

超宽带冲击雷达与反隐形技术

赵尚弘¹, 杨晓铁², 谢小平¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学 科研部, 陕西 西安 710068)

摘要: 综述了当前国外飞机隐形技术的发展状况,分析了超宽带冲击雷达的主要特点和在反隐形技术上的应用研究状况。

关键词: 隐形;超宽带雷达;反隐形;光导开关

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2000)02-0082-04

近年来,一些军事强国如美国等发展了非常有效的飞机隐形技术,如F-117A隐形攻击战斗机、B-2隐形战略轰炸机、F-22先进技术战斗机等都在飞机外形设计、机体材料方面作了极其科学的考虑,大大缩小了飞机的雷达截面(RCS),使之具备了出色的隐形效果。可以说,隐形技术已对现有雷达技术构成了严重的挑战,当前的大部分防空系统都很难有效的对付隐形飞机。为此,研制反隐形新型雷达就成为雷达技术领域一个十分迫切的课题,这已引起世界各军事强国的普遍关注。本文拟就目前隐形技术和反隐形雷达研究方面的进展状况作一评述。

1 国外隐形技术的发展状况

隐形技术主要包括无源隐形技术和有源隐形技术两大类。所谓无源隐形技术就是根据任何目标上波的反射和吸收规律,在目标上采用吸波材料和透波材料,以吸收和减弱对方侦察系统的雷达回波能量;还可根据波反射规律,改变武器装备的外形和结构,使目标的反射波偏离对方探测系统的作用范围,从而使对方的各种探测系统不能发现或发现概率大大降低。有源隐形技术就是设置新的波源,发射各种波束(如电磁波、声波等)来迷惑、干扰或抵消对方探测系统的工作波束,以达到隐蔽己方目标的目的。例如施放光弹或电子干扰波使对方的光电探测系统迷惑,施放电子干扰诱饵使对方的探测系统跟踪假目标等。这类技术靠加强而不是减弱目标的可探测信号来达到目标隐形的目的。目前人们所说的隐形技术主要指无源隐形技术。具体包括隐形外形技术和隐形材料技术。

(1)隐形外形技术 为了达到隐形的目的,隐形飞机在总体外形上摒弃了一般飞机的常规设计方案,消除了机身与机翼之间、水平尾翼与垂直尾翼之间、飞机与发动机悬挂舱及武器吊舱、副油箱之间形成的近于90°的角,而采用了多面、多锥体和飞翼式布置及燕尾形设计,把机身与机翼融为一体。此外还通过内置发动机和油箱等措施将机身的突出部位减少到最低程度,使整个隐形飞机形成一种平滑的过渡,外表平滑利落,以消除角反射效应。

(2)隐形材料技术 实现隐形的关键是机体的外形设计,隐形材料的使用仅能使飞机的RCS降低10%左右。但是,若对外形过于苛刻要求,势必以气动性能的降低为代价,反倒减弱了飞机的作战能力。而在飞机关键部位合理使用吸波涂层材料,既对原设计改动不大,又可以收到满意的隐形效果。因此,隐形材料技术的发展和成为隐形技术发展的重要支撑技术。被称为“黑色喷气机”的F-117A机体表面几乎全部涂覆了黑色的雷达吸波材料。B-2轰炸机将近900m²的机体表面有95%涂覆了一种具有不同厚度的韧性隐形涂层。

隐形材料吸波或透波的原理是:由于普通窄带雷达发射的雷达波一般总处于微波的某一波段,当特定频

率的雷达波入射到相应材料表面时,材料产生电导损耗、高频介质损耗和磁损耗等,使电磁能转化为热能而散发;或使雷达波能量分散到目标的各个部位,减少雷达接收天线上反射的电磁能;或采用合适的材料厚度,使雷达波在材料表面的反射波和进入材料后与底层的反射波叠加发生相消干涉,起到减弱反射波的作用。有些材料不仅可起透波作用,还可起偏振作用。隐形材料又按其使用方法分为涂料型和结构型。

涂料型材料用以涂覆在飞机表面。目前广泛使用的隐形吸波涂料是铁氧体、羰基铁、金属丝超细粉末组成的涂料等,可以起到吸波、透波和偏振等作用。近年来国际上在改进传统涂料性能的基础上有了很多新的突破,出现了一些性能卓越的新材料,并且工艺简单,只需采用改进的喷枪就可以在飞机任何部位(机头、尾翼以及铆钉、接缝等处)实施喷涂,特别适合对老飞机的隐形改装。

结构型隐形材料用以制造机体外壳和构件,是隐形材料的重要组成部分。它一般是以非金属为基体(如环氧树脂和热塑性材料等),以铁氧体、石墨等为填充吸波材料,形成既能减弱电磁波的反射强度,又能承受一定荷载的结构型复合材料。

关于近来引起高度关注的等离子体技术则是另一种全新的隐形术。超宽带冲击雷达主要是针对上述无源隐形技术。

2 超宽带冲击雷达

2.1 超宽带冲击雷达的特点

隐形目标多半用吸波材料涂层构成,并且有光滑的轮廓,这样可以减少雷达横截面积。这种用吸波材料构成的“隐形”目标一般只对很窄的一个波段适合。而常规窄带雷达正是由于所发射的雷达波频带窄,特定的吸波材料即可大大减弱雷达回波,因此无法有效探测雷达截面很小的隐形飞机。而超宽带冲击雷达发射的脉冲包含了丰富的频率,因此在冲击雷达面前,“隐形”目标的窄带吸波涂层就失去了作用。另外,弱反射面目标一般将表面设计成扁平形,边缘十分薄,这样对普通雷达波可以形成共振吸收,以减弱它的反射强度。但遇到超宽带雷达波时却仅能产生很小的共振,而有比普通雷达波强得多的反射波。总之,对于那些即使未镀隐形涂层但有较小雷达截面的目标,例如巡航导弹、海洋巡舰等,超宽带雷达都有很大的潜能。

尽管超宽带雷达已经研究了快 20 年,但是研究者们却很少研制出成功的实际系统^[1,2]。最大的问题就是如何进行高能量的高速转化,即在很短的瞬间发射很高的能量。近年来,随着光导开关的出现,特别是 fs($1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$)激光选通的快速光导开关技术的成熟,人们可以产生脉宽在 ps($1\text{ps}=10^{-12}\text{s}$)级的电磁辐射,拥有从接近直流到数 THz($1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$)的超宽频带。再加之高速 A/D 变换技术、高速信号处理能力等方面的突破,使得超宽带雷达的实用化研究具备了基本条件。

光导开关的基本原理是:当用超短激光脉冲照射直流偏置的半导体开关材料(常用的如 GaAs)时,这种材料能在 ps 级的时间范围内迅速的由高电阻变到低电阻,从而可以让瞬态电流通过。这种电流能够产生上升和持续时间都非常短的电磁脉冲,这种电磁脉冲正是冲击雷达系统必不可少的。图 1,2 是超短激光脉冲选通光导开关产生的其双极脉冲形状和频谱分布^[3]。

图 3 是典型的实验超宽带冲击雷达框图。超宽带冲击雷达发射系统由调制器、超短脉冲激光器、光导开关、直流偏置和超宽带电磁脉冲发射器组成,该系统向自由空间发射一种脉宽为 ps 级的脉冲,它有很高的峰值功率和有几乎接近直流到 THz 的频谱。常规方法很难不改变波束性质将频谱如此宽的信号从光导开关耦

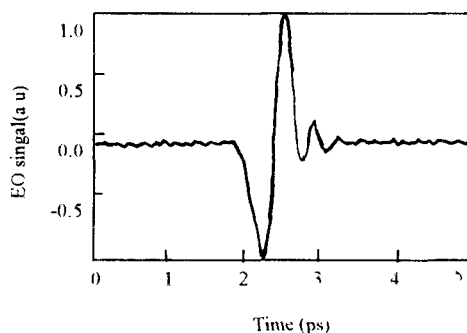


图 1 THz 电磁脉冲波形

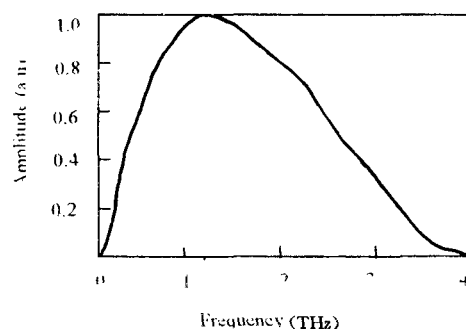


图 2 THz 脉冲的超宽带频谱

合到天线上并发射出去,为此在发射系统中要将发射天线(基本偶极子天线)与光导开关设计成一体化以便高效发射超宽带信号。对 f_s 激光的调制编码可采用伪随机码编码技术。因为脉冲宽度越窄,允许的码位就越长,其自相关峰就越高,这就可以大大提高雷达检测弱信号(例如低 RCS 的隐形目标)的能力和抗电磁干扰能力,而普通窄带雷达就很难作到。正是由于脉冲极窄,即使发射的信号平均功率不很高,但峰值功率却很高。例如,发射平均功率 50mW,脉冲重复率 1kHz,脉宽 1ps,则峰值功率可达 50MW。这同时使超宽带冲击雷达的作用距离足以满足中程雷达要求。接收系统由接收天线、数字信号处理系统以及显示终端组成。其中接收天线与发射天线结构相同。

超宽带冲击雷达研究中重点要解决三个方面的问题:(1)超宽带脉冲源方面,提高脉冲升速度,提高超宽带信号强度;(2)天线方面,提高天线发射效率,(3)超宽带信号的处理技术。解决好这三个方面的问题将会为超宽带雷达的实用化取得重要突破。

与常规窄带雷达相比,超宽带冲击雷达的优点还在于:

(1)冲击雷达的空间分辨率可达 cm 级。因为雷达的空间分辨率与雷达脉冲宽度成正比, $d = \tau c / 2$, d 是最小分辨率, τ 是脉宽。脉宽为 100ps 级时对应于 1.5cm 的分辨率。所以超宽带雷达可以用来区分真假弹头。虽然假目标可以设计得与真实弹头有相同的弹道特性和雷达信号特征,但其物理尺寸要小得多,并且在空间上处于不同位置。用于跟踪这类目标的普通远程雷达不具备区分真假弹头的高空间分辨率,而超宽带雷达就可以实现。

(2)超宽带信号对树叶、地面和墙壁等障碍物有更强的穿透能力。国外商用的冲击雷达已经用来很好地定位一些较细的目标如地下管、洞、混凝土钢筋等,对地质分界面、危险性垃圾,湖泊和冰川的轮廓也可以准确的成像。事实上,这种雷达曾用来探测到在几年前坠入美国 Potomac 河的一架飞机的尾部。根据 Los Alamos 的研究表明,超宽带雷达所拥有的远程、高能量对透过树林、地表探测掩藏在它们后面的运输工具、火炮设施、地堡和矿藏等来说是最有价值的。并且对那些移动目标,例如巡航导弹、导弹发射架、坦克、卡车等的探测,脉冲雷达也非常有效。

(3)借助于距离选通技术而获得抗杂波、降低多路干涉能力。冲击雷达在探测杂波背景中的目标方面比扩频雷达更具优势。

(4)超短程探测能力。普通的正弦波雷达在探测近程目标时存在有较大的问题。主要因为距离太短,当目标的反射信号到达接收器时,发射信号脉冲还正进行。假如用扩谱技术来提高距离分辨率,只能使情况更加恶化。而发射短脉冲冲击雷达所具有的探测盲区与其距离分辨率相当,因而能很好的解决这个问题。脉冲雷达的这种短距离探测能力可以在导弹的引火、太空飞行器的回收、干扰源的探测、空中编队飞行中的相互位置保持以及防撞系统等各个方面得到运用。

(5)冲击雷达很难被拦截和跟踪。拦截普通雷达波的接收装置不可能探测到宽带的冲击雷达信号。一般雷达的反跟踪(例如在雷达发射器的传输部位固定一个导弹),只能依赖一种或者另一种的多种信号射、接方式来完成,而脉冲雷达却不用改变它的操作模式,因为它发射的这种脉冲信号看起来好像都是拦截信号,以至让对手无法跟踪。

(6)冲击雷达在电子对抗(ECM)方面有很强的抗干扰能力。对普通窄带雷达,只要将能量集中在它对应的波段上,就可很容易阻塞雷达。但是这种干扰效果常常取决于干扰信号的“增益带宽积”。根据研究,冲击技术可以用更宽的频率范围发射更多能量,并且在跳频的实现上也比普通雷达快得多。即使对手正对它的某一个频段上用很高的能量进行干扰,但冲击雷达的超宽带极大地减少了整个雷达信号被阻塞的几率。因为超宽带雷达发射的脉冲极短,允许很长的码位,利用自相关特性可以滤出干扰信号。

2.2 国外研究状况

美国 Texas 大学的研究者示范了一个 8 阵列的光导开关天线组成的超宽带雷达实验系统^[4]。在雷达天

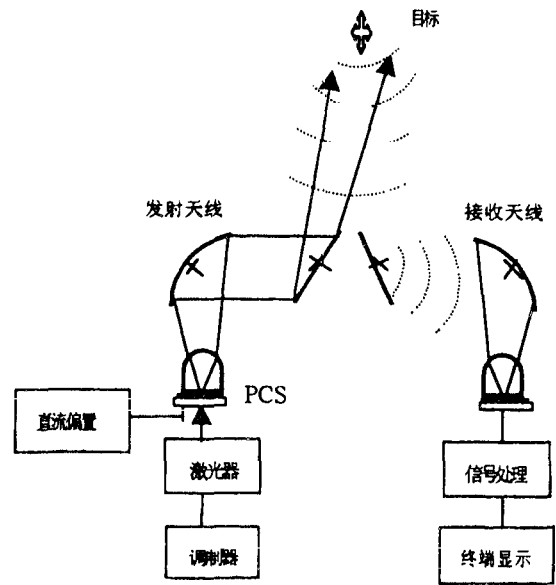


图3 超宽带冲击雷达系统示意图

线前几米处的探测器测得这种发射脉冲的周期为 400ps, 峰值功率达 800kW, 传输效率达 65%, (而普通雷达的传输效率仅有 30%), 雷达效率 51%, 整个系统效率为 33%。不久之后, Sandia 国家实验室研究出一种新型开关材料, 将选通光导开关所需的激光能量减少近 1000 倍。这些成果进一步提高了冲击雷达的效率。

基于 Texas 大学的研究成果, 美国一家公司的研究者们充分结合实验和理论研究成果研制了一套计算机脉冲雷达模型。这套模型被工业界和政界看好, 认为这种雷达是脉冲领域最好的, 至少在民用领域是这样的。它模拟了目前军事中实际问题, 即低空飞行、低反射面截面和雨天情况下图象模糊的目标探测问题, 极好地证明了冲击雷达的潜能。这种雷达模型透过 2-in./hr. 的暴雨幕, 成功地探测到了 11 海里(1 海里=1853.2m)远、离地 4 英尺高度处、直径约为 1 英寸的光滑铁球。科学家们都很有信心地认为, 如果在这方投入必要的研究, 在不久的将来, 这套模型很有可能代替实际的雷达系统。根据这家公司的研究机构说, 另一家较小的脉冲实验室已经证实了这种雷达可以探测到几百英尺外的 1.5 英寸的目标。这种发射机的平均功率是 15mW, 发射脉冲的峰值功率大约是 10kW, 甚至可以探测到几百英尺外一个人的手指的移动。

脉冲技术在雷达、通信、电子战运用方面的巨大潜能已经引起各国政府和国防部的高度重视。一些机构在这方面已经有了分类产品和专利产品。另外, 美国几家公司正在组建一个有关冲击雷达技术方面的图书馆, 以便让脉冲技术的价值得到更好的运用。其中有一家公司在 Texas 大学的协助下正在进行这方面的研究。几年前, Texas 大学和这家小公司签约, 利用 Los Alamos 的光导开关技术建立了一个脉冲雷达工作实验室模型, 并且证实了这种技术产生能量非常高的短脉冲。在进行的探测一个仅 8 英寸大小的微凹球状物时, 一个研究者说: “我们能够看见那个球上的每一道凹痕。”^[5]这也充分证明了脉冲雷达的 cm 级的分辨能力。

资料表明, 俄罗斯在超宽带冲击雷达技术方面也已经具有相当先进的水平。这已引起美国政府的高度重视, 促使他们加大了在这方面研究力度。正如一个美国研究者所说: “我们迫切需要大力提高雷达技术在识别和确认敌方目标方面的能力, 超宽带冲击雷达也许将引起雷达技术一场新的革命。”目前的主要研究课题是怎样实现能量、速度和带宽之间的最佳组合, 研制高速光导开关技术, 高度重视脉冲雷达在电子战中的运用, 从而也加快了宽带技术的发展。宽带信号相关技术方面的极大潜能以及超宽带雷达技术在军事上的应用正在受到越来越全面的重视, 增强在探测隐形目标、低损大气传播、对真假目标的精细分辨和低空目标分辨等这些领域的研究就变得十分迫切。

致谢: 作者感谢中科院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室陈国夫研究员、赵卫研究员的有益讨论, 感谢美国 Rensselaer 大学超快光电子学 & THz 成像实验室 X. -C. Zhang 教授的网上交流。

参 考 文 献

- [1] 阮成礼. 电磁导弹概论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1994. 215.
- [2] R. A. Cheville, D. Grischowsky. Time domain terahertz impulse ranging studies[J]. Appl. Phys. Lett., 1995, 67(14): 1960~1962.
- [3] Q. Wu, M. Litz, X. -C. Zhang. Broadband detection capability of ZnTe electro-optic field detectors[J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 68(21): 2924~2926
- [4] W. B. Scott, L. Calif. UWB radar has potential to detect stealth aircraft[J]. Aviation Week & Space Technology, 1989, (4): 38~41.
- [5] D. A., Fulghum. New radars peel veil from hidden targets[J]. Aviation Week & Space Technology, 1999, (18): 58~60.

Ultra-Wideband Impulse Radar and Counter-Stealth Technology

ZHAO Shang-hong¹, YANG Xiao-tie², XIE Xiao-ping¹

(1. The Telecommunication Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710077, China; 2. Dept. of Science Research, AFEU., Xi'an 710068, China)

Abstract: The advances in stealth-aircraft technology overseas are reviewed in detail. The principal features of ultra-wideband impulse radar and its important applications in counter-stealth systems are also investigated.

Key words: stealth; ultra-wideband impulse radar; counter-stealth; photoconductive switch