

基于频域校正的宽带雷达相参积累研究

郑晓东 孙晓闻 高 兵 倪国新

(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 雷达在进行目标检测时一般通过相参积累来提高信噪比,但是运动目标回波之间的跨距离单元走动的现象会降低相参积累的性能,借助仿真说明在宽带雷达检测高速目标的情况下该现象尤其明显,校正距离走动尤为必要。为此提出了基于频域校正的包络补偿算法,即在频域完成数字脉冲压缩并补偿走动项。仿真中与 Keystone 变换相比较,两种算法均能够在目标速度未知情况下,校正距离走动,改善宽带雷达多脉冲相参积累性能,其中频域校正算法优势在于运算量远小于 Keystone 变换,更有利于工程上的实现。

关键词: 宽带雷达;高速目标;距离走动;频域校正

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Study on the coherent integration for wide-band radar based on frequency domain correction algorithm

Zheng Xiaodong Sun Xiaowen Gao Bing Ni Guoxin

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Coherent integration is used to improve the signal-to-noise ratio when radar detects the target, the radial motion of moving targets will lead to range migration, which will degrade the performance of coherent integration. The simulation shows that range migration is obvious when detecting the fast-moving target with wide-band radar, so it is important to correct range migration. A new algorithm called frequency domain correction was proposed, the digital pulse compression and the compensation of the moving terms are completed in the frequency domain. The simulation shows that the Keystone transform and frequency domain correction algorithm can compensate scatter migration through resolution cells without knowing the velocity of targets. Therefore, detection performance of wideband radar is improved because of the achievement of coherent integration in multi-cycle echoes. The algorithms' operation amount were analyzed and the result showed that the new algorithm's operation amount is far less than the Keystone transform, and the method is easy for engineering implementation.

Keywords: wide-band radar; fast-moving targets; range migration; frequency domain correction

1 引言

为便于雷达目标检测,通常对多脉冲周期的目标回波进行相参积累,提高信噪比以达到检测的要求^[1-2]。但是在宽带条件下,运动目标在对多脉冲重复周期进行相参处理期间有可能会出现跨距离单元走动,甚至在相邻周期之间目标的径向位移都可能大于一个距离单元的长度,这将对积累效果产生很大的影响^[3-4]。因此在进行多脉冲积累时,如何进行距离走动校正成为了宽带雷达相参积累技术所主要关注的研究方向之一。

距离走动校正就是将分散在不同的距离单元中的信号校正到同一个距离单元从而进行相参积累,针对宽带雷达距离走动校正主要有包络插值移位算法、Keystone 变换、时分包络移动补偿算法和距离门拉伸等方法^[3]。本文在分析宽带雷达检测高速运动目标时距离走动影响相参积累的基础上,提出了基于频域校正包络补偿算法,并与 Keystone 变换做运算量比较,得到的仿真结果良好,有利于工程实现。

2 距离走动问题描述

线性调频信号是宽带雷达中非常常用的大时宽带宽积

信号^[5]。下面以线性调频信号为例,设雷达发射的线性调频脉冲宽度为 T ,脉冲重复周期 T_p ,调频斜率为 K ,目标与雷达初始距离为 R ,径向速度为 v ,载频为 f_c ,第 n 个发射信号^[6]为:

$$s(t, n) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi(f_c t + \frac{K}{2}t^2)} \quad (1)$$

当第 n 个脉冲达到目标时,回波的延迟则为 $\tau_n = 2(R_0 + vt_n)/c$,第 n 个脉冲的目标回波方程为:

$$s_o(t, n) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_n}{T}\right) e^{j\pi K(t - \tau_n)^2} e^{j2\pi f_c(t - \tau_n)} e^{j\pi f_d t} \quad (2)$$

$f_d = 2v/\lambda$ 为多普勒频率, $\lambda = c/f_c$ 为工作波长。解调后得到基带回波为:

$$s_o(t, n) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_n}{T}\right) e^{j\pi K(t - \tau_n)^2} e^{-j2\pi f_c \tau_n} \quad (3)$$

脉冲多普勒雷达的脉冲压缩是通过匹配滤波完成的,滤波器响应为^[7]:

$$h(t, n) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{-j\pi Kt^2} \quad (4)$$

基带回波进行脉冲压缩^[8]:

$$x(t, n) = s(t, n) \otimes h(t, n) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_n}{T}\right) e^{j\pi K(t - \tau_n)^2} e^{-j2\pi f_c \tau_n} \otimes \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{-j\pi Kt^2} = B \text{sinc}[B(t - \tau_n)] e^{-j2\pi f_c \tau_n} \quad (5)$$

式中: B 为发射信号带宽, $\text{sinc}(x) = \sin \pi x / \pi x$,基带回波经脉冲压缩后,包络为离散 sinc 函数,中心位于 τ_n 处。因此每个回波脉压后包络中心各异,发生包络走动。

从上面分析可知,包络走动的程度和脉冲积累时间、目标的径向运动速度和信号带宽有关系,目标的径向速度越大,信号带宽越大,积累时间越长,包络走动越严重。

假设雷达发射的信号带宽 B 是 150 MHz,脉冲重复周期 T_p 是 100 μs ,积累脉冲数目 n 是 60 个,目标的径向速度 v 是 1 000 m/s,于是相参积累时间是 600 ms,在相参积累时间内,目标运动了 6 m,距离分辨单元 $c/2B = 1$ m,因此积累期间经历了 6 个距离分辨单元^[9-10]。

图 1~4 说明了跨距离门走动与积累回波数、目标径向速度、发射信号带宽的关系^[11]。其中 4 幅图的脉冲重复周期都是 1 ms,图 1 中发射信号带宽为 50 MHz、径向速度为 1 km/s、积累回波数为 10,跨越的距离门数为 6 个;相比于图 1,图 2 中将积累回波数提高到 20 个,跨越距离门数增加为 12;相比于图 1,图 3 中的目标速度提高为 10 km/s,跨越距离门数增加为 60;相比于图 1,图 4 中的发射信号带宽提高到 200 MHz,跨越距离门数增加为 24。

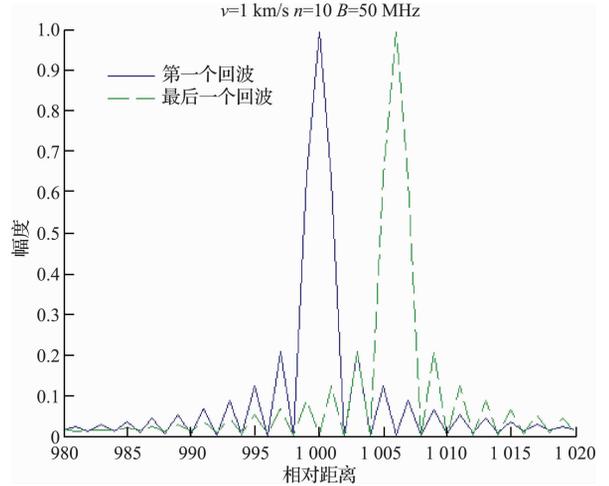


图 1 $v=1$ km/s $n=10$ $B=50$ MHz

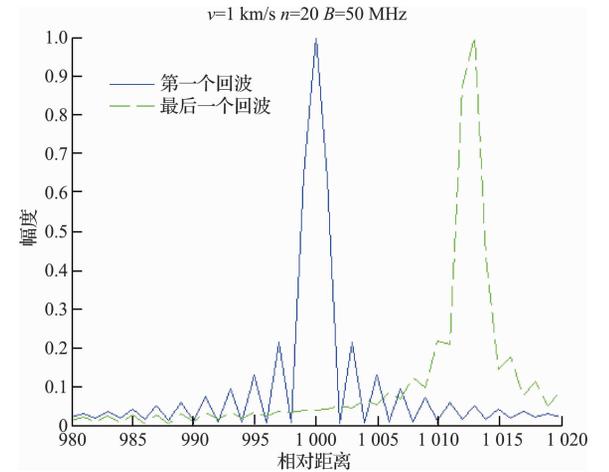


图 2 $v=1$ km/s $n=20$ $B=50$ MHz

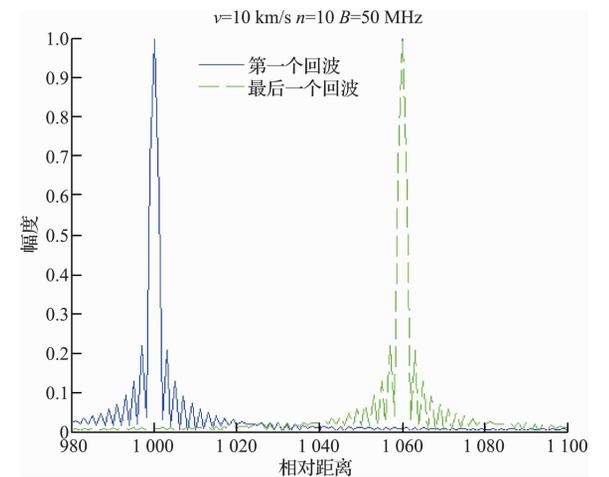


图 3 $v=10$ km/s $n=10$ $B=50$ MHz

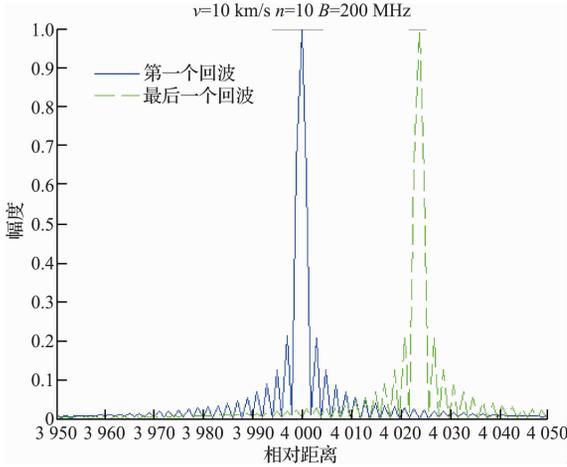


图 4 $v=1 \text{ km/s}$ $n=10$ $B=200 \text{ MHz}$

所以在宽带雷达检测高速运动目标的时候,进行距离走动校正尤为必要,否则相参积累的性能会大大降低。

3 基于频域校正的包络补偿算法

3.1 算法分析

已知在频域上与指数函数相乘对应时域上的延迟,频域校正包络补偿算法正是基于该基本思想,并且与频域脉压相结合后能够体现其运算量小的优越性。

根据驻留相位原理可知,LFM 信号匹配滤波频率响应为^[7]:

$$H(f) = A^*(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right)e^{j\pi\frac{f^2}{\tau}} \quad (6)$$

对式(3)做 FFT 变换可得第 m 个脉冲回波频谱:

$$X(f, n) = \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right)e^{-j\pi\frac{f^2}{\tau}} e^{-j2\pi f_c \tau} * e^{-j\pi f \frac{2k}{\tau}} e^{-j2\pi f \frac{2n\tau}{\tau}} \quad (7)$$

式(6)和(7)相乘即可完成数字脉压:

$$Y(f, n) = X(f, n)H(f) =$$

$$\text{rect}\left(\frac{f}{B}\right)e^{-j2\pi f_c \tau} e^{-j\pi f \frac{2k}{\tau}} e^{-j2\pi f \frac{2n\tau}{\tau}} \quad (8)$$

式中: $e^{-j2\pi f \frac{2n\tau}{\tau}}$ 即对应包络走动。若在频域上与 $e^{j2\pi f \frac{2n\tau}{\tau}}$ 相乘,则可以实现包络补偿:

$$Z(f, n) = X(f, n)e^{-j2\pi f \frac{2n\tau}{\tau}} =$$

$$\text{rect}\left(\frac{f}{B}\right)e^{-j2\pi f_c \tau} e^{-j\pi f \frac{2k}{\tau}} \quad (9)$$

将式(9)变换到时域:

$$z(t, n) = B\text{sinc}\left[B\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)\right]e^{-j2\pi f_c \tau} \quad (10)$$

可知经频域补偿,各个回波包络中心都与第一个回波包络中心位置一致。同 keystone 变换^[12-13]一样,目标径向速度难以估计,频域补偿指数因子 $e^{-j2\pi f \frac{2n\tau}{\tau}}$ 是未知的。

因此把目标划定在一个速度范围内并量化为 N 个值,然后根据量化后的速度值所确定的指数因子进行搜索和补偿,因此数字频域脉压的流程如图 5 所示。

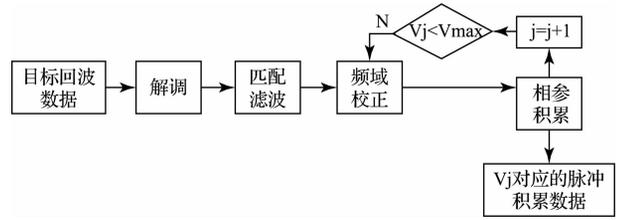


图 5 基于频域校正的包络补偿算法流程图

3.2 运算量分析

下面讨论 keystone 变换和频域校正两种算法的运算量,设相参积累脉冲数为 M ,每个发射脉冲对应的回波采样点数为 L ,频域采样点数相同。设第 m 个脉冲回波的第 l 个时域采样点 $s(m, l)$,第 l 个频域采样点为 $S(m, l)$ 。

对于 Keystone 变换,对其第 k 次速度模糊值进行搜索时,第 m 个脉冲回波包络补偿为^[14]:

$$S_k(m, l) = e^{-j2\pi k \frac{l}{c}} \sum_{n=1}^M S(n, l) \text{sinc}[nf_c / (f_c + l) - n] \quad (11)$$

可知对某一速度进行搜索时,Keystone 变换运算量为 $M(M-1)L$ 次加法和 $M(M+1)L$ 次乘法。

对于频域校正算法,用第 k 次速度值进行搜索时,第 m 个脉冲回波包络补偿为:

$$S_k(m, l) e^{-j2\pi k (2mv_s T / c)} \quad (12)$$

频域校正算法每次搜索的运算量为 ML 次乘法,远小于 keystone 算法的运算量。

3.2 仿真分析

下面结合仿真讨论,仿真参数设置为如下,脉冲时间宽度 T 为 $10 \mu\text{s}$,中心频率 10 GHz ,目标初始距离 R_0 为 1 km ,目标初始速度 v_0 为 10 km/s ,脉冲重复频率 PRF 为 1 kHz ,积累回波数 n 为 10 ,带宽 1 GHz 采样频率 2 GHz ,加上 10 dB 的高斯噪声。在速度精确处,得到如下归一化积累幅度:

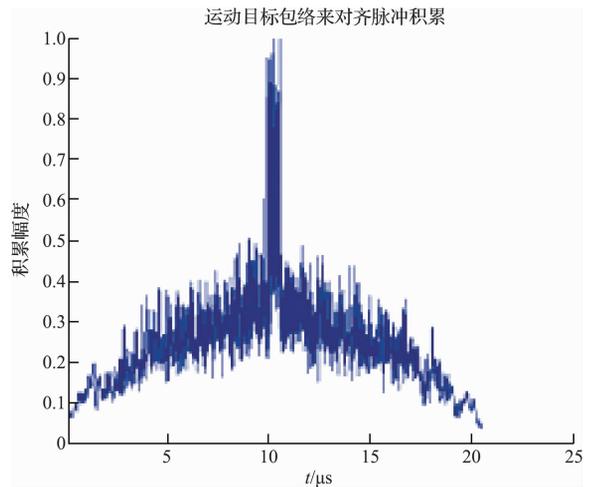


图 6 未经过包络补偿直接脉冲积累的结果

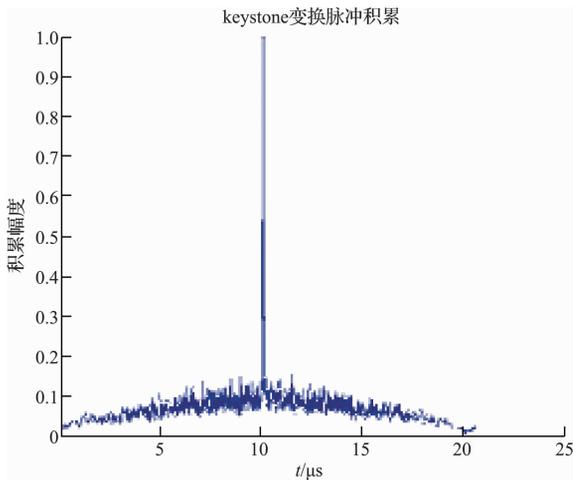


图7 经过 keystone 变换后脉冲积累的结果

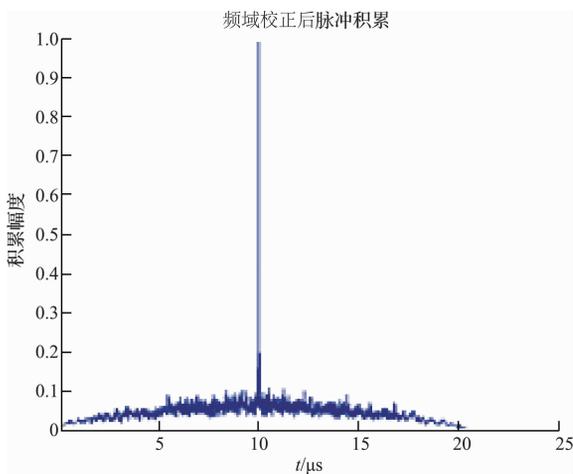


图8 基于频域校正包络补偿后脉冲积累的结果

从中可以看出,两种算法均很好的解决了图6中回波走动的问题,三种情况最大采样点坐标(1000对应精确的距离估计)分别为:1057、1000、1001;积累幅度分别为:30 dB、37.7 dB、38.9 dB。可见两种算法的对距离的估计均较为准确,其中 keystone 算法的运算时间为 117.19 s,基于频域校正的包络补偿算法则为 2.04 s,远远小于 keystone 算法,显然更有利于工程实现。

最后,采用运算量相对较小的频域校正算法进行速度维扫描。仿真参数同上,速度扫描^[15-16]范围是 9~11 km/s,间隔 100 m/s,得到图 9。

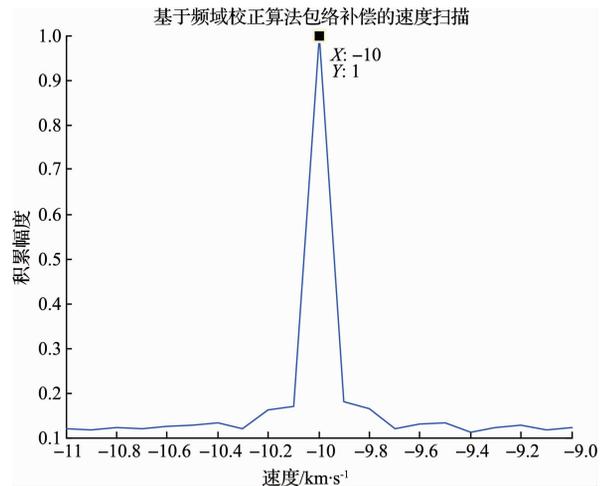


图9 基于频域校正算法包络补偿的速度扫描

图9中,在速度为 10 km/s 时得到峰值,与所设参数一致,速度扫描在精确值处得到最大的积累幅度,与理论相同。

4 结论

针对宽带雷达检测高速运动目标中存在的关键的跨距离门走动问题,提出了基于频域校正的包络补偿算法,通过仿真纠正了距离走动问题,并与 keystone 算法进行比较,得出基于频域校正的包络补偿算法运算量远小于 keystone 算法,有利于工程实现。

参考文献

- [1] 张伟锋, 薛明华, 李林琳. 基于 FPGA 的实时测距雷达研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30(12):152-153.
- [2] 侯民胜, 秦海潮. 相参积累法抑制同频雷达间干扰研究[J]. 电子测量技术, 2008, 31(6):51-53.
- [3] 李涛. 宽带雷达检测的若干问题研究[D]. 西安电子科技大学, 2011.
- [4] 姜永华, 李玉龙, 翟龙军, 等. 相参雷达信号源检定技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 30(8):39-41.
- [5] 王霄. 基于时频分析的线性调频信号检测[J]. 仪器仪表学报, 2007, 27(z2):1245-1246.
- [6] 肖慧, 胡卫东, 郁文贤. LFM CW 雷达高速运动目标检测与估计[J]. 信号处理, 2007, 23(6):829-832.

(下转第 104 页)