

# 用子波变换方法实现高距离分辨 雷达中精确距离跟踪

陆林根

(北京无线电测量研究所, 北京 100854)

**摘 要:** 本文研究了在高距离分辨雷达(HRR)中对输入的回波信号进行子波变换实现精确距离跟踪. HRR 雷达所得的目标回波波形是目标各强散射点在雷达视线上的投影<sup>[1~3]</sup>. 对一个具体的波形散射点至雷达之间的距离从原理上都可以得出, 但从实际上, 由于目标运动时姿态变化, 其散射点幅度和距离变化太快, 因此实现对散射点距离跟踪是很困难的. 本文在国内首次介绍利用对信号子波变换方法提取目标的综合信息实现对雷达目标的精确距离跟踪. 实际证明此方法是可行的.

**关键词:** 距离跟踪; 信号处理; 子波变换; 高距离分辨雷达

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2000)12-0022-03

## Using Wavelet Transform for Ranging Tracking System in High Resolution Radar Systems

LU Lin gen

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The method of ranging tracking using wavelet transform in high resolution radar system is researched in this paper. The back scattered power of the target is represented as a function of time. The range of the each scattered point could be measured as a delay time of transmitter pulse. But for moving targets the amplitude and range would change speedily. So it is very difficult to tracking the range. In this paper the method of wavelet transform of input pulse for range tracking system is satisfactorily demonstrated.

**Key words:** range tracking; signal processing; wavelet transform; high range resolution radar

### 1 引言

HRR 雷达为了提高其分辨率一般是一个宽带系统, 而目前雷达的距离和角度跟踪测量系统用的是窄带系统. 在窄带距离跟踪系统中, 目标被视作一个等效散射中心<sup>[3]</sup>(目标各强散射点的幅度和空间相位合成等效中心), 所以其距离跟踪系统只是对此中心实现跟踪, 得到的距离信息是等效中心相对于雷达之间的距离. 此种距离跟踪方法是在系统中产生不同的前、后波门<sup>[2,3]</sup>, 根据目标回波中心相对于前、后波门位置不同产生不同的距离误差, 再经过跟踪滤波器滤波后, 以此移动前、后波门位置使目标回波中心始终处于前、后波门位置的中心. 此方法也就是测量距离的方法. 高距离分辨雷达用的是宽带系统, 其输出的正交回波脉冲的波形如图 1 所示, 图 1 是 HRR 雷达实测录取的回波波形. 此目标回波波形已不是像窄带系统中等效散射中心的回波, 而是目标的各强散射点均有反映的高距离分辨雷达的回波波形. 根据这一次录取的波形, 可以测量出目标各散射点相对于雷达的位置, 但要实现距离跟踪却存在一定的困难, 原因是各散射的幅度、多普勒频率

和空间相位都与目标运动的姿态有关, 其变化是很大的, 这么大的输入变化作为跟踪系统的输入信号是不合适的. 因此, 在高距离分辨雷达系统中一般既采用有窄带系统, 又有宽带系统. 窄带系统是作为传统的座标测量系统, 宽带系统是作为目标图像处理或目标识别系统. 这样完全不同的带宽系统全部由一部雷达站完成设备量很大, 又没有必要性. 本文是在高距离分辨雷达录取大量数据的基础上, 提出了一种用子波变换方法实现高距离分辨雷达距离跟踪系统, 这样就可以去掉窄带系统, 减少设备量, 同时又提高了距离测量精度. 采用子波变换方法使信号的输入仍然是高距离分辨雷达的信号形式, 这样就既可以保持高距离分辨雷达的优点, 又使用了传统的、可靠的前、后波门跟踪方式.

### 2 宽带回波信号与子波变换

HRR 雷达发射信号为宽带信号, 形式为线性调频波形(LFM), 其表达式为<sup>[1,2]</sup>:

$$V_t = U_0 \text{rect}(t/\tau) \exp[j(2\pi f_0 t + \pi B t^2/\tau + \varphi_0)] \quad (1)$$

式中  $\tau$  是信号持续时间; 信号的频率调制为  $B/\tau$ ;  $U_0$  为发射

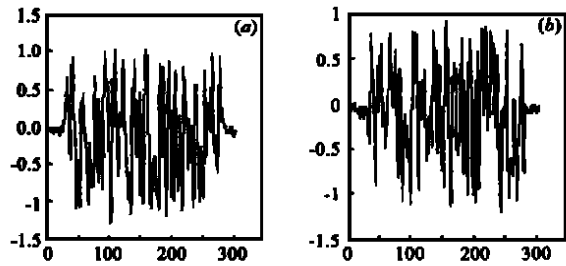


图 1 实测波形图

信号幅度;  $f_0$  为载频;  $\varphi_0$  为发射信号的起始相位. 式中:

$$\text{rect}(t/\tau) = \begin{cases} 1; & t \leq \tau \\ 0; & t > \tau \end{cases} \quad (2)$$

此发射信号经过目标的各散射点反射后, 雷达接收机信号所接收的信号表达式为<sup>[12]</sup>:

$$U_r = \sum_{i=1}^M k_i U_0 \text{rect}\left(\frac{t_i - \tau}{\tau}\right) \exp[j(2\pi(f_0 - f_{di})(t_i - \tau) + \pi \frac{B}{\tau}(t_i - \tau)^2 + \phi_i - \phi_0)] \quad (3)$$

式(3)中  $i$  为距离分辨单元内强散射点的个数;  $M$  为总的散射点数;  $k_i$  是各强散射点的散射系数;  $\phi_i$  为各强散射点的相移;  $f_{di}$  为各散射点的多普勒频率; 而  $t_i$  是各散射点相对于雷达的延迟(雷达至目标的距离)为<sup>[9]</sup>:

$$t_i = 2d_i/c \quad (4)$$

式中  $d_i$  为强散射点相对于雷达的距离;  $c$  为光速. 将此信号经过全去斜率混频器处理后, 把延迟  $\tau_0$  的信号式(1)和式(3)相互作卷积可以得出正交的  $I$  和  $Q$  分量的公式, 如下式所示的  $I$  分量:

$$U_{rI} = \sum_{i=1}^M k_i U_0 \text{rect}\left(\frac{t_i - \tau}{\tau}\right) \sin[j(2\pi(f_0 - f_{di})(t_i - \tau) + \pi \frac{B}{\tau}(t_i - \tau)^2 + \phi_i - \phi_0)] \quad (5)$$

而其  $Q$  分量表达式为:

$$U_{rQ} = \sum_{i=1}^M k_i U_0 \text{rect}\left(\frac{t_i - \tau}{\tau}\right) \cos[j(2\pi(f_0 - f_{di})(t_i - \tau) + \pi \frac{B}{\tau}(t_i - \tau)^2 + \phi_i - \phi_0)] \quad (6)$$

实际上实测的数据见图 1 所示. 图 1 的(a)所示数据为  $I$  支路所得数据, 而  $Q$  支路所得数据见(b), 按所得数据对其中一点进行距离测量是可以的, 但要进行距离跟踪是很困难的, 当然也可以采用其他的方法. 如在信号输出端加保持电路, 使其成为一定的形状后再进行跟踪, 经过研究这种方法是不行的. 其原因是经过保持电路所得波形也是很难实现跟踪, 且

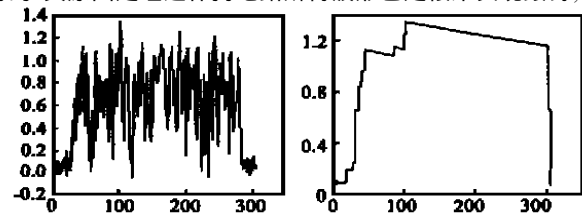


图 2 包络检波和采样保持波形图

跟踪精度很差. 采样保持电路后的波形见图 2 所示.

本文提出的一种方法是对目标回波进行子波变换. 子波变换是一个有力的数学工具, 已广泛应用于信号处理, 图像处理, 目标识别等领域. 连续子波变换, 首先可以认为是平方可积函数  $\Psi(t)$ , 也是  $\Psi(t) \in L^2(R)$  为一基本子波, 令

$$\Psi_{a,b}(t) = 1/|a|^{1/2} \Psi((t-b)/a), \quad a, b \in R, a \neq 0 \quad (7)$$

其中  $a$  为时频域中伸缩参数;  $b$  为时频域中平移参数. 因此其频谱的定义是:

$$W(a, b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (8)$$

式中  $f(t)$  是时域中函数, 经过子波变换后的频谱  $W(a, b)$ . 由于基本子波是由许多谱波合成. 在频谱上为一个频线区, 这很容易理解子波的一个特性.

本文采用子波变换的是快速算法(FWT)<sup>[8-10]</sup>. 其关键在于用级联滤波器组, 而不是用卷积运算实现子波变换. 采用子波变换方法如图 3 所示.

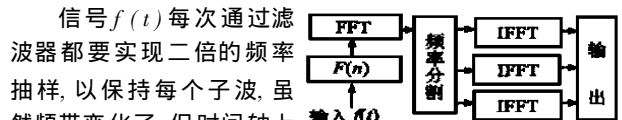


图 3 子波变换实现方框图

信号  $f(t)$  每次通过滤波器都要实现二倍的频率

抽样, 以保持每个子波. 虽然频带变化了, 但时间轴上的

采样数还是不变的. 这样

高频滤波器频带宽, 而低频

滤波器频带窄, 时间轴上采样数还是不变的, 从而实现了子波

变换有不同分辨率的要求. 起到了观察局部频带上信号波形

的显微镜作用.

用此方法所得低频频带的小波变换所得实际上的结果见

图 4.

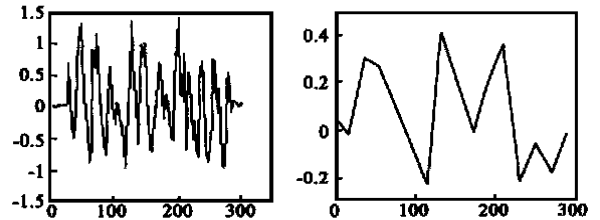


图 4 实测波形和子波变换后的波形图

如图 4、图 5 所示: 在子波变换后的信号波形, 可以区分目标的头部、中间部分和尾部. 只要在距离跟踪系统中所确定的头部与系统中前、后波门的关系就可以精确测量出目标头部至雷达之间的距离, 并实现了跟踪.

虽然目标运动时姿态变化, 但是实际测试波形表明: 输入信号经过子波变换后, 其目标的头部的位置和形状基本上是

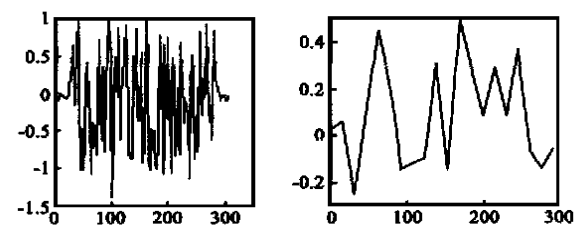


图 5 实测和子波变换后的波形图

稳定的. 因此雷达系统可以用这个方法实现距离跟踪.

### 3 总结

本文将高分辨雷达所得的波形采用子波变换方法, 得到其低频分量, 然后再将此子波变换波形实现距离跟踪. 此时, 不破坏其高分辨特性, 又充分得用其窄带跟踪的、稳定的、可靠的跟踪技术. 利用本方法可以省去窄带系统, 又可以提高测量距离的精度.

#### 参考文献:

- [ 1 ] B. D. Steinberg. Microwave imaging of aircraft [ J ]. IEEE, Dec. 1998, 76(12).
- [ 2 ] D. Barton. Radar System Design Analysis [ M ]. 1962.
- [ 3 ] P. K. Skolnik. Radar Handbook [ M ]. 1995.
- [ 4 ] P. K. Hughes. High resolution radar detection strategy [ J ]. IEEE, Sep. 1983, AES-19(5).
- [ 5 ] A. Farine. High resolution radar for enhanced target detection [ C ]. In: Radar, 92.
- [ 6 ] CIE/R 中国电子学会雷达分会. 雷达目标成像技术交流讨论会论文集 [ C ]. 1995, 11, 北京.
- [ 7 ] 陆林根. 高分辨雷达的目标自动检测器 [ J ]. 电子科学学刊, 1997, 3, 195.

- [ 8 ] P. M. Bentley. Wavelet transforms an introduction [ J ]. ECE Journal, 1994(8): 175- 186.
- [ 9 ] I. Danbaches. The wavelet transforms time-frequency localization and signal analysis [ J ]. IEEE, 1990, 36: 961- 1005.
- [ 10 ] 方子文, 沈庭芝, 朱少娟. 子波变换新方法 [ J ]. 系统工程与电子技术, 1998, 11: 11- 14.
- [ 11 ] 毛京红. 用子波变换提取目标回波波形特征 [ J ]. 系统工程与电子技术, 1996, 3: 16.
- [ 12 ] 焦李成, 保铮. 子波理论及其应用 [ J ]. 系统工程与电子技术, 1993, 11.

#### 作者简介:



陆林根 1936 年生, 1960 年毕业于苏联列宁格勒电工学院. 现任中国电子学会会士、电子学会理事和雷达委员会副主任、IEEE 高级会员. 主要从事雷达信号处理和系统设计的工作. 发表论文 40 多篇, 获航天部部级科技进步成果一、二等奖、国家科研成果三等奖. 1989 年评为研究员.

#### (上接第 21 页)

- [ 4 ] K. D. Singh and L. E. Holliday. Evaluation of MR/MEG/EEG coregistration strategies using Monte Carlo simulation [ J ]. Electroencephalography and clinical Neurophysiology, 1997, 102: 81- 85.
- [ 5 ] T. D. Lagerlund and F. W. Sharbrough. Determination of 10- 20 system electrode locations using magnetic resonance image scanning with markers [ J ]. Electroencephalography and clinical Neurophysiology, 1993, 86: 7- 14.
- [ 6 ] H. Buchner and M. Fuchs. Source analysis of median nerve and finger stimulated somatosensory evoked potentials: multichannel simultaneous recording of electric and magnetic fields combined with 3D MR tomography [ J ]. Brain topography, 1994, 6(4): 299- 310.
- [ 7 ] Seung Schik Yoo and C. R. G. Guttman. 3D Localization of surface 10 ~ 20 EEG electrodes on high resolution anatomical MR images [ J ]. Electroencephalography and clinical Neurophysiology, 1997, 102: 335- 339.
- [ 8 ] J. R. Ives and S. Warach. Monitoring the patients' EEG during echo planar MRI [ J ]. Electroencephalography and clinical Neurophysiology, 1993, 87: 417- 420.
- [ 9 ] H.-J. Huppertz and M. Otte. Estimation of the accuracy of a surface matching technique for registration of EEG and MRI data [ J ]. Elec-

- troencephalography and clinical Neurophysiology, 1998, 106: 409- 415.
- [ 10 ] B. Wang, C. Toro. Head surface digitization and registration: a method for mapping positions on the head onto magnetic resonance images [ J ]. Brain topography, 1994, 6(3): 185- 192.
- [ 11 ] P. J. Besl and N. D. McKay. A method for registration of 3D shapes [ J ]. IEEE transactions on Pattern analysis and machine intelligence, 1992, 14: 239- 256.
- [ 12 ] A. Gevins and P. Brickett. Beyond topographic mapping: towards functional anatomical imaging with 124 channel EEGs and 3-d MRIs [ J ]. Brain topography, 1990, 3(1): 53- 64.
- [ 13 ] C. R. Maurer, Jr and G. B. Aboutanos. Registration of 3D images using weighted geometrical features [ J ]. IEEE transactions on medical imaging, 1996, 15(6): 836- 849.
- [ 14 ] C. R. Maurer, Jr and R. J. Maciunas. Registration of head CT images to physical space using a weighted combination of points and surfaces [ J ]. IEEE transactions on medical imaging, 1998, 17(5): 753- 761.
- [ 15 ] S. Umeyama. Least squares estimation of transformation parameters between point patterns [ J ]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1991, 13(4): 376- 380.