

文章编号: 1000-6893(2001)S0-0S70-05

机载聚束式 SAR 中空变相差的分析

付文宪, 洪文, 李少洪

(北京航空航天大学 电子工程系 203 教研室, 北京 100083)

ANALYSIS OF SPACE-VARIANT PHASE ERROR IN AIRBORNE SPOTLIGHT MODE SAR

FU Wen-xian, HONG Wen, LI Shao-hong

(203# Research Group, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 总结了聚束式 SAR 随空间变化的相位误差的自聚焦补偿方法, 并通过分析当目标存在一定运动时所产生的相位误差而分析了聚束式 SAR 的空变相差的来源、散焦、对成像和图像质量的影响。文中给出了空变相差的数学模型, 通过理论推导得到了相应的结论, 仿真计算则证实了所得的结论。这些结论将直接应用于对已有空变相差自聚焦方法的改进, 从而得到更为精确、高效、实用的空变相差自聚焦补偿算法。

关键词: 聚束式 SAR; 空变相差; 自聚焦算法

中图分类号: V 243.2; TN 958 **文献标识码:** A

Abstract: This paper sums up several autofocus algorithms applied to compensate space-variant phase error in Spotlight SAR, and analyzes cause, property, defocus and effects on imaging of space-variant phase error after phase errors coming from imaged targets with translation or rotation are analyzed. Mathematical mode of space-variant phase error is given in this paper, and some conclusions are acquired on the basis of theoretical deduction, also, results of simulation support the above conclusions. Based on the traditional autofocus algorithms of space-variant, a more efficient and accurate autofocus algorithm is expected while considering these conclusions.

Key words: spotlight SAR; space-variant phase error; autofocus algorithm

合成孔径雷达 (SAR-Synthetic Aperture Radar) 技术^[1]通过分析多普勒频率来改善雷达方位分辨率, 自 1951 年 Goodyear 公司的 CarWiley 提出了这一概念以来, SAR 得到了迅猛的发展。目前, SAR 正朝多模式、多波段、多极化等方向发展, 具有高分辨率成像能力的聚束式 SAR 是其中不可缺少的一种^[2,3]。如图 1 示, 在该模式工作过程中, 雷达视线方向始终对准被测目标区域中心, 从而在较长合成孔径积累时间内获得普通条带式 SAR 不能达到的精细分辨力, 特别是其方位分辨力与雷达天线的真实孔径无关(而条带式 SAR 的理想方位分辨率为天线真实孔径的 1/2), 不再受限于雷达天线的波束宽度, 给该模式带来了能量上的优势。

极坐标格式算法 (PFA-Polar Format Algorithm) 是聚束式 SAR 成像中较为成熟的算法^[4,5], 它建立在极坐标格式的基础上采用去调频

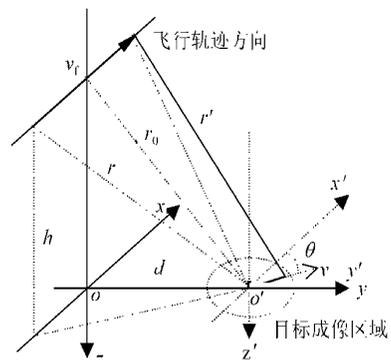


图 1 机载聚束式 SAR 几何模型

Fig 1 Geometry model of airborne spotlight SAR

技术, 其信号处理流程如图 2 所示, 先对成像目标区域中心进行完全的聚焦补偿, 再采用高效高精度的多相位滤波技术完成插值变换, 以提高成像处理的效率。

聚束式 SAR 复杂的工作模式、高的成像分辨力和长的合成孔径积累时间等都对其运动补偿提出了更为严格的要求。聚束式 SAR 中载机运动传感器系统除了传统的惯性导航系统 INS 之外, 还

收稿日期: 2000-05-10; 修订日期: 2000-09-05
基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (69831040)
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2001/S0/0S70/>

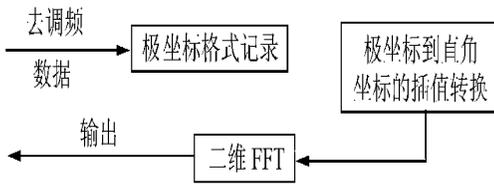


图2 PFA 算法流程图

Fig 2 Block diagram of PFA

增加了高精度的捷连惯导测量单元 MU 和准确稳定定位的全球无线电定位系统 GPS 等装置, 在运动传感器系统提供精确数据的基础上, 还要进行自聚焦运动补偿。聚束式 SAR 由其特定的成像模式引入了随空间变化的相位误差, 即相差随目标散射点的空间几何位置而不断变化, 任何单一的补偿都无法完成整个成像区域内的相差补偿。由于成像雷达与被测目标间存在相对的转动, 聚束式 SAR 中相差多为空间变化的, 故空变相差的补偿在聚束式 SAR 中具有重要的现实意义。

在 SAR 发展的过程中, 已形成了各种运动补偿自聚焦算法, 如多孔径 MA PDR IFT 方法、多孔径相位差方法 PD、多孔径相位组合 PC 方法、相位梯度算法 PGA 等, 这些方法主要是处理空不变相位误差^[4]。而对空变相差的补偿, 采用的有子孔径成像的处理方法, 然而, 当相位误差因子变化不连续时, 其补偿效果不甚理想。多强点处理方法^[6]和 M. A. Staff 等人提出的对任意运动的目标成像方法^[7]也可以用来补偿空变相差。为了对上述空变相差自聚焦算法在计算量、效率、可实现性等方面进行定性定量的深入分析, 本文从聚束式 SAR 空变相差的性质等本质问题出发, 研究分析了来源于匀速平动、转动的各类空变相差, 并为今后在此基础上精确高效的空变相差自聚焦算法的研究奠定基础。

1 空变相差模型

如图 1 所示, 在聚束式 SAR 成像中由于雷达波束总是对准成像目标中心, 当载机平台存在运动偏差时, 天线相位中心与目标之间存在相对运动。假设目标为刚体, 则目标区域内所有点的平动是相同的, 然而, 不同位置的点由于离目标中心距离不同, 则其转动所产生的影响各不相同。据此把天线相位中心与目标之间的这种相对运动分解为目标中心相对天线相位中心的平动和目标各散射点绕目标中心的转动, 考虑到问题的复杂性, 主要研究目标中心的匀速平动和目标中散射点绕目标

中心的匀速转动。

1.1 目标静止

在目标没有运动的情况下, 天线相位中心与目标之间的距离

$$r(t) = \sqrt{h^2 + d^2 + (v_f t)^2} - r_0 + (v_f t)^2 / (2r_0) - T/2 \quad t \quad T/2 \quad (1)$$

式中: h 为飞机平台高度; d 为目标距平台的水平距离; v_f 为平台的飞行速度; T 为合成孔径积累时间; 最短斜距为 $r_0 = \sqrt{h^2 + d^2}$, 如图 1 所示。则相应的多卜勒相位为: $\phi = 4\pi r(t) / \lambda$, λ 为射频波长, 可见这种情况下所产生的回波信号为线性调频信号。

1.2 目标匀速平动

目标中心以一定的速度 $v(v_0, \theta)$ 移动, v_0 为速度大小, θ 为速度方向与平台运动方向夹角 (顺时针为正, 逆时针为负), 则 v 沿方位向和距离向的 2 个分量为 $v_1 = v_0 \cos \theta$, $v_2 = v_0 \sin \theta$, 天线相位中心与目标间的距离

$$r(t) = \sqrt{h^2 + (d + v_2 t)^2 + (v_f t - v_1 t)^2} \quad (2)$$

利用泰勒级数对上式在 $t = 0$ 展开得

$$r(t) = r^{(0)}(0) + \frac{r^{(1)}(0)}{1!} t + \frac{r^{(2)}(0)}{2!} t^2 + \frac{r^{(3)}(0)}{3!} t^3 + \frac{r^{(4)}(0)}{4!} t^4 + \dots \quad (3)$$

式中: $r_1 = r^{(1)}(0)$; $r_2 = r^{(2)}(0)$; $r_3 = r^{(3)}(0)$; $r_4 = r^{(4)}(0)$ 。根据系数值的不同, 回波信号将含有 1 次、2 次、3 次及高次相位。

1.3 目标匀速转动

设目标区域内一点在 $x-y-z$ 坐标系中的坐标为 (x_0, y_0) , 相应的极坐标为 (r_0, θ) , 绕目标中心的角速度为 ω (顺时针为正, 逆时针为负), 则有如下关系式: 点的初始位置 $\begin{cases} x_0 = r_0 \cos \theta \\ y_0 = r_0 \sin \theta \end{cases}$, 点在

运动中的位置 $\begin{cases} x = r_0 \cos(\theta + \omega t) \\ y = r_0 \sin(\theta + \omega t) \end{cases}$, 其中: $-T/2 \leq t \leq T/2$, T 为合成孔径积累时间。产生的位置变化,

$$\begin{cases} \Delta x = x - x_0 = r_0 [\cos(\theta + \omega t) - \cos \theta] \\ \Delta y = y - y_0 = r_0 [\sin(\theta + \omega t) - \sin \theta] \end{cases}$$

则天线相位中心到该点的距离为

$$r(t) = \sqrt{h^2 + (d + y_0 + \Delta y)^2 + (v_0 t - x_0 - \Delta x)^2} \quad (4)$$

利用泰勒级数在 $t = 0$ 展开得

$$r(t) = r_0 + r_1 t + r_2 t^2 / 2 + r_3 t^3 / 6 + r_4 t^4 / 24 + r_5 t^5 / 120 \dots \quad (5)$$

式中: r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 分别为相差系数。

2 空变相差的分析及仿真

根据以上空变相差的模型对空变相差进行仿真,并根据仿真结果来分析空变相差的性质、散焦等。在仿真过程中,设计的方位向分辨率为 1m ;发射信号的波长为 0.03m ;方位向波束角为 30° ;平台速度 v_f 为 100m/s ;平台高度为 3000m ;斜距 r_0 为 $10\,000\text{m}$ 。另外,考虑聚束式 SAR 成像采用 PFA,所以在空变相差补偿前已经过运动传感系统及其它补偿方法的补偿,此时的相位误差对应的位移与一个空间分辨单元相当,则按照仿真设计的参数可以适当选择目标点的运动参数,平动的速度选 $0.5\text{m/s}, 1\text{m/s}, 3\text{m/s}$;转动的速度 ω 取 $1.5(^\circ/\text{s})$ (距目标中心为 80m 时)。

2.1 匀速平动

先研究目标中心相对天线相位中心匀速平动时所产生的相位误差特性。由式(1),式(3)可知,目标静止与匀速平动在合成孔径积累时间内相对天线相位中心的距离不同,这个相对距离的差值就是相位误差的来源即 $\Delta r = r(t) - r(t)$,则相差为 $\Delta\phi + 4\pi\Delta r/\lambda$

表 1~ 表 3 为目标中心以 3 种不同速度平动时,相对距离变化引起的各系数差值。

表 1 速度大小为 0.5m/s 时相对距离差的变化
Table 1 Variety of relative range difference at a speed of 0.5m/s

速度方向	Δr_1	Δr_2	$\Delta r_3/10^{-4}$	$\Delta r_4/10^{-4}$
0°	0.000	-0.010	0.00	0.06
30°	0.239	-0.009	-7.09	0.05
45°	0.337	-0.008	-1.01	0.04
60°	0.413	-0.005	-1.23	0.03
90°	0.477	0.000	-1.43	0.1×10^{-3}
180°	0.000	0.010	0.00	0.06
270°	-0.477	0.000	1.44	0.1×10^{-3}

表 2 速度大小为 1.0m/s 时相对距离差的变化
Table 2 Variety of relative range difference at a speed of 1.0m/s

速度方向	Δr_1	Δr_2	$\Delta r_3/10^4$	$\Delta r_4/10^{-4}$
0°	0.000	-0.020	0.00	-2.88
30°	0.477	-0.017	-1.41	0.01
45°	0.675	-0.014	-1.99	1.01
60°	0.826	-0.010	-2.45	0.10
90°	0.854	0.000	-2.86	0.3×10^{-3}
180°	0.000	0.020	0.00	0.12
270°	-0.954	0.000	2.86	0.3×10^{-4}

表 3 速度大小为 3.0m/s 时相对距离差的变化

Table 3 Variety of relative range difference at a speed of 3.0m/s

速度方向	Δr_1	Δr_2	$\Delta r_3/10^4$	$\Delta r_4/10^{-4}$
0°	0.00	-0.050	0.00	-2.660
30°	1.43	-0.051	-4.07	0.030
45°	2.02	-0.042	-5.82	0.220
60°	2.48	-0.030	-7.21	0.170
90°	2.86	0.001	-8.58	0.003
180°	0.00	0.060	0.00	-0.380
270°	-2.86	0.000	8.56	0.003

图 3 为方位向目标中心点在匀速平动时的成像效果比较。

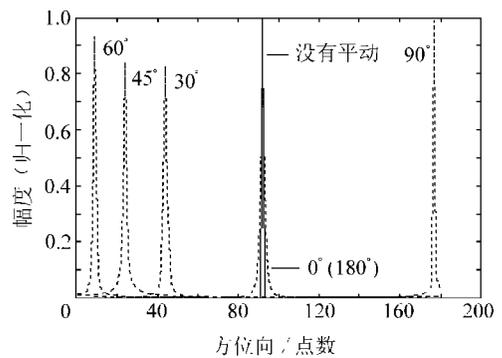


图 3 方位向中点在速度为 1.0m/s 时的图像

Fig. 3 Image of point (0, 0) at a speed of 1.0m/s

从表 1~ 表 3 可看出在本文研究范围内, $\Delta r_3, \Delta r_4$ 总是很小(达 10^{-4} 级),即 3 次及更高次相差可以忽略,但线性相差和 2 次相差则影响最终成像。线性相差带来冲击响应函数 (RF-impulse Response Function) 主瓣的偏移,并且从图 3 中可发现,不同的速度矢量偏移量并不相同。如考虑飞行中相对平动的变化,则偏移量的不同将造成 SAR 图像的几何失真。2 次相差的存在则意味着 RF 主瓣的展宽和旁瓣的对称升高,随着 2 次相差的增大甚至会出现主瓣多峰值的现象,从而造成图像分辨率的下降,对比度变差和图像散焦的现象。图 3 还说明距离向的平动主要造成偏移,而主瓣几乎不展宽,方位向的平动则正好相反,主要是旁瓣的展宽和幅度的下降,其它方向的平动介于这两者之间。

通过以上分析可得目标匀速平动所引起的相位误差特性:

(1) 无论平动大小(在本文研究的范围之内)和方向如何,由平动产生的相位误差主要是线性相差和 2 次相差,高次相差可以不考虑。

(2) 方位向和距离向的平动所产生的相差各不相同:方位向主要是 2 次相差,而距离向主要是

线性相差, 其它方向的运动则两者兼有。

(3) 相对飞行轨迹对称的平动所产生的相位误差相同, 速度越大则相位误差对成像产生的影响越大。

2.2 匀速转动

由转动引起的相位误差与点的具体位置有关, 为了给出一般的规律, 选取点 (30, 0), (80, 0) (40√3, 40), (40√2, 40√2), (40, 40√3), (0, 80), (0, 30), (-80, 0), (0, -80) 进行仿真, 这些点与目标中心的距离相同, 分布在不同的方向。图 4~ 图 6 为不同点在转速变化时各次系数的曲线变化图。

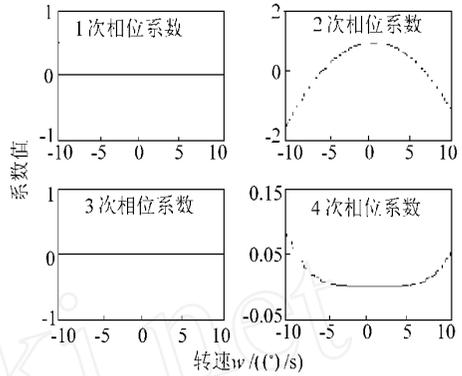


图 6 点 (0, 80) 的系数变化规律

Fig. 6 Variance rule of coefficients of point (0, 80)

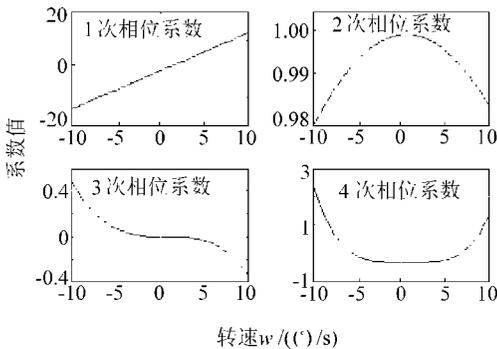


图 4 点 (80, 0) 的系数变化规律

Fig. 4 Variance rule of coefficients of point (80, 0)

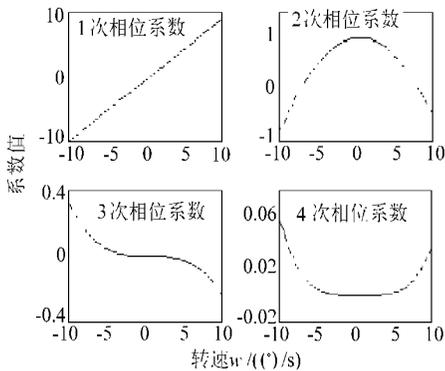


图 5 点 (40√2, 40√2) 的系数变化规律

Fig. 5 Variance rule of coefficients of point

图 7 给出了同一点在转动时所成的像及根据式 (4), 式 (5) 分别补偿各次相差后的成像情况。

方位向和距离向上的点在转动时成像如图 8 和图 9。

图 4~ 图 6 显示了距目标中心同样距离的点在转动时的相差因子变化情况, 可见, 在本文讨论范围内, 线性误差和 2 次相差总是不可忽略的, 而当转速较大时, 3 次及更高次的相差必须考虑。即

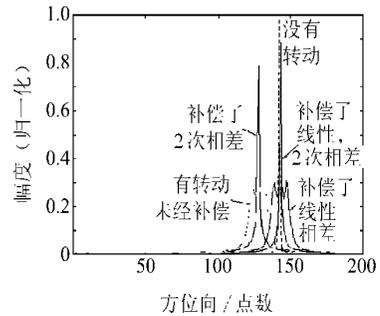


图 7 点 (50, 50) 在转速为 -2% 时的图像

Fig. 7 Image of point (50, 50) with rotation (-2%)

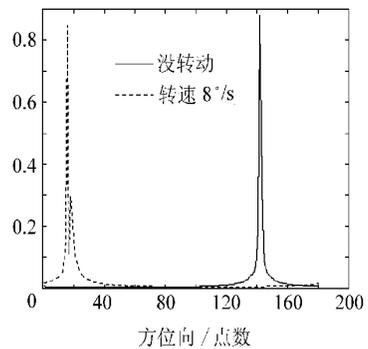


图 8 点 (50, 0) 存在转动时的图像

Fig. 8 Image of point (50, 0) with rotation

使目标以同一角速度围绕目标中心旋转, 各次相差也并不相同, 这充分说明了转动造成的相差具有随空间分布的特点。线性及 2 次相差同样造成图像几何失真、分辨率下降、图像散焦等, 3 次及更高次相差则引起 RF 旁瓣的非对称增大, 造成图像虚假目标的出现和图像的散焦, 图 8 清楚地证实了这一点。图 7 比较了没有转动、有转动未经补偿及有转动但分别补偿各次相差后的图像, 可以看出经过线性相差的补偿, 图像消除了偏移; 经

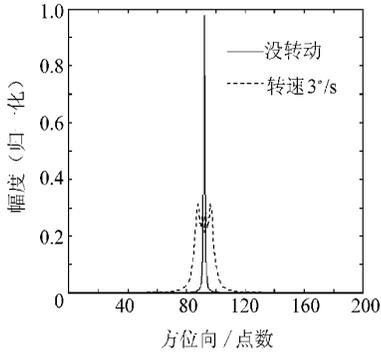


图 9 点(0, 60)存在转动时的图像

Fig. 9 Image of point (0, 60) with rotation

过 2 次相差的补偿, 成像显著变窄; 补偿了线性 and 2 次相差后的图像只剩下不对称的偏差。图 9 说明了距离向上的散射点在转动时主要存在 2 次相差, 即 RF 主瓣展宽, 而方位向则不然, 各次相差都存在, 图 8 表明了这一现象。

通过以上图表和分析可得目标匀速转动时的相位误差特性:

(1) 在转速较小时(产生的位移与 1 个分辨单元相当), 主要产生线性相差和 2 次相差, 而 3 次及更高次相差可以不考虑。

(2) 在转速较大时, 3 次及 4 次相差也较突出, 必须考虑。

(3) 距离向上的目标对比方位向上的目标转动所产生的相位误差其 4 次相差不能忽略, 但没有线性和 3 次相差。

(4) 距目标成像中心越远, 转速越大, 所产生的相差就越大。

(5) 在本文研究范围内运动产生的 5 次及更高次相差可以忽略。

3 结 语

机载聚束式 SAR 中空变相差的自聚焦补偿对高分辨率成像有很重要的影响, 如何高效地补偿空变相差越来越成为获取高分辨率 SAR 图像的关键。本文从空变相差的逆问题出发, 即目标具有相对运动时所引起的空变相差的特性而得到空变相差的性质、散焦及对成像的影响。这将有助于根据文中所得的空变相差的特点而在空变相差的自聚焦补偿中有针对性地加以处理, 研究出精确、高效的空变相差自聚焦运动补偿方法。

参 考 文 献

- [1] Ausheman D A, Kozma A, Walker J L. Development in radar imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, A ES-20(4): 363- 400
- [2] Jakowatz C V Jr, *etc.* Spotlight mode synthetic aperture radar: a signal processing approach [M]. Kluwer Academic Publishers Group, 1996: 12- 59.
- [3] Freeman A, Evans D, Zylij J. SAR applications in the 21st century [A]. Proc EU SAR 'C [C]. 1996: 25- 30
- [4] Carrara W G, Goodman R S, Mafewski R M. Spotlight SAR: signal processing algorithms [M]. Artech House, 1995: 203- 243
- [5] 洪文. 机载聚束式合成孔径雷达成像的聚焦处理研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1997.
- [6] Werness S, Carrara W, *etc.* Moving target imaging algorithm for SAR data [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1990, 26(1): 57- 66
- [7] Stuff M A, Sullivan R C, Thelen B J, *et al.* Automated two and three dimensional, fine resolution, radar imaging of rigid targets with arbitrary unknown motion [J]. SPIE, 1994, 2230: 180- 189.

作者简介:



付文(1972-) 男, 北京航空航天大学信号与信息处理专业博士研究生, 现主要从事机载 SAR 成像、运动补偿和图像处理等方面的研究工作。



洪文, 女, 北京航空航天大学副教授, 1997 年获该校工学博士学位, 1998 年至 1999 年任德国宇航院客座科学家。主要研究领域为高分辨率 SAR 成像及其应用等。



李少洪(1939-) 男, 教授, 博士生导师, 北京航空航天大学信号与信息处理教研室主任, 主要从事雷达、信号与信息处理、检测、估计、多目标跟踪和目标识别等方面的研究工作。