

调频步进雷达运动目标信号处理的新方法

雷 文,龙 腾,韩月秋
(北京理工大学电子工程系,北京 100081)

摘 要: 调频步进雷达是一种距离高分辨率的雷达体制,但是会产生目标冗余的问题.目标抽取算法就是消除这种冗余,提取目标真实位置的方法.对于这种雷达体制,目标运动是影响其性能的主要原因.本文分析了目标抽取算法的特点及速度、速度估计误差对此方法的影响.为克服速度造成的包络走动影响,本文提出了一种改进的目标抽取算法.这种方法在可以准确估计目标速度时具有很好的性能,但是随着速度估计误差增大,性能有所下降.本文给出了速度估计误差的界限,以便尽量减少速度估计误差引起的问题.此外,本文还提出了另一种幅度内插的方法,很好地解决了速度估计误差造成的距离耦合时移问题.计算机仿真的结果验证了理论分析的正确性.这两种方法,尤其是后面幅度内插的方法,可以解决调频步进雷达运动目标处理的关键问题,为这种雷达体制的实用化奠定了基础.

关键词: 调频步进; 距离高分辨率; 运动目标

中图分类号: TN959.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 12-0034-04

Novel Signal Processing Methods for Moving Targets in Stepped Frequency Modulated Radar

LEI Wen, LONG Teng, HAN Yue-qiu

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

Abstract: Modulated stepped frequency radar is a system to get high-resolution range profile with the problem of redundancy. So extracting method is presented to eliminate such redundancy and get the true position of target. In this radar system, target motion is the main factor to influence its performance. Characteristics of extracting method are analyzed here, so do the effects of velocity and velocity estimated error on this method. In order to overcome the influence of return pulse motion, an improved extracting method is provided. The capability of this improved method is good with accurate velocity estimation, but decreases with increasing velocity estimated error. The velocity estimated error limit is addressed to reduce the problem caused by it as far as possible. In addition, an amplitude interpolating method is given to resolve the range-coupling shift caused by velocity estimated error. The emulated computer results validate the correctness of theory analysis. These two suggested methods, especially the later amplitude interpolating method, can settle the key problems of target moving in the signal processing of modulated stepped frequency radar and provide foundation for realization of such radar system.

Key words: modulated stepped frequency; high-resolution range; moving target

1 引言

高分辨率距离成像在现代雷达中是一个重要的研究课题,现已得到广泛应用.由于雷达的距离分辨率与信号带宽成反比,为获取高分辨率的距离像需要采用大带宽信号.通常采用的大带宽脉冲信号主要是“chirp”脉冲,或是一串步进频脉冲^[1-3].

调频步进频信号采用 chirp 信号作为步进频信号的子脉冲,具有“chirp”脉冲和步进频脉冲两者的特点,因此在获得高距离分辨率的同时,可以降低对数字信号处理机瞬时带宽的要求,提高系统的数据率,同时保证信号的作用距离^[4].

采用调频步进频信号合成高分辨率距离像首先需要对各回波信号进行脉压处理,获得初步改善的距离分辨率.然后对这样一串脉压后的步进频回波做 IFFT 处理,在各个采样点上得到最终的高分辨率距离像.为减少采样损失,采样率通常高于回波脉冲带宽,造成各个采样点覆盖的高分辨率距离像互相有重叠,从而提出了如何从各个采样点相互重叠的高分辨率距离像中提取出一个完整的目标距离像的问题.现已有两种方法被采用提取高分辨率距离像,分别是叠加法和目标抽取算法.当目标静止时,这些方法合成的高分辨率距离像效果不错.但是当目标运动时,采用这些方法经速度补偿后得到

的距离像,在速度和速度估计误差的影响下,会产生目标偏移、幅度损失和伪峰。

为克服速度造成的回波包络走动的影响,本文提出了一种改进的目标抽取算法。这种改进的方法可以通过改变第一个采样点上提取的信息长度,从而改变其它各个采样点上提取的信息部分来减少幅度损失和防止伪峰出现。但是这种改进的方法仍然受速度估计误差影响。本文分析了速度估计误差的影响,确定了能够提取出伪峰时的速度估计误差界限。本文还提出了另一种幅度内插方法解决速度估计误差引起的问题。这种方法利用 IFFT 之前包络上的幅度关系,避免了速度估计误差造成的距离耦合时移问题,基本不受步进频信号中速度和速度估计误差造成的影响,可以很好地得到距离像。此外,本文还讨论了幅度起伏对幅度内插法的作用,表明幅度起伏基本不影响算法的根本性能。

以上两种方法,尤其是后一种幅度内插方法,很好地解决了运动目标的距离耦合时移问题,为调频步进雷达的实用化提供了基础。

2 调频步进信号

一般情况下,调频步进频雷达接收的回波信号表达式可参见文献[4]。

2.1 Chirp 子脉冲输出

当 chirp 子脉冲回波经过它的匹配滤波器后,不考虑步进频的影响,输出为:

$$y(t) = \sqrt{KT^2 \frac{\sin^2\left(\frac{+Kt}{2} \frac{T}{2}\right)}{\left(\frac{+Kt}{2} \frac{T}{2}\right)}} \exp j 2\left(-\frac{1}{2} Kt^2\right) e^{j/4} \quad (1)$$

式中: K 表示调频斜率, $K = B/T$, B 是每个子脉冲上的调频带宽, T 是发射脉冲宽度, $\frac{1}{2}$ 表示多普勒频率。

从式(1)中可见,输出包络是个 sinc 函数。显然,第一旁瓣幅度太高,这样高的旁瓣很容易造成误判,因此输出信号应通过加窗抑制旁瓣。通常采用的一种窗是海明窗,加窗后的脉压输出可写成:

$$y(t) = 0.54y(t) - 0.23y(t - 1/B) - 0.23y(t + 1/B) \quad (2)$$

2.2 步进频信号输出

文献[3]阐明了对于一个运动目标,相位上必须用速度估计值加以补偿以减少距离偏移、幅度损失和发散的影响。剩下的问题主要包括由速度估计误差引起的峰值距离循环偏移和幅度损失问题。这种由速度估计误差造成的距离偏移可由下式得到:

$$r(v) = (f_0/f) \cdot T_r \cdot v \quad (3)$$

式中 v 是速度估计误差,得到的目标将在 IFFT 所覆盖的范围内按照 $r(v)$ 的大小循环偏移。

3 目标抽取算法

3.1 原理

目标抽取法主要处理如何将所需要的目标信息顺序拼接起来,形成一个完整的高分辨率距离像。叠加法则是将全部目标信息顺序叠加起来的方法。

为了减少回波信号的采样损失,采样间隔要比回波脉

宽小,造成 IFFT 处理后,各采样点覆盖的高分辨率距离像之间重叠的部分。

采用目标抽取算法,在每个采样位置上提取出来的信息以此采样点位置为中心,对称分布,因而可表示成:

$$d_k(l) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{i,k} e^{j \frac{2\pi}{N} l i} \quad (4)$$

$$kN_s - N/2 < l \leq kN_s + N/2 \quad (5)$$

$G_{i,k} = A_{i,k} e^{j \phi_{i,k}}$ 表示第 k 个采样在第 i 个子脉冲上的采样, $d_k(l)$ 表示在第 k 个采样位置上,第 l 个提取结果; N 是子脉冲个数; N_s 表示一个采样间隔上的高分辨率距离单元个数:

$$N_s = T_s N f \quad (6)$$

式中 T_s 是采样间隔, $T_s = 1/f_s$, f_s 是采样频率, f 是步进频率。

对于静止目标,每个抽取出来的部分以采样位置为中心对称分布,并且是顺序排列,合成整个距离像,在第一个采样点上提取出来的信息就是采样间隔的一半。

3.2 速度和速度误差的影响

前面讨论了对于静止目标,合成高分辨率距离像的方法。对于运动目标,有两个因素会影响正确合成距离像。一个是速度,另一个则是速度估计误差。

由于很难准确估计速度值,并且硬件上不容易实现精确移位采样,采样技术通常选用不移位采样技术。

当目标移动经过一段距离 d 之后,IFFT 处理之后的峰值位置将偏移 $d/2$ 。图 1 表明了原先峰值的采样位置 1 是如何比离其 $d/2$ 的采样位置 2 具有更多的幅度损失的。

若仍采用原有的目标抽取算法作为合成距离像的方法,具有最大幅度的峰值有可能被抛弃,替代以具有更多幅度损失的采样值。在这种情况下,还有可能出现某些多余的伪峰。

另一个重要的、不可忽视的影响因素是速度估计误差造成的距离耦合时移问题^[1-3]。

4 改进的目标抽取算法

4.1 原理

目标抽取算法中,由速度引起的回波包络走动不可忽视,尤其当速度较大时,这种影响尤为严重。

显然,对于同一组回波上的所有采样点,其高分辨率位置输出是一样的,都等于第一个回波位置。与静止目标情况相比,不同之处在于每个采样位置上的幅度是不均匀加权的,因此导致回波包络偏移。

这种改进的目标抽取算法通过估计目标偏移量 $d/2$,改变第一采样点上高分辨率距离单元的提取长度,从而消除由速度引起的包络走动问题。这种处理在速度估计误差不太大的情况下,可以获得好的距离像。图 2 表明了这种方法是如何避免速度引起的包络走动导致的幅度损失的, N_d 表示由速度估计值得到的偏移量。

4.2 伪峰

4.2.1 回波包络上的幅度关系 为减少采样损失,在回波主瓣内通常有几个采样点。所有这些位于主瓣内的采样点都包含相同的目标位置信息,因而这些采样点的 IFFT 输出峰值位

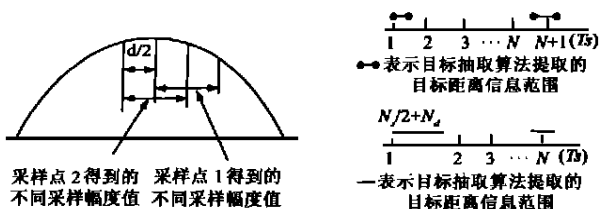


图 1 采样点在一个脉冲回波 图 2 改进的目标抽取算法上的采样幅度变化

置相同,只是幅度不同.对于调频步进频信号来说,这些采样点输出峰值的幅度关系就是一个加窗后的 sinc 包络波形.

4.2.2 伪峰形成 为分析多余伪峰的形成原因,假定 IFFT 之前,主瓣上的采样点数为 m .由于目标会在相差 $1/f$ 的整数倍的地方提取出来,当 m 满足式(7)时,就为伪峰形成提供了机会,如图 3 所示.这里伪峰是指多余的假目标.

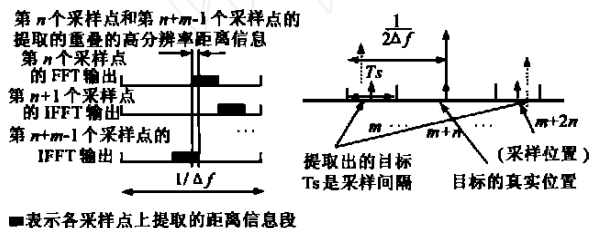


图 3 提取伪峰示意图(伪峰出现在重叠提取区域) 图 4 提取的伪峰与真实目标对比示意图

$$mT_s > 1/f \quad (7)$$

对于一个静止目标,一般情况下,伪峰幅度远小于提取出来的主瓣峰值幅度,因此可认为没有伪峰.

对于一个运动目标,当速度估计误差不可忽视时,幅度较大的伪峰出现几率大大增加.一旦速度估计误差大小满足式(8),就会出现最严重的结果,即对应一个目标,会有两个具有同样幅度的峰值出现,其距离相差 $1/f$,如图 4 所示.

$$V_{err} = \frac{1}{2} \frac{f}{f_0} \frac{C}{T_r} \frac{C}{2} = \frac{C}{4f_0 T_r} \quad (8)$$

假定这两个峰值所在的采样点位置距离目标真正位置 nT_s ,在这些峰值上的幅度损失可通过式(9)和式(2)(采用海明窗)得到, $| \cdot |$ 表示取绝对值:

$$A_{loss}(n) = 20 \log_{10}(|y(0)|) - 20 \log_{10}(|y(nT_s)|) \quad (9)$$

在这种条件下,实际中只有一个目标,却出现了两个幅度类似的目标.对于目标成像和识别,这就会造成严重的问题.

4.2.3 速度估计误差界限与伪峰幅度关系 当伪峰的幅度超过了检测门限时,比如 A_{min} ,它就会被当作目标提取出来,而相应的最小的速度估计误差可通过如下方法得到:

首先找出满足式(10)的最大的 n ,其中 $t_{hrr} = 1/(Nf)$.

$$A_{min} \geq 20 * \log_{10}(|y(nt_{hrr})|) \quad (10)$$

然后计算两个提取出来的峰值之中幅度偏大的峰值位置和真正位置之间的距离:

$$T_{min} = \frac{1}{f} - nt_{hrr} \quad (11)$$

最后,会提取出伪峰的最小的速度估计误差 $V_{min\text{err}}$ 可由

下式得到:

$$V_{min\text{err}} = T_{min} \frac{f}{f_0} \frac{C}{T_r} \frac{C}{2} \quad (12)$$

式中 T_r 是脉冲重复周期.

在其它类型的窗函数下,找出最小速度估计误差的过程是类似的,差别仅在于 IFFT 之前的回波包络不同.

5 幅度内插法

5.1 原理

采样点的 IFFT 输出峰值幅度与其在 IFFT 之前的包络上的采样幅度具有某种对应关系.

对于静止目标,这两种幅度之间是一一对应的,因此,可以通过将 IFFT 输出的峰值幅度值作为 IFFT 之前包络上的采样幅度值,在 IFFT 之前的包络上进行内插,恢复出一个完整的 IFFT 之前的包络.此包络上的幅度最大点位置即代表了此回波位置.

这样一种内插过程可由下式实现:

$$A_{full}(t) = \prod_{i=1}^M A_i \text{sinc}\left(2 \frac{(iT_s - t)}{T_s}\right) = \prod_{i=1}^M A_i \frac{\sin\left(2 \frac{(iT_s - t)}{T_s}\right)}{\left(2 \frac{(iT_s - t)}{T_s}\right)} \quad (13)$$

$T_s < t < MT_s$

其中 M 是 IFFT 之前的包络主瓣内的采样点个数, A_i 表示第 i 个采样 IFFT 输出的幅度; $A_{full}(t)$ 是位置 t 的幅度.

对于一个运动目标,IFFT 输出的峰值幅度关系与 IFFT 之前包络上的采样幅度关系不相同,但是近似.如图 5 所示运动目标与静止目标的 IFFT 输出幅度关系.

目标运动造成不同采样位置上 IFFT 输出得到不同的幅度调制. IFFT 输出中最大峰值位置出现在距离静止目标峰值采样位置 $d/2$ 的位置上, d 表示目标移动经过一组 PRT 的距离.因此,可通过将这些 IFFT 输出幅度作为 IFFT 之前包络上的采样幅度,进行内插恢复一个完整的包络.此恢复包络的最大幅度点位置代表了目标运动经过一组 PRT 的中间位置.

大多数不同的目标可从他们位于不同的高分辨率距离单元区分开来,除了这些目标的间距恰好是 $1/f$ 的情况,这时容易造成目标个数误判.

5.2 其它因素

采用幅度内插法要注意的一点是 IFFT 之前的脉冲形状不能是矩形的,因为从矩形脉冲得到的采样样本不能准确地合成一个包络并得到其中心位置.实际上,雷达截面随角度变化也是很剧烈的.这会引引起回波信号幅度闪烁,参见文献[5].这样的幅度闪烁会引起内插时不均匀的幅度调制,引起合成包络峰值偏移,但一般此偏移量与速度估计误差造成的距离耦合时移相比不大,基本可满足高分辨率距离精度.

6 计算机仿真和性能分析结果比较

这里对前面提到的成像方法进行性能比较.

下面仿真中, $T_r N f = 12$, $T_r = 200\mu\text{s}$, f 为 12MHz, f_0 为 10GHz,所有提取出来的峰值幅度均做归一化处理.除特殊声明外,不考虑噪声.

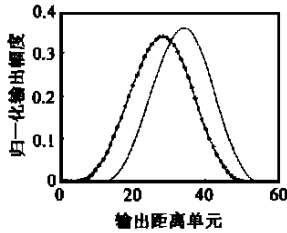


图5 移动目标与静止目标回波包络关系示意图。
(—代表静止目标包络, *代表运动目标包络)

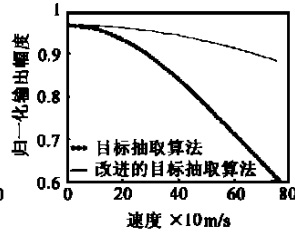


图6 目标抽取算法和改进的目标抽取算法得到的目标平均幅度对比图

图6对目标抽取算法和改进的目标抽取算法获取目标的能力进行了对比,速度覆盖范围为0到750米/秒,速度估计误差为0.图6表明改进的目标抽取算法得到的目标平均幅度值随速度变化缓慢,但目标抽取算法得到的平均幅度值则变化剧烈.这种由目标抽取算法提取出的小幅度的峰值很容易当成噪声、伪峰,或根本就没过门限.这是不希望发生的.

图7到图8对比了不同速度估计误差下,幅度内插法和改进的目标抽取算法提取目标的能力(从距离误差平均值、平均幅度两方面评估),速度估计误差范围为0到100米/秒,速度值相同.

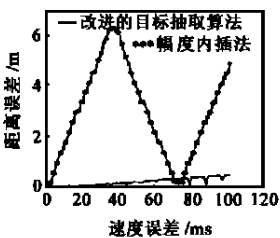


图7 改进的目标抽取算法和幅度内插法得到的平均距离误差对比图

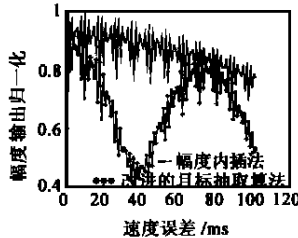


图8 改进的目标抽取算法和幅度内插法得到的平均幅度对比图

从图7、8可见,当采用改进的目标抽取算法得到的距离误差最大时,幅度损失也最厉害,这会导致得到目标个数判断失误.为避免这种情况,有两种方法可选择.一种是通过其它方法获取小速度估计误差,另一种是当速度准确度不够时采用幅度内插方法.本文已在式(12)中给出速度估计误差的界限.

图9和10考虑了噪声和幅度闪烁的问题,以检测幅度内

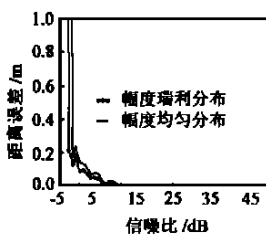


图9 幅度分别为瑞利分布和均匀分布时,幅度内插法得到的平均距离误差

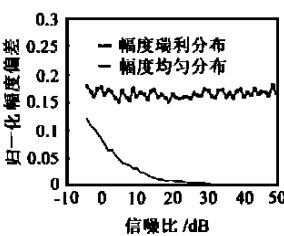


图10 幅度分别为瑞利分布和均匀分布时,幅度内插法得到的平均幅度误差

插算法的性能.

通常,许多噪声是服从高斯分布的,而瑞利分布代表了一种典型的幅度闪烁的情况,因此这里采用白高斯噪声,并采用瑞利分布以仿真幅度闪烁效果.

从图9和图10可见,噪声主要在低SNR时,引入大量随机的伪峰,而闪烁效应则是导致幅度起伏.如果这种由闪烁引起的幅度起伏可容忍,并且SNR足够高时,内插算法可以很好地合成高分辨率距离像.

5 结论

本文提出一种改进的目标抽取算法得到合成的高分辨率距离像,解决了速度造成的回波包络走动问题.本文详细讨论了速度估计误差对这种方法的影响,提出确定速度估计误差界限的方法,以尽可能减少伪峰效应.本文还提出了一种内插方法,克服了速度估计误差引起的距离耦合时移效应.文中讨论了闪烁效应和噪音影响.理论分析和仿真结果表明,本文所提的两种成像方法为实现调频步进雷达的高分辨率性能提供了基础.

参考文献:

[1] D. R. Wehner. High-Resolution Radar (2nd) [M]. Artech House, 1995.
 [2] T. H. Einstein. Generation of high resolution radar range, profiles and range profile auto-correlation functions using stepped-frequency pulse trains [R]. project report TF-54, Lincoln Laboratory, MIT, 1985.
 [3] 龙腾. 频率步进雷达信号的多普勒性能分析 [J]. 现代雷达, 1996, 18(2): 31 - 37.
 [4] 龙腾, 毛二可, 何佩琨. 调频步进雷达信号分析与处理 [J]. 电子学报, 1998, 12(26): 84 - 88.
 [5] M. I. Skolnik, Radar Handbook (2nd) [M]. Mc Graw-Hill, 1990.

作者简介:

雷文 1974年生,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.

龙腾 1968年出生.博士,北京理工大学雷达技术研究所副所长、北京理工大学电子工程系副教授、后备青年学术带头人,中国航空学会信号处理分会理事,中国电子学会高级会员.1999年1月到8月任美国Stanford大学信息系统实验室客座副教授.已获部级奖2项,发表论文数十篇.主要研究方向:雷达系统,数字信号处理,数据通信.

韩月秋 1959年毕业于北京工业学院雷达专业.1989年任北京工业学院教授,1993年任博士生导师.主要研究领域是雷达及制导信号处理.