur numérique peut ainsi exécuter la compression de l'impulsion dans une étape ultérieure.

Mélangeur / Excitatrice

Le **mélangeur** ajoute la fréquence intermédiaire (FI) non modulée et l'impulsion sortant du générateur. La valeur de fréquence zéro au centre de l'impulsion sera donc remplacé par la FI. Le **combinateur hybride** est un diviseur de puissance passif inverse. Les signaux des phases I et Q y sont unis pour donner l'impulsion totale à la fréquence intermédiaire (FI).

Synthétiseur de fréquence

Le synthétiseur de fréquence à faible bruit de phase fournit les différentes fréquences de base qui permettent le changement rapide de fréquence d'émission. Les anciens radars utilisent un synthétiseur analogique alors que les plus récents utilisent une boucle à phase asservie (BPA).

Élévateur de fréquence

Ce convertisseur rehausse la fréquence de l'impulsion depuis la fréquence intermédiaire (FI) à la fréquence plus élevée d'émission mais à faible puissance. Il est similaire au convertisseur de fréquence qui abaisse celle-ci dans le récepteur.

Amplificateur de puissance

L'impulsion transmise étant générée à faible intensité. Il est donc nécessaire de l'amplifier fortement avant de l'envoyer. L'amplificateur de puissance est généralement un klystron, un tube à onde progressive (TOP) ou un amplificateur à semi-conducteurs. Un filtre passe-bande coupe les fréquences harmoniques. Le signal de sortie contient ainsi toute l'information sur l'amplitude et la phase de l'impulsion. Après l'amplification, l'impulsion est envoyée à l'antenne en passant par le duplexeur.



Figure 17 : Klystron à réflecteur, ou réflex, K-806.

Modules de transmission d'une antenne à commande de phase active

Une antenne à commande de phase est dite active si le signal est directement produit par les éléments de réception/transmission inclus dans le dispositif. Le fonctionnement de ces antennes est décrit dans le module sur les antennes, ce seront les détails techniques des transmetteurs que nous verrons ici. En exemple, l'antenne dans le nez d'un chasseur Tornado européen et le radar de défense aérienne RRP-117 sont de ce type.

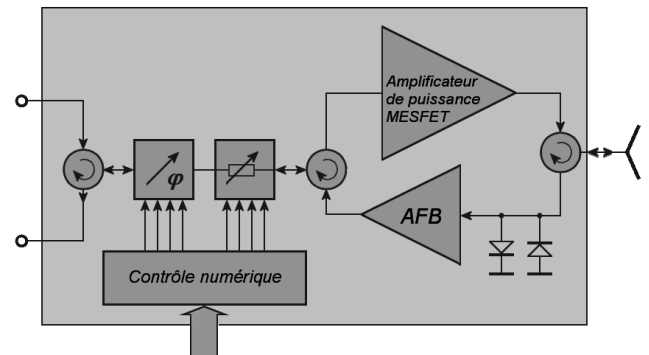


Figure 18 : Diagramme des modules de transmission d'une antenne active.

Les modules de transmissions d'une telle antenne sont à semi-conducteurs pour minimiser l'espace et la Figure 18 montre le diagramme du circuit. Toutes les composantes sont assemblées sur un module transmission/réception qui comprend le déphaseur électronique, un contrôle d'atténuation numérique, une amplification à semi-conducteurs, un amplificateur à faible bruit (AFB), deux circulateurs et un duplexeur. Il est également habituel d'avoir une unité de test et d'état qui est relié aux contrôles de l'antenne.



Figure 19 : Vue arrière d'une antenne active.

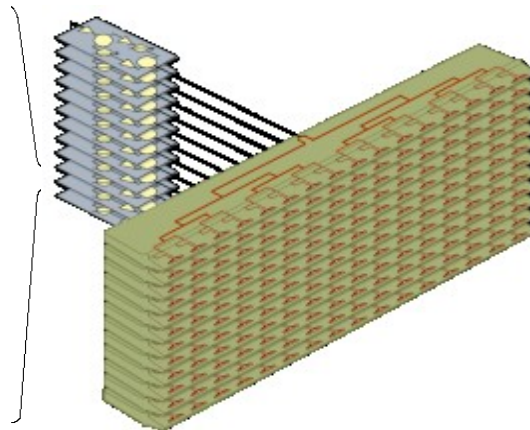


Figure 20 : Diagramme montrant l'alimentation d'une antenne active

Plusieurs antennes récentes, comme celle du RRP-117, utilisent des transmetteurs à amplificateurs à semi-conducteurs qui fonctionnent en multiplex sur deux fréquences. Ces dernières sont modulées linéairement en fréquence pour la compression d'impulsion. Cette méthode permet d'utiliser la moindre de puissance de ce type d'amplificateurs pour obtenir quand même une portée maximale optimale.

Chaque rangée d'éléments radiants a sa propre unité d'amplification et son propre récepteur. La combinaison des signaux reçus selon le concept de l'antenne mono-impulsion est envoyée pour

traitement après passage dans le mélangeur qui le change à la fréquence intermédiaire (FI). Les modules d'alimentation de l'ensemble fournissent le courant par un système à bus.

Un limiteur est parfois ajouté entre l'AFB et l'antenne pour atténuer les signaux parasites venant d'émetteurs de brouillage ou par les cibles ayant une surface équivalente radar très importantes car trop près du radar. Cet appareil protège également le récepteur en cas de défaillance du duplexeur qui laisserait passer le signal à transmettre dans cette direction. Un limiteur simple consiste en deux diodes PIN connectées en parallèle mais avec des polarités inverses.

Compression d'impulsion

La compression d'impulsion est une technique de traitement du signal utilisée dans le domaine du radar afin d'augmenter la résolution en distance de la mesure ainsi que le rapport signal sur bruit. À l'origine, la compression temporelle a donc été développée pour amplifier la puissance de l'impulsion transmise (puissance de pointe).

L'idée générale est d'obtenir une impulsion longue, afin de conserver une énergie suffisante à la réception, sans pour autant sacrifier la résolution par rapport à une impulsion courte de puissance équivalente. La forme de l'impulsion est décrite dans la Figure 22.

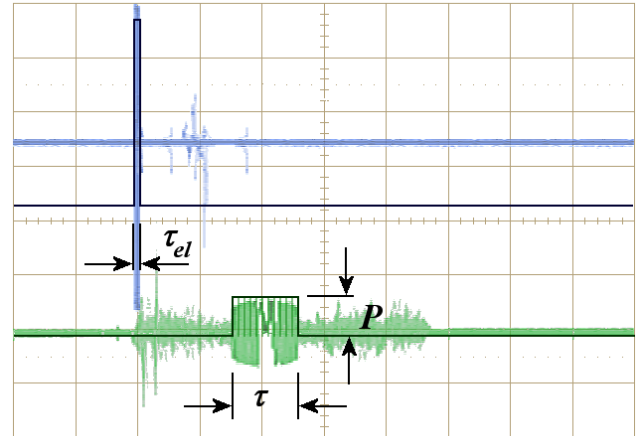


Figure 21 : Impulsion classique courte (en bleu) et une impulsion longue transmise avec modulation d'impulsions interne (en vert).

Son principe est le suivant : on génère un signal dont le support temporel est relativement long pour maximiser l'énergie émise. Cependant, on module ce signal de telle manière qu'après un filtrage adapté, l'inter-corrélation entre le signal reçu et les différentes fréquences du signal émis permet de résoudre les signaux de retours de plusieurs cibles qui pourraient se chevaucher à l'intérieur de la distance que représente la longueur de l'impulsion. Comme chaque partie de l'impulsion a sa propre fréquence, les retours sont complètement séparés.

L'inter-corrélation entre le signal reçu et le signal émis permet également de faire ressortir le vrai signal du bruit de fond qui a une distribution statistique de bruit blanc. Grâce à un filtre, le récepteur radar peut extraire ce dernier en utilisant une fréquence synchrone à l'impulsion modulée initiale. Même si le signal retourné par la cible est sous le niveau du bruit, la multiplication du signal par cette fréquence réajuste la phase des composantes du signal de retour ce qui fait ressortir le vrai signal. Cela permet d'allonger la portée utile du radar au-delà de ce que prédit l'équation du radar classique.

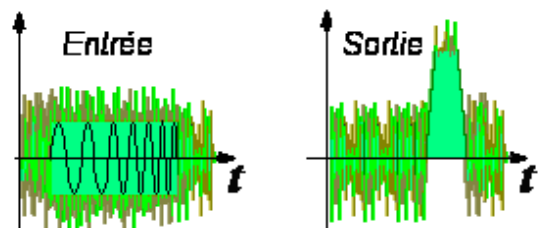


Figure 22 : Les signaux d'entrée et de sortie d'un étage de compression.

La distance aveugle (R_{min}) est cependant plus grande avec cette technique par rapport à une impulsion conventionnelle de même résolution car l'impulsion compressée est beaucoup plus longue, comme on peut voir sur la Figure 21. Le duplexeur qui alimente l'antenne avec le signal provenant du transmetteur ne peut commuter vers le récepteur qu'après la fin de l'impulsion, et dans le cas de l'impulsion compressée ce temps est beaucoup plus long.

Rapport de compression d'impulsion

La compression permet à un récepteur d'améliorer la résolution en distance par rapport à une impulsion non compressée de même longueur. Pour une compression linéaire en modulation de fréquence d'une impulsion de durée τ par une modulation de *bande passante* B , on améliorera la résolution selon ce qu'on appelle le *rapport de compression d'impulsion* (RCI). Par exemple, une compression de 50 pour 1 veut dire que la distance de résolution est réduite à 1/50 par rapport à une impulsion conventionnelle. Le calcul de ce rapport se fait ainsi :

$$RCI = \frac{(c_0 \cdot \tau/2)}{(c_0/2B)} = B \cdot \tau \quad (1)$$

RCI est le gain de puissance de l'impulsion compressée sur celle non compressée de même durée, ce qui représente un gain du rapport signal sur bruit. On peut également trouver l'amélioration de la résolution en utilisant RCI selon :

$$R_{rés} = c_0 \cdot (\tau/2) = c_0 \cdot B \quad (2)$$

Le rapport de compression est égal au nombre de sous-impulsions contenu dans l'onde émise, soit son codage par modulation. La résolution est donc proportionnelle à la durée d'un élément de ce codage. La portée maximale augmente comme la racine quatrième du RCI. La distance aveugle (R_{min}) de l'impulsion compressée ne change cependant pas par rapport à une impulsion non compressée de même longueur, le temps d'émission demeure en effet le même.

Avantages	Désavantages
Faible puissance nécessaire et donc utilisable pour les transmetteurs à semi-conducteurs	Électronique complexe
Augmentation de la portée utile	Pas d'amélioration de la portée minimale
Amélioration de la résolution	Lobes secondaires temporels
Meilleure immunité au brouillage	
Résout mieux les cibles	

Tableau 2 : Avantages et désavantages de la compression.

Lobes secondaires temporels

Une impulsion compressée n'est pas une *onde carrée* mais une série d'oscillations comme sur la vue du signal sur l'oscilloscope (Figure 23 haut à gauche). L'oscillation avec la plus grande amplitude est le *lobe principal* alors que les autres sont appelés *lobes secondaires temporels*. Sur l'affichage PPI de la même figure, on peut voir que le retour de la cible sera étiré dans l'espace de la même manière. En effet, l'énergie venant des lobes secondaires la frappera à un temps différent du lobe principal et seront donc placés à une distance différente.

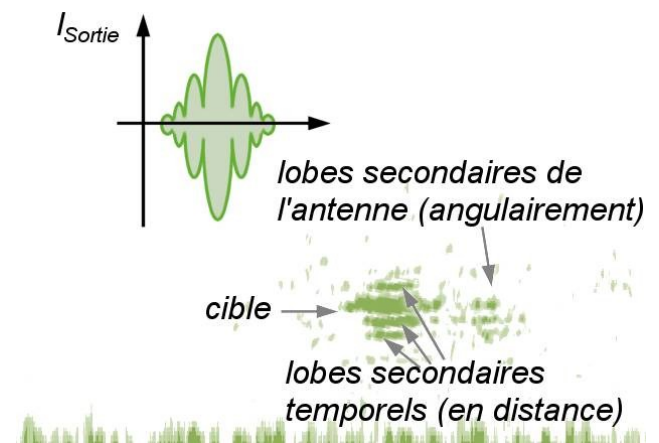


Figure 23 : Vue des lobes secondaires temporels

Ces lobes secondaires temporels sont donc importants dans la détermination de la compression et des filtres à utiliser. Un moyen de filtrer ces lobes indésirables à la réception est de pondérer les retours en fonction de l'amplitude du signal initial. Le lobe principal ressortira mais il y aura perte d'intensité et donc diminution du rapport signal sur bruit. Un bon filtre peut diminuer les lobes secondaires de l'ordre de 30 dB.

Types de modulation

Compression d'impulsions par modulation de fréquence linéaire

Cette méthode de compression de l'impulsion émise utilise une modulation de fréquence linéaire. Ceci a l'avantage d'utiliser un circuit électronique relativement simple. Cependant, elle présente l'inconvénient que le brouillage du signal est relativement facile à réaliser en utilisant un simple appareillage de balayage des fréquences. L'exemple suivant montre le diagramme d'un circuit de compression linéaire.

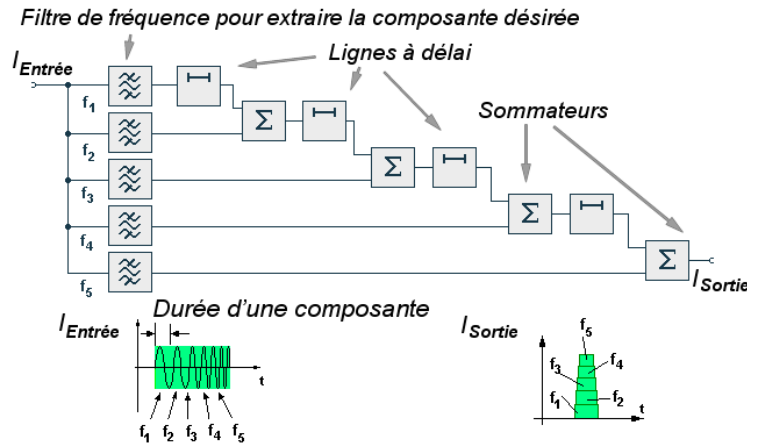


Figure 24 : Diagramme du processus de compression linéaire.

L'impulsion initiale est divisée en un certain nombre d'intervalles de temps à fréquence constante. Le filtre de compression est une série de circuits qui introduisent un délai en fonction linéaire de la fréquence. Le circuit permet à la fin de l'impulsion de « rattraper » son début ce qui donne une impulsion plus courte d'amplitude plus grande. Le RRP-117 est un bon exemple d'une application de la modulation de fréquence linéaire.

Il y a vraiment deux techniques possibles pour la génération de ce type de compression :

- Traitement numérique par conversion des I/Q
- Par traitement des ondes acoustiques de surface d'un cristal piézoélectrique

Compression d'impulsion par modulation non-linéaire

Le principe d'une modulation non-linéaire est de faire varier sa fréquence selon une fonction connue. La modulation peut être symétrique ou asymétrique. Dans le premier cas, on utilise une variation de la fréquence du signal qui augmente durant la première moitié de l'impulsion et qui diminue durant la seconde. Dans le second cas, on utilise la moitié d'une onde symétrique. Ce type de compression a plusieurs avantages:

- Elle ne nécessite pas de suppression des lobes secondaires car la modulation de l'onde est calculée pour en limiter l'amplitude;
- Elle permet d'avoir moins de perte dans le rapport signal sur bruit.

Les désavantages sont :

- Une plus grande complexité de l'électronique ;
- La nécessité de bien séparer la modulation de fréquence de chaque moitié de l'impulsion pour minimiser les lobes secondaires temporels.

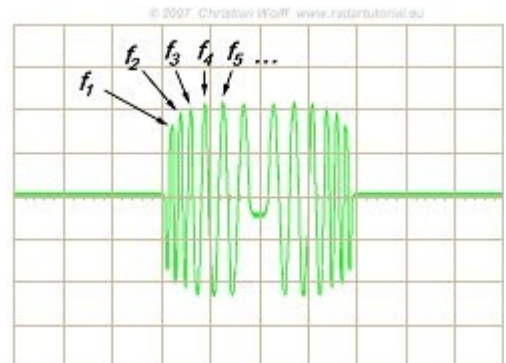


Figure 25 : Onde symétrique (par un générateur d'ondes).

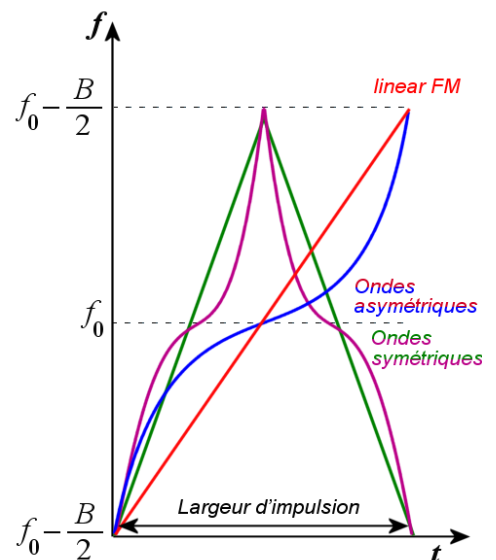


Figure 26 : Ondes asymétriques et symétriques.

Compression de phase

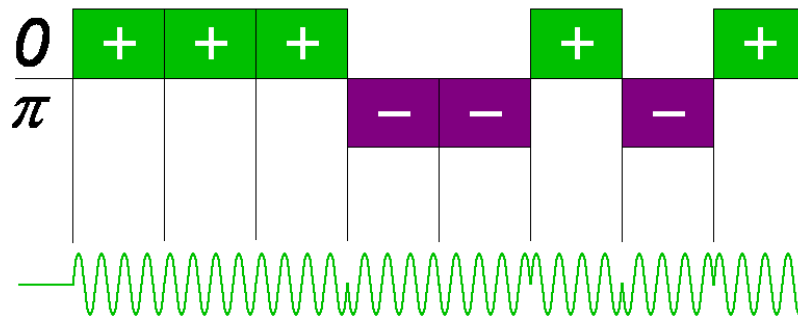


Figure 27 : Schéma d'une modulation de phase

Le codage de phase de l'onde diffère de celui de fréquence. Dans ce codage, une longue impulsion est divisée en plusieurs impulsions courtes qui correspondent généralement à une sous-section de la cellule de résolution de l'impulsion originale. Toutes les sous-impulsions ont la même durée mais une phase initiale différente qui devient son identité.

Ce codage est le plus souvent un code binaire. Par exemple, il est possible d'affecter à certains blocs un déphasage de zéro (ce qui revient à conserver ces blocs tels quels) et de déphaser les autres de π (ce qui revient à changer leur signe) comme dans la figure 27. Il s'agit donc d'une séquence de +1 et -1. L'introduction de ce codage donne des discontinuités de phase entre les sous-impulsions.

Le choix des phases aléatoires 0, π est très importante. Un cas spécial de ces codes est celui de Barker. Il est considéré comme optimum car il minimise les lobes secondaires temporels qui sont en plus d'égale amplitude. Le tableau montre la séquence de codage dans un tel cas. Une étude statistique par ordinateur a montré qu'un codage de 6 000 sous-impulsions ne nécessite que 13 éléments. Dans ce cas, le rapport de compression est de 13 et le niveau des lobes secondaires temporels est de -22.3 dB par rapport au lobe principal.

Il est également possible de coder le signal sur un alphabet de plus de deux phases (codage polyphasé). Comme dans le cas de la modulation de fréquence linéaire, il suffit de réaliser une corrélation entre le signal émis et le signal reçu pour avoir le signal compressé.

Longueur du code n	Éléments du code	Maximum d'intensité du lobe secondaire (dB)
2	+ -	-6.0
3	+ + -	-9.5
4	+ + - + , + + + -	-12.0
5	+ + + - +	-14.0
7	+ + + - - + -	-16.9
11	+ + + - - + + - - + -	-20.8
13	+ + + + + - - + + - - + -	-22.3

Tableau 3 : Codes de Barker.

Sommaire

1. Le transmetteur radar génère une série d'impulsion courte à un haut taux de répétition et à haute puissance;
2. La distance d'une cible se calcule à partir du temps aller-retour de la partie avant de l'impulsion transmise;
3. Les deux principaux types d'émetteurs utilisés sont:
 - a. Les radars pseudo-cohérents utilisant des tubes auto-oscillants pour produire l'impulsion. Leur phase changeant d'une impulsion à la suivante, le retour doit être corrélé avec la «signature» individuelle de chaque impulsion à la réception (cohérente sur réception);
 - b. Les radars cohérents qui utilisent un oscillateur stable et des amplificateurs de puissance.
4. La longueur de l'impulsion est déterminée par une onde carrée, son début et sa fin contrôlant le générateur d'onde. La durée de l'impulsion essentiellement déterminée de la résolution à distance souhaitée ;
5. Les impulsions peuvent être modulées en fréquence ou en phase («intra-modulation»). La durée de l'impulsion détermine la distance minimale possible;
6. Une puissance d'émission de 10% ou moins ne donne qu'une influence négligeable sur la portée maximale du radar.

© 2011 Radartutorial.eu

Tous les textes sont utilisables selon les termes de la *GNU- Free Documentation Licence* et une seconde licence dans les conditions de *Creative Commons*.