

超声波扩频测距及其信道自适应均衡技术*

潘仲明 杨 俊 王跃科

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要 在扩频通讯系统框架中,建立一种新颖的多阵元超声波测距定位系统。从测距系统的仿真结果来看,采用二进制相移键控(BPSK)直序信号数字相关解调技术和基于最小均方算法的超声波接收信道自适应均衡器,不仅可以克服本地载波(相干解调)相位偏移所带来的不利影响,而且可以抑制多径信道噪声干扰和接收信道增益、相位随机漂移对测量精度的影响,从而提高了超声波测距系统的信噪比和分辨率。此外,采用伪随机码扩频解扩方法,容易实现码分多址(只要给安装在大范围测量区域中多个传感器分配相应的伪随机码,就可以方便地辨认出各个区域传感器发出的信号),扩大超声波测距系统的测量范围。

关键词 超声波;扩谱测距;自适应滤波;数字相关解调

中图分类号 :TN911.7 **文献标识码** :A

Adaptive Ultrasonic Distance Measurement Based on Spread Spectrum Technique

PAN Zhong-ming, YANG Jun, WANG Yue-ke

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

Abstract : This paper presents a novel method for distance measurement by multi ultrasonic arrays within the Direct Sequence Spread Spectrum(DS-SS) framework of the communication system. In view of the results of ultrasonic distance measurement simulation, it can be seen that the system design considerations, which is ground on the demodulation of BPSK signals by digital correlation and the adaptive equalization of receiving channels by means of Least-Mean-Squares algorithm, lead to strong restraint of the effect of disturbance in many cases, such as the phase error of local carrier used for coherent demodulation, the jam of multipath channels, and the random drift of the gain and phase in receiving channels, hence improve greatly the signal-noise ratio and the resolving power in ultrasonic orientation system accordingly. Furthermore, since the principle of the ultrasonic measurement system adopted here is based on spread spectrum with pseudorandom sequence codes, it is easier to realize of the Code Division Multiple Access(CDMA) by allocating different codes at different testing areas, so as to distinguish different signals transmitted by different ultrasonic transmitters/receivers, which will extend the measuring scope of the system. Thus it can be said that the methods considered in this paper has expansive prospect in the measure and control field for practical purposes.

Key words : ultrasonic ; SS distance measurement ; adaptive filter ; digital correlation demodulation

本文提出的扩谱测距方法将应用于现场机器人定位系统。该系统是基于全球定位系统(GPS)原理,应用特殊的超声波传感器测距技术和多传感器信息融合方法,在机器人的特定作业空间中的不同区域安置多个超声波发送器,在运动机器人上配置十字阵元超声波接收器(如图1所示),以确定机器人的坐标和姿态,为机器人的自主控制和远程遥控提供现场空间数据。由于采用了多个传感器,如果应用传统的超声波测距方法,就难以克服多传感器信号的相互干扰和各个传感器接收通道参数不一致所带来的测量误差,同时,也无法辨别不同区域的传感器信号。为此,在本系统的方案设计时,引入了软件无线电技术,用数字信号处理器(DSP)建构自适应扩谱测距系统,以抑制多径信道的噪声干扰,实现码分多址和多阵元超声波接收信道的自适应均衡。

* 收稿日期:2002-06-28

作者简介:潘仲明(1959—),男,副教授,硕士。

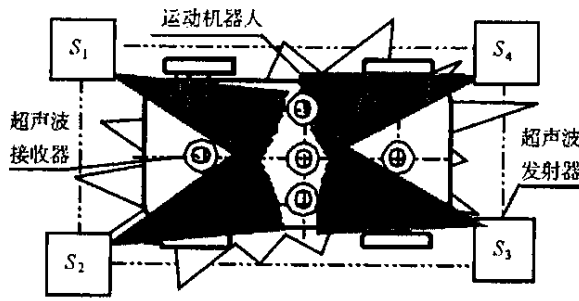


图 1 运动机器人精密定位系统

Fig.1 Precision positioning system for moving robot

声波信号的这种处理方法,在机器人、坦克、火炮以及低空军事侦察等方面^[1]具有重要的用途,此外,由于电磁波在海水中传播时衰减严重,声波信号处理在水下探测、通讯、定位和导航系统中,得到了更为广泛的应用^[2,3]。例如,美国的 Raytheon System Co.和 Dynamics Technology Inc.于 1995 年末与美国国防先进计划署签订合同,要研制沿轨(Along-track)分辨率 10cm,作用距离 1km 的合成孔径声纳(SAS),直接目的是猎雷,所用频率为 50kHz,美国国家防务中心海洋科学重点研究计划还安排了夏威夷州的一个 SAS 计划,用于探测水下不明武器,所用频率是 12.5kHz;美国的 Lockhill Martin 公司和 Woods Hole 研究所也重点开展水声扩频调制解调和自适应信道均衡技术方面的研究,并取得了阶段性成果。

1 超声波扩频测距系统

超声波扩频测距及数字相关解扩系统的原理如图 2 所示。在图 2(a)中,测距脉冲的周期(或频率 f_d)由测距的最大量程 $d_{max} = c/f_d$ 来确定(c 为声波在空气中的传播速度,当温度为 15℃, $c \approx 340\text{m/s}$);测距脉冲的占空比由扩频码的周期来确定,以保证在每一测量周期中有完整的扩频码序列。扩频码采用自相关性质优良的 Gold 序列,其频率 f_s 由测距系统的分辨率确定($f_s = 100f_d$)。测距脉冲与扩频码相乘,再与载波(频率为 $f_c = 10f_s$ 的余弦信号)相乘后,完成 BPSK 信号调制;BPSK 信号经 D/A 转换、放大后驱动超声波发送器。

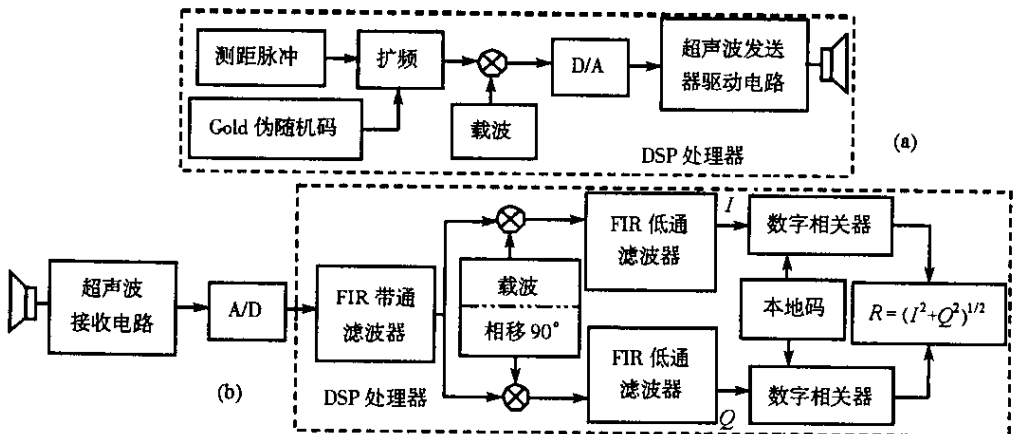


图 2 超声波扩谱测距系统原理框图 (a)发送器; (b)接收器

Fig.2 Framework of ultrasonic spread spectrum distance measurement (a) Transmitter; (b) Receiver

在图 2(b)中,超声波(BPSK 信号)经接收端放大后,DSP 系统对其进行采样,并转换成数字信号,再经 FIR 数字滤波器滤除通带外的噪声,然后,用与调制载波相干的两个正交的载波与已调信号相乘,经基带 FIR 低通滤波器,形成 I、Q 两路信号。将这两路信号分别经 $T_b/2$ (T_b 为扩频码的码片周

期)延迟后与自身相加完成前端处理,而后进入数字相关器与本地码(事先分配的 Gold 序列)进行相关运算,在输出端则进行平方相加和开方处理,以克服相干解调的本地载波相位误差的影响。

图 3 给出了仿真过程中测距脉冲和相关峰值 R 的相对位置关系(绘图时将测距脉冲乘以 -1 ,以便于区分测距脉冲和相关峰值 R)。在图中,小峰值 A 是与本地码不同的另一 Gold 序列产生的 BPSK 信号(在时间轴 150 单位处设立开关信号,使之叠加在正常信号中)对接收端的影响,峰值 B 是与本地码相同的 Gold 序列产生的正常测距信号在接收端的相关解调结果,由峰值出现的时刻相对于测距脉冲发出时刻的滞后量乘以声速,就是超声波发送器与接收器之间的距离,峰值 C 是正常 BPSK 信号经延时后,再叠加在正常信号(模拟反射波)中产生的结果。图中的高频噪声是叠加在正常信号中的加性高斯白噪声,信噪比为 10。

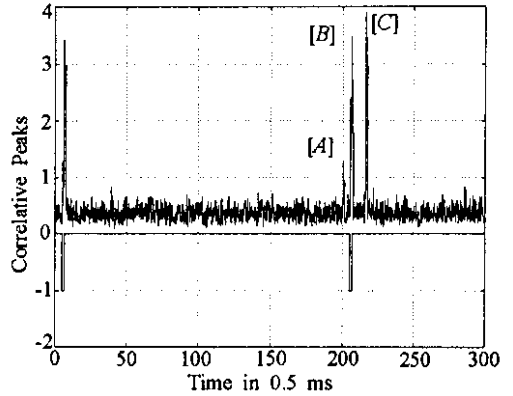


图 3 测距脉冲(反向)与相关峰值

Fig.3 Pulses (inverted) and correlative peaks

与峰值 B 、 C 相比,峰值 A 很小,因此只要设计适当的门限,就可忽略 A 的影响。由此可见,采用扩频测距,不仅可以有效解决多途传播引入的问题,而且抗干扰能力强,易于实现码分多址。

2 自适应信道均衡

超声波接收信道的增益和相位,在工作时会产生随机漂移的现象,使得各个信道的增益和相位不一致。为了削弱这种时变特性的不利影响,通常是采用自适应信道均衡的方法。考虑到超声波接收信道在某一瞬间可以通过的频率分量不太宽,且对波形的要求并不十分严格的工作情况,因而仅需满足信道之间振幅和相位特性的一致性就可以保证测量精度。为此,可采用如图 4 所示的超声波自适应信道均衡方案。图中,基准信道取自多阵元接收信道中的某一信道,其输出 d_k 作为期待响应信号,输入 s_k 是在超声波周期性停止工作期间,由 DSP 系统从信道输入端直接注入的专用测试信号,进行所谓的“断续式”自适应调整。在此,自适应均衡器采用如图 4(b)所示的有限冲击响应(FIR)结构的滤波器,自适应算法采用 LMS 算法。由图 4 可知误差信号为

$$e_k = d_k - y_k = d_k - W_k^T X_k \tag{1}$$

式中, $W_k^T = [w_k^0, w_k^1, w_k^2, w_k^3]$, $X_k^T = [x_k, x_{k-1}, x_{k-2}, x_{k-3}]$

最小均方算法就是寻求使 k 时刻的均方误差 $E[e_k^2]$ 最小化的方法,从而解出最佳权系数 W_k^* 。在实际应用中,均方差的最小值是按照 Widrow^[4]提出的随机梯度算法通过递归求解的。令 n 表示迭代次数,则最小均方迭代算法如下:

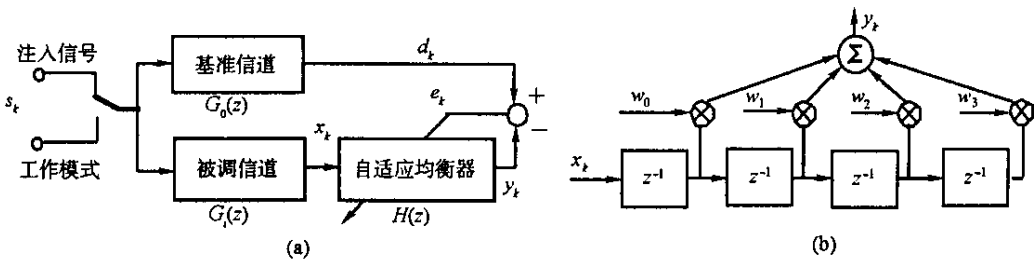


图 4 超声波自适应信道均衡原理框图 (a)系统方案; (b)FIR 滤波器结构

Fig.4 Framework for adaptive equalizer of ultrasonic receiving channels (a)System procedure; (b)FIR filter

$$\begin{cases} y_k(n) = W_k^T(n)X_k(n) \\ e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \\ W_k(n+1) = W_k(n) - \mu e_k(n)X_k(n) \end{cases} \quad (2)$$

式中, μ 为控制收敛速率和算法稳定性的步长。

本文采用的自适应滤波器的权系数长度 $N = 4$, 收敛因子 $\mu = 0.05$, 进行仿真实验时, 将模拟超声波接收电路的谐振频率偏移 60%。从图 5(a) 纵坐标的正半部分可以看出, 发生频偏时的相关峰值明显降低(参见图 3); 其纵坐标的负半部分的相关峰值, 是用同样的参数, 但采用了自适应信道均衡器所得到的仿真结果(绘图时将结果乘以 -1); 图 5(b) 是在与图 3 相同的仿真条件下, 采用注入信号进行自适应滤波的结果。可见, 自适应均衡的效果不仅保持了相关峰值不变, 而且可以模拟信道的逆传递函数, 剔除多径信道的噪声。

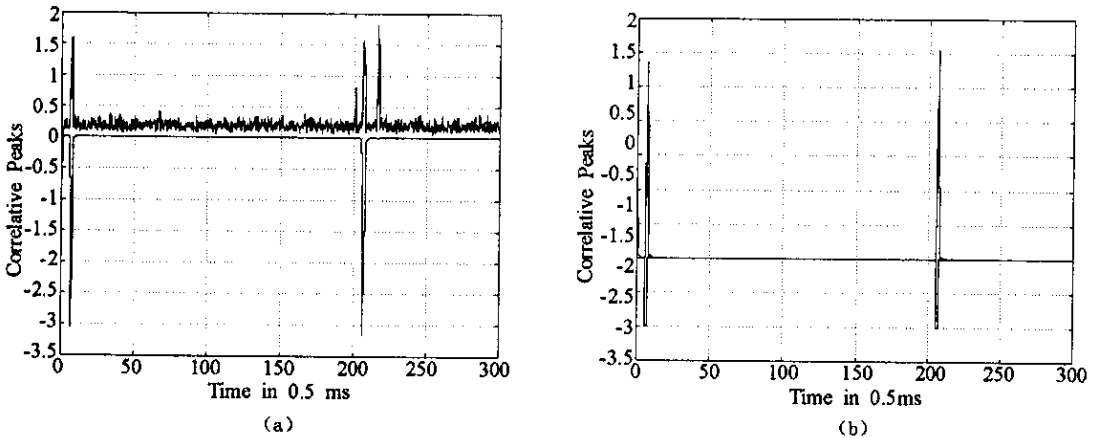


图 5 自适应均衡仿真结果 (a) 频偏时的相关峰值; (b) 多径信道的自适应模拟

Fig.5 Results of simulation for adaptive equalizer

(a) Correlative peaks when resonance frequency change; (b) Simulator of multi-path channels

3 结论

本文利用 Matlab 通讯工具箱进行了超声波扩频测距和自适应信道均衡的仿真实验, 从初步的仿真结果看, 证实了文中提出的扩频测距、数字相关解调技术和自适应均衡方法, 具有很强的抑制多径干扰的能力, 同时还可以提高系统测距的分辨率, 因而, 比常规超声波测距方法具有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈华伟, 蔡宗义等. 两种声学阵列的定向精度分析与仿真[J]. 声学 & 电子工程, 2001, 6(3): 6-11.
- [2] 马晓民. 水声扩频技术在水下轨迹测量中的应用[J]. 声学 & 电子工程, 2001, 6(2): 1-6.
- [3] 李启虎. 水声信号处理领域若干专题研究进展[J]. 应用声学, 2001, 20(1): 1-5.
- [4] [美] Rappaport T S. 无线电通信原理与应用[M]. 蔡涛等译. 北京: 电子工业出版社, 1999: 236-237.

