

利用接地板开槽减缩微带贴片天线的 RCS

张明旭 龚书喜 刘英

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 接地板开槽可以改变微带天线的辐射特性及阻抗特性, 在微带贴片天线的频带展宽中已有所应用。该文给出了微带贴片天线散射特性的矩量法求解过程, 并分析了接地板开槽对天线雷达截面(RCS)的影响。与短路针加载相结合, 给出了一种接地板开槽形式。结果表明, 据此设计的微带贴片天线在较宽频带内实现了 RCS 的减缩, 同时天线的辐射性能保持良好, 对天线的隐身有一定的借鉴作用。

关键词: 微带贴片天线; 雷达截面; 开槽; 矩量法; 短路针

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0498-03

Reducing the RCS of Microstrip Patch Antenna by Cutting Slots on the Groundplane

Zhang Ming-xu Gong Shu-xi Liu Ying

(National Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The radiation and impedance characteristic of microstrip antenna may be influenced by cutting slots on the groundplane with applications to widening the frequency band. The Method of Moment (MoM) which is used to solve the scattering of microstrip patch antenna is presented. The effect of cutting groundplane slots on the RCS is analyzed and a scheme of cutting slots is put forward combining shorted-posts load. The results indicate that the RCS is reduced a lot during a very wide frequency band, while antenna' radiation performance remains. The conclusion is useful for the antenna radar cross section reduction.

Key words: Microstrip patch antenna; RCS; Cutting slot; Method of Moment (MoM); Shorted-post

1 引言

在各种飞行器中, 天线作为必不可少的组成部分, 其 RCS 对飞行器整体的 RCS 贡献较大的问题越发突出。由于天线系统工作特点的限制, 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不可能简单地在天线隐身中获得应用。如何降低天线的 RCS, 使天线系统免遭敌方雷达的探测和攻击而有效地工作, 不仅关系到天线本身的生存, 而且影响到其载体的电磁隐身性能, 进而影响到天线载体的生存。

天线的散射通常分为两部分, 一部分是与天线负载情况无关的结构模式项散射场, 它是天线接匹配负载时的散射场, 其散射机理与普通散射体相同; 另一部分则是随天线负载情况变化的天线模式项散射场, 它是由于负载与天线不匹配而反射的功率经天线再辐射而产生的散射场, 这是天线作为一个加载散射体而特有的散射。

微带天线^[1]具有尺寸小、易与载体表面共形等诸多优点, 在飞行器的低 RCS 天线应用中具有广阔的前景。其中, 微带贴片天线以其相对效率高、分析方法成熟而应用最为广泛。然而作为一种高 Q 值谐振器, 它最主要的缺点就是带宽太窄, 增益偏低。近几年来, 国内外学者根据微带贴片天线的独特结构, 提出了很多 RCS 减缩方案^[2-4], 但大都是以牺牲天线辐射性能为代价的。天线的增益损失和带宽变化是目

前衡量 RCS 减缩方案优劣的主要标准。如何在天线性能损失的可承受范围之内, 尽可能降低其 RCS, 折中考虑这两方面因素, 是摆在众多学者面前的重要课题。

接地板开槽^[5,6]可以改变微带天线的辐射及阻抗特性, 在展宽微带贴片天线的频带中已有所应用。本文将将其引入到微带贴片天线的 RCS 减缩中, 分析计算了接地板开槽对天线 RCS 的影响, 并结合短路针加载, 给出了一种较为理想的开槽形式。计算结果表明, 据此设计的微带贴片天线, 在较宽频带内实现了 RCS 的减缩, 增益仅下降了 0.2dB, 带宽保持不变。

2 微带贴片天线散射特性的矩量法求解^[7]

平面波照射在同轴线馈电的微带贴片天线上, 在天线的馈电端口接有负载 Z_l 。计算其散射特性时给定入射波的强度, 在同轴线馈电端口不加激励, 而是接一个负载 Z_l 。由金属表面切向电场为零的边界条件得到下面两个表达式

$$\begin{aligned} E_s^i(\mathbf{r}) = & j\omega\mu_0 \int_s G_{xx}^{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') ds' - \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla_s \cdot \int_s G_{\phi}^{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \nabla_s' \cdot \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') ds' + j\omega\mu_0 \\ & \cdot \int_0^h [\mathbf{x}G_{xz}^{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + \mathbf{y}G_{yz}^{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] I(z') dz' - \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla_s \cdot \int_0^h G_{\phi}^{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \frac{dI(z')}{dz'} dz' - \mathbf{x}E_x^{\text{mag}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - \mathbf{y}E_y^{\text{mag}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'), \\ & \mathbf{r} \in S \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_z^i(z) = & j\omega\mu_0 \int_s [\mathbf{x}G_{zx}^{21}(z, \mathbf{r}') + \mathbf{y}G_{zy}^{21}(z, \mathbf{r}')] \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') ds' - \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \frac{d}{dz} \\ & \cdot \int_s G_\phi^{21}(z, \mathbf{r}') \nabla'_s \cdot \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') ds' + j\omega\mu_0 \int_0^h G_{zz}^{22}(z, z') I(z') dz' \\ & - \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \frac{d}{dz} \int_0^h G_\phi^{22}(z, z') \frac{dI(z')}{dz'} dz' - \mathbf{z}E_z^{\text{mag}}, \end{aligned} \quad (2)$$

$0 < z < h$

其中 \mathbf{r} 是场点位置矢量, \mathbf{r}' 是源点位置矢量, 而 $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')$ 是贴片上的电流分布, $I(z')$ 是探针上的电流分布, E_x^{mag} , E_y^{mag} 和 E_z^{mag} 是同轴线口径处的等效磁流环产生的电场分量, $G^{mn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 指的是场在第 m 层, 源在第 n 层的空间域格林函数(见图 1)。移去贴片和探针, 仅剩下介质和接地板以后, 入射平面波在贴片原来的位置上产生的总场是 $\mathbf{E}_z^i(\mathbf{r})$, 在探针原来的位置上产生的总场是 $\mathbf{E}_z^i(z)$ 。

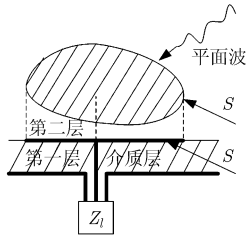


图 1 同轴馈电微带天线示意图

分析计算时将同轴线口径处用等效磁流环表示, 假定同轴线的口径处分布有 TEM 模式的场, 且同轴线的内芯和外皮之间的电压 V_L , 则式(1), 式(2)中该磁流环激励起的电场为

$$E_t^{\text{mag}}(\mathbf{r}) = 2\pi K \frac{d}{dt} S_0 \left\{ [J_0(k_\rho a) - J_0(k_\rho b)] V_v^e / k_\rho^2 \right\},$$

$$K = \frac{V_L}{\ln(b/a)}, \quad t = x, y \quad (3)$$

$$E_z^{\text{mag}}(\mathbf{r}) = \frac{2\pi K}{j\omega\epsilon_0\epsilon_r} S_0 \left\{ [J_0(k_\rho a) - J_0(k_\rho b)] I_v^e \right\},$$

$$K = \frac{V_L}{\ln(b/a)} \quad (4)$$

其中 a 是同轴线的内径, b 是同轴线的外径, $V_L = Z_l I_l$, Z_l 是负载阻抗, S_0 是零阶索末菲尔德积分, I_v^e, V_v^e 是等效传输线上的电压和电流, I_l 是负载上的电流, 该电流也是通过矩量法求解式(1)和式(2), 与贴片和探针上的电流一起求出。

采用空间域矩量法, 选择三角形面元基函数(又称为 RWG 基函数), 该基函数能够模拟任意形状贴片天线上的电流分布。使用伽略金方法对式(1)和式(2)的混合位积分方程两边分别取内积, 得到阻抗矩阵方程。求解该阻抗矩阵方程, 得到电流分布便可以求得微带天线的散射场。

在下面的计算中, 天线均采用同轴线馈电(如图 1 所示), 馈电端口匹配良好(微带天线较易实现馈电端口匹配), 此时天线模式项散射近似为零, 因此下面的工作主要进行的是结构模式项散射的减缩。

3 天线设计和数值结果

当平面波照射微带贴片天线时, 在不同频率会激励起不同的感应电流, 天线的散射场正是由这些感应电流引起的。接地板开槽可以改变微带天线的阻抗特性及贴片表面感应电流的流动路径, 对天线的散射特性产生影响。

在微带天线的接地板上沿 x 轴方向开 3 个槽, 如图 2 所示。计算结果表明: 开槽后天线的谐振频率保持不变, 天线增益有小幅下降, 带宽几乎没有损失。图 3 给出了此天线在一段频率内(注: 2-8GHz 为机载导航及电子战天线常用工作频段)的单站 RCS 曲线, 入射波为 θ 极化平面波, 入射角 $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ (这个角度入射可以激励较多的谐振模式电流)。可以看到, 接地板开槽的确能够影响天线的散射特性, 对抑制谐振频率点的 RCS 峰值起到了一定的作用。

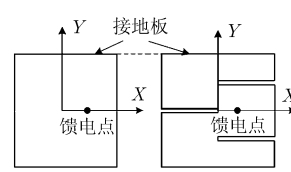


图 2 接地板开 3 槽示意图

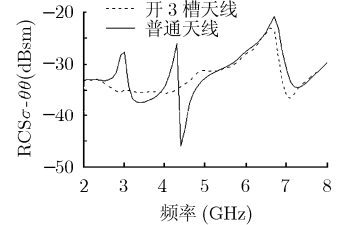


图 3 开 3 槽天线的散射特性

微带天线加载短路针^[8]相当于引入电纳, 同样可以改变天线的阻抗特性, 影响其 RCS。在适当位置进行加载不会造成天线谐振频率的偏移, 同时带外的 RCS 有一定程度的减缩。基于上述分析及结论, 本文设计了一个接地板开槽微带贴片天线。

首先设计一个工作在 3GHz, 辐射性能良好(其中增益为 6.76dB, 带宽为 2.4%)的普通微带贴片天线。其中, 介质基片的相对介电常数 $\epsilon_r = 2.35$, 基片的厚度 $h = 2\text{mm}$, 电损耗角正切 $\tan \delta_r = 0.001$ 。贴片的外围尺寸为 $W \times L = 31.4\text{mm} \times 31.4\text{mm}$, 接地板尺寸为 $W_g \times L_g = 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。选择接地板中心为坐标原点, 采用同轴线馈电, 其内芯半径为 0.45mm, 馈电点的坐标为(5.3, 0)。

在上述天线的接地板上沿 x 轴方向开 5 个槽, 如图 4 所示。接地板的外形关于 x 轴对称, 槽的宽度均为 1mm, 其中 $d_1 = W_g/3$, $d_2 = 2W_g/3$ 。短路针的坐标分别为(0, 15)、(0, -15), 短路针半径为 0.45mm, 此时天线的馈电点为(5.5, 0)。

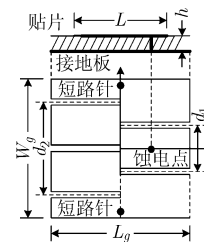


图 4 接地板开槽微带天线示意图

计算结果表明, 图4所示接地板开槽微带天线的工作频率仍然为3GHz, 增益下降为6.58dB左右, 阻抗带宽几乎不变。接地板开槽天线与普通天线的远场方向图对比见图5。可以看到, 它们有着相似的方向图, 方向图的后瓣稍有增大。由此可见, 图4给出的接地板开槽天线较好地保持了原天线的辐射性能, 增益下降不到0.2dB, 带宽基本不变。

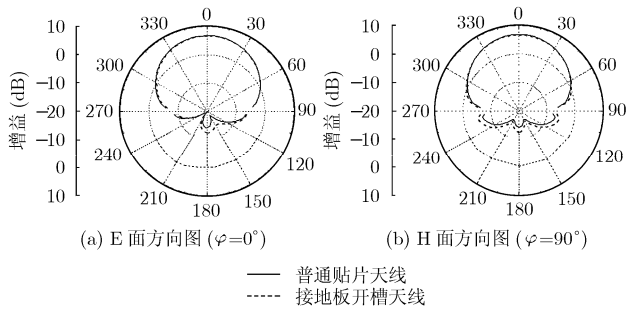


图5 接地板开槽微带天线和普通微带贴片天线的方向图

图6是接地板开槽微带天线的回波损耗曲线, 图7给出了入射波为 θ 极化平面波, 入射角为典型角度 $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ 时开槽天线的单站RCS曲线, 图8, 图9给出了入射角为 $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ 及 $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 时该天线的单站RCS曲线。由图7可以看到, 接地板开槽后, 对于 $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ 入射方向, 天线的RCS在大部分频带内都得到了减缩。在工作频率3GHz附近RCS下降了12dB左右, 另外两个谐振点RCS峰值也分别有5dB和12dB的下降, 带内RCS减缩较为理想, 而带外的RCS可以通过频率选择表面进行减缩。如图8, 图9所示, 入射角为 $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ 时, 天线的RCS也有较为明显的减缩, 而当平面波以 $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 角度入射时, RCS曲线并无十分明显的变化, 因此需要在以后的工作中对本文提出的开槽方式作进一步改善。

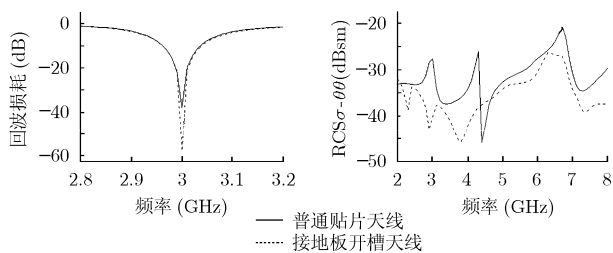


图6 接地板开槽天线的回波损耗

图7 接地板开槽天线的散射特性 ($\theta = 60^\circ, \varphi = 45^\circ$)

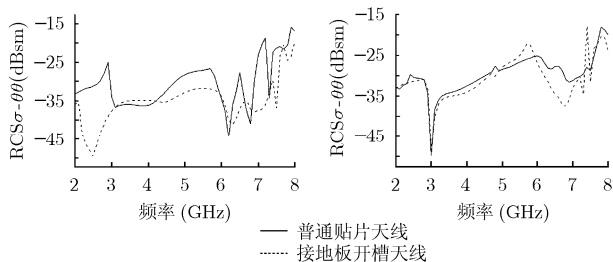


图8 接地板开槽天线的散射特性 ($\theta = 60^\circ, \varphi = 90^\circ$)

图9 接地板开槽天线的散射特性 ($\theta = 60^\circ, \varphi = 0^\circ$)

接地板开槽可以改变天线的阻抗特性及贴片上感应电流的流动路径。电流的蜿蜒流动, 使其产生的散射场部分抵消, 从而达到降低天线RCS的目的。与短路针加载相结合, 在保持天线辐射性能的同时, 实现了较宽频带内RCS的减缩。虽然方向图后瓣稍有增大, 但是相对于较小的增益损失、带宽不变及明显的RCS减缩效果等诸多优点, 可以认为这种代价是值得的。

4 结束语

由上可知, 在微带天线的接地板上开槽是实现较宽频带RCS减缩的可行方案。开槽后, 带内的RCS减缩较为明显, 其中工作频率点的RCS减小了12dB左右, 其他谐振点的RCS峰值也有不同程度的下降。同时, 天线的辐射性能变化很小, 增益仅仅下降了0.2dB, 带宽几乎不变, 较好地解决了天线良好辐射性能与低RCS要求之间的矛盾。就接地板开槽形式及与其它RCS减缩方法的综合, 作者正在进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 钟顺时. 微带天线理论与应用. 第一版, 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991: 1-2.
- [2] 杨超, 阮颖铮, 冯林. 微带天线RCS减缩技术及分析方法. 电波科学学报, 1994, 9(4): 52-56.
- [3] 冯林, 阮颖铮. 天线RCS减缩技术研究的新进展. 电子科技大学学报, 1995, 24(7): 23-26.
- [4] Wilson C B, Davidson D B, Odendaal J W, and Janse van Rensburg D J. The RCS reduction of microstrip patch antennas. Tenth International Conference on Antennas and Propagation, 14-17 April 1997, vol.1: 174-177.
- [5] Chiou T W and Wong K L. Designs of compact microstrip antennas with a slotted ground plane. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001. IEEE, 8-13 July, 2001, vol.2: 732-735.
- [6] Wong K L, Kuo J S, and Chiou T W. Compact microstrip antennas with slots loaded in the ground plane. Eleventh International Conference on Antennas and Propagation, 17-20 April, 2001, vol.2: 623-626.
- [7] 贺秀莲. 微带天线的数学建模理论与数值分析方法研究. [博士学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [8] 张洪波, 龚书喜. 双H形槽减缩微带天线RCS. 空间电子技术, 2006, 3(1): 37-39.

张明旭: 男, 1980年生, 硕士生, 研究方向为电磁散射、天线隐身及微带天线小型化。

龚书喜: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 天线与电磁散射研究所所长, 主要研究方向为电磁理论、电磁辐射、电磁散射与隐身技术等。

刘英: 女, 1977年生, 博士, 讲师, 研究方向为电磁学数值方法研究、电大尺寸目标RCS分析、天线RCS减缩、微带天线与分形天线等。