

编队目标架次检测方法研究

石定杰, 姚佩阳, 杜钦峰

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:针对常规低分辨雷达无法直接在距离和方位上分辨同一批次中目标的缺陷,分析了编队目标雷达回波信号的时频特征,提出了一种基于平滑的伪 Wigner - Ville 分布来提取编队目标雷达回波中的架次信息的方法。该方法不仅能可靠检测目标架数,而且有一定的抗噪声和抗干扰能力。仿真试验验证了该方法的有效性,优于常规的 WVD 分布。

关键词:低分辨雷达;架次检测;时频分析

中图分类号:TN957.52 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)06-0040-04

编队飞行的机群,飞行间距一般在几十米到数百米之间,对于常规低分辨警戒雷达,难以在距离和方位上分辨出多个目标,因而只有设法在多普勒频域获得多目标分辨。但是飞机编队飞行造成的多普勒频率差别很小,为了提高多普勒频移分辨率,就必需较长的相关处理时间。可是飞行目标的多普勒频率是随时间变化的,在较长的观察时间内雷达目标回波信号是非平稳的,这样,基于传统傅立叶变换的多普勒分析方法的性能将会失效。

近年来新兴的时频分布是分析时变、非平稳信号的有力工具,它不仅能反映信号的频率分量,而且还可以反映这些频率分量随时间演变的规律。因此,利用时频分布方法对目标回波在多普勒域进行分析,可望实现多目标分辨^[1]。

1 编队目标雷达回波信号的时频特征

雷达目标回波的多普勒频率决定于雷达的波长 λ , 目标的速度 V 以及目标飞行方向与雷达视线的夹角 φ , 即:

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos\varphi \quad (1)$$

由于编队目标之间的间距很小,不同目标回波信号的多普勒频率差异很小。以两架编队飞行的目标为例,如图 1 所示。

假设编队飞行时,两架飞机的速度相同,则它们回波的多普勒频率的差别就取决于它们各自与雷达视线夹角的不同,即:

$$\Delta f_d = f_{d_1} - f_{d_2} = \frac{2V}{\lambda} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) \quad (2)$$

φ_1 与 φ_2 的差别是由两飞机的间距 d 和目标距雷达的距离 R 所决定的。一般有 $R \gg d$, 因此, φ_1 与 φ_2 的差别是很小的,进一步简化有:

$$\Delta f_d = f_{d_1} - f_{d_2} = \frac{2V}{\lambda} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) = \frac{2V}{\lambda} \left(-2\sin\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \cdot \sin\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \approx \frac{2V}{\lambda} \cdot \frac{d}{R} \cdot \sin^2\varphi \quad (3)$$

上式中,利用了当 $R \gg d$ 时, $\sin(\varphi_1 - \varphi_2) \approx \varphi_1 - \varphi_2 \approx -\frac{d}{R} \sin\varphi$, 其中 $\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ 是平均的雷达视线与飞

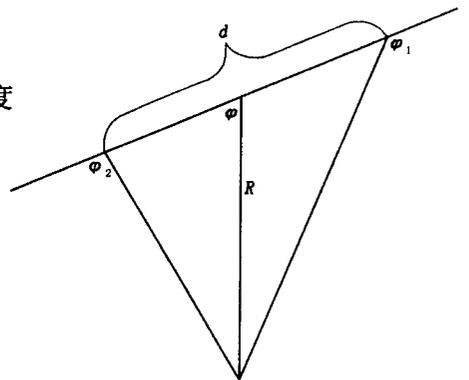


图 1 两编队飞机多普勒频差示意图

收稿日期:2003-06-11

作者简介:石定杰(1979-),男,湖南湘潭人,硕士生,主要从事飞机目标识别研究。

行方向的夹角。由上式可以看出,若 d 与 R 固定,则最大的多普勒频差发生在 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 时,即当目标沿切线方向飞过雷达时。 Δf_d 一般是很小的,以某警戒雷达为例,其波长 $\lambda = c/f = 0.3 \text{ m}$,若目标的飞行速度 $V = 850 \text{ km/h} = 236.11 \text{ m/s}$,目标间的距离 $d = 100 \text{ m}$,目标与雷达的距离 $R = 100 \text{ km}$,则最大多普勒频差($\varphi = \pi/2$ 时)为

$$\Delta f_{d \max} = \frac{2V}{\lambda} \cdot \frac{d}{R} \approx 1.574 \text{ Hz} \quad (4)$$

因此,在多普勒频率为常数的情况下,若要采用傅立叶变换来分辨这两个目标,则至少需要 $T = \frac{1}{\Delta f_{d \max}} = 0.635 \text{ s}$ 的目标回波信号。实际上,如果目标未沿切向飞行时所需的时间还要长。

实际中,由于作战飞机的高机动性(加、减速等),以及恒速飞行目标不同时刻与雷达视线夹角的变化,致使每个目标回波的多普勒频率呈现时变特性,其多普勒频谱发生扩展,从而降低了多普勒域的分辨力。目标回波多普勒的变化率为(假设目标速度不变)

$$\frac{df_d}{dt} = \frac{-2V}{\lambda} \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{2V}{\lambda} \sin \varphi \frac{d}{dt} \left(\frac{Vt}{R} \sin \varphi \right) \approx -\frac{2VV}{\lambda R} \sin^2 \varphi \quad (5)$$

由于 V/R 很小,上式中忽略了更高次的 V/R 项,式(5)表明,多普勒频率变化最快的方向也在 $\varphi = \pi/2$ 处,即目标作切向飞行时。仍以上述参数为例,当 $\varphi = \pi/2$ 时,

$$\left. \frac{df_d}{dt} \right|_{\max} = \frac{2V^2}{\lambda R} = 3.7 \text{ Hz/s} \quad (6)$$

这样在相关处理所需的 0.635 s 之内,目标自身的多普勒频率变化已达: $\left. \frac{df_d}{dt} \right|_{\max} \cdot T = 2.36 \text{ Hz}$,这已超过两目标间的多普勒频差,若不对上述多普勒频率的变化进行预处理,直接用傅立叶变换做谱分析,则两目标的频谱是连在一起的,想要分辨这两个目标是不可能的。一般对于任何的角度,在分辨目标所需的相关处理时间内,单一目标多普勒频率的变化为

$$\delta f_d = \frac{df_d}{dt} \cdot \frac{1}{\Delta f_d} = \frac{V}{d} \quad (7)$$

式(7)说明了在相关处理时间内,目标本身多普勒频率的变化只与目标的速度 V 及间距 d 有关,而与 φ 和 R 无关。这相当于在达到频率分辨所需相关处理时间内,目标的多普勒频率变化已达 V/d ,按上述参数为 2.36 Hz ,因此实际上傅立叶变换是很难分辨这两个目标的。

但是,在短暂的观察时间内,多普勒频率变化一般为时间的低次函数,在很多情况下可以用一次函数来近似,即在较短的观测时间内目标回波信号可以看作为线性调频信号。进一步分析目标多普勒频率变化的情况可得:

$$\frac{d^2 f_d}{dt^2} = \frac{4V^3}{\lambda R^2} \cdot \cos \varphi \cdot \sin^2 \varphi \quad (8)$$

仍以上述参数为例,当 $\varphi = \pi/2$ 时, $\frac{d^2 f_d}{dt^2} = 0$,即目标多普勒频率的变化是线性的。对其它 φ 值, $\frac{d^2 f_d}{dt^2}$ 也非常小,它的最大值是在 $\varphi = \pi/4$ 时, $\left. \frac{d^2 f_d}{dt^2} \right|_{\max} = 0.003 \text{ Hz/s}^2$ 。一般有:

$$\frac{d^2 f_d}{dt^2} / \frac{df_d}{dt} = \frac{2V}{R} \cos \varphi \quad (9)$$

式(9)说明目标多普勒频率的变化对线性调频模型的偏离最大可达 0.33% ,因此可以认为在相关处理时间内,用线性调频模型来描述多普勒频率是足够准确的^[2]。

2 时频分析方法研究

由以上分析可知,目标多普勒频率的变化率可用线性调频信号模型来近似描述,这样,可以借用时频分析对线性调频信号良好的分辨能力,在时频域实现对编队目标的分辨。

2.1 短时傅立叶变换(STFT)

STFT 定义为

$$\text{STFT}_s^h(t, \omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} s(\tau) h^*(\tau - t) d\tau \quad (10)$$

式中 $s(t)$ 是信号, $h(t)$ 是窗函数。

短时傅立叶变换是研究非平稳信号时广泛采用的方法,它是信号的线性时频表示,因而不存在交叉项干扰。但是,STFT 的分辨性能很大程度上依赖于窗函数的选择,一般都采用非振荡低通型窗函数,如高斯窗和汉宁窗。根据不确定性原理,它不可能同时提高信号的时间、频率分辨能力,而要在两者之间折衷,较长的窗函数具有较高的频率分辨性能,而时间分辨性能较差,反之亦然。

2.2 Wigner - Ville 分布

WVD 定义为

$$\text{WVD}_s(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int s^*(t - \frac{1}{2}\tau) s(t + \frac{1}{2}\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (11)$$

WVD 是 Cohen 类时频分布中基本的时频分布,它具有许多良好的数学特性,而被广泛应用在非平稳信号处理领域中。与传统的傅立叶变换相比,它的时频分辨率高。但是,由于 WVD 是信号的二次时频表示,对于非线性调制信号或多元信号,其 WVD 中必然存在严重的交叉项,干扰了在时频平面上对信号的观察和解释。

2.3 平滑的伪 Wigner - Ville 分布(SPWD)

在式(11)中,令 $t + \frac{1}{2}\tau = t'$, $\tau = 2(t' - t)$, $d\tau = 2dt'$ 代入后可得:

$$\begin{aligned} \text{WVD}_s(t, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \cdot 2 \int_{-\infty}^{+\infty} s^*(2t - t') e^{-j\omega \cdot 2(t' - t)} s(t') dt' = \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot 2 e^{j2\omega t} \int_{-\infty}^{+\infty} s^*[-(t' - 2t)] s(t') e^{-j2\omega t'} dt' = \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot 2 e^{j2\omega t} \text{STFT}_s^{(-t)}(2t, 2\omega) \end{aligned} \quad (12)$$

即 WVD 等价于以信号自身 $s(-t)$ 为窗函数,并对时间和频率轴都进行了 2 倍压缩的 STFT。最后还要乘上一个相移及幅度因子,但这些因子及尺度对时频分辨性能没有影响,在分析时可以不考虑。WVD 与 STFT 的等价性排除了一般认为它比 STFT 的分辨性能好的结论。WVD 可以看作是一种特殊的 STFT,但比通常的 STFT 具有更高的时频分辨性能,其原因在于通常的 STFT 在选择窗函数时没有考虑到信号的特点,而简单地选择了非振荡型的低通窗函数(如矩形窗、汉明窗等)。而 STFT 选择信号自身作为窗函数,这种窗函数对信号具有自适应的匹配性。可以将 SPWD 看成是在 WVD 和 STFT 之间的折衷,它采用了与 STFT 相似的较短的窗长,所不同的是它仍采用了截短后的信号作为窗函数,因此可以实现对信号的 Dechirping^[3]。

SPWD 定义为

$$\text{SPWD}_s(t, \omega) = \iint g(t - t') H(f - \omega') \text{WVD}_s(t', \omega') dt' d\omega' \quad (13)$$

由于 WVD 的交叉项在时间与频率两个方向上振荡,SPWD 的出发点就是在二维的时频平面上分别在时间和频率方向用两个独立的滤波器 $g(t)$ 和 $H(\omega)$ 对交叉项进行滤波。它一般不满足时、频边缘分布和时频有限支撑等性质,其频域核函数为

$$\psi_{\text{SPWD}}(t, \omega) = g(t) H(\omega) \quad (14)$$

SPWD 是在 WVD 的基础上进一步利用窗函数,在牺牲少量分辨力的前提下,抑制交叉项,达到分辨多元信号的目的。

3 实验仿真

例:两个线性调频信号之和的分辨

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) = A_1 e^{j\omega_1 t^2/2 + j\omega_0 t} + A_2 e^{j\omega_2 t^2/2 + j\omega_0 t} \quad (15)$$

其中,对信号采样 128 个点, $s_1(t)$ 的频率从 0.25 Hz 线性变化到 0.21 Hz, $s_2(t)$ 的频率从 0.35 Hz 线性变化

到 0.31 Hz。进行 STFT 变换时采用窗长为 23 个采样点的 Hamming 窗,进行 SPWD 变换时采用的时间平滑窗为 15 个采样点窗长的 Kaiser 窗,频率平滑窗为 63 个采样点窗长的 Kaiser 窗^[4]。实验结果如图 2 所示。

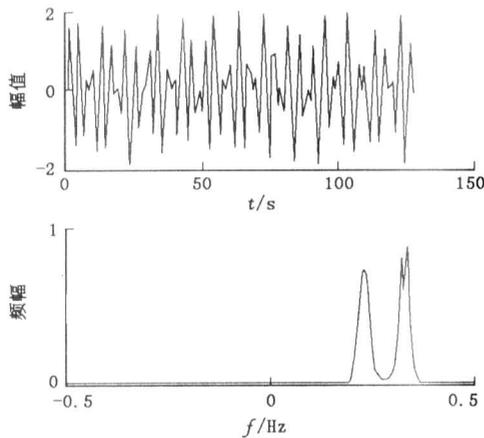


图 2(a) 信号的时、频域表示

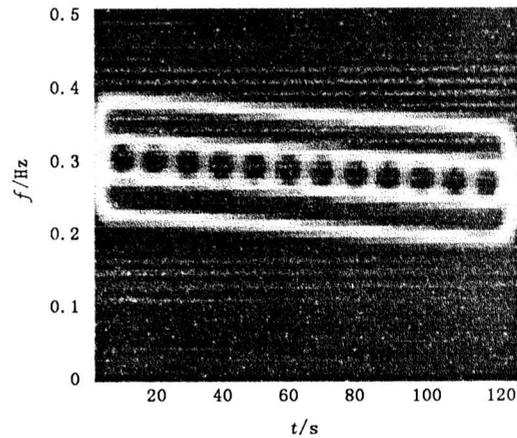


图 2(b) STFT 分布图

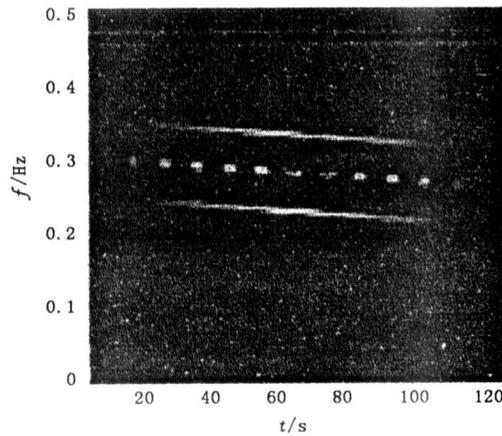


图 2(c) WVD 分布图

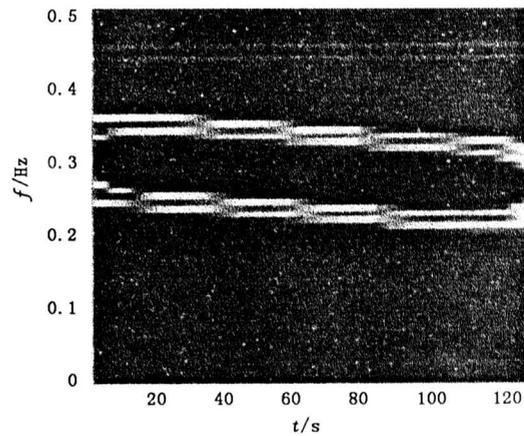


图 2(d) SPWD 分布图

分析:信号是由两个线性调频信号复合而成,它在时域和频域表示如图 2(a)所示,从上下两图都无法分辨出这两个分量,所以说传统的傅立叶变换已不能达到多目标分辨的目的。图 2(b)所示为信号经过短时傅立叶变换后的结果,可以大致看出信号的时频平面表示,但由于窗函数的选择导致时间分辨率和频率分辨率不可能同时到达最小,所以当频率差很小时就不能分辨多元分量。图 2(c)为信号的 WVD 分布,它的分辨率最好,但存在严重的交叉项,影响了多元分量的分辨。图 2(d)是信号的 SPWD 分布,它是短时傅立叶变换和 WVD 的折衷,牺牲了少量的分辨率来抑制交叉项,基本能分辨上述两个线性调频信号分量。

4 结束语

本文首先分析了编队目标雷达回波信号的时频特征,得出了在相关处理时间内,用线性调频模型来描述多普勒频率是足够准确的结论。随后又研究了几种时频分布,根据仿真实验结果证明了短时傅立叶变换分辨率低的缺点但不存在交叉项,WVD 有很高的分辨率但严重的干扰项影响了多元分量的分辨,因此提出了一种折衷方法,即 SPWVD,它既具有较高的分辨率又很好地抑制了交叉项。所以,在编队目标架次检测中利用 SPWVD 能可靠地进行多目标分辨且有一定的抗干扰能力,具有很强的实际意义。

参考文献:

- [1] Chen V C, Qian S. Joint Time - Frequency Transform for Radar Range - Doppler Imaging[J]. IEEE trans. AES, 1998, 34(2): 486 - 499.

[3] 梁虹. 信号与系统分析及 MATLAB 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2002.

(编辑:姚树峰)

A Method of DFT Fast Hardware Realization with CPLD

HE Wei¹, YANG Bao - qiang², TANG Bin¹

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China; 2. The training Department of Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

Abstract: By exploring the coefficients of the discrete Fourier transform (DFT), a method of DFT fast hardware realization by using CPLD devices is proposed in this paper. 8 - point DFT realization by using this method takes about 200ns.

Key words: DFT; CPLD; fast realization

(上接第 43 页)

[2] 姬红兵,高新波,谢维信. 一种编队目标架次检测方法[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(6):62-65.

[3] Cohen L. Time - Frequency Analysis: Theory and Applications[M]. America:Prentice Hall,1995.

[4] 胡昌华. 基于 Matlab 的系统分析与设计—时频分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.

(编辑:门向生)

A Study of Methods in Identifying Targets Sortie in Formation

SHI Ding - jie, YAO Pei - yang, DU Qin - feng

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: In view of the defect that a conventional low - resolution radar fails to directly resolve targets flying in formation in both range and azimuth, the radar echo signals of multi - targets in formation are analyzed for time - frequency characteristics. A method is proposed, which is used for extracting the sortie information from the formation target radar echo on the basis of smoothed pseudo - WVD distribution, and such a method is used not only for identifying target sortie number reliably, but also for resisting noise and interference. The experimental results illustrate that the efficiency of the method is superior to that of the conventional WVD distribution.

Key words: low - resolution radar; target sortie identification; time - frequency analysis