

## WSN 节点声测距 TOA 值频域估计方法

孟令军<sup>①②</sup> 王宏涛<sup>③</sup> 夏善红<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所传感技术联合国家重点实验室北方基地 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

<sup>③</sup>(中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 该文研究了节点声测中 TOA 值的频域估计方法, 与基于幅度检测的时域分析法相比, 低信噪比下的测距精度高。它采用递归型的 Goertzel 短时频率分析算法。通过优化声信号频率及 Goertzel 算法窗口长度, 实现了定点计算算法, 节点采集测距信号的同时进行 TOA 值估计。论文还提出了一种多阈值的 TOA 值估计方法, 提高了低信噪比下的 TOA 值检测精度。算法在一个具有 dsPIC6014A 微处理器的节点进行了验证。节点测距试验结果表明, 该算法在低信噪比下的定位精度较高, 可实现 25 m 内的节点测距和定位, 测距误差 < 3%。

**关键词:** 无线传感器网络; 节点定位; Goertzel 算法; TOA; 声测距

中图分类号: TP393; TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0993-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00127

## TOA Estimation Method in Frequency Domain for Acoustic Ranging of WSN Node

Meng Ling-jun<sup>①②</sup> Wang Hong-tao<sup>③</sup> Xia Shan-hong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(State Key Lab of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

<sup>③</sup>(National Key Laboratory For Electronic Measurement Technology(North University of China), Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A new method of TOA (time of arrival) estimation in frequency domain used for wireless sensor nodes' acoustic ranging is proposed in this paper. It shows higher accurate results under lower signal-noise-ratio applications compare to the time-domain method such as amplitude detection. It is based on Goertzel algorithm for short time frequency analyses. Fixed point algorithm is achieved by adjusting acoustic ranging signal's frequency and window length. The computation of the algorithm can be done during one sampling period of microcontroller. A multi-magnitude threshold TOA estimate method is also studied for reducing the errors further. The algorithm has been tested on a node with a dsPIC6014A microprocessor. Experimental results show that the performance is better than those in time-domain. The acoustic ranging error is less than 3% at the distance of 25 meters.

**Key words:** Wireless sensor network; Node localization; Goertzel algorithm; TOA; Acoustic ranging

### 1 引言

基于时间测量的声测距(Acoustic ranging)实现定位具有成本低、精度高等优势, 在地面及水中无线传感器网络节点(以下简称节点)定位应用中具有重要研究意义<sup>[1-5]</sup>。节点声测距定位方法与基于 RSS(Received Signal Strength)/AOA(Angle Of Arrival)/DOA(Direction Of Arrival)<sup>[6]</sup>等方式相比, 硬件实现简单, 成本低, 测距精度较高, 因此受到了广泛的研究和关注。在已经发表的声测距技术中, 对射频+超声波测距的研究较多。采用的超声波频

率为 40 kHz, 多在室内视距范围内使用, 方向性强, 具有厘米量级的精度, 测距距离一般不超过 10 m<sup>[1]</sup>。文献[4]介绍了一种利用人耳可闻的音频信号和模拟音频锁相器实现节点测距的方法, 最大定位误差超过了 20%, 易受到数字系统的干扰。文献[7]介绍了利用 PDA 实现了音频信号高精度测距, 但计算量及功耗大, 无法在以单片机为控制器的节点上实现。

上述研究多在时域内进行 TOA 估计, 低信噪比下误差大, 论文针对这个问题, 探索了在频域内进行音频测距信号 TOA 值的估计算法。它采用改进的 Goertzel 算法及多阈值分析方法实现了频域内的 TOA 值估计。与已发表的各种时域内检测方法相比, 该方法抗干扰能力较强, 低信噪比下检测精

2009-01-21 收到, 2009-10-20 改回

国家 973 计划项目(2009CB320300)资助课题

通信作者: 孟令军 lingjunm@263.net

度高,对节点软件及硬件资源要求低。

## 2 声测距信号的 TOA 值频域估计

节点声测距多为射频同步测距方式,工作原理如图 1 所示。节点 A 向节点 B 发送射频(Radio Frequency-RF)同步信号,同时通过扬声器发送声测距信号,节点 B 收到射频信号后,开始采集麦克风收到的声信号,并利用辅助的模拟电路或者数字信号处理算法来获得测距信号的 TOA 值。射频信号的传播速度远大于声速,因此可认为节点对测距声信号的发射和采集是同步的,通过 TOA 值及当地声速就得到了节点间的距离值。

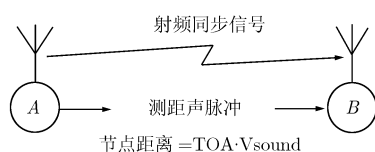


图 1 射频同步声测距原理

常用的 TOA 值计算是在时域内完成的,即通过分析节点接收到的音频测距信号幅度来判别 TOA 值,该方法在低信噪比时,误差显著增大,无法满足实际应用。我们通过对信号的瞬态频谱分析发现,测距信号在频域内能获得较精确的结果,如图 2 所示(频域分析结果均为无量纲数据值,下同)。因此,如果采用实时频率分析技术,对采集到的测距信号数据进行频域分析,是完全可以检测到测距信号的。常见的短时频率分析有 STFT(Short-Time Fourier Transform)、小波分析及 Goertzel 算法等。前两种的计算量较大,普通节点上难以实现,本文利用 Goertzel 算法实现 WSN 节点测距信号检测的技术。

Goertzel 算法由 Gerald Goertzel 于 1958 年提出的,与 DFT,FFT 功能类似,用于频率分析,优

点是无需计算全部频率点就能获得特定频率值信息<sup>[8]</sup>。该算法数据存储容量小,在实现诸如 DTMF(Dual-Tone Multi-Frequency)、FSK 等特定频率信号识别方面有很高的性价比,便于 MCU 及 FPGA 实现<sup>[9,10]</sup>。

设输入的离散数字量为  $x(n)$ ,输出的数字量为  $y(n)$ ,待检测信号特征频率为  $f_i$ ,系统采样频率为  $f_s$ ,Goertzel 算法可以表示为

$$y(n) = x(n) + 2\cos(2\pi f_i/f_s)y(n-1) - y(n-2)$$

该算法实现测距信号检测,实质上就是用一个滑动窗口对一个数据序列进行计算,它是一个与 IIR 滤波器类似的递归过程:每移动(采集)一个数据点,均需要与一个长度为 `fft_nb` 的窗口缓冲数据进行一次递归计算,每个递归计算完成后更新缓冲数组。算法流程可以表示为

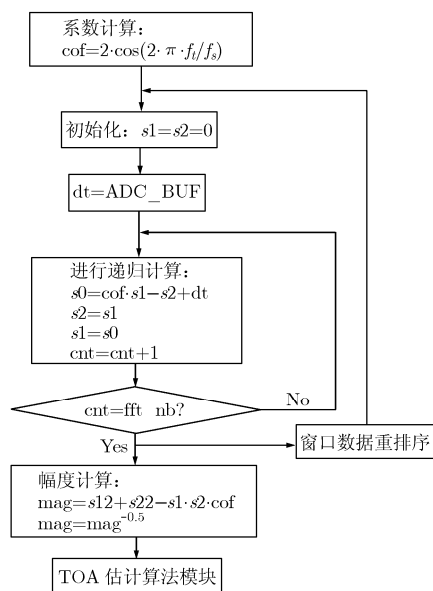
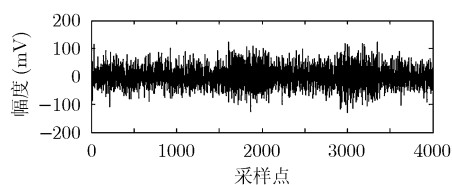
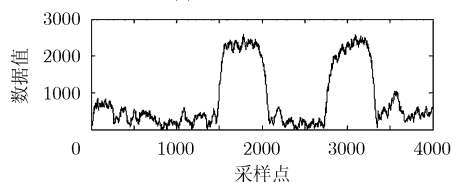


图 3 Goertzel 算法流程图



(a) 时域波形 SNR=5dB



(b) 频域分析结果

图 2 时域-频域内的测距信号波形

实际应用中估计 TOA 值时,受 MCU 内部存储容量限制,Goertzel 算法需在一个采样周期内完成计算,对算法计算时间有一定要求。计算时间与采样频率、窗口长度、MCU 计算能力等多个参数相关,提高计算速度需要全面考虑。采样频率决定了 TOA 的分辨率,采样频率高,TOA 分辨率高,但计算量大难以降低计算时间,因此,采样频率需要针对具体应用来综合考虑,此处取  $f_s=8$  kHz,对应的 TOA 分辨率为  $0.125$  ms,换算成标准大气环境下的测距值为  $\Delta d=0.34 \times 0.125=0.04$  m,本文研究的 WSN 主要应用在野外,节点尺寸在  $10$  cm 量级,因此可以满足节点野外定位精度需求。窗口长度与采样频率及频率分辨率有关,在  $8$  kHz 采样时,窗口长度

在 100-300 个采样点之间, 窗口长度与计算时间成正比, 根据仿真及实际测量, 这里选取的窗口长度为 150 个采样点。递归算法中的乘法运算在 MCU 中耗时较大, 本文对此进行了改进。在节点测距应用中, 一定范围内的测距信号频率值变化对测距精度影响不大, 从而可以通过调整测距信号频率范围, 将系数  $\text{cof}$  值变为  $2^{-n}$ , 则乘法运算变为移位计算, 加快了计算速度。取  $f_s=8 \text{ kHz}$ ,  $\text{fft\_nb}=150$ , 当  $f_r=1651 \text{ Hz}$  时,  $\text{cof} \approx 0.5$ , 则  $\text{cof} \cdot s1 \Leftrightarrow s1 \gg 1$ 。图 4 是对上述参数利用 C 语言实现的算法验证仿真结果 (信号持续时间 60 ms, 7 位量化)。可以看出, 该算法在低信噪比下可以准确地检测到测距信号。

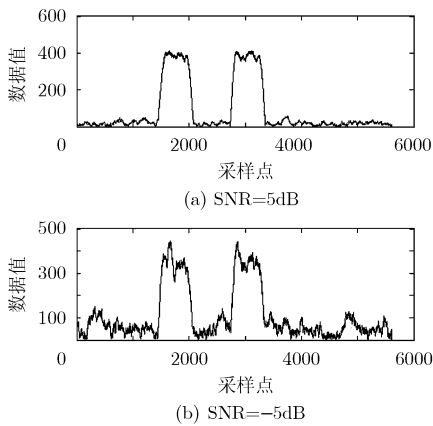


图 4 不同信噪比下的算法输出结果

### 3 多阈值 TOA 估计算法

对于 TOA 值的精确估计, 传统方法多采用最大似然或者最小二乘法估计等, 但受节点能源及计算能力限制, 这些方法仍过于复杂, 需要研究新的算法。测量中发现, 采用简单脉冲测距信号时, 低信噪比下算法输出信号有波动 (图 5), 对 TOA 估计影响较大。通过仿真及实际测量对比, 对输出的测距信号采用了加窗处理来提高算法输出信号质量。本文采用的是 Blackman 窗口函数 (窗口长度为  $N$ ):

$$f(x) = 0.42 - 0.5 \cdot \cos \frac{2\pi}{N} + 0.08 \cdot \cos \frac{4\pi x}{N}$$

添加窗口函数的效果对比如图 5 所示, 可以看出, 利用窗口函数对测距信号进行处理可以显著改善计算输出, 对提高 TOA 估计精度有很大帮助。

TOA 值估计最简单的方法是利用算法输出信号的上升沿与一个预先设定的阈值进行比较判别。由于输出信号的上升沿有一定的斜率 (图 5), 不同阈值得出的 TOA 值不同, 从图 5 可以看出, 计算输出的波形基本上是对称的, 因此采取在上升沿和下降沿对同一个阈值进行判断, 然后取两个时刻的中

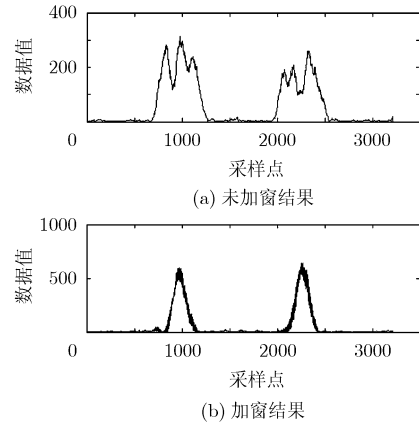


图 5 窗口函数对计算结果影响

间值来估计信号的到达时刻:  $N_{\text{TOA}} = 0.5 \cdot (T_R + T_F)$ , 计算原理如图 6 所示, 可以看出阈值改变时, 双沿模式的 TOA 估计误差  $\text{DT}2 < \text{DT}1$ , 精度高于单沿模式。

单阈值受波形的影响较大, 为了进一步提高 TOA 估计精度, 这里研究了一种多阈值 TOA 估计方法。如图 7 所示, 设  $V1$ 、 $V2$  是 TOA 判别用的阈值上下限, 如果连续判别, 产生的 TOA 估计值  $\text{TOA}_{\text{est}} \in \{T_{\min}, T_{\max}\}$ , 最后取多个估计值的均值作为最终估计值:  $\text{TOA}_{\text{est}} = 0.5 \cdot (T_{\min} + T_{\max})$ 。考虑到计算速度问题, 这里取了高中低 3 个阈值进行计算:

$$\text{TOA}_{\text{est}} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 (T_{\min}(n) + T_{\max}(n))$$

图 8 是不同信噪比下利用单阈值、多阈值及多阈值多次平均方法获得的 TOA 估计误差变化情况, 从中可以看出, 多阈值方式 TOA 估计误差有明显改善, 而利用多次平均时, TOA 的误差在低信噪比下的误差小于 1 ms, 在标准大气环境下对应的距离值约为 0.34 m, 可以满足野外节点定位需求。

### 4 节点验证及结果

算法验证节点 MCU 采用 Microchip 公司的 16 位单片机-dsPIC6014A, 它内置了 12 位 ADC 和 8 kB 的 RAM, 16 位的指令操作和 I/O 控制, 支持 C 语言编程和部分 DSP 功能, 外部接口丰富, 时钟、功耗控制灵活, 能在 3~5 V 的电压范围工作, 3.3 V 时的最高运行速度 20 MIPS, 适合用于计算量较大的节点系统。CPU 中包含了 DSP 引擎, 提高了内核的运算能力和吞吐能力。它具有一个高速 17 位  $\times$  17 位乘法器, 一个 40 位 ALU, 两个 40 位饱和累加器和一个 40 位双向桶形移位寄存器。累加器或任何工作寄存器中的数据, 可以在单个周期内右移 16 位或左移 16 位。DSP 指令可以无缝地与所有其他

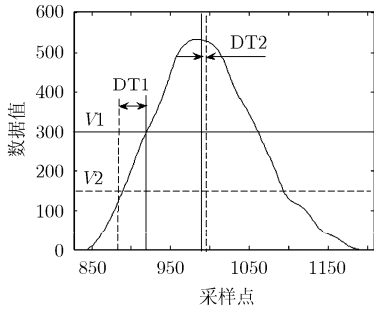


图 6 双沿 TOA 估计

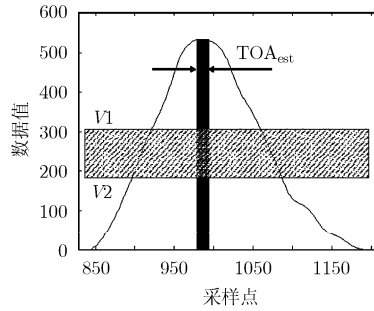


图 7 多阈值 TOA 估计

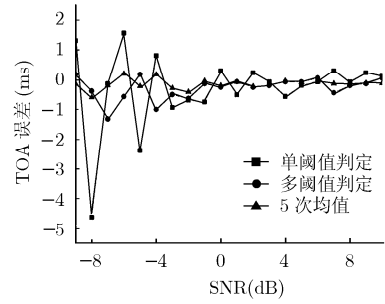


图 8 不同算法的 TOA 误差

指令一起操作，能获得最佳的实时性能。图 9 是节点系统结构简图。音频接收传感器为驻极体式传声器，传声器的信号调理模块包括一个增益约 60 dB 的前置放大器和一个中心频率为 1651 Hz 的带通滤波器。测距信号采用 PWM 方式产生，经过低通滤波器和功率放大器后送给扬声器。该节点系统主要用于对声、振动等速变信号进行实时采集与分析。

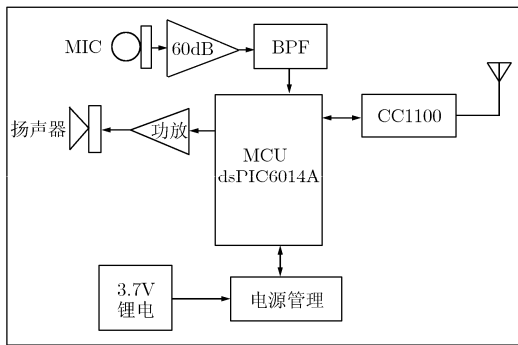


图 9 节点硬件结构框图

节点测距时,MCU 先启动 ADC 进行数据采集,在采集的间隔时间执行 Goertzel 算法,算法采用纯软件方式实现。节点采用 8 kHz 采样,采样间隔 125  $\mu$ s,采样完成后马上进行 150 次的迭代计算,通过实际测量,优化后的 Goertzel 算法 C 程序模块可以

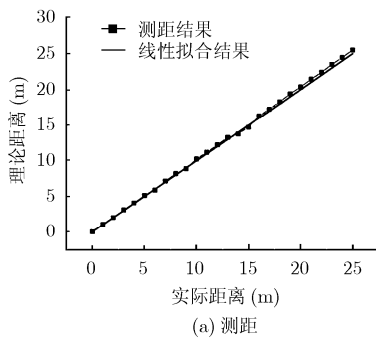
在 MCU 单个采样时间内完成(主晶振频率: 10 MHz, 4 倍频),计算结束后利用动态时钟切换指令切换到系统内部时钟或休眠时钟,实现了节点的节能控制。

在室外利用音频信号测距时,需要考虑大气中的声速影响因素:大气温度、风速及风向等。目前,节点上实现风速测量还存在较大的技术障碍,因此一般只进行温度补偿,可以满足多数应用场合的测距需求。本文采用  $V_s = 331.4 + 0.6T$  来对声速补偿<sup>[11]</sup>,式中,  $T$  为大气温度,单位是  $^{\circ}\text{C}$ 。大气温度利用射频模块 CC1100 内置的温度传感器实现采集。

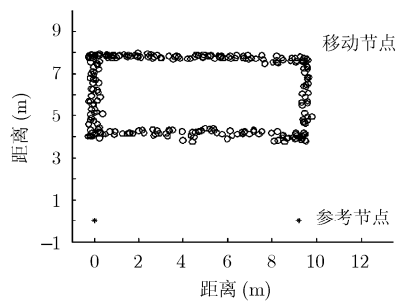
图 10 是利用该节点获得的室外 1~25 m 测距结果和 2 个参考节点对平面移动节点的定位结果。数据表明,该节点完全可以实现 25 m 的远距离节点间隔测量及定位,测距误差在 25 m 时的最大误差小于 3%,平面定位最大误差小于 1.3 m。

### 5 结束语

本文的研究表明,频域内进行实时频率分析是实现低信噪比下的节点音频测距信号检测的一种有效方法。利用多阈值法提高了 TOA 估计精度,该算法可以用具有数字信号处理功能的 MCU 或者 FPGA 实现,适用于野外及水中用无线传感器网络节点定位。



(a) 测距



(b) 移动节点平面定位

图 10 测距及定位结果

## 参 考 文 献

- [1] Priyantha N B. The cricket indoor location system. [Ph.D. dissertation], Massachusetts Institute of Technology, June 2005: 62-65.
- [2] De Marziani C and J Urefia, *et al.*. Implementation of acoustic sensor network for relative positioning system. Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'07), Vigo, Spain, 4-7, June, 2007: 1559-1564.
- [3] Patwari N. Location estimation in sensor networks. [Ph.D. dissertation], The University of Michigan, 2005: 19-22.
- [4] Zhang Jing-bin and Ting Yan, *et al.*. Thunder: A practical acoustic localization scheme for outdoor wireless sensor networks. Technical Report CS-2005-13, June, 2005: 3-5.
- [5] Chen Tian and Liu Wen-yu, *et al.*. Localization and synchronization for 3D underwater acoustic sensor networks. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4611: 622-631.
- [6] 曾凡仔, 孙正章等. 无线传感器网络的节点定位方法. 通信学报, 2008, 29(11): 62-66.  
Zeng Fan-zi and Sun Zheng-zhang. Improved node localization algorithm for Wireless sensor network. *Journal on Communications*, 2008, 29(11): 62-66.
- [7] Peng Chun-yi and Shen Guo-bin, *et al.*. BeepBeep: a high accuracy acoustic ranging system using COTS mobile devices. SenSys '07: Proceedings of the 5th international conference on embedded networked sensor systems. Sydney, Australia, 2007: 1-14.
- [8] Engelberg S. Digital Signal Processing: An Experimental Approach. London, Springer. 2008: 203-206.
- [9] Lin Min-Chuan and Tsai Guo-Ruey, *et al.*. FPGA-based spectrum analyzer with high area efficiency by goertzel algorithm. Congress on image and signal processing 2008, CISP'08, Sanya, China, May 27-30, 2008: 157-159.
- [10] R Jurdak and C V Lopes, *et al.*. Software acoustic modems for short range mote-based underwater sensor networks. OCEANS 2006-Asia Pacific, Singapore. May 16-19, 2006: 1-7.
- [11] Hass J. How fast does sound travel. [www.indiana.edu/~emusic/acoustics/speed.htm](http://www.indiana.edu/~emusic/acoustics/speed.htm), 2004.
- 孟令军: 男, 1969年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络节点定位技术.
- 王宏涛: 男, 1985年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络.
- 夏善红: 女, 1958年生, 博士生导师, 研究方向为微传感技术与微光机电系统.