

基于 FMCW 雷达测距的车辆防碰撞系统

刘军辉, 陈宏滨

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要:针对交通事故频发、驾驶员遇到潜在碰撞反应不及时,设计了一种基于雷达测距的车辆防碰撞系统。该系统以 24 GHz 雷达传感器为前端信号收发模块,浮点 DSP 芯片作为数据采样和处理核心,实时监测前车的距离和速度。雷达采用连续三角波调频方式,利用 Chirp-Z 算法对雷达差频信号进行频谱细化,以提高测距精度。仿真结果表明,本系统能精确获取前车距离及相对速度,实现安全预警。

关键词:车辆防碰撞;24 GHz 雷达;浮点 DSP;三角波调频;安全预警

中图分类号: TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-808X(2016)05-0349-06

A vehicle anti-collision system based on FMCW radar ranging

LIU Junhui, CHEN Hongbin

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the frequent traffic accidents, the driver encounters a potential collision is not timely, a vehicle anti-collision system is designed based on radar ranging. The system uses 24 GHz radar sensor for the front-end signal transceiver module, floating-point DSP chip as the core sampling and processing of data. Radar uses a continuous triangle wave frequency modulation and applies Chirp-Z algorithm for spectrum refinement of radar beat frequency signal to improve the range accuracy. Simulation results show that the system can effectively get the distance and the relative speed of the vehicle in front, and achieve security warning.

Key words: vehicle anti-collision; 24 GHz radar; floating-point DSP; triangular wave modulation; security warning

随着人们生活水平的提高,汽车也越来越普及,逐渐成为出行的主要交通工具。但汽车给人们带来便利的同时,也带来了许多伤害。伴随着公路上的汽车越来越多,交通事故也越来越频发。据统计,中国的交通事故率高居世界第一,每年交通事故 50 万起以上,因道路交通安全事故伤亡人数超过 20 万人。对公路交通事故的分析表明,80% 以上的交通事故由司机反应不及时引起,65% 的车辆相撞属于追尾相撞^[1]。研究同时表明,若司机能够提前 1~2 s 意识到危险情况并采取相应的安全措施,则绝大多数交通事故都可避免^[2]。因此,如何在公路上安全行车和保障人们的生命财产安全,成为全社会广泛关注的焦点问题。安全带、安全气囊等传统被动安全设施在性能

上已无更多创新,汽车主动安全相关技术则越来越受到汽车厂商的重视,各种汽车主动安全设备及系统的投入使用为保证车辆的安全行驶做出了重大贡献。汽车防撞雷达系统作为汽车主动安全的重要部分已成为主要的研究对象^[3]。

汽车防撞雷达系统研究始于 20 世纪 60 年代,早期由于元器件的限制,发展非常缓慢。近年来,随着集成电路的快速发展和智能交通在全球的兴起,汽车防撞雷达系统受到越来越多的关注^[4]。国际上对汽车防撞雷达系统的研究主要集中在美国、欧洲和日本等发达国家,各大汽车公司积极参与研究,先后成功研制出多种不同频段的汽车防撞雷达系统,并已投入商用。国内对汽车防撞雷达系统的研究起步较晚,目

收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(61162008)

通信作者: 陈宏滨(1981—),男,湖南邵阳人,教授,博士,研究方向为传感器网络、认知无线电。E-mail: chbscut@guet.edu.cn

引文格式: 刘军辉,陈宏滨.基于 FMCW 雷达测距的车辆防碰撞系统[J].桂林电子科技大学学报,2016,36(5):349-354.

前主要为一些高校和科研机构参与研究,还处于初期阶段^[5]。

根据工作原理不同,汽车防撞雷达主要分为红外雷达、超声波雷达、激光雷达和毫米波雷达。红外雷达光线传播不易扩散,环境适应性强,能全天候工作,且红外雷达系统制作成本低廉;但是红外雷达测距范围有限,只能适用短距离目标,测距范围限制了其在汽车防撞方面的应用。超声波雷达测距原理简单,成本低且制作方便,但超声波的速度容易受外界环境影响,在不同温度下,超声波的速度表现不一;同时,超声波能量衰减较大,距离越远,反射的信号越微弱,灵敏度下降很快,故只适合近距离测量。激光雷达测距范围大、测距时间短、测距精度高,但是在高速移动的汽车上容易发生幅度振动,同时激光在雾天容易被吸收且激光对人眼有害,这些不利因素限制了激光雷达在汽车防撞雷达系统的应用。毫米波雷达在汽车防撞系统中具有以下优点:1)探测性能稳定,受雨、雪、雾、强光、污尘等环境因素影响较少;2)波长短、多普勒频移大,相对速度的测量精度较高^[6]。鉴于此,设计了一种基于FMCW(frequency modulation continuous wave)雷达测距的汽车主动安全系统。

1 FMCW 雷达测距基本原理

FMCW 雷达通过发射天线向前方发射调频连续波信号,并接收目标的反射信号来测量目标的距离和相对速度。静止目标下,反射信号和发射信号的波形相同,仅仅在时间上滞后 Δt ,静止目标 FMCW 雷达的工作方式如图 1 所示,FMCW 雷达的调制信号为三角波调制。 Δt 与目标距离 R 的关系为

$$R = \frac{c\Delta t}{2}, \quad (1)$$

其中 c 为光速。反射信号与发射信号差频,得到一个差频信号 Δf ,由于 Δt 非常小,通常情况下将 Δt 转换到差频信号 Δf 上进行测量。

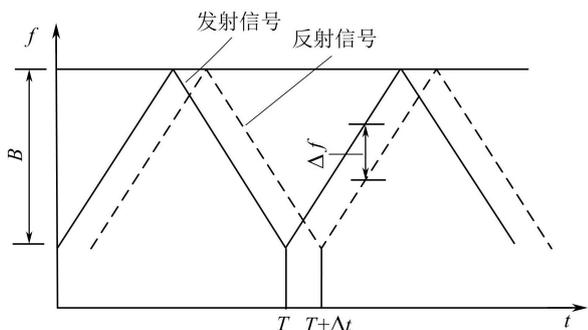


图 1 静止目标 FMCW 雷达工作方式

Fig.1 FMCW radar work under stationary target

由图 1 中的三角关系可得,

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta f}{B}. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可得,

$$R = \frac{cT\Delta f}{4B}. \quad (3)$$

其中: T 为调频连续波周期; B 为调频带宽。由式(3)可知, Δf 中包含目标的距离信息,只需对差频信号 Δf 进行处理,即可测量目标的距离 R 。

运动目标 FMCW 雷达工作方式如图 2 所示。当所测目标与车载雷达间存在相对速度时,接收的回波信号的载波相对于发射信号载波将产生一个频移,该频移即为多普勒频移,其值为

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda}. \quad (4)$$

其中: f_d 为多普勒频移; λ 为载波波长; v_r 为所测目标与雷达的相对速度^[7]。

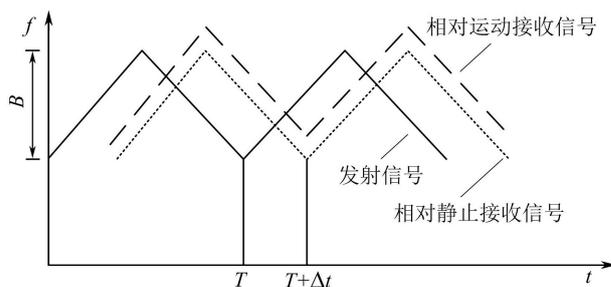


图 2 运动目标 FMCW 雷达工作方式

Fig.2 FMCW radar work under moving target

在运动目标情况下,调制三角波的上扫描和下扫描段输出的差频频率分别为:

$$f_{b+} = \Delta f - f_d; \quad (5)$$

$$f_{b-} = \Delta f + f_d. \quad (6)$$

结合式(3)、(4),目标的距离和相对速度分别为:

$$R = \frac{cT}{8B}(f_{b-} + f_{b+}); \quad (7)$$

$$V = \frac{c}{4f_0}(f_{b-} - f_{b+}). \quad (8)$$

通过以上分析,只需在一个三角波调制周期内分别计算出上扫描差频 f_{b+} 和下扫描差频 f_{b-} ,便可获取当前时间前车的相对速度和距离。

2 安全距离模型

安全车距是指同一车道同向行驶的相邻车辆为保证行车安全而必须保持的行车距离。若相邻车辆的行车间距保持在安全车距以上,则很难发生追尾类安全交通事故。临界安全车距是指为保证车辆安全

行驶而必须保持的最小车距。安全车距与很多因素有关,包括行车环境、车辆性能、驾驶员的反应速度等^[7]。常用的安全车距模型有直接限定模型、车头时距模型、驾驶员预估模型^[8]。

考虑只有在在本车速度 v_1 大于前车速度 v_2 时,才可能发生相撞。因而本系统将安全距离模型简化为 v_1 减速到与 v_2 相等时,若碰撞未发生,则碰撞可以避免。车辆的安全距离模型如图 3 所示。

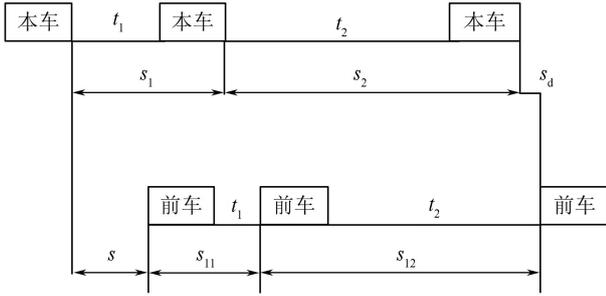


图 3 安全距离模型

Fig. 3 Safety distance model

设 s 为本车和前车的安全车距, t_1 为本车驾驶员反应及汽车刹车系统延迟时间, t_2 为本车减速到与前车速度相等所需时间, s_d 为减速至两车相对静止时的车距。在 t_1 时间段,前车和 본车都保持当前的速度运动,本车行驶距离为

$$s_1 = v_1 \times t_1, \quad (9)$$

前车行驶距离为

$$s_{11} = v_2 \times t_1. \quad (10)$$

在 t_2 时间段,本车减速,前车仍然保持速度 v_2 ,且在 t_2 时间内,本车速度由 v_1 减至 v_2 ,考虑为匀减速,本车的最大减速度为 a_{\max} 。根据运动学知识,

$$t_2 = \frac{v_1 - v_2}{a_{\max}}. \quad (11)$$

在减速阶段 t_2 时间内,本车行驶距离为

$$s_2 = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2a_{\max}}, \quad (12)$$

前车行驶距离为

$$s_{12} = v_2 \times \frac{v_1 - v_2}{a_{\max}}. \quad (13)$$

减速完成后,需保持两车的跟车距离 s_d ,

$$s_d = Mv_2 + s_0. \quad (14)$$

其中: M 为跟车系数,通常由经验得到; s_0 为最小停车距离,通常规定为 2 m ^[9]。

参考图 3 的安全距离模型,安全行车距离

$$s = s_1 + s_2 + s_d - s_{11} - s_{12}. \quad (15)$$

结合式(9)~(14),式(15)可以简化为

$$s = \Delta v \times t_1 + \frac{\Delta v^2}{2a_{\max}} + M \times v_1 + s_0, \quad (16)$$

其中, $\Delta v = v_1 - v_2$ 为相对速度。根据以上分析可知,安全行车距离主要由 Δv 决定。将防撞雷达系统所测的距离 R 与安全距离 s 对比,若 $R \leq s$,则表明当前处于危险状态,系统自动报警。

3 系统构架

本系统以德国 Innosent 公司生产的 IVS-179 雷达传感器作为 24 GHz 雷达前端,负责发射和接收雷达信号;TI 公司的 TMS320F28335 控制 DAC 模块产生雷达模块工作所需的三角波调制信号,三角波调制信号进入 IVS-179 的输入端,IVS-179 的输出端经过高通滤波和放大电路后,输入到 TMS320F28335 的 AD 引脚进行采样和 FFT 处理,从而获取前车的相对速度和距离信息。基于雷达测距的车辆防碰撞系统结构如图 4 所示,整个系统主要由 24 GHz 雷达模块、DAC 模块、高通滤波电路、放大电路及 DSP 采样和信号处理部分构成。

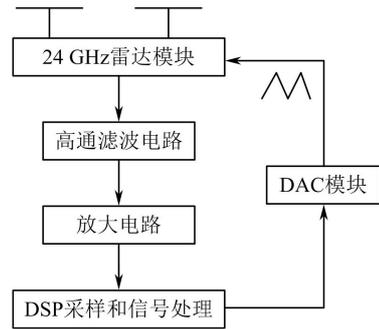


图 4 系统结构

Fig. 4 system structure

3.1 24 GHz 雷达模块

IVS-179 雷达传感器是德国 Innosent 公司生产的 24 GHz 带 VCO 的雷达收发器,是一款应用广泛的窄波束雷达传感器。由于采用平面微带天线结构,IVS-179 的体积非常小,适合在汽车上安装。IVS-179 传感器电路主要由信号源、混频输出和信号收发部分构成。其中信号源包括 VCO 和供压源,VCO 用于接收三角波调制信号,实现 FMCW 工作模式,供电源采用 5 V 电压供电。IVS-179 雷达的工作原理为:VCO 接收三角波调频信号后,输出一个发射信号,发射信号分成 2 路,一路经发射天线发射出去,另一路进入混频器;接收天线接收到回波信号,经去噪和放大处理后,进入混频器与发射信号进行混频,最终形成差频信号。

3.2 DAC 模块

本系统选用 DAC8563 芯片产生周期三角波信号作为雷达模块的调制信号。DAC8563 是 TI 公司推出的一款 16 位、双通道,输入电压为 2.7~5.5 V,且具有高速 SPI 接口的数模转换芯片。DAC 模块与 TMS320F28335 通过 SPI 接口连接,TMS320F28335 通过 SPI 向 DAC8563 的寄存器发送相关命令,控制 DAC8563 产生三角波调制信号。

3.3 高通滤波和放大电路

在对差频信号采样和数字处理前,需对差频信号进行滤波和放大处理。24 GHz 雷达模块由于受到三角波调制,调制信号的频率为 100 Hz,所以采用截止频率为 1 kHz 的高通滤波器,即选用高通截止频率为调制频率的 10 倍。由于多反馈有源滤波器具有集成度高、增益高、Q 值高等优点,同时,有源滤波器相比简单的无源滤波器具有更小的衰减和更小的体积^[10]。本系统采用有源运放芯片 LM358 设计的二阶高通滤波器。

通过解调滤波后的差频信号为微弱类信号,与目标的距离成反比。由于雷达模块混频器输出的信号幅度范围很小,距离远的回波信号幅度比距离近的回波信号幅度小,若对回波信号直接进行 AD 采样,幅度大的回波信号会淹没幅度小的回波信号^[11],因此在采样前必须对中频信号进行放大。本系统中,由于雷达前端模块的限制,中频放大的增益不能超过 60 dB;同时 TMS320F28335 的 AD 采样电压不能超过 3 V,否则会烧坏芯片。考虑到近距离和远距离幅度范围变换较大,若采用固定放大增益,则可能使 AD 采样的输入电压超过安全范围。相反,采用自动增益控制(AGC)电路可以随输入信号的幅度自动调节其增益,达到输出电压稳定在一定范围内。本系统选用的 AD603 芯片是 ADI 公司继 AD600 后推出的一款低噪声、宽频带、高增益的压控 VGA 芯片,其增益与控制电压呈线性关系,可调增益范围为 9~51 dB。为了使增益达到+60 dB,系统采用 2 片 AD603 芯片顺序级联,放大增益以满足系统需求。

3.4 DSP 采样和信号处理

本系统采用 TI 公司生产的 TMS320F28335 作为数字信号核心处理器,相比于 2000 系列的其他芯片,TMS320F28335 增加了浮点计算内核,提高了复杂计算的能力。该处理器具有如下优点:

1) 32 位浮点 DSP,处理器主频高达 150 MHz,CPU 指令周期 6.67 ns,指令执行速度快;

2) 片上存储大,包括 256K×16 位的 FLASH,34K×16 位 SRAM,还具有外部存储器扩展接口 XINTF;

3) 片上外设丰富,其中包括 18 路 PWM,16 通道 ADC,3 通道 SCI,88 个通用输入/输出接口,1 通道 SPI 等。

TMS320F28335 片内集成了一个 12 位的模数转换器,通过多路复用可以配置成 16 通道模拟输入;采样频率最高可配置为 12.5 MHz;多种触发源启动 ADC 转换。

系统中,TMS320F28335 控制 DAC 模块产生周期为 10 ms、幅度为 3~8 V 的三角波信号,通过三角波对雷达模块进行调频。同时,TMS320F28335 控制 AD 以 2 MHz 的采样频率对雷达的差频信号采样。由于三角波调频和 AD 采样需要同步,才能正确获取上下扫频段的差频频率;系统采用定时器中断 0 控制 DAC 模块产生三角波,定时器中断间隔为 10 ms。定时器中断函数内,每产生一个 DAC 值,ADC 进行一次采样并保存在一个临时数组中。当数组中的采样点数达到 1024 点,程序进入 FFT 算法部分,通过对 1024 的采样点数进行 FFT 变化,即可计算出上扫频段频率,同样方法计算出下扫频段频率。根据式(7)、(8)计算当前车距和相对车速,从而实现安全预警。

系统软件流程如图 5 所示。启动系统并初始化后进入 AD 采样,经 FFT 变换和谱峰搜索获取频率信息,根据频率计算出相对速度和车距,以此判断车辆的安全状况。

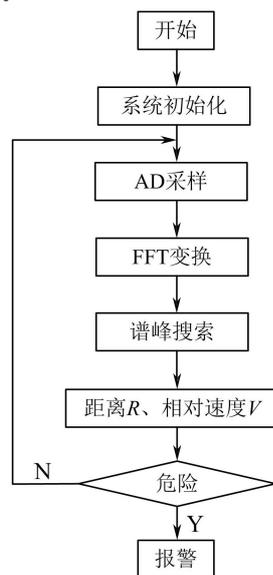


图 5 系统软件流程

Fig. 5 System software process

4 系统仿真及结果分析

IVS-179 中心频率为 24 GHz,最大调频带宽为 250 MHz,三角波调制信号周期为 10 ms,AD 采样频率为 1 MHz,系统最大测量距离为 150 m,最大测量速度为 200 km/h。根据以上参数建立 FMCW 雷达系统模型,通过 Matlab 软件完成了系统模型的仿真。图 6 为车距 90 m、速度 90 km/h 的上下扫频段频谱。

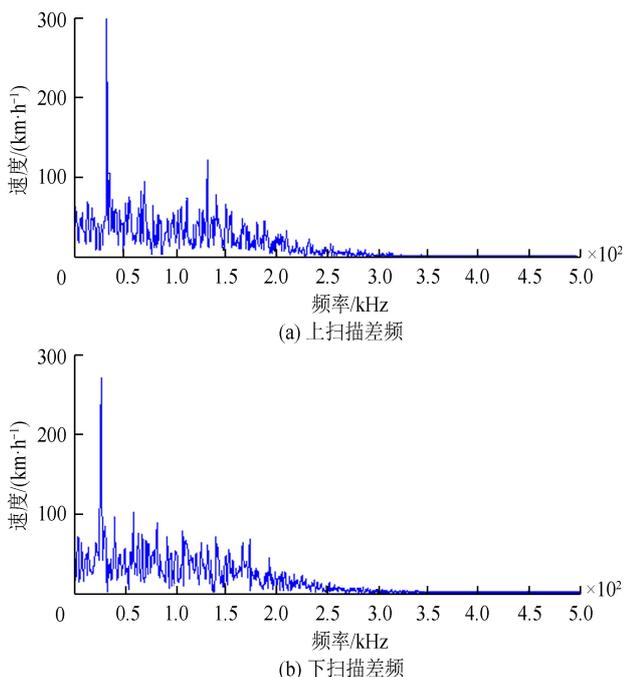


图 6 差频信号频谱

Fig. 6 Spectrum of beat frequency signal

在图 6 中,上扫描差频频率约为 34.18 kHz,下扫描差频频率约为 26.367 kHz。根据式(7)、(8)可以测出当前车距为 90.82 m,车速为 87.89 km/h。表 1 为 3 组不同距离和速度下的仿真数据及测量误差。从表 1 可看出,直接对差频信号进行 FFT 变换产生的误差较大。

表 1 3 组距离和速度下的仿真数据

Tab. 1 Simulation data for three distances and speeds

距离/ m	速度/ (km · h ⁻¹)	仿真距离/ m	仿真速度/ (km · h ⁻¹)	距离 误差	速度 误差
90	100	89.36	100.71	0.64	0.71
120	110	120.12	109.86	0.12	0.14
150	120	150.88	119.02	0.88	0.98

系统误差主要由 FFT 的栅栏效应产生。直接对 N 点进行 FFT 变换具有固定的频率间隔 f_s/N ,其中 f_s 为采样频率。增加采样点 N 可以提高频谱分辨率,但系统的运算量和内存也会增大,在实时系统中对系统的性能影响很大。为此,出现了各种不同原理的频谱细化和校准方法,综合比较各方法,本系统采用 Chirp-Z 方法进行频谱细化。

Chirp-Z 是一种在 Z 平面沿着一段螺旋线均匀采样的 Z 变换方法。基本原理是在一段螺旋线上选取频率起始点和螺旋参数,确定采样频率和采样点数,对此段频带进行局部 Z 变换^[12]。通过 FFT 粗略计算出频谱谱峰所在位置,以此谱峰位置的前一点所对应频率为 Chirp-Z 的起始频率进行频谱细化。表 2 为经 Chirp-Z 频谱细化后 3 组不同距离和速度的仿真数据。对表 2 和表 1 仿真结果对比发现,Chirp-Z 算法对系统精度有一定的优化作用。

表 2 Chirp-Z 优化后的仿真数据

Tab. 2 Simulation data under Chirp-Z optimization

距离/ m	速度/ (km · h ⁻¹)	仿真距离/ m	仿真速度/ (km · h ⁻¹)	距离 误差	速度 误差
90	100	90.26	99.85	0.26	0.15
120	110	120.07	109.96	0.07	0.04
150	120	150.24	119.98	0.24	0.02

5 结束语

针对交通安全事故日趋增多,设计了一种以 24 GHz 雷达为数据收发模块、浮点 DSP 芯片 TMS320F28335 为核心处理器的车辆防碰撞系统,并通过 Matlab 软件对系统模型进行仿真验证。仿真结果表明,连续三角波调制的雷达仿真系统能够较准确地获取本车与前车的车距和相对车速;同时,由于采样间隔的限制,系统存在一定的误差;在不增加采样点数的情况下,Chirp-Z 能提高测距精度。对于汽车防撞雷达系统而言,现阶段主要技术难题是如何提高测距精度和避免虚漏警。下一步将对如何减少虚警和漏警进行研究,并在实际环境中进行测试。随着汽车保有量的快速增加,车辆防碰撞系统在未来必定拥有广阔的市场空间。

参考文献:

[1] 陈勇,黄席樾,杨尚罡. 汽车防撞预警系统的研究与发展[J]. 计算机仿真,2006,23(12):239-243.

- [2] WU Yurong, WANG Congling, LI Xunbo, et al. Study on automotive anti-collision radar system and its signal processing algorithm[C]//IEEE of International Forum on Information Technology and Applications, 2009: 586-590.
- [3] EUGIN H, KIM Sang-dong, CHIHO P, et al. Automotive FMCW radar with adaptive range resolution[C]// Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symposia, 2008: 130-133.
- [4] 黄文奎. 毫米波汽车防撞雷达的设计与实现[D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2006: 5-6.
- [5] 梁品, 陈照章, 于敬泉. 基于 DSP 的汽车防撞雷达及其信号处理[J]. 微电子学, 2007, 37(5): 628-635.
- [6] 钟勇, 姚剑峰. 现代汽车的四种测距方法[J]. 汽车工业研究, 2001(2): 38-40.
- [7] 李飞, 曹峰, 高一栋, 等. 汽车防撞雷达报警算法[J]. 现代雷达, 2013, 35(12): 31-37.
- [8] 刘刚, 侯德藻, 李志强, 等. 汽车主动防撞系统安全报警算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(5): 697-700.
- [9] 丁祥. 基于 DSP 的汽车防撞雷达信号处理的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 12-13.
- [10] 姜兴, 刘涛. 24GHz 车载防撞雷达及中频信号处理电路设计[J]. 微型机与应用, 2014, 33(1): 56-59.
- [11] 高香梅. FMCW 防撞雷达系统中频信号处理的软硬件关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 18-19.
- [12] 陈祝明, 丁义元, 向敬成. 采用 Chirp-Z 变换提高 LFM-CW 雷达的测距离精度[J]. 信号处理, 2002, 18(2): 106-112.

编辑: 梁王欢