

A Low-profile Antenna Design Based on High-impedance Surface

Hongran Wang

Southwest China Research Institute of Electronic Equipment

Email: wanghongranran2008@126.com

Abstract

At present, the antenna plays a vital role in the wireless communication system. By using the antenna system to load the high impedance surface EBG reflector, we can grasp the EBG structure status and determine its impact on the antenna radiation performance. Based on this, combined with practical considerations, this paper first briefly analyzes the design principle of low profile antenna based on high impedance surface, then expounds the characteristics of high impedance surface EBG structure, and finally proposes the design strategy of low profile antenna based on high impedance surface. With a view to helping the work of relevant departments.

Keywords: *High-impedance Surface; Low Profile; Antenna Design*

对基于高阻抗表面的低剖面天线设计研究

王泓然

中国电子科技集团公司第二十九研究所 610036

摘要: 目前, 天线在无线通信系统中起到至关重要的作用, 利用天线系统实现对高阻抗表面 EBG 反射板的加载, 可掌握 EBG 结构状态, 明确其对天线辐射性能产生的影响。基于此, 本文结合实际思考, 首先基于高阻抗表面简要分析了低剖面天线的设计原理, 其次阐述了高阻抗表面 EBG 结构的特性, 最后提出了高阻抗表面的低剖面天线设计策略, 以期对相关部门的工作有所帮助。

关键词: 高阻抗表面; 低剖面; 天线设计

引言

随着通信技术的不断应用, 宽带无线电设备已经被应用于多领域中, 利用超宽带天线技术, 执行宇航、遥测、卫星通信等工作。而低剖面天线在设计过程中, 会将天线比作无线通信系统的门户, 根据其辐射性能, 实现对通信质量的控制, 结合噪声信号、干扰信号进行分析, 凸显出天线系统的定向辐射功能, 增加在无线系统阶段的执行性因素。

一、780MHz-1050MHz 之基于高阻抗表面的低剖面天线设计原理

(一) 天线设计

在低剖面天线设计工作中, 应选择贴片偶极的天线设计方式, 稳定天线结构, 采用 Fr-4 的介质基板, 设置其厚度在 1mm 以内。通过双面的 PCB 板完成对低剖面天线的设计工作, 促使辐射单元的贴片工作能够顺利实施。首先, 可采用正交的花瓣形金属进行贴片, 让电磁波正常地进行收发, 展现出其双极化的优势, 促进辐射单元的开设, 用于同轴区使内芯能够进行馈电。

在介质基板下方, 需开展对高阻抗表面的印刷操作, 让上表面与下表面进行衔接, 使偶极子天线维持

垂直的状态，增加寄生贴片的应用，促使正交花瓣形的金属贴片能够进行组合，以控制天线的带宽。

同时，在寄生贴片应用过程中需根据金属贴片的性状，增加辅助贴片的应用。例如：在花瓣形金属贴片应用过程中，可增加 T 形贴片进行辅助，使同轴馈电线能够正常运行，衔接外层的金属导体，以保证其可以耦合馈电。根据介质基板的应用效益，使金属贴片在进行馈电环节不会出现异常，在天线的 4 个角内，增加通孔并在整机上进行安装。运用 Sn 仿真曲线得出天线的实际频段在间，使天线的频率在-10db 以内。由此方式，凸显出天线的良好性能。

（二）高阻抗表面结构设计

在高阻抗表面结构设计过程中，可了解其是以定向辐射天线反射板的形式出现的，可通过控制天线高度的方式，调整其剖面并让天线可以分别进行放置，确保其能够在高阻抗表面（HIS）与理想导体（PEC）的上方完成反射操作。首先，可根据波段的状态，掌控电流元所受到的辐射，确认其位置在前向波区域，数据线对天线的定向管控。运用波段叠加的方式，计算出其具体相位，规划出波段 1 和波段 2 之间的相位差，经计算可得出相位差是 0。此时，可根据天线的工作波长（ r ），反射板与天线之间的距离（ H ），反射板中的反射相位（ φ ），了解天线区域内往返的途径，设置为 $2H$ 。当在此时间内形成的空间相位会出现一定的延迟，此部分延迟时间被却认为（ φ_2 ）。据此为使 $\Delta\varphi=0$ ，可列出公式：

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1 - 2H \frac{2\pi}{\lambda} = 0$$
$$H = \frac{\varphi_1}{4\pi} \lambda$$

这样一来，可将 PEC 作为反射板，此时的 $H=\lambda/4$ ， $\varphi_1=\pi$ 。而高阻抗表面结构作为反射板时， φ_1 会相对较小（当相位相同时）。所以，为保证高阻抗表面结构的稳定性，可优先设置辐射天线反射板，控制天线的实际高度，运用剖面高度控制分析的方式，了解高阻抗表面单元的状态。例如：介质基板上层是正方形的金属贴片，则可直接让其作为高阻抗表面的单元，根据贴片中心的状态，增加介质板背与金属孔的应用，让其能够呈现出相互衔接的状态，使 mushroom 与高阻抗表面的结构特性一致。

另外，在设计工作实施过程中，应掌握高阻抗表面结构的状态。通过三维建模的方式，加强对高阻抗表面结构的设计。绘制出反射相位曲线，确认频段的变化范围，让其在 800MHz-960MHz 之间。由此方式，确认反射单元的实际组织，使谐振频点为 885MHz。将此处的表面阻抗确认为 3800Ω 。根据高阻抗表面单元的反射状态进行分析，使相同区域的反射相位控制在 90° 以内。

利用原场同向叠加的方式，确认镜像电流单元的状态，使天线可以分别放置在指定区域，以完成高阻抗表面与理想导体之间的对比操作。

二、高阻抗表面 EBG 结构的特征

（一）高阻抗表面结构

高阻抗表面是金属介质的混合形态，其作为一种二维的 EBG 结构，在金属表面有凸起，外形大致与蘑菇相同，也可比作蘑菇型 EBG 结构。因为高阻抗表面在制作环节只需通过简单的工艺，采用无源集总元件加载的方式，增加双面印刷版，增加有源集上的二极管，以控制高阻抗表面的运行效率，采用有源元件的加载方式，使金属贴片可以周期性排列。其中间介质为基本，而底层是有连续性金属平面的。通常会以正方形、三角形、六边形的形态出现，让其表面依靠二维网格进行排列，运用介质镶嵌的方式，使得平面与金属贴片可以逐一连接（具体如下图所示）。

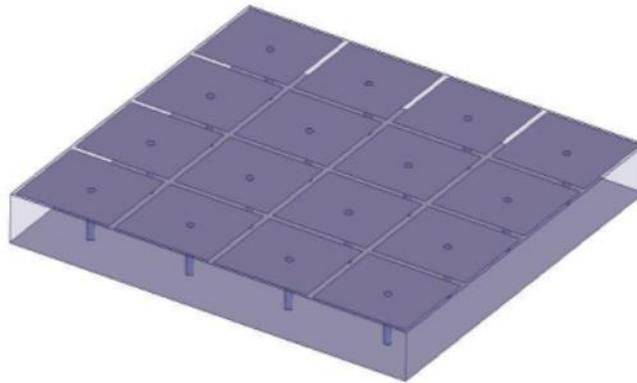


图 1 高阻抗表面结构图

若高阻抗表面存在两层结构，需在原有基础上再增加一层，构建出三层结构，运用两层介质基板进行组合并在每一层内都增加金属贴片，运用粘合的方式，确认其中的金属通孔，使其与接地面相互连接。或是在上层、下层结构中增加平行电容，控制电容的实际量值，确保高阻抗表面的并联电路谐振效率有所下降，形成低频带隙（本文主要以两层高阻抗表面为主）^[1]。

（二）等效媒质模型的创建

在高阻抗表面结构设计过程中需增加正方形贴片的应用，设置贴片的边长为 w ，单元缝隙宽度为 g ，介质层实际厚度为 t ，金属化半径为 r 。依靠结构参数，确认介质层内的介电常数，控制高阻抗表面的带隙频率，促使高阻抗表面的反射相位更加明显（模型结构如下图所示）。

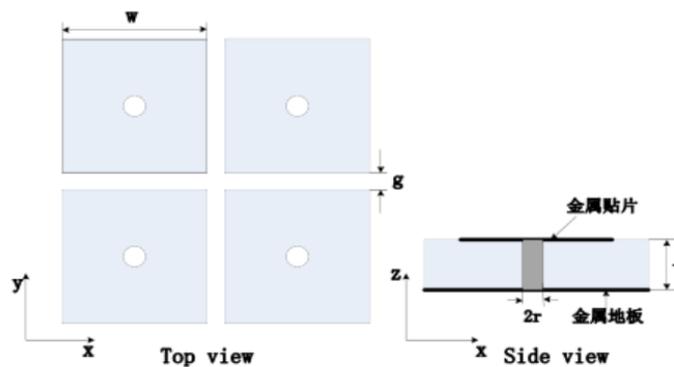


图 2 等效媒质模型结构分布图

通过局域谐振模型的高阻抗表面结构，创建出等效模型并及时进行估算操作。采用模型手段，评估高阻抗表面单元，利用金属贴片控制缝隙边缘并合理应用等效电容，保证地平面与金属化孔之间是有等效电感的。由此方式，考虑 LC 谐振电路，执行周期性的贴片操作，降低数值计算环节的误差，实现对电磁场中电容 c 以及电感 l 的估算：

$$C = \frac{w (\epsilon_1 + \epsilon_2)}{\pi} \cos^{-1}[a/g]$$

其中，周期长度 $a=w+g$ ；介电常数 $\epsilon_1=\epsilon_0$ ，其中的覆盖层为空气， $\epsilon_2=\epsilon_0\epsilon_r$ ，其主要表示在下方介质基板内的介电常数^[2]。

根据计算公式可知，电容 C 是否改变取决于高阻抗表面的周期场地、贴片长度以及缝隙宽度，通过单元配列的方式，可掌握电感 L ，控制磁导率并缩短介质基板，让电感值得以确认^[3]。

三、基于高阻抗表面的低剖面天线设计策略

在低剖面天线设计过程中，必须重视高阻抗表面结构的状态。利用先进的 HIS 替代以往的理想导体反射表面。由此方式，使天线呈现出完整的状态，使其表面的高度有所提升。通过对低剖面天线的分析，掌握其和高阻抗反射区域之间的关系，让高阻抗表面结构和低剖面天线相互结合，确保二者能够顺利组装在一起。将天线的频段范围进行控制，增加驻波系数的应用，列出 HIS 的结构矩阵，控制天线的实际高度，让低剖面天线能够增效^[4]。

（一）高阻抗表面阵列设计

根据上述内容可知，在高阻抗表面单元设计工作中需要注重其组成方式，列出 5*5 的矩阵，让其可以完成反射操作。将高阻抗表面与低剖面天线进行衔接，使天线能够呈现出 45°的状态，让夹角可以正常放置，保证在不对低剖面天线性能造成影响基础上，控制其物理尺寸。将 HIS 表面的反射板进行倒置，根据其中 4 个角的状态进行分析，运用定向切除的方式，使反射板不会单独在高阻抗表面设置。而是采用同轴线缆的安装方式，让其作用于低剖面天线上。以此方式，确认高阻抗表面的阻抗特性，掌握该区域内的反射相位特征^[5]。

（二）低剖面天线性能测试

通过对低剖面天线性能进行测试，掌握实测天线的状态。通过驻波曲线，控制低剖面天线的频段在 1060MHz 以内。根据电压驻波比实现对整体电性能的控制。例如：将电压驻波比控制在 1.8 以内，确保在低剖面天线作用下，其不会发生骤变。根据中心频点的状态，绘制出辐射方向体域，运用辐射增效的方式，将中心频点的增益方向控制在 2°以内，让增益最大值在 3dB-7.67dB 之间，维持波束的宽度在 66.6，确保低剖面天线在设计过程中不会出现问题。降低回波的耗损概率，使低剖面天线能够进行单向的辐射。

（三）半波偶极子天线仿真操作

在高阻抗表面的低剖面天线设计过程中，需增加对其反射特性的探讨，运用相同相位分析的方式，掌握低剖面的变化程度。因为当前金属板和入射波之间的距离在 180°左右，所以为保证低剖面天线的顺利运行，可控制天线的辐射效率，让其可以适用于多个场景当中。若在低剖面天线运行阶段出现空间狭小的问题，或是整机的尺寸受到限制，则会让天线的实际剖面有所更改。此时，则可结合金属反射板的应用效率进行分析，结合低剖面天线的设计要求，增加入射波与反射波之间的相位差，确保其可以从 180°增加到-180（如下图所示）。

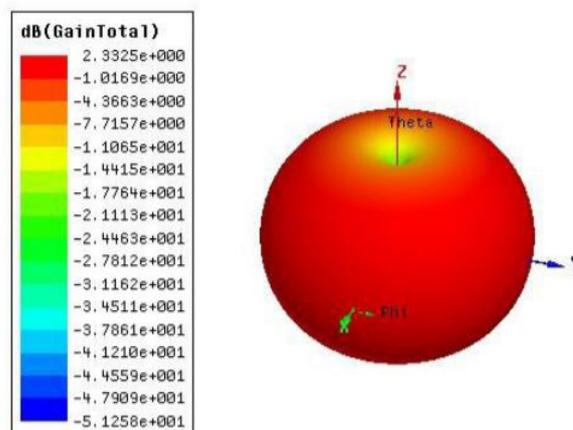


图 3 半波偶极子天线仿真三维模型图

由此方式，运用频带的变化操作，使辐射波与反射波能够相互进行叠加，通过天线状态的更改，确认具体的辐射方向，从而降低剖面天线系统的剖面，达到节省整机空间的目的。

首先，可设置无线电参数，将其作为性能指标并成为设计天线以及天线选择工作中的主要依据。通过方向系数、方向图、输入阻抗以及增益等方式，确认天线的具体方向。例如：在天线方向性确认时，可勘察远区的距离，将其设置为 r ，在条件相同的状况下，则可运用空间方向与相对值比较的方式，明确其中的函数关系。这样，则可了解最大辐射中的电场强度，实现对同一距离内电场强度的管控，掌握具有方向性的函数值。通过自由空间内相移常数的确认，控制自由空间内所产生的波长，计算出对称振子的长度。增加方向图与对称振子之间的关联。由上述内容可知，方向图的主要方向为回转体的绕振子轴运行方向（如下图）。

其次，根据半波偶极子的状态，将低剖面天线比作 l ，此时 $l=0.25\lambda$ ，运用代入式则可计算出半波偶极子的方向，确认其函数内容。通过波瓣图或是方向图的应用，掌握其中最大的主瓣，其中次大的称为副瓣。结合天线的方向进行分析，运用直观的方式，掌握在相同距离内辐射场强的实际大小，使工程内的剖面图能够以垂直的状态展现。促使平面 h 能够与 E 相交，在确认最大辐射方向后，方可了解磁场此时的强度，得出最大辐射方向内的高阻抗表面。

同时，因为无线通信在运行过程中需增加天线设备的辅助，运用辐射操作完成对应的任务，所以，应结合辐射功率的密度进行分析，了解无方向性的天线，使方向图能够绘制成球面，使辐射功率的密度设置为 S_0 ，促使则可实现对场强的比较，得出无方向性低剖面天线的辐射功率。另外，因为方向系数作为低剖面天线的一种定位参考，其具体方向还需根据方向图中的内容进行确认，所以，为保证输入功率的准确性，可通过增益的方式，让天线之间的能量进行转换，控制天线的收益程度，使天线的辐射功率是无方向性的。

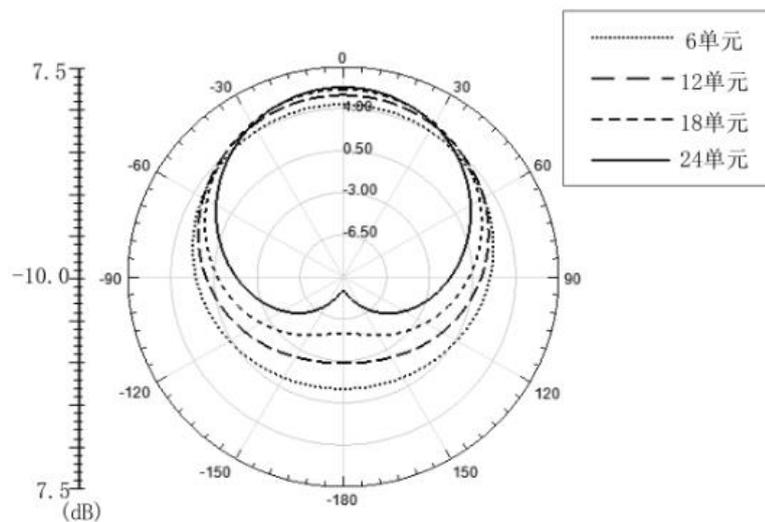


图4 单元数不同的高阻抗表面仿真模型方向图

最后，可将半波偶极子天线应用于工程当中，使其两端的直径保持一致，运用直导线完成 $1/4$ 工作波长的组合操作，促使 HFSS 软件在应用后能够确认天线模型的状态，促使天线的工作频率能够确认在 3GHz 以内，由此创建出仿真模型，确认回波损耗，使低剖面天线在运行过程中能够完成单口馈电操作，降低在回波损耗环节的影响并控制天线的回波损耗在 15.33% 以内。这样，则可避免在模型创建时出现仿真误差（具体如图三所示）。

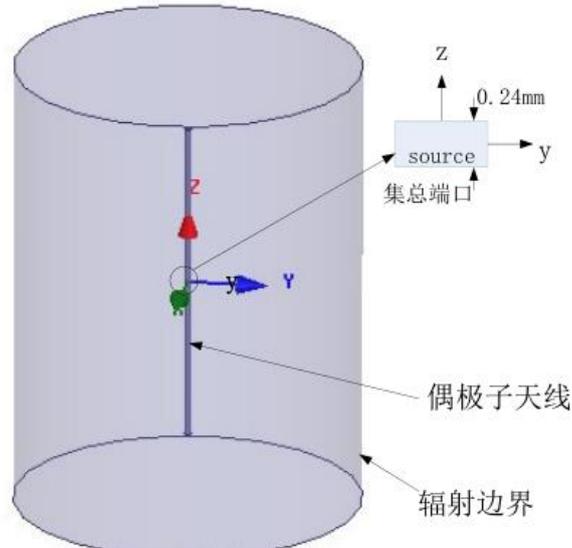


图5 低剖面天线偶极子模型

(四) 结果分析

运用实验分析的方式了解到，高阻抗表面结构能够很好地替代以往的导体反射面，使反射表面与天线之间的距离能够被控制为 $1/4$ 波长。增加了在低剖面天线运行过程中的限制性因素，保证天线剖面能够更加完整。本文采用对低剖面天线性能测试的方式，掌握其在工作环节需要运用 $800\text{MHz}-960\text{MHz}$ 的波段，即可实现增益 7dB 。而在低剖面天线的高度需控制在 20mm 一下，以实现基站天线的设计，控制低剖面天线的具体高度，让天线的辐射性能有所改变。

结论

综上所述，高阻抗表面的整体带隙是较为狭窄的，为保证低剖面天线设计工作的顺利实施，需增加对EBG结构的思考，运用形状贴片的方式，提高低剖面天线的辐射程度，使其中的带隙频率有所下降，从而保证高阻抗表面的紧凑性，拉进高阻抗表面单元与低剖面天线之间的距离，让二者接近于 0 ，减少其中的后瓣并完成增益操作。由此控制天线系统是实际尺度，避免低剖面天线与高阻抗表面出现耦合问题，使其可以进行匹配调节。

参考文献

- [1] 刘松林.基于高阻抗表面的低剖面天线设计[J].科技创新与应用,2022,12(24):108-111.
- [2] 杨天明.基于基片集成波导技术的高性能天线研究[D].电子科技大学,2022.
- [3] 修鑫.新型多功能微波吸收体技术研究[D].南京理工大学,2021.
- [4] 周鹏.基于紧耦合结构的阵列天线与宽带吸波器研究[D].西安电子科技大学,2021.
- [5] 胡志鹏.宽频带紧耦合阵列天线及关键技术研究[D].西安电子科技大学,2021.