

基于循环相关的 LFM 脉冲雷达宽带回波 Doppler 和多径时延的联合估计

史建锋^{①②} 王可人^①

^①(电子工程学院 合肥 230037)

^②(北京军代局 北京 100042)

摘要: 基于循环相关特性, 该文提出了针对线性调频(LFM)脉冲雷达宽带回波 Doppler 和多径时延联合估计的方法。该方法首先利用雷达回波的循环相关变换, 通过多径分量的能量累积估计 Doppler 频移尺度参数, 然后结合发射信号的先验信息构造降阶函数, 将回波信号降为多个单频信号, 最后利用零频率截面循环谱能够将时间上有重叠的多径回波信号在该截面上分开且分辨率加倍的特性, 估计出各多径分量的时延值。该方法只需要一个脉冲信号即可完成 Doppler 和多径时延的联合估计, 对低信噪比噪声有较强的容忍性, 能抑制各径相关交叉项的影响, 并且具有较高的多径时延估计分辨率。文中给出了计算机仿真实验, 仿真结果表明了该算法的有效性。

关键词: 循环相关; 循环谱; 线性调频信号; 多径; 参数估计

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1736-04

Joint Estimation of Doppler and Multipath Time Delay of Wideband Echoes for LFM Pulse Radar Based on Cyclic Correlation

Shi Jian-feng^{①②} Wang Ke-ren^①

^①(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

^②(Beijing Military Representative Department, Beijing 100042, China)

Abstract: A new method based on cyclic-correlation character for estimating the Doppler and multipath time delay of the wideband echoes for LFM pulse radar by only one pulse signal is presented. First, the Doppler is estimated by energy cumulation of multipath component based on cyclic-correlation transform. Then, an order-reduced signal is reconstructed combining the Doppler with the prior knowledge of the transmitted signal, and the echoes signal is converted to many single-frequency signals. Finally, the multipath time delay is obtained by zero-frequency section cyclic-spectrum where the overlapping echoes can be separated and the resolution is doubled. The method is adapted for low SNR noise, can restrain the affection of the cross-items, and has a high time-delay estimation resolution. Some computer simulations are given in this paper and the results show that the new method is valid.

Key words: Cyclic-correlation; Cyclic spectrum; LFM signal; Multipath; Parameter estimation

1 引言

对 LFM 脉冲雷达回波信号的 Doppler 频移和多径时延的估计问题, 是雷达、声纳信号处理中的热门课题。许多学者进行了大量的研究^[1-3], 文献[1]基于最大似然参数估计方法, 提出了对 LFM 脉冲雷达回波信号的 Doppler 频移和多径时延联合估计方法, 该方法利用 WHT 估计 Doppler 频移, 利用“修正时频相关函数”估计多径时延; 文献[2]提出了基于接收信号与发射信号 XWVD 峰值估计的方法, 通过估计回波信号的瞬时频率来直接得到瞬时 Doppler 频移的估计值; 文献[3]则在文献[1]的基础上基于自适应核时频分布, 利用 WVD 峰值法及 RWT 法对 Doppler 频移和多径时延进行估计。以上方法都能解决相关参数的估计问题, 然而这些方法都是建立在将 LFM 脉冲雷达回波信号建模为一般的非平稳信号基础之上

的。

其实在非平稳信号中存在一类非常特殊的信号, 即它们具有循环相关特性, 这类信号被称之为循环平稳信号^[4]。利用循环相关特性解决信号处理中的一些问题, 具有适用低信噪比情况以及频率分辨率高等优点^[5]。LFM 信号就具有循环相关特性^[6], 可建模为循环平稳信号。目前, 利用循环相关特性解决 LFM 脉冲雷达回波信号的 Doppler 频移和多径时延估计参数估计问题的研究较少。本文将 LFM 信号建模为循环平稳信号, 为了抑制多径的相互影响, 根据回波信号的循环相关性, 运用多项式的最小二乘曲线拟合方法对 Doppler 频移进行估计, 然后结合发射信号的先验信息, 重构一个降阶函数, 最后利用零频率截面的循环谱将时间上有重叠的多径信号分开, 得到多径时延的有效估计。文中第 2 节简介了信号循环平稳特性; 第 3 节给出了观测信号模型; 第 4 节给出了联合估计算法原理; 然后运用计算机进行了仿真实验。

2 循环相关变换

令 $x(t)$ 为一个零均值的非平稳复信号, $x(t)$ 的时变相关函数定义为

$$R_x(t, \tau) = E\{x(t)x^*(t + \tau)\} \quad (1)$$

若 $y_r(t) = x(t)x^*(t + \tau)$ 的统计特性具有周期为 T_0 的周期性, 则可用时间平均将相关函数表示为

$$R_x(t, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N + 1} \sum_{n=-N}^N x(t + nT_0)x^*(t + nT_0 + \tau) \quad (2)$$

显然 $R_x(t, \tau)$ 具有周期性, 因此我们可以用 Fourier 级数将它展开, 其 Fourier 系数为

$$R_x^\alpha(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{+T_0/2} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 可得

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{Z \rightarrow \infty} \frac{1}{Z} \int_{-Z/2}^{+Z/2} x(t)x^*(t + \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (4)$$

以上变换即为循环相关变换, 系数 $R_x^\alpha(\tau)$ 即为循环相关函数。

3 信号基本模型

设 LFM 脉冲雷达发射的信号线性频率调制的脉冲间隔为 PRI、幅度为 A 的矩形脉冲串, 脉冲宽度为 T , 则一个脉冲间隔内的信号为

$$x(t) = \begin{cases} A \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right) + \theta_0\right], & 0 \leq t \leq T \\ 0, & T \leq t \leq \text{PRI} \end{cases} \quad (5)$$

式中 f_0 和 k 分别为初始频率和频率调制率, θ_0 为初相。在宽带假设条件下, 雷达收到的回波信号是具有多普勒频移的多径分量的叠加信号, 可表示为

$$r(t) = y(t) + n(t) = \sum_{i=1}^M B_i A x[a(t - \tau_i)] + n(t) \\ = \begin{cases} \sum_{i=1}^M B_i A \exp\left[j2\pi\left(f_0 a(t - \tau_i) + \frac{1}{2} k a^2 (t - \tau_i)^2\right) + \theta_i\right] \\ \quad + n(t), & 0 \leq t \leq T \\ n(t), & T \leq t \leq \text{PRI} \end{cases} \quad (6)$$

式中 B_i 和 τ_i 分别表示回波信号第 i 条多径分量的幅度衰减因子和时间延迟参数, 并假设 $\tau_1 = 0$ 且 $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_M$; a 为多普勒频移尺度参数; M 为回波信号的多径个数; θ_i 为随机相位; $n(t)$ 为接收噪声, 通常假设为零均值高斯白噪声, 并与信号 $x(t)$ 相互独立。

4 带宽回波 Doppler 频移和多径时延联合估计

4.1 Doppler 频移的估计

根据式(1)不难知道回波信号式(6)观测信号的瞬时自相关函数为

$$R_r(t, \tau) = E[r(t)r^*(t + \tau)] \\ = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M B_m B_n^* A^2 e^{-j2\pi(\tau + \tau_m - \tau_n)\left[f_0 a + \frac{1}{2} k a^2 (\tau - \tau_m - \tau_n)\right] + \theta_m - \theta_n} \\ \cdot e^{-j2\pi k a^2 (\tau + \tau_m - \tau_n)t} + R_n(\tau) \quad (7)$$

根据式(4), 计算出式(7)的循环自相关函数:

$$R_r^\alpha(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} R_r(t, t + \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt \\ = \sum_{m=1}^M \sum_{n=m}^M B_n^2 A^2 e^{-j2\pi\left[f_0 a \tau + \frac{1}{2} k a^2 \tau (\tau - 2\tau_m)\right]} \delta[\alpha + k a^2 \tau] \\ + \sum_{m=1}^M \sum_{n \neq m}^M B_m B_n^* A^2 e^{-j2\pi(\tau + \tau_m - \tau_n)\left[f_0 a + \frac{1}{2} k a^2 (\tau - \tau_m - \tau_n)\right] + \theta_m - \theta_n} \\ \cdot \delta[\alpha + k a^2 (\tau + \tau_m - \tau_n)] + 2\pi R_n(\tau) \delta(\alpha) \quad (8)$$

可以看出, 信号能量主要集中在 $\alpha = -k a^2 (\tau + \tau_m - \tau_n)$ 处, 即在循环频率轴上有 $L = M(M - 1) + 1$ 个峰, 最中间的出现在 $\alpha = -k a^2 \tau$ 处, 其余 $M(M - 1)$ 个关于该峰左右对称。与中间峰左右对称的峰中虽然包括 $(M - 2)(M - 1)$ 个交叉项峰, 但所有这些峰的峰值点在 (τ, α) 上为一组平行线, 其斜率均为 $K = \tau / \alpha = -k a^2$ 。同时由式(8)看出, 噪声主要集中在零循环频率处。显然可以取 $\tau \neq 0$ 的循环相关延迟 τ 使 $2\pi R_n(\tau) \delta(\alpha) = 0$ 以消除噪声的影响, 说明该方法有利于低信噪比条件下的参数估计。

根据以上分析的结果可知, 循环相关交叉项不但无需消除, 而且可以利用, 利用其来估计平行线斜率参数, 起到增加参数估计可靠性的作用。这里采用多项式的最小二乘曲线拟合的方法估计这组平行线的斜率, 由于要估计的是平行线的斜率, 所以多项式的阶次为 1。为了降低噪声的影响, 可以取 $\tau \neq 0$ 处的直线段。假设通过拟合方法估计得出平行线的斜率为 \tilde{K} , 则可得 Doppler 频移尺度参数的估计值为

$$\tilde{a} = \sqrt{-\tilde{K} / k} \quad (9)$$

4.2 多径时延的估计

通过式(8)可看出, 多径 LFM 雷达回波信号的循环相关函数(即 $M \neq 1$ 时), 存在各径之间相互影响的问题, 并且存在交叉项问题, 这使得直接对该循环相关函数进行处理很难获得多径时延的估计值。为了解决该问题, 本文提出以下方法。根据以上得到的 Doppler 频移尺度参数估计值和发射信号的先验信息, 构造消去时间二次项的一个降阶函数:

$$g(t) = e^{-j\pi k \tilde{a}^2 t^2} \quad (10)$$

将该降阶函数与回波信号相乘, 得

$$z(t) = r(t)g(t) \\ = \sum_{i=1}^M B_i A e^{j2\pi[(f_0 \tilde{a} - k \tilde{a}^2 \tau_i)t]} e^{j\pi[-2f_0 \tau_i + k \tilde{a}^2 \tau_i^2 + \theta_i]} + g(t)n(t) \quad (11)$$

这时降阶后的回波信号变成了单频信号, 单频信号的频率与各径时延有关, 由于回波信号各径时延相差不大, 用常规的 Fourier 变换很难将间隔很小的多径时延分开, 所以本文将进行以下处理。降阶后的回波信号 $z(t)$ 的循环谱为

$$S_z^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_z^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (12)$$

如果求出所有点的循环谱值, 计算量将较大。根据循环谱的对称性, 本文只计算正循环频率上的零频率截面循环谱值, 即 $S_z^{\alpha \geq 0}(0)$ 。实际中数据均为离散形式, 可采用以下频域平

滑法求该循环谱^[7]:

$$S_z^{\alpha}(n, 0) = \frac{1}{I} \sum_{i=-(I-1)/2}^{(I-1)/2} \frac{1}{N} Z(n, q_{\alpha}/2 + i) Z^* \cdot (n, -q_{\alpha}/2 + i) g(i) \quad (13)$$

其中 I 为频域平滑点数, N 为样本数, q_{α} 为循环频率量化点数, z 为 $z(n)$ 的有穷 Fourier 变换, $g(i)$ 为频域平滑窗。各单频分量在循环频率 $\alpha_i = 2f_0\tilde{a} - 2k\tilde{a}^2\tau_i$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 处出现峰值。由此可得多径分量的时延估计值为

$$\hat{\tau}_i = \frac{2f_0\tilde{a} - \alpha_i}{2k\tilde{a}^2} \quad (14)$$

而由式(11)可知, 降阶后的回波信号频率 $f_i = f_0\tilde{a} - k\tilde{a}^2\tau_i$ 。显然循环谱的循环频率分辨率为常规频谱频率分辨率的 2 倍, 这说明利用循环谱对时延进行估计具有较高的分辨率, 使得间隔较小的多径时延在循环频率域上能有效分辨。如果假设各径时延 $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_M$, 则有 $\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_M$ 。不妨假设 $\tau_1 = 0$, 则 $\alpha_1 = 2f_0$, 从而 $\alpha_i < 2f_0$ ($i = 2, \dots, M$)。

5 仿真实验及分析

仿真实验中回波信号由 3 径(即 $M = 3$)信号叠加组成, 其参数为: Doppler 频移尺度参数 $a = 1.1$, 多径时延 $\{\tau_1, \tau_2, \tau_3\} = \{0, 80/f_s, 200/f_s\}$, 采样率 $f_s = 1\text{MHz}$, 每个多径分量的信噪比均为 -2dB , 数据采样点数为 $N = 1000$, 发射信号的初始频率为 $f_0 = f_s/4$, 频率调制率为 $k = 0.1f_s^2/N$, $\theta_0 = 0$ 。

图 1 表示多径 LFM 回波信号的 WD 分布, 图 2 为 LFM 回波信号的 WD 分布的幅度等高图, 以下等高阶数均为 8。

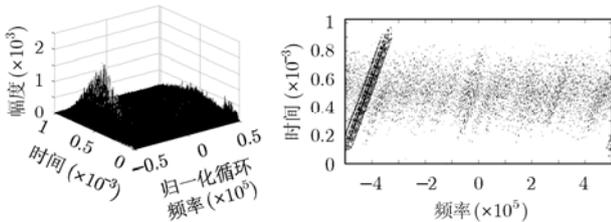


图 1 回波信号的 WD 分布

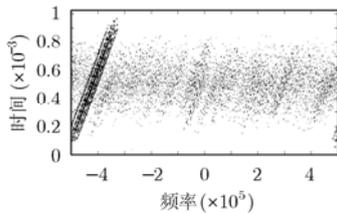


图 2 回波信号 WD 分布的幅度等高图

图 3 表示多径 LFM 回波信号的循环相关函数包络, 图 4 为 LFM 回波信号的循环相关函数的幅度等高图。

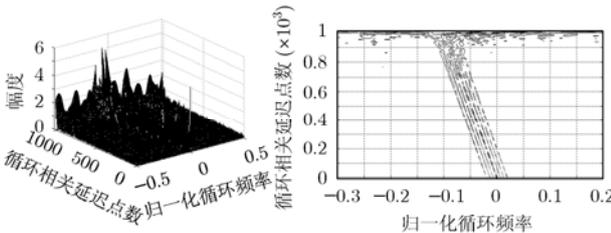


图 3 回波信号循环相关函数包络

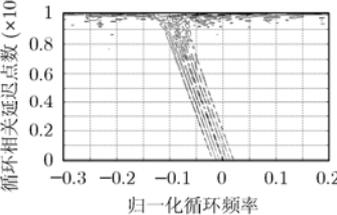


图 4 回波信号循环相关函数的幅度等高图

由图 1、图 2 可看出, LFM 回波循环的 WD 分布受噪声影响比较严重, 无法精确估计出信号频率进而估计出调制斜率。而由图 3, 图 4 可看出, 多径 LFM 回波信号的循环相关变换聚集在 $\alpha = -ka^2(\tau + \tau_m - \tau_n)$ 线上, 轮廓清晰可见, 基本不受噪声影响, 这有利于对频率调制率的估计。我们通过一阶多项式的最小二乘曲线拟合法估计平行线的频率, 即可得到频率调制率的估计值, 进而可估计出 Doppler 频移尺度参数。虽然交叉项的存在对频率调制率的估计有贡献, 但它的存在将使得直接对多径时延估计变得十分困难。本文提出的构造函数法能够消去二次方项, 然后运用零频率截面循环谱方法估计多径时延, 该方法避免了交叉项的影响, 并且具有较高的分辨率, 以下进行仿真实验。

图 5 为以上降阶后的频谱图, 图 6 为降阶后的零频率截面循环谱图, 即利用本文方法估计的谱图。

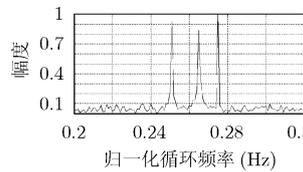


图 5 降阶后的频谱图

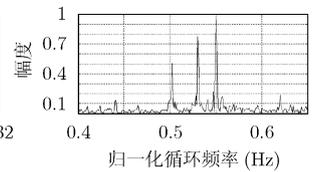


图 6 降阶后的零频率截面循环谱图

由图 5、图 6 可知, 使用本文的方法能有效地消除多径交叉项的相互影响。由图 5 可得, 降阶后的信号在频谱图上出现谱峰, 在其上搜索谱峰并记对应的频率值为 f_i ($i = 1, 2, 3$), 由 $f_i = f_0\tilde{a} - k\tilde{a}^2\tau_i$, 即可估计出 τ_i , 由于这些参数均为正数, 所以频谱图中最大频率对应的时延为 $\tau_1 = 0$, 另外两个频率对应 τ_1, τ_2 。由图 6 可知, 降阶后的信号在循环频率 $\alpha = 0.55f_s$ 等处出现峰, 根据式(16)的关系式也可得到各径时延参数估计值。对比图 5 和图 6 中各径谱峰所对应的位置可知, 循环谱方法估计多径时延的分辨率为频谱法估计分辨率的 2 倍, 显然当多径时延相隔较小时, 用循环谱法估计各径时延将具有明显的优越性。

6 结束语

本文基于循环相关变换提出了 LFM 脉冲雷达宽带回波信号的 Doppler 和多径时延参数联合估计算法。该算法首先根据频率调制率在循环相关函数域的聚集特性估计出回波信号的频率调制率, 进而估计出 Doppler 频移尺度参数, 然后结合发射信号的先验信息构造降阶函数, 再利用降阶后信号的零频率截面循环谱估计出各多径时延。与常规的相关方法估计时延相比, 本文方法克服了交叉项的影响, 并且具有较高的时延估计分辨率, 同时也保证了估计精度。仿真实验结果验证了该方法的有效性。

参考文献

[1] 田孝华, 廖桂生, 吴云韬. LFM 脉冲雷达回波 Doppler 与多

- 径时延的联合估计. 电子学报, 2002, 30(6): 857-860.
- Tian X H, Liao G S, and Wu Y T. Joint estimation of Doppler and multipath time delay of overlapping echoes for LFM pulse radar. *Acta Electronic Sinica*, 2002, 30(6): 857-860.
- [2] 戴延中, 李志舜. 基于 Wigner-Ville 分布的宽带回波瞬时多普勒估计方法. 声学学报, 2002, 27(2): 137-140.
- Dai Y Z and Li Z S. Instantaneous Doppler estimation of wideband echoes based on Wigner-Ville distribution. *Acta Acustica*, 2002, 27(2): 137-140.
- [3] 刘庆云, 李志舜. 基于自适应核时频分布的多普勒频移及多径时延估计. 西北工业大学学报, 2004, 22(1): 29-32.
- Liu Q Y and Li Z S. On improving joint estimation of Doppler frequency and multipath time delay of overlapping echoes for LFM pulse sonar. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2004, 22(1): 29-32.
- [4] Gardner W A. The spectral correlation theory of cyclostationary time-series. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1986, 11(7): 13-36.
- [5] Gardner W A. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1991, 8(2): 14-36.
- [6] Gardner W A. Spectral correlation of modulated signals: Part I -analog modulation. *IEEE Trans. on Communications*, 1987, 35(6): 584-594.
- [7] Gardner W A and Roberts R S. One-bit spectral-correlation algorithms. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(1): 423-427.
- 史建锋: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为非平稳信号检测与处理.
- 王可人: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理.