

一种提高二相编码雷达检测目标动态范围的方法

顾 红, 苏卫民, 付耀先, 刘国岁

(南京理工大学电光院, 南京 210094)

摘 要: 在相位编码雷达进行各目标回波信号功率相差较大的多目标或隐身目标检测时, 会存在隐身目标和小功率信号淹没在大功率信号距离旁瓣中的情况. 本文提出了一种逐次消去回波中大功率信号的方法来去除大功率信号的距离旁瓣, 检测小功率信号, 从而提高雷达系统观察目标的动态范围至 80dB 以上. 仿真研究和雷达实验表明该方法是有可行性的.

关键词: 相位编码; 旁瓣抑制; 动态范围

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)12-1752-03

A Method of Enhancing the Dynamic Range of Binary Phase Coded Radars

GU Hong, SU Wei-min, FU Yao-xian, LIU Guo-sui

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: When the phase-coded radars scan the stealth targets or numerous targets, which have large changes in their echo amplitudes, the weaker signals may be drowned in the range sidelobe caused by the stronger signals. A step by step way of removing the stronger signals from the echoes to eliminate their range sidelobe is presented, so that the weaker signals can be detected and the dynamic range of the radar system can be enhanced by 80dB or more. Simulation study and radar experiment indicate that the method is effective and feasible.

Key words: phase codes; suppression of range sidelobe; dynamic range

1 引言

二相编码雷达总存在多普勒敏感的问题, 因此具体实现时人们会根据雷达观察的目标情况来确定雷达脉压的合适长度, 尤其在雷达观察高速目标时脉压长度就不能选得太大. 当相位编码雷达的脉压长度较短时, 雷达的主旁比就不会很高, 雷达观察目标的动态范围也就不会很大. 此时, 如果雷达又需要观察各回波信号功率相差很大的多目标时, 或在复杂背景下观察隐身目标时, 就会使小功率信号或微弱的隐身目标淹没在大功率信号的距离旁瓣中. 例如对 m 系列^[1]伪随机连续波雷达而言, 设雷达要观察多普勒频率相同、距离门不同的两个目标, 且它们反射面积相差非常悬殊, 使这两个目标回波幅度上相差有 80dB, 经常规检测后如图 1 所示, 只能看到第 3 距离门上的大目标信号, 而第 5 距离门上的小目标信号已完全淹没在大目标信号的距离旁瓣中.

对于这种情况, 一般的做法是设法抑制距离旁瓣, 如在系统中加入旁瓣抑制滤波器^[2], 或采用统计处理方法抑制距离旁瓣^[3], 或选择互相关特性良好的码字. 这儿, 考虑到大的距离旁瓣是由大功率回波信号和参考码字作脉压互相关时引起的, 因此只要在信号处理中设法消除大功率信号, 大的距离旁瓣也就自然消除, 因而就能检测出小功率信号. 本文正是基于这一思想提出了在原始视频回波信号中消除大功率信号来达到消除大的距离旁瓣、检测小功率信号和扩展雷达动态范围的目的. 其过程是首先采用传统的脉压-FFT 技术检测出大功率信号, 并设法提取它们的距离和速度信息, 然后将它们从原始回波信号中消除掉, 最后再用传统脉压-FFT 技术即可检测到小功率信号. 事实上, 这方法本质上和 CLEAN 技术相一

致^[4,5]. 在具体实施时, 本文提出了“滤波器法去除大功率信号”和“FFT-IFFT 法去除大功率信号”这两种方法.

2 滤波器法去除大功率信号

设相位编码雷达的发射波形为:

$$f(t) = m(t) \exp(i2\pi f_0 t) \quad (1)$$

其中, $m(t)$ 为调相码字, 可以是 Baker 码、 m 序列或其他码型等. $m(t)$ 的取值为 1 或 -1, 对载频信号进行 $0, \pi$ 调相, f_0 为载波频率.

雷达发射信号经 K 个目标反射后形成雷达回波, 设第 k 个目标回波信号幅度为 A_k , 多普勒频率为 f_{dk} , 滞后时间为 t_k , 所对应的距离门为 d_k , 则雷达回波可表示为:

$$h(t) = \sum_{k=1}^K A_k m(t - t_k) \exp(i2\pi(f_{dk} + f_0)(t - t_k)) \quad (2)$$

雷达回波经鉴相后, 其视频信号为:

$$h'(t) = \sum_{k=1}^K A_k m(t - t_k) \exp(i2\pi f_{dk}(t - t_k)) \quad (3)$$

由视频信号可以看出, 各目标回波信号是无法简单地从时域或频域上将它们分开的. 在这儿, 我们首先进行脉冲压缩, 对于伪随机码而言, 脉压长度即为码周期内的码长. 脉压后按距离门进行频谱分析. 在这种传统的“脉压-FFT”方法信号处理后, 会检测出各大功率信号的目标, 而那些低于处理后主旁比的小功率信号显然会淹没在各大功率信号的距离旁瓣中. 为此我们提出采用滤波器法将先前“脉压-FFT”方法检测出的各大功率信号逐一从原始的视频信号式(3)中滤除掉, 之后, 再用传统的“脉压-FFT”方法进行处理就能检测出各小功率信号的目标.

收稿日期: 2001-09-10; 修回日期: 2002-06-26

基金项目: 西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室基金(No. 00JS01.2.2BQ02)

假设 $k = p$ 时的目标回波信号功率最大,为从原始视频信号中待消的信号,且其距离、速度信息已被较精确地估计出.首先将原始的视频信号乘上该大功率信号的距离门信息 $m(t - t_p)$ 后为:

$$b_1(t) = h'(t) m(t - t_p) \\ = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^A A_k m(t - t_k) m(t - t_p) \exp(i2\pi f_{dk}(t - t_k)) \\ + A_p \exp(i2\pi f_{dp}(t - t_p)) \quad (4)$$

然后将式(4)再乘上该大功率信号的速度信息 $\exp(-i2\pi f_{dp}t)$

$$b_2(t) = b_1(t) \exp(-i2\pi f_{dp}t) \\ = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^A A_k m(t - t_k) m(t - t_p) \exp(i2\pi(f_{dk} - f_{dp})(t - t_k)) \\ + A_p \exp(i2\pi f_{dp}t) \quad (5)$$

经过上面两步变换后,实际上就把该待消的大功率信号已变换成一个直流分量,此时我们可在时域或频域上设计一个高通滤波器将其从式(5)中去除掉,因而其剩余部分为:

$$b_3(t) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^A A_k m(t - t_k) m(t - t_p) \exp(i2\pi(f_{dk} - f_{dp})(t - t_k)) \quad (6)$$

去除掉上面待消的大功率信号后,需对式(6)信号还原,即将式(6)再乘以 $\exp(i2\pi f_{dp}t) m(t - t_p)$,有:

$$b_4(t) = b_3(t) \exp(i2\pi f_{dp}t) m(t - t_p) \\ = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^A A_k m(t - t_k) \exp(i2\pi f_{dk}(t - t_k)) \quad (7)$$

将式(3)和式(7)比较可以看出,式(7)变成消除了 $k = p$ 时大功率信号后的视频信号,而其他信号基本保持不变.因此按以上步骤可从式(7)中依次再消除已检测出的第二、三、...个大功率目标回波信号.之后,再在剩余的视频信号上作传统的“脉压-FFT”信号处理就可将小功率目标回波信号检测出来.

3 FFT-IFFT 法去除大功率信号

上述方法中,首先采用传统“脉压-FFT”方法来检测出大功率的目标回波信号,并获得它们的距离和速度信息,然后利用这些目标信息特征将该大功率信号变成直流信号,最后用滤波器将该大功率信号从原始视频信号中滤除掉,这过程需分两步走.我们介绍一种更有效和快速的方法—FFT-IFFT法,从原始视频回波信号中消除大功率目标回波信号.

FFT-IFFT法是按距离门顺序逐一计算进行的,设雷达要观察的距离门有 M 个,即 $\tau = 1, 2, \dots, M$.假设我们要观察的距离门为 τ ,将混频后得到的视频回波信号乘上要观察的距离门信息 $m(t - \tau)$,得:

$$c_1(\tau) = h'(t) m(t - \tau) \\ = \left(\sum_{k=1}^A A_k m(t - t_k) \exp(i2\pi f_{dk}(t - t_k)) \right) m(t - \tau) \quad (8)$$

对于距离门 τ ,假设在该距离门上有多个目标,多目标的序号组成一个集合为 P_τ ,同时设定其中又有几个功率相对大的目标,它们序号所组成的集合为 Q_τ ,显然有 $Q_\tau \in P_\tau$.则上式可表示为:

$$c_1(\tau) = \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \notin P_\tau}}^A A_k m(t - t_k) \exp(i2\pi f_{dk}(t - t_k)) \right) m(t - \tau) \\ + \sum_{\substack{k=1 \\ k \in P_\tau}}^A A_k \exp(i2\pi f_{dk}(t - t_k)) \quad (9)$$

将式(9)变换到频域,就可很容易地检测出该距离门上 $k \in Q_\tau$ 中的几个功率大的目标信号.我们可将该距离门上的这几个功率大的目标信号频谱分别用窗宽为 δ (可调)的矩形窗同时取出,然后再将取出的频谱变换到时域,可近似得到:

$$R_{n\tau} = \sum_{k \in Q_\tau} A_k \exp(i2\pi f_{dk}(t - t_k)) \quad (10)$$

对 $\tau = 1, 2, \dots, M$ 其他各距离门顺序作上述处理,然后将各距离门上取出的大功率信号频谱在变换到时域后分别和其对应的距离门信息 $m(t - \tau)$ 相乘,再将所得结果全部相加,得到所有要观察的距离门上大功率信号时域波形的总和:

$$R_n = \sum_{\tau=1}^M R_{n\tau} m(t - \tau) = \sum_{\tau=1}^M \sum_{k \in Q_\tau} A_k \exp(i2\pi f_{dk}(t - t_k)) m(t - \tau) \quad (11)$$

接着,再从原始的视频回波 $h'(t)$ 中去除 R_n ,即可得剩下小功率信号的视频回波.然后再用传统的“脉压-FFT”技术就可检测出剩余的小功率信号.

一般情况下,在利用 FFT 技术进行时域到频域的变换时会产生频谱泄漏.尤其在大功率信号存在的情况下频谱泄漏会显得更加严重,这对利用 IFFT 技术消除大功率信号是相当不利的.为此,可采用时域加窗技术(如 90dB 的切比雪夫窗),来有效抑制 FFT 后的频谱泄漏,之后再采用 IFFT 技术就可较彻底地去除大功率信号.这儿时域所加窗的幅度值是均大于 0 的,因此加窗并不改变二相编码信号的正负极性,可不影响雷达后续的相关检测.

4 去除大功率信号对系统信噪比的影响

对于伪随机二相编码连续波雷达而言,在雷达检测出相对大的目标信号后,为了要知道是否还存在相对小的目标信号,就需要采用上面的方法将已检测到的大目标信号从原始视频信号中去除掉.在去除大功率信号时,首先选取大功率信号的频谱,然后变换至时域,并乘上相应的距离门信息,接着再将它们从原始的视频信号中减去.所以这过程理论上对系统噪声并没有影响或影响很小,同样对小功率的信号也没影响或影响很小.如果将相位编码雷达中距离旁瓣不算作为噪声成分的话,那么上述去大功率信号的过程对雷达系统的信噪比几乎没影响或影响很小.

但对于码捷变的二相编码雷达而言,脉压相关处理后的距离旁瓣是随机分布的,因此人们往往将这些随机分布的距离旁瓣也作为雷达噪声的一部分.这样在采用上述方法将大功率信号从原始视频信号中去除后,也就很好地消除了这些大功率信号所引起的大的距离旁瓣,从而会极大提高雷达系统的信噪比,和非常有利于发现小功率目标信号.

5 仿真分析

以 m 序列伪随机二相编码连续波雷达为例,码周期也就是脉压长度为 63,一个码元采样一个点.

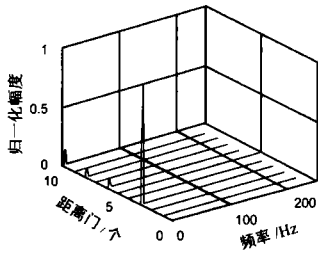


图1 传统脉压-FFT处理后的频谱输出

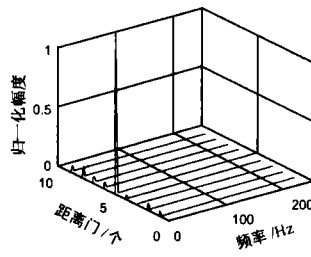


图2 滤波器法去除大功率信号后的输出

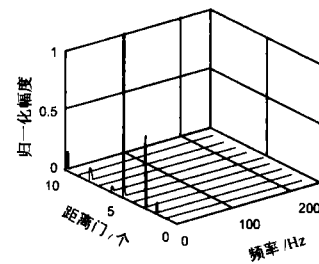


图3 多普勒频率估计有一定误差时的输出

仿真1 设目标回波中有两个目标,这两个目标的多普勒频率相同为5Hz,而它们的信号幅度相差80dB.大目标在第3距离门上,其多普勒包络为 $s_1 = \exp(i2\pi 5t)$,小目标在第5距离门上,其多普勒包络为 $s_2 = 0.0001\exp(i2\pi 5t)$.图1为采用传统“脉压-FFT”方法处理后的频域图.图1中只能看到第3距离门上的大目标信号,而第5距离门上的小目标信号由于其多普勒信号与大目标信号相同,所以它已淹没在大目标信号的大距离旁瓣中.

为了能观察到小目标信号,可采用滤波器法去除大功率信号.如果用传统“脉压-FFT”能精确检测出大目标信号的参数特征,那么就能将第3距离门上的大目标信号从原始视频信号完全去除掉如图2所示.图2中可有效地检测出第5距离门上的小目标信号.

在用传统“脉压-FFT”检测大目标信号的参数特征时,一般距离门信息能准确检测,而多普勒信息可能有一定的误差,但只要误差不要太大,则对去大目标信号和检测小目标信号影响不大.如图3所示,其中第3距离门上大目标信号的多普勒频率应是5Hz,却被估计为5.58Hz,但第5距离门上小目标信号仍被有效地检测出来.

仿真2 设目标回波中含有三个目标,这三个目标的多普勒频率仍相同为5Hz,而它们的信号幅度相差80dB,且大目标在第3和8距离门上,它们多普勒包络分别为 $s_1 = \exp(i2\pi 5t)$ 和 $s_2 = \exp(i2\pi 5t)$;小目标在第5距离门上,其多普勒包络为 $s_3 = 0.0001\exp(i2\pi 5t)$.图4为采用传统“脉压-FFT”方法处理后的频域输出.图4中看到了第3和8距离门上的大目标信号,而第5距离门上的小目标信号由于其多普勒信号

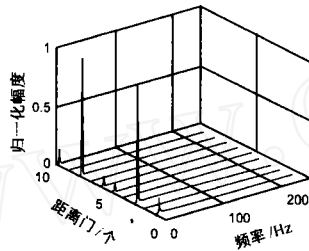


图4 传统脉压-FFT处理后的频谱输出

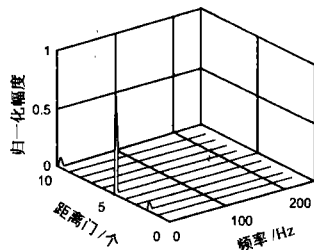


图5 FFT-IFFT法去除大功率信号后的输出

与大目标信号相同,所以它已淹没在大目标信号的距离旁瓣中.

图5是用FFT-IFFT法去除第3和8距离门上的大目标信号后的频谱输出,可见该方法能有效地检测出第5距离门上的小目标信号.其中采用了100dB切比雪夫窗.

6 结论

相位编码雷达的距离旁瓣是限制相位编码雷达输入动态范围的根本原因,为此提出从原始回波视频信号中逐一去除大功率目标信号的方法,来从根本上消除由这些大功率信号所引起的大的距离旁瓣,从而能有效地扩展了雷达的输入动态范围.在具体实现上给出了两种方法,即“滤波器法去除大功率信号”和“FFT-IFFT法去除大功率信号”.仿真分析表明,这种方法能有效扩展相位编码雷达动态范围至80dB以上.同时在某个相位编码连续波雷达平台上进行了试验验证,结果证明这种方法是可行的和有效的.

参考文献:

- [1] 肖国镇等.伪随机序列及其应用[M].北京:国防工业出版社,1985.
- [2] E L Key, E N Flowle, R D Haggarty. A method of sidelobe suppression in phase-coded pulse compression systems[R].MIT Tech Rep. 209, 1959.
- [3] Gu Hong, Liu Guosui. Range sidelobe reduction for the random binary phase codes[A]. SPIE[C]. 1997, 3066.
- [4] J Tsao, B D Steinberg. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: The clean technique[J]. IEEE Trans on AP, 1988, 36(4): 543 - 556.
- [5] A Segalovitz, B D Frieden. A 'CLEAN'-type deconvolution algorithm [J]. Astron Astrophys, 1978, 70: 335 - 343.

作者简介:



顾红男,1967年出生于江苏启东,南京理工大学副教授.1995年获西安电子科技大学博士学位.主要从事噪声雷达系统和信号处理、高速数字信号处理和无源探测等.