

# 基于波形评价准则和遗传算法的 ISAR 谱拼接方法

朱 丰<sup>1</sup>, 张 群<sup>1</sup>, 冯有前<sup>2</sup>, 罗 迎<sup>1</sup>, 王 敏<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077;

2. 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:** 阐述了基于距离-多普勒算法的线性调频信号体制逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像原理和间断信号相位补偿原理,在此基础上,针对 ISAR 谱图特性提出了一种利用波形评价准则和遗传算法进行相位近似补偿的谱图拼接处理方法,并进一步利用拼接后的谱图实现最终的 ISAR 成像。仿真实验结果表明,该谱图拼接方法简单易行,且可以明显改善 ISAR 成像效果,具有一定的实用性。

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 谱图; 相位补偿; 波形评价准则; 遗传算法

中图分类号: TN 957

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.10.14

## ISAR spectrogram connection method based on waveform evaluation criterion and genetic algorithm

ZHU Feng<sup>1</sup>, ZHANG Qun<sup>1</sup>, FENG You-qian<sup>2</sup>, LUO Ying<sup>1</sup>, WANG Min<sup>1</sup>

(1. Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Institute of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** The theory of inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging with chirp signals based on range-Doppler algorithm and the principle of phase compensation for intermittent signal connection are analyzed. On the basis of that, aiming at the character of the ISAR spectrogram, a novel method of connecting different spectrograms via compensating phases approximately with waveform evaluation criterion and genetic algorithm is proposed. Furthermore, the final ISAR image can be achieved by using the connected spectrogram. Simulation results show that the proposed method is simple, easy to operate and very practical, and the image effect can be improved by using the proposed method.

**Keywords:** inverse synthetic aperture radar (ISAR); spectrogram; phase compensation; waveform evaluation criterion; genetic algorithm

## 0 引言

逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像技术利用发射信号的大带宽特性获得径向的高分辨率,利用雷达与目标之间的相对运动形成等效的合成阵列,获得方位向的高分辨率<sup>[1-3]</sup>。因此,为获得成像所需的二维高分辨率,雷达发射信号必须具有足够大的带宽,同时目标相对于雷达必须具有足够的累积转角<sup>[4]</sup>。足够大的带宽可利用调频体制信号或者步进频率体制信号来实现,而要获得足够的累积转角则要求雷达探测目标时必须具有一定的成像累积时间。在这累积时间内,很可能出现由于目标机动或其他原因而导致回波数据受损的情况,如何在剔除受损数据段的基础上,利用数据拼接方法将完好的数

据段重新组合<sup>[5]</sup>,获取目标高分辨 ISAR 像是一个具有实际价值的课题。

近年来,有文献研究了利用机会照射源对目标进行识别和成像的技术,如基于多电视台子孔径综合<sup>[4]</sup>和基于直接傅里叶重构与时频分析方法<sup>[6]</sup>。然而当目标转角小时,运用这些方法会使分辨率受到限制;若扩大转角,远离散射中心的散射点会散焦,同时会给运动补偿带来潜在的困难,此外多电视台工作需要很高的成本。文献<sup>[5]</sup>的主要工作是围绕如何利用步进频率体制雷达子孔径合成高分辨的一维距离像而展开的。文献<sup>[7]</sup>借助旋转不变技术估计信号参数的方法,提出一种基于外辐射源的超分辨成像算法,并利用该算法估计散射点的位置和散射强度<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>的主要思想是在子孔径融合处理中,进行子孔径外

收稿日期:2010-05-14; 修回日期:2011-05-04。

基金项目:国家自然科学基金(60971100);空军工程大学电讯工程学院科研创新基金(DYCX1017)资助课题

作者简介:朱丰(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为雷达成像与信号处理。E-mail:zhufeng83@gmail.com

推,利用已知子孔径得到功率谱估计,将估计得到的功率谱作为子孔径所具有的先验频率分布信息,在此条件约束下利用子孔径进行加权范数最小化来填补空缺数据。本文从另一个角度出发,与谱缺失算法,如谱插值、谱预测、谱外推等方法的思路不同,不需要子孔径外推和估计算法,也无需利用多电视台工作,仅在单站 ISAR 中实现有效谱图数据的综合处理。本文提出在进行基于距离-多普勒算法的成像过程中,实施以最优波形评价准则为目标函数<sup>[10]</sup>,并利用遗传算法<sup>[11]</sup>来进行相位补偿的 ISAR 谱图拼接处理方法,该方法简单易行,在保持成像所需分辨率的前提下,较好地改善了成像质量。

### 1 线性调频信号 ISAR 成像原理

假设雷达和目标的成像几何关系如图 1 所示。图 1 中,雷达固定在  $(X, Y)$  坐标系统原点  $O$  位置;假设目标有  $K$  个散射点,  $Q_1, \dots, Q_K$ ;  $P$  为参考点;  $(x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k)$  分别为散射点  $Q_1, \dots, Q_k$  相对于参考点  $P$  的坐标,目标运动方向平行于  $Y$  轴,运动速度为  $v$ 。

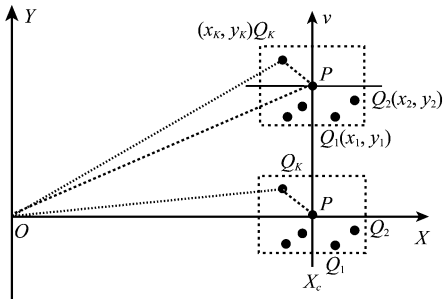


图 1 雷达和目标之间的几何关系图

雷达发射的线性调频信号可写为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (1)$$

式中,  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形窗函数;  $f_c$  是载频;  $T_p$  是脉冲宽度;  $\mu$  是调频率。通过相关处理可获得一维距离像<sup>[12]</sup>,即

$$S_c(f, \tau) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \cdot T_p \cdot \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c} \cdot x_k\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c} \cdot R_{k\Delta}(\tau)\right) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_k$  为第  $k$  个散射点的反射系数;

$$R_{k\Delta}(\tau) = \sqrt{(X_c + x_k)^2 + (v\tau + y_k)^2} - \sqrt{X_c^2 + (v\tau)^2} \approx \frac{X_c x_k + v\tau y_k}{X_c} \quad (3)$$

对  $S_c(f, \tau)$  取模值,  $|S_c(f, \tau)|$  即为距离(频率)-慢时间谱图,式(2)可写为

$$S_c(f, \tau) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \cdot T_p \cdot \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c} \cdot x_k\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c X_c} \cdot v y_k \cdot \tau\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c} \cdot x_k\right) \quad (4)$$

作关于慢时间  $\tau$  的傅里叶变换,得

$$S(f, f_\tau) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \cdot T_p \cdot \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c} \cdot x_k\right)\right) \cdot$$

$$\text{sinc}\left(f_\tau + \frac{2v f_c}{c X_c} \cdot y_k\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c} \cdot x_k\right) \quad (5)$$

$|S(f, f_\tau)|$  的峰值出现在  $(-2\mu \cdot x_1/c, -2v f_c \cdot y_1/c X_c), \dots, (-2\mu \cdot x_k/c, -2v f_c \cdot y_k/c X_c)$ , 这与  $(x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k)$  成正比例。通过简单换算,即可得到目标的 ISAR 像。在  $|S(f, f_\tau)|$  中固定的  $f$ , 即得到横向距离像  $|S(f_\tau)|$ , 通过简单换算,即可将  $f_\tau$  变换到横向距离上。

综上所述可以看出  $|S_c(f, \tau)|$  是一个二元函数,将其写成矩阵形式可知,  $|S_c(f, \tau)|$  的列向量是关于频率  $f$  的一元函数,对频率  $f$  作线性变换即可转化为距离,因此  $|S_c(f, \tau)|$  是由不同慢时间  $\tau$  的各个一维距离像排列而成的;  $|S_c(f, \tau)|$  的行向量是关于慢时间  $\tau$  的一元函数,即由在不同距离单元的各个慢时间函数排列而成的,同时  $|S_c(f, \tau)|$  的行向量是连续的多频信号,其频率个数对应于在该距离单元上的散射点个数。

在 ISAR 成像过程中,很可能会发生谱图数据受损或者丢失的情况。在这种情况下,如果将不同部分的有效谱图拼接起来,由于  $|S_c(f, \tau)|$  行向量信号的连续性,因此会产生相位突变,需要进一步的相位补偿。由于二维 ISAR 像是 ISAR 谱经过作关于慢时间的傅里叶变换而得到的,因此,补偿拼接间断 ISAR 谱的原理与下一节中所阐述的间断信号相位补偿原理是一致的。具体分析将在下一节展开。

### 2 间断信号相位补偿原理分析

如果一个连续信号波形中某段或某几段时间内的信号波形无法获得,当将其余部分拼接起来构成一个非连续信号时,必然会产生相位突变,从而使得该信号频谱图的波峰会降低和展宽,故需要进行相位补偿。下面通过理论和仿真两个层面来分析其相位补偿原理。

假设原始信号为多个单频信号(频率个数为  $N$ )的线性叠加。表达式可写为

$$u_0 = u_1 + u_2 + \dots + u_n \quad (6)$$

式中,  $u_1 = \exp(j2\pi f_1 t), u_2 = \exp(j2\pi f_2 t), \dots, u_n = \exp(j2\pi f_n t)$ 。假设  $\Delta t$  时间段内的信息缺失,则缺少的数据为

$$\Delta u = \exp(j2\pi f_1 \Delta t) + \exp(j2\pi f_2 \Delta t) + \dots + \exp(j2\pi f_n \Delta t) \quad (7)$$

若将后续信号进行补偿,对于  $u_1$  需要补偿的相位为

$$\Delta \Psi_1 = 2\pi f_1 \Delta t \pm N_1 \cdot 2\pi, N_1 \in \mathbf{Z} \quad (8)$$

对于  $u_2$  需要补偿的相位为

$$\Delta \Psi_2 = 2\pi f_2 \Delta t \pm N_2 \cdot 2\pi, N_2 \in \mathbf{Z} \quad (9)$$

以此类推,对于  $u_n$  需要补偿的相位为

$$\Delta \Psi_n = 2\pi f_n \Delta t \pm N_n \cdot 2\pi, N_n \in \mathbf{Z} \quad (10)$$

只有当以上公式全部满足时,才能做到乘以一个补偿因子即可实现相位精确补偿。其中,特例为当  $N=1$  时,即为单频信号,可实现相位精确补偿。而对于难以做到相位精确补偿的间断多频信号,需要寻求相位近似补偿方法。

近似补偿需要利用波形评价函数来衡量补偿的优劣,可利用波形熵作为相位补偿中的波形评价函数,如离散信号的波形熵<sup>[10,13]</sup>等。

**定义 1** 设某一离散信号波形为  $f(n), n=0, 1, 2, \dots, M-1$ , 该信号的波形熵为

$$E_s = - \sum_{n=0}^{M-1} p_n \cdot \lg p_n \quad (11)$$

式中

$$p_n = \frac{|f(n)|}{\|F\|}, \quad \|F\| = \sum_{n=0}^{M-1} |f(n)| \quad (12)$$

以对补偿后信号作傅里叶变换得到的波形为目标函数,使其波形熵值达到最小,即完成了最优相位补偿。下面以两个单频信号线性叠加的间断信号形式为例,结合仿真分析基于最小波形熵准则的相位近似补偿原理,如图 2 所示,原始信号表达式可写为

$$u'_0 = u_1 + u_2 \quad (13)$$

式中,  $u_1 = \exp(j2\pi f_1 t)$ ,  $f_1 = 50$  Hz,  $u_2 = \exp(j2\pi f_2 t)$ ,  $f_2 = 70$  Hz, 缺失时间段  $\Delta t = 0.05$  s。

将后续信号直接与前段信号相拼接后的结果如图 2(c) 所示,从图中可以明显看出由相位突变引起的波形突变。对其作傅里叶变换,得到的频谱图如图 2(d) 所示,与图 2(b) 相比,波峰明显展宽,峰值降低,而且出现了幅度较大的旁瓣。利用基于最小波形熵准则的相位近似补偿方法进行补偿后,获得的波形结果如图 2(e) 所示,对其作傅里叶变换,得到频谱图如图 2(f) 所示。与图 2(d) 相比,图 2(f) 中的波峰明显更尖锐,旁瓣也明显降低,但却达不到图 2(b) 的程度。

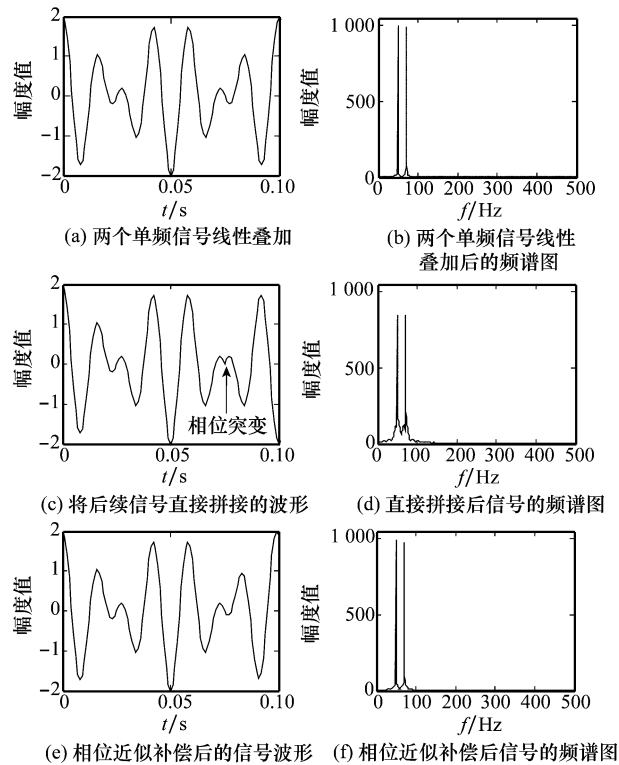


图 2 拼接间断多频信号时利用相位近似补偿结果图

### 3 基于遗传算法的 ISAR 谱拼接方法

基于以上分析,在 ISAR 成像时的有效谱图拼接过程中,如果直接将后续有效谱图与前段相拼接,就必须进行相

位补偿处理,而且只有选择了合适的补偿相位,使距离-多普勒平面上方位向信号波形熵值达到最小,才能获得相对最好的聚焦效果。因此,可以将基于波形评价准则的间断信号相位补偿方法引入到 ISAR 谱图拼接处理过程中,以实现有效的相位补偿处理。本文方法具体步骤如下:

**步骤 1** 在 ISAR 成像过程中,对于  $S_c(f, \tau)$ ,不妨令  $f = f_i$ ,  $f_i$  为  $S_c(f, \tau)$  矩阵中每行的离散频率,其中  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为  $S_c(f, \tau)$  矩阵的行数,则  $S_c(f, \tau)$  可以写为  $S_c(f_i, \tau)$ 。假设  $S_c(f_i, \tau)$  包括  $D$  部分信息完整的谱图,将其写为  $S_{cd}(f_i, \tau_d)$ ,其中  $d = 1, 2, \dots, D$ ,  $\tau_d$  为第  $d$  段有效谱图对应的慢时间长度;

**步骤 2** 选择  $S_{cd^*}(f_i, \tau_{d^*})$ ,其中  $\tau_{d^*} = \max(\tau_d)$ ,  $d = 1, 2, \dots, D$ ;

**步骤 3** 将  $S_{cd^*}(f_i, \tau_{d^*})$  和  $S_{cd}(f_i, \tau_d) \cdot \exp(j\theta_{i,d})$  拼接起来,其中  $\theta_{i,d} \in [0, 2\pi]$ ,  $d = 1, 2, \dots, D$  且  $d \neq d^*$ 。其结果记为  $\tilde{S}_c(f_i, \tau')$ ;

**步骤 4** 对  $\tilde{S}_c(f_i, \tau')$  作慢时间  $\tau'$  的傅里叶变换,结果记为  $\tilde{S}(f_i, f'_i)$ ;

**步骤 5** 对  $\tilde{S}(f_i, f'_i)$  的每一行计算其波形熵值;

**步骤 6** 重复步骤 3~步骤 5,直到搜索到  $\tilde{S}_c(f_i, \tau')$  的每一行对应的相位值  $\theta_{i,d}^*$ ,其中  $d = 1, 2, \dots, D$  且  $d \neq d^*$ ,使得拼接  $S_{cd^*}(f_i, \tau_{d^*})$  和  $S_{cd}(f_i, \tau_d) \cdot \exp(j\theta_{i,d}^*)$  并作慢时间  $\tau'$  的傅里叶变换后的每一行波形熵值最小;

**步骤 7** 记  $\theta_{i,d}^*$  为最佳补偿相位,利用  $\theta_{i,d}^*$  进行补偿,得到结果记为  $S_c^*(f_i, \tau')$ ;

**步骤 8** 对  $S_c^*(f_i, \tau')$  作慢时间  $\tau'$  的傅里叶变换,其结果为最终 ISAR 像。

需要说明的是:在步骤 2 里,选择了所有有效谱图中最长的一段作为其余谱图拼接的基准。这是因为,作为基准的这段有效谱图不需要进行相位补偿,而相位补偿本身是一个近似过程,所以为得到补偿后最好的 ISAR 像,应选择最长的有效谱图作为基准。

在步骤 6 中,为减少搜索量、提高效率,我们利用遗传算法来搜索  $S_{cd}''(f_i, \tau_d)$  矩阵中每一行的最佳补偿相位  $\theta_{i,d}^*$ 。将  $\theta_{i,d}$  作为输入变量,在取值区间  $[0, 2\pi]$  内随机取值。然后,按照遗传算法原理,将其进行编码、复制、选择、交叉和变异等处理。将  $\tilde{S}(f_i, f'_i)$  每一行的波形熵值作为目标函数。以 MAXGEN 次迭代后获得的波形熵最小值对应的补偿相位作为最佳补偿相位,完成 ISAR 谱图的拼接。

### 4 计算机仿真实验

假设点目标模型如图 3 所示。设雷达载频  $f_c = 10$  GHz,发射脉宽  $T_p = 1$   $\mu$ s,带宽  $B = 300$  MHz 的线性调频信号,距离分辨率  $\Delta_R = 0.5$  m。目标距雷达 10 km,脉冲重复频率 (pulse repetition frequency, PRF) PRF = 256 Hz。目标速度  $v = 50$  m/s。图 4 给出了成像时间为 6 s,即横向距离分辨率  $\Delta_c = 0.5$  m,且在成像过程中无任何缺失信息的 ISAR 像。

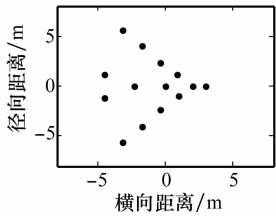


图 3 点目标模型

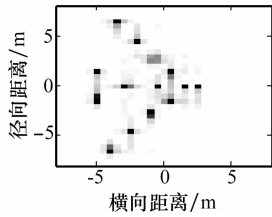


图 4 完整 ISAR 像

如果成像积累时间 8 s,其中 2 s 缺失回波信息,有效数据对应的横向距离分辨率仍为  $\Delta_c = 0.5$  m,其距离-慢时间谱图和对该谱图直接进行 ISAR 成像的结果分别如图 5(a)和图 5(b)所示。图 6(a)给出了 5(a)中前 6 s 的谱图,利用该谱图进行处理得到的 ISAR 成像结果如图 6(b)所示。从图 5(b)和图 6(b)中可以看出,ISAR 像的旁瓣较高,成像结果较差。将图 5(a)中后续有效谱图直接拼接得到的谱图如图 7(a)所示,从图 7(a)中可以看出谱图不连续,存在明显相位突变。利用图 7(a)中的谱图进行 ISAR 成像,结果如图 7(b)所示,可以看出成像结果仍然难以令人满意。

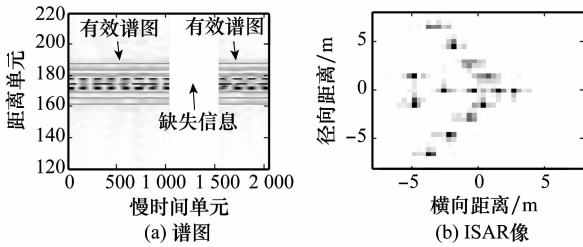


图 5 成像时间 8 s 有缺失信息的处理结果

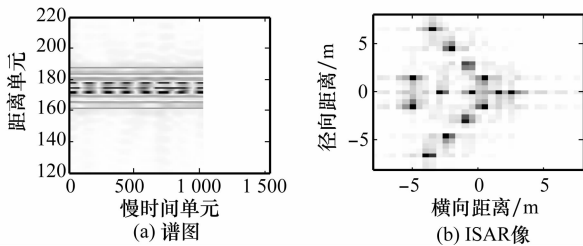


图 6 成像时间为 6 s 有缺失信息的处理结果

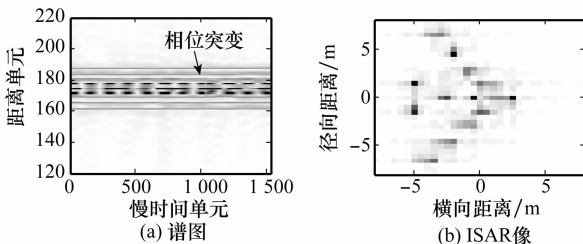


图 7 直接进行有效谱图拼接的 ISAR 成像图

利用遗传算法对每个距离单元搜索最佳补偿相位  $\theta_i^*$ 。参数设定如下:种群中个体数为 40,每个染色体由 20 位二进制数组成,十进制的取值区间为  $[0, 2\pi]$ ,适应度函数的选择压差为  $[0, 2]$ ,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.05,代沟  $GGAP = 0.9$ ,最大遗传代数  $MAXGEN = 50$ 。各个距离单元的补偿相位随迭代次数增加而逐渐趋于某个相位值,以

第  $MAXGEN$  次迭代选取的相位值为最佳补偿相位,可以搜索到各个距离单元所对应的最佳补偿相位如图 8(a)所示。为了更好地比较结果,图 8(b)给出了不利用遗传算法,将取值区间  $[0, 2\pi]$  等分成 1 000 份后进行遍历搜索的结果。比较图 8(a)和图 8(b)可以看出,结果几乎一致,这也证明了遗传算法的有效性。图 9 给出了搜索第 1 个距离单元所对应最佳补偿相位的迭代曲线图。为了更好地证明利用遗传算法的有效性,利用一台笔记本电脑(机器配置如下:主频为 Intel Pentium M 1.60 GHz,L2 Cache 为 2 MB,内存为 1 GB)对不同方法分别进行计时实验,得到的结果是:利用遗传算法搜索所有的最佳补偿相位仅需要 14 744 s,而如果利用遍历搜索方法需要 78 621 s,充分表明了利用遗传算法可以大大减少搜索量和计算量。

图 10 给出了经过相位补偿后的 ISAR 成像图。从图 10 中可以看出,ISAR 像的散射点聚焦效果有了明显改善。

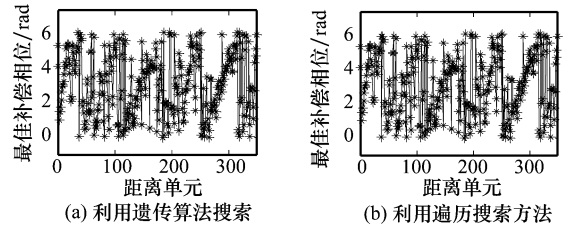


图 8 各距离单元对应的最佳补偿相位

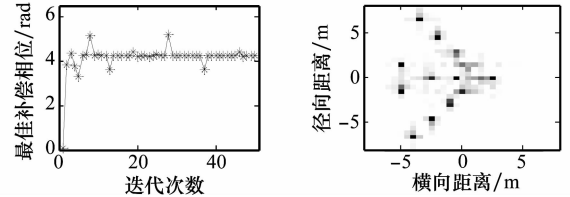


图 9 第 1 距离单元对应最佳补偿相位迭代曲线

图 10 相位补偿后成像

下面,利用图像对比度准则<sup>[14]</sup>将几个成像结果进行定量分析比较。

从表 1 中可以看出,相位补偿后的 ISAR 像(见图 10)的图像对比度值明显比图 7(b)和图 6(b)大,说明图 10 的成像质量有了显著改善,虽然图 10 中 ISAR 像达不到图 4 的效果,但已可以证明本文方法的有效性。

表 1 不同 ISAR 图像对比度值

图序	ISAR 图像对比度值
图 4	133.342 7
图 6(b)	104.940 7
图 7(b)	110.308 0
图 10	128.206 1

进一步,讨论缺失数据长度对本文方法的影响。设雷达参数不变,有效数据长度仍为 6 s 的条件下,缺失数据长度分别为 1 s、2 s、6 s、12 s 的仿真结果如图 11(a)~图 11(d)及表 2 所示。从图 11 和表 2 中可以看出,随着缺失数据长度的增加,通过补偿拼接获得的 ISAR 谱误差值越来越大,ISAR 像效果越来越差,ISAR 像对比度值也越来越低。当缺失数据长度为 12 s 时,通过补偿拼接获得的 ISAR 像对比度

值与缺失数据长度为 2 s 时未经补偿直接拼接后获得的 ISAR 像(见图 7(b))对比度值相当。因此,缺失数据长度不应超过有效数据长度的两倍。

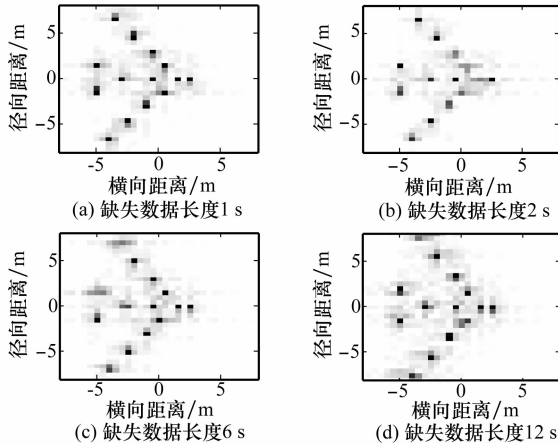


图 11 不同缺失数据长度条件下仿真结果图

表 2 不同缺失数据长度时 ISAR 图像对比度值比较

数据	ISAR 像对比度值
缺失数据长度 1 s	131.539 3
缺失数据长度 2 s	128.206 1
缺失数据长度 6 s	125.475 2
缺失数据长度 12 s	113.801 1

此外,在不同信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)条件下继续展开相关仿真实验,设雷达参数不变,缺失数据均为 2 s,其仿真结果如图 12(a)~图 12(d)所示。从图 12 中可以看出,随着信噪比的降低,通过补偿拼接获得的 ISAR 像效果越来越差,当信噪比降低到  $-10$  dB 时,ISAR 像的聚焦效果难以令人满意。因此,利用本文方法进行补偿拼接时,信噪比不应低于  $-10$  dB。

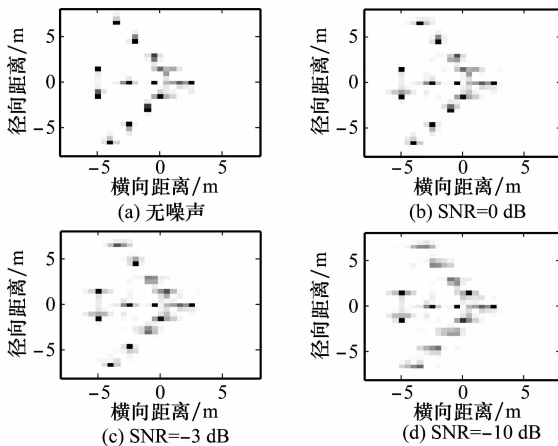


图 12 不同信噪比条件下仿真结果图

## 5 结 论

本文首先阐述了线性调频信号 ISAR 成像原理,其次结合仿真着重研究了拼接间断信号时的相位补偿问题,并提出了一种基于最小波形熵准则的相位近似补偿方法。在

此基础上,提出了基于该原理的 ISAR 谱图补偿拼接处理方法,并且进一步利用遗传算法来搜索最佳补偿相位以减少运算量提高效率。该方法简单有效,具有一定的实用性。仿真结果不仅证明了本文方法的有效性,而且表明本文方法是比较鲁棒的。

## 参 考 文 献:

- [1] Xing M, Wu R, Li Y, et al. New ISAR imaging algorithm based on modified Wigner-Ville distribution[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(1): 70 - 80.
- [2] Ma C, Yeo T, Tan H, et al. Three-dimensional ISAR imaging using a two-dimensional sparse antenna array[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 378 - 382.
- [3] Bao Z, Wang G, Luo L. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(5): 1582 - 1588.
- [4] 张馨文, 王俊. 基于多电视台子孔径综合的无源雷达成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(3): 528 - 531. (Zhang X W, Wang J. Passive radar imaging algorithm based on sub-apertures synthesis of multiple television stations[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 528 - 531).
- [5] 张云华, 李海滨, 伍捷. 步进频率线性调频脉冲信号的子孔径处理方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(1): 1 - 6. (Zhang Y H, Li H B, Wu J. Sub aperture processing method for stepped-frequency chirp signal[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(1): 1 - 6).
- [6] Wu Y. Investigation of passive radar imaging using Wigner-Ville distribution [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2001.
- [7] 李岩, 王俊, 张守宏. 基于外辐射源的 ESPRIT 超分辨率成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(1): 143 - 146. (Li Y, Wang J, Zhang S H. ESPRIT Super-resolution imaging algorithm based on external illuminators[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 143 - 146).
- [8] Quinquis A, Radoi E, Totif F. Some radar imagery results using superresolution techniques[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2004, 52(5): 1230 - 1244.
- [9] 王琦, 李亚超, 邢孟道, 等. 多视角 ISAR 成像研究[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 34(2): 165 - 169. (Wang Q, Li Y C, Xing M D, et al. A study of ISAR imaging of spatial diversity angles[J]. *Journal of Xidian University*, 2007, 34(2): 165 - 169).
- [10] Jeong H, Kim H, Kim K. Application of subarray averaging and entropy minimization algorithm to stepped frequency ISAR autofocus[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2008, 56(4): 1144 - 1154.
- [11] Solteiro P E, Tenreiro M J, Moura O P. Dynamical modelling of a genetic algorithm[J]. *Signal Processing*, 2006, 86(10): 2760 - 2770.
- [12] Zhang Q, Yeo T, Tan H, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the hough transform [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291 - 299.
- [13] Liu Z, Zhang S. A novel method of translational motion compensation for hopped-frequency ISAR imaging [C]// *Proc. of the IEEE International Radar Conference*, 2000: 255 - 260.
- [14] Fabrizio, Berizzi, Giovanni C, et al. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(3): 1185 - 1191.