

# 基于准行波阵的毫米波引信微带频扫天线

王大鹏, 王震, 徐利平, 李勇军

(西安机电信息技术研究所, 西安 710065)

**摘要:**针对传统毫米波引信天线无法兼顾宽波束、高增益、小尺寸的问题,提出了一种基于准行波阵的毫米波引信微带频扫天线;该天线由5个微带贴片串联构成,天线尺寸仅为 $20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,微带贴片之间距离固定,通过频率扫描方式改变天线主波束指向;毫米波引信在弹丸落地前根据落角信息计算出天线的主波束倾角,然后通过调整引信的工作频率使频扫天线主波束垂直照射到目标;仿真与实测结果显示:天线工作频率为 $30.2 \sim 35.6\text{ GHz}$ ,在整个频带内增益均大于 $11\text{ dB}$ 且幅值基本保持不变;天线通过频扫方式其E面主波束探测角可以达到 $78^\circ$ ;该天线高增益、小尺寸,天线的频扫特性使引信在不同落角情况下均能保持对目标的最大探测能力。

**关键词:**引信天线;毫米波;频扫天线;微带天线阵列;准行波天线

**本文引用格式:**王大鹏,王震,徐利平,等.基于准行波阵的毫米波引信微带频扫天线[J].兵器装备工程学报,2017(6):156-160.

**Citation format:**WANG Da-peng, WANG Zhen, XU Li-ping, et al. A Frequency Scanning Microstrip Antenna Based on Quasi-Traveling Wave Array for Millimeter Wave Fuzes [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(6):156-160.

中图分类号:TJ43+4.1

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)06-0156-05

## A Frequency Scanning Microstrip Antenna Based on Quasi-Traveling Wave Array for Millimeter Wave Fuzes

WANG Da-peng, WANG Zhen, XU Li-ping, LI Yong-jun

(Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** A frequency scanning microstrip antenna based on quasi-traveling wave array for millimeter wave fuzes was designed to solve the problem that traditional millimeter wave fuze antenna cannot take into account the wide beam, high gain and small size. This antenna consists of five space-fixed series microstrip patches with the size of  $20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ . The main beam direction was changed along with frequency scanning. According to the impact angles, the main beam of the frequency scanning antenna was irradiated vertically to the target by adjusting the fuze frequency. Simulated and measured results showed that the antenna had good performance between  $30.2 \sim 35.6\text{ GHz}$  and the gain is greater than  $11\text{ dB}$ ; The antenna E plane can cover  $78^\circ$  by frequency scanning. With the high-gain and small-size frequency scanning antenna, the fuze can keep the best performance of target detection at different impact angles.

**Key words:** fuze antenna; millimeter wave; frequency scanning antenna; microstrip antenna array; quasi-traveling wave antenna

随着毫米波技术的不断成熟,近几年来毫米波引信探测技术已经成为国内外引信技术研究的热点,作为引信发射和接收终端的毫米波天线也成为当前研究的主要课题之一。

引信的落角范围、结构尺寸和炸高等技术指标决定了引信天线必须具备以下3个特点:一是宽波束,天线主波束宽度必须能够覆盖引信落角范围;二是小尺寸,天线必须能够在狭

小空间内安装;三是高增益。天线增益要尽量高一些以便提高引信的探测灵敏度和探测精度。传统的毫米波引信多采用单片微带天线或压缩波导缝隙天线等占用空间较小的天线,这些天线具有波束较宽、体积小优点,能够保证毫米波引信在大落角变化范围下对目标探测信号的一致性,但天线增益相对较低,影响了探测器的探测灵敏度和精度。

频扫天线具有增益高、主波束方向可以随着天线工作频率的变化而变化的特点,同时可以很好兼顾引信的大落角变化范围和天线高增益的要求。文献[1]设计了一种用于弹体前端的毫米波微带准行波引信天线,该天线增益大于12 dB,在32.6~37.1 GHz范围内进行波束扫描可以获得弹体子午面任意倾角 $\theta \pm 20^\circ$ 天线波束扫描。其缺点是天线尺寸较大且波束扫描角度较窄,当引信落角范围较大时无法使用。文献[2]和文献[3]介绍了一种波导缝隙阵列毫米波引信天线,天线均具有高增益、可在一定频率范围内进行波束扫描的特点,但由于天线尺寸过大,无法在炮弹等常规弹药毫米波引信上使用。

针对传统毫米波引信天线无法兼顾宽波束、小尺寸、高增益的问题,本文提出了一种基于准行波阵的毫米波引信微带频扫天线。

## 1 准行波微带天线

任何一个横电磁波(TEM)传输结构都可以改造成一个行波天线<sup>[4]</sup>。行波天线的结构有多种形式,例如采用微带梳状线串联结构<sup>[5]</sup>,微带矩形贴片串联结构<sup>[6-8]</sup>,微带偶极子贴片串联结构<sup>[9]</sup>,波导缝隙阵列结构<sup>[10]</sup>等,它们都是通过微带天线终端接各种形式的负载实现天线的行波传输功能。行波天线终端负载会消耗部分输入行波天线的能量,导致天线的传输效率降低。为提高行波微带天线的传输效率,可采用微带贴片级联方式构成微带串馈天线阵列<sup>[11]</sup>,阵列中每一个微带贴片都作为前一个贴片的负载,通过调节各个微带贴片和馈线的宽度使微带天线串馈阵列输入阻抗匹配到50  $\Omega$ 。相比端接负载的行波天线,该微带天线传输的并非严格意义上的行波,故称为准行波微带天线。

准行波微带天线各单元之间的相位关系可通过变化各微带贴片单元之间的距离来调节。该天线阵列由一端馈电,各微带贴片单元之间通过馈线串联,可以通过调整微带贴片单元之间的距离获得希望的任意波束指向。准行波微带天线示意图如图1。

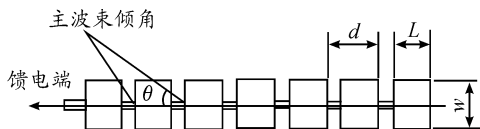


图1 准行波微带天线示意图

假设天线主波束倾角 $\theta$ 从馈电端算起,其计算公式<sup>[1]</sup>为

$$\cos\theta = \lambda_0 \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{\lambda_e} \right) \quad (1)$$

其中: $\lambda_0$ 为电磁波在空气中的波长; $d$ 为辐射贴片单元之间的距离; $\lambda_e$ 为电磁波在介质中的波长,其计算公式<sup>[1]</sup>为

$$\lambda_e = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\xi_r}} \quad (2)$$

其中 $\xi_r$ 为天线基板的介电常数。

由式(1)可得:通过调节微带贴片单元间距可实现天线的主波束倾角 $\theta$ 为从馈电端到负载端的任意角度值。当微带贴片单元间距 $d < \lambda_e$ 时,天线主波束偏向馈电端;当微带贴片单元间距 $d > \lambda_e$ 时,天线主波束偏向负载端。

## 2 准行波微带频扫天线

频扫天线全称为频率扫描天线,是指天线波束指向随频率的少量改变而有规律地大范围改变的天线。本文所设计的基于准行波阵的毫米波引信微带频扫天线采用5个微带贴片串联的方式,天线长20 mm,宽8 mm,较小的尺寸使其可以很轻松地安装于弹体头部或侧壁。此处以该天线安装于弹体侧壁的方式说明天线的频扫特性与弹体落角的匹配特性。

如图2所示,弹头方向沿X轴正向,天线馈电方向与弹头方向相同。天线正面由5个微带辐射贴片组成的微带串馈阵,背面覆铜作为接地面,天线馈电端开有直径为0.6 mm的通孔,从天线背面通过通孔对天线进行馈电。采用3 mm厚聚四氟乙烯风帽对微带天线进行保护,风帽内表面距天线高度4 mm,外表面与弹体共形。

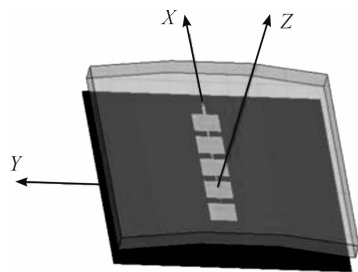


图2 毫米波引信微带频扫天线模型

天线基板采用罗杰斯4350B板材,相对介电常数为3.5,厚度为0.254 mm。微带贴片单元尺寸可根据公式<sup>[6]</sup>计算得:长度为2.4 mm,宽度为2.9 mm。贴片单元间距 $d$ 主要由主波束倾角决定。取弹体落角 $\theta_1 = 70^\circ$ ,此时若要天线主波束倾角 $\theta$ 垂直照射到地面,则主波束倾角 $\theta = 90^\circ - \theta_1 = 20^\circ$ 。由式(1)和式(2)得,微带贴片辐射单元间距 $d$ 为

$$d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\xi_r} + \cos\theta} \quad (3)$$

由上式计算可得天线主波束倾角 $\theta = 20^\circ$ 时,微带贴片辐射单元间距 $d$ 为3 mm。

为观察微带贴片辐射单元间距 $d$ 为3 mm时天线的频扫特性,将式(2)代入式(1)得:

$$\cos\theta = \frac{\lambda_0}{d} \sqrt{\xi_r} = \frac{c}{df_0} \sqrt{\xi_r} \quad (4)$$

由上式可以看出,天线的主波束倾角随着工作频率的变化而变化。当微带贴片辐射单元间距 $d=3\text{ mm}$ ,天线工作频率从 $31\text{ GHz}$ 扫描到 $35\text{ GHz}$ 时,主波束倾角从 $12^\circ$ 变化到 $50^\circ$ 。

### 3 天线特性仿真及实验验证

#### 3.1 天线特性仿真

用 Ansoft HFSS 软件建立的天线和风帽模型如图 2 所示。天线基板选用 $0.254\text{ mm}$ 厚的罗杰斯 4350B 板材,微带贴片单元长 $L=2.4\text{ mm}$ ,宽 $W=2.9\text{ mm}$ ,微带贴片单元间距 $d=3\text{ mm}$ ,风帽选用 $3\text{ mm}$ 厚聚四氟乙烯材料,风帽内表面距天线高度为 $4\text{ mm}$ 。其中弹头方向沿 $X$ 轴正向且与天线馈电方向相同。仿真结果如图 3 所示。

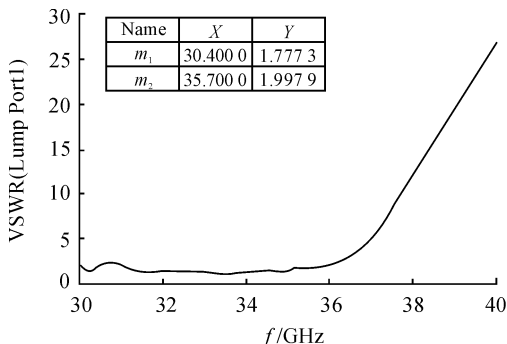


图 3 天线电压驻波比 VSWR

由图 3 可以看出,该天线在 $30.5\sim 35.7\text{ GHz}$ 频率范围内具有良好的输入阻抗特性(电压驻波比 $\text{VSWR}<2$ ),相对频带宽度达到 $15.7\%$ ;其中,图 4 为频扫天线在 $30.5\text{ GHz}$ 、 $32\text{ GHz}$ 、 $34\text{ GHz}$ 、 $35.7\text{ GHz}$ 四个频点的天线 3D 方向图;图 5 为频扫天线工作频率为 $34\text{ GHz}$ 时天线 E 面与 H 面辐射方向图;图 6 为频扫天线 E 面频扫特性图,图中分别给出了天线工作在 $31\text{ GHz}$ 、 $32\text{ GHz}$ 、 $33\text{ GHz}$ 、 $34\text{ GHz}$ 、 $35\text{ GHz}$ 五个频点时的天线 E 面方向图。

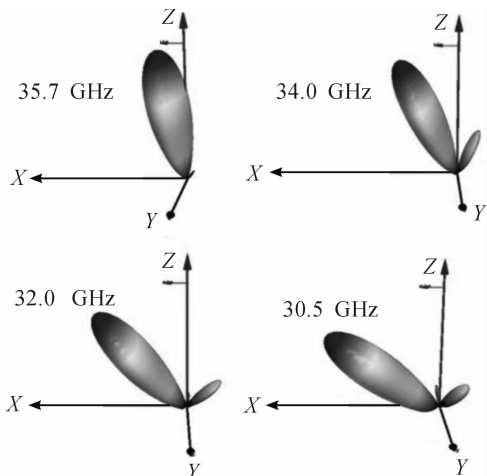


图 4 频扫天线在 4 个频点的 3D 方向

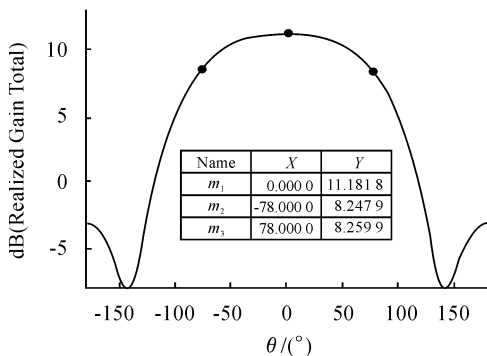
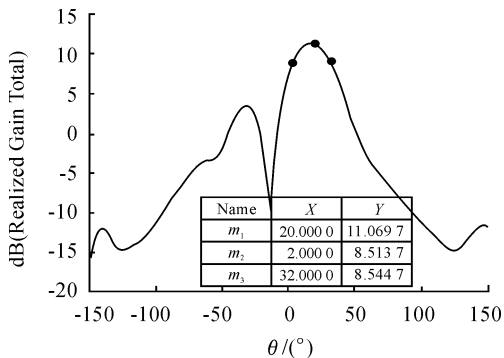


图 5 天线 E 面与 H 面辐射方向

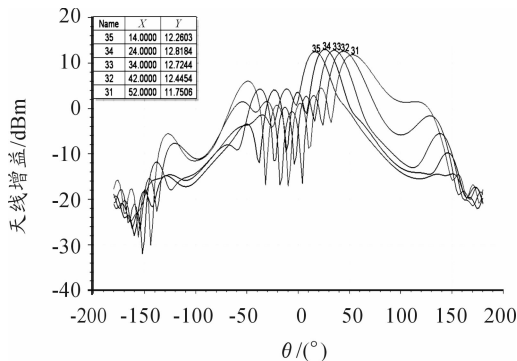


图 6 天线的 E 面频扫特性

图 4、图 5 和图 6 的仿真结果显示:当微带贴片单元间距 $d=3\text{ mm}$ ,天线工作频率为 $34\text{ GHz}$ 时,天线主波束倾角 $\theta=20^\circ$ ,E 面( $XOZ$ 面)内半功率波瓣宽度为 $30^\circ$ ,H 面( $YOZ$ )内半功率波瓣宽度为 $156^\circ$ ;天线在工作频率范围内增益均大于 $11\text{ dB}$ ,当天线工作频率从 $31\text{ GHz}$ 扫描到 $35\text{ GHz}$ 时,天线的主波束倾角 $\theta$ 从 $52^\circ$ 变化到 $14^\circ$ 。仿真结果与计算结果基本一致。

由仿真结果可计算得:当天线工作频率从 $30.5\text{ GHz}$ 扫描到 $35.7\text{ GHz}$ 时,天线主波束倾角可变化 $47^\circ$ 。由于天线 E 面波束宽度为 $30^\circ$ ,则该频扫天线正常工作时 E 面的探测角度范围可以达到 $77^\circ$ 。

#### 3.2 实验验证

##### 3.2.1 天线输入阻抗特性测试

基于图 2 的仿真模型及天线模型具体尺寸参数值,本文对所设计的小型化毫米波频扫微带天线进行了实际加工制

作,天线基板选用罗杰斯 4350B,介电常数为 3.5,板材厚度为 0.254 mm,天线阵阵长 17 mm,宽 2.9 mm,风帽选用介电常数为 3.5,厚度为 3 mm 聚四氟乙烯材料。图 7 为加工天线的实物照片。

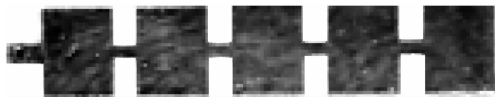


图 7 毫米波准行波频扫微带天线实物照片

如图 8 所示,采用安立知 37369C 适量网络分析仪对天线的电压驻波比(VSWR)进行测量。为保证测量精度,测试时首先将天线焊接到天线座体上以保证天线背面完全接地,天线座体的背面安装有 K 型接头,天线馈电孔与 K 型接头之间由玻璃绝缘子进行连接。最后将 K 型接头连接到适量网络分析仪的测试电缆。

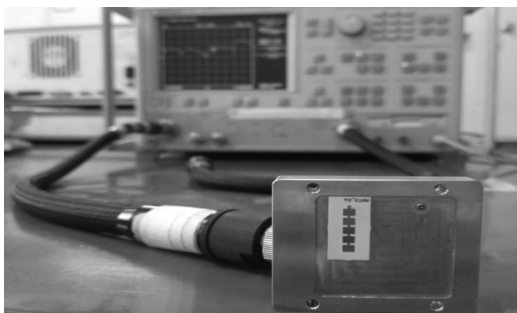


图 8 天线电压驻波比测试图片

由图 9 可以看出,天线中心频率为 33 GHz,在 30.2 ~ 35.6 GHz 频率范围内具有良好的输入阻抗特性(电压驻波比  $VSWR < 2$ ),相对频带宽度达到 16.3%。测试结果(30.2 ~ 35.6 GHz)与仿真结果(30.5 ~ 35.7 GHz)基本吻合。

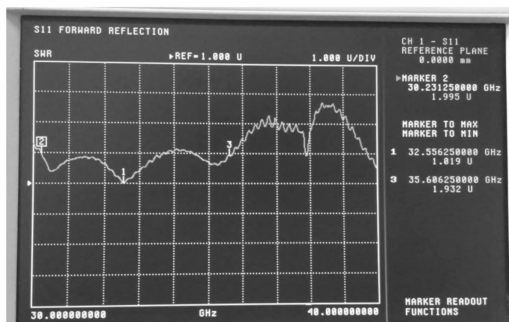


图 9 天线电压驻波比 VSWR 实测结果

### 3.2.2 天线频扫特性测试

在微波暗室对天线的频扫特性进行了测试。测试方法为将待测天线作为发射端固定在旋转台上,用标准波导天线作为接收端连接至频谱仪进行远场接收,收发天线之间的距离  $R = 20$  m(满足远场测试条件: $R > 2D^2/\lambda$ , $D$ 为接收天线口径, $\lambda$ 为天线工作波长),收发天线的架设高度均为 4 m。旋转台每转两度记录一次数据。图 10 为天线 E 面频扫特性测

试图片。图 11 为天线 E 面频扫特性测试结果。

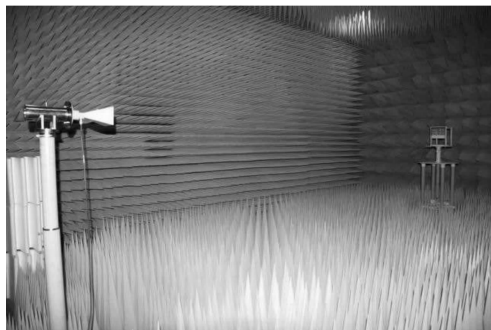


图 10 天线 E 面频扫特性测试图片

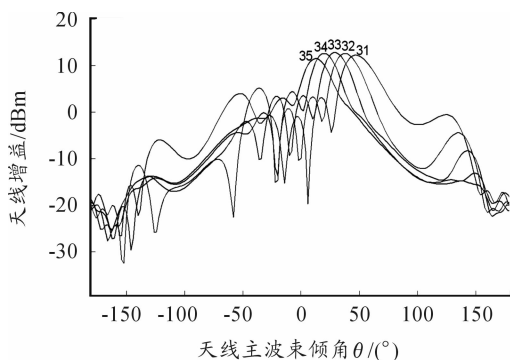


图 11 天线 E 面频扫特性测试结果

从图 11 可以看出,当天线工作频率从 31 GHz 扫描到 35 GHz 时,天线增益大于 11 dB 且幅值基本不变,天线 E 面波束倾角  $\theta$  从 48° 变化到 12°。实测该天线相对带宽达到 16.3%,经计算得:当天线工作频率从 30.2 GHz 扫描到 35.6 GHz 时,天线 E 面波束倾角可变化 48°,由于天线 E 面波束宽度为 30°,则该频扫天线正常工作时 E 面的探测角度范围可以达到 78°,能够满足一般毫米波引信的使用要求。测试结果与仿真结果基本一致。两者之间的差异主要是由于天线加工误差引起的,实际加工的天线微带贴片之间的距离  $d$  略小于设计值( $d = 3$  mm)从而导致天线主波束倾角实测结果略小于仿真结果。

## 4 结论

本文提出了一种应用于毫米波引信的基于准行波阵的毫米波引信微带频扫天线。该微带频扫天线主波束倾角  $\theta$  随着天线工作频率变化而变化的特性使引信在不同落角情况下均能保持对目标的最大探测能力。仿真与实测结果表明:天线工作频率为 30.2 ~ 35.6 GHz(电压驻波比  $VSWR < 2$ ),在整个频带内增益均大于 11 dB 且幅值基本不变;该频扫天线正常工作时 E 面的探测角度范围可以达到 78°;天线尺寸仅为 20 mm × 8 mm,可以方便地安装于弹体头部或侧壁任何部位,能够满足一般毫米波引信的使用要求。该微带频扫天线是一种性能较好、实用性很强的毫米波引信天线。

## 参考文献:

- [1] 刘景萍,吴大俊.毫米波引信共形天线的设计[J].制导与引信,2008,29(2):15-17.
- [2] 王月娟,张立东.宽频带引信天线的设计[J].制导与引信,2004,25(2):37-41.
- [3] 王杰.毫米波引信天线[J].制导与引信,1999,10(2):51-57.
- [4] 黄忠华,崔占忠,牛良永,等.小口径弹药引信介质天线设计[J].兵工学报,1999,20(1):76-78.
- [5] 林昌禄.天线工程手册[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [6] RIDA A, TENTZERIS M, NIKOLAOU S. Design of Low Cost Microstrip Antenna Arrays for MM-Wave Applications [J]. IEEE International Symposium on Antennas & Propagation, 2011(5):2071-2073.
- [7] LEE MS, KIM YH. Design and Performance of a 24 GHz

- Switch-Antenna Array FMCW Radar System for Automotive Applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(5):2290-2297.
- [8] JAYACHANDRAN M, GUPTA S C. Frequency Scanning Microstrip Antenna (S-band) [J]. International Radar Symposium, 1983, 27(2):175-180.
- [9] NESIC A, DRAGAS S. Frequency Scanning Printed Array Antenna [J]. Antennas & Propagation Society International Symposium, 1995, 2(2):950-953.
- [10] SUN Z, DAI Z, XUAN X, et al. A Wideband Frequency Scanning Microstrip Antenna Array with Low Profile [J]. International Conference on Mechatronic Sciences, 2013(11):3081-3084.
- [11] 何林涛.机载毫米波有源相控阵天线热设计研究[J].兵器装备工程学报,2016(5):115-119.
- [12] 约翰·克劳斯.天线[M].北京:电子工业出版社,2005.

(责任编辑 杨继森)

(上接第150页)

## 参考文献:

- [1] 俞宽新,丁晓红,庞兆光.声光原理与声光器件[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 宋雁鹏,李晓,王志斌.声光可调谐滤波器驱动系统设计[J].超声与声光,2015,37(4):721-725.
- [3] 张春光.基于超光谱成像系统的声光可调滤波技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- [4] 苏金明,王永利. MATLAB7.0 实用指南[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [5] 杨丹,赵海滨,龙哲. MATLAB 图像处理实例详解[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [6] NEELAM GUPTA, VITALY B, VOLOSHINOV. Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range [J]. Applied optics, 2007, 46(7):1081-1088.

- [7] 曾洪.声阻抗匹配层 OPCM 超声换能器的优化设计和实验研究[D].镇江:江苏大学.
- [8] 李存波,谢本亮. TeO<sub>2</sub> 超声换能器的外部匹配网络设计[J].超声与声光,2011,35(5):768-770.
- [9] 徐晓伟.超声换能器的阻抗匹配分析[J].超声与声光,2014,36(5):745-747.
- [10] RICHARD CHI-HSI LI (李缉熙). 射频电路工程设计[M].鲍景福,唐宗熙,张彪,译.北京:电子工业出版社,2011.
- [11] 徐兴福. ADS2011 射频电路设计与仿真实例[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [12] 张泽红,赵治国,雷波,等.宽光谱声光可调滤光器[J].超声与声光,2013,35(1):19-23.
- [13] REINHOLD LUDWING, GENE BOGDANOV. 射频电路设计——理论与应用[M].王子宇,王心悦,译.北京:电子工业出版社,2013.

(责任编辑 杨继森)