

一种基于非线性调频波形的双通道参数估计器

张琰珩, 彭应宁, 王秀坛

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 传统的跟踪雷达中使用多普勒滤波器组结构的距离、速度联合估计器是理论上的最大似然估计器, 这种估计器结构复杂开销大, 在多目标环境下对小目标检测有损失. 在对具有比较宽的多普勒响应范围的非线性调频 (NonLinear Frequency Modulation, NLFM) 波形优化设计的基础上, 文章提出了一种双通道非线性调频脉压结构的参数估计器, 并分析了其理论性能, 给出了相应的仿真结果.

关键词: 脉冲压缩; 跟踪雷达; 非线性调频; 双通道估计器

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2001) 09-1210-03

A Novel Bi-Channel Parameter Estimator Based on Nonlinear Frequency Modulated Waveforms

ZHANG Li-ping, PENG Ying-ning, WANG Xiu-tan

(1. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract: In traditional tracking radars, the joint parameter estimator that is constructed as the Doppler filter bank is optimum in the sense of maximum likelihood, whereas such estimator bears the shortcomings of the considerable complexity in implementation and the loss of detectability in dense target environment. Based on the designing of sub-optimum nonlinear frequency modulated signal, a novel structure that has only two NLFM channels is described, with the performance analysis and the simulation results also presented.

Key words: pulse compression; tracking radars; nonlinear frequency modulation; bi-channel estimator

1 引言

在许多雷达系统的设计目标中, 都需要得到比较高的距离精度和距离分辨力, 同时还需要测量 (估计) 目标的速度. 一般脉冲体制的雷达多采用对发射波形的频率 (或者相位) 调制以获得比较宽的发射带宽, 同时采用脉冲压缩技术在接收端进行匹配滤波, 以恢复分辨力. 多目标跟踪雷达系统注重目标的距离测量精度以及目标的运动速度估计, 但是 (已经在理论上证明^[1]) 发射包络为方波的调频和调相波形必然存在一定程度的距离——速度耦合效应 (Range-Velocity Coupling), 即未知运动速度的目标的回波经脉冲压缩处理后会带来距离估计视在误差. 在跟踪雷达中, 如果目标运动速度的先验信息不可得, 为了得到比较好的距离测量和速度估计精度, 采用以下两类办法补偿耦合误差: 一是经过多次发射脉冲, 以距离变化率作为目标运动速度的粗略估计, 然后利用速度的粗略估计补偿距离估计的误差; 二是利用多个匹配在不同多普勒频率的通道, 选择多个通道输出的最大者对应的中心多普勒频率和延迟, 获得距离速度的联合最大似然估计^[1]. 第一类方法的主要缺点是估计精度低, 响应慢, 第二类方法的估计精度高但硬

件开销大.

针对跟踪雷达在多目标的复杂环境下进行目标距离和速度估计的要求, 提出了基于非线性调频波形的双通道联合参数估计器. 该估计器的优势在于估计精度接近最大似然估计的结果而实现大大简化 (在本文所举的典型跟踪雷达的例子中, 该系统的硬件开销是最大似然系统的 1/8), 并且由于采用了非线性调频波形的优化设计, 使得系统在多目标复杂环境下使用时不损失对小目标的检测能力. 另外, 该系统具有比较宽的多普勒响应范围.

2 基于非线性调频波形的双通道脉压

双通道结构以非线性调频波形为基础, 充分利用两个速度响应中心频率 (中心频率是自适应调整的) 相距较远的通道的输出幅度信息来估计目标的实际距离和速度, 解除距离——速度耦合关系, 达到实时的、高精度的估计. 图 1 是这种双通道系统的结构.

图 1 中, 发射信号记为 $u(t)$, 带有多普勒频率的 (和未知延时的) 回波信号记为 $u(t-\tau, f_d)$, 其中 τ 为延时, f_d 为多普勒

收稿日期: 2000-06-15; 修回日期: 2001-01-10

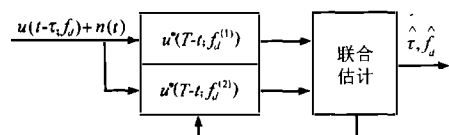


图1 双通道参数估计器

频率,它们分别反映了目标的距离和速度,因此目标距离和速度的联合估计问题就是回波的参数 τ 和 f_d 的估计。接收到的噪声记为 $n(t)$,并假定是高斯白噪声。在最大似然估计器和双通道估计器中,各个通道对应的脉压匹配滤波器分别匹配在不同的中心多普勒频率上,记为 $f_d^{(1)}$ 、 $f_d^{(2)}$ 直到 $f_d^{(N)}$ 等,则第 m 个通道的匹配滤波器的冲击响应可以用 $u^*(T-t, f_d^{(m)})$ 表示。对于双通道结构,两个通道对应的脉压匹配滤波器分别匹配于 $f_d^{(1)}$ 和 $f_d^{(2)}$ 。

发射波形是经过非线性调频函数调制的,这种非线性调频波形的设计方法在文献[3]中有叙述,其基本思想是采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对式(1)所示的瞬时调频函数进行优化搜索,寻找满足一定约束条件的准最优波形。优化搜索的过程是在由瞬时调频函数中的几个关键参数组成的多维空间中进行的,这些参数分别是 K_h 、 X_h 和 n ,不同的参数对应了不同的瞬时调频函数形式并可进一步得到不同特点的非线性调频波形。

$$\mu(t) = K_h - \frac{K_h - 1}{1 + (2t - 1)/(2X_h - 1)^{2n}} \quad (1)$$

假设我们对目标运动速度的先验知识局限于目标运动速度的上限和下限(一般下限为0,上限可以设为拟跟踪目标可能的最大速度),则双通道脉压匹配滤波器系数中的参数 $f_d^{(1)}$ 设置为下界对应的多普勒频率而 $f_d^{(2)}$ 设置为上界对应的多普勒频率,记 $f = [f_d^{(1)}, f_d^{(2)}]$,多普勒频率范围记为 $\Delta f_d = f_d^{(2)} - f_d^{(1)}$ 。

双通道非线性调频脉压的模糊函数如式(2)所示,则两组分别以 $f_d^{(1)}$ 和 $f_d^{(2)}$ 为参数的匹配滤波器的输出特性分别可用式(3)和式(4)表示。

$$\chi(\tau, f_d) = \int u(t) u^*(t - \tau) \exp(-j2\pi f_d t) dt \quad (2)$$

$$\chi_1(\tau, f_d) = \int u(t) u^*(t - \tau) \exp[-j2\pi(f_d - f_d^{(1)})t] dt \quad (3)$$

$$\chi_2(\tau, f_d) = \int u(t) u^*(t - \tau) \exp[-j2\pi(f_d^{(2)} - f_d)t] dt \quad (4)$$

为了使运算简化和便于实现,我们一般只利用脉压匹配输出的主峰点的信息而忽略其他点的输出(事实上由于这一点是瞬时信噪比最大的,包含了比较多的信息),因此引入新的函数, $\xi_1(f_d) = \max_{\tau} |\chi_1(\tau, f_d)|$, $\xi_2(f_d) = \max_{\tau} |\chi_2(\tau, f_d)|$ 。定义函数

$$h(f_d) = \frac{\xi_1(f_d) - \xi_2(f_d)}{\xi_1(f_d) + \xi_2(f_d)} \quad (5)$$

该函数是归一化的两个通道的输出幅度的差值。在一定范围内 $h(f_d)$ 近似呈线性函数,并可进一步用式(6)线性近似,如下

$$h(f_d) \approx a \cdot f_d + b = \hat{h}(f_d) \quad (6)$$

图2是非线性调频调频带宽5MHz,脉冲宽度128μs的情况下取 $f = [f_d^{(1)}, f_d^{(2)}] = [0, 40k]$ Hz时得到的 $h(f_d)$ 。

利用式(6),可以得到目标的多普勒频率估计式为

$$\hat{f}_d = (h(f_d) - b)/a \quad (7)$$

延时的估计利用求“质量中心”的方法可以按下式求出:

$$\hat{\tau} = \frac{(f_d^{(2)} - \hat{f}_d)\tau_1 + (\hat{f}_d - f_d^{(1)})\tau_2}{f_d^{(2)} - f_d^{(1)}} \quad (8)$$

式(6)和(7)中的 a 、 b 利用最小二乘法对 $h(f_d)$ 拟合得到,式(8)中的 τ_1 和 τ_2 定义为

$$\tau_1 = \arg(\max_{\tau} |\chi_1|), \tau_2 = \arg(\max_{\tau} |\chi_2|), \quad (9)$$

从图2可以看到在满足一定条件下($\Delta f_d T < 1$)时, h 的线性近似可以很好的逼近真实结果并得到比较好的估计。应该指出,这种方法形式上类似于跟踪雷达方位估计中所采用的“和、差”通道法,所不同的是,这里的双通道对应的输入为同一个接收机的信号,只是匹配系数有所不同,所以不存在“和、差通道法”中的通道幅度、相位特性不一致,并且两个通道输出幅度差值大小不影响多普勒估计精度。

依照噪声为白色高斯噪声的假定,可以得到上述估计量的估计方差如下(假定脉压输出高信噪比, SNR 为脉压输出信噪比)

$$\sigma_{f_d}^2 = ((1 - \rho) + 1/\text{SNR})/a^2, \sigma_{\tau}^2 = \sigma_{f_d}^2 (\tau_2 - \tau_1)^2 / \Delta^2 \quad (10)$$

ρ 是双通道输出的相关系数, $0 < \rho < 1$, 并且 ρ 随着 $\Delta f_d/B$ 的减小而趋向于1,一般在 $\Delta f_d T$ 接近1时, $1 - \rho < 1$ 。

式(10)没有考虑采样引起的多普勒频率和延时估计误差,原因是采样引起的误差可以看是一个加性的误差,并且只有提高采样率才能克服,在雷达采样率和调频带宽一定的情况下,该项误差与采用的处理方法基本无关。

3 仿真实验

考虑一个跟踪雷达系统, $T = 100\mu\text{s}$, $B = 10\text{MHz}$, 即 $BT = 1000$; 采用 GA 算法设计的非线性调频信号参数为 $K_h = 15.4$, $X_h = -0.234$, $n = 2$ 。波形主副比(PSR)为31dB,主瓣展宽因子1.47,因为没有引入加权,信噪比损失可以忽略。该波形的 $h(f_d)$ 函数通过仿真计算得到,参数 $a = 0.02 \times 10^{-3}\text{s}$, $b = -0.04$ 。

在第2节中提到了 $h(f_d)$ 线性近似成立的条件为 $\Delta f_d T < 1$, 实际的系统中目标运动的多普勒频率可能会超过这个范围,解决的办法一是不采用线性近似而采用函数查表法求多普勒频率的估计值,二是采用图3描述的迭代估计算法逐步求精,使算法不受限于 $\Delta f_d T < 1$ 的条件。按照该迭代算法,从第二步开始,利用前一步的估计结果, $\Delta f_d T < 1$ 的条件将自动满足。另外该算法的特点是双通道中心多普勒频率自适应调整,以跟踪目标运动速度的变化。

将第 k 步的双通道估计过程记为 $BC(k)$, 多普勒频率差记为 δ_k , 自适应调整的多普勒频率上、下界记为 f_k 而估计结果为 $[\hat{f}_{d,k}, \hat{\tau}_k]$ 。其中多普勒频率上、下界按式(10)自适应调整,即

$$\begin{cases} f_{d,k+1}^{(1)} = \hat{f}_{d,k} - \delta_{k+1}/2 \\ f_{d,k+1}^{(2)} = \hat{f}_{d,k} + \delta_{k+1}/2 \end{cases} \quad (11)$$

该算法将系统多普勒响应范围扩展到了 δ_0 , 在我们考虑的系

统中, $\delta_0 = 8/T$. 该系统在输入信号信噪比 -6dB 和 -9dB 时的距离估计方差仿真结果见图 4. 因为多普勒频率估计的方差和距离估计方差之间在一定信噪比时有确定关系, 为使图表清晰, 这里不再给出距离估计的统计结果.

如果采用基于二相码的最大似然联合估计器, 则需要约 16 个通道以覆盖整个 $\delta_0 T = 8$ 的范围, 并且因为在多目标复杂环境下二相码需要引入加权, 最大似然估计器的平均信噪比损失接近 1dB , 最大损失接近 2dB , 而采用非线性调频的双通道估计器的平均信噪比损失为 0.15dB , 最大损失不超过 0.35dB .

图 4 中的 Single 表示单个通道的估计器估计误差, 没有加噪声, 在 $f_d T > 0.35$ 后估计误差大于 15 米, 为使图清晰, 截断至 6 米. ML 表示最大似然估计误差.

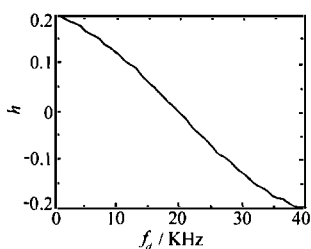


图 2 归一化双通道主峰差值

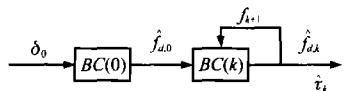


图 3 迭代估计算法流程

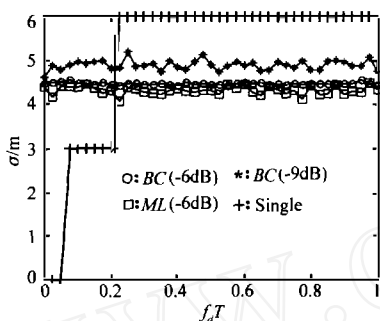


图 4 双通道估计器距离估计性能仿真结果

4 结论

对以往的基于二相码波形的最大似然联合估计器进行了简化, 利用我们已有的非线性调频波形的优化设计方法, 提出了基于非线性调频波形的双通道参数估计器和迭代估计算法. 该估计方法具有简化实现的复杂性和运算量、多普勒响应范围宽、能够适应多目标跟踪环境和信噪比损失小等优势, 通过理论分析和仿真验证, 估计精度接近最大似然的多通道联合估计器的结果.

参考文献:

- [1] Cook C E, Benfield M. Radar Signals. An Introduction to Theory and Applications[M]. Artech House Inc., 1993.
- [2] Mow W H, Li S Y R. Aperiodic autocorrelation and crosscorrelation of polyphase sequences[J]. IEEE Trans., 1997, IT-43(3):1000-1007.
- [3] 黄勇, 彭应宁, 张琢珏等. 基于调频函数和遗传算法的非线性调频信号产生方法[J]. 电子学报, 1999, 27(11):77-79.

作者简介:

张琢珏 男, 1977 年 6 月生于山东潍坊, 博士研究生, 1999 年于清华大学获学士学位, 并于同年入清华大学电子工程系攻读博士学位, 专业为通信与信息系统, 主要从事课题为雷达信号处理等.

彭应宁 男, 1939 年出生于四川, 教授, 1962 年毕业于清华大学无线电系, 1965 年研究生毕业. 现为清华大学电子工程系教授, 博士生导师. 多年从事高速实时数字信号处理的研究, 曾获多项国家级和部委级科技进步奖. 目前研究方向为: 谱估计、自适应滤波、自适应阵列信号处理、并行信号处理、雷达信号处理、神经网络与子波变换等.