

雷达天线系统隐身方法研究

朱华邦，邵兵，朱璐

(92941部队，辽宁葫芦岛，125001)

摘要：以飞行器为载体的雷达天线系统隐身，是飞行器隐身研究的一项重要课题，文中从时域、空域、带外及正交极化、带内同极化四个方面探讨了雷达天线系统隐身的基本原理。

关键词：雷达天线；RCS；隐身

中图分类号：TN 952

文献标识码：A

0 引言

以飞行器为载体的雷达天线系统通常在飞行器的鼻锥方向产生很强的 RCS 贡献。一个典型的战术导弹在 X 波段水平极化入射时，在其鼻锥区域的末制导雷达卡塞格伦天线的 RCS 高达 10dB 左右。对于脉冲多普勒雷达常用的平板裂缝天线阵，其 RCS 可高达 30dB 以上^[1]。因此降低天线系统的 RCS 成为目标隐身技术中一个重要的关键技术课题。但是，由于天线系统自身工作特点所限制，它必须保证自身雷达波的正常接收和发射，因此常规的隐身措施（如低 RCS 外形设计、雷达吸波材料技术等）不可能简单地在天线隐身中获得应用。既要求雷达天线系统只辐射和接收己方雷达波，又不反射和散射敌方雷达波，这实际上是很难解决的一对矛盾。这就使雷达天线系统隐身成为飞行器隐身技术中难以解决的关键问题，即使在国外也还没有找到一种既可显著降低天线 RCS，又完全不影响雷达天线的工作功能的完全理想的途径。目前只能从实际要求出发，在一定的时域、空域和频域范围内，尽量缓和或回避这种矛盾，形成在一定限制条件下的天线系统隐身途径。

1 天线系统的时域隐身

对于机载或弹载雷达，通常并不要求在飞行的全过程处于开机状态。例如弹载末制导雷达，大多在接近目标时才启动雷达，而在相当长的平飞时间内，导弹最容易受到敌方雷达的截获与跟踪。利用这个特点，可以在雷达不工作时，设法将天线隐蔽起来，在雷达开机前将天线复原正常状态。

国外隐身飞机上早已采用了这种天线伪装技术。

例如在天线不工作时将天线指向旋转 90°，使其最大散射方向偏离飞行器头部区域；或者将天线完全收进机体，使敌方雷达波无法照射到天线。此外，也可在天线外面加装一个可拆卸的低 RCS 屏蔽罩，在雷达开机前自动去除。图 1 a)、b) 分别表示导弹的 RCS 实测方向图及加天线伪装罩的 RCS 实测方向图。

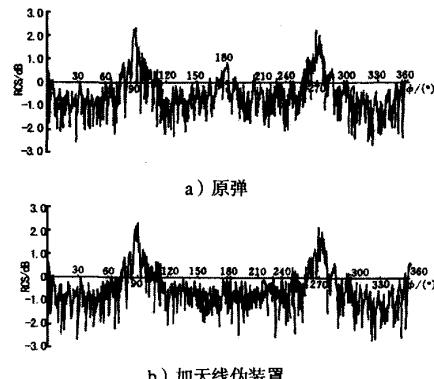


图 1 导弹的 RCS 实测方向图 (X 波段，水平极化)

由图 1 b) 可见，在整个导弹鼻锥区域内回波显著减少，其峰值 RCS 降低。如果对伪装罩中心区域（反射波源）及边缘（绕射波源）实施局部涂覆吸波材料后，其 RCS 还可再降低 8~10dB，如图 2 中的 a)、b) 所示。

天线系统伪装技术的突出优点是简单可行，隐身效果显著。当天线系统复原后，隐身附加装置可完全不影响原天线的工作性能。此外，屏蔽式伪装罩还有宽频带、多极化和宽入射角范围的隐身效果。这种隐身途径的缺点是雷达开机时就完全失去了隐身能力。

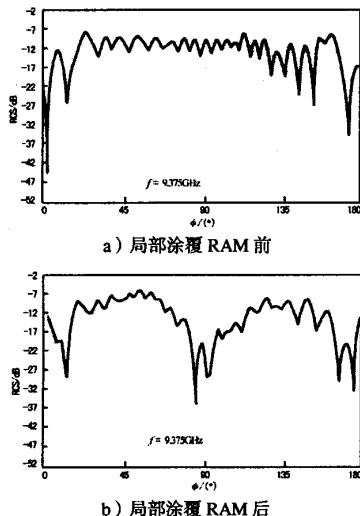


图 2 金属伪装罩 RCS 的实测值

2 天线系统空域隐身

利用斜射式行波天线阵可将雷达天线的最大辐射方向保持在飞行器鼻锥方向，但其结构项散射 σ_s 的峰值（通常在天线阵面法线方向）可移到飞行器鼻锥区域外，模式项散射 σ_e 的峰值（鼻锥方向）则可通过良好的匹配技术来减少。可由下式表达^[2]：

$$\sigma_e = G^2 \mu^2 \Gamma^2 \lambda^2 / 4\pi,$$

式中： G 为散射天线的增益系数； μ 为散射天线与收发天线之间的极化匹配因子； Γ 为散射天线负载失配时的电压反射系数； λ 为电磁波波长。

当馈源反射系数降低到 0.1 时，模式项 RCS 可减少 20dB（见表 1）。因此这种天线阵能实现在鼻锥区域内隐身。

表 1 天线模式项 RCS 与馈源反射系数的关系

反射系数	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\frac{\sigma_e(\Gamma)}{\sigma_e(\Gamma=1)}$	-20.0	-13.98	-10.46	-7.96	-6.02
反射系数	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\frac{\sigma_e(\Gamma)}{\sigma_e(\Gamma=1)}$	-4.44	-3.10	-1.94	-0.92	0

行波阵列的形式可采用波导裂缝阵，也可采用微带天线阵。一种简单的 13 单元梳齿形微带行波阵的实验结果表明，这种天线在鼻锥区域内的 RCS 可比阵面法向 RCS 减少 20dB 以上，只要将天线法向移出鼻锥区域，便可获得一定空域内较为有效的隐身效果。这种天线隐身途径的优点是天线设计简单，隐身效果显著；缺点是鼻锥区域以外不能隐身，并且在天线馈源驻波带宽以外由于模式项 σ_e 增大也不能隐身。此外，这种天线在用于飞行器雷达时，还应解决体积、结构、单脉冲馈电等一系列技术问题。

万方数据

3 天线系统带外隐身和正交极化隐身

当敌我双方雷达处于不同工作频段时，可利用频率选择表面（FSS）来实现对带外威胁雷达的隐身。例如，利用带通型 FSS 可做成选频滤波天线罩，在我方雷达工作频带内具有很好的透波性能（功率传输系数接近于 1），不影响天线收发正常工作；而在该频带以外，滤波天线罩等效为一个全反射金属罩，利用其流线形表面的低 RCS 特性，将威胁雷达波散射到各个方向去而不照射到天线上。

利用带阻型 FSS 可做成选频滤波反射面天线，它在己方雷达频带内具有良好的反射特性（反射系数接近于 1），保证反射面在天线工作频率内正常工作，但在带外，这种表面具有很好的透波性能，因而对威胁雷达波不产生强烈的结构项和模式项散射，而透过 FSS 反射面的雷达波则可利用装在其后的雷达吸波材料加以吸收，达到减少带外 RCS 的目的。

天线系统极化隐身原理与带外隐身相类似，它利用了极化选择表面（PSS）对不同极化波的滤波特性，当敌我双方雷达波极化方向正交时，亦可达到较好的隐身效果，大约 10dB 左右。此外，也可通过特殊的 FSS+PSS 设计，使之同时兼有带外隐身和正交极化隐身的双重效果。

这种天线隐身途径的特点不需增加或改动结构，只需用 FSS 或 PSS 替代原有的天线罩或反射面，因此特别适合改善现有的或正在研制的雷达天线隐身性。它的缺点是对同频率、同极化的威胁雷达波无能为力。

4 天线系统带内同极化隐身

在天线工作频带内对相同极化的威胁雷达波要实现隐身特性是件极其困难的任务。此时虽然模式项散射 σ_e 会因为带内的良好匹配而降低，但结构项 σ_s 则会因为天线的谐振而加大。由于 σ_s 与天线结构形式和材料有关，因此对不同的天线应采取不同的隐身措施。

对于反射面天线，在较窄的工作频带内可利用阻抗加载对消技术来实现隐身。图 3 表示直径为 27cm 的卡塞格伦天线在馈源中加可调短路活塞（改变模式项的相位）后，对同频同极化波实测的单站 RCS 曲线。由图 3 可见，加载对消可使天线的总 RCS 降低约 10dB。除了馈源加载对消外，这种双反射面天线还可采用副面加载与正面散射对消，或正面边缘绕射与镜面反射对消，亦可获得 3~5dB 的天线隐身效果。此外，采用优化参数的椭圆面代替传统的抛物面，能使其轴向峰值 RCS 降低 20dB 以上，此时通过修改副面和馈源，仍可获得聚焦良好的辐射方向图。

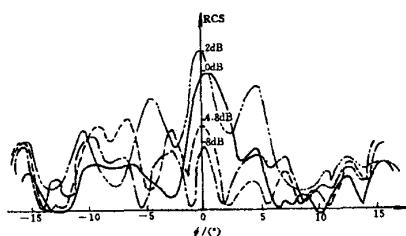


图 3 不同加载位置时, 卡塞格伦天线 RCS 的实测结果

对于平板裂缝阵列天线, 其结构项 RCS 可高达 20~30dB, 在平板上涂覆吸波材料虽然可以降低其 RCS, 但由于破坏了裂缝天线的辐射环境, 天线增益也同时下降, 天线系统的 RCS 系数 K_σ 并不会因此而获得改善。一种可能的替代方案是将裂缝辐射单元改为端射式行波介质棒天线。由于电磁波在介质棒表面上的反射较小, 同时介质棒上相距 $\lambda_g/4$ 的两段微分长度上的位移电流在轴线方向上的散射可以互相抵消, 因此这种单元的结构项 σ_s 将显著减少。此外, 由于有介质棒的引导, 在介质棒阵面后可使用吸波材料而不影响天线辐射, 因而可进一步降低金属平板表面引起的 σ_s , 而不致于降低天线增益。与相同增益的平板裂缝阵比较, 这种介质棒天线阵可降低 RCS 约 9dB。这种天线的特点是纵向尺寸略大于平板裂缝阵, 但在毫米波或较短的厘米波频段, 这个缺点可得到缓解。

降低阵列天线 RCS 的另一途径是将阵列表面由平面结构修改成曲面结构, 以便直接与飞行器表面共形。这种共形曲面阵上各单元的散射场相位各异, 因而可以互相抵消或部分抵消, 使其 σ_s 能显著降低。为了保证所需要的辐射方向图, 这种阵列通常要采用自适应相控扫描的工作方式, 形成飞行器表面的“智能蒙皮”, 因此这种天线在阵列设计、结构复杂性和经费负担等方面会带来一系列困难。

微带天线阵是一种更易于与飞行器表面共形的隐身天线, 它具有尺寸小、剖面低、重量轻、成本低且易于广角扫描等优点。为了减小微带天线的 RCS, 可

采用多种方法。第一种方法为电阻性加载, 可以在微带贴片边缘集总式加载, 也可利用条带进行分布式加载。加载后天线 RCS 可减少 5~10dB。另一种方法是利用变容二极管进行电抗性集总加载^[3]。改变二极管偏压可改变天线效率和增益, 从而控制微带天线的 RCS, 可获得 10dB 的隐身效果。第三种方法是利用铁氧体覆盖层加载, 由于铁氧体材料加上偏置磁场后具有明显的非互易特性, 因此对天线辐射和散射特性可有不同的影响, 从而实现在天线增益仅下降 1dB 的情况下获得天线 RCS 减缩 7dB 的隐身效果。

5 结束语

科学技术的最新成就推动了军事隐身技术的不断发展。这就对各种防御探测系统和防御武器系统提出了严峻的挑战。隐身技术给当今军事带来的冲击波使人们逐渐意识到, 21 世纪战场的主要武器装备, 将普遍采用隐身技术, 并成为提高武器装备突防能力和进攻能力的重要途径。作为武器系统平台上主要反射体的雷达天线, 将产生很强的 RCS 贡献, 因此是隐身技术研究的一个难点, 也是我们必须研究的一项重要课题。加强对雷达天线的隐身方法研究, 将对整个武器平台的隐身研究产生重要影响。

参考文献:

- [1] 钟华, 李自力. 隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999:83-86
- [2] 林冒禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002:602-612
- [3] [美]Merrill I Skolnik. 雷达手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003:188-194

Radar Antenna System Concealment Method Investigation

ZHU Hua-bang, SHAO Bing, ZHU Lu

(The 92941st Unit of PLA, Huludao, Liaoning, 125001)

Abstract: Aircraft as carrier of Radar antenna system concealment is an important lesson of Radar antenna system concealment investigation. The paper discusses the basic principle of the radar antenna system from four aspect, which space, time, outside of frequency bandwidth uprightness polarization and inside of frequency bandwidth same polarization.

Key words: radar antenna; RCS; concealment

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

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，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>