

# 基于 IWR1642 的雷达水位计设计

汪义东<sup>1,2</sup>, 郑 宏<sup>3</sup>

(1. 水利部水文水资源监控工程技术研究中心, 江苏 南京 210012;

2. 江苏南水科技有限公司, 江苏 南京 210012; 3. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012)

**摘要:**针对雷达天线前端模拟电路复杂、成本高的问题,设计了一种基于毫米波传感器 IWR1642 的 77GHz 雷达水位计。完整设计了雷达水位计所需要的部件,包括平面微带天线、硬件电路以及外壳,采用加速度传感器矫正安装角度,RS485 通讯传递数据。阐述了雷达水位计软件的工作流程,采用在快速傅里叶变换的基础上进行选带傅里叶变换的算法计算差频信号的频率。制作了水位计测试样机,并在实验室中完成测试,测量误差小于 1 cm,满足雷达水位计的测量要求。

**关键词:**毫米波传感器;雷达水位计;调频连续波;平面微带天线;差频信号

中图分类号:TV131.66

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2021)07-0014-05

## Design of radar water level gauge based on IWR1642

WANG Yidong<sup>1,2</sup>, ZHENG Hong<sup>3</sup>

(1. *Hydrology and Water Resources Monitoring Engineering Technology Center, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China*; 2. *Jiangsu Naiweh Corporation, Nanjing 210012, China*;

3. *Nanjing Automation Institute of Water Resources and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China*)

**Abstract:** Aiming at the complexity and high cost of the radar antenna front-end analog circuit, a 77GHz radar water level gauge based on the millimeter wave sensor IWR1642 was designed. The components required for the radar water level gauge were completely designed, including a planar microstrip antenna, hardware circuit and the shell, using the acceleration sensor to correct the installation angle, and RS485 communication to transmit data. The workflow of the radar water level gauge software was described. The algorithm of band-selective Fourier transform based on fast Fourier transform was used to calculate the frequency of difference frequency signal. A prototype of a water level gauge was produced and tested in a laboratory. The measurement error was less than 1 cm, which met the measurement requirements of a radar water level gauge.

**Key words:** millimeter wave sensor; radar water level gauge; frequency modulated continuous wave (FMCW); planar microstrip antenna; difference frequency signal

水位测量是水文工作中必不可少的环节,与传统接触式测量及超声波测量相比,采用雷达水位计进行水位测量具有测量精度高、安装维护方便等优点。目前市面上大部分雷达水位计是引进国外的脉冲型雷达水位计,脉冲型雷达水位计的成本较

高,而调频连续波雷达水位计还处于起步阶段,并且雷达天线前端模拟电路复杂,调试困难。因此本文设计了一种基于毫米波雷达传感器 IWR1642 的 77GHz 调频连续波雷达水位计,此芯片集成了天线前端所需要的模拟电路,大大降低了雷达电路设计

收稿日期:2020-12-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405700)

作者简介:汪义东(1992—),男,本科,主要从事水文仪器的研发工作。E-mail: 512528536@qq.com

的难度。

## 1 雷达测距原理

在雷达测距系统中<sup>[1-2]</sup>,其基本概念是指电磁信号发射过程中被其发射路径上的物体阻挡进行的反射。FMCW 雷达系统所用信号的频率随时间变化呈线性升高,这种类型的信号也称为线性调频脉冲。

FMCW 雷达系统发射线性调频脉冲信号,并捕捉其发射路径中的物体反射的信号,该线性调频脉冲由发射天线(TX 天线)发射,物体对该线性调频脉冲的反射生成由接收天线(RX 天线)捕捉的反射线性调频脉冲,TX 信号和 RX 信号进入混频器(混频器是电子组件,将信号合并到一起生成一个具有新频率的新信号)生成中频(IF)信号。对于 2 个正弦输入可以写成以下方程:

$$x_1 = \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$x_2 = \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

输出 $x_{out}$ 有一个瞬时频率,等于 2 个输入正弦函数的瞬时频率之差,输出 $x_{out}$ 的相位等于 2 个输入信号的相位之差:

$$x_{out} = \sin((\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)) \quad (3)$$

计算 IF 信号的频率可以得到测量的距离,距离可以表示为

$$d = \frac{c f_0 T_c}{2B} \quad (4)$$

式中, $d$ 是与被检测物体的距离, $c$ 是光速, $f_0$ 是 IF 信号的频率。

在本方法中可以忽略 IF 信号的频率与物体速度的依赖关系,快速 FMCW 中,物体速度对其影响通常非常小,且在处理完成多普勒傅里叶变换后,即可对其进行进一步校正。

## 2 硬件结构设计

雷达水位计采用轻量化、小型化设计,雷达核心电路板固定在托架上,托架通过四周的定位孔安装在外壳中。整个外壳的壳体部分采用铝合金材料,从而减轻自身重量,顶部通过密封圈和塑料盖进行密封,达到防尘防水的效果。底部设有两个航空插头,一个引出电源和通信线,另一个引出调试线。壳体外部预留安装孔,可以加装二维万向节支架,以便调整雷达水位计水平角度。雷达水位计结构示意图如图 1 所示,其中 1 为铝合金外壳,2 为密

封圈,3 为 ABS 材质前盖,4 为雷达核心电路板,5 为雷达核心电路板托架。

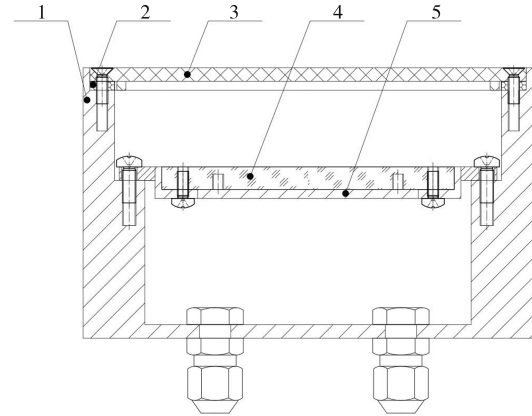


图1 雷达水位计结构示意图

### 2.1 77GHz 平面微带天线的设计

目前 77GHz 雷达在汽车方面应用较为广泛,技术成熟,国内外对汽车雷达天线及相关核心技术也进行了研究<sup>[3-6]</sup>。但是 77GHz 雷达在水文行业的应用相对匮乏,针对雷达水位计对雷达面积以及测量距离要求,设计了一款小尺寸、高增益的 77 GHz 平面微带天线。天线由一发一收两个  $10 \times 8$  的微带阵列单元组成,天线在水平方向和垂直方向都具有较高的增益和较低的波束宽度,E 面的 3 dB 波束宽度约为  $9^\circ$ ,H 面的 3 dB 波束宽度约为  $9^\circ$ ,增益为 24 dBi,满足雷达水位计的探测要求。平面微带天线示意图如图 2 所示。

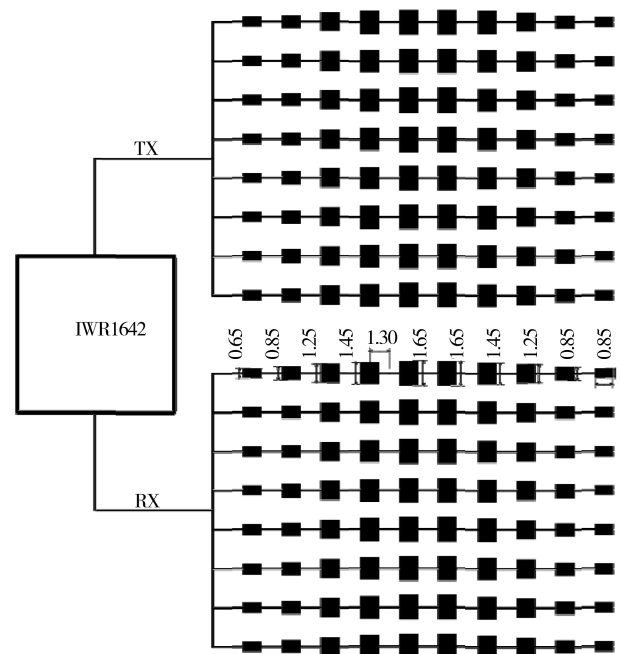


图2 平面微带天线示意图

天线由矩形贴片组成的串馈微带天线阵模型,

其中介质基板使用 TI 推荐的高频板材 Rogers4835, 板材厚度为 4 mil, 相对介电常数为 3.480。由于天线的馈电网络中的阻抗需要与毫米波传感器 IWR1642 要求的相匹配, 而阻抗匹配的过程复杂, 计算量较大, 在电路设计中过孔的阻抗相对于线路的阻抗更加难以控制, 因此馈电网络中不宜有过孔, 因此天线需要与毫米波传感器 IWR1642 布置在高频板材的同一面。

## 2.2 硬件电路设计

雷达水位计的硬件电路主要由毫米波传感器 IWR1642、超低功耗加速度传感器 iNEMO、电源管理系统 PMIC 以及 RS485 通讯接口组成, 雷达水位计结构框图如图 3 所示。

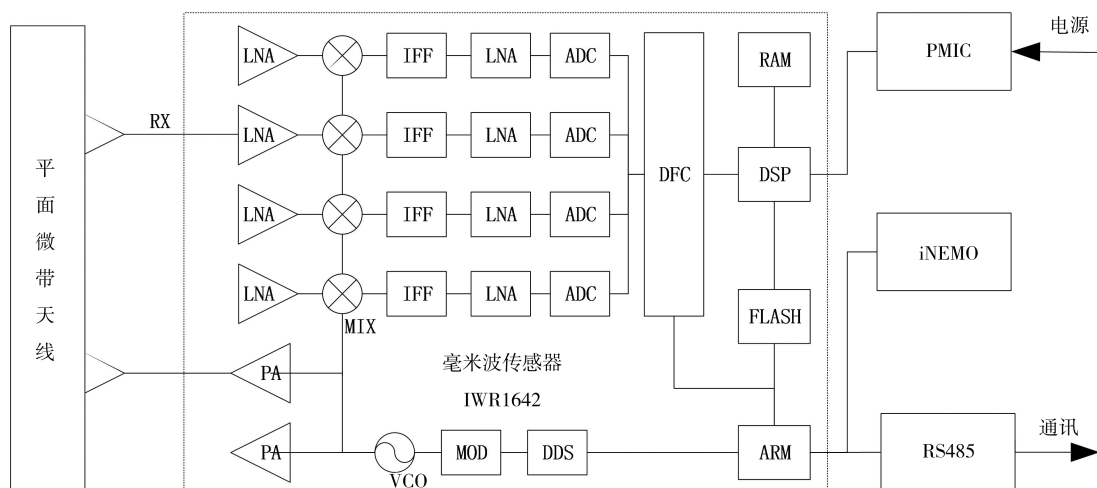


图3 雷达水位计结构框图

雷达水位计硬件电路的核心是毫米波传感器 IWR1642<sup>[7]</sup>, 是一款能够在 76 ~ 81 GHz 频带中运行且基于 FMCW 雷达技术的集成式单芯片毫米波传感器, 具有高达 4 GHz 的连续线性调频脉冲, 该传感器采用 TI 的低功耗 45 nm、RFCMOS 工艺进行构建, 并且在极小的封装中实现了前所未有的集成度, 有效解决了雷达模拟前端电路的复杂性。毫米波传感器包括整个毫米波射频前端和模拟基带信号链, 最多可用于 2 个发射器和 4 个接收器, 以及可编程的 MCU 和高速 DSP。毫米波传感器的射频/模拟前端包括三角波发生器 (DDS)、调制器 (MOD)、压控振荡器 (VCO)、功率放大器 (PA)、低噪声放大器 (LNA)、正交混频器 (MIX)、中频滤波器 (IFF)。

此外核心电路还集成了加速度传感器, 用于计算安装角度是否水平; 电源管理芯片, 用于具有过压、过流断电保护功能以及 RS485 通讯接口电路, 用于与外部设备通讯。

## 3 测距算法设计

距离测量的关键在于计算 IF 信号的频率, 根据式 (4) 推出距离, 再消除物体位移带来的微小误差。

根据数字信号处理的理论, 使用傅里叶变换求取 IF 信号的频率是实际信号频率的近似值, 在非同步采样时, 由于各次谐波分量并未能刚好落在频率的分辨点上, 而是落在各个频率分辨点之间, 实际测量的频率值大概率不会落在分辨点上, 因此就不能直接得到各次谐波分量的准确值, 而只能用临近的频率分辨点的值来近似替代, 这个就称之为 FFT 的“栅栏效应”。由于存在“栅栏效应”, 使得直接使用 FFT 所获得的频率因为有固定的采样间隔  $\Delta f$  而

产生  $\Delta f/2$  的测量误差。

为了解决上述问题, 本文采用增加窗函数的方式抑制傅里叶变换的频谱泄露, 设置带宽为 4 GHz, 单次发射持续时间为 40  $\mu$ s, 单次采样点数为 1024, 窗函数选择汉宁窗, 则理论上距离的分辨率可达到 3.75 cm。在水文仪器规范中, 雷达水位计的测量精度最低要求为 2 cm 以下, 因此需要在傅里叶变换的基础上使用选带傅里叶变换提高精度。

对于无限长序列, 可以增加采样点数  $N$ , 增加谱线数量, 提高频谱分辨率, 以削弱栅栏效应的影响, 而采集信号的长度会极大影响着运算速度, 为了在不增加分析数据长度的情况下提高分辨率, 本文采用在傅里叶变换的基础上使用选带傅里叶变换提高分辨率。使用选带傅里叶变换可以识别频谱的细微结构, 对感兴趣频段进行高分率分辨率的分析<sup>[8-9]</sup>。该算法对特征谐波所在局部频段进行细化, 细化倍数为  $D$ , 细化谱的频谱间隔  $\Delta f' = D\Delta f$  为全景谱频谱间隔的  $1/D$ , 频率分辨率提高了  $D$  倍。

具体步骤如下。

(1) 复调制移频: 将目标频带的中心频率移至频率轴的零点处。

(2) 低通滤波: 对移频后的信号进行低通滤波, 以滤除分析频段以外的高频信号。

(3) 抽取: 对信号进行系数为  $D$  的抽样, 即对时域上每  $D$  个序列点保留 1 个, 其余的序列点舍弃, 抽取后相当于采样率降低了  $D$  倍。

(4) 傅里叶变换频谱分析: 对抽取之后的时域信号进行傅里叶变换。

(5) 频率调整: 经过傅里叶变换得到的是以零频点为中心的一段频谱, 将其移至实际频率处方求出细化之后的真实频谱。

经过细化后的距离分辨率可达到毫米级别, 完全能够满足水文仪器规范的要求。

4 实验测试

将测试使用的雷达水位计样机安装在可移动的标尺轨道的一端, 标尺上固定一平面代替水面, 移动标尺模拟水位的变化, 使用激光测距仪测量的数据作为标准值。在 0 ~ 10 m 范围内, 按步进 50 cm 进行 3 次实验, 求得最大绝对值误差和平均值误差, 测试数据如表 1。

实验结果表明, 在 0 ~ 10 m 实验量程范围内, 最大误差和平均误差均小于 1 cm, 满足对水位实时测量的精度要求。

5 结 论

本文从非接触式雷达水位计的测量原理入手, 详细叙述了雷达水位计的硬件及软件, 基于测距算

表 1 步进 50 cm 测试结果 单位: cm

测试范围	实验 1	实验 2	实验 3	最大误差	平均误差
50.00	50.21	50.13	50.16	0.21	0.17
100.00	100.06	100.15	100.09	0.15	0.10
150.00	150.19	149.89	150.03	0.19	0.04
200.00	200.09	199.83	200.23	0.23	0.05
250.00	250.39	250.27	250.38	0.39	0.35
300.00	300.07	299.87	299.92	0.13	-0.05
350.00	349.96	350.11	350.22	0.22	0.10
400.00	399.79	399.98	400.06	0.21	-0.06
450.00	450.25	450.12	450.22	0.25	0.20
500.00	499.76	499.54	499.64	0.46	-0.35
550.00	550.70	550.40	550.40	0.64	0.55
600.00	600.23	600.31	600.38	0.38	0.31
650.00	649.87	649.93	650.08	0.13	-0.04
700.00	699.78	699.73	699.86	0.27	-0.21
750.00	750.19	750.26	750.32	0.32	0.26
800.00	800.21	800.24	800.33	0.33	0.26
850.00	849.77	849.90	849.86	0.23	-0.16
900.00	900.05	899.98	900.13	0.13	0.05
950.00	950.32	950.36	950.43	0.43	0.37
1000.00	1000.64	1000.74	1000.58	0.74	0.65

法提出在快速傅里叶变换的基础上使用选带傅里叶变换进行局部细化,提高差频测量精度,满足了水温测量规范要求。雷达水位计的测试样机尺寸小,质量轻,方便集成安装,但是河水表面情况复杂,再加上高频电磁波容易受到雨水的干扰,因此还需要在硬件和算法上做进一步提高和完善。

#### 参考文献:

- [1] SKOLNIK M I. 雷达系统导论 [M]. 左群生,译. 北京:电子工业出版社,2014:130-138.
- [2] MAHAFZA B R. 雷达系统分析与设计 [M]. 周万幸,译. 北京:电子工业出版社,2016:364-366.
- [3] JURGEN H, ERAY T, RAIK S, et al. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2012, 60(3):845-860.

- [4] VASANELLI C, BATRA R, SERIO A, et al. Assessment of a millimeter-wave antenna system for MIMO radar application [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16:1261-1264.
- [5] 张慧,余英瑞,徐俊,等. 77 GHz 车载毫米波中远距雷达天线阵列设计 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(10):48-51.
- [6] 严煜铭,廖成,周文君,等. 基于相位梯度超表面的高增益透镜天线设计 [J]. 电子元件与材料, 2019, 38(9):77-81.
- [7] Karthik Ramasubramanian Jasbir Singh. 利用 77 GHz 毫米波进行液位感测 [J]. 今日电子, 2017(8):42-45.
- [8] 冯志华,刘永斌,张健. 用在频谱细化中 Chirp-Z 变换的特性分析 [J]. 信号处理, 2006, 22(5):9.
- [9] 丁康,潘成灏,李巍华. ZFFT 与 Chirp-Z 变换细化选带的频谱分析对比 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(6):9-12.

(上接第 13 页)

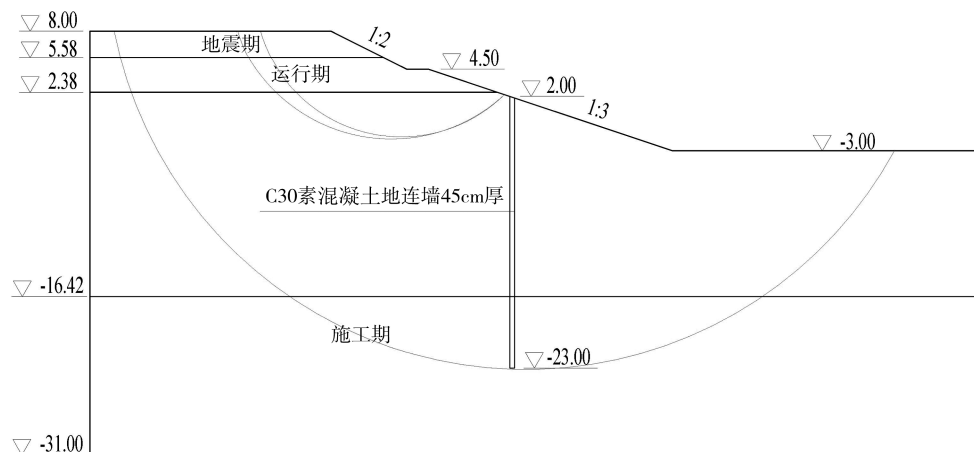


图 5 河道边坡稳定计算结果(地下连续墙,单位:m)

## 4 结 语

本文通过对新孟河延伸拓浚工程南延段河道工程中局部深厚淤泥质粉质黏土河段进行河道边坡抗滑措施研究分析,综合比选了水泥土搅拌桩、预制钢筋混凝土方桩与地下连续墙等河道边坡抗滑方案。通过综合分析,最终确定采用整体稳定性比较好、结构比较简单、施工技术成熟且造价最低的地下连续墙作为深厚淤泥质粉质黏土河段河道边坡抗滑措施。

#### 参考文献:

- [1] 古浩. 边坡稳定及抗滑桩加固研究 [D]. 南京:河海大学, 2006.

- [2] GB50286—2013, 堤防工程设计规范 [S].
- [3] 喻和平,田斌. 滑坡防治措施的现状和发展 [J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(2):104-107.
- [4] 王军,陈云敏,郝玉龙. 复合挡土结构在滑坡防治中的应用研究 [J]. 工程勘察, 2001(2):39-42.
- [5] 陈伟,王铁力,夏辉,等. 高灵敏土对河道整治边坡稳定的影响分析 [J]. 水利技术监督, 2018(2):116-119.
- [6] 朱彦鹏,王秀丽,狄生奎,等. 黄土边坡建筑的抗滑移设计 [J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(2):85-89.
- [7] 徐静,苏凯,苏叶平. 浅析梁垛河护岸工程设计方案比选 [J]. 江苏水利, 2019(1):7-11.
- [8] 余文畴,卢金友. 长江中下游河道整治和护岸工程实践与发展 [J]. 人民长江, 2002(33)8:15-17.