

基于目标 RCS 特性的有源对消隐身分析

曲长文，向迎春

(海军航空工程学院电子信息工程系，山东烟台 264001)

摘要：有源对消隐身是现代隐身技术发展的一个重要方向，它能在传统隐身的基础上进一步降低受保护目标被雷达发现的概率。基于目标的雷达散射截面(RCS)特性，介绍了有源对消隐身的基本原理，讨论了幅值和相位误差对隐身效果的影响，分析了对消波(场)的辐射特性，并对实现有源对消隐身所需的关键技术进行了讨论。结果表明有源对消隐身技术理论上可行，工程难度较大，应用前景广阔。

关键词：雷达隐身；有源对消；对消波(场)；雷达截面减缩

中图分类号：TN957； TJ765.5 文献标识码：A 文章编号：1672-2337(2010)02-0109-04

Active Cancellation Stealth Analysis Based on RCS Characteristic of Target

QU Chang-wen, XIANG Ying-chun

(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Active cancellation stealth is an important research direction in the field of stealth nowadays. Based on traditional stealth, the radar detection probability of the target to be protected could be reduced further by active cancellation stealth. Based on RCS characteristic of target, the basic theory of active cancellation stealth is introduced. The influences of amplitude and phase errors on stealth are discussed. Then the radiation characteristic of cancellation wave is analyzed, and the key technologies of active cancellation stealth are also discussed. The analysis indicates that the technology of active cancellation stealth is feasible in theory and difficult in engineering, but also has a bright future in application.

Key words: radar stealth; active cancellation; cancellation wave(field); radar cross section reduction(RCSR)

1 引言

伴随着现代战争对高性能隐身武器的需求，在传统的隐身外形、隐身材料、隐身结构等技术研究基础之上，美、俄、英、法等军事强国都在不断探索新的隐身机理，对消隐身技术就是其中之一。对消技术分无源对消和有源对消两种。无源对消技术又称自适应阻抗加载技术，它是在被保护目标表面开槽或孔，设置分布或集中复数阻抗以改变蒙皮表面的电流分布，形成辐射源并在远区产生一个附加散射场。在某些方向和频率范围内，附加散射场和目标本身散射场反向叠加，使合成散射场减小^[1]。这项技术只适合于产生某种频率，因而实用性有限^[2]。有源对消隐身技术则是在舰艇等目标上装备有源对消电子设备，利用相参信号的干涉效应，产生适合对消的电磁波，采用相干

手段使目标散射场和人为引入的辐射场在敌方雷达探测方向相干对消，在雷达接收天线处与目标真实回波相抵消，从而减弱雷达接收到的目标真实回波，达到隐身的效果。有源对消是一种灵巧的信号消隐方式，因而实现信号消隐的难点在于实时准确获得待消信号的参数。同时人为引入的对消场，其幅度和相位的精确控制对对消效果至关重要，这又对生成对消场的电子设备提出了较高的要求。随着工程上数字阵列技术的发展，高精度的信号幅相控制^[3]成为可能，为有源对消隐身系统从理论走向实际应用奠定了基础。

2 有源对消隐身原理

2.1 有源对消基本原理

同两列声波叠加会产生相加和相消性干涉，

从而使声能得到增强或减弱的效果一样。电磁波也具有这样的特点,但是同有源消声技术相比,有源电磁对消技术的难点在于:待消声源的特性已知,而有源隐身目标的反射特性未知,且难以测试;声音的传播速度比雷达信号慢得多,后者为光速,因此消声系统的自适应闭环工作方式难以在有源对消隐身中应用;消声主要应用于一维方式或很小的空间区域(如飞机座舱局部等),而有源对消隐身则包含了空间环境的很大的立体角范围^[4]。它在三维空间通过自适应的实时有源电磁波控制系统产生隐身波实现有源电磁波对消。

目标对电磁波的反射基于目标表面感应电流的二次辐射。根据电磁逆散射理论,若已知源的辐射场分布,反过来又可以得到散射体的特性和场源分布。而从目标对雷达的隐身看,往往只需雷达所在的一个小的立体角范围内实现电磁波对消,此时也只需给出这一特定区域的远区电磁场数值即可。雷达反射截面(RCS)就是对目标在一定方向上反射的功率与入射的功率密度进行归一化处理后得出的度量。它表征目标表面感应电流的远区辐射场,其数学表示式为^[5]

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{r \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi r} \frac{E_s \cdot e_r}{E_i} e^{-jkr} \quad (1)$$

式中, $\sqrt{\sigma}$ 为目标 RCS 的复数平方根; e_r 为极化方向; k 为自由空间波数; E_s 和 E_i 分别为回到接收点的反射电场矢量和入射电场矢量; r 为目标离雷达的距离。可见,只要通过有源或无源的手段,降低投照到目标的信号强度,则从目标散射回雷达的信号强度相应地更弱了,从而减小了 RCS。或者只降低目标散射回波也可以达到雷达散射截面缩减(RCSR)的目的。

从理论上讲,目标在不同方向的 RCS 数值可以精确地测到,而瞬态的雷达入射场也可以通过平台上的传感器精确测到。这样根据式(1)的定义,目标在雷达方向上的散射场就确定了,即

$$E_s = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{E_i \cdot \sqrt{\sigma} \cdot e_r}{2\sqrt{\pi r}} e^{jkr} \quad (2)$$

在雷达方向与散射场相干但相位相反的场总是可以产生出来的,因此,有源电磁波对消在理论上是成立的。实际有源隐身效果将取决于雷达信号参数测量精度和对消辐射源参数的控制精度以及实时性等。

2.2 对消波(场)辐射特性

目标等效的反射源和人为引入的对消源(可能不止一个)的辐射特性与基本电偶极子在自由空间的辐射特性相似。为简化分析,考虑一个有限长的电偶极子辐射单元,如图 1 所示,它在 P 点的辐射特性与目标在雷达方向的反射特性相似。P 点合成场的归一化振幅为^[6]

$$E(\theta) = \frac{\cos(\frac{kl}{2} \cos\theta) - \cos \frac{kl}{2}}{\sin\theta} \quad (3)$$

式中, k 为自由空间的传播常数,且 $k = 2\pi/\lambda$; l 为图中 AB 之间的距离。在有源对消时 l 相当于等效散射中心和对消源之间的距离。

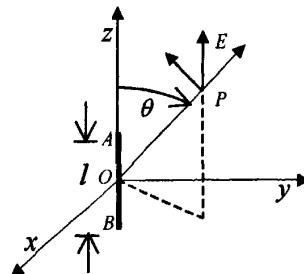


图 1 自由空间电偶极子示意图

图 2 为直角坐标下的 $l/\lambda = 1.5$ 时按 θ 角的变化而绘出的波瓣特性。从图 2 可知,反射波和对消波的合成场是两个矢量的空间叠加的结果,是一个多瓣的方向图。在最小方向两个矢量反相相加,所有最小点为零。瓣数随着 l/λ 的增加而增多,而零点出现的位置由 $\sin\theta = 0$ 给出。

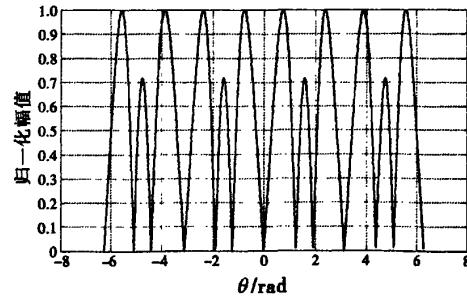


图 2 自由空间电偶极子辐射波瓣图

对消隐身的目的是让反射波(场)和入射波(场)合成后的方向图零点对准雷达,并不是实现全空间的目标散射场抵消,在某些方向上散射波的强度可能得到了加强。因此,对消源尽量保证

有宽主瓣、低副瓣的辐射图,并让主瓣对准雷达方向。当对消源和雷达方向等效的反射中心重合,对消的结果是在雷达方向实现了零电磁波图,而不改变目标原来的散射场分布^[4]。对消源和反射中心的间距增加将导致波瓣数增多、雷达方向辐射图零点所对应的立体角减小,不利于在大的空间范围实现隐身。

2.3 对消波的幅相条件及误差分析

2.3.1 对消幅相条件

对于复杂目标可被分解为 N 个离散散射体或散射中心的组合,其 σ 取决于各散射中心的散射截面积的相关和^[3]:

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} e^{j\varphi_n} \right|^2 \quad (4)$$

式中, σ_n 为第 n 个散射中心的复数 RCS; φ_n 为该散射中心的相对相位。在众多的散射中心中,对于特定的工作频率和入射角,一般存在着若干起主要作用的散射中心。集中减缩主要散射中心对散射所做的贡献,可有效地实现 RCSR。人为引入与主要散射中心相对应的对消源是有源对消的出发点。目标平台上的传感器将入射雷达波的参数送入控制系统,自适应地产生并在所需方向发射一系列合适的相干波,改变目标的散射分布,有效地降低雷达方向的散射功率密度。

设目标原有的雷达截面积为 σ_0 ; 人为通过有源方式引入一个等效的散射中心,其等效散射截面积为 σ_1 ; 它们的相位分别为 φ_0 和 φ_1 , 叠加后的目标散射截面积 σ 为

$$\sigma = |\sqrt{\sigma_0} e^{j\varphi_0} + \sqrt{\sigma_1} e^{j\varphi_1}|^2 \quad (5)$$

$$\text{即 } \sigma = \sigma_0 \left| 1 + \frac{\sigma_1}{\sigma_0} + 2\sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma_0}} \cos(\varphi_1 - \varphi_0) \right| \quad (6)$$

对其作归一化处理,且令 $\sigma' = \sigma_1/\sigma_0$, 则上式变为

$$\bar{\sigma} = |1 + \sigma' + 2\sqrt{\sigma'} \cos(\varphi_1 - \varphi_0)| \quad (7)$$

控制 σ_1 和 φ_1 , 就可能进行寻优,以实现最佳对消效果。当达到最佳对消参数:

$$\begin{aligned} \sigma' &= 1 \\ \varphi_1 - \varphi_0 &= (2k+1)\pi \end{aligned} \quad (8)$$

时 $\bar{\sigma} = 0$, 即在雷达方向上有效地实现了雷达隐身。但实际中往往做不到完全隐身,这是因为对消波的实际相位与幅值同式(8)的最佳条件相比是有误差的。下面考虑相位差和幅值差对隐身效果的影响。

2.3.2 相位差对隐身效果的影响

在假设 $\sigma' = 1$ 下, 设对消波的相位偏离最佳相位的误差为 $\Delta\varphi$, 由式(8)可得

$$\begin{aligned} \sigma' &= 1 \\ \Delta\varphi &= \varphi_1 - \varphi_0 - (2k+1)\pi \end{aligned} \quad (9)$$

归一化雷达截面 $\bar{\sigma}$ 随相位差的变化关系为

$$\bar{\sigma} = 4 \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (10)$$

归一化雷达截面(NRCS) $\bar{\sigma}$ 随相位差的变化曲线如图 3 所示。

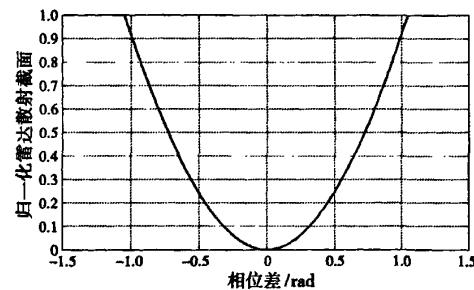


图 3 仅存在相位差时的归一化雷达截面

从图 3 中可以看出,当相位偏离最佳相位超过 60° 后,不但没有达到隐身反而加强了目标的散射特性,失去了隐身作用。这说明有源对消隐身对相位误差的要求不能超过 60° 。

2.3.3 幅值差对隐身效果的影响

当相位满足条件 $\varphi_1 - \varphi_0 = (2k+1)\pi$, 幅值相对最佳幅值参数存在误差 $\Delta\sigma = \alpha\sigma_0$ 时, 显然 $\sigma' = 1 + \alpha$ 。归一化雷达截面 $\bar{\sigma}$ 随幅值差的变化关系为

$$\bar{\sigma} = (1 - \sqrt{1 + \alpha})^2 \quad (11)$$

相应地, 归一化雷达截面 $\bar{\sigma}$ 随幅值差的变化曲线如图 4 所示。从图中可以看出有源对消隐身对幅值误差的敏感度比对相位误差的敏感度小得多。当 $\alpha = -1$ 时, 目标的反射特性没有发生改变, 这也就是没有引入人为辐射场的情况, 相当于没有采取有源对消隐身措施。当 $-1 < \alpha < 3$ 时, 目标的反射特性被减弱, 幅值差只要在这个区间内变化都对受保护目标有一定的隐身效果。当 $\alpha = 3$ 时, 虽然采用了有源对消隐身措施且相位也满足最佳条件, 但由于幅值误差太大相当于没有采用对消隐身措施。当 $\alpha > 3$ 时, 幅值误差的影响使得目标的散射特性被加强了。

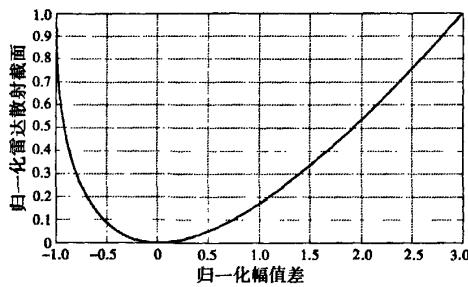


图 4 仅存在幅值差时的归一化雷达截面

若相位与幅值同时存在误差时，则归一化雷达截面 σ 随相位与幅值误差的变化关系为

$$\sigma = |2 + \alpha + 2\sqrt{1+\alpha} \cos(\Delta\varphi)| \quad (12)$$

则相位与幅值同时存在误差时，归一化雷达截面 σ 随相位与幅值误差的变化曲面如图 5 所示。

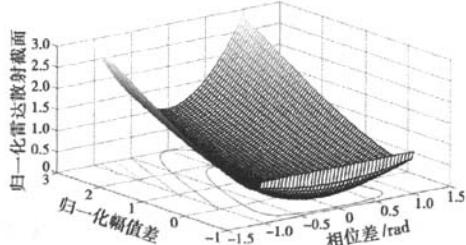


图 5 相位差和幅值差同时存在时的归一化雷达截面

从图 5 中可以看出，当相位与幅值相对最佳条件都有变化时，要对被保护目标达到一定的隐身效果，则相位与幅值差偏离最佳条件的范围被进一步地缩小，而对相位的要求就更苛刻。在图中底部顶点处幅值和相位均为最佳条件，此时雷达截面积为 0，实现了完全隐身。

2.4 对消结构

对消隐身的工作过程如图 6 所示。平台上的侦收系统快速、准确地测量出入射雷达波的频率、相位、幅度、波形、极化形式和雷达的空间位置等，在计算机信息处理系统的控制下从目标散射数据库中提取出在该雷达波照射下平台的反射特性，从而通过计算机信息处理系统实时地自动产生具有合适强度、频率相位、极化和波形的附加电磁辐射，利用相干波的干涉效应，在雷达接收天线处抵消目标原有的回波，达到隐身目的。这种隐身实际上是自适应的电磁波对消。

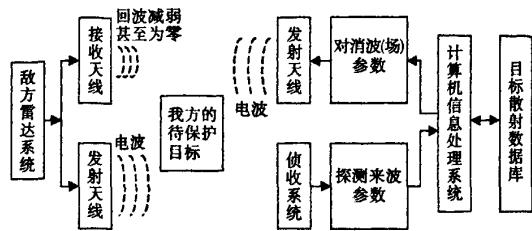


图 6 有源对消隐身结构框图

3 有源对消隐身的关键技术

3.1 雷达来波信号参数的实时测定

当前工程上的雷达来波信号参数测量方法在精度上与实现有源对消隐身的要求还有差距，提高这些参数的测量精度是有效进行有源对消隐身的关键技术。为了有效地控制目标的信息特征，必须详尽地研究目标的信息特征，因此进一步发展目标信息特征测量技术，提高测量精度是实现有源对消隐身的重要条件。

3.2 被保护目标的全向 RCS 的计算

准确计算目标的 RCS 后，再利用式(2)可以得到相应的目标散射场。在复杂目标 RCS 计算领域，西方军事强国处于技术领先地位，已开发出一批用于复杂目标 RCS 分析计算的软件包。我国也有几种版本的 RCS 计算软件，用它们计算复杂目标的 RCS 有一定的可信度。但对实现对消隐身的要求来说，其计算功能和精度还是不理想，这是严重制约隐身和反隐身技术发展的一个障碍。在当前一个时期内，如何实现精确快速求解复杂目标的电磁散射问题是有源对消隐身研究的一个重要方面。

3.3 对消波(场)的精确控制技术

对幅度的控制，一种办法是通过改变有源对消隐身系统的发射功率^[4,8]，另一种办法是用相控阵技术实现对消波的幅度控制，对相位的控制则采用零平衡技术^[9]。对消波(场)除了进一步提高幅度和相位的控制精度外，还需要解决它的自适应开环控制和对对消延时的测量和控制以保证实时性的实现。对实时性的要求一般可以通过建立目标散射数据库来满足，但如何建立一个高效准确的目标散射数据库又是一个困难问题。

(下转第 118 页)

- [11] Yu M C. Research on New Methods of Parameters Estimation and Signal Simulation for SAR[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.

作者简介:



赵军 男,1980年生,清华大学电子工程系硕士研究生,主要研究方向为SAR运动目标处理、SAR应用。
E-mail:zhaojun07@mails.tsinghua.edu.cn

许稼 男,1974年生,清华大学电子工程系博士后、副教授,主要研究方向为雷达及水声领域的目标检测、估计和识别、仿真模拟、合成孔径/逆合成孔径成像,目前已经在《IEEE Trans on GRS》、《IEEE Trans on AES》、《IEEE SPL》、《IET Proceeding of RSN》、《Electronic Letter》、《Sig-

(上接第112页)

3.4 隐身效果表征与评估

只要引入对消波(场)后目标散射有减缩效果,就在一定程度上“隐身”了。但是如何确定一个指标或阈值使减缩达到或低于这一阈值时就能实现完全隐身或至少部分隐身是亟待解决的问题。这一指标或阈值可以是探测雷达识别目标所需的最小功率流密度的绝对量是相对量。

4 结束语

美国在20世纪90年代就开始了秘密的激烈讨论和研究,其B-2隐身轰炸机上的ZSR-63防御辅助电子设备就采用了有源对消隐身技术,并且还计划在2025年采用有源隐身技术实现卫星隐身。1995年以来,国内一些研究机构对有源对消隐身技术在理论上已有一定的研究,而在工程技术实现上未见相关报道。有源对消隐身是一项总体技术,虽然当今的技术环境已具备了突破的基本条件,但由于国外在隐身技术领域的研究高度保密,一些关键技术的实现难度依然很大,它的工程应用或许还需要更长的时间。

参考文献:

- [1] 曲长文. 反雷达隐身和雷达反隐身技术[J]. 电子工程, 1997(4):6-11.
[2] 匡兴华, 钟华. 隐身技术与隐身对抗[J]. 国防科技参

考 Processing》、《中国科学》等国内外刊物及学术会议发表论文近100篇,SCI、EI、ISTP检索60余篇。

夏斌 男,1985生,清华大学电子工程系博士研究生,主要研究方向为SAR运动目标处理、实时雷达信号处理。

杨健 男,1965年生,清华大学电子工程系教授、博士生导师,主要研究方向为极化雷达及SAR应用,在最优极化、相对最优极化与杂波抑制、目标分解、目标特征的提取与目标识别、极化SAR图像处理、阵列信号处理等方面取得了一系列研究成果,先后在国内外发表论文100余篇,其中有20余篇论文被SCI收录,40篇被EI收录。

彭应宁 男,1939年生,清华大学电子工程系教授、博士生导师,长期从事雷达信号处理领域的研究,已发表学术论文近300余篇,其中被SCI、EI和ISTP收录的论文200多篇,出版专著4部,并获10多项国家级和部委级科技进步奖。

考, 1996, 17(1):31-48.

- [3] 吴曼青. 数字阵列雷达的发展与构想[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(6):401-405.
WU Man-qing. Development and Future Design of Digital Array Radar[J]. Radar Science and Technology, 2008, 6(6):401-405. (in Chinese)
[4] 邓扬建, 张杰儒. 雷达有源隐身技术研究[J]. 电子对抗技术, 1997(4):11-17.
[5] Knott E F. Radar Cross Section[M]. Dedham, MA: Artech House, 1985.
[6] 埃德米尼斯特尔. 工程电磁场基础[M]. 雷银照, 吴静,译. 北京:科学出版社, 2002.
[7] Knott E F. RCSR Guidelines Handbook[R]. Atlanta, Georgia, Engineering Experiment Station, Georgia Institute of Technology, 1976.
[8] 吴晓葆, 陈图强, 洪光启. 雷达有源隐身技术研究[J]. 电子对抗, 1995(4):38-48.
[9] 梁百川. 有源隐身技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2004, 27(1):3-6.

作者简介:



曲长文 男,1963年生于山东济南,海军航空工程学院电子信息工程系教授、博士生导师,主要研究方向为信号处理、SAR成像和电子对抗,在国内外学术刊物和会议上发表论文近100余篇,其中SCI、EI、ISTP检索40余篇,出版学术专著1部。

向迎春 男,1985年12月生,四川达州人,海军航空工程学院硕士生,主要研究方向为电子对抗情报保护与隐身。E-mail:xycasy@163.com

雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>