

文章编号:1004-9037(2014)04-0609-06

一种基于 Tsallis 熵的逆合成孔径雷达距离对准方法

荆 腾^{1,2} 汪 玲^{1,2}

(1. 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室(南京航空航天大学),南京,210016;

2. 南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016)

摘要:距离对准是逆合成孔径雷达(ISAR)成像处理中运动补偿的关键步骤,其对准质量影响最终的 ISAR 成像质量。在传统的基于 Shannon 熵的距离对准方法基础上,本文给出一种新的基于 Tsallis 熵的距离对准方法,即引入非广延 Tsallis 熵,来衡量合成距离像的锐化度,并对距离平移量进行估计。详细分析了 Tsallis 熵的特性和用于距离对准的可行性,并通过仿真和实测数据,来验证基于 Tsallis 熵的距离对准方法的性能。结果表明,相比基于 Shannon 熵的距离对准方法,基于 Tsallis 熵的距离对准方法具有较好的抗噪声性能,并且可获得更好的距离对准效果。

关键词:逆合成孔径雷达;运动补偿;距离对准;Tsallis 熵;Shannon 熵

中图分类号:TN957.52

文献标志码:A

Range Alignment Method for ISAR Using Tsallis Entropy

Jing Teng^{1,2}, Wang Ling^{1,2}

(1. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), Nanjing, 210016, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Range alignment is a key step of the motion compensation in inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging. The quality of the range alignment affects the quality of the resulting reconstructed ISAR image. Based on the conventional Shannon-entropy-based range alignment method, a new range alignment method using Tsallis entropy is presented, where the Tsallis entropy is introduced to measure the sharpness of the synthetic range profiles (sum of the shifted range profiles), and estimate the amount of the range shift. The property of Tsallis entropy and the applicability in range alignment are analyzed in detail. Simulated and real data are used to verify the performance of the range alignment method using Tsallis entropy. The results show that, compared with the range alignment method using Shannon entropy, the range alignment method using Tsallis entropy has good anti-noise performance, and is able to obtain better alignment results.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); motion compensation; range alignment; Tsallis entropy; Shannon entropy

引 言

逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)利用目标相对于雷达的转动进行成像,但实际中除了转动分量,目标和雷达之间还有

相对平动分量存在。平动分量会造成接收回波在距离向上发生错位,无法进行方位向有效的相干积累,因此 ISAR 成像之前必须进行距离对准^[1],消除回波的距离向错位。目前 ISAR 已有许多距离对准方法^[2-5],如相关法^[2]、包络最小熵法^[3]、全局最小熵法^[4,5]、基于修正峰度的对准方法^[6]等。实

际中由于成像系统和目标散射特性不同,针对不同的 ISAR 数据^[7],距离对准方法的处理效果不尽相同。本文在深入研究已有距离对准方法基础之上,研究一种新的基于 Tsallis 熵的距离对准方法,以充分挖掘回波包含的有用信息^[8],获得新的回波距离对准途径。

包络最小熵法和全局最小熵法均采用 Shannon 熵^[9]作为距离对准的度量,通过寻找使合成距离像熵值最小的距离偏移量,完成距离对准。Shannon 熵是一种广延熵,广延统计在处理短程相互作用和短时记忆系统方面取得了巨大成功,但在处理长程相互作用系统、有记忆效应的介观系统以及一些耗散系统时表现出局限性^[10]。随着科学研究的不断深入,巴西物理学家 Tsallis C 提出了一种广义的非广延熵, Tsallis 熵^[11,12]。Tsallis 熵引入非广延参数 q ,原先广延统计无法解释的现象,通过选择合适的非广延参数 q 都可以得到满意的结果^[13,14]。因此, Tsallis 熵能够描述很多自然或者是人造的系统,具有其优越性。Cagri Yanik H 和 Birsen Yazici 已将 Tsallis 熵应用于单基合成孔径雷达,并取得了良好的效果^[15,16]。本文尝试将 Tsallis 熵用于 ISAR 距离对准。首先分析了 Tsallis 熵的特性以及用于距离对准的可行性,然后使用 Tsallis 熵代替 Shannon 熵进行距离对准,并以最终图像的对比度(Image contrast, IC)最大为准则,对 Tsallis 熵的非广延参数 q 进行搜索,确定使 IC 最大的 q 值,并以基于该 q 值的 Tsallis 熵完成距离对准。为提高算法效率,同时给出了非广延参数 q 值选取的经验准则,可避免对 q 值搜索。最后通过仿真实验分析了基于 Tsallis 熵的距离对准方法的抗噪性能,通过实测数据处理验证了该方法的有效性,并可获得比基于 Shannon 熵的包络最小熵法更好的距离对准效果。

1 基于 Tsallis 熵距离对准的可行性

Tsallis 熵的定义为^[11,12]

$$S_q = k \frac{1 - \sum_{i=1}^W p_i^q}{q-1} \quad q \in \mathbf{R} \quad (1)$$

式中: k 为正常数; W 为系统的状态数; p_i 为系统处在第 i 个状态的概率,且满足 $\sum_{i=1}^W p_i = 1$; q 为非广延参数,为系统熵函数非广延性的一种量度。在 $q=1$ 时, Tsallis 熵变为玻尔兹曼-吉布斯熵^[11],恢复广延性。若 k 同时近似为 1,玻尔兹曼-吉布斯熵即为 Shannon 熵。Tsallis 熵可以看作是玻尔兹

曼-吉布斯熵或 Shannon 熵的一种推广,通过选择合适的非广延参数 q ,基于 Tsallis 熵的非广延统计理论可以描述一些传统统计理论无法解释的现象,更好地描述真实世界。

类似已有方法将 Shannon 熵用于衡量合成距离像的锐化度,本文尝试将 Tsallis 熵引入 ISAR 距离对准中,以期能够更好地描述合成距离像的锐化度。下面通过分析 Tsallis 熵的特性,证明其用于距离对准的可行性。令 $k=1, W=2$,即考虑系统仅有两个状态的情况,分别画出 $q=-1, -0.5, 0, 0.5, 1, 2$ 时 Tsallis 熵 S_q 随 p_i 的变化曲线^[10],如图 1 所示。

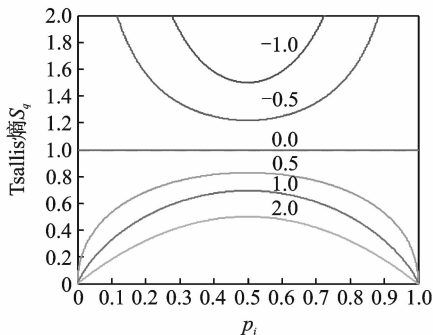


图 1 在不同 q 值下, Tsallis 熵 S_q 随 p_i 的变化曲线
Fig. 1 Curves of Tsallis entropy S_q along with the change of p_i under different values of q

观测图 1 可以得出如下结论:(1)当 $q=0, S_q$ 恒为 1;(2)当 $q>0, S_q$ 均随 p_i 增大先增后减,在 $p_i=0.5$ 时有最大值,其中 $q=1$ 时,呈现为 Shannon 熵的特性。因此类似 Shannon 熵,也可以选择 $q>0$ 但 $q \neq 1$,用最小 Tsallis 熵为准则进行距离对准。当回波对准时,合成距离像的锐化度最大^[3],包络最不平坦,熵也最小;(3)当 $q<0, S_q$ 随 p_i 增大先减后增,在 $p_i=0.5$ 时具有最小值。这种情况下将 Tsallis 熵用于距离对准,合成距离像波形的锐化度越大,则 Tsallis 熵越大,合成距离像波形的锐化度越小,则 Tsallis 熵越小,所以此时以最大 Tsallis 熵为准则进行距离对准,在理论上也是一种可行的方法。

为更好与传统基于 Shannon 熵的距离对准方法进行比较,下面选择 $q>0$,以最小 Tsallis 熵为准则对 ISAR 回波进行距离对准,并探讨 q 值的选取。

2 基于 Tsallis 熵的距离对准方法

2.1 实现方法

假设相邻两个回波的包络(即距离像)为 $e_1(r)$ 和 $e_2(r)$,两者之间由于平动引入的距离偏移量为

Δr , 则 Δr 可通过搜索使合成距离像的 Tallis 熵最小得到

$$\Delta \hat{r} = \min_{\Delta r} S_q[y(\Delta r)] \quad (2)$$

式中: $\Delta \hat{r}$ 为距离偏移 Δr 的估计值, $y(\Delta r)$ 为合成距离像, 即 $y(\Delta r) = e_1(r) + e_2(r - \Delta r)$ 。由式(1)可得

$$S_q[y(\Delta r)] = \frac{1 - \sum_{j=1}^N p_j^q}{q - 1} \quad (3)$$

式中: N 为 $y(\Delta r)$ 的总像素个数, p_j 为 $y(\Delta r)$ 第 j 个像素的概率, 定义为 $p_j = \frac{|y_j|}{y}$, 其中 y_j 为 $y(\Delta r)$

第 j 个像素的幅度, $y = \sum_{j=1}^N |y_j|$ 。

将上面的步骤依次用于所有回波, 从而完成距离对准, 具体步骤类似文献[1, 3]。为提高距离对准的精度, 还可以将基于 Tsallis 熵的距离对准方法与积累相结合, 获得更好的距离对准效果。

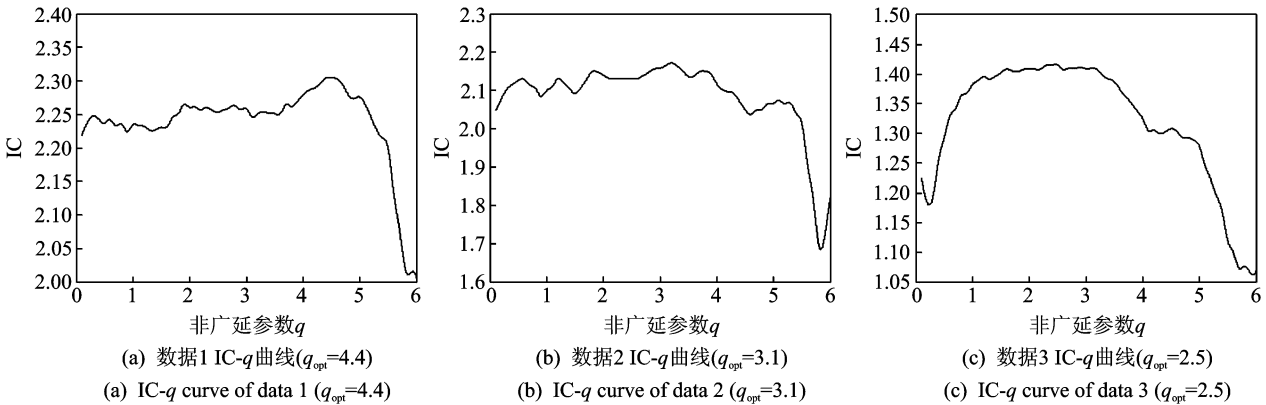


图 2 3 组飞机实测数据的图像对比度随 q 的变化曲线

Fig. 2 Curves of image contrast (IC) of three sets of plane real data along with the change of q

3 实验结果与性能分析

为了验证上述基于 Tsallis 熵的 ISAR 距离对准方法的有效性, 下面首先使用仿真数据对该方法的性能进行分析, 然后使用实测数据对该方法进行验证, 并对处理的结果进行分析。

3.1 抗噪声性能

仿真数据包含 256 个回波, 256 个距离单元。假设目标由两个强散射点构成, 分别位于不同的距离单元, 反射率分别为 10 和 8, 位于不同的距离单元中。考虑到回波的起伏, 用 $[-1, 1]$ 间均匀分布的随机数, 来描述散射点反射率在回波间的变化。同时, 根据给定信噪比 SNR, 在每一回波中添加高斯白噪声, 通过改变信噪比的大小来分析基于 Ts-

2.2 非广延参数 q 的选择

以获得最佳对准效果为目的, 可对 Tsallis 熵的非广延参数 q 进行最优选择。具体可通过使最终所得图像对比度最大来搜索最优非广延参数 q , 用 q_{opt} 表示, 此时对准效果也认为是最优的, 即

$$q_{opt} = \max_q (IC_q) \quad (4)$$

其中 IC_q 为非广延参数为 q 时所得图像的对比度。

显然, 采用上述方法选择最优非广延参数 q 计算量较大。实际中可以利用一些经验来减少计算量。对飞机实测数据分析表明, 使图像对比度最大的 q 值通常位于 $[1, 5]$ 之间, 且在此区间变化较平缓。图 2 给出了 3 组飞机实测数据的图像对比度随 q 的变化曲线。因此, 在实际中可按照上面的经验, 缩小 q 的搜索范围以降低运算量, 也可以在此范围内直接选择 q 值, 虽然可能不是最优选择, 但可避免搜索, 提高运算效率。

allis 熵的距离对准方法的抗噪声性能, 并与传统基于 Shannon 熵的包络最小熵法作比较。在成像时间内, 用正弦曲线描述雷达与目标之间平动引起的回波在距离向上的整体偏移。

在不同信噪比的情况下, 使用包络最小熵法与基于 Tsallis 熵的距离对准方法对仿真数据进行距离对准, 如图 3 所示, 当信噪比为 -3.4 dB 时, 包络最小熵法无法完成距离对准, 而基于 Tsallis 熵的距离对准方法依然可以完成距离对准, 其临界信噪比达到 -5.4 dB。根据上述非广延参数 q 的选择方法, 为减少计算量, 此处直接选择最优的非广延参数值为 3。可见, 基于 Tsallis 熵的距离对准方法相比包络最小熵法具有更好的抗噪声性能。

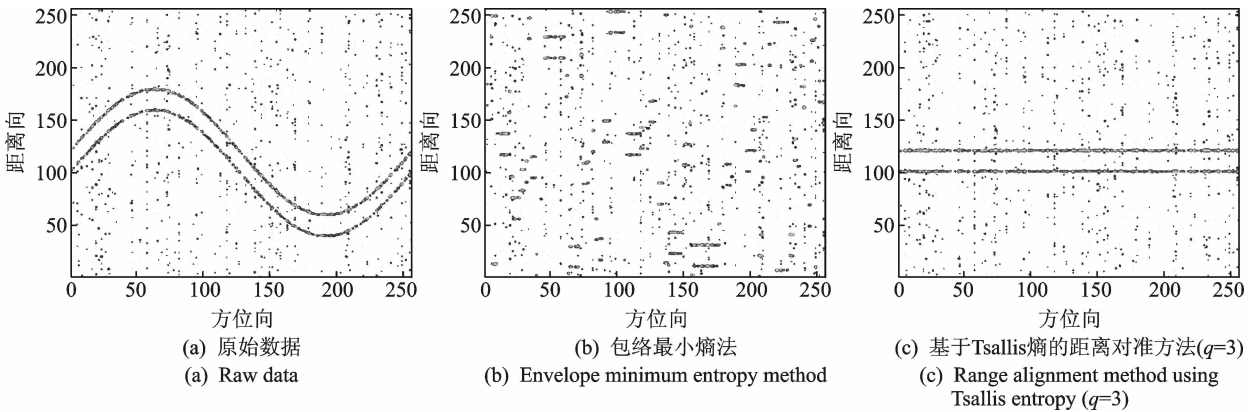


图 3 SNR=-3.4 dB 仿真数据距离对准结果
Fig. 3 Range alignment results of simulation data under SNR=-3.4 dB

3.2 实测数据处理结果

为验证基于 Tsallis 熵的距离对准方法的有效性,应用该方法对飞机 ISAR 实测数据进行处理,并与包络最小熵法作比较。图 4 显示了两组飞机 ISAR 实测数据。图 5,6 分别显示了两组飞机实测数据的距离对准结果。图 5(a),6(a)为包络最小熵法距离对准结果,图 5(b),6(b)为基于 Tsallis 熵的距离对准方法的距离对准结果,从中可以看出,图 5(b)所示的距离对准结果要优于图 5(a)所示的距离对准结果,同样图 6(b)所示

的距离对准结果也优于图 6(a)所示的距离对准结果,尤其是线圈标注的区域,可以更明显的看出基于 Tsallis 熵的距离对准方法要优于包络最小熵法。

继续统一使用相位梯度自聚焦(Phase gradient autofocus,PGA)方法进行相位补偿并成像,然后计算图像的对比度。图 7,8 显示了两组飞机实测数据的成像结果。图 7(a),8(a)为包络最小熵法的成像结果,图 7(b),8(b)为基于 Tsallis 熵的距离对准方法的成像结果,从中可以看出,图 7(b)所

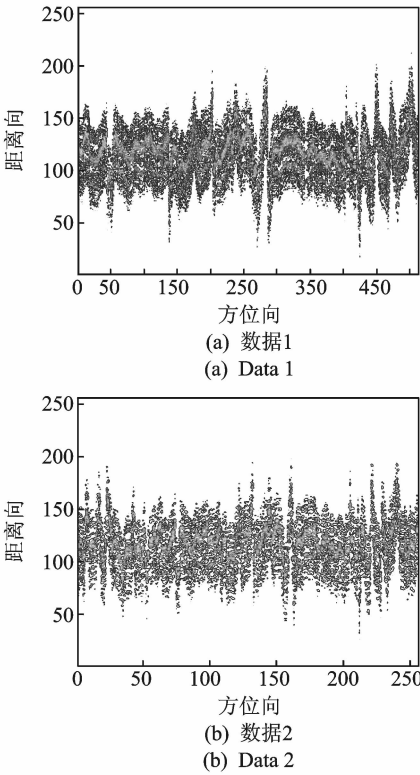


图 4 原始数据
Fig. 4 Raw data

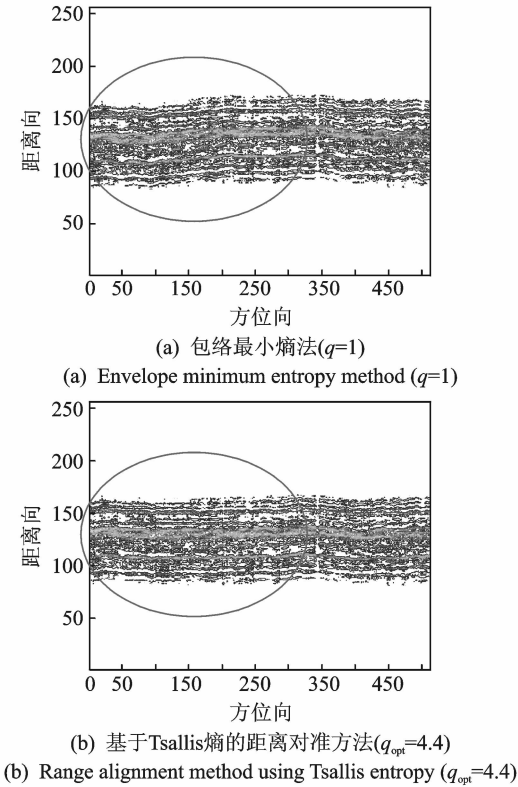


图 5 数据 1 距离对准结果

Fig. 5 Range alignment results of data 1

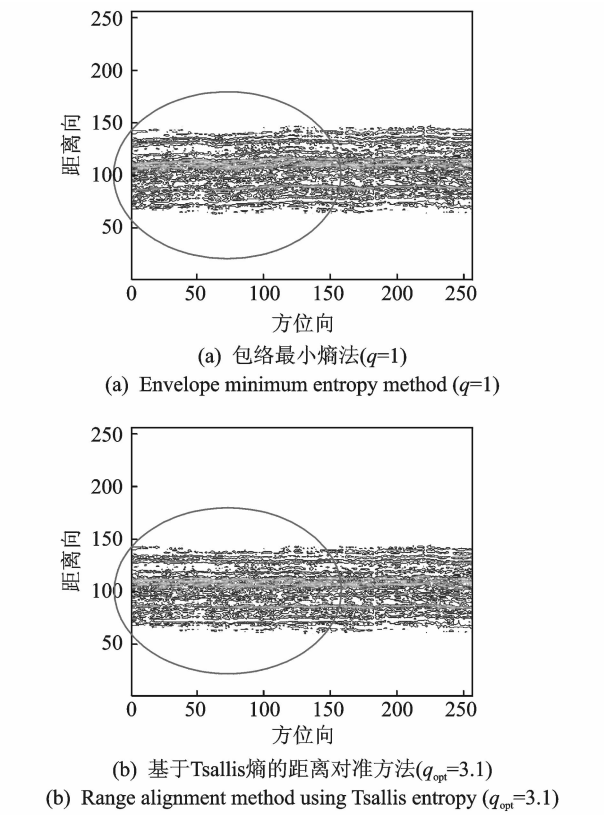


图 6 数据 2 距离对准结果

Fig. 6 Range alignment results of data 2

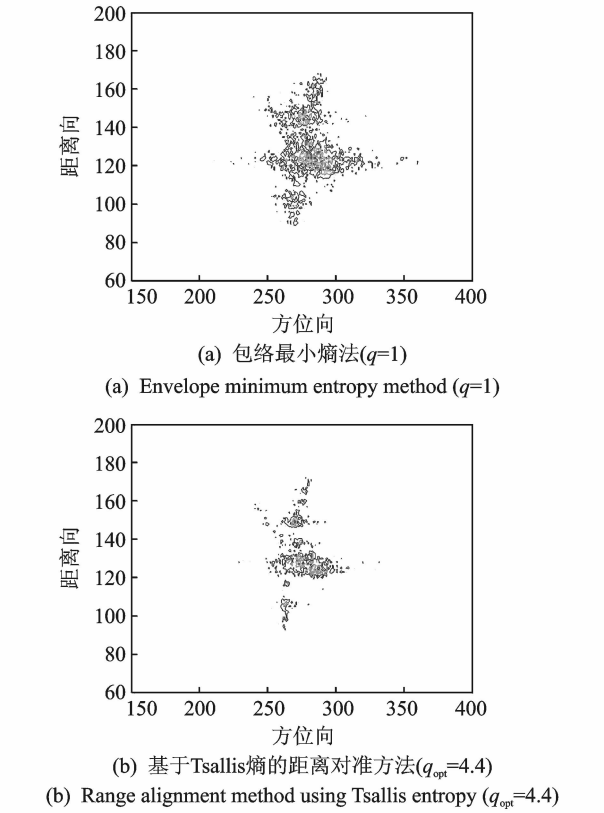


图 7 数据 1 成像结果

Fig. 7 Imaging results of data 1

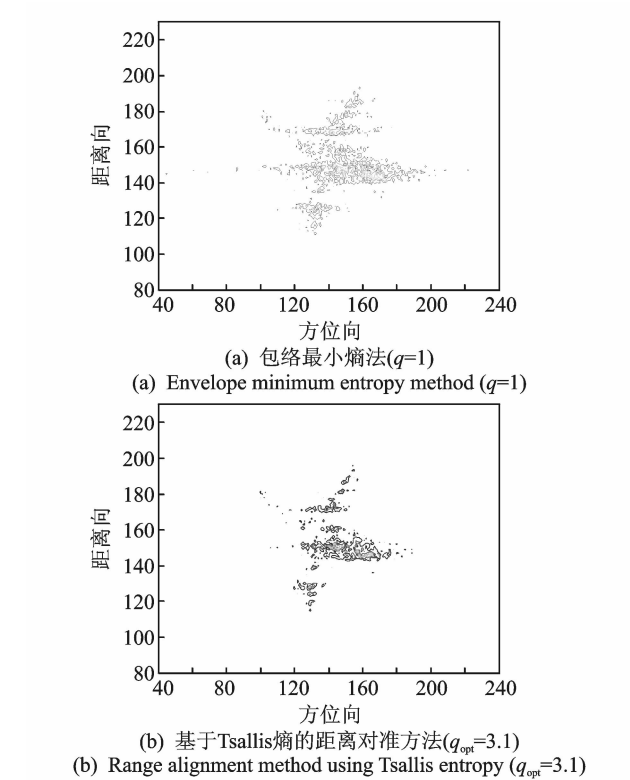


图 8 数据 2 成像结果

Fig. 8 Imaging results of data 2

示的成像结果要优于图 7(a)所示的成像结果,同样图 8(b)所示的成像结果也要优于图 8(a)所示的成像结果。表 1 为相同方法相位补偿后成像的图像对比度。从表 1 也可以看出,使用相同方法 PGA 相位补偿后,基于 Tsallis 熵的距离对准方法成像的图像对比度大于包络最小熵法成像的图像对比度,因此,可以证明,基于 Tsallis 熵的距离对准方法的距离对准效果要优于包络最小熵法的距离对准效果。

从仿真数据和实测数据的处理结果可以看出,基于 Tsallis 熵可以得到比 Shannon 熵更好的距离对准结果,因为 Tsallis 熵是一种非广延熵,是传统广延熵 Shannon 熵的有效推广,通过图像对比度最大准则,可以从 q 的范围中(包含 $q=1$ 时的 Shannon 熵)选择出最优的非广延参数值,因而可以得到最优的图像对比度,进而获得最优的距离对准结果。

表 1 相同方法相位补偿后成像的图像对比度		
Table 1 Image contrast after using the same phase compensation method		
图像对比度	包络最小熵法	基于 Tsallis 熵的距离对准方法
数据 1	1.1011	1.2300
数据 2	1.7334	1.9151

4 结 束 语

本文首先要对回波数据进行距离对准,消除目标与雷达之间相对平动对回波数据在距离向上的影响,将回波数据转化为转台目标数据。本文基于非广延 Tsallis 熵,提出了一种新的距离对准方法,该方法使用性能更加优越的 Tsallis 熵作为距离对准的准则,并通过使成像的图像对比度最大来确定最优的非广延参数 q 的值。本文分析证明了该方法具有良好的抗噪性能,并通过实测数据验证了该方法针对某些实测数据,可以得到比包络最小熵法更好的距离对准效果。

参 考 文 献:

[1] 汪玲. ISAR 运动补偿技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2003.
Wang Ling. Study on ISAR motion compensation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.

[2] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999.
Liu Yongtan. The radar imaging technology [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999.

[3] 王根原,保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法[J]. 电子学报,1998,26(6):5-8.
Wang Genyuan, Bao Zheng. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(6): 5-8.

[4] Zhu D Y, Wang L, Yu Y S. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2):204-208.

[5] 俞翔,朱岱寅. 一种改进型全局最小熵 ISAR 距离对准算法[J]. 数据采集与处理,2012,27(5):535-540.
Yu Xiang, Zhu Daiyin. Improved global minimum entropy range alignment algorithm for ISAR [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(5): 535-540.

[6] 汪玲,朱兆达. 一种基于最大修正峰度的 ISAR 距离对准算法[J]. 南京航空航天大学学报,2006,38(6):722-726.
Wang Ling, Zhu Zhaoda. New range alignment algorithm for ISAR based on maximum modified kurtosis [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(6): 722-726.

[7] 刘斌,张翔,廖文和. 微小卫星雷达隐身性能的在轨逆合成孔径雷达成像验证[J]. 南京航空航天大学学报,2011,43(6):816-820.
Liu Bin, Zhang Xiang, Liao Wenhe. Radar-stealth performance evaluation of minisatel lite by in-orbit in-

verse synthetic aperture radar imaging [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 43(6): 816-820.

[8] 沈明威,孟祥东,朱岱寅. 机载雷达近程杂波高效自适应抑制算法[J]. 南京航空航天大学学报,2013,45(1):88-93.
Shen Mingwei, Meng Xiangdong, Zhu Daiyin. Efficient adaptive algorithm for short-range clutter suppression of airborne radar[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(1): 88-93.

[9] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27:379-423, 623-656.

[10] 刘丽彦. 非广延统计中一些基本问题的研究[D]. 天津:天津大学,2008.
Liu Liyan. Study on some basic problems in nonextensive statistics [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.

[11] Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics[J]. Journal of Statistical Physics, 1988, 52(1):479-487.

[12] 曹克非,王参军. Tsallis 熵与非广延统计力学[J]. 云南大学学报,2005,27(6):514-520.
Cao Kefei, Wang Canjun. Tsallis entropy and nonextensive statistical mechanics [J]. Journal of Yunnan University, 2005, 27(6):514-520.

[13] 欧聪杰. 非广延统计物理中的四个基本问题与广义量子气体的热力学性质[D]. 厦门:厦门大学,2006.
Ou Congjie. Four basic problems in nonextensive statistical physics and the thermodynamic properties of generalized quantum gases [D]. Xiamen: Xiamen University, 2006.

[14] 刘枝朋. 外场作用下相对论气体的非广延参数的物理性质研究[D]. 天津:天津大学,2007.
Liu Zhipeng. The properties of the nonextensive parameter q of relativistic gas under an external electromagnetic field [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

[15] Yanik H C, Yazici B. Mono-static synthetic aperture radar interferometry with arbitrary flight trajectories [J]. SPIE Digital Library, 2012, 8394:1-8.

[16] Nie Xin, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. Fast implementation of convolution backprojection algorithm in spotlight SAR[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 27(4): 333-337.

作者简介:荆腾(1989-),男,硕士研究生,研究方向:逆合成孔径雷达(ISAR)成像,E-mail: jingteng_nuaa@163.com;汪玲(1977-),女,副教授,研究方向:合成孔径雷达(SAR)及逆合成孔径雷达(ISAR)成像,无源雷达目标检测与成像,E-mail: tulip_wling@nuaa.edu.cn。