

LFM 脉冲雷达回波 Doppler 与多径时延的联合估计

田孝华, 廖桂生, 吴云韬

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 基于最大似然参数估计, 本文提出了一种对 LFM 脉冲雷达回波 Doppler 频移和多径时延联合估计的方法。该方法先利用 WHT 估计 Doppler 频移, 然后结合发射信号的先验知识重构参考信号, 最后利用 WVD 能将时间上有重叠的多径信号在时频域分开的特性, 采用本文称之为“修正时频相关函数”估计多径时延。该方法只需一个周期的脉冲信号就能完成频移和时延的联合估计, 对加性高斯白噪声具有强的鲁棒性, 其运算量小。

关键词: LFM 信号; Wigner-Ville 分布; Wigner-Hough 变换; 时频相关函数

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0852-04

Joint Estimation of Doppler and Multipath Time Delay of Overlapping Echoes for LFM Pulse Radar

TIAN Xiaohua, LIAO Guisheng, WU Yuntao

(Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: A new method for estimating the Doppler and multipath time delay of the overlapping echoes for LFM pulse radar by only one period pulse signal is presented. First, the Doppler frequency is estimated by Wigner-Hough transform. Then, a reference signal is reconstructed using the prior knowledge of the transmitted signal and the frequency parameters. Finally, using the property that Wigner-Ville distribution can separate each echo from overlapping echoes in time-frequency plane, the multipath time delay is obtained by a so-called “the modified time-frequency correlation function” proposed in this paper. The proposed method is characterized by the stronger robustness of additive Gaussian noise and the lower computational cost.

Key words: linear frequency modulated (LFM) signal; Wigner-Ville distribution; Wigner-Hough transform; time-frequency correlation function

1 引言

脉冲雷达采用具有大时宽带宽积的 LFM 信号来增加探测距离, 同时保证高分辨力。雷达收到的回波信号实际上是一个具有 Doppler 频移的多径分量相迭加的信号。Doppler 频移与多径分量不仅包含有目标的重要信息, 而且对多径分量的积累可以有效提高信噪比, 改善雷达的检测能力。通常雷达对 Doppler 频移的估计是采用最大似然准则使互相关函数最大来完成的。这种方法在回波中含有多径分量时由于多径分量在时间上的重叠使估计结果会出现较大误差。文献[2]提出用 MUSIC 方法对回波信号的多径时延进行估计, 它需要对多个周期的脉冲进行处理, 并且只适用于平稳信号。

能给出信号时频结构的时频分布是研究非平稳信号的一种最直接而且非常有效的工具。LFM 信号是一种非平稳信号, 虽然单分量 LFM 信号的 WVD 具有理想的聚集性, 而且采用 WVD 也能将在时间上有部分重叠的多径分量有效区分, 但是严重交叉项的存在使得直接用 WVD 估计回波信号的参数变

得十分困难。为了抑制交叉项的影响, 本文提出了利用 WHT 对一个周期的回波进行处理来实现 Doppler 频移的估计, 然后结合发射信号的持续时间, 重构一个参考信号, 最后利用 WVD 能将时间上有重叠的多径信号在时频域分开的特性, 采用本文称之为“修正时频相关函数”对多径时延进行有效估计。

2 信号模型及相关公式

2.1 信号模型

设 LFM 脉冲雷达发射的信号是线性频率调制的周期为 T 、幅度为 A 的矩形脉冲串, 脉冲持续时间为 T_A , 则一个周期的脉冲信号为:

$$s(t) = \begin{cases} Ae^{j(2\pi f_i t + \pi g_t t^2 + U_0)}, & 0 \leq t \leq T_A \\ 0, & T_A \leq t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

式中 U_0 为初始相位, (f_i, g_t) 为 LFM 信号的频率参数, f_i 为初始频率, g_t 为调频率。雷达收到的回波信号是具有 Doppler 频移的多径分量的迭加。设多径数为 L , 以收到第 1 条多径的起

始时间为参考,多径分量的延迟时间为 S_1, S_2, \dots, S_L , 且 $0 = S_1 \leq S_2 \leq \dots \leq S_L$, 则收到的信号为:

$$x(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^L A_i A e^{j(2\pi f_r(t-S_i) + P_{g_i}(t-S_i)^2 + U_i)} + n(t), & 0 \leq t \leq T_A + S_L \\ n(t), & T_A + S_L \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

式中 A_i, U_i 为第 i 条多径的增益和随机相位, (f_r, g_r) 为接收信号的频率参数, $n(t)$ 为高斯白噪声.

2.1.2 最大似然估计与 WVD 的关系

最大似然估计是雷达对回波参数进行估计的一种最佳估计. 设雷达发射信号为 $s(t)$, 接收回波 $x(t)$ 仅受加性高斯噪声影响, 待估参数为 H . 观察时间为 $[0, T]$, 则 $x(t)$ 为:

$$x(t) = s(t; H) + n(t) \quad (3)$$

式中 $n(t)$ 为均值为 0, 功率谱密度为 $N_0/2$, 方差为 R_n^2 的高斯白噪声. 对于给定的数据序列 $x(t_n)$, $n = 1, 2, \dots, N$, 我们利用噪声 $n(t)$ 的统计特性, 采用最大似然准则估计参数 H . 定义条件概率密度函数 $p(x/H)$ 为似然函数 $L(x; H)$, 参数 H 通过使 $L(x; H)$ 最大来获得. 由于 $n(t_n)$, $n = 1, 2, \dots, N$ 是独立的高斯白噪声, 则有:

$$\begin{aligned} L(x; H) &= p(x/H) = \frac{1}{(2\pi R_n^2)^{N/2}} \exp\left\{-\frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^N |x(t_n) - s(t_n; H)|^2\right\} \\ &= \frac{1}{(2\pi R_n^2)^{N/2}} \exp\left[-\frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^N |x(t_n)|^2\right] \exp\left[-\frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^N |s(t_n; H)|^2\right] \\ &\quad \exp\left[\frac{2}{N_0} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^N x(t_n) s^*(t_n; H)\right] \\ &= K e^{-E_s/N_0} e^{2\operatorname{Re}(y)/N_0} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{式中 } K = \frac{1}{(2\pi R_n^2)^{N/2}} \exp\left[-\frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^N |x(t_n)|^2\right]$$

$$E_s = \sum_{n=1}^N |s(t_n; H)|^2 = \text{信号能量}$$

$$y = \sum_{n=1}^N x(t_n) s^*(t_n; H) = \text{相关函数}$$

由上可见, 如果能量 E_s 不取决于 H (如单分量线性调频信号), 则使 $L(x; H)$ 最大的 H 也就是使相关函数 y 最大的 H . 又由于使 y 最大的 H 与使 $|y|^2$ 最大的 H 相同. 因此, 我们可以使 $R(x; H)$ 最大来得到 H . $R(x; H)$ 定义为:

$$R(x; H) = |y|^2 = \left| \sum_{n=1}^N x(t_n) s^*(t_n; H) \right|^2 \quad (5)$$

Moyal 公式^[3] 给出了 WVD 与 $R(x; H)$ 的关系:

$$\left| \sum_{n=1}^N x(t_n) s^*(t_n; H) \right|^2 = \int \int WVD_x(t, f) WVD_s^*(t, f; H) dt df \quad (6)$$

式中 $WVD_x(t, f)$ 与 $WVD_s(t, f; H)$ 分别表示 $x(t)$ 的 WVD 和 $s(t; H)$ 的 WVD (WVD 的定义见式(8)). 设在 $0 \leq t \leq T$ 之外 $s(t)$ 和 $s(t; H)$ 为 0. 时频相关函数 (TFCF) 定义为:

$$\text{TFCF}(H) = \int \int WVD_x(t, f) WVD_s^*(t, f; H) dt df \quad (7)$$

如果 $x(t)$ 仅仅受高斯白噪声影响, 则使 $\text{TFCF}(H)$ 最大的 H 值与使 $R(x; H)$ 最大的 H 值相同. 但对于接收的在时间上有重叠的多径 LFM 信号来说, 采用使 $R(x; H)$ 最大来得到 H 将会产生较大误差 (E_s 依赖于 H), 而 WVD 能将在时间上有重叠的多径 LFM 信号在时频域有效区分. 如果 WVD 中的交叉项

能得到较好抑制, 则采用使 $\text{TFCF}(H)$ 最大来估计 H 将会达到较好效果.

2.1.3 Wigner-Ville 分布和 Wigner-Hough 变换

Wigner-Ville 分布 (WVD) 是应用最广泛的一种时频分布, 具有许多优良特性^[3]. 它能同时描述信号在不同时间和不同频率的能量密度或强度. Wigner 在研究量子力学时提出的这种分布为^[3]:

$$WVD_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{S}{2}\right) x^*\left(t - \frac{S}{2}\right) e^{-j2\pi f S} dS \quad (8)$$

离散时间的 WVD 为^[3]:

$$\text{DTWVD}_x(n, f) = 2T \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(n + kT) x^*(n - kT) e^{-j2\pi f kT} \quad (9)$$

Wigner-Hough 变换 (WHT) 是由 S Barbarossa 提出的一种将 WVD 与 HT 相结合的一种变换^[4]. 它可有效抑制 WVD 中交叉项的影响. 最初用于分析多分量 LFM 信号^[4], 后来 S Barbarossa 将 WHT 推广, 用于分析瞬时频率服从一般变化规律的信号^[5]. LFM 信号的 WHT 为^[4]:

$$\begin{aligned} \text{WHT}_x(f, g) &= \int \int WVD_x\left(t, f + \frac{g}{2}\right) e^{-j2\pi(f+g)t} dt \\ &= \int WVD_x(t, f + \frac{g}{2}) dt \end{aligned} \quad (10)$$

对 LFM 信号以大于两倍的 Nyquist 速率采样, 得到的采样序列 $x(n)$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ (N 为偶数) 的离散 WHT 为^[4]:

$$\begin{aligned} \text{DTWHT}_x(f, g) &= \sum_{n=0}^{N/2-1} \sum_{k=-n}^n x(n+k) x^*(n-k) e^{-j2\pi(f+g)n} \\ &\quad + \sum_{n=N/2}^{N-1} \sum_{k=n-N+1}^{N-1-n} x(n+k) x^*(n-k) e^{-j2\pi(f+g)n} \end{aligned} \quad (11)$$

3 雷达回波 Doppler 频移与多径时延的联合估计

3.1.1 Doppler 频移的估计

LFM 脉冲雷达发射信号的频率参数 (f_t, g_t) 是已知的, 对回波 Doppler 频移估计可通过对回波频率参数的估计来实现. 由于回波信号是在时间上有重叠的多径信号的迭加, 本文采用 WHT 对 LFM 信号的频率参数进行估计, WHT 每一点的值 $\text{WHT}_x(f, g)$ 是对 $x(t)$ 的 WVD 沿直线 $f_0(t) = f + gt$ 积分得到的, 而 LFM 信号的 WVD 聚集在直线 $f_0(t) = f_r + g_r t$ 上. 因此, LFM 信号的 WHT 在 (f_r, g_r) 点将有最大值. 通过检测 $\text{WHT}_x(f, g)$ 峰值可实现回波信号频率参数的估计, 令估计值为 (\hat{f}_r, \hat{g}_r) .

采用 WHT 估计接收信号的频率参数具有以下优点: (1) WHT 利用了 LFM 信号的 WVD 在时频面的特点, 沿直线积分进行峰值检测, 仅仅这条直线的噪声对每一点的值 $\text{WHT}_x(f, g)$ 有影响. 因此, WHT 比 WVD 对噪声更具有鲁棒性; (2) 虽然 WHT 与所有非线性变换一样具有门限效应, 但 WHT 的门限值与采样数成反比^[4], 在低信噪比下可通过增加采样数来降低门限; (3) WHT 对估计参数性能的改善是以增加运算量为代价的. 对于发射信号频率参数 (f_t, g_t) 已知的 LFM 脉冲雷达来说, 可利用发射信号的频率参数来减小运算量. 即在时频面沿直线 $f_0(t) = f + gt$ 积分时, (f, g) 只选择以 (f_t, g_t) 为中心、偏移量为 $(\Delta f, \Delta g)$ 区域内的值. 偏移量由目标的最大运动速

度及最大加速度决定。

3.1.2 多径时延的估计

为了估计回波的多径时延,利用发射信号的持续时间 T_A 及估计的频率参数 (f_r, g_r) 重构一幅度为 1 的参考信号。

$$s_r(t) = \begin{cases} e^{j(2\pi f_r t + \pi g_r t^2)}, & 0 \leq t \leq T_A \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

由于 WVD 能将时间上有重叠的多径回波在时频面有效区分,因此可利用时频相关函数 TFCF(S) 来估计多径时延。但对于每一个时延的时频相关函数值都需要在整个时频面积分才能得到,运算量相当大。为了使运算量减小,根据 LFM 信号的 WVD 在时频面的特点,本文提出了一种修正时频相关函数的概念,并利用修正时频相关函数对多径时延进行估计。

设待估的多径时延为 S, LFM 信号的频率参数为 (f, g) , $x(t)$ 和 $s_r(t)$ 的 WVD 为 $WVD_x(t, f)$ 和 $WVD_{s_r}(t, f)$, 则 LFM 信号的修正时频相关函数(MFICF)定义为:

$$F(S) = \int_0^{T_A} WVD_x(t + S, f + g t) WVD_{s_r}(t, f + g t) dt \quad (13)$$

序列 $x(n)$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ (N 为偶数) 的离散修正时频相关函数为:

$$DIF(S) = \sum_{n=0}^{N-1} DIWVD_x(n + S, f + g n) DIWVD_{s_r}(n, f + g n), \quad S = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (14)$$

式中 $DIWVD_x(n, f + g n)$ 、 $DIWVD_{s_r}(n, f + g n)$ 分别为多径信号 $x(t)$ 、参考信号 $s_r(t)$ 的离散 WVD。为了计算每一时延对应的 $F(S)$ 值,首先对每一个离散时间 n ,只取与参考信号 $s_r(t)$ 瞬时频率 $f + g n$ 对应的 $DIWVD_{s_r}(n, f + g n)$ 与多径信号 $x(t)$ 在 $n + S$ 时刻对应频率点 $f + g n$ 的 $DIWVD_x(n, f + g n)$ 相乘,然后将 n 从 0 到 $N-1$ 的每一时刻的乘积值相加即可。

采用修正时频相关函数估计多径时延有以下特点: (1) 由于 WVD 能将在时间上有重叠的多径 LFM 信号在时频域有效

区分,采用时频相关函数估计多径时延将会得到较好效果; (2) 对于时刻 n ,不是取所有频率点的 $DIWVD$,而仅取一个频率点的 $DIWVD$ 计算 $F(S)$,运算量大大减小; (3) 各条多径信号的 WVD 聚集在相互平行的瞬时频率线上。尽管交叉项也聚集在平行的频率线上,但由于交叉项是调幅的,且均值为零,而自项沿瞬时频率线均为正,因此对 $F(S)$ 的峰值搜索,可实现多径时延的估计; (4) 每一时延的修正时频相关函数值是沿直线进行相关,然后迭加得到的,对噪声更加具有鲁棒性; (5) 对于干扰信号来说,由于其时频聚集性与多径信号的时频聚集性规律不同,因此 $F(S)$ 不会有虚假的峰值出现。

3.1.3 联合估计算法步骤

(1) 用式 (9) 计算回波采样序列 $x(n)$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ (N 为偶数) 的离散 WVD。

(2) 用式 (11) 计算 $x(n)$ 的离散 WHT, 通过对 $DIWHT_x(f, g)$ 峰值检测实现回波信号频率参数的估计 (f_r, g_r) , 并计算回波的 Doppler 频移: $f_d = (f_t - f_r) + (g_t - g_r)t$

(3) 根据估计的频率参数及发射信号的脉冲持续时间按式 (12) 重构参考信号 $s_r(t)$ 。

(4) 采用修正时频相关函数式 (14) 估计多径时延。

4 仿真分析

为了验证上述算法的有效性,用计算机对几种典型情况进行了仿真。设接收的 LFM 信号参数为: $(f, g) = (0.14, 0.04)$, 持续时间为 $T_A = 150T_s$, 采样数据长度为 200, 采样间隔 T_s 为 0.17。

例 1 图 1 给出的是在只有加性高斯噪声条件下对 LFM 脉冲雷达回波参数的估计。回波由四条多径组成, 时延分别为 0, 10 T_s , 35 T_s 和 50 T_s , 每条多径信号的信噪比均为 -3dB。(a) 是回波的离散 WVD, (b) 是离散 WHT, (c) 是用修正时频相关函数进行搜索的结果。

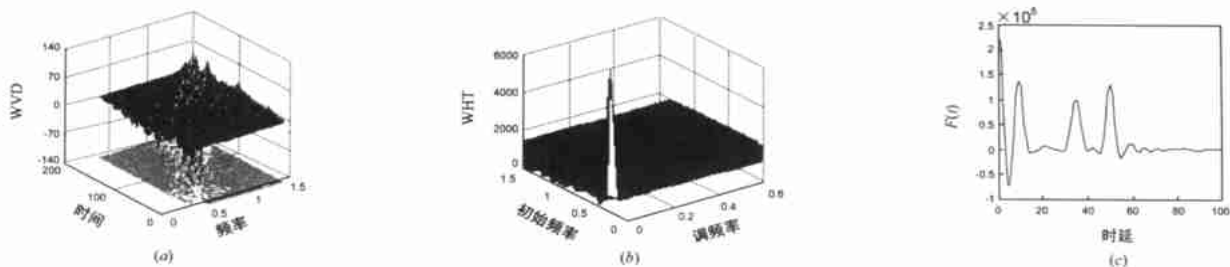


图 1 仅存在高斯白噪声条件下由四条多径迭加而成的 LFM 回波频率参数和多径时延的估计

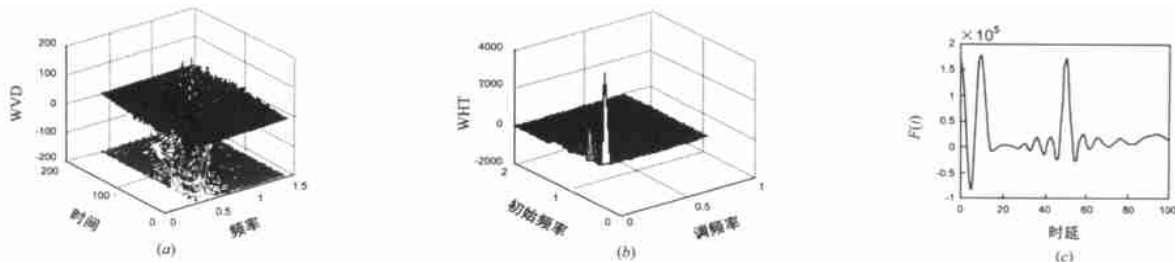


图 2 在高斯白噪声和干扰条件下由三条多径迭加而成的 LFM 回波频率参数和多径时延的估计

例2 图2给出的是存在加性高斯噪声和干扰时对 LFM 脉冲雷达回波参数的估计. 接收干扰信号参数为: $(f, g) = (0.4, 0.02)$, 持续时间为 $T_A = 150T_s$, 延迟时间为 $35T_s$, 干噪比为 -3dB . 希望得到的信号由三条多径组成, 时延分别为 $0, 10T_s, 50T_s$. 每条多径信号的信噪比均为 -3dB , 其余参数与例1相同. (a) 是离散 WVD, (b) 是离散 WHT, (c) 是用修正时频相关函数进行搜索的结果.

从仿真结果可以看出: (1) 多径信号的 WVD 中交叉项的存在使得直接用 WVD 估计信号的频率参数十分困难, 而采用在时频面沿直线积分的 WHT 有助于抑制 WVD 中的交叉项. 因此, 用 WHT 估计信号的频率参数能得到较好结果; (2) 由于干扰与信号频率参数的差异, 在干扰延迟时间处未出现峰值. 通过对修正时频相关函数峰值搜索可以准确估计希望信号的多径时延.

5 结论

本文提出了一种对 LFM 脉冲雷达回波 Doppler 频移和多径时延进行联合估计的方法. 该方法利用 WHT 对 Doppler 频移进行估计, 为了估计多径时延, 本文提出了修正时频相关函数的概念, 并利用修正时频相关函数估计多径时延. 该方法只需一个周期的脉冲信号, 对加性高斯白噪声具有强的鲁棒性, 运算量小. 仿真结果验证了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] 丁鹭飞, 张平. 雷达系统 [M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1984.

- [2] A M Bruckstein, T J Shan, T Kailath. The resolution of overlapping echos [J]. IEEE Trans 1985, ASSP23(6): 1357- 1367.
- [3] Leon Cohen. Time-Frequency Analysis: Theory and Applications [M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1995.
- [4] S Barbarossa. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform [J]. IEEE Trans, 1995, SP243(6): 1511- 1515.
- [5] S Barbarossa, O Lemoine. Analysis of nonlinear FM signals by pattern recognition of their time-frequency representation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1996, 3: 112- 115.

作者简介:



田孝华 男, 1965 年 10 月生于湖南石门, 西安电子科技大学博士生, 1989 年获空军电讯工程学院无线电导航工程专业学士学位, 1992 年获电子科技大学通信与电子系统专业硕士学位, 获军队科技进步三等奖两次. 感兴趣的研究方向为阵列信号处理、非平稳信号处理及移动通信等.



廖桂生 男, 1963 年生于广西, 教授, 博士生导师, 1992 年获西安电子科技大学博士学位, 1999 年 11 月至 2000 年 11 月为香港中文大学高级访问学者, 主要从事统计信号处理、子波变换和神经网络及其在雷达、通信中的应用研究.