

加权重排算法在多目标雷达信号分辨中的应用¹

李 勇 刘玉萍* 廉保旺 王永生 张 怡

(西北工业大学电子工程系 西安 710072)

* (北京航空航天大学理学院 北京 100084)

摘 要 该文应用一种加权重排算法,对多目标雷达信号的分辨进行了研究。此加权重排算法简单且容易实现,重排后的时频分布虽然失去了双线性,但保持了其它良好性质,特别是换回了对 Chirp 信号和冲击信号的准确定位。针对编队多目标雷达信号的线性调频特点,应用加权重排算法在权衡能量聚集性和消除重排振荡的同时,实现了对编队多目标雷达信号较佳分辨。

关键词 时频分析,加权重排算法,多目标雷达信号分辨

中图分类号 TN951

1 引 言

时频分布是分析时变和非平稳信号的有力工具。目前应用最多的时频分布是 Cohen 类的双线性时频能量分布。由于 Cohen 类分布是信号的二次函数,多元信号的 Cohen 类分布必然存在交叉项。交叉项的存在干扰真实信号的时频特征,使得对时频分布的分析解释变得困难。为了有效地抑制交叉项,并适用于各类信号,人们提出了许多核函数的设计方法^[1,2]。但核函数的平滑作用在减小交叉项的同时,对信号的自分量也产生了扩散作用,因而降低了对信号自分量时频分布的定位精度。要获得一个好的时频分布,目前大致有 3 种主要方法^[1]: 第一,将被分析信号分解成基本成分,再用这些基本成分的时频表示和作为被分析信号的时频表示。当这种分解方法较适合被分解信号时,便可获得具有较少交叉项的时频分布。第二,从交叉项特定的几何形状和振荡结构出发,使用图像处理的方法除去交叉项。若信号自分量和交叉项不重叠时,这种方法效果较好。第三,应用平滑函数,将某时频分布的交叉项移去或消除,再利用重排来增加信号自分量的时频聚集性。本文对多目标雷达信号先使用重排平滑伪 WVD 变换,根据多目标雷达信号的线性调频特点在重排算子中使用加权因子和比例因子,在权衡能量聚集性和消重排振荡的基础上,对多目标雷达信号进行了较好的分辨。

2 多目标编队雷达回波信号的数学模型

雷达运动目标的多普勒频率决定于雷达的波长 λ , 目标本身速度 V 以及目标飞行方向与雷达视线的夹角 β , 即

$$f_d = (2V/\lambda) \cdot \cos \beta \quad (1)$$

如图 1 所示, 设编队飞行时, 两架飞机的速度相同, 则它们回波的多普勒频差就取决于它们各自与雷达视线夹角 β 的不同。由图可知, $\beta_1 \neq \beta_2$, 且由两目标间距 d 和目标距离 R 所决定。一般情况下, $R \gg d$, 因此 β_1 与 β_2 的差别是很小的, 即两目标的多普勒频差很小。实际中作战飞机经常作机动飞行, 速度 V 不断变化, 因而不能保证每一目标的多普勒频率为常数。即使是恒速飞行的目标, 由于不同时刻其航向与雷达视线的夹角 β 在不断变化, 因而也不能保证每一目标的多普勒频率为常数。事实上每一目标回波的多普勒频率并不恒定, 而是时间

¹ 2001-02-11 收到, 2001-09-06 改回
航空科学基金资助 (项目编号: 98F53066)

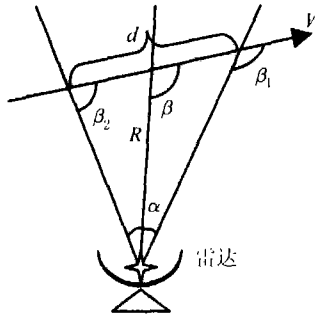


图 1 两目标多普勒频差图

的复杂函数。通过对雷达目标的多普勒频率 (假设目标的速度不变) 求导可得每一目标回波多普勒频率的变化为^[3]

$$\frac{df_d}{dt} = \frac{2V}{\lambda} \cdot (-\sin \beta) \cdot \frac{d\beta}{dt} \approx \frac{2V}{\lambda} \cdot (-\sin \beta) \cdot \left(\frac{V}{R} \sin \beta\right) \approx -[2V^2/(\lambda R)] \cdot \sin^2 \beta \quad (2)$$

对 (2) 式进一步分析可得目标多普勒频率变化的情况如下:

$$\begin{aligned} d^2 f_d / dt^2 &= -[2V^2/(\lambda R)] \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot d\beta / dt \\ &= -[4V^3/(\lambda R^2)] \cdot \cos \beta \cdot \sin^2 \beta \end{aligned} \quad (3)$$

如雷达参数: 波长 $\lambda = 0.3\text{m}$, 目标的飞行速度 $V=850\text{km/h}=236.11\text{m/s}$, 目标的间距 $d=100\text{m}$, 目标与雷达的距离 $R=100\text{km}$; 当 $\beta = \pi/2$ 时, $d^2 f_d / dt^2 = 0$, 即目标多普勒频率变化在目标沿雷达切向飞行时是线性的; 对于其它的角度值, $d^2 f_d / dt^2$ 也非常小, 它的最大值是在 $\text{tg} \beta = \sqrt{2}$ 处, 且最大值为 $d^2 f_d / dt^2|_{\max} = 0.0068\text{Hz/s}^2$.

对一般的 β 值有

$$\frac{d^2 f_d}{dt^2} / \frac{df_d}{dt} = \frac{2V}{R} \cos \beta \quad (4)$$

$$\frac{d^2 f_d}{dt^2} / \frac{df_d}{dt} |_{\max} = \frac{2V}{R} = 0.0047 = 0.47\% \quad (5)$$

由 (5) 式可知: 目标多普勒频率的变化对线形调频模型的偏差最大可达 0.47%。在短暂观测时间内, 多普勒频率变化一般为时间的低次函数。在很多情况下, 可用一次函数来近似, 即目标回波信号可近似看作是线性调频信号, 且目标的回波幅度也可认为是近似恒定的, 即编队多目标雷达回波信号可近似看作是多个频率相近, 幅度恒定的线性调频信号的线性组合。其数学模型可表示为

$$s(t) = \sum_i a_i \cdot \exp[j2\pi(b_i t + c_i t^2/2)], \quad 0 \leq t \leq T \quad (6)$$

式中 a_i 为信号的幅度, b_i 和 c_i 为初始频率和线性调频率, T 为观测时间。

3 重排方法用于多目标雷达回波信号

在双线性时频分布中, WVD(Winger-Ville Distribution) 分布具有良好的时频分辨率,

且满足绝大多数可取的时频特性, 但由于信号分量之间相互作用而产生了交叉项, 使得它在实际应用时受到限制. 尽管如此, 当人们使用低通滤波器时, 这些交叉项常常可以减少, 同时还能保持时频移不变性, 如下式:

$$\text{TFR}_x(t, w) = \frac{1}{2\pi} \iint \Phi_{\text{TF}}(u, \Omega) \cdot \text{WVD}_x(t - u, w - \Omega) \cdot du d\Omega \quad (7)$$

所示. (7) 式中 $\text{TFR}_x(t, w)$ 代表 $x(t)$ 的时频表示, 二维低通滤波器 $\Phi_{\text{TF}}(u, \Omega)$ 对 $\text{WVD}_x(t, w)$ 起平滑作用, 此平滑作用实际上是在时频面内将原 $\text{WVD}_x(t, w)$ 的所有值经 $\Phi_{\text{TF}}(u, \Omega)$ 加权后求平均. 这个平均将使在 $\Phi_{\text{TF}}(u, \Omega)$ 区间内摆动的交叉项减少, 同时信号自分量也扩展. 为保持此平均作用对交叉项的减少, 同时又能增加信号自分量的能量聚集性, 可采取的一种方法就是重排. 重排将点 (t, w) 处的 $\text{TFR}_x(t, w)$ 值重新安排到那些贡献能量的引力中心去, 引力中心对应的坐标为

$$kt(t, w) = t - \frac{\iint u \cdot \Phi_{\text{TF}}(u, \Omega) \cdot \text{WVD}_x(t - u, w - \Omega) du \cdot \frac{d\Omega}{2\pi}}{\iint \Phi_{\text{TF}}(u, \Omega) \cdot \text{WVD}_x(t - u, w - \Omega) \cdot du \cdot \frac{d\Omega}{2\pi}} \quad (8a)$$

$$kw(t, w) = w - \frac{\iint \Omega \cdot \Phi_{\text{TF}}(u, \Omega) \cdot \text{WVD}_x(t - u, w - \Omega) du \cdot \frac{d\Omega}{2\pi}}{\iint \Phi_{\text{TF}}(u, \Omega) \cdot \text{WVD}_x(t - u, w - \Omega) \cdot du \cdot \frac{d\Omega}{2\pi}} \quad (8b)$$

重排引起对时频表示 $\text{TFR}_x(t, w)$ 的重构, 重构后的时频表示为 $\text{MTFR}_x(t', w')$, 它在任意点 (t', w') 的值 $\text{MTFR}_x(t', w')$ 是所有原时频表示 $\text{TFR}_x(t, w)$ 的值移到该引力中心点 (kt, kw) 的和, 即

$$\text{MTFR}_x(t', w') = \iint \text{TFR}_x(t, w) \cdot \delta(t' - \hat{t}(t, w)) \cdot \delta(w' - \hat{w}(t, w)) \cdot dt dw \quad (9)$$

应注意, 重排的目的是通过在时频面内再分配它的能量来提高信号自分量尖峰定位的精确性, 因此当某点 (t, w) 处的 $\text{TFR}_x(t, w)$ 值为零时, 就没有必要再重排它. 同时也应注意, 如果平滑核 $\Phi_{\text{TF}}(u, \Omega)$ 是实值时, 由于 WVD 总是实值的, 则重排算子 (8a) 和 (8b) 式也应是实值的.

在所有可能 Cohen 类中, 平滑伪 WVD , (SPWVD , Smooth Pseudo WVD) 是最为通用的分布之一. 它具有较佳的消交叉项效果^[4], 因为它有一分离的核 $\Phi_{\text{TF}}(u, \Omega) = g(u) \cdot H(\Omega)$, 允许在时间和频率两方面独立地进行平滑调整, 则 (7) 式变形如下:

$$\begin{aligned} \text{SPWVD}_{g,h,x}(t, w) &= \text{TFR}_x(t, w) \\ &= \frac{1}{2\pi} \iint g(u) \cdot H(\Omega) \cdot \text{WVD}_x(t - u, w - \Omega) \cdot du \cdot d\Omega \\ &= \int h(\tau) \cdot gx(t, \tau) \cdot e^{-jw\tau} d\tau \end{aligned} \quad (10)$$

(10) 式是傅里叶变换的表达式, 将 (8a) 和 (8b) 式用 (10) 式表示如下:

$$kt(t, w) = t - \text{SPWVD}_{Tg,h,x}(t, w) / \text{SPWVD}_{g,h,x}(t, w) \quad (11a)$$

$$kw(t, w) = w + j\text{SPWVD}_{g,Dh,x}(t, w) / \text{SPWVD}_{g,h,x}(t, w) \quad (11b)$$

其中 $Tg(t) = t \cdot g(t)$ (乘积算子), $Dh(t) = h'(t) = dh(t)/dt$ (微分算子)

重排后的 SPWVD 称为 MSPWVD(Modified SPWVD), 表达式如下:

$$\text{MSPWVD}_{g,h,x}(t', w') = \frac{1}{2\pi} \iint \text{SPWVD}_{g,h,x}(t, w) \cdot \delta(t' - kt(t, w)) \cdot \delta(w' - kw(t, w)) \cdot dt dw \quad (12)$$

重排算法 MSPWVD 与 SPWVD 比较, 主要多了两个额外的傅里叶变换: $\text{SPWVD}_{Tg,h,x}(t, w)$ 和 $\text{SPWVD}_{g,Dh,x}(t, w)$, 可以采用快速傅里叶变换实现, 因而存在有效的快速算法。

将实测两目标编队雷达回波信号用 SPWVD 分布和 MSPWVD 分布处理, 从图 2 和图 3 可看出: 由于两目标多谱勒频差较小, 实测数据存在较大的噪声, SPWVD 分布的平滑作用, 已不能分辨此两目标; 从图 4 和图 5 可看出: MSPWVD 分布基本能分辨两目标, 但由于实测数据存在较大的噪声, 且因重排引力中心的存在, 重排不可避免地存在振荡现象, 这从它的立体图可明显看出。这不利于目标识别, 并且由于重排, 使得重排后的表示失去了双线性, 因此它不属于双线性表示的 Cohen 类, 但它仍然保持有原表示可取的其它特性, 如时频移不变性, 能量守恒性等。同时也可知, 重排后失去的仅仅是它的双线性, 并且换回了对 Chirp 信号和冲击信号的极好定位。

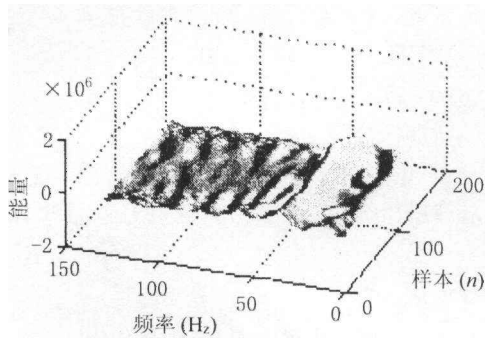


图 2 实测数据 SPWVD 立体图

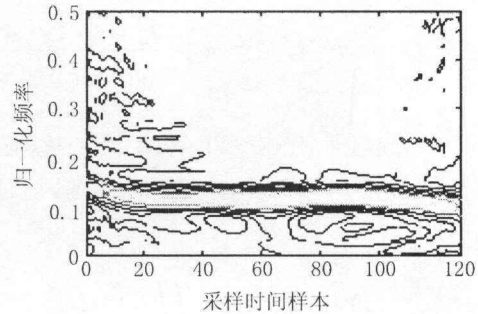


图 3 实测数据 SPWVD 平面图

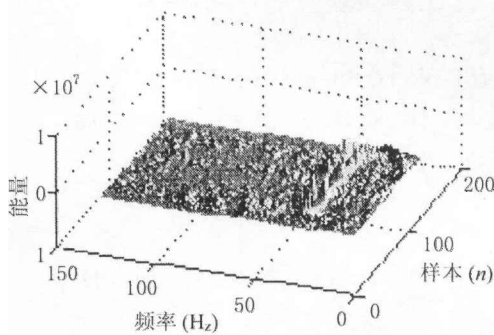


图 4 实测数据 MSPWVD 立体图

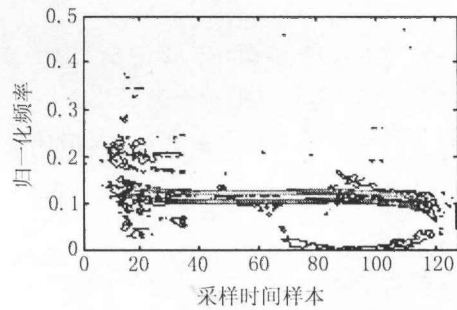


图 5 实测数据重排 SPWVD 平面图

4 加权重排方法用于多目标雷达回波信号

为了达到最佳分辨雷达目标架次的目的, 针对雷达回波信号的线性调频特点, 为权衡能量聚集和重排振荡, 在重排算子 (11a) 式中加一加权因子 A 为

$$kt(t, w) = t - A \cdot \text{SPWVD}_{Tg, h, x}(t, w) / \text{SPWVD}_{g, h, x}(t, w) \quad (13)$$

上式中加权因子 A 的大小决定着重排后整个能量的大小, 它和下面的比例因子 $B(E)$ 一起影响重排震荡的剧烈程度, 它的值可在 $(0, 1)$ 范围内选择。在重排 (12) 式中加一比例因子 $B(E)$, 根据原能量 E 的大小按比例地进行重排, 重排后的 (12) 式变形为

$$\text{MSPWVD}_{g, h, x}(t', w') = \frac{1}{2\pi} \iint B(E) \cdot \text{SPWVD}_{g, h, x}(t, w) \cdot \delta(t' - kt_x(t, w)) \cdot \delta(w' - kw_x(t, w)) \cdot dt dw \quad (14)$$

将加权 MSPWVD 应用于上述多目标实测数据, 为权衡能量聚集性与消重排振荡效果, 适当地调整加权因子 A 和比例因子 $B(E)$, 从图 6 和图 7 可看出: 加权 MSPWVD 不仅消交叉项效果较 MSPWVD 好, 且改善了信号自分量的能量聚集性和重排后时频面存在的振荡性问题, 因而利于达到最佳分辨雷达目标架次的目的。

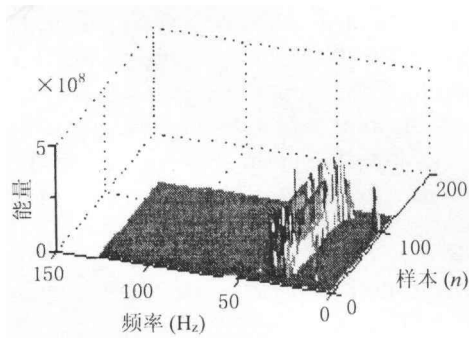


图 6 实测数据加权 MSPWVD 立体图

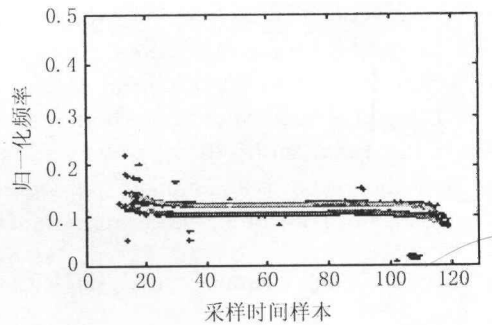


图 7 实测数据加权 MSPWVD 平面图

5 结 论

本文应用一种提高时频表示的加权重排方法, 此加权重排方法通过从它计算的点移掉这种表示的值到一能量引力中心来产生对原表示的修正。这种转移依赖于信号和表示本身, 从而使其失去了双线性, 但仍保持有原表示的许多特性。文中首先应用简单易实现的重排方法对多目标雷达回波信号进行分辨, 然后针对信号的线性调频特性, 提出了增加一加权因子和比例因子的加权重排算法, 将之应用于多目标雷达回波信号, 达到了良好的分辨效果, 从而证实了多目标雷达回波信号的线性调频数学模型, 同时也验证了加权重排方法确实具有改善能量聚集和消重排振荡的特性。

参 考 文 献

- [1] 张贤达, 保铮, 非平稳信号分析与处理, 北京, 国防工业出版社, 1998 年 9 月, 第 2 章.
- [2] K. Kodera, C. De Villedary, R. Gendrin, Analysis of time-varying signals with small BT values, IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1978, 34(1), 64-76.
- [3] 刘玉萍, 非平稳时频分析方法及其用于雷达目标识别的研究, [硕士论文], 西安, 西北工业大学, 2000 年 3 月, 第 4 章, 第 4 节.

- [4] F. Auger, P. Flandrin, Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(5), 1068-1089.

APPLICATION OF THE WEIGHT REASSIGNMENT METHOD TO MULTI-OBJECT RADAR SIGNAL RESOLUTION

Li Yong Liu Yuping* Lian Baowang Wang Yongsheng Zhang Yi

(Dept. of Electron. Eng., Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**(School of Science, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100034, China)*

Abstract In this paper, multi-object radar signals resolution is studied by using the weight reassignment method, which can easily be realized because of its fast algorithm and its simple structure. Although time-frequency distribution is not bilinear when the reassignment method is used, it exhibits some other good properties, especially its perfect localizing for chirp and impulse signals. Based on the linear frequency modulation model of radar signals, which are suit for using the reassignment method, real formation radar targets echo data is processed to obtain better radar multi-object classification. A number of experimental results are given to prove that the weight reassignment method can be used to improve time-frequency resolution and capability of restraining interference and noise.

Key words Time-frequency analysis, Reassignment method, Multi-object radar signals resolution

李 勇: 男, 1962 年生, 教授, 从事雷达信号处理和 DSP 的研究与开发.

刘玉萍: 女, 1964 年生, 讲师, 从事信号与信息处理方面的研究.

廉保旺: 男, 1962 年生, 教授, 从事通信系统、雷达信号处理和 DSP 的研究与开发.

王永生: 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 从事通信、导航、遥控方面的信息传输和信号处理的研究.

张 怡: 女, 1958 年生, 副教授, 从事通信技术和信号处理方面的研究.