

文章编号:1671-6833(2020)06-0013-06

基于毫米波雷达的汽车前防撞预警系统设计

张三川¹, 叶建明², 师艳娟¹

(1.郑州大学 机械与动力工程学院,河南 郑州 450001; 2.浙江创立汽车空调有限公司,浙江 龙泉 323700)

摘 要:为研究毫米波雷达用于汽车前向防撞探测的可行性,设计了一种基于 77 GHz 毫米波雷达传感器的汽车前向防撞探测系统装置。该装置针对低频漏波信号和高频干扰信号,采用模拟信号处理模块等硬件系统进行初步滤除,并在此基础上依次通过 FIR 数字滤波、FFT 变换、恒虚警检测等数字算法的处理,实现了目标距离、速度等信息的探测。同时,针对结构化道路的汽车前碰撞工况,构建了基于毫米波雷达方位角探测原理和行车安全距离模型的前防撞多级预警模型。场地道路测试表明:所设计的探测装置对静态目标距离探测误差为 4.5%,对同时探测两个动态目标的速度的最大误差为 5%。77 GHz 毫米波雷达传感器应用于汽车前防撞预警系统设计具有可行性。

关键词:毫米波雷达; 预警算法; 前防撞系统; 安全距离模型; 信号处理; 道路试验

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.06.006

0 引言

毫米波雷达主要使用 24 GHz 和 77 GHz 频段,上海中科院微系统所研制出我国首个全芯片集成的 24 GHz 小型防撞雷达,其距离探测可达 100 m 以上,速度探测超过 100 km/h^[1]。马玉贞等^[2]利用 130 nm CMOS 工艺设计集成的 24 GHz 防撞雷达,可根据 $1/2^N$ 倍调信号输出功率,实现任意波形输出。郝宏刚等^[3]设计的用于 24 GHz 防撞雷达的混合馈电阵列天线,天线子阵和馈电网络的电流采用切比雪夫分布,使得天线阵的增益达到 21.7 dBi。由于 24 GHz 雷达天线体积大、精度低,国际上将 77 GHz 毫米波雷达作为研究重点。Wang 等^[4]结合频移键控和线性调频连续波调制的优点,调制信号采用快速锯齿扫描,能够准确地对目标进行识别,具有对静止或 4 个以上运动目标的实时检测能力。Blazquez 等^[5]基于微带、波导和 MMIC 混合技术设计的 77 GHz 防撞雷达,集合了这些硬件的优点,实现了对信号和数据的多普勒处理和 4 个目标的跟踪处理。金良等^[6]采用新型 45 度线极化串馈微带天线阵设计的 77 GHz 防撞雷达,通过反射相消槽获得最佳驻波特性,避免对向来车由于同垂直极

化而带来的强电磁干扰。

本文针对目前防撞系统测距测速精度低、预警算法针对性不强等问题,拟根据道路交通前碰撞工况,对防撞系统的硬件电路和算法进行设计,以期提高系统测距和测速的精度。

1 前碰撞工况与预警原理

1.1 碰撞工况

汽车前向碰撞事故的道路工况,主要有以下 3 种^[7]:

(1)相邻车道目标车辆突然变道。相邻车道目标车变道并入本车车道,若安全距离不够,且本车不减速继续前行,会发生前向追尾碰撞事故。

(2)同车道本车车速大于目标车。本车在小于安全车距范围内加速或以大于目标车辆的速度匀速行驶,也会导致前向追尾碰撞事故。

(3)同车道目标车辆减速行驶或突然停车。若目标车不在安全距离内主动减速,甚至制动停车,也会发生前向追尾碰撞事故。

1.2 预警原理

(1)目标车辆变道。假设雷达波在接收天线接收时平行,如图 1 所示, TX 为发射天线, RX1 和 RX2 为接收天线。则:

收稿日期:2020-06-12;修订日期:2020-09-23

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAG02B04)

作者简介:张三川(1962—),男,四川资阳人,郑州大学教授,博士,主要从事汽车主动安全技术方面的研究, E-mail: sc.zhang@zzu.edu.cn。

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

式中: d 为 RX1 和 RX2 之间的距离; θ 为目标车辆的方位角; $\Delta\phi$ 为两接收天线之间的相位差; λ 为雷达波波长。

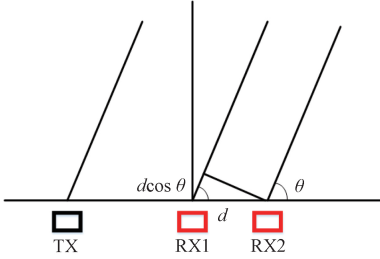


图 1 雷达测方位角原理

Figure 1 The principle of radar angle measurement

将同一目标信号在天线方向上进行 FFT 变换并计算角度^[8], 两个信号之间 N 点采样必须至少相差一个周期, 即:

$$\frac{2\pi d \Delta \cos \theta}{\lambda} \geq \frac{2\pi}{N} \quad (2)$$

故

$$\Delta\theta \geq \frac{\lambda}{Nd \sin \theta} \quad (3)$$

式中: N 为采样点数。当 $\theta = \pi/2$ 时, $\Delta\theta$ 取得最小值。

变道工况如图 2 所示, A 车和 B 车在相邻车道同向行驶, 假设自车为 A, 目标车为 B, B 车在行驶过程中变道到 A 车所在车道或其继续保持原车道行驶均可通过 A 车雷达检测到的方位角 θ 来判断。

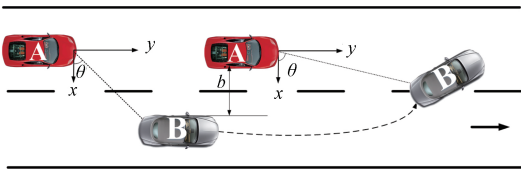


图 2 相邻车道目标车变道

Figure 2 Target vehicle lane changing in adjacent lane

若 A 车所安装雷达的坐标系的 x 轴与车道方向垂直, y 轴为平行方向, 则 B 车在最大距离处变道时的极值方位角为:

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{2S_{\max}}{b}\right) \quad (4)$$

式中: S_{\max} 为判断是否邻车变道的距离最大值(超过此距变道即可视为对本车行驶安全无影响), m; b 为两车并行的横向安全距离, m; $b/2$ 为最小横向安全距离, m。

对于 B 车在距离 S_{\max} 范围内变道时, 横向距

离变小, 当横向距离小于最小横向安全距离 $b/2$ 时, 即认为 B 车在实施变道, 则 B 车的最小方位角为:

$$\theta_{\min} = \arctan\left(\frac{2D_{\min}}{b}\right) \quad (5)$$

式中: D_{\min} 为正常变道的 B 车在实施变道前与 A 车的最小安全距离。当 B 车正常变道时, 其方位角会在 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 内变大。

对于本车道前方行驶车辆和大于 S_{\max} 车距的邻车道车辆, 其方位角均大于 θ_{\max} , 但本车道前方车辆的方位角等于或略小于 90° , 明显大于邻车道车辆的方位角, 而邻车若在方位角 $[0, \theta_{\max}]$ 内实施变道, 显然是极其危险的行为。

(2) 同车道本车车速大于目标车。如图 3 所示, A 车和 B 车在同一车道行驶, 假设自车为 A, 前车为 B, A 车制动前与 B 车相距为 D (安全距离)。B 车匀速行驶, A 车以大于 B 车的速度靠近 B 车, A 车发现危险, 采取制动措施。

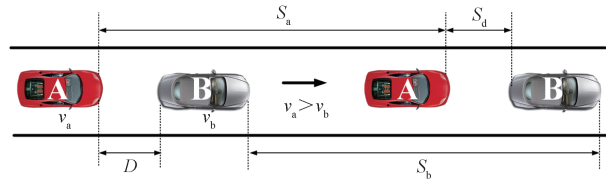


图 3 同车道本车速度大于目标车

Figure 3 The speed of the vehicle in the same lane greater than the target vehicle

由图 3 可知, 安全距离公式为:

$$D \geq S_a - S_b + S_d \quad (6)$$

式中: S_a 为制动一段时间后 A 车的行驶距离, m; S_b 为 B 车的行驶距离, m; S_d 为两车的跟车距离, m。

当 v_a 制动到与 v_b 相等时, 即可认为两车无追尾危险。根据运动学原理^[9], 两车的安全距离为:

$$D_1 \geq \frac{(v_a - v_b)t_1}{3.6} + \frac{(v_a - v_b)^2}{25.92a_a} + \frac{(v_a + v_b)t_2}{7.2} + S_d \quad (7)$$

式中: v_b 为 B 车匀速行驶的速度, km/h; v_a 为 A 车的初速度, km/h; a_a 为 A 车的制动减速度, m/s^2 ; t_1 为驾驶员反应时间和消除制动间隙时间之和, s; t_2 为持续制动时间, s。

(3) 目标车减速行驶或突然停车。如图 4 所示, B 车突然制动直至停止, A 车匀速靠近 B 车, 发现危险后, 采取制动措施。

若 B 车静止时 A 车仍处于运动状态, 则可

FIR 带通滤波器设计,窗函数采用 Hamming 窗,滤波器阶数为 55,采样频率为 96 000 Hz,通带频率为 400~20 000 Hz。将设计完成的滤波器系数嵌入 Simulink 进行仿真,图 7 上方为滤波前 100 Hz、1 kHz 和 30 kHz 的混合波形,下方为滤波后的波形。仿真结果显示,输出信号只剩下 1 kHz 的信号,处于通带范围外的信号成功被滤除,初步验证了仿真达到了预期效果。

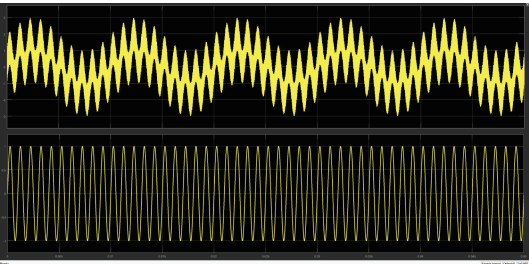


图 7 滤波前后波形对比

Figure 7 Waveform comparison before and after filtering

为进一步得到目标信号的频率,需将信号从时域变换到频域。本设计采用经典的 2 维 FFT 变换来获得目标信息。根据奈奎斯特采样定理:采样频率大于最高频率的 2 倍时,采样后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息^[11]。为了在使用中达到更好的效果,本文的目标信号频率最大值为 20 kHz,结合实际情况,采样频率选择为 96 kHz,采样点数选择 1 024。

如图 8(a)所示,输入信号为 1、5、10、15 kHz 的混叠波,经过 FFT 处理后信号的频域特性如图 8(b)所示,频域中存在 4 个峰值,其频率分别为 1、5、10、15 kHz,在其他频率处幅值几乎为零。输出信号的频谱特点和输入信号的频率特性完全一致,说明 FFT 变换有较好的效果。

得到目标信息后,需滤除环境等虚假目标的干扰,本文采用 CA-CFAR 算法进行自适应门限设计,其原理如图 9 所示。

分别用 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 和 $y_i(i=1,2,\cdots,n)$ 表示检测单元两侧参考单元,参考单元长度为 $2n,n$ 为前沿和后沿参考单元长度; X 和 Y 分别是前沿和后沿参考单元对杂波强度的局部估计。与检测单元 A 邻近的是两个保护单元,防止目标能量泄漏到参考单元中,影响检测器杂波强度的两个局部估计值^[12]。仿真结果如图 10 所示。输入目标信号和杂波信号,蓝色曲线为自适应门限,黑色曲线为目标信号和杂波,低于门限的信号全部被滤除。

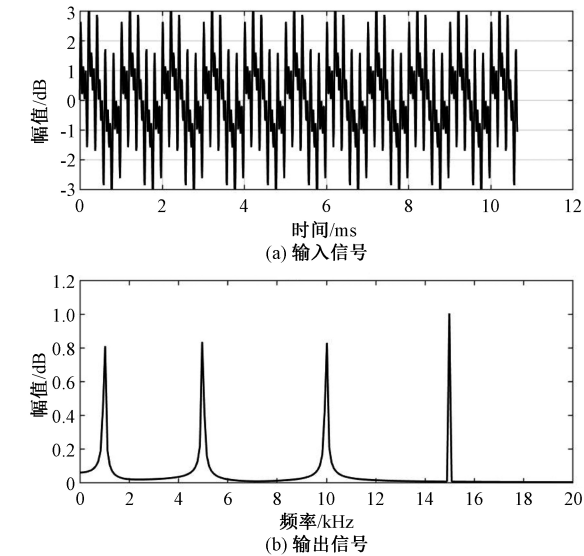


图 8 FFT 前后对比

Figure 8 Comparison before and after FFT

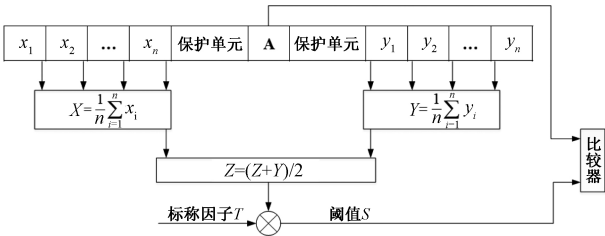


图 9 恒虚警检测算法原理

Figure 9 Principle of constant false alarm detection algorithm

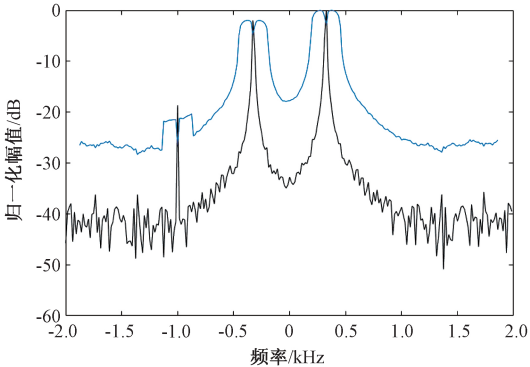


图 10 CA-CFAR 仿真结果

Figure 10 Simulation result of CA-CFAR

3 试验结果与分析

3.1 试验方案

本文在双向两车道条件下进行试验,假设自行车位于左侧车道,雷达安装在车头正中。试验设备主要包括:毫米波雷达、硬件电路板、12 V 电源、CAN 盒转接头、笔记本电脑、可显示实时速度的电动车。

试验内容包括:静态多目标多位置探测,如

图 11(a)所示;动态单目标多位置探测^[13],如图 11(b)所示;动态多目标多位置探测,如图 11(c)所示。试验设计探测距离为 24 m,试验前,在路面每间隔 6 m 处作上标记,每项试验结束后,将探

测距离在地面上作出标记,与障碍物实际距离进行对比。对于动态目标速度的检测,在固定距离处实时获取动态目标的速度,并作好记录,与电表仪表盘速度进行对比。



图 11 3 种试验方案

Figure 11 Three experimental schemes

3.2 结果分析

图 12 为毫米波雷达探测静止目标的结果,以中心车道线为原点,两车道宽度为 x 轴,车辆前方距离为 y 轴,建立二维坐标系,自车位于左侧车道正中,即 -1.75 m 处。

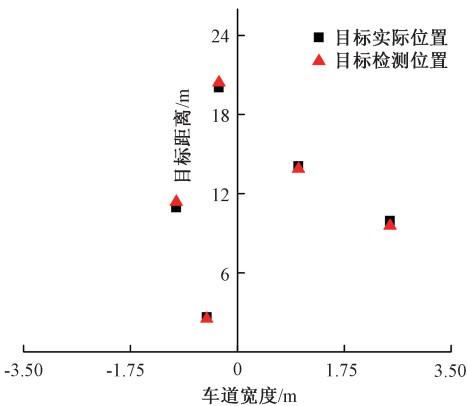


图 12 静态目标位置分布

Figure 12 Position distribution of static target

静态目标实际值和检测值的误差分析如表 1 所示,综合图表可知,在静止多目标条件下,障碍物的实际位置和检测位置基本一致,且误差在 5% 以下。

表 1 探测结果及误差分析

Table 1 Detection results and error analysis

距离实际值/m	距离检测值/m	距离误差/%
2.63	2.51	4.5
10.95	11.38	3.9
9.93	9.56	3.7
14.08	13.87	1.5
20.04	20.42	1.9

图 13 为毫米波雷达探测动态多目标的结果分布,假设两个目标相向行驶,在其与自车距离分别为 6、12、15、18、24 m 时,获取毫米波雷达检测的距离和速度,与实际距离和目标仪表盘显示速度进行对比分析。

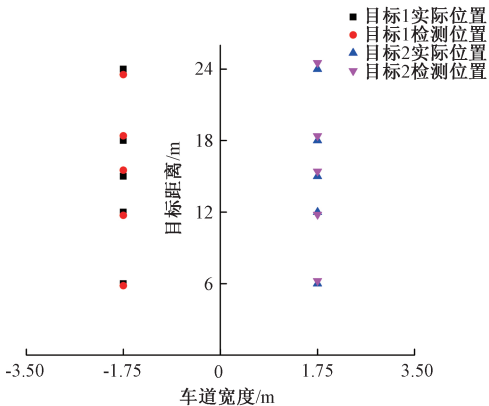


图 13 动态多目标位置分布

Figure 13 Position distribution of dynamic multi-target

动态目标 1、2 实际值和检测值的误差分析如表 2、3 所示,其中,“-”表示远离目标,“+”表示靠近目标。综合图表,结果显示:在动态多目标条件下,障碍物的实际位置和检测位置基本一致,误差在 5% 以下,且障碍物运动方向与实际一致。

表 2 目标 1 探测结果及误差分析

Table 2 Detection results and error analysis of target 1

距离实际值/m	距离检测值/m	距离误差/%	车速表值/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	车速检测值/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	车速误差/%
6	5.83	2.8	-4	-4.2	5.0
12	11.72	2.3	-7	-7.3	4.3
15	15.51	3.4	-9	-9.2	2.2
18	18.39	2.2	-12	-11.7	2.5
24	23.53	2.0	-16	-16.5	3.1

表 3 目标 2 探测结果及误差分析

Table 3 Detection results and error analysis of target 2

距离 实际 值/m	距离 检测值/ m	距离 误差/ %	车速表值/ (km·h ⁻¹)	车速检 测值/ (km·h ⁻¹)	车速 误差/ %
24	24.52	2.2	6	6.2	3.3
18	18.39	2.2	9	9.2	2.2
15	15.41	2.7	12	12.3	2.5
12	11.79	1.8	15	14.6	2.7
6	6.23	3.8	18	18.4	2.2

4 结论

(1)设计了一款基于 77 GHz 毫米波雷达的前防撞探测装置,在静态多目标、动态单目标、动态多目标情况下,道路试验测距、测速的相对误差小于 5%,达到了设计目标。

(2)构建了基于毫米波雷达测距、测速和方位角的相邻车道车辆的预警原理和算法。

(3)试验结果证明,将 77 GHz 毫米波雷达用作车辆防撞系统设计具有可行性。

参考文献:

[1] 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.

[2] 马玉贞,陈够喜,崔成林,等.24 GHz 防撞雷达抗干扰任意波形设计[J].计算机工程与设计,2017,8(10):2613-2616.

[3] 郝宏刚,周小川.一种新型混合馈电 24 GHz 车载雷达

阵列天线设计[J].微波学报,2018,34(3):48-51.

[4] WANG G, HONG W, ZHANG H, et al. Investigations on anti-jamming method for 77 GHz automotive millimeter wave radar[C]//IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband. New York: IEEE, 2016: 423-426.

[5] BLAZQUEZ G R, ALMOROX G P, BURGOS G M, et al. Perimeter surveillance radar in W-band based on vehicle collision avoidance technology[C]//European Radar Conference. New York: IEEE, 2017: 351-354.

[6] 金良,葛俊祥.77 GHz 车载防撞雷达新型天线阵设计[J].固体电子学研究进展,2018,38(5):343-347.

[7] 张译芳.高等级公路行车安全距离及防追尾碰撞预警系统的研究[D].西安:长安大学,2016.

[8] 丁鹭飞,耿富录,陈建春.雷达原理[M].5 版.北京:电子工业出版社,2014:153-156.

[9] 余志生.汽车理论[M].5 版.北京:机械工业出版社,2009:97-99.

[10] REN X B, LIU Z Y, FU T F. The embedded implementation of millimeter wave radar signal processing system [C]//Chinese Intelligent Automation Conference. Berlin: Springer, 2017:152-154.

[11] 李莉,王沛,俞玉莲.数字信号处理原理和算法实现[M].北京:清华大学出版社,2010.

[12] 何友,关键,孟祥伟,等.雷达目标检测与恒虚警处理[M].2 版.北京:清华大学出版社,2011:39-40.

[13] 刘忠臣.基于毫米波雷达的汽车并线辅助系统研究[D].长沙:湖南大学,2017.

Design of Vehicle Forward Collision Warning System Based on Millimeter Wave Radar

ZHANG Sanchuan¹, YE Jianming², SHI Yanjuan¹

(1.School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;2.Zhejiang Chuangli Automotive Air Conditioner Co., Ltd., Longquan 323700, China)

Abstract: In order to study the feasibility of millimeter wave radar for vehicle forward collision avoidance detection, a forward collision avoidance device was designed based on 77 GHz millimeter wave radar. Aiming at the low frequency leakage wave signal and high frequency interference signal, the device used analog signal processing module and other hardware systems for preliminary filtering. On this basis, the distance and speed of the target were obtained through the processing of FIR digital filtering, FFT transform, constant false alarm detection and other digital algorithms. At the same time, a multi-stage pre-warning model and method was constructed based on millimeter wave radar azimuth detection principle and driving safety distance model for the forward collision condition of passenger cars on structured roads. Road test showed that the distance detection error of the device designed for static target was 4.5%, and the maximum error was 5% for detecting two dynamic targets at the same time. Therefore, it was feasible for 77 GHz millimeter wave radar to be used in the design of vehicle anti-collision warning system.

Key words: millimeter-wave radar;early warning algorithm;front-collision system;safe distance model;signal processing; road test