

基于希尔伯特解调的 LFM 信号调频斜率的识别

高洪青

(南京电子技术研究所, 南京 210013)

摘要: 脉冲调制信号调制参数的识别与计算是很多领域的研究重点, 文中以希尔伯特解调为基础, 依据 LFM 信号相位信息的特点和最小二乘法的拟合, 研究了一种全新的线性调频信号的识别算法, 并分析了识别算法对载频不敏感的特点, 并通过迭代算法以及自身的收敛特性, 可快速解调出 LFM 信号的调制参数; 通过各类仿真信号的解调分析, 算法的正确性和有效性得到了验证; 结合虚拟仪器技术, 本算法在某雷达接收机线性调频信号的测试得到了工程应用, 进一步验证了算法的有效性。

关键词: 希尔伯特解调; LFM 信号; 调频斜率

Recognizing the Chirp Constant of LFM Based on Hilbert Demodulation

Gao Hongqing

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: In many special researches, the estimation of the modulated parameters and the automatic analysis of Intra-pulse modulated characteristics are especially important. Based on Hilbert demodulation and the least-square method, a new recognizing algorithm of the Chirp constant of LFM is introduced. The specification of the carrier-frequency-insensitive is presented, by Iteration algorithm and the convergence property of itself, the modulated parameters is recognized. The correctness and validity of the algorithm is indicated by the actual radar signal and the computer simulation signal.

Keywords: Hilbert demodulation; LFM; Chirp constant

0 引言

雷达信号脉内调制参数是雷达和电子对抗等领域内的研究热点, 脉内调制参数包括信号的幅度、频率、相位及包络形状的调制, 因此, 对雷达信号脉内特征参数的识别也形成了许多估计算法和相关技术^[1]。

本文利用经典的希尔伯特变换, 对目前雷达信号中常用的线性调频 (LFM) 信号进行分析, 提出了利用希尔伯特解调进行线性调频信号调制斜率识别的具体算法, 并对识别算法中的误差等进行了具体分析, 最后通过仿真信号和实际信号对上述方法进行验证, 获得了较好的效果。

1 算法原理

1.1 线性调频 (LFM) 信号^[2]

LFM 的复数表达式可以写成:

$$x(t) = A \operatorname{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{ut^2}{2}\right) + \varphi_0\right] = A \exp[j\varphi_s(t)]$$

式中, $f = f_0 + ut$ 为信号的频率, f_0 为起始频率, u 为频率变化斜率, B 为调频带宽, τ 为脉冲宽度, 其中 $u = \frac{B}{\tau}$ 。LFM 信号的相位是一二次多项式。

$$\varphi_s = ut^2 + 2\pi f_0 t + \varphi_0 \quad (1)$$

1.2 希尔伯特变换的解调原理^[2-4]

根据希尔伯特变换的原理, 原始信号 $x(t)$ 与希尔伯特变换 $\hat{x}(t)$ 有如下的关系:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

$$x(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{x}(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3)$$

$$x_a(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (4)$$

式 (4) 是用 $x(t)$ 和 $\hat{x}(t)$ 构成的一个复数解析信号。对解析信号进行移频、反正切变换得到 $x(t)$ 的相位估计,

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg}[x_a(t)e^{-j2\pi f_0 t}] \quad (5)$$

用二次多项式对 $\varphi(t)$ 进行拟合, 可得

$$\varphi(t) = at^2 + bt + c \quad (6)$$

因此, LFM 信号的调制斜率 $u = \frac{a}{\pi}$, 起始频率 $f_0 = f_c + \frac{b}{2\pi}$, 终止频率 $f_1 = f_0 + u\tau$, 中心频率 $f_c = \frac{(f_0 + f_1)}{2}$ 。^[5-8]

因此, 图 1 为 LFM 信号调制参数识别的流程:

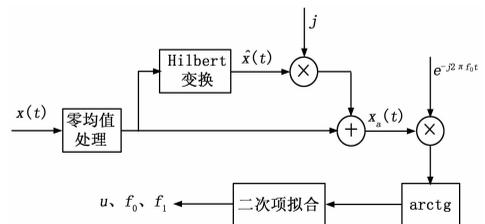


图 1 LFM 信号解调流程图

1.3 零均值处理^[9]

希尔伯特变换处理过程中进行了多次的 FFT 变换, 而信号的均值会使频谱在 $f=0$ 时产生一个很大的冲激, 会增加 FFT 运算的误差。文献 [9] 分析了信号中的直流分量对希尔伯特变换算法精度的影响, 导致二次项拟合的结果产生极大的误差 (如图 2 所示)。

零均值处理的过程如下: 信号量化后的采样数据为 x_n ($n = 1, 2, \dots, N$), N 为采样长度, 则信号的均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n, \text{ 零均值处理后, 用 } X_n = x_n - \bar{x} \text{ 替代原始信号 } x_n.$$

收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-07-28。

作者简介: 高洪青 (1975-), 男, 硕士, 主要从事雷达自动测试系统, 虚拟仪器等方向的研究。

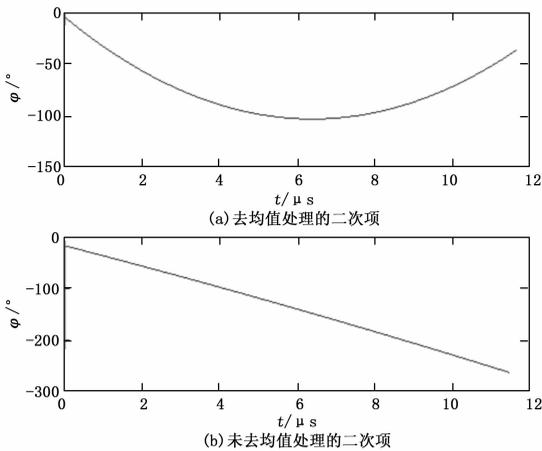


图 2 零均值处理图

1.4 最小二乘法拟合^[10-12]

最小二乘法是采样数据拟合时最常用也最简单的一种方法，其算法原理是使采样数据与拟合数据偏差的平方和达到最小，即：

$$\Phi_{\min} = \sum_{k=1}^n [ax_k^2 + bx_k + c - y_k]^2$$

根据最小二乘法的原理，对 Φ 求 a 、 b 、 c 的偏导数并令其为 0，即可求得 Φ 的最小值，即：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a} = 2 \sum_{k=1}^n x_k^2 [ax_k^2 + bx_k + c - y_k] = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b} = 2 \sum_{k=1}^n x_k [ax_k^2 + bx_k + c - y_k] = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial c} = 2 \sum_{k=1}^n [ax_k^2 + bx_k + c - y_k] = 0$$

可得方程组如下，解出 a 、 b 、 c 。

$$\begin{bmatrix} 2 & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c \\ b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \end{bmatrix}$$

根据拟合出的 a 、 b 、 c 即可解调出 LFM 的起始频率、终止频率、调制带宽等参数。

1.5 载频的不敏感性

由式 (5) 可知，算法中须对解析信号进行频移 f 。通常情况下，若频移 f 为原始信号的中心频率，则解调后的二次项是一个具有峰或谷的二次项（如图 2 (a) 所示），调频斜率的精度也更高。

然而，在大多数情况下，信号的中心频率往往不能准确地得到。由于本算法不但可以解调出信号的调频斜率，且起始频率、终止频率、中心频率等参数也能得到，因此建议采用下图所示的流程进行解调分析。

由于本算法具有较好的收敛性，在设定斜率误差后，只需对中心频率进行几次迭代后即可解调出精度较高的调频斜率。

设信号的中心频率 $f_c=1$ kHz，采样频率为 $f_s=10$ kHz，信号起始频率 $f_0=990$ Hz，终止频率为 $f_1=1100$ Hz，数据长度 $N=8192$ 。因此，该信号的脉宽 $T=0.8192$ ，调频斜率 $a=244.140625$ Hz/s。图 3 (a) ~ (e) 分别是采用不同的频移解调后的二次项。

对上述信号运用图 3 所示的流程，初始频率设为 800 Hz，

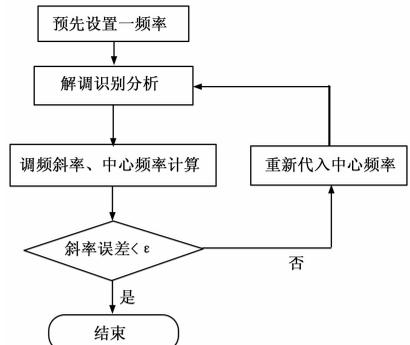


图 3 解调算法流程

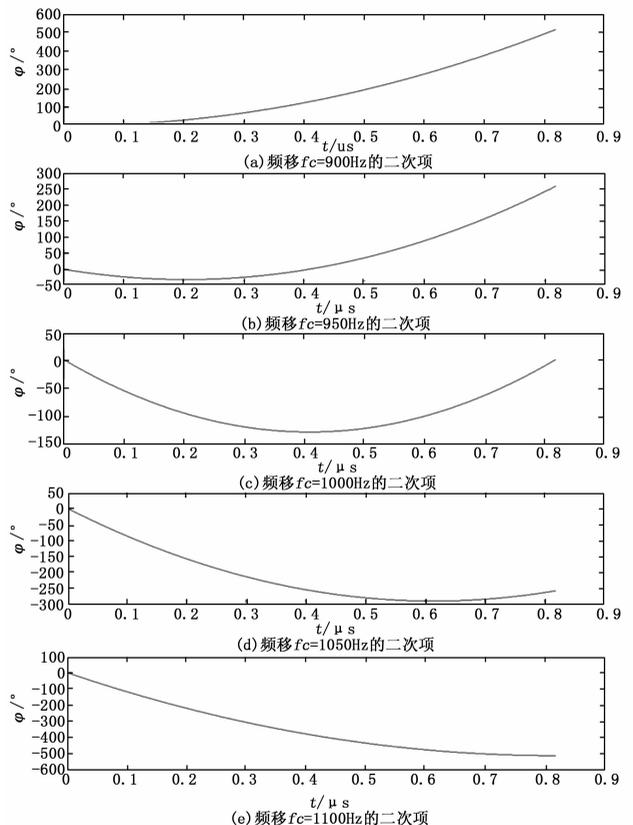


图 4 不同频移的二次项

解调出的调频斜率为：244.1234 Hz/s，误差为：0.007%。

2 仿真分析

下面分别以几种典型的线性调频信号来验证该算法的有效性。

2.1 简单线性调频信号

图 5 所示的线性调频信号，起始频率为 38 MHz，中止频率为 42 MHz，采样频率为 500 MHz，脉冲宽度为 8.192 μ s。通过解调后的二次项如图 5 (b) 所示，通过二次项拟合后解调出的起始频率为 38.0012 MHz，中止频率为 41.999 MHz，调频斜率为 4.8826e⁵ MHz/s，误差为 0.0039%。

2.2 三角波线性调频信号

图 6 所示的调频信号，其频率变化如图 6 (a) 所示，其频率变化为三角波函数，通过解调后的二次项如图 6 (b) 所示，从图中可以看出，LFM 信号频率变化的每个线性阶段对应着一段二次项函数，可分别对每个二次项进行拟合，解调出

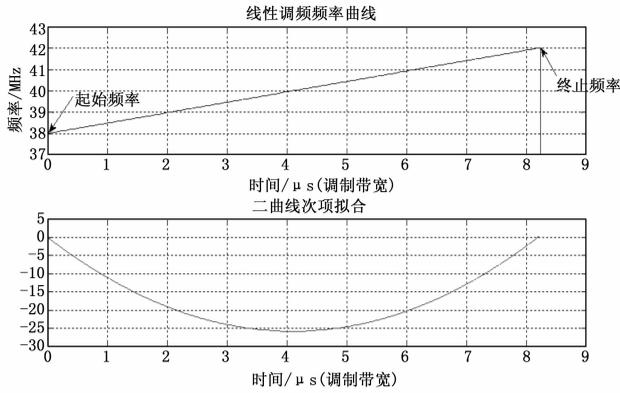


图 5 简单 LFM 信号

各个线性阶段的起始频率、中止频率和调制斜率等参数。

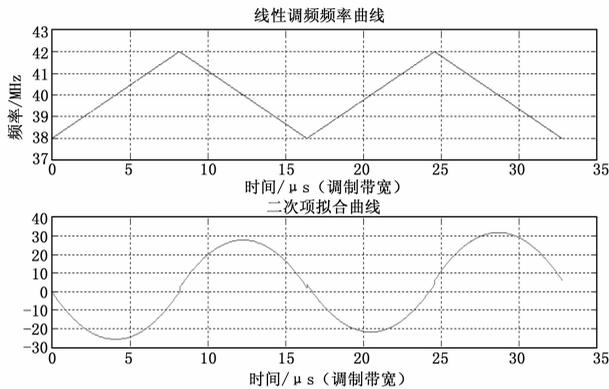


图 6 三角波线性调频信号

2.3 锯齿波线性调频信号

图 7 所示的调频信号，其频率变化如图 7 (a) 所示，其频率变化为锯齿波函数，通过解调后的二次项如图 7 (b) 所示，从图中可以看出，LFM 信号频率变化的每个线性阶段对应着一段二次项函数，可分别对每个二次项进行拟合，解调出各个线性阶段的起始频率、中止频率和调制斜率等参数。

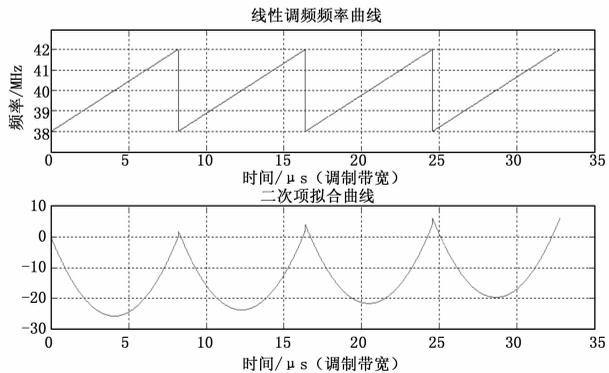


图 7 锯齿波线性调频信号

3 实际应用

随着近年来雷达对抗技术的不断发展，对雷达信号的要求也越来越高，雷达信号的线性调频信号、多相码调制信号成为目前的趋势，在雷达接收机测试时，线性调频信号的调制参数是一十分重要的参数指标^[1-3]。

图 8 所示为利用希尔伯特解调算法进行调频斜率识别的测试示意图，目前常规的数字示波器的触发方式、采样频率（可

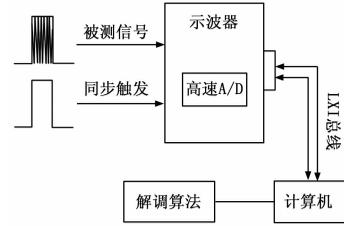


图 8 测试示意图

达 5 G)、存储深度（可达 16 MB），完全能满足本文所述算法对测试数据的要求。利用示波器中的高速 A/D 对调制信号进行高速采集，通过本文所述的希尔伯特解调识别算法进行调制斜率识别，可以方便及快速地解调出调制信息，解调结果如图 9 所示。

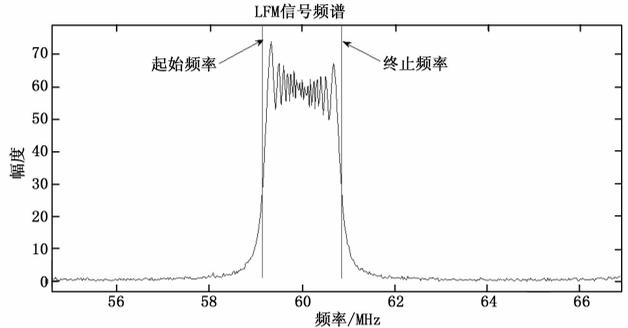


图 9 线性调频 LFM 信号解调

4 结论

本文研究了利用希尔伯特变换进行调频斜率的识别方法。文章首先给出了调频斜率解调流程图，并分析了识别算法的载频不敏感的特点，对减小误差提出了有效的方法。通过对仿真信号及实际信号的解调计算验证了该算法的正确性及有效性。

参考文献：

- [1] 斯科尼克. 雷达手册 [M]. 北京：电子工业出版社，2003.
- [2] 高洪青，禹倩. 基于虚拟仪器的雷达 LFM 信号调制特征识别 [A]. 第三届全国虚拟仪器大会论文集 [C]. 2008.
- [3] 李晶晶，江桦，王明坤. 希尔伯特变换在信号解调中的应用 [J]. 信息工程大学学报，2002，3 (4)：29-31.
- [4] Hu Y, Ren W X, Yang D, Miao Li. Demodulation of Non-stationary Amplitude Modulated Signal Based on Hilbert Transform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, Vol. 32 Issue (10)：181-183.
- [5] 李彦，姜军，朱丰，等. 一种线性调频信号参数提取方法 [J]. 空军工程大学学报：自然科学版，2014 (6)：49-52.
- [6] 张华. 低信噪比下线性调频信号的检测与参量估计研究 [J]. 成都：电子科技大学，2004
- [7] 崔华. 一种新的线性调频信号的瞬时频率估计方法 [J]. 计算机应用研究，2008，25 (8)：2532-2533
- [8] Lü X Z, Gao X C, Liu T R, et al. The estimation of chirp constant of baseband LFM signals [J]. Radar & Ecm, 2008.
- [9] 高洪青，褚红燕. 基于希尔伯特解调的多相码调制信号的识别 [J]. 现代雷达，2007 (1)：31-33.
- [10] Zhou G Y, Zhong-Fu YE. An Approach to Estimating the Chirp Constant of LFM [J]. Journal of University of Science & Technology of China, 2003
- [11] 田垅，刘宗田. 最小二乘法分段直线拟合 [J]. 计算机科学，2012 (S1)：482-484.
- [12] 权开波，贾宁，杜培寿. 基于最小二乘法的曲线拟合 [J]. 商，2015 (3)：296-296.