

提高 FMCW 雷达测距精度的谱最大值估值算法

徐军荣, 于盛林

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: FMCW 雷达在理论上具有很高的测距精度, 但是在实际系统中, 都是通过数字信号处理的方法对其回波信号进行处理, 从而获得回波功率谱, 进而获取其距离信息, 因而受到采样与处理字长的限制。传统的方法是通过增加采样点数来提高雷达的测距精度, 但是从系统实时性要求出发, 不能过多的增加信号处理的时间, 即不能过多的增加其采样点数。因此, 在对回波功率谱特点研究的基础上, 提出一种新的估值算法, 在计算量增加不多的情况下, 可以提高雷达的测距精度。

关键词: 雷达; 回波信号处理; 距离; 精度; 算法

中图分类号: TN953⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2009)04-0073-03

Improving Range Precision of FMCW Radar Using Estimating Maximum Algorithm of Spectrum

XU Jun-rong, YU Sheng-lin

(College of Automation Engineering, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The frequency modulated continuous wave(FMCW) radar has high theoretical range measuring precision. But in the practical system, because it acquires the range information from its power spectrum through digital signal processing which is limited by the data length. For improving the range precision, the traditional way is increasing the number of the samples. But the signal in the practical system should be processed immediately, the time spent on the signal processing should not be increased too much, that is to say the number of the samples can not be increased too many. So based on the research of the character of the spectrum, a new estimating algorithm is expounded which can improve the range precision of the FMCW radar and add less calculation.

Key words: radar; echo signal processing; range; precision; algorithm

0 引言

近几年来, 调频连续波(FMCW)雷达的理论和有了长足的进步, 由于 FMCW 雷达不仅具有很高的距离分辨率和测距精度, 而且具有易于实现固态化, 没有距离盲区, 良好的低截获概率特性, 使其在高精度的距离测量上比其他体制的雷达具有更为明显的优势^[1]。FMCW 雷达的目标距离信息表现在差拍信号的频谱上, 通过频谱分析来获取目标距离信息等^[2]。

采用 FFT 计算差拍信号频谱的方法会带来因频域采样引起的测距误差。现有的提高测距精度算法如采样内插法^[3]、FFT-CZT^[4]算法其基本思想都是先对信号作 FFT 变换, 找出谱峰所对应的位置, 然后再对谱峰所在区域局部增加采样点, 从而提高测距精度。

这种方法虽然在一定程度上减少了运算量, 但是为了达到一定的测距精度, 需要增加的运算量还是很可观的。文中采用的改进估值方法是考虑到雷达系统的实时性要求, 对 FFT 变换后的距离谱谱峰位置进行逼近估计, 与现有提高 FMCW 雷达测距精度算法如采样内插法、FFT-CZT 法相比, 可以在计算量增加不多的情况下, 提高 FMCW 雷达的测距精度。

1 FMCW 雷达回波信号处理

理想情况下, FMCW 雷达发射信号在有效扫频周期 T 内可以表示为^[5]:

$$S_T(t) = \cos[2\pi(f_0 t - Bt/2 + Kt^2/2) + \Phi_0] \quad (1)$$
$$0 \leq t < T$$

式中 Φ_0 为发射信号的随机初相位, f_0 为 $t = 0$ 时发射信号的瞬时频率, 即为发射信号的中心频率, $K = B/T$ 为调频的斜率, T 为有效扫频周期, B 为调频带宽。

收稿日期: 2008-07-31

作者简介: 徐军荣(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为计算机测控、雷达信号处理等; 于盛林, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算机测控, 数字信号处理, 混沌、分形理论及应用。

径向速度为 0, 距离为 R 处的点目标产生的回波信号^[5]与原始发射信号两路扫频信号通过混频器进行混频, 并滤去混频所得的差拍信号中的高频分量, 得到的差频信号如下^[5]:

$$S_{IF}(t) = \frac{1}{2} K_r \cos[2\pi(f_0 - B/2)\tau_0 + 2\pi B t \tau_0 / T + \theta_0] \quad (2)$$

则差频信号频率为:

$$f = B\tau_0 / T = 2BR / Tc \quad (3)$$

由式(3)可知在调制参数 B 、 T 一定的条件下, 差频 f 和距离 R 成正比, 测得差频 f 即可计算出距离 R 。从差频信号中提取出差频信息, 通常采取的方法是对差频信号做傅里叶变换, 将时域信号转换为频域信号, 此过程在差频信号的频谱图上表现为信号频谱在差频 f 处存在峰值。

但是在实际应用中, 不可能对式(2)信号全部记录, 只能对其采样, 然后再对采样序列进行离散傅里叶变换, 求取频谱峰值对应的频率。显然, 这种方法在模拟信号数字化过程中会产生混叠效应和量化误差, 在离散傅里叶变换过程中会产生频谱泄漏效应和栅栏效应, 使得峰值频率与理论值之间存在一定的偏差。

对式(2)进行傅里叶变换, 得到回波中频距离谱, 由于回波中频距离谱的正负部分是严格对称的, 所以可以只取其正频部分, 即:

$$F_+(f) = u \frac{\sin[\pi T(f - \frac{B}{T}\tau_0)]}{2\pi(f - \frac{B}{T}\tau_0)} e^{-j\pi(Tf - 2f_0\tau_0)} \quad (4)$$

式中 $u = K_r/2$, K_r 为信号传输损耗因子; $F_+(f)$ 的幅度在频率正半轴上, 当 $f = \frac{B}{T}\tau_0$ 时有最大值, 理想情况下的频谱如图 1(a) 所示。图中横轴为归一化频率, 纵轴为归一化幅度, 标值单位为单位“1”。

当 τ_0 变化时, 所有离散谱线的位置不变, 只有各谱线的幅值相应地按照一定规律变化, 根据式(3)的线性关系, 不同的距离 R 对应的幅值最大的谱线位置不同, 幅值最大的谱线应该就是距离主频点最近的谱

线, 由此根据谱峰位置可以提取出距离信息。但是由于距离谱谱线是离散的, 其对应的距离值也是离散的, 因此谱线幅值最大的位置可能并不是其包络曲线主瓣峰值所对应的位置, 而是会有一定的偏移, 从而产生了测距的误差。

当谱线位置发生偏移的时候, 相对于主瓣峰值所对应的中央谱线位置可能有两种情况, 如图 1, 其中图 1(b) 为距离谱中各采样点对应的离散谱线相对于频谱主瓣峰值位置右偏的情况, 图 1(c) 为距离谱中各采样点对应的离散谱线相对于频谱主瓣峰值位置左偏的情况。

为了精确测量复包络曲线最大值的位置, 最直接的方法就是增加采样点数和傅里叶变换运算的点数, 在处理器速度一定时, 必然会增加信号处理的运算时间, 从而影响 FMCW 雷达系统的实时性。文中提出一种在不增加采样点数和傅里叶变换运算点数情况下, 根据复包络曲线在主瓣区间内以主瓣峰值点对应的中央谱线为对称的关系对最大值进行估算, 由此可以在不影响系统实时性的前提下提高 FMCW 雷达的测距精度。

2 改进的距离谱最大值的估值算法

由于采用 FFT 计算得的距离谱是对连续距离谱的等间隔采样, 其最大值点必定位于其复包络曲线的主瓣内。当离散频谱幅值最大的位置与其复包络曲线最大值对应的位置一致的时候, 峰值点的频率即为中频频率 $f_{IF} = B\tau_0 / T$, 此时根据式(3)计算得的距离即为目标的实际距离。根据式(4), 其距离谱曲线各零点位置为: $f = f_{IF} \pm m/T$, m 为自然数, 此时除了 $R = R_{IF}$ 外, 其余的采样点均位于距离谱的零点上, 此时距离谱上只有一根谱线。

但是在实际系统中, 由于 A/D 采样过程中的混叠效应和量化误差, FFT 变换过程中的栅栏效应, 频谱泄露等现象的存在, 离散频谱最大幅值谱线必然会偏离谱峰位置。此时距离谱上所有的采样点均不在零

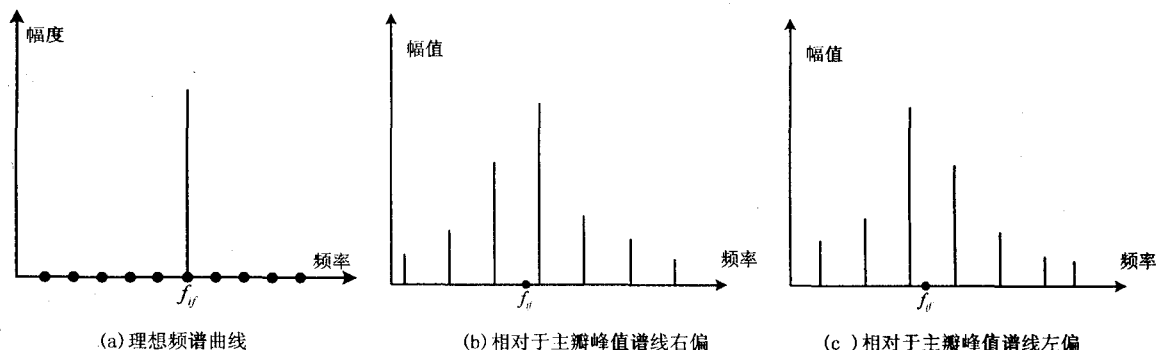


图 1 谱线位置

点,距离谱上应该有 N 条谱线,如图 1 所示。此时距离谱幅值最大采样点对应的谱线偏离主瓣峰值点对应的谱线,从而计算得的距离与实际距离之间就会存在一定的误差。

当距离谱谱线位置偏离谱峰峰值位置时,以左偏为例,如图 2 所示。

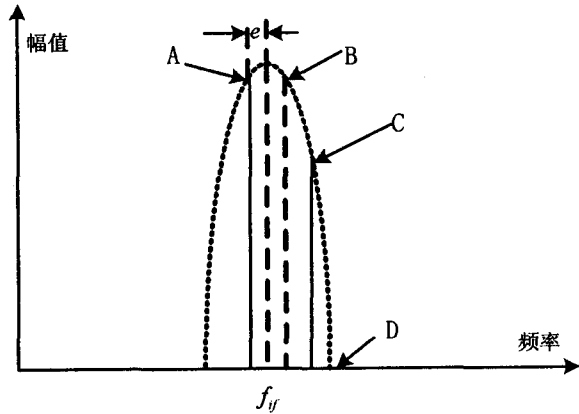


图 2 复包络曲线内各点情况

图中横轴为归一化频率,纵轴为归一化幅度,标值单位为单位“1”。

图中点 $A(f_1, k_1)$ 所对应的谱线为离散频谱最大幅值谱线,此谱线可以看作是复包络曲线最大值所对应谱线左偏 e 所得,距离谱主瓣看作是关于中央峰值谱线对称的,则 A 关于其对称点 B 位置为: $(f_1 + 2e, k_1)$,此时所有复包络曲线中理论幅值为 0 的谱线也均左偏 e ,从而产生如图 2 中的点 $C(f_2, k_2)$,经分析可以知道, $f_2 = f_1 + 1/T$, T 为发射信号的扫频周期, D 点为实际复包络曲线的零点,则 D 点位置为 $(f_2 + e, 0)$ 。

各点位置如图 2 所示, BCD 三点可以近似为一条直线,则有如下线性关系:

$$\frac{k_1 - k_2}{k_1} = \frac{f_2 - f_1 - 2e}{f_2 - f_1 - e} \tag{5}$$

令 $l = \frac{k_1 - k_2}{k_1}$,则式(5)可变化为:

$$e = \frac{(l - 1)(f_2 - f_1)}{l - 2} \tag{6}$$

通过对比计算所得的偏差 e 与事先设定好的误差 de ,当偏差小于误差时,可以认为此时的频率即为所要求的差频频率,从而确定目标的距离信息。当偏差大于所设定的误差时,修正 $f_1 = f_1 + de, f_2 = f_2 + de$,对应离散频谱幅值更正为: k_1, k_2 ;由式(5)、(6)计算出的新的偏差 e 。

算法流程如下:

- (1) 计算差频信号的 FFT,并设定最大误差 de ;
- (2) 找出 FFT 计算所得离散谱线最大值和次大值的位置,进而确定谱峰的位置;

- (3) 根据式(6) 计算偏差 e ;
- (4) 比较 e 与 de ,如果 $e > de, f_1 = f_1 + de, f_2 = f_2 + de$,将新的 f_1, f_2 代入式(5),计算新的 k_1, k_2 ,根据式(6) 计算新的偏差,并转入(4),否则继续;
- (5) 根据线性计算所得的频率,代入式(3),计算出目标的距离。

3 仿真结果与分析

对于如上算法,分别用近程与远程雷达参数进行仿真实验,并对比分别采用不同方法时仿真程序运行所需时间。

对于远程雷达,设定参数为: $f_0 = 10\text{GHz}, B = 10\text{MHz}, T = 512\mu\text{s}, f_s = 2\text{MHz}$,设定距离为 $5500\text{m} \sim 6500\text{m}$,测距误差为 1m ,目标为单目标,分别用直接 FFT 变换法,FFT-CZT 法,内插采样法以及文中改进方法计算结果如表 1,四种方法仿真所需时间如表 2。

表 1 远程雷达单目标计算机仿真结果

设定距离(m)	直接 FFT 法(m)	FFT-CZT 法(m)	采样内插法(m)	文中方法(m)
5500.0	5505.0	5501.3	5498.4	5501.0
5700.0	5703.8	5700.0	5700.9	5700.7
5900.0	5902.5	5902.5	5903.4	5900.5
6100.0	6105.0	6101.3	6098.4	6101.0
6300.0	6303.8	6300.0	6300.9	6300.5
6500.0	6502.5	6502.5	6503.4	6501.0

表 2 远程雷达单目标各方法平均计算时间

	直接 FFT 法	FFT-CZT 法	内插采样法	文中方法
平均计算时间(s)	0.3593	0.4193	1.3050	0.3643

对于近程雷达,设定参数为: $f_0 = 10\text{GHz}, B = 1.5\text{GHz}, T = 2\text{ms}, f_s = 100\text{KHz}$,设定距离为 $3\text{m} \sim 5\text{m}$,测距误差为 5mm ,目标为单目标,用直接 FFT 变换法,FFT-CHIRP,内插采样法以及文中改进方法计算结果如表 3,四种方法仿真所需时间如表 4。

表 3 近程雷达单目标计算机仿真结果

设定距离(m)	直接 FFT 法(m)	FFT-CZT 法(m)	采样内插法(m)	文中方法(m)
3.0	3.0078	3.0027	3.0103	3.0008
3.4	3.4082	3.4021	3.4009	3.400
23.8	3.8086	3.8002	3.8110	3.8006
4.2	4.2090	4.2010	4.2017	4.2001
4.6	4.6094	4.6012	4.6118	4.6004
5.0	5.0098	5.0000	5.0024	5.0008

表 4 近程雷达单目标各方法仿真时间

	直接 FFT 法	FFT-CZT 法	内插采样法	文中方法
平均计算时间(s)	0.3280	0.4088	0.8437	0.3645

由表 1、3 可知,文中所提出测距算法在设定误差范围内,能够比较精确计算出目标的距离,所计算的距离误差均不超过设定误差;而且从表 2、4 可知在保证

(下转第 79 页)

表 3 两种预测方法的均方误差

预测方法	文中方法	ARIMA(4,1,1)(1,1,0) [*] 模型
均方误差	7.501	13.476

$$\sigma = \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \hat{X}_i)^2}{N} \tag{5}$$

其中, X_i 是真实值, \hat{X}_i 是预测值, N 是样本数。

显然,文中方法明显优于 ARIMA 预测方法。

3 结束语

文中以网络论坛话题热度趋势预报为研究对象,针对小波分解后各信号不同特点建立不同预测模型,仿真结果表明,此方法用来预测网络论坛话题热度趋势这一类非平稳的时间序列取得了较好的预测效果。但是,在实验中发现:小波函数的选择是影响模型预测精度的关键因素之一,应对该问题作进一步研究;ARIMA 的应用前提是时间序列的平稳性,实际工作中数据往往是非平稳序列,需对序列进行预处理,使之达到平稳的要求。

未来的工作主要在于根据预测值将那些普通帖子过滤掉,充分考虑热帖内容,挖掘潜在的高级用户,发现更有意义的高级用户行为模式,进而实现对网络论坛的管理和分析。

(上接第 75 页)

一定测距精度的基础上,文中方法所需的计算时间比较少,与其它两种方法相比,更加能够满足实际雷达系统实时性的要求。

4 结束语

针对 FMCE 雷达单目标距离谱的特点,提出一种新的精度改进算法,可以在一定程度上提高 FMCW 雷达的测距精度。该算法是基于 FFT 变换,在距离谱谱峰位置对目标距离所对应的频率进行估值运算。文中的方法与直接 FFT 变换法,FFT - CZT 法,内插采样法相比较有如下优点:计算精度更高,计算时间更少即计算量更小。

此外,雷达测距精度还受到调频非线性^[6]、噪声^[7]等因素的影响,要想获得更高的测距精度,必须对调频非线性进行校正,对回波信号进行滤波降噪处理。

参考文献:

[1] 陈祝明,丁义元,向敬成.采用 Chirp - Z 变换提高 LFM-

参考文献:

[1] Hansen J V, Nelson R D. Neural networks and traditional time series methods: a synergistic combination in state economic forecasts[J]. IEEE Trans Neural Networks, 1997, 8(4): 863 - 873.
[2] Khotanzad A, Sadek N. Multi - scale high - speed network traffic prediction using combination of neural networks[C]// Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Portland, O R, USA: IEEE Press, 2003: 1071 - 1075.
[3] Mallat S. A Theory of Multi - resolution Signal Decomposition: The Wavelet Transform[J]. IEEE Trans on PAMI, 1989, 11(7): 674 - 693.
[4] 孙明谦,姚淑萍,胡昌振.服务器负载的小波 - 神经网络 - ARMA 预测[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(10): 154 - 155.
[5] 冉启文,单永正,王 琪,等.电力系统短期负荷预测的小波 - 神经网络 - PARMA 方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 38 - 42.
[6] 常学将,陈 敏,王明生.时间序列分析[M]. 北京:高等教育出版社, 1993.
[7] 周 波,石爱国,蔡 烽,等.基于多尺度分析和神经网络的时间序列预报[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(1): 93 - 94.
[8] 薛 薇.SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.

CW 雷达的测距离精度[J]. 信号处理, 2002, 18(2): 110 - 112.
[2] Zhang Jie. Research of High Precision Frequency Measure Algorithm Based on LabVIEW[C]//2007. ICEMI '07. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Xi'an, China: [s. n.], 2007.
[3] 李 政,张容权,杨建宇,等.利用频域增采样内插方法提高 LFM CW 雷达测距精度[J]. 电讯技术, 2005(5): 77 - 80.
[4] 刘 宝,刘军民.FMCW 雷达快速高精度测距算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2001(9): 41 - 45.
[5] 宋 玮.FMCW 雷达测距精度及其信号处理技术的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2004.
[6] Ahmed N. Hardware and Software Techniques to Linearize the Frequency Sweep of FMCW Radar for Range Resolution Improvement[D]. B. S. E. E. : University of Kansas, 2004.
[7] Krzysztof K S. Novel Method of Decreasing Influence of Phase Noise on FMCW Radar[C]//Proceedings of 2001 CIE International Conference on Radar. Beijing, China: [s. n.], 2001: 319 - 323.