Principes de base du radar pulsé

Caractéristiques du signal radar pulsé, techniques de compression et mesure

Par Giovanni D'Amore, Marketing Brand Manager RF&MW Products Keysight Technologies

Dans l'article précédent «Un relooking pour le radar, mais la physique reste la même», nous avons passé en revue l'équation de la portée d'un radar. L'équation de la portée d'un radar réunit les principales variables caractéristiques d'un radar et permet donc de comprendre les mesures effectuées pour assurer une performance optimale. Parce que la puissance du signal est indirectement proportionnelle à la valeur puissance 4 (d^4) de la distance à la cible, une forte puissance d'émission est souhaitable. Le radar pulsé offre de nombreux avantages par rapport au radar à ondes continues, essentiellement pour des opérations à forte puissance.

Caractéristiques du signal d'impulsion

Les caractéristiques d'un signal radar pulsé déterminent en grande partie la performance et la capacité du radar. La puissance de l'impulsion, le taux de répétition, la largeur et la modulation sont équilibrés pour obtenir la combinaison optimale pour une application donnée.

La puissance d'impulsion affecte directement la distance maximale, ou la portée, d'une cible qui peut être détectée par le radar. La fréquence de répétition des impulsions (*Pulse Repetition Frequency*, PRF) détermine directement la portée maximale sans ambiguïté de la cible. La largeur d'impulsion détermine la résolution spatiale du radar. La largeur de l'impulsion et la forme de l'impulsion déterminent également le spectre du signal radar. La diminution de la largeur d'impulsion augmente la bande passante du signal. Une bande passante système plus large entraîne un niveau de bruit du récepteur plus élevé pour une quantité de puissance donnée, ce qui réduit la sensibilité. Comme la forme de l'impulsion peut déterminer la bande passante du signal et affecter la détection et l'identification des cibles, elle est choisie en fonction de l'application.

Les impulsions courtes avec un faible taux de répétition maximisent la résolution et la plage (ou portée) sans ambiguïté, et une puissance d'impulsion élevée optimise la portée du radar par rapport à la distance. Cependant, il existe des limites pratiques à la génération des impulsions courtes et de grande puissance. Par exemple, une puissance de pointe plus élevée réduira la durée de vie des éléments utilisés dans la conception des amplificateurs à haute puissance. Heureusement, des formes d'ondes complexes et des techniques de compression d'impulsions peuvent être utilisées pour atténuer considérablement la limitation de puissance sur la largeur d'impulsion.

Techniques de compression d'impulsion

Les techniques de compression permettent d'utiliser des impulsions de signal relativement longues sans compromettre la résolution au niveau de la portée. La clé de la compression des impulsions se trouve dans la puissance. Une impulsion plus longue réduit la puissance de crête de l'impulsion transmise tout en conservant la même énergie globale de l'impulsion. Lors de la réception, l'impulsion est compressée via

un filtre de corrélation en une impulsion plus courte, ce qui augmente sa puissance de crête et réduit sa largeur. Ainsi, le radar à compression d'impulsion réunit simultanément les avantages de la haute résolution et de la puissance élevée dans une courte et longue impulsion respectivement

La technique de compression d'impulsion avec un filtre de concordance repose sur le fait de moduler l'impulsion RF/microondes d'une manière qui facilite le processus de compression. La fonction de filtrage peut être réalisée numériquement en utilisant la fonction de corrélation croisée pour comparer l'impulsion reçue avec l'impulsion transmise. Le signal de réception échantillonné est répétitivement décalé dans le temps, calculé en transformée de Fourier puis multiplié par le conjugué de la transformée de Fourier du signal d'émission échantillonné.

La sortie de la fonction de corrélation croisée est proportionnelle à la concordance décalée dans le temps des deux signaux. Un pic dans la fonction de corrélation croisée ou en sortie du filtre de concordance se produit lorsque les deux signaux sont alignés. Ce pic est le signal de retour du radar et peut typiquement avoir une durée 1000 fois plus courte que la pulsation transmise. Même si deux ou plusieurs longues impulsions transmises se chevauchent dans le récepteur, le pic en sortie ne se produit que lorsque chacune des impulsions est alignée avec l'impulsion d'émission. Ceci rétablit la séparation entre les impulsions reçues et, avec elle, la résolution de la portée.

De nombreuses techniques de modulation peuvent être utilisées pour obtenir une corrélation élevée entre les signaux reçus et transmis. Par exemple, un balayage linéaire FM, un codage de phase binaire (par exemple, des codes de Barker) ou des codes polyphasés (par exemple, des codes Costas). Les graphiques appelés diagrammes d'ambiguïté illustrent la manière dont différents schémas de compression d'impulsion fonctionnent en fonction de la largeur d'impulsion et du décalage de fréquence Doppler, comme le montre la figure 1.

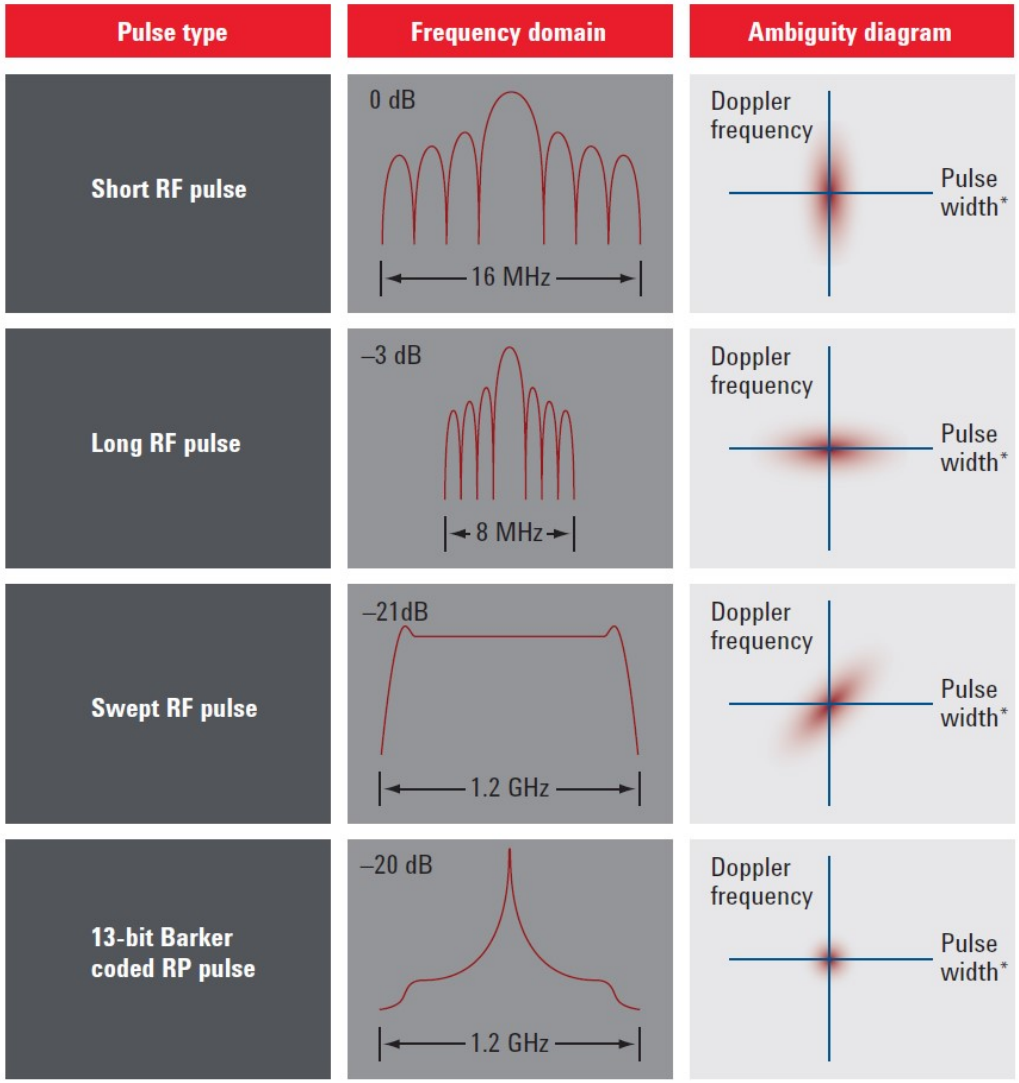


Figure 1. Le diagramme d'ambiguïté illustre la précision de localisation par rapport à la précision Doppler pour différents types d'impulsions radar.* Le terme largeur d'impulsion sur le diagramme d'ambiguïté se réfère à la largeur d'impulsion à la sortie du détecteur de radar.

Translation of figure 1 :

Pulse type : Type d’impulsion

Frequency domain : Domaine fréquentiel

Ambiguity diagram : Diagramme d’ambiguïté

Short RF pulse : Impulsion RF courte

Long RF pulse : Impulsion RF longue

Swept RF pulse : Impulsion RF balayée

13-bit Barker coded RP pulse : Impulsion RP codée Barker 13-bit

Doppler frequency : Fréquence Doppler

Pulse width : Largeur d'impulsion

Mesure du radar pulsé

Comprendre les mesures radar et la façon dont l'instrumentation répond aux signaux radar est cruciale pour concevoir des solutions radar performantes et rentables. Les mesures radar critiques comprennent la puissance, le spectre, les caractéristiques des impulsions, le gain d'antenne, la surface équivalente de cible, les gains et pertes au niveau des composants, le facteur de bruit et le bruit de phase. L'équation de la portée d'un radar [1] montre que ces paramètres de mesure influencent directement la performance du radar, comme le montre la figure 2.

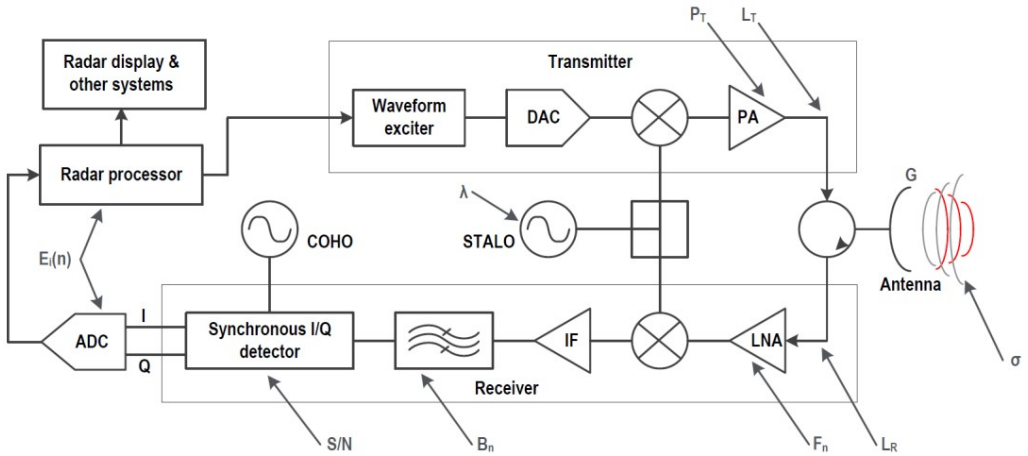


Figure 2. Relation entre les variables clés dans l'équation de la portée d'un radar et les implémentations analogiques/numériques hybrides des modules émetteur et récepteur d'un système radar.

Translation of Figure 2 :

Radar display & other systems : Affichage radar & autres systèmes

Radar processor : Processeur radar

ADC : CAN

Waveform exciter : Stimulateur de forme d'onde

DAC : CNA

Transmitter : Emetteur

Antenna : Antenne

Synchronous I/Q detector : Détecteur I/Q synchronisé

Receiver Récepteur

Plusieurs types d'équipements de test peuvent mesurer la puissance d'impulsion, le spectre et les caractéristiques. Par exemple, les wattmètres, les analyseurs de spectre et les analyseurs de signaux vectoriel. Comme chaque instrument possède ses avantages mais aussi ses limites, le meilleur choix dépend des objectifs de mesure et des contraintes pertinentes sur le radar et l'équipement de test.

Solutions rentables pour la mesure de puissance d'impulsion

Le wattmètre est la solution la plus courante et la moins coûteuse pour mesurer la puissance. Un modèle complet peut mesurer la puissance moyenne, la puissance de pointe, le rapport cyclique et de multiples statistiques de puissance. Le wattmètre utilise un transducteur appelé capteur de puissance, qui convertit la puissance du signal haute fréquence en un signal DC ou basse fréquence que le wattmètre peut alors mesurer par rapport à un niveau de puissance RF/micro-ondes spécifique.

Les compteurs sont le moyen le plus économique de mesurer les caractéristiques de fréquence et de synchronisation d'un signal pulsé. La capacité de porte temporelles permet des mesures statistiques sur les signaux balayés ou compressés. L'ajout d'un troisième canal optionnel pour les mesures microondes CW et la connexion d'un wattmètre et d'un capteur de puissance compatibles créent une solution rentable pour les mesures de puissance impulsionnelle.

Mesure de la puissance d'impulsion et du spectre avec un analyseur de signal ou de spectre

L'avantage principal d'un analyseur de spectre ou de signal est la capacité à mesurer la fréquence et la puissance d'un signal. L'information spectrale peut révéler des problèmes qui provoquent un fonctionnement non-optimal du radar tel que perte de puissance ou l'émission de signaux indésirables. La figure 3 montre que le spectre de l'impulsion peut fournir des informations sur la largeur d'impulsion, la période et le rapport cyclique du signal.

Les analyseurs de spectre modernes sont basés sur l'implémentation numérique d'une architecture à balayage qui offre des avantages en vitesse, précision et bruit de phase par rapport aux modèles analogiques. Les analyseurs de signaux utilisent les numériseurs, le traitement du signal numérique (*Digital Signal Processing*, DSP) et la transformée de Fourier rapide (*Fast Fourier Transform*, FFT) pour calculer les spectres de fréquence. Un avantage clé des analyseurs de signaux basés sur la FFT est la vitesse de calcul, en particulier pour les mesures intra-canal.

Avec des numériseurs rapides et des techniques innovantes tels que «extension du plancher de bruit»

(«*noise floor extension*»), les analyseurs de signaux sont capables d'atteindre des performances de portée dynamique proches de celles d'un analyseur à balayage. Étant donné que les analyseurs de signaux calculent les informations de phase, ils peuvent effectuer une analyse du signal vectoriel et une démodulation avancée des signaux complexes. L'ajout d'une application de mesure pour l'analyse des impulsions simplifie et améliore encore les mesures radar.

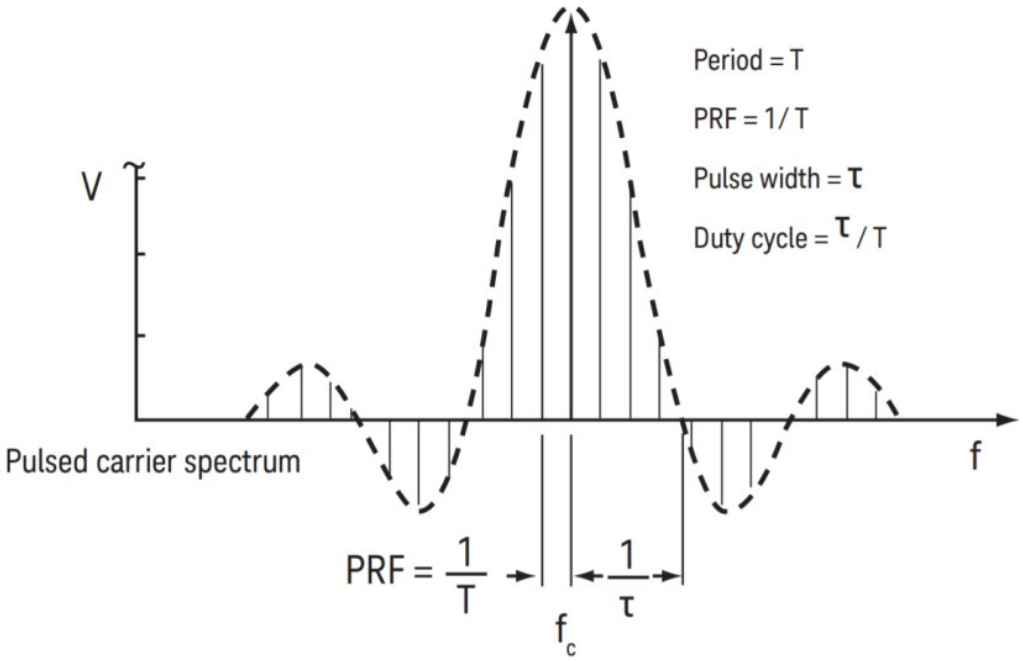


Figure 3. Le spectre de fréquence révèle des informations utiles sur le domaine temporel concernant le signal d'impulsion.

Translation figure 3 :

Pulsed carrier spectrum : Spectre de porteuse pulsée

Period : Période

Pulse width : Largeur d'impulsion

Duty cycle : Rapport cyclique

Solutions d'analyse des impulsions complexes

Le processus d'analyse des impulsions est souvent décrit en trois étapes principales: le déclenchement, l'acquisition du signal et la mesure/analyse. Ces étapes du processus peuvent être effectuées individuellement par des dispositifs distincts ou en plusieurs étapes par un seul analyseur. Ces premières étapes dans les analyses d'impulsions, c'est-à-dire la recherche du signal intéressant et l'établissement d'une synchronisation adéquate des mesures, peuvent être difficiles à réaliser.

Deux plates-formes matérielles différentes sont généralement utilisées pour l'analyse des impulsions: des analyseurs de signaux avec une fréquence intermédiaire (IF : *Intermediate Frequency*) numérique à large bande et des oscilloscopes ou numériseurs avec un taux d'échantillonnage suffisamment élevé pour gérer directement les signaux RF/microondes en bande de base. Alors que plusieurs de ces mesures peuvent être aussi bien effectuées par les analyseurs de signaux que par les oscilloscopes, le critère de choix majeur concerne deux importantes caractéristiques de l'étage d'entrée matériel: la bande passante et la plage dynamique. Les CAN (Convertisseurs Analogiques Numériques, ADC pour *Analog-to-Digital Converter*) haute vitesse dans les oscilloscopes RF/microondes offrent une bande passante extrêmement large et une bonne linéarité de phase. En revanche, les CAN plus lents et la bande passante des filtres des analyseurs de signaux fournissent une plage dynamique plus élevée.

Un avantage pratique de l'analyseur de signaux en tant que plate-forme de mesure est qu'il peut supporter une commutation transparente entre les mesures par balayage, vectorielles et en temps réel au sein d'un seul instrument. En utilisant des mélangeurs externes intelligents, cet instrument à lui seul — via une interface utilisateur unique — peut assurer ces fonctionnalités sur de larges bandes passantes et des fréquences de fonctionnement allant jusqu'à 110 GHz.

Mesures d'antenne, du RCS, des composants et des sous-ensembles

Le gain d'antenne est une variable clé dans l'équation de la portée d'un radar et affecte donc directement les performances du système. D'autres caractéristiques importantes incluent la polarisation, la largeur du faisceau, la visée et les lobes latéraux. Un analyseur de réseau vectoriel (*Vectorial Network Analyzer*, VNA) est l'instrument idéal pour effectuer ces mesures suivant toute une variété d'approches : grandes ou petites configurations en champ lointain; des configurations planes, cylindriques ou sphériques en champ proche.

Lorsque vous travaillez avec des systèmes à multi-ouverture ou à surface multi-phase, des facteurs tels que la taille de la surface et le temps de mesure souhaité sont des facteurs clés dans le choix de la meilleure solution de mesure. Lorsque le nombre de canaux nécessaires est peu élevé, une approche basée sur un VNA est suffisante. Dès que le nombre de canaux est à deux chiffres, une solution référence multicanaux basée sur du matériel de mesure modulaire est plus efficace.

La valeur de la surface équivalente radar (*Radar Cross Section*, RCS) a un effet direct sur la portée du radar. Cette mesure de RCS demande de relever un certain nombre de défis différents : les très faibles niveaux de signal nécessitent des récepteurs de mesure hautement sensibles basés sur un mélangeur pour produire des résultats significatifs. En outre, le séquençage peut également être nécessaire pour améliorer les résultats de mesure en excluant les petites réflexions causées par des éléments dans la plage de test.

Les composants inclus dans le chemin du signal — les filtres, les duplexeurs, les circulateurs — peuvent causer des pertes qui ont des implications majeures pour la puissance de sortie du système. Les déficiences telles que la planéité de la phase, la planéité de l'amplitude et le retard de groupe affectent également les performances du radar. Un wattmètre à deux ports est un moyen simple de mesurer la perte. Un analyseur de réseau vectoriel offre une large gamme de mesures pour les signaux CW et pulsés, permettant une caractérisation détaillée des composants et des sous-systèmes le long du chemin du signal à l'intérieur du système radar.

Facteur de bruit, lobe latéral temporel (Time Sidelobe Level) et bruit de phase

Le facteur de bruit, la valeur du lobe latéral temporel (*Time Sidelobe Level)* et le bruit de phase sont des caractéristiques cruciales qui peuvent avoir un effet marquant sur la performance de chaque système radar: le facteur du bruit a un effet direct sur la performance du récepteur; le *Time Sidelobe Level* affecte la résolution spatiale, la portée dynamique et plus encore; et le bruit de phase provoque des bandes latérales qui réduisent le rapport signal/bruit (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR). Ces mesures peuvent être effectuées efficacement et avec précision en utilisant des solutions spécialement conçues ou des analyseurs à usage général équipés d'applications de mesure spécialisées. En fin de compte, la capacité de mesurer, analyser et comprendre ces paramètres dans un système radar permet des améliorations de la résolution spatiale, de la dynamique, du SNR et plus encore.

1 http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1386EN.pdf?id=2715324

Pour une étude plus approfondie des solutions de mesure radar, visitez http://keysight.com/find/radar-focus.