

LFMCW 雷达差频信号滤波电路设计*

王斯盾 刘 鹏

(后勤工程学院后勤信息与军事物流工程系 重庆 401311)

摘要: 理想情况下 LFMCW 雷达差频信号在规则区内是标准正弦信号,但大量实测信号表明,差频信号中含有成分复杂的噪声信号,严重影响了雷达的测距精度。采用模拟滤波器,是滤除这些噪声信号最直接的办法。针对 LFMCW 雷达差频信号信号频带与噪声频带相近的特点,介绍了一种计算简单的模拟椭圆滤波器设计方法,分别设计了椭圆函数低通、高通滤波器,然后通过级联的方式构成带通滤波器。实测实验表明,该方法设计的带通滤波器可以有效地降低噪声干扰,提高 LFMCW 雷达差频信号质量。

关键词: LFMCW 雷达;差频信号;椭圆滤波器;滤波电路

中图分类号: TN713 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10

Design of difference frequency signal filter circuit for LFMCW radar

Wang Sidun Liu Peng

(Department of Logistics Information & Logistics Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China)

Abstract: Under ideal conditions, the LFMCW radar difference frequency signal is a standard sinusoidal signal in the regular region, but a large number of measured signals show that the difference frequency signal contains complex noise signals, which seriously affects the ranging accuracy. The use of analog filters is the most direct way to filter out these noise signals. Aiming at the characteristics of the frequency band of LFMCW radar is similar to the noise band, a simple design method of simulated elliptic filter is introduced. The elliptic function low pass and high pass filter are designed respectively, and then the cascade method is used to form a band pass filter. Experimental results show that the proposed band-pass filter can effectively reduce the noise interference and improve the quality of LFMCW radar frequency difference signal.

Keywords: LFMCW radar; difference frequency signal; elliptic filter; filter circuit

0 引言

线性调频连续波(linear frequency modulated continuous wave, LFMCW)雷达是线性调频体制和连续波雷达融合的成果,集成了各自的优点,具有时宽带宽积大、最小测量距离近、测量精度高等优点,常用于汽车、火车防撞,液位、物位测量。近年来,随着无人驾驶技术的迅速发展,LFMCW 雷达作为重要的传感器,应用更加广泛^[1-4]。

由 LFMCW 雷达的测距原理可知,差频信号的质量直接决定了 LFMCW 雷达的测距精度。在理想情况下,差频信号在规则区内是频率时变的标准正弦信号^[5]。但是,经过大量的实测 LFMCW 雷达差频信号发现,国内外雷达射频前端的差频信号中都含有成分复杂的噪声信号。由于这些噪声的存在,使整个雷达系统的性能大大降低,并使后端频率估计算法在某些情况下不能正常工作,误判率较高。

因此,必须要对差频信号进行滤波处理^[6-9]。

采用模拟滤波器是 LFMCW 雷达滤波去噪最直接有效的办法。常用的模拟滤波器有巴特沃斯(Butterworth)、切比雪夫(Chebyshev)以及椭圆函数(Elliptic)滤波器。其中巴特沃斯和切比雪夫滤波器在无限大阻带处衰减为无限大。巴特沃斯滤波器在通带和阻带都是平稳的;切比雪夫滤波器在通带平坦、阻带等波纹或是阻带平坦、通带等波纹;椭圆函数滤波器在通带和阻带都会产生纹波,在相同的性能要求下,比前两种滤波器需要的阶数更低,而衰减曲线更陡峭^[10]。由文献[11]可知,LFMCW 雷达差频信号频带与噪声频带往往很近,因此,采用椭圆滤波器是最优的。

1 LFMCW 雷达测距原理与噪声分析

1.1 LFMCW 雷达测距原理

在锯齿波调频方式下 LFMCW 雷达发射信号、回波信

收稿日期:2017-04

* 基金项目:国家自然科学基金(61271449,61302175)、重庆市自然科学基金(CSTC2015jcyjBX0017)资助项目

号时频谱图如图 1 所示。

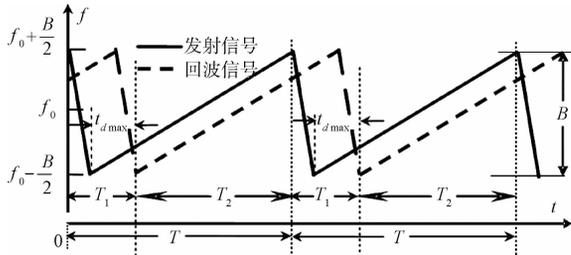


图 1 发射信号、回波信号时频谱

其中, f_0 、 B 、 T 分别表示发射信号的调频中心频率、调频带宽、调频周期, $\mu = B/T$ 表示锯齿波调频斜率。

在一个调频周期 T 内, 发射信号和回波信号的时频谱相似, 只是回波信号相对于发射信号有最大为 t_{dmax} 的时延。由于发射信号在跨越调频周期时具有不连续性, 有一个很陡的下降沿, 因此将一个调频周期 T 分为非规则区(时宽为 T_1) 和规则区(时宽为 T_2)。

$$f_i(t) = f_0 - \frac{B}{2} + \mu t \quad 0 < t < T \quad (1)$$

$$f_r(t) = f_0 - \frac{B}{2} + \mu(t - t_d) \quad t_d \leq t < T + t_d \quad (2)$$

$$f_{bs}(t) = f_i(t) - f_r(t) = \mu t_d \quad t_d \leq t < T \quad (3)$$

在非规则区里, 差频信号频率急剧下降至 0, 难以从中提取距离信息^[12]。在规则区里, 差频信号频率 $f_{bs}(t)$ 为一个单频正弦信号, 计算得到公式:

$$f_{bs} = \frac{B}{T} \cdot t_d = \frac{2BR}{cT} \quad t_d \leq t < T \quad (4)$$

式中: R 为测量距离, c 为电磁波速度。由式(4)可知, 准确地得到差频信号的频率信息对于雷达测距精度至关重要。

1.2 差频信号的实测与噪声分析

本设计采用业界常用的 K 波段雷达射频前端, 德国 Innosent 公司生产的 IVS-167, 以测量距离 5 m 和 10 m 为例, 测得 5 m 处差频信号及其频谱如图 2 所示, 10 m 处差频信号及其频谱如图 3 所示。

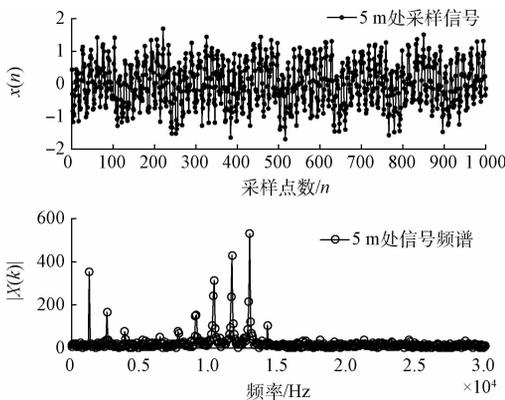


图 2 5 m 处差频信号及其频谱

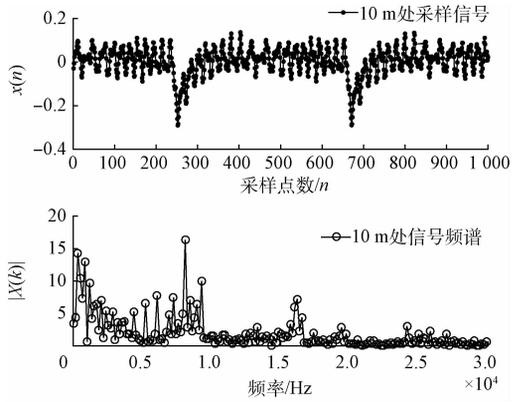


图 3 10 m 处差频信号及其频谱

从图 2、图 3 的雷达差频信号时域图中可以清楚地看出, 差频信号中有严重的三角波调幅信号干扰。在高频部分, 信号的波峰有明显的毛刺。从差频信号频谱图中也可以得知, 低频信号的能量与含有距离信息的差频信号能量几乎一样, 同时还有较为明显的谐波分量。此外还有明显的高频分量。

LFMCW 雷达差频信号的噪声主要来自两个方面^[13]: 外部环境噪声和内部系统噪声。

1) 外部环境噪声指雷达信号从射频前端到信号处理系统的过程中, 天线的热噪声、工业的干扰等。由雷达方程可知, LFMCW 雷达测量的距离与差频信号的功率成四次方的关系, 当测量距离较远时, 有用信号都被淹没在噪声信号之中。这部分的噪声一般表现为高斯白噪声。

2) 内部系统噪声一般指 LFMCW 雷达接收机和发射机同时工作时, 发射机的信号泄露到接收机产生的噪声。虽然 LFMCW 雷达发射功率较低, 但是如果收发间不能完善隔离, 回波信号将淹没在泄露的发射信号当中。这部分的噪声一般表现为三角波信号泄露。此外, 部分传统信号源采用压控振荡器(VCO), 由于其本身结构上的缺陷, 会产生功率起伏和线性度不高的现象, 同样也会产生一些噪声^[14]。

采用模拟滤波器是工业中雷达差频信号去噪的常用方法。本设计根据差频信号特点, 搭建模拟滤波器, 滤除高频噪声信号和低频泄漏三角波信号。

2 椭圆滤波器的设计

根据 LFMCW 雷达的实际需求, 本文设计测距范围为 5~20 m。调制信号为锯齿波信号, 由于为近距离测量, 选用调制信号频率为 750 Hz, 调制电压为 1.33~3.71 V, 对应的射频前端 IVS-167 发射频率为 24.020~24.178 GHz, 由此可知调频带宽为 158 MHz。由式(4)可计算得到差频信号的频率范围在 3.5~17 kHz。此外, 差频信号与噪声信号最大功率差约为 20 dB^[15]。

设计滤波器性能指标如下:

- 1) 通带截止频率: 分别为 $f_{pl} = 3.5 \text{ kHz}$ 和 $f_{ph} = 17 \text{ kHz}$;
- 2) 阻带截止频率: 分别为 $f_{sl} = 2.5 \text{ kHz}$ 和 $f_{sh} = 20 \text{ kHz}$;
- 3) 通带波纹 ϵ 小于 0.2 dB ;
- 4) 阻带衰减大于 20 dB ;
- 5) 特征阻抗为 20Ω 。

由以上性能指标可知,这是一个带通滤波器。带通滤波器一般由低通滤波器转为带通滤波器和低通滤波器与高通滤波器级联两种设计方式^[16]。本文采用一个截止频率为 17 kHz 的低通滤波器和一个截止频率为 3.5 kHz 的高通滤波器级联而成。

2.1 低通滤波器的设计

步骤 1: 确定滤波器阶数

计算本设计的陡度系数: $A_s = f_{sh}/f_c = 20\,000/17\,000 = 1.18$ 。反射系数: $\rho = \sqrt{\epsilon^2/(1+\epsilon^2)} = \sqrt{0.2^2/(1+0.2^2)} = 19.6\%$, 对应的通带波纹为 0.18 dB 。查阅椭圆滤波器阶数表可知,估算得到椭圆滤波器最小阶数 $N=5$ 即可满足设计要求。

步骤 2: 选择归一化滤波器

满足设计要求的归一化低通滤波器有 π 型和 T 型两种形式,如图 4 所示,但考虑到实际应用的电路调试过程中,电感的价格比电容高,体积比电容大,容差也远远大于电容的容差。因此,电路设计中一般采用较少的电感如图 4(a)所示。

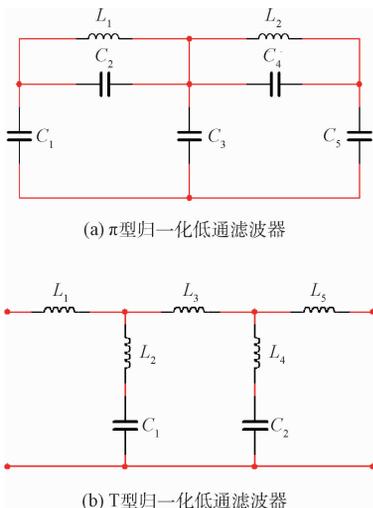


图 4 归一化低通滤波器

步骤 3: 计算去归一化元件值

查表得到归一化的电容和电感值,再用 $Z=20 \Omega$ 和频率标度系数 $FSF(2\pi f_c)$ 进行去归一化,去归一化原则为: $L' = (L \times Z)/FSF, C' = C/(FSF \times Z)$ 。

归一化元件值和计算得到的去归一化元件值如表 1

所示。

表 1 归一化元件值与去归一化元件值

元器件名称	归一化元件值	去归一化元件值
C_1/nF	0.120 31	56.32
C_2/nF	0.234 21	109.63
C_3/nF	1.613 39	755.23
C_4/nF	0.714 18	334.31
C_5/nF	0.817 71	382.77
L_1/mH	1.125 13	0.21
L_2/mH	0.769 73	0.14

利用 Multisim 对设计的滤波器进行仿真实验,搭建电路及仿真结果如图 5 所示,为了真实反映实际电路情况,仿真电路采用与计算结果近似的常用的元件值。

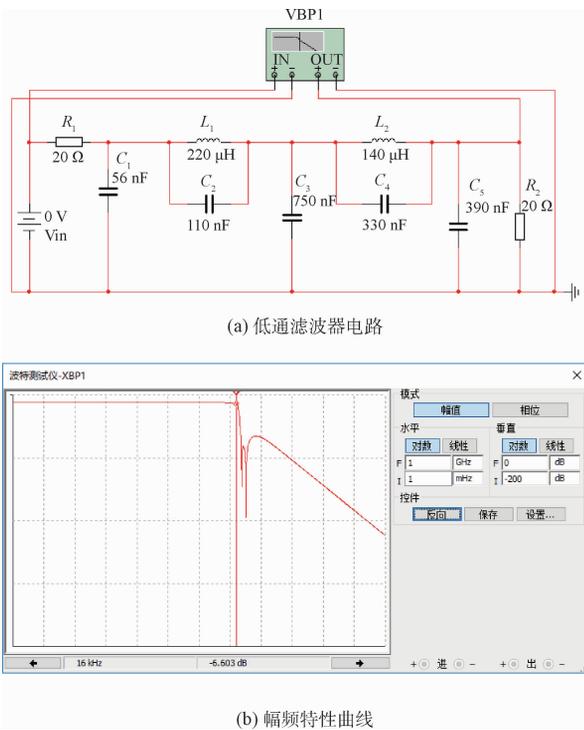


图 5 低通滤波器电路及幅频特性曲线

2.2 高通滤波器的设计

步骤 1: 确定滤波器阶数

计算本设计的陡度系数: $A_s = f_c/f_{sl} = 3\,500/2\,500 = 1.40$, 反射系数: $\rho = \sqrt{\epsilon^2/(1+\epsilon^2)} = \sqrt{0.2^2/(1+0.2^2)} = 19.6\%$, 对应的通带波纹为 0.18 dB , 由文献^[10]可知估算得到椭圆滤波器最小阶数 $N=5$ 即可满足设计要求。

步骤 2: 选择归一化滤波器

模拟高通滤波器与低通滤波器的网络结构具有对称性,把每个电感 $L(\text{H})$ 转换成数值为 $1/L(\text{F})$ 的电容,把每个电容 $C(\text{F})$ 转换为数值为 $1/C(\text{H})$ 的电感,利用元件值的

倒数可以归一化 LC 低通滤波器变换为相应的高通滤波器,信号源内阻和端接电阻不变,同时考虑使用尽量少的电感,得到的滤波电路如图 6 所示。

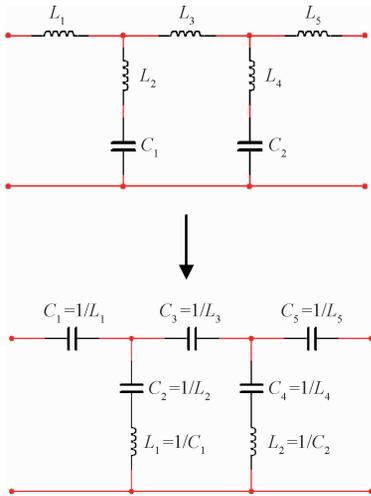


图 6 低通到高通归一化滤波器的变换

步骤 3: 计算去归一化元件值

查表得到归一化元件值,再用 $Z=20\ \Omega$ 和频率标度系数 $FSF(2\pi f_c)$,以及 $L' = \frac{L \times Z}{FSF}$, $C' = \frac{C}{FSF \times Z}$ 原则进行去归一化。

计算得到的去归一化元件值如表 2 所示。

表 2 归一化元件值与去归一化元件值

元器件名称	归一化元件值	去归一化元件值
$C_1/\mu\text{F}$	1.732 2	3.94
$C_2/\mu\text{F}$	11.990 4	27.26
$C_3/\mu\text{F}$	0.685 9	1.56
$C_4/\mu\text{F}$	5.592 8	12.72
$C_5/\mu\text{F}$	0.772 5	1.76
L_1/mH	0.805 6	0.73
L_2/mH	0.734 8	0.67

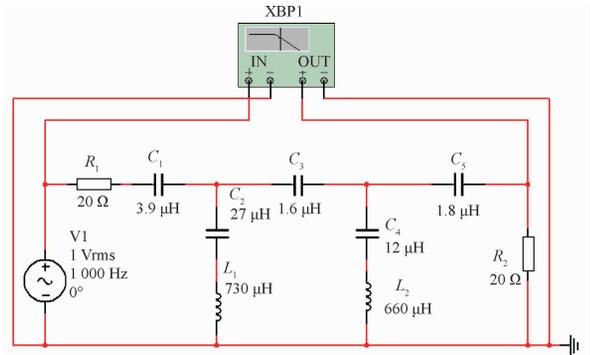
利用 Multisim 进行仿真实验,搭建电路及仿真结果如图 7 所示,为了真实反映实际电路情况,仿真电路采用与计算结果近似的常用的元件值。

2.3 带通滤波器的设计与测试

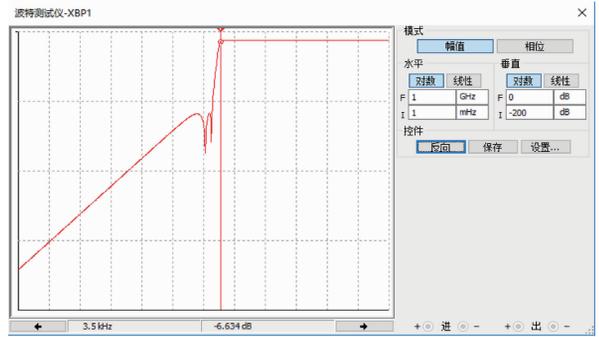
通过低通滤波器与高通滤波器级联的方式设计的带通滤波器如图 8 所示。

将此滤波器嵌入 LFM CW 雷达信号采集系统中,滤波后得到目标在 5 m 处信号频谱如图 9 所示,在 10 m 处信号频谱如图 10 所示。

由滤波前 5 m 和 10 m 处差频信号频谱与滤波后 5 m 和 10 m 处差频信号频谱作对比可知,滤波前 5 m 和 10 m

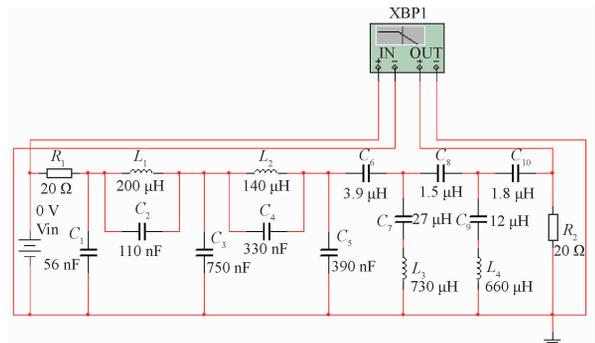


(a) 高通滤波器电路

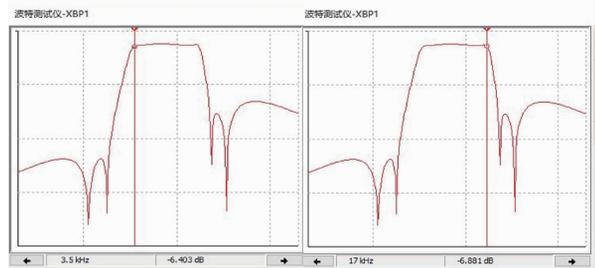


(b) 幅频特性曲线

图 7 高通滤波器电路及幅频特性曲线



(a) 带通滤波器电路



(b) 幅频特性曲线

图 8 带通滤波器电路及幅频特性曲线

处差频信号低频部分三角波泄漏信号干扰明显,难以判断有用的回波信号。滤波后 5 m 和 10 m 处低频部分的干扰

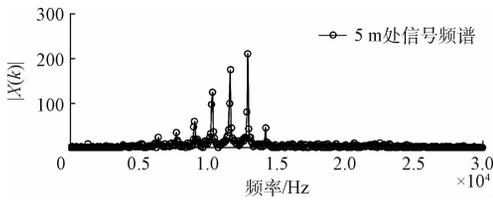


图 9 滤波后 5 m 处信号频谱

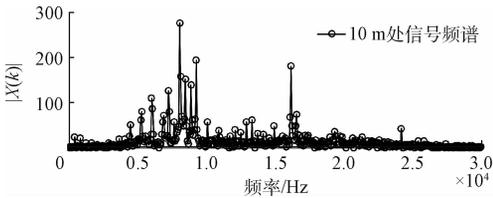


图 10 滤波后 10 m 处信号频谱

已经基本消除,高频部分噪声也得到了有效抑制。

3 结 论

通过分析实测 LFMCW 雷达差频信号与理论分析差频信号噪声来源,发现差频信号中有明显的三角波泄露问题。本文采取实际应用过程中常用的方法,搭建模拟带通滤波器,滤除低频部分的泄露三角波信号,得到了较为干净的距离信息频谱。同时也抑制了高频的噪声,提高了信号的信噪比。由于搭建模拟电路方法的自身的局限性,只能最大程度地消除或降低各种干扰和噪声及由这些干扰噪声引起的不确定性。因此要得到高精度的距离信息,最大程度地消除噪声,仍需要考虑采用数字信号处理技术这一强有力的工具。

参考文献

- [1] ZENG S. A target tracking system using sensors of multiple modalities [J]. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 2013, 11(4):384-404.
- [2] 靳璐,付梦印,王美玲,等. 基于视觉和毫米波雷达的车辆检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(5):465-471.
- [3] 骆云志,雷雨能,王钊. 基于毫米波雷达和 CCD 摄像机信息的 D-S 融合方法[J]. *数据采集与处理*, 2014, 29(4):648-653.
- [4] 戚昊琛,胡智文,张鉴. FMCW 雷达系统的双模方向判断模块研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(5):486-492.

- [5] 肖玮,涂亚庆,刘良兵,等. 多段同频正弦信号频谱融合的 LFMCW 雷达测距算法[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(1):94-103.
- [6] 蔡潇,陈敬军. 高灵敏度大动态范围船用导航雷达对数中频放大器设计[J]. *雷达与对抗*, 2016(1):56-59.
- [7] 戚昊琛,张鉴,高伟清,等. FMCW 雷达测距系统的中频信号处理电路设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2015(8):29-32.
- [8] 张鉴,戚昊琛,高伟清,等. 汽车主动防撞系统的中频信号处理模块[J]. *电子器件*, 2015, 38(5):1114-1119.
- [9] 汪红,张杰,张大彪. 调频连续波(FMCW)雷达信号调理电路[J]. *仪表技术与传感器*, 2012(1):105-107.
- [10] 陈实,艾春森,何轲,等. 一种 AGC 控制的低噪声水声接收机[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(9):67-71.
- [11] 刘贵如,周鸣争,陈效华,等. 基于连续波毫米波雷达的车辆开门防撞预警技术[J]. *江苏大学学报:自然科学版*, 2015, 36(6):634-640.
- [12] 沈艳林,涂亚庆,刘鹏,等. 非整周期采样信号频率估计的相频匹配方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(6):1221-1226.
- [13] 宋斌. FMCW 雷达物位计收发前端的设计[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [14] HONG J, CHEON C. Simple VCO nonlinearity correction algorithm based on EMD in FMCW radar system [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(17):1484-1486.
- [15] 陈天琪,杨浩,戴志伟. 24 GHz FMCW 车载测距雷达系统设计[J]. *电子技术应用*, 2016, 42(12):37-40.
- [16] 杨茂辉,徐军,赵青,等. 一种新型小型化宽阻带低通滤波器设计[J]. *微波学报*, 2010, 26(4):61-64.

作者简介

王斯盾,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为智能检测与智能控制。

E-mail: danube.live@qq.com