液面雷达测距精度及补偿方法研究

Research on the Leasuring Accuracy and Compensation Method for Level Radar

(1.哈尔滨工业大学;2.江西工业工程学院) 黄仁欣 [1,2]　宗成阁 [1]
Huang,Renxin　Zong,Chengge

摘要：首先介绍了用 LFMCW 信号实现液位测量的原理，导出了线性调频雷达差频信号表达式；同时分析了信号非线性对测距精度造成的影响，并采用了数字预畸变技术以改善固态振荡源非线性振荡特性，取得了明显的效果。

关键词：液位测量；非线性补偿；线性调频连续波；信号处理
中图分类号：TN953+.2　　**文献标识码**：A
文章编号：1008-0570(2005)02-0064-02

Abstract: The paper first presents the principls of using LFMCW signals to measure liquid leval, and got the representation of difference frequency of FMCW radar. At the same time, the paper analysis the affection of signal nonlinearity on measurement precision, and introduces the method of predistortion to improve the nonlinearity of solid oscillator。

key words: level measurement; Nonlinear compensation; IFMCW; signal processing

技术创新

1 引言

近年来，石油化工企业中的油品储运系统自动化控制和管理水平得到了很大发展，有的企业的储运系统已经能达到罐区数据计算机采集，阀位集中遥控。液面雷达作为一种高精度、免维护的新型非接触液位测量设备，有很大的市场和很好的应用前景。液面雷达只需探测单一目标，并且作用距离近，不需要大的发射功率，但要求测距精度高、电路简单可靠、体积小、成本低。根据这一特点，液面雷达适宜采用 LFMCW 信号体制。线性调频连续波(LFMCW)雷达的测距精度和距离分辨力主要取决于信号的频谱结构。为提高测距精度和距离分辨力，需选择较大的调频带宽。调频带宽大，还可降低有源干扰的频谱密度，提高抗干扰性能。而 LFM 信号的主要缺点是在信号产生和处理过程中的任何失真，都会使信号频谱的旁瓣增高，因而降低雷达的检测能力。我们采用数字预畸变技术提高 LFM 信号的线性度，取得了明显的效果，满足了系统测距精度的要求。

2 IFMCW 雷达测距原理

IFMCW 液面雷达基本原理如图 1 所示。由于液面雷达作用距离近，发射功率小，尺寸小，因此设计成收发共用一个天线，并通过环行分配器隔离。

从天线发射的受锯齿波信号调制的调频连续波信号，碰到被测物体表面后发生反射，反射回波被接收机接收，并与发射机直接耦合过来的发射信号进行混频，在电波传播到被测物体表面并返回天线的这段时间内，发射机频率较之于回波频率已有了改变，因此在混频器上便会有差频电压输出，通过差频电压的频率可直接导出目标距离。

黄仁欣：讲师
黑龙江省科委留学回国人员基金资助项目，课题编号 L9611.

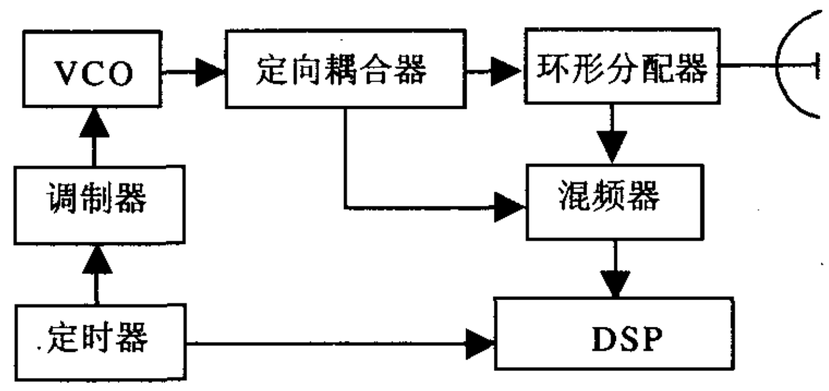


图 1　液面雷达基本原理

设发射信号的瞬时频率 ω_i 为：

$$\omega_i = \omega_0 + 2\alpha t_n,\quad -\tfrac{1}{2}T_s < t_n < +\tfrac{1}{2}T_s \tag{1}$$

t_n 为调频周期，α 为调制频率的变化率。将 ω_i 转化成跟电压成比例的相位形式为 $\phi_i = \int_0^t \omega_i dt + const$，不失一般性，令初始相位 const 为 0，求出相位 φ_i 的一般表达式为：

$$\phi_i = \omega_0 t_n + \alpha t_n^2 + n\omega_0 T_s \tag{2}$$

令发射信号的波形为 $V_g \sin\phi_g$，电波碰到静止目标的回波形式为 $V_e \sin\phi_e$，其中 φ_e 跟 φ_g 相似，只是在时间上延迟了一个 τ。

$$\tau = \frac{2R}{c} \tag{3}$$

将发射信号与回波混频，混频输出结果为一个直流分量、一个低次乘积项 $GV_eV_g \sin\phi_e \sin\phi_g$ 和更高阶的乘积项。通常我们只关心低次的乘积项 $GV_eV_g \sin\phi_e \sin\phi_g$，并把它写成和差形式

$$\frac{1}{2}GV_eV_g\left[\cos(\phi_g - \phi_e) - \cos(\phi_g + \phi_e)\right]$$

式中 G 为混频系数。滤除上边频分量，只保留下边频分量 $\frac{1}{2}GV_eV_g\cos(\phi_g - \phi_e)$ 项。在任意一段长度为 Ts 的区间内，有两个不同的差拍频率，图 2 为 $\tau << T_s$ 时差频信号谱的两个 sinc 包络。随着 τ 的增大，差频 ω_{B1} 包络越来越宽，差频 ω_{B2} 包络越来越窄。经过滤波后，ω_{B2} 的作用可以忽略。

$$\omega_{B1} = 2\alpha\tau = 2\alpha \cdot \frac{2R}{C} \tag{4}$$

得距离 R 与差频 ω_{B1} 的关系式：

$$R = \frac{C}{4\alpha} \cdot \omega_{B1} \tag{5}$$

式中，C 为无线电波的传播速度，是个常量；α 则为调制频率的变化率，由系统参数决定。如果已设定了系统参数，那么距离 R 就与差频信号频率 ω_{B1} 成线性关系。差频信号经 A/D 采样后，转换成数字信号，并由数字信号处理机(DSP)的信号处理单元对其做快速傅立叶变换(FFT)，把时域的采样信号变换到频域，再利用主瓣内的几根谱线拟合出差频频率，由公式(5)求出距离值，最终由终端显示器显示出雷达天线与被测液面的距离。

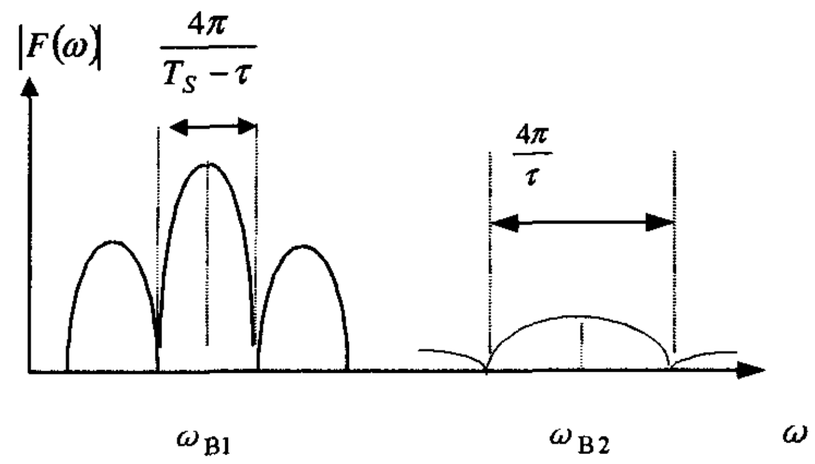


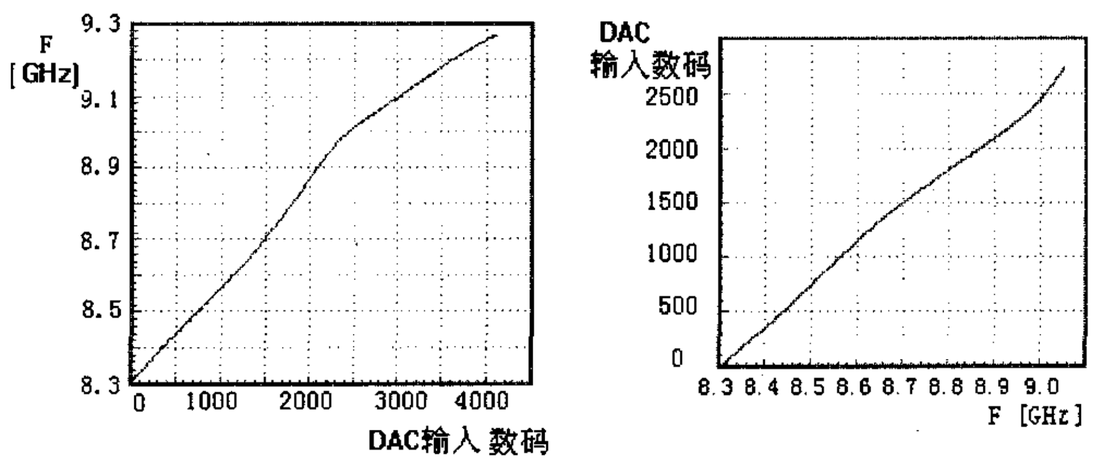
图2　差频信号谱包络

《80C51 宏汇编程序设计语言》
万方数据

3 信号预畸变原理

前面分析中假定调频信号是纯线性调频信号，实际上由于压控振荡器(VCO)的非线性，即使输入线性增长的电压，输出的调频信号也不是线性的。我们实际测得的 F-V 曲线如图 3(a)所示，在图中可以看出，F 与 V 并不成线性关系。又因 $V \propto t_n$，因此 α 在整个调频周期内也是一个变化的量，当距离 R 不变时，由于 α 不是常数，使得差频信号的频率与距离不成线性关系，再加上系统噪声的影响，不仅使主瓣包络变得无规则，严重时还会出现“假峰”。如果用这些谱线来测距，就会严重影响系统测距精度。在实际测量中，由于“假峰”的影响经常造成很大的读数偏差。

因此，有必要先对 D/A 输出的线性电压进行预畸变，而使输出的调频信号变成为线性调频信号。从图 3(a)可以看出，虽然 F-V 曲线不是线性的，但却是一一对应的。只要我们找出所有的对应点，再从中选取我们所需要的 F-V 对应点。我们把这些电压值存成一张表，以后只要输出这些电压值就能得到线性调频波了。这种方法虽然比较繁琐，但易于用计算机实现。



(a)实测的 F-V 曲线　　(b)预畸变后的 F-V 曲线

图 3　预畸变前后振荡器的 F-V 曲线

由于锯齿波电压用数字合成方法产生，DAC 的数字量输入跟模拟电压输出成一一对应的线性关系，因此我们先测量出数字输入量与调制频率的关系。实际测量时 D/A 增长的步长为 4，只测 1024 点。由于当 D/A 输入从 000H~FFFH(电压输出为 0~+10.24V 时)，对应的频率为 8.27GHz~9.25GHz，超过了 750MHz 的调频带宽。因此我们在整个 F-V 曲线中选取线性比较好的前一段 D/A 输入从 000H~AAAH，频率为 8.27~9.02GHz 来作为校正的对象。

考虑到 F-V 曲线在小段范围内可以认为是线性的，因此，先对得到的 F-V 曲线进行线性插值成 4096 点，并把插值后得到的数据生成一张表。然后把 750MHz 调频带宽等分成 4096 个频率点，根据每个频率点查找表上与自己最接近的频率值，并把查找的结果存在另一张表格里。这样就得到了校正后的 F-V 曲线。在这张表里，V 不再是线性的，而 F 却是线性的了。校正后的 F-V 曲线如图 3(b)所示。

以上的插值和校正程序用 C 语言编写，具体实现框图如图 4 所示。校正后的电压值生成一张表写入数字信号处理机 TMS320C25 的程序存储器。C25 程序运行时通过 D/A 输出锯齿波电压控制 VCO 产生线性调频信号。

我们进行了系统实测，采样数据长度为 256 点，时域补零成 4096 点，做 4096 点 FFT，并利用最大值谱线来测距。在未对锯齿波进行预畸变时，读数与真实距离值有较大的偏差，且经常出现读数“回跳”。而采用预畸变技术后，测距精度基本满足 0.5(设计要求，仅在个别点上出现较大的偏差。

4 结束语

针对液面雷达研制过程中遇到的实际问题，提出了对 VCO 的非线性进行定时补偿的预畸变方法。该方法在液面雷达中得到了应用，并获得到了满意的效果，提高了系统的测距精度，有一定的参考价值。

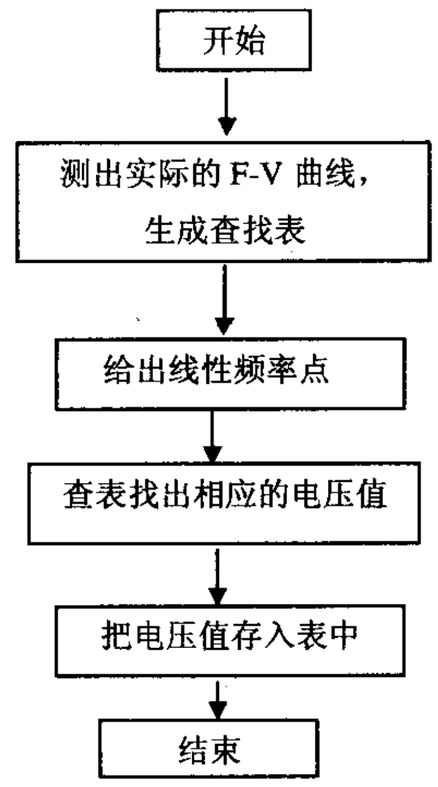


图 4　预畸变实现框图

参考文献:

[1]胡翔，阮文杰．LFMCW 雷达的调频非线性对距离分辨率的影响．现代雷达 1999.10(5)

[2]张永强. LFMCW 高线性度信号源技术研究.[学位论文]，成都：电子科技大学，2001

[3]蔡英杰，向敬成.宽带 LFM/NLFM 信号及其产生.系统工程与电子技术.1999(1):36~40

[4]Zong chengge, Yuan yeshu et. A Method for Target Estimation of Level Radar.1996 CIE International Conference OF Radar Proceedings.270~273.

作者简介：黄仁欣，男，1971 年生，江西工业工程职业技术学院电子信息系电子信息教研室主任，讲师、工程师。现为哈尔滨工业大学通信与信息系统专业硕士研究生，从事信号与信息处理及 DSP 应用的研究工作。电话：13879951036;E-mail:huangrenxin@126.com;宗成阁，男，1954 年生，教授，哈尔滨工业大学航天学院电子与通信工程系副主任，长期从事信号与信息处理及 DSP 的教学和研究工作。

(337055　萍乡市江西工业工程职业技术学院电子信息系)黄仁欣

(150001　哈尔滨工业大学航天学院)宗成阁

(Jiangxi Industry Engineering Vocational Technical Institute, Jinngxi,China 337055)Huang,Renxin

(Harbin Institute of Technology, Harbin,China 150001) Zong,Chengge

(收稿日期:2004.8.15)

宏拓系列数据采集板,通信板
模拟量隔离变送,小信号放大模块
网址:www.hotec.com.cn
北京宏拓控制技术有限责任公司
电话:010-82665601,82665689　传真:82665687