

基于声波相位的物联网感知技术

刘洋, 张武雄, 房卫东

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 物联网设备之间的感知以及交互技术是物联网行业发展必备基础之一。随着多媒体设备越来越普及(如智能手机、平板电脑、家庭音响), 普遍存在于这些设备上的扬声器和麦克风使低成本声波设备与设备之间的交互技术成为可能。而声波具有的低速率、低频率的物理特性, 使基于声波的感知技术具有较高的精度、较低的计算量等优点。基于此, 提出一种声源与移动设备之间基于声波的相位差测量方法, 以在不同的移动设备与声源之间进行高精度的距离测量。在一定范围内, 首先, 移动设备接收声源发送的单频率声音信号, 并利用声音信号与声源的音频模块进行相位同步, 然后, 通过计算移动设备与声源之间相位差, 计算移动设备与声源之间距离的改变。

关键词: 物联网感知技术; 相位补偿; 声波测距

中图分类号: TN912.6

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00052

IoT sensing technology based on acoustic phase

LIU Yang, ZHANG Wuxiong, FANG Weidong

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract: The perception and interaction technology between IoT devices is one of the necessary foundations for the development of the Internet of things. With the growing popularity of multimedia devices, such as smart phones, tablet, and home audio, the speakers and microphones are ubiquitous on these devices which make it possible to the low cost interaction between devices using acoustic signal. The low speed and low frequency physical properties of sound waves make the acoustic-based sensing technology have higher accuracy and lower computation. A phase based measurement method using acoustic signals was proposed, which could be used to measure high precision distance between different mobile devices and sound sources. In a certain range, firstly, the mobile device receives the single frequency acoustic signal transmitted by a sound source. The mobile device uses the sound signal to synchronize the phase between the mobile devices the sound source, and then calculates the distance between the mobile device and the sound source by calculating the phase difference during movement.

Key words: IoT perception technology, phase compensation, acoustic ranging

1 引言

随着现代信息技术的发展, 移动设备的价格越来越低, 且被越来越多的人所使用, 人们的生活因此变得更加便利和充实, 同时, 移动设备能够支持更多的功能应用, 帮助用户实现人与人、人与设备之间更加智能的互动。移动设备的功能不断增多, 但是仍然不能满足人们的需求, 其需要更加经济,

更加精确人与物、物与物的距离。物联网设备之间距离的测量和定位技术是物联网感知技术中重要的组成部分^[1-4]。在设备之间, 传统无线测距技术包括基于视频的测距技术、基于红外的测距技术和基于惯性的测距技术等。这些技术所需要的设备往往体积庞大, 或价格昂贵, 并且对应用场景有特定的要求, 例如, 需要被识别的目标在光照下, 需要在某个区域内等, 不具有普遍性。同时, 传统的测距

技术受到现有硬件资源的限制,测距精确度往往受到限制,并不能满足用户的使用要求,这限制了物联网设备之间的感知以及交互。随着多媒体设备越来越普及(如智能手机、平板电脑、家庭音响),普遍存在于这些设备上的存储和计算资源,使低成本、高精度的设备与设备之间的交互技术成为可能。近年来,有大量关于移动设备之间距离测量的研究,主要可以分为以下 3 个方面。1) 基于 Wi-Fi 信号的测距,例如,基于 Wi-Fi 信号的信号强度的测距^[5]、基于 Wi-Fi 信号的信道状态信息(channel state information)的测距^[6]。2) 基于声波的反射波^[7]的测距。这些方法首先计算发射信号与目标物体的反射信号的时间差或相位差,或多普勒频移,然后计算目标物体的距离。3) 基于声波的多普勒效应的测距^[8]。这种方法是利用声源发送频率变化的声波,接收端通过计算每个声源的多普勒效应,并结合接收端内部的传感器,判断接收端的移动方向和距离。由于基于多普勒的方法受到多普勒效应的分辨率的影响,只有速度较快的移动才能被识别,测量的精度有限,并且声源发送频率变化的声音由于硬件的限制,容易产生噪声。这些方面的研究受到了移动设备现有硬件资源的限制,精确度或作用距离受到了制约。例如,在基于声波的反射波的方法中,由于受到移动设备上音频模块采样频率的限制,精确度较低,同时受到移动设备音频模块功率的限制与多径反射噪声的影响,测距范围并不能满足用户多元化的需求。传统的相位同步方法要求接收端对发射端有反馈信号,以便构成稳定的闭环链路,然而在生活中,移动设备(如智能手机),与声源之间并不存在某种反馈,这使传统的相位同步技术不能直接应用在移动设备相位同步的场景中。

2 系统模型

针对现有技术的不足,为了实现移动设备与声源之间高精度的距离测量,本文提出了一种基于声波相位的测距方法,旨在解决当前声波测距方法及设备受噪声影响较大测量精度低的技术问题。该方法首先进行设备与声源之间精准的同步,随后计算并测量移动设备与声源之间的相位变化,获取移动设备与声源的距离。

在现实生活中,由于设备之间硬件系统(如系统时钟)的差异,导致声源与移动设备之间的相位并不是同步的,移动设备与声源之间的相位会随着

时间的变化而变化,很难利用传统的方法实现声源与移动设备之间音频相位的同步。在人们大量的观察中发现,常见的移动设备与声源之间的相位差会随时间呈线性的变化趋势。因为本文采用相位差进行计算,为了分析方便,所提方法假设声源的相位为固定值,不影响计算结果。相位差的不规则变化来自移动设备与声源的不同步。于是,在一定范围内,声源发射某一固定频率的声波,移动设备接收该声波,可以将移动设备接收到声波的相位与声源的声波相位之差 θ 表示为 $\theta = \theta_a(t) - \theta_b + \phi_a(t)$ 。其中, $\theta_a(t)$ 为移动设备的音频模块的相位; θ_b 为声源的音频模块的相位,并假设其为固定值。在大量实验和观察中发现, $\phi_a(t)$ 是一个随时间缓慢变化的函数,这个函数变化很缓慢,在一定时间内近似保持不变,并且 $\theta_a(t)$ 是一个随时间线性变化的信号。在一定距离内,当声源与移动设备之间的距离不发生变化时,近似认为 $\theta = at$,其中, a 是常数。通过实验可证明,存在合适的常数 a ,在较长的一段时间内,使这种相位漂移变化可以控制在 2π 以内。

由于声源与移动设备的相位差随着时间呈线性变化,因此在频域上,可以看成 $f_a - f_b = \frac{a}{2\pi}$,其中, f_a 为移动设备接收到声波的频率, f_b 为声源发射声波的频率。由于 a 是常数,并且频率差异很小(小于 0.05 Hz),传统的方法(如快速傅里叶变换)需要大量的采样点才能够测量到如此小的频率差异,并不能满足系统实用性的要求。

针对目前技术的不足,本文根据已有技术提出了一种快速高精度的相位同步算法,并根据相位差计算声源与移动设备之间的距离,系统模型如图 1 所示。其中,正交信号产生模块,可以使用信号延时 $\frac{1}{4}$ 个周期的方法来实现,也可以使用希尔伯特变换的方法来实现,还可以使用二阶广义积分器(SOGI, second order generalized integrator)技术来实现。

为了从正交信号 $q_1v'_0$ 和 $q_2v'_0$ 中解调出移动设备获取的相位,首先需要进行相位检测,也就是获取正交相位信号 $d_1v'_0$ 和 $d_2v'_0$,其根据不同实现方法构成了不同类型。这些算法可以是:1) 基于静止参考坐标系的方法;2) 基于同步旋转坐标系的方法。基于静止参考坐标系的方法把输入信号与其正交信号相乘,经过低通滤波后得到信号的相位信息。这种方法所产生的二倍频率的信号需要低通滤波器

将其滤除，然后通过相位解调技术，得到当前信号的相位。低通滤波器的引入将使自动控制过程中产生较大的时延，同时低通滤波器的截止频率如果设置过低，将会影响自动调节过程；如果设置过高，将不会达到满足要求的滤波效果，系统将会受到噪声信号的影响。相对于基于静止参考坐标的方法，基于旋转坐标变换的方法具有动态性能好的优点。其采用 Park 变换的方法进行相位检测，利用自动控制模块的输出 ω' 作为输入，可以对 $q_1v'_0$ 和 $q_2v'_0$ 中频率为 ω' 的载波进行相位检测，得到正交的相位信号，从而得到 $d_1v'_0$ 和 $d_2v'_0$ 。其中，相位解调模块为反正切 (\arctan) 变换，用于解调 $d_1v'_0$ 和 $d_2v'_0$ 中的相位信息，得到当前 v'_0 中 ω' 频率信号的相位 θ ；自动控制模块利用由用户提供的频率的估计值 ω 和相位解调模块输出的相位信号 θ 作为输入，动态调整参数 ω' ，使 θ 在 0 附近趋于稳定。该模块可以使用比例—积分—微分 (PID, proportional-integral-derivative) 的控制方法，也可以使用基于人工神经网络 (ANN, artificial neural network) 的控制方法，还可以使用模糊逻辑控制 (fuzzy logic control) 的方法。当 $\omega' \approx \omega_0$ 时，则认为同步完成，进入距离测量的步骤。

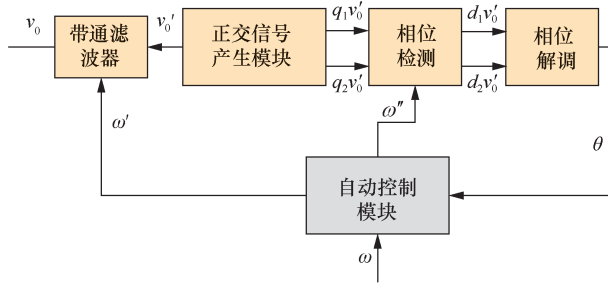


图 1 音频模块之间相位自动同步的系统模型

3 系统的实现

本节包括 3 个方面的内容，首先，介绍不同音频模块之间相位同步的方法；然后，利用已经同步的音频模块之间相位差的变化，进行高精度的距离测量；最后，通过实验证明系统的有效性。

3.1 相位同步方法

相位同步的系统模型如图 2 所示。其中，带通滤波器的中心角频率为 ω ，其为用户给定，在系统运行过程中保持不变，输出 v'_2 为输入信号 v_2 中角频率为 ω 的信号分量，假设 $v'_2(t) = A \sin(\omega_0 t + \theta)$ ，

$\omega_0 = 2\pi f_a$ ，其中， A 表示输入信号的幅度， θ 表示输入信号的相位， ω_0 表示信号的实际角频率， f_a 是接收到的实际信号频率。

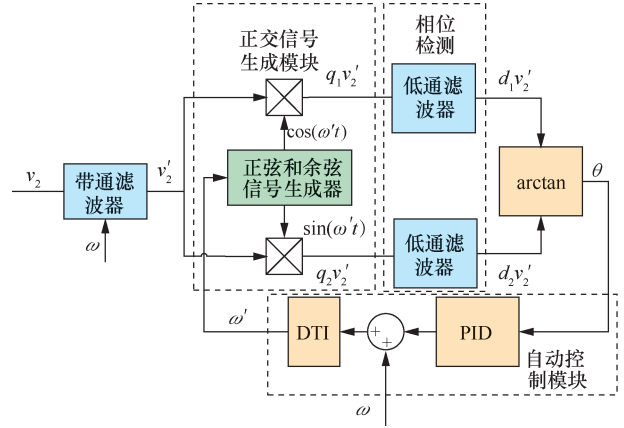


图 2 相位同步的系统模型

其中，正弦和余弦信号生成器结合自动模块输出的角频率估计值 ω' ，构成正交信号生成模块，生成正弦信号 $\sin(\omega't)$ 与余弦信号 $\cos(\omega't)$ 。通过将 v'_2 与 $\cos(\omega't)$ 相乘，得到 $q_1v'_2$ ，通过将 v'_2 与 $\sin(\omega't)$ 相乘，得到 $q_2v'_2$ ，计算过程为

$$q_1v'_2 = \cos(\omega't) \cdot A \sin(\omega_0 t + \theta) = A \left(\sin(\omega't + \omega_0 t + \theta) - \frac{\sin(\omega't - \omega_0 t - \theta)}{2} \right)$$

$$q_2v'_2 = \sin(\omega't) \cdot A \sin(\omega_0 t + \theta) = A \cdot \left(\cos(\omega't - \omega_0 t - \theta) - \frac{\cos(\omega't + \omega_0 t + \theta)}{2} \right) \quad (1)$$

当 $\omega' \approx \omega_0$ 时，得到

$$q_1v'_2 \approx A(\sin(2\omega_0 t + \theta) + \sin \theta)$$

$$q_2v'_2 \approx A(\cos \theta + \cos(2\omega_0 t + \theta)) \quad (2)$$

由于 $q_1v'_2$ 、 $q_2v'_2$ 均包含 $2\omega_0$ 角频率的信号，因此，需要经过低通滤波器将其滤除。将 $q_1v'_2$ 、 $q_2v'_2$ 信号分别经过一对低通滤波器进行低通滤波，分别得到信号 $d_1v'_2$ 和 $d_2v'_2$ ，可以表示成

$$d_1v'_2 \approx A \sin \theta$$

$$d_2v'_2 \approx A \cos \theta \quad (3)$$

故 $d_1v'_2$ 和 $d_2v'_2$ 构成一对包含相位信息的正交信号。这里的一对低通滤波器起到了相位检测的作用。

通过 \arctan 模块对 $d_1v'_2$ 和 $d_2v'_2$ 进行反正切变换，解调信号当前的相位 θ ， θ 的范围是 $[0, 2\pi]$ ，该模

块是相位解调模块。由于声源与移动设备之间不是同步的，这时的相位是随着时间变化的，并不能用来计算距离。利用比例—积分—微分（PID）控制的方法实现移动设备与声源之间的相位同步过程中的自动控制，该模块是自动控制模块。图 2 中离散时间积分器（DTI, discrete-time integrator）与 PID 共同构成表示比例—积分—微分自动控制模块。自动控制模块根据输入信号 θ 的变化以及角频率 ω' 的估计值 ω ，对角频率 ω' 进行自动调节，使 ω' 满足 $\omega' \approx \omega_0$ 条件，从而实现声源与移动设备之间的相位同步。

3.2 基于相位解卷绕的声波高精度测距算法

此时，声源与接收端的音频相位是近似同步的，因此，提出一种基于声波相位的原理实现声源与移动设备测距的方法，原理如图 3 所示。

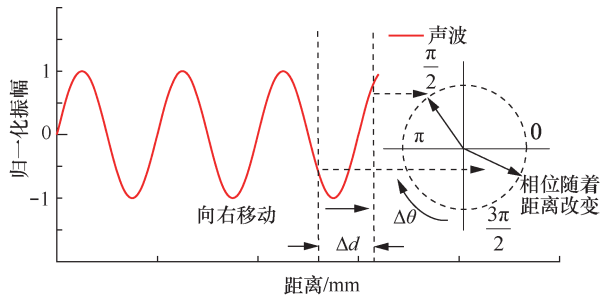


图 3 基于相位的声波测距原理

在完成移动设备与声源近似同步之后，也就是 $\omega' \approx \omega_0$ 之后，设置 PID 输出参数 ω' 为固定值，不再随着 PID 的输入 θ 的改变而改变，此时，记录相位值为初始相位 θ_0 。

假设移动设备的初始位置已知，随着移动设备的移动，移动设备的音频模块与声源距离也随之移动，这会使接收到声音的信号相位发生周期性的变化。通过进行相位的解卷绕以及当前周期内的相位值，可以判断移动设备移动的距离，实现精确的声源与距离的测量。由图 2 可知，由于距离变化，引起相位 θ 发生变化，当前位置与初始位置相位差可以表示为

$$\Delta\theta = 2\pi k + \theta_1 \quad (4)$$

其中， θ_1 是相位在当前周期内的值与初始相位 θ_0 的差， k 为相位卷绕的次数，在测量的过程中自动计算。当相位从 0 跳变至 2π 时， k 的值加 1，相位从 2π 跳变至 0 时， k 的值减 1。这里， k 值可以通过解卷绕的方式来获取。移动设备、声源之间距离 R_d 与相

位差的关系可以表示为

$$R_d = R_0 + \frac{v_s}{\omega'} \cdot \frac{\Delta\theta}{2\pi}$$

其中， R_0 为初始位置的距离，在实际应用中可以利用参照物求得， v_s 为当前环境下声波的传播速度， ω' 为声波的角频率。

3.3 实验结果

实验结合本文所提方法提出的音频模块之间相位自动同步的结构，使用带通滤波器和基于静止坐标系相位检测方法的步骤实现。实验中假设声源位置固定，放置在卷尺的 0 处。移动设备为一部安卓手机，放置在 10 mm 处，记录该位置为初始位置，即 $R_0=10$ 。声源播放载波频率 f_b 为 18 kHz 的亚超声波，手机通过话筒接收该声波，将接收到的声波信号 v_2 输入带通滤波器模块。将自动控制模块的输入量 ω 设置为 $2\pi \cdot 18k$ rad/s。在一定范围内，将本文所提方法的测量结果与卷尺上实际距离做比较，经过分析，得到数据的累积分布函数（CDF, cumulative distribution function）如图 4 所示。

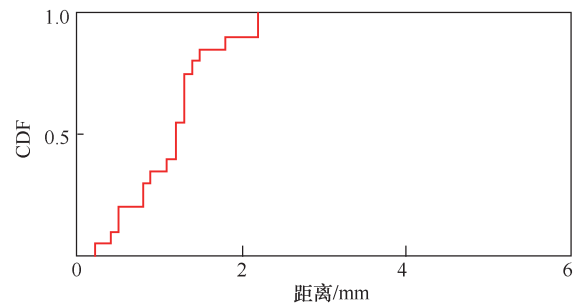


图 4 测量误差累积分布函数

由图 4 可知，在一定范围内，本文所提方法的测量结果误差中值是 1.5 mm，并且 90% 的数据的误差在 2 mm 以内。

4 结束语

本文针对目前声波测距技术的测距精度较低、测距范围较小等问题，提出了一种高精度的相位同步方法，并直接利用声波的辐射来测量移动设备移动的距离，此方法相比传统方法有精度高、距离远的优点。本文所提方法可以利用现有常见的移动设备与声源实现高精度同步，同时也可以用于设备与声源之间的高精度距离测量，同时在部署多个声源之后，还可以用于移动设备定位和行为感知。

参考文献:

- [1] 肖竹, 王东, 李仁发, 等. 物联网定位与位置感知研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(10): 1265-1287.
ZHU X, DONG W, LI R F, et al. Localization and nodes location-aware in Internet of things[J]. Scientia Sinica Informationis, 2013, 43(10): 1265-1287.
- [2] 顾晶晶, 陈松灿, 庄毅. 基于无线传感器网络拓扑结构的物联网定位模型[J]. 计算机学报, 2010, 33(9): 1548-1556.
GU J J, CHEN S C, ZHUANG Y. Wireless sensor network-based topology structures for the Internet of things localization[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(9): 1548-1556.
- [3] 胡永利, 孙艳丰, 尹宝才. 物联网信息感知与交互技术[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1147-1163.
HU Y L, SUN Y F, YIN B C. Information sensing and interaction technology in Internet of things[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1147-1163.
- [4] 童恩栋, 沈强, 雷君, 等. 物联网情景感知技术研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 9-14, 20.
TONG E D, SHEN Q, LEI J, et al. Study on context-aware technologies for Internet of things[J]. Computer Science, 2011, 38(4): 9-14, 20.
- [5] LI W L, ILTIS R A, WIN M Z. A smartphone localization algorithm using RSSI and inertial sensor measurement fusion[C]//Global Communications Conference. 2014:3335-3340.
- [6] XIONG J, JAMIESON K. ArrayTrack: a fine-grained indoor location system[C]//Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation. 2013:71-84.
- [7] WANG W, LIU A X, SUN K. Device-free gesture tracking using acoustic signals[C]// International Conference on Mobile Computing

and NETWORKING. 2016:82-94.

- [8] MAO W, HE J, QIU L. CAT: high-precision acoustic motion tracking[C]//International Conference on Mobile Computing and NETWORKING. 2016: 69-81.

[作者简介]



刘洋(1991-), 男, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士生, 主要研究方向为无线定位、物联网、普适计算等。



张武雄(1985-), 男, 博士, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所副研究员, 主要研究方向为物联网、车联网、室内定位等。



房卫东(1971-), 男, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所高级工程师, 主要研究方向为无线传感器网络的可靠传输、信任管理与安全路由协议等。