

Simplifier la conception des réseaux d'antennes à commande de phase avec des circuits intégrés de formation de faisceaux

Par Keith Benson, directeur Amplificateurs RF/MW et circuits intégrés pour réseaux d'antennes, Analog Devices

Pour améliorer les performances de leurs solutions de communications sans fil et autres systèmes radar, les concepteurs sont confrontés à des exigences croissantes concernant l'architecture des antennes. Bon nombre de nouvelles applications ne peuvent en effet fonctionner qu'en utilisant des antennes moins gourmandes en énergie et moins encombrantes que les traditionnels modèles paraboliques à commande mécanique. Ces exigences viennent s'ajouter à la nécessité de pouvoir s'adapter rapidement à une nouvelle menace ou à un nouvel utilisateur, de transmettre de multiples flux de données, et de fonctionner plus longtemps tout en réduisant les coûts de façon significative. Dans certaines applications, il est nécessaire d'annuler un signal de blocage entrant avec une faible probabilité d'interception (LPI). Il est possible de relever ces défis en optant pour des antennes à commande de phase qui arrivent sur le marché. Les inconvénients historiques des antennes à commande de phase sont relégués aux oubliettes grâce à l'utilisation d'une technologie microélectronique avancée qui réduit à la fois les dimensions, le poids et la consommation électrique de ces solutions.

Le présent article décrit brièvement les solutions d'antennes existantes et présente les avantages des antennes à commande électrique. Nous verrons également comment les avancées enregistrées dans le domaine des semiconducteurs améliorent les paramètres de taille, poids, consommation et coût (SWaP-C) des antennes électriques ; enfin, nous expliquerons à l'aide d'exemples comment la technologie d'Analog Devices répond à ces questions.

Introduction

S'ils sont utilisés depuis plus d'un siècle, les systèmes électroniques sans fil qui se servent d'antennes pour émettre et recevoir des signaux n'en continuent pas moins de bénéficier régulièrement d'améliorations, dans la mesure où les exigences d'exactitude et d'efficacité, ainsi que des métriques avancées, jouent un rôle de plus en plus important. Depuis plusieurs années, les antennes paraboliques sont largement utilisées pour transmettre (Tx) et recevoir (Rx) des signaux lorsque la directivité est importante ; en outre, bon nombre de ces systèmes continuent de bien fonctionner moyennant un coût relativement modique après des années d'optimisation. Ces antennes paraboliques équipées d'un bras mécanique pour modifier l'orientation du rayonnement présentent cependant certains inconvénients, à savoir la lenteur de commande, leur fort encombrement et leur fiabilité médiocre à long terme, sans oublier le fait qu'elles disposent d'un unique diagramme de rayonnement ou flux de données. Ces éléments ont amené les ingénieurs à adopter la technologie avancée des antennes à commande de phase (*phased array antenna*) afin d'améliorer ces caractéristiques et d'ajouter de nouvelles fonctionnalités. Commandées électriquement, les antennes à commande de phase ne manquent pas d'atouts par rapport aux antennes traditionnelles : un encombrement et un volume inférieurs, une meilleure fiabilité à long terme, une orientation rapide et de multiples faisceaux. Fort de ces avantages, cette technologie trouve sa place dans les applications militaires, les communications par satellite

(satcom) et les télécommunications 5G, y compris les automobiles connectées.

Technologie de commande de phase

Une antenne à commande de phase est constituée d'éléments d'antennes assemblés de sorte que le diagramme de rayonnement de chacun des éléments soit associé de façon constructive aux antennes voisines pour former un diagramme de rayonnement efficace, le « lobe principal ». Le lobe principal transmet l'énergie rayonnée vers l'endroit désiré, tandis que l'antenne est conçue pour perturber et détruire les signaux émis dans des directions non désirées, formant des zéros (*nulls*) et des lobes latéraux. Le réseau d'antennes est conçu pour maximiser l'énergie rayonnée dans le lobe principal tout en abaissant à un niveau acceptable l'énergie rayonnée dans les lobes latéraux. La direction du rayonnement peut être manipulée en changeant la phase du signal injecté dans chaque élément de l'antenne. La Figure 1 montre comment le réglage de la phase du signal dans chaque antenne peut orienter le faisceau effectif dans la direction souhaitée pour un réseau linéaire. Résultat, chaque antenne du réseau est réglée séparément en phase et en amplitude jusqu'à obtention du diagramme de rayonnement voulu. L'intérêt que représente la possibilité d'orienter le faisceau rapidement dans un réseau à commande de phase sans aucune pièce mécanique mobile est facilement compréhensible. Quelques nanosecondes suffisent pour modifier la phase à l'aide de circuits intégrés, ce qui permet de modifier la direction du diagramme de rayonnement pour faire rapidement face à de nouvelles menaces ou s'adapter à de nouveaux utilisateurs. De même, il est possible de passer d'un faisceau rayonné à un zéro effectif pour absorber un signal brouilleur, de sorte que l'objet soit invisible — c'est le cas des avions furtifs. Ces changements, qu'il s'agisse du repositionnement des diagrammes de rayonnement ou du passage à des zéros effectifs, peuvent être effectués quasi instantanément grâce à la possibilité de régler la phase électriquement à l'aide de dispositifs à semiconducteurs en lieu et place des pièces mécaniques. Autre avantage, une antenne à commande de phase peut émettre plusieurs faisceaux simultanément, ce qui permet de suivre plusieurs cibles ou de gérer plusieurs flux de données d'utilisateur. Cette opération est accomplie grâce au traitement numérique du signal dans les multiples flux de données aux fréquences de la bande de base.

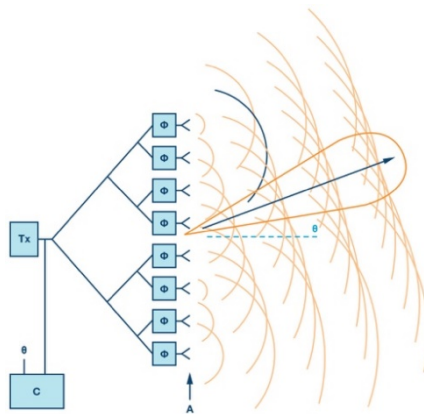


Figure 1. Représentation théorique des éléments d'un réseau d'antennes à commande de phase

L'implémentation typique de ce réseau utilise les éléments d'une antenne imprimée (ou antenne « patch ») configurés en rangées et colonnes espacées de façon égale de type 4×4, soit 16 éléments au total. Un petit réseau de 4×4 est représenté en Figure 2 avec des antennes patch utilisées comme source de rayonnement. Ce réseau d'antennes peut atteindre des dimensions importantes dans les radars au sol (plus de 100 000 éléments possibles).

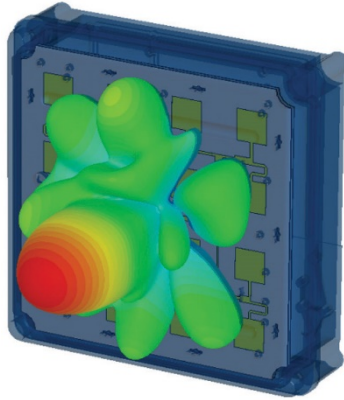


Figure 2. Illustration du diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes comptant 4×4 éléments

Certains compromis de conception sont incontournables en fonction de la taille du réseau et de la puissance de chaque élément rayonnant ayant une incidence sur la directivité du faisceau et la puissance rayonnée effective. La performance de l'antenne peut être prédite en utilisant quelques valeurs courantes (facteur de mérite). Les concepteurs d'antennes s'intéressent souvent au gain de l'antenne et à la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE — EIRP en anglais), ainsi qu'au rapport G_t/T_n (gain de l'antenne/température de bruit). Plusieurs équations de base peuvent être utilisées pour décrire les paramètres indiqués dans les équations suivantes. On voit que le gain d'antenne (G_t) et la puissance PIRE sont directement proportionnels au nombre d'éléments du réseau, ce qui permet de créer les réseaux de grandes dimensions que l'on trouve dans les radars au sol.

$$\text{Antenna Gain } (G_t) = \frac{\text{Radiation Intensity in Desired Direction}}{\text{Radiation Intensity of Isotropic Antenna (All Angles)}} = 10 \log N + G_e$$

$$\text{EIRP} = P_t \times G_t$$

$$\frac{G_t}{T_n} = \frac{\text{Antenna Gain}}{\text{Noise Temperature}}$$

$$T_n = [\text{Noise Factor} - 1] \times \text{Temp}$$

$$P_t = 10 \log N + P_e$$

Où :

N = nombre d'éléments

G_e = gain des éléments

G_t = gain de l'antenne

P_t = puissance totale de l'émetteur

P_e = puissance par élément

T_n = température de bruit

L'espacement des éléments d'antennes est un autre aspect-clé de la conception des antennes à commande de phase. Après avoir défini les objectifs du système en fixant le nombre d'éléments, le diamètre physique du réseau est dans une large mesure déterminé par le fait que les limites de

chaque cellule unitaire sont inférieures à environ une demi-longueur d'onde, ce qui empêche la formation de lobes de périodicité (*grating lobes*). Les lobes de périodicité correspondent à l'énergie rayonnée dans des directions non désirées, ce qui impose des exigences strictes dans le choix des composants électroniques intégrés dans le réseau : ils doivent être compacts, légers et peu gourmands en énergie. L'espacement en demi-longueurs d'onde soulève des défis de conception particuliers aux fréquences élevées où la longueur de chaque cellule unitaire diminue. Conséquence, aux fréquences supérieures, le niveau d'intégration des circuits doit augmenter, tandis que le conditionnement sera de plus en plus sophistiqué et les techniques de gestion thermique simplifiées — tout en étant de plus en plus complexes.

À mesure que l'on construit une antenne apparaissent de nombreux challenges concernant la conception du réseau : acheminement des lignes de contrôle, gestion de l'alimentation électrique, circuits pulsés, gestion thermique, considérations environnementales, etc. On assiste actuellement à l'émergence d'une tendance industrielle fortement favorable à l'utilisation de réseaux moins encombrants et moins lourds. L'architecture traditionnelle utilise de petites « planches » de circuits imprimés où les circuits intégrés sont montés perpendiculairement à la face arrière de la carte de l'antenne. Cette technique a été améliorée au cours des 20 dernières années dans le but de réduire continuellement la taille de la « planche », ainsi que la profondeur de l'antenne. Les designs de prochaine génération abandonnent cette architecture en « planches » au profit d'une approche plate, où le niveau d'intégration des différents circuits électroniques est suffisamment élevé pour qu'ils soient fixés simplement en face arrière de la carte de l'antenne. En réduisant sensiblement sa profondeur, cette solution permet d'incorporer l'antenne plus aisément dans des applications portables ou embarquées. En Figure 3, l'image de gauche représente les patchs d'antennes « plaqués or » montés sur la face supérieure du circuit imprimé, tandis que l'image de droite montre le frontal analogique de l'antenne sur la face inférieure du circuit imprimé. Il s'agit uniquement d'un sous-ensemble de l'antenne qui pourrait également inclure un étage de conversion de fréquence à une extrémité de l'antenne, ou un réseau de distribution assurant la relation entre une entrée RF unique et l'ensemble du réseau. Il apparaît clairement que les circuits qui présentent un niveau d'intégration élevé simplifient de manière significative la conception des antennes ; de plus, à mesure qu'elles gagnent en compacité et embarquent davantage d'électronique sur une surface réduite, la conception des antennes exige une nouvelle technologie à semiconducteurs pour que les solutions soient viables.

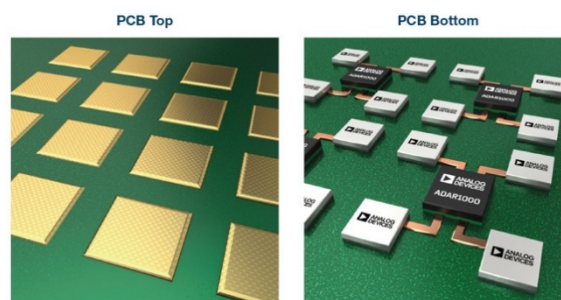


Figure 3. Une antenne réseau plate avec, à gauche, les différents patchs de l'antenne sur la partie supérieure du circuit imprimé et, à droite, les circuits intégrés en face arrière de la carte d'antenne

Formation des faisceaux : numérique ou analogique ?

La plupart des antennes à commande de phase conçues ces dernières années utilisent la technique de formation de faisceaux analogiques (*analog beamforming*), où l'ajustement de phase est effectué aux fréquences RF ou IF, avec un jeu de convertisseurs de données unique pour l'ensemble de l'antenne. Les

concepteurs s'intéressent de plus en plus à la technique de formation de faisceaux numériques (*digital beamforming*), une approche qui associe un jeu de convertisseurs de données à chaque élément d'antenne et où l'ajustement de la phase s'effectue sous forme numérique dans un circuit logique programmable sur site (FPGA) ou un convertisseur de données. La formation de faisceaux numériques présente de nombreux avantages, à commencer par la possibilité de transmettre sans difficulté plusieurs faisceaux, voire d'en modifier quasi instantanément le nombre. Cette remarquable flexibilité est intéressante dans de nombreuses applications et contribue largement à son adoption. Les améliorations continues apportées aux convertisseurs de données réduisent la dissipation de puissance et permettent d'atteindre des fréquences plus élevées, l'échantillonnage RF en bandes L et S faisant de cette technologie une réalité dans les systèmes radar. Si de multiples aspects entrent en ligne de compte dans la comparaison des techniques de formation de faisceaux analogiques et numériques, l'analyse est généralement guidée par le nombre de faisceaux requis, la dissipation de puissance et les objectifs de coût. La formation de faisceaux numériques se distingue généralement par une dissipation de puissance plus élevée avec un convertisseur de données par élément, mais bénéficie d'une flexibilité supérieure qui facilite la création de plusieurs faisceaux. Les convertisseurs de données nécessitent également une plage dynamique plus large, étant donné que la formation de faisceaux qui rejette les signaux de blocage a lieu uniquement après la numérisation. Pour sa part, la formation de faisceaux analogiques peut prendre en charge plusieurs faisceaux, mais elle requiert un canal d'ajustement de phase supplémentaire pour chaque faisceau. À titre d'exemple, la création d'un système à 100 faisceaux multiplierait par 100 le nombre de déphaseurs RF d'un système à 1 faisceau, de sorte que le coût en convertisseurs de données par rapport à des circuits intégrés d'ajustement de phase peut varier en fonction du nombre de faisceaux. De même, la dissipation de puissance est généralement inférieure avec une approche « analogique » qui peut utiliser des déphaseurs passifs ; toutefois, à mesure que le nombre de faisceaux augmente, la dissipation de puissance va elle aussi augmenter en raison de l'utilisation d'étages de gain supplémentaires pour alimenter le réseau de distribution. Un compromis courant existe, qui consiste à adopter une approche hybride où des sous-réseaux de formation de faisceaux analogiques sont suivis par une combinaison numérique des signaux traités par les sous-réseaux. Cette solution qui suscite un intérêt croissant auprès des industriels devrait continuer d'évoluer au cours des années à venir.

Technologie microélectronique

Un système radar pulsé standard émet un signal qui se réfléchit dans un objet pendant que le radar attend l'impulsion de retour pour « cartographier » le champ de vision de l'antenne. Ces dernières années, cette solution frontale aurait embarqué des composants discrets, probablement fabriqués en arséniure de gallium (AsGa). Les circuits intégrés utilisés comme briques de base dans les antennes à commande de phase sont représentés en Figure 4 : il s'agit d'un déphaseur chargé d'ajuster la phase de chaque élément de l'antenne (et qui, finalement, dirige l'antenne), d'un atténuateur conçu pour optimiser le faisceau, d'un amplificateur de puissance qui émet un signal et d'un amplificateur faible bruit qui le reçoit, ainsi que d'un commutateur pour basculer entre les modes émission et réception. Dans les implémentations antérieures, ces circuits intégrés étaient généralement montés sur un boîtier de 5×5 mm ; d'autres solutions, plus sophistiquées, étaient formées d'un circuit intégré monolithique et monovoie en AsGa.

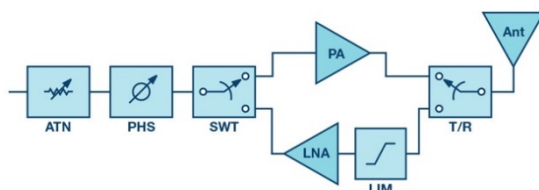


Figure 4. Exemple du frontal RF typique d'une antenne à commande de phase

La récente prolifération des antennes à commande de phase a bénéficié des avancées de la technologie des semiconducteurs. Les nœuds avancés BiCMOS SiGe (Silicium Germanium), silicium sur isolant (SOI) et CMOS massif ont associé des circuits numériques pour contrôler la direction dans le réseau, ainsi que le trajet du signal RF pour ajuster la phase et l'amplitude dans un seul circuit intégré. Il est aujourd'hui possible de réaliser des circuits intégrés de formation de faisceaux multicanaux qui ajustent le gain et la phase dans une configuration à 4 voies (jusqu'à 32 voies pour les conceptions en ondes millimétriques). Dans certains exemples basse consommation, un circuit intégré en silicium sera utilisé en tant que solution monolithique pour gérer toutes les fonctions décrites ci-dessus. Dans les applications forte puissance, les amplificateurs de puissance réalisés en nitrure de gallium (GaN) ont considérablement accru la densité de puissance pour s'adapter aux cellules unitaires des antennes à commande de phase traditionnellement prises en charge par des amplis de puissance à tube à ondes progressives (TWT) ou par des amplis de puissance en AsGa de relativement faible puissance. Dans les applications aéroportées, la tendance est favorable aux architectures plates et aux atouts offerts par la technologie GaN en termes de rendement en puissance ajoutée (PAE). Dans les radars terrestres de grandes dimensions, le nitrure de gallium (GaN) a également permis de remplacer les antennes paraboliques commandées par un tube à ondes progressives (TWT) par des antennes à commande de phase. Il existe à présent des circuits intégrés monolithiques en GaN capables de délivrer plus de 100 watts de puissance avec un rendement PAE de plus de 50 %. Ce rendement en puissance ajoutée (PAE) peut être combiné au faible rapport cyclique des applications radar (taille, poids et coût du réseau d'antennes). Au-delà de la capacité de puissance intrinsèque du GaN, la diminution des dimensions par rapport aux actuels circuits intégrés en arséniure de gallium (AsGa) représente un atout supplémentaire. Entre un amplificateur de puissance AsGa de 6 à 8 W en bande X et une solution en GaN, l'encombrement diminue en effet de 50 %, voire davantage. Un tel écart est significatif lorsque ces composants électroniques sont intégrés dans la cellule unitaire d'un réseau d'antennes à commande de phase.

Circuits intégrés à commande de phase analogique d'Analog Devices

Analog Devices développe des circuits analogiques de formation de faisceaux entièrement intégrés pour un large éventail d'applications, telles que les radars, les communications par satellite et les télécommunications 5G.

À titre d'exemple, le circuit intégré de formation de faisceaux en bandes X/Ku [ADAR1000](#) est un dispositif à 4 voies qui fonctionne entre 8 et 16 GHz en mode TDD (duplex par répartition dans le temps), l'émetteur et le récepteur étant incorporés dans un unique circuit intégré. Cette approche convient idéalement aux applications radar en bande X, ainsi qu'aux communications par satellite (*satcom*) en bande Ku, où le circuit intégré peut être configuré pour fonctionner en mode émetteur-récepteur ou en récepteur seul. Le circuit intégré à 4 voies est logé sur un boîtier pour montage en surface QFN de 7x7 mm, ce qui simplifie son intégration dans des réseaux d'antennes plates avec une dissipation de seulement 240 mW/voie en émission et de 160 mW/voie en réception. Les voies émission-réception et réception sont conçues pour s'interfacer directement de l'extérieur avec un module frontal (FEM) proposé par Analog Devices. La Figure 5 représente le contrôle de gain et de phase avec une couverture de phase complète sur 360 degrés, une résolution de phase inférieure à 2,8 degrés, ainsi qu'un contrôle de gain supérieur à 31 dB. Le circuit ADAR1000 embarque une mémoire intégrée permettant de stocker jusqu'à 121 états de faisceau, un état contenant l'ensemble des réglages de phase et de gain pour l'ensemble du circuit intégré. L'émetteur délivre un gain d'environ 19 dB avec une puissance saturée de 15 dBm lorsque le gain en réception est d'environ 14 dB. Autre paramètre clé, le contrôle de gain à changement de phase est d'environ 3 degrés dans une plage de 20 dB. De même, le changement de gain avec contrôle de phase est d'environ 0,25 dB sur l'ensemble de la couverture de phase à 360 degrés, ce qui facilite les tâches d'étalonnage.

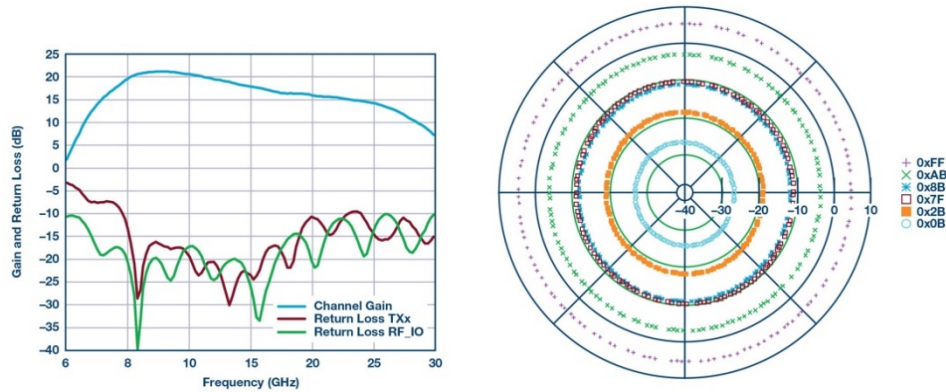


Figure 5. Gain en émissions/perte par réflexion et contrôle de gain/phase sur l'ADAR1000 à 11,5 GHz

Ce circuit intégré de formation de faisceaux est destiné à des applications de réseaux à commande de phase analogiques ou à des architectures de réseaux hybrides qui conjuguent formation de faisceaux numériques et analogiques. Analog Devices offre une solution complète de l'antenne aux bits incluant les convertisseurs de données, la conversion de fréquence, un circuit intégré de formation de faisceaux analogiques, ainsi que le module frontal. Ce jeu de circuits permet à Analog Devices de combiner les fonctionnalités et d'optimiser les circuits intégrés de manière appropriée afin de permettre à ses clients d'implémenter plus facilement leurs designs d'antenne.

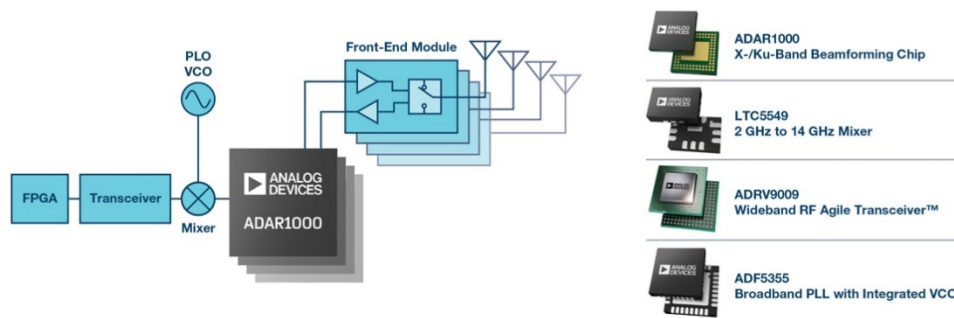


Figure 6. Pour en savoir plus sur les réseaux. à commande de phase d'ADI :

www.analog.com/phasedarray