

一种新的雷达动目标检测方法*

李涛¹, 钟志峰¹, 黄坚²

(1.湖北大学 物理学与电子技术学院, 湖北 武汉 430062;

2.江西财经大学 软件与通信工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 基于线性调频(LFM)脉冲压缩雷达原理及雷达动目标显示(MTI)的数学模型, 通过与传统二脉冲对消和三脉冲对消的方法相对比, 采用四脉冲对消和参差脉冲重复频率处理盲速的方法进行动目标检测。仿真实验证明, 在动目标检测中使用线性调频脉冲压缩的四脉冲对消和参差脉冲重复频率方法, 能够更好地提取杂波中的运动目标。

关键词: 线性调频(LFM); 动目标显示(MTI); 脉冲对消

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)17-0072-03

A new detected method of the radar moving targets

Li Tao¹, Zhong Zhifeng¹, Huang Jian²

(1.School of Physics and Electronics, Hubei University, Wuhan 430062, China;

2.School of Software and Communication Engineering, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China)

Abstract: Using four-impulse and varying pulse repetition frequency of consumption deal with blind speed detect moving target. Contrast with the traditional method of using two or three-impulse frequency of consumption in this paper based on the principle of linearity frequency modulation (LFM) Pulse-compression radar and the mathematical model of radar moving target indicator (MTI) of the paper is established. Theory and simulation results show that the ability of detecting moving targets under the noisy situation can be improved perfectly by the methods of using Pulse-compression four-impulse and varying pulse repetition frequency of consumption.

Key words: linear frequency modulation(LFM); moving target indicator(MTI); impulse frequency of consumption

MTI 雷达的用途是抑制固定或慢速运动的无用目标信号, 并且能检测或显示飞机之类的运动目标信号。MTI 雷达在国防军事、气候监测有着极为重要的作用。传统的雷达动目标显示通常采用双脉冲、三脉冲以及单一的反馈延迟对消的方法。但是随着复杂对抗技术的进一步发展以及战略战术进一步的精度要求, 传统的方法已满足不了新技术新条件下所提出来的新需求。如双脉冲对消方法在阻带不具有较宽的凹口、杂波和运动目标回波时, 在显示器上同时显示, 对于运动目标的观测较为困难。三脉冲对消具有比双脉冲对消更好的凹口, 但通带响应不够平滑, 在实际工程中, 显示不出其优越性。单一的反馈延迟优点是通过反馈环路能够对滤波器的频率响应形状进行设计, 但是其反馈容易造成振荡, 限制了增益因子^[1]。

本文首先在采用线性调频脉冲压缩的 MTI 雷达中

简要地引入了双脉冲、三脉冲对消方法, 然后在此基础上提出了四脉冲对消方法, 滤除固定杂波提取出运动目标回波的信息。该方法大大改善了在杂波背景下检测运动目标的能力, 从而能够很好地显示杂波中的运动目标。最后仿真实验证明了该方法的有效性及其实用性。

1 LFM 脉冲压缩雷达

1.1 LFM 脉冲压缩雷达原理

LFM 脉冲压缩雷达的基本工作原理^[2]如图 1 所示。将雷达发射天线和目标假定为一个系统, 即获得等效线性时不变(LTI)系统。

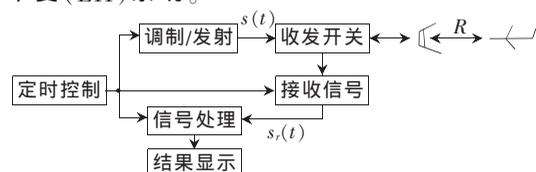


图 1 简单脉冲雷达系统框图

* 基金项目: 江西省青年科学基金资助项目(20114BAB211012)

技术与方法

Technique and Method

其冲激响应为:

$$h(t) = \sum_{i=1}^M \sigma_i \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

式中, M 为目标的个数, σ_i 表示目标散射性能, τ_i 是光速在雷达与目标之间往返一次的时间。雷达发射信号 $s(t)$ 通过等效 LTI 系统^[5], 可获得输出信号 $s_r(t)$:

$$s_r(t) = s(t) \times h(t) = s(t) \times \sum_{i=1}^M \sigma_i \delta(t - \tau_i) = \sum_{i=1}^M \sigma_i s(t - \tau_i) \quad (2)$$

1.2 LFM 信号

脉冲压缩雷达能同时提高雷达的作用距离和距离分辨率^[1]。脉冲压缩雷达采用宽脉冲发射以提高发射的平均功率, 保证足够大的作用距离; 而接收时采用相应的脉冲压缩算法获得窄脉冲, 以提高距离分辨率, 较好地解决了雷达作用距离与距离分辨率之间的矛盾。LFM 信号是脉冲压缩雷达常用的调制信号, 接收时运用匹配滤波器压缩脉冲^[3]。LFM 信号数学公式为:

$$s(t) = \text{rect}(t/T) e^{j2\pi(f_c t + \frac{K}{2}t^2)} \quad (3)$$

1.3 LFM 脉冲的匹配滤波

为使滤波器输出信噪比在某一特定时刻达到理想值, 需对输出信号进行匹配滤波。可得到信号 $s(t)$ 匹配滤波器的时域脉冲响应^[4]为:

$$h(t) = \text{rect}(t/T) e^{-j\pi K t^2} x e^{j2\pi f_c t} \quad (4)$$

$s(t)$ 经过 $h(t)$ 可得输出信号 $s_0(t)$, 即:

$$s_0(t) = T \frac{\sin \pi K T (1 - |t|/T)}{\pi K T t} \text{rect}(t/2T) e^{j2\pi f_c t} \quad (5)$$

式(5)即为 LFM 脉冲信号通过匹配滤波器后的输出结果, 它是以为 f_c 固定载频的信号。当 $t \leq T$ 时, 其包络近似为辛克(sinc)函数。

$$s_0(t) = T \text{Sa}(\pi K T t) \text{rect}(t/2T) = T \text{Sa}(\pi B t) \text{rect}(t/2T) \quad (6)$$

2 MTI 基本原理

MTI 雷达利用动目标传送回波的多谱勒频移来提取信息, 从而区分运动目标和固定以及慢速运动目标^[5]。由于固定目标回波中的多谱勒频率为零, 而且慢速运动的杂波中存在的多谱勒频移也聚集在零频左右, 这些回波在相位检波后, 输出信号相位不随时间改变或随时间作缓慢改变, 映射在幅度上即为其幅度不随时间改变或随时间作缓慢改变。反之, 运动目标回波在相位检波后, 因其相位随时间改变较大, 反映在幅度上, 表现为幅度随时间改变较快。因此, 若将相邻重复周期内的回波输出信号作减法运算, 那么固定目标的回波会被完全对消, 慢速杂波也能得到很大程度衰减有运动目标得以保留。由此便可将固定目标、慢速杂波与运动目标辨别出来, 这即是 MTI 对消原理^[4]。

2.1 双脉冲对消

双脉冲对消也叫单延迟对消, 单延迟对消器可以由图 2 所示的形式实现。对消器的冲激响应用 $h(t)$ 表示。

输出 $y(t)$ 等于冲激响应 $h(t)$ 与输入信号 $x(t)$ 的卷积。

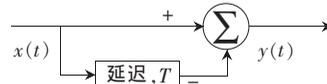


图 2 双脉冲对消

延迟 T 等于雷达脉冲重复间隔 ($1/f_r$)。输出信号 $y(t)$ 为:

$$y(t) = x(t) - x(t - T) \quad (7)$$

单延迟对消功率响应:

$$|H(\omega)|^2 = 4(\sin(\omega T/2))^2 \quad (8)$$

2.2 三脉冲对消

三脉冲对消也叫又称双延迟对消^[1], 双延迟对消器可以由图 3 所示的形式实现。

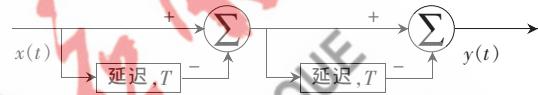


图 3 三脉冲对消

其输出信号为:

$$y(t) = x(t) - 2x(t - T) + x(t - 2T) \quad (9)$$

双延迟对消功率响应:

$$|H(\omega)|^2 = 16(\sin(\omega T/2))^4 \quad (10)$$

2.3 四脉冲对消

四脉冲对消也叫三延迟对消, 三延迟对消器可以由图 4 所示的形式实现。四脉冲对消可以很好地消除、减小雷达相干检波器输出信号中的杂波。

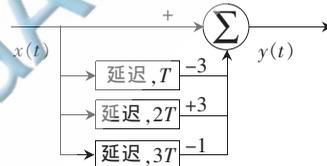


图 4 四脉冲对消

其输出信号为:

$$y(t) = x(t) - 3x(t - T) + 3x(t - 2T) - x(t - 3T) \quad (11)$$

而四脉冲对消的冲激响应为:

$$h(t) = \delta(t) - 3\delta(t - T) + 3\delta(t - 2T) - \delta(t - 3T) \quad (12)$$

对式(12)傅里叶变换得:

$$H(\omega) = 1 - 3e^{-j\omega T} + 3e^{-2j\omega T} - e^{-3j\omega T} \quad (13)$$

对式(13)求其功率:

$$\begin{aligned} |H(\omega)|^2 &= H^*(\omega)H(\omega) \\ &= (1 - 3e^{-j\omega T} + 3e^{-2j\omega T} - e^{-3j\omega T})(1 - 3e^{-j\omega T} + 3e^{-2j\omega T} - e^{-3j\omega T})^* \\ &= \frac{16}{9}(\sin(\omega T/2))^8 \end{aligned} \quad (14)$$

雷达发射信号 $s(t)$ 经过该等效 $h(t)$ 系统, 得输出信号 $s_r(t)$ 为:

$$s_r(t) = s(t) \times h(t) = s(t) \times \sum_{i=1}^N \sigma_i \delta(t - \tau_i) = \sum_{i=1}^N \sigma_i s(t - \tau_i) \quad (15)$$

2.4 参差脉冲重复频率

当 $f_d T_r = n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 时, 对消器输出为零, 即当 $f_d = n/T_r$ 时, 运动目标在对消器输出端无信号输出。当 $n = 0$

技术与方法 Technique and Method

即 $f_d=0$ 时,对应的固定目标无输出,这是理想状态。然而径向速度为零的动目标回波也会被同时抑制(这在所难免)。在 $n=1,2,3,\dots$ 时,有相似的多谱勒频率 ($f_d=n/T_r$) 的目标,在对消器输出端无信号,此时对应的多谱勒频率的目标径向运动速度称之为盲速^[2]。

$$V_b = \lambda_n / 2T_r = \lambda_n f_r / 2 \quad (16)$$

由于多谱勒频率正比于目标速度,所以多谱勒频率等于雷达脉冲重复频率 f_r 整数倍,可见盲速是目标在一个重复周期的位移恰好等于 $\lambda/2$ (或其整数倍)的速度^[2]。在信号处理过程中由于检测前后脉冲幅度相等,此处动目标被对消,造成信号的遗漏。

通过改变连续脉冲时间的脉冲重复间隔来应用脉冲重复频率捷变将盲速扩展至可接受的值,从而减少盲速问题。使用接近于 1 的参差比可以将第一真实盲速推得更远^[4]。本文采用脉冲之间的参差,对于每次扫描均能在所关注的多谱勒频率上获得良好的响应。

3 MTI 仿真及结果

通过仿真实验验证两脉冲、三脉冲及四脉冲对消响应,进而验证本文所提方法的有效性。仿真基本参数:雷达工作频率 $f_0=6.0$ MHz,发射信号带宽 $W_f=1.0$ MHz,雷达回波脉冲数 $P_n=2$,发射信号时宽 $T_w=65 \mu\text{s}$,频率调制斜率 $K=1.5 \times 10^{10}$,雷达发射脉冲重复周期 $P_r=520 \mu\text{s}$,采样频率 $f_s=5.0$ MHz,噪声功率 $N_f=-2$ dB,理论探测最大距离 $S=78$ km。

根据上述提供的线性调频信号模型,利用 Matlab 软件模拟相应的线性调频信号。根据 MTI 原理,对上述信号进行仿真,结果如图 5 所示。

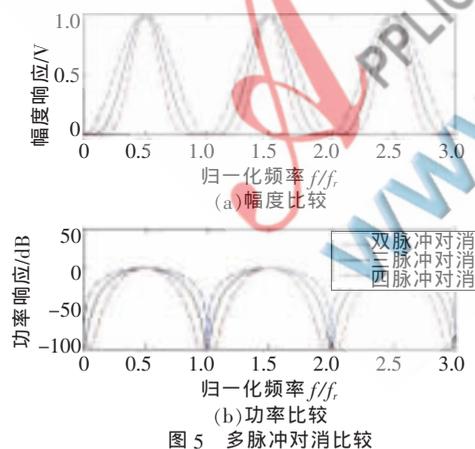


图 5 多脉冲对消比较

图 5 比较了双脉冲、三脉冲及四脉冲对消响应,可以看出,理想情况下四脉冲幅度响应比三脉冲、两脉冲幅度响应更佳,这一仿真结果与文中理论分析一致^[6]。从图中的仿真结果对比可以看出,双脉冲、三脉冲对消明显没有四脉冲对消响应拥有更好的效果。

图 6 是经过 MTI 处理后的仿真图,可以明显看出,杂波经过四脉冲对消、盲速处理后,幅度明显减少,淹没在噪声中,运动目标(5 个目标)显现在显示器上。在实际工程中要考虑到实际应用性,当脉冲过多会增大计算量,因而四脉冲的脉冲对消方法优势更为突出。

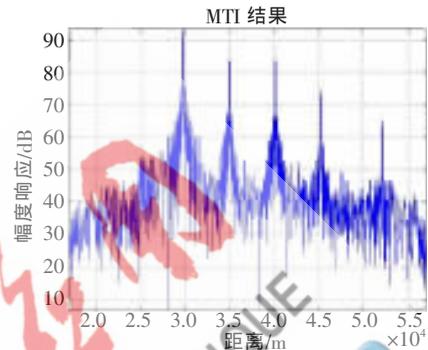


图 6 处理后动目标显示

通过理论分析及实验证明,对回波采用双脉冲、三脉冲对消在实际应用中存在不理想的动目标响应,而采用四脉冲对消及盲速处理的动目标检测方法,能对回波数据进行较强的杂波抑制,并能提取更精确的动目标回波信息,从而大大改善了在杂波背景下检测运动目标的性能。该方法较之传统的三脉冲、两脉冲方法在仿真耗时仅相差 0.05~0.15 s,并且其整体性能有显著的提升,有较强的实用性及工程应用性。

参考文献

- [1] MAHAFZA B R, ELSHERBENI A Z. 雷达系统设计 MATLAB 仿真[M]. 朱国富译. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [2] 廖建国,李永,李继杰.线性调频脉冲压缩雷达仿真研究[J].空间电子技术,2010(2):59-62.
- [3] 张斌,张英波.线性调频脉冲压缩雷达信号干扰仿真研究[J].现代电子技术,2008(7):11-13.
- [4] 罗仕红,刘春生.基于 LabVIEW 的雷达动目标仿真[J].电子设计工程,2010,18(6):33-35.
- [5] 贺静波.线性调频脉冲压缩雷达干扰仿真研究[J].舰船电子工程,2005,147(3):110-112.
- [6] 席泽敏,贺静波.线性调频脉冲压缩雷达干扰仿真研究[J].现代雷达,2005,27(10):5-7.

(收稿日期:2012-04-12)

作者简介:

李涛,男,1987 年生,硕士研究生,主要研究方向:微电子学与固体电子学。

钟志峰,男,1972 年生,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向:通信与信息系统。