

一种稳健的离散频谱校正方法

曹延伟 张昆帆 江志红 程 翥 皇甫堪

(国防科技大学电子科学与工程学院信号处理研究室 长沙 410073)

摘要: 该文提出了一种适用于连续波雷达测速的、稳健的离散频谱校正方法,即三角形法。该方法具有原理简单、计算量小、易于实现、校正精度高等优点。该文介绍了三角形法频谱校正的原理,分析了三角形法校正效果随信噪比以及参与校正的谱线根数变化情况,并给出了仿真结果。最后将三角形法和能量重心法进行了对比,得出了三角形法受信噪比变化影响较小的结论。

关键词: 频谱校正, 三角形法, 能量重心法, 连续波雷达

中图分类号: TN958.94

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1353-04

A Robust Discrete Spectrum Correcting Method

Cao Yan-wei Zhang Kun-fan Jiang Zhi-hong Cheng Zhu Huangfu Kan

(College of Electron. Sci. and Eng., National Univ. of Defence Tech., Changsha 410073, China)

Abstract A robust correcting method for discrete spectrum in CW radar velocity measuring is proposed in this paper, it is named the method of triangle. This method, with low computation and high accuracy, is theoretically simple and easily carried out. The paper introduces the principle of this method, analyzes its correcting effects changed with noise and spectrum line numbers used, the simulation result is also given. Finally, the method of triangle is compared with energy centrobaric correction method, with the conclusion that noise has less effects on the method of triangle.

Key words Spectrum correction, Method of triangle, Energy centrobaric correction method, CW radar

1 引言

多频连续波雷达具有设备简单、测距精度高、可同时测速等优点,在靶场等许多领域有着广泛的应用。在连续波雷达利用多普勒效应测量目标速度的时候,由于 FFT 的栅栏效应,多普勒频率无法正好处在采样点上,这样得到的多普勒频率将会出现比较大的偏差,如果不进行频谱校正,测得的目标速度也会出现较大误差。1975 年, Burges 采用插值法^[1]对加矩形窗的离散频谱进行校正。1983 年 Grandke 提出了加汉明窗的内插校正法^[2]。近年来,国内一些学者也提出了 4 种频谱校正的方法,即离散频谱的能量重心校正法^[3]对幅值进行校正的比值法^[4-6], FFT+DFT 细化分析傅里叶变换法^[7],相位差法^[8-12]。但上述几种方法除文献[3]中的能量重心法外,实现过程都比较复杂,计算量比较大,不利于 DSP 实现,无法满足雷达实时测速的需要。这里我们提出了一种简单有效的、稳健的、适用于连续波雷达测速的频谱校正新方法,即“三角形”法,并将它与文献[3]提出的能量重心法进行了比较。

2 三角形法频率校正原理

连续波雷达测速的基本原理如图 1 所示。连续波雷达对接收到的模拟信号 $x_R(t)$ 首先进行采样,得到离散化的数字信号 $x(n)$, 然后进行 FFT 谱分析,在此基础上进行谱峰搜索,得到多普勒频率的近似值,紧接着进行多普勒频率校正,最后利用公式 $v = (c/2f_0) \times f_d$ 计算得到目标的速度。前边所说的“三角形”法就是频率校正时所采用的方法。

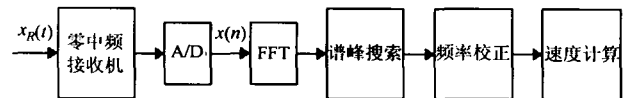


图 1 连续波雷达测速原理框图

三角形法是根据几何原理进行频率校正的。当用直线分别连接主瓣内谱峰左右谱线时,可近似认为形成一个三角形,这就是“三角形”法名称的由来。下面首先以谱峰左右各取 1 根谱线为例,介绍该方法的校正原理,如图 2 所示。

在图 2 中,假定搜索到的谱峰为谱线 DQ,其对应的谱线号为 k ,且其右边的谱线 KL 幅值大于其左边谱线 GP 的幅值,则实际谱峰的位置应在点 Q 和 L 之间,如图中虚线 A0

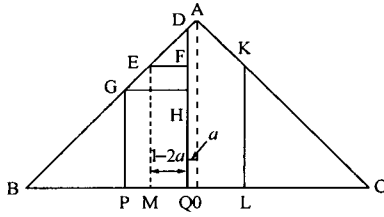


图 2 三角形法利用谱峰左右各 1 根谱线进行频率校正原理图

所示。假设线段 QO 的长度为 a ，那么 a 就是要求的谱线修正量。将谱线 KL 以 A0 为对称轴移至 EM 处，分别连结点 A, K, 以及点 A, D, G, 组成了一个近似 $\triangle ABC$, $\triangle ABC$ 近似为等腰三角形, 在 $\triangle DEF$ 和 $\triangle DGH$ 中, 利用等比原理, 有

$$\frac{GH}{DH} = \frac{EF}{DF} \tag{1}$$

假定 GP, DQ, KL 三根谱线的幅值分别为 $L(k-1)$, $L(k)$, $L(k+1)$ 则有

$$GH=1, \quad DH=L(k)-L(k-1)$$

由于 $M0=0L=1-a$, 则

$$EF=1-a-a=1-2a, \quad DF=L(k)-L(k+1).$$

根据式(1), 有

$$\frac{1}{L(k)-L(k-1)} = \frac{1-2a}{L(k)-L(k+1)} \tag{2}$$

从式(2)可以得到

$$a = \frac{L(k+1)-L(k-1)}{2[L(k)-L(k-1)]} \tag{3}$$

同时, a 应满足 $|a| \leq 0.5$, 即校正量的绝对值应该小于 0.5 根谱线。若 $|a| > 0.5$, 保留其符号, 而将其绝对值置为 0.5, 否则搜索到的谱峰就会发生错误, 而校正后的多普勒频率也将出现比较大的误差。因此校正以后的多普勒频率为

$$f_d = (k+a) \times (f_s / N) = \left\{ k + \frac{L(k+1)-L(k-1)}{2[L(k)-L(k-1)]} \right\} \times \frac{f_s}{N} \tag{4}$$

这里 k 为谱峰对应的谱线号, f_s 为采样频率, N 为 FFT 点数。

在实际应用中, 为了提高校正效果, 可利用主瓣内谱峰左右各 2 根甚至更多的谱线进行校正, 其原理如图 3 所示。

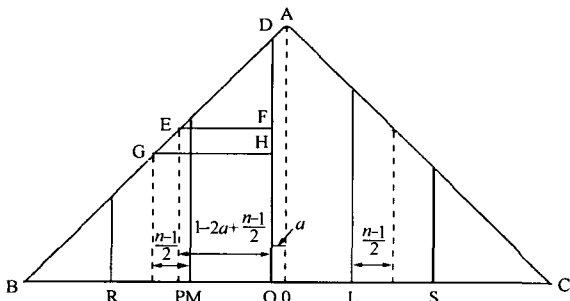


图 3 利用谱峰左右各 n 根谱线进行校正的三角形法原理图

首先将谱峰 DQ(其谱线号为 k)处左右各 n 根谱线作平均, 平均后的谱线分别位于第 $k-1$ 根谱线左边 $(n-1)/2$ 距离处, 和第 $k+1$ 根谱线右边 $(n-1)/2$ 距离处, 其幅值大小分别为 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k-i)$, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k+i)$ 。设谱峰的校正量为 a , 则根据三角形几何关系, 利用上边同样的推导方法, 可得

$$\frac{1+(n-1)/2}{L(k)-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k-i)} = \frac{1-2a+(n-1)/2}{L(k)-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k+i)} \tag{5}$$

$$a = \frac{\frac{n+1}{4} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k+i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k-i) \right]}{L(k) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k-i)}, \text{ 这里 } a \text{ 同时应满足 } |a|$$

≤ 0.5 。校正后的多普勒频率为

$$f_d = (k+a) \times f_s / N$$

$$= \left\{ k + \frac{\frac{n+1}{4} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k+i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k-i) \right]}{L(k) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(k-i)} \right\} \times \frac{f_s}{N} \tag{6}$$

3 仿真实验

为了验证上述结论, 现做以下仿真实验。假定距离雷达 30km 远处有一目标, 作匀速直线运动朝雷达飞来, 其速度在 900m/s~1050m/s 之间均匀分布。假定雷达发射频率为 10GHz, 则其多普勒频率在 60000Hz~70000Hz 之间均匀分布。现仿真产生零中频信号

$$x^{f_0}(n) = e^{j[\omega_{d0}n - 2\pi f_0 2R_0/c]} + v_0(n)$$

其中 $R_0 = 30 \text{ km}$, $\omega_{d0} = 2\pi f_{d0} \cdot T_s$, T_s 为采样周期, 取 $T_s = 800 \text{ ns}$ (采样频率 $f_s = 1.25 \text{ MHz}$), $v_0(n)$ 为高斯白噪声, 噪声方差在 $-11\text{dB} \sim +12\text{dB}$ 之间变化。对采样后的零中频信号做 1024 点的 FFT 运算, 加 $\beta = 4.538$ 的 Kaiser 窗。对应于每个信噪比均做 1000 次蒙特卡罗仿真实验, 结果如图 4 所示。其中曲线 1, 2, 3, 4, 5, 6 分别代表利用三角形法在谱峰左右各取 1 根, 2 根, 3 根, 4 根, 5 根, 6 根谱线进行校正的结果, 下同。从图 4 可以看出, 三角形法的校正效果是很不错的, 其速度误差均方差不超过 2m/s, 相对误差最大只有 2.2% 左右, 三角形法达到了较高的校正精度。另外还可以看出, 随着输出信噪比的增加, 三角形法的校正精度有所提高, 但提高幅度不大, 变化比较平稳, 呈现出稳健的特点。此外, 三角形法在用谱峰左右各 2 根谱线进行校正时达到最佳效果, 3 根校正时的效果比 2 根的略差, 而从 4 根开始, 随着校正所用谱线根数的增加, 校正效果逐步下降, 误差越来越大。下面改变 Kaiser 窗的参数, 令 $\beta = 10.056$, 其它条件不变, 重新做 1000 次仿真, 结果如图 5 所示。

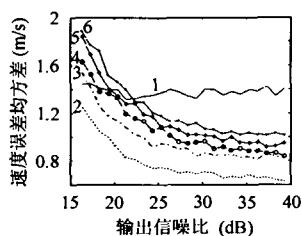


图 4 $\beta=4.538$ 时三角形法谱峰左右各取 1~6 根谱线校正时仿真结果

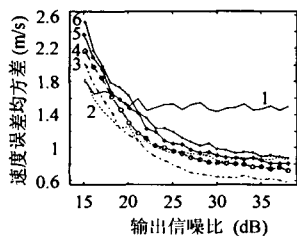


图 5 $\beta=10.056$ 时三角形法谱峰左右各取 1~6 根谱线校正时仿真结果

图 5 给出的是加 $\beta=10.056$ 的 Kaiser 窗时，利用三角形法在谱峰左右各取 1~6 根谱线进行校正所得到的速度误差均方差随 FFT 输出信噪比变化曲线。从图 5 可以看出，当 β 参数变为 10.056 时，三角形法的整体校正效果有所下降，并且 3 根时的校正效果略好于 2 根时的校正效果。综合图 4 和图 5 可以看出，三角形法在利用谱峰左右各 2 根谱线进行校正时可以取得比较理想的结果。

4 三角形法和其它方法的比较

文献[3]提出了离散频谱的能量重心校正法，其频率的校正公式为

$$f_0 = \left[\sum_{i=-n}^n \gamma_i(m+i) \frac{f_s}{N} \right] / \left[\sum_{i=-n}^n \gamma_i \right] \quad (7)$$

其中 m 为主瓣内峰值的谱线号， γ_i 为功率谱第 i 条谱线值， f_s 为采样频率， N 为 FFT 点数， f_0 为校正后得到的频率值。与三角形法一样，能量重心法也是一种简单有效的频率校正方法，但文献[3]所给出的仿真实例并没有考虑噪声的影响，而在雷达测速的实际情况中噪声的影响是不可忽略的。文献[13]在对各种校正方法进行对比的仿真实验中，虽然考虑到了噪声的影响，但并没有给出校正时所取谱线根数对校正效果的影响，因此有必要对噪声情况下能量重心法的校正效果进行分析。为此利用能量重心法作同样的仿真，除了频率校正公式不同外，其余仿真条件均相同，做 1000 次仿真实验，仿真结果如图 6 和图 7 所示。

图 6 和图 7 分别给出的是加 $\beta=4.538$ 和 $\beta=10.056$ 的 Kaiser 窗时，利用能量重心法在谱峰左右各取 1~6 根谱线进行校正所得到的速度误差均方差随 FFT 输出信噪比变化曲线，图中数字 1~6 的含义和前述相同。从图 6 可以看出，信噪比对能量重心法的校正效果影响比较大，随着输出信噪比的提高，速度误差均方差下降较快。同时，校正时所取的谱线根数越少，校正的效果越好，可见在噪声的影响下能量重心法的校正效果和文献[1]给出的结论不尽相同。比较图 6 和图 7 可以看出，在加不同宽度的窗时，利用能量重心法进行校正的效果是不同的。在加 $\beta=4.538$ 的宽窗时，利用谱峰左右各 1 根谱线进行校正取得最佳效果。而在加 $\beta=10.056$

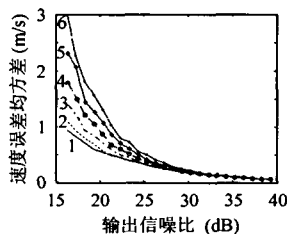


图 6 $\beta=4.538$ 时能量重心法谱峰左右各取 1~6 根谱线校正时仿真结果

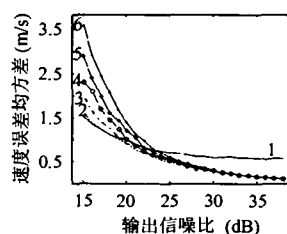


图 7 $\beta=10.056$ 时能量重心法谱峰左右各取 1~6 根谱线校正时仿真结果

的窄窗时，利用 2 根谱线校正时的效果最好。这是因为当对零中频信号加上 $\beta=4.538$ 的 Kaiser 窗时，主瓣内加上谱峰总共只有 4 根谱线，当利用谱峰左右各 2, 3, 4, 5, 6 根谱线进行校正时，能量重心法实际上将越来越多的噪声引入有用信号中进行校正，这样必然会导致校正的效果越来越差。但在加 $\beta=10.056$ 的窄窗时，主瓣内总共有 6 根谱线，所以在图 7 中，利用谱峰左右各 2 根谱线校正取得最佳效果。

为了更加直观地对比两种方法，将上述仿真结果中两种方法分别取 2 根谱线和 6 根谱线的数据重新提出，画在一幅图中，如图 8, 9, 10, 11 所示。从图中可以看出两种方法的校正精度都比较高，在取 2 根谱线进行校正时，能量重心法的校正效果要比三角形法好，在信噪比较高的情况下这个特点更加突出，如图 8 和图 10 所示。但在取 6 根谱线进行校正时，在低信噪比情况下，三角形法的校正效果比能量重心法好，在高信噪比情况下，能量重心法比三角形法的校正效果要好，如图 9 和图 11 所示。这从另外一个方面说明能量重心法受信噪比影响较大。

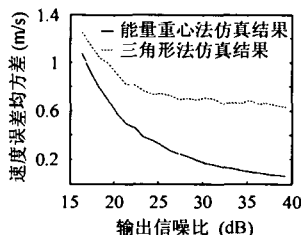


图 8 $\beta=4.538$ 时两种方法谱峰左右各取 2 根谱线校正时仿真结果

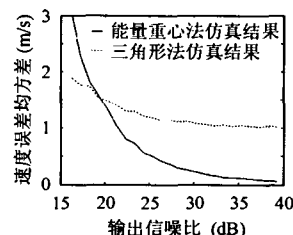


图 9 $\beta=4.538$ 时两种方法谱峰左右各取 6 根谱线校正时仿真结果

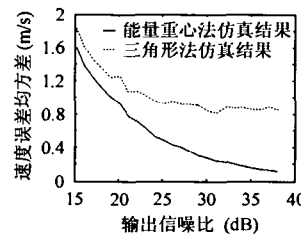


图 10 $\beta=10.056$ 时两种方法谱峰左右各取 2 根谱线校正时仿真结果

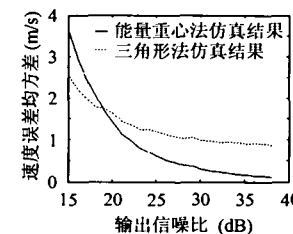


图 11 $\beta=10.056$ 时两种方法谱峰左右各取 6 根谱线校正时仿真结果

5 结束语

三角形法利用三角形几何原理对离散频谱进行校正,具有原理简单,计算量小,易于实现等优点,它达到了比较高的测速精度,可广泛地应用于连续波雷达测速等领域。能量重心法也是一种简便的频谱校正方法,与能量重心法相比,三角形法具有稳健的优点,在实际雷达系统中有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Burgess T. On digital spectrum analysis of periodic signals. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1975, 58(3): 556 – 567.
 - [2] Grandke T. Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1983, 1M-32(2): 350 – 355.
 - [3] 丁康, 江利旗. 离散频谱的能量重心校正法. *振动工程学报*, 2001, 14(3): 354 – 358.
 - [4] 丁康, 张晓飞. 频谱校正理论的发展. *振动工程学报*, 2000, 13(1): 14 – 22.
 - [5] 朱利民, 钟秉林, 黄仁. 离散频谱多点卷积幅值修正法的理论分析. *振动工程学报*, 1999, 12(1): 120.
 - [6] 黄迪山. FFT 相位误差分析及实用校正方法. *振动工程学报*, 1994, 7(2): 185 – 189.
 - [7] 刘进明, 应怀樵. FFT 谱连续细化分析的傅里叶变换法. *振动工程学报*, 1995, 18(2): 162 – 166.
 - [8] 谢明, 张晓飞, 丁康. 频谱分析中用于相位和频率校正的相位差校正法. *振动工程学报*, 1999, 12(4): 454 – 459.
 - [9] 丁康, 罗江凯, 谢明. 离散频谱时移相位差校正法. *应用数学和理学*, 2002, 23(7): 729 – 735.
 - [10] 丁康, 朱小勇, 谢明等. 离散频谱综合相位差校正法. *振动工程学报*, 2002, 15(1): 114 – 118.
 - [11] 丁康, 钟瞬聪, 朱小勇. 离散频谱相位差校正法研究. *振动与冲击*, 2001, 20(2): 52 – 55.
 - [12] 丁康, 朱小勇. 适用于加各种窗的一种离散频谱相位差校正法. *电子学报*, 2001, 29(7): 987 – 989.
 - [13] 朱小勇, 丁康. 离散频谱校正方法的综合比较. *信号处理*, 2001, 17(1): 91 – 97.
- 曹延伟: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为现代信号处理、雷达信号处理等.
- 程 翥: 男, 1974年生, 讲师, 研究方向为现代信号处理.
- 皇甫堪: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达及现代信号处理方面的研究.