

# 一种采用新颖高阻抗接地面的薄型低剖面天线

## A Thin, Low-Profile Antenna Using A Novel High Impedance Ground Plane

作者：EM Software&Systems Inc. Gopinath Gampala, Rohit Smmeta and C.J.Reddy.

对于特定应用的天线尺寸，它不仅依赖于技术，也依赖于物理规律，即天线相对于波长的尺寸对辐射特性有决定性的影响。随着现代通信设备变得越来越小、越来越轻，对于低剖面天线的设计需求比过去更多<sup>[1]</sup>。

一种实现低剖面天线设计的方法是采用高阻抗接地面，而不是传统的金属接地面<sup>[2-3]</sup>。金属平板作为接地面能够重定向后向辐射，同时为天线提供屏蔽作用。原则上，常规的接地面是完纯电导体（PEC）。它可以对入射电流进行反相，因此使得原始的天线电流和镜像电流产生破坏性干扰。为了消除这个影响，天线安装在金属接地面 1/4 波长之上。这使得天线的尺寸在低频时变得很大。为了减小天线的尺寸，需要完纯电导体（PEC）的对偶面作为接地面，即完纯磁导体（PMC）。但是怎样实现自然界并不存在的纯磁导体？答案是使用高阻抗表面（High Impedance Surfaces-HIS），它本质上可以认为是人工磁导体<sup>[4-5]</sup>。

高阻抗表面广泛应用于反射面阵列天线、低剖面天线、电磁吸波材料和极化器<sup>[6-7]</sup>。这些表面表现出独特的性能，如入射波的同相反射和表面波抑制。在天线结构中加入高阻抗表面能改进各种天线参数，如增益、阻抗和天线尺寸。根据工作环境的不同，可以对高阻抗表面的设计进行优化从而调整电磁波的特性。CAD 工具利用数值优化技术使得求解复杂问题成为可能。现在有很多求解电磁问题的优化算法。对于给定的问题，决定采用什么优化算法最合适并不是件简单的任务，这取决于变化参数的个数和范围、优化的目标、模型尺寸以及可利用的资源等多种因素。

二维周期谐振阵列（印制板或互补槽）在特定频带内与电磁波的相互作用可以作为频率选择表面（FSS）。在文献中对不同的频率选择表面单元都有描述，它们各有优劣。多频段偶极子结构是极化依赖的，对称设计是双极化的，分形结构是紧凑设计的。高阻抗表面（HIS）可以通过在背面为金属的介质衬底上印制周期的频率选择表面实现。在关注的频率范围对高阻抗表面（HIS）进

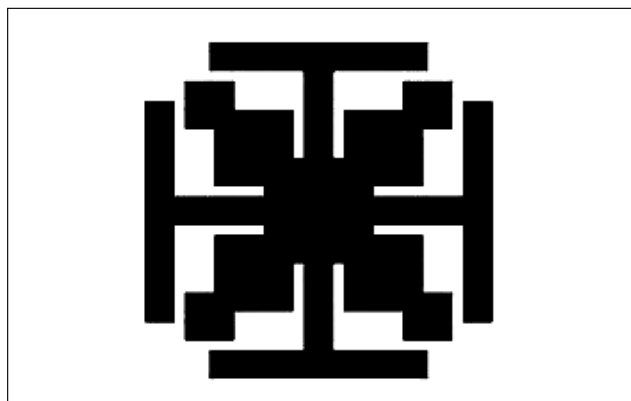


图 1. FSS 单元。

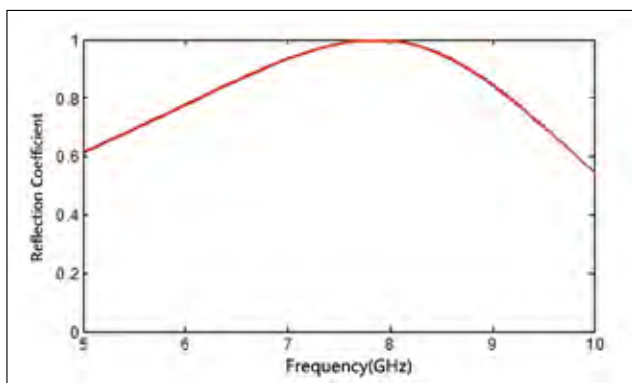


图 2. 周期单元阵列的反射系数。

行优化非常重要。根据观察，频率选择表面和高阻抗表面（HIS）的特性互相关联。利用这种相关性，可以通过以下两步加速优化过程：

- 优化频率选择表面本身；
- 通过在背面为金属的介质衬底上印制优化的频率选择表面实现高阻抗表面。

尽管宽频带天线的需求在增长，但是窄带天线在工作频率为 49MHz、900MHz、2.4GHz、5.8GHz 的无绳和无线电话应用中仍有它的优势。利用只工作在关心频率附近的窄带天线可以避免来自相邻频段的干扰。本文描述了一种新颖的频率选择表面（FSS）结构，对反射系数的陡斜特性进行了优化。频率选择表面单元由一个“耶路撒冷”

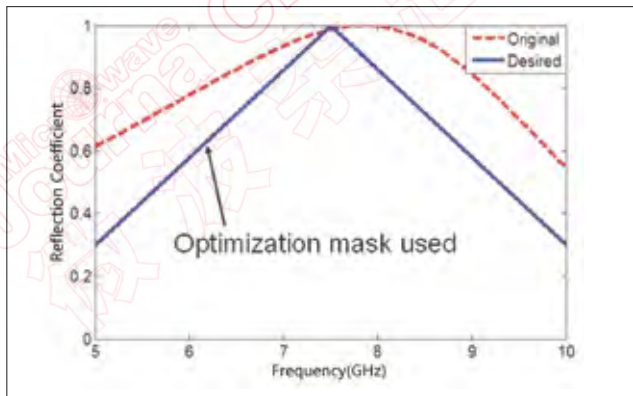


图 3. FSS 反射特性、原始的和期望的设计目标。

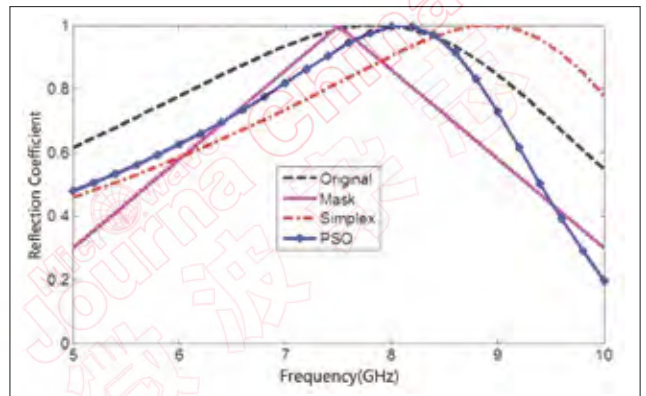


图 4. 单纯形法和粒子群优化算法的比较。

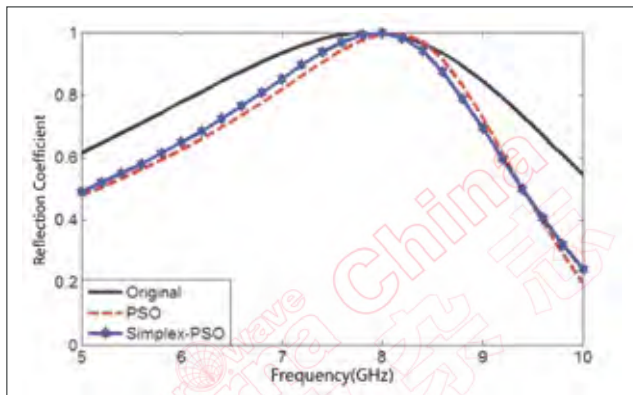


图 5. 单纯形法、粒子群优化和两者混合算法的比较。

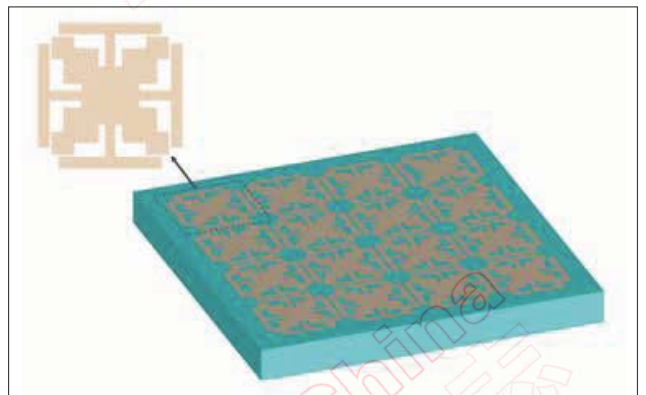


图 6. 采用优化 FSS 实现的 HIS。

十字和一个三次分形贴片组成，如图 1 所示。在设计高阻抗表面时可以利用频率选择表面结构的反射特性，作为减少无绳电话中的串扰的天线衬底。用一个工作在 5.8GHz 其衬底为 0.07 个波长厚介质的低剖面单极子 (1/4 波长) 天线演示了高阻抗表面衬底的性能。单极子首先作为一个线结构来分析；然后把这种设计转换成印制板形式。

### 频率选择表面设计和优化

频率选择表面结构的工作依赖于单元的谐振。由单元结构组成的周期性阵列与电磁波相互作用会在特定的频率产生谐振，它对全反射入射平面波就是一个带阻滤波器，如图 2 所示。

把具有宽带特性的频率选择表面结构的初始设计优化为具有尖峰的窄带特性。商业软件 FEKO<sup>[8]</sup> 采用两种不同的优化方法分析频率选择表面 (FSS) 结构：它们是单纯形内尔德 - 米德法 (Simplex Nelder-Mead) 和粒子群优化方法 (Particle Swarm Optimization)。

### 单纯形内尔德-米德法 (Simplex Nelder-Mead Method)

单纯形 Nelder-Mead 算法是一种局部的或下山算法，

最终的优化结果与起点有很强的关系。单纯形法指在 N 维空间中由 N+1 个点的集合组成的几何图形。单纯形法实质上是一个迭代过程，其基本思想是根据问题，从一个基本可行解出发，逐步改进目标函数的取值，直到求得最优基本可行解。单纯形法的运动由三种操作完成：反射、扩张和收缩。

### 粒子群优化方法 (PSO)

粒子群优化方法是一种全局搜索算法，它是基于种群的随机进化计算技术，即基于在自然中种群的运动和

表 1. 优化运行时间比较。

Optimization algorithm	No. of iterations	Time taken (hrs)
PSO	900	900
Simplex	179	32.2
PSO+Simplex	100+154	45.7

表 2. HIS 设计参数。

Periodicity of the unit cell	7.6 mm
Dielectric constant of the substrate	$\epsilon_r = 2.2$
Height of the substrate	3 mm = 0.07 $\lambda_d$

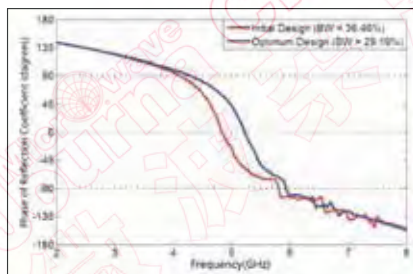


图 7. 采用优化和未优化 FSS 实现的 HIS 反射特性。

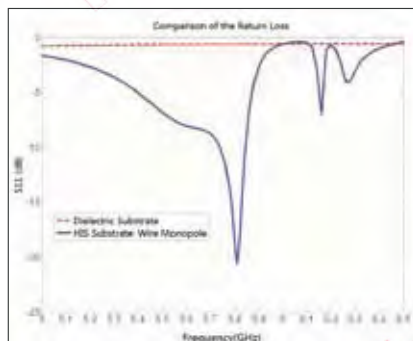


图 8. 采用 HIS 和介质做基片的单极子的回波损耗。

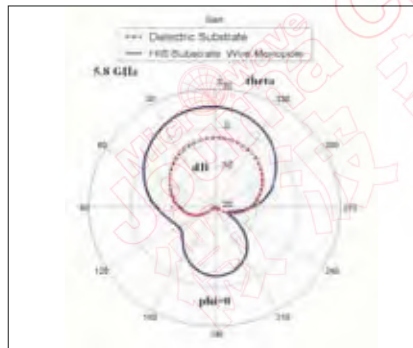


图 9. 采用 HIS 和介质做基片的单极子在 5.8GHz 时的增益。

智能。粒子群优化方法可以以一群在野外采蜜的蜜蜂作为对比得到最好的解释。它们的目标是找到花丛最多的地方，其中每只蜜蜂代表一套参数，每只蜜蜂都有基于它自身经验（局部最佳）的花丛最多地方的位置和基于其他蜜蜂经验（全局最佳）的花丛最多地方的位置两方面的信息。基于给予个体或同辈的权重，每只蜜蜂飞行于局部和全局最佳位置之间。一旦飞行完成，这只蜜蜂就把新发现的信息传达给其他蜜蜂，它们会相应地调整自己的位置和速度。通过这种持续的信息探测和交流，所有的蜜蜂最终找

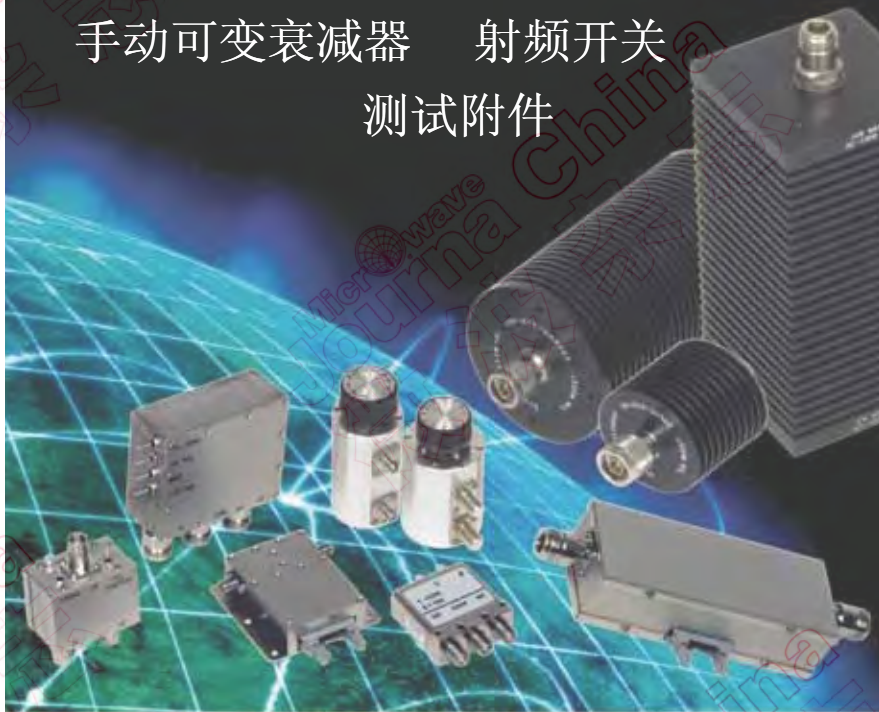
到花丛最多的地方。在提出的频率选择表面单元中可优化的参数或变量有“耶路撒冷”十字臂和分形贴片的尺寸。指定一个区间优化参考值（Optimization Mask）作为优化目标，如图 3 所示。

由于单纯形法是一种局部优化方法，因此它比全局优化方法的粒子群优化方法收敛快得多。然而，和全局优化方法的粒子群优化方法相比，单纯形法成功与否取决于起点，具有收敛于局部最小的缺点。从图 4 可以

# 射频解决方案

来自 **JFW Industries**

测试系统    固定衰减器    功分器  
 程控衰减器    负载/终端器  
 手动可变衰减器    射频开关  
 测试附件



**JFW Industries**

Call 317-887-1340

Toll Free 877-887-4JFW (4539)

E-mail sales@jfwindustries.com

Visit www.jfwindustries.com

Specialists in Attenuation and RF Switching

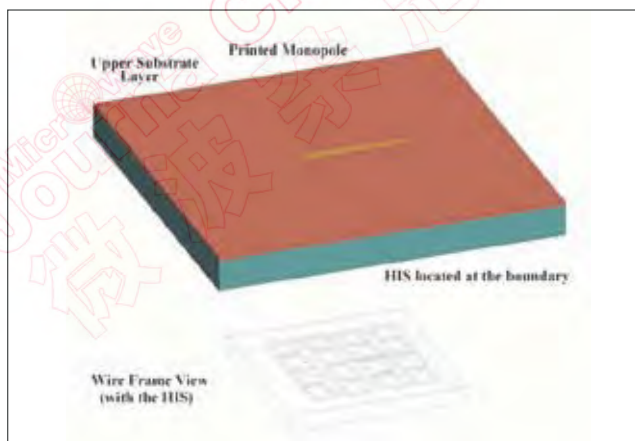


图 10. 在基片间采用 HIS 的印制板单极子天线。

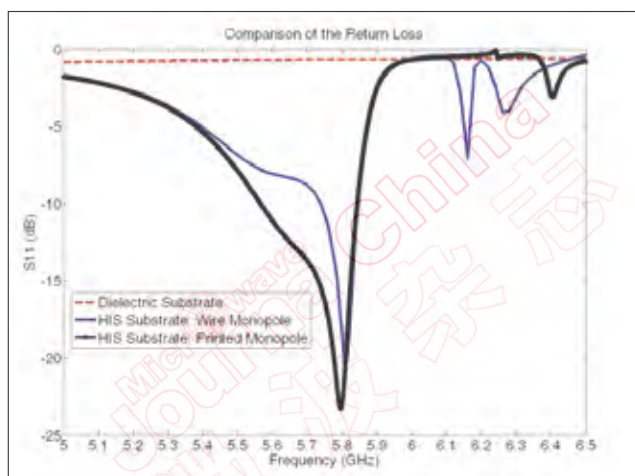


图 11. 回波损耗的比较。

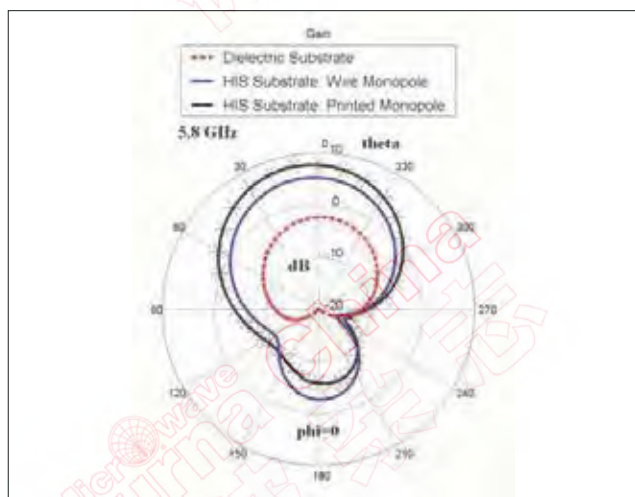


图 12. 平面和非平面天线在 5.8GHz 时的单极子天线增益。

看出，全局优化的粒子群优化方法比单纯形法更易于接近区间优化参考值 (Mask)，但代价是花费巨大的运行时间。

为了改进达到全局最小的机会但又不牺牲收敛的速度，可以把粒子群优化方法和单纯形法混合在一起，全局优化

方法用来给局部优化方法寻找起点。混合的方法提高了优化方法的速度但又没有牺牲达到全局优化目标的能力。在这个过程中，在全局优化器迭代 100 次后启动局部优化器。局部优化器在 154 次迭代后达到全局最小值，如图 5 所示，减少了 95% 的运行时间。在表 1 中描述了每个优化算法在一台包含两 CPU，每个 CPU 具有 4 核的 EM64T Linux 电脑上运行至收敛时所需的迭代次数和运行时间。

### 高阻抗表面设计和验证

优化完成了实现人工磁导体的第一步，并推进到下一步设计过程，即把优化过的频率选择表面印在背面是金属的介质基片上。高阻抗表面的设计参数如图 6、表 2 所示，其中  $\lambda_d$  表示在 5.8GHz 时的介质波长。

使用未优化和优化过的频率选择表面结构实现的高阻抗表面接地面的反射特性揭示了频率选择表面和高阻抗表面之间的相关性。使用优化过的频率选择表面实现的高阻抗表面比使用未优化的能够减少 7% 的带宽，如图 7 所示，在这里带宽定义为反射系数在 90 度与 -90 度之间的相位变化。

不像通常的完纯金属导体接地面，天线可以安装在非常接近高阻抗表面接地面从而形成低剖面设计。对一个具有低剖面设计的长度为 1/4 波长在 5.8GHz 无绳电话工作频率以高阻抗表面为接地面和同样厚度的背面为金属的介质基片单极子天线进行了性能的测试。图 8 和图 9 验证了高阻抗表面接地面的性能具有低的回波损耗并比以金属为背面的介质衬底的增益高 7.5dB。

### 平面天线

通常天线倾向于设计成印制板格式，这样能够便于与周围环境集成。印制板天线具有的另一个优点就是比非印制板天线便宜和适合批量生产。基于这些原因，设计从突出的圆柱状的单极子天线转向平面印制板单极子天线。线单极子天线 (建模成圆柱) 通过著名的公式  $a = 0.25 * w$  可变换成印制板单极子天线，其中  $a$  是圆柱的半径， $w$  是微带的宽度。为了维持高阻抗表面和单极子之间的电磁关系，微带单极子和圆柱单极子的轴线处于同一高度。微带单极子和上表面之间不应该有间隙，间隙会使得单极子容易损坏和不易制造。为了避免这个问题，采用和衬底一样介质特点的介质 (与高阻抗表面相关) 填充间隙。图 10 显示了在新加介质层之上的印制单极子天线。线框视图方式显示了高阻抗表面位于介质层之间

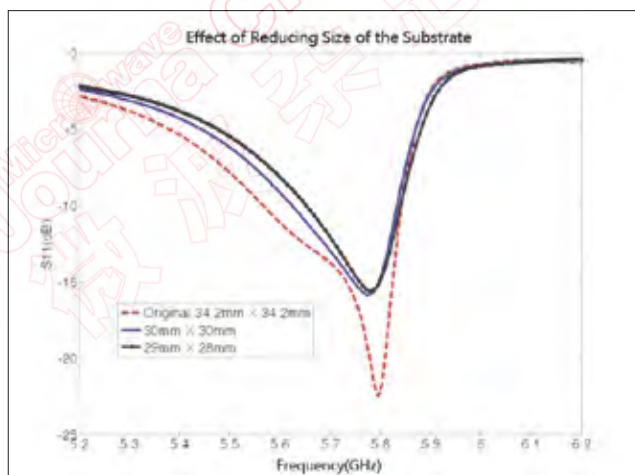


图 13. 减少基片尺寸的影响。

的边界。由同轴电缆末端激励出 TEM 模,它的外导体接地,内导体穿过衬底并激励单极子的一端。

用介质衬底替换空气层会改变单极子和高阻抗表面的电长度,谐振频率偏离期望的 5.8GHz。为了将天线调回到 5.8GHz,

单极子要缩放  $\frac{1}{\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}}$  倍,

高阻抗表面要缩放  $\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}/\epsilon_r$  倍,

需要指出的是通过缩放能将谐振频率移到非常靠近 5.8GHz 处,但是更精确的调节才能使得谐振频率准确定位在 5.8GHz。图 11 比较了平面设计、非平面设计和不使用高阻抗表面衬底时的  $S_{11}$  参数。从图 11 可以发现平面设计能增加回波损耗带宽(定义为低于 10dB)。由于改进了在中心频率处的阻抗匹配,天线的增益从 5.35dB(非平面单极子)增加到 7.73dB(平面单极子)。图 12 展示了这种特性和在俯仰平面 XZ 的增益方向图。

### 衬底长度和宽度的影响

由于整个天线的尺寸(包括高阻抗表面接地面)对于在紧凑型移动设备中的使用非常重要,因此研究了衬底长度和宽度对天线阻抗特性的影响。图 13 画出了回波损耗随衬底尺寸减小的变化规律。可以看出衬底尺寸变小会使得阻抗带宽变窄。因此衬底尺寸可以用来控制阻抗带宽。

### 结论

通过组合分形和“耶路撒冷”十字单元,设计了一种新颖的频率选择表面结构。这种结构在控制反射系数

方面具有更大弹性。优化方法的效率可以通过混合局部优化方法和全局优化方法来提高,在提出的频率选择表面结构例子证明了这点。由优化过的频率选择表面实现的窄带高阻抗表面可以用来设计低剖面天线。由高阻抗表面作接地面,衬底厚度为  $0.07\lambda_d$  的低剖面单极子天线可以将天线的增益增加 7.5dB。进一步的改进,可以将天线设计为平面天线,将天线增益从 5.53dB 增加到 7.73dB。可以发现这样的设计可以增加天线的回波损耗带宽。对衬底尺寸的研究表明减少尺寸会导致天线变成窄带,但是以牺牲谐振零深为代价。■

### 参考资料

1. A.K. Skrivervik, J.F. Zurcher, O. Staub and J.R. Mosig, "PCS Antenna Design: The Challenge of Miniaturization," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 43, No. 4, August 2001, pp. 12-27.
2. D. Sievenpiper, R. Broas and E. Yablonovitch, "Antennas on High-impedance Ground Planes," 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Vol. 3, pp. 1245-1248.
3. M.E. Ermutlu, C.R. Simovski, M.K. Karkkainen, P. Ikonen, A.A. Sochava and S.A. Tretyakov, "Patch Antennas with New Artificial Magnetic Layers," arXiv:physics/0504075v1, April 2005.
4. C.R. Simovski, M.E. Ermutlu, A.A. Sochava and S.A. Tretyakov, "Magnetic Properties of Novel High Impedance Surfaces," IET Microwave Antennas and Propagation, Vol. 1, No. 1, February 2007, pp. 190-197.
5. D.J. Kern, D.H. Werner, A. Monorchio, L. Lanuzza and M.J. Wilhelm, "The Design Synthesis of Multiband Artificial Magnetic Conductors Using High Impedance Frequency Selective Surfaces," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 1, January 2005, pp. 8-17.
6. P. Ratajczak, J.M. Baracco and P. Brachat, "Adjustable High Impedance Surface for Active Reflectarray Applications," 2007 European Conference on Antennas and Propagation Proceedings, pp. 1-6.
7. F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Reflection Phase Characteristics of the EBG Ground Plane for Low Profile Wire Antenna Applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 10, October, 2003, pp. 2691-2703.
8. FEKO Suite 6.1, EM Software and Systems (www.feko.info), 2012.