

## 基于微波雷达的近距离移动物体检测系统设计

金远凡, 秦会斌

(杭州电子科技大学 新型电子器件与应用研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 为了快速识别一定范围内的移动物体并提高检测的准确度, 提出了一种基于 STM32 的微波雷达近距离移动物体的检测系统设计。该系统使用电磁波的多普勒原理来检测移动物体的反射波波长差异。通过 STM32 和优化算法对接收的信号进行处理以提高检测判定速度和准确度。最后对系统测试, 表明该系统具有成本低、工作环境稳定、快速准确显示的能力。

**关键词:** 微波雷达; 多普勒原理; 算法优化; 移动物体检测

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200528

中文引用格式: 金远凡, 秦会斌. 基于微波雷达的近距离移动物体检测系统设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 129-133.

英文引用格式: Jin Yuanfan, Qin Huibin. Design of a near range moving object detection system based on microwave radar[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 129-133.

## Design of a near range moving object detection system based on microwave radar

Jin Yuanfan, Qin Huibin

(Institute of New Electron Device &amp; Application, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to quickly identify moving objects within a certain range and improve the accuracy of detection, a close-range moving objects detection system based on STM32 and microwave radar is designed. The system uses the Doppler principle of electromagnetic waves to detect differences in the wavelength of reflected waves from moving objects. The received signals are processed through STM32 and optimization algorithms to improve the speed and accuracy of detection. Finally, the system test shows that the system has the ability of low cost, stable working environment, fast and accurate display.

**Key words:** microwave radar; Doppler principle; algorithm optimization; moving object detection

## 0 引言

近距离移动物体检测是基于无线测距技术上发展的, 常见的无线测距方法有超声波、激光、雷达测距<sup>[1]</sup>。近年来, 由于调频连续波雷达的研究和技术发展得到了重大进步, 其现在具有体积小、发射功率小、测量精度较高等优点<sup>[2]</sup>。

目前, 调频连续波雷达主要采用数字信号处理的方式来对回波差频信号进行处理<sup>[3]</sup>。但是这种方式一般只能获取目标的距离信息。本文考虑到移动物体具有位移量, 在对产生的差频信号加入多普勒频移分析, 在获得距离信息的基础上得到目标物体的速度信息。同时为了优化数据显示实时性不足的问题, 优化了 FFT 算法并在 STM32 中对信号数据处理进行简化, 最后通过警报灯的形式显示结果。

## 1 检测原理

微波雷达所产生的微波具有波长短、方向性好、速度快等优点。同时产生的微波具有反射的特性, 当碰到阻挡物的时候, 其中一部分微波将被反射回来<sup>[4]</sup>。反射

的波长随着阻挡物的参数改变而改变, 如果阻挡物是静止的, 那么波长是固定的, 当遇到运动的物体时, 波长会发生变化, 波长的变化和运动物体的方向有关。远离发射装置时, 反射波的波长比波源的波长长, 频率变高; 靠近发射装置时, 反射波的波长比波源的波长短, 频率变低。原理示意图如图 1 所示。

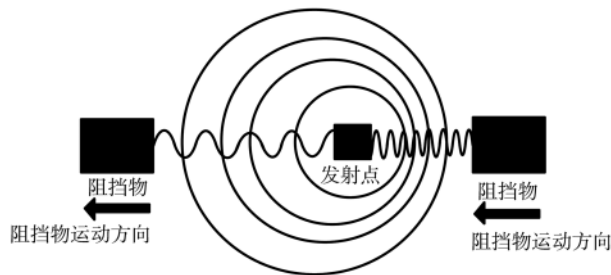


图 1 多普勒效应

如图 2 所示, 由于存在多普勒效应, 移动目标其发射信号和接收信号除了时延效应还存在多普勒频移  $f_d$ 。依靠三角波的上升沿和下降沿对应的差拍信号的频率

# 雷达与导航 Radar and Navigation

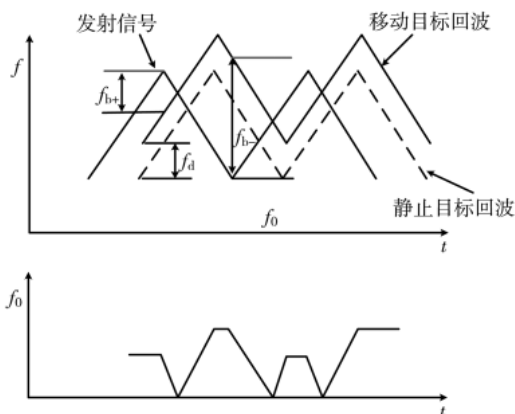


图2 移动目标探测原理图

差  $f_{b+}$ 、 $f_{b-}$  完成对目标的距离和速度测量,该情况下公式为:

$$\begin{cases} f_{b+} = f_0 - f_d \\ f_{b-} = f_0 + f_d \end{cases} \quad (1)$$

$$R = \frac{cT}{8\Delta F} (f_{b+} + f_{b-}) \quad (2)$$

$$V = \frac{\lambda}{4} |f_{b+} - f_{b-}| \quad (3)$$

式中  $c$  为光速(m/s),  $T$  为三角波周期(s),  $\Delta F$  为调制信号调频带宽(Hz),  $f_0$  为混频后的差频频率(Hz)。

## 2 系统设计框架构成

系统框架图如图3所示。微波雷达模块工作时,模块中的三角波调制信号发生器首先工作,用于控制雷达收发器,产生的线性调频信号遇到目标物体时会反射回来。混频器电路将发射信号和反射回来的信号进行混频得到差频信号,滤波电路滤除差频信号中的干扰信号,获得的中频信号,进入高速A/D转换器对该信号进行采样,将采样的信号送入单片机中进行信号处理分析,最终获得移动的目标物体的距离和速度信息。为了方便观察探测距离范围内是否存在移动目标物体,利用警报灯显示,用于确认检测范围内是否存在移动。实验过程中,通过示波器来测试滤波器对信号的处理情况。当示

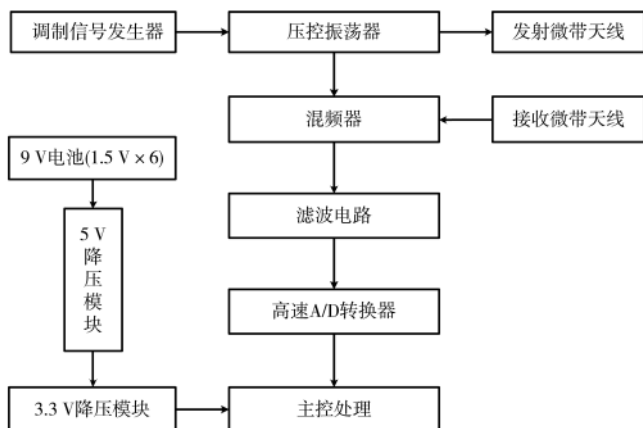


图3 系统框架图

波器上的波形显示有一段和初始的高电平脉宽或者低电平脉宽不同的波形时,表示在距离范围内探测到有移动物体存在,单片机的输出信号将警报灯点亮;当示波器上波形的电平脉宽消失时,表示在距离范围内没有探测到任何目标物体,警报灯熄灭。

## 3 系统设计与实现

本系统的实现主要依靠雷达收发模块、滤波模块和数据处理模块。

### 3.1 雷达收发模块设计

系统中的雷达收发模块采用的是 RFbeam 旗下公司的 K-LC1a 型号的雷达收发器,该型号模块主要由 5 个部分组成。压控振荡器(VCO)、调制信号发生器及供电电源组成信号源部分,另外包括信号收发部分和混频输出部分。压控振荡器(VCO)与测量结果的准确度有关,三角波调制信号发生器控制压控振荡器的输出信号,产生的三角波信号在调制方式下经 VCO 一路通过发射天线发射一系列连续波,该信号遇到阻挡物体后会被反射回来,反射回来的信号被接收天线接收进入混频器,而另一路信号直接进入混频器,混频后得到含有目标距离和速度信息的差频信号。该信号是本系统之后探测移动目标的重要数据。

### 3.2 滤波模块设计

系统中的滤波器的作用是对混频电路出来的混频信号进行滤波,去除掉在传输过程中产生的干扰信号,只保留带有距离和速度信息的差频信号,从而保证信号的准确性。目前,常用的滤波器根据滤波特性可以分为三种类型:切比雪夫滤波器、贝塞尔滤波器以及巴特沃斯滤波器<sup>[5]</sup>。

上述的三种滤波器相比较,巴特沃斯滤波器可以使通频带内的频率响应曲线变得更加平滑,并将不必要的突峰消除,无论是在通带内还是阻带内都是频率的单调函数。因此为了获得更准确的结果,本文系统采用的滤波器是巴特沃斯带通滤波器,且为二级二阶<sup>[6]</sup>。

二阶巴特沃斯带通滤波器的传递函数表达式如式(4)所示。

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{k\omega_0 s / Q_m}{s^2 + \frac{\omega_0 s}{Q_m} + \omega_0^2} \quad (4)$$

检测的信号频率范围设为  $f_{\text{start}} \sim f_{\text{end}}$ , 带宽为 BW, 则中心频率为:

$$f = \frac{f_{\text{start}} + f_{\text{end}}}{2} \quad (5)$$

中心角频率:

$$\omega = \pi f \quad (6)$$

品质系数:

$$Q_m = \frac{\omega}{\text{BW}} \quad (7)$$

已知测量信号的起始频率  $f_{\text{start}}$  为 300 Hz, 终止频率

# 雷达与导航 Radar and Navigation

$f_{\text{end}}$  为 2.5 kHz, 由式(5)可以得出中心频率  $f=1.4$  kHz, 由式(6)得出中心角频率  $\omega=4396$  Hz, 由式(7)得出品质因数  $Q_m=1.998$ 。巴特沃斯带通滤波器的系数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别设为 1.1、0.549 和 1。

二阶巴特沃斯滤波器两级电路完全一样, 所以对两级电路取相同的取值, 就能对信号进行滤波<sup>[7]</sup>。巴特沃斯滤波器的电路设计图如图 4 所示。

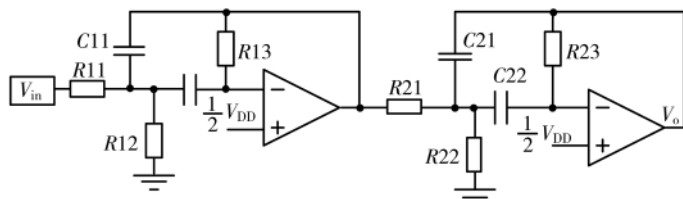


图 4 巴特沃斯滤波器的电路设计图

巴特沃斯滤波幅频特性曲线如图 5 所示。

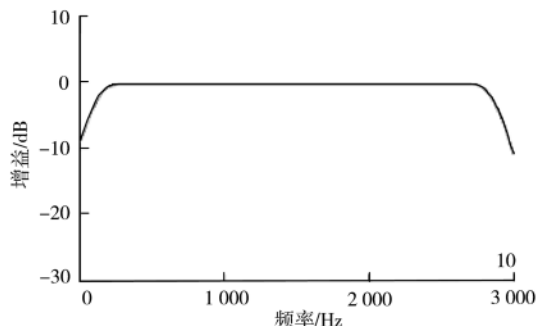


图 5 巴特沃斯滤波幅频特性曲线

## 3.3 数据处理模块设计

数据处理模块作为本系统的核心, 目的是分析中频信号的多普勒频率。本文系统使用高速 A/D 对数据进行采集, 该方式相较于 STM32 自带 A/D 转换速度更快, 避免了丢失信号的可能性<sup>[8]</sup>。

对中频信号进行数字处理时, 通过对信号观察时间的限制会导致频谱分量的扩展, 也就是频谱泄露现象。本文通过对 FFT 算法进行加窗插值来优化频谱误差。接下来考虑到对信号特性和适用范围的权衡, 对窗函数进行筛选。针对本系统对实时性的要求, 选择 2 项 Hanning 窗。

余弦窗的表达式:

$$w_i(n) = \sum_{i=0}^K (-1)^i b_i \cos\left(\frac{2\pi}{N} in\right) \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

式中  $K$  为窗函数的项数,  $b_i$  为系数。

当  $K=1$ ,  $b_0=b_1=0.5$  时, 此类余弦窗为 2 项 Hanning 窗。相邻两频谱主谱线之间的谱线间隔数为周期数, 用 Hanning 窗截断的正弦信号的主瓣宽度为 4 个谱线间隔, 分辨出相邻的谐波所需要的采样周期数最少, 只需要 2 个周期以上的采样点, 因此在牺牲一些计算精度的基础上, 满足了高要求的实时性。

为了简化系统输出显示结果, 通过 STM32 将处理后

的多普勒频谱转换成相应的信号高电平输出。通过 STM32 自带的 A/D 采集对目标信号高电平脉宽进行持续采样, 得到一个持续时间  $T$ 。考虑到系统初始化时, 也会产生一个不定的高电平, 对其采集时间为  $T_{\min}$ <sup>[9]</sup>。系统工作时, 通过  $T$  与  $T_{\min}$  时间的比较来判断在指定距离范围内有无目标移动物体的存在。

本文通过观察示波器的波形来判断指定范围区域内是否存在目标移动物体。示波器上波形出现一个电平脉宽, 则探测采样时间  $T$  大于  $T_{\min}$ , 警报灯亮, 表示存在目标移动物体; 示波器上波形电平脉宽消失, 则探测采样时间  $T$  小于  $T_{\min}$ , 警报灯灭, 表示不存在目标移动物体, 以达到探测效果<sup>[10]</sup>。系统控制器对数据处理的过程如图 6 所示。

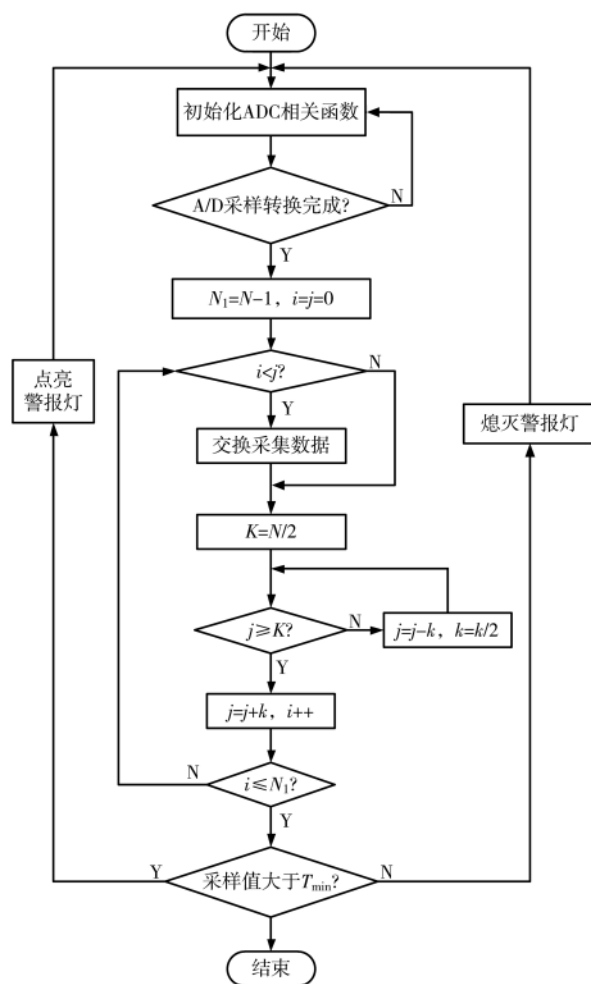


图 6 算法设计流程图

## 4 平台搭建与测试分析

对搭建完的平台进行系统测试和最大距离测试两部分。其中, 系统测试是为了判断系统能否有效地正常工作, 通过观察在指定范围区域内存在目标物体时警报灯能否被点亮。最大距离测试是为了判断探测系统的探测范围能否达到所设定的 20 m。

本论文设计的探测系统要求是在指定范围区域内

# 雷达与导航 Radar and Navigation

都能探测到目标移动物体,因此需要对探测距离进行测试。本文设置的探测范围为 20 m 以内,故以 1 m 为间距,分别对 1 m、2 m、3 m、4 m、...、20 m 进行测试,通过示波器测试的波形图来确定移动物体的距离。

在上述所测试的距离内都不放置目标移动物体,让系统工作并进行测试,示波器波形图如图 7 所示。由图可知,当指定距离范围内没有目标物体移动时,波形图上出现的信号很密集,在高电平和低电平上都没有较为明显的脉宽( $T$  小于  $T_{\min}$ ),验证了指定距离范围内不存在目标探测物。

在系统工作时,在 20 m 范围以内放置一个目标物

体并随机移动,这时示波器的图形显示出现许多电平脉冲( $T$  大于  $T_{\min}$ ),验证了系统在指定距离范围内能够探测到目标移动物体的存在,当目标物移动到指定的最大距离 20 m 处的位置时,示波器上显示的波形图如图 8 所示。验证了系统的探测范围能达到所设定的 20 m。

## 5 结论

比较图 7、图 8 可知,在目标距离为 20 m 内系统能快速准确检测目标移动物体的存在。Hanning 加窗插值 FFT 算法优化了原来测量实时性不足的缺点。基于 STM32 控制器的系统设计相较于 DSP 控制器,使得整个系统成本降低,有较高的实用价值。

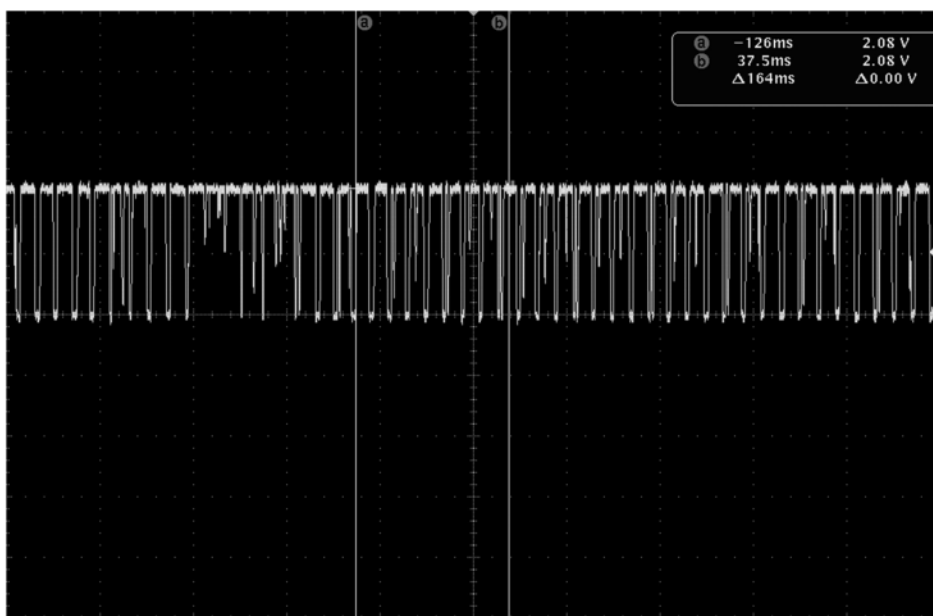


图 7 指定范围内没有移动目标时示波器图形

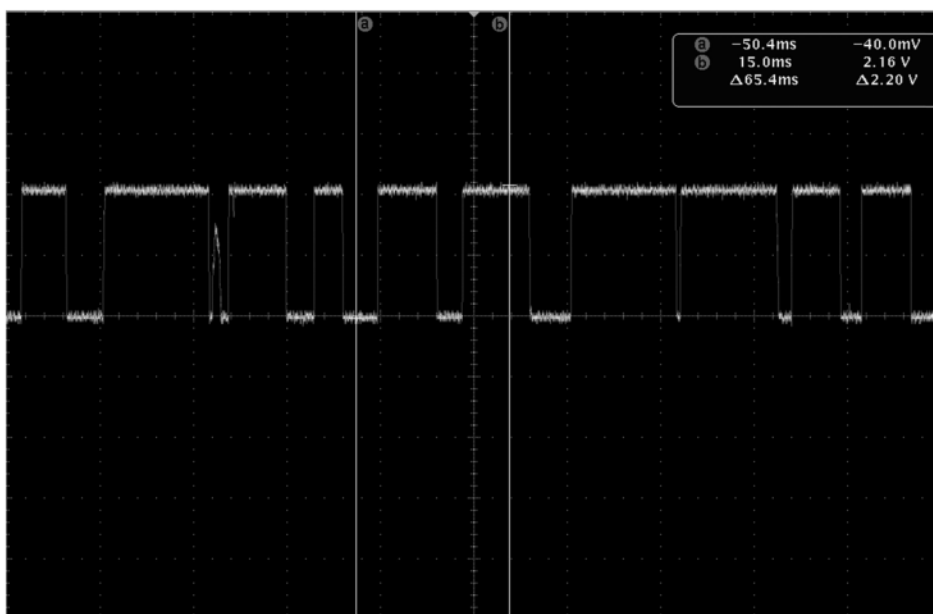


图 8 范围 20 m 存在移动目标时示波器图形



# 雷达与导航 Radar and Navigation

## 参考文献

- [1] 陈伟民,李存龙.基于微波雷达的位移/距离测量技术[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1251-1265.
- [2] 岳文豹,杨录,张艳花.FMCW 雷达近程测距系统设计[J].电子技术与应用,2012,40(4):73-75.
- [3] 张大彪,王艳菊.微波测速、测距系统的设计[J].仪表技术与传感器,2004,35(4):11-15.
- [4] 程焰平.X 波段便携式战场侦察雷达收发系统低功耗设计[J].火控雷达技术,2010,39(2):75-78.
- [5] 余俊,吴晓朝,许一男,等.巴特沃斯滤波器在雷达目标航迹处理中的应用[J].火力与指挥控制,2011,36(2):129-131.
- [6] 桂静宜.二阶有源低通滤波电路的设计与分析[J].电子科技,2010,23(10):15-17.
- [7] 康学福.滤波电路频率特性的仿真分析[J].国外电子测量技术,2014,33(1):40-42.
- [8] 彭璐佳,张莉萍,黄勃,等.基于 STM32 的车载智能风扇系统的设计与实现[J].传感器与微系统,2018,37(12):81-83,87.
- [9] 孙金林,王国余,胡方圆.数字化智能声速测量系统设计[J].传感器与微系统,2015(10):114-117.
- [10] 郭伟军,章国青,孙以泽.基于 STM32 和 PCL6045BL 的经编机电子横移系统设计[J].电子技术应用,2018,44(12):36-39.

(收稿日期:2020-06-19)

## 作者简介:

金远凡(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统设计。

秦会斌(1961-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:新型电子器件及 ASIC 设计、现代传感器设计及应用。

(上接第 120 页)

- [2] 周勇.5G 无线通信网络物理层关键技术[J].数字通信世界,2018(10):40,47.
- [3] CIANCA E, LUISE A D, RUGGIERI M, et al. Channel-Adaptive techniques in wireless communications: an overview[C]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2002, 2(8): 799-813.
- [4] 雷花.自适应编码调制技术在卫星通信中的应用[D].北京:北京理工大学,2016.
- [5] 王琦.基于 5G 典型频段与场景的毫米波信道传播特性研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [6] 吴凤辉.高阶 QAM 解调中的同步算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [7] MUKHTAR H, EL-TARHUNI M. An adaptive hierarchical QAM scheme for enhanced bandwidth and power utilization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(8): 2275-

2284.

- [8] 李真,王伟华,周文安,等.基于 OFDM 的自适应传输技术[J].无线通信技术,2004,30(1):34-35.
- [9] 周子铨.超高速无线局域网中的自适应传输技术及干扰解决方案研究[D].南京:东南大学,2014.
- [10] WANG Y, LIU W, JIN M, et al. FQAM/FPSK modulation for spatial modulation systems[C]. 2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2016.

(收稿日期:2020-06-15)

## 作者简介:

张健(1978-),男,博士/研究员,主要研究方向:毫米波集成电路及无线通信系统设计。

高泽峰(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:毫米波高速通信。

吴倩文(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向:毫米波集成电路及其应用。

(上接第 128 页)

- [19] GUPTA R, BERA J N, MITRA M. Development of an embedded system and MATLAB-based GUI for online acquisition and analysis of ECG signal[J]. Measurement, 2010, 43(9): 1119-1126.

(收稿日期:2020-06-29)

## 作者简介:

李昊宇(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:电路与系统、智能硬件。

张荣芬(1977-),女,博士,教授,主要研究方向:电路与系统、机器视觉及大数据智能技术。

刘宇红(1963-),男,硕士,教授,主要研究方向:电路与系统、智能硬件、大数据分析。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所