

文章编号: 1001- 2486(2009) 02- 0121- 05

超声阵列障碍探测技术及其在无人车辆中的应用*

潘仲明, 贺汉根

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 设计了适合安装在汽车前保险杠的超声障碍检测系统。提出了一种新颖的混合型超声波换能器阵列、基于换能器阵列合成孔径和超声波脉冲编码的障碍检测算法, 以区分回波信号是否含有危险信息。理论计算与实验结果表明, 该系统可检测到直径 15mm 的平板目标, 其有效测量距离为 0.2~ 25m, 并可实现多目标定位。

关键词: 超声阵列; 合成孔径; 多目标定位

中图分类号: TP212.9; TP274.5 **文献标识码:** A

Application of Ultrasonic Transducer Array for Obstacle Detection Technology in Unmanned Automobile

PAN Zhong-ming, HE Han-gen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An ultrasonic obstacle detection system for mounting on the front bumper of an automobile was designed. Using an omnibus ultrasonic transducer array and ultrasonic pulse coding techniques, an algorithm for collision identification was formulated based on a synthetic aperture to discriminate between echoes constituting real threats and those that do not. Theoretical calculation and test results show that the detectable diameter of flat boards is 15mm, and the active range is between 0.2~ 25m. Furthermore, the multiple obstacles in front of the automobile can be located simultaneously.

Key words: ultrasonic array; synthetical aperture (SA); multi-target orientation

超声传感器在汽车防碰撞预警系统和目标定位系统得到了广泛应用。然而, 超声传感器的作用距离通常小于 $10\text{m}^{[1-3]}$ 。对于低速(小于 60km/h) 野外无人驾驶车辆而言, 希望安装在车辆前保险杠的传感器的作用距离不小于 25m, 测量视野略大于车辆宽度(1.8m)。采用目前市面上销售的超声波传感器不能满足这一需求。为此, 文中研制了工作频率 24kHz、作用距离大于 30m、半波束宽度为 5° 的超声波换能器, 并设计了一种新颖的混合型超声波阵列, 以适应无人驾驶车辆防碰撞系统的需求。为了避免多传感器信号的串扰问题, 提高阵列的测距精度和可靠性, 本文采用了基于伪随机码(PN code) 的相关检测技术^[4-5]。

1 超声波换能器

考虑到超声波在空气中的指数吸收衰减系数与其工作频率成正比, 因此大作用距离超声波换能器的工作频率不能太高。在此, 选取厚度 $H = 12\text{mm}$ 、直径 $D = 90\text{mm}$ 的压电陶瓷圆盘(P-13 材料) 作为超声换能器振子, 其谐振频率为 24kHz, 频带宽度 4kHz, 半波束宽度为 5° 。配上自行研制的高性能发射/接收电路, 该超声换能器的作用距离达到 32m。

对于近距离超声波测距, 选取厚度 $H = 3\text{mm}$ 、直径 $D = 50\text{mm}$ 的压电陶瓷圆片(P-13 材料) 作为超声换能器振子, 其谐振频率约为 40kHz, 频带宽度约为 6.5kHz, 半波束宽度约为 5° , 作用距离为 10m。图 1 是 40kHz 和 24kHz 超声换能器实物图片。

* 收稿日期: 2008-08-30

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60234030)

作者简介: 潘仲明(1959-), 男, 教授, 博士。

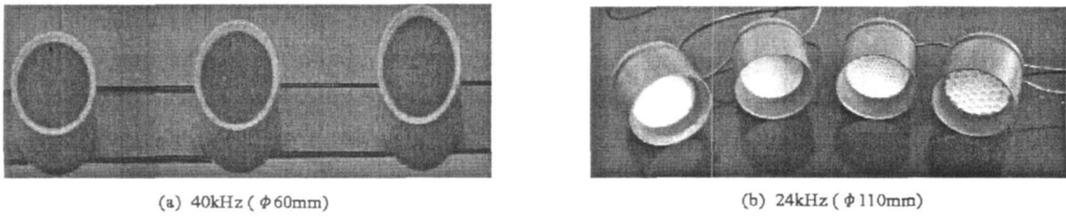


图1 压电圆盘式超声波换能器实物图片
Fig. 1 Piezo disks used as ultrasonic transducers

2 混合型换能器阵列

如果仅采用工作频率为 24kHz 的大作用距离超声波传感器构成阵列,则不但增大了阵列的体积、重量,而且提高了成本;同样,若仅采用工作频率为 40kHz 的小换能器构成阵列,则其作用距离又太短了。因此,本文采用如图 2 所示的混合型超声波换能器阵列结构,并将它安装在车辆前保险杠的正前方。在图 2 中,工作频率为 24kHz 的大作用距离超声波传感器有 4 个,其中的 2 个作为超声波收发器,2 个作为超声波接收器,负责检测区域 ①和 ②中的障碍物;工作频率为 40kHz 的超声波收发器有 3 个,负责检测近距离区域 ③中的障碍物;区域 ④距车辆前保险杠前方 0.5~ 2m) 中的障碍物可利用有超声波传感器的旁瓣进行检测。

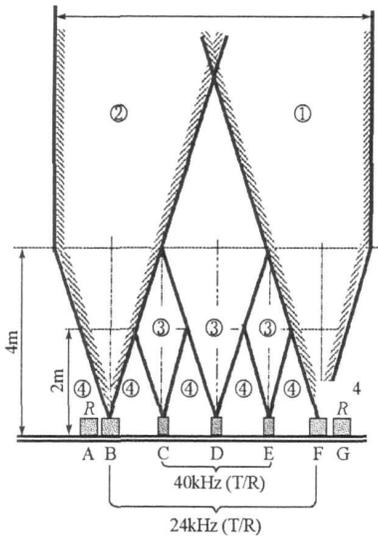


图2 混合型超声换能器阵列
Fig. 2 An omnibus ultrasonic array

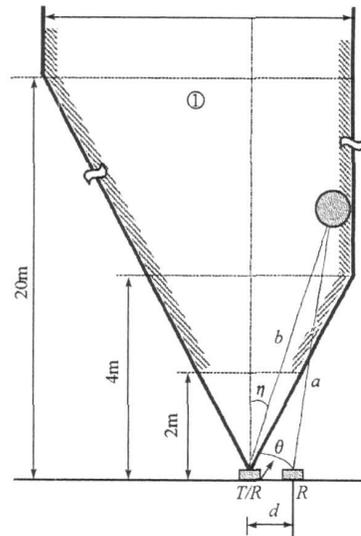


图3 区域①合成孔径边界
Fig. 3 The SA borderline of region 1

在距离换能器前方 2m 范围内,阵列主波束的最大测量孔径为

$$D_s = 2 \times \tan(5^\circ) \times 10 \approx 1.75(\text{m})$$

由于可利用超声波传感器的旁瓣进行检测,故在区域 ③和 ④内阵列的测量孔径超过了车身宽度 1.8m。

在距离换能器前方 4m 处,阵列的合成测量孔径为

$$D_M = 4 \times \tan(5^\circ) \times 6 \approx 2.1(\text{m})$$

当目标与超声阵列之间的距离大于 4m,阵列的合成测量孔径大于 2.1m。

事实上,在车辆的正前方,并非所有的障碍物都对车辆的安全行驶构成威胁。因而,只需考虑略大于车身宽度范围内的障碍物即可,否则,将增加虚警概率。下面讨论超声阵列检测边界的确定方法。

从图 2 可以看出,区域 ①和 ②的检测孔径边界的几何图形成左、右镜像关系,因此,仅讨论区域 ①中超声换能器阵列的合成测量边界就可以了。

考虑障碍物在超声收发器 T/R 中心线右侧的情形(见图3)。 T/R 接收回波信号的时间比接收器 R 延长了 Δt 秒, 即

$$\Delta t \approx \frac{d}{c} \sin \theta$$

式中, d —左、右超声换能器的中心距;

c —声波在空气中的速度;

θ —左、右两超声波接收器的连线与接收器 R 中心点到线段 b (长声程) 的垂线的夹角。

应当指出, 本文不使用信号相位匹配法进行空间信号处理^[6], 因此, 不要求

$$d < \lambda/2$$

式中, λ —24kHz 超声波的波长。

两超声换能器接收回波信号延时量 Δt 随目标距离 (4~25m) 变化而变化的曲线, 构成了超声换能器阵列的合成测量边界。图4表示区域①中超声换能器阵列合成测量孔径的边界, 亦即 Δt 与目标距离的关系(在此, 用半声程时间 t 表示距离)。

应用二次多项式拟合图4所示的曲线, 得到如下方程:

$$u = (0.1 \cdot x^2 - 3.2 \cdot x + 52) \times 10^{-3}$$

式中, u —合成测量孔径边界 Δt 的上界;

x —障碍物与换能器之间距离所对应的射程时间 TOF 的一半, 即半声程时间 t 。

由图3和图4可见, 当障碍物在超声换能器 T/R 中心线的右侧, 也即接收器 R 比换能器 T/R 先接收到回波信号, 则在图3所示的换能器阵列测量孔径内应满足如下关系:

$$\Delta t \leq u \quad (1)$$

否则, 表示障碍物在阵列的测量边界之外, 对车辆的正常行驶不构成威胁。

障碍物与超声阵列之间的距离按下式估计:

$$D = (a + b)/2 \quad (2)$$

超声波发射器 T 与障碍物之间的方位角约为

$$\eta \approx \arcsin\left(\frac{b-a}{d}\right) \quad (3)$$

式中, $d \ll a, b$ 。

同理, 在区域②中也可以导出上述结果。在其它检测区域或多传感器重叠检测区域内, 可采用多传感器信息融合技术来估计车辆前方障碍物的位置, 并实现多目标检测与定位。

3 信号处理及系统设计

3.1 信号处理

首先确定系统的采样频率。根据图4, $\min\{\Delta t\} \approx 0.005\text{ms}$, 因此, 对于24kHz超声换能器, 其采样频率应大于或等于200kHz, 才能有效地分辨出 Δt , 这是因为 $\min\{\Delta t\}$ 所对应的采样点数必须满足:

$$\text{采样点数} = \min\{\Delta t\} \times \text{采样频率} \geq 1$$

对于3个40kHz超声波传感器, 选用100kHz的采样频率即可。

目标检测过程分为两档: 近距离检测和远距离检测。

(1) 近距离目标检测: 其测距范围为4m之内。超声收发器 C、D 和 E(见图2) 发送持续时间为1ms

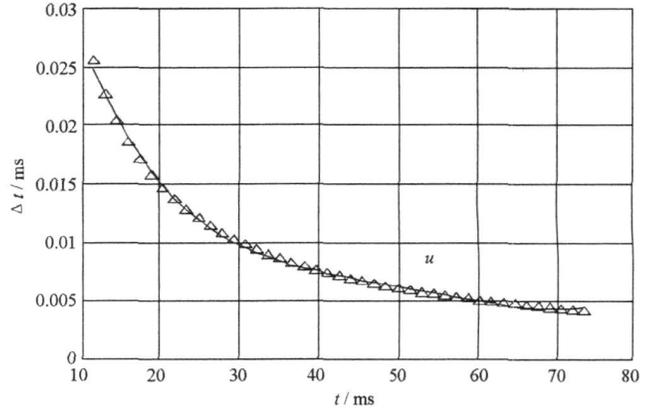


图4 区域①合成孔径的计算值

Fig.4 The calculated SA curve of region 1

的信号; 超声收发器 B、F 发送持续时间为 10ms 的伪随机码(PN)信号, 分别由接收器 A、G 接收回波信号, 采用阈值检测法判定前方是否存在目标。如果车辆前方近距离范围内没有障碍物, 则实施远距离目标检测。

近距离目标检测的盲区为

$$D_0 = c \times \text{TOF} / 2 \approx 0.2(\text{m})$$

式中, 声程时间 TOF 用阈值检测法确定。

(2) 远距离目标检测: 其测距范围为 4~25m。由超声波换能器 A、B、D、F、G(见图 2)负责检测, 其中, 24kHz 换能器 A 和 B 及换能器 F 和 G 分别构成线阵, 按式(1)~(3)确定有威胁目标的距离和方位; 而 40kHz 换能器 D 单独使用, 采用相关检测法来计算声程时间。为了避免传感器之间的串扰, 要求超声收发器 B、F 所发送的两个二进制伪随机码序列互不相关。相关检测法如下:

采样信号经平方后再通过一个二阶数字滤波器可得到回波信号的包络 $s(n)$, 即

$$s(n) = r^2(n) + 2 \cdot r^2(n+1) + r^2(n+2)$$

这里, 数字滤波器是用于消除由平方算法所产生的位于半采样频率附近的谱成分。

发送信号的包络与回波信号的平方包络之间的互相关函数 C_r 按下式计算

$$C_r(m) = \sum_{n=0}^{M-1} s(m+n) \cdot T_R(m)_{n=0,1,\dots,N-M} \quad (4)$$

式中, N 是采样序列 $r(n)$ 的长度, M 是发送信号包络序列的长度; $T_R(n)$ 为发送信号的包络(即“标准模板”)。

假设采样周期为 T_s , 互相关函数的峰值 $\max C_r$ 所对应的序列位移为 $m=L$, 那么, 超声波的射程还应进行修正, 即

$$\text{TOF} = T_s \times (L - M) \quad (5)$$

它表示计算射程时间还要扣除换能器发送超声频信号的持续时间^[5]。

目标与传感器之间的距离为

$$D = (c \times \text{TOF}) / 2 \quad (6)$$

式中, c 为声波的速度, 它与气温的关系为

$$c \approx 331.4 + 0.6T \quad (\text{m/s})$$

其中, T 为环境温度。

将 24kHz 超声收发器 T/R 对着距离为 8m、方位角约为 2° 的前方目标(直径为 15mm 的厚木板)发射持续时间为 10ms 的一种单极性伪随机码信号, 图 5 是超声换能器 R 接收到的回波信号及经过处理的包络信号。

将单极性 PN 码标准模板 $T_R(n)$ 改为双极性 PN 信号, 幅值为 ± 1 ; 将图 5 中回波信号的平方包络 $s(n)$ 也转换成双极性信号。利用式(4), 计算二者的互相关函数, 得到的结果如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看出, 相关峰值对应的位移为 $L = 584 \times 20 = 11680$, 而发送序列的长度 $M = 100 \times 20 = 2000$, 采样周期 $T_s = 0.005\text{ms}$ 。根据式(5), 超声波的射程时间为

$$\text{TOF} = T_s \times (L - M) = 48.4(\text{ms})$$

由式(6)可确定目标与换能器之间的距离:

$$D = (c \times \text{TOF}) / 2 \approx 8.228(\text{m})$$

式中, 取 $c \approx 340(\text{m/s})$ 。

目标的方位角约为

$$\theta = \arctan\left(\frac{8.228 - 8}{8}\right) \approx 1.6^\circ$$

由此可见, 测量结果与理论值十分接近。

实验表明, 将 24kHz 超声收发器 T/R 正对着距离约为 32m 的墙壁发射持续时间为 3ms 的脉冲信号, 仍可接收到可目测的回波信号^[7]。

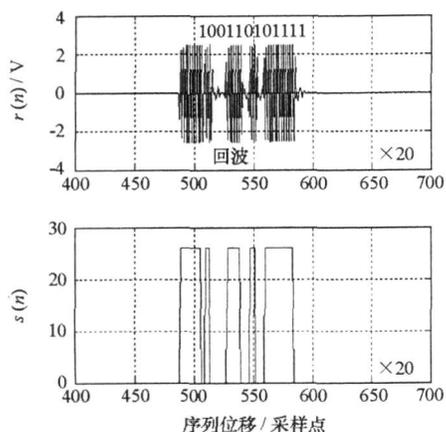


图5 单极性 PN 码回波信号及包络

Fig.5 The echo and its contour stimulated by unipolar PN code

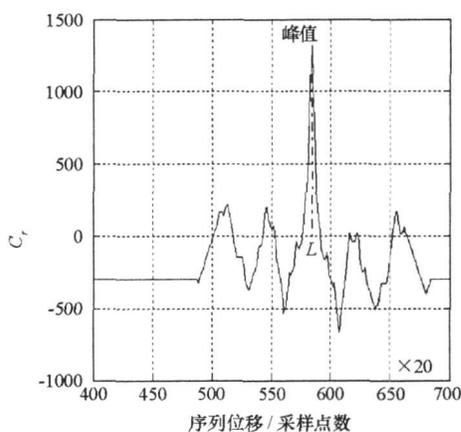
图6 双极性 PN 码和 $s(n)$ 的互相关函数

Fig.6 The correlation function between ambipolar PN code and $s(n)$

3.2 数据采集与处理系统

图2所示的超声波阵列有7个换能器,本系统数据采集芯片选用MAX155高速、8位、多通道模数转换器。该芯片有8个模拟输入通道,各通道都带有跟踪/保持电路,可同时进行采样。每个通道的转换时间为 $3.6\mu\text{s}$ (277kHz),并能将结果存在内部的 $8\times 8\text{RAM}$ 中。在单电源+5V供电时,MAX155可工作于单极或双极性、单端或差分等形式的转换电路中。此外,该芯片具有2.5V的内部参考电压和电源关断功能,这样就提供了一个完善的数据采集系统。

超声波换能器A、B、F和G接收电路的输出端分别接入MAX155芯片的AIN0~AIN3端;换能器C、D和E接收电路的输出端分别与MAX155芯片的AIN0~AIN3端连接。

用一片FPGA芯片分别为MAX155芯片、TMS320C54 DSP和超声波换能器B、C、D、E和F发射电路提供接口信号、数据存储器和选通信号。TMS320C54 DSP系统用于完成数据处理,并估计目标的距离和方位。

按前面所述的数据采集速率,如果采用数据块滚动相关算法,仅需20k字节的FPGA缓冲内存。

4 结论

本文所提出的混合型超声阵列目标检测系统,可作为无人驾驶车辆的障碍检测与定位系统。目前,已经在基于微处理机和数据采集控制板卡以及LabView软件包完成了单传感器测距和双传感器定位的实验工作,取得了预期的结果。下一步将建立基于DSP+FPGA的实时数据采集、控制与处理系统,实现周期为0.2s的目标测距与定位。如果车辆按60km/h速度行驶,在这一时间周期内车辆行驶的距离约为3.3m,小于前面所述的近程测量距离4m。

参考文献:

- [1] Jugen R K. Object Detection, Collision Warning and Avoidance Systems[M]. Society of Automotive Engineers, 1994.
- [2] Frenkel R, Gao R X. Ultrasound Pulse Coding for Robust Obstacle Detection Using a Long Cane[C]// Instrumentation and Measurement Technology, 2006: 1251-1256.
- [3] 韩赞东,陈强,尉昊赞. 超声定位技术在汽车安全预警系统中的应用[J]. 测控技术, 2002, 21(8): 10-14.
- [4] 潘仲明,简盈,王跃科. 基于两步相关法的大量程超声波测距技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(5): 73-76.
- [5] 潘仲明,杨俊,王跃科. 超声波扩频测距及其信号自适应均衡技术[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(6): 95-98.
- [6] 孙进才,朱维杰. 信号相位匹配原理与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005.
- [7] 潘仲明,简盈,王跃科. 大作用距离超声波传感技术研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(1): 207-210.