

平飞模式双站 SAR 成像算法研究

朱振波^① 汤子跃^② 蒋兴舟^①

^①(海军工程大学 武汉 430033)

^②(空军雷达学院 武汉 430019)

摘要: 双站 SAR 的成像技术是机载双站 SAR 的一个关键问题, 该文首先建立了平飞模式的双站模型, 然后在双站模型等效到单站的基础上, 对双站 SAR 成像方法进行了研究, 分别给出了平飞正侧视的 CS 双站成像算法和平飞斜侧视模式时的 ECS 双站成像算法, 该等效方法能够解决平飞模式的双站 SAR 成像问题, 最后通过计算机仿真, 验证了该算法的有效性。

关键词: 双站 SAR; ECS 算法; 平飞

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2702-04

The Imaging Algorithm of Bistatic SAR with Parallel Track

Zhu Zhen-bo^① Tang Zi-yue^② Jiang Xing-zhou^①

^①(University of Naval Engineering, Wuhan, 430033, China)

^②(Air Force Radar Academy, Wuhan, 430019, China)

Abstract: The development of bistatic focusing algorithm is a pivotal issue, which is still in progress and not sufficiently solved. This paper firstly describes the special case of equal velocity vectors and parallel flight paths of transmitter and receiver, and then makes detailed and mathematical study on the approximate bistatic-to-monostatic application. Based on the Bistatic-To-Monostatic Application (BTMA), the bistatic imaging can be processed with a Standard SAR Processor, and then the conventional CS, ECS algorithm are also applicable to the bistatic imaging, which are all testified by the simulation in the paper. As a result, based on BTMA, the imaging of the bistatic SAR with parallel track can be solved.

Key words: Bistatic SAR; Extended Chirp Scaling (ECS) algorithm; Parallel track

1 引言

双站 SAR 是指发射系统和接收系统安装在不同载体上的 SAR 系统。它具有灵活的配置方式和成像模式(如平飞正侧视、跟随模式等), 可以充分利用目标的散射特性成像, 获取更多的信息^[1,2]。双站 SAR 系统中, 收、发分离的特殊性使得目标回波回收方式发生改变, 导致了双站 SAR 在成像处理算法方面有其特殊性, 传统的算法不能被应用到双站成像中。目前, 常规 SAR 成像算法的研究相对比较成熟, 有 CS, RD, $\omega-k$ 和 ECS 算法等, 但是双站 SAR 的成像算法研究刚刚开始。Rigling 等提出了双站成像的 PFA 算法^[3]; 针对特殊双站模式, Ender 等提出了 $\omega-k$ 算法^[2]; 针对任意飞行模式, Soumekh 讨论了基于 BP 算法的成像^[4]。本文在双站模型等效到单站的基础上, 对双站 SAR 成像方法进行了研究, 给出了平飞正侧视和平飞斜侧视模式时的双站成像算法, 最后计算机仿真验证了算法的有效性。

2 双站 SAR 的信号模型

同常规 SAR 系统一样, 双站 SAR 系统的模式通常也有

3 种: 条带式、扫描式和聚束式。条带式成像的双站 SAR 可以采用正侧视(收、发波束指向与其平台运动方向垂直), 也可以采用斜侧视(收、发波束指向与其平台运动方向有一定夹角)的工作方式, 通常使用最多的是正侧视工作方式, 本文主要研究了平飞模式时条带式双站 SAR 的成像算法。正侧视工作方式时双站 SAR 的收、发平台与目标位置的几何关系如图 1, 其中收、发平台高度分别为 H_R , H_T , 收、发平台到测绘中心 P 的正侧视距离为 R_{R0} , R_{T0} , 收、发平台分别作等速 V_0 匀速直线飞行。定义 $R(t; R_{T0}, R_{R0})$ 为发射机经点目标 P 反射到接收机的距离和, 在不考虑幅度调制的条件下, 接收信号可表示为

$$S_r(\tau, t; R_{T0}, R_{R0}) = A \cdot \exp \left\{ -j\pi K \left[\tau - \frac{2R(t; R_{T0}, R_{R0})}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} R(t; R_{T0}, R_{R0}) \right\} \quad (1)$$

其中 c 表示光速, K 表示发射信号调频斜率, λ 表示波长, τ 表示快时间, t 表示慢时间。

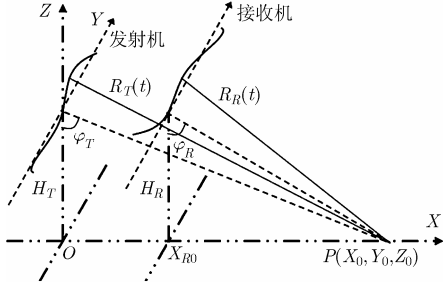


图 1 平飞模式双站 SAR 模型

3 双站 SAR 成像方法

双站 SAR 系统中收、发系统的分离, 使得发射机经点目标 P 反射到接收机的距离和 $R(t; R_{T0}, R_{R0})$ 为两个根号的和, 导致了双站 SAR 在成像处理算法方面有其特殊性, 传统的算法不能直接被应用到双站成像中。对于平飞模式的双站 SAR, 可以考虑将双站模型等效到单站结构, 从而解决了距离和中两个根号带来的困难, 这样常规单站的成像处理算法经过适当改变也可以实现双站 SAR 的成像。下面主要给出了平飞正侧视和平飞斜侧视模式的等效方法和相应的双站 SAR 成像算法。

3.1 平飞正侧视模式

首先给出平飞正侧视模式到单站的等效模型。在单站模型中, 正侧视 SAR 的收发距离和为

$$R(t; R_c) = 2\sqrt{R_c^2 + V_m \cdot t^2} \quad (2)$$

其中 V_m 表示单站模式时载机速度, R_c 表示载机天线相位中心到目标的正侧视距离。

根据图 1, 平飞正侧视模式双站 SAR 的收发距离和可表示为

$$R(t; R_{T0}, R_{R0}) = \sqrt{R_{T0}^2 + V_0^2 \cdot t^2} + \sqrt{R_{R0}^2 + V_0^2 \cdot t^2} \quad (3)$$

其中 V_0 表示收发载机相同的航速。

根据式(2), 式(3), 经过等效计算后, 可以得到双站到单站的等效模型如下:

$$\left. \begin{aligned} R_c &= \frac{R_{T0} + R_{R0}}{2} \\ V_m &= \frac{R_{T0} + R_{R0}}{2\sqrt{R_{T0} \cdot R_{R0}}} V_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在以上等效过程中, 假设收发载机等速度运行, 收发载机均工作在平飞正侧视模式。通过以上等效后, 平飞正侧视模式双站 SAR 的成像可以通过常规单站 SAR 的方法实现, 图 2 给出了等效后 CS 算法的流程, 对应的相位因子表达式推导如下^[5,6]:

(1) CS 相位因子

$$\begin{aligned} &H_{CS}(\tau, f_t; R_{ref}) \\ &= \exp \left\{ -j\pi K_r(f_t; R_{ref}) C_s(f_t) \left[\tau - \frac{2}{c} R(f_t; R_{ref}) \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

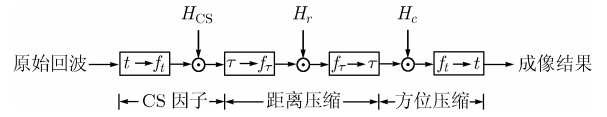


图 2 双站 CS 算法流程

其中

$$K_r(f_t; R_c) = \frac{K}{1 + \frac{2\lambda K R_c}{c^2} \frac{\left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2\right]^{3/2}}} \quad (6)$$

$$C_s(f_t) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2}} - 1 \quad (7)$$

$$R(f_t; R_c) = \frac{R_c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2}} = R_c [1 + C_s(f_t)] \quad (8)$$

定义 R_{ref} 为等效后的参考距离。

(2) 距离项相位因子 完成距离徙动校正、距离压缩和二次距离压缩。

$$\begin{aligned} H_r(f_r; f_t; R_{ref}) &= \exp \left\{ \frac{-j\pi f_r^2}{K_r(f_t; R_{ref}) \cdot [1 + C_s(f_t)]} \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi f_r}{c} \cdot R_{ref} \cdot C_s(f_t) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

(3) 方位相位因子 完成方位压缩和剩余相位的补偿

$$\begin{aligned} H_c(f_t; R_c) &= \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R_c \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2} \right] \right\} \\ &\cdot \exp \{ j\Theta_1(f_t; R_c) \} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Theta_1(f_t; R_c) &= \frac{4\pi}{c^2} \cdot K_r(f_t; R_c) \\ &\cdot [1 + C_s(f_t)] \cdot C_s(f_t) \cdot (R_c - R_{ref})^2 \end{aligned} \quad (11)$$

3.2 平飞斜侧视模式

图 3 给出了平飞正侧视模式的几何结构, α_R, α_T 分别表示收发载机天线相位中心到目标的斜视角。

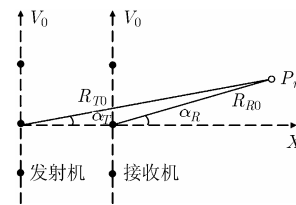


图 3 平飞斜侧视双站 SAR 平面模型

在单站模型中, 斜视侧视 SAR 的收发距离和为

$$R(t; R_c) = 2\sqrt{R_c^2 + V_m^2 \cdot t^2} - 2R_c \cdot (V_m t) \cdot \sin \alpha_m \quad (12)$$

其中 V_m 表示单站模式时载机速度, R_c 表示载机天线相位中心到目标的正侧视距离, α_m 为斜视角。

根据图 3 双站 SAR 距离和表示为

$$R(t; R_{T0}, R_{R0}) = \sqrt{R_{T0}^2 + V_0^2 \cdot t^2 - 2R_{T0} \cdot (V_0 t) \cdot \sin \alpha_T} + \sqrt{R_{R0}^2 + V_0^2 \cdot t^2 - 2R_{R0} \cdot (V_0 t) \cdot \sin \alpha_R} \quad (13)$$

根据式(12)、式(13), 经过等效计算后, 可以得到双站到单站的等效模型如下:

$$\left. \begin{aligned} R_c &= \frac{R_{T0} + R_{R0}}{2} \\ V_m &= \frac{\sqrt{(R_{T0} + R_{R0})^2 - (R_{T0} \cdot \sin \alpha_R + R_{R0} \cdot \sin \alpha_T)^2}}{2\sqrt{R_{T0} \cdot R_{R0}}} V_0 \\ \sin \alpha_m &= \frac{\sin \alpha_R + \sin \alpha_T}{2} \\ & * \left[\frac{\sqrt{(R_{T0} + R_{R0})^2 - (R_{T0} \cdot \sin \alpha_R + R_{R0} \cdot \sin \alpha_T)^2}}{2\sqrt{R_{T0} \cdot R_{R0}}} \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

在以上等效过程中, 假设收发载机等速度平飞, 收发载机均工作在平飞斜侧视模式。通过式(14)的等效后, 平飞正侧视模式双站SAR的成像可以通过常规单站SAR的方法实现, 图4给出了等效后ECS算法的流程^[7], 对应的相位因子表达式推导如下:

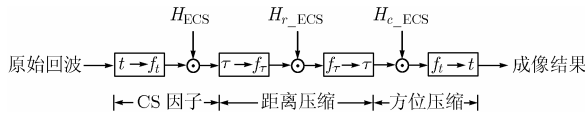


图4 双站ECS算法流程

(1) CS 因子

$$H_{ECS}(\tau, f_t; R_{ref}) = \exp \left\{ -j\pi K_r(f_t; R_{ref}) \cdot C_s(f_t) \cdot \left[\tau - \frac{2}{c} R(f_t; R_{ref}) \right]^2 \right\} \quad (15)$$

其中

$$K_r(f_t; R_c) = \frac{K}{1 + \frac{2\lambda K R_c \cos \alpha}{c^2} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda f_t}{2V_0} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}} \quad (16)$$

$$C_s(f_t) = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0} \right)^2}} - 1 \quad (17)$$

$$R(f_t; R_c) = \frac{R_c \cos \alpha}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0} \right)^2}} = R_c [1 + C_s(f_t)] \quad (18)$$

(2) 距离项相位因子 完成距离徙动校正、距离压缩和二次距离压缩。

$$H_{r_ECS}(f_r; f_t; R_{ref}) = \exp \left\{ -j \frac{\pi f_r^2}{K_r(f_t; R_{ref}) \cdot [1 + C_s(f_t)]} \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi f_r}{c} \cdot R_{ref} \cdot C_s(f_t) \right\} \quad (19)$$

(3) 方位相位因子 完成方位压缩和剩余相位的补偿

$$H_{c_ECS}(f_i; R_c) = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R_c \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_i}{2V_0} \right)^2} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ j [\Theta_1(f_i; R_c) + \Theta_2(f_i; R_c)] \right\} \quad (20)$$

其中

$$\Theta_1(f_i; R_c) = \frac{4\pi}{c^2} \cdot K_r(f_i; R_c) \cdot [1 + C_s(f_i)] \cdot C_s(f_i) \cdot (R_c - R_{ref})^2 \quad (21)$$

$$\Theta_2(f_i; R_c) = \frac{2\pi f_i}{V_0} R_c \cdot \sin \alpha \quad (22)$$

4 成像仿真

仿真中系统参数: 信号带宽 100MHz, 脉冲重复频率 200Hz, 脉冲宽度 10 μ s, 载机速度 70m/s; 发射载机高度 6km; 接收载机高度 3km。发射载机正侧视距离 30km, 接收载机正侧视距离 10km。

图 5 给出了基于CS算法实现的平飞模式双站SAR的成像结果; 图 6 给出了基于ECS算法实现的平飞斜侧视模式的成像结果, 接收天线的斜视角分别 20°, 成像性能指标的比较见表 1。

表 1 点目标脉冲响应参数

斜视角	ISLR (dB)	PSLR (dB)	SSLR (dB)	分辨力(m)
0°	-16.09	-40.70	-45.59	1.91(距离) 0.62(方位)
20°	-16.25	-39.56	-42.15	2.50(距离) 1.62(方位)

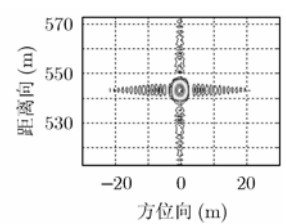
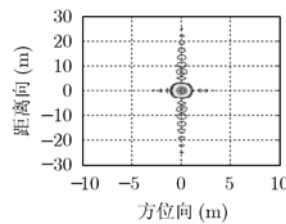


图5 平飞正侧视CS算法成像结果 图6 平飞斜侧视CS算法成像结果

5 结束语

本文在双站模型等效到单站的基础上, 对双站 SAR 成像方法进行了研究, 给出了平飞正侧视和平飞斜侧视模式时的双站成像算法, 最后通过计算机仿真, 验证了算法的有效性, 该方法能够解决双站 SAR 在平飞模式下的成像问题, 对双站 SAR 的工程实现有一定的意义。

参考文献

- [1] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003: 10-20.

- Tang Zi-yue and Zhang Shou-rong. Bistatic SAR System Theory. Beijing: Science Publishing House, 2003: 10–20.
- [2] Ender J H G. Signal theoretical aspects of bistatic SAR. IEEE International Geosci. and Remote Sensing Symp., Toulouse, July 2003, 3: 1438–1441.
- [3] Rigling B D and Moses R L. Polar format algorithm for bistatic SAR. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 2004, 40(4): 1147–1159.
- [4] Soumekh M. Wide-bandwidth continuous-wave monostatic/bistatic synthetic aperture radar imaging. In Proceedings of International Conference on Image Processing, Chicago, Illinois, USA, 1998, 3: 361–365.
- [5] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005: 123–160.
- Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Technique of Radar Imaging. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2005: 123–160.
- [6] Keith Raney R, Rung H, Bamler R, Cumming I, and Wong F. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786–799.
- [7] Moreira A, Scheiber R, and Mittermayer J. Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123–1136.
- 朱振波: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像技术.
- 汤子跃: 男, 1966年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达系统、信号处理以及SAR成像等领域的研究.
- 蒋兴舟: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达及水声信号理论的研究.