

基于先验信息的低信噪比调频连续波雷达信号处理

侯庆文^{1,2)}✉, 胥志激^{1,2)}, 鲁亿方¹⁾

1) 北京科技大学自动化学院,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: houqw@ustb.edu.cn

摘要 针对恶劣测量条件下宽频带低信噪比调频连续波雷达信号距离模糊问题,建立了固态料面调频连续波雷达信号模型,并提出了以先验信息为辅助,包含信号频域预处理、频带截取及频带能量加权的距离反演方法.实际数据处理结果显示:经过预处理的信号频谱平均信噪比由原来的-5.55 dB 提高到 8.32 dB;采用包络线截频带法和最小二乘截频带法进行距离反演后拟合料线与实际料线间的料形相似度由 0.46 分别提高到 0.71 和 0.79.

关键词 雷达; 先验信息; 信噪比; 处理算法; 距离测量
分类号 TM931

Low SNR FMCW signal processing with prior information

HOU Qing-wen^{1,2)}✉, XU Zhi-wei^{1,2)}, LU Yi-fang¹⁾

1) School of Automation & Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Key Laboratory of Advanced Control for Iron and Steel Process (Ministry of Education), Beijing 100083, China
✉ Corresponding author, E-mail: houqw@ustb.edu.cn

ABSTRACT A solid surface frequency modulated continuous wave (FMCW) radar signal model was built to solve the range ambiguity problem of wideband and low signal-to-noise ratio (SNR) FMCW signal under severe measurement conditions. Based on prior information, a distance inversion method was proposed, which contained signal pretreatment, band intercepting, and energy weighting. Actual data processing results show that the SNR of the frequency spectrum rises from -5.55 to 8.32 dB after pretreatment. The index of similarity of the stock level shape increases from 0.46 to 0.71 and 0.79 by band envelope interception and least squares interception, respectively.

KEY WORDS radar; prior information; signal-to-noise ratio; processing algorithm; distance measurement

密闭容器内料面高度及其形状,一直是工业生产过程中的重要参数.由于微波对于物料表面的凹凸敏感,具有不受温度、粉尘、气体和压力影响的优点,在恶劣环境下能够检测出准确的距离信息^[1].近年来调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)雷达在工业生产和民用自动化领域获得了广泛的应用,也被利用到高炉料面的高度测量和料面成像.

依据雷达排布和信号处理方法的不同,料面成像大体有以下两类方法:第一类是对多个雷达的回波数据进行联合处理,在二维傅里叶变换的基础上进行插

值,由二维孔径合成得到三维图像;第二类是对每个雷达的回波数据进行单独处理,得到每个雷达对应的高度信息,然后根据这些高度值由点及面,得到整个料面的近似形状.第一类方法多适用于规则排布的阵列雷达,成像结果较为准确,但成像原理较为复杂,运算时间较长;第二类方法多适用于不规则排布的单点雷达,成像原理较为简单,运算时间较短,但由于料面形状仅来源于有限个点的拟合,所以成像结果不够准确.

作为第一类方法的代表,采用 MIMO 技术的雷达成像系统^[2]给天线布阵方式和信号模式都带来了很大

的灵活性,但同时也增加了系统实现和信号处理的复杂度.此外,相比于阵列雷达,单点雷达的体积较小,在某些工业场合(如高炉)更满足生产和安全的需要.但是,在根据点数据重构料面的过程中,由于测量环境的影响,表征距离的点数据通常伴有噪声,其可信度具有不确定性.刘信恩等^[3]结合高斯过程响应面模型和蒙特卡罗方法,基于输入变量已知的概率分布使用拉丁超立方设计来选择可信数据.徐守乾和朱延娟^[4]针对点云信息量少造成的重构困难,按照稀疏点云自身特征进行分块,引入迭代、渐进的思想来弥补部分数据的缺失.李乐庆和康宝生^[5]利用径向基函数(radial basis functions, RBF)神经网络,采用相关系数来自动确定网络隐含层核函数半径,对散乱点曲面进行重构.Ohtake等^[6]结合自适应分区近似和最小二乘RBF拟合得到高质量的重构曲面.Biggers和Keyser^[7]针对复杂噪声环境,采用已知数据模型等先验知识进行预测、迭代识别和构建,得到高质量的拟合表面.

本文针对第二类成像方法中料面拟合不够准确的问题,结合先验信息进行校正.依据高炉布料经验和以前的基础^[8],基于实际高炉溜槽布料方式,利用先验信息进行距离点数据的辨识、统计和优化.

1 固态料面 FMCW 信号模型

如图1所示,设坐落于高度 h 的雷达发射微波至曲面 $z=f(x,y)$,入射角为 θ ,照射范围为 D .

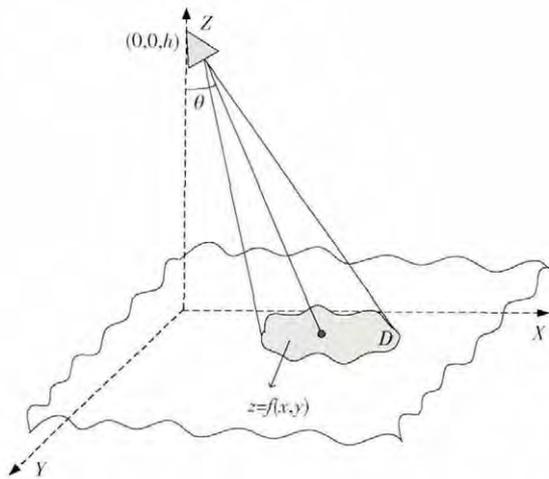


图1 雷达照射固态料面

Fig.1 Sketch map of radar's irradiating on a tough surface

单独的散射点距天线 R_i ,采用步进式调频,起始频率 f_0 ,步距 Δf ,发射和回波信号强度分别为 V_T 和 V_R ,接收信号强度由入射信号强度、天线方向图、散射系数、天线张角和入射角度共同决定.发射信号与回波混频后 t 时刻信号幅值为

$$v_i(t) = \frac{1}{2} V_T V_R \cos \left[\frac{4\pi}{c} (\Delta f \cdot f_s \cdot t + f_0) R_i \right]. \quad (1)$$

式中 c 为光速, f_s 为采样频率.对于整个雷达照射区域 D ,发射信号与回波混频后的差频信号为

$$v(t) = \frac{1}{2} V_T V_R \int_{\Sigma} \cos \left[\frac{4\pi}{c} (\Delta f \cdot f_s \cdot t + f_0) \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2} \right] dD = \frac{1}{2} V_T V_R \int_{\Sigma} \cos \left[\frac{4\pi}{c} (\Delta f \cdot f_s \cdot t + f_0) \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + (f(x,y) - h)^2} \right] dD. \quad (2)$$

令

$$F = \cos \left[\frac{4\pi}{c} (\Delta f \cdot f_s \cdot t + f_0) \sqrt{x^2 + y^2 + (f(x,y) - h)^2} \right],$$

则

$$v(t) = \frac{1}{2} V_T V_R \iint_D F(x,y,f(x,y)) \sqrt{1 + F_x^2 + F_y^2} dx dy. \quad (3)$$

当 $\theta > 30^\circ$ 时,受到漫反射后向散射的影响,回波强度远远小于小入射角时的强度.此外,由于大角度入射,导致雷达在同样的照射角下,所照射到的区域增大,总体频谱呈现频带宽且强度小的特征.在实际测量环境中,由于噪声等干扰成因复杂且较明显,最终导致大角度入射情况下,频谱呈现低信噪比、宽频带且距离信息模糊.

基于多组数据联合分析料面反演,可以依据入射角 θ 、信噪比 R_{SN} 和信号最大能量 a ,建立三组模型对信号归类.

模型 A:

$$\begin{cases} a \leq \bar{A} \text{ 或 } R_{SN} \leq \bar{R}_{SN}, \\ \theta > 30^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

模型 B:

$$\begin{cases} a > \bar{A} \\ R_{SN} > \bar{R}_{SN} \text{ 或 } \begin{cases} a < \bar{A} \\ R_{SN} < \bar{R}_{SN}. \end{cases} \\ \theta > 30^\circ \end{cases} \quad (5)$$

模型 C:

$$\begin{cases} a \geq \bar{A} \text{ 或 } R_{SN} \geq \bar{R}_{SN} \\ \theta \leq 30^\circ \end{cases}. \quad (6)$$

式中 \bar{R}_{SN} 为数据平均信噪比, \bar{A} 为信号平均最大能量.

由定义公式可知,以上三种模型数据的可信度为 $A < B < C$.数据联合分析时反演料线/面时,若遇到奇异数据,需结合其可信度进行分析及原因排查.

2 基于先验信息的大角度低信噪比信号处理

为了改善低信噪比且对于固体料面测量时出现的频谱连续多峰导致的距离模糊问题,提出了基于先验信息的包含信号预处理去噪和基于能量重心思想去模糊的中心距离求取过程的信号处理反演方法.

在对实际信号的处理中,利用先验信息进行数据

的辨识、统计和优化: 依据高炉的容积和布料经验, 可判断出距离的大致范围, 对实际料面回波信号进行辨识; 基于实际高炉溜槽布料方式和规律, 料面形状关于中心基本对称, 对于处理结果不确定的点, 可以结合与其对称的可信数据进行优化; 高炉料面虽粗糙不平, 但其在每一个小区域内变化平缓, 若遇到奇异点, 进行剔除。

2.1 信号预处理

在实际测量中, 有效频带所在范围随着测量距离的不同而改变, 然而背景噪声遍布包括有效信号所在频段的整个频率轴, 无法用数字滤波器滤除。基于先验信息辨识实际目标回波, 将背景噪声分频段求取, 背景噪声在某一频段的值可利用在本频段无有效料面回波的数组进行联合估算。假设共测量 N 组数据, 作 1024 点快速傅里叶变换 (FFT)。

将 N 组数据的频谱合成一个 $N \times 512$ 的矩阵 S 。

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,512} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,512} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{N,1} & S_{N,2} & \cdots & S_{N,512} \end{bmatrix} \quad (7)$$

所有数据对应距离分布在 $R_{\min} \sim R_{\max}$ 内, 令

$$R_1 = R_{\min} + \frac{R_{\max} - R_{\min}}{3},$$

$$R_2 = R_{\min} + \frac{2(R_{\max} - R_{\min})}{3},$$

距离 R_{\min} 、 R_1 、 R_2 和 R_{\max} 在频谱上分别对应谱线 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 。寻找元素个数分别为 n_1 、 n_2 和 n_3 的数组集 N_1 、 N_2 和 N_3 , 使其包含的数组分别在距离段 $R_{\min} \sim R_1$ 、 $R_1 \sim R_2$ 和 $R_2 \sim R_{\max}$ 内无有效料面回波而只存在背景噪声, 则噪声谱可由下式求得:

$$\text{Noise}(j) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N S_{i,j}}{N}, & j \in [1, L_1] \cup [L_4, 512]; \\ \frac{\sum_{i=1}^{n_1} S_{N_1(i,j)}}{n_1}, & j \in (L_1, L_2); \\ \frac{\sum_{i=1}^{n_2} S_{N_2(i,j)}}{n_2}, & j \in [L_2, L_3]; \\ \frac{\sum_{i=1}^{n_3} S_{N_3(i,j)}}{n_3}, & j \in [L_3, L_4]. \end{cases} \quad (8)$$

经过预处理后的第 i 组数据信号谱可以表示为

$$s_i(j) = \begin{cases} S_{i,j} - \text{Noise}(j), & S_{i,j} > \text{Noise}(j); \\ 0, & S_{i,j} \leq \text{Noise}(j). \end{cases} \quad (9)$$

式中 j 为谱线号, $1 \leq j \leq 512$ 。

2.2 频谱细化及截取

对于传统距离反演方法, FFT 谱的频率分辨率较低, 为 f_s/N (f_s 为信号采样率), 而线性调频 Z 变换 (Chirp-Z transform, CZT) 适合于对局部窄带频谱进行细化分析, 可以有效地提高精度^[9]。

信号频谱呈现杂乱多峰, 宽频带等特性, 通过对频谱进行截取, 得到含有有效距离信息的频带, 可以充分利用到整体信息, 具有更准确的优势。利用对 CZT 谱作包络线或最小二乘拟合曲线有助于频带的截取: 包络线法通过连接各峰值极值点, 可以得到曲线变化较主导、突出的特征; 最小二乘拟合法可以得到与原 CZT 谱之间误差最小的平滑曲线, 结合了所有的点信息, 反映曲线的高低及变化趋势。

包络线作法: 寻找 CZT 谱上所有的峰值及其对应频率, 运用三次样条插值法对这些点进行插值, 连成包络线。最小二乘曲线作法: 对给定数据点 $\{(f_i, A_i)\}$ ($i=0, 1, \dots, m$) 在取定的函数类 ϕ 中, 求 $p(x) \in \phi$, 使误差的平方和 E^2 最小, $E^2 = \sum [p(f_i) - A]^2$ 。

在曲线上所有点中寻找满足以下条件的两个点作为频带的左右两端, 令其坐标分别为 $(f(i), a(i))$ 和 $(f(j), a(j))$ 。设曲线谱峰坐标为 $(f(n_0), a(n_0))$, 则:

$$\begin{cases} f(i) < f(n_0); \\ f(i) \leq \forall f(k), i-3 \leq k \leq i+3; \\ a(i) \leq 0.2a(n_0). \end{cases} \quad (10)$$

在满足上述条件的点中取频率最接近 $f(n_0)$ 的为频带左端。同理可得频带右侧。

2.3 能量加权求距

针对宽频带频谱造成中心距离模糊的问题, 可以采用在截取后的频带上进行能量加权的方法进行去模糊, 中心频率计算式如下:

$$f_0 = \frac{\sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} A_i^2 f_i}{\sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} A_i^2} \quad (11)$$

式中 A_i 为 CZT 谱上点幅值强度, n_{\min} 为 CZT 谱上距离左频带端最近点频率对应谱线号, n_{\max} 为 CZT 谱上距离右频带端最近点频率对应谱线号, f_i 为 CZT 谱上截取频带内各点对应频率。

由 FMCW 工作原理^[10-14] 可得公式:

$$f = \frac{2R}{c} \cdot \Delta f \cdot f_s \quad (12)$$

因此, 可得中心距离 R_0 为

$$R_0 = f_0 \frac{C}{2f_s \cdot \Delta f} = \frac{C \sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} A_i^2 f_i}{2f_s \cdot \Delta f \sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} A_i^2} \quad (13)$$

基于以上分析,图2即为针对宽频带低信噪比信号的距离信息反演流程.

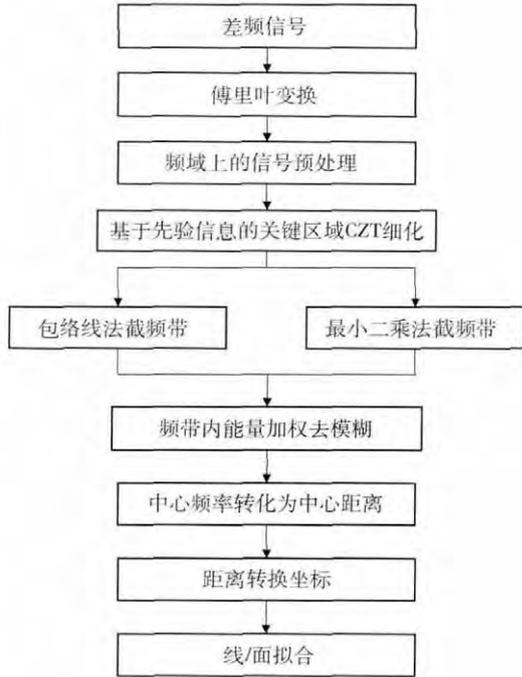


图2 距离信息反演流程图

Fig.2 Flow chat of distance inversion

由反演方法本身可知,相较于FFT法,采用包络线法及最小二乘法截取频带后求中心频率的方法具有分辨率更高的优势.且由于是在一定频段上按照能量加权,使得测量固体料位时出现的多个谱峰信息全部被利用,而加权时采用的能量法有效地增加和强调频谱峰值大的地方在计算中心频率时所占权重.相较于包络线法,最小二乘法截取频带更宽,最终得到的曲线更平滑.

3 实测信号处理结果

测量环境如图3所示,起始角度 65° ,入射角每减小 1° 测量一次,共测量60组数据.基于实际高炉溜槽布料方式和规律,由先验信息可知,料面形状关于中心大致对称.对于模型A,由于大入射角导致后向散射

系数小,会造成信号强度减弱,甚至炉壁反射影响,不利于频谱分析,此时可利用料面基本对称的优势,结合与其位置对称的点高度进行联合分析.

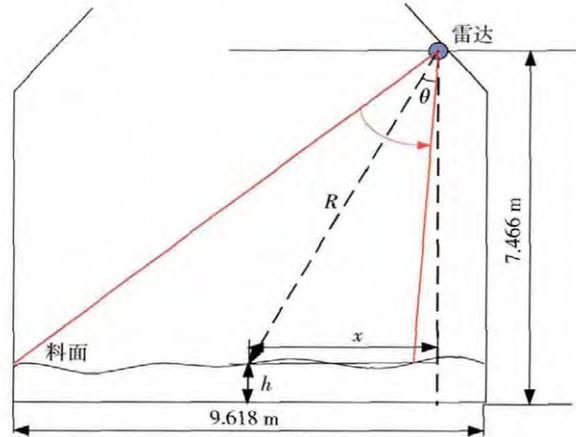


图3 测量示意图

Fig.3 Test condition of FMCW signal data

对于第 N 组数据($1 \leq N \leq 60$):

$$\begin{cases} \theta = 66 - N, \\ x = R \sin \frac{\theta\pi}{180}, \\ h = 7.466 - R \cos \frac{\theta\pi}{180}. \end{cases} \quad (14)$$

3.1 预处理

除2 m和25 m处的固定干扰以外,模型A频谱上显示,在11~13 m处存在两个信号回波谱.这是由于入射角较大,微波入射到料面边缘与炉壁交界附近,存在炉壁反射.其中大部分入射波经后向散射直接反射,小部分通过料面反射到炉壁再由接收模块接收,期间使得距离增大,造成频谱可见两个谱峰,左侧的谱峰表征实际距离.数据中亦存在炉壁反射过强,实际料面回波微弱无法分辨的情形,这一类点需结合先验知识及相邻数据共同分析,最后剔除.三种模型的信号原始频谱如图4所示.三种模型的信号经预处理去除背景噪声后的信号频谱如图5所示,表1为入射角度及处理前后的信噪比.

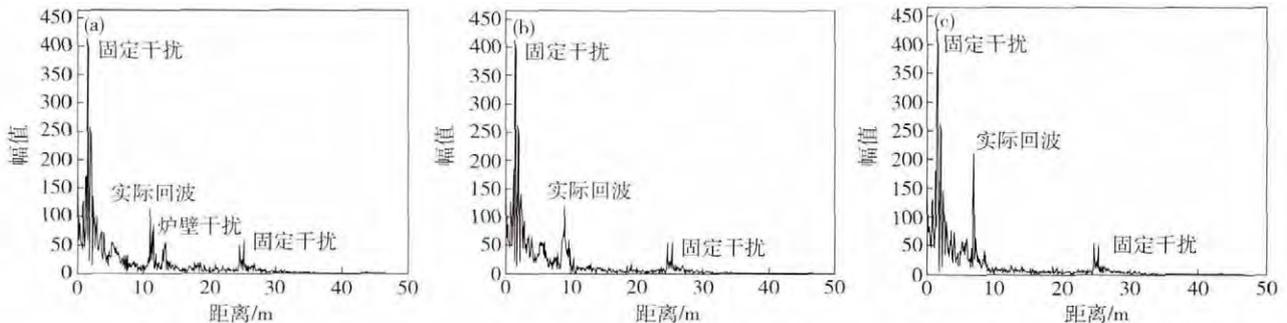


图4 三种模型原始频谱. (a) 模型A; (b) 模型B; (c) 模型C

Fig.4 Original spectra of three models: (a) Model A; (b) Model B; (c) Model C

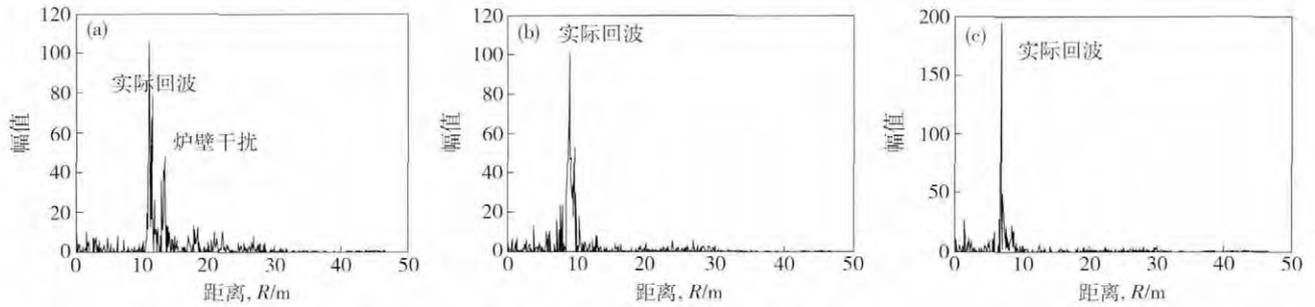


图 5 预处理后频谱. (a) 模型 A; (b) 模型 B; (c) 模型 C

Fig. 5 Spectra after signal pretreatment: (a) Model A; (b) Model B; (c) Model C

表 1 三组信号入射角及信噪比

Table 1 Incident angle and SNR of signals

模型	入射角/(°)	原始信噪比/dB	预处理后信噪比/dB
模型 A	62	-7.4035	3.6371
模型 B	39	-4.9204	12.3996
模型 C	9	-3.4556	7.2781

图 6 为所有信号预处理前后信噪比对比图. 其中信噪比最低的五组数据(6~10组, 对应入射角 $56^{\circ} \sim 60^{\circ}$)是由于炉壁反射过于强烈导致的实际信号被湮没而无法识别. 将该五组数据剔除, 预处理前平均信噪比为 -5.5544 dB, 预处理后平均信噪比为 8.3238 dB.

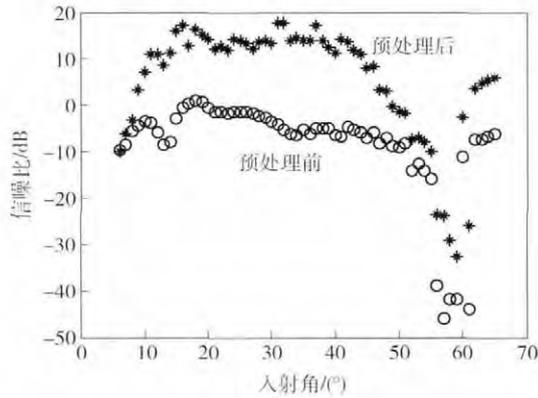


图 6 预处理前后信噪比对比

Fig. 6 SNR comparison before and after pretreating

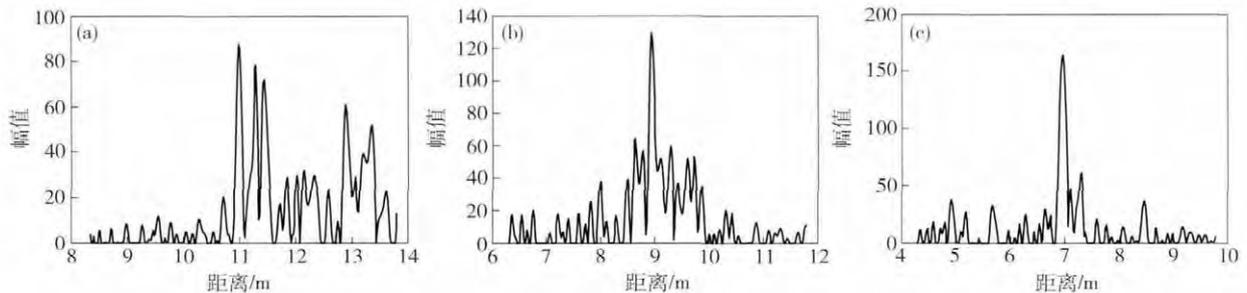


图 7 CZT 细化谱对比. (a) 模型 A; (b) 模型 B; (c) 模型 C

Fig. 7 CZT spectrum contrast: (a) Model A; (b) Model B; (c) Model C

3.2 频谱细化及频带截取

对消除噪声后的信号进行 CZT 细化, 得到的细化谱如图 7 所示. 通过频谱细化, 使距离分辨率由 0.0916 提高到 0.0183.

频谱细化后, 可根据不同方法确定中心频率. 针对大角度入射、低信噪比的模型 A 数据, 图 8 为采用三种不同反演方法的结果, 黑色粗体直线表示中心距离的位置, 表 2 为中心距离的数值.

表 2 各方法中心距离对比

Table 2 Central distance contrast of different methods

模型	FFT 加权法	包络线截频带法	最小二乘截频带法	实际距离
模型 A	7.0704	6.9882	6.9792	7.01
模型 B	11.1904	11.2105	11.2790	11.45
模型 C	9.1317	9.0579	9.0519	8.67

3.3 料线拟合

各测量点的中心距离确定后, 需将全部数据进行坐标变化后拟合成一条表示料面形状的曲线. 对于入射角为 $61^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 时所测得的几组数据, 求得距离转换坐标后的点与雷达的水平距离约为 10 m, 而高炉直径总体为 9.618 m, 可见求得的数据并不准确, 受到了炉壁的干扰. 由于高炉布料规则决定料面几乎为对称, 所以入射角过大的不可靠数据组可由与其关于高炉中心对称的小角度入射数据对应高度近似代替. 图 9 为 60 组数据处理后的料线与实际料线对比图.

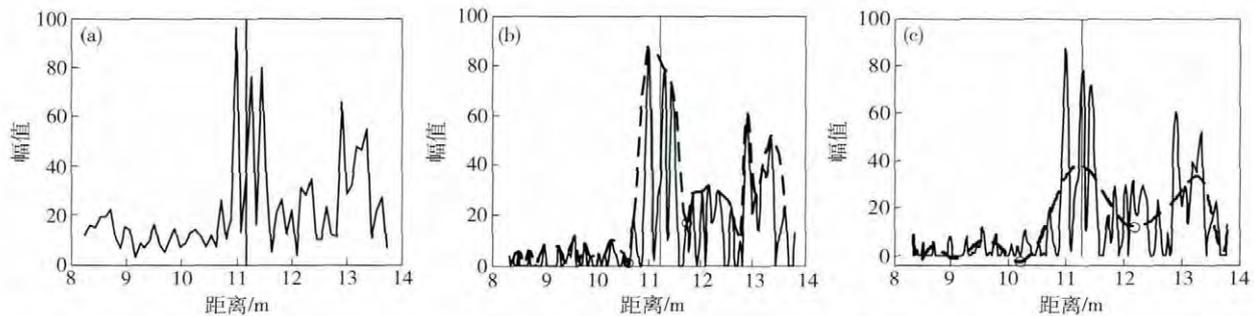


图8 不同反演方法选取结果的对比。(a) FFT 加权法; (b) 包络线截频带法; (c) 最小二乘截频带法

Fig.8 Distance contrast of different inversion methods: (a) FFT weighted method; (b) band envelope interception method; (c) least squares interception method

将图9的曲线总结为平均误差和料形相似度两项评价指标,见表3。平均误差为各点误差的平均值,料形相似度采用图形相似度 f 的度量方法进行计算。设实际料线有 N 个点,每个点的高度值为 H_i ($i=1, 2, \dots, N$), 插值料线上相应点的高度值为 h_i , 那么定义图形相似度 f 如下式所示:

$$f = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N |h_i - H_i|}{\sum_{i=1}^N H_i} \quad (15)$$

其中当 $f \leq 0$ 时认为 $f=0$,表示相似度为0,两条曲线完全不相似;当 $f=1$ 时,也就是两条曲线相似度最大的时候,可以反推出两条曲线上每一点高度都相同,有 $h_i = H_i$,两条曲线完全重合。

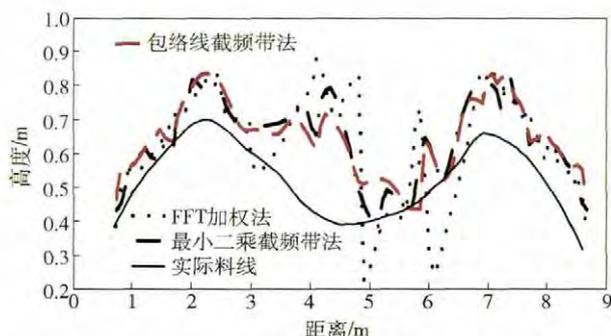


图9 反演料线与实际料线对比

Fig.9 Contrast between stock levels calculated by the distance inversion method and actual data

表3 插值料线与实际料线的平均误差和料形相似度

Table 3 Average error and index of similarity of the stock level

反演方法	平均误差	料形相似度
FFT 加权法	0.0964	0.4643
包络线截频带法	0.1160	0.7110
最小二乘截频带法	0.1205	0.7919

由于生产中料形对生产效率的影响很大,而平均误差存在正负抵消的情况,所以以料形相似度为主要考察指标。采用本文提出的两种方法比FFT加权反演

法相似度分别提高53.13%和70.56%。

4 结论

针对固体料面测量的复杂情况,提出一种基于先验信息的低信噪比FMCW信号处理方法,通过信号预处理去噪、频谱细化、频带截取、能量加权等一系列过程,得到最终处理结果。由实际数据处理结果可以看到,采用提出的处理方法很好地平滑了采用FFT点处理后的奇异点,在保留原始信息的前提下,得到更为光滑且更接近实际料线形状的插值曲线。

参考文献

- [1] Liu X M. Application of radar material meter in metallurgical production process. *Instrum Stand Metrol*, 2001(1): 28 (刘晓民. 雷达料位仪在冶金生产过程的应用. 仪器仪表标准化与计量, 2001(1): 28)
- [2] Guang Q D, Dang W W, Xiao Y M, et al. Three-dimensional imaging via wideband MIMO radar system. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 7(3): 445
- [3] Liu X E, Xiao S F, Mo J. Design point choice of Gaussian process response surface model applied to uncertainty analysis. *Comput Aided Eng*, 2011, 20(1): 101 (刘信恩, 肖世富, 莫军. 用于不确定性分析的高斯过程响应面模型设计点选择方法. 计算机辅助工程, 2011, 20(1): 101)
- [4] Xu S Q, Zhu Y J. The surface reconstruction for few and scattered points cloud. *Manuf Inf Eng China*, 2011, 40(3): 35 (徐守乾, 朱延娟. 稀疏点云的曲面重构. 中国制造业信息化, 2011, 40(3): 35)
- [5] Li L Q, Kang B S. RBF-based surface reconstruction from scattered data. *J Northwest Univ Nat Sci Ed*, 2011, 41(2): 221 (李乐庆, 康宝生. 基于RBF的散乱点曲面重构. 西北大学学报: 自然科学版, 2011, 41(2): 221)
- [6] Ohtake Y, Belyaev A, Seidel H P. Sparse surface reconstruction with adaptive partition of unity and radial basis functions. *Graphical Models*, 2006, 68: 15
- [7] Biggers K, Keyser J. Inference-based surface reconstruction of cluttered environments. *IEEE Trans Visual Comput Graphics*,

- 2012, 18(8): 1255
- [8] Chen X Z, Yin Y X, Hou Q W, et al. Improvement of a radar signal processing system for burden surface measurement in a blast furnace. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2011, 33(2): 215
(陈先中, 尹怡欣, 侯庆文, 等. 高炉雷达料面测量信号处理系统改进. 北京科技大学学报, 2011, 33(2): 215)
- [9] Li T Y, Ge L D. Research of two kinds of fast zoom spectrum. *Syst Eng Electron*, 2004, 26(9): 1192
(李天昀, 葛林东. 两种快速频域细化分析方法的研究. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1192)
- [10] Eugin H, Kim S D, Chiho P, et al. Automotive FMCW radar with adaptive range resolution // 2008 *Second International Conference on Future Generation Communication Networking Symposium*. Sanya, 2008: 130
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Wang H, Li X G, Wang J Q. Ranging method of FMCW radar based on discrete biorthogonal Fourier transform. *Syst Eng Electron*, 2012, 34(7): 1372
(王虹, 李兴国, 王剑桥. 基于离散双正交傅里叶变换的 FMCW 雷达测距方法, 系统工程与电子技术, 2012, 34(7): 1372)
- [14] Zhang S X, Li J, Zhang L, et al. Frequency modulated continuous wave squint synthetic aperture radar imaging algorithm based on series reversion. *Acta Electron Sin*, 2013, 41(3): 532
(张双喜, 李军, 张磊, 等. 基于级数反演的斜视 FMCW SAR 成像算法研究. 电子学报, 2013, 41(3): 532)