

LFMCW 雷达密集运动目标检测

刘贵喜, 凌文杰

(西安电子科技大学 自动控制系, 陕西 西安 710071)

摘要:线性调频连续波雷达对于匀速运动目标的回波经过混频以后还是一个线性调频信号(LFM).从 LFM 信号中提取密集运动目标的距离和速度参数是个比较复杂的问题.本文提出了一种基于目标运动补偿和逐次消去("CLEAN")技术相结合的检测方法,该方法避免了估计多分量 LFM 信号参数问题,同时又消除了多普勒效应对密集运动目标检测的各种影响.仿真结果表明该方法不但克服了 LFMCW 雷达在密集目标检测中的困难,而且比传统方法降低 10dB 左右的检测信噪比门限.

关键词:线性调频连续波雷达;密集运动目标检测;逐次消去技术;交叉项

中图分类号:TN958.94 **文献标识码:**A

DENSE-MOVING TARGET DETECTION OF LFMCW RADAR

LIU Gui-Xi, LING Wen-Jie

(Dept. of Automation, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The received signal from target of linear frequency-modulated continuous wave (LFMCW) radar is a linear frequency-modulated (LFM) signal. It is a complex problem to obtain the velocity and range of the target by estimating the parameters of LFM signal. A novel method was presented to detect the dense-moving target based on motion compensation and "CLEAN" technique. The method avoids estimating the parameters of LFM and eliminates the different effects produced by Doppler Effect. Simulation illustrates that the proposed method can not only overcome the difficult in dense-moving target detection but also reduce 10dB detection threshold.

Key words: LFMCW; dense-moving target detection (DMTD); "CLEAN" technique; cross-term

引言

线性调频连续波(LFMCW)雷达由于距离分辨率高、无距离盲区、发射功率低和低被截获概率等优点,在军民领域有广泛应用. LFMCW 雷达对于静止目标检测,已趋于成熟.而在运动目标(以下讨论均为匀速运动目标)检测中,尤其是密集目标,由于多普勒效应仍存在不少问题.本文提出了一种基于目标运动补偿和"CLEAN"技术[5]相结合的检测方法.该方法有效消除了多普勒效应对 LFMCW 雷达检测带来的影响.

1 运动目标回波信号分析

设 LFMCW 雷达一个扫频周期内的发射信号为

$$s_t(t) = a_0 \exp\left[2\pi j\left(f_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2\right)\right], \quad (1)$$

这里, f_0 是工作频段, $\alpha = B/T$ 称为调频率. B 为扫频带宽, T 是扫频周期. 回波信号

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^n b_i \exp\left\{2\pi j\left[f_0(t - \tau_i) + \frac{1}{2}\alpha(t - \tau_i)^2\right]\right\}, \quad (2)$$

$$\text{其中 } \tau_i = \frac{2(r_i + v_i t)}{c}, \quad (3)$$

n 为目标个数, r_i 为 $t=0$ 时刻,第 i 个目标的距离, v_i 为该目标的径向运动速度(以下简称速度).

混频后零中频信号为

$$s_{IF}(t) = \sum_{i=1}^n c_i \exp\left[2\pi j\left(f_0 \tau_i + \alpha \tau_i t - \frac{1}{2}\alpha \tau_i^2\right)\right], \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)整理可得

$$\begin{aligned} s_{IF}(t) &= \sum_{i=1}^n c_i \exp\left\{2\pi j\left[2\alpha r_i t(1 - 2v_i/c)/c + 2f_0 v_i t/c - \right.\right. \\ &\quad \left.\left.2\alpha v_i t^2(1 - v_i/c)/c + 2(f_0 - \alpha r_i/c)r_i/c\right]\right\} \\ &= \sum_{i=1}^n c_i \exp\left\{2\pi j\left[f(r_i)t + f_{dt}t - 2\alpha v_i t^2(1 - v_i/c)/\right.\right. \end{aligned}$$

$$c + \theta_i \} \quad (5)$$

其中 $f_{di} = 2f_0 v_i / c$ 为多普勒频移, $\theta_i = 2(f_0 - \alpha r_i / c) r_i / c$ 为相位, $f(r_i) = 2\alpha r_i (1 - 2v_i / c) / c$ 是与距离成正比的差频, 这两项线性耦合在一起, 这就是 FMCW 雷达中的距离速度耦合问题. 传统方法通常忽略交叉项 $2\alpha v_i t^2 (1 - v_i / c) / c$ 的影响, 将式(5)简化成一个纯正弦信号. 这样通过正负向调频的和频得出多普勒频移, 同时得到目标运动速度, 然后从差频得出目标距离. 这样带来的问题有 3 个: 1、估计的算法存在理论误差, 在密集目标检测情况下, 有必要考虑这种近似带来的误差. 2、抗噪声性能降低. 由于 LFM 信号近似成正弦信号, 并采用传统的 FFT 算法估计中心频率时, 对噪声的影响就变得比较敏感. 3、当在多目标情况下, 除了多普勒效应带来的速度 - 距离耦合以外, 各个目标在作混频时(为了对距离 - 速度解耦合), 又产生了相互之间的耦合, 这样在检测的时候就产生虚假目标问题. 为解决上面问题, 本文提出利用速度估计值去除交叉项, 利用“CLEAN”技术去除目标之间的耦合, 从而得出了一种密集运动目标检测的新算法.

2 基于目标运动补偿与“CLEAN”技术的检测方法

假设

$$s_{IF+}(t) = \sum_{i=1}^n c_i \exp \left\{ 2\pi j \left[f_0 \tau_i + \alpha \tau_i t - \frac{1}{2} \alpha \tau_i^2 \right] \right\}, \quad (6)$$

$$s_{IF-}(t) = \sum_{i=1}^n c_i \exp \left\{ 2\pi j \left[f_0 \tau_i - \alpha \tau_i t + \frac{1}{2} \alpha \tau_i^2 \right] \right\}, \quad (7)$$

分别为正向调频、负向调频周期接收到的零中频信号. 先讨论单目标情形, 然后再推广到多目标.

当 $n = 1$ 时, 将式(6)、(7)混频取和频可得

$$s'_{IF}(t) = c_1^2 \exp \left[2\pi j \left(\frac{4f_0 v_1}{c} t + \frac{4f_0 r_1}{c} \right) \right], \quad (8)$$

上式为正弦信号, 该信号的频率含有目标速度信息, 由上式可以估计出目标的运动速度 \hat{v}_1 . 根据 \hat{v}_1 , 构造信号

$$r(t) = \exp \left\{ -2\pi j \left[\hat{f}_{d1} t - 2\alpha \hat{v}_1 t^2 (1 - \hat{v}_1 / c) / c \right] \right\}, \quad (9)$$

将式(5)乘以式(9)得

$$g(t) = r(t) \cdot s_{IF}(t) = c_1^2 \exp \left\{ 2\pi j \cdot [f(r_1) t + \theta_1] \right\}, \quad (10)$$

式(10)为运动补偿后的距离谱, 该信号中有目标的距离信息, 这样通过运动补偿就消除了交叉项

对运动目标测距的影响. 多目标情况比较复杂, 式(8)除了各目标多普勒频移项以外, 还存在目标之间的耦合项(也是 LFM 信号)的干扰. 当存在 n 个目标的时候, 式(8)的形式如下所示

$$s'_{IF}(t) = \sum_{i=1}^n c_i^2 \exp \left[2\pi j \left(\frac{4f_0 v_i}{c} t + \frac{4f_0 r_i}{c} \right) \right] + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n c_i c_k \exp \left\{ 2\pi j \left[f_0 (\tau_i + \tau_k) + \alpha (\tau_i - \tau_k) t - \frac{\alpha (\tau_i^2 - \tau_k^2)}{2} \right] \right\}, \quad (11)$$

上式第一部分为 n 个目标的多普勒频移项, 第二部分为目标之间的耦合项, 显然耦合项也是 LFM 信号. 从频谱上它与目标项(多普勒频移项)就混合在一起产生干扰, 图 1 是按上述思想, 在两个目标情况下将(11)做频谱分析得到的. 从图中可知, 出现了两个干扰项, 并且干扰项的幅值比目标项大, 因此我们很难区分哪两根谱线是目标多普勒频移项, 这在检测过程容易产生虚假目标现象.

为解决上面的问题, 引入“CLEAN”技术[5]. 事实上, 在图 1 中虽然分辨不出两个目标, 但能分辨出一个真实目标, 根据谱分析理论, 频谱中最大值对应的频率必定是回波能量最大的目标的多普勒频移. 于是得到了回波信号最强的一个目标的运动速度, 根据单目标检测描述的方法, 按式(9)构造补偿信号, 经过运动补偿后得到该目标的距离. 这样就完成了对一个目标(回波能量最大)的检测. 然后根据“CLEAN”的思想, 我们通过一个频带极窄的带阻滤波器, 在零中频信号中剔除该目标分量, 然后再逐个检测其它目标. 图 2 为两个目标情况下, 剔除第一个目标以后的多普勒谱. 整个算法的具体步骤如下:

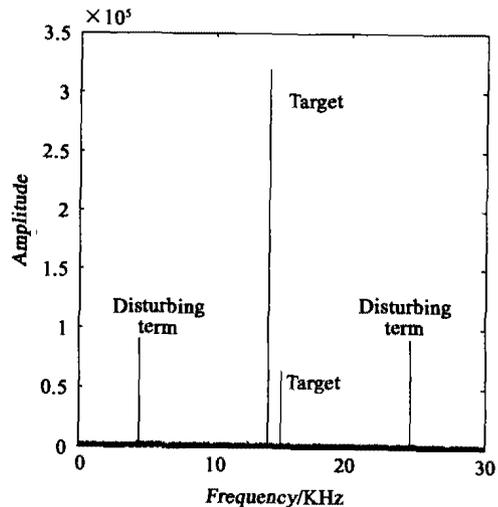


图 1 两个目标的多普勒谱
Fig. 1 Doppler spectrum of two targets

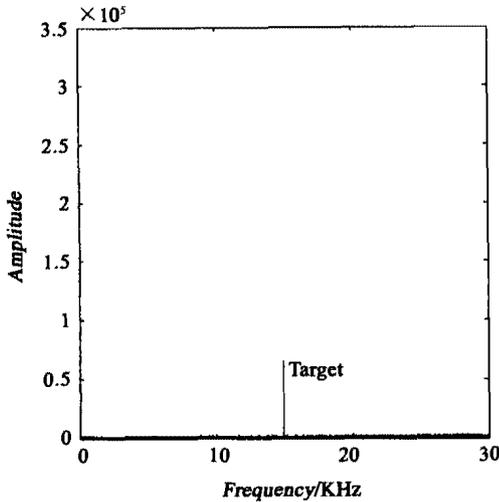


图2 剔除第一个目标后的多普勒谱
Fig.2 Doppler spectrum after eliminating the first target

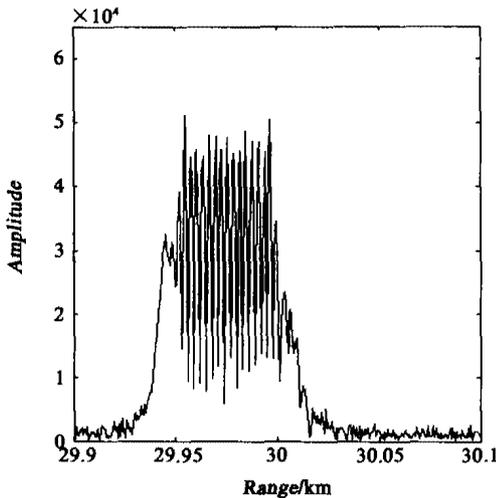


图3 传统方法密集目标距离谱图
Fig.3 Range spectrum of dense target in conventional method

1、将正、负向调频周期接收到的零中频信号再次混频取和频 $s'_{IF}(t)$, 做傅立叶变换, 从频谱中找到最大值, 得到回波能量最大的目标的速度 $\hat{\nu}_1$.

2、根据速度 $\hat{\nu}_1$ 构造信号 $r_1(t) = \exp\{-2\pi j[f_{d1}t - 2\alpha \hat{\nu}_1 t^2(1 - \hat{\nu}_1/c)/c]\}$, α 在正负向调频周期取值不同, 所构造的信号也不同, 实际工程中该信号可以用直接频率合成综合器件 (DDS) 实现. 将它与中频信号相乘得到 $g_1(t) = s_{IF}(t) \cdot r_1(t)$, 这时该速度分量 LFM 信号被补偿为频率为 $f(r_1)$ 的单频信号, 而其它分量仍然为 LFM 信号.

3、计算 $g_1(t)$ 的频谱 $G_1(f)$, 搜索最大值对应的位置得到 $f(r_1)$, 于是得到该运动速度下目标的距

离.

4、在频域构造一个中心频率为 $f(r_1)$ 的频带极窄的带阻滤波器并对 $g_1(t)$ 滤波.

5、将滤波后的信号乘以 $s_1(t) = r_1^*(t) = \exp\{2\pi j[f_{d1}t - \{2\alpha \hat{\nu}_1 t^2(1 - \hat{\nu}_1/c)/c]\}$, 将其它目标中频信号校正为原来的形式, 这样中频信号中, 速度为 ν_1 的目标就被滤除.

6、重复 1~5, 直到检测不出明显的目标为止.

由上面的讨论可知, 该估计方法有两个特点: 1、根据速度估计, 构造信号去除了目标自身的耦合影响, 使距离检测的性能提高; 2、“CLEAN”技术是将目标估计一个, 剔除一个, 因此目标之间的耦合影响也被去除. 基于以上两个特点, 该方法在目标比较密集的情况下, 仍然有比较好的检测结果.

3 仿真结果

为验证本文方法的有效性, 对其进行计算机仿真. 实验中 LFM CW 雷达参数如下: 载频 $f_0 = 35\text{GHz}$, 扫频带宽 $B = 150\text{MHz}$, 扫频周期 $T = 100\text{ms}$. 混频后的信号干扰假设只存在高斯白噪声, 均值为零, 方差为 σ^2 . 信噪比定义为 c_i^2/σ^2 , c_i 为 (5) 式的幅值.

用二维坐标 $T_i(\nu_i, r_i)$ 表示目标的速度 (m/s) 和距离 (m). 图 3~图 6 是编队飞行模型下, 传统忽略交叉项方法与本文方法比较. 三个密集目标 (飞机), 速度相同, 二维坐标分别为 $T_1(200, 30000)$ 、 $T_2(200, 30020)$ 、 $T_3(200, 29980)$, 信噪比分别为 $\text{SNR1} = 5\text{dB}$ 、 $\text{SNR2} = 0\text{dB}$ 、 $\text{SNR3} = -5\text{dB}$. 图 2 是忽略交叉项的结果, 图 4~图 6 是本文提出的方法. 由图 3 可知, 在编队飞行的情况下, 由于目标之间相距很近

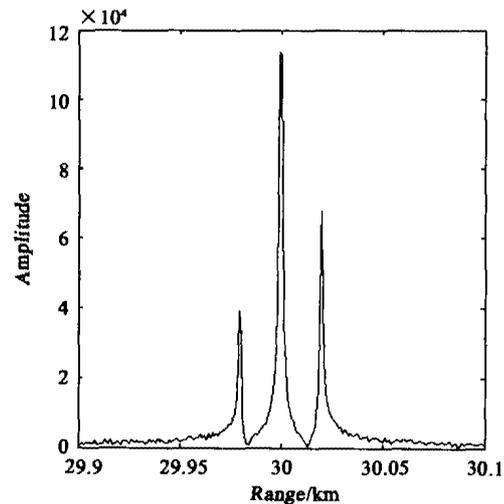


图4 本文方法三个目标的距离谱
Fig.4 Range spectrum of three targets in this paper

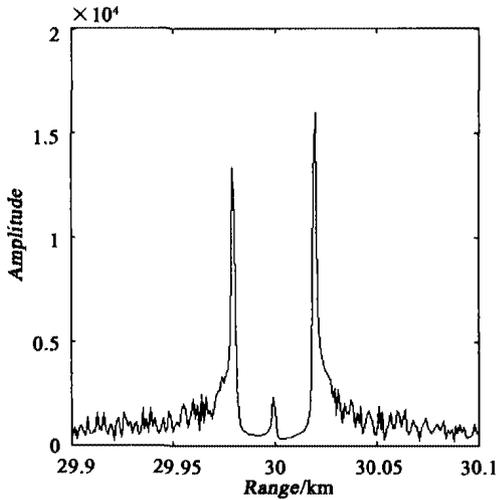


图 5 剔除第一个目标以后的距离谱
Fig. 5 Range spectrum after eliminating the first target

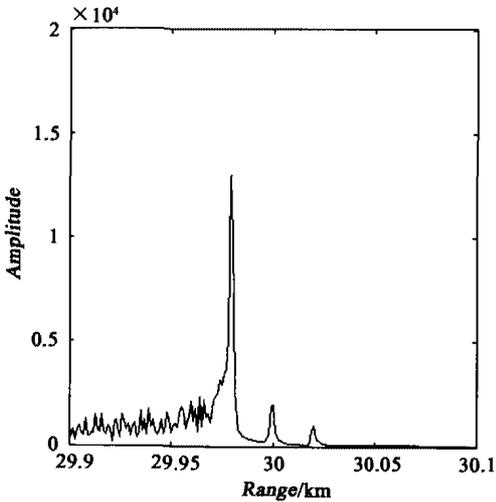


图 6 剔除第二个目标以后的距离谱
Fig. 6 Range spectrum after eliminating the second target

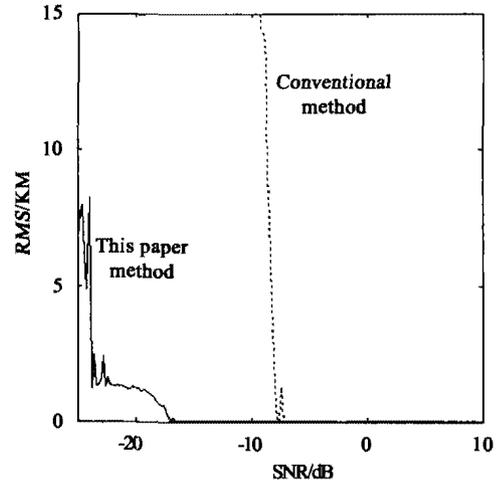


图 7 距离估算均方根误差与输入信噪比之间的函数关系
Fig. 7 The RMS range estimation error as a function of the SNR

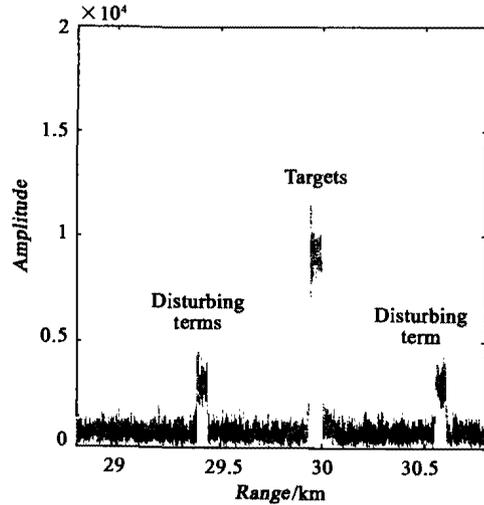


图 8 传统方法两个目标距离谱图
Fig. 8 Range spectrum of two targets in conventional method

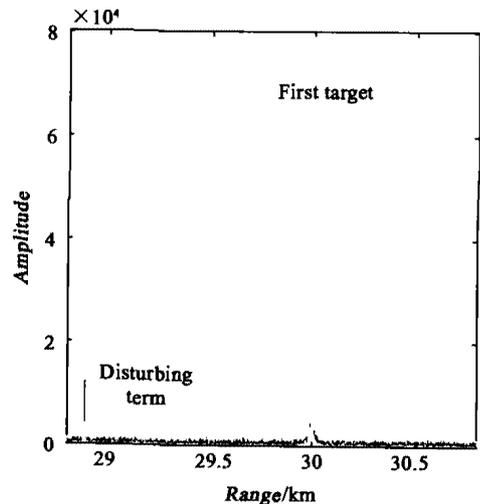


图 9 检测目标 1 时的距离谱图
Fig. 9 Range spectrum of detecting the first target

(20 米),传统方法产生了明显的距离模糊,以至于无法确定飞机架次和距离,而在图 4 ~ 图 6,经过运动补偿和逐个剔除目标后,能清楚的辨别目标个数,并且得到准确的目标距离。

图 7 是单个目标下,本文方法与忽略交叉项方法目标距离估算均方根误差与输入信噪比之间的函数关系.由图可以看出,本文方法(实线所示),信噪比在 -17dB 时,检测性能开始恶化,与传统的忽略交叉项方法(虚线所示)相比,检测信噪比门限降低了 10dB 左右.因此,本文方法有较好的抗噪声性能。

图 8 ~ 图 10 是不同速度下,与传统方法的比较结果.二维坐标分别为 $T_1(300, 30000)$ 、 $T_2(250, 30050)$,信噪比分别 $\text{SNR}_1 = 0\text{dB}$ 、 $\text{SNR}_2 = -10\text{dB}$ 。

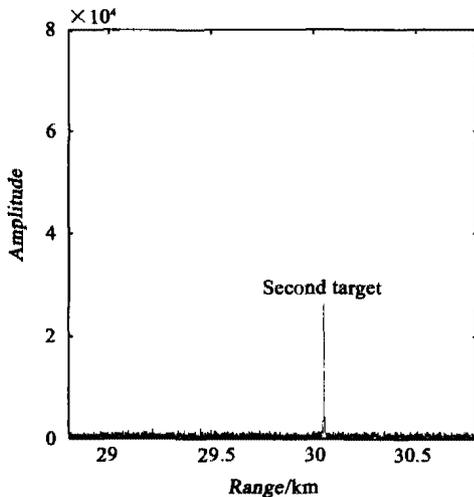


图 10 检测目标 2 时的距离谱图

Fig. 10 Range spectrum of detecting the second target

如图 8 所示,由于距离谱展宽以及干扰项的影响,传统方法已无法正确分辨目标.图 9 是本文方法检测目标 1 时的距离谱图,虽然也有干扰项,但一次只检测回波能量最大的目标,因此它对检测结果不带来影响.图 10 是检测目标 2 时的距离谱图.由于算法采用了“CLEAN”技术思想,目标之间的干扰被明显抑制,图 10 中已经看不到干扰项的影响,从而得到准确的目标距离.

由上面的仿真结果,我们得出,本文方法对于密集运动目标有比较好的检测效果.由于在实际应用中,目标并非都是点目标,当雷达分辨率远小于目标尺寸时,目标的距离谱会展宽,导致检测性能下降,这些有待于进一步研究.

4 结语

本文分析了多普勒效应对密集目标检测的影响,提出了一种基于目标运动补偿和“CLEAN”技术相结合的新方法.算法仿真表明了该方法的有效性,同时,也讨论了该方法有待于改进之处.

REFERENCES

- [1] Stove A G. Linear FMCW radar technique[J]. *IEE Proceedings-F*, 1992, **139**(5): 343—350.
- [2] Rife D C, Boorstyn R R. Single-Tone parameters estimation from discrete-time observations[J]. *IEEE Transactions on Information theory*, 1974, **20**(9): 591—598.
- [3] Boshash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. II. Algorithms and Applications. *Proceedings of The IEEE*, 1992, **80**(4): 540—568.
- [4] Skolnik M I. *Radar Handbook* Second Edition[M]. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [5] Tsao J, Steinberg B D. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: the CLEAN technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, **36**(4): 543—556.