

# 极化有源雷达校准器的幅相失真分析及修正

林健智,李卫星,张 月,陈曾平

(国防科技大学自动目标识别重点实验室,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 极化有源雷达校准器(Polarimetric Active Radar Calibrator, PARC)可用于宽带高分辨雷达的定标,以使高分辨成像技术能准确刻画雷达目标的细微特征,但其作为有源器件会引入额外失真从而影响系统失真补偿.本文基于成对回波理论及频域失真补偿原理,通过将频域补偿转换为时域滤波,提出截取滤波器系数的方法以修正 PARC 失真.实测数据结果表明了理论分析和提出的修正方法的正确性,修正后的 PARC 可近似理想地补偿系统失真.

**关键词:** 宽带高分辨雷达; 定标; 高分辨成像技术; 雷达目标; 有源器件; 失真补偿; 回波

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2016)06-1512-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.06.036

## Analysis and Modification of Amplitude-Phase Distortion in Polarimetric Active Radar Calibrator

LIN Jian-zhi, LI Wei-xing, ZHANG Yue, CHEN Zeng-ping

(Science and Technology on Automatic Target Recognition Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** A polarimetric active radar calibrator (PARC) is used to calibrate wideband high-resolution radars, confirming the high-resolution imaging can accurately characterize radar targets. However, the PARC is an active component and induces additional distortion, affecting the system distortion compensation. This paper was based on the “method of paired echoes” and the distortion compensation in the frequency domain. After transforming the frequency compensation into the filtering in the time domain, we proposed to intercept the time filter for modifying the PARC distortion. The experimental results based on real radar data confirm the accuracy of the theoretical analysis and the proposed modification method and after the modification the PARC can approximately compensate the system distortion.

**Key words:** wideband high-resolution radar; calibration; high-resolution imaging; radar target; active component; distortion compensation; echo

### 1 引言

高分辨成像技术可提供雷达目标形状、尺寸等细微特征,是当今雷达研究的重要发展方向之一<sup>[1,2]</sup>. 高分辨意味着大带宽,而雷达系统各种非理想元器件难以在整个宽频带内保持平坦幅度特性和线性相位特性,从而引起系统幅相失真的问题<sup>[3,4]</sup>. 一般雷达系统要求旁瓣小于-25dB,这意味着系统在带内幅频波动小于1dB、相频波动小于6°,如果不进行系统幅相失真补偿,实际的雷达系统很难达到这样的指标要求<sup>[5]</sup>.

当前高分辨雷达进行系统失真补偿的常用措施是使用极化有源雷达校准器<sup>[4,6]</sup>. 它最先是由国外研究者研制并用于极化雷达的外定标,由收发两天线和放大器、光调制器和光纤延迟线等有源器件组成,故被命名

为“Polarimetric Active Radar Calibrator(PARC)”,国内学者将其翻译为“极化有源雷达校准器”<sup>[7]</sup>. PARC 后来也用于非极化雷达的系统幅相失真补偿,工作于转发器模式,即 PARC 的接收天线接收到雷达发射信号后,将信号进行放大、电光转换、光纤延迟、光电转换和增益控制,最后由发射天线辐射回雷达处,起到相当于远场点目标的作用,且能提供数十 dB 以上的高信噪比,是进行系统幅相失真补偿的较理想目标<sup>[4,6]</sup>. 需要注意的是该方法并非外定标,因为外定标是通过外部放置定标体来修正极化雷达天线的极化误差,两者虽然在形式上都利用了外部目标但工作方式和目的不一样<sup>[8]</sup>. 然而 PARC 的有源器件也为非理想元器件,从而雷达信号在经过其一系列处理后也将不可避免地发生失真,对雷达系统的幅相失真补偿会产生影响.

本文基于采用匹配滤波方式进行脉冲压缩的系统,针对利用 PARC 补偿系统幅相失真的过程,在系统幅相失真及补偿原理上,深入分析了 PARC 的幅相失真特性及影响,从时域补偿角度修正了 PARC 的幅相失真误差,解决了当前雷达系统幅相失真补偿效果有限的问题,实测数据结果证明了本文理论分析和提出方法的正确性和有效性。

## 2 系统幅相失真及补偿

### 2.1 系统幅相失真分析

实际雷达系统总会存在幅相失真,来源于系统整个通路上的所有非理想元器件,最简单的系统幅相失真特性为简谐振动<sup>[9]</sup>:

$$H_1(f) = [a_0 + a_1 \cos(2\pi c_1 f)] \cdot \exp[-j2\pi b_0 f - j b_1 \sin(2\pi d_1 f)] \quad (1)$$

其中  $f$  为频率,  $a_0$  和  $b_0$  为恒值,  $a_1$  和  $c_1$  分别表示幅频特性起伏的幅度和变化频率,  $b_1$  和  $d_1$  分别表示相频特性起伏的幅度和变化频率。

设系统输入信号为  $s_i(t)$ 、输出信号为  $s_o(t)$ , 根据成对回波理论, 可得<sup>[5]</sup>:

$$s_o(t) \approx a_0 s_i(t - b_0) + \frac{a_1}{2} [s_i(t - b_0 + c_1) + s_i(t - b_0 - c_1)] + \frac{a_0 b_1}{2} [s_i(t - b_0 + d_1) - s_i(t - b_0 - d_1)] \quad (2)$$

可见, 信号通过存在幅相失真的系统时, 输出分为三项: 第一项是输入信号的无失真线性放大项; 第二项和第三项分别由幅频失真和相频失真引起, 其形状和输入信号一致, 对称分布在第一项两侧, 称为成对回波. 成对回波导致主瓣展宽、距离分辨率下降、旁瓣抬高, 甚至产生假目标, 称为径向重影。

实际系统幅相特性较复杂, 但根据傅里叶级数展开, 可表示成多个简谐振动之和, 即表达式中多了累加号, 后续的推导只需在相应地方加上累加号即可, 不影响推导, 本文为书写简便仅采用简单表达式。

### 2.2 频域补偿

不同于采用 STRETCH 处理方式时系统失真具有复杂特性, 采用匹配滤波处理方式时, 雷达系统是各个子系统线性串联的系统, 可以作为整体一起进行测试和补偿<sup>[5]</sup>. 常用的方法是频域补偿<sup>[3]</sup>: 设  $S_{\text{ideal } i}(f)$  为理想输入信号  $s_{\text{ideal } i}(t)$  的频谱,  $S_{\text{ideal } o}(f)$  为经过系统后输出信号即理想点目标回波  $s_{\text{ideal } o}(t)$  的频谱, 则可得频域补偿因子:

$$H_1(f) = \frac{S_{\text{ideal } o}(f)}{S_{\text{ideal } i}(f)} \quad (3)$$

设  $S_{\text{target } o}(f)$  为雷达实际目标回波  $s_{\text{target } o}(t)$  的频谱, 从而频域补偿结果为

$$S_{c_o}(f) = \frac{S_{\text{target } o}(f)}{H_1(f)} = S_{\text{target } o}(f) \cdot \frac{S_{\text{ideal } i}(f)}{S_{\text{ideal } o}(f)} \quad (4)$$

## 3 PARC 幅相失真误差及修正

### 3.1 PARC 幅相失真分析

利用 PARC 对系统进行幅相失真补偿时, PARC 作为有源器件自身也存在幅相失真误差, 设 PARC 的幅相特性为  $\hat{H}_1(f)$ , 则 PARC 回波应为:

$$S_{\text{PARC } o}(f) = H_1(f) \hat{H}_1(f) S_{\text{ideal } i}(f) \quad (5)$$

于是上述频域补偿过程中求得的频域补偿因子实际上为:

$$H_1(f) \hat{H}_1(f) = \frac{S_{\text{PARC } o}(f)}{S_{\text{ideal } i}(f)} \quad (6)$$

从而对实际目标的实际补偿结果为:

$$\hat{S}_{c_o}(f) = \frac{S_{\text{target } o}(f)}{H_1(f) \hat{H}_1(f)} = \frac{S_{c_o}(f)}{\hat{H}_1(f)} \quad (7)$$

由上式可以看出, 利用 PARC 在频域进行系统失真补偿时, 在补偿掉系统失真的同时却又引入 PARC 的失真; 上式也可以看成是理想的补偿结果  $s_{c_o}(t)$  又经过了幅相特性为  $1/\hat{H}_1(f)$  的失真系统, 可依照式(1)描述该幅相特性:

$$\frac{1}{\hat{H}_1(f)} = [\hat{a}_0 + \hat{a}_1 \cos(2\pi \hat{c}_1 f)] \cdot \exp[-j2\pi \hat{b}_0 f - j \hat{b}_1 \sin(2\pi \hat{d}_1 f)] \quad (8)$$

其中, 变量的含义同前文, 加注上标仅是为了区别前文. 则由前面的推导不难得到实际补偿结果的时域表示为:

$$\hat{s}_{c_o}(t) \approx \hat{a}_0 s_{c_o}(t - \hat{b}_0) + \frac{\hat{a}_1}{2} [s_{c_o}(t - \hat{b}_0 + \hat{c}_1) + s_{c_o}(t - \hat{b}_0 - \hat{c}_1)] + \frac{\hat{a}_0 \hat{b}_1}{2} [s_{c_o}(t - \hat{b}_0 + \hat{d}_1) - s_{c_o}(t - \hat{b}_0 - \hat{d}_1)] \quad (9)$$

这说明了实际补偿结果出现了由 PARC 幅相失真误差引起的成对回波。

### 3.2 PARC 幅相失真修正

由于频域乘法相当于时域卷积, 因此, 上述频域补偿过程也可以在时域通过滤波实现, 即在上述得到频域补偿因子后取其倒数, 通过傅里叶逆变换可得到滤波器的时域响应, 然后截取较大值点作为 FIR 滤波器的系数, 将实际目标回波时域信号通过该 FIR 滤波器即可实现失真补偿<sup>[10]</sup>.

从滤波器的角度看, 式(7)相当于回波频域信号  $S_{\text{target } o}(f)$  经过幅相特性为  $1/[H_1(f) \hat{H}_1(f)]$  的滤波器, 其包含了 PARC 的幅相失真误差; 该滤波器又可以看成信号  $h_1(t)$  (为  $1/H_1(f)$  的傅里叶逆变换结果, 代表了仅

存在系统幅相失真时的滤波器的时域响应)经过了幅相特性为  $1/\widehat{H}_1(f)$  的失真系统,因此该滤波器的时域响应为:

$$\widehat{h}(t) \approx \widehat{a}_0 h_1(t - \widehat{b}_0) + \frac{\widehat{a}_1}{2} [h_1(t - \widehat{b}_0 + \widehat{c}_1) + h_1(t - \widehat{b}_0 - \widehat{c}_1)] + \frac{\widehat{a}_0 \widehat{b}_1}{2} [h_1(t - \widehat{b}_0 + \widehat{d}_1) - h_1(t - \widehat{b}_0 - \widehat{d}_1)] \quad (10)$$

这表明,利用 PARC 进行系统幅相失真补偿时所求得的滤波器的时域响应,相比利用理想点目标进行系统幅相失真补偿时所求得的滤波器的时域响应,多了成对回波.因此,在截取滤波器时域响应的较大值点构造 FIR 滤波器时,只要将成对回波排除在外,即取 FIR 滤波器时域响应为:

$$h(t) \approx \widehat{a}_0 h_1(t - \widehat{b}_0) \quad (11)$$

于是其频域特性近似式(3)中仅存在系统幅相失真时的滤波器的频域特性,用它来对系统进行失真补偿就相当于利用理想点目标进行补偿,即消除了 PARC 失真的影响.

### 3.3 实现步骤

上述给出了 PARC 幅相失真误差修正的理论分析,下面给出其具体实现步骤:

(1) PARC 回波信号经过接收、直接采样和正交解调后得到回波的离散复信号  $s_{\text{PARC}_o}(t_n)$ ,并通过 FFT 运算得到其频谱  $S_{\text{PARC}_o}(f_n)$ ;

(2) 构造理想发射信号的离散复信号  $s_{\text{ideal}_i}(t_n)$  并通过 FFT 运算得到其频谱  $S_{\text{ideal}_i}(f_n)$ ;

(3) 将(1)和(2)中两频谱相除求得滤波器的频域响应  $H(f_n)$ ;

(4) 将  $H(f_n)$  通过 IFFT 运算得到滤波器的时域响应  $h(t_n)$ ,截取其较大值且不含成对回波部分作为 FIR 滤波器的系数,其具体做法为:设置门限得到大于门限的三块区域,中间为主回波,两侧为成对回波,取中间与左侧的中点作为起始点、中间与右侧的中点作为终止点,起始点与终止点之间即为所要截取的滤波器系数;

(5) 将实际目标回波信号经过接收、直接采样和正交解调后得到的离散复信号通过上述 FIR 滤波器实现系统幅相失真补偿.

## 4 实验结果及分析

利用我国某 ISAR 雷达对本文的理论和方法进行验证.首先转动雷达天线使其对准数公里外标校塔上的 PARC,设置好雷达的工作模式,然后开发射机发射信号,雷达接收机接收 PARC 转发的信号并经采集存储设备进行记录.录取完 PARC 的回波数据后,雷达的工作模式不变,转动天线根据预报的轨道信息跟踪球形

标校星并录取其回波数据;同理录取了非点状目标的回波数据.

利用 PARC 回波和标校星回波(先通过相参积累提高信噪比)分别构造滤波器,其时域响应对比如图 1 所示,可以看到,利用 PARC 所构造的滤波器的时域响应在主体两侧出现了高的凸起,即为 PARC 的幅相失真误差引起的成对回波,这与式(10)的结论是一致的;而主体部分的差异是由 PARC 幅相失真中振动频率较小的分量与主回波叠加在一起所致,该部分影响较小,可以忽略.

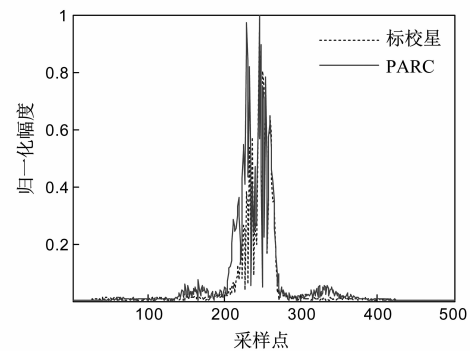
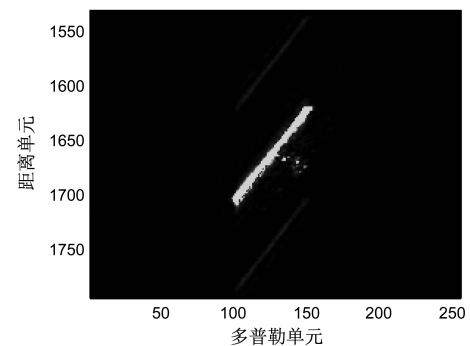
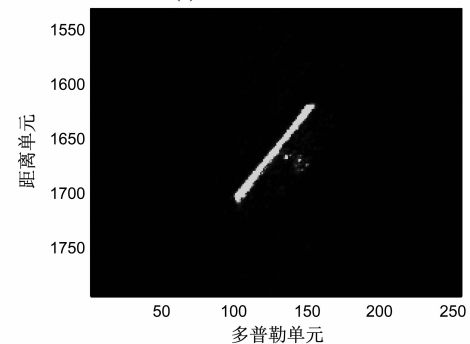


图1 滤波器时域响应对比

图 2 是上述两滤波器对同一非点状目标同一时间段回波数据补偿后的成像结果,可以看到,利用 PARC 补偿结果导致了径向重影,这与式(9)的结论是一致的;而目标部分的成像效果的细微差异是由振动频率



(a) 利用PARC补偿结果



(b) 利用标校星补偿结果

图2 补偿结果对比

较小的失真分量引起,但差别并不大,可通过对比度增强等图像处理的方法加以消除。

根据本文方法,修正 PARC 的失真后对上述同一数据的补偿结果如图 3 所示,对比图 3 和图 2(a),可以看到,修正后径向重影被消除且目标部分的成像效果没有改变,证明了本文方法的正确性和有效性。

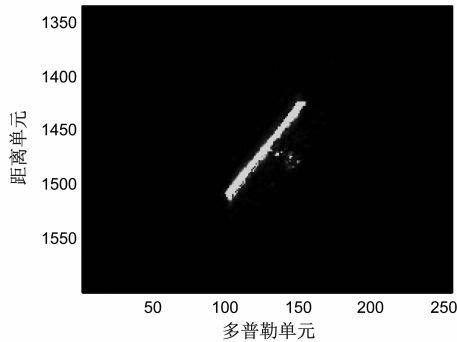


图3 修正PARC失真后的补偿结果

## 5 结束语

系统幅相失真补偿是雷达系统达到设计指标性能的重要保证。本文针对利用 PARC 进行系统幅相失真补偿导致补偿后出现径向重影的问题,结合系统幅相失真补偿的原理,分析了 PARC 的幅相失真误差及其影响,从时域补偿的角度提出了修正方法,从而消除了径向重影实现了对系统幅相失真的较理想补偿。实测数据结果验证了本文方法的正确性。由于本文的补偿方法实现简单,为解决我国当前雷达系统花高成本修建 PARC 标校塔却不能较好地补偿系统幅相失真的难题提供了理论和技术支撑。

## 参考文献

- [1] 周万幸. ISAR 成像系统与技术发展综述[J]. 现代雷达, 2012,34(9):1-7.  
ZHOU Wan-xing. Development and prospect of ISAR imaging system and imaging technique [J]. Modern Radar, 2012,34(9):1-7. (in Chinese)
- [2] Biao ZHANG, Yiming PI, Xiaobo YANG. Terahertz imaging radar with aperture synthetic techniques for object detection [A]. 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops [C]. Budapest: IEEE, 2013. 921-925.
- [3] Peter TAIT. Introduction to Radar Target Recognition [M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2009. 264-272.
- [4] 林钱强,张月,陈曾平. 宽带雷达 STRETCH 处理系统失真补偿新方法[J]. 电子与信息学报,2013,35(6):1477-1483.  
LIN Qian-qiang, ZHANG Yue, CHEN Zeng-ping. A new compensation method of system distortion in wideband ra-

dar STRETCH processing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013,35(6):1477-1483. (in Chinese)

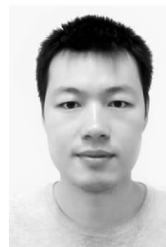
- [5] 刘永坦. 雷达成像技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. 341-397.
- [6] 杨文军,徐泳,王峰,等. 宽带雷达系统失真补偿信号的提取方法 [J]. 现代雷达, 2006,28(5):8-11.  
YANG Wen-jun, XU Yong, WANG Feng, et al. Compensation signal extraction for wideband radar system distortion [J]. Modern Radar, 2006,28(5):8-11. (in Chinese)
- [7] P S DALEMAN, R K HAWKINS, T I LUKOWSKI. Experience with active radar calibrators for airborne SAR [A]. 10th Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Maryland: IEEE, 1990. 795-798.
- [8] HONG Jun, ZANG Bing-rong, WANG Hong-qi. The progress of the airborne SAR calibration techniques in China [A]. IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Hamburg: IEEE, 1999. 422-424.
- [9] 王吉滨,孟宪德,张忠. 一种新的高频地波雷达接收系统补偿方案 [J]. 电子学报, 2001,29(4):534-537.  
WANG Ji-bin, MENG Xian-de, ZHANG Zhong. A new compensation method for HF ground wave radar receiving system [J]. Acta Electronica Sinica, 2001,29(4):534-537. (in Chinese)
- [10] 张月,鲍庆龙,杨剑,等. 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, et al. Design and implementation of channel equalization method for wideband digital array radar [J]. Signal Processing, 2010,26(3):453-457. (in Chinese)

## 作者简介



林健智 男,1987年9月生于广东揭阳。现为国防科技大学博士研究生。研究方向为宽带雷达数据处理。

E-mail: jzlingkd@163.com



李卫星 男,1989年8月生于河南信阳。现为国防科技大学博士研究生。研究方向为阵列信号处理。

E-mail: lee\_weixing@163.com