

## 一种无需时间同步的声源定位方法\*

余冉, 许斌<sup>+</sup>, 孙国栋

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

### Acoustic Source Localization Scheme without Time Synchronization

YU Ran, XU Bin<sup>+</sup>, SUN Guo-Dong

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

+ Corresponding author: E-mail: xubin@tsinghua.edu.cn

**Yu R, Xu B, Sun GD. Acoustic source localization scheme without time synchronization. *Journal of Software*, 2011, 22(Suppl. (1)): 102-110.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11011.htm>

**Abstract:** Location is of great importance wireless sensor network applications because location information can often be used to identify events. TODA is a typical localization scheme widely used in previous work, but it requires time synchronization over all anchor nodes with known positions. Time synchronization increases the cost and complexity of system, and the errors caused by software and hardware seem subtle but often lead to bad accuracy of localization. A new TDOA localization scheme is presented in this paper, whose basic idea is to use an additional, position-known signal source,  $S'$  to change the way of calculating TODA values. After the emission of the source signal  $S$ , the new signal  $S'$  is emitted. The TDOA of  $S$  between different receivers can be derived from the time difference of receiving  $S$  and  $S'$ , called TD2S, at each receiver. This way eliminates the dependence of TODA on time synchronization, and improves the localization accuracy. Experiments under three-dimensional space have been conducted with mobile phones, and the results show that the proposed scheme is not only of high accuracy, but also of easy deployment, low cost, and robustness.

**Key words:** acoustic signal; localization; time synchronization; mobile device

**摘要:** 在无线传感器网络的应用中,位置信息对于监测活动起着极其重要的作用。TDOA(time difference of arrival)是一种得到广泛应用的定位方案,但是对于传统的 TDOA 算法,使用者需要预先通过在节点间收发数据包执行所有节点的时间同步,这不仅增加了额外的成本,还会因为软件和硬件的延迟带来一些计时误差,这些误差虽然绝对数值较小,但仍然会极大地降低高速信号定位的精度。提出一种新的 TDOA 定位方法,在需定位的信号源之外添加了一个位置已知并固定的系统信号源来改变 TODA 值的计算方式,让这个系统信号源在待定位物体发出源信号  $S$  之后发出一个与源信号相同的信号  $S'$ ,然后再使用同一节点接收两个不同的信号  $S$  和  $S'$  的时间差(time difference of 2 signals,简称 TD2S)来计算两个不同节点接收  $S$  的时间差,消除了 TDOA 方法对节点间时间同步的依赖,进而有效地提高了声源的定位精度。最后,在手机上实现了该定位方法,并在三维空间下进行了实验,结果表明,所提方法不仅定位精度较高,而且是一种容易部署、成本低、抗干扰能力较强的方法。

**关键词:** 声音信号;定位;时间同步;移动设备

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60803124, 61170212)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-07-29

在无线传感器网络的应用中,节点所处的位置通常是一个重要的感知信息,研究者们已经提出了多种定位方法,其中与距离相关的方法包括接收信号强度方法(received signal strength,简称 RSS)、信号到达时间方法(time of arrival,简称 TOA)、信号到达时间差方法(time difference of arrival,简称 TDOA)等等.其中,TDOA 方法具有较高的定位精度.在这种方案中,待定的信号源发出信号,多个位置已知并且固定的接收器记录这个信号的到达自身的时间.通过不同接收器到达时间的差值,可以计算出信号源所在的位置.除了上面的方案之外,另一种定位方案往往也被称为“TDOA”,这种方法<sup>[1-5]</sup>使用两种不同传播速度的信号进行定位.Cricket<sup>[6]</sup>是采用这种方案的一个典型例子.它的信号源在同一时刻发射两种信号:无线信号和超声波.接收器会记录两种信号各自的到达时间.通过这两个到达时间和信号的传播速度,可以算出信号源和接收器之间的距离,从而在获取多个这种距离后推出信号源的位置.本文不考虑这种方案,我们所说的 TDOA 都是指使用同一信号各接收器的到达时间差.

本文主要研究使用 TDOA 定位的问题.对于 TDOA 方法,由于对时间差的计算必然要求各接收器之间的时间同步.对于时间同步,当前已有很多方法,如 RBS<sup>[7]</sup>,TPSN<sup>[8]</sup>,FTSP<sup>[9]</sup>,GTSP<sup>[10]</sup>等,这些方法是通过网络的不同节点间一系列的信息交换来完成的.然而,当一个节点将自己产生的包含时间戳的信息包发送给另一个节点以实现同步时,这个信息包会在到达目标之前遭遇很多延迟.这些延迟使得时间同步不能准确地执行.文献[11,12]总结了这些导致时间同步不准确的因素:

- 发送时间:发送方用来产生一个信息包的时间.
- 进入时间:信息包在被发送之前,在介质访问控制子层中的延迟时间.
- 传播时间:信息包从被发送出去到被接收端接收到的时间.
- 接收时间:接收端接收,解码和将信息包转发到网络上层的时间.

已有的时间同步方法都力图去除这些因素的影响.然而,它们往往只能处理其中的一两种而非全部<sup>[8,11]</sup>.而且即使有一个完美的方案能够解决以上所有的问题,但它仍然会受到时钟偏移的影响.由于时钟偏移的存在,同步往往需要在节点的工作过程中执行多次,这带来了很大的开销.在这种情况下,时钟偏移存在的问题使得高精度的定位难以实现,特别是在使用低成本或商用设备时.

与以上问题相对应,我们研究了一种无需时间同步的新型定位方案,称为 Whistle.我们通过双信号感知和采样点查找两种技术获得了很高的时间精度.在这种方案中,首先,接收点接收并记录源信号和后继信号(称为双信号感知);接着,所有接收器计算两个信号之间的采样点数(称为采样点查找),并且依此计算出两个信号的到达时间之差;然后,所有接收器都将结果发送到服务器,服务器再根据这些时间差和接收点的位置计算出源信号到达不同接收点的时间差;最后,根据 TDOA 方法,我们可以得到信号源的位置.与其他使用特定设备的 TDOA 系统相比,Whistle 具有低成本、部署方便和应用范围广泛的特点.具体来说,本文的贡献主要包含以下几个方面:

- 无需时间同步.提出的机制改变了 TDOA 方法的底层机制,去除了时间同步的要求,因此避免了其他 TDOA 方案中的很多误差.
- 高精度的定位系统.时间的粒度取决于接收器的采样频率.我们使用了 44.1kHz 的采样频率,因此能在时间测量上达到 0.023ms 的精度.大多数商用设备,如手机、MP3、普通传感器等都支持这个采样频率.
- 我们将 Whistle 部署在 6 个商用手机上.在一个  $9 \times 9 \times 4\text{m}^3$  空间内的多种环境下的实验中,我们的系统的平均误差在 10cm~20cm 之间,这可以满足很多应用的需求.

本文第 1 节给出 Whistle 的原理、关键技术及其解决方法.第 2 节描述 Whistle 的具体工作流程.第 3 节通过一个基于手机的真实实验床平台,综合考察 Whistle 的性能.第 4 节对与本文相关的工作进行简要介绍和分析.最后总结全文.

## 1 无需时间同步的定位方法

在 Whistle 方案中,待定位物体(声源)需要能够发出一个声音信号,表明其存在.在本文所提的系统中,我们采用声音信号进行定位.这具有一定的代表性,因为很多电子设备,如手机、PDA、一般传感器等都能发出和录

制声音.不过,我们所设计的方案也可以用在采用其他信号的定位系统中.用  $S$  表示 3D 空间中的一个固定声源,它可以发出一个持续一段时间的全向声音信号.为方便起见,我们也用  $S$  来代表被发出的信号.在 Whistle 中,假设信号  $S$  可以预先准确地用数学表达式描述出来.从实现上说,Whistle 并不依赖于某种特定的信号,因此可以有很广泛的应用.图 1 展示了 Whistle 系统的基本结构.在此系统中,接收器会记录前后两个信号,并将相关的时间信息传给 AP,AP 再将这些信息传输到笔记本电脑以计算出结果.在 Whistle 中是否使用笔记本电脑作为服务器是可选的.如果节点的计算能力能够达到要求,也完全可以采用节点来计算信号源位置.这样,整个网络就成为一个纯粹的星形结构.

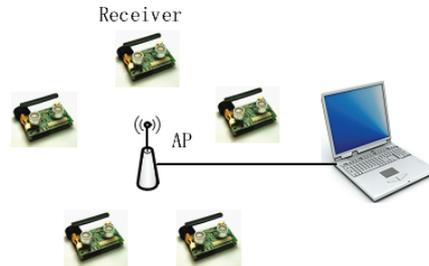


Fig.1 Architecture of Whistle

图 1 Whistle 系统的网络体系结构

### 1.1 由TDOA得到声源位置

TDOA 值代表的是同一信号到达不同接收节点的时间差.在 2D 条件下,一个 TDOA 值  $\Delta\tau_{ij}$  与相关节点  $i$  和  $j$  可以确定一条双曲线的  $i$  和  $j$  所在的位置.因此,信号源必定位于这条双曲线上,基于 TDOA 值的定位也通常被称为双曲线定位.2D 空间中,3 个参考点所建立的两条双曲线就可以唯一确定信号源所在的位置;3D 空间中,4 个参考点形成的 3 个双曲面也可以实现定位功能.虽然在合适的参考点数目下直接求解双曲线的交点是一种定位方法,但在实际应用中,由于噪声等干扰因素,这种方法很少被采用.相对地,在这种情形下,我们往往要布置一些冗余节点,这样我们就需要一些其他近似方法<sup>[1-4,13,14]</sup>.很多研究者用 Chan 的方法<sup>[5]</sup>,原因是这种方法能获得较高的精度,而计算复杂度也比较适合.Chan 的方法针对的是 2D 场景,不过很容易扩展到 3D.Chan 的方法是一种基于近场(near-field)的计算方法,并采用了迭代技术来获得满足精度要求的解,本文采用类似的思路根据 TDOA 值来计算声源的位置.

### 1.2 由TD2S得到TDOA

图 2 给出了系统中两个节点  $A$  和  $B$  的一个典型的时间与事件序列.我们使用  $t_{A1}$  和  $t_{B1}$  分别来代表  $S$  到达  $A$  和  $B$  的麦克风的时间.如果两个节点是同步的,准确的 TDOA 值是  $t_{B1}-t_{A1}$ .但在 Whistle 中,节点保持各自的时钟,而且如前所述,即使我们采用了一个完美的时间同步方案,仍然不能获得准确的 TDOA 值.由于软件和硬件的延迟,节点  $A$  会在  $t_{A2}$  时刻侦测到  $S$ ,而不是  $t_{A1}$ . $B$  上也会存在类似的延迟.许多研究表明,这种延迟是不可避免且难以预测的<sup>[15]</sup>.因此, $t_{B2}-t_{B1}$  和  $t_{A2}-t_{A1}$  不一定是相同的(或者说基本上总是不同),这让我们无法使用  $t_{B2}-t_{A2}$  作为  $t_{B1}-t_{A1}$  的代替值.为了消除上面提到的时间误差和测量的不确定性,引入了一个信号  $S'$  来消除时间同步的步骤.

在接收到声源所发出的信号  $S$  后,某个节点发出声音信号  $S'$ ,这个信号被称为系统声音信号.发出  $S'$  的节点被称为基准节点.有了系统声音  $S'$  的帮助之后,我们就可以设计一种测量  $t_{B1}-t_{A1}$  的方法.如图 2 所示,在  $\tau$  之后,基准节点  $A$  根据其自身的时钟,在  $t_{A3}$  时刻,从它的扬声器中发出信号  $S'$ .

**定理 1.** 所有的非系统节点总是先接收到声源信号  $S$ ,再接收到基准节点发出的系统声音信号  $S'$ .

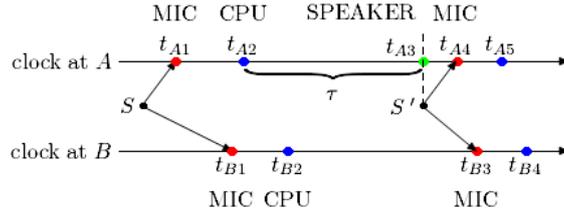


Fig.2 Time sequence of receivers A and B

图2 接收节点 A 和 B 的时间序列图

证明:我们用  $S$  代表信号源, $a$  代表基准节点, $b$  代表一个非基准节点.假定  $t_a$  和  $t_b$  分别是  $S$  从  $a$  传播到  $a$  和传播到  $b$  所用的时间. $t_c$  为  $S$  从  $a$  传播到  $b$  的时间.另外,我们使用  $t_{ab}$  来表示从  $S$  发射出  $S$  到  $b$  接收  $S$  中间所经过的时间. $S, a$  和  $b$  这 3 个节点的位置构成了一个三角形(如图 3 所示),或者处于一条直线上.在这两种情况下,根据三角形三边的关系,我们都能导出  $t_b \leq t_a + t_c$ .由于基准节点在接收  $S$  和发射  $S'$  之间有一个延迟,可知  $t_{ab} > t_a + t_c$ .这样,我们就可以知道  $t_{ab} > t$ ,这表明,非基准节点必然先接收到  $S$ ,然后再接收到  $S'$ .  $\square$

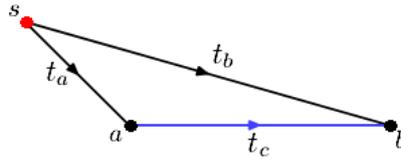


Fig.3 Acoustic source signal and system signal

图3 两个信号的传播示意图

如图 2 所示, $S$  在  $t_{A3}$  时刻从  $A$  的扬声器被发射出去,分别在  $t_{A4}$  和  $t_{B3}$  时刻到达  $A$  和  $B$  的麦克风处. $A$  和  $B$  的 CPU 分别在  $t_{A5}$  和  $t_{B4}$  时刻检测到  $S$ .根据定理 1, $t_{B3}$  必定晚于  $t_{B1}$ .我们把一个节点接收到  $S$  和接收到  $S'$  之间经过的时间记作 TD2S.显然,对于节点  $A$ ,TD2S 为  $T_{A2S} = t_{A4} - t_{A1}$ ,对于节点  $B$ ,TD2S 为  $T_{B2S} = t_{B3} - t_{B1}$ .由于  $A$  和  $B$  的位置始终是固定的, $A$  的扬声器和  $B$  的麦克风之间的距离(用  $d_{AB}$  表示)是一个常量.另外, $A$  的扬声器和麦克风之间的距离(用  $d_{AA}$  表示)也是一个常量.用  $T_{AB}$  表示  $A$  和  $B$  之间的 TDOA 值,有  $T_{AB} = t_{B1} - t_{A1}$ .如公式(1)所示, $T_{AB}$  可以由  $T_{A2S}$  和  $T_{B2S}$  作相互运算得出:

$$\begin{aligned}
 T_{AB} &= t_{B1} - t_{A1} \\
 &= (t_{B3} - t_{A3}) - (t_{B3} - t_{B1}) + (t_{A3} - t_{A1}) \\
 &= (t_{B3} - t_{A3}) - (t_{B3} - t_{B1}) + (t_{A4} - t_{A1}) - (t_{A4} - t_{A3}) \\
 &= d_{AB}/v - (t_{B3} - t_{B1}) + (t_{A4} - t_{A1}) - d_{AA}/v \\
 &= d_{AB}/v - T_{B2S} + T_{A2S} - d_{AA}/v
 \end{aligned} \tag{1}$$

由于  $d_{AB}$  和  $d_{AA}$  是常量,只需要计算  $T_{B2S}$  和  $T_{A2S}$  就可以得到  $T_{AB}$  的值,从表达式上看,计算  $T_{B2S}$  和  $T_{A2S}$  不需要  $A$  和  $B$  两个节点的时间同步.因此,公式(1)的意义在于用可以独立测量的 TD2S 值来计算 TDOA 值,从而消除了节点间的同步.下一节解决一个节点如何准确计算 TD2S 值的问题.

### 1.3 计算TD2S

在图 2 中,由于软件和硬件延迟是无法预测且不固定的, $t_{A4} - t_{A1}$  一般不同于  $t_{A5} - t_{A2}$ .因此,对于一个节点来说,使用两个 CPU 时间戳来计算 TD2S(传统的时间同步方法往往是这样做的)是一种不值得推荐的做法.

在我们的系统中,节点从接收到  $S$  之前到接收到  $S'$  之后,一直处于录音状态,并以固定频率  $f$  进行采样.也就是说,每过  $1/f$  秒,节点就用它的 A/D 转换器将感知到的信号转化为一个实数或者复数.举例来说,当  $S$  到达节点  $X$  的麦克风时, $X$  正在采第  $i$  个数据.一段时间过后, $X$  的麦克风接收到  $S'$ ,并且它的采样数已经到了第  $j$  个(根据定理 1,有  $j > i$ ).这样,我们就可以计算出节点  $X$  的 TD2S 值  $T_{X2S}$ ,即  $T_{X2S} = (j - i)/f$ .因此,我们就去除了基于时间戳的

时间同步方法中固有的不确定量和误差.由此可以看出,较高的采样频率能够保证较高的时间精度.本文中,我们使用的采样频率为 44.1kHz.大多数商用设备都支持这个采样频率.

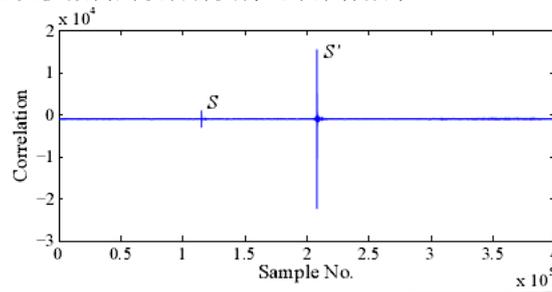


Fig.4 Arrivals of S and S' at a node

图 4 S 和 S' 采样中的到达时刻

#### 1.4 声音信号到达检测

Whistle 方案的另一个关键挑战在于:如何在节点的信号采样数据中,准确地找出 S 和 S' 的到达时刻所对应的采样点.我们假定 S 和 S' 是同一种信号,并且具有明确的数学表达式.如果这个信号具有良好的自相关特性,就可以很容易地通过将接收信号与模板信号进行相关计算的方法,将相关计算结果的峰值点作为 S 的到达时刻点.具体到我们的方案,由于接收点要接收两个信号,理论上相关结果的两个最大峰值即可作为 S 和 S' 的到达对应点.根据定理 1,较晚的一个代表 S' (如图 4 所示).然而在实际环境下,由于反射引起的多径效应,以及其他干扰因素的影响,相关结果的最高峰往往不能指代信号的到达时间.在这种情形下,我们使用最高峰之前一个包含  $\omega_0$  个采样点的窗口中的第 1 个尖峰来表示信号的到达.为了找到这个尖峰,我们设置了两个参数:高度和平均斜率.超过一定高度的采样点才被认为是“峰”,而与附近采样点之间的平均斜率超过一定值才被认为是“尖峰”.平均斜率的计算方法如下:

$$P = (Y_{\text{peak}} - Y_{\text{valley}}) / (X_{\text{peak}} - X_{\text{valley}}) \quad (2)$$

其中,  $X_{\text{valley}}$  表示在这个峰值点之前最近的一个波谷采样点.只需选择高度超过了  $Y_{\text{maxpeak}} \times TH_y$ , 且平均斜率大于  $P_{\text{maxpeak}} \times TH_p$  的采样点,  $\omega_0, TH_y, TH_p$  均为经验参数.在 Whistle 中, 设定  $\omega_0 = 5000, TH_y = TH_p = 0.5$ .

一般来说,我们可以使用所有具有良好相关特性的信号作为检测信号.考虑到手机的扬声器和麦克风的特性<sup>[21]</sup>,在本文中,我们使用线性 chirp 信号(听起来像汽笛声一样,这也是 Whistle 这个名称的由来)作为 S 和 S', 它的频率在 2kHz~6kHz 之间发生变化,持续时间为 50ms.

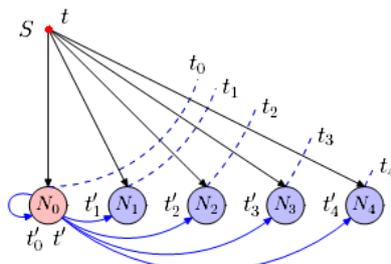
## 2 Whistle 工作过程

讨论了 Whistle 的基本原理之后,我们将会在这一节中展示 Whistle 的工作工程.如前所述,我们需要  $M (M \geq 5)$  个节点以实现 3D 定位.不失一般性,  $N_0$  来代表基准节点,用  $N_i (1 \leq i \leq M-1)$  来代表非基准节点 ( $N_0$  不一定是距离 S 最近的节点). Whistle 的工作流程分为 3 个步骤:

第 1 步.节点开始录音,并且用它们的麦克风记录 S 信号.如图 5 所示, S 在  $t$  时刻被发出,并且分别在  $t_0, t_1, \dots, t_{M-1}$  时刻到达节点  $N_0, N_1, \dots, N_{M-1}$ .注意,在图 5 中,  $t$  或者  $t_i$  时刻都是相对于同一个时钟而言的.

第 2 步.基准节点  $N_0$  检测到 S 后,在  $t$  时刻发出一个信号 S'.经过一段时间后,信号 S' 到达了每个接收节点.接收节点  $N_i (1 \leq i \leq M-1)$  在 S' 于  $t'_i$  时刻到达时仍然处于录音状态.这样,每个节点就都记录了一段录音数据  $R_i$ , 其中包含了 S 和 S'.使用前面的方法,对  $R_i$  和标准模板信号作相关运算,就能够得到  $t'_i - t_i$ , 这就是节点  $N_i$  计算出来的 TD2S 值,明显地,它只取决于本地时钟的值.

第 3 步.将所有接收节点的 TD2S 值汇总在一起,就可以计算出准确的 TDOA 值,然后通过 TDOA 值再计算出声源所在的位置.这样就完成了整个定位过程.

Fig.5 Receipt of  $S$  and  $S'$  with  $N_0$  as the base node图5  $S$  和  $S'$  的发送和接收示意图,  $N_0$  是基准节点

### 3 实验结果和分析

我们使用 8 个手机,其中含有 6 个 Dopod P800,一个 O2 XDA Atom 和一个 Sony Ericsson XPeria 来构建系统原型.每一个手机都有一个内建的扬声器和麦克风,以及一个 WiFi 通信模块.我们使用其中的 O2 手机作为基准节点,Sony 手机作为声源,其他手机作为接收节点.信号  $S$  和  $S'$  被指定为 linear chirp 声音.linear chirp 信号是一种频率随时间增大或减小的信号,其表达式为  $x(t)=\sin(2\pi(f_0+kt/2)t)$ .其中  $f_0$  为信号的起始频率, $k$  为信号频率的增长系数.设定的 chirp 信号频率在 2kHz~6kHz 之间,即  $f_0=2\text{kHz}$ ,采样频率为 44.1kHz,总时长为 50ms,因此, $k=3.63$ .

图 1 展示了 Whistle 的系统结构.系统由一个服务器和 8 个手机组成,服务器是一个笔记本电脑,用来处理录音文件和计算结果.手机作为客户端,上面部署了一个负责录音的客户端程序,以 44.1kHz 的采样频率进行声音采样.节点中的客户端程序包含操作界面、录音-输出线程和播放线程.节点录制的的数据除了发送给服务端外,也会以 wav 格式保存在自己的存储卡中.在这些节点中,存在一个位置不明的声源  $S$  和一个基准节点  $S'$ .声源节点和基准节点无需录音;其他节点被称作锚节点,用于记录声音信号.基准节点和锚节点都已经预先知道了它们的位置(由用户测量并输入).我们使用 C++和 Windows Mobile 6.0 SDK 设计了节点上部署的客户端软件.服务端软件的主程序使用 C++和 MFC 编写.负责信号处理和计算位置的部分用 Matlab 编写,并被转换为 COM 组件供主程序调用.当得到了最终的定位结果之后,服务器会把这个结果显示出来.

#### 3.1 误差来源分析

本节我们总结了几个可能的误差来源.在 Whistle 中,我们首先从 TD2S 获取 TDOA,然后再根据 TDOA 解方程以获取信号源位置.这两步都有可能产生误差.主要的影响因素有:

信噪比(signal to noise ratio,简称 SNR):环境噪音总是会被记录下来.如果我们传输的信号能量有限或者噪声的频率与传输信号接近,噪声就很难被滤掉,确定信号的到达时间就会比较困难.

多径效应:由于反射的存在,一个声音信号可能会由几条不同的路径到达接收节点,接收节点收到的是这些信号的叠加.虽然我们选取最早的峰值作为接收到信号的采样点以处理多径问题,但有些时候仍然不能正确地得到结果.

解方程:当计算得到的 TDOA 值的误差较小时,Chan 的方法表现良好,但是,如果 TDOA 的误差增大,这种方法就不太适用了.

在实验中我们发现,尽管大多数 TDOA 值的误差都在 0.4ms 以下,但仍有一小部分 TDOA 值的误差相对较大,这样就引入了新的误差.除了一些可以忽略的因素,例如声音的传播速度在不同环境下的变化之外仍然存在一些因素能够影响定位的精度.另外,每测量一次声源位置,都记录当时的环境温度,因为声速与温度有关<sup>[16]</sup>,具体关系为  $v_{\text{air}}=331.3+0.6\times\theta(\text{m/s})$ ,其中  $\theta$  表示温度(摄氏度),对环境温度的考虑有助于提高定位精度.

#### 3.2 实验环境

考虑到上面分析的可能的影响因素,本节在 3D 空间下对 Whistle 的系统性能进行了综合考察,并分别针对室外较安静环境(一个体育馆前)、室外嘈杂环境(与前面地点相同,但使用一个录音机大声播放音乐)和室内安

静环境(9m×9m×4m 的大厅)分别进行了考察,分别称 3 种环境为正常(normal)、嘈杂(noisy)和室内(inside). 图 6 中描绘了 3D 的情况,被标以数字和  $N_i$  的点分别代表不同的声源位置和不同的接收节点.部署方案中关键的距离都已在图中标明.由于整个场景是对称的,我们的声源只在该场景的 1/4 空间中变换位置.为简化起见,在下一节中,我们使用与声源所在位置相关的数字作为实验的序号,并用这个序号指代在对应位置所做的实验.

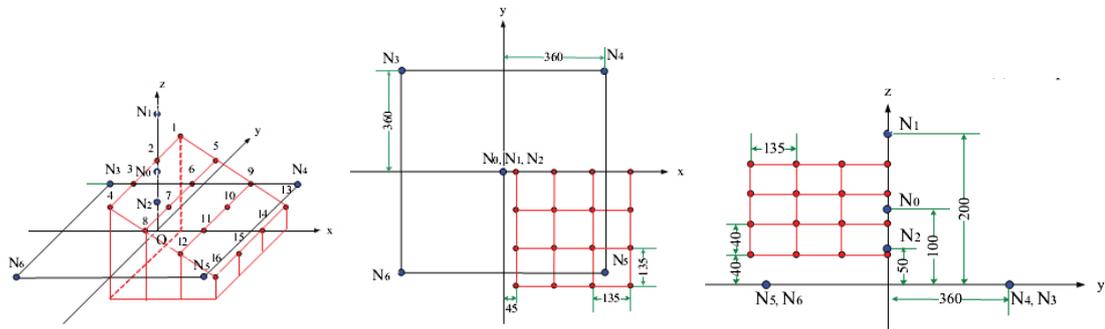


Fig.6 Deployment of anchor nodes and acoustic source in experiments.

The sub-figures from left to right are the 3D view, the top view and the right view of the deployment (unit: cm)

图 6 实验中接收节点和声源的分布从左到右分别为 3D 视图、顶视图和右视图(单位:cm)

### 3.3 实验结果与分析

我们在图 7 中展示了每个位置的定位误差.可以看出声源在大多数位置上的定位误差在 30cm 以下.可以得出结论,即当声源远离大部分接收点时,定位误差将会增大,其本质原因在于:用 TDOA 值求解信号源位置时的方法是求解双曲面的交点,当双曲面距离焦点(接收点)很远的位置以较小的夹角相交时,即使其中一个双曲面产生了一个微小的变化,都会让交点产生很大的偏移.

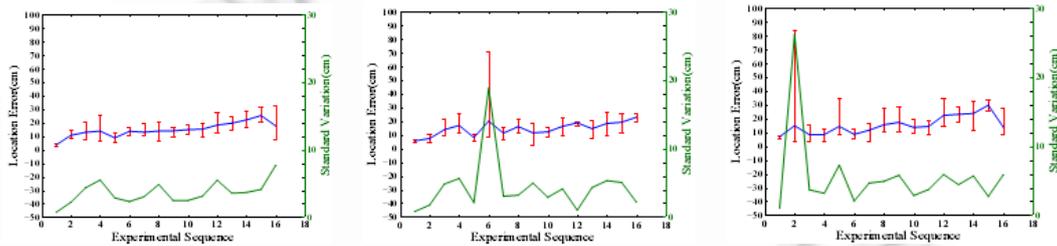


Fig.7 Errors of acoustic sources at different positions(Left, Middle, Right: Normal, Noisy, and Inside).

The line with two vertical ends represents the mean error, where the two ends represent the maximal and minimal error; and the dotted line (right axis y) the standard error

图 7 各个声源点的定位误差(左、中、右图分别表示正常、嘈杂、室内 3 种环境).

区间曲线表示平均定位误差及最大、最小误差,点线对应各个图右侧的 y 轴,表示定位误差的标准差

图 8 展示了 3D 场景下定位误差的累积分布 CDF,可以看出,定位结果的平均定位误差为 10cm~20cm.这表明,Whistle 在各种环境下都能获得较高的定位精度.但我们可以发现,正常环境下的定位结果并不总是最好的,除了 3D 室内环境的定位结果相对其他环境明显较差外,其余环境的定位误差基本差别不大.可见虽然噪声和多径会带来更多的异常点,但并不直接增大定位误差.我们认为,系统在存在反射和噪声的情况下仍能较准确地定位的原因在于寻找第 1 个峰值的方法能够较有效地处理反射,而 chirp 信号良好的自相关特性能够较好地去除噪声.

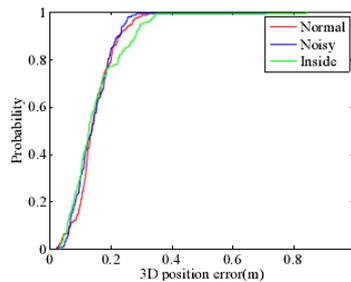


Fig.8 CDF of localization error

图 8 定位误差的 CDF 图

#### 4 相关工作

在过去的研究中,研究者们曾经提出过许多基于距离的定位方案.已有的工作在定位时主要使用4类方法: TOA(time of arrival,到达时间),TDOA(time difference of arrivals,到达时间差)<sup>[6,11,17,18]</sup>,DOA(direction of arrival,到达方向)<sup>[19-22]</sup>和 RSSI(received signal energy)<sup>[23-27]</sup>.

Cricket<sup>[6]</sup>是一个基于 TDOA 的定位系统.它在定位过程中由信号源同时发出无线射频信号和超声波信号,接收节点记录自身接收到这两个信号的时间点,依此计算出这两个信号的 TDOA 并最终得到节点之间的距离.Cricket 无需进行时间同步,但需要让信号源同时发射两种信号,因此需要特定的硬件.Mahajan 等人的工作<sup>[11]</sup>使用 TDOA 测量值来求解一组线性方程,他们对系统的评估是通过模拟进行的.文献[18]的工作使用了 8 个麦克风来获取 TDOA 信息,这些信息被进一步用于确定声源所在的方向.为支持一些在原野上监测动物的应用,文献[19,28]中的工作实现和评估了一个名为 ENBOX 的声音定位系统,并且用它来确定发出叫声的土拨鼠所在的位置.ENBOX 是一个 DOA 系统,需要时间同步的支持.此外,有一种定位方式是基于接收信号的 RSSI 值的<sup>[24,25]</sup>,文献[24]中提出了一个基于能量的定位系统,该系统使用麦克风阵列和最大似然估计方法确定信号源的位置.文献[25]设计和比较了一系列基于能量的定位方法.因为对于信号的强度与距离之间的关系,现在仍然缺乏一个能够灵活适应各种情况的模型.因此,基于能量定位的方法就很难得出节点之间精准的距离,从而定位的准确性就无法保证.BeepBeep<sup>[15]</sup>是一个基于声音的高精度测距系统.它只使用两个手机的扬声器、麦克风和无线通信模块,无需对设备作预先的调节即可得到两个手机之间的距离.BeepBeep 方案中的两个手机都需要主动地参与测距的过程,因此 BeepBeep 扩展后可以用于 TOA 的定位方案,但无法用于 TDOA 的定位,因为在 TDOA 的定位中,声源并不一定会被定位系统控制.

#### 5 结束语

本文提出了一种声音定位方法及系统 Whistle.作为一个基于 TDOA 方法的系统,Whistle 避免了传统方案中对时间同步的要求,从根本上改变了 TDOA 定位方法.在 Whistle 中,几个异步的接收节点记录源信号和后继的系统信号,双信号感知采样点计数的方法获得了较高的时间解析度.通过在手机上的一系列实验,其结果显示,Whistle 系统的定位误差大致在 10cm~20cm 之间.总的来说,Whistle 具有低成本、易部署、易推广的特点.

#### References:

- [1] Fang B. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes. IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems, 1990, 26(5):748-753.
- [2] Foy W. Position-Location solutions by Taylor-series estimation. IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, 1976,12(2): 187-194.
- [3] Friedlander B. A passive localization algorithm and its accuracy analysis. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1987,12(1): 234-245.
- [4] Torrieri D. Statistical theory of passive location systems. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1984,20(2):183-198.

- [5] Chen Y, Ho K. A simple and efficient estimation for hyperbolic location. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1994,42(8):1905–1915.
- [6] Priyantha N, Chakraborty A, Balakrishnan H. The cricket location-support system. In: *Proc. of the MobiCom*. 2000. 32–43.
- [7] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-Grained network time synchronization using reference broadcasts. In: *Proc. of the OSDI*, 2002.
- [8] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M. Timing-Sync protocol for sensor networks. In: *Proc. of the SenSys*. 2003. 138–149.
- [9] Maroti M, Kusy B, Simon G, Ledeczi A. The flooding time synchronization protocol. In: *Proc. of the SenSys*. 2004. 39–49.
- [10] Sommer P, Wattenhofer R. Gradient clock synchronization in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IPSN*. 2009. 37–48.
- [11] Mahajan A, Walworth M. 3D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receivers. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2001,17(1):91–95.
- [12] Sivrikaya F, Yener B. Time synchronization in sensor networks: A survey. *IEEE Networks*, 2004. 45–50.
- [13] Abel J. A divide and conquer approach to least-squares estimation. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, 1990,26(2): 423–427.
- [14] Smith J, Abel J. The spherical interpolation method of source localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1987,12(1): 246–252.
- [15] Peng C, Shen G, Zhang Y, Li Y, Tan K. Beepbeep: A high accuracy acoustic ranging system using cots mobile devices. In: *Proc. of the SenSys*. 2007. 1–12.
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/speed\\_of\\_sound](http://en.wikipedia.org/wiki/speed_of_sound)
- [17] Frampton K. Acoustic self-localization in a distributed sensor network. *IEEE Sensor Journal*, 2006,6(1):166–172.
- [18] Valin J, Michaud F, Rouat J, Letoumeau D. Robust sound source localization using a microphone array in a mobile robot. In: *Proc. of the IROS*. 2003.
- [19] Girod L, Lukac M, Trifa V, Estrin D. The design and implementation of a self-calibrating distributed acoustic sensing platform. In: *Proc. of the SenSys*. 2006. 71–85.
- [20] Kaplan K, Le Q, Molnar P. Maximum likelihood methods for bearings-only target localization. In: *Proc. of the ICASSP*. 2001.
- [21] Ledeczi A, Kiss G, Feher B, Volgyesi P, Balogh G. Acoustic source localization in fusing space direction of arrival estimates. In: *Proc. of the IESES*. 2006.
- [22] Oshman Y, Davidson P. Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999,35(3):892–901.
- [23] Ampeliotis D, Berberidis K. Linear least squares based acoustic source localization utilizing energy measurement. In: *Proc. of the SAMSP*. 2008.
- [24] Chen M, Liu Z, He L, Chou P, Zhang Z. Energy-Based position estimation of microphones and speakers for ad hoc microphone arrays. In: *Proc. of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*. 2007.
- [25] Meesookho C, Uitra U, Narayanan S. On energy-based acoustic source localization for sensor network. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2008,56(1):365–377.
- [26] Sheng X, Hu Y. Energy based acoustic source localization. In: *Proc. of the IPSN*. 2003.
- [27] Sheng X, Hu Y. Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Signal and Processing*, 2005,53(1):44–54.
- [28] Ali A, Collier T, Girod L. An empirical study of collaborative acoustic source localization. In: *Proc. of the IPSN*. 2007. 41–51.



余冉(1983—),男,河南人,硕士生,主要研究领域为移动计算.



孙国栋(1981—),男,博士,助理研究员,主要研究领域为传感网,移动计算.



许斌(1973—),男,博士,副教授,主要研究领域为移动计算,服务计算.