

## 平地假设对合成孔径雷达时域算法成像质量的影响研究

林世斌\* 李悦丽 严少石 周智敏  
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 时域算法具有精确成像和易于运动补偿等突出优点, 在超宽带合成孔径雷达(Ultra Wide Band Synthetic Aperture Radar, UWB SAR)成像领域应用前景广阔。当使用时域成像算法对起伏地形成像时, 可引入平地假设来简化成像几何模型, 但平地假设会引入几何误差, 进而影响成像质量。该文研究了平地假设对时域算法成像质量的影响, 指出其影响在直线孔径条件下表现为位置偏移, 在非直线孔径条件下还将造成目标散焦。同时推导得到了目标位置偏移量的表达式, 给出了目标聚焦时非直线孔径最大偏移和地表高程起伏程度应满足的定量条件。最后采用时域算法中的后向投影(Back Projection, BP)算法处理仿真数据, 处理结果验证了该文相关结论。

**关键词:** 平地假设; 起伏地形; 时域算法; 后向投影算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)03-309-05

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20035

## Study of Effects of Flat Surface Assumption to Synthetic Aperture Radar Time-domain Algorithms Imaging Quality

Lin Shi-bin Li Yue-li Yan Shao-shi Zhou Zhi-min  
(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology,  
Changsha 410073, China)

**Abstract:** Time-domain algorithms have great application prospect in Ultra Wide Band Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) imaging for its advantages such as perfect focusing and perfect motion compensation. We could adopt the flat surface assumption to simplify the imaging geometric model, when undulating terrain is imaged using time-domain algorithms. Nevertheless, the flat surface assumption leads to geometric errors, thereby affecting the imaging results. This paper studies the effects of this assumption on time-domain imaging algorithms, points out that it leads to position offset problem in the case of linear aperture, and it even leads to target defocusing problem in the case of non-linear aperture. The expression of position offset is given in this paper, as well as the restriction of the maximal offset of the non-linear aperture and the maximum elevation of the area in order to focus the targets. The conclusions are validated by simulated data, which is processed by one kind of time-domain algorithms, namely Back Projection (BP) algorithm.

**Key words:** Flat surface assumption; Undulating terrain; Time-domain algorithms; Back Projection (BP) algorithm

### 1 引言

时域算法具有精确聚焦、适合于非直线孔径成像和易于结合数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据等突出优点, 在 SAR 成像领域备受关注, 特别是宽波束大积累角的机载 UWB SAR (Ultra Wide Band Synthetic Aperture Radar)成像领域, 它具有很好的应用前景<sup>[1]</sup>。最早的也是最基本的时域算法是 BP 算法, 它源于计算机层析技术, 由 McCorkle 首先引入到 SAR 成像处理中<sup>[2]</sup>。BP (Back Projection)算法的缺点是计算量大, 为了减

小它的计算量, 先后提出了局部后向投影(Local BP, LBP)<sup>[3,4]</sup>、四分树后向投影(Quadtree BP, QBP)<sup>[5,6]</sup>以及快速因子分解后向投影(Fast Factorized Back Projection, FFBP)<sup>[7]</sup>等一系列快速 BP 算法, FFBP 算法近似达到频域成像算法的计算量<sup>[8]</sup>。

当使用时域成像算法对起伏地形成像时, 可以结合地表的 DEM 数据处理<sup>[9-11]</sup>, 或者引入平地假设来简化处理。结合地表的 DEM 数据处理无疑可以提高算法的成像质量, 然而这也将带来一定的问题, 一是算法需要成像区域的外部 DEM 数据, 二是算法的模型相对较复杂, 因此在某些时候可以考虑引入平地假设简化处理。平地假设一方面简化了成像几何模型, 另一方面将引入成像误差, 进而影响成

2012-05-17 收到, 2012-08-01 改回; 2012-08-13 网络优先出版

\*通信作者: 林世斌 1163942861@qq.com

像质量。本文研究了平地假设对时域算法成像质量的影响,指出它的影响在直线孔径条件下表现为目标位置偏移,在非直线孔径条件下还将造成目标散焦。本文工作属于SAR几何误差分析的范畴,SAR几何误差包括载机的运动误差和地表高程误差,本文主要讨论地表高程误差的影响。现今较多论文研究了几何误差对频域算法的影响<sup>[12,13]</sup>,但是讨论几何误差对时域成像算法影响的研究相对不足。

本文首先介绍了时域成像算法的基本原理,然后从直线孔径和非直线孔径两方面定量分析了平地假设对时域算法成像质量的影响,推导得到了目标位置偏移量的表达式,给出了目标聚焦对非线性孔径最大偏移和地表高程起伏程度的定量约束,最后通过时域算法中的BP算法验证了本文相关结论。

## 2 时域成像算法基本原理

时域成像算法包括BP和快速BP等一系列算法,虽然实现方法各有不同,然而它们的基本原理是一致的,即在时域完成信号的相干积累。时域成像算法的成像模型如图1所示,其中虚线框表示成像区域,虚线框上的曲面表示地表面,也是模型的成像面,区域中任意点位置矢量用 $\mathbf{s}$ 表示,虚线表示载机理想航迹,实曲线表示真实航迹,实曲线中的黑点表示Stop-go模型中载机驻留位置,位置矢量用 $\mathbf{t}_i$ 表示。

时域成像算法的基本原理都是时域相干积累,即相干信号积累得到加强,不相干信号积累相互削弱,成像过程可以表示为

$$\text{SARImg}(\mathbf{s}) = \sum g(\mathbf{t}_i, R_i) \exp(4\pi j R_i) \quad (1)$$

其中 $\text{SARImg}(\mathbf{s})$ 表示成像区域的复图像, $g(\mathbf{t}_i, R_i)$ 表示各实孔径回波距离压缩后的结果, $R_i$ 表示各个实孔径到像素点 $\mathbf{s}$ 的距离,即 $R_i = |\mathbf{t}_i - \mathbf{s}|$ , $\mathbf{s}$ 表示成像平面内任意点的位置矢量, $\mathbf{s} = (x, y, z)$ ,且 $z = \text{DEM}(x, y)$ ,DEM为地表面的高程数据,当引入平

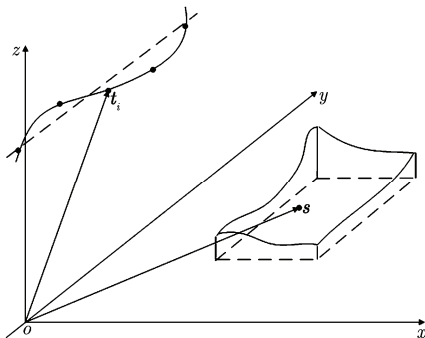


图1 BP算法成像模型

地假设时,即假定地表面为水平面,有 $z = 0$ 。求和范围由波束积累角确定。

## 3 平地假设对时域算法成像质量的影响

由以上算法基本原理可以看出,在引入平地假设的条件下,原本 $z = \text{DEM}(x, y)$ 简化为 $z = 0$ ,这个误差将进一步影响到 $R_i = |\mathbf{t}_i - \mathbf{s}|$ ,最终对成像结果造成影响。为了便于研究,我们首先分析这个近似误差在直线孔径下对成像结果的影响,进而过渡到研究平地假设在非直线孔径下对成像结果的影响。

### 3.1 直线孔径情况

当全孔径为直线孔径时,时域算法成像示意图如图2所示。假设成像平面上高 $h$ 处有一点目标 $P_1$ ,过 $P_1$ 点做成像平面的垂线,垂线与成像平面交于 $Q$ 点,过 $P_1$ 点以载机理想轨迹为轴做圆,圆与成像平面交于 $P_2$ 点,则对任意实孔径 $i$ 有

$$\Delta R = R_{i1} - R_{i2} = 0 \quad (2)$$

其中, $R_{i1}$ 为实孔径 $i$ 到点 $P_1$ 的距离, $R_{i2}$ 为实孔径 $i$ 到点 $P_2$ 的距离,所以 $P_1$ 和 $P_2$ 的距离迁徙曲线是完全一致的。因此,在引入平地假设的条件下,点目标 $P_1$ 的回波经时域成像算法处理后将将在 $P_2$ 处精确聚焦。

由上面分析可知,在引入平地假设的条件下,点目标 $P_1$ 的回波数据经时域成像算法处理将聚焦于 $P_2$ 处,这就是真实地物向成像平面映射的过程,因此,目标在图像中的位置将偏离真实位置,偏移量 $\Delta x$ ( $P_2$ 点和 $Q$ 点的距离)可以表示为

$$\Delta x = \sqrt{R^2 - (H - h)^2} - \sqrt{R^2 - H^2} \quad (3)$$

其中, $R$ 为 $P_1$ 到载机理想轨迹的距离, $H$ 为载机高度。当 $h$ 远小于 $H$ 和 $R$ 时,偏移量 $\Delta x$ 可以进一步简化为

$$\Delta x \approx \frac{Hh}{\sqrt{R^2 - H^2}} \quad (4)$$

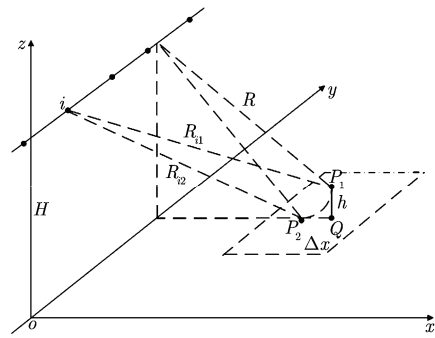


图2 线性孔径条件下成像几何关系示意图

### 3.2 非直线孔径情况

当全孔径为非直线孔径时，时域算法成像示意图如图 3 所示，其中实曲线表示非直线孔径，虚线表示直线孔径，其余部分定义与图 2 情况一致。易知此时对任意孔径  $i$  有

$$\Delta R = R_{i1} - R_{i2} \neq 0 \quad (5)$$

上式中不等号是不恒等意思。当载机实际航迹位于理想航迹附近时， $\Delta R$  较小，点目标  $P_1$  的回波仍能在  $P_2$  处聚焦，然而由于  $R_{i1}$  和  $R_{i2}$  的差异， $P_2$  处的聚焦性能有所下降，下降程度由  $\Delta R$  决定。通常我们

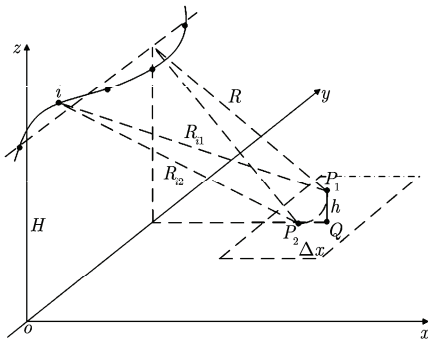


图 3 非线性孔径条件下成像几何关系示意图

结合式(6)和式(7)可得，为了使点目标聚焦，地表高程和非直线孔径最大偏移必须满足

$$\frac{h\Delta L}{\sqrt{R^2 - H^2}} < \lambda/8 \quad (8)$$

总之，在非直线孔径条件下，引入平地假设时，用时域算法对地表成像会带来两个问题：(1) 成像位置偏移，偏移量由式(4)确定；(2) 图像散焦，为了使目标聚焦，地表高程和非直线孔径最大偏移必须满足式(8)。

## 4 实验验证

为了验证上述相关结论，我们用时域算法中的 BP 算法处理了仿真数据，处理结果如下。为了便于描述，不引入平地假设和引入平地假设的 BP 算法分别称为 DEM-BP 算法和 Flat-BP 算法。

### (1) 直线孔径情况

实验仿真了条带正侧式合成孔径雷达成像系统，系统采用线性调频体制，载机航迹为理想直线，全孔径为直线孔径，实验场景为一个斜面上放置一个点目标，点目标位于场景中心，点目标高程约 42 m，斜面倾角为 15°，系统相关参数如表 1 所示，实验结果如图 5 所示。

对比成像结果我们可以看出，在直线孔径条件下，DEM-BP 算法通过结合 DEM 数据，能够在正

确的位置对目标精确成像。Flat-BP 算法在对有一定高程目标成像时，问题主要表现为目标成像位置的偏移，计算实验结果的偏移量， $\Delta x$  近似为 28.1 m，而根据式(4)  $\Delta x$  为 28 m，实际值与理论值相符。

$$\Delta R < \lambda/8 \quad (6)$$

认为当双程距离误差不超过  $\lambda/4$ ，即当  $\Delta R$  满足

点目标能聚焦。下面进一步分析距离误差  $\Delta R$  和点目标高程  $h$  及载机最大运动误差  $\Delta L$  的关系。如图 4 所示，实孔径分布在以理想轨迹为中心  $\Delta L$  为半径的圆柱体内，根据数学推导，当  $\Delta L$  和  $h$  远小于  $R$  和  $H$  时，对最大距离误差有

$$\Delta R_{\max} \approx \frac{h\Delta L}{\sqrt{R^2 - H^2}} \quad (7)$$

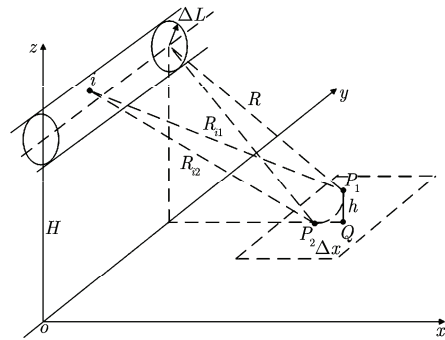


图 4 距离误差与地表高程及载机运动误差的几何关系示意图

表 1 系统相关参数

参数	参数值
场景斜距	3605 m
载机高度	2000 m
带宽	200 MHz
波束积累角	12.3°
方位分辨率	1 m
距离分辨率	0.75 m
场景方位向宽度	30 m
场景距离向宽度	90 m

确的位置对目标精确成像。Flat-BP 算法在对有一定高程目标成像时，问题主要表现为目标成像位置的偏移，计算实验结果的偏移量， $\Delta x$  近似为 28.1 m，而根据式(4)  $\Delta x$  为 28 m，实际值与理论值相符。

### (2) 非直线孔径情况

实验仿真了条带正侧式合成孔径雷达成像系统，系统采用线性调频体制，实验场景及实验相关参数与直线孔径情况一致，全孔径为非直线孔径，非直线孔径最大偏移为 66 m。实验用 DEM-BP 算法和 Flat-BP 算法分别处理了雷达回波数据，成像结果如图 6 所示。

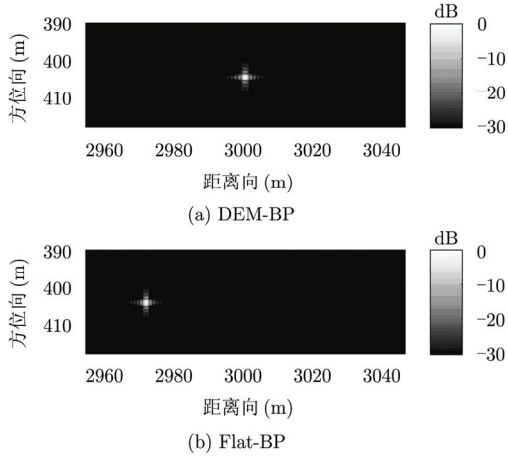


图 5 直线孔径条件下 DEM-BP 和 Flat-BP 的成像结果

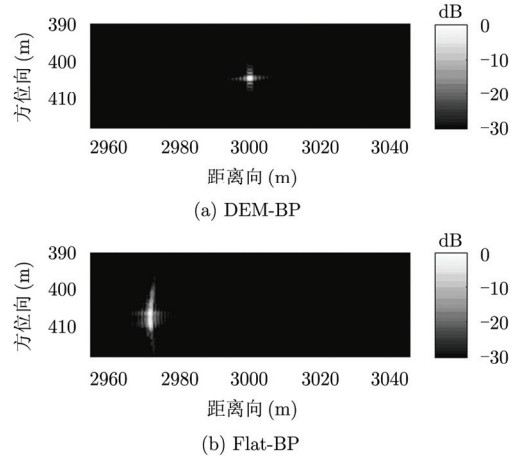


图 6 非直线孔径条件下 DEM-BP 和 Flat-BP 成像结果

对比成像结果我们可以看出，在非直线孔径条件下，DEM-BP 算法通过结合地表 DEM 数据，能够在正确的位置对目标精确成像。Flat-BP 算法在对有一定高程目标成像时，问题主要表现两个方面，一是成像位置偏移，二是点目标散焦。计算实验结果的偏移量， $\Delta x$  近似为 28.1 m，而根据式(4)  $\Delta x$  为 28 m，实际值与理论值相符。根据式(8)为了使点目标不出现散焦， $(h\Delta L)/\sqrt{R^2 - H^2}$  应小于  $\lambda/8$ ，而实验中  $(h\Delta L)/\sqrt{R^2 - H^2}$  为 0.924 m，远大于  $\lambda/8 = 0.0535$  m，因此出现明显散焦现象。

为了进一步验证式(8)关于目标散焦的定量描述，我们做了两组相关实验。第 1 组实验固定点目标高程而改变孔径最大偏移，观察最大偏移对目标散焦的影响，其中点目标高程设定为 10 m， $\sqrt{R^2 - H^2}$  设定为 3000 m，中心频率波长为 0.4286 m，方位向理论分辨率为 1 m，实验结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，随着非直线孔径最大偏移的增大，目标的方位向分辨率和峰值旁瓣比都增大，

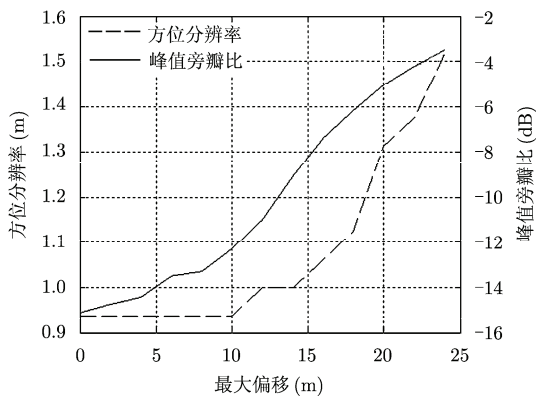


图 7 孔径最大偏移对目标散焦的影响

并且最大偏移从 0 m 到 15 m，目标的分辨率和峰值旁瓣比在 1 m 和 -8 dB 以下，与理论值的 1 m 和 -13 dB 差异不大，当最大偏移超过 15 m，目标的分辨率和峰值旁瓣比上升到 1.5 m 和 -4 dB，目标散焦明显。而根据式(8)得到目标散焦的临界值发生在  $\Delta L = \lambda\sqrt{R^2 - H^2}/(8h) = 16$  m 处，理论值与实际值相近，验证了式(8)的正确性。

第 2 组实验固定孔径最大偏移而改变点目标高程，观察目标高程对目标散焦的影响，实验相关参数与上组实验相同，实验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出，随着点目标高程的增大，目标的方位向分辨率和峰值旁瓣比都增大，并且最大偏移从 0 m 到 15 m，目标的分辨率和峰值旁瓣比在 1 m 和 -8 dB 以下，与理论值的 1 m 和 -13 dB 差异不大，当最大偏移超过 15 m，目标的分辨率和峰值旁瓣比上升到 1.5 m 和 -4 dB，目标散焦明显。而根据式(8)得到目标散焦的临界值发生在  $h = \lambda\sqrt{R^2 - H^2}/(8\Delta L) = 16$  m 处，理论值与实际值相近，验证了式(8)的正确性。

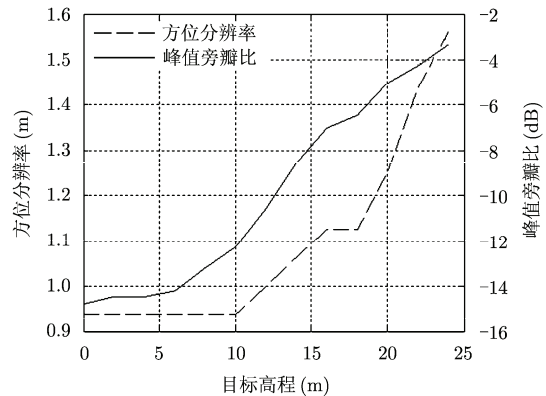


图 8 目标高程对目标散焦的影响

## 5 结论

本文研究了平地假设对合成孔径雷达时域算法成像质量的影响,指出它的影响在直线孔径条件下表现为目标位置偏移,在非直线孔径条件下还将造成目标散焦。本文推导了目标位置偏移量的表达式,给出了目标聚焦对非线性孔径最大偏移和地表最大高程的定量约束。通过BP算法处理仿真数据验证了本文相关结论。

## 参考文献

- [1] Vu V T, Sjogren T K, and Pettersson M I. On apodization techniques for ultra-wideband SAR imaging[C]. Proceeding of European Radar Conference, Rome, Italy, 2009: 529-532.
- [2] McCorkle John W. Focusing of synthetic aperture ultra wideband data[C]. International Geoscience and Remote Sensing (IGRSS), Fairbora, USA, 1991: 1-5.
- [3] Yegulalp A F. Fast Backprojection algorithm for synthetic aperture radar[C]. IEEE Radar Conference, Waltham, MA, 1999: 60-65.
- [4] Ahmed I. Study of the local backprojection algorithm for image formation in ultra wideband synthetic aperture radar[D]. [Ph.D. dissertation], Sweden: Bleking Institute of Technology, 2008: 31-41.
- [5] John McCorkle and Martin Rofheart. An order  $N^2 \log(N)$  backprojector algorithm for focusing wide-angle wide-bandwidth arbitrary-motion synthetic aperture radar[C]. International Society for Optical Engineering (SPIE) AeroSense Conference, Orlando: FL, 1996: 25-36.
- [6] Seung-Mok Oh and James H McClellan. Multiresolution imaging with quadtree backprojection[C]. 35th Asilomar Conference on Signals Systems & Computers, 2001: 105-109.
- [7] Ulander L M H, Hellsten H, and Stenström G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 760-776.
- [8] Vu V T, Sjogren T K, and Pettersson M I. A comparison between fast factorized backprojection and frequency-domain algorithms in UWB low frequency SAR[C]. Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Boston: MA, 2008: 1293-1296.
- [9] Othmar Frey, Erich H Meier, and Daniel R Nüesch. Processing SAR data of rugged terrain by time-domain back-projection[C]. Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE), Bellingham, Wash, 2005, Vol. 5980: 9-20.
- [10] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J J. Topography-dependent motion compensation for repeat-pass interferometric SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 206-210.
- [11] Jones C, Hensle S, and Michel T. Topography-dependent motion compensation: application to UAVSAR data[C]. 2009 IEEE Radar Conference, California, USA, May 4-8, 2009: 1-6.
- [12] Prats P, Karlus A, Câmara de Macedo, *et al.* Comparison of topography-and aperture-dependent motion compensation algorithms for airborne SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 349-353.
- [13] Karlus A, Câmara de Macedo, and Scheiber R. Precise topography-and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 172-176.

## 作者简介



林世斌(1988-),男,江西赣州人,国防科技大学电子科学与工程学院硕士生,主要研究方向为合成孔径雷达信号处理。

E-mail: 1163942861@qq.com

严少石(1983-),男,甘肃武威人,国防科技大学电子科学与工程学院博士生,主要研究方向为合成孔径雷达实时成像及运动补偿。

周智敏(1957-),男,国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为先进性雷达探测系统与信息处理、SAR信号处理、高速信号处理等。

李悦丽(1973-),女,湖南浏阳人,博士,现为国防科技大学电子科学与工程学院副教授,获国家科技进步二等奖1项,部委科技进步一、二等奖各1项,主要研究方向为合成孔径雷达成像以及实时信号处理系统实现。