

Radartutorial

Chapitre 6: Récepteur

(Éditeur: Christian Wolff, traduction en langue française et révision:
Pierre Vaillant et Christophe Paumier, Version 24 mai 2012)

Sommaire

Objectifs	1
INTRODUCTION.....	2
SIGNAL MINIMUM DETECTABLE (SMD).....	2
BANDE PASSANTE.....	2
GAMME DYNAMIQUE.....	3
RECEPTEUR SUPERHETERODYNE.....	4
PRINCIPE	4
FILTRE DE PRESELECTION.....	4
MELANGEUR	5
FILTRE FI.....	6
AMPLIFICATEUR FI.....	6
AMPLIFICATEUR VIDEOFREQUENCE.....	6
OSCILLATEUR LOCAL	7
DOUBLE HETERODYNE	7
SYNTONISEUR (PREMIERE CONVERSION).....	7
1ERE AMPLIFICATION.....	8
SECOND CONVERTISSEUR	8
SECONDE AMPLIFICATION DE FI.....	8
COMMANDES AUTOMATIQUE DE GAIN.....	8
COMMANDE PRINCIPALE DE GAIN.....	9
GAIN VARIABLE DANS LE TEMPS (GVT).....	9
COMMANDE AUTOMATIQUE DE GAIN (CAG).....	9
AMPLIFICATEUR LOGARITHMIQUE.....	10
GAIN DYNAMIQUE DE BALAYAGE	11
COMMANDE AUTOMATIQUE DE LA FREQUENCE.....	11
CAF DANS LES RECEPTEURS RADIO.....	11
CAF DANS UN RECEPTEUR RADAR.....	12
CANAUX DE RECEPTION	12
CANAL D'AMPLITUDE.....	12
CANAL COHERENT.....	13
RECEPTEUR LINEAIRE D'UN RADAR METEOROLOGIQUE	13
SOMMAIRE.....	14
QUESTIONNAIRE.....	15

Objectifs

Le récepteur dans un radar sert à détecter les faibles échos captés par l'antenne, puis de les amplifier suffisamment pour en extraire l'information afin de l'afficher sur l'écran de l'opérateur. Cet appareil doit être capable d'extraire des signaux qui sont de plusieurs ordres de grandeur plus faibles que le signal émis par le radar et de les amplifier par un facteur de 20 à 30 millions de fois. Cela est une tâche ardue à la fréquence originale de l'onde porteuse radar et c'est pourquoi les récepteurs utilisent un procédé appelé « superhétérodyne » qui transforme l'onde reçue à une fréquence intermédiaire avant de procéder à l'amplification.

Dans ce module, le lecteur trouvera les informations nécessaires à la compréhension du récepteur. Il devrait pouvoir ensuite :

- Donner les exigences nominales que doit satisfaire un récepteur ;
- Décrire les principes du processus hétérodyne ;
- Décrire les composantes principale d'un récepteur ;
- Pouvoir décrire sur un diagramme les diverses opérations qui se passent dans un récepteur typique.

Introduction

Le récepteur reçoit les échos de retour qui ont été perçus par l'antenne. Il transforme le signal à haute fréquence du faisceau en un signal modulé de fréquence intermédiaire (FI) qui contient l'information des échos, l'amplifie et les transmet ensuite au système de traitement du circuit radar qui en retirera ensuite les cibles d'intérêt. Le récepteur idéal doit :

- Amplifier les signaux reçus sans y ajouter de bruit de fond ou distorsion;
- Optimiser la probabilité de détection de signaux grâce à une bande passante adaptée;
- Avoir une large plage d'intensités qu'il peut traiter sans saturation;
- Rejeter les signaux d'interférence pour optimiser l'extraction de l'information.



Figure 1 : Récepteur et générateur de signaux d'un radar ASR-E de contrôle aérien (Fabricant : EADS)

Signal minimum détectable (SMD)

Le signal minimum détectable (P_{min}) pour un récepteur est une caractéristique importante car elle détermine la portée maximale du radar. Pour un récepteur typique, sa sensibilité est de l'ordre de 10^{-13} Watts (-100 dBm), qu'on nomme le signal minimum détectable (SMD).

Tous les récepteurs sont construits avec un SMD qui correspond aux conditions d'utilisations. Il n'est pas plus élevé que nécessaire car cela limiterait la bande passante de réception et demanderait de traiter des signaux faibles qui ne sont pas significatifs. En général, plus le seuil minimal de SMD est élevé, plus bas sera le taux de fausses alarmes dans la détection de cibles mais cela limitera l'extraction de vrais signaux du bruit de fond.

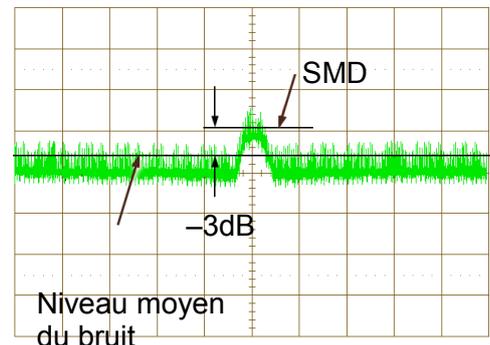


Figure 2 : Bruit blanc et un signal dépassant le SMD

Bande passante

La bande passante (exprimé par B , BP ou Δf) est un intervalle de fréquences, mesuré en Hertz, pour lesquelles l'amplitude de réception correspond à un niveau de référence, toute fréquence hors de cet intervalle doit tomber à une amplitude très inférieure (au moins 3dB plus bas).

Dans un récepteur radar, la bande passante dépend surtout l'étape de filtrage de la fréquence intermédiaire (FI). Il doit pouvoir traiter toutes les fréquences contenues dans l'écho de rétrodiffusion de la cible. Plus la bande passante est large, plus la quantité de bruit passant dans le récepteur est grande puisque ce dernier se retrouve à toutes les fréquences. Cela affecte donc le rapport signal sur bruit final et la sensibilité du récepteur.

La bande passante est grosso-modo proportionnelle à la quantité d'information contenue dans le signal. Ainsi pour détecter correctement une impulsion carrée par une transformée de Fourier rapide (TFR), la bande passante du récepteur doit être égale à la plus haute fréquence significative de la série de sinus qui décompose le signal provenant de

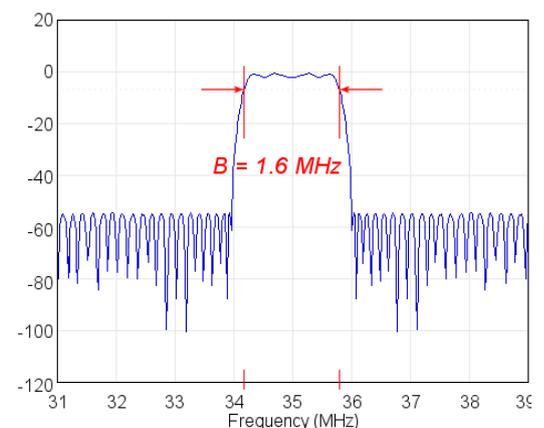


Figure 3: Graphique montrant un filtre passe-bande illustrant le concept de -3 dB (demi-puissance).

cette impulsion. Plus la bande passante est large dans ce cas, plus les côtés de l'onde carrée seront abrupts et mieux elle sera représentée.

Généralement, la bande passante B d'une impulsion en forme d'un demi-sinus de durée τ sera :

$$B = \frac{1}{\tau} \quad (1)$$

L'influence de l'effet Doppler-Fizeau sur un écho reçu va changer la durée du signal. Pour obtenir l'information de vitesse contenue dans cet effet, la bande passante du récepteur doit donc être plus grande que celle du transmetteur-radar. Dans les radars à modulation intra-impulsion, la bande passante du récepteur doit être beaucoup plus large que les fréquences de l'impulsion. Dans ce cas, elle dépend de la modulation interne du signal, de la longueur de l'impulsion et d'une fonction de pondération pour diminuer les effets des lobes secondaires temporels. Une bande passante normale est à peu près de 200 MHz avec les techniques actuelles. Les récepteurs de haute de gamme ont des *bandes passantes ajustables*.

Un autre facteur très important est le bruit du récepteur. Chaque récepteur ajoute au signal qu'il traite un certain bruit interne qui ne peut être évité même par la meilleure conception. Ce bruit est en effet dû au mouvement brownien des électrons dans les composantes résistives, donc au bruit thermique, et il est proportionnel à la bande passante du récepteur.

Produit durée-bande passante

Le paramètre généralement utilisé pour caractériser la compression d'impulsion est le *produit durée-bande passante*, ou *tempo-bande passante*, connu comme $T \cdot B$ (en $\mu\text{s} \cdot \text{MHz}$). Des valeurs de $T \cdot B$ entre 5 et 1 000 peuvent être obtenues dans certains radars. Avec une faible valeur, de 5 à 15, certaines techniques permettent une suppression impressionnante des lobes secondaires temporels de plus de 35 dB. Pour des valeurs de 15 à 500, des récepteurs radars de haut de gamme peuvent diminuer ces lobes de l'ordre de 35 à 45 dB, cela variant selon le décalage Doppler, le compromis sur la perte d'une partie du signal et la valeur de la FI.

Une grande valeur de $T \cdot B$, jusqu'à 1 000, est utilisable pour une haute résolution en distance et sur la mesure de la hauteur de la cible grâce à la différence temporelle entre l'écho de retour direct et celui par réflexion au sol (Détermination de la hauteur par trajets multiples).

Gamme dynamique

Le récepteur doit amplifier l'écho de retour des cibles. Ce dernier varie grandement selon la nature de la cible et sa section efficace radar. La gamme dynamique correspond au rapport du signal mesurable maximal sur le signal mesurable minimal (le SMD). La limite supérieure fait habituellement référence à l'intensité de saturation et la limite inférieure au bruit.

Le récepteur doit donc avoir une gamme dynamique qui dépasse le plus intense des échos de retour possible. En pratique, cela veut dire qu'il doit s'étendre jusque dans les 80 dB car les échos les plus intenses proviennent:

- Des précipitations jusqu'à 55 dB ;
- Anges radar jusqu'à 70 dB ;
- Échos de mer jusqu'à 75 dB ;
- Échos de sol jusqu'à 90 dB.

Récepteur superhétérodyne

Les signaux de radiofréquence reçus par l'antenne du radar doivent être transformés en signal de vidéofréquences pour en extraire les données sur les échos de retour des cibles. Pour cela, un système radar se sert d'un récepteur superhétérodyne dont les composantes principales se retrouvent dans le diagramme ci-dessous :

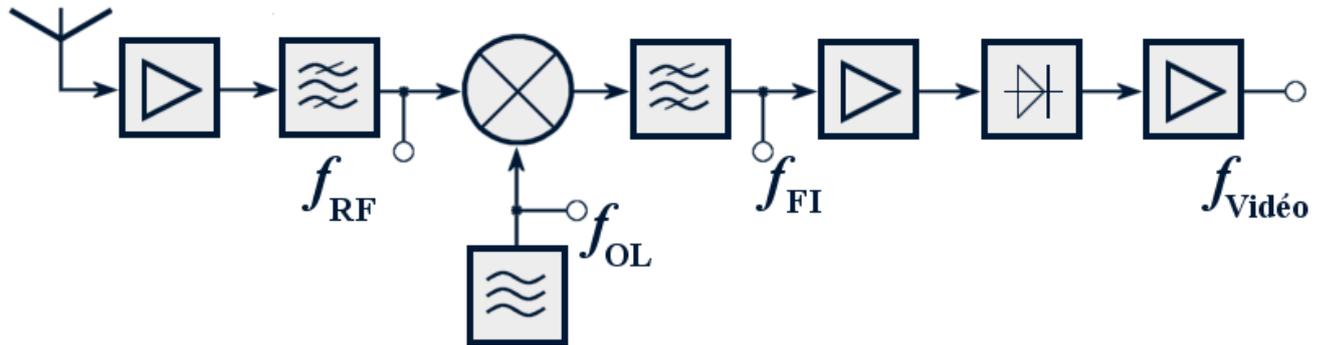


Figure 4 : Diagramme des composantes d'un récepteur superhétérodyne.

Principe

La Figure 4 montre le diagramme des composantes d'un récepteur superhétérodyne. Le signal de radiofréquences (RF) venant de l'antenne passe par un filtre qui ne laisse passer que la gamme de fréquences désirées. Le signal passe ensuite dans un mélangeur qui l'ajoute à une onde produite par un oscillateur local stable. Les deux signaux entrent en battement à une fréquence intermédiaire (FI) qui est la différence de fréquences entre les deux ondes, c'est le procédé de changement de fréquence, dit *hétérodyne*.

L'onde venant de l'oscillateur est automatiquement ajustée afin d'avoir toujours la même différence de fréquence avec celle du signal RF ce qui permet d'avoir une FI constante sur toute la plage de fréquences du récepteur. Le signal FI est ensuite envoyé vers un amplificateur qui augmente son intensité. Finalement, il passe dans un détecteur qui par démodulation en tirera la composante finale de vidéofréquences.

Un récepteur superhétérodyne diminue ainsi la fréquence du signal reçu depuis celle de la porteuse radar à une fréquence intermédiaire plus basse qu'il sera plus facile ensuite d'amplifier et de démoduler pour obtenir un signal de vidéofréquences.

Filtre de présélection

La réception commence par le signal issu de l'antenne. Celui-ci comprend la fréquence sur laquelle on veut se caler mais également d'autres fréquences ambiantes. Un filtre d'antenne, placé avant l'amplificateur, élimine les fréquences indésirables de façon à éviter que des signaux éventuels de forte amplitude ne saturent l'amplificateur haute fréquence (HF). Les limites de ce filtre sont choisies afin d'éliminer toute fréquence image parasite. La largeur de bande du récepteur ne doit pas être plus grande que la fréquence intermédiaire (FI).

L'amplificateur assure ensuite une première amplification. Il est conçu de façon à obtenir le meilleur rapport signal sur bruit possible. Il est important qu'il introduise le moins de bruit interne pour obtenir une meilleure réception.

Le récepteur sur plusieurs radars anciens n'utilisait pas ce stade de filtre et pré-amplification et envoyait le signal reçu directement à un mélangeur à cristaux. Cela avait certains désavantages dont celui de permettre la réception de signaux de fréquences parasites provenant de sources différentes.

Mélangeur

Le mélangeur, comme son nom l'indique, prend le signal pré-amplifié (f_{TX}) et le combine à une onde produite par l'oscillateur local ($f_{oscillateur\ local}$). Ces deux ondes entrent en battement à une fréquence intermédiaire (FI) double par changement de fréquence :

- $f_{FI} = f_{rx} - f_{oscillateur\ local}$
- $f_{FI} = f_{oscillateur\ local} - f_{rx}$

Le spectre de sortie est donc composé deux bandes latérales, positives et négative, identiques. La mesure ne peut être faire que sur l'amplitude absolue du signal, en général sur la différence suivante : $f_{FI} = |f_{oscillateur\ local} - f_{rx}|$

La fréquence non désirée, dite *fréquence image*, doit être à l'extérieur de la bande passante du filtre subséquent.

Par exemple, un récepteur qui opère à une fréquence intermédiaire de 60 MHz doit utiliser un oscillateur local dont la fréquence sera toujours à 60 MHz au-dessus du signal reçu. Un tel récepteur qui reçoit des signaux de 1030 MHz doit donc utiliser un oscillateur de 1090 MHz pour l'hétérodynage. Ce sera l'onde à FI qui sera amplifiée par la suite et envoyée au détecteur de signal. Tout signal à 60 MHz qui sort du mélangeur sera ainsi accepté comme venant de la FI et passé au convertisseur.

Dans un récepteur sans pré-filtre de radiofréquence, le spectre de fréquences contenu dans le signal venant de l'antenne est très large. Normalement, les fréquences non désirées tomberont à l'extérieur de la plage de la FI et seront rejetés. Il peut cependant parfois arriver que des signaux parasites donnent un battement à FI. Ainsi dans le même exemple, un signal provenant d'un autre émetteur mais à 1150 MHz produit dans le mélangeur un battement à la fréquence intermédiaire de 60 MHz ($|1150 - 1090| = 60$ MHz) qui se mélangera au signal provenant de la fréquence 1030 MHz et causera une **interférence par fréquence image**.

Calcul de la fréquence image

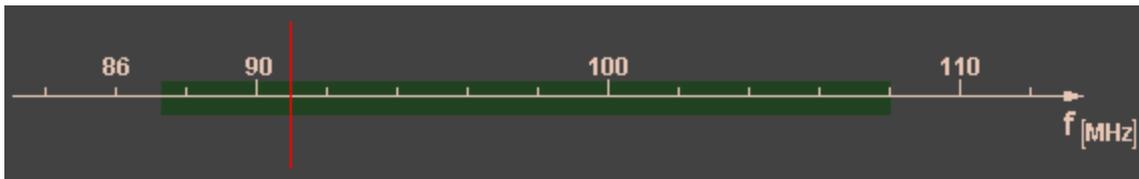


Figure 3 : Gamme de fréquences d'un récepteur radio MF limitée entre 87,5 et 108 MHz

Le calcul des fréquences images est similaire à la syntonisation d'une station radio avec un filtre qui ne laisse passer que certaines fréquences. En reprenant l'équation précédente, on peut identifier les deux fréquences qui donneront FI à la sortie du mélangeur :

- $f_1 = f_{oscillateur} + f_{FI}$
- $f_2 = f_{oscillateur} - f_{FI}$

Comme f_{FI} est le même : $f_1 - f_{oscillateur\ local} = f_{oscillateur\ local} - f_2$

Et : $f_1 + f_2 = 2f_{oscillateur\ local}$

$$f_{oscillateur\ local} = (f_1 + f_2) / 2$$

$f_{oscillateur\ local}$ est donc la fréquence moyenne entre les deux fréquences images. Par exemple, en utilisant une fréquence de l'oscillateur à mi-chemin de 87,5 et 108 MHz, soit 97,75 MHz, la sortie du mélangeur donnera un mélange des signaux reçus de ces deux fréquences. L'une des fréquences est donc la fréquence image de l'autre, à FI de 10,25 MHz.

Toute fréquence supérieure ou inférieure à intervalle sera éliminée. Ainsi un signal à 87,0 ou 108,5 MHz ne sortira pas à FI mais à un FI légèrement supérieur et sera filtré subséquemment. Dans ce cas:

$$2f_{IF} = (108,5 - 87,0) \text{ MHz et } f_{IF} = 10,75 \text{ MHz au lieu de } 10,25 \text{ MHz}$$

Bien qu'en général, la fréquence de l'oscillateur soit choisie pour être supérieure à la fréquence désirée, l'inverse peut aussi être utilisé. En résumé si :

$$f_{rx} > f_{Oscillateur\ local} \text{ alors } f_{image} = f_{rx} - 2 \cdot f_{IF}$$

$$f_{rx} < f_{Oscillateur\ local} \text{ alors } f_{image} = f_{rx} + 2 \cdot f_{IF}$$

Filtre FI

Le filtre de fréquence intermédiaire permet de ne garder que la fréquence désirée du signal de sortie du mélangeur. Il est conçu pour avoir une ou plusieurs bandes passantes étroites qui n'affectent pas la puissance du signal. Lorsque la largeur de l'impulsion radar est variable, par exemple un mélange de courtes et longues impulsions, la bande passante doit être adaptée à celle des différents retours.

Amplificateur FI

Après la conversion à la FI, le signal passe par une série d'amplificateurs qui donnent la plus grande partie du gain du récepteur. Cette étape d'amplification de fréquence intermédiaire doit être adaptée afin de pouvoir faire varier la bande passante et le gain du récepteur. La bande passante du récepteur est définie par celle de ces amplificateurs et le gain doit être variable afin d'obtenir une tension constante à la sortie pour toutes les parties du signal.

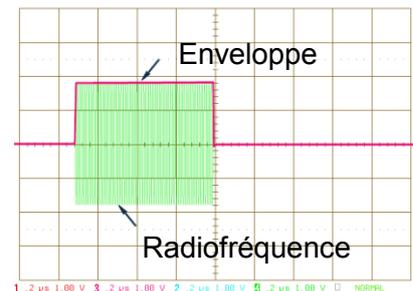


Figure 7: Signal passant par le détecteur vu à l'oscilloscope.

Détecteur

Le détecteur dans un récepteur de micro-ondes sert à convertir l'impulsion à FI en impulsion de vidéofréquences. Le plus simple détecteur est un circuit à diode. Il extrait l'enveloppe de l'impulsion revenant d'une cible : la diode laisse seulement passer la tension positive et le condensateur dans le circuit est un filtre passe-bas qui bloque les variations de tension de la fréquence FI. En plus de la modulation d'amplitude (MA), il est possible d'avoir un détecteur qui extrait d'autres types de modulation.

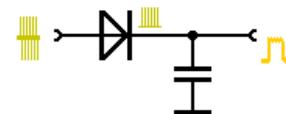


Figure 6: Un détecteur simple.

Amplificateur vidéofréquence

L'amplificateur de vidéofréquences reçoit le signal sortant du détecteur et en augmente la puissance afin qu'il soit possible de stimuler l'affichage radar. Il est essentiellement un circuit RC (résistance-condensateur) couplé à un amplificateur utilisant un transistor à fort gain capable de traiter une large bande de fréquences.

La sortie du récepteur est normalement « émettodyne » : amplifiée de telle sorte que la son amplitude demeure stable. La faible impédance de sortie est ajustée à celle du câble vers l'afficheur qui est soit un tube cathodique ou, plus récemment, un écran d'ordinateur.

Oscillateur local

L'oscillateur local engendre une onde continue en fréquence qui sera mélangée avec le signal pour le descendre à une fréquence intermédiaire

La plupart des récepteurs radar utilisent une fréquence intermédiaire (FI) dans le domaine des mégahertz, généralement entre 30 et 75 MHz. Celle-ci est extraite en mélangeant le signal reçu avec celui d'un oscillateur local (OL). Ce dernier est donc essentiel au fonctionnement du récepteur et doit être non seulement être ajustable en fréquence mais aussi très stable. Par exemple, un oscillateur de 3 000 MHz qui varie seulement de 0,1 % donnera un décalage de 3 MHz à la FI , ce qui est égal à la bande passante de la plupart des récepteurs et ce qui diminuerait grandement le gain espéré du signal de sortie.

La puissance de sortie des oscillateurs est faible (20 à 50 milliwatts) parce que la plupart des récepteurs utilise un mélangeur à cristal qui en demande peu.

La sortie de l'oscillateur doit être ajustable sur une gamme de fréquences de plusieurs MHz dans la zone de 4 000 MHz. Il doit en effet suivre toute variation de la fréquence du faisceau radar pour maintenir la différence de fréquences qui donne FI . Le meilleur moyen est un oscillateur dont la fréquence s'ajuste en variant la tension à ses bornes.

La fréquence de l'oscillateur est soit inférieure ou supérieure à celle de la porteuse. Un amplificateur sélectif en amont du convertisseur permet de filtrer les fréquences images ce qui ajoute à la sensibilité du récepteur.

Double hétérodyne

Lors du choix de la fréquence intermédiaire (FI), il faut tenir compte des paramètres suivants :

- Aucun autre transmetteur n'opère avec suffisamment de puissance à cette fréquence dans la région ;
- Elle doit être suffisamment basse pour une démodulation facile ;
- Elle doit être adaptée à la gamme de fréquences de réception qui permet d'éviter les fréquences images.

Ces paramètres sont difficiles à concilier et le choix de FI est souvent un compromis pour minimiser leurs effets. Plusieurs récepteurs évitent ce compromis en utilisant une **double conversion de fréquence**.

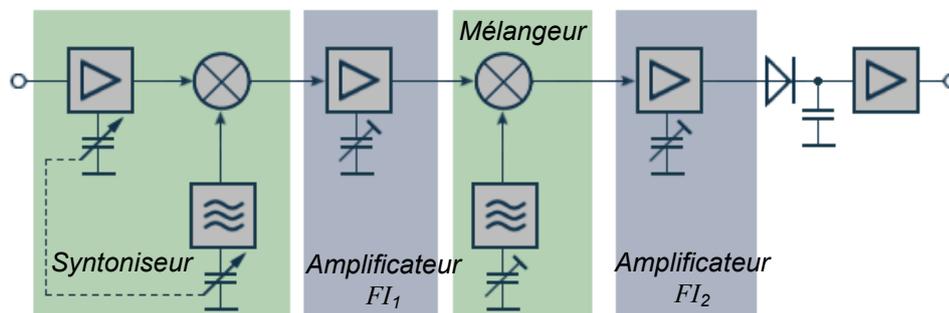


Figure 4 : Diagramme fonctionnel d'un convertisseur à double hétérodyne.

Cette méthode est parfois appelée à double hétérodyne. Les récepteurs l'utilisant ont une très faible bande passante et peuvent éliminer les fréquences images. La double conversion donne également une sélection plus précise de fréquence ce qui permet de discriminer entre deux sources très proches en fréquence.

Syntoniseur (première conversion)

Le syntoniseur est un convertisseur de fréquence comprenant un mélangeur, le premier oscillateur local (OL) et des filtres. Le convertisseur amène le signal d'entrée à la fréquence intermédiaire (FI_1), par exemple 500 MHz, grâce au mélange avec la fréquence de l'oscillateur. Après le mélangeur, seule la FI_1 désirée reste pour traitement futur.

1ère amplification

Le premier amplificateur ne travaille que sur une gamme de fréquences relativement étroite et donne un fort gain au signal à FI_1 . Comme cette dernière est assez élevée, par exemple 500 MHz, cette section du circuit nécessitera un blindage pour l'isoler des influences externes. Des mesures de commande automatique de gain doivent être incluses à cette étape.

Second convertisseur

Le signal maintenant à FI_1 est à nouveau mélangé, cette fois avec le signal d'un second oscillateur local, ce qui la ramène à une fréquence intermédiaire plus basse FI_2 . Celle-ci se situe généralement dans la région de 60 à 75 MHz.

Seconde amplification de FI

La seconde amplification travaille aussi sur une plage étroite de fréquences et donne un fort gain au signal. FI_2 , qui se situe généralement dans la région de 60 à 75 MHz, peut être traitée facilement ensuite pour en extraire l'information sur les cibles radar. L'amplification de FI à ce stade détermine le gain global du récepteur, son rapport signal sur bruit et sa bande passante efficace. Typiquement, la seconde amplification est formée d'une série d'amplificateurs, de trois à dix, qui sont variables en bande passante et en gain.

La chaîne d'amplificateurs est le plus souvent logarithmique et ne peut être saturée par le signal sortant du second convertisseur. L'amplification d'un signal tend ainsi vers une limite exponentielle au lieu d'une valeur fixe. Les variations d'amplitude d'un faible signal à FI_2 seront perceptibles à la sortie de l'amplification alors qu'avec une série d'amplificateurs linéaires, on pourrait se retrouver avec un signal plat à intensité maximale.

Commandes automatique de gain

	Français	Anglais	Russe (Cyrillique)	Allemand
CPG	Commande principale de gain	main gain control (MGC)	Ручная Регулировка Усиления	Handregelung
GVT	Gain variable dans le temps	sensitivity time control (STC)	Временная Автоматическая Регулировка Усиления	Entfernung- (also: zeit-) abhängige automatische Verstärkungsregelung (Siemens- Neudeutsch: GTC: Gain Time Control)
CAG	Commande automatique de gain	automatic gain control (AGC)	Шумовая Автоматическая Регулировка Усиления	rauschabhängige Automatische Verstärkungs-Regelung
ampli-log	Amplificateur logarithmique	logarithmic amplifier		logarithmischer Verstärker

Tableau 1 : Différentes méthodes de commande automatique de gain.

La plupart des radars utilisent une méthode ou une autre pour empêcher la saturation de leur récepteur lors de l'amplification de la fréquence intermédiaire (FI) en une ou plusieurs étapes. Le contrôle manuel par l'opérateur radar est la plus simple façon de le faire mais elle est très aléatoire et accaparante.

De plus, la variation d'intensité des signaux à traiter par les récepteurs radar est très grande. Les échos près du radar sont beaucoup plus intenses que ceux à grande distance à cause de la diminution en $1/R^4$ selon l'équation du radar. L'ajustement du gain est donc variable avec la distance et avec les propriétés réfléchives des cibles.

Commande principale de gain

L'opérateur peut avoir à sa disposition un bouton d'ajustement manuel, le plus souvent il ne s'agit que d'un potentiomètre qui ajuste au mieux la tension de gain. Cette commande est souvent sous-estimée ou mal utilisée parce qu'elle n'aide pas à augmenter la sensibilité du récepteur seulement à rehausser tous les échos jusqu'à saturation.

L'opérateur ne voit souvent pas plus de cibles car les signaux plus faibles sont perdus dans le bruit. Ce dernier peut même apparaître sur des zones entières d'un affichage PPI. Cette commande doit donc être utilisée de façon optimale ainsi :

- Le contrôle vidéo et de luminosité sur l'unité d'affichage doivent être ramenés au minimum ;
- Le bouton de luminosité doit être ajusté jusqu'à ce qu'un écho témoin émis par le système lui-même puisse être juste perçu à l'écran ;
- Le contrôleur vidéo (gain) est ensuite tourné jusqu'à voir le bruit de fond apparaître. Ce dernier devrait être 3dB plus faible que l'écho témoin, soit deux fois moins intense ;
- L'opérateur répètera ces étapes une demi-heure plus tard, après que ses yeux se soient habitués à l'obscurité et puisse mieux comparer les intensités.

Gain variable dans le temps (GVT)

L'application d'un gain uniforme, comme dans la méthode manuelle, n'est pas la meilleure solution à cause de la variabilité des échos. Différentes méthodes furent développées pour effectuer automatiquement ces corrections d'intensité.

Les premiers circuits de contrôle du gain, appelés **gain variable dans le temps (GVT)**, utilisaient la propriété de variation avec la distance, et donc le temps, du signal radar. Ces circuits appliquaient une correction inversement proportionnelle au temps passé entre l'émission et la réception de chaque impulsion reçue dans une période de répétition d'impulsion.

La Figure 9 montre en vert la variation avec la distance de l'intensité du faisceau radar avec certains pics correspondants à des échos. Le circuit de gain variable dans le temps applique la courbe inverse en rouge pour normaliser l'intensité des retours. Celle-ci est idéalement en R^4 mais cela est difficile à produire. En pratique, c'est la tension de chargement d'un condensateur qui est utilisé, ce qui donne une fonction exponentielle.

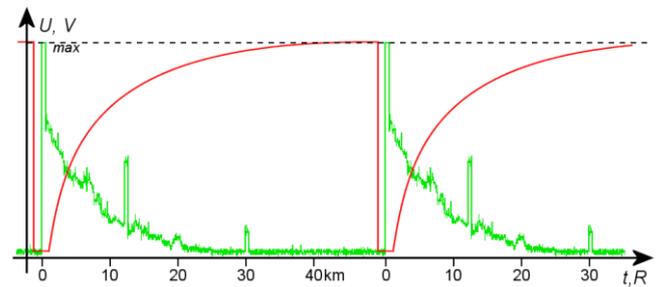


Figure 9 : Diagramme de la méthode de gain variable dans le temps

Il est à remarquer que le gain appliqué très près du radar est nul. Cette période correspond à la distance aveugle durant laquelle l'impulsion est émise. Durant ce laps de temps, il est toujours possible qu'une partie du très puissant signal émis passe du circuit d'émission vers le récepteur et le gain nul permet d'éviter de griller ce dernier.

En général, le GVT n'est utilisé que pour des distances allant jusqu'à 80 km du radar. Cela évite la saturation du récepteur par de très probables forts échos de retour à l'intérieur de cette distance. Les échos provenant de plus loin ont peu de chance d'être assez forts pour affecter le récepteur et aucune correction ne leur est appliquée.

Commande automatique de gain (CAG)

Contrôler le gain est une nécessité pour obtenir la meilleure réception de signaux variant grandement d'intensité. Une forme complexe de commande automatique de gain (CAG) ou de commande automatique instantanée de gain (CAIG) est utilisée en exploitation normale.

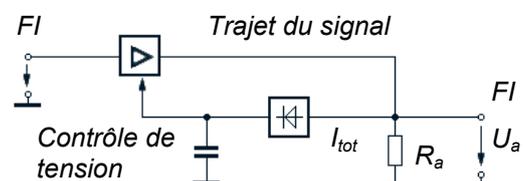


Figure 5 : Schéma de la commande automatique de gain.

Le CAG est une méthode permettant de contrôler automatiquement le gain dans les étages d'amplification d'un récepteur radio de façon à ce que le signal de sortie demeure relativement insensible aux variations de l'intensité de réception. La plus simple forme de CAG est d'ajuster le biais, et par conséquent le gain, de l'amplificateur selon le niveau des signaux reçus. Ainsi le gain est proportionnel au plus fort signal reçu et si plusieurs signaux entrent simultanément cela amplifiera seulement les plus faibles signaux, souvent ceux avec le plus d'importance pour l'opérateur.

Le CAIG est cependant la méthode plus souvent utilisée de nos jours. Le gain γ est ajusté pour chaque signal individuellement. Il est formé d'un amplificateur de courant continu à large bande passante qui varie instantanément le gain appliqué au signal de fréquence intermédiaire mais inversement au changement d'intensité de celui-ci. Ainsi, l'amplification suit une pente inverse à celle de la variation d'intensité des signaux ce qui augmente les faibles échos et diminue les échos forts.

La gamme dynamique d'un CAIG est limitée par le nombre d'étapes d'amplification de la FI. Quand il n'y a qu'une étape, le gain est généralement autour de 20 dB mais il peut atteindre 40 dB pour une série d'amplifications.

Amplificateur logarithmique

Un amplificateur logarithmique est spécialement conçu pour ne pas saturer tout en n'utilisant pas de circuit spécial de contrôle du gain. La tension de sortie de cet amplificateur augmente de façon linéaire pour les faibles signaux d'entrée et devient une asymptote logarithmique quand l'intensité des signaux augmente. Ainsi la tension de sortie n'atteint jamais la valeur de saturation, au contraire des amplificateurs ordinaires de FI.

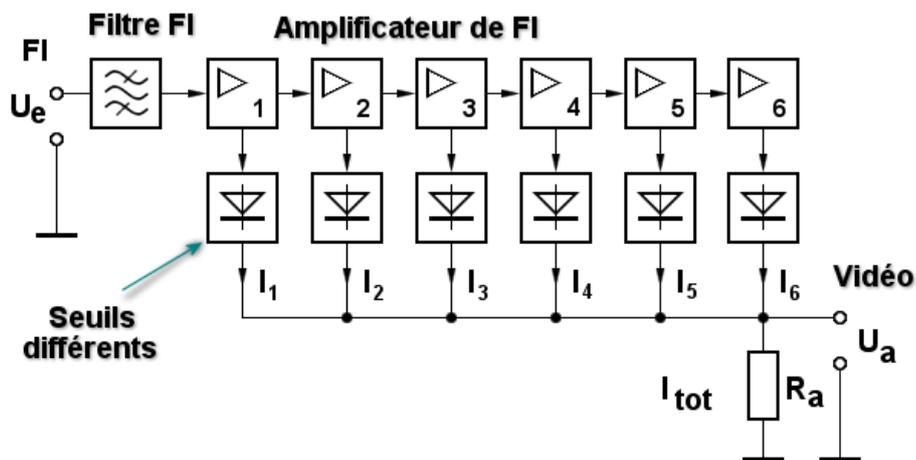


Figure 11 : Schéma fonctionnel d'un amplificateur logarithmique.

Un circuit typique pour obtenir un gain logarithmique est montré dans la Figure 11. Il s'agit d'une série d'amplificateurs par lesquels passe le signal radar. Ils sont reliés à des diodes et un détecteur (points I) qui peut mesurer la tension à chaque étape d'amplification. La tension de sortie dépend de la somme des tensions venant de ces détecteurs et non de la tension finale des amplificateurs.

Ainsi, la série d'amplificateurs augmente linéairement l'intensité du signal FI ce qui peut mener à la saturation à l'amplificateur final. Cependant, la tension ne sera pas à son maximum aux détecteurs antérieurs. Lorsqu'un signal passant dans la série d'amplificateurs est graduellement rehaussé pour atteindre la saturation du dernier de ceux-ci, la tension en I_5 sera à la valeur de saturation. Par contre, celle aux détecteurs antérieurs ne le sera pas. La valeur de sortie du circuit sera la somme de I_1 à I_5 .

Si un autre signal légèrement plus fort passe dans le circuit, la somme des tensions des détecteurs sera légèrement plus forte même si I_5 a toujours la même valeur. Plus le signal reçu augmente d'intensité plus d'amplificateurs de la série satureront en ordre décroissant de leur position dans la

chaîne. En choisissant soigneusement le nombre d'amplificateurs et leur niveau de saturation, on obtient une réponse approximativement logarithmique et on évite la saturation.

Un défaut de ce circuit est que si deux signaux arrivent en même temps, un faible et un fort, ils se confondent dans le récepteur et le gain sera légèrement réduit pour celui qui est faible à cause de la limitation appliquée au second.

Gain dynamique de balayage

Il y a toujours des échos permanents, comme des échos de sol venant du relief, qui affecte les données radars. Leur intensité peut être importante mais leur position est connue et le gain peut être ajusté pour en diminuer les effets sur l'affichage radar. Les récepteurs anciens appliquaient un masque pour diminuer le gain à ces endroits mais les caractéristiques de ces échos varient avec les conditions atmosphériques ce qui pouvait mener à une compensation incorrecte. Les récepteurs modernes mesurent l'intensité réelle pour un grand nombre de cellules de résolution durant le balayage et peuvent ainsi ajuster le gain dynamiquement.

L'atténuation appliquée ensuite au signal suit généralement une variation par rapport à la valeur statistique du masque fixe.

Cette approche est simple mais comporte un défaut : sur les bords de la zone de fouillis radar, la variation est souvent abrupte avec la zone libre de fouillis. L'analyse de l'intensité par le système a tendance à étaler cette bordure ce qui étend l'atténuation à une certaine distance hors du masque, le tout affectant la *visualisation des cibles mobiles* dans cette zone. Cela est particulièrement vrai avec les impulsions longues et les impulsions compressées qui ont des cellules de résolution plus larges.

Le gain dynamique de balayage est généralement appliqué à des diodes PIN dont la tension est biaisée pour donner des caractéristiques assez linéaires.

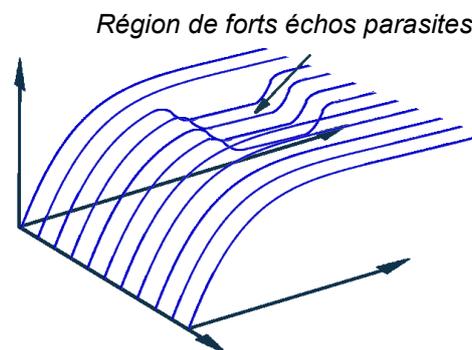


Figure 12: Diagramme montrant une série de GVT sur différents azimuts.

Commande automatique de la fréquence

Le récepteur radar requiert une plage d'ajustement de la fréquence de réception pour compenser les variations du transmetteur et de l'oscillateur local causées par le changement de température d'opération. Il possède donc généralement une commande automatique de fréquence (CAF).

CAF dans les récepteurs radio

Une CAF est utilisée dans des situations pour lesquelles la fréquence d'un oscillateur doit être contrôlée par un signal externe. Le circuit perçoit la différence entre la fréquence réelle de l'oscillateur et celle désirée, et produit une tension proportionnelle à celle-ci.

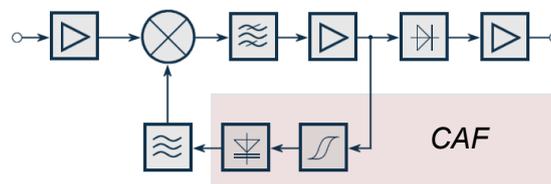


Figure 13 : Schéma d'un récepteur ayant une commande automatique de fréquence (CAF)

Un **varactor**, ou diode à capacité variable, sert alors à garder la fréquence intermédiaire (FI) stable. Il produit en effet une réactance virtuelle qui sera incluse dans la fréquence de l'oscillateur pour son ajustement. Par exemple, avec une FI de 10,7 mégahertz et un oscillateur local de fréquence inférieure à la porteuse du signal, lorsque le LO diminue de fréquence, la FI augmente. Cela va donc en rétroaction augmenter la tension à la sortie du discriminateur et augmenter la réactance du varactor pour ramener la fréquence de l'oscillateur à celle désirée. Et vis-versa pour une augmentation de la fréquence du LO.

Ce type de CAF est utilisé dans les récepteurs radio, les transmetteurs MF et les synthétiseurs de fréquence pour stabiliser la fréquence. Il nécessite une amplitude relativement constante du signal d'entrée (signal reçu) ce qui n'est pas le cas pour un récepteur radar.

CAF dans un récepteur radar

L'ajustement automatique de la fréquence dans un radar non cohérent ou un pseudo-cohérent utilise l'un des deux circuits suivants:

1. La fréquence du transmetteur réajuste celle du récepteur (cas 1) ;
2. La fréquence du récepteur réajuste celle du transmetteur (cas 2).

Dans les deux cas, un échantillon du signal transmis est gardé grâce à un coupleur directif mis entre le transmetteur et le duplexeur. Ce signal, de même fréquence que la porteuse, est mélangé avec celui de l'oscillateur local pour donner un signal CAF-FI qui sera envoyé dans un circuit discriminateur de fréquence très sensible pour donner une tension proportionnelle à la différence de fréquence et de polarité avec la FI du signal retourné par les cibles.

Ainsi, si la FI et la CAF-FI sont égales, le voltage à la sortie du discriminateur sera nul. Sinon la tension sera appliquée à l'oscillateur local pour corriger toute déviation en fréquence comme dans la Figure 14. Alternativement, la tension peut être appliquée au transmetteur pour corriger sa fréquence. Ce second cas revient à utiliser l'oscillateur local plus stable comme étalon de fréquence.

Le circuit du cas 1 est le plus utilisé dans les radars peu coûteux ou anciens qui se servent d'un magnétron auto-oscillant car ces derniers ne sont pas ajustables en fréquences. Le second cas est donc réservé pour les transmetteurs à tube micro-onde. La fréquence est alors ajustée en modifiant mécaniquement les dimensions de la cavité résonnante grâce à la tension du discriminateur.

Les radars entièrement cohérents n'ont pas besoin de CAF car la fréquence du transmetteur et du récepteur proviennent d'une même horloge interne ce qui donne une cohérence optimale et une stabilité totale entre les signaux émis et reçus.

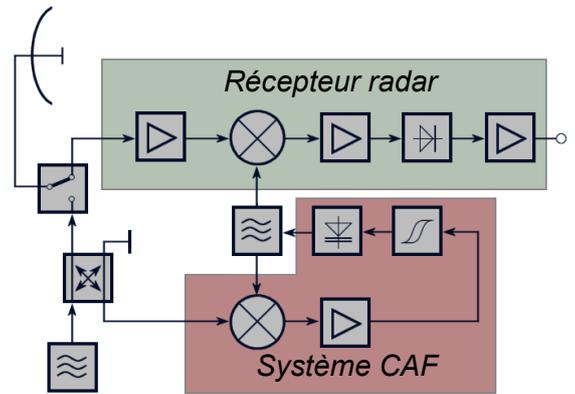


Figure 14: Schéma du circuit de commande automatique de fréquence pour un récepteur radar (cas 1).

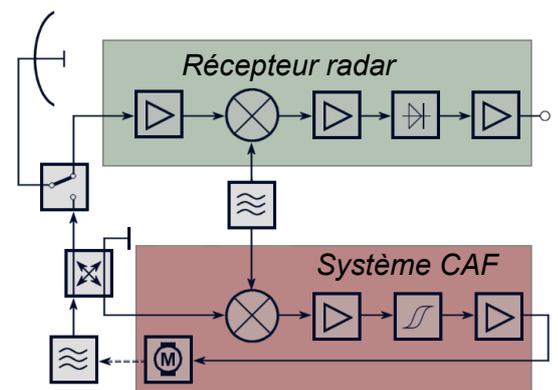


Figure 15: Schéma du circuit de commande automatique de fréquence pour un récepteur radar (cas 2).

Canaux de réception

Canal d'amplitude

Le signal à la sortie du récepteur peut avoir différentes propriétés : amplitude, polarité et décalage Doppler. Dans le cas le plus simple de traitement, le signal à la fréquence intermédiaire (FI) est redressé par une diode puis passe par un condensateur ce qui en extrait l'enveloppe de l'amplitude, soit le *signal vidéo*. Comme cette onde inclut des fréquences allant jusqu'à 5 MHz (variant selon la bande passante du récepteur), on ne peut parler d'un récepteur de *basse fréquence* et le principe de la démodulation est plutôt le même que pour une onde de *fréquence moyenne*.

Ce type de sortie du récepteur donne un maximum de sensibilité au récepteur radar. Un désavantage majeur est cependant que l'analyse de la fréquence Doppler n'est pas possible et que les échos parasites se superposent au signal. Cette sortie du récepteur dans un radar analogique était donc utilisée pour le traitement des données de la portée éloignée de l'affichage, une zone où il n'y a normalement pas de fouillis radar dû aux échos permanents, comme ceux du sol, car le faisceau y est trop en altitude.

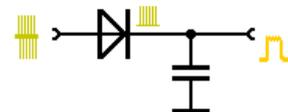


Figure 6 : Le plus simple démodulateur est un détecteur d'enveloppe du signal.

La démodulation simple est utilisée dans les radars modernes de surveillance aérienne pour :

- La détection d'interférences dues au brouillage électronique ;
- La détection des précipitations, usage comparable au [mode chasse-pluie](#) ;
- Une sortie pour le dispositif de test intégré (acronyme BITE en anglais).

Canal cohérent

Le signal de FI est déjà amplifié et seulement modifié par une compression de la gamme dynamique à la sortie du récepteur. Pour analyser le décalage Doppler, et donc la vitesse radiale de la cible, la sortie doit passer dans un démodulateur à détection de phase. Cela permet aux radars modernes de surveillance aérienne de détecter les cibles mobiles.

Récepteur linéaire d'un radar météorologique

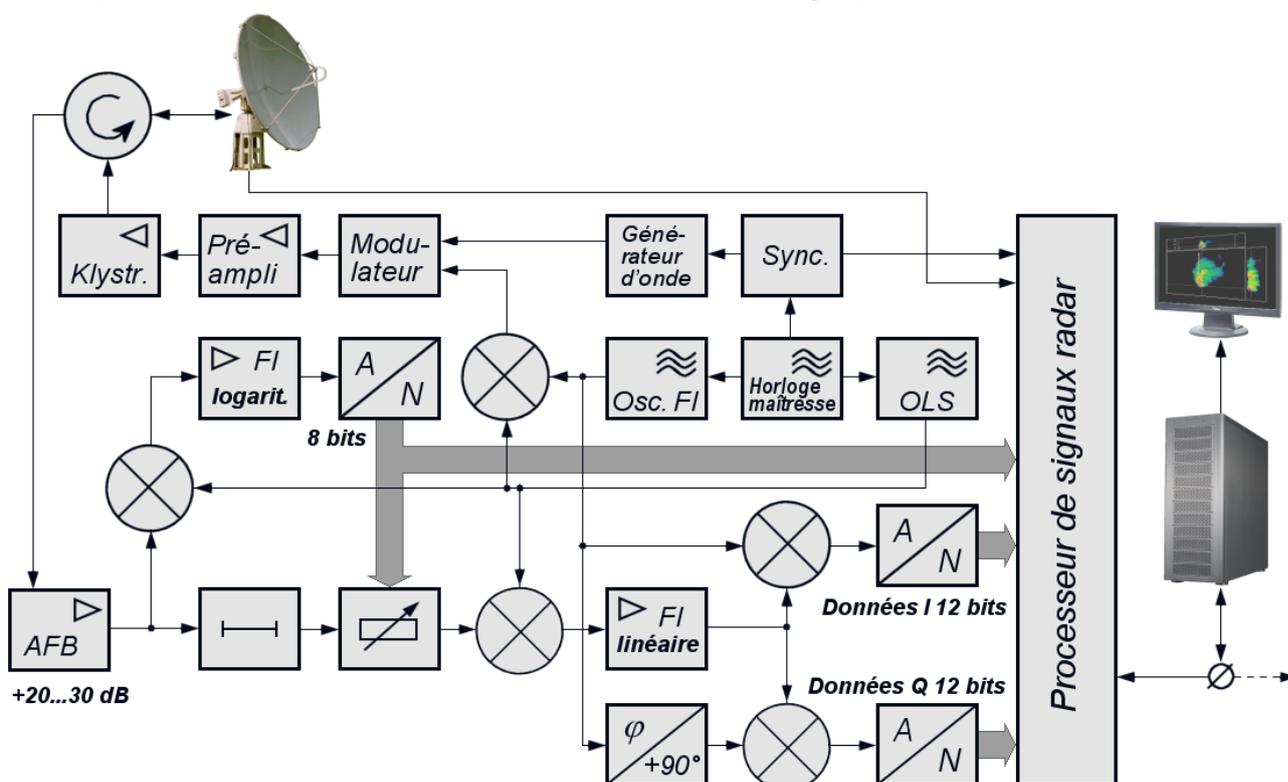


Figure 17 : Schéma du circuit du récepteur linéaire frontal d'un radar météorologique.

Dans un radar météorologique, ce n'est pas seulement la détection qui est importante mais également l'intensité du signal car elle est proportionnelle au taux de précipitations. Le récepteur est donc plus complexe tel qu'on peut le voir dans la Figure 17. Celle-ci montre le circuit pour un radar cohérent où toutes les fréquences et les déclencheurs sont issus d'un *oscillateur maître stable*, ou *oscillateur cohérent* (COHO en anglais). Cela assure la synchronisation des opérations du transmetteur et du récepteur. En particulier, la fréquence de la porteuse et de l'*oscillateur local stable* (OLS) sont produites grâce à la démultiplication de la fréquence du COHO. La première est amplifiée par un klystron à cavités multiples et envoyée par l'antenne. La seconde est mélangée aux échos de retour dans le récepteur pour donner la fréquence intermédiaire (FI) qui sera envoyé au processeur de signaux.

Ce type de radar doit pouvoir filtrer les forts échos de sols, doit être extrêmement sensible et par-dessus tout avoir une très grande résolution à l'intérieur d'une gamme dynamique étendue d'intensités. Tout changement dans la linéarité du gain doit être connu par le processeur de signaux afin de bien rendre l'intensité du signal qui a été compressé antérieurement dans le récepteur. Les circuits simples de commande automatique du gain, comme le *Gain variable dans le temps* et l'*amplification logarithmique avec démodulation*, utilisés dans les radars de surveillance aérienne, ne sont pas compatibles car non linéaires.

Dans un radar météorologique, un amplificateur logarithmique suivi d'un convertisseur analogue-numérique (A/N) est utilisé pour créer un signal qui sera passé à un affaiblisseur (transducteur fixe ou réglable servant à la réduction d'amplitude d'une onde sans l'introduction de distorsion appréciable). Le convertisseur A/N doit être extrêmement rapide pour que la valeur de l'affaiblissement soit liée à chaque écho individuellement. Des circuits A/N flash avec un délai de l'ordre de la nanoseconde sont utilisés et le signal doit être retardé d'autant, par une ligne à retard fait d'un câble coaxial de plusieurs mètres de longueur, avant d'être traité par le processeur radar. Ce dernier utilise les données numériques et les indications de l'affaiblisseur pour correctement en tirer l'intensité de l'écho.

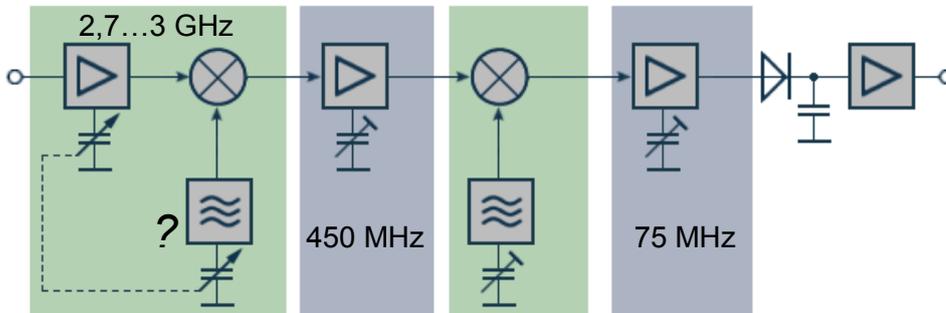
Sommaire

1. Le récepteur radar reçoit de l'antenne les signaux radio de l'environnement et en extrait les échos à la fréquence de la porteuse radar.
2. Les récepteurs **superhétérodynes** sont les plus communément employés.
3. Une **fréquence-miroir** est une harmonique qui est produite à la sortie du mélangeur de fréquences parce que la différence et la somme entre la porteuse et la fréquence de l'oscillateur local ne peuvent être différenciées à la sortie de FI. Un filtre spécial doit être utilisé pour l'éliminer. En général, un circuit **double hétérodyne** empêchera que la fréquence-miroir ne sorte d'un récepteur ayant une large bande passante.
4. Pour une normalisation des intensités des cibles rapprochées et éloignées :
 - Un circuit à *gain variable dans le temps* (GVT) est utilisé pour ajuster le gain de l'amplificateur selon la distance au radar. Il peut être statique ou dynamique ;
 - Une *commande automatique de gain* (CAG) est nécessaire pour ajuster la sensibilité du récepteur lorsque les signaux varient grandement en intensité ;
 - Un amplificateur logarithmique prévient les échos très puissants de saturer le récepteur.
5. Le décalage de fréquence des échos, dû au déplacement des cibles, doit être préservé durant la démodulation afin de l'utiliser pour la détection des cibles mobiles.

Questionnaire

Ce questionnaire porte sur les notions de bases du récepteur radar prend environ 30 minutes à compléter.

1. Dans la figure ci-dessous, l'oscillateur local stable (OLS) utilise une fréquence supérieure à la porteuse radar qui est de 2,7 à 3 GHz. L'OLS donne une fréquence intermédiaire de 450 MHz dans la première étape et de 75 MHz dans la seconde. Quelle gamme de fréquences doit pouvoir au moins donner l'OLS ?



- 75 – 450 MHz
 - 3,15 – 3,45 GHz
 - 2,7 – 3,0 GHz
2. Quelle est la fréquence qui devrait être utilisée par l'OLS à gauche si la porteuse est de 2,8 GHz?
 - 3,15 GHz
 - 3,55 GHz
 - 3,70 GHz
 3. Si l'on utilise un détecteur pour mesurer la sensibilité du récepteur radar (SMD), peut-on mesurer la courbe d'étalonnage du récepteur sans un autre instrument de mesure spécial?
 - Non, ce n'est pas techniquement possible
 - Oui, cela est techniquement possible mais demande beaucoup de temps
 4. Si la largeur de bande passante des échos radars est de 5 MHz, lequel des modules suivants doivent pouvoir traiter ces fréquences?
 - Tous les amplificateurs de fréquence intermédiaire (FI)
 - Tous les amplificateurs vidéo
 - Tous les oscillateurs locaux