

# 基于毫米波雷达的高精度液位测量方法

深圳中电国际信息科技有限公司 庄天海 张轩轩 刘志钢

DOI:10.19353/j.cnki.dzsj.2020.21.050

液位测量技术在工业工程领域有着广泛的应用,传统测量技术的测量精度难以达到毫米量级。针对液位测量高精度测量需求,文中在对Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)测距原理研究的基础上,提出了一种改进的分段相位差测距算法。该算法采用补零FFT进行频谱细化,将谱线间的相位变化动态范围进行压缩,消除了分段相位差测距算法中的相位模糊问题,提高了测量精度。仿真结果表明,在带宽为250MHz,信噪比为0dB的高斯白噪声环境下,该测距算法的测量精度可达到±0.2mm。

在工业生产、水文监测、油料存储等工程应用过程中,常常需要对相关液体、油料等高度进行监控。为了保证生产的安全性和公平性,液位测量的精度通常要达到毫米级,相关测量技术在这些工程领域有着极为广泛的应用。

目前液位测量技术普遍是采用激光雷达,超声波雷达,和毫米波雷达等自动化测量技术。

激光雷达技术采用单点式的测量,能量集中,精度高,但其有一个很大的缺点是穿透性不行,容易受到应用环境的限制,比如雨雪天气,雾霾天气,沙尘等。由于需要开孔,一个是影响容器的密封性,同时容易受到灰尘油污等污染而遮挡激光的通路,影响其使用,如果所测量的液体具有腐蚀性,还可能会腐蚀损坏测量仪器。

超声波雷达技术是成本最低,应用最早最为广泛技术之一,但由于声波在传播空间上,极容易受到风速、温度等因素影响,造成精度不稳定,可靠性差。对于温度的影响,通常还需要加入温度传感器进行温度补偿,校正补偿复杂,总体来说效果并不显著,适用于环境良好或精度要求不高的场景。

近几年,随着毫米波雷达技术的成熟,其良好的穿透性能,以及抗干扰性能脱颖而出。毫米波雷达信号可以穿透塑料、木材、玻璃进行测量,对于这类材料的容器,无需开孔,可直接从容器外部进行测量,从而避免与被测液体的接触。对于户外应用,毫米波雷达信号也能穿透雾霾、风沙、雨雪等相对恶劣的天气进行测量。

以上测量方法的测量精度一般都不高,因此针对高测量精度需求,本文提出了一种改进的分段相位差测距算法。

## 1 FMCW测距原理

改进的分段相位差测距算法是基于Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)测距原理实现的,测距原理如下:

假设测距设备发射机发射的调频连续波为:

$$S_T(t) = \exp[j\varphi_T(t)] = \exp\{j[2\pi f_0 t + \pi K t^2 + \varphi_0]\} \quad (1)$$

其中,  $K=B/T$ ,  $B$ 为调制带宽,  $T$ 是信号调频周期,  $\varphi_0$ 是初始相位。

若目标距离为 $R$ ,则测距设备接收机接收到的回波信号为:

$$S_R(t - \tau_R) = \cos[2\pi f_0(t - \tau_R) + \pi K(t - \tau_R)^2 + \varphi_0] \quad (2)$$

其中,  $\tau_R = 2R/c$ ,  $c$ 是波速。

发射信号与回波信号经过混频、滤波后,得到中频输出信号,可表示为:

$$S_{IF}(t) = \exp(j\varphi) \cdot \exp(j[2\pi f t]) \quad (3)$$

其中,输出的中频信号的频率为:

$$f \approx \frac{2K}{c} R - \frac{2f_0}{c} v$$

相位为:

$$\varphi \approx \frac{4\pi R}{\lambda}$$

$f_0$ 是发射信号的中心频率,  $\lambda$ 是发射信号的波长。

考虑液位测量过程中,液位的是相对静止的或是缓慢移动的,可以将速度项省略,重写为:

$$f = \frac{2K}{c} R = \frac{R}{R_{res}} \frac{1}{T} = \frac{R}{R_{res}} df \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (5)$$

其中,距离分辨率  $R_{res} = \frac{c}{2B}$ , 频谱分辨率  $df = \frac{1}{T}$ ,

这里假设采样时长等于信号调制周期。

从公式(4)、(5)可知,目标距离与输出信号的频率有关、目标距离也与输出信号的相位有关,因此测距的方法有两种方式,一种是对信号的频率进行估计得到目标的距离,另一种是对信号的相位估计来得到距离。但这里需要注意的是,相位的变化是以 $2\pi$ 为周期的,因此不能通过直接测量相位得到距离,但可以通过相位的变化量得到距离的变化量,若已知初始距离,则可以得到目标的距离。

## 2 分段相位差算法原理及缺陷

分段相位差法是将中频信号从中间分成两个子段,通过比较计

算信号经过半个调制周期 $T_0/2$ 相位变化多少来进行估计。具体如下:

对于中频信号:

$$x(t) = \exp(j\varphi_0) \cdot \exp(j2\pi f_0 t), 0 \leq t < T_0 \quad (6)$$

其中, 信号的初始相位 $\varphi_0 = \frac{4\pi R}{\lambda}$ ,  $f_0 = \frac{R}{R_{res} T}$ ,  $R$ 是

雷达到液面的距离,  $T$ 是信号的调频周期。采样后的信号为:

$$x(n) = \exp(j\varphi_0) \cdot \exp(j2\pi \frac{f_0}{f_s} n), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

将信号从中间分为两段 (离散长度为 $M = \frac{N}{2}$ ), 如

图1所示, 可表示为:

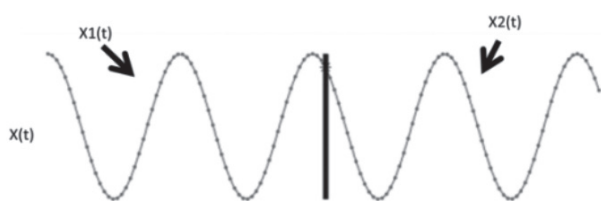


图1 中频信号离散化

$$x_1(n) = \exp(j2\pi \frac{f_0}{f_s} n + j\varphi_0) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_2(n) &= \exp(j2\pi \frac{f_0}{f_s} (n + M) + j\varphi_0) \\ &= \exp(j2\pi \frac{f_0}{f_s} n + j2\pi \frac{f_0}{f_s} M + j\varphi_0) \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $n=0, 1, \dots, M-1$ 。

分别对 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 做M点FFT, 可得:

$$X_1(k) = \text{Sa}\left(\pi\left(k_0 - k\right)\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{M-1}{M}\left(k_0 - k\right) + j\varphi_0\right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} X_2(k) &= \text{Sa}\left(\pi\left(k_0 - k\right)\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{M-1}{M}\left(k_0 - k\right) + j2\pi k_0 + j\varphi_0\right) \\ &= \text{Sa}(\pi k) \cdot \exp\left(j\pi \frac{M-1}{M} k + j2\pi k_0 + j\varphi_0\right) = \text{Sa}(\pi k) \cdot \exp(j\varphi_2) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $\hat{k}$ 是离散最大谱线的频点,  $k_0$ 是真实最大谱线的频点, 偏移量 $\Delta k = k_0 - \hat{k}$ ,  $-0.5 < \Delta k < 0.5$ 。

$x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 的相位差:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \text{angle}\left(\frac{X_2(k)}{X_1(k)}\right) \\ &= [\varphi_2 - \varphi_1]_{2\pi} = [2\pi k_0]_{2\pi} = \left[2\pi\left(\hat{k} + \Delta k\right)\right]_{2\pi} = 2\pi\Delta k \end{aligned} \quad (12)$$

其中, 符号 $[x]_{2\pi}$ 表示 $x$ 是以 $2\pi$ 为周期的角相位 $x \in (-\pi, \pi)$ 。

通过测量相位差 $\Delta\varphi$ , 可得到偏移量:

$$\Delta k = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (13)$$

$k_0$ 的估计值为:

$$\hat{k}_0 = \hat{k} + \Delta k \quad (14)$$

初始相位的估计值为:

$$\hat{\varphi}_0 = \left[ \varphi_1 - \pi \frac{M-1}{M} \Delta k \right]_{2\pi} \quad (15)$$

从而得到频率的估计为:

$$\hat{f}_0 = \hat{k}_0 \cdot \frac{2}{T_0} \quad (16)$$

对应距离的估计为:

$$\hat{R} = \hat{f}_0 TR_{res} = \hat{k}_0 \cdot df TR_{res} = \hat{k}_0 \cdot 2 / T_0 \cdot TR_{res} \quad (17)$$

由上述推导过程可知, 距离估计精度跟 $\Delta k$ 的估计精度以及频谱分辨率 $df$ 有关。对于250 MHz的带宽来说, 当 $T=T_0$ 时, 一个 $df$ 对应的距离为 $2R_{res} T / T_0 = 1.2m$  (分段导致的分辨率降低)。假设测量的相位 $\Delta\varphi$ 与实际相位误差为 $1^\circ$ , 则引起的 $\Delta k$ 误差为 $1/360$ , 从而引起的测距误差为

$$e = \frac{1.2m}{360} = 3.3mm。$$

由于 $\Delta k$ 的取值范围为 $(-0.5, 0.5)$ , 对应于 $\Delta\varphi$ 的取值范围 $(-\pi, \pi)$ , 而 $-\pi$ 和 $\pi$ 为相邻相位, 存在相位模糊的问题, 容易受噪声的影响而将实际相位差 $-\pi$ 误测为 $\pi$ , 反之亦然, 从而导致测频误差相差一个分辨率( $df=2/T$ )。故为了达到精确的距离估计, 需要消除相位模糊的问题。为了消除相位模糊的问题, 本文提出了改进的分段相位差法, 并利用改进的方法进行频谱和相位校正后, 用相位累加的方式进行高精度测距。

### 3 改进的分段相位差算法原理及噪声干扰误差分析

#### 3.1 算法原理

基于分段相位差法, 将分段后的信号进行M点FFT改为进行 $M_f$ 点的FFT, 当 $M_f > M$ 时, 进行补零, 可得:

$$X_1(k) = \text{Sa}\left(\pi\Delta k \frac{M}{M_f}\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{M-1}{M_f} \Delta k + j\varphi_0\right) = A \cdot \exp(j\varphi_1) \quad (18)$$

$$X_2(k) = \text{Sa}\left(\pi\Delta k \frac{M}{M_f}\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{M-1}{M_f} \Delta k + j2\pi k_0 \frac{M}{M_f} + j\varphi_0\right) = A \cdot \exp(j\varphi_2) \quad (19)$$

经DFT之后,  $X_2(n)$ 与 $X_1(n)$ 的相位差为:

$$\Delta\varphi = \text{angle}\left(\frac{X_2(k)}{X_1(k)}\right) = [\varphi_2 - \varphi_1]_{2\pi} = \left[2\pi k_0 \frac{M}{M_f}\right]_{2\pi} = \left[2\pi \hat{k} \frac{M}{M_f} + 2\pi\Delta k \frac{M}{M_f}\right]_{2\pi} \quad (20)$$

这里由于相位  $2\pi k \frac{M}{M_f}$  可能为非整周期, 同时由于已知  $\hat{k}$ , 因此在求  $X_2(n)$  与  $X_1(n)$  的相位差的同时, 可以减去该相位信息, 得到修正的  $\Delta\varphi$  为:

$$\hat{\Delta\varphi} = \text{angle} \left( \frac{X_2(k)}{X_1(k)} \cdot \exp \left( -j2\pi k \frac{M}{M_f} \right) \right) = \left[ 2\pi \Delta k \frac{M}{M_f} \right]_{2\pi} \quad (21)$$

由上式可以看出:

当  $M_f = M$  时, 即为前面所述改进前的分段相位差法;

当  $M_f > M$  时, 由  $\Delta k \in (-0.5, 0.5)$ , 相位  $\Delta\varphi$  的变化量为:  $-\pi < \hat{\Delta\varphi} < \pi$ , 没有相位模糊问题。

例如, 当  $M_f = 2M$  时,  $\Delta\varphi$  的变化范围为:  $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 。

由上述推导可得:

$$\widehat{\Delta k} = \frac{\widehat{\Delta\varphi} M_f}{2\pi M} \quad (22)$$

频谱估计结果:

$$\widehat{k}_0 = \hat{k} + \widehat{\Delta k} \quad (23)$$

对应距离估计:

$$R = \widehat{f}_0 TR_{res} = \widehat{k}_0 \cdot df_{M_f} \cdot TR_{res} \quad (24)$$

初始相位估计结果:

$$\varphi_0 = \left[ \varphi_1 - \pi \frac{M-1}{M_f} \Delta k \right]_{2\pi} = \left[ \varphi_1 - \frac{M-1}{M} \cdot \frac{\widehat{\Delta\varphi}}{2} \right]_{2\pi} \quad (25)$$

根据前面所述的FMCW测距原理, 液面的回波信号的离散表达式为:

$$x(n) = \exp(j\varphi_r) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f_0}{f_s} n\right) \quad (26)$$

$$\varphi_r = [\phi_r]_{2\pi} \quad (27)$$

其中  $\phi_r = \frac{4\pi r}{\lambda}$ ,  $r$  是雷达接收机距离液面的距离。

当液面发生位移  $\Delta r$  时, 相位变化量为:

$$\Delta\phi = \phi_{r+\Delta r} - \phi_r = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda} \quad (28)$$

即可以通过测量相邻两帧的相位差  $\Delta\phi$ , 得到距离的变化量  $\Delta r$ 。由于相位测量的范围是  $[-\pi, \pi]$ , 所以为了避免位移  $\Delta r$  模糊, 要求  $\pi < \Delta\phi = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda} < \pi$ , 即  $\Delta r$  的绝对值应小于  $\lambda/4$ 。以20fps (帧每秒, 一帧表示一次测量结果) 的信号处理速度为例, 帧间隔为  $T_f = 50\text{ms}$ , 理想无噪环境下能支持的最大位移速度为  $v_{\max} = \frac{\lambda}{4T_f} = \frac{12.5\text{mm}}{200\text{ms}} = 0.06\text{m/s}$ 。

在液位测量应用中, 液位的变化通常都是缓慢的波动或者是

静止, 所以一般都能满足要求 (考虑到噪声的存在, 应留有一定的余量, 如果需要适应更大的变化量, 可以选择波长更长的信号, 或者提高信号处理速度。)

当条件  $-\pi < \Delta\phi < \pi$  成立时, 以初始距离  $R_0$  为第0次测量, 设第M-1次测量和第M次测量期间, 液面位移为  $\Delta r_M$ , 则第M次测量时的高度为:

$$\begin{aligned} r_M &= R_0 + \sum_{m=1}^M \Delta r_m = R_0 + \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{m=1}^M \Delta\phi_m \\ &= R_0 + \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{m=1}^M \phi_m - \phi_{m-1} \\ &= R_0 + \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{m=1}^M [\varphi_m - \varphi_{m-1}]_{2\pi} \end{aligned} \quad (29)$$

其中,  $\varphi_m$  是第m帧的相位测量值, 可通过改进的相位差法进行测量。即当条件  $-\pi < \Delta\phi < \pi$  成立时,  $\Delta\phi_m$  可通过测量第m帧的相位与第m-1帧的相位相减, 然后去混叠得到第M次测量时, 雷达接收机与液面的距离  $r_M$ 。

### 3.2 噪声干扰误差分析

设第m次测量时, 信号的相位为:

$$\hat{\varphi}_m = \varphi_m + \delta_m \quad (30)$$

相位噪声  $\delta_m$  是均值为零的高斯白噪声  $\sim [0, \sigma^2]$ 。对应的测量值为:

$$\hat{\varphi}_m = [\hat{\varphi}_m]_{2\pi} = [\varphi_m + \delta_m]_{2\pi} \quad (31)$$

由位移不模糊条件, 要求  $-\pi < \hat{\varphi}_m - \hat{\varphi}_{m-1} < \pi$ , 其隐含

条件  $-\frac{\pi}{2} < \delta_m < \frac{\pi}{2}$ , 有:

$$\begin{aligned} \hat{r}_M &= R_0 + \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{m=1}^M [(\hat{\varphi}_m - \hat{\varphi}_{m-1})]_{2\pi} \\ &= R_0 + \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{m=1}^M [[\hat{\varphi}_m]_{2\pi} - [\hat{\varphi}_{m-1}]_{2\pi}]_{2\pi} \\ &= R_0 + \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{m=1}^M [\hat{\varphi}_m - \hat{\varphi}_{m-1}]_{2\pi} \\ &= R_0 + \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{m=1}^M \hat{\varphi}_m - \hat{\varphi}_{m-1} \\ &= R_0 + \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{m=1}^M \phi_m - \phi_{m-1} + \delta_m - \delta_{m-1} \\ &= r_M + \frac{\lambda}{4\pi} (\delta_M - \delta_0) = r_M - \frac{\lambda}{4\pi} \delta_M \end{aligned} \quad (32)$$

其中,  $\delta_0$  是标定初始距离的误差, 这里假设标定是无误

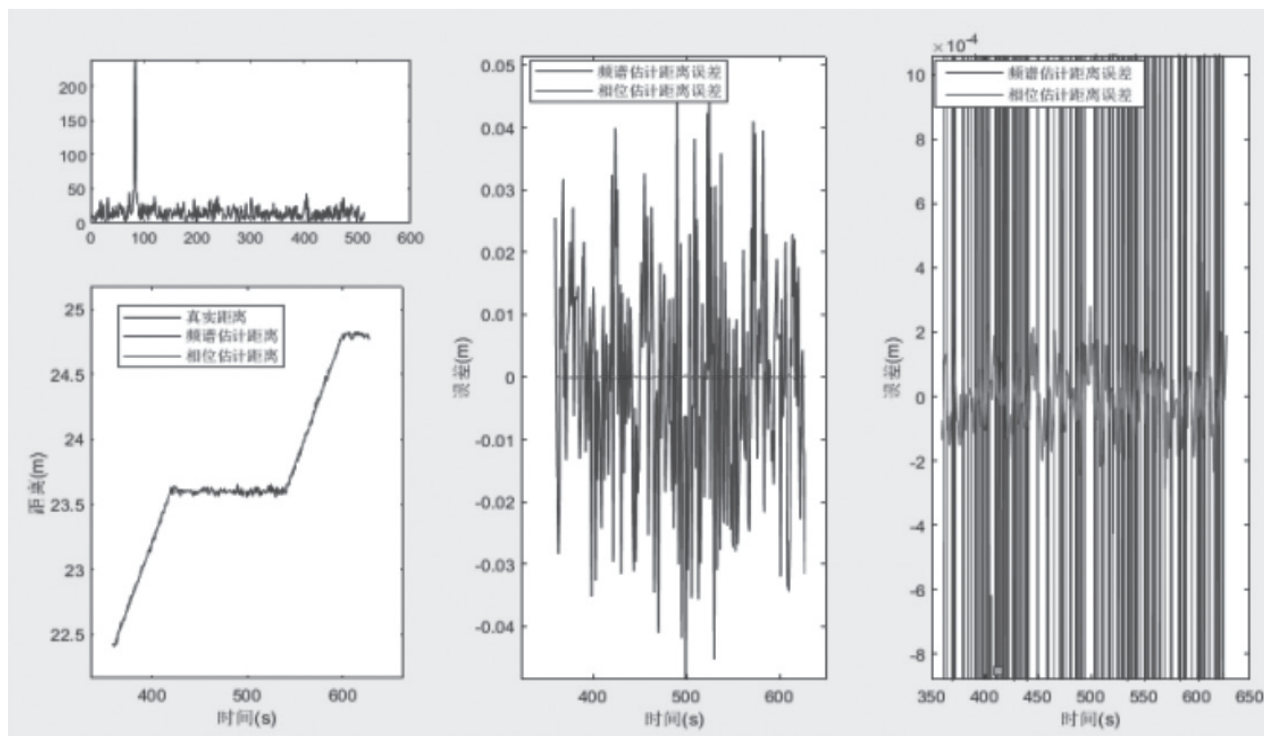


图2 基于改进的分段相位差法, 利用频谱估计测距和利用相位估计测距精度比较

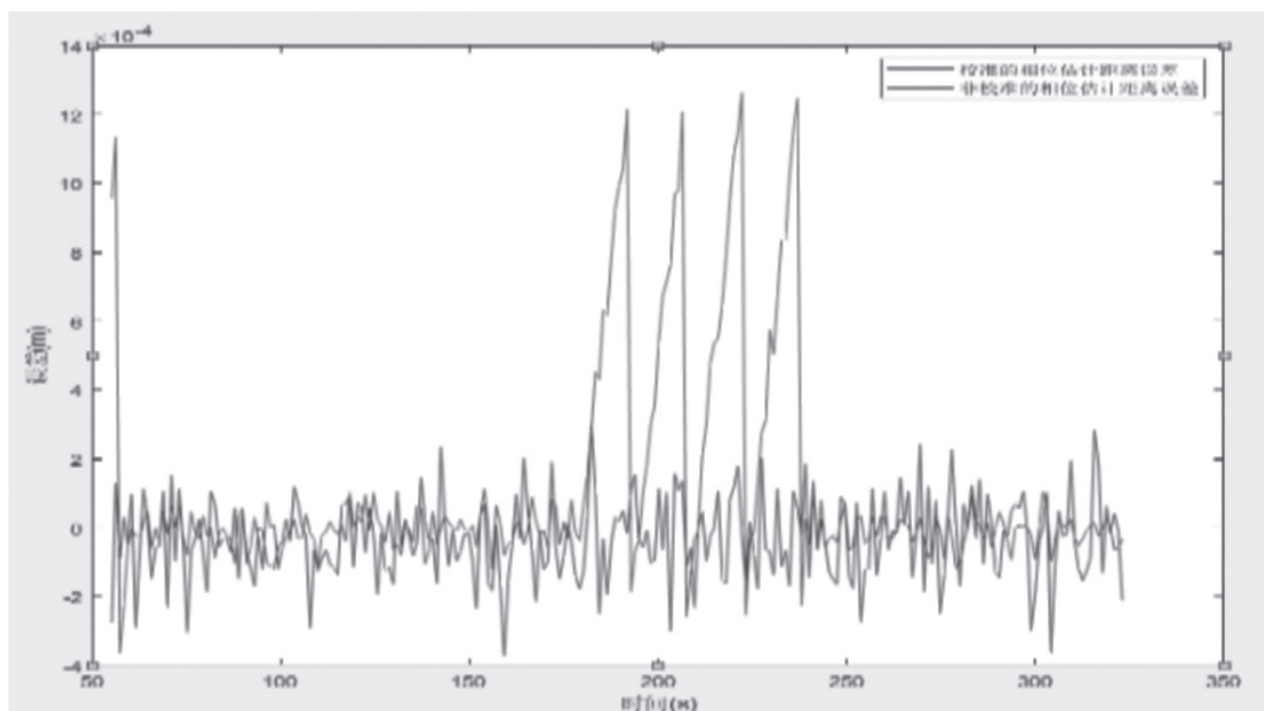


图3 基于校准的相位测距精度与基于校准前的相位测距精度比较

差的, 则基于该相位累加的测量方法, 误差等于最后一次测量的误差, 在满足位移不模糊条件的前提下, 具有很强的抗相噪性能, 例如, 当相位误差  $\delta_M$  等于  $4\pi/180$  时, 距离误差为  $0.0694mm$ 。另外, 由位移不模糊条件可知, 如果  $\Delta\phi_m$  的动态范围越大, 则要求  $\delta_M$  的范围越小。

从测量原理分析中, 距离的初始值需要对初始距离  $R_0$  进

行设置, 设置值的误差  $\delta_0$  影响到总偏差, 认为设定一般可以认为误差  $\delta_0$  为零, 但这就变成了半自动化, 维护不方便。因此为了满足自动化要求, 需要对  $R_0$  进行自动化设置。考虑到液位长时间时不变的, 可以利用改进的相位差法中通过频谱估计测得的距离进行多次测量取平均或者其他平滑滤波来进行距离的初始化。



#### 4 仿真验证

通过仿真,对改进的分段相位差算法进行验证,仿真参数如下:

波长: 12.5mm (24GHz毫米波)

调频带宽: 250MHz

调频周期: 1ms

采样频率: 256MHz

信噪比: 0dB

液面位移速度: 0m/s 与 0.02m/s 相互切换

仿真信号:

$$x(n) = \exp(j\varphi_r) \cdot \exp(j2\pi \frac{f_0}{f_s} n) + Noise \quad (33)$$

给定准确初始距离的仿真结果如图所示。

从图2仿真结果中可以看出,在0dB信噪比下,利用频谱估计得到的距离精度误差在±40mm左右,而利用相位估计测得的精度提高到了±0.2mm,说明了基于相位估计测距算法的有效性,满足毫米级精度的要求。从图3可以看出,相位校准后再进行估计,精度会更稳定(红色曲线),但由于信号截断,导致的信噪比降低,而使测试精度有所下降。此外从图中可以看出,相位估计得到的距离误差在0附近抖动,可以认为误差是零

均值的。说明,可以在静止液位的条件下,通过多次测量取平均值来设置初始距离是有效的。

#### 5 结论

本文首先介绍了分段相位差测距算法及其存在的相位模糊问题。为了消除相位模糊的问题,本文提出了改进的分段相位差法,利用改进的算法进行频谱和相位校正后,再用相位累加的方式进行高精度测距;并对测距误差进行分析,结果表明该测距算法的测量误差等于最后一次测量的误差,在满足位移不模糊条件的前提下,具有很强的抗相噪性能;最后仿真对比结果证明了改进的分段相位差算法的有效性,该算法可满足毫米级精度的测距要求。

作者简介:

庄天海(1988—),男,学士,中级工程师,研究方向:信号处理技术、校准、目标跟踪以及雷达设计等方面的研究。

张轩轩(1985—),男,学士,研究方向:射频技术、雷达天线设计等方面的研究。

刘志钢(1971—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:信号与信息处理,通信电路与系统。

(上接第117页)

分析人员提供基础运营报表管理和重点指标监控功能,提供专业的指标分析、交互列表分析、用户轨迹分析和用户群分析等功能。通过对后台数据的统计分析,实现系统的进一步优化。系统包括报表管理、报表检索、报表分析和实时日志。

统计报表包含原始报表、共享报表、我的报表和历史列表。原始报表提供最为基础的报表主题及维度组合方案,由超级管理员构建、编辑和删除,可供所有用户查看和分析。用户可以在原始报表基础上构建自定义报表,高级管理员可在此基础上构建共享报表分享给其他用户,也可建立个人报表供自己查看和分析。共享报表对于所有用户都可以进行查看和分析,建表本人及其上级管理员可对报表进行删除。个人报表提供用户个人自定义报表的查看分析功能,建表本人可对报表进行删除。历史列表模块呈现用户查看列表的历史痕迹,能够引导用户快速定位近期关注列表。

报表检索提供给用户根据报表名称快速检索所需报表,支持模糊查询。

报表分析提供给管理员查看、统计和导出各类运营指标报

表,可以选择时间段、统计周期及报表属性。统计周期分为日报、周报、月报和年报。管理员可以定义报表指标和维度来构建自定义报表。

实时日志包括识别引擎日志、对话系统日志和交互逻辑日志。如果系统运营过程中出现问题,可以通过查看日志来定位和跟踪相应具体问题。

本文基于企业的业务形态,结合智能语音识别和分析技术构建了智能化、人性化、高效率的企业智能客服系统。研究智能机器人客服语音导航、自助登记、智能外呼和微信智能客服场景应用,为客户带来全新的互动自助服务体验。系统具备语音策略灵活的可配置性,可自定义及拓展性,所使用的关键技术和方法遵循当前主流行业标准,便于后续的移植和升级。通过智能客服系统,可以缓解人工电话成功率持续下降和人力资源成本趋于紧张的矛盾。

作者简介:郭玲(1973—),女,湖南湘潭人,副教授,主要研究方向为人工智能、Web应用开发。