

Chapitre 1. Principe Radar

I.1 Principe Radar

Radar (*Radio Detection And Ranging*) : « détection et télémétrie radio ». Le radar a été créé à la fin des années 1930

Le radar est en même temps un émetteur et un récepteur d'ondes électromagnétiques, tels que :

- les rayons infrarouges (télécommande de TV, chaleur) ;
- les rayons ultraviolets (lampes à bronzer) ;
- les rayons X (matériel d'imagerie médicale) ;
- les rayons gamma (la radioactivité) ;
- les signaux émis et reçus par les CB, talkie-walkie, téléphone fixe sans-fil, téléphone portable ;
- et les rayons microondes (les fours à microondes).

Les radars travaillent dans une gamme de fréquences proches que celles des micro-ondes vue leurs exploitations faciles vis à vis les besoins que sont la détection et la télémétrie quelque soit les conditions météorologiques.

I.2. Cycle de travail d'un appareil radar

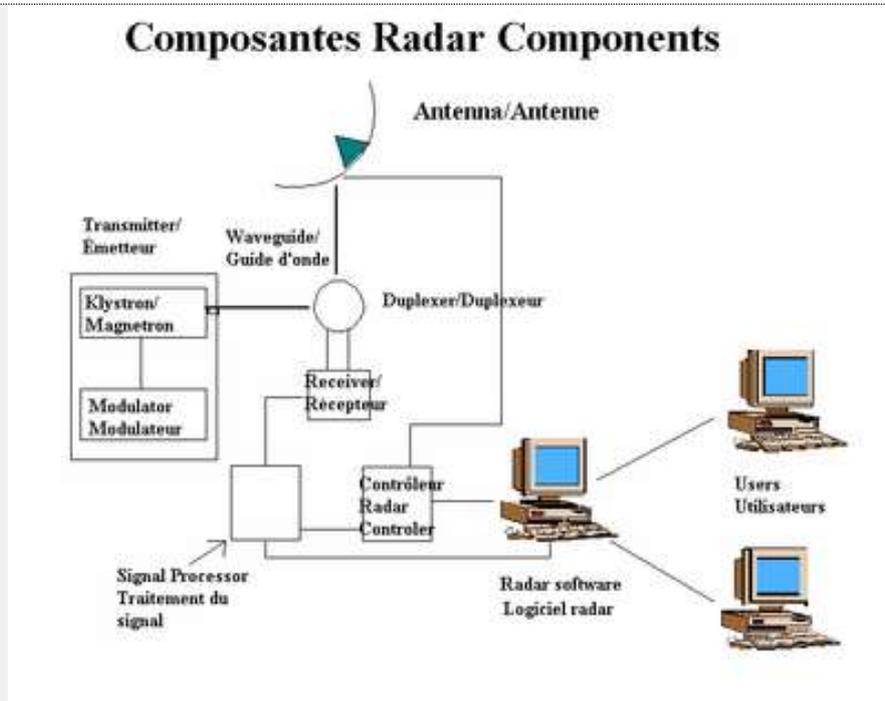
1. La partie émettrice du radar crée, émet, une onde électromagnétique vers une direction précise
2. L'OEM se propage dans l'air à la vitesse de la lumière ($c=300.000$ km/s).
3. Si elle rencontre un obstacle, une partie de l'OEM est réfractée (transmise avec modification d'angle d'incidence) et l'autre partie est réfléchie.
4. Le radar détecte la partie réfléchie donc présence d'un obstacle, c'est la fonction *Detection de Radio Detection And Ranging*.
5. Le radar a été construit de façon à connaître le temps d'envoi de l'OEM incidente et le temps de retour de l'OEM réfléchie De cette façon, on peut déterminer la durée de séparation entre ces deux moments et par conséquent la distance entre ce radar et l'obstacle en se basant sur la vitesse de l'OEM (300.000 km/s environ), c'est la fonction *Ranging* (télémétrie) de *Radar Detection And Ranging*.



Le principe est identique pour les sonars actifs utilisés sur les sous-marins, l'air est remplacé par l'eau, et l'OEM est remplacée par l'onde sonore, un son.

- OEM incidente : cette OEM est celle qui arrive sur l'obstacle. Elle existe avant de rencontrer l'obstacle, elle disparaît ensuite car elle se transforme en OEM réfléchi et OEM réfractée.
- OEM réfléchi : cette OEM est celle qui est renvoyée par l'obstacle. Elle n'existe qu'une fois que l'OEM incidente a rencontré l'obstacle.
- OEM réfractée : cette OEM est celle qui est absorbée par l'obstacle. Elle n'existe qu'une fois que l'OEM incidente a rencontré l'obstacle.

I.3 Technologie du radar



Composantes d'un radar (Exemple :Radar monostatique)

Composantes d'un système radar

Un radar est formé de différentes composantes :

- Un émetteur qui génère l'onde radio.
- Un guide d'onde qui transmet l'onde vers l'antenne.
- Un duplexeur ou commutateur électronique, dirige l'onde vers l'antenne lors de l'émission ou le signal de retour depuis l'antenne vers le récepteur lors de la réception.
- Une antenne dont le rôle est de diffuser l'onde électromagnétique vers la cible avec le minimum de perte.
- Un récepteur qui reçoit le signal incident (cible - antenne - guide d'ondes - duplexeur).
- Un étage de traitement de signal permettant de traiter le signal brut afin d'en extraire des données utiles. Les données obtenues sont affichées aux utilisateurs.

Radar monostatique et bistatique

- Dans une configuration monostatique, le partage de l'électronique et de l'antenne permet de réduire l'encombrement et les coûts de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur.
- Dans une configuration bistatique, le récepteur est distinct de l'émetteur et est totalement passif, donc moins facilement détectable par un ennemi potentiel.

Génération de l'onde

L'émetteur du radar comprend: un oscillateur permanent, un amplificateur et un modulateur. Ainsi, la génération de l'onde se fait de la manière suivante:

- L'**oscillateur permanent** basé sur la technologie des tubes à cavité résonnante, il peut être un klystron qui a une fréquence très stable, un magnétron dont la fréquence varie dans le temps, ou d'autres types d'oscillateurs à état solide.
- Les **générateurs d'impulsion**, ou modulateurs, sont des pièces électroniques qui produisent l'impulsion radar à partir de l'onde continue produite par l'oscillateur.
- Une fois que l'onde est produite, le guide d'onde la transmet vers l'antenne.

Plages de fréquences radar

| Nom de bande | Plage de fréquences | Longueurs d'onde | Commentaires |
|----------------|---------------------|------------------|---|
| HF | 3-30 MHz | 10-100 m | Pour high frequency (haute fréquence). Utilisée par les radars côtiers et les radars "au-delà de l'horizon". |
| P | < 300 MHz | 1 m+ | Pour précédent : appliquée <i>a posteriori</i> aux radars primitifs |
| VHF | 50-330 MHz | 0.9-6 m | Pour very high frequency (très haute fréquence). Utilisée par les radars à très longue portée et par ceux à pénétration de sol. |
| UHF | 300-1000 MHz | 0.3-1 m | Pour ultra high frequency (ultra haute fréquence). Radars à très longue portée (ex. détection de missiles balistiques), pénétration de sol et de feuillage. |
| L | 1-2 GHz | 15-30 cm | Pour long . Utilisée pour le contrôle aérien de longue portée et la surveillance aérienne, le GPS (et donc les radars passifs se basant dessus). |
| S | 2-4 GHz | 7.5-15 cm | Pour short (court). Utilisée par les radars de trafic aérien local, les radars météorologiques et navals. |
| C | 4-8 GHz | 3.75-7.5 cm | Compromis entre les bandes S et X pour les transpondeurs satellitaires et les radars météorologiques. |
| X | 8-12 GHz | 2.5-3.75 cm | Pour les radars météorologiques, les autodirecteurs de missiles, les radars de navigation , les radars à résolution moyenne de cartographie et la surveillance au sol des aéroports. |
| K _u | 12-18 GHz | 1,67-2,5 cm | Fréquence juste sous K (indice 'u' pour <i>under</i> en anglais) pour les radars de cartographie à haute résolution et l'altimétrie satellitaire. |
| K | 18-27 GHz | 1,11-1,67 cm | De l'Allemand kurz (court). Très absorbées par la vapeur d'eau, K _u et K _a sont utilisées pour la détection des gouttelettes de nuages en météorologie et dans les radars routiers (24.150 ± 0.100 GHz) manuels. |
| K _a | 27-40 GHz | 0.75-1.11 cm | Fréquence juste au-dessus de K (indice 'a' pour "above" en anglais) pour la cartographie, la courte portée, la surveillance au sol des aéroports, les radars routiers (34.300 ± 0.100 GHz) automatisés, et les radars anti-collision montés sur les voitures haut de gamme. |
| mm | 40-300 GHz | 1 - 7,5 mm | Bande millimétrique subdivisée en quatre parties : |
| Q | 40-60 GHz | 7.5 mm - 5 mm | Utilisée pour les communications militaires. |
| V | 50-75 GHz | 6.0 - 4 mm | Très fortement absorbée par l' atmosphère . |
| E | 60-90 GHz | 6.0 - 3.33 mm | |
| W | 75-110 GHz | 2.7 - 4.0 mm | Utilisée comme radar anti-collisions automobile et pour l' observation météorologique à haute résolution et de courte portée. |

Chapitre 2. Principe de fonctionnement

II.1. Réflexion

Les ondes électromagnétiques sont réfléchies par tout changement significatif des constantes diélectriques ou diamagnétiques du milieu traversé. Cela signifie qu'un objet solide dans l'air ou le vide, ou tout autre changement significatif de la densité atomique entre l'objet et ce qui l'entoure, disperse les ondes radar. C'est particulièrement vrai pour les matériaux conducteurs d'électricité, tels les métaux et la fibre de carbone, ce qui rend les radars très adaptés à la détection d'avions et bateaux.

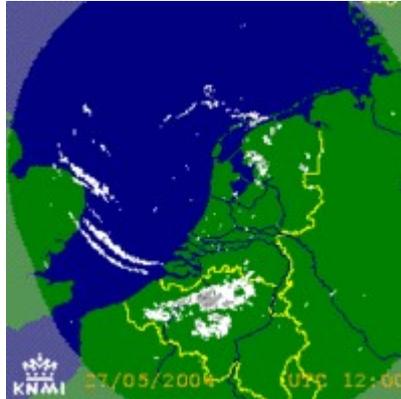
La partie de l'onde qui est retournée au radar par une cible est appelée sa réflectivité. La surface de la cible à réfléchir ou disperser ces ondes est appelée sa section efficace. En fait, les ondes radar se dispersent de façons différentes suivant la longueur d'onde utilisée, la forme de la cible et sa composition:

- Si la longueur d'onde est beaucoup plus petite que la taille de la cible, l'onde rebondira dessus comme la lumière sur un miroir. La section efficace dépendra dans ce cas de la forme de la cible et de ses propriétés réfléchives.
- Si la longueur d'onde est beaucoup plus grande que la taille de la cible, les atomes de cette dernière seront polarisés. C'est-à-dire que les charges négatives et positives dans le matériau seront séparées comme dans une antenne dipolaire. Ceci est décrit par le modèle de la diffusion Rayleigh qui prédit le bleu du ciel et le rouge d'un coucher de soleil. Dans cette situation, la section efficace sera proportionnelle au diamètre de la cible et à ses propriétés réfléchives.
- Quand les deux longueurs sont comparables, il peut se produire des résonances entre les atomes de la cible et la réflexion se comporte selon la théorie de Mie, rendant le patron de réémission très variable.

Les premiers radars utilisaient des longueurs d'onde beaucoup plus importantes que la taille des cibles et recevaient un signal vague, tandis que certains radars modernes utilisent des longueurs d'onde plus courtes (quelques centimètres, voire moins) qui peuvent voir des objets plus petits, comme la pluie ou les insectes.

Les ondes radio courtes sont réfléchies par les courbes et des angles aigus comme la lumière sur un morceau de verre arrondi. Les cibles les plus réfléchissantes pour des courtes longueurs d'ondes présentent des angles de 90° entre leurs surfaces réfléchissantes. Une structure composée de trois surfaces planes se rejoignant en un seul coin (par exemple le coin d'une boîte) réfléchira toujours

les ondes entrantes directement vers leur source. Ces types de réflexion sont couramment utilisés comme réflecteurs radar afin de détecter plus facilement des objets difficilement décelables autrement, et sont souvent présents sur des bateaux afin d'améliorer leur détection en cas de sauvetage et pour réduire les risques de collision.



Paillettes de contre-mesures vues par un radar météorologique

Pour les mêmes raisons, les objets voulant éviter d'être détectés vont orienter leurs surfaces afin d'éliminer les coins intérieurs et éviter les surfaces et arêtes perpendiculaires aux directions de détection courantes. Cela conduit à des avions furtifs aux formes particulières. Ces précautions n'éliminent pas complètement les réflexions à cause du phénomène de diffraction, particulièrement pour les grandes longueurs d'onde. Des câbles ayant pour longueur la moitié de la longueur d'onde ou des bandes de matériau conducteur (comme les " paillettes " de contre-mesures radar) sont très réfléchissants mais ne renvoient pas l'onde vers sa source.

Une autre façon de se camoufler est d'utiliser des matériaux absorbant les ondes des radars, c'est-à-dire contenant des substances résistantes ou/et magnétiques. On les utilise sur les véhicules militaires afin de réduire la réflexion de l'onde. C'est en quelque sorte équivalent de peindre quelque chose de couleur sombre dans le spectre visible.

II.2 Calcul de la réflectivité

Selon l'équation radar, la puissance P_r retournée au radar depuis la cible est :

$$P_r \propto P_t \cdot \sigma / R^4$$

Où P_t est la puissance transmise,

R est la distance et

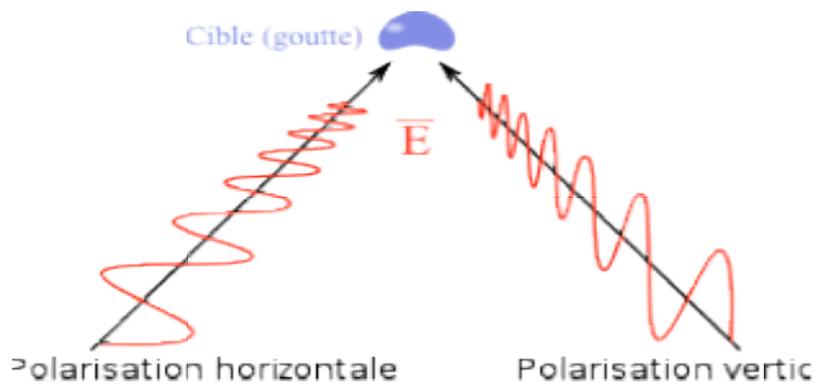
σ est la section efficace de la cible.

La réflectivité étant définie comme le rapport de P_r/P_t , on voit:

- Que des cibles se trouvant à des distances différentes mais ayant les mêmes caractéristiques de réflexion donneront des échos fort différents, et, dans tous les cas, beaucoup plus faibles que le signal émis. Cette équation tient compte seulement de la diminution de la puissance du signal due à la distance et ne tient pas compte de l'atténuation causée par l'absorption du milieu traversé.
- Que la réflectivité dépend de la section efficace qui est trouvée selon ce qu'on a montré antérieurement. D'autres développements mathématiques influent sur la section efficace. Ceux-ci incluent des analyses basées à la fois sur le temps et la fréquence comme la théorie des ondelettes et la transformée de Chirplet. Elles utilisent le fait que les cibles en mouvement des radars sont typiquement "chantantes" (c'est-à-dire qu'elles changent leur fréquence en fonction du temps, comme le chant d'un oiseau ou des chauves-souris).

II.3. Polarisation

Illumination de la cible avec polarisation horizontale et verticale.



Dans le signal émis par le radar, le champ électrique est perpendiculaire à la direction de propagation, et la direction du vecteur de ce champ électrique représente la polarisation de l'onde. Les radars utilisent une polarisation verticale, horizontale et circulaire pour détecter différents types de réflexions.

- Par exemple, la polarisation circulaire est utilisée pour minimiser les interférences causées par la pluie.
- Une polarisation linéaire indique généralement des surfaces métalliques, et aide un radar de recherche à ignorer la pluie.

II.4. Interférences

Il existe de nombreuses sources de signaux malvenus, que les radars doivent pouvoir ignorer plus ou moins, afin de se focaliser uniquement sur les cibles intéressantes. Ces signaux malvenus peuvent avoir des origines internes et externes, passives et actives. La capacité d'un radar à surmonter ces nuisances définit son rapport signal sur bruit (SNR) : plus le SNR est grand, plus le radar peut séparer efficacement une cible des signaux parasites alentour.

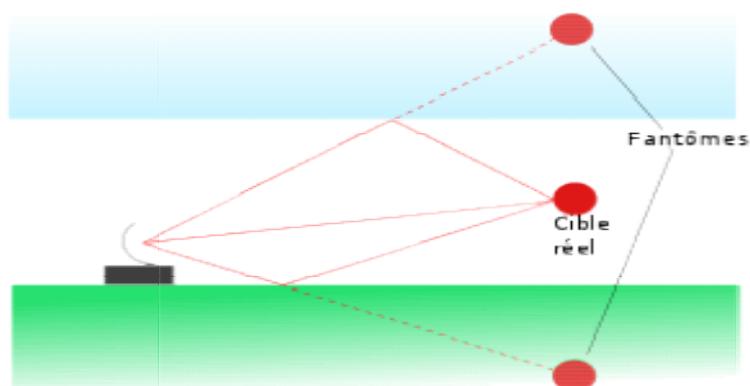
- *Bruit*

Le bruit est une source interne de variations aléatoires du signal, que tous les composants électroniques génèrent de façon inhérente à différents degrés. Le bruit apparaît typiquement comme constitué de variations aléatoires superposées au signal d'écho reçu par le radar, lequel est celui qu'on recherche. Plus la puissance du signal désiré est faible, plus il est difficile de le discerner du bruit (tenter d'entendre un murmure près d'une route encombrée est similaire). Ainsi, les sources de bruit les plus importunes apparaissent au niveau du récepteur et beaucoup d'efforts sont faits pour minimiser ces facteurs. Le facteur de bruit est une mesure du bruit produit par un récepteur comparé à celui produit par un récepteur idéal, et ce ratio doit être minimal.

Le bruit est aussi généré par des sources extérieures, principalement par les radiations thermiques naturelles de l'environnement entourant la cible du radar. Dans le cas des radars modernes, grâce aux hautes performances de leurs récepteurs, le bruit interne est inférieur ou égal au bruit de l'environnement extérieur, sauf si le radar est pointé vers un ciel dégagé, auquel cas l'environnement est si froid qu'il génère très peu de bruit thermique.

- *Échos parasites*

Les échos dus au phénomène de trajets multiples d'une cible font apparaître des fantômes.



Les échos parasites sont des retours venant de cibles qui sont par définition inintéressantes pour l'opérateur radar. Les causes de ces échos sont :

- Des objets naturels tels que le sol, la mer, les précipitations (telles que la pluie, la neige ou la grêle), les tempêtes de sable, les animaux (particulièrement les oiseaux), les turbulences atmosphériques, et d'autres effets atmosphériques (par exemple les chutes de météores ou les réflexions sur l'ionosphère).
- Des objets fabriqués par l'homme tels que les immeubles ou des paillettes métalliques lâchées intentionnellement comme contre-mesures dans la guerre électronique.
- Les supports du guide d'onde partant de l'antenne vers le cornet d'émission situé au point focal de la parabole. Dans un affichage radar comme le PPI, ces échos indésirables ressembleront à des points très brillants au centre de l'affichage.
- Des réflexions venant de trajets par réflexions multiples sur une cible. Ainsi, le faisceau radar frappe une cible et comme l'onde émise est réfléchiée dans toutes les directions, une partie peut être réfléchiée sur une autre cible et retourner au radar. Comme le temps mis pour cette seconde réflexion pour atteindre le radar est plus long que le retour direct, elle sera placée au mauvais endroit. On peut ainsi obtenir deux cibles au lieu d'une.
- Des échos de propagation anormale dans l'atmosphère. En effet, le trajet que doit parcourir le faisceau radar est calculé à partir d'une structure normale de l'atmosphère. Si la température varie différemment de la norme, le faisceau sera dévié anormalement. Dans le cas où la température augmente avec l'altitude (inversion de température), le faisceau est dévié vers le sol et on a un très fort retour de ce dernier.
- Des échos venant des réflexions/réfractions ionosphériques. Ce type de parasites est particulièrement difficile à identifier, puisqu'il est en mouvement et se comporte de la même manière que les cibles voulues, créant ainsi un fantôme.
- Des objets très réfléchissants visibles au travers d'un lobe secondaire de l'antenne, alors que l'antenne pointe vers une zone moins réfléchissante. On verra alors un fantôme dans la direction où pointe le lobe principal.

Il est à noter que ce qui est un écho indésirable pour certains peut cependant être le but recherché par d'autres. Ainsi les opérateurs à l'aviation veulent éliminer tout ce dont on vient de parler mais les météorologistes considèrent que les avions sont du bruit et ne veulent garder que les signaux provenant des précipitations.

Les échos parasites sont considérés comme une source d'interférences passive, puisqu'elles ne sont détectées qu'en réponse aux signaux émis par le radar. Il existe plusieurs façons d'éliminer ces

échos. Plusieurs de ces méthodes reposent sur le fait que ces échos tendent à être stationnaires lors des balayages du radar. Ainsi, en comparant des sondages radar successifs, la cible désirée sera mobile et tous les échos stationnaires pourront être éliminés. Les échos de mer peuvent être réduits en utilisant une polarisation horizontale, tandis que la pluie est réduite avec une polarisation circulaire (notez que les radars météorologiques souhaitent obtenir l'effet inverse, utilisant donc une polarisation horizontale afin de détecter les précipitations). Les autres méthodes visent à augmenter le rapport signal sur bruit.

La méthode CFAR (*Constant False-Alarm Rate*, parfois appelée AGC pour *Automatic Gain Control*) repose sur le fait que les échos dus aux parasites sont beaucoup plus nombreux que ceux dus à la cible. Le gain du récepteur est automatiquement ajusté afin de maintenir un niveau constant des échos parasites visibles. Les cibles ayant un retour plus important que les parasites ressortiront facilement de ces derniers, même si les cibles plus faibles se perdent dans le bruit. Par le passé, le CFAR était contrôlé électroniquement et affectait également tout le volume sondé. Maintenant, le CFAR est contrôlé par ordinateur et peut être réglé différemment en chaque zone de l'affichage. Ainsi il s'adapte au niveau des échos parasites selon la distance et l'azimut.

On peut utiliser également des masques de régions connues d'échos parasites permanents (par ex. les montagnes) ou incorporer une carte des environs du radar pour éliminer tous les échos ayant une origine située sous le niveau du sol ou au dessus d'une certaine hauteur. Pour réduire les retours des supports du cornet d'émission sans diminuer la portée, il est nécessaire d'ajuster la période muette entre le moment où l'émetteur envoie une impulsion et le moment où le récepteur est activé, afin de ne pas tenir compte de retours internes à l'antenne.

- Brouillage

Le brouillage radar se réfère aux fréquences radios originaires de sources extérieures au radar, émettant à la fréquence du radar et masquant donc les cibles intéressantes. Le brouillage peut être intentionnel (un dispositif antiradars dans le cas d'une guerre électronique) ou non voulu (par exemple dans le cas de forces alliées utilisant du matériel qui émet dans la même gamme de fréquences). Le brouillage est considéré comme une source d'interférences active, puisqu'il est causé par des éléments extérieurs au radar et généralement sans lien avec les signaux du radar.

Le brouillage pose des problèmes aux radars puisque les signaux de brouillage n'ont besoin de parcourir qu'un aller (du brouilleur au récepteur du radar) alors que les échos du radar parcourent un aller-retour (radar-cible-radar) et sont donc beaucoup moins puissants une fois de retour au récepteur. Les brouilleurs ont donc beaucoup moins besoin d'être puissants que les radars afin de

masquer efficacement les sources le long du champ de vision depuis le brouilleur vers le radar (brouillage du lobe principal). Les brouilleurs ont un effet supplémentaire sur les radars situés le long d'autres champs de visions, à cause des lobes secondaires du récepteur du radar (brouillage des lobes latéraux).

Le brouillage du lobe principal peut généralement être réduit seulement en réduisant son angle solide, et ne peut jamais être complètement éliminé si le brouilleur est situé directement face au radar et s'il utilise les mêmes fréquences et polarisation que le radar. Le brouillage des lobes secondaires peut être surmonté en réduisant les lobes de réception secondaires dans la conception de l'antenne du radar et en utilisant une antenne unidirectionnelle afin de détecter et ignorer tous les signaux non destinés au lobe principal. Des travaux sont également menés actuellement sur les antennes à balayage électronique actif afin de leur permettre de repositionner dynamiquement leurs lobes secondaires en cas de brouillage. Enfin, on peut citer d'autres techniques antibrouillage : le frequency hopping et la polarisation par exemple. Se référer aux contre-mesures électroniques pour plus de détails.

Les interférences sont récemment devenues un problème pour les radars météorologiques de bande C (5,66 GHz) à cause de la prolifération des équipements WiFi à 5,4 GHz.

Chapitre 3. Traitement des signaux radar

III.1. Mesure de distance

Temps de retour du signal

Une manière de mesurer la distance à un objet est d'émettre une courte impulsion de signal radio, et de mesurer le temps que prend l'onde pour revenir après avoir été réfléchi. La distance est la moitié du temps de retour de l'onde (car le signal doit aller à la cible puis revenir) multipliée par la vitesse du signal (qui est proche de la vitesse de la lumière dans le vide si le milieu traversé est l'atmosphère).

Quand l'antenne est à la fois émettrice et réceptrice (ce qui est le cas le plus courant), l'antenne ne peut pas détecter l'onde réfléchi (aussi appelée *retour*) pendant que le signal est émis - on ne peut pas savoir si le signal mesuré est l'original ou le retour. Cela implique qu'un radar a une portée minimale, qui est la moitié de la durée de l'impulsion multipliée par la vitesse de la lumière. Pour détecter des cibles plus proches, il faut utiliser une durée d'impulsion plus courte.

Un effet similaire impose de la même manière une portée maximale. Si le retour arrive quand l'impulsion suivante est émise, une fois encore le récepteur ne peut pas faire la différence. La portée maximale est donc calculée par:

$$x = \frac{c\Delta t}{2}$$

Où c est la vitesse de la lumière et Δt est le temps entre deux impulsions

La forme de l'impulsion joue sur la capacité du radar à distinguer deux objets proches (notion de Pouvoir de résolution). Cette forme d'émission est utilisée par les radars à impulsions.

Modulation de fréquence

Une autre façon de mesurer la distance au radar est d'utiliser une modulation de la fréquence d'un radar à émission continue. L'onde est émise par une antenne et reçue par une seconde antenne puisque le même électronique ne peut émettre et recevoir à la fois. Dans ce cas le signal émis au temps T a une fréquence A mais une fréquence B au temps T' ultérieur. Le signal émis à T qui frappe une cible et revient au radar aura donc une fréquence différente de celle émise à ce moment par le radar. En faisant la différence entre les deux fréquences, on peut déduire la distance parcourue, aller-retour, entre le radar et la cible. On utilise généralement une variation sinusoïdale

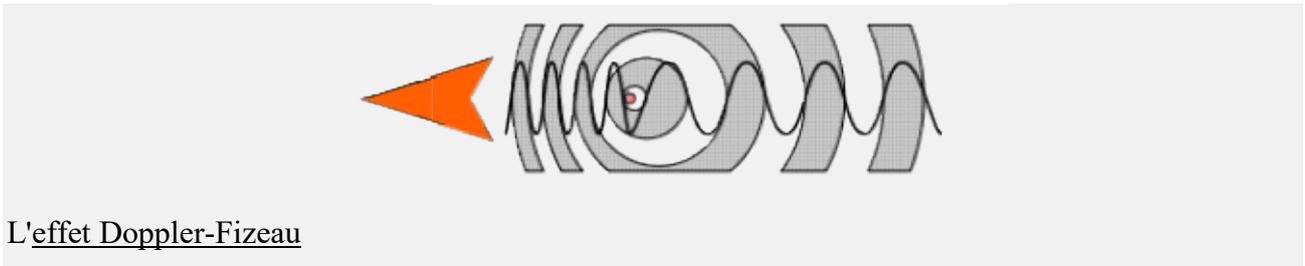
de fréquences qu'il est facile de calibrer et la comparaison entre les deux fréquences est faite en utilisant les battements inter-fréquentiels. Cette technique est utilisée depuis longtemps dans les altimètres pour mesurer l'altitude de vol et peut être utilisée dans les radars comme les détecteurs de vitesse de la police routière.

Cette forme d'émission est utilisée par les radars à émission continue.

III.2. Mesure de vitesse

Il existe différentes méthodes pour mesurer la vitesse de déplacement d'une cible :

- La plus ancienne consiste à noter sa position à un instant **X**, à l'aide d'un crayon gras, sur l'affichage radar. À un instant **Y**, on refait la même chose et la différence des deux positions divisée par le temps écoulé entre **X** et **Y** donne la vitesse de déplacement.



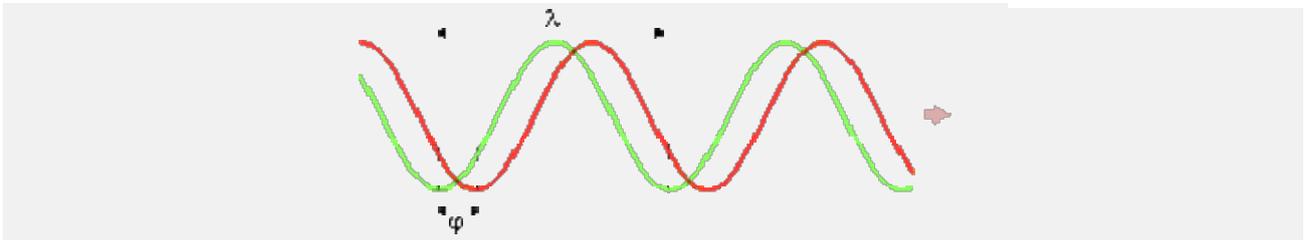
- On peut également noter la variation de fréquence de l'onde émise par rapport à celle reçue lorsqu'on émet continuellement à une fréquence fixe. Il s'agit là de l'utilisation de l'Effet Doppler-Fizeau. Comme on ne fait pas varier la fréquence émise, on ne peut cependant pas définir la position de la cible de cette manière. En plus, on n'a que la composante radiale au radar de la vitesse. Par exemple, une cible se déplaçant perpendiculaire au faisceau radar ne causera pas de changement de fréquence alors que la même cible se déplaçant vers le radar à la même vitesse provoquera un changement maximal.
- La plus courante des méthodes est d'utiliser une variante de l'effet Doppler avec un radar à impulsions. Dans ce cas, on note la différence de phase entre les impulsions successives revenant de la cible. Cette méthode permet de déterminer la vitesse radiale ET la position de la cible.

Vitesse Doppler avec radar à impulsions

Au lieu de mesurer la différence de fréquence entre l'onde émise et celle reçue, qui peut être trop minime pour l'électronique, on utilise la différence de phase entre deux impulsions successives revenant d'un même volume sondé (paire d'ondes pulsées). Entre chaque impulsion, les cibles se

déplacent légèrement et sont frappées par l'onde à une partie légèrement différente de son cycle. C'est cette différence de phase que le radar note au retour.

L'intensité d'une impulsion après un aller-retour est donnée par :



Différence de phase entre deux ondes revenant d'une cible ayant bougé

$$I = I_0 \sin \left(\frac{4\pi x_0}{\lambda} \right) = \sin(\phi_0)$$

$$\text{Où : } \begin{cases} x_0 = \text{distance radar - cible} \\ \lambda = \text{longueur d'onde} \\ \Delta t = \text{temps entre deux impulsions} \end{cases} .$$

L'intensité d'une impulsion subséquente revenant du même volume sondé mais où les cibles ont légèrement bougé est donnée par :

$$I = I_0 \sin \left(\frac{4\pi(x_0 + v\Delta t)}{\lambda} \right) = I_0 \sin(\phi_0 + \Delta\phi)$$

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi v \Delta t}{\lambda} \right)$$

Alors :

$$v = \text{vitesse des cibles} = \frac{\lambda \Delta\phi}{4\pi \Delta t}$$

Comme on n'obtient que la composante radiale du déplacement, il faut donc le suivre pour savoir l'angle que fait sa véritable direction de déplacement avec le rayon au radar. Par la suite, un simple calcul trigonométrique donne la véritable vitesse de la cible.

Dilemme Doppler

Intéressons-nous maintenant à la vitesse maximale qu'on peut mesurer sans ambiguïté. Comme on ne peut déterminer à partir d'un sinus qu'un angle compris entre $-\pi$ et $+\pi$, on ne peut mesurer une vitesse supérieure à:

$$Vitesse_{max} = \pm$$

C'est ce qu'on appelle la vitesse de Nyquist. Pour obtenir une meilleure détermination de la vitesse des cibles, il faut envoyer des impulsions très rapprochées, donc avec Δt très petit. Mais on sait également que la portée en réflectivité est *directement* proportionnelle à Δt , ce qui demande un grand Δt pour être sûr de la position des échos revenant de loin sans ambiguïté. Ce **dilemme Doppler** limite donc la portée utile des radars Doppler à impulsions.

III.3. Réduction des interférences

Le traitement du signal est nécessaire pour éliminer les interférences (dues à des sources radio autres que celle du radar) ainsi que les échos parasites. On utilise les techniques suivantes:

- Élimination en suivant seulement les échos qui bougent.
- Filtrage des échos en utilisant leur vitesse Doppler : les échos parasites et les interférences ont généralement des vitesses nulles.
- Corrélation avec des radars de surveillance secondaires : il s'agit d'un dispositif qui envoie depuis la cible un signal lorsqu'il reçoit un faisceau radar. Ce signal identifie la cible et, selon le cas, son altitude et sa vitesse.
- Processus adaptif temps-espace : en utilisant une antenne à commande de phase pulsée et les vitesses Doppler qu'on en obtient, on peut analyser le patron moyen des fréquences et en faire ressortir le pic qui indique la cible.
- Taux de fausse alarme constant : il s'agit de déterminer le niveau de bruit moyen continu en chaque point de l'affichage radar et de ne garder que les échos ayant un retour supérieur à celui-ci.
- Masque digital du terrain qui permet d'éliminer les échos qui proviendraient de sous le niveau du sol.

III.4. Applications

Les premières utilisations opérationnelles du radar eurent lieu pendant la Seconde Guerre mondiale afin de détecter depuis la côte l'approche de formations aériennes, et de navires, tant par le Royaume-Uni que par les forces allemandes.

Les radars ont aujourd'hui une très grande variété d'applications dans de nombreux domaines :

- militaire : radars de détection et de surveillance aérienne au sol ou embarqués (sur chasseurs pour le combat aérien et *Système de Détection et de Commandement Aéroporté* sur avions de guet (*Airborne Warning And Control System (AWACS)* en anglais); radars de veille en surface sur les navires de guerre ; radars d'appontage ; identification radar (IFF) ; autodirecteurs de missiles ; radars de détection terrestre ; radars d'artillerie ; brouilleurs radar ; satellites radar d'observation de la terre ;
- aéronautique : contrôle du trafic aérien ; guidage d'approche d'aéroport ; radars d'altimétrie ; radars de navigation ;
- maritime : radar de navigation ; radars anti-collision ; balises radars ; transpondeur radar
- météorologie : détection de précipitations (pluie, neige, grésil, grêle, etc.) et de formations nuageuses. Les radars les plus récents utilisent l'effet Doppler et sont donc capables d'évaluer la vitesse de ces particules. Certains radars utilisent les polarisations verticale et horizontale pour donner une idée du mélange de formes des particules sondées ce qui, associé à leur intensité, peut indiquer le type de précipitation.
- circulation et sécurité routière : contrôle de la vitesse des automobiles (voir cinémomètre), le modèle classique sur les routes de France est le Miradop (**mini radar doppler**) utilisé par les brigades de gendarmerie. Ils sont placés sur les autoroutes, dans les zones où les véhicules peuvent rouler à une vitesse supérieure à la vitesse maximale autorisée. Radars de recul sur automobiles, Radar d'assistance au freinage d'urgence (ACC Adaptive Cruise Control) ;
- scientifique : embarqués sur satellite pour l'observation de la Terre, du niveau des océans...

Pour approfondir



Ecran radar marine

- Généralités
 - Radar à synthèse d'ouverture
 - Radar tridimensionnel à balayage électronique
 - Radar à antenne latérale
 - Moving Target Indicator
 - Radar de poursuite
 - Equation du radar
- Radars aéroportés
- Radar météorologique
 - Profileur de vents
- Radars spatiaux
 - Altimètre radar, voir Altimètre
 - Diffusiomètre
- Radars navals
- Radars de contrôle aérien
 - Radar primaire
 - Radar secondaire
- Radar de contrôle routier
 - Radar automatique
 - Radar automatique en France
- Étude du sous-sol
 - GPR