High accurate TOA/TODA estimation and NLOS identification with environment multipath propagation characteristics for acoustic indoor localization

TOA estimation and NLOS identification channel statistics for acoustic smartphone indoor localization

1. Introduction

室内定位技术种类，突出基于声技术的发展，GuoGuo，弗莱堡以及葡萄牙三篇论文。并阐述所取得的成就。与其他技术相比，具有的优势。但是，多径以及遮挡是公认的难题，并且限制了实用化。

Location based service which known as GPS is more and more important in our daily life. Recently, as the mobile device, such as smartphone, apple watch, google glass and the other wearable devices, has been already available for the people, the demand of user localization for precision marketing, indoor navigation and public safety in large structures is obvious, especially in big mall, subway station, airport where GPS services are severely limited [Hui Liu 2007].

Despite significant effort on indoor localization in both academia and industry in the past two decades, highly accurate and practical smartphone based indoor localization remains an open problem. Time of Arrival based ranging approaches, such as special devices using ultra-wideband or ultrasound signals, are more reliable and accurate. However, the additional devices and incompatible with smartphone make them not practically useful for conventional users. Other low-complexity approaches rely on existing sensor in smartphones to infer current location, such as WiFi, fingerprinting, compass and accelerometers. However, their low accuracy and prerequisites like site survey or pairing limits their applications.

[Hui Liu 2007] Hui Liu, Houshang Darabi, Pat Banerjee, and Jing Liu. Survey of Wireless Indoor Positioning Thecniques and Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2007.

多径传输使得TOA/TDOA的估计难度加大，而遮挡会引入一个正的测量偏差，引入一个较大的定位误差，甚至是失败。

目前，室内定位技术中，关于的NLOS识别已经取得了很多成果。从方法上看，可以分为：测距，历史信息，信道统计特性。合作与非合作。

针对各个方法进行分析。其中，针对信道的统计特性最为值得关注，因为它与环境的物理信息直接相关，携带了大量的信息，并在UWB系统中取得了较好的效果。但是其要求信号需要有较大的带宽，但由于严重的室内多径，这种信号会给TOA/TDOA估计带来较大困难。为了实现声信号的NLOS识别以及高精度的TOA/TDOA估计，我们需要寻找新的方法和思路。

室内环境的多径传播模型。

What is obviously is that CIR has been included a full information of surrounding physical messages which is a direct reason of multipath, such as room size, space shape, objects position and materials. 阐述TOA/TDOA，以及NLOS跟多径特征的关系。

因此，针对声信号室内定位的诸多挑战，我们提出一种新的方法：Indoor Environment Multipath Characteristics Estimation (**IEMCE**) ，a method focusing on multipath characteristics estimation of complex indoor multipath propagation, such as the main transmission path of acoustic signal, energy distribution of multipath propagation and the arriving time of each path， in order to precisely obtain TOA/TDOA of target signal and realize LOS/NLOS identification.

The main contributions of this paper are as follows:

(1)We combine the problem of TOA/OTDOA estimation and NLOS identification as an indoor multipath propagation characteristics estimation problem, and propose a new approach, IEMCE, to resolve it. Usually, those two problems are respectively researched both in academia and industrial.

(2)We exploit environment multipath propagation information to realize high accurate TOA/TDOA estimation and NLOS identification in acoustic smartphone indoor positioning. In such a long time, multipath propagation is considered as an adverse factor which should be against in digital communication and indoor positioning. But, we are the first to solve TOA/TDOA estimation and NLOS identification problems using multipath propagation information instead of suppress and abandon it.

(3)To achieve IEMCE of LFM acoustic signal, a multipath estimation method based on FrFt with iterative optimal order estimation is proposed.实验表明，能够稳定且高效地估算信道多径特征。

(4)Through IEMCE, the first arriving path is considered as the precise TOA value and an adaptive and soft-decision threshold is needed to improve the estimation accuracy. To propose NLOS identification based on the multipath propagation characteristics by machine learning classifier or composite hypothesis testing.

2. Related work

3. IEMCE

IEMCE是通过所接收到混叠声信号来估计室内环境信息，进而利用环境信息进行精准TOA估计以及NLOS识别。传统基于信号传播信道的统计特性的方法，主要是利用信道脉冲响应CIR的统计特性，如RMS，峰度以及斜率等。CIR虽与环境也是耦合的，但此类方法没有真正对环境的多径传播信息进行估算和利用，IEMCE则是主要关注在环境多径传播信息的使用上。这些信息主要包括信号通过每条传播路径的到达时刻分布及能量衰减，因此不需要对信道的传播模型进行精确拟合和建立。如果将接收到的混叠声信号看作多成分信号，IEMCE就转化成了信号成分的探测、识别与提取。

IEMCE的核心在于如何精确估计信号通过每条传播路径的到达时刻，来获得室内多径传播的准确时延分布以及能量分布。为了能够在实际工程系统中得到应用，需要对声信号的调制形式进行选择以对信号处理算法进行设计。

3.1 信号选择及

信号的选择取决于系统的定位方法以及信号处理算法。如文献[K. Liu 2015]使用的是binary pulse-amplitude-modulation信号为宽带调幅信号，而文献[S. I. Lopes 2015] [Alexander Ens 2015][Reimar Pfeil. 2015] [Peng C. 2012]使用的则为线性调频信号（LFM）。宽频调幅信号以中心频率为基准利用伪码调制技术进行扩频调制，与无线通讯信号传输不同，当周围环境噪声较大时声信号幅值受影响较大抗干扰能力较弱[Guan S P, 2015]。LFM线性调频信号的调制频率随时间呈线性变化，具有较大的能量和带宽，与宽频调幅信号相比，具有较强的抗干扰和多普勒抑制能力，已经在雷达领域得到广泛应用[Su J. 2015]。因此，本文选用LFM信号作为声信号的调制形式，其信号的表达式为，

 (Fuc-LFM)

其中，为信号幅度，为信号时间长度，为载频，为调频率，为初始相位。LMF信号在时频域表现为一条频率随时间线性增加的直线，如图Fig[LFM] a所示，其，，，。使用一对智能手机，谷歌Nexu 4在走廊环境中，相隔6米视距情况下进行播放和录制，b图为所接收到声信号（4096个采样点）经过交叉项抑制的RID时频分布，能够清晰地看出此信号包含了多个多径传播成分，并且最大能量并非是视距传输的信号，而是经过叠加的多径信号。通过记录每一条LFM信号的到达时刻及其能量，即可对环境的多径传播信息进行估计。



a. The TFD of LFM signal b. The RID of received signal corrupted by dense multipath

Fig[LFM] Time frequency distribution of LFM signal

由于能量无法跃变，在扬声器播放声音时，突然的能量变化会产生一个频带较宽的噪声信号，这对于信号TOA估计以及IEMCE是不利的。文献[S. I. Lopes 2015]通过增加所设计的时域加权窗来进一步将10ms的脉冲进行时域能量压缩，以充分利用其时域及频域信息。针对本文信号，我们所设计的时域加权窗如Fig[window]所示，在信号起始与结束时分别增加长度为5ms及2ms的布莱克曼窗。Fig[sigCmp]所示为复合窗与矩形窗所接收到信号的频谱图。通过对信号的平滑，能够有效抑制宽带噪声信号的产生。



Fig[window] 复合窗

3.2 signal processing

一种最简单的估计信号到达时刻估计方法是基于互相关或广义互相关的TOA估计方法[Peng C. 2012]，但受限于手机平台采样率以及器件稳定性等因素，其检测鲁棒性较差[Sanjib Sur 2014]。针对LMF信号的TOA估计方法较多，罗列参考文献，做一个两句话的介绍。分数阶傅里叶变换（FrFT）是一个传统傅里叶变换的广义形式，近些年来在工程应用中得到工程师的广泛青睐。FrFT可以看做是时频平面旋转角度以后的时频分布，对于信号，其旋转角度为的FrFt变换结果为：



逆FrFT变换表达式为：



其中，为FrFT的核函数，表示为：



The computation of fractional Fourier transform corresponds to the following steps [Luis B. Almeida 1994]:

(1) a product by a chirp;

(2) a Fourier transform (with its argument scaled by csca);

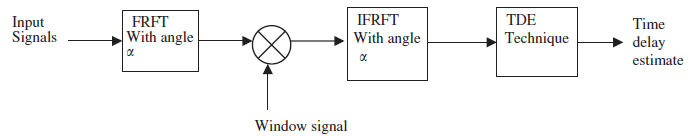
(3) another product by a chirp;

(4) a product by a complex amplitude factor.

在工程中，常用的基于FrFT的时延估计方法，其框图如图所示Fig[TOAFrFt]。通过将输入信号的时间、频率轴旋转a角度，将其变换至分数阶傅里叶变换域，在通过窗函数进行分数阶滤波，获得目标信号存在的可能区域，通过iFrFT对信号进行重构，再利用TDE技术进行信号的时延估计。因此，旋转角度a（也成阶数order）对于提高信号时延估计，信号到达时刻估计，以及我们所需要的多径信号到达时刻分布估计，都是十分重要的，需要一个最优的阶数a值。常用的最优a估计方法是通过（1）参数计算法，以及（2）直接搜索来获得。对于表达式为Fuc-LFM的LFM信号，当采样速率为*fs*时，时域带宽T对应的采样点数为N，那么最优阶数可以通过公式[Chris Capus 2003]：

 --（Fuc-order）

计算得到。但是在实际使用中，特别是智能手机平台，消费类器件的不确定性带来的采样率的漂移，给实际所采集到的信号参数带来一定误差。这会使得计算得到的并非最优阶数。这个可以通过对实际信号的参数估计来提升的估计精度，针对未知LFM信号的参数估计，可以使用文献??的方法。而一种比较直接且快速的方法是针对所采集的信号进行直接搜索[Roshen Jacob 2009]，以获得最优估计阶数。对于本文的场景，由于信号参数已知，我们可以缩小搜索范围以降低计算量，提高搜索效率。



Fig[TOAFrFT] The diagram of TDE using the FrFT

在Fig[TOAFrFT]的基础上，我们提出本文所使用的基于FrFT并带有递归最优阶数估计的TOA估计方法来获得IEMCE，其框图如图Fig[IEMCE]所示。信号经过信号预处理以进行噪声滤除和信号分割，信号分割的目的是截取适当长度的信号，使其包含尽可能多的信息量，以提高计算效率。在对处理后的信号进行FrFT得到IEMCE之前，首先经过一个递归最优阶数估计器，以得到最优的旋转角度a。利用此旋转角度a，信号经过FrFT后，即可获得IEMCE。

Preprocessing

FrFt

FrFt order

FrFt

IEMCE

Order estimation

Frist path detection

Fractional filtering

Signal reconstruction

Input signal

Iterative optimal order estimator

Fig[IEMCE] The diagram of IEMCE

其步骤主要包括：

Step1: 记原始信号为*y(t)*，对其信号进行预处理，主要包括带通滤波以及信号分割。由于室内环境存在较强的背景噪声，特别是低频部分，并且信号频域带宽已知，通过FIR带通滤波器来滤除其它频率的噪声成分得到*yf(t)*，以提高信号的信噪比SNR。在使用传统FIR滤波器的时候，需要对由于滤波器自身特性所引起的时延以及频移进行补偿。常用的语音分割算法包括短时过零率和短时能量比，由于短时能量比对于能量突变检测较为敏感，本文使用短时能量比检测信号的突变，以确定有效信号的位置。在第时刻，取长窗的长度为，并将窗内平均能量记作。短窗长度为，起始时刻为，将短窗内平均能量记作。窗能量的表达式，分别表示为：





则短时能量比为：



短时能量比的各脉冲峰值的位置，即为事件信号的起始点，并通过的量级进行进一步判断是否为有效信号。为了进行快速FrFT计算，选取信号长度应为2的幂次，且能够保证LFM信号及主要多径信息被完整地包含在信号片段内。进行信号分割后的语音信号记作*x(t)*。计算信号的信噪比SNR。

Step2：递归循环计算，并记当前循环次数为*k*。在此过程中，是以第一个到达路径为目标进行递归循环运算，来估计最优阶数。这是由于所接收混叠信号中的最强成分是经过多次叠加后的结果，或是其它的噪声成分，其信噪比相对较低，对最优阶数的估计干扰较大。因此，选择信噪比较高的第一个到达路径信号作为目标信号，估算其FrFT的最优阶数，并同时可估算出信号的TOA值。

在循环中，对*x(t)*进行阶数为的FrFT，得到第*k*次循环的结果，若*k*=0,则利用公式Fuc-order计算理论FrFT阶数的值，并将其作为最优阶数的初值，即。在分数阶傅里叶变换域，由于每一个峰代表了一个传播路径所接收到的信号，在寻找第一个到达路径时，首先需要通过峰值检测对波峰进行提取，在使用基于能量阈值的方法对其进行探测。为了提高探测的鲁棒性，我们提出了一种基于信号信噪比（SNR）及信号能量的自适应阈值，其表达式为：



其中为阈值参数方程，由SNR决定，当噪声为加性白噪声时，表示为，



一般情况下，。当时，，当时，。如图Fig[thd]为参数方程的曲线。当噪声为其它有色噪声时，的取值变大，并需要经过实验根据具体场景来定。那么，对第一个多径的到达时刻为为



进行计算。其中为的波峰计算函数。



Fig[thd] The function of threshold parameter based on SNR

Step4.分数阶滤波。以第一个多径到达时刻为滤波器的分数阶中心，其分数阶带通宽度记作*L*，设计窗函数，表示为：



将其与相乘，即可得到滤波后的分数阶傅里叶成分，即：



取其同等阶数的逆分数阶傅立叶变换，即可实现对信号的时域重构，



Step4.结束条件。将作为新的信号输入到递归最优阶数估计器，即，对其进行阶数搜索估计，结果记作。以阶数进行FrFT后的结果为，再利用自适应阈值进行第一路径到达时刻探测，得到。分数阶滤波的带宽长度*L*每次按照一定比例进行缩短，可以为2或3的倍数，直至。，直至。

根据SNR写公式。

Step5.输出。第M次达成条件。则，对进行到达时刻估计，即可获得TOA。对x(t)进行阶数为的FrFT，即可获得IEMCE.

Chirp extraction and reconstruction of anyone of chirps form a mixture can be achived by performing an equivalent inverse FrFT on the respect spiked components in the complex FrFT output.

3.3 IEMCE algorithm

写算法。

4. TOA estimation with IEMCE

4.1 adaptive threshold decision

4.2 ranging method and performance





5. NLOS identification

6. Conclusion

[K. Liu 2015] Kaikai Liu, Xinxin Liu, and Xiaolin Liu. Guoguo: Enabling Fine-grained Smartphone Localization via Acoustic Anchors. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 15(5):1-1.

[S. I. Lopes 2015] Sergio I. Lopes, Joes M.N. Vieira, Joao Reis, Daniel Albuquerque, and Nuno B. Carvalho. Accurate smartphone indoor positioning using a WSN infrastructure and non-invasive audio for TDoA estimation. Pervasive & Mobile Computing, 2015, 20(C):29-46.

[Alexander Ens 2015] Acoustic Self-Calibrating System for Indoor Smart Phone Tracking. International Journal of Navigation and Observation. 2015.

[Reimar Pfeil. 2015] Robust Acoustic Positioning for Safety Applications in Underground Mining. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol.64, No. 11, 2015.

[Guan S P, 2015]Guan S P, Hua J Y, Du S Y, et al. A robust acoustic signal for smartphone-based indoor ranging and positioning[J]. Scientia Iranica. Transaction D, Computer Science & Engineering, Electrical, 2015, 22(3): 1061.

[Su J 2015]Su J, Tao H, Rao X, et al. Robust multicomponent LFM signals synthesis algorithm based on masked ambiguity function[J]. Digital Signal Processing, 2015.

[Peng C. 2012]Peng C, Shen G, Zhang Y. BeepBeep: A high-accuracy acoustic-based system for ranging and localization using COTS devices[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS), 2012, 11(1): 4.

[Sanjib Sur 2014] Sanjib Sur, Teng Wei and Xinyu Zhang. Autodirective Audio Capturing Trough a Synchronized Smartphone Array. ACM,2014

[Luis B. Almeida 1994] The Fractional Fourier Transform and Time-Frequency Representations. IEEE transactions on signal processing, Vol. 42

[Chris Capus 2003] Short-time fractional Fourier methods for the time-frequency representation of chirp signals. Journal of the Acoustical Society of Amarica, 2003, 113(6):3253-63.

[Roshen Jacob 2009] Applications of Fractional Fourier Transform in Sonar Signal Processing. Lete Journal of Research, 2009,55(1):16-27.

[Hui Liu 2007]Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. 37, No.6, 2007

[Roee Diamant 2014]LOS and NLOS Classification for Underwater Acoustic Localization. IEEE Transactions on Mobile Computing. Vol.13, No.2, 2014

文中所用信号为：E:\zhanglei\matlab工作区\原始数据存储区\2016\0610测距实验\Test\Beacon\data\_1.wav