

一种机载C波段天线RCS减缩设计

张耀中, 陈旭, 孔鹏, 朱军

中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西 西安

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月22日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

提出了一种减缩机载C波段微带天线雷达散射截面(RCS)的设计, 该方法基于对微带天线散射来源的分析, 给出一种贴片修型及减缩贴片面积的设计思路。在常规矩形贴片天线的基础上, 运用该思路设计了一种优化后的单元贴片。通过对比该天线与常规矩形贴片天线的区别, 探究了减缩贴片面积减少散射设计思路的可行性。使用该方法后, 在L-Ku频段范围内, 在 $\varphi = -30^\circ \sim 30^\circ$ 角域范围内的RCS平均值缩减了接近10 dB, 验证了该设计方法的有效性。

关键词

RCS减缩, 微带天线, 散射

A Kind of RCS Reduction Design on Airborne C-Band Antenna

Yaozhong Zhang, Xu Chen, Peng Kong, Jun Zhu

The 20th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an Shaanxi

Received: May 29, 2026; accepted: June 22, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

A design method is proposed to reduce the Radar Cross Section (RCS) of airborne C-band microstrip antennas. Based on an analysis of the scattering sources of microstrip antennas, this design concept focuses on patten modification and area reduction. Building on a conventional rectangular patch antenna, this concept is used to design an optimized unit patch. By comparing the differences between this antenna and the conventional rectangular patch antenna, the feasibility of the scattering reduction design approach based on patch area reduction is investigated. With this method, the average RCS value in the $\varphi = -30^\circ$ to 30° angular range is reduced by nearly 10 dB across the L-Ku band, verifying the effectiveness of the proposed design method.

Keywords

RCS Reduction, Microstrip Antenna, Scattering

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代装备的不断发展,隐身技术成为飞行器设计的重要指标,是提高飞行器的生存、突防能力,尤其是纵深打击能力的有效手段[1],因此现代航空器对雷达隐身提出了较高要求。雷达隐身目的是降低装备被雷达等探测设备发现的可能性,雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)是表征装备识别特性的基本参数。除航空器自身襟翼、进气道等结构性散射源外[2],天线因自身的辐射和强散射特性也对整机散射有较大贡献,因此在不明显影响天线正常辐射性能的基础上缩减机载天线的 RCS 对雷达隐身航空器有重大意义。

针对天线的 RCS 减缩研究,目前已有一些对应的解决思路,如通过改变极化方式或频率选择的超表面[3] [4]、加载雷达吸波材料吸收入射波[5]、通过相位调整实现的无源对消[6]和有源对消[7]等技术路径都能够有效缩减机载天线的 RCS。

2. 理论分析

雷达截面(Radar Cross Section, RCS)也称为雷达散射截面积,是衡量目标对特定方向入射波散射电磁功率强弱的物理量,目标雷达散射截面定义式如下:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|\bar{E}^s|^2}{|\bar{E}^i|^2}$$

式中 σ 为目标雷达散射截面, \bar{E}^s 为散射电场, \bar{E}^i 为平面入射电场。由于典型目标的 RCS 通常跨度较大,为使用方便,对其取对数:

$$\sigma_{dBsm} = 10 \lg \sigma$$

当雷达散射截面相对于平面入射电场值较小时,表现出更低的截获可能性,对于雷达隐身类产品来说,雷达散射截面积越低,雷达隐身性能越好。

天线作为一种特殊的辐射体,总的散射包括结构项散射和模式项散射两部分。

天线的模式项散射主要由于负载和天线失配导致的,部分进入天线接收的能量经过反射会产生二次辐射,这种由二次辐射产生的散射场表现为天线的模式项散射。天线的结构项散射是天线辐射被完全吸收(即天线完全匹配为负载时),仅由天线结构产生的散射场,分析这部分散射场时,天线的散射机理与普通散射体一致。

针对天线的模式项散射,主要可以通过两种方法进行控制:① 使接收机负载与传输线尽量匹配,当天线与传输线尽量匹配时,天线的反射系数接近于 0,其反射电场也趋近于 0。② 控制终端接收场,使入射波的极化与天线的极化模式正交,或通过控制天线方向图的形状,将辐射区域控制至辐射角域外的方式,都可以有效降低天线的模式项散射。

针对天线的结构项散射，一般主要从瑞利散射、谐振散射和光学散射三方面进行控制。瑞利散射通常指的是入射波长远大于目标尺寸的散射，目标的主要散射来源受自身结构尺寸影响较大，细节基本上不会产生大幅影响。谐振散射是与天线结构尺寸相当的散射，天线的各部分散射的强度和相位都不再相同，因此谐振散射不仅受天线外形尺寸的影响，也受天线结构之间相互关系的影响。光学散射指入射波长远远小于天线尺寸的散射，在高频散射时，散射体各部分直接的影响很小，各个部件自身可以视为相互独立的散射体单独分析，对各个部件散射场求和，可以得到目标的总散射场。

微带天线因其尺寸小、重量轻、剖面低、易于加工等优点在机载共形隐身天线的设计过程中有相对较多的优势。微带天线的二次辐射场及结构项散射场的场源均为微带天线贴片上的感应电流。控制微带天线贴片表面电流分布是实现微带天线 RCS 减缩的有效方法。在微带天线贴片表面开槽，可以改变贴片表面感应电流的分布，进而改变天线的散射场，从而使天线在某些频段的 RCS 得到减缩。

本文提出一种新的贴片结构，通过对贴片天线单元辐射电流较弱的部分进行开槽，减弱贴片的表面感应电流。这种方法可以缩减天线尺寸的同时减少天线的谐振散射，从而实现较宽频段下威胁角域($-30^\circ < \theta < 30^\circ$)的 RCS 缩减。

3. 一种 C 波段天线 RCS 缩减设计

首先设计一种常规的 C 波段贴片天线进行研究，如图 1 所示，在 HFSS 中建立常规 C 波段矩形贴片模型，优化天线相关尺寸参数，得到其辐射性能仿真结果如图 2 所示。

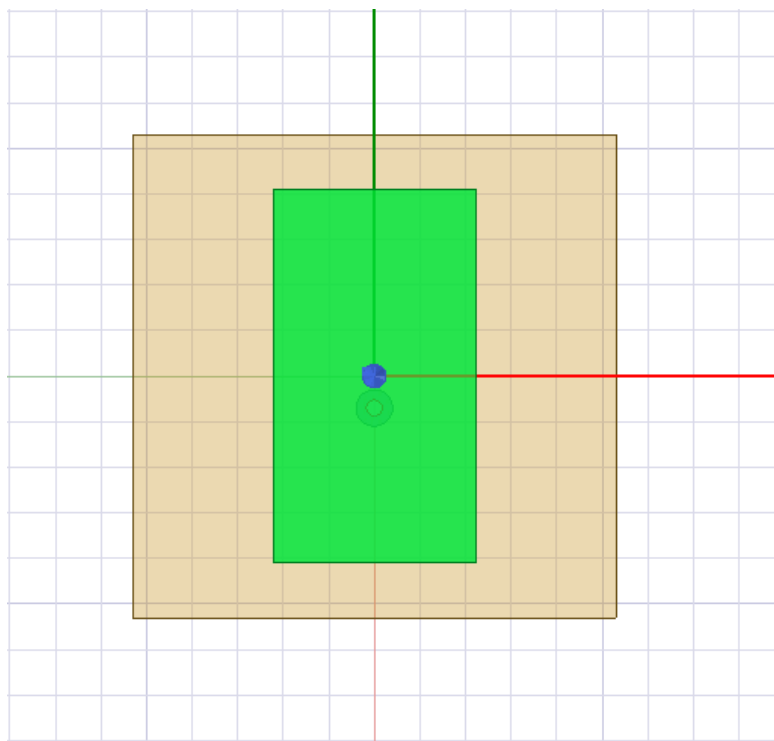


Figure 1. Conventional C-band rectangular patch model

图 1. 常规 C 波段矩形贴片模型

由图 2 可知，在谐振频率，天线匹配良好，电压驻波比为 1.08，天线能够实现全向辐射，且在有效的工作频段和俯仰角为 $30^\circ \sim 120^\circ$ 、方位角为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 的角域范围内天线增益 ≥ 0 dBi。

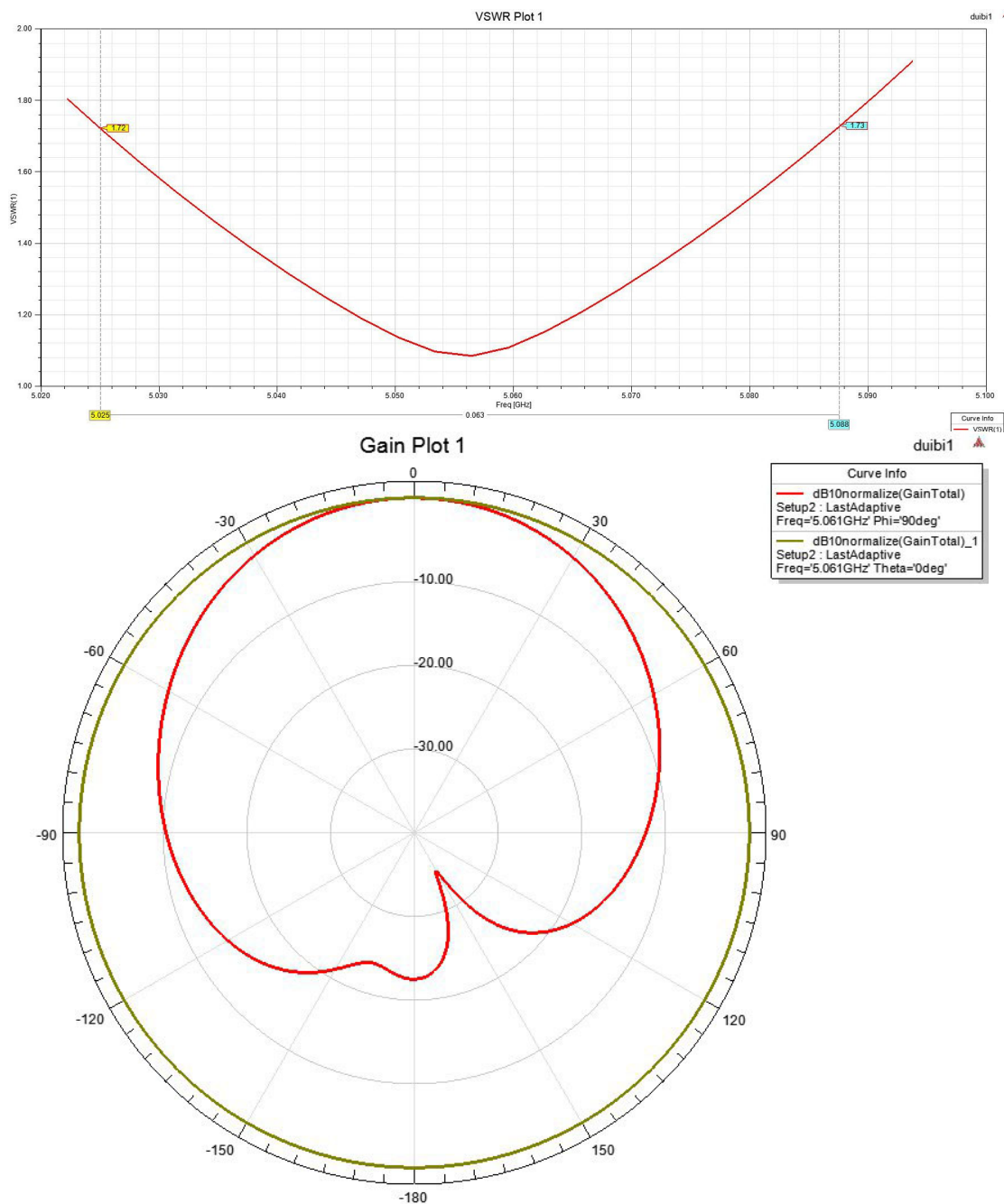


Figure 2. Simulation results of conventional C-band rectangular patch unit

图 2. 常规 C 波段矩形贴片单元仿真结果

对参考天线进行分析, 当入射波由 $\varphi = -30^\circ \sim 30^\circ$ (前向威胁角域) 掠入天线表面时, 在印制板表面会产生结构项散射, 同时矩形贴片自身尺寸对 C 波段入射波也会产生谐振散射。针对上述情况, 需对印制板基层进行修型, 同时调整天线单元。首先, 在不改变天线单元朝向的基础上, 使印制板斜向面对威胁角域, 减少散射。

通过对常规矩形贴片的研究发现, 平面波入射情况下, 感应电流在贴片上的分布并不均匀, 从分布情况来看, 贴片边缘部分的感应电流较强, 贴片中央部分的电流稍弱, 如图 3 所示。

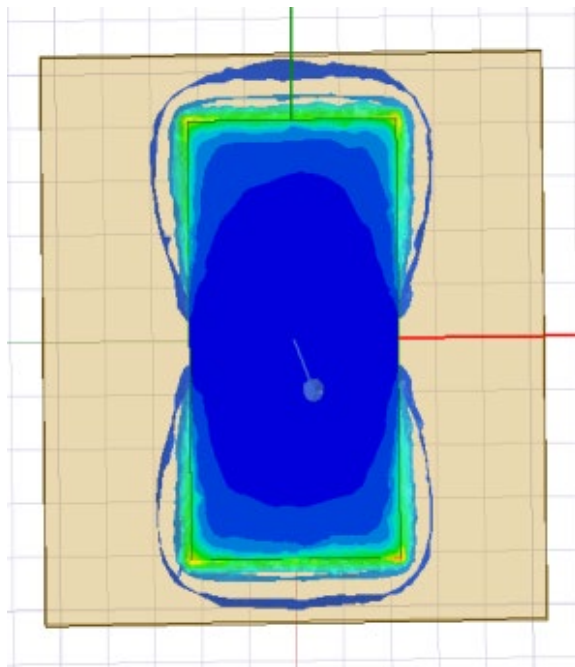


Figure 3. Current distribution of conventional patch unit
图 3. 常规贴片单元电流分布情况

通过对感应电流的分析，对贴片边缘部分进行修型，如图 4 所示，将贴片边缘部分作内凹修型，使辐射电流产生更长的路径，同时削弱边缘部分表面电流。

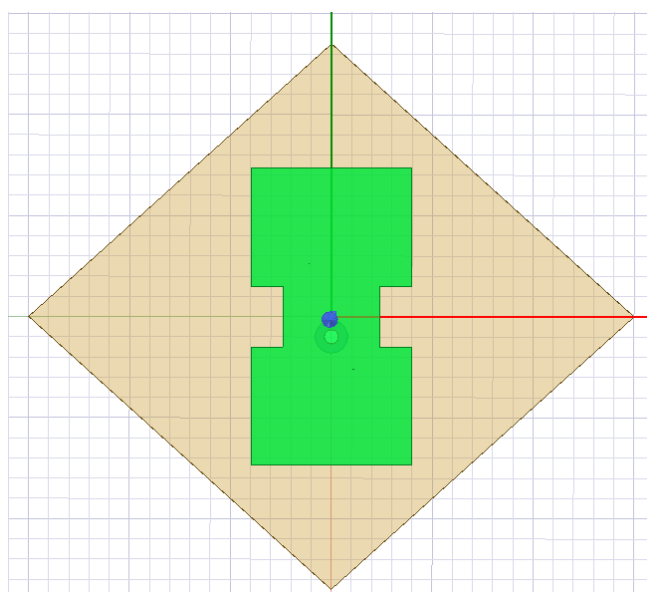


Figure 4. C-band antenna element with RCS reduction (Type A)
图 4. 一种 RCS 减缩的 C 波段天线单元(Type A)

同时为进一步缩减贴片 RCS，如图 5 所示，对贴片辐射电流分布较弱的区域进行开槽处理，开槽处贴片的感应电流分布有限，但仍能对 RCS 减缩起一定效果，是贴片修型的有效补充。

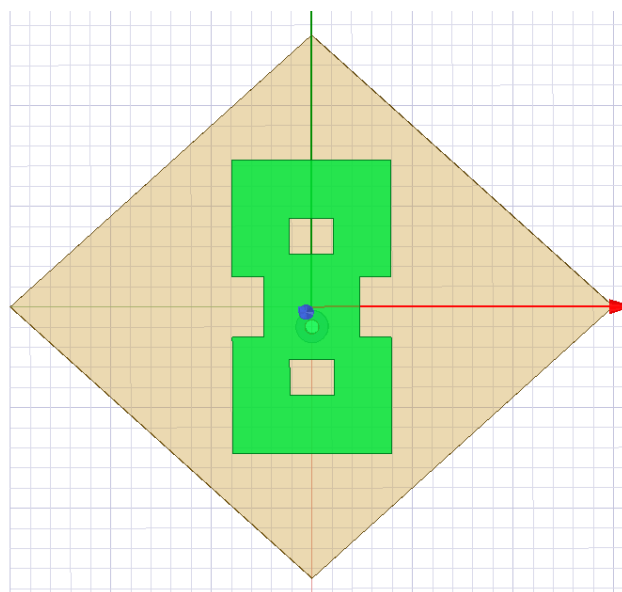


Figure 5. C-band antenna element with RCS reduction (Type B)
图 5. 一种 RCS 减缩的 C 波段天线单元(Type B)

如图 6 所示, 优化后单元电流产生了更长的路径, 单元长度相比矩形贴片减少了 1.1 mm, 且中部的开槽进一步减少了贴片单元的谐振散射。

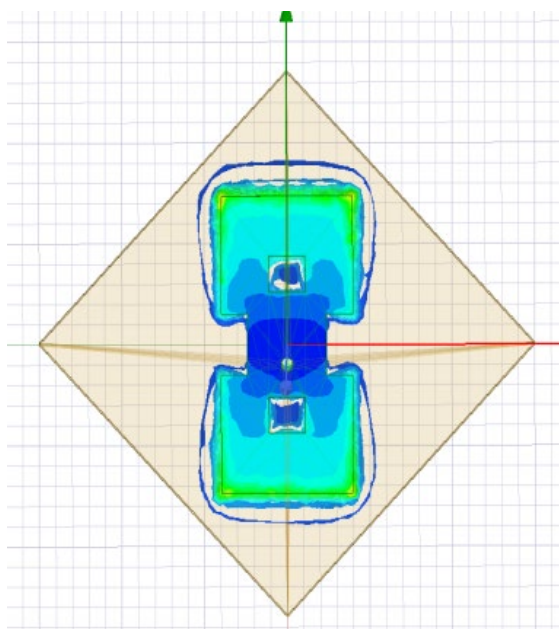


Figure 6. Current distribution of optimized patch (Type B)
图 6. 优化后贴片单元(Type B)电流分布情况

由图 7 可知, 在谐振频率天线仍能够完成良好的匹配, 电压驻波比为 1.03, 天线能够实现全向辐射, 且在有效的工作频带和俯仰角为 $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 、方位角为 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的角域范围内天线增益 ≥ 0 dBi。全向辐射且覆盖范围能够达到常规 C 波段矩形贴片同等水平。

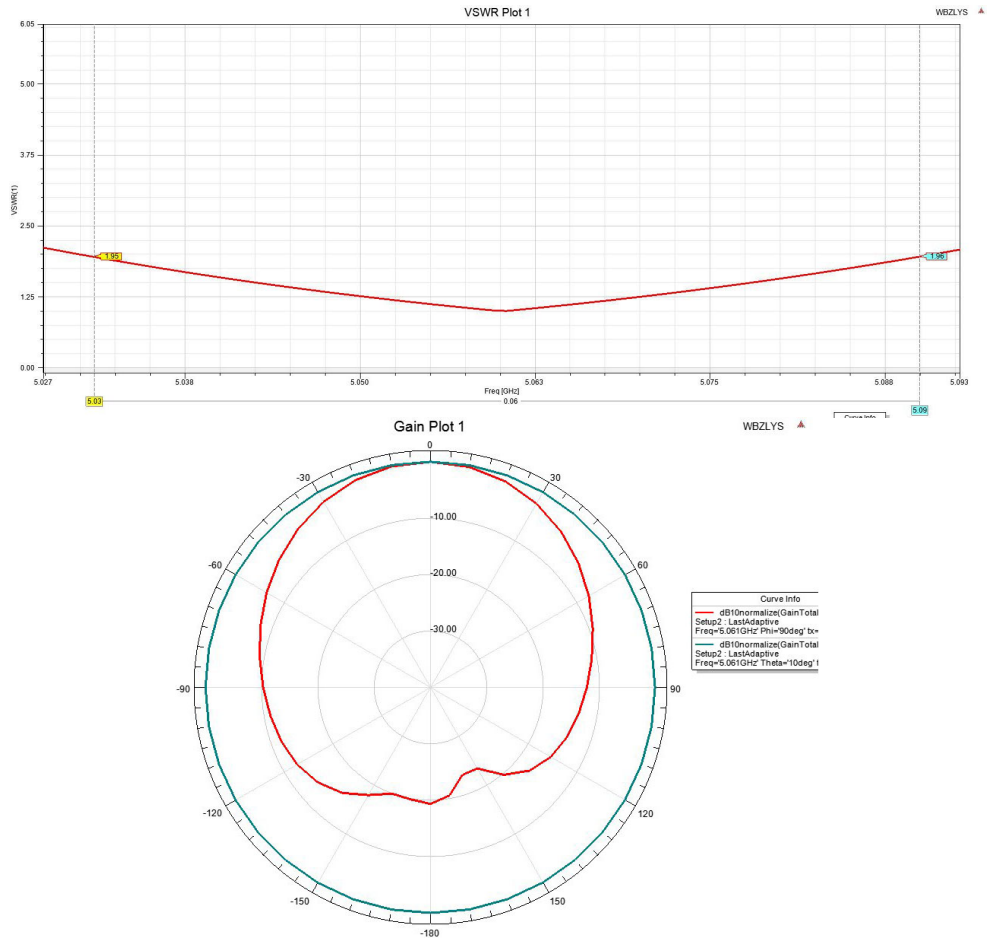


Figure 7. Simulation results of optimized patch (Type B)
图 7. 优化后贴片单元(Type B)仿真结果

如图 8 所示, RCS 减缩后的天线在 L~ku 频段各频率范围内的单站 RCS 均值均在 -30 dBsm 以下, 部分频段均值可以达到 -45 dBsm, 相比矩形贴片单元下降了 10 dB 左右, 具有良好的 RCS 减缩效果。

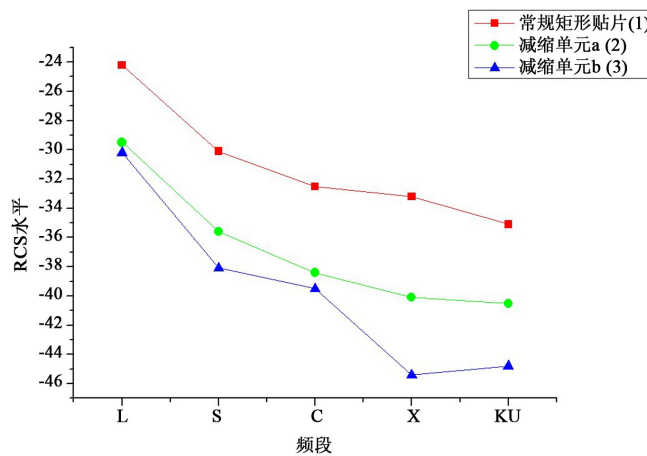


Figure 8. RCS comparison of three types of patches
图 8. 三种类型贴片 RCS 水平对比

4. 结语

本文基于微带天线的特点,对微带贴片的散射来源进行分析,针对不同散射来源提出一种可以降低天线 RCS 的优化设计。在保证原辐射特性的基础上,印制板修型和贴片单元优化后的微带天线实现了明显的 RCS 减缩效果。仿真结果表面,与常规矩形贴片天线相比,优化后的设计可以实现威胁角域内单站 RCS 平均值有效缩减,缩减水平接近 10 dB,与开二阶边缘槽[8]的单元贴片缩减设计相比,在更广频域范围内实现了相对更高的缩减量。后续将进一步研究实物制造时的吸波涂料加载和结构修型。本文的设计思路可以应用到 C 波段导航、通信天线的 RCS 缩减设计中。

参考文献

- [1] 刘文一,刘鹏,刘荣丰. 飞行器隐身技术关键技术及其发展趋势[J]. 科技信息, 2011(17): 476.
- [2] 贺媛媛,周超. 飞行器隐身技术研究及发展[J]. 飞航导弹, 2012(1): 84-91.
- [3] 周禹龙,曹祥玉,高军,等. 双频频率选择表面及其在微带天线宽带 RCS 减缩中的应用[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1446-1451.
- [4] 王夫蔚,任宇辉,高宝建. 基于可重构频率选择表面的天线 RCS 减缩研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(12): 2983-2989.
- [5] 叶彩林,张林博,范靖,等. 快速固化雷达吸波涂料的制备及其性能研究[J]. 中国涂料, 2019, 34(2): 46-51.
- [6] 刘划东,张琳,张东洋,等. 雷达对抗系统隐身技术探析[J]. 雷达与对抗, 2002(3): 8-11.
- [7] 徐乐涛,冯德军,王雪松. 基于间歇采样的合成孔径雷达目标有源隐身方法[J]. 电波科学学报, 2016, 31(1): 31-38.
- [8] 牟春晖,姜文,龚书喜,等. 一种新型的低雷达散射截面微带天线[J]. 微波学报, 2015, 31(2): 10-14.