

# Les systèmes de pointage et de poursuite

## 1. Notions préliminaires

### 1.1. La contrainte apportée par l'antenne et la longueur d'onde d'utilisation

Le besoin de disposer d'un système de poursuite se pose dès qu'une antenne directive est utilisée et que le satellite est en déplacement, le but étant que la direction du lobe principal de l'antenne reste dans la direction du satellite. Plus le lobe est étroit ou plus le mouvement du satellite est rapide et plus la poursuite devient difficile. Dans la pratique c'est la largeur du lobe qui est le premier facteur limitant.

Pour une antenne de type parabole, plus la fréquence augmente et plus le lobe se rétrécit pour le même diamètre. A titre d'exemple pour une parabole de 90cm de diamètre, le lobe principale est de l'ordre de  $10^\circ$  à 2.4GHz. La formule pratique donnant la largeur de lobe en degrés à 3dB pour une antenne parabolique de diamètre D et pour une longueur d'onde  $\lambda$  est :

$$q_{3dB} = 60 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Si l'on cherche à anticiper les futurs tendances dans l'exploitation des satellites amateurs nous remarquons que les fréquences hyper se développent de plus en plus. AO-51, satellite en orbite basse lancé en mi-2004, a une voie de descente sur 2.4GHz. AO-40, satellite à orbite Molnya, offrait une descente en bande 10GHz et 24GHz. P3E proposera également, à l'horizon 2006, des fréquences allant jusqu'à 47GHz!

Si nous cherchons à utiliser le même réflecteur parabolique (90cm) que précédemment la largeur du lobe passe à  $2.4^\circ$  sur 10GHz, à  $1^\circ$  sur 24GHz et  $0.5^\circ$  sur 47GHz! La précision demandée sur la poursuite devient alors beaucoup plus contraignante.

Bien entendu les besoins amateurs n'ont rien à voir par rapport aux besoins professionnels ou il n'est pas rare de spécifier des précisions de poursuite en millidegrés.

Une autre formule moins connue mais aussi pratique donne la perte de niveau en dB pour un

angle de dépointage faible  $\theta$ :  $S = -12 \cdot \left( \frac{q}{q_{3dB}} \right)^2$ , en effet le sommet du lobe d'une antenne peut,

en première approximation être considéré comme parabolique. Cette formule a un intérêt dans le cas de liaisons où le moindre dB a son importance.

### 1.2. L'erreur de poursuite instantanée

Nous définirons d'abord la direction de référence qui est la direction du satellite par rapport au centre de l'antenne.

L'erreur de poursuite instantanée est définie comme l'axe angulaire entre la direction de référence et la direction d'arrivée de l'onde provenant du satellite vis-à-vis de l'antenne. Elle est exprimée soit en degrés soit en fractions de lobe d'antenne à 3dB. L'erreur de poursuite maximale tolérée est typiquement de l'ordre de 10% du lobe à 3dB.

### 1.3. La précision de pointage

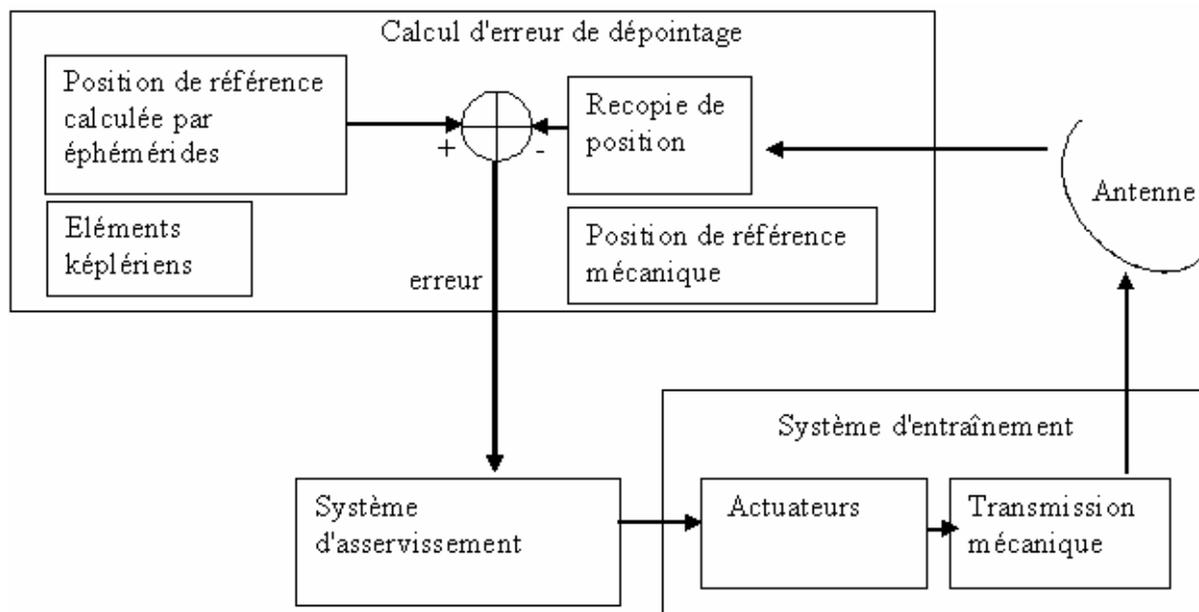
Il s'agit de l'écart entre la direction de référence et l'affichage (ou recopie) qui en est faite c'est-à-dire la précision ultime de pointage de l'antenne que le système est capable de réaliser. Une valeur typique pour du matériel amateur classique est de l'ordre de quelques degrés.

### 1.4. Besoin radioamateur présent et futur

Le besoin en précision de pointage est donc très différent selon l'application visée. Il est donc important que le radioamateur se pose les bonnes questions et soit au fait des sources d'erreurs principales afin de pouvoir mettre au point correctement son système de pointage. C'est ici le but de cet article.

## 2. Composants et principes des principaux systèmes de pointage et de poursuite

Le schéma suivant est typique d'un système de poursuite.



### 2.1. Les systèmes d'entraînement

Le rôle du système d'entraînement est de modifier la position de l'antenne de façon à minimiser l'erreur de poursuite instantanée. Les différents actuateurs permettant le mouvement sont:

- les actuateurs asynchrones. Ils disposent de trois modes: marche avant, arrière et frein. Ce sont les actuateurs utilisés dans les installations amateurs. Ces actuateurs peuvent être des actuateurs rotatifs (rotors classiques) ou linéaires (vérins électriques). La précision des rotors amateurs du commerce est typiquement de l'ordre du degré.
- les moteurs à contre-couple. Il s'agit d'utiliser deux moteurs couplés dont l'un sert à l'entraînement principal et l'autre applique un couple mécanique opposé. Cela permet d'éliminer les jeux mécaniques des engrenages. On retrouve ces systèmes dans les installations professionnelles.

## 2.2. Les systèmes de mesure d'erreur

La qualité d'un système de mesure d'erreur est fonction de:

- sa résolution, c'est-à-dire la plus petite différence de position qu'il est possible de mesurer
- sa précision, c'est-à-dire l'écart de la valeur mesurée par rapport à une loi parfaitement linéaire

### 2.2.1. Mécaniques

Deux grandes familles sont utilisées : les senseurs potentiométriques et les codeurs numériques absolus et impulsifs.

Le premier est de loin le plus utilisé car le plus simple. Il est constitué d'un potentiomètre de grande linéarité. Il est muni d'un multiplicateur ou réducteur d'angle mécanique avec souvent un rattrapage de jeu. De cette façon tous les tours de potentiomètre sont décrit lorsque l'axe de rotation de l'antenne est entièrement parcouru ( $360^\circ$  ou  $450^\circ$  en azimuth,  $180^\circ$  en élévation). L'axe primaire est solidaire de l'axe mécanique tandis que l'axe secondaire est fixe dans l'axe. Une résolution de  $0.5$  degrés est tout à fait faisable avec un bon potentiomètre.

Un codeur numérique absolu est constitué d'un disque gradué en plusieurs secteurs angulaires qui sont détectés (par des photodiodes en général). La sortie est un nombre binaire qui peut être codé selon un code de GRAY ou un code linéaire. Le nombre de bits détermine la précision du codeur. Un codeur de 8 bits/tour donnera une résolution de  $1.4^\circ$ . Un codeur de 12 bits, valeur courante, donnera une résolution de  $0.09^\circ$ . Les codeurs professionnels de grande précision (radar, radioastronomie) montent jusqu'à 24 bits. Ils utilisent en plus des traitements numériques particuliers permettant d'améliorer la résolution. En général des codeurs de cette précision sont multitours, chaque tour décuplant la précision (cela peut aller jusqu'à 4096 tours). La mécanique interne est cependant plus complexe qu'un simple potentiomètre multitour normal!

Les codeurs impulsifs délivrent un nombre donné d'impulsions par tours avec en plus un signal indiquant le sens de rotation. Ils ne permettent pas de donner une valeur d'angle absolue et il faut un comptage des impulsions pour retrouver la valeur de l'angle. Ce calcul nécessite une mémorisation de la dernière position calculée. On retrouve par exemple ce genre de codeurs dans les vérins électriques de motorisation de paraboles satellite. La résolution est déterminée par le nombre d'impulsions par tour qui varie typiquement de 500 à 5000 ( $0.07^\circ$ ).

Il y a deux méthodes pour réaliser l'axe fixe servant de référence. La première, la plus utilisée, est solidaire du support mécanique fixe par rapport à cet axe. Il s'agit en général du stator du moteur d'entraînement, le rotor étant couplé à l'autre axe. Cette méthode fonctionne bien à condition que la mécanique soit suffisamment rigide. Pour les moyens amateurs courants avec des largeurs de lobes de  $10^\circ$  c'est suffisant et elle met en œuvre des rotors classiques c'est-à-dire intégrant le moteur et le potentiomètre de copie.

La deuxième méthode est utilisée lorsqu'une précision plus importante est recherchée (EME ...) c'est-à-dire typiquement pour des lobes inférieurs au degré. Elle consiste à créer l'axe de référence à l'aide d'un pendule réalisé avec une tige et une petite masselotte fixée à l'extrémité. La direction du pendule reste alors parfaitement verticale sous l'effet de la pesanteur et indépendante du jeu de toute la structure mécanique du système d'entraînement. La mesure en élévation est alors précisément référencée par rapport à la verticale du lieu.

## 2.2.2. Electromagnétiques

D'autres systèmes de mesures d'erreurs fonctionnent uniquement sur un principe électromagnétique. De tels système n'existent pas à notre connaissance dans le monde amateur. Ils sont utilisés surtout en bande hyper avec des antennes à grand gain ou la précision de pointage est critique.

Nous avons principalement :

- les systèmes monopulses
- les systèmes à extracteur de modes (en hyperfréquence)

Un système monopulse d'amplitude utilise deux antennes dont les axes sont décalés. Deux voies sont formées; l'une étant la somme des signaux reçus sur les deux antennes et l'autre la différence. Le rapport de ces deux valeurs fournit une mesure d'écartométrie indépendante du niveau du signal reçu. Le même principe est applicable en exploitant la phase.

Un système à extraction de mode exploite les propriétés électromagnétiques du guidage des ondes dans un guide. Ces ondes se propagent dans le guide selon différents modes. Lorsque la direction d'attaque de l'onde est parallèle à l'axe du guide (en fait le cornet de la source de la parabole), elle se couple et se propage dans le guide selon un seul mode. Cependant lorsque l'onde arrive avec un angle d'incidence non nul d'autres modes parasites sont excités dans le guide. Ces modes parasites sont détectés par des capteurs spéciaux dans le guide (système à fentes et à étranglements qui aiguille ces mode sur des sondes distinctes). La tension détectée en sortie de ces sondes sert à calculer l'angle de dépointage du faisceau de l'antenne selon deux axes pour le système d'asservissement.

L'intérêt principal de ces systèmes vient surtout du fait qu'ils sont capables de fonctionner de façon totalement autonome sans besoin d'éphéméride ou de réglage régulier. L'asservissement est optimal puisque l'erreur est directement issue de la qualité du signal en réception. Ils sont principalement utilisés dans les stations terriennes de contrôle à fort gain d'antenne (ou les largeurs de lobes se comptent en millidegrés) pointant des satellites géostationnaires.

## **2.3. Les systèmes d'asservissement**

La connaissance d'un signal de dépointage permet son utilisation pour mouvoir les antennes par l'intermédiaire du système d'entraînement. La génération des signaux de commande des systèmes d'entraînement est à la charge des asservissements.

L'asservissement est toujours confronté au compromis entre la vitesse et la précision. Un système d'asservissement est en fait la gestion de ces deux facteurs de façon intelligente sachant que dans certains cas il est possible d'avantager la vitesse au détriment de la précision et inversement.

Un système précis est en général lent et si il est trop lent il peut ne pas réussir à suivre le mouvement rapide d'un satellite (en orbite basse par exemple). Pour cela la commande du système d'asservissement peut être configurée afin de favoriser soit la vitesse soit la précision selon le type d'orbite du satellite à poursuivre. Enfin la forme temporelle de la tension de commande du système d'entraînement peut être optimisée en passant par plusieurs phases: une phase de mouvements rapides pour pré positionner l'antenne dans un laps de temps court puis une phase de mouvements lents durant laquelle la position de l'antenne est affinée avec la précision nécessaire pour pointer le satellite.

Tous les systèmes d'asservissement modernes intègrent ces gestions intelligentes plus d'autres comme le passage au Nord, le mode manuel etc...

### **3. Bilan des erreurs des systèmes de poursuite**

Les sources d'erreurs qui interviennent sont de plusieurs types:

- les erreurs mécaniques provenant du système d'entraînement
- les erreurs dues au système de mesure de dépointage
- les erreurs liés au système d'asservissement

Les erreurs du système d'entraînement sont principalement liées à l'erreur de dépointage entre le lobe de l'antenne et l'axe mécanique de l'antenne. Il s'agit de l'erreur initiale de réglage du positionnement de l'antenne sur son mat support. Ces erreurs proviennent aussi du jeu dans l'entraînement. Typiquement le jeu provient de l'usure des engrenages des rotors ou de fixations mal serrées. Le jeu peut varier selon la position de l'antenne. En effet si celle-ci n'est pas bien équilibrée sur son mat support, elle crée un couple mécanique qui aura un effet de torsion sur le mat, le moment de ce couple dépendant de l'angle de positionnement de l'antenne.

Les erreurs dues au système de mesure de dépointage sont de deux types:

- initiales, qu'un réglage ou un étalonnage peut éliminer. Il s'agit des erreurs liées à la détermination de coordonnées géographiques de la station, à la détermination du Nord
- permanentes, qui sont liées aux éphémérides (ou à l'âge et l'exactitude des éléments képlériens), à la réfraction de l'atmosphère, aux codeurs de copie

Les erreurs liées au système d'asservissement sont plus subtiles et sont causées par son comportement vis-à-vis des signaux d'erreurs qui lui sont appliqués. Par exemple les vibrations causées par le vent ou des secousses diverses, dans le cas où la copie de position les détecterait, peuvent être trop rapides pour le système d'asservissement et donc non corrigées. Pour les systèmes numériques, la précision étant limitée l'asservissement se mettra en marche seulement lorsque l'erreur aura dépassé un certain seuil. Les logiciels de poursuite intègrent un réglage de ce seuil et un effet d'hystérésis pour permettre d'éviter que les rotors soient sollicités à chaque petite brise de vent. Enfin il ne faut pas négliger le bruit et les parasites induits sur un câble provenant d'un capteur de position analogique à cause de l'environnement électromagnétique (passage en émission etc...). Des problèmes de CEM de ce genre peuvent fausser la mesure de dépointage vue par le système d'asservissement. Il est donc recommandé de blinder et filtrer correctement tout câble de copie analogique.

J'espère que cet article aura permis de poser correctement les notions importantes d'un système de poursuite et de pointage d'antenne satellite. Il est important de se poser les bonnes questions sur tous ces points surtout si l'on souhaite s'équiper pour accéder et expérimenter les bandes de fréquences hyper des satellites amateurs qui sont amenées à se développer dans les années à venir.

73's

Matthieu F4BUC  
F4buc@f8kg1.com