

文章编号: 2095-4980(2018)01-0031-07

太赫兹 ISAR 成像系统误差校正算法

盛佳恋¹, 何 静^{1,2}, 付朝伟^{1,2}, 李银伟¹, 王海涛¹

(1.上海无线电设备研究所, 上海 200090; 2.上海目标识别与环境感知工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 针对非线性系统误差对太赫兹雷达成像质量的影响, 提出一种最小熵系统误差校正算法。在实测的太赫兹逆合成孔径雷达成像实验中, 非线性误差会对回波相位产生影响, 从而使得脉压后的距离像能量分散, 进而降低成像质量。经过对误差形式的理论分析, 建立一维距离像的相位误差补偿模型, 并基于最小熵的优化准则迭代校正此系统误差。实验结果表明, 与基于参考点目标的方法相比, 所提方法自适应性更强, 且具有更好的校正效果。

关键词: 太赫兹; 逆合成孔径雷达成像; 最小熵; 误差校正

中图分类号: TN125

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0031

Error correction algorithm for terahertz ISAR imaging system

SHENG Jialian¹, HE Jing^{1,2}, FU Chaowei^{1,2}, LI Yinwei¹, WANG Haitao¹

(1.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China;

2.Shanghai Engineering Research Center of Target Identification and Environment Perception, Shanghai 200090, China)

Abstract: To deal with the effect of the nonlinear system error on the terahertz radar imaging, a system error correction algorithm based on minimum entropy is proposed. In the real terahertz inverse synthetic aperture radar imaging experiments, the intrinsic system error influences the echo phase and disperses the range profile, which will lead to the image degradation. After theoretical analysis of the error formulation, the phase error compensation model for 1D range profile is established. It is found that this error can be skillfully removed by the minimum entropy metric. Experimental results show a higher efficiency and better adaptability of the proposed method compared to that based on the reference reflection.

Keywords: terahertz; Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR); minimum entropy; error correction

由于对非合作目标在抗干扰、反隐身和高分辨等方面的优势, 太赫兹逆合成孔径雷达(ISAR)成像已引起了国内外军事和民用领域的高度关注^[1-4]。相对于微波和毫米波, 太赫兹波处于更高频段, 具有更短的波长, 更容易实现极宽带信号和极窄波束的目标精细成像^[5-6]。在极短的观测时间内实现高分辨成像, 可避免回波因目标姿态快速变化而引起的复杂成像过程, 并能够实时捕获高速运动的目标动态, 这为雷达探测和目标识别提供新的途径。

近几年, 太赫兹源技术的发展已大大推动了太赫兹 ISAR 成像的应用与研究^[7]。2007年, K B Cooper 等成功研制了第一部太赫兹成像系统^[8]; 2013年, 德国 FHR 报道的 MIRANDA-300 雷达系统工作频率为 0.3 THz, 可用带宽 40 GHz, 分辨力已达 3.7 mm^[9]。目前国内的太赫兹雷达成像技术仍属于起步阶段, 仅有少数单位拥有太赫兹雷达系统。系统的不成熟和不稳定性所带来的潜在误差, 大大影响了 ISAR 成像质量。除了从系统硬件的角度解决该问题外, 基于数据的自适应误差校正也具有重大的研究意义。

利用已有的太赫兹 ISAR 系统进行实验发现, 其存在的固有系统误差影响了回波相位, 从而导致一维距离像扩散。这一方面使得目标支撑区不符合真实情况, 另一方面引起常规的成像算法失效。通常的做法是, 利用自激信号或参考点目标获取系统误差后进行校正。然而, 这种做法在未来应用中受到极大限制, 除了精确度要求外, 参考点有无或选取也是难题。相比之下, 基于数据本身的校正方法具有更高的灵活性和自适应性。本文提出的最小熵误差校正方法能够有效解决该问题, 实测数据结果也表明该盲补偿的方法具有一定可行性。

收稿日期: 2017-01-24; 修回日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41601508); 上海市自然科学基金资助项目(17ZR1428700; 15ZR1439500)

1 太赫兹 ISAR 成像实验模型

利用已有的太赫兹成像系统进行微波暗室实验, 雷达保持不动, 将目标放置在底座固定的转台上, 转台以均匀的速率旋转, 几何布置如图 1(a)所示, 目标成像平面如图 1(b)所示。雷达发射并接收连续线性调频信号, 其信号形式为:

$$S(\hat{t}, t) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2\right)\right] \quad (1)$$

式中: \hat{t} 表示快时间; t 表示全时间; T_p 表示脉冲持续时间; f_c 为载频; γ 为调频率。

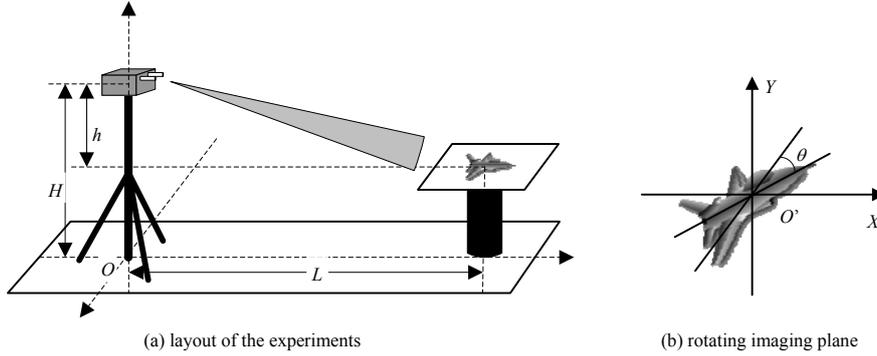


Fig.1 Illustration of terahertz ISAR imaging system in microwave anechoic chamber

图1 太赫兹 ISAR 成像微波暗室实验模型示意图

以雷达支架所处的地面位置为坐标系中心 O , 雷达所处的坐标位置为 $(0,0,H)$, 目标所在的参考坐标系原点 O' 的坐标为 $(0,L,H-h)$, 目标上某散射点 P 在 t 时刻相对于 O' 的坐标位置矢量为 $(X(\theta_t), Y(\theta_t), 0)$, 目标相对雷达的瞬时距离可表示为:

$$R(t) = \sqrt{X^2(\theta_t) + (Y(\theta_t) + L)^2 + h^2} \quad (2)$$

通过解线频调(Dechirp)的方式进行脉冲压缩^[10], 参考距离固定为 R_{ref} , 因此, 忽略剩余视频相位, Dechirp 后的信号可写成如下形式:

$$S(\hat{t}, t) = \text{rect}\left[\frac{1}{T_p}\left(\hat{t} - \frac{2R(t)}{c}\right)\right] \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t)\right) \exp\left[-j\frac{4\pi\Delta R(t)}{c}\gamma\hat{t}\right] \quad (3)$$

式中: $\Delta R(t) = R(t) - R_{\text{ref}}$; c 为光速; λ 为波长。脉压后的一维距离像为:

$$G(\hat{f}, t) = \text{sinc}\left(T_p\left(f_r - \frac{2\gamma\Delta R(t)}{c}\right)\right) \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t)\right) \exp\left[-j\frac{4\pi\Delta R(t)}{c}f_r\right] \quad (4)$$

式中 f_r 为距离向频率。

由式(3)可以看出, 在某个固定方位时刻 t , $S(\hat{t}, t)$ 退化为 $S(\hat{t})$, 且相位随 \hat{t} 线性变化。然而, 系统误差的存在使得线性相位不理想, 甚至出现高阶相位影响距离像的分布和聚焦。将距离时间离散化为 \hat{t}_n ($n=0:N-1$), 假设非线性误差为 $\exp(j\phi(\hat{t}_n))$, 存在误差后的信号和一维距离像分别表示为:

$$\begin{cases} S_{\text{err}}(\hat{t}_n) = S(\hat{t}_n) \exp(j\phi(\hat{t}_n)) \\ G(\hat{f}_k) = \sum_{n=0}^{N-1} S_{\text{err}}(\hat{t}_n) \exp\left(j\frac{2\pi}{N}kn\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中 \hat{f}_k 是距离频率。

实验中, 对 1 个 $0.02 \text{ m} \times 0.03 \text{ m}$ 的金属片进行测试, 得到距离像如图 2(a)所示。由理论距离分辨力 0.0156 m 计算得到主能量区所占的距离为 0.375 m , 显然已远远超过目标实际尺寸。另外, 即使铁片分布在 2 个距离单元,

但其相位仍然近似线性,如图 2(b)所示,而实际中的相位变化呈现非线性且具有随机性,对点目标的回波数据沿距离方向的相位如图 2(c)所示。一般地,认为非线性相位在 $\pm \pi/4$ 范围之内,则不会引起能量的分散。从图 2(c)可以明显看出非线性相位已超过此范围。由于随机相位误差影响目标散射分布,对后续成像十分不利,因此在成像前需要进行校正。

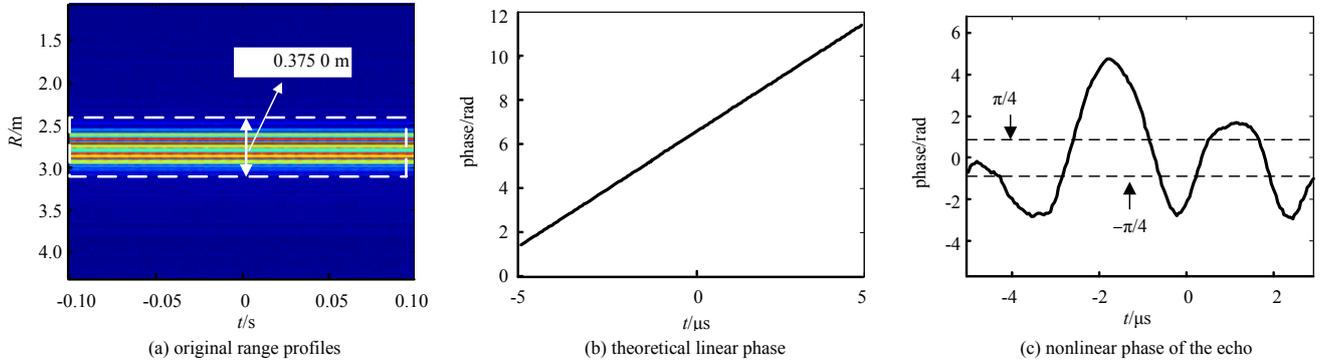


Fig.2 Range profiles and the echo phase of a metal plate
图 2 简单目标距离像及回波相位形式

2 距离像相位误差补偿方法

从式(5)中可以看出,系统误差 $\exp(j\phi(\hat{t}_n))$ 对每一个散射点均相同,且影响一维距离像 $G(\hat{f}_k)$ 的聚焦效果。因此有 2 种思路:

1) 基于参考点的相位误差补偿

这种方法原理简单直接,即通过在同一场景下利用简单的点目标获得实验数据后,取其非线性相位,进行平均,并对其他复杂目标直接进行相位补偿。点目标回波去除线性相位形式为:

$$S_{\text{point}}(\hat{t}_n) = \exp(j\bar{\phi}(\hat{t}_n)) \quad (6)$$

式中 $\bar{\phi}(\hat{t}_n)$ 为多个脉冲非线性相位的平均。

若误差随机性只表现在沿距离时间方向,那么包含 P 个散射点的目标形式为:

$$S_{\text{err}}(\hat{t}_n) = \sum_{p=0}^P S_p(\hat{t}_n) \exp(j\phi(\hat{t}_n)) \quad (7)$$

将 $S_{\text{point}}(\hat{t}_n)$ 作为补偿项,对 $S_{\text{err}}(\hat{t}_n)$ 直接进行共轭相乘,相位误差可得到补偿

$$\tilde{S}(\hat{t}_n) = S_{\text{err}}(\hat{t}_n) \cdot S_{\text{point}}^*(\hat{t}_n) \approx \sum_{p=0}^P S_p(\hat{t}_n) \quad (8)$$

然而,在没有参考点目标时,需要基于数据进行自适应补偿。

2) 自适应相位误差补偿

显然,非线性相位影响一维距离像的聚焦效果,若不考虑脉冲之间非线性相位的随机性,即认为每个脉冲时刻均相同。因此,可利用多个距离脉压像的聚焦性能作为评价标准^[11],通过迭代优化进行相位补偿。本文利用最小熵为评价标准说明补偿方法^[12]。

令第 t_m ($m=0:M-1$) 个脉冲时刻补偿后的距离像为:

$$\tilde{G}_{k,m}(\phi) = \sum_{n=0}^{N-1} S_{\text{err}}(n,m) \exp(-j\phi_n) \exp\left(j\frac{2\pi}{N}kn\right) \quad (9)$$

式中: $\phi = [\phi_n]_{N \times 1}$; 距离像 $\tilde{G}(\phi) = [\tilde{G}_{k,m}(\phi)]_{N \times M}$ 的能量为 $E = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} |\tilde{G}_{k,m}(\phi)|^2$, 则熵值可表示成

$$\text{Ent}\{\tilde{G}(\phi)\} = -\frac{1}{E} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} |\tilde{G}_{k,m}(\phi)|^2 \log |\tilde{G}_{k,m}(\phi)|^2 + \log(E) \quad (10)$$

最小熵的优化准则为:

$$\min J(\boldsymbol{\phi}) = \text{Ent}\{\tilde{G}(\boldsymbol{\phi})\} \quad (11)$$

求解式(11)的优化问题, 可利用优化方法求解, 一阶和二阶导数形式分别为:

$$\begin{cases} \frac{\partial J(\boldsymbol{\phi})}{\partial \phi_n} = -\frac{1}{E} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \left(1 + \log |\tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})|^2\right) \frac{\partial |\tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})|^2}{\partial \phi_n} \\ \frac{\partial J^2(\boldsymbol{\phi})}{\partial \phi_n^2} = -\frac{1}{E} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \left[\left(\frac{\partial |\tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})|^2}{\partial \phi_n} \right)^2 + \frac{\partial^2 |\tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})|^2}{\partial \phi_n^2} \left(1 + \log |\tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})|^2\right) \right] \end{cases} \quad (12)$$

式中

$$\begin{cases} \frac{\partial |\tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})|^2}{\partial \phi_n} = 2 \text{Re} \left\{ \frac{\partial \tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})}{\partial \phi_n} \cdot \tilde{G}_{k,m}^*(\boldsymbol{\phi}) \right\} \\ \frac{\partial^2 |\tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})|^2}{\partial \phi_n^2} = 2 \text{Re} \left(\frac{\partial^2 \tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})}{\partial \phi_n^2} \tilde{G}_{k,m}^*(\boldsymbol{\phi}) \right) + 2 \left| \frac{\partial \tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})}{\partial \phi_n} \right|^2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})}{\partial \phi_n} = -j \sum_{n=0}^{N-1} S_{\text{err}}(n, m) \cdot \exp(-j\phi_n) \cdot \exp\left(j\frac{2\pi}{N}kn\right) \\ \frac{\partial^2 \tilde{G}_{k,m}(\boldsymbol{\phi})}{\partial \phi_n^2} = -\sum_{n=0}^{N-1} S_{\text{err}}(n, m) \cdot \exp(-j\phi_n) \cdot \exp\left(j\frac{2\pi}{N}kn\right) \end{cases} \quad (14)$$

通过设置步长 α 可更新迭代值 $\phi_n^{[d+1]} = \phi_n^{[d]} - \alpha (\nabla^2 J(\boldsymbol{\phi}))^{-1} \cdot \nabla J(\boldsymbol{\phi})$, 其中, d 为迭代次数, $\nabla^2 J(\boldsymbol{\phi})$ 和 $\nabla J(\boldsymbol{\phi}) = [\partial J(\boldsymbol{\phi}) / \partial \phi_n]_{N \times 1}$ 分别为 Hessian 矩阵和梯度向量。

3 实验结果分析

首先, 利用现有设备进行基于点目标的实验, 点目标尺寸和原始脉压结果如图 2 相对应的说明和图 2(a), 获得的非线性相位如图 2(c)所示。再对复杂的飞机模型进行微波暗室实验, 与点目标转台中心位置一致, 模型如图 3(a)所示。受到非线性相位误差的影响, 得到的回波脉压结果散布情况与点目标一致, 如图 3(b)所示, 37.5 cm 的分布范围已超过目标真实尺寸, 某次回波(包含多个散射点)的相位形式如图 3(c)所示, 除了多个散射点叠加效应, 该相位大致走势与点目标近似。

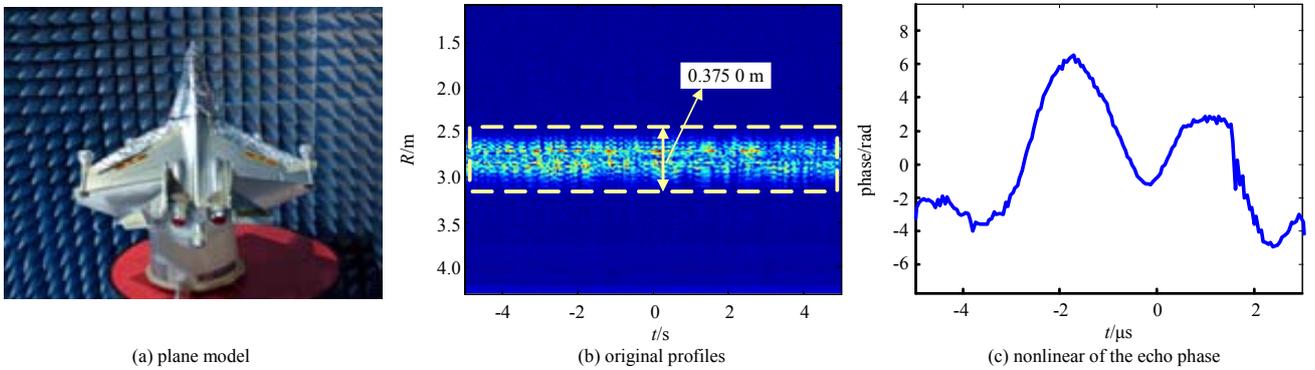


Fig.3 Range profiles and the echo phase of a complex target
图3 复杂目标距离像及回波相位形式

利用本文介绍的方法 1 进行补偿, 得到的脉压结果如图 4(a)所示, 计算的尺寸约为 14.1 cm, 与实际尺寸接近, 放大的结果如图 4(b)所示。这种方法优势在于速度快, 但也存在缺陷: a) 依赖于参考点, 距离中心位置需保持一致; b) 线性拟合补偿精确度有限。

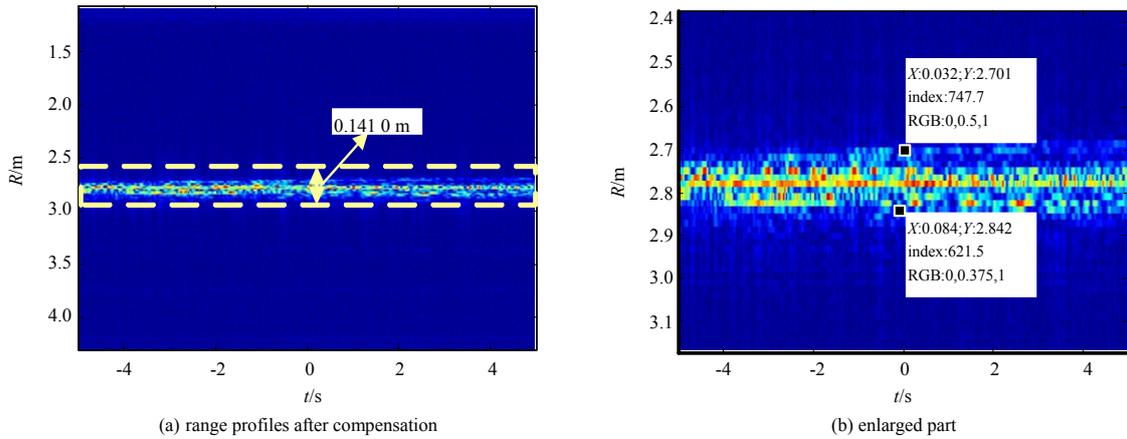


Fig.4 System error correction results based on point-referenced scheme
图 4 基于参考点的系统误差补偿结果

基于回波数据本身的校正方法具有更大的适用性。利用本文介绍的方法 2 可实现自适应的精确补偿。为了更清楚地表现该方法的自适应性,首先对参考点目标的回波数据进行补偿,得到的距离像如图 5(a)所示,与原始脉冲包络对应包络的对比如图 5(b)所示。由于金属片几乎只占有 1~2 个距离单元,因此从 1 个脉冲的剩余相位可看出补偿的效果。从图 5(c)可看出,所有回波的平均残余相位保持在 $\pm \pi/4$ 之间。

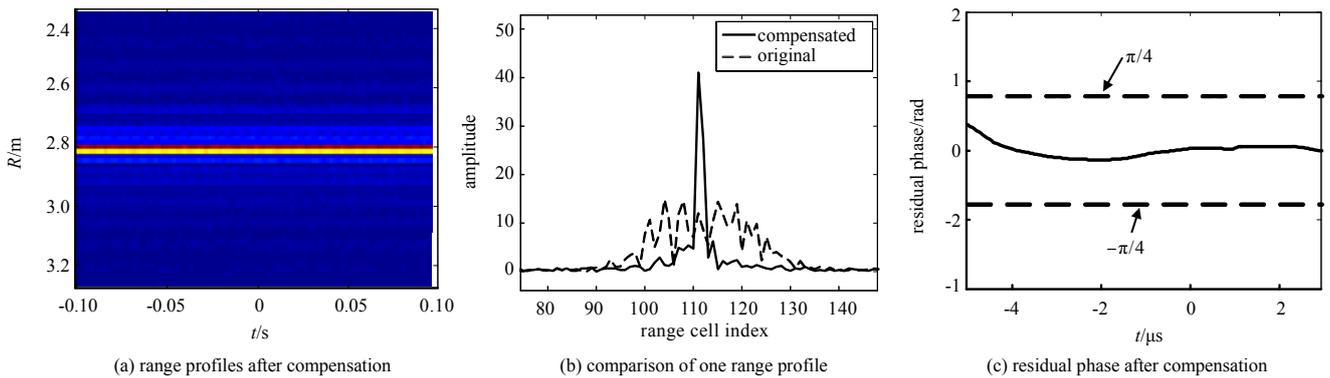


Fig.5 Adaptive correction results for the metal plate
图 5 点目标的自适应补偿结果

其次,利用该自适应方法对图 3(a)的复杂目标进行补偿,得到的结果如图 6 所示,其中图 6(a)为补偿后的距离像,对应的放大图图 6(b)显示了其能量分布范围与图 4(a)接近,约为 14.1 cm。从图 6(c)的对比结果可以看出,基于最小熵方法与参考点方法补偿后的单个包络几乎一致。估计相位和残余相位对比结果如图 6(d)和图 6(e)所示,剩余的平均相位均能保证在 $\pm \pi/4$ 之间。图 6(d)给出了迭代 100 次过程的熵值变化曲线。

针对该目标回波数据(采样点数约 $207 \times 5\,000$),2 种方法与原始距离像在能量分布范围、熵值、处理时间(相同配置)和自适应性的对比如表 1 所示,2 种方法获得的距离像聚焦效果比原始距离像均有很大改善,基于最小熵的方法熵值相对更小,这表明该方法能够提高补偿精确度,同时不借助参考点即可实现补偿;但处理速度需进一步改进。除此之外,对同一位置的目标进行多次实验,估计得到的相位曲线基本一致;但不同位置目标的非线性相位曲线不同。由此可初步分析,此相位误差形式并不是固定不变的,存在一定的空变性。从中也可看出,本文所提的自适应方法具有更大优势。

表 1 误差校正结果对比

Table1 Comparison of error correction results

	target distribution/cm	entropy	elapsed time/s	adaptability
original range profiles	37.5	11.729 6	—	—
point referenced scheme	14.1	10.718 9	0.071 1	weak
minimum entropy scheme	14.1	10.610 3	50.212 9 (100 iterations)	strong

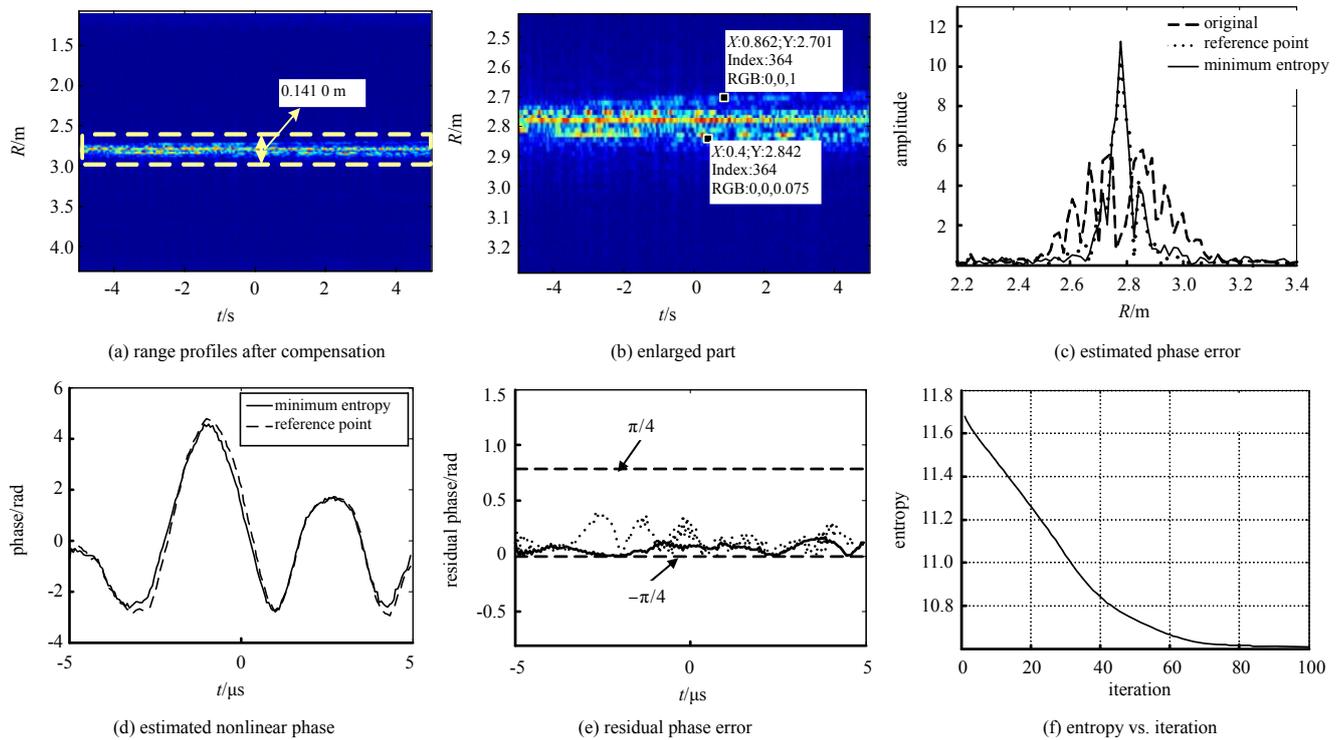


Fig.6 System error compensation results based on minimum entropy scheme
图6 基于最小熵的系统误差补偿结果

4 结论

针对太赫兹 ISAR 成像系统误差造成的距离像扩散问题, 本文提出了一种自适应的非线性相位补偿方法。结合实测的实验数据, 首先介绍了基于参考点的校正方法。考虑该方法自适应性和补偿精确度的约束, 进一步提出了基于回波数据的最小熵补偿方法。该方法以距离像的聚焦性能作为评价标准, 不依赖于参考点, 能够以较高精确度实现回波相位补偿, 为后续 ISAR 成像提供可靠的预处理。

参考文献:

- [1] APPLEBY R, WALLACE H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2007,55(11):2944-2956.
- [2] 徐刚锋, 张岩. 太赫兹成像雷达技术与制导应用探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4):507-511. (XU Gangfeng, ZHANG Yan. Development of terahertz imaging radar technology and its guidance application[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):507-511.)
- [3] 梁美彦, 邓朝, 张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):189-198. (LIANG Meiyan, DENG Chao, ZHANG Cunlin. Terahertz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):189-198.)
- [4] 张彪. 太赫兹雷达成像算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014. (ZHANG Biao. Research on imaging algorithms of terahertz radar[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [5] 刘玉景. 太赫兹雷达ISAR成像技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (LIU Yujing. Research on ISAR imaging techniques of terahertz radar[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [6] 舒鑫. 太赫兹雷达高分辨ISAR成像方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (SHU Xin. Research on high resolution ISAR imaging of THz Radar[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.)
- [7] DANYLOV A A, GOYETTE T M, WALDMAN J, et al. Terahertz inverse synthetic aperture radar(ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter[J]. Optics Express, 2010,18(15):16264-16272.
- [8] DENGLER R J, COOPER K B, CHATTOPADYAY G, et al. 600 GHz imaging radar with 2 cm range resolution[C]// IEEE/MTT-S International on Microwave Symposium. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2007:1371-1374.

- [9] STANKO S,CARIS M,WAHLEN A,et al. Millimeter resolution with radar at lower terahertz[C]// 2013 14th International on Radar Symposium(IRS). Dresden,Germany:IEEE, 2013:235-238.
- [10] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Radar imaging techniques[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [11] BERIZZI F,CORSINI G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996,32(3):1185-1191.
- [12] KRAGH T J. Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus[C]// Processing of 14th Adaptive Sensor Array Processing Workshop. Lexington,USA:[s.n.], 2006:645-648.

作者简介:



盛佳恋(1987-),女,浙江省平湖市人,博士,主要研究方向为逆合成孔径雷达成像。email:s.jialian@gmail.com.

何静(1982-),男,陕西省宝鸡市人,高级工程师,主要从事太赫兹雷达成像系统设计与性能测试。

付朝伟(1985-),男,山西省平遥市人,工程师,主要从事雷达成像系统参数论证与算法设计。

李银伟(1985-),男,河南省扶沟县人,工程师,主要从事干涉 SAR 系统设计与信号处理。

王海涛(1978-),男,山东省烟台市人,研究员,主要从事引信信号处理、太赫兹 ISAR 成像与星载毫米波 SAR 成像研究。

.....
(上接第 20 页)

- [13] DEAL W R,LEONG K,RADISIC V,et al. Low Noise Amplification at 0.67 THz using 30 nm InP HEMTs[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011,21(7):368-370.
- [14] DEAL W R,LEONG K,ZAMORA A,et al. Recent progress in scaling InP HEMT TMIC technology to 850 GHz[C]// 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Tampa,Florida,USA:[s.n.], 2014:1-3.
- [15] LEONG K,MEI X,YOSHIDA W,et al. A 0.85 THz Low Noise Amplifier using InP HEMT transistors[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015,25(6):397-399.
- [16] HOEFFLINGER B. ITRS-the international technology roadmap for semiconductors[M]. Berlin Heidelberg:Springer, 2011.
- [17] LEUTHER A,KOCH S,TESSMANN A,et al. 20 nm metamorphic HEMT with 660 GHz FT[C]// 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials(IPRM). Piscataway,NJ,USA:[s.n.], 2011:1-4.

作者简介:



曾建平(1986-),男,四川省简阳市人,工学博士,助理研究员,主要研究方向为太赫兹微电子器件。email:zengjianping@mtrc.ac.cn.

安宁(1988-),男,成都市人,工学硕士,助理研究员,主要研究方向为太赫兹微电子器件。

李志强(1987-),男,成都市人,理学博士,助理研究员,主要研究方向为高压器件。

李倩(1988-),男,成都市人,助理研究员,硕士,主要研究方向为太赫兹微电子器件。

唐海林(1979-),男,成都市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为太赫兹微电子器件。

刘海涛(1988-),男,成都市人,研究实习员,硕士,主要研究方向为太赫兹微电子器件。

梁毅(1989-),男,成都市人,学士,主要研究方向为太赫兹微电子器件。