

# LFMCW 雷达运动目标检测与距离速度去耦合<sup>1</sup>

杨建宇 凌太兵 贺峻

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘要:** 为解决 LFMCW 雷达运动目标的检测和距离速度去耦问题, 该文提出了一种将动目标检测与频域配对相结合的 MTD-频域配对方法。该方法通过 MTD 实现对不同模糊速度目标的检测和分类, 以简化差拍信号频谱, 然后利用对称三角线性调频连续波上 / 下扫频段多普勒频移的对称性, 实现动目标距离速度去耦合。仿真结果证明了该方法的有效性。

**关键词:** LFMCW 雷达, 动目标检测, 距离速度去耦合

**中图分类号:** TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)02-0169-05

## MTD and Range-Velocity Ddcoupling of LFMCW Radar

Yang Jian-yu Ling Tai-bing He Jun

(College of Electronic Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** To solve the problem of Moving Target Detection (MTD) and range-velocity decoupling in LFMCW Radars, a method combining MTD with frequency domain pairing is proposed. The method realizes detection and classification of moving targets with different ambiguous velocities via MTD in order to simplify the spectrum of beat signal, then eliminates moving target's range-velocity coupling based on the symmetry of the Doppler shift between positive and negative frequency sweep in triangular frequency modulation continuous waves. The effectiveness of the method is demonstrated by simulations.

**Key words** LFMCW, MTD, Range-velocity decoupling

### 1 引言

线性调频连续波 (LFMCW) 雷达信号时宽通常较大, 距离速度耦合引起的运动目标较大的测距偏移是这种雷达应用于多目标环境必须解决的关键技术问题。距离偏移在单一调频斜率的 LFMCW 雷达中是无法消除的<sup>[1]</sup>, 但调频斜率不同时运动目标的距离偏移却不相同<sup>[2,3]</sup>。根据这一特点, 采用对称三角 LFMCW 信号, 通过动目标检测 (MTD) 滤波实现 MTD 和按模糊速度简化目标环境, 并利用运动目标差拍信号在上 / 下扫频段频谱的对称性, 采用频域配对法选出不同目标, 就可以实现 MTD 和距离速度去耦合。

### 2 频域配对法

#### 2.1 对称三角线性调频连续波信号分析

对称三角 LFMCW 雷达发射信号的上 / 下扫频段是一个有效时宽  $T$  远大于最大作用距离处目标回波时延  $\tau_m$  的线性调频信号, 其发射信号瞬时频率、回波信号瞬时频率及其差拍信号频谱如图 1 所示。

<sup>1</sup> 2002-10-28 收到, 2003-04-14 改回  
教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金资助课题

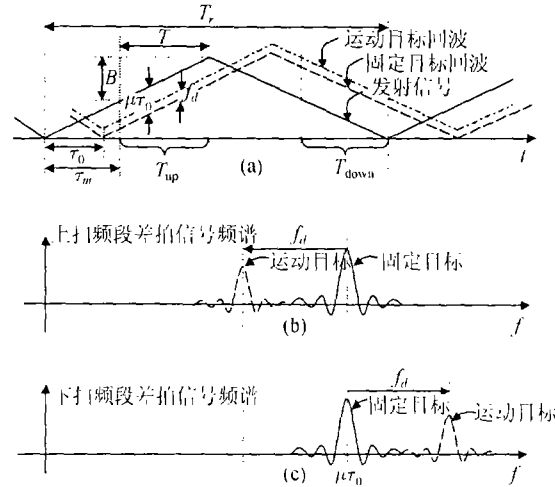


图1 发射信号、回波瞬时频率及差拍信号频谱

将时间轴坐标原点设定在发射信号上扫频有效区间的中点, 则发射信号在有效上扫频  $T_{up} = [-T/2, T/2]$  可表示为

$$s_T^+(t) = A_0 \cos[2\pi(f_0 t + 0.5\mu t^2) + \phi_0^+] \quad (1)$$

其中  $A_0$ ,  $\phi_0^+$  分别为发射信号的振幅和随机初相,  $\mu = B/T$  为调频斜率,  $B$  为有效带宽,  $T$  为有效时宽。一个径向速度为  $v$ ,  $t=0$  时斜距为  $R_0$ , 回波延迟为  $\tau_0 = 2R_0/c$ , 瞬时回波延迟为  $\tau(t) = 2(R_0 - vt)/c = \tau_0 - kt$  ( $k = 2v/c = f_d/f_0$  为归一化多普勒频率) 的点目标产生的回波信号  $s_R^+(t)$  在区间  $T_{up}$  可以表示为

$$s_R^+(t) = K_r A_0 \cos\{2\pi[f_0(t - \tau(t)) + 0.5\mu(t - \tau(t))^2] + \phi_0^+ + \theta_0^+\}, \quad t \in T_{up} \quad (2)$$

其中  $K_r$  为目标反射系数,  $\theta_0^+$  为目标反射引起的附加相移。将  $s_T^+(t)$  与  $s_R^+(t)$  进行基带混频(略去混频损耗因子), 得到差拍信号  $s_B^+(t)$ :

$$s_B^+(t) = 0.5K_r A_0^2 \cos[\theta^+(t) + \theta_0^+] \quad (3)$$

$$\theta^+(t) = 2\pi(f_b^+ t + 0.5\mu_b^+ t^2 + \theta_b^+) \quad (4)$$

其中  $f_b^+ = (1+k)\mu\tau_0 - kf_0$ ,  $\mu_b^+ = -2(k\mu + 0.5\mu k^2)$ ,  $\theta_b^+ = f_0\tau_0 - 0.5\mu\tau_0^2$ 。一般来说  $k \ll 1$ , 由式(3), (4)可知, 差拍信号  $s_B^+(t)$  仍为线性调频信号, 调频斜率为  $\mu_b^+ \approx -2k\mu$ , 调频带宽为  $B_b = 2kB$ , 时带积为  $D_b = 2kD$  ( $D = BT$  为有效区间内发射信号的时带积), 中心频率为  $f_b^+ \approx \mu\tau_0 - f_d$ , 对应应在距离轴上的峰值出现在  $R_0 - f_d T \delta_R$  ( $\delta_R = c/(2B)$  为距离分辨率), 测距误差为  $-f_d T \delta_R$ , 这就是LFMCW雷达的距离速度耦合现象。

同理可以证明, 下扫频段差拍信号  $s_B^-(t)$  可表示为

$$s_B^-(t) = 0.5K_r A_0^2 \cos[\theta^-(t) + \theta_0^-] \quad (5)$$

$$\theta^-(t) = 2\pi(f_b^- t + 0.5\mu t^2 + \theta_b^-) \quad (6)$$

其中  $f_b^- = (1+k)\mu\tau_0 + kf_0$ ,  $\mu_b^- = 2(k\mu + 0.5\mu k^2)$ ,  $\theta_b^- = f_0\tau_0 + 0.5\mu\tau_0^2$ ,  $s_B^-(t)$  也是线性调频信号, 调频斜率为  $\mu_b^- = -\mu_b^+$ , 调频带宽为  $B_b$ , 时带积为  $D_b$ , 中心频率为  $f_b^- \approx \mu\tau_0 + f_d$ , 对应应在距离轴上的峰值出现在  $R_0 + f_d T \delta_R$ , 测距误差为  $f_d T \delta_R$ 。

## 2.2 频域配对法

由以上分析可知, 对于对称三角线性连续波调频信号来说, 同一的运动目标的差拍信号频谱在上 / 下扫频段会产生以实际位置为对称轴的偏离, 如图 1 所示。同时, 同一目标在上 / 下扫频段得到的频谱具有相同形状。根据这两个特点就能将不同的目标分辨开来, 并进行配对处理, 消除距离速度耦合, 测出目标的距离和速度值。这种方法称为差拍信号频域配对法, 具体步骤如下:

**2.2.1 确定目标** 为了在确定目标时消除差拍信号频谱旁瓣的影响, 可以对差拍信号进行加窗处理, 例如汉宁窗和海明窗。根据恒虚警概率  $P_f$  确定门限, 凡是连续超过门限的一段连续频谱, 认为是由一个目标 (点目标或分布目标) 产生的。

**2.2.2 选取配对** 同一目标在上 / 下扫频段得到的差拍信号频谱具有相同形状, 可以采用特征参数比较的方法, 即按照频谱峰值误差绝对值  $\rightarrow$  宽度误差绝对值  $\rightarrow$  能量误差绝对值  $\rightarrow$  相似程度绝对值的顺序进行判断, 直到将同一目标在上 / 下扫频段的差拍信号频谱完全配对。

**2.2.3 确定目标的距离和速度** 根据上 / 下扫频段距离偏移的对称性, 可以求出目标实际距离对应的差拍信号频率  $f_b = (f_b^+ + f_b^-)/2$ , 目标实际位置为  $R_0 = (c/2\mu)f_b$ , 上 / 下扫频段的平均偏移量  $f_\Delta = (f_b^- - f_b^+)/2$ , 距离偏移量  $R_\Delta = (c/2\mu)f_\Delta$ , 运动目标速度为  $v = (B/f_0)(R_\Delta/T)$ 。

## 2.3 频域配对法的局限性

频域配对法不仅适用于点目标, 而且适用于分布目标, 但在实际应用中存在如下两方面的问题:

(1) 频谱重叠 多目标情况下, 当两个目标的多普勒频率差  $\xi$  和时延差  $\tau$  满足  $\xi = \mu\tau$  时, 目标差拍信号在频谱上将产生严重重叠, 无法进行配对。

(2) 具有相似反射强度和频谱形状的不同目标 在多目标情况下, 不同目标产生的差拍信号频谱幅度及形状很可能非常相似, 难以进行准确配对。

## 3 动目标检测方法分析

### 3.1 LFMCW 多扫频周期信号分析

在三角线性调频连续波多扫频周期内, 对每个上扫频段均将坐标原点选在有效扫频段中点, 则扫频期间频谱的变化仅表现在每个上扫频段初始时刻的回波延迟上。第  $n$  个上扫频段的初始回波延迟  $\tau_n = 2(R_0 - vnT_r)/c = \tau_0 - nkT_r$ , 差拍信号中心频率  $f_{b,n}^+ = \mu\tau_0 - f_d - n\mu kT_r$ ,  $\theta_{b,n}^+ = f_0\tau_0 - 0.5\mu\tau_0^2 - n f_d T_r$ 。差拍信号  $s_{B,n}^+(t)$  频谱  $S_{B,n}^+(f)$  在正频率轴上差拍信号中心频率  $f_{b,n}^+$  处可以表示为

$$S_{B,n}^+(f_{b,n}^+) = K e^{-2j\pi n f_d T_r} \quad (7)$$

其中

$$K = 0.5K_r E [C(\sqrt{D_b/2}) - jS(\sqrt{D_b/2})] / \sqrt{D_b/2} e^{j\theta_0^+} e^{j2\pi(f_0\tau_0 - 0.5\mu\tau_0^2)} \quad (8)$$

是与  $n$  无关的复常量,  $E = A_0^2 T/2$  为发射信号有效能量,  $C(\cdot)$ ,  $S(\cdot)$  是菲涅尔积分函数。

由  $S_{B,n}^+(f_{b,n}^+)$  的表达式可以看出, LFMCW 雷达信号峰值的相位受多普勒频率  $f_d$  调制<sup>[4]</sup>。

因此, 可以通过 MTD 技术, 采用多普勒滤波器组将同一距离单元中不同速度的目标区分开来。对于下扫频段, 可得到类似的结论。

### 3.2 MTD 的局限性

单一斜率的线性调频连续波 MTD 存在如下局限性:

(1) 距离速度耦合 距离速度耦合不能消除, 因此距离和速度都无法准确测量。同时, LFMCW 雷达信号时宽通常很大, 距离速度耦合引起的距离偏移比脉冲雷达中的 LFM 信号严重得多。

(2) 速度模糊 由于发射信号重复周期  $T_r = 1/f_r$  较大, 多普勒频率高度模糊。当两目标的多普勒频率差满足  $\xi = nf_r$  时, 它们的回波就会从同一个多普勒滤波器输出, MTD 就不能有效地区别它们, 造成速度模糊 [5]。

### 4 MTD-频域配对法

采用差拍信号频域配对法可以无模糊地测定目标的距离和速度, 但是依赖于目标差拍频谱的特征参数, 适用于简单的目标环境; MTD 方法可以抑制杂波, 将目标按照模糊速度大小分类, 但存在较严重的速度模糊和距离速度耦合, 如果将差拍信号频域配对法和 MTD 结合起来, 先通过 MTD 抑制固定杂波、简化目标环境, 然后再利用配对法在简化的目标环境中实现配对, 就可以在复杂的环境中实现运动目标的距离速度去耦, 测定目标的无模糊距离和速度, 这种方法称为 MTD-频域配对法。如图 2 所示, 首先, 差拍信号经 A/D 变换后得到数字信号, 进行加窗 FFT, 得到差拍信号频谱; 然后通过距离选通, 利用对消器抑制固定杂波, 实现 MTI; 再利用 MTD 简化目标环境; 通过恒虚警门限确定目标; 最后通过特征参数比较的方法, 将上/下扫频段同一目标的频谱进行配对, 消除距离速度耦合, 测出目标的不模糊距离和速度, 形成速度距离目标二维环境图。

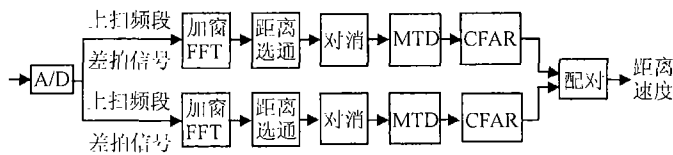


图 2 MTD-频域配对法

### 5 方法的验证

为了验证 MTD-频域配对法的有效性, 我们对典型情况进行了仿真。设定参数  $B = 150\text{MHz}$ ,  $T = 10\text{ms}$ ,  $f_0 = 35\text{GHz}$ ,  $A_0 = 1$ , 信号采样点数  $N_i = 512$ , 回波周期数  $N_j = 16$ , 仿真步骤按照图 2 进行。图 3~图 8 给出了仿真结果, 其中归一化距离为  $\bar{R} = R/(0.25\delta_R)$ , 归一化速度为  $\bar{v} = v/(0.5\delta_v)$  ( $\delta_v = \lambda/(2N_j T_r)$  为多扫频周期信号的速度分辨率), 模糊多普勒频率为  $\bar{f}_d = f_d \text{mod } f_r$ 。

图 3 为多目标的二维环境图, 其中①②③为点目标, 目标④⑤是分布杂波。图 4 是经过 MTD-频域配对法后恢复出的目标环境图。两图比较可看出, MTD-频域配对法可消除距离速度耦合和速度模糊, 测出目标的距离和速度。图 5、图 6 分别为上/下扫频段多目标差拍信号经过加窗 FFT 后的多周期距离像, 可以看出, 运动目标产生了距离偏移。因为在设定初始参数时, 目标①和②、④和⑤之间的多普勒频率差  $\xi$  和延时差  $\tau$  满足  $\xi = \mu\tau$ , 所以由图 5 可以看出目标

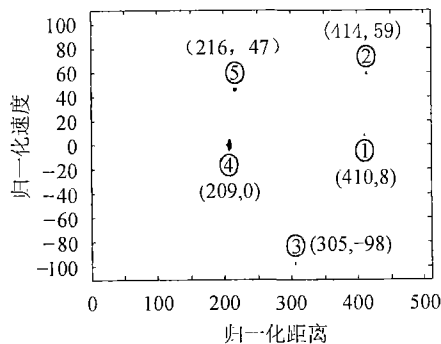


图 3 多目标环境图

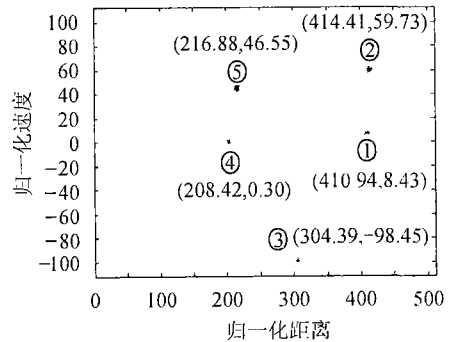


图 4 经 MTD-频域配对法后恢复出的目标环境图

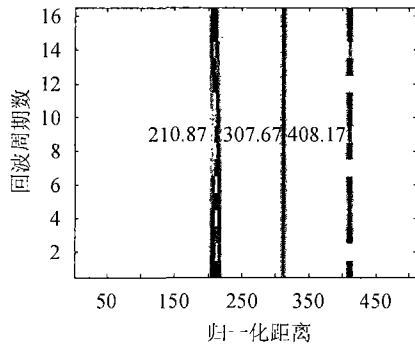


图 5 经加窗 FFT 后的上扫频距离像

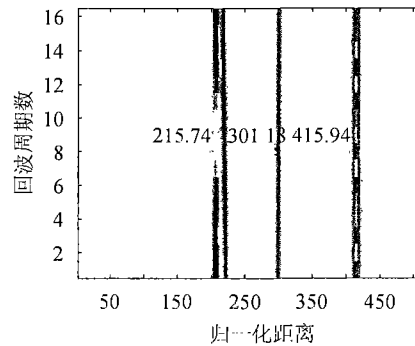


图 6 经加窗 FFT 后的下扫频距离像

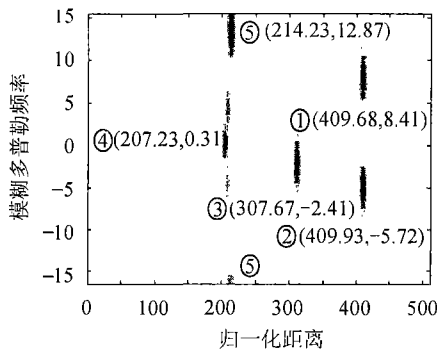


图 7 经 MTD 后的上扫频距离速度像

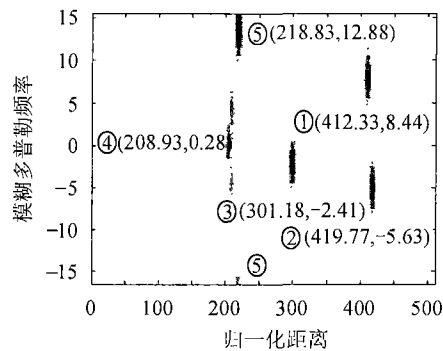


图 8 经 MTD 后的下扫频距离速度像

差拍信号的频谱在上扫频段发生了重叠。图 7 为上扫频段多目标差拍信号频谱经过 MTD 滤波后多目标的距离速度像, 图 8 为下扫频段多目标差拍信号频谱经过 MTD 滤波后目标的距离速度像, 可看出, 不同模糊速度的目标差拍信号经 MTD 滤波后区分开来。图 7、图 8 经过 CFAR 和配对去耦处理后, 即可得到图 4 的最终结果。

## 6 结论

本文分析了线性调频连续波运动目标的距离速度耦合现象及特点, 提出 MTD-频域配对法, 可以消除速度模糊和距离速度的耦合, 测出目标的距离、速度。计算机仿真结果证明了该方法的有效性。这种方法可用于多目标环境条件下的 LFM CW 雷达信号处理。

## 参 考 文 献

- [1] 杨建宇. LFM CW 雷达信号模糊函数分析. 信号处理, 2002: 18(1), 39-42.
- [2] 徐涛, 金昶明, 孙晓玮, 夏冠群. 一种采用变周期调频连续波雷达的多目标识别方法. 电子学报, 2002, 30(6): 861-863.
- [3] Yang Jianyu, Huang Shunji. Moving target indication of LFM CW radar for clutter rejection. Int. Symp. on Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors, Kyoto, Japan, 1989: 585-589.
- [4] A. G. Stove. Linear FMCW radar techniques. *IEE Proc.-F: Radar and Signal Processing*, 1992, 139(5): 343-340.
- [5] 张立志, 汪学刚, 向敬成. 线性调频连续波雷达的动目标显示. 信号处理, 2000, 16(3): 262-266.

杨建宇: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 现任电子科技大学电子工程学院院长. 研究方向: LFM CW 雷达理论、实现技术与应用、毫米波雷达成像、数字信号处理、信号检测与估计.

凌太兵: 男, 1977 年生, 硕士, 研究方向: LFM CW 雷达理论与实现技术、数字信号处理.

贺峻: 男, 1976 年生, 硕士, 研究方向: 数字信号处理.