

NMTI 方法在宽带雷达系统中的应用¹

贺知明 向敬成 黄巍

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: NMTI 方法是一种通过雷达回波信号脉间位移来检测运动目标的非相干方法, 可用于宽带雷达的动目标检测, 有效实现杂波抑制。该文分别以理想矩形和高斯钟形脉冲作为雷达回波信号模型, 通过仿真研究, 详细讨论了 NMTI 方法在宽带雷达中的应用。

关键词: 非相干动目标显示, 杂波抑制, 信杂比, 改善因子

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1628-06

Application of NMTI Method in Wideband Radar Systems

He Zhi-ming Xiang Jing-cheng Huang Wei

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

Abstract NMTI is a noncoherent method to detect moving target through relative range displacement between sequent radar echo signals. It can be used in wideband radar systems for moving target detection and clutter suppression effectively. In this paper, ideal rectangle and Gaussian shape pulse act as radar echo signal model. Through simulation research, application of NMTI method in wideband radar systems is discussed in detail.

Key words Noncoherent Moving Target Indication (NMTI), Clutter suppression, Signal-to-clutter ratio, Improvement factor

1 引言

雷达要探测的目标, 通常是运动着的物体, 例如空中的飞机等。但是目标的周围经常存在着各种背景, 例如各种地物、云雨、海浪及敌人释放的金属丝干扰等。这些背景可能是不动的, 如建筑物, 也可能是缓慢运动的, 如海浪、雨云。一般来说, 它们的运动速度比目标的速度小。这些背景产生的回波称为杂波。由于杂波散射面积大, 其影响是不可低估的^[1,2]。因此, 研究地面杂波对雷达信号检测的影响并采取何种方法进行有效抑制, 在理论上和技术上均有十分重要的意义。

当信号的带宽与中心频率之比在 1% 与 25% 之间时, 称为宽带 (WB) 信号, 大于 25% 时, 称为超宽带 (UWB), 而小于 1% 则为窄带 (NB)。宽带雷达的主要特征是具有很宽的带宽和较好的距离分辨力, 作为一种新的探测技术, 已引起国内外的广泛关注。利用其宽带及高分辨力的优势, 可以获得复杂目标的精细回波响应, 对目标识别和目标成像非常有利。特别是, 宽带雷达可以增强雷达散射截面 (RCS) 和改进杂波的抑制, 从而提高目标的探测能力^[3,4]。

2 NMTI 方法的原理及杂波模拟

在宽带雷达中, 由于所具备的高分辨率特点, 可以忽略回波信号的相位信息, 采用一种非相干的动目标显示 (NMTI) 方法来实现杂波抑制。NMTI 方法的原理是将同一个运动目标经过

¹ 2002-08-30 收到, 2002-11-29 改回

电子科技大学青年科技基金 (批准号: YF020203) 资助课题

一定时间间隔反射回来的两个回波信号的瞬时位置进行比较,进而将动目标和固定目标信号区分开来,它亦被一些文献称为动目标有限位移显示法。由于这种方法没有直接涉及到相干的概念,所以,称之为非相干法^[5]。

如图 1 所示,将回波信号经包络检波(去掉相位信息)之后,通过对消器,完成输入信号瞬时位置的比较。根据性能指标要求,我们选用非递归二次对消器,它又可称为三脉冲对消器,等效为两个非递归型一次对消器的级联,其递推关系式为

$$y(n) = x(n) - 2x(n-1) + x(n-2) \quad (1)$$

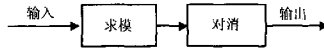


图 1 NMTI 方法的实现框图

在不同的雷达重复周期,固定杂波的回波脉冲瞬时位置基本可看作是固定不变的,故通过对消器可以消掉,而对于运动目标来说,根据运动速度的不同,在不同的雷达重复周期,其回波脉冲瞬时位置发生了变化,因此,通过对消器后不能完全消除。通过这样的方法,雷达回波信号的信杂比将得到改善,其改善程度用信杂比改善因子 I 表示,可以定义

$$I = SCR_{out}/SCR_{in} = \frac{(S_{out} + C_{out})/C_{out}}{(S_{in} + C_{in})/C_{in}} \quad (2)$$

其中 SCR_{in} , SCR_{out} 分别为输入和输出信杂比 (Signal-to-clutter ratio), S_{in} , S_{out} 分别为输入和输出信号功率, C_{in} , C_{out} 分别为输入和输出杂波功率。通过分析信杂比改善因子 I 的高低,可以判断杂波抑制效果的好坏。

在任何时刻,雷达地面杂波均是由具有相同距离上的天线主波束和旁瓣的回波所组成,并且是随机变量。对于地面雷达来说,一般可以用幅度瑞利分布、功率谱高斯分布的杂波进行模拟。杂波模拟产生的框图如图 2 所示,其中,复高斯白噪声可以用下面的方法来产生:

$$x_1 = \sqrt{-2\ln\lambda_1} \cdot \cos 2\pi\lambda_2 \quad (3)$$

$$x_2 = \sqrt{-2\ln\lambda_1} \cdot \sin 2\pi\lambda_2 \quad (4)$$

$$x = x_1 + jx_2 \quad (5)$$

式中 λ_1 , λ_2 分别为独立的服从 (0,1) 均匀分布的随机数,让 x_1 , x_2 分别作为复数数据 x 的实部和虚部,便可得到幅度服从瑞利分布的白噪声。然后让它通过一个窄带低通滤波器就可以得到指定带宽的杂波。用满足高斯分布的滤波器可以对实际的地物杂波进行比较真实的模拟。

我们将分别以理想矩形和钟形脉冲作为回波信号模型,通过计算机仿真,研究其在宽带条件下的应用。结合实际课题中的参数设定,取雷达工作频率为 1.2GHz,雷达接收机中频带宽为 200MHz,满足宽带条件。此外,在仿真研究中,取杂波模拟中的低通滤波器的 3dB 带宽为 6Hz,雷达脉冲重复周期为 500 μ s。

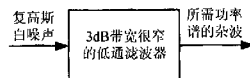


图 2 杂波模拟框图

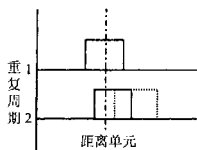


图3 采用矩形脉冲的 NMTI 示意图

3 理想矩形信号模型的 NMTI 方法仿真

为了研究的方便,先取动目标回波信号的最理想形式,即用矩形脉冲来进行仿真。这种情况下,假设脉冲宽度内信号幅度保持恒定,脉冲的中心点进行采样。采用矩形脉冲的 NMTI 原理如图 3 所示,对同一个距离单元,以 2 个脉冲重复周期作比较。当目标运动速度较小时,第 2 个脉冲重复周期的回波脉冲没有移出脉冲宽度的 1/2,动目标脉冲将会与杂波一样被对消掉(如图 3 中第 2 重复周期时用实线表示的脉冲位置);当目标运动达到一定速度之后,第 2 个脉冲重复周期的回波脉冲移出了脉冲宽度的 1/2,动目标脉冲不会被对消掉(如图 3 中第 2 重复周期时用虚线表示的脉冲位置),此时,信杂比将得到改善。综上,为了有足够把握将动目标回波信号检测出来,必须保证动目标在这段时间内移动的距离不小于电磁波在一个时间 τ 内所传播的距离的一半,即

$$T_{iv} \geq (c\tau/2)(1/2) = c\tau/4 \quad (6)$$

其中,电磁波传播速度 $c = 3 \times 10^8$ m/s, τ 为雷达脉冲宽度,等于雷达接收机中频带宽 B 的倒数, T_i 为对消时间间隔,可设为与雷达脉冲重复周期 T 或 nT 相等 (n 为整数)。根据实际课题要求,分别取 $B = 200$ MHz, $T = 500 \mu$ s, 并取 $T_i = T$ 。在这种情况下,如果要把运动目标(如飞机)完全区分开的话,由式(6),其理论速度至少应该为

$$v = \frac{c\tau}{4T_i} = \frac{c}{4TB} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 500 \times 10^{-6} \times 200 \times 10^6} = 750 \text{ m/s} \quad (7)$$

如果动目标的飞行速度小于这个最小值,即在时间 T 内不能有足够的位移,动目标回波信号和输入的固定杂波一起被对消了,从而导致信杂比无法得到改善。表 1 给出了相应条件下,对比动目标相对地面雷达平台的不同速度 v 及不同输入信杂比 ($\text{SCR}_{in} = 0$ dB, -5 dB),采用 NMTI 方法实现杂波抑制的信杂比改善情况。

表 1 矩形信号模型 NMTI 方法单脉冲处理时的信杂比改善因子 (dB)

输入信杂比 SCR_{in} (dB)	动目标速度 v (m/s)				
	≤ 753	754	800	900	1000
0	无改善	25.67	28.82	28.39	28.37
-5	无改善	22.43	24.99	26.54	25.03

由表 1 可以看出,当 $v \leq 753$ m/s 时,信杂比没有改善。这与前面阐述的此种情况下,理论计算的 750 m/s 的最低检测速度非常吻合。随着速度的增加, NMTI 的信杂比改善因子基本变化不大,总体上可以达到 28 dB 以上。此外,在相同速度下,输入信杂比为 0 dB 时比输入信杂比为 -5 dB 时,其信杂比改善因子略优,与实际情况相符。图 4 为 NMTI 方法单脉冲处理时的杂波抑制情况,与输入杂波相比,对消之后的输出杂波大都被消除了。

由式(7),当雷达脉冲重复周期 T 与接收机中频带宽 B 的乘积取值越大, NMTI 方法所要求的运动目标的速度限制就越小,这也是 NMTI 方法适用于宽带雷达杂波抑制的主要原因。

当然,在宽带的条件下,如果雷达脉冲重复周期 T 取值过小,也将导致 NMTI 方法在动目标速度较低时失效。

对于低速目标的检测,我们可以采取将多个周期回波脉冲分组进行处理,这种情况下,有两种方法可以考虑:(1)是将单个脉冲中心位移的比较变为脉冲组中心位移的比较;(2)是采取隔 n 个回波脉冲进行比较的方法,即将两个相邻回波脉冲位移的比较变为第 1 个与第 $n+1$ 个,第 2 个与第 $n+2$ 个等等,这些间隔为 n 的回波脉冲之间位移的比较。两种方法都相当于使雷达重复周期成倍的增加,在很大程度上降低了 NMTI 方法所要求的速度限制。以 5 个脉冲一组为例,信杂比改善情况的仿真结果由表 2 和表 3 给出。

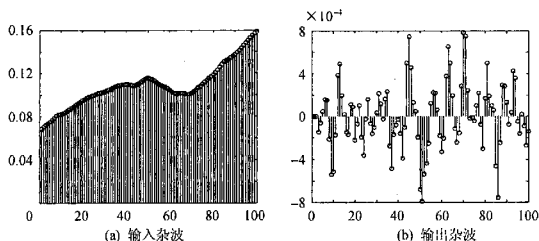


图 4 NMTI 单脉冲处理方法的杂波抑制情况

表 2 矩形脉冲分组处理方法 1 的信杂比改善因子 ($n=5$)

SCR _{in} (dB)	动目标速度 v (m/s)					
	≤ 150	200	400	600	800	1000
0	无改善	5.47	8.71	10.38	11.89	12.86
-5	无改善	4.64	8.06	10.16	11.82	12.70

表 3 矩形脉冲分组处理方法 2 的信杂比改善因子 ($n=5$)

SCR _{in} (dB)	动目标速度 v (m/s)					
	≤ 150	200	400	600	800	1000
0	无改善	19.56	22.10	23.80	25.64	25.32
-5	无改善	19.23	21.75	23.53	24.71	24.55

可以看出,当 $v \leq 150$ m/s 时,两种方法均不能改善信杂比。将它与 (7) 式中所得限制速度的 1/5(每组取 5 个脉冲数,相当于脉冲重复周期扩为原来的 5 倍,即 $750\text{m/s} \div 5=150$ m/s) 作比较,是完全一致的,这也再一次验证了前面的理论计算结果。此外,在同样有效的速度下,两种方法所得到信杂比改善情况比单脉冲处理时较差,并且二者的杂波抑制效果也是不一样的,方法 2 的信杂比改善因子明显高于方法 1。图 5 和图 6 中输入输出杂波的比较可以合理地解释这一结果。

可以看出,采用 NMTI 成组处理方法 2 的杂波抑制情况明显优于方法 1,且均比单脉冲处理时的杂波抑制情况要差(有效速度条件下)。这与前面信杂比改善因子的仿真结果是一致的。所以,在检测高速运动目标时,宜采用单脉冲处理的 NMTI 方法,而在检测低速运动目标时,需采用上述的 NMTI 成组处理方法 2 来进行杂波抑制。

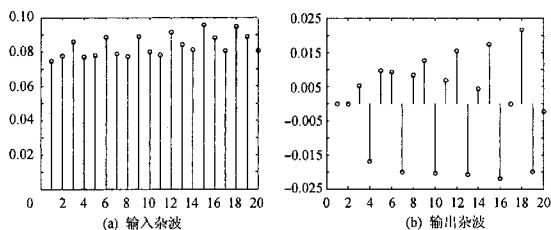


图5 NMTI 成组处理方法 1 的杂波抑制情况

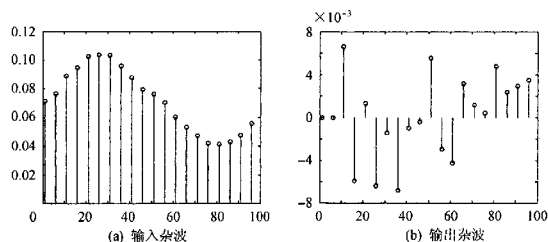


图6 NMTI 成组处理方法 2 的杂波抑制情况

4 钟形信号模型的 NMTI 方法仿真

由于前面仿真中采用的矩形脉冲信号是一种非常理想的情况，它的一个突出限制就是运动目标必须达到一定的速度后，回波信杂比才会有所改善。而实际情况中，信号脉冲不是矩形，而是钟形的。这样的话，即使很小的速度，其对应运动目标回波脉冲信号的位移也将导致对消器的输出不为零，从而使信杂比得到改善。图7给出了采用钟形脉冲的 NMTI 的原理。图7中，脉冲的形状是钟形的，仍为中心点采样，同样对一个距离单元，以2个脉冲重复周期作比较。理论上，只要目标运动，就一定可以对消出一个 Δ 值， Δ 值的大小决定最终信杂比改善因子的高低。

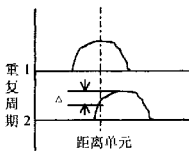


图7 采用钟形脉冲的 NMTI 示意图

在具体的仿真研究中，我们采用高斯曲线作为钟形脉冲模型。表4给出了相应条件下，对比运动目标相对地面雷达平台的不同速度 v 及不同输入信杂比 ($SCR_{in} = 0\text{dB}, -5\text{dB}$)，采用 NMTI

方法实现杂波抑制的信杂比改善情况。

表 4 信号采用高斯形脉冲时 NMTI 的信杂比改善因子 (dB)

SCR _{in} (dB)	动目标速度 v (m/s)					
	50	100	250	500	750	1000
0	26.73	28.55	28.92	29.31	31.55	31.51
-5	22.09	23.31	23.76	25.21	26.18	26.16

这种情况避免了采用矩形脉冲仿真时的速度限制, 从低到高的不同速度下, 信杂比均有较明显的改善。同时, 我们可以看到, 随着运动目标速度的增大, 信杂比改善因子也不断提高, 增至 750m/s 的速度后, 信杂比改善因子不会再有大的变化, 基本上保证 30dB 以上, 完全能够满足实际课题的指标要求。此时, 第 2 重复周期的回波脉冲已完全移过第 1 重复周期回波脉冲的中心采样点, 对消结果达到最大差值, 信杂比改善也达到最优效果。

5 结 论

通过仿真分析, 我们看到, 在相应的速度条件下, 杂波抑制的改善因子指标完全能够满足实际应用要求; 由于不必考虑回波的相位信息, 其实现过程比相干处理更加简单, 降低了系统设计的复杂性; 另外, 其运算量远远小于包含采用 FFT 的动目标检测 (MTD) 方法, 仅要求较少的处理时间即可完成, 有利于减少雷达系统的硬件规模。由于 NMTI 方法要求雷达对目标有很高的分辨率, 所以这种方法在窄带雷达的应用受到了一定限制。随着脉冲压缩技术及宽带雷达技术的发展, 已给这种方法的应用提供了可能, 其简单易实现的优势将在宽带雷达信号处理系统的设计中得到进一步的发挥。

参 考 文 献

- [1] Farina A, Russo A. Radar detection of correlated targets in clutter. *IEEE Trans. on AES*, 1986, AES-22(5): 513-532.
- [2] (美) 杰里·L·伊伏斯, 爱德华·K·里迪著, 卓荣邦, 杨士毅, 张金全等译. 现代雷达原理. 北京: 电子工业出版社, 1991, 第九, 十, 十四章.
- [3] Immoreev I. Ultra wide band location, Main features and differences from common radiolocation. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 1997, 2(1): 81-88.
- [4] 向敬成, 张明友. 雷达系统. 北京: 电子工业出版社, 2001, 第七章.
- [5] 陈春林. 动目标选择雷达. 北京: 国防工业出版社, 1981, 第三章.

贺知明: 男, 1972 年生, 讲师, 博士生, 主要从事宽带雷达信号处理、并行处理机设计及相关算法研究工作。

向敬成: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事雷达系统分析与设计、雷达信号处理等领域的研究工作。

黄 巍: 男, 1968 年生, 博士生, 主要从事宽带雷达信号检测及相关算法研究工作。