

# 基于 DGS 的微带 DBR 双工器的研究

陈春红, 李 娜, 吴 文

(南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏南京 210094)

**摘 要:** 提出了一种高隔离度的微带双工器结构. 在微带双重行为谐振(DBR)滤波器中引入基于缺陷地结构(DGS)的低通滤波器, 利用 DGS 的慢波特性减小 DBR 滤波器奇偶模之间的相速差, 从而改善滤波器的上阻带特性. 使用本文提出的微带滤波器结构设计并研制了一 C 波段的微带双工器, 仿真和测试结果表明: 微带双工器的插入损耗小于 1.3dB, 隔离度大于 65dB.

**关键词:** 双重行为谐振; 缺陷地结构; 双工器; 滤波器

**中图分类号:** TN713      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 01-0014-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.01.003

## Study on the Microstrip DBR Diplexer Based on DGS

CHEN Chun-hong, LI Na, WU Wen

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** This paper presents a high isolation microstrip diplexer. The lowpass filter based on defected ground structure (DGS) is introduced into the dual behavior resonator(DBR) microstrip bandpass filter. The slow-wave characteristic of DGS can balance the phase-velocity difference between even-mode and odd-mode of DBR filter, so the rejection in the up stop band of filter can be improved. The DBR filter based on DGS has been analyzed. On this basis, a C-band microstrip diplexer has been developed, and the simulation and experimental result indicate that the insertion loss is less than 1.3dB and the isolation is better than 65dB.

**Key words:** dual behavior resonator(DBR); defected ground structure(DGS); diplexer; filter

## 1 引言

双工器在无线通信系统中有很重要的应用. 收发双工器一般由两个带通滤波器和一个 T 型结组成, 是一个三端口网络, 包括天线端口、发射端口和接收端口, 其主要作用是使接收信道和发射信道共用一个天线, 可以同时工作<sup>[1]</sup>. 由于微带双工器制作简单、结构紧凑、容易集成, 具有广阔的应用前景, 因此微带线结构双工器是当前双工器的主要发展方向之一.

双工器的隔离度和插入损耗等性能指标直接影响通信系统的性能. 为了使双工器具有好的隔离度, 构成双工器的滤波器应该具有高的频率选择特性以抑制不需要信号. 因此可以选用具有传输零点的滤波结构, 从而使得双工器的频率响应具有高的选择特性. 文献[2]中采用了抽头发夹型结构, 这种结构具有可控的传输零点, 研制的 S 波段的双工器的阻带隔离度可达 40dB 以上. 文献[1]中的开路环结构利用交叉耦合引进传输零点, 可以在一定程度上改善阻带抑制制度, 研制的 S 波段的双工器在整个工作频段内的隔离度都大于 40dB, 但

是增加了设计的复杂度和加工难度. 在文献[3]中, 采用了一种改进的 DBR 结构设计了微带双工器, DBR 可以实现中心频率和传输零点的独立控制, 采用 DBR 设计带通滤波器具有插入损耗小和阻带衰减较好的优点, 研制的 Ku 波段双工器下阻带的隔离度大于 40dB, 而上阻带的隔离度只有 24dB.

对于远距离通信系统, 例如卫星通信系统, 由于通信距离远, 要求发射功率比较大, 而接收机在天线输入端的等效噪声功率要很低(即灵敏度很高), 因此对双工器的隔离度提出了更高的要求, 往往需要达到 60dB 以上. 到目前为止, 文献报道的微带双工器达不到此要求.

通常增加级数可以增大滤波器的阻带抑制制度, 从而提高双工器的隔离度, 但是该方法不仅会增加插入损耗, 而且也不能有效提高上阻带抑制制度. 其主要原因是微带线带通滤波器一般由耦合谐振器构成, 而耦合谐振器中奇模、偶模相速不同, 从而导致滤波器的上边带不陡峭、通带不对称和产生寄生通带, 因此滤波器在上阻带的抑制制度总是比下阻带差. 为了解决上述问题, 可以采用 DGS 等慢波结构来增加奇模传播的电长度, 减

小奇偶模之间的相速差,从而改善微带滤波器的上阻带特性。

本文在 DBR 带通滤波器中引入基于 DGS 的准椭圆低通滤波器,改善 DBR 滤波器的上阻带抑制度,利用该微带滤波器结构设计并研制了一 C 波段的微带双工器,最后给出了测试结果。

## 2 基于 DGS 的 DBR 滤波器

### 2.1 DBR 滤波器

DBR 是由两种不同的并联带阻结构组成的,每一个带阻结构基于本身的基本谐振条件引进一个传输零点<sup>[4]</sup>。通过适当地连接多个带阻结构,可在较低和较高的阻带中间产生一个通带响应。DBR 结构有多种形式,其中开路分支线形式的 DBR 比较适合需要在离通带较近的两边都形成高抑制度阻带的设计,且结构简单,加工方便,因此本文采用开路线形式的 DBR 来构成滤波器,如图 1 所示。

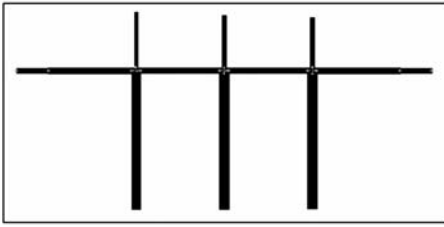


图1 开路线DBR滤波器结构

开路分支线的并联组合形式对传输零点频率没有任何影响,因此,分支线的输入阻抗可以被独立地用来设置传输零点。根据参数的数目和带阻结构的初始行为,DBR 允许以下参数的独立控制:通带的中心频率、在较低衰减带的传输零点和在较高衰减带的传输零点。对传输零点进行合理选择(可通过选择邻近的多个零点来得到具有一定带宽的高抑制度阻带),可以使阻带的抑制度尽量高。

DBR 可以通过斜率参数  $b$  来建模,对于一个  $n$  阶 DBR 滤波器,其中第  $j$  个谐振器可以定义如下<sup>[5]</sup>:

$$\theta_{j1} = \frac{\pi}{2k_{j1}} \quad (1)$$

$$\theta_{j2} = \frac{\pi}{2k_{j2}} \quad (2)$$

$$Z_{j1} = -\frac{Z_{j2} \tan \theta_{j1}}{\tan \theta_{j2}} \quad (3)$$

$$Z_{j2} = Z_0 \frac{\pi}{b_j} \left[ \frac{1 + \tan^2 \theta_{j2}}{4k_{j2}} - \frac{(1 + \tan^2 \theta_{j1}) \tan \theta_{j2}}{4k_{j1} \tan \theta_{j1}} \right] \quad (4)$$

其中,  $k_{jk}$  为传输零点对应频点与通带中心频率的比值。

DBR 只是实现了低通原型中的串联电感,并联电容可由导纳变换来实现。根据相对带宽、斜率参数  $b$  和查表得到的低通原型滤波器的元件值,可以计算四分

之一波长导纳变换器的特性阻抗<sup>[5]</sup>:

$$Z_{C01} = Z_0 \sqrt{\frac{g_a b_1 w}{\omega_1 g_0 g_1}} \quad (5)$$

$$Z_{Cj,j+1} = Z_0 \sqrt{\left( \frac{w}{\omega_1} \sqrt{\frac{b_j b_{j+1}}{g_j g_{j+1}}} \right)} \quad (6)$$

$$Z_{Cn,n+1} = Z_0 \sqrt{\frac{g_n b_n w}{\omega_1 g_n g_{n+1}}} \quad (7)$$

其中,  $g_0 = g_1 = 1$  为电路的终端导纳,  $w$  为相对带宽,  $g_j$  为等波纹的切比雪夫低通原型滤波器的元件值,  $\omega_1'$  为低通原型的截止频率即  $\omega_1' = 1$ 。

对于一个可用于 C 波段卫星通信系统的双工器,接收频段为 3.7 ~ 4.2GHz,发射频段为 5.9 ~ 6.4GHz。因此,接收滤波器通带为 3.7 ~ 4.2GHz,阻带为 5.9 ~ 6.4GHz;发射滤波器通带为 5.9 ~ 6.4GHz,考虑到发射机镜像频率为 3.5 ~ 4GHz(本振频率为 4.95GHz),因此阻带为 3.5 ~ 4.2GHz。

设计滤波器时,首先需要确定滤波器的阶数,为了在得到高阻带抑制度的同时确保通带插入损耗也在可以接受的范围内,本文选定 3 阶切比雪夫滤波器。则已知的参数如表 1 所示,其中,  $F_0$  为通带中心频率。根据式(1) ~ (7),可以计算出 DBR 的特性阻抗、相位和导纳变换器的特性阻抗值,这是一组随  $b$  改变的参数。由于微带线尺寸的限制,将特性阻抗限制在 25 ~ 95Ω 范围内,因此,选定接收滤波器中的  $b = 5$ ,发射滤波器中的  $b = 4$ 。由此,可确定 DBR 滤波器的参数,如表 2 所示。介质板采用 Rogers 5880,相对介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ ,厚度  $h = 0.254\text{mm}$ 。用 ADS 的 LineCalc 工具可计算各段微带线的尺寸。

表 1 DBR 滤波器已知参数表(波纹 0.01dB)

	接收滤波器	发射滤波器
滤波器参数	$F_0 = 3.95\text{GHz}$ , $w = 17\%$	$F_0 = 6.15\text{GHz}$ , $w = 12\%$
DBR1 参数	$k_{11} = 0.65$ , $k_{12} = 1.49$	$k_{11} = 0.57$ , $k_{12} = 1.6$
DBR2 参数	$k_{21} = 0.65$ , $k_{22} = 1.56$	$k_{21} = 0.64$ , $k_{22} = 1.6$
DBR3 参数	$k_{31} = 0.65$ , $k_{32} = 1.62$	$k_{31} = 0.68$ , $k_{32} = 1.6$

表 2 DBR 滤波器参数表

	接收滤波器	发射滤波器
DBR1	$Z_{11} = 32.44$ , $\theta_{11} = 138.46$ $Z_{12} = 64.47$ , $\theta_{12} = 60.40$	$Z_{11} = 25.46$ , $\theta_{11} = 157.89$ $Z_{12} = 93.81$ , $\theta_{12} = 56.25$
DBR2	$Z_{21} = 31.44$ , $\theta_{21} = 138.46$ $Z_{22} = 56.12$ , $\theta_{22} = 57.69$	$Z_{21} = 36.57$ , $\theta_{21} = 140.63$ $Z_{22} = 66.69$ , $\theta_{22} = 56.25$
DBR3	$Z_{31} = 30.77$ , $\theta_{31} = 138.46$ $Z_{32} = 50.65$ , $\theta_{32} = 55.56$	$Z_{31} = 46.38$ , $\theta_{31} = 132.35$ $Z_{32} = 63.28$ , $\theta_{32} = 56.25$
导纳变换器	$Z_{C01} = Z_{C34} = 43.02$ $\theta_{C01} = \theta_{C34} = 90$ $Z_{C12} = Z_{C23} = 45.96$ $\theta_{C01} = \theta_{C34} = 90$	$Z_{C01} = Z_{C34} = 57.24$ $\theta_{C01} = \theta_{C34} = 90$ $Z_{C12} = Z_{C23} = 81.38$ $\theta_{C01} = \theta_{C34} = 90$

对滤波器进行仿真优化,频率响应如图2所示.由图2可知,发射滤波器通带内的插入损耗小于0.4dB,由于主要考虑其下阻带的抑制度,在3.5~4.2GHz范围内,衰减大于65dB,已达到了预定指标;接收滤波器在通带内的插入损耗小于0.4dB,但是上阻带衰减没有达到预定的指标要求,整个阻带5.9~6.4GHz内的衰减只有个别点可以达到60dB以上.

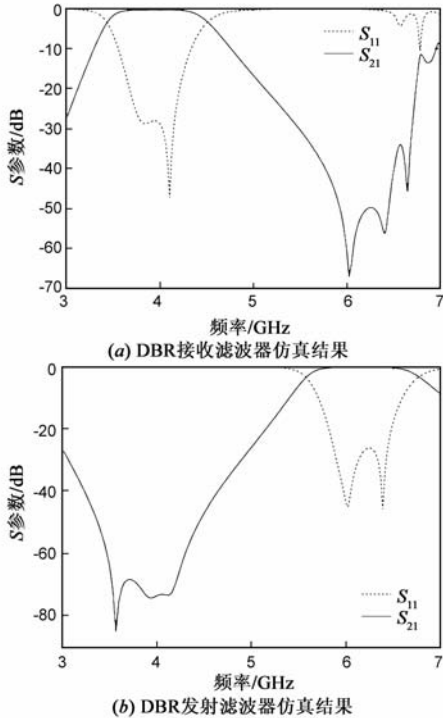


图2

由于耦合谐振器中奇模、偶模相速差会导致上边带不陡峭、通带不对称和产生寄生通带,故增加滤波器的阶数只能提高滤波器下阻带的抑制度,而不能有效提高上阻带抑制度,且会增加通带插入损耗.本文在DBR带通滤波器中引入基于DGS准椭圆低通滤波器,利用DGS慢波特性和增加奇模传播的电长度,减小奇偶模之间的相速差,从而改善滤波器的上阻带抑制度.

## 2.2 DGS低通滤波器

DGS是在微带线、共面波导等平面微波传输线的接地层上蚀刻出的一种周期或非周期形状的结构<sup>[6]</sup>.DGS结构可在一定的频率范围形成阻带,与一般的平面局域电磁带隙结构相比,DGS更容易定义单元结构和建模,虽然需要由几个DGS单元构成才显现周期特性,但是总尺寸仍相对较小.加入到DBR滤波器的DGS低通滤波器的设计需要考虑以下几个问题:

(1)由于DBR带通滤波器的通带和阻带比较接近,因此需要选择阻带比较尖锐的逼近函数,例如准椭圆低通滤波器.准椭圆低通滤波器除了与巴特沃斯和切比雪夫低通滤波器一样在串联支路中含有电感元件之

外,还具有高Q值的LC并联谐振电路.

(2)对于衰减极点的选择决定了对DBR滤波器上阻带的改善程度.

(3)DGS低通滤波器在DBR滤波器通带内的插入损耗要尽量小.

(4)DGS的形式很多,采用不同形式的DGS来实现滤波器具有不同的特性.

根据双工器的设计要求,可确定基于DGS的准椭圆低通滤波器的指标为:通带为3.7~4.2GHz,通带内的插入损耗小于0.5dB,阻带为5.9~6.4GHz,阻带衰减大于20dB.

选用5阶准椭圆低通滤波器模型,将集总元件滤波器和DGS结构及加宽微带线之间对应起来.哑铃型DGS结构的电磁仿真结果类似一个低通滤波器;螺旋型DGS具有多频带隙谐振特性,且第一个阻带比较陡峭.因此,串联电感由哑铃型DGS来实现<sup>[6]</sup>,LC并联谐振电路由螺旋型DGS来实现,而并联支路的电容是由加宽微带线来实现的.需注意的是,加宽微带线的引入产生了寄生的附加电感.基于此,可得到基于DGS的准椭圆低通滤波器的等效电路,如图3所示<sup>[7]</sup>.

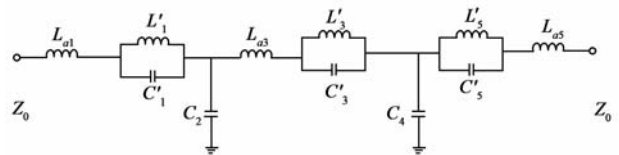


图3 DGS准椭圆低通滤波器原理图(5阶)

根据查表和文献<sup>[7]</sup>中的公式,可得DGS准椭圆低通滤波器的集总参数值,然后用曲线拟合的方法得到DGS的最终尺寸,如表3所示.

表3 DGS滤波器参数表

	集总元件值	尺寸参数值
加宽微带线	$Z_0 = 50\Omega$ , $L_{a,1} = L_{a,5} = 0.2\text{nH}$ $L_{a,3} = 0.9\text{nH}$ , $C_2 = C_4 = 1.05\text{pF}$	$w = 2\text{mm}$ , $l = 13\text{mm}$
哑铃型 DGS	$L'_1 = L'_5 = 0.77\text{nH}$ $C_1 = C_5 = 0.44\text{pF}$	正方形边长: $a = 2.3\text{mm}$ 窄长缝隙宽: $w = 0.3\text{mm}$
螺旋型 DGS	$L'_3 = 1.58\text{nH}$ $C_3 = 0.42\text{pF}$	$w = 0.2\text{mm}$ , $l = 24.6\text{mm}$ 卷折次数为 3

基于DGS的准椭圆低通滤波器的结构如图4所示,其频率响应如图5所示.从图5可看出,DGS滤波器在DBR滤波器的第一个寄生通带附近形成了宽阻带,

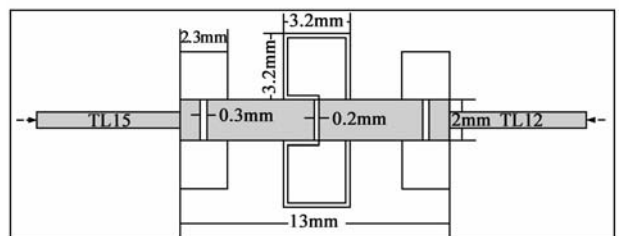


图4 基于DGS的准椭圆低通滤波器的结构

在 5.9~6.4GHz 范围内的抑制度大于 30dB.

### 2.3 基于 DGS 的 DBR 滤波器

如图 5 所示, DBR 滤波器在高频处存在多个寄生通带, 从而使得滤波器的上边带变得不陡峭, 上阻带抑制度变差, 上下通带不对称. 而 DGS 低通滤波器可在 DBR 滤波器的第一个寄生通带附近形成较宽的阻带. 把基于 DGS 的准椭圆低通滤波器加入 DBR 滤波器, 通过抑制 DBR 带通滤波器的第一个上寄生通带来改善 DBR 滤波器的上阻带抑制度.

加入 DGS 结构的 DBR 滤波器如图 6 所示, 从图中可看出, 没有改变原有的 DBR 滤波器结构, 只在 DBR 滤波器的馈线端加入了一段微带线, 微带线底部加入了 DGS 结构. 仿真得到如图 7 所示的频率响应. 由图中可以看出, 滤波器的上边带变得更加陡峭, 上阻带范围内的抑制度明显提高, 证明这种结构确实可以有效增大上阻带抑制度.

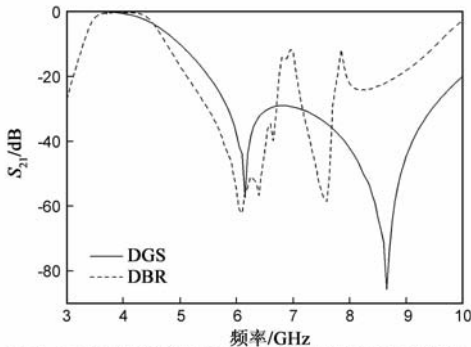


图5 DBR接收滤波器和DGS滤波器的频率响应

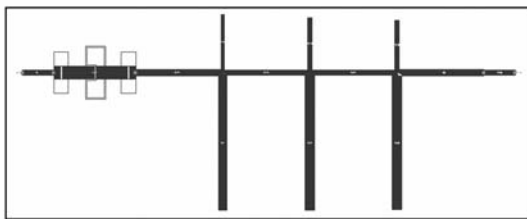


图6 加入DGS结构的DBR滤波器

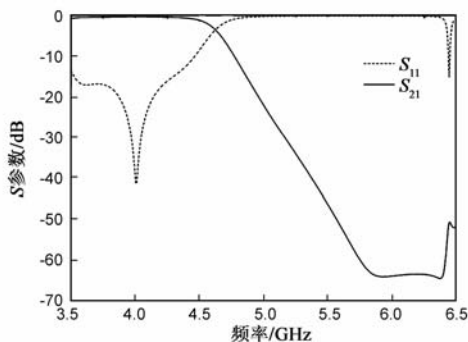


图7 基于DGS的DBR滤波器的频率响应

### 3 基于 DGS 的微带 DBR 双工器

将发射滤波器和接收滤波器连接到天线端口, 为

了使发射滤波器和接收滤波器互不影响, 需要设计微带 T 型结. 在发射滤波器前串联一段阻抗为  $50\Omega$ 、长度为四分之一接收频率导波长的微带线, 目的是使发射滤波器的输入端在接收频率处是短路的, 经过阻抗变换后变成开路, 不会影响发射端口<sup>[7]</sup>. 相对应的, 在接收滤波器前需串联长度为四分之一发射频率导波长的  $50\Omega$  微带线. 用 ADS 软件进行优化, T 型结的最终长度定为:  $l_R = 3\text{mm}$ ,  $l_T = 4.5\text{mm}$ .

基于 DGS 的微带 DBR 双工器的电路版图如图 8 所示. 实物如图 9 所示. 需要注意的是, 由于 DGS 结构不可以接地, 因此将电路板放进金属屏蔽盒时, 需要留出一个空气槽. 经过仿真, DGS 下方的空气槽的高度应大于 3mm, 为了不影响性能, 将空气槽留得大一些, 最终确定尺寸为  $12\text{mm} \times 17\text{mm} \times 4\text{mm}$ .

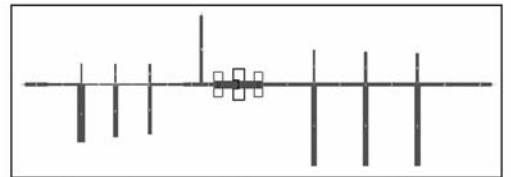


图8 基于DGS的微带DBR双工器的版图

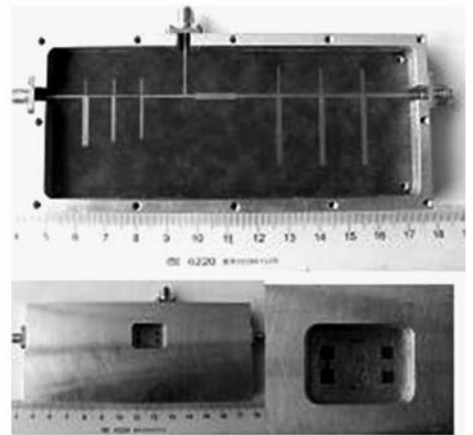


图9 基于DGS的微带DBR双工器

仿真结果和测试结果如图 10 所示. 实测回波损耗大于 13dB, 通带插入损耗小于 1.3dB, 隔离度大于 65dB, 与仿真结果相当吻合.

### 4 结论

本文在 DBR 带通滤波器中引入基于 DGS 的准椭圆低通滤波器, 利用 DGS 慢波特性增加奇模传播的电长度, 减小奇偶模之间的相速差, 提高滤波器上阻带陡度和通带对称性, 并抑制寄生通带. 采用该滤波器结构成功设计了 C 波段微带双工器, 仿真和测试结果表明本文所提出的微带双工器具有隔离度高、插入损耗小、体积小和重量轻等优点, 在卫星通信系统中具有很好的应用前景.

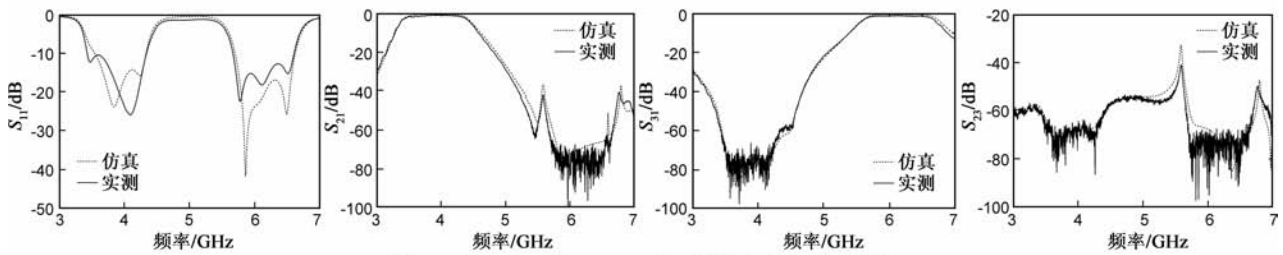


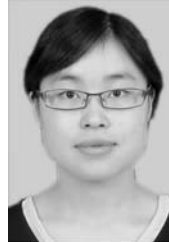
图10 基于DGS的微带DBR双工器的仿真与测试结果

## 参考文献

- [1] 曹海林, 陈世勇, 杨士中. 一种微带开路环双工器的设计[J]. 重庆邮电学院学报, 2006, 18(1): 26 - 29.
- [2] 张安祺, 贺冬, 尹秋艳. S波段基于微带抽头发夹型双工器设计[J]. 现代电子技术, 2007, (19): 11 - 13.
- [3] K Singh, K Ngachenchaiah, D Bhatnagar, S Pal. Notch implemented dual behavior resonator filter and diplexer at Ku-band [J]. Microwave Journal, 2010, 53(4): 206 - 216.
- [4] Cédric Quendo, Eric Rius, Christian Person. Narrow bandpass filters using dual-behavior resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(3): 734 - 743.
- [5] Cédric Quendo, Eric Rius, Christian Person. Narrow bandpass filters using dual-behavior resonators based on stepped-impedance stubs and different-length stubs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(3): 1034 - 1044.
- [6] Jong-Sik Lim, Chul-Soo Kim, Dal Ahn. Design of low-pass filters using defected ground structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(8): 2539 - 2545.
- [7] 杨瑾屏, 吴文. 新型 DGS 准椭圆低通滤波器的研究[J]. 电子学报, 2008, 36(2): 235 - 238.

YANG Jin-ping, WU Wen. Research on novel quasi-elliptic low-pass filters using defected ground structure[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 235 - 238. (in Chinese)

## 作者简介



陈春红 女, 1978年2月出生于江苏宜兴. 分别于2001年、2004年获得南京理工大学光电学院学士学位和硕士学位, 现为南京理工大学讲师, 在读博士, IEEE会员. 主要研究方向为微波毫米波射频电路和微波毫米波探测技术.

E-mail: xiyan\_21@sohu.com



吴文 男, 1968年生于江苏江都, 博士, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE高级会员, 现任南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点学科实验室副主任. 主要从事微波毫米波理论与技术、微波毫米波探测技术和多模复合探测技术等方面的教学和研究工作.

E-mail: wuwen@mail.njust.edu.cn