

匹配滤波和去斜率脉压方法性能分析与比较

宿绍莹 侯庆凯 任艳 陈曾平

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 匹配滤波与去斜率脉压是宽带成像雷达常用的两种处理方法, 理论上具有同样的距离分辨率, 但在实际应用中由于调频非线性、幅相失真和混频器噪声等非理想因素的影响, 两者性能存在差异。本文首先介绍了两种方法的原理, 提出了对非理想因素导致的系统失真进行周期性分量和非周期性分量的分解方法, 仿真结果表明匹配滤波方法在旁瓣抑制、距离分辨率和信噪比等性能上都优于去斜率脉压方法, 通过数字滤波对幅相失真进行补偿后, 可进一步提高匹配滤波脉压方法的性能, 最后通过实测数据验证了分析方法及结论的正确性。本文结论可用于指导宽带成像雷达系统设计。

关键词: 宽带成像雷达; 匹配滤波; 去斜率脉压; 线性调频

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)02-0202-05

Performance Comparison of Matched Filtering and Dechirp Pulse Compression

SU Shao-ying HOU Qing-kai REN Yan CHEN Zeng-ping

(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: Matched filtering and dechirp processing are the common methods in wide band imaging radar. They both obtain equal resolution in theory, but perform differently in practical application. This paper starts from the principles of the two methods, and analyzes the distortion of system by dividing it into two portions: the periodic part and the nonperiodic one. The simulation result shows that the method of matched filtering processing performs better than dechirp processing when considering sidelobe suppression and range-resolution and signal noise ratio. The performance of matched filtering is improved with compensation of amplitude and phase distortion. Analysis based on real data proves the effectiveness and efficiency of the proposed strategy of analyzing. The conclusions of this paper can be referred to in the system design of wide band imaging radar.

Key words: wide band radar; matched filtering; dechirping; linear frequency modulation(LFM)

1 引言

宽带成像雷达为改善雷达性能, 同时实现远距离探测和高分辨率, 通常采用宽带线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号体制, 通过脉冲压缩解决作用距离和距离分辨率之间矛盾。

宽带 LFM 信号进行脉压处理目前有两种主要方法: 一是匹配滤波脉压方法, 二是去斜率脉压方法^[1], 处理流程如图 1 所示。由于现代雷达应用领域的拓展, 对距离分辨率的要求越来越高, 发射所需要的带宽也随之增加。匹配滤波脉压方法需要较高的采样率和数字信号处理能力, 其应用受到了限制。而去斜率脉

压方法通过模拟混频有效的降低了信号处理带宽, 理论上可以获得与匹配滤波方法相同的分辨率, 近些年在高分辨雷达中得到了广泛的应用^[2-4]。

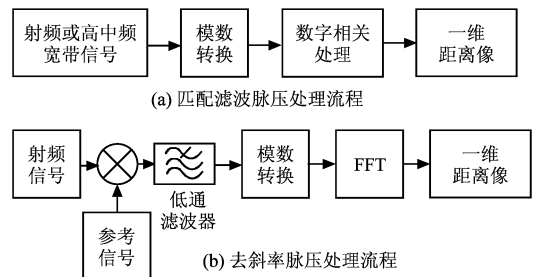


图 1 去斜率与匹配滤波脉压处理流程

去斜率脉压方法理论和工程应用都已经比较成熟,研究主要针对该方法在调频非线性、多普勒调制和系统幅相失真等方面的补偿^[2, 3, 5, 6],以获得目标更高质量的一维像和二维像,而缺乏对两种处理方法的性能分析与比较。本文从数学模型出发,对系统失真分解为周期性分量和非周期性分量,分析比较了调频线性度失真、幅相失真等非理想因素对两种处理方法性能的影响,并根据某型号雷达实测数据分析和比较了两种处理方法在实际工程应用中的性能差异。

2 数学模型

2.1 匹配滤波脉压方法

雷达发射信号的复数形式为

$$s(t) = \text{rect} \frac{t}{T} \exp j2 f_c t + \frac{1}{2} K t^2 \quad (1)$$

其中 T 为脉冲持续时间, f_c 为中心频率, t 是时间变量, K 是线性调频率。

匹配滤波脉压方法对宽带雷达信号直接采集,中心频率对脉压处理过程没有必然影响,时延后的目标接收回波可表示为

$$s_r(t) = \text{rect} \frac{t-t_i}{T} \exp j K(t-t_i)^2 \quad (2)$$

匹配滤波器为发射信号的复共轭可表示为

$$h(t) = \text{rect} \frac{t}{T} \exp -j K t^2 \quad (3)$$

匹配滤波器的时域输出表达式为

$$s_{out}(t) = s_r(t) \otimes h(t) = (T - |t|) \text{rect} \frac{t}{2T} \text{sinc} Kt(T - |t|) \quad (4)$$

压缩后输出近似为 sinc 函数

$$s_{out}(t) \approx T \text{sinc} [KT(t-t_i)] \quad (5)$$

该近似在大时宽带宽积下是精确的,距离分辨率为

$$\rho_r = \frac{0.886}{|K|T} \cdot \frac{c}{2} \approx \frac{c}{2|K|T} = \frac{c}{2B}, B \text{ 为信号带宽} \quad (6)$$

2.2 去斜率脉压方法

去斜率脉压过程如图 2 所示,混频器工作在射频,雷达中心频率对脉压处理结果有影响,因此无法忽略。某点目标到雷达的距离为 R_i ,对应的回波延时为 t_i ,雷达接收信号复数形式表示为

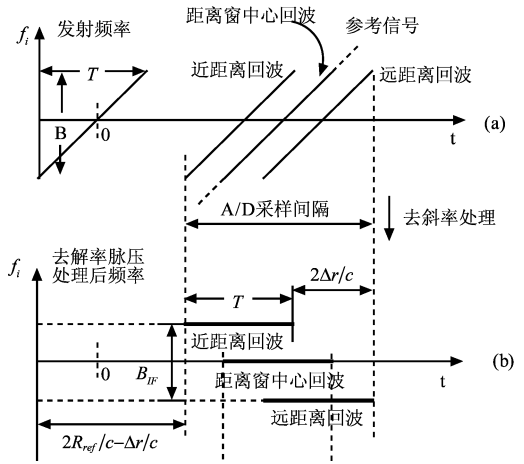


图 2 去斜率脉压过程示意图

$$s_r(t) = \text{rect} \frac{t-t_i}{T} \exp j2 f_c(t-t_i) + \frac{1}{2} K(t-t_i)^2 \quad (7)$$

设参考距离为 R_0 ,回波延时为 t_0 ,参考信号为

$$s_0(t) = \text{rect} \frac{t-t_0}{T_0} \exp j2 f_c(t-t_0) + \frac{1}{2} K(t-t_0)^2 \quad (8)$$

混频后经低通滤波,设 $t_\Delta = t - t_0$ 则差频信号为

$$s_y(t) = \text{rect} \frac{t-t_i}{T} \exp -j2 K t - t_0 t_\Delta \exp -j2 f_c t_\Delta \exp j K t_\Delta^2 \quad (9)$$

对差频信号作傅立叶变换得到

$$S_y(f_i) = T \text{sinc} [T(f_i + K t_\Delta)] \exp -j2 f_c t_\Delta \exp -j2 f_i t_\Delta \exp j K t_\Delta^2 \quad (10)$$

频域脉冲信号的分辨率为 $0.886/T$,因 $f_i = -K t_\Delta$,又 $t_\Delta = 2R_\Delta/c$ 得相应的距离分辨率为

$$\rho_r = \frac{c}{2|K|} \cdot \frac{0.886}{T} \approx \frac{c}{2|K|T} = \frac{c}{2B} \quad (11)$$

3 仿真分析与比较

上一节的结论可以知道,两种脉压方法理论上具有相同的距离分辨率,去斜率脉压方法有效降低了信号处理带宽,运算量降低同时简化了信号处理设备的工程实现难度,因此广泛应用于 SAR 和 ISAR 系统。但去斜率脉压方法也有其固有的缺陷,下面从调频线性度、幅相失真等因素出发,分析两种处理方法的对距离分辨率、旁瓣电平等性能参数影响。

3.1 调频线性度失真对脉压性能的影响

文献^[7-9]从不同角度分析了调频线性度对信号性

能的影响,对其主要因素本文进一步给出定量的结论。以去斜率脉冲压缩方法为例,对参考信号进行调频非线性分析。

调频非线性分为周期性分量和非周期性分量。式(8)中 K 分别表示为 K_1, K_2, L 为调频非线性度, f_m 为周期性分量的频率,noise为白噪声函数。

$$\begin{aligned} K_1 &= K + LK \cos(2 f_m t) \\ K_2 &= K + LK \text{noise}(t) \end{aligned} \quad (12)$$

为与实测数据比较,本文中采用如下雷达参数进行仿真: $f_c = 600\text{MH}$, $Z_B = 300\text{MH}$, $T = 300\mu\text{s}$, 周期性分量 $L = 10^{-5}$, 非周期性分量 $L = 10^{-4}$ 。通过仿真分析如图3所示,匹配滤波方法因参考信号具有理想线性特性,脉压结果较为理想。非周期性分量导致主瓣展宽,而周期性分量导致主瓣展宽的同时还产生成对的高旁瓣电平,对脉压性能影响较大。

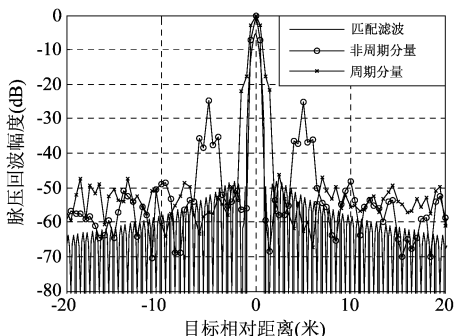


图3 调频线性度周期分量和非周期分量影响

调频线性度对脉压后旁瓣电平及距离分辨率的影响,通过仿真分析如图4所示,旁瓣电平主要由周期性分量产生,设周期性分量频率 $f_m = 100\text{KH}$,结果如图4(a)所示;距离分辨率主要由非周期性分量产生,结果如图4(b)所示。另外不同带宽对调频线性度的要求也不相同,带宽越大对调频线性度的要求也越高。去斜率脉压方法需要对两个线性调频信号模拟混频,各自的非线性失真和混频器的非线性失真导致调频线性度指标的恶化,一般大于匹配滤波脉压方法两倍,因此脉压性能也随之下降。

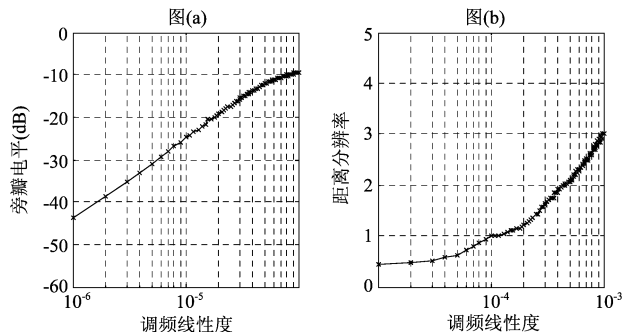


图4 调频线性度对旁瓣电平和距离分辨率的影响

3.2 幅相失真对脉压性能的影响

与线性度失真分析相似,对幅相失真同样分解为周期性分量与非周期性分量。式(8)中幅度为归一化表示,考虑周期性和非周期性失真影响,幅度分别表示为 A_1, A_2, G 为失真幅度,定义为失真最大幅度与信号幅度的比值;相位失真在式(8)的相位项分别加扰动 P_1, P_2, H 为相位扰动幅度,单位为度。 f_m 为周期性分量的频率,noise为白噪声函数。

$$A_1 = 1 + G \cos(2 f_m t) \quad (13)$$

$$A_2 = 1 + G \text{noise}(t)$$

$$P_1 = H \cos(2 f_m t) / 180 \quad (14)$$

$$P_2 = H \text{noise}(t) / 180$$

通过仿真分析如图5所示,非周期性分量对脉压性能影响较小,而周期性分量导致旁瓣电平抬高,对脉压性能影响较大。

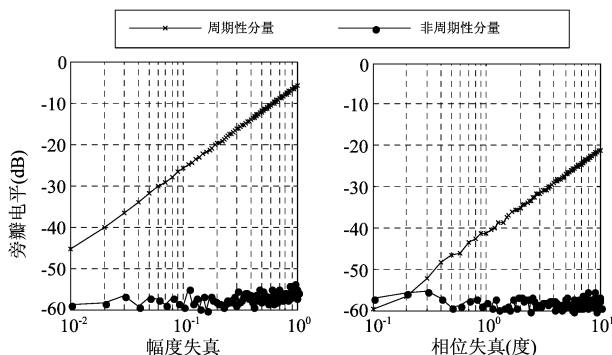


图5 幅相失真对脉压性能的影响

幅相失真对匹配滤波和去斜率脉压方法均产生影响,但由于去斜率脉压方法存在模拟混频环节,导致幅相误差进一步恶化,一般大于匹配滤波方法两倍,因此性能下降更为严重。幅相失真可以通过幅相补偿改善其影响,匹配滤波脉压方法通过数字信号处理补偿,精度较高,但去斜率脉压方法通过模拟信号处理补偿,精度有限,因此考虑幅相失真时,匹配滤波脉压方法具有较大的优势。

3.3 其它因素对脉压性能的影响

线性度失真和幅相失真是对脉压性能影响的两个主要因素,但在实际工程应用中还存在很多其它因素,同样对脉压性能造成影响,如采样率、混频器谐波失真、目标高速运动等。

另外从二维成像角度分析,由公式(4)、(9)和(10)可以看出去斜率脉压方法产生多个相位项,其中公式(9)的第三项为残余视频相位项,公式(10)的第

三项为包络斜置项,两者对二维成像无益,都需要进行补偿,对相位补偿方法的研究一直是二维成像处理的难点和热点,虽然取得了很多可喜的进展,但无疑增加了成像处理的难度同时也降低了成像的质量。关于这方面的详细分析超出本文的讨论范围,但同样是匹配滤波脉压方法和去斜率脉压方法的不同之处,值得进一步深入的研究。

4 实测数据分析

由于影响宽带雷达脉压性能的因素很多,部分模拟器件的非理想性很难给出数学模型。为比较两种脉压方法的性能,本文采用某宽带成像雷达的实测数据进行分析,参数与仿真分析一致,脉压后的一维距离像如图6所示。

实测结果进一步验证了仿真分析的结论,由于去斜率脉压方法存在较多的模拟处理环节,系统的幅相失真对其造成的影响更为严重,影响了脉冲压缩处理的性能,造成主瓣展宽、旁瓣抬高。而匹配滤波脉压方法为全数字处理过程,旁瓣抑制和距离分辨率上都有较大的优势,同时获得更高的信噪比。这些优点可以改善接收机的性能,有效提高目标分辨能力和弱小目标检测能力,对目标一维、二维成像及目标识别等领域也会带来更好的效果。

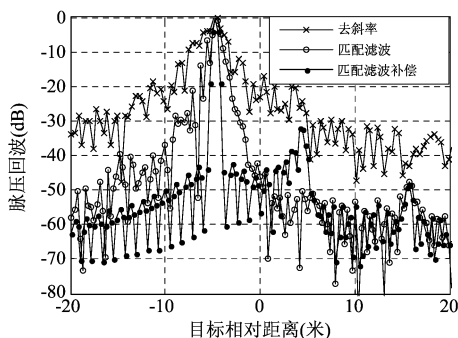


图6 实测数据脉压性能分析

系统补偿是提高脉压性能的重要手段,而幅相失真补偿是宽带雷达接收机必要的组成部分。去斜率脉压方法幅相失真补偿须通过模拟器件实现,补偿精度有限。匹配滤波脉压方法可以通过数字方法^[10]对系统失真进行补偿,精度较高。图6中给出了匹配滤波脉压方法幅相失真补偿后的结果,可以看出一维距离像的改善是明显的,表1给出脉压性能的主要参数对比。匹配滤波方法经幅相失真补偿后性能参数接近理论值,对信噪比的改善尤为突出。

表1 实测数据脉压性能对比

	去斜率	匹配滤波	匹配滤波补偿
距离分辨率(米)	1.5	0.8	0.6
旁瓣电平(dB)*	-13.5	-28	-41.6
信噪比(dB)	28.3	53.2	57.1

*注:因脉压回波发生畸变,旁瓣电平并不能清晰的得到,表中数据为主瓣和偏离主瓣1米处的电平相对值

匹配滤波脉压方法可以获得更高的性能,但要求对宽带射频或中频信号直接采集,对模数转换器件和数字信号处理的实时性要求较高。近年来集成电路水平的提高和数字信号处理方法工程应用的普及,对宽带成像雷达的中频信号甚至射频信号的直接采集成为可能,这也必将促进宽带成像雷达数字接收机的新发展。

5 结束语

本文介绍了宽带雷达去斜率和匹配滤波两种脉压方法的流程,并给出了数学模型及推导过程。通过对影响脉压性能的两个主要因素——调频线性度失真和幅相失真的建模与仿真分析,得出对距离分辨率和旁瓣电平的影响的定量分析,因去斜率方法比匹配滤波方法存在更多的模拟处理环节,所以匹配滤波方法具有明显的优势。最后通过实测数据对两种脉压方法的性能进一步分析,匹配滤波方法在旁瓣抑制、距离分辨率和信噪比等性能上都远优于去斜率脉压方法,通过数字幅相均衡对实测数据处理后,可进一步提高匹配滤波脉压方法的性能。本文的分析及得出的结论可以为宽带成像雷达接收机的设计提供参考,以改善接收机的性能。

参考文献

- [1] Caputi W J. Stretch: A Time-Transformation Technique [J]. IEEE Trans on AES. 1971, 7(2): 269-278.
- [2] 彭卫,汪学刚,唐斌,吴宏刚. 基于 Dechirping 技术的宽带全数字阵列雷达时延测量方法研究[J]. 电子与信息学报. 2010, 32(1): 32-37.
Peng Wei, Wang Xue-Gang, Tang Bin, Wu Hong-Gang. A Method of Relative Delay Measurement for the Wideband Digital Array Radar Based on Dechirping Technique [J]. Journal of Electronics & Information Technology. 2010, 32(1): 32-37.
- [3] 金胜,高梅国,邓颖丽. 基于 Dechirp 处理的雷达宽带测量技术[J]. 现代雷达. 2008, 30(5): 82-85.
Jin Sheng, Gao Mei-Guo, Deng Ying-Li. Wideband

- Measurement Technique Based on Dechirp Processing for Radar[J]. *Modern Radar*. 2008, 30(5): 82-85.
- [4] De Witt J J, Nel W A J. Range Doppler dynamic range considerations for dechirp on receive radar[C]. Amsterdam, Netherlands: 2008.
- [5] 刘书君,孙进平,袁运能,毛士艺. 合成孔径雷达中匹配滤波与解调频压缩方法的性能分析[J]. *信号处理*. 2007, 23(1): 31-35.
- Liu Shujun, Sun Jinping, Yuan Yunneng, Mao Shiyi. Analysis of Matched Filtering and Dechirp Processing for SAR Echo Compression[J]. *Signal Processing*. 2007, 23(1): 31-35.
- [6] 冯德军,王雪松,肖顺平,王国玉. 高速目标解调频处理的相位特性及其补偿[J]. *电子与信息学报*. 2008, 30(4): 916-920.
- Feng De-Jun, Wang Xue-Song, Xiao Shun-Ping, Wang Guo-Yu. Phase Signatures and Compensating Approach to Moving Target Echoes by Dechirping Processing [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*. 2008, 30(4): 916-920.
- [7] 陆必应,梁甸农. 调频线性度对线性调频信号性能影响分析[J]. *系统工程与电子技术*. 2005, 27(8): 1384-1386.
- Lu Bi-Ying, Liang Dian-Nong. Effects of FM linearity on the performance of LFM signals[J]. *Systems Engineering and Electronics*. 2005, 27(8): 1384-1386.
- [8] 王银芳. 大时带宽线性调频信号性能评估技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2004.
- Wang Yin-Fang. Study on Performance Evaluation of Large Time-Band Width Linear Frequency Modulation Signal [D]. National University of Defense Technology, 2004.
- [9] 万永伦, 姒强, 汪学刚. 超宽带线性调频信号线性度的测量方法[J]. *电子测量与仪器学报*. 2007, 21(4): 55-58.
- Wan Yonglun, Si Qiang, Wang Xuegang. Linearity Measurement Method for Ultra-wideband Linear Frequency Modulated Signal[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*. 2007, 21(4): 55-58.
- [10] 张月, 鲍庆龙, 杨剑, 陈曾平. 宽带数字阵列雷达通道均衡方法的设计与实现[J]. *信号处理*. 2010, 26(3): 453-457.
- Zhang Yue, Bao Qing-Long, Yang Jian, Chen Zeng-Ping. Design and Implementation of Channel Equalization Method for Wideband Digital Array Radar[J]. *Signal Processing*. 2010, 26(3): 453-457.

作者简介



宿绍莹(1982-),男,现为国防科技大学电子与工程学院博士研究生。主要研究方向为高速数据采集、雷达信号处理、雷达成像等。E-mail:sy_su@126.com

侯庆凯(1987-),男,现为国防科技大学电子与工程学院博士研究生,主要研究方向为压缩感知,雷达信号处理等。

任艳(1973-),女,国防科技大学电子与工程学院硕士研究生,主要从事雷达信号处理方面的研究。

陈曾平(1967-),男,国防科技大学电子与工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理,目标识别及电路系统设计等。