

基于外推的 SAR 图像分辨率增强算法

董臻, 朱国富, 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 提高合成孔径雷达(SAR)图像的分辨率对自动目标识别等具有重要意义. 本文通过对图像的二维频谱进行外推, 扩展了 SAR 系统的等效带宽以达到提高图像分辨率的目的. 文中给出了实现外推算法的详尽步骤并进行了仿真验证, 仿真结果证实了算法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 谱估计; 外推; FFT; Levinson 算法

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 03-0359-04

Enhancing the Resolution of SAR Image by Extrapolation

DONG Zhen, ZHU Guo-fu, LIANG Dian-nong

(College of Electric Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Enhancing the resolution of SAR image can improve ATR significantly. An extrapolation algorithm is used to expand the 2-D bandwidth of the detailed image to enhance the resolution and the implementation steps are discussed in detail in this paper. The simulation results proves its validity.

Key words: SAR; spectral estimation; extrapolation; iterative; FFT; Levinson algorithm

1 引言

提高合成孔径雷达(SAR)图像的分辨率一直是 SAR 信号处理孜孜以求的目标. 之所以出现这个问题, 是因为许多 SAR 成像算法, 如 $-k$ 、Chirp-Scaling 等算法, 在成像过程中通过插值或近似将回波信号变换至空间频率域, 然后利用 FFT 获得图像(下文称之为傅立叶图像). FFT 最大的优点是运算量小, 但傅立叶图像冲激响应高旁瓣的固有缺点也很明显, 虽然通过加窗可以有效降低旁瓣, 可这需付出展宽主瓣的代价. 近年来, “超分辨成像”日益引起关注^[1,2]. 所谓“超分辨成像”, 是指用现代谱估计技术取代 FFT 处理空间频率域信号以获得低旁瓣、窄主瓣的冲激响应, 提高图像质量. “超分辨成像”处理的对象通常是对傅立叶图像初步解译后获得的“焦点地区”, 因为处理整幅图像的计算量是惊人的. 但是“超分辨成像”的名字容易让人将这种处理技术与诸如 $-k$ 、Chirp-Scaling 等 SAR 成像算法并列, 因此称之为“分辨率增强”技术更宜. 文献[1]讨论了如何利用自适应旁瓣抑制(ASR)、最小方差法(MVM)、自回归模型(AR)等现代谱估计技术来增强 SAR 图像分辨率, 可视之为该项研究前一阶段发展的总结, 其中绝大部分谱估计方法的原理均可见文献[3]. 作为补充, 本文利用信号外推技术增强 SAR 图像分辨率, 该算法在提高分辨率的同时又保持了信号的相位, 所以更加有利于目标识别之类的应用.

本文第二部分分析了 SAR 图像二维频谱的特点, 指出 SAR 系统受雷达发射信号与天线波束角所限, 是二维带通系统; 第三部分讨论了一种由信号时域、频域能量分布先验信息指导的最小范数外推算法, 并根据 SAR 图像分辨率增强处理的特点将之适当修正, 设计出一种迭代算法; 第四部分对算法的有效性进行了仿真验证; 最后总结了本文的研究工作. 如无特别声明, 本文中的 SAR 均指正侧视机载 SAR.

2 SAR 图像二维频谱的特点

图 1 表示正侧视 SAR 的两种模型:

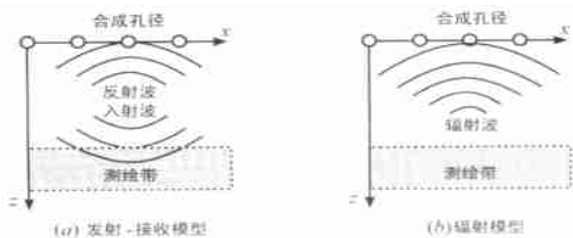


图 1 正侧视 SAR 的两种模型

图 1(a) 所示为实际工作模型, 雷达发射电磁波, 经测绘带反射之后以光速返回天线, 实际中忽略了电磁波传播期间载机运动导致的收发位置差, 即雷达收发同位; 图 1(b) 所示模型中, 目标以速度 $c/2$ 辐射电磁波并被雷达接收. 文献[4]指出, 图 1(a) 与图 1(b) 所示的两种模型可视作等价.

辐射模型中,传播信号 $s(x, z, t)$, 其傅立叶变换为 $S(k_x, k_z)$, 则:

$$s(x, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint S(k_x, k_z) \exp(jk_x x + jk_z z + j\omega t) \cdot dk_x dk_z d\omega \quad (1)$$

可见任何信号 $s(x, z, t)$ 均可分解为平面波的叠加. (k_x, k_z) 是 SAR 图像的频域, 在辐射模型中称为波数域, 是频率域. 对于图 2(a) 所示入射角为 θ , 传播速度为 $c/2$, 频率为 ω 的平面波, 其波数-频率域 (k_x, k_z) 各分量之间存在关系:

$$k_x = \frac{2\omega}{c} \sin \theta; k_z = \frac{2\omega}{c} \cos \theta \quad (2)$$

发射-接收模型中, 如果雷达波束张角为 θ , 那么, 等价的辐射模型中目标辐射波的波束张角亦为 θ . 又设信号频带范围: $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$, 由式(2)知 SAR 图像的频域支撑区形状如图 2(b) 阴影部分所示:

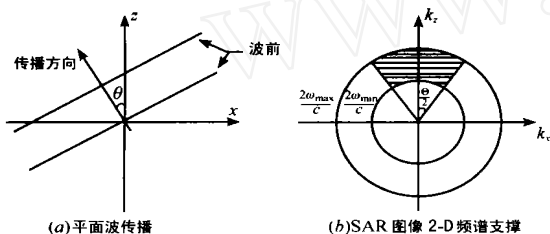


图 2 SAR 图像的频域支撑区

可见从滤波的观点看, SAR 系统是由以下的极坐标函数定义的二维带通滤波器:

$$F(r, \theta) = \begin{cases} 1, & r \in (\frac{2\omega_{\min}}{c}, \frac{2\omega_{\max}}{c}), \theta \in (\frac{\theta_{\min}}{2}, \frac{\theta_{\max}}{2}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

理想点目标的傅立叶图像正是此带通滤波器的冲激响应. 为了提高分辨率, 可以通过外推扩大滤波器的通带以改善冲激响应.

3 外推算法及其实现

3.1 一维情况

当已知信号在时域、频域的能量分布特点, L C Potter 提出的最小范数外推算法^[5]使此前的许多外推算法成为该算法的某种特例. 本节对 Potter 的算法作了近似, 使解更加简洁.

已知 L 维向量 x , 它与 N 维向量 y 之间满足:

$$y_{m_l} = x_l \quad \text{即} \quad T \cdot y = x \quad (4)$$

式中 T 是 $L \times N (L < N)$ 维采样矩阵, T 的第 l 行向量中只有第 m_l 个元素等于 1, 其余为零. 显然, 方程(4)欠定, 有无数解. 为了获得惟一解, 需加限制^[5]:

$$\text{最小化} \quad \phi = \sum_{n=0}^{N-1} q_n |y_n|^2 + \sum_{k=0}^{N-1} P_k |Y_k|^2 \quad (5)$$

式中 Y_k 是 y 的离散傅立叶变换 Y 的第 k 个元素, q_n, P_k 分别是时域、频域的非负系数. 显然 q_n, P_k 的值越大, 最小化准则使得相应 y_n, Y_k 处的能量越受到抑制. 因此可以根据先验信息适当选择系数指导最小化过程. 如果 y 是已知通带范

围的带限信号, 只需令通带内的 P_k 值不大于 1, 通带外的 P_k 值远远大于 1, 就能获得近似带限信号解. 将式(4)用矩阵表示:

$$\text{最小化} \quad \phi = y^H (Q + P) y \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} Q = \text{diag}(q_0, q_1, \dots, q_{N-1}) \\ P_{i,j} = p_{(i-j) \bmod N}, i, j = 0, 1, \dots, N-1 \\ p = \text{IDFT}(P) \end{cases} \quad (7)$$

IDFT 表示逆离散傅立叶变换. 矩阵 P 是由向量 p 决定的循环矩阵, 其特征值是向量 P 的元素. 容易证明矩阵 $Q + P$ 是半正定矩阵. 至此, 外推问题已经转化为由式(4)与(5)表述的最小化问题, 其解为:

$$\hat{y} = (Q + P)^+ \cdot T^H \cdot (T \cdot (Q + P)^+ \cdot T^H)^{-1} \cdot x \quad (8)$$

式中上标“+”表示矩阵的伪逆. 当无法获知信号的时域能量分布时(如本文的应用场合), 可将矩阵 Q 置为零阵, 只考虑频域加权. 根据权系数在最小化过程中的作用, 使频域权系数与信号功率谱成反比是合理的. 若信号功率谱为 $|H(k)|^2$, 定义矩阵 S 和频域权系数 P_k :

$$\begin{cases} S_{i,j} = h_{(i-j) \bmod N}, i, j = 0, 1, \dots, N-1 \\ \bar{h} = \text{IDFT}(|H|^2) \\ P_k = |H_k|^{-2}, \text{ if } |H_k|^2 > 0 \\ P_k = 0, \text{ if } |H_k|^2 = 0 \end{cases}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

于是式(8)可写为:

$$\hat{y} = S \cdot T^H \cdot (T \cdot S \cdot T^H)^{-1} \cdot x \quad (11)$$

易证 S 是 Hermitian Toeplitz 矩阵, 同时只有当信号仅由 p ($p \leq N-1$) 个正弦信号组成时, S 才是半正定的, 任何噪声的加入都会赋予 S 以正定性^[3], 因此可视 S 为正定. 这些性质带来的益处将在下文提及.

实际情况中, 常常无法得到信号功率谱的先验信息. 这时, 一个自然的思路是: 设计一种迭代算法, 信号功率谱的初值根据信号的已知部分获得; 在迭代过程中, 信号功率谱由上一次迭代解获得并以此之求本次迭代解; 当相邻两次迭代解之间的差异小于某个阈值或迭代次数达到最大时, 终止迭代, 最后一次迭代解作为结果. 类似的思路也在其它信号处理问题中体现, 如 SAR 运动补偿的 PGA 算法^[6]、谱估计的 Clean 算法^[7]等. 本文的迭代算法分以下步骤进行:

(1) 计算功率谱 $|H|^2$, 下标“ n ”表示第 n 步迭代. 本文采取加窗周期图谱估计^[3], 记数据窗为 N 点序列 w :

$$|H|^2 = \begin{cases} |\text{DFT}(\hat{y}_0)|^2, & \text{if } n = 1 \\ |\text{DFT}(w \cdot y_{-1})|^2, & \text{if } n > 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中符号“ \cdot ”表示矢量点乘, 初值 \hat{y}_0 定义为:

$$\hat{y}_{0n} = \begin{cases} x_n, & \text{if } n \in \{m_0, m_1, \dots, m_{L-1}\} \\ 0, & \text{if } n \notin \{m_0, m_1, \dots, m_{L-1}\} \end{cases}, n = 0, 1, \dots, N \quad (13)$$

由 $|H|^2$ 可求得 \bar{h} , S . 以上均可利用 FFT 实现.

(2) 计算 $\bar{y} = (G)^{-1} \cdot x$, 其中 $G = T \cdot S \cdot T^H$:

$$G_{(i,j)} = h_{((m_i - m_j) \bmod N)}, i, j = 0, 1, \dots, L-1 \quad (14)$$

显然, G 是 Hermitian 矩阵. 当 x 在 y 中呈连续排列时, G 是 S 的 L 阶主子式, 继承了 S 的正定性和 Toeplitz 特性. 这时, 可以利用 Levinson 算法解线性方程组^[3]:

$$G \cdot b = x \tag{15}$$

计算量只有 $O(L^2)$.

(3) 计算 $\hat{y} = S^{-1} \cdot T^H \cdot b$. 令:

$$c = T^H \cdot b \tag{16}$$

则 y 可以利用 FFT 求得:

$$y = \text{IDFT}(\overline{\text{DFT}(c)}) \tag{17}$$

并且由于矩阵 T 的特殊结构, 使得 c 与 b 之间存在简单关系:

$$c_n = \begin{cases} b_n, & \text{if } n \in \{m_0, m_1, \dots, m_{L-1}\} \\ 0, & \text{if } n \notin \{m_0, m_1, \dots, m_{L-1}\} \end{cases}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \tag{18}$$

(4) 观察相邻两次迭代解的相对变化:

$$\text{if } \text{err} = \frac{(\hat{y} - \hat{y}_{-1})^H \cdot (\hat{y} - \hat{y}_{-1})}{\hat{y}_{-1}^H \cdot \hat{y}_{-1}} \begin{cases} \leq \text{or } > \max, & \text{终止迭代} \\ > \text{and } \geq \max, & \text{继续迭代} \end{cases} \tag{19}$$

仿真中选取的门限是 $\max = 1 \times 10^{-3}$, 最大迭代次数 $\max =$

10.

3.2 二维情况

表 1 SAR 图像分辨率增强仿真参数

信号与 积累角	低分辨情形	中心频率 600MHz, 带宽 150 MHz, 时宽 0.3μs 的 LFM 信号; 积累角 14 度
	高分辨情形	中心频率 600MHz, 带宽 250 MHz, 时宽 0.3μs 的 LFM 信号; 积累角 24 度
成像区域与成像算法		成像区域—距离向 95~105 米, 方位向 -5~5 米, 成像算法—BP 算法 ^[9]
目标放置		如图 3(a) 所示

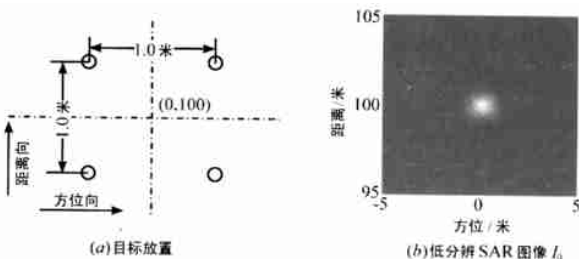


图 3 目标放置与低分辨 SAR 图像

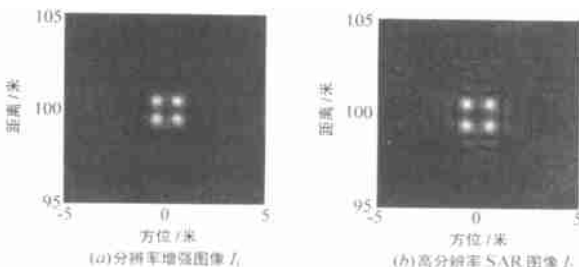


图 4 分辨率增强图像与高分辨 SAR 图像

图 3(b) 是按表 1 中的低分辨参数成的像, 由于发射信号带宽与天线波束角有限, 目标没有被区分开. 下图 (a) 是对频谱外推后的图像, 图 (b) 是将发射信号带宽与天线波束角分别增

如何将 $L_1 \times L_2$ 维序列 x_{2d} 外推为 $N_1 \times N_2$ 维序列 y_{2d} , $L_1 \leq N_1, L_2 \leq N_2$? 先将 y_{2d} 按列组合成长度为 $N_1 N_2$ 的一维序列 y_{1d} :

$$y_{1d(i \times N_1 + j)} = y_{2d(i, j)}, \quad i = 0, \dots, N_1 - 1; j = 0, \dots, N_2 - 1 \tag{20}$$

二维外推问题就转化为一维外推与内插问题, 可用同样的方法处理. 需要注意的是, 尽管这时 Hermitian 矩阵 G 一般不再保持 Toeplitz 特性, 但容易证明 G 仍具有块状 Toeplitz 特性, 故可借助多通道 Levinson 算法快速求解方程 (15)^[3].

上节已经指出 SAR 图像是二维带限信号, 因此可以利用外推算法增加图像信号的二维“等效”带宽, 由此获得的傅立叶图像比原 SAR 图像具有更高的二维分辨率. 但是原图像的频谱支撑区形状不规则, 为了使用快速算法, 处理中尽可能充分地截取了支撑区中的一块矩形部分作为待外推信号, 截取部分包含了原频谱的绝大部分能量^[8].

4 仿真结果

仿真中先对四个理想点目标成一幅低分辨率图像 I_0 , 然后对其频谱外推后得到一幅高分辨图像 I_1 , 最后增加发射信号带宽与天线波束角两个参数得到高分辨率图像 I_2 . 对比三幅图像, 可以验证本算法的效果. 仿真参数如下表所示:

至 250MHz 和 24 后用 BP 算法成的图像.

从图 4(a) 可以看出, 经过外推处理, 原来无法分辨的四个点目标显著凸现. 图 (a) 中目标点的分辨率与图 (b) 相似, 尽管目标位置稍有偏移, 但是旁瓣显得更低. 总的来看, 图 (a) 和图 (b) 对四个点目标的区分效果是相近的——或者说信号带宽 150MHz、积累角 14 度的 SAR 系统经过频谱外推处理后, 发射信号等效带宽与等效积累角分别增至 250MHz 与 24°.

5 结束语

本文首先分析了 SAR 图像二维频谱的特点, 指出 SAR 系统受发射信号与天线波束角所限, 是二维带通系统. 根据这一特点, 本文通过对 SAR 图像二维频谱进行外推增加 SAR 系统发射信号的等效带宽和与天线波束角, 从而增强了 SAR 图像的二维分辨率. 文中给出了实现外推算法的详尽步骤并进行了仿真验证. 需要指出的是, 应用于对地观测的 SAR 系统成像背景非常复杂, 一种或一类分辨率增强算法可能只适于某种特定场合. 因此在选择算法时, 要注意与应用相结合. 进一步的工作将放在不同算法对特定用途的效果评估上.

参考文献:

[1] S R Degraaf. SAR imaging via modern 2-D spectral estimation methods [J]. IEEE Trans. IP., May 1998, 7(5): 729 - 761.

- [2] L M Lovak ,et al. Automatic target recognition using enhanced resolution SAR data [J]. IEEE Trans. AES. Jan 1999 ,35(1) :157 - 175.
- [3] [美]S M Kay. 现代谱估计原理与应用 [M]. 科学出版社 ,1994.
- [4] C Cafforio ,C prati ,F Rocca. SAR data focusing using seismic migration techniques [J]. IEEE Trans. on AES. ,March ,1990 ,28 (2) :194 - 207.
- [5] L C potter ,et al. Energy concentration in band-limited extrapolation [J]. IEEE Trans. ASSP ,July ,1989 ,37 :1027 - 1041.
- [6] D E Wahl ,et al. Phase gradient autofocus —A robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Trans. AES July ,1994 ,30(3) : 827 - 834.
- [7] P T Cough. A fast spectral estimation algorithm based on the FFT [J]. IEEE Trans. SP June ,1994 ,42 :612 - 620.
- [8] W G Carra ,et al. Spotlight synthetic aperture radar-signal processing algorithm [M]. Artech House. Boston. London ,1995.
- [9] John W McCorcle. Focusing of synthetic aperture ultra wide band data [A]. Proc. IGRASS '89 [C] ,Proceedings Vancouver ,1989 :1 - 5.

作者简介:

董 臻 男. 1973 年出生于安徽省岳西县. 分别于 1995 年 ,2001 年获得国防科技大学电子科学与工程学院学士、博士学位. 主要研究兴趣为 SAR 成像与检测.



朱国富 男. 1972 年出生于河南省洛阳市. 分别于 1994、1997、2001 年获得国防科技大学电子技术系学士、硕士、博士学位. 主要研究兴趣为 SAR 实验技术.

梁甸农 男. 1936 年出生于湖南省濂源县. 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会会士. 主要从事超宽带雷达系统理论及自适应信号处理、谱估计等研究工作.