

高炉雷达料面测量信号处理系统改进

陈先中^{1,2)} 尹怡欣^{1,2)} 侯庆文^{1,2)} 李晓理^{1,2)} 马健^{1,2)} 王猛^{1,2)}

1) 北京科技大学信息工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083

通信作者, E-mail: cx@ustb.edu.cn

摘要 研制用于高温恶劣生产环境下新型冶金专用雷达. 采用改进的调频连续波测量原理, 提高了固体雷达料面测量的实时性. 提出一种新的智能时变阈值信号处理方法, 解决了因高炉内料面反射系数变化影响雷达测距精确性问题. 实验室模拟仿真固粉态料面测量表明, 该冶金雷达测量料面的跟踪延时在 0.2 s 以内, 最大跟踪测量平均误差控制在 0.05%. 现场测试结果表明, 测量平均误差 0.95%, 能够实时稳定地跟踪料面变化, 满足高炉监控需求.

关键词 高炉; 雷达; 料面测量仪; 信号处理

分类号 TM931

Improvement of a radar signal processing system for burden surface measurement in a blast furnace

CHEN Xianzhong²⁾, YN Yixin²⁾, HOU Qingwen²⁾, LIXiaoli²⁾, MA Jian²⁾, WANG Meng²⁾

1) School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Key Laboratory of the Ministry of Education of China for Advanced Control for Iron and Steel Process, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Corresponding author, E-mail: cx@ustb.edu.cn

ABSTRACT Metallurgical radar was developed which can be used in high temperature and harsh production environments. It adopted an improved frequency-modulated continuous wave principle and enhanced the real-time performance of solid material level measurement. An intelligent time-varying threshold signal processing method was proposed to solve the radar ranging accuracy problem caused by the change of solid material surface reflection coefficient in a blast furnace. Measurement results in a solid powder state material surface simulation environment in the laboratory shows that the measurement tracking delay of the metallurgical radar is within 0.2 s and the maximum average tracking error is less than 0.05%. Field test results show that the average measurement error is 0.95%, indicating that the metallurgical radar is capable of stable material surface tracking in real time and can meet the requirements of BF monitoring.

KEY WORDS blast furnaces; radar; level meters; signal processing

目前测距雷达按工作方式主要分为脉冲雷达和调频连续波 (frequency-modulated continuous wave, FMCW) 雷达^[1]. FMCW 雷达具有辐射功率小、测距精度高及设备集成小型化等众多特点, 在工业生产和民用自动化领域获得了广泛的应用^[2-3]. 冶金行业高炉生产中也已使用微波雷达进行料面测量试验, 但目前料面测量雷达均是国外产品. 由于上述

雷达不是冶金专用雷达, 普遍存在两个问题: 一是固体料面跟踪速度慢, 平均在 5 s 左右; 二是测量误差大, 一般在 3% ~ 5% 的范围内波动. 同时, 由于对高炉高温含尘变介电常数的料面特性缺乏了解, 测量稳定性极差, 经常因数据波动大而死机. 本文针对冶炼生产环境下, 高炉内部多粉尘、高温和高压给料面测量带来的问题, 改进了固体雷达测量和信号处

收稿日期: 2010-02-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划目标导向资助项目 (No. 2009AA04Z456); 东南大学毫米波国家重点实验室资助项目 (No. K200801); 北京市教委重点学科资助项目 (No. XK100080537)

理方法,提高了实时性和稳定性.研制的高炉雷达在宝钢不锈钢事业部 2号高炉获得了实际应用,为恶劣生产环境下稳定获取料面信息,提供了新的测量手段.

1 测量原理

1.1 基本原理^[1-4]

设发射信号为

$$V_T \sin(\omega t + \varphi) \tag{1}$$

则接收信号为

$$V_R \sin[\omega(t - \tau) + \varphi] \tag{2}$$

式中, V_T 为发射信号的幅值, V_R 为接受信号的幅值, ω 为信号的频率, τ 为微波的传输时间, φ 为发射信号的初相位.

将发射信号和接收信号进行混频:

$$V_T \sin(\omega t + \varphi) V_R \sin[\omega(t - \tau) + \varphi] = \frac{V_T V_R}{2} \left[\cos\left(2\pi \frac{2R}{C} f\right) - \cos(2\omega t + 2\varphi - \omega\tau) \right] \tag{3}$$

经过低通滤波保留低频信号:

$$\frac{V_T V_R}{2} \cos\left(2\pi \frac{2R}{C} f\right) \tag{4}$$

传统的低频信号分析方法如下:

$$\frac{V_T V_R}{2} \cos\left[2\pi \frac{2R}{C} f\right] = V' \cos\left[2\pi \frac{2R}{C} \left(f + \frac{B}{N}\right)\right] = V' \cos\left[2\pi \frac{R}{C} \frac{1}{(2B)N} f + \varphi_0\right] \tag{5}$$

式中, $V' = \frac{V_T V_R}{2}$ 为信号幅值, R 视为信号频率, $f = \frac{C}{2B}N$

视为采样频率 f_s 则式(5)就等价于

$$V' \cos\left[2\pi \frac{f}{f_s} f + \varphi_0\right] \tag{6}$$

对式(5)进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 则频谱间隔, 此处即为距离分辨率

$$\Delta R = \frac{C}{2B} \tag{7}$$

此分析方法存在的问题: 距离分辨率 ΔR 受制于调频带宽 B 而带宽 B 又受制于系统硬件. 当带宽 B 为 1 GHz 时, 距离分辨率 ΔR 仅为 0.15 m. 要想进一步提高距离分辨率, 则必须从硬件上进行改进, 代价非常高.

1.2 原理修正

针对传统分析方法的不足, 对滤波后的低频信号进一步修正, 式(4)中, 信号频率 f 可以进行如下变换:

$$f = f_0 + \frac{B}{N} i \quad (i = 0, 1, \dots, N-1) \tag{8}$$

式中: Δf 为频率步进; $i = 0, 1, \dots, N-1$ 为相应离散调频点.

将式(8)代入式(4), 则有

$$\frac{V_T V_R}{2} \cos\left[2\pi \frac{2R}{C} \left(f_0 + \frac{B}{N} i\right)\right] = V' \cos\left[2\pi \frac{2R}{C} \Delta f (i + \varphi_0)\right] \quad (i = 0, 1, \dots, N-1) \tag{9}$$

对式(9)作进一步变换可得

$$V' \cos\left[2\pi \frac{2R}{C} \Delta f (i + \varphi_0)\right] \tag{10}$$

式中, $\frac{2R}{C} \Delta f$ 为信号频率, f_s 为采样率.

对此信号进行 FFT 可得信号频率:

$$f = \frac{i}{N} f_s \tag{11}$$

式中, i 为峰值谱线号, N 为 FFT 的长度.

由式(10)可知

$$f = \frac{2R}{C} \Delta f f_s \tag{12}$$

结合式(11)和(12), 可得

$$R = \frac{i}{2N\Delta f} f_s \tag{13}$$

只要找出正确的峰值谱线号 i , 就可以求出相应的距离 R . 由(13)式可知, 距离 R 只取决于光速 C 、采样长度 N 和扫频步进 Δf .

同时由式(13)可知, 距离分辨率为

$$\Delta R = \frac{C}{2N\Delta f} \tag{14}$$

此修正分析结果相比于传统结果, 揭示了影响距离分辨率的本质. 由式(14)可以看出, $N\Delta f = B$ 一定的情况下, 距离分辨率为定值, 可以通过调节 N 、 Δf 的分配来满足不同的实时性要求. 表 1 列出了三种常用采样长度下运算所需时间 (单位为数字信号处理 (digital signal processing, DSP) 指令周期), 其中调频采样时间包括调频控制时间、采样等待和转换时间, FFT 时间主要为算法用时.

由表 1 可以看出, 调频采样时间跟采样长度成正比; 比较 256 点与 1024 点采样, 由于 FFT 按照 DIT (decimation in time, 按时间抽取) 蝶形算法进行优化, 所以 FFT 的用时基本相同, 但调频和采样节约的时间较多, 经过计算可见其总时间节约了 74.1%. 从测量方法上提高了系统的实时性. 但是, 考虑到实际测量环境中高炉料面的缓变特征, 以及数字信号处理中间计算过程的精度损失, 结合 1024 点一次测量所用时间为 47.788 ms, 能够满足系统实时性的要求, 所以本文最终采样长度采用 1024 点.

表 1 不同采样长度用时对比

Table 1 Time consuming comparison of different sampling lengths

采样长度	时间 / (DSP指令周期)		
	调频采样	FFT	总时间
256	1759771	98 117	1857888
512	3519515	108 505	3628020
1024	7039003	129 330	7168333

2 复杂工况下的综合信号处理方法

FM CW 雷达非常适合短距离精确测量, 具有高的距离分辨能力和测量精度. 然而, 由式 (14) 可知, 当采样点数 N 为 1024 频率步进 Δf 为 1 MHz 时, 相应的距离分辨率 ΔR 约为 0.146 m, 此分辨率不能满足高精度测量的要求. 传统雷达信号处理方法^[5]是采样滤波以后利用 FFT 得到信号频谱, 然后利用各种频谱校正方法^[6-9]求得信号的真实频率, 从而算出相应的距离.

本文针对高炉生产环境进行研究, 被测料面由铁矿石和焦炭组成, 其料面坑洼不平, 反射系数比较低, 回波信号中包含了大量干扰. 同时, 由于高炉的特殊性, 雷达的安装位置不能任意选定, 炉体内的十字测温架也可能成为一个很大的干扰源, 由于信号未达到料面之前就会有很大一部分能量直接被十字测温架反射, 故在差频信号中体现出一个很强的低频干扰, 如果不作处理, 会淹没真实信号. 其次, 高炉生产过程中, 不断的布料、喷水等工艺过程会使得炉体内充满粉尘、水蒸气等气液固三态混合物, 这些混合物对雷达信号的吸收、散射等也会加剧信号的恶化.

回波信号与发射信号混频后得到原始差频信号, 再通过低通滤波器 (low-pass filter, LPF) 滤除高频干扰, 就可以得到式 (4) 低频信号. 然而, 此低频信号还包含大量干扰, 需要进行进一步处理. 由于是针对真实的工况进行研究, 被测环境的一些参数已知, 利用这些已知参数对信号进行预处理优化, 会大大提高信号质量, 降低后续处理的难度. 真实的高炉测量环境中, 距离雷达大约 6 m 的地方是十字测温架, 而高炉料面一般在十字测温架 1 m 以下, 即雷达安装位置距离料面约为 7 m 左右. 考虑到雷达的通用性以及软件相对于硬件改动较为容易, 在设计预处理模拟滤波器时, 并没有把 6 m 以内的信号全部滤除, 而只是滤除测量中几乎不可能出现的低频干扰——对应于 50 cm 以内的信号, 其他频段的信号则使用数字信号处理技术处理.

2.1 模拟信号处理

实际情况下, 各种噪声以及雷达器件本身的反射都会混杂在回波信号中, 使得回波信号频谱中出现多个波峰, 并且在低频段会出现一段幅值较高呈递减趋势的信号, 称为 Rn 现象^[10]. 这些低频干扰都可以通过图 1 所示高通滤波器滤除. 信号经过高通滤波器 (High-Pass Filter, HPF) 后幅值比较低, 使用图 2 放大和滤波电路滤除高频噪声.

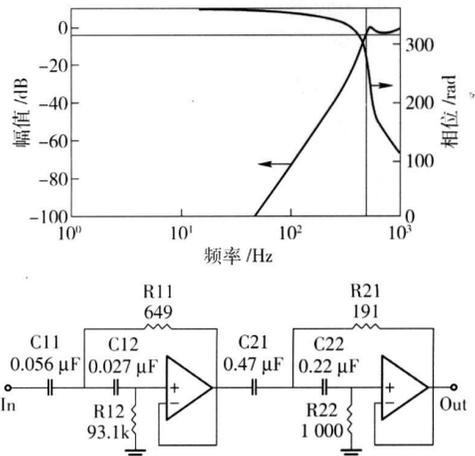


图 1 高通滤波器的 PSPICE 仿真结果及电路图

Fig 1 PSPICE simulation result and circuit of a high-pass filter

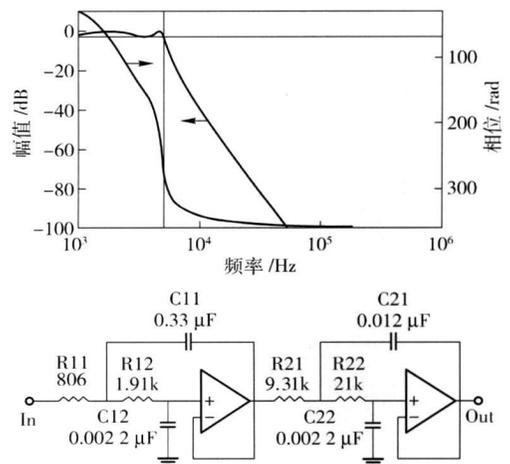


图 2 低通滤波器的 PSPICE 仿真结果及电路图

Fig 2 PSPICE simulation result and circuit of a low-pass filter

2.2 数字信号处理

差频信号经模拟滤波器后进行模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 采样及数字信号处理. 设置采样点数 N 为 1024 频率步进为 1.6 MHz, 则频率分辨率 ΔR 约为 0.092 m. 这样的分辨率还不能满足高炉生产的要求, 必须使用频谱校正技术进行校正.

高炉实际测量最近距离约为 7 m, 最远距离一般不超过 15 m, 所以试验中预设 FIR (finite impulse response, 有限冲激响应) 滤波器, 其带通上下截止频率分别对应 6 m 和 15 m. 对于滤波器的要求是过渡带越窄, 阻带衰减越大越好. 然而, 过渡带、阻带的高要求会给实时性带来影响. 另外, FIR 滤波器采用窗函数设计, 不同的窗函数设计出来的滤波器性能也不一样. 试验中综合比较了利用 Hamming 窗和 Hann 窗设计的 50 阶和 100 阶 FIR 滤波器的效果, 结果如图 3 所示.

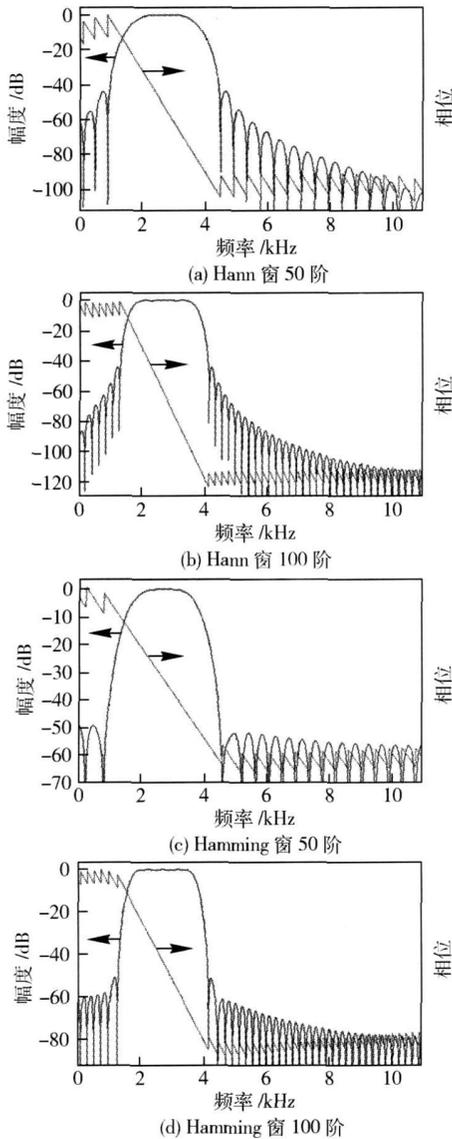


图 3 不同滤波器特性对比

Fig. 3 Characteristics comparison of different filters

由图 3 可知, Hamming 窗的旁瓣衰减明显优于 Hann 窗. 100 阶滤波器的过渡带明显好于 50 阶, 但 100 阶的计算量比 50 阶大, 这会影响系统实时性. 实际采用美国 T 公司 DSP28335 数字信号处理器,

主频 150 MHz, 50 阶滤波器耗时 0.868 ms, 100 阶耗时 1.210 ms, 100 阶滤波器能满足实时性的要求, 最终选用 Hamming 窗 100 阶 FIR 滤波器.

FIR 滤波器只能滤除 6 ~ 15 m 以外的干扰 (如十字测温造成的干扰). 对于 6 ~ 15 m 内的干扰却无能为力. 高炉内复杂恶劣的环境会带来各种各样的干扰, 反映在频谱中就是全频段都有噪声, 这就大大降低了信噪比, 给快速傅里叶变换后的寻峰带来极大干扰, 影响了系统稳定性. 为提高测量结果的稳定性, 本文采用了以智能时变阈值 (time varying threshold TVT) 方法, 结合混合信号滤波方法, 流程图如图 4 所示.

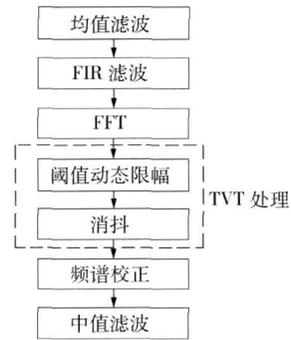


图 4 数字信号处理流程

Fig. 4 Flow chart of digital signal processing

(1) 均值滤波: DSP28335 的片内外设带有 12 位 16 通道模数转换器, 多通道同时采样提高了信号采样速度; 另外, 多通道采样能一定程度上滤除脉冲干扰.

(2) 智能时变阈值处理方法包括阈值动态限幅和消抖: 频率寻峰过程中, 首先系统进行测量初期的学习过程, 凭经验确定一个合适的曲线, 曲线形状为基于雷达回波信号平均噪声之上的一个阈值范围, 一般取噪声能量的 150% 为阈值动态曲线. 如果动态限幅测量有效值的次数超过 5% 则进行阈值调整, 阈值曲线下移或上移. 另外设置有效峰值谱线号在频域的最大偏差计数器, 如果偏差超过阈值则计数器加 1, 如果计数器超过初设的上限阈值则做进一步处理; 同样此偏差计数器也是可调的. 偏差计数器在 1 h 内进行清零, 系统在需要时进行偏差计数器阈值的调整, 可有效去除短时煤气流等干扰信号的波动, 增强系统稳定性.

(3) 频谱校正: 采用比值法对快速傅里叶变换的结果进行校正, 得到的谱线号, 在实验室环境下, 系统精度可以达到毫米级, 最大误差低于 3 mm.

(4) 中位值平均滤波: 为防止频率寻峰的最终

结果受到脉冲干扰, 最大程度的提高系统稳定性, 将一定次数 N 的寻峰结果归为一组, 去掉这组峰值中的最大和最小值, 然后计算 $N-2$ 个数据的算术平均值.

由于采用上述混合滤波, 测量周期延长. 测试结果表明, 完成一次测量耗时约 20 ms , 作中位滤波时, 如果 N 取 10 则最终测量周期约为 0.2 s , 可满足高炉生产实时性需求.

3 试验结果

3.1 模拟试验

实验室模拟固粉态料面测量, 采用固体焦炭和煤粉做实验. 信号经过上述滤波处理后, 频谱如图 5 所示. 正确找到峰值后, 再经过比值法对频谱校正得出实际信号频率, 从而得到对应的真实距离.

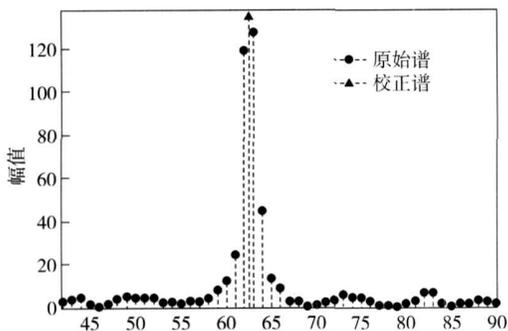


图 5 采样信号频谱及校正

Fig 5 Original spectrum and correction spectrum of the sampled signal

为验证上述信号处理技术的稳定性, 对同一对象进行多次测量, 其结果如图 6 所示. 由图 6 可见, 多次测量最大偏差接近 3 mm , 精度达到 0.05% ; 测量结果的波动在毫米级, 稳定性达到设计要求.

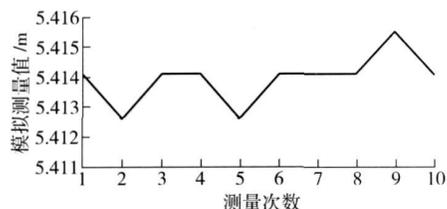


图 6 同一对象多次测量结果

Fig 6 Repeated measurement results of the same target

3.2 现场测试

在宝钢进行了生产环境下高炉料面的实际测量. 该高炉容积 2500 m^3 . 图 7 为本文研制的冶金专用雷达实物图, 图 8 为测试环境. 图 8 的测试环境

为高炉休风时套筒内看到的生产时炉料的真实状态, 其中套筒内部黑色的横杠为十字测温.



图 7 现场安装雷达

Fig 7 Field installed radar

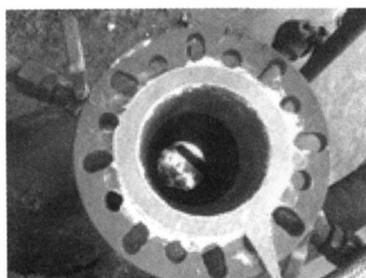


图 8 雷达安装环境

Fig 8 Radar installation environment

图 9 为现场测量数据. 由图可见在稳态连续多次测量后, 最大数据偏差小于 0.1 m , 平均误差为 0.95% .

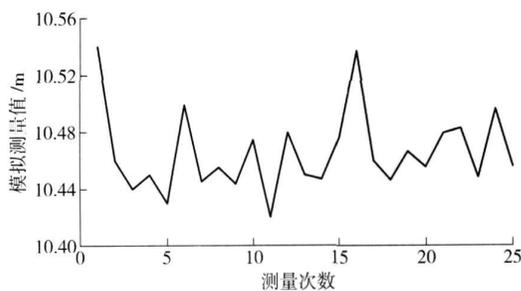


图 9 现场测试结果

Fig 9 Field test results

4 结语

EMCW 雷达在料面测量中有其独特的优势, 然而生产过程中的高炉内部环境恶劣, 对雷达测距干扰极大, 普通 EMCW 雷达在这样的环境下很难稳定工作. 本文通过理论和实践研究了提高雷达测距稳定性和实时性; 使用笔者研制的专用冶金雷达进行了现场测试, 从测量结果来看, 精度和稳定性较好地满足了高炉生产的需要.

参 考 文 献

- [1] Stove A G. Linear FMCW radar techniques. *IEE Proc F*, 1992, 139(5): 343
- [2] Graham S W, Douglas L M, Michael V M. A high accuracy microwave ranging system for industrial applications. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1993, 42(4): 812
- [3] Sai B, Kastelein B. Advanced high precision radar gauge for industrial applications//CIE ' 06 International Conference. Shanghai, 2006. 1
- [4] Eugén H, Kim S D, Chih P, et al. Automotive FMCW radar with adaptive range resolution//2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking. Sanya, 2008. 130
- [5] Carr A E, Cuñbert L G, Oliver A D. Digital signal processing for target detection FMCW radar. *IEE Proc F*, 1981, 128(5): 331
- [6] Xie M, Ding K. A new rectifying technique of discrete spectrum analysis. *J Chongqing Univ Nat Sci Ed*, 1995, 18(2): 47
(谢明, 丁康. 离散频谱分析的一种新校正方法. 重庆大学学报: 自然科学版, 1995, 18(2): 47)
- [7] Ding K, Xie M. Error analysis for amplitude correction method using convolution of three points in discrete spectrum. *J Vib Eng*, 1996, 9(1): 92
(丁康, 谢明. 离散频谱三点卷积幅值修正法的误差分析. 振动工程学报, 1996, 9(1): 92)
- [8] Ko H H, Cheng K W, Su H J. Range resolution improvement for FMCW radars//Proceedings of the 5th European Radar Conference. Amsterdam, 2008. 352
- [9] Liang H Q, He Z Q. Study on signal processing of FMCW ground penetrating radar//2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Zhangjiajie, 2009. 528
- [10] Daigle F. Method for Recursive Echo Processing in Time of Flight or Level Measurement System. USA Patent: 7054227 B2. 2006-05-30