超宽带雷达特性及其应用

姚广锋　王希岭

超宽带雷达的研究和应用是雷达发展中的质的飞跃。它使用了频谱宽度可与其中心频率相比较的超宽带无线电信号，可以更好地解决诸如探测和识别目标、雷达成像等一系列雷达观测问题，引起人们的广泛兴趣和极大关注。

1　超宽带雷达的定义

目前普遍接受的超宽带雷达的定义是：雷达辐射信号的宽带指数大于 0.25 的雷达为超宽带雷达。宽带指数定义为：

$$\mu=\frac{\Delta f}{f_0}=2\frac{f_H-f_L}{f_H+f_L} \tag{1}$$

即信号频谱宽度 Δf 与其中心频率 f_0 的比值。f_H、f_L 为信号的上限频率和下限频率。

2　超宽带雷达的特性

2.1　超宽带雷达信号

超宽带雷达信号的两种可能表示方法：一是借用窄带信号的复数模型法，优点是便于近似计算超宽带信号的变换和易于误差估计；第二种方法是采用实数模型法，充分反映信号的超宽带特性。由于超宽带信号的时间瓣数目的降低，复包络已不能反映信号形状。即使在精确结果的条件下，复数模型都不能令人满意，最好还是用时间的实数振荡函数来模拟超宽带信号。

在超宽带雷达中基于窄脉冲形式的无载波信号是目前超宽带雷达中应用最多的一种信号。虽然由于其功率受限而限制了超宽带雷达的作用距离，但它在超宽带雷达特性，尤其是目标特性研究中特别适用。故现今的超宽带雷达大多数都采用此类脉冲型信号。

2.2　目标对超宽带信号的雷达特性

雷达所解决的全部问题都可以归结为被雷达目标所散射的电磁场的某些特性问题。超宽带信号下目标的建模方法有两种：结构物理方法和表象方法。结构物理方法可以揭示雷达信号非稳态散射的物理机理。表象方法便于研究复杂形状和有涂层的问题。

基于微分方程的雷达目标模型是用输入输出变量或状态变量的微分方程来描述目标的散射特性。

$$y_{ij}^{(n)}(t)+\sum_{k=1}^{n-1}a_{ijk}(\theta,\varphi)y_{ij}^{(k)}(t)=\sum_{k=1}^{m-1}b_{ijk}(\theta,\varphi)u_j^{(k)}(t) \tag{2}$$

$$y_i(t)=\sum_{j=1}^{2}y_{ij}(t) \tag{3}$$

式中，对于探测信号，$u_j(t)=e_j^i(t,\varphi)$；对于反射信号，$y_i(t)=e_{oi}^{(s)}(t)$。

这种模型的优点是可以通过微分方程的解直接得到散射信号的时间表达式，并可以推广到具有非线性电气物理特性的雷达目标。

以状态变量的微分方程为基础的目标模型，可以在模拟计算机上直接实现，也可以通过有效的算法在数字计算机上构建，它的优点是可以使最佳信号处理算法综合问题的解得以简化。

由于超宽带信号的特点导致雷达目标具有一种可以称之为超宽带无线电信号频率二重性的特殊性质：低频区的信息与高分辨率。这种性质在于，随着无线电信号频谱的加宽，分辨率也同时提高，从而出现了获取低频段信息的可能性。获得雷达目标的超宽带特性后，就可以用于目标识别、雷达成像、确定姿态和计算极化

效应等。

2.3 超宽带雷达目标回波信号

对于超宽带雷达，因为目标上的“亮点”数目以及观测角是不定的，所以目标反射回来的回波信号形式具有随机性，从而导致接收信号的不可观测性。所以不能像以往窄带雷达那样认为接受到的回波信号是确知信号的概念来描述超宽带雷达的接收信号。

2.4 超宽带雷达天线

在超宽带情况下，发射天线激励信号的形状与辐射长的时间结构不一致，以及接收天线入射波的时间结构与其输出信号不一致。场的时间结构与角坐标的关系排除了非稳态情况下直接利用经典单色方向图的可能性，此时，单色方向图已经完全失去了它的意义。因此，天线特性只用频率特性族或脉冲特性族来描述。另外超宽带信号辐射的另一个特点是可能在有限尺寸天线上分出局部辐射中心。

对超宽带雷达天线的基本要求有：在超宽带信号频带中输入阻抗不变；最大辐射方向不变；存在明显的相位中心；场强增益系数的频率关系：对于发射天线 $G(\omega)=\text{const},\omega\epsilon\Delta\omega$；对于接收天线，$G(\omega)\sim\omega^2,\omega\epsilon\Delta\omega$；对于收发共用天线 $G(\omega)\sim\omega,\omega\epsilon\Delta\omega$。

3 超宽带雷达系统设计的技术问题

3.1 发射机和信号源

对超宽带系统的最主要的限制是峰值输出功率不够。迄今为止，实验雷达所用的脉冲源，不是晶体管冲激脉冲发生器，就是放电管发生器，但是这两种脉冲源都受到严格的限制。现在随着 OASS 器件的发展，超宽带雷达性能的拓宽出现了新的可能性，特别是在高功率电平情况下，OASS 器件的可重复性和快速上升时间对超宽带雷达技术尤为重要。

围绕发射机的大多数问题都与高功率开关器件的性能以及对它们的需求有关。超宽带技术希望使用非常迅速和便宜的开关来构成不昂贵的发射机，这种开关要能够承受极高的电压且具有极高的可靠性。

现在的开关源可以控制极高的功率(级)。这种器件输出的信号的持续期是极短的，但是其充电时间却很长。故虽然它提供的峰值功率远高于普通的发射机，但其平均功率却很低。由于探测距离取决于信号能量，而且鉴于能量等于平均功率的时间积分，显然，现有的开关装置只适用于近程应用。

在某些设备中，输入到天线的波形的特征不是非常苛刻的。如探地应用，可以直接使用高功率开关送出的信号。但在大多场合，波形设计对距离、速度和角度测量至关重要。

3.2 天线

超宽带雷达的天线有两种：连续发射天线和阵列天线。阵列天线可以提供更好的方向性和更高的功率，但是可能会产生栅瓣。这两种类型的天线在频率和波束宽度间有着同样的耦合关系，所以实现可用的波束宽度以及控制与频率有关的波束宽度的影响对它们都是问题。

超宽带信号的基带波形可能包括极低的频率成分。如使用常规的天线设计方法将具有以下问题：在这种类型的波形下维持波束宽度控制，以及保持增益。由于溢出损失会使反射体的增益降低，而较低频率上的阵元间的耦合又会使阵列增益降低。

3.3 接收机

在接收机的设计中要处理三个问题：第一个问题是由于我们不再处理窄带波形，那么最好的接收机是线性的这种说法对吗？即对于其幅度并不传送任何信息的基带视频信号结构，用线性接收机来处理这种波形仍然合适吗？第二个问题是可用来处理超宽带信号的技术。第三个问题是关于保证目标角度估测的参数估值要求。对接收机所提的性能要求必须与整个系

统方程中其他参数的性能取得平衡。

如果知道传送信号的频率成分,那么接收机必须覆盖这一频带并加上足以包括目标谐波及多个回波的频率余量。一组间隔很近的多脉冲回波与原始信号具有不同的频率成分。带来的问题是如何接收超宽带信号并用一些相关技术去识别。

3.4　信号处理方法

超宽带雷达可为目标识别提供更多的目标特征信息,同时它也对目标特征信号处理提出了更高要求。常规的载波雷达的信号处理方法已不再有效,需要研究新的方法和技术。近年来对各种处理技术进行了报道,典型的技术包括时—频联合处理和高阶信号处理等技术。对于冲激雷达信号处理,信号检测是其基础,其检测方法有:双谱检测算法和基于子波变换的信号检测方法等。

4　超宽带雷达的应用

超宽带雷达最早的应用是出于美国陆军探测地下物体的需要,且在目标成像、丛林透视,以及某些类型的杂波抑制和低 RCS 目标探测等方面有其应用前景。

4.1　目标识别

超宽带雷达有两种识别目标的方法:第一种方法是以足够宽的宽带信号来照射目标,以估测其谐振频率,这些估测数据可以用作识别目标的样板。另一个方法是采用足够精细的距离分辨力,可分辨目标的所有散射中心,从而实现目标的识别。

第一种方法要求信号的最小频率应该为目标的谐振散射体长度的 2 ~4 倍。波形中较高频率将激励较高模式的谐振,但是基波谐振通常具有最强的响应。为提高目标识别的可靠性,希望激励尽可能多的谐振,所以要选用足够带宽的信号。对于轰炸机而言,信号要覆盖 2 ~4 兆赫,其宽带指数为 0.66。

第二种方法形成目标的一维“图像”(常称它为距离轮廓)。超宽带雷达的回波是一系列的回波,而不是窄带雷达的一个集中回波。这些回波携带了一系列不同角度信息的回波,可通过逆合成孔径处理进行目标成像。如果所成的像具有足够多细节以区别相似的飞机类型,从而实现目标的识别。

4.2　雷达成像

用超宽带雷达建立目标图像的理论基础是刘易斯 - 鲍雅尔斯基恒等式或特殊情况下的卡诺 - 莫法特恒等式。

其成像方法有:拉顿逆变换(或多维傅氏变换),其缺点是抗干扰能力差;另外是试探法,它是以线性作用响应的被测强制分量与目标轮廓函数的关系,以及轮廓函数与特征函数的关系为基础的,其特点是必须以离散的形式提出问题,而且要求反复求解。包括:有限表面法、投影函数法、利用目标回波成像和利用目标冲激响应成像。超宽带雷达成像的特点:

4.2.1　具有发现隐蔽目标的能力

UWB 雷达具有强的穿透叶状物的能力。它是一类地面穿透型雷达。

4.2.2　处理器算法的考虑

在超宽带成像雷达中,距离曲率对成像分辨率的影响很大。保证高成像分辨率的困难在于距离曲率随成像地散射点的不同而改变。虽然可以通过增加距离存储器进行适当补偿,但对所有距离存储器而言,实现对距离曲率同时补偿困难。所以雷达适当选择一种图像形成处理算法,用于有效补偿距离曲率。目前 $\Omega - k$ 算法是一种较适合于超宽带成像雷达的一种算法。它能较好解决距离曲率的补偿问题。

4.2.3　旁瓣抑制

常规 SAR 处理器可采用可分离的二维加权函数抑制旁瓣。UWB SAR 系统中除常见的正交旁瓣外,还出现了非正交旁瓣,需要采取可变加权的简单办法抑制非正交旁瓣。

(下转第 60 页)

样条件下的爆炸效应具有同样的特性。但是每个药型罩形成的高速破片流由于其金属粒子质量太小,故其破坏能力随距离增大而很快下降,因此这种战斗部的有效作用距离最适宜用于武器制导精度较高的情况,在这种小脱靶量情况下,这种战斗部比常规破片式战斗部对空中目标的毁伤效果好。

利用聚能效应形成自段破片的多聚能装药战斗部主要考虑到药型罩形成的自锻破片速度可达1600~2000米/秒,甚至更高,而且自锻破片形成过程质量的损失很小,因此可以在较大距离上保持很大的穿透目标的能力,对于钢制目标,它能穿透的厚度为药型罩直径的0.5~1倍。因此它可以用来对付再入弹头等高强度结构的目标,并可能起爆其中的炸药。但这种战斗部的药型罩只能沿战斗部壳体放置一层,因此自锻破片的数量是有限的,在作战中能否命中目标是很难说的。

5 结论

综上所述,对付小脱靶量的空中目标,利用聚能效应形成金属射流的多聚能装药战斗部比破片式战斗部的效果要好一些,在杀伤半径相同时,战斗部质量也小,随着脱靶量的不断增大,由于微粒速度急剧衰减,这种战斗部的杀伤效果将急剧下降。但随着防空导弹制导精度的提高,脱靶量越来越小,如果是小脱靶量,多聚能装药战斗部对空中目标的毁伤效果就会比常规破片式战斗部对空中目标的毁伤效果好是肯定的。而利用聚能效应形成自段破片的多聚能装药战斗部由于受战斗部质量约束,自锻破片的数量有限,因而击中目标的概率受限。

李静海,92941部队92分队高工

(上接第33页)

4.2.4 运动补偿

UWB SAR系统中运动补偿显得比一般SAR雷达困难,需要认真对待解决。

4.2.5 自动聚焦

常规SAR系统将运动产生的相位误差作为一维问题对待,形成了许多健全的自动聚焦技术。对于USB SAR系统,由于信号频谱分量分布宽,如果对所有波长成分都采用一个相同的误差校正,运动目标产生的相位误差就不能有效校正。所以自动聚焦问题也是USB SAR系统中的一个关键问题。

4.3 杂波抑制

超宽带波形具有将小目标与杂波分辨得较好的性能。常用的杂波抑制方法是在四个测量数据域中(距离、方位、仰角和多普勒)的一个或多个是杂波反射和目标信号分开。杂波抑制的三个基本方法为:分辨单元尺寸减小、使用低的中心频率以及波形极性鉴别。用普通系统和超宽带系统都可能降低单元尺寸。不过,对角度和时间/频率分辨力之间的关系的利用却是超宽带波形所独有的,利用这种相互影响的关系可以使杂波抑制得到某种特有的改善。用低中心频率不仅可以降低杂波发射,而且还可以提高丛林透视力。利用波形极性辨别方法可提高对杂波中的高导磁率目标的检测能力。这个方法是超宽带雷达波形所特有的,因为他要求能够鉴别到达时间相差半个波长所引起的波形极性的改变与反射的极性变换之间的差异。

5 结论

超宽带雷达具有许多常规雷达所不具备的优点,例如,其优异的目标识别能力、抗杂波干扰性能、反目标隐身能力、以及抗电子与非电子干扰能力等,都是常规雷达所无可比拟的。但是,现阶段的技术水平离实用还有一定距离,影响超宽带雷达应用的主要问题有两个,一是尚无能同时满足大功率和大带宽要求的雷达发射源和天线馈电系统,二是有关超宽带雷达的电磁兼容性也需要认真解决。总之,超宽带雷达是一种非常有前途的新型雷达,但是有许多技术及理论问题还有待不断完善。

姚广锋,空军装备研究院防空所一室工程师
王希岭,国防大学在读硕士研究生