

基于梯形波调制 FMCW 雷达的多目标检测^①

宋健强, 刘云学, 李 珂

(烟台大学, 烟台 264005)

摘 要: 由于传统的对称三角 LFM CW 雷达上下扫频配对问题, 很容易因错配而产生虚假目标。为了解决对称三角波调制在复杂目标情况下的目标配对难题, 文章利用梯形波的调制方式, 并结合 MTD (动目标检测) 技术缩减目标环境, 利用恒定频段测得的目标速度实现配对; 即创新性地提出采用 MTD-恒频速度配对法, 对上下扫频信号进行二维 FFT 显示出动目标, 利用同速度通道对单目标配对缩减目标环境, 再利用恒频段对信号一维得到的速度信息对同速度通道下的多目标进行配对, 同时把恒频段的目标速度作为信息测得的真实速度, 提高了目标信息的准确度, 从而实现复杂目标环境下的准确配对, 获得目标信息。最后, 通过检测得到的真实速度, 对梯形波的上扫频 (或者下扫频) 进行速度补偿, 以实现目标距离的矫正。仿真效果验证了该方法的有效性。

关键词: LFM CW 雷达; 梯形波; MTD-恒频速度配对

中图分类号: V474

文献标识码: A

文章编号: 1674-7135(2018)06-0012-05

D O I: 10.3969/j.issn.1674-7135.2018.06.003

Multi-Target Detection Based on Trapezoidal Wave Modulation FMCW Radar

SONG Jianqiang, LIU Yunxue, LI Ke

(Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: Owing to the problem of targets pairing between positive and negative frequency sweep in traditional symmetrical triangular LFM CW radar, it is easy to mismatch and generate false targets. In order to solve the problem of target pairing in the case of symmetrical triangular wave modulation in complex targets, this paper uses the modulation method of trapezoidal wave, combined with MTD (moving target detection) technology to reduce the target environment, and uses the target speed measured by the constant frequency band to achieve pairing. That is, the innovative method is proposed to use the MTD-constant-frequency speed matching method to perform two-dimensional FFT display of the moving target on the positive and negative frequency-sweeping signal, use the same speed channel to reduce the target environment with single-target pairing, and then use the constant frequency band to obtain the speed information of the signal in one dimension. Multi-target pairing under the channel, and the target speed of the constant frequency band as the real speed measured by the information, the target information accuracy is improved, and the accurate pairing in the complex target environment is obtained to obtain the target information. Finally, by detecting the true speed, the positive frequency-sweeping (or negative frequency-sweeping) is compensated by speed to achieve the correction of the target distance. The effectiveness of the method is demonstrated by simulations.

Key words: LFM CW radar; Trapezoidal wave; MTD

^① 收稿日期: 2018-09-04; 修回日期: 2018-11-13。

基金项目: 基于现代雷达信号处理的交通信息采集与处理关键技术研究及应用 (2015GGX101027)

作者简介: 宋健强 (1994—), 烟台大学在读硕士研究生, 研究方向: 雷达信号处理。E-mail: 2513361775@qq.com。

0 引言

在科技飞速发展的今天,LFMCW 雷达以其独特的优势,使其在民用各个领域得到了广泛的研究与应用。传统的对称三角 LFMCW 雷达在多目标情况下,由于上下扫频的配对问题,极容易出现虚假目标,而对目标的准确测量带来困难^[1]。文献[2,3]提出了 MTD-频域配对方法,该方法先通过 MTD 简化目标环境,再分析信号频谱特性进行配对。但在复杂的环境下,不同目标的频谱特性可能相同或者产生频谱混叠,导致配对困难。文献[4]提出了二次混频的 CLEAN 技术,该方法利用对中频信号再次混频进行最强目标的配对,并依次消除配对后的目标信息,最终得到全部目标的信息。这种方法的优势明显,那就是配对准确,但却较为繁琐。如果目标过多,实时性就有可能不保证。文献[5]提出了一种变周期调制方式,该方法利用真实目标在不同调制周期下距离速度不变性、而虚假目标是变化的这一特性进行配对。但在实际应用中,该调制方式复杂,实现成本高且困难,而且在多目标下可能出现虚假目标变化范围不大而误看成真实目标的情况。文献[6]提出了 MTD-速度配对,该方法利用上下扫频配对得到速度矩阵并进行模糊处理,与 MTD 后的模糊速度配对,进而得到目标信息。此方法高效可行,但却要通过计算速度矩阵实现配对,容易带来误差及虚假目标的混淆。文献[7~9]提出了一种梯形波调制方式,并进行了改进,提出变周期梯形波,利用上下扫频段和恒频段 3 个频段信息进行配对。该方法虽然简单可行,但在复杂目标情况下亦会造成虚假信息产生;变周期虽然可以在一定程度上解决虚假目标问题,但工程实现起来较麻烦。本文摒弃变周期实现困难的反方式,在等周期梯形波调制方

式的基础上,对上下扫频段进行 MTD 缩减目标环境后,利用恒定频段测得的目标速度来实现目标在上下扫频的准确配对,可以准确、有效地得到目标距离速度信息。

1 梯形波 FMCW 雷达基本原理

雷达信号测量是通过发射出信号,遇到目标反射回信号,再通过回波信号来得到目标信息。梯形波调制波形如图 1 所示。

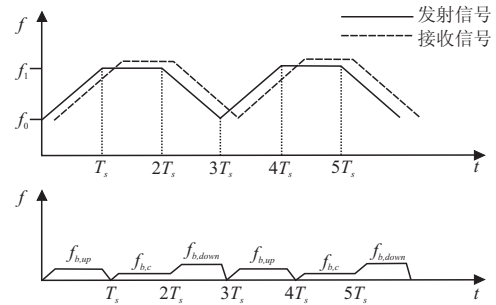


图 1 梯形波收发信号及差拍信号频率

Fig. 1 Trapezoidal Wave Transmission and Reception Signal and Beat Signal Frequency

图 1 中, f_0 为在 $t=0$ 时刻的初始频率, f_1 为恒定频率, T_s 为信号有效时宽, $f_{b,up}$ 为上扫频差拍频率, $f_{b,c}$ 为恒定频率段回波频率, $f_{b,down}$ 为下扫频差拍频率。

上扫频段发射信号为:

$$S_{t,up}(t) = A_0 \cos[2\pi(f_0 t + \frac{1}{2}\mu t^2) + \phi_{up}] \quad t \in [0, T_s] \quad (1)$$

其中, A_0 , ϕ 分别是发射信号的振幅和随机初相; $\mu = B/T$ 为调频斜率; $B = f_1 - f_0$ 为有效带宽。设回波延时为 $\tau(t)$, 则回波信号为:

$$S_{r,up}(t) = K_r A_0 \cos\{2\pi[f_0(t - \tau(t)) + \frac{1}{2}\mu(t - \tau(t))^2] + \varphi_{up} + \phi_{up}\} \quad t \in [0, T_s] \quad (2)$$

以目标与远离雷达方向为正, 则目标回波延时 $\tau(t) = \frac{2(R_0 + vt)}{c}$, 其中, R_0 为目标初始距离; v 为目标径向速度。将发射信号与回波信号混频得差拍信号:

$$S_{b,up}(t) = \frac{1}{2} K_r A_0^2 \cos\{2\pi[f_0 \tau(t) + \mu \tau(t)t - \frac{1}{2}\mu \tau^2(t)] - \phi_{up}\} \quad t \in [0, T_s] \quad (3)$$

将 $\tau(t) = \frac{2(R_0 + vt)}{c}$ 代入并忽略较小项, 得:

$$S_{b,up}(t) = \frac{1}{2} K_r A_0^2 \cos\{2\pi[(\frac{2\mu R_0}{c} + \frac{2vf_0}{c})t + \frac{2\mu v}{c}t^2 + \frac{2f_0 R_0}{c}] - \phi_{up}\} \quad t \in [0, T_s] \quad (4)$$

同理,在下扫频段得差拍信号为:

$$S_{b,up}(t) = \frac{1}{2}K_r A_0^2 \cos \left\{ 2\pi \left[\left(-\frac{2\mu R_0}{c} + \frac{2vf_0}{c} \right) t - \frac{2\mu v}{c} t^2 + \frac{2f_0 R_0}{c} \right] - \phi_{up} \right\} \quad t \in [2T_s, 3T_s] \quad (5)$$

在恒频段 $t \in [T_s, 2T_s]$ 得差拍信号为:

$$S_{b,c}(t) = \frac{1}{2}K_r A^2 \cos \left[2\pi \left(\frac{2vf_1}{c} t + \frac{2Rf_1}{c} \right) - \varphi \right]$$

所以,3 个频段的差拍信号的中心频率为:

$$\begin{cases} f_{b,up} = \frac{2\mu R}{c} + \frac{2vf_0}{c} \\ f_{b,c} = \frac{2vf_1}{c} \\ f_{b,down} = -\frac{2\mu R}{c} + \frac{2vf_0}{c} \end{cases} \quad (6)$$

从恒频段可以直接得到运动目标相对雷达的径向速度: $v = \frac{cf_{b,c}}{2f_1}$ 。

同时,目标径向速度也可通过上下扫频的差拍频率求得: $v = \frac{c(f_{b,up} + f_{b,down})}{4f_0}$, 目标距离为: $R = \frac{c(f_{b,up} - f_{b,down})}{4\mu}$ 。

若对一维 FFT 通过恒频速度直接配对,则图 2 所示为理想情况下配对成功;图 3 所示为虚假目标产生的情况,从图中可知,如果直接对上下扫频和速度进行配对,容易出现虚假目标,致使配对失败;当然,也会出现两个目标速度相同但距离不同的情况。因此,在以上两种情况下会出现虚假目标,而且由于各种误差,使得恒频得到的速度与上下扫频配对得到的速度并不相等,造成配对困难。下面通过 MTD 缩减目标环境后再进行配对。

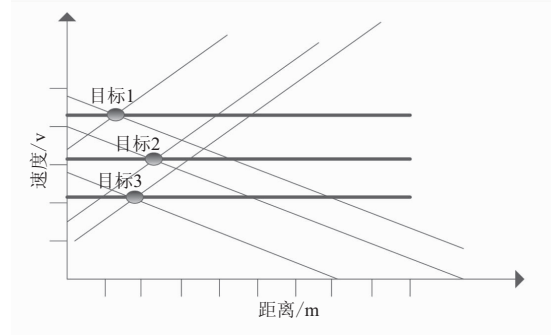


图 2 理想情况下

Fig. 2 Ideal Situation

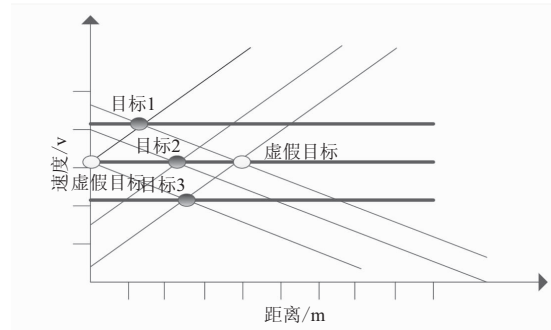


图 3 同一速度虚假目标的产生

Fig. 3 Generation of False Targets at the Same Speed

2 配对实现与目标信息测量

通过以上分析可以发现,用梯形波调制上下扫频与三角波调制上下扫频得到的差拍信号原理相同。因此,对 k 周期上下扫频分别进行二维 FFT 并做 MTD 处理,缩减目标环境,测得上下扫频中心频率与目标模糊频率。

在多周期情况下,第 k 周期的上下扫频差拍信号分别为:

$$S_{b,up,k}(t) = \frac{1}{2}K_r A_0^2 \exp \left\{ j2\pi \left[\frac{2\mu R_0}{c} + \frac{2vf_0}{c} + \frac{2\mu v k T_r}{c} \right] t + \frac{2\mu v}{c} t^2 \right\} \exp \left[j2\pi \left(\frac{2vf_0}{c} k T_r + \frac{2f_0 R_0}{c} \right) \right] \exp(j\varphi_{0,up,k}) \quad t \in [kT_r, T_s + kT_r] \quad (7)$$

其中, $T_r = 3T_s$ 为重复周期,

$$\varphi_{0,up,k} = -2\pi \left[\left(\frac{4\mu v R_0}{c^2} + \frac{4\mu v^2 k T_r}{c^2} \right) t + \frac{2\mu v^2}{c^2} t^2 + \frac{2\mu R_0^2 + 4\mu v R_0 k T_r + 2\mu v^2 k^2 T_r^2}{c^2} \right] - \phi_{0,up,k}$$

$$S_{b,down,k}(t) = \frac{1}{2}K_r A_0^2 \exp \left\{ j2\pi \left[\left(-\frac{2\mu R_0}{c} + \frac{2vf_0}{c} - \frac{2\mu v k T_r}{c} \right) t - \frac{2\mu v}{c} t^2 \right] \right\} \exp \left[j2\pi \left(\frac{2vf_0}{c} k T_r + \frac{2f_0 R_0}{c} \right) \right] \exp(j\varphi_{0,down,k}) \quad t \in [2T_s + kT_r, 3T_s + kT_r] \quad (8)$$

配对的具体步骤如下:

(1) 对恒频段做一维 FFT 运算,得到目标速度

矩阵,并按升序排列, $v = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ 。

(2)对上下扫频进行二维 FFT,峰值点分别对应中心频率和模糊多普勒频率。此时,做如下处理:

a. 将上下扫频相同模糊多普勒通道中仅有一个峰值的目标进行配对,利用(6)式计算得到目标距离速度联合矩阵,并按速度升序排列: $RV = [(r_1, \tilde{v}_1), (r_2, \tilde{v}_2), \dots, (r_{n-m}, \tilde{v}_{n-m})]$ (假设这里有 $(n-m)$ 个目标)。

b. 用距离速度联合矩阵中的速度,从最小值开始依次与恒频速度矩阵最小值进行相减,若所得的差最小,则两者最相近,将相近的两个速度记录并剔除,并将恒频与配对得到的相近速度替换作为真实速度,直至距离速度联合矩阵中的速度都配对完毕,则新的目标距离速度联合矩阵为: $RV' = [(r_1, \hat{v}_1), (r_2, \hat{v}_2), \dots, (r_{n-m}, \hat{v}_{n-m})]$ 。

c. 剩下速度矩阵为 $v' = [v'_1, v'_2, \dots, v'_m]$ 。此时,上下扫频剩余目标的多普勒通道为两个甚至多个,相同多普勒通道对应的峰值亦为两个甚至多个。假设剩余模糊多普勒通道为 p 个,则上扫频段: $\bar{f}_d^1: (f_{b,up}^1, f_{b,up}^2, \dots, f_{b,up}^{q_1}), \bar{f}_d^2: (f_{b,up}^1, f_{b,up}^2, \dots, f_{b,up}^{q_2}), \dots, \bar{f}_d^p: (f_{b,up}^1, f_{b,up}^2, \dots, f_{b,up}^{q_p})$, 每个通道分别对应 $q_1, q_2, \dots, q_p$ 个目标峰值。同理,下扫频段: $\bar{f}_d^1: (f_{b,down}^1, f_{b,down}^2, \dots, f_{b,down}^{q_1}), \bar{f}_d^2: (f_{b,down}^1, f_{b,down}^2, \dots, f_{b,down}^{q_2}), \dots, \bar{f}_d^q: (f_{b,down}^1, f_{b,down}^2, \dots, f_{b,down}^{q_q})$, 其中, $q_1 + q_2 + q_p = m$ 。

d. 分别将每个多普勒通道内的上下扫频对应配对,得到距离与速度阵,再将速度分别与 $v' = [v'_1, v'_2, \dots, v'_m]$ 内的速度比较(用速度相减,最小的值即为最接近值),速度相近的即为真实目标速度,亦将相应恒频速度替换为真实速度。

e. 再利用上(或下)扫频中心频率进行目标距离矫正,求得目标距离 $R = \frac{cf_{b,up} - 2vf_0}{2\mu}$ 。

3 仿真验证

为了验证上述方法的效果,做以下仿真:设定仿真参数,信号初始频率为 $f_0 = 10^{10}$ Hz,调频斜率为 $\mu = 10^{10}$ Hz/s, $T_s = 1$ ms, $f_1 = (f_0 + 10^7)$ Hz,采样频率为 $f_s = 10^7$ Hz,周期数 $k = 32$,FFT 点数为 8192,则最大不模糊多普勒频率为 333 Hz,最大模糊速度为 $v_r = 5$ m/s。选取 5 个目标距离(m)、速度(m/s),如表 1 所示。

表 1 目标参数

Tab. 1 Target parameter

目标	1	2	3	4	5
距离	500	700	1000	1500	1700
速度	33	51	33	38	84.5

上述 5 个目标中有两个目标速度相同,3 个目标在同一速度通道。上下扫频仿真分别如图 4、图 5 所示,恒频如图 6 所示。

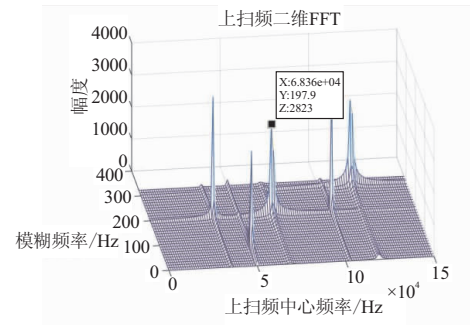


图 4 上扫频段 MTD 处理

Fig. 4 Positive Frequency Sweep MTD Processing

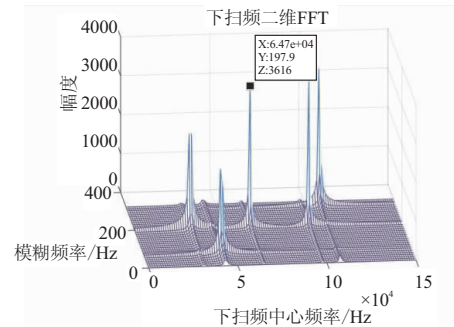


图 5 下扫频段 MTD 处理

Fig. 5 Negative Frequency Sweep MTD Processing

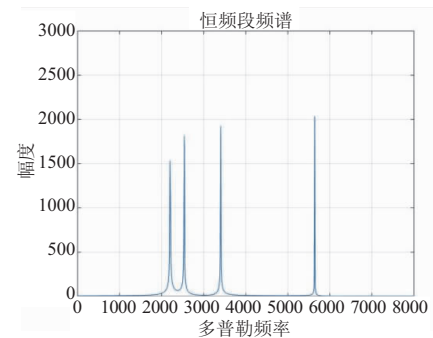


图 6 恒频段一维 FFT

Fig. 6 Constant Frequency One-dimensional FFT

由恒频段得速度矩阵(单位: m/s): $v = [32.9221, 38.0470, 51.039, 84.5155]$; 由上下扫频分别

得二维信息(单位:Hz),如表 2、表 3 所示。

表 2 上扫频目标信息

Tab.2 Positive Frequency Sweep Target Information

目标	1	2	3	4	5
距离频率	35400	50050	68360	102500	118400
模糊多普勒频率	197.9	62.5	197.9	197.9	302.1

表 3 下扫频目标信息

Tab.3 Negative Frequency Sweep Target Information

目标	1	2	3	4	5
距离频率	31740	42720	64700	97660	107400
模糊多普勒频率	197.9	62.5	197.9	197.9	302.1

先对速度通道为单目标的进行配对,62.5Hz 和 302.1Hz 通道,分别得到距离速度信息:(695.775m,54.975m/s)、(1693.5m,82.5m/s),及恒频速度替换:(695.775m,51.039m/s)、(1693.5m,84.5155m/s);所以,缩减速度(单位 m/s)矩阵为: $v = [32.9221, 38.0470]$ 。再将上下扫频 197.9Hz 通道配对,得到 9 组数据:(503.55m,27.45m/s)、(750.75m, -219.75m/s)、(997.95m, -466.95m/s)、(750.75m, 274.65m/s)、(997.95m, 27.45m/s)、(1245.2m, -219.75m/s)、(1006.8m, 530.7m/s)、(1254m, 283.5m/s)、(1501.2m, 36.3m/s),则符合速度信息的 3 组数据为:(503.55m, 27.45m/s)、(997.95m, 27.45m/s)、(1501.2m, 36.3m/s);恒频替换:(503.55m, 32.9221m/s)、(997.95m, 32.9221m/s)、(1501.2m, 38.047m/s)。配对及计算结果如表 4 所示。再通过上扫频进行目标距离矫正,如表 5 所示。

表 4 配对得到的目标距离速度信息

Tab.4 Paired Target Distance Speed Information

目标	1	2	3	4	5
距离(m)	503.55	695.775	997.95	1501.2	1693.5
速度(m/s)	32.9221	51.039	32.9221	38.047	84.5115

表 5 距离矫正结果

Tab.5 Distance Correction Result

目标	1	2	3	4	5
距离(m)	498.0779	699.711	992.4779	1499.5	1691.5
速度(m/s)	32.9221	51.039	32.9221	38.047	84.5115

通过以上仿真分析可以看出,恒频段的速度信息更加准确。因此,我们利用恒频得到的速度为准进行了配对的替换,并进行相应的距离矫正,使得测量的目标信息更加准确。

4 结论

本文在梯形调制方式下分析了多目标情况下的目标配对问题。对目标回波差拍信号进行二维 FFT,得到目标的模糊多普勒频率,利用相同模糊多普勒通道,对目标进行配对。在同一多普勒通道出现多目标的情况下,创新性地提出了通过恒定频段得到的速度与上下扫频得到的目标速度进行配对,得到多目标情况下的准确测量值,有效去除了虚假目标的产生。

通过对梯形波回波差拍信号上下扫频,进行二维 FFT,以缩减目标环境,再根据恒频段速度进行多目标配对,实现了上下扫频的准确配对。通过仿真可以看出,由配对计算得到的目标速度有一定的误差,而在相同的 FFT 点数下恒频段速度误差较小,基于此,也可以将恒频得到的速度所对应的多普勒频率,与利用上(或下)扫频得到的距离速度耦合,求得对应的目标距离。

线性调频连续波雷达以其质量轻、体积小、能全天候使用等独特优点,已在军用和民用领域得到广泛应用。如在军用方面,小型雷达能对导弹进行精密末制导;在民用方面,具有近距离探测能力的雷达能探测埋地管道;同时,具有高分辨率和能近距离探测目标的雷达,还能监测安全驾驶的车辆及交通管制等。而信号处理部分是雷达系统的核心之一,本文介绍的雷达信号处理方法完全可以在这些方面得到广泛应用。

参考文献:

- [1] 包敏. 线性调频连续波雷达信号处理技术与硬件实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [2] 凌太兵. LFM CW 雷达运动目标检测与距离速度去耦合[D]. 西安:西安电子科技大学,2003.
- [3] 刘闯. 对称三角 LFM CW 雷达目标检测方法的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.
- [4] 刘贵喜,凌文杰,杨万海. 线性调频连续波雷达多目标分辨的新方法[J]. 电波科学学报,2006(1):79-83.

(下转第 22 页)