

基于花瓣形开槽可调高阻表面单元的 S 波段 可重构表面波波导设计与仿真

周永宏^{1,2}, 陈 星¹, 洪 涛², 冯 攀¹, 唐正明²

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 西华师范大学电子信息工程学院, 南充 637002)

摘 要: 基于高阻表面的表面波波导在微波系统中被广泛用于传输表面波能量或者导引表面波至别处,但大多数表面波波导都存在如下问题:(1) 导波路径是固定不变的,不能依据实际情况实时改变导波路径;(2) 工作频段都很高,几乎都在 X 波段或以上频段.这两个问题限制了表面波波导的应用范围,尤其第一个问题意味着需要为每一条导波路径设计一个波导,将极大地提高设计加工成本.本文先设计了一个花瓣形开槽的正方形高阻单元,并加载了四个变容二极管(SMV1408),通过调整变容二极管的反向偏置电压从 20 V 下降到 0.2 V,实现了在常用的 S 波段单元阻抗从 $j390\Omega$ 增加至 $j1710\Omega$;然后基于该可调高阻单元提出了可重构表面波波导概念,并通过 HFSS 仿真证明了该概念的可行性.该波导可以同时形成多条导波路径,并可实时调整导波路径;同时为了抑制表面波能量泄漏,利用我们之前的研究成果对导波路径的设计提出了相应的建议,仿真结果很好地验证了我们建议的有效性.

关键词: 表面波波导; 可重构导波路径; 花瓣形开槽; 变容二极管; 高阻表面单元; 表面波能量泄漏

中图分类号: TN99 文献标识码: A 文章编号: 0490-6756(2017)06-1211-06

Design and simulation of the reconfigurable surface-wave waveguide based on petal-slotted tunable high impedance surface cells in S band

ZHOU Yong-Hong^{1,2}, CHEN Xing¹, HONG Tao², FENG Pan¹, TANG Zheng-Ming²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

2. School of Electronic Information Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

Abstract: The surface-wave waveguide, based on the high impedance surface, is widely used to transform the surface-wave energy or to guide surface-waves along a constrained path. However, there still remain two issues for most surface-wave waveguides. First, the guided-wave path is fixed, which will prevent changing the guided-wave path in real-time situation. Second, the working frequency band is usually high, which is in X band or a higher frequency range. The two issues have limited the large-scale applications of the surface-wave waveguide, especially for the first one, which means that one has to design individual waveguides for every guided-wave path, leading to the high cost. In this paper, a high-impedance square cell with petal slots attached with four varactors (SMV1408) is designed. Its impedance value increases from $j390\Omega$ to $j1710\Omega$ in S band by decreasing the reverse bias voltage of varactor from 20V

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 四川省教育厅自然科学重点项目(17AZ0384)

作者简介: 周永宏(1979-), 男, 四川夹江人, 副教授, 博士生, 研究方向为电磁阻抗表面设计及应用. E-mail: scnczyh@163.com

通讯作者: 陈星. E-mail: xingc@live.cn

to 0.2V. Based on this tunable cell, the authors propose the concept of the reconfigurable surface-wave waveguide and its feasibility has been proved by HFSS. In the simulation, the proposed waveguide can provide multi-guided paths and the paths can be adjusted in real time; meanwhile, to prevent the energy leak of surface-waves, the guide-wave path is optimized by previous achievements in this paper, and the effectiveness of the suggestions is verified well by the simulation results.

Keywords: Surface-wave waveguide; Reconfigurable guided-wave paths; Petal slot; Varactor; High impedance surface cell; Energy leak of surface-waves

1 引言

表面波波导作为一种能束缚表面波并引导其沿指定路径传输的表面结构^[1],其在微波系统中的主要应用即是用于传输表面波能量,比如二维电磁能量传输系统^[1].在此基础之上衍生出了一些应用,诸如给某种特殊天线馈电(漏波全息天线^[2])、用于保护某种重要电路不受高能表面波的伤害^[1].

表面波波导并不是一个新兴概念,早在 20 世纪 50 年代 Rotman、Hougarly 和 Hansen 等研究者在研究波纹阻抗表面时就已提出波纹阻抗表面在某种条件下可以用来传输表面波能量^[3,4],即表面波波导.之后这方面的研究中断,直到 1996 年 Barnes 和 Kitson 等人提出凹凸表面,这种表面可以在某种条件下传输表面等离子体^[5,6].由于凹凸表面工作频率及加工成本极高,并未得到大规模应用.在 1999 年 Daniel Sievenpiper 等提出高阻表面后,指出这种基于高频 PCB 板的表面结构在带隙频带外支持表面波传播^[7,8],可以用作表面波波导.众所周知,高频 PCB 板由于具有质轻、价廉、易加工且加工精度高已在微波各个领域得到广泛应用^[8-10,14-16],所以在 1999 年之后十余年中,多位杰出学者如 Sievenpiper、Quarfoth、Gregoire,和 Kabakian 等设计出了各种各样的基于高频 PCB 板的表面波波导^[2,13-16],但这些波导绝大多数都存在如下问题:(1) 导波路径是固定不变的,不能依据实际情况实时改变导波路径;(2) 工作频段都很高,几乎都在 X 波段或以上频段.这两个问题限制了表面波波导的应用范围,尤其第一个问题意味着需要为每一条导波路径设计一个波导,将极大地提高设计加工成本.

为了解决上述问题,本文先设计了一个花瓣形开槽的正方形高阻单元,并加载了四个变容二极管(SMV1408),通过调整变容二极管的反向偏置电

压从 20 V 下降到 0.2 V,实现了在常用的 S 波段单元阻抗 $j390\Omega$ 增加至 $j1710\Omega$;然后基于该可调高阻单元,本文提出了可重构表面波波导概念,并通过 HFSS 仿真证明了该概念的可行性,该波导可以同时形成多条导波路径,并可实时调整导波路径;同时为了抑制表面波能量泄漏,我们根据可重构表面波波导的导波路径特点,利用我们之前的研究成果对导波路径的设计提出了相应的建议,仿真结果很好地验证了我们建议的有效性.该波导初次加工成本可能较高,但由于其导波路径具有可重构性,所以平摊下来成本低廉,具有较好的应用前景.

2 新型花瓣形开槽可调高阻表面单元设计

我们在文献[15]中使用的正方形开槽单元,该单元加载了四只型号为 SMV1405 的变容二极管,当反向偏置电压从 14 V 下降到 2.3 V 时,其阻抗值从 $j370\Omega$ 增加大到 $j780\Omega$ (中心频率为 1.65 GHz),我们在文献[15]中已经验证了这一阻抗范围不足以形成无泄漏的弯曲表面波波导,因此我们必须重新设计一个可调阻抗单元使其满足我们的要求.图 1 给出了重新设计的花瓣形开槽单元的顶视图和侧视图.

根据文献[16]中的仿真方法可以获得图 1 所示高阻单元的色散曲线如图 2 所示.从图中可以看出,在频率为 2.85 GHz,当加载电容从 1 pF 增加至 4 pF 时,阻抗值从 $j390\Omega$ 增加至 $j1710\Omega$.根据 SMV1408 的数据手册可知,当反向偏置电压为 20 V 时,其等效电容为 1 pF;当反向偏置电压为 0.2 V 时,其等效电容为 4 pF.根据文献[15]中给出的分析方法,导波路径内外的阻抗值相差越大,其能量越不容易泄漏,这也是图 1 中给出的两个电压分别是 20 V 和 0.2 V 的原因.

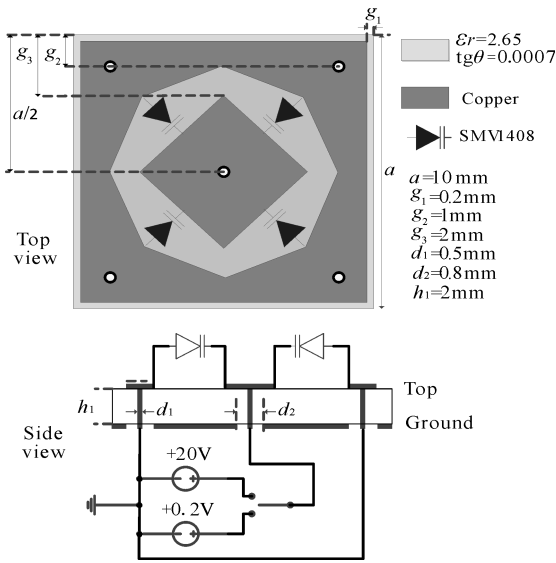


图 1 花瓣形开槽高阻表面单元

Fig. 1 A petal slotted high impedance surface cell

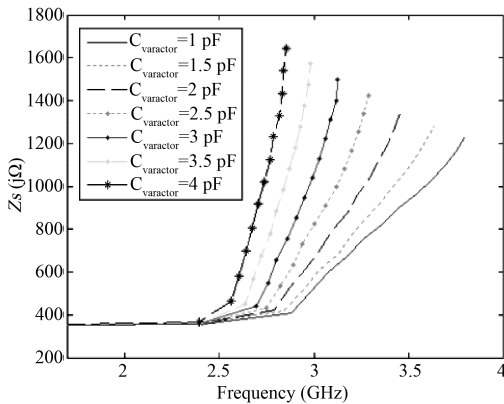


图 2 花瓣形开槽高阻单元色散曲线

Fig. 2 The dispersion curve of the petal-slotted cell

3 可重构表面波波导建模与仿真

3.1 MATLAB-HFSS 联合建模

由于形成一个可重构表面波波导需要很多单元, 虽然在进行波导仿真时可以用一个 sheet 单元来等效实际单元, 只需该 sheet 单元赋相应的阻抗值即可, 但由于单元数众多, 手动建模工作量依旧十分庞大, 因此我们利用 MATLAB-HFSS API 接口函数, 编写程序来进行建模工作. 本文用到的主要接口函数.

```
hfssScriptSetup(fid, Project, Design) % 设置工程名和 HFSS 设计名
```

```
hfssRectangleL(fid, Name, Start, Width, Height, Color) % 创建一个 sheet
```

```
hfssBoxL(fid, Name, Start, [Length Width Height]) % 创建一个真空盒子
```

```
hfssAssignImpedance(fid, Name, Object, Resistance, Reactance) % 给创建的 sheet 赋值
```

```
hfssAssignRadiation(fid, Name, Object) % 赋辐射边界条件
```

```
hfssAssignPE(fid, Name, ObjectList, [inf-GND = false]) % 赋值金属边界条件
```

```
hfssAssignWavePort(fid, PortName, SheetObject, nModes, isLine, intStart, intEnd, Units) % 赋值波导端口
```

MATLAB-HFSS 联合建模的过程可以简述如下.

首先在 MATLAB 中用 API 函数编写 *m* 文件, 编译通过后就会生成 *vbs* 脚本文件, 然后在 HFSS 中先建一个与 *m* 文件中设定的 HFSS 工程同名的空工程, 然后再在 HFSS 中运行前面生成的 *vbs* 脚本文件即可. 图 3 给出了由 30×30 个高阻单元构成的可重构波导 HFSS 仿真模型, 图中详细标注了各个边界条件、馈源及导波路径内外高阻单元的阻值.

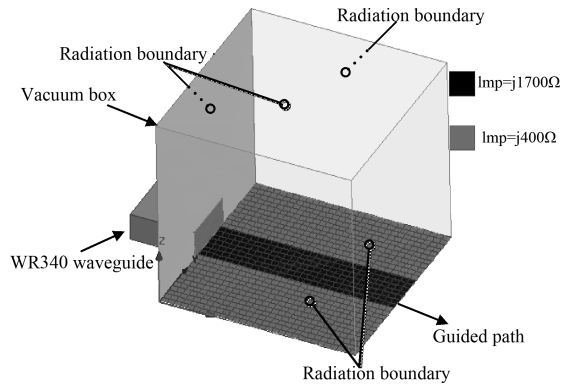


图 3 可重构表面波波导 HFSS 仿真模型

Fig. 3 The simulation model of the re-configurable surface wave wave-guides

3.2 可重构表面波导仿真

我们将在图 3 所示的阻抗表面上, 针对可重构波导的可重构性进行仿真, 其可重构性主要体现在导波路径位置重构、导波路径宽度重构及导波路径形状重构.

第一种情况: 导波路径位置改变. 在同一张阻抗表面上, 通过调整阻抗单元的反向偏置电压形成不同的导波路径, 然后用同样的馈源给波导馈电, 单元尺寸为 10 mm , 导波路径宽度为 $7 \times 10 \text{ mm}$ 略小于矩形波导的宽度 86.36 mm , 我们得到阻抗表面电场分布图如图 4 所示, 从图 4 中可以看出, 直波导变换位置后, 其依然能引导表面波传输且没有能量泄漏.

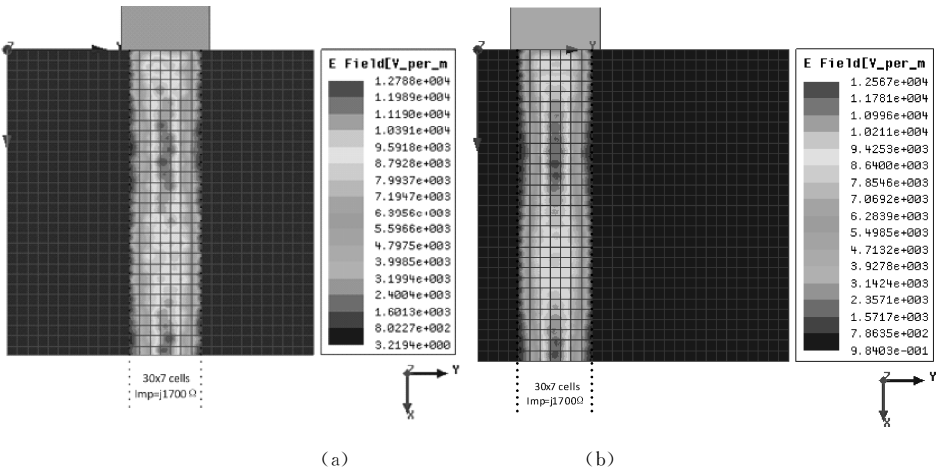


图 4 导波路径位置重构

Fig. 4 The position reconfiguration of the guided path

第二种情况:导波路径宽度重构.以图 4(b)为基准位置,将波导宽度变为 9 个单元,即 9×10 mm,我们得到图 5 所示电场分布图.从图 5 中可以

看出,直波导宽度从 70 mm 变为 90 mm 后,直波导依然能够引导表面波传输且没有能量泄漏.

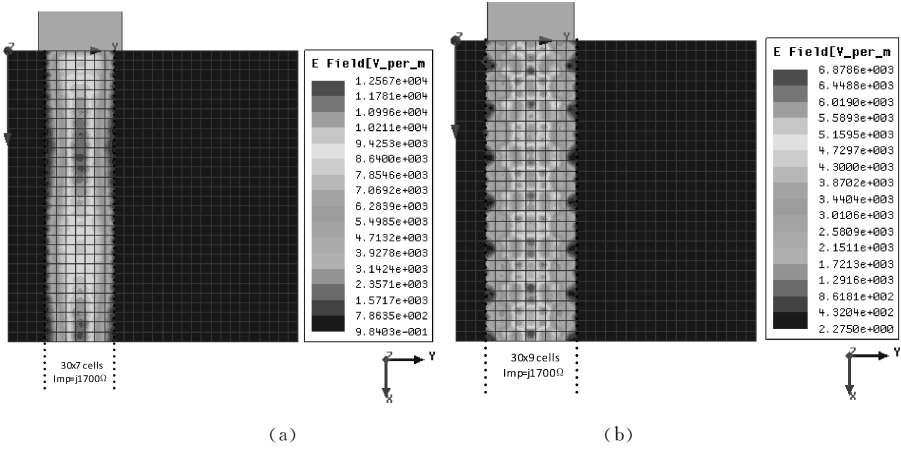


图 5 导波路径宽度重构

Fig. 5 The width reconfiguration of the guided path

第三种情况:导波路径形状重构.以下仿真先将波导宽度变为 60 mm,然后再向左弯折 90° ,紧接着将导波路径一分为二.该仿真既改变了路径宽

度,又进行了弯折、分裂,其仿真结果如图 6 所示.从图 6 中可以看出,改变宽度和弯折分裂均能正常引导表面波,且依然没有发生泄漏.

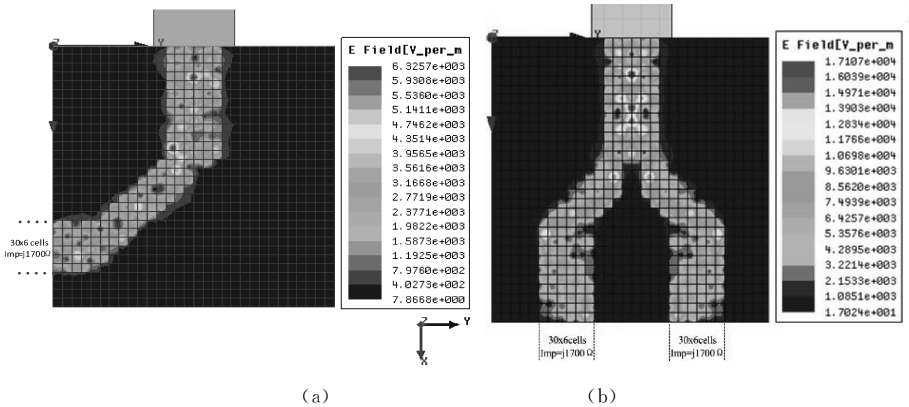


图 6 导波路径形状重构

Fig. 6 The shape reconfiguration of the guided path

4 可重构表面波波导能量泄漏抑制

由图 4~图 6 可以看出, 表面波能量均没有发生泄漏, 这是因为我们根据之前的研究成果^[15], 对表面波波导的宽度 d 、导波路径内外阻抗值 Z_1 和 Z_2 、工作频率 f 、以及导波路径弯折角度 γ 等关键参数做了精心设计, 如图 7 所示。

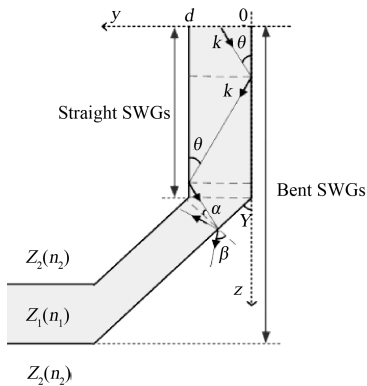


图 7 弯折波导示意图
Fig. 7 The bent waveguide

由文献[15]可知, 直波导时需满足如下关系才能不发生泄漏。

$$\varphi = 90^\circ - \sin^{-1} \left\{ \frac{\pi C_0}{d \cdot \omega \sqrt{1 - \frac{Z_1^2}{\eta_0^2}}} \right\} >$$

$$\sin^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1 - \frac{Z_2^2}{\eta_0^2}}}{\sqrt{1 - \frac{Z_1^2}{\eta_0^2}}} \right\} = \alpha_c \tag{1}$$

若导波路径发生弯折, 假设弯折角度为 γ , 则此时应该满足的关系式为

$$\psi = 90^\circ - \sin^{-1} \left\{ \frac{\pi C_0}{d \cdot \omega \sqrt{1 - \frac{Z_1^2}{\eta_0^2}}} \right\} - \gamma >$$

$$\sin^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1 - \frac{Z_2^2}{\eta_0^2}}}{\sqrt{1 - \frac{Z_1^2}{\eta_0^2}}} \right\} = \alpha_c \tag{2}$$

式中, C_0 为真空中的光速; η_0 是真空波阻抗; ω 是工作角频率。

根据(1)式可知, 直波导如果配置不正确也会发生能量泄漏。以图 4 中的仿真为例, 我们把阻抗值 Z_1 降低至 $j450\Omega$, 其余参数保持不变, 则(1)式为

$$\varphi = 61.1^\circ < \alpha_c = 69.4^\circ$$

则必然会发生泄漏。相应的仿真结果如图 8 所

示。从图 8 中可以看出, 在波导外部区域 (Outside region, 图中红色虚线框内) 出现了较多的漏波, 有学者认为, 直波导的能量泄漏可以忽略, 那是在各项参数正确配置的情况下, 直波导较弯曲波导而言不易发生泄漏。我们的理论说明, 如果参数配置不合理, 虽然是直波导依然会发生表面波泄漏, 所以(1)式对直波导的能量泄漏抑制具有指导意义。

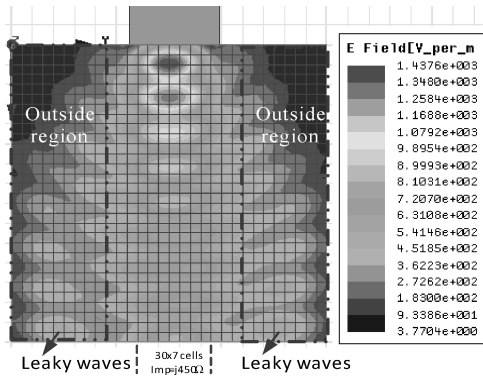


图 8 直波导发生能量泄漏
Fig. 8 The energy leakage of the straight waveguide

对弯折波导而言, 相比直波导更容易发生泄漏, 因为想让(2)式成立, 其对各项参数要求更高。我们前面已经验证了阻抗值对能量泄漏的影响, 下面我们看看弯折波导弯折角度的影响, 我们将导波路径宽度设为 70 mm, 导波路径内外阻抗值分别设为 $j1710\Omega$ 和 $j390\Omega$, 这样配置一般弯折是不会有泄漏的 (参见图 6), 若我们将弯折角度设为 90° , 则此时(2)式无论如何都不再成立。则此种情况下, 必然会有表面波泄漏, 图 9 给出了相应的仿真结果。所以(2)式对弯折波导的能量泄漏抑制具有指导意义。

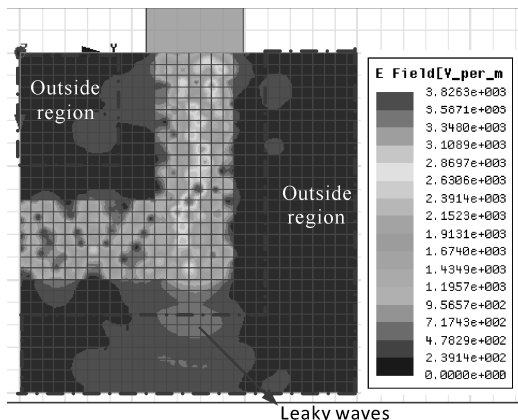


图 9 90° 弯折波导发生能量泄漏
Fig. 9 The energy leakage of the 90° bent waveguide

5 结 论

本文设计了一个花瓣形开槽的可调高阻单元,通过调整变容二极管的反向偏置电压,实现了阻抗值从 $j390\Omega$ 增加到 $j1710\Omega$ ($f=2.85\text{ GHz}$),然后基于该单元构建了一个 30×30 的阻抗表面,通过调整单元的反向偏置电压,在同一个阻抗表面上分别形成了不同宽度、不同位置的直波导、弯折波导、分叉波导,并给出了相应的仿真结果.同时参考我们之前的研究成果,给出了直波导和弯折波导的能量泄漏分析公式.该公式可以简单描述为:导波路径内外阻抗值的差值越大、导波路径宽度越宽、导波路径弯折角度越小,则该表面波波导越不易发生能量泄漏.但需要指出的是,要实现本文提出的可重构表面波波导,还需要设计一个电源自动控制电路,否则只能手动调整,其实时性和准确性难以保证.

参考文献:

- [1] Gregoire D J, and Kabakian A V. Surface-wave waveguides [J], IEEE Antenn Wirel Propag Lett, 2011, 10: 1512.
- [2] Sievenpiper D F, Colburn J, Fong B, *et al.* Holographic artificial impedance surfaces for conformal antennas [C]. Washington DC: IEEE Antennas Propagat Symp, 2005.
- [3] Rotman W. A study of single-surface corrugated guides [J]. Proc IRE, 1951, 39: 952.
- [4] Hougardy R, Hansen R. Scanning surface wave antennas-oblique surface waves over a corrugated conductor [J]. IRE Trans Antenn Propag, 1958, 6: 370.
- [5] Kitson S, Barnes W, Sambles J. Full photonic band gap for surface modes in the visible [J]. Phys Rev Lett, 1996, 77: 2670.
- [6] Barnes W, Priest T, Kitson S, *et al.* Physical origin of photonic energy gaps in the propagation of surface plasmas on gratings [J]. Phys Rev B Condens, 1996, 54: 6227.
- [7] Sievenpiper D J. High-impedance electromagnetic surfaces [D]. Los Angeles: University of California, 1999.
- [8] Sievenpiper D J, Zhang L, Broas R F J, *et al.* High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band [J]. IEEE Trans Microw Theor Tech, 1999, 47: 2059.
- [9] 孙浩然, 黄卡玛. 一种结构新颖的微带前向耦合器设计及其应用 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 1049.
- [10] 郑治, 陈星, 许光辉, 等. 介质覆盖层对微带天线带宽的展宽作用 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 326.
- [11] Quarfoth R, Sievenpiper D F. Impedance surface waveguide theory and simulation [C]. Spokane, WA: IEEE Antenna Propagat Symp, 2011.
- [12] Quarfoth R, Sievenpiper D F. Simulation of anisotropic artificial impedance surface with rectangular and diamond lattices [C]. Spokane, WA: IEEE Antennas Propagat Symp, 2011.
- [13] Quarfoth R, Sievenpiper D F. Artificial tensor impedance surface waveguides [J]. IEEE Trans Antenn Propag, 2013, 61: 3597.
- [14] Quarfoth R, Sievenpiper D F. Nonscattering waveguides based on tensor impedance surfaces [J]. IEEE Trans Antenn Propag, 2015, 63: 1746.
- [15] Zhou Y H, Chen X, Luo Z J. Analysis and simulation of energy leakage for the surface-wave waveguide based on tunable impedance cells [J]. Appl Computat Electrom, 2016, 31: 230.
- [16] Luo Z J, Chen X, Long J, *et al.* Nonlinear power-dependent impedance surface [J]. IEEE Trans Antenn Propag, 2015, 63: 736.