

## 宽带雷达中消除“盲速”的动显方法研究

贺知明\* 黄巍 向敬成

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】** 动目标显示雷达中通常存在多普勒频率所引起的“盲速”现象，常采用参差脉冲重复频率的方法来克服这种不利影响。在宽带雷达中，也可采用一种通过雷达回波信号的瞬时位移来检测运动目标的非相干动目标显示方法，在完全克服“盲速”影响并简化系统设计的同时，亦能够实现包括低速目标在内的不同速度目标的有效检测。该文分别对这两种杂波抑制方法进行了研究，最后得出了宽带高分辨雷达进行杂波抑制的有效实现方法。

**关键词** 盲速；参差脉冲重复频率；非相干动目标显示；信杂比改善因子  
中图分类号 TN951 文献标识码 A

## Study on MTI Method of Eliminating “Blind Speed” in Wideband Radar

He Zhiming Huang Wei Xiang Jingcheng

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

**Abstract** “Blind speed” phenomenon due to Doppler frequency usually exists in moving target indication radar. This disadvantage affect is avoided through staggered pulse repetition frequency method. In wideband radar, a noncoherent moving target indication method is adopted, which is used to detect the moving target through instantaneous displacement of radar echo signals. It not only can completely avoid the affect of “blind speed” and simplifies system design, but also can effectively detect the targets of different speed including low speed. In this paper, these two clutter suppression methods are researched, and the corresponding results of analysis are finally presented.

**Key words** blind speed; staggered pulse repetition frequency; noncoherent moving target indication; signal-to-clutter ratio improvement factor

雷达在探测各种运动目标时均会受到杂波干扰的影响。由于地物杂波和气象杂波相对于地面搜索雷达来说是静止不动或慢速运动的，而空中目标是时刻在运动的，动目标回波和杂波回波在时延、相位和频率三个方面存在差别：1) 固定杂波回波相对于雷达发射脉冲的时延是常数，动目标回波相对于雷达发射脉冲的时延是变化的，这种变化对窄带低分辨雷达而言是不明显的，但对于宽带高分辨雷达，在目标高速运动时，是较容易区分的。2) 固定杂波回波与雷达发射脉冲间的相位差是恒定的，而动目标回波与雷达发射脉冲间的相位差在不同重复周期内是变化的，这一相位差随时间变化的速率即运动目标回波信号的多普勒频移。3) 固定杂波回波的频率和发射源的频率相同，其多普勒频率为零；动目标回波频率和发射源的频率有

2002年5月19日收稿

\* 男 30岁 博士 讲师 主要从事宽带雷达信号处理方面的研究

一差值,其多普勒频率不为零<sup>[1]</sup>。

针对动目标与杂波的不同特性,信号处理时常用一种既能消除杂波,又能保留动目标信号的对消器,该项技术称之为动目标显示(Moving Target Indication, MTI)。由于多普勒频移的影响,“盲速”效应是需要解决的问题。通常采用参差,即改变雷达脉冲重复频率的方法,使多普勒频率不等于脉冲重复频率的整数倍来消除“盲速”影响。对于宽带高分辨率雷达,可采用不考虑回波相位,即仅仅比较回波瞬时位移的(Noncoherent Moving Target Indication, NMTI)方法进行对消处理<sup>[2]</sup>,在完全消除“盲速”影响并简化系统设计的同时,亦能够实现包括低速目标在内的不同速度目标的有效检测。本文对上述两种克服“盲速”影响的动目标显示方法进行较为深入的讨论,得出相应的仿真与分析结果。

## 1 MTI及其“盲速”效应

对消器实际上就是滤波器(通常称为MTI滤波器),它利用动目标回波和杂波在频谱上的区别,有效的抑制杂波而提取信号。为了抑制杂波,其滤波特性应根据杂波频谱来设计,使滤波器凹口对准杂波谱线。处在某一距离单元的回波,在理想的情况下,是一串等幅脉冲,其频谱是以单个脉冲频谱为包络,间隔为 $1/T_r$ 的一系列离散谱线。实际上,由于天线扫描的影响,脉冲串的包络是受天线波瓣图形状所调制。并且,固定杂波通常还存在内部起伏,其结果是使回波脉冲的幅度和相位有少量变化。这些影响致使频谱的离散谱线展宽,而成为间隔为 $1/T_r$ 的梳状谱。天线扫过目标收到的回波脉冲数愈少,杂波内部起伏愈大,则梳状谱的宽度就愈宽。

由于杂波谱线的展宽,简单的一次对消器已不能很好的滤去杂波,需要进一步改善滤波器的特性。为了在稳定的条件下获得较好的杂波改善,可选用非递归二次对消器,如图1所示。其传递函数可以写为

$$H(z) = (1 - Z^{-1})^2 = 1 - 2Z^{-1} + Z^{-2} \quad (1)$$

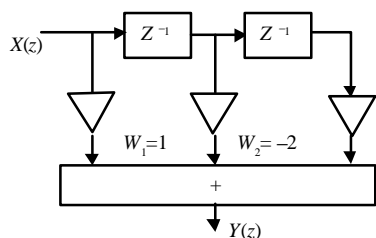


图1 非递归二次对消器

它等效为两个非递归型一次对消器级联。通过这样的对消方法,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,定义为

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

式中  $SCR_{in}$ 、 $SCR_{out}$  分别为输入和输出信杂比,  $S_{in}$ 、 $S_{out}$  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。

当目标的径向速度等于雷达的盲速时,相邻重复周期,动目标的相参视频回波电压的幅度相等。对消后对消视频回波电压的幅度始终为零;当目标的径向速度接近于雷达的盲速时,动目标的对消视频回波电压的幅度很小。雷达的盲速相对应的多普勒频率为

$$f_d = \frac{2v_{r0}}{I} = nf_r \quad (3)$$

而在雷达测量中,最大不模糊距离和最大不模糊速度的乘积为

$$R_{vmax} v_{rmax} = \frac{cI}{8} = \frac{c^2}{8f_0} \quad (4)$$

这是一个只由雷达工作波长(或工作频率)决定的参数。当重复频率选得比较高时,可得到较大的不模糊测速范围,但最大不模糊测距范围相应减小。在地面雷达中,常选择低重复频率,以保证最大作用距离内无测距模糊,但在检测目标时会遇到“盲速”问题。这时,可采用参差重复频率的方法(即采取两个以上不同重复频率交替工作)来克服“盲速”对MTI雷达的影响。

## 2 参差方法仿真

采用参差重复频率方法,不仅可以较好的解决“盲速”问题,而且可以用改变参差次数及其比值的方

法获得不同的速度响应(或等效MTI滤波器响应)<sup>[3, 4]</sup>。实际上,参差重复频率方法不是消除了“盲速”,而是提高了第一“盲速”的数值,使其第一等效“盲速”大于实际目标的最高速度。

设雷达采用两种脉冲重复频率 $f_{r1}$ 和 $f_{r2}$ 交替工作,而 $f_{r1}$ 和 $f_{r2}$ 均满足最大不模糊测距的要求。根据实际课题要求,选取参差比 $T_1:T_2=500\ \mu\text{s}:375\ \mu\text{s}=4:3$ 进行仿真。由多普勒频移公式

$$f_d = \frac{2v}{I} = \frac{1}{T_r} \tag{5}$$

式中  $I = c/f_0 = 3 \times 10^8 / 1.2 \times 10^9 = 0.25\ \text{m}$ , 可知,当 $T_{r1} = 500\ \mu\text{s}$ 时,相应的第一“盲速”为 $v = 250\ \text{m/s}$ ;当 $T_{r2} = 375\ \mu\text{s}$ 时,相应的第一“盲速”为 $v = 333.3\ \text{m/s}$ ;而采用参差后的等效第一“盲速”则变为

$$v' = \frac{a+b}{2} v = \frac{4+3}{2} \frac{I}{(T_{r1}+T_{r2})} = 1\ 000\ \text{m/s}$$

为了比较好的对未用参差和采用参差的MTI方法做出比较,可以绘出信杂比改善因子——速度图( $I$ - $v$ 图)。相应的 $I$ - $v$ 曲线如图2所示,图中,模拟杂带宽统一采用6 Hz,所采用的数据为仿真的数据经过加上距离上位移和相应的多普勒频率得到的,采用的对消器均为非递归二次对消器。

从图中可以看到,采用参差后的平均改善因子 $\bar{I} \approx 57\ \text{dB}$ ,把其余未用参差的第一“盲速”进行比较可以算出其改善因子提高了11 dB左右,因此比较好的消除了第一“盲速”的影响。从上面的对比图中可以归纳出采用参差后不仅有效的提高了第一“盲速”,而且采用参差后的改善因子的曲线比未采用时更加平坦,这说明参差也能使MTI的检测方法更加稳定,使其受速度的变化影响不大。

从图中还可看到,对于低速目标,“盲速”的影响依旧存在;同时,由于需要采用多个重复频率,系统实现较为复杂。在宽带高分辨雷达中,一种实现较为简单且行之有效的解决方案就是采用与多普勒频移无关的非相干动目标显示——NMTI方法。

### 3 NMTI方法研究

NMTI(非相干动目标显示)是将同一个运动目标经过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。由于这种方法没有涉及到回波相位概念,所以,称之为非相干法<sup>[2]</sup>。

NMTI方法的实现如图3所示,从图中看出,它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,仍旧选用前面介绍的非递归二次对消器,并采取式(2)的定义来计算信杂比改善因子 $I$ 。通过比较信杂比改善因子 $I$ 的高低,来分析NMTI方法杂波抑制的性能。

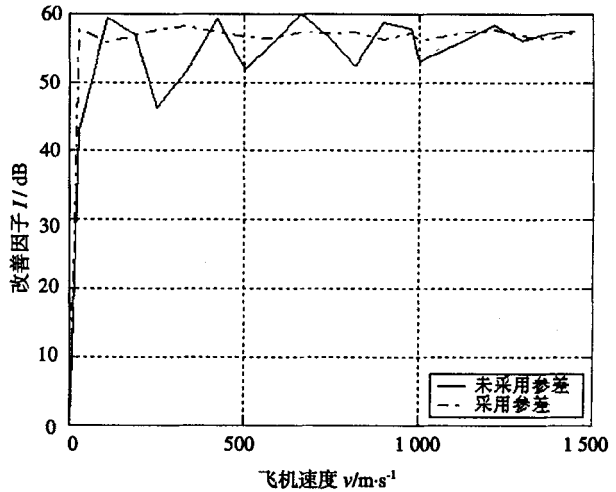


图 2 不同速度条件下,参差与未参差的 MTI 性能对比

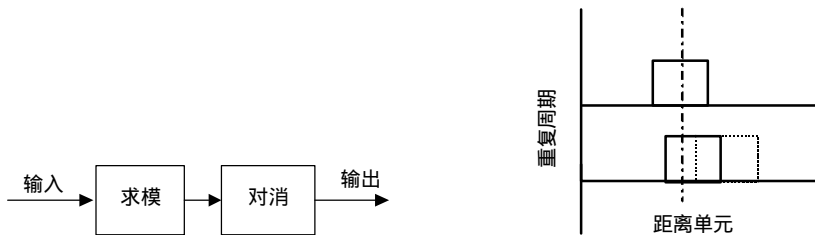


图3 NMTI方法的实现框图

图4 矩形脉冲NMTI示意图

在仿真过程中,采用幅度瑞利分布、功率谱高斯分布的杂波进行模拟,即让复高斯白噪声通过不同带

宽的窄带低通滤波器以得到不同的杂波。结合实际应用中的参数设定,取雷达工作频率为1.2 GHz,雷达接收机中频带宽为200 MHz,满足宽带条件。杂波模拟中,取低通滤波器的3 dB带宽为6 Hz,雷达脉冲重复周期为500  $\mu\text{s}$ 。对不同的信号模型,分析的结果有所不同。下面就对采用不同回波模型的NMTI仿真与分析结果分别予以讨论。

### 3.1 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4所示。从图中看出对同一个距离单元,以相邻脉冲重复周期作比较。当目标运动速度较小时,下一个重复周期的回波脉冲没有移出脉冲宽度的1/2,动目标脉冲将会和杂波一样被对消掉(如图中第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,下一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(如图中第2重复周期时用虚线表示的脉冲位置),此时,回波信杂比将得到改善。综上所述,为了有足够把握将动目标回波信号检测出来,必须保证动目标在对消脉冲时间间隔 $T_i$ 内移动的距离不小于电磁波在脉冲宽度 $t$ 内所传播的距离的一半,即

$$T_i v \geq \frac{ct}{2} \quad (6)$$

式中  $c = 3 \times 10^8$  m/s为电磁波传播速度, $t$ 为雷达脉冲宽度,等于雷达带宽 $B$ 的倒数, $T_i$ 为对消时间间隔,可设为与雷达脉冲重复周期 $PRT$ 相等。在这种情况下,如果要把运动目标(如飞机)完全区分开的话,其理论最低速度应为

$$v = \frac{ct}{4T_i} = \frac{c}{4PRTB} \quad (7)$$

如果动目标的飞行速度小于这个最小值,即在 $PRT$ 时间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。此时,最低检测速度为750 m/s。

表1给出了相应条件下,对比不同动目标速度 $v$ 及不同输入信杂比( $SCR_{in} = 0$  dB,  $-5$  dB),采用NMTI方法实现杂波抑制的信杂比改善情况。

当 $v > 750$  m/s时,信杂比没有改善。这与前面阐述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上变化不大,总体上可以达到30 dB以上,能够满足指标要求。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时的信杂比改善因子略优,但总的来说影响不大。

由前面的分析可以看出,当雷达脉冲重复周期 $PRT$ 与信号带宽 $B$ 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 $PRT$ 取值过小,将导致NMTI方法在动目标速度较低时失效。

表1 矩形脉冲相邻重复周期NMTI方法的

$SCR_{in}$	信杂比改善因子						单位 :dB
	动目标速度 $v / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$						
	750	800	850	900	950	1 000	
0 dB	无改善	32.08	32.55	32.61	32.77	32.26	
$-5$ dB	无改善	31.29	31.89	32.07	31.94	32.12	

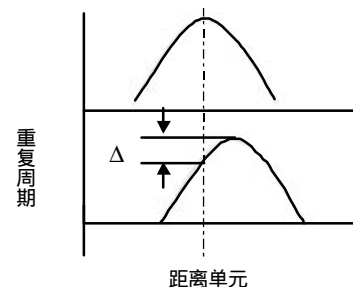


图5 钟形脉冲 NMTI 示意图

### 3.2 钟形信号模型的NMTI方法仿真

钟形脉冲的NMTI的原理如图5所示,从图中知,脉冲的形状是钟形的,采用中心点采样,对一个距离单元,以相邻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 $\Delta$ 值, $\Delta$ 值的大小决定最终信杂比改善因子的高低。在具体的仿真研究中,采用高斯函数(3 dB处作截断处理)作为钟形脉冲模型。

表2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( $SCR_{in} = 0$  dB,  $-5$  dB),采用NMTI方法实现杂波抑制的信杂比改善情况。

在表2中,选取了几个比较典型的速度进行二次对消输出,可明显看出低速目标也可获得比较好的对消结果(最低检测速度可达9 m/s)。因此,采用钟形脉冲进行NMTI的仿真很大程度上避免了采用矩形脉冲时的速度限制,从低到高的不同速度下,信杂比均有较明显的改善。同时,可看到,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750 m/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50 dB左右,完全能够满足实际应用的指标要求。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。此外,随着输入信杂比的提高,信杂比改善因子略有增加,但总的来说,影响不明显。

表2 信号为高斯钟形脉冲时NMTI的信杂比改善因子 单位: dB

$SCR_{in}$	动目标速度 $v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$							
	<9	9	50	100	300	500	750	1 000
0 dB	无改善	30.64	37.09	39.58	45.06	47.44	51.32	50.81
-5 dB	无改善	29.75	36.57	39.41	44.69	47.15	49.77	50.12

## 4 结束语

相干处理的MTI方法,由于多普勒频移的影响,存在“盲速”效应的问题。通常可采用参差重复频率的方法,通过提高第一合成“盲速”的值,以等效地克服“盲速”的影响。通过本文的仿真研究,在相应参数条件下,采用参差后的平均改善因子达到约57 dB,比未用参差时第一“盲速”对应的信杂比改善因子提高了10 dB以上,较好地消除了第一“盲速”的影响。其缺点在于,由于采用多个脉冲重复频率,因此系统控制相对复杂。

对于宽带高分辨雷达,可以采用非相干处理的NMTI方法,即通过雷达回波信号的瞬时位移来检测运动目标的非相干动目标显示方法,在完全克服“盲速”影响并简化系统设计的同时,亦能够实现包括低速目标在内的不同速度目标的有效检测。在研究中,首先采用理想矩形脉冲模型,对NMTI方法在原理上进行了仿真与分析;在此基础上,采用与实际回波信号较为接近的钟形脉冲模型进行仿真,从低到高的不同速度下,信杂比均有较明显的改善,能够满足实际应用的指标要求。根据不同雷达对信号处理的具体要求,可以选择不同的设计方案。在宽带高分辨雷达中,不受“盲速”影响、处理方法相对简单的NMTI技术完全可以作为实现雷达杂波抑制的一条重要途径。

本文的研究工作得到了电子科技大学青年科技基金资助,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 王小谟,张光义,贺瑞龙,等. 雷达与探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [2] 陈春林. 动目标选择雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981
- [3] 王意青,张明友. 雷达原理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1993
- [4] (美)杰里L.伊伏斯,爱德华K.里迪. 现代雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1991

编 辑 刘文珍