

# 脉冲雷达中频采样系统的镜频抑制性能分析与参数设计

雷 文, 龙 腾, 曾 涛, 毛二可

(北京理工大学电子工程系, 北京 100081)

**摘 要:** 本文研究了脉冲雷达信号包络对中频采样的影响,重点分析了非理想包络对镜频抑制的影响,主要是产生镜频、幅度损失;作为一种特例,详细研究了简单脉冲信号矩形包络边沿对镜频抑制的影响;分析了不同系统参数对镜频抑制的影响,以保证脉冲边沿特性,并尽可能减少镜频影响.本文还分析了线性调频信号中频采样处理时的镜频抑制影响.

**关键词:** 单脉冲雷达; 中频采样; 镜频抑制; 包络; 参数

**中图分类号:** TN958.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1585-04

## Performance Analysis of Mirror Frequency Rejection and Parameter Design for Intermediate Frequency Sampling System of Pulse Radar

LEI Wen, LONG Teng, ZENG Tao, MAO Er-ke

(Electronics Engineering Dept. of Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The influence of the envelope of pulse radar signal on the intermediate frequency sampling is investigated, especially the influence of non-ideal envelope on mirror frequency rejection is studied, and the main influences of mirror frequency and amplitude loss are pointed out. As a special case, the effect of rectangular-envelope-edge of pulse signal on intermediate frequency sampling is carefully studied. The influence of different parameters on mirror frequency rejection is analyzed to ensure the pulse edge character after intermediate frequency sampling and to reduce mirror frequency as much as possible. Moreover, the influence of mirror frequency rejection of intermediate frequency sampling is researched for linear modulated frequency pulse signal.

**Key words:** pulse radar; intermediate frequency sampling; mirror frequency rejection; envelope; parameter

### 1 引言

现代雷达的趋势是向全数字化方向发展,采用直接数字中频采样技术是实现这一目标的一个重要组成环节<sup>[1-4]</sup>.

本文选择了一种具有代表性的滤波器形式<sup>[4]</sup>对中频采样输出进行镜频抑制,其滤波器时域输出、输入关系如下:

$$y_k = x_k - j \sum_{i=1}^n a_i (x_{k+2i-1} - x_{k-2i+1}) \quad (1)$$

其中  $a_i$  表示滤波器的系数.此外,中频  $f_i$  和中频采样频率  $f_{is}$  之间还应满足下式<sup>[4]</sup>,

$$f_{is} = 4f_i / (2p + 1) \quad (2)$$

其中  $p$  为正整数.式(1)中的数字滤波器是在假设用来滤波的所有采样点都处在脉冲包络内、并且幅度均等的条件下,得到理想镜频抑制输出而设计的.但是实际脉冲回波包络一般都是非理想的,幅度并不均匀.因此,根据理想回波包络设计的镜频抑制滤波器,对于非理想回波包络来说,就会得不到理想镜频抑制输出,可能会出现镜频,影响脉冲包络边沿的陡峭

性.而在电子对抗中,对于脉冲雷达体制来说,具有陡峭的脉冲边沿特性是保证抗拖引——一种重要的反电子欺骗干扰方法的重要因素.

本文首先分析了理想及非理想脉冲包络的镜频抑制输出结果;然后分析了不同系统参数对镜频抑制的影响,以保证脉冲信号边沿特性,并减少镜频抑制不干净引起的镜频;最后分析了线性调频脉冲信号的中频镜频抑制影响.仿真结果表明本文对系统参数影响的分析及其选择具有实际意义,为直接数字中频采样系统参数选择提供了理论依据.

### 2 简单脉冲信号镜频抑制原理及分析

#### 2.1 脉冲信号镜频抑制原理

简单脉冲回波上,第  $k + k_0$  个采样点和第  $k$  个采样点的频谱关系如下,其中  $b_{k, k_0}$  为第  $k_0 + k$  个采样点相对于第  $k$  个采样点的频谱幅度加权系数:

$$X_{k+k_0}(\omega) = b_{k, k_0} e^{j k_0 T_{is} \omega} X_k(\omega) \quad (3)$$

对应于式(1)的时域镜频抑制滤波公式,由式(3)可得相应的频域滤波公式为:

$$Y_k(\omega) = X_k(\omega) \left( 1 + 2 \sum_{i=1}^n a_i \sin((2i-1)T_{is}) \right) - j \sum_{i=1}^n a_i (b_{k,2i-1} - 1) e^{j(2i-1)T_{is}} X_k(\omega) + j \sum_{i=1}^n a_i (b_{k,-2i+1} - 1) e^{-j(2i-1)T_{is}} X_k(\omega) \quad (4)$$

由式(4)可见,  $b_{k, k_0}$  为 1 时,表示的是理想镜频抑制输出;  $b_{k, k_0}$  不为 1 时,表示的是包络非线性时的镜频抑制输出。

**2.1.1 理想简单脉冲信号镜频抑制** 对于简单脉冲信号来说,输入信号为单点频信号,假定输入信号为  $x(t) = \sin(\omega t)$ , 则输入信号频谱为

$$X_k(\omega) = (1/2j) (\delta(\omega - \omega_0) - \delta(\omega + \omega_0)) \quad (5)$$

因此,对于简单脉冲信号来说,镜频抑制的目的就是滤掉输入信号中的那根负谱。

考虑到目标运动造成的多普勒速度影响,镜频抑制滤波器的带宽应该覆盖目标运动速度所有可能范围,故镜频抑制滤波器带宽对应 2 倍目标最大多普勒速度。

理想情况下,所有用来镜频抑制的采样点幅度一致,并都在脉冲内,才能得到文献[4]中理想的镜频抑制结果。

由镜频抑制滤波器系数定义<sup>[4]</sup>可知

$$1 + 2 \sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_0(2i-1)T_{is}) = 0 \quad (6)$$

因此,简单脉冲的理想镜频抑制输出为

$$Y_k(\omega) = (1/j) \delta(\omega - \omega_0) \quad (7)$$

**2.1.2 非均匀包络对镜频抑制的影响** 矩形回波信号通过中频放大器后,由于中频放大器频响带宽有限,包络不再是矩形的,而是钟形的,包络变得更为平滑、脉冲边沿变得更平坦。此外,其它因素也会造成回波包络幅度的非均匀性,从而镜频抑制得不到式(7)的最终结果,可能会产生镜频,形成假目标,并造成幅度损失。

这种情况下,由于各采样点幅度与包络上的采样幅度直接成正比,第  $k_0 + k$  个采样点相对于第  $k$  个采样点的频谱幅度加权系数  $b_{k, k_0}$  不再为 1。

由式(2)的关系式,可得式(4)的输出结果为:

$$Y_k(\omega) = (1/j) \delta(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} j \sum_{i=1}^n a_i (b_{k,2i-1} + b_{k,-2i+1} - 2) (-1)^{(i-p)} \delta(\omega - \omega_0) - \frac{1}{2} j \sum_{i=1}^n a_i (b_{k,2i-1} + b_{k,-2i+1} - 2) (-1)^{(p-l)} \delta(\omega + \omega_0) \quad (8)$$

由式(8)可见,等号右边第二项、第三项分别表示真实频率误差和镜频的大小,并且真实频率幅度误差等于镜频幅度;不同的幅度加权系数  $b_{k, k_0}$ , 对应不同的真实频率和镜频输出。当所有可能的  $k$  值满足式(9)时,式(8)与式(7)相等,各采样点得到的镜频抑制滤波结果是干净的镜频抑制滤波结果,无镜频影响。

$$\sum_{i=1}^n a_i (b_{k,2i-1} + b_{k,-2i+1} - 2) (-1)^{(i-p)} = 0 \quad (9)$$

上式中,  $k$  表示脉冲包络上的采样点位置。

当式(9)不能满足时,镜频抑制不能将镜频彻底滤除,并且真实频率处会存在一定的幅度损失。由式(9)可见,采样点间包络的非线性是产生镜频的主要原因。

**2.2 脉冲边沿对镜频抑制影响分析**

标准矩形脉冲边沿是脉冲包络非理想的一种特例。下面就这种特例进行分析。

**2.2.1 幅度损失及镜频泄露** 当利用式(1)对脉冲边界上的采样点进行镜频抑制时,一部分采样值已位于脉冲之外。假设有  $m$  个采样点在脉冲之外,  $n$  是镜频抑制滤波阶数,此时镜频抑制输出结果为

$$y_k = x_k - j \left( \sum_{i=1}^n a_i x_{k+2i-1} - \sum_{i=1}^{n-m} a_i x_{k-2i+1} \right), \quad n - m > 0 \quad (10)$$

$$\text{或 } y_k = x_k - j \sum_{i=1}^n a_i x_{k+2i-1}, \quad n - m = 0 \quad (11)$$

式(10)的频域变换结果为:

$$Y_k(\omega) = X_k(\omega) - j \sum_{i=1}^n a_i e^{j(2i-1)T_{is}} X_k(\omega) + j \sum_{i=1}^{n-m} a_i e^{-j(2i-1)T_{is}} X_k(\omega) \quad (12)$$

式(11)频域变换结果和式(12)与理想镜频抑制输出相比,少了式(13)这一项。由此可见,镜频抑制结果不干净,得不到干净频谱,还残留有频谱泄露得到的镜频,并且真实频率的幅度有损失。

$$Y_k(\omega) = j \sum_{i=n-m+1}^n a_i e^{-j(2i-1)T_{is}} X_k(\omega) \quad (13)$$

由于中频频率和中频采样率之间关系如式(2)所示,因此在本系统参数下,对于单点频信号及式(5)的输入信号,式(13)可写为

$$j \sum_{i=n-m+1}^n a_i e^{-j(2i-1)T_{is}} X_k(\omega) = \frac{1}{2} j \sum_{i=n-m+1}^n a_i (-1)^{(i-p)} \delta(\omega - \omega_0) - \frac{1}{2} j \sum_{i=n-m+1}^n a_i (-1)^{(p-l)} \delta(\omega + \omega_0) \quad (14)$$

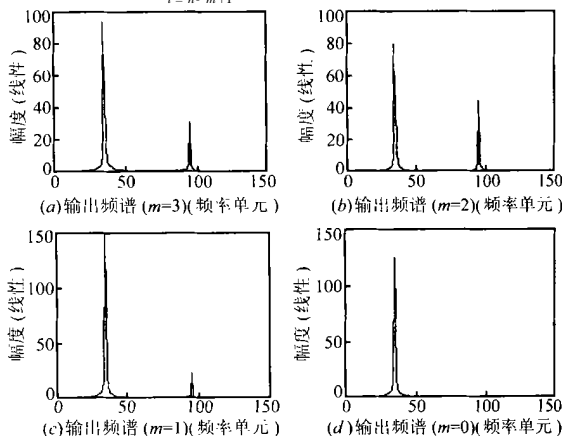


图 1 三阶镜频抑制滤波器边界采样点滤波线性结果 (m 表示不在脉冲内的采样点个数)

由式(14)可见,对于同一组  $a_i$ ,  $p$  是一固定常数,则对应不同的  $m$ , 镜频和真实频率幅度损失起伏变化。

**2.2.2 脉冲边沿的中频滤波仿真结果** 图 1 给出了目标速度 40 米/秒时,镜频抑制滤波器阶数为 3 阶时的结果。仿真结果可见,只要镜频抑制时利用了脉冲外采样点,得到的频率就会出现因泄露产生的一个镜象频率,并且此镜象频率幅度及真实频率幅度随脉冲外采样点个数不同,起伏变化。

### 3 系统参数对简单脉冲镜频抑制的影响及其选择原则

#### 3.1 系统参数对镜频抑制的影响

影响脉冲边沿特性及镜频的系统参数主要有以下几种:

##### (1) 中频采样频率

提高中频采样频率,可使得用来镜频抑制的几个采样点之间近似为线性,从而使式(8)逼近于式(7),减小镜频抑制时的幅度损失、减少镜频影响。

##### (2) 中频放大器频响带宽

一般而言,中频采样频率一定的条件下,中频放大器频响带宽越大,得到的脉冲包络边沿越陡峭,镜频抑制后边沿幅度损失越大、镜频幅度越大;中频放大器频响带宽小,中频放大器后的脉冲包络边沿变化越平坦,因而镜频抑制后幅度损失越小、镜频影响越小。

##### (3) 镜频抑制滤波器阶数

从滤波器角度看,增加镜频抑制滤波器阶数可减少镜频泄露以及正频谱幅度损失影响。

从包络线性度的角度看,滤波器阶数越大,镜频抑制所需要的采样点覆盖范围越大,越难保证其线性化,不易保证式(9)成立,从而一定程度上又会降低脉冲边沿特性、增加镜频泄露。但滤波器阶数越高,滤波器系数  $a_i$  相对越小<sup>[4]</sup>,对式

(9)的影响也相对较小,因此当包络的线性度较好时,采用略高一些的滤波器阶数还是可适当减少镜频泄露及正频谱幅度损失。

#### 3.2 参数设计原则

由于提高中频采样频率,意味着保留了原始信号更多的信息,可从本质上改善镜频抑制效果;而增加滤波器阶数需要更多的采样点进行镜频抑制,扩展了用来镜频抑制的包络区域,使之更加难以保证包络局部线性化,增加了镜频出现的可能性。所以,要改善镜频抑制效果,应尽可能从提高中频采样频率着手。中频采样频率实在不能保证镜频抑制效果时,再提高镜频抑制滤波器阶数。

从保证脉冲边沿特性出发,需要大中频放大器频响带宽和高采样频率;从防止镜频出发,需要小中频放大器频响带宽和高采样频率。因此,在中频采样频率一定时,中频放大器频响带宽的选择则需要在保证脉冲边沿特性和防止镜频之间折衷。

#### 3.3 仿真结果

下面针对单点目标仿真验证了中频采样频率以及镜频抑制滤波器阶数对镜频抑制结果的影响。输入脉冲均为脉宽为 0.2 $\mu$ s 的矩形脉冲。假定包络不动。

(1) 本组仿真检验不同的中频采样频率对镜频抑制的影响。

由本组仿真结果可见,随着中频采样频率的增加,镜频抑制后包络逼近镜频抑制前的包络,镜频泄露趋于减少。

中频放大器频响带宽 8MHz, 1 阶镜频抑制滤波器。目标速度 40 米/秒。

中频采样频率 20MHz, 中频 5MHz, 参见图 2。

中频采样频率 100MHz, 中频 25MHz, 参见图 3。

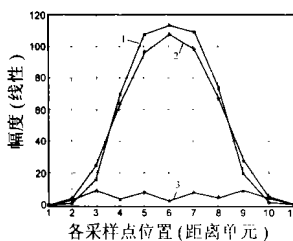


图 2 中频采样频率 20MHz 时镜频抑制结果

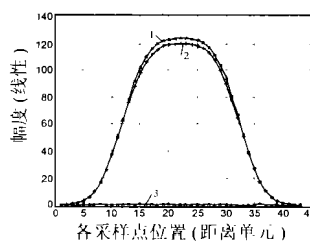


图 3 中频采样频率 100MHz 时镜频抑制结果

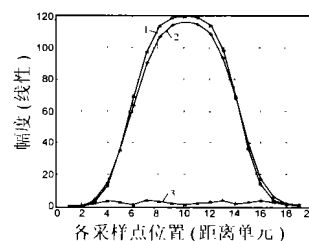


图 4 阶镜频抑制滤波器滤波结果

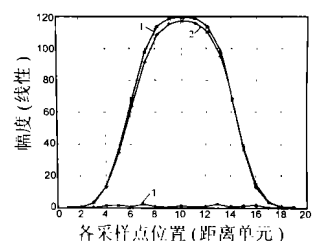


图 5 阶镜频抑制滤波器滤波结果

其中曲线 1 为中频放大器后的标准脉冲包络,曲线 2 是镜频抑制后,正频率处的信号包络,曲线 3 是镜频抑制后,泄露的负频率处的信号包络

(2) 本组仿真检验不同的镜频抑制滤波器阶数对镜频抑制的影响

本组仿真结果可见,适当增加镜频抑制滤波器阶数可使镜频抑制后包络更接近镜频抑制前包络,并减少镜频幅度。

中频放大器频响带宽 8MHz, 中频采样频率 40MHz, 中频 10MHz。目标速度 40 米/秒。

(1) 1 阶镜频抑制滤波器,参见图 4。

(2) 2 阶镜频抑制滤波器,参见图 5。

#### 4 组性调频脉冲信号的中频镜频抑制

当对线性调频脉冲信号进行中频镜频抑制时,镜频抑制滤波的性能是其中的重要问题。

##### 4.1 线性调频脉冲信号理想镜频抑制原理

理想情况下,线性调频信号内各采样点之间的频谱关系同样如式(3)所示,并且  $b_k, k_0$  为 1。但是与简单脉冲信号不同,线性调频信号的输入频谱是通过脉冲内所有采样点做 FFT

得到,覆盖了整个信号调制频段.因此,理想情况下,第  $k$  个采样点的输入信号频谱指的是时域上从第  $k$  个采样点开始,包含了脉冲内的所有采样点的信号对应的频谱,可表示为:

$$X_k(\omega) = \sum_{i=k}^{k+N_s-1} x_i e^{-j i T_s \omega} = e^{j k T_s \omega} \sum_{i=0}^{N_s-1} x_{i+k_1} e^{-j i T_s \omega} \quad (15)$$

其中第  $k_1 + k$  个采样点表示真实线性调频脉冲起始采样点,  $N_s$  表示线性调频信号脉冲内所有采样点个数,  $N$  表示 FFT 点数,并且  $N_s < N$ . 因此,为了要滤掉负边带频谱,镜频抑制滤波器带宽只要大于输入信号  $X_k(\omega)$  的负边带频谱带宽即可.

由以上过程可见,线性调频信号的镜频抑制相当于是将整个脉冲内所有采样点统一地看成要滤波的信号,利用前后平移后的信号合成当前信号的虚部.

#### 4.2 线性调频输入信号带宽损失对镜频抑制的影响

实际的线性调频信号镜频抑制处理并不一定总能将所有脉冲采样点包含在内,得到理想镜频抑制结果.波门设置位置、脉压点数等因素会造成镜频抑制时,用来合成线性调频信号虚部的输入信号频谱不能包含所有脉内采样点,造成合成信号虚部的输入信号脉宽减少、频谱带宽损失.

由线性调频信号的特点可知,线性调频带宽是与脉冲宽度成正比的.因此,线性调频信号虚部相对输入带宽损失等于其相对脉宽损失的一个平均,一般这种脉宽损失并不大,因此线性脉压造成的虚部输入信号相对带宽损失不大,基本不会影响镜频抑制输出结果.

### 5 结论

本文详细分析了非均匀脉冲包络对中频采样滤波器镜频抑制的影响,指出非均匀包络会造成镜频抑制时镜频泄露、幅度损失.作为这种理论的应用,本文重点分析了矩形脉冲边沿对镜频抑制的影响.

针对不同的系统参数,如中频采样频率、镜频抑制滤波器阶数等,本文分析并验证了这些参数对镜频抑制的影响,以保证中频采样系统镜频抑制的性能.

本文还分析了线性调频信号的中频采样镜频抑制性能,指出其输入信号带宽损失对镜频抑制结果的影响一般不大.

#### 参考文献:

- [1] Hulin Liu, Arif Ghafoor, Peter H Stockmann. A new quadrature sampling and processing approach [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(5): 733 - 748.
- [2] K C Ho, Y T Chan. A Digital Quadrature Demodulation System [J]. IEEE Trans on AES, 1996, 32(4): 1218 - 1226.
- [3] Yuanbin Wu, Jinwen Li. The design of digital radar receivers [J]. IEEE AES System Magazine, January 1998: 35 - 41.
- [4] 曾涛. 脉冲多普勒雷达信号实时信号处理的理论与实现 [D]. 北京理工大学博士学位论文, 1999.

#### 作者简介:



雷文女, 1974 年生于北京. 1996 年毕业于北京理工大学电子工程系获学士学位, 同年开始直接攻读信号处理专业博士学位. 发表论文数十篇.



龙腾男, 1968 年出生于福建福州. 1995 年在北京理工大学电子工程系获工学博士学位. 北京理工大学电子工程系教授、博士生导师; 中国航空学会信号处理分会理事、无线电技术分会委员, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员. 1996 年担任北京理工大学雷达技术研究所副所长. 已获部级二等奖一项、三等奖一项, 出版专著一部, 发表论文近百篇, 其中 EI/ISTP 收录的论文二十余篇. 主要研究方向: 雷达系统, 数字信号处理, 数据通信.