

超宽带雷达反隐身机理综述*

何建国 陆仲良 刘克成

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘要 本文对超宽带(UWB)/冲激雷达的反隐身机理作了全面的讨论。从冲激脉冲具有的超宽带特性、短时性、信号先兆效应、电磁导弹特性,以及吸波材料的驰豫时间效应和自诱导透明性等方面,分析对比了冲激雷达与常规雷达回波的差异。初步实验结果表明,超宽带冲激雷达有优越的反隐身能力。

关键词 冲激雷达, 超宽带, 反隐身, 雷达吸波材料

分类号 TN958.2

Anti-Stealth mechanism of UWB Rader

He Jianguo Lu Zhougliang Liu Kecheng

(Department of Electronic Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract The anti-stealth mechanism of UWB/IR is discussed in details. The difference of echoes between impulse radar and conventional radar is analysed and compared in many aspects such as the UWB property, short time feature, signal precursor effects, electromagnetic missile characteristic for impulse signal, and molecular relaxation and self induced transparency of RAM. The preliminary experiment results show that UWB/IR have advantageous anti-stealth capability.

Key words Impulse radar (IR), UWB, Anti-stealth, Transient response, RAM

飞行器隐身技术是通过飞行器的外形设计,飞行器表面涂覆吸波材料和阻抗加载等方法,减弱飞行器的散射分布特性,使飞行器在某些方向的雷达散射截面(RCS)大大降低,以致常规的雷达很难发现或无法探测。国外隐身技术发展很快,美国在隐身技术方面处于领先地位,如美国在海湾战争中使用的F-117A隐身战斗机,其RCS比常规机型下降20 dB以上,从而使现有的常规窄带雷达对隐身目标的

* 1996年3月10日收稿

作用距离降低到常规目标的30%以下。

隐身技术的重点是外形隐身和材料隐身,本文主要讨论冲激雷达的反隐身(外形隐身和材料隐身)潜在能力,从频域时域二方面系统地分析了冲激雷达反隐身的机理,并讨论了冲激雷达的应用前景。

1 反隐身机理的频域分析

超宽带雷达是指相对频带大于或等于20%的雷达,冲激雷达是一种典型的超宽带雷达。常规雷达的相对带宽通常小于15%,因此用它们探测目标时,从目标的回波信号中只能提取单个频率及其附近很窄频带内目标的特性,信息量少,一般只能给出目标的点特性(如空间位置、速度等);当隐身目标的隐身频段正好复盖这个频带时,雷达就丧失了探测能力。

雷达的相对带宽可以表示为

$$\eta = \frac{f_H - f_L}{(f_H + f_L)} \quad (1)$$

式中 f_H 和 f_L 分别为信号在一定条件(如频谱的幅值等于频谱最大幅值的0.707倍)下的最高频率和最低频率。

对于无载频的冲激雷达,如果脉冲波形为单个正向脉冲(如高斯脉冲,矩形脉冲), $f_L = 1$, $\eta = 2$,如果脉冲波形为单周正弦脉冲,则 $f_L > 0$, $\eta < 1$ 。通常冲激雷达发射的脉冲波形是有一定重复率的无载频窄脉冲,其相对带宽 $> 80\%$ ^[1]。

目标的雷达截面与目标的尺寸、形状和涂覆的吸波材料密切相关,一个确定性目标的雷达散射截面与波长的关系可分为三个区域:瑞利区、谐振区和光学区^[2]。

瑞利区的突出特点是雷达散射截面正比于频率的四次方,即 $\sigma \propto \omega^4$ (2)

因此在瑞利区,目标的RCS随频率单调增大,整个目标都参与了散射过程,其形状的细节并不重要。

在光学区,目标的尺寸比雷达波长大得多,即 $\lambda < L$ 。在这个区域,累积的相互影响很小,以致一个散射体可作为各独立的散射中心的集合来处理。

当目标的尺寸与波长是同一量级时,沿目标长度上入射场的相位变化十分显著。这就是谐振区。在这个区域,雷达截面随频率的变化呈现振荡,最大值比按光学区方法计算值大许多倍。在谐振区,散射体的每一部分都会影响另外的部分,散射体上每点的场都是入射场和该物体上其余引起的散射场的叠加。散射体各部分间相互影响的总效果决定了最终的电流分布。

外形隐身是通过翼身融合等方式来减小目标的雷达截面积,不同形状、尺寸和材料的目标,其谐振频率差别很大。当用常规窄频带雷达照射目标时,若经过外形隐身的目标处于瑞利区、光学区或谐振区的极小值频率附近时,外形隐身的作用得到充分的发挥。但是对于工作在谐振区的大相对带宽雷达,同时还能通过目标谐振频率的提取进行目标识别。

材料隐身是通过在飞行器表面涂覆吸波材料来减小RCS。在目前的技术条件下,吸波材料一般都是窄频带的,而且都是针对常规雷达的频段设计的,因此它对窄频带雷达具有良好的隐身能力。然而,冲激雷达由于具有很大的带宽,其频谱包含几乎从直流到数千兆赫的带宽,因而吸波材料即使有吸收,也只是总能量的极小部分。图(1)给出了脉冲宽度与频带宽度的关系,图中分别给出了载频为 f_0 和1、2和10个正弦周期脉冲的频谱。由图可见,单个脉冲的频谱比10个周期脉冲的频谱要宽得多。因此,材料隐身

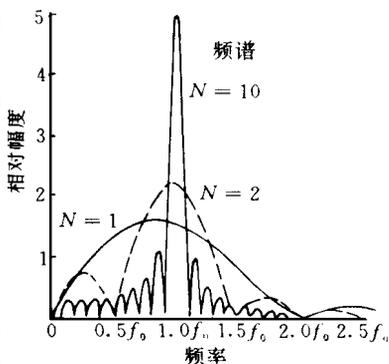


图1 具有1、2、10个正弦周期的脉冲的频谱

对冲激雷达来说,其效果必将大大减少。

2 反隐身机理的时域分析

冲激雷达发射的脉冲宽度极窄,除了包含的频谱极宽以外,它还是一种瞬态的过程。因此,在对它进行研究时,还应从瞬变电磁场和时域理论来分析考虑。经典的雷达方程是在窄频带情况下推导的,式中目标的 RCS 和其它参数的瞬态情况下需要新的定义和寻找更合理的表征参数^[3]。在瞬态情况下,吸波材料的吸收机理和电磁波散射和传播的特性也将大大不同于稳态情况。

2.1 吸波材料的驰豫时间效应

由于吸波材料的分子具有质量,并以一定的惯性旋转,因此它们不能对电磁场作出瞬时的响应。分子驰豫现象表明,由于在吸波材料中,分子对入射场的响应需要时间,故脉冲越短,传播时的衰减越小。当脉冲宽度的延尽时间比吸波材料的驰豫时间更短时,则可无衰减传播。

隐身中采用的吸波材料通常为涂覆型吸波材料。它们大部分为铁氧体的电波吸收体,铁氧体吸波材料的吸收机理是磁壁共振和磁畴旋转共振引起的电磁损耗。这就是铁氧体的驰豫现象。由于磁壁共振和磁畴旋转共振的建立需要一定的时间(T)。当一个冲激脉冲(τ)作用于吸收体时,若作用的时间极短, $\tau < T$,则在这一个时间间隔内共振没有建立起来,则吸波材料就不会吸收波的能量,因而被从其中传播而衰减很小。我们可以从铁氧体的磁滞回线来说明这一点。

具有 $\mu_r = \epsilon_r$ 的理想铁氧体吸波材料,具有相同的磁滞回线和电滞回线,如图2所示。为了说明冲激脉冲的作用,把它与有载频长脉冲作比较。当有载频电磁脉冲照射吸收材料时,吸波材料将受到磁化(或电极化)。在一个载频周期内,吸波材料中的磁场 H 和磁感 B 将沿图2(b)所示的磁滞回线绕行一周,吸波材料吸收的能量正比于回线的面积,其值设为 S_0 。对一二部 X 频段的雷达($f = 10\text{GHz}$),若脉宽为 $1\mu\text{s}$,则一个脉冲内包含了10000个载频周期,于是总损耗为10000 S_0 。当图2(a)所示的无载频电磁脉冲照射吸波材料时,情况就大不相同了。这时,磁场 H 和磁感 B 将在饱和磁感和剩余磁感所定的一个很小的磁滞回线上绕行,它的面积为 S_0 ,而且每一周期内只绕行一次。因 $S > S_0$,在一个重复周期内有载频电磁脉冲的能量损耗与无载频冲激电磁脉冲的能量损耗相比,前者的损耗要大4个量级以上。这种理想吸收材料对无载频冲激电磁脉冲几乎不起吸收作用,因而就不能降低目标在瞬态电磁波照射情况下的雷达散射截面。

物理研究表明,吸波材料的磁化强度不是对激励的瞬时响应,而是在它之后有一个延迟,材料的瞬态磁化强度 M_0 可以表示为

$$M_0 = M \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3)$$

τ 为特征驰豫时间, M 为稳态磁化强度。分析表明^[4],对于涂复型吸波材料,材料的驰豫时间与入射脉冲宽度对反射信号的影响很大。具体地说,驰豫时间对反射信号的后沿部分影响大,随着驰豫时间的减小,反射信号的能量也随之减少。材料对入射脉冲宽度的反射也有很大影响,入射脉冲宽度增大时,驰豫效应的影响增强,材料的吸收增大。此外,当入射脉冲的幅值大于 RAM 的磁饱和强度时,RAM 目标产生的非线性效应使得反射信号出现很大畸变,反射信号的能量也随之增大。

由此可以得出结果,吸波材料的驰豫时间越长,入射脉冲越窄,脉冲幅值越大,则 RAM 的吸收性能越差。

2.2 瞬态信号的先兆效应和自诱导透明性^{[5]、[6]}

冲激脉冲是一种超宽带的信号。除了 UWB 效应以外,这种信号还能提供有关它与媒质相互作用时瞬态响应的信息。因为从定性的方面看,这种瞬态效应可能会在信号幅度、频率、极化、相位和时延等方面与稳态情况不同。

早在1914年,人们就注意到与分子驰豫现象紧密相连系的信号先兆效应。这是由于分子谐振在材料

中引起折射指数急剧变化的结果。根据 Balanis 理论^[7]，一般情况下，材料的电极化率是三种不同极化模式的组合，即

$$\begin{aligned} \chi_e(\omega) &= \chi_e(\omega) - j\chi_i(\omega) \\ &= [\chi_{ed}(\omega) + \chi_{ei}(\omega) + \chi_{ee}(\omega)] \\ &\quad - j[\chi_{id}(\omega) + \chi_{ie}(\omega)] \quad (4) \end{aligned}$$

式中 $\chi_{ed}(\omega)$ 为偶极子电极化率， $\chi_{ei}(\omega)$ 为离子电极化率， $\chi_{ee}(\omega)$ 为电子的电极化率。

对于一般的色散媒质，大部分都会呈现这三种机理。图3表示了一种有代表性材料的电极化率随频率变化的函数关系。从图中可以看到，当一种分子谐振模式被激励时，电极化率就有一个急剧的变化。虚部有三个峰值，对应于材料的各种谐振，这就是材料的吸收频带。

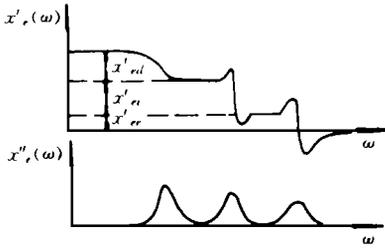


图3 典型介质的电极化率曲线

图3也表明，材料的电极化率在谐振点两边是很不相同的，正是由于这种差异，导致了非常有趣的现象。

1. 在低于谐振的频率上，材料具有通常给定的电极化率，因而它具有确定的传播速度。
2. 在谐振时，材料具有较高的折射指数，因而导致传播的速度较慢。
3. 在高于谐振的频率上，极化率变为一个低的平坦部分，这时折射指数较低，因而具有较快的传播速度。

由此而知，如果有极窄的入射脉冲，即使频谱的中心频率与材料谐振频率相近，但由于带宽比吸收频带宽得多（如图4所示），虽然透射脉冲的载波得到了衰减，但吸收带以外的谱分量仍占主导地位。

由于在谐振区的那部分信号比区域外的信号传播慢，因此带外的谱分量将比谐振区的较早到达观察者（图5），比谐振频率高的谱分量产生的瞬态信号最先到达。这就是索末菲先兆（Sommerfeld Precursor），接着到达的最低于谐振频率的谱分量信号，称为布里渊先兆（Brillouin Precursor）。最后到达的才是谐振区域的谱分量信号。

密西根大学的研究者对这一效应作了较深入的研究，得到了短脉冲传输原信号能量的百分比要大于长脉冲的结论。也就是说，从通过媒质的传输情况来看，短脉冲引发的响应不同于长脉冲，短脉冲比长脉冲传输更多的相对能量，因而能得到更多的目标信息。这对于冲激雷达反隐身的机理是特别有意义的。

除了信号先兆效应以外，在短脉冲的作用下，媒质还会呈现一种非线性效应。这就是自诱导透明性。

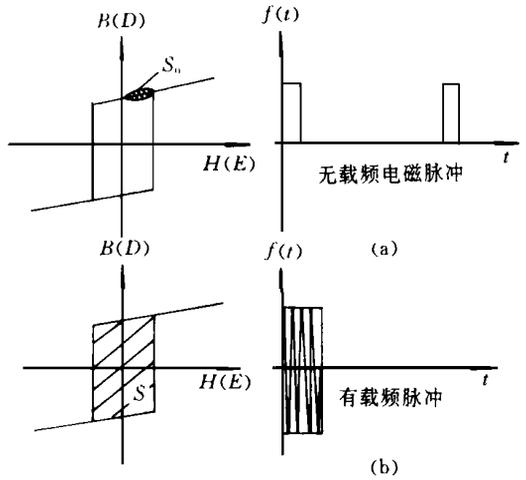


图 2
(a) 无载频电磁脉冲一个周期内的损耗为 W_0 的面积， $W_0 \ll W$ ；
(b) 有载频脉冲的损耗为 NW_0 。

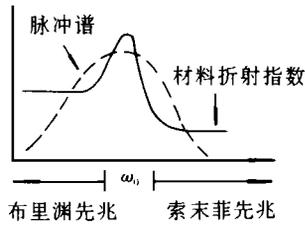


图4 入射脉冲的频谱

这种现象是由于材料具有两种状态而出现的。通常一个磁偶子矩被激励后可以进动到一个新的角度再回到原来的位置。如果一个人射脉冲具有恰到好处的能量和正确的时间把磁偶极子矩进动到一个新角度再返回,使总变化 $\theta = 2\pi$ 那么脉冲就可以完全无阻尼地通过材料传播,因为系统最后的状态与最初的状态相同,没有能量丢失。在这种情况下,脉冲包络的面积是 $2\pi n$ (n 为整数),所以这种脉冲称为 2π 脉冲。它是麦克斯韦方程无损耗解,也就是说 2π 脉冲可无损耗地通过媒质。

但要指出的是,自诱导透明性目前只在光频得到了证明,但对于某些材料,这种效应在雷达频段也可能存在。这对于冲激雷达抗 RAM 的机理研究又提供了一条新路。

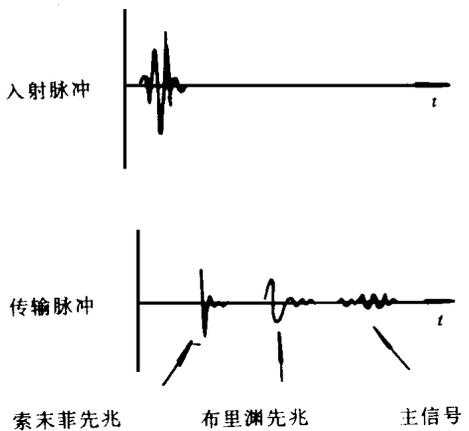


图5 信号先兆效应

2.3 瞬态电磁波的传播特性^{[8],[9]}

Maxwell 方程建立近百年来,人们对单色波或窄频带电磁波的认识已趋成熟,许多经典的分析方法和近似方法已被广泛应用。在这些分析中,人们都是采用了球面波的概念,即波的能量以 r^{-2} 速率衰减。

1983年,美国 Britingham 首次提出瞬态场中的聚焦波模(FWM)概念^[10]。这是一种三维结构的不色散电磁波。在此基础上,T. T. Wu 提出了电磁导弹的理论。这种理论表明,在总辐射能量为有限值的条件下,一个有限尺寸的辐射源所辐射的能量,在空间传播时随着距离的增加而按 $r^{-2\epsilon}$ ($0 < \epsilon < 1$) 规律衰减。因为 $\epsilon < 1$,所以它是一种比球面波平方反比律衰减慢的电磁波,且衰减可任意慢,即 ϵ 可趋于零。这时电磁波明显地具有类似于粒子的特性,但是要实现慢衰减,激励源应满足一定的波形条件。

由于电磁导弹的潜在应用价值,国内外许多科学家都对此进行研究,他们在电磁导弹波形条件,传播特性及散射规律,以及等离子体中的电磁导弹和电磁导弹实验系统等方面都取得了许多重要成果,对电磁学的新发展作出了卓越的贡献。

文献[8]分析了电磁导弹的特性,并认为电磁导弹用于雷达系统,它的慢衰减特性和不同的散射规律将改写雷达方程,使照在目标上的能量密度大幅度地提高,从而改变雷达信噪比。在电磁导弹照射下,不能用现有的吸波材料和外形隐身技术来降低目标的雷达截面。用电磁导弹作雷达信号,允许采用先进的数字编码技术和信号处理技术来进一步提高雷达检测弱信号和抗干扰的能力。因此用电磁导弹作雷达信号能全面提高雷达性能和反隐身能力。电磁导弹反隐身技术还可以与其它反隐身技术(如双/多基地雷达,星载和机载雷达等)兼容。以上表明,电磁导弹是一种有效的反隐身手段,由于电磁导弹是由窄脉冲的辐射传播时产生的,因此用冲激雷达可以达到实现这种技术的途径。

3 冲激雷达的应用前景

以上理论分析表明,冲激雷达具有许多独特的性能,具有探测隐身飞机的优势,国外和国内的对比实验结果表明^[11]:在反隐身飞机方面,冲激雷达比常规窄带雷达优 15~20 dB 左右。实现反隐身冲激雷达的关键有高效率、高增益天线,高功率脉冲发射机,超宽带高灵敏度接收机等。超宽带天线技术发展很快,目前已经研制出增益为 10~20 dB 的超宽带天线。应用激光控制的 BASS 光导开关已能产生大于 100 MW 峰功,重复频率 1 kHz 的高功率纳秒脉冲发射机。瞬时带宽 1 GHz 以下的高灵敏接收机和数字化仪已研制成功。国外报导已生产出作用距离达 25 km 的实验型冲激雷达,并能同时跟踪上百批目标。因此,冲激雷达不仅在探地等方面有广泛的应用,而且已应用于合成孔径成像,探测叶簇隐蔽的目标研究。当前已经可实现作用距离为 10~20 km 的雷达系统,可用于近程探测和制导、机载合成孔径成像、目标识别等。随着 UWB 技术的发展,UWB 雷达必将有着灿烂的明天,其实用化,将是雷达发展史上的

又一个新的程碑。

参 考 文 献

- 1 Ultra-wideband Radar, Research and Development Considerations, AD-A229882, Los Alamos National Laboratory, June, 1989
- 2 E F 克拉特著, 阮颖铮译. 雷达散射截面——预估、测量和减缩. 北京: 电子工业出版社, 1988.
- 3 Keith A shubert, George T Rucn. Canonical representation of the radar range equation in time domain, SpIE, Ultrawideband Radar, 1992. 1031: 2~12
- 4 匡纲要, UWB 雷达目标建模和信号设计, 国防科技大学博士学位论文, 1995
- 5 David L. Black. An Overview of Impulse Radar Phenomenon. IEEE, ARS system Magazine, Dece. 1992: 6~11
- 6 Terence W. Barrett. Energy Transfer & Propagation and the Dielectrics of Materials: Transient Versus Steady State Effects, UWB Radar: Proce of Frist Los Alamos symp, 1991: 1~19
- 7 Balanis, Constantine. Advanced Engineering Electromagnetics, John wiley & Sons, Inc (New York), 1989
- 8 阮成礼, 林为干. 电磁导弹与反隐身技术, 现代雷达, 1992, (3): 36~40
- 9 T. T. Wu. Electromagnetic missiles. J Appl Phys 1985, 57 (7): 2370
- 10 J N. Brittingham. J Appl Phys 1983: 54: 1179
- 11 何建国, 陆仲良, 粟毅. 涂覆目标的超宽雷达特性的实验研究. 宇航学报, 1993, (2)

(责任编辑 潘生)