文章编号:1001-893X(2012)05-0615-04

俯冲斜视 SAR 成像分辨力分析*

常 军1,刘玉文2,任培宏1,杨 勇1

(1.中国西南电子技术研究所,成都 610036;2.第二炮兵装备研究院,北京 100085)

摘 要:针对雷达平台在俯冲条件下的 SAR 成像几何关系及成像原理,分析了俯冲条件下斜视 SAR 在斜平面内的分辨力,根据几何关系给出了从斜平面转换到地面的斜地转换系数,最后推导了俯冲 斜视段的地面方位向和距离向的分辨力数学表达式。在此基础上对影响分辨力的主要因素进行了 分析,分析结果表明,该成像分辨力数学模型不仅适合俯冲阶段,也适合平飞阶段,对工程应用具有 一定参考价值。

关键词:合成孔径雷达;俯冲斜视 SAR;斜地转换系数;斜平面分辨力;地距分辨力 中图分类号:TN959.2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.05.002

Analysis of Squinted-looking SAR Imaging Resolution in Diving Condition

CHANG Jun¹, LIU Yu-wen², REN Pei-hong¹, YANG Yong¹

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;

2. The Second Artillery Military Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: According to the SAR imaging geometry and the imaging principle of the radar platform in diving conditions, the squint plane resolution under the condition of diving mode is analysed. The conversion factor from the squint plane to ground – plane is provided according to the geometric relationship. Finally, the ground azimuth and range resolution mathematical expressions are deduced in diving condition. On this base, the main factors that affect resolution are analysed and the result shows the mathematical model is not only suitable for diving phase imaging resolution but also for level flight phase. It has a certain reference value for engineering applications.

Key words: SAR; dive squinted-looking SAR; transform coefficient from the squint plane to ground; squintedplane resolution; range resolution

1 引 言

SAR 技术的出现,为雷达应用提供了更为广阔的 空间。它的优势在于能在全天候条件下得到高分辨 率的地面图像,其精度已经达到或接近光学和红外传 感器的水平,并成为现代战争中执行空中侦察和监视 任务非常重要和不可取代的技术手段。正因为如此, 现代雷达的空对地模式普遍采用这种技术,利用它为 飞机的广域侦察和瞄准目标提供信息支持。F-15、F-16、F-16、F-18、F-22、F-35、"幻影"2000、"台风"、苏27、 苏30等均采用了 SAR 成像技术。

目前,相当一部分的 SAR 雷达设备均工作在平 飞段的正侧视成像,平台的飞行速度接近匀速直线 飞行,因此设计者对 SAR 的分辨率分析相对简单。 但对于工作在大前斜角俯冲段的 SAR,由于速度高、 斜视角很大,同时存在侧向机动和纵向机动等非运 速运动、场景相对于雷达的下视角和下倾角均在不 停地发生变化等特点,因此,此时的 SAR 分辨率分 析变得很复杂;另外,从应用的角度来说,SAR 图像 的地距图像比斜距图像更重要,因此,对地距分辨力 的分析就显得尤为重要。文献[1-2]对俯冲阶段的 SAR 成像进行了分析,文献[3]对俯冲阶段的 DBS 成像分辨率进行了分析,都未涉及地距分辨率。本 文将根据平台在俯冲阶段的几何特点,以及 SAR 成 像原理,推导出在俯冲阶段的斜距分辨率及地距分 辨率.然后对分辨力进行分析和仿真。

2 斜平面成像分辨力

www.teleonline.cn

俯冲前斜 SAR 的成像示意图如图 1 所示。雷 达以速度 V_a 在空间内俯冲运动,从 A 点运动到 B 点雷达持续照射目标区域,假设 o'为线段 AB 的中 心,雷达相对于场景某一点 C 的转角为θ_{syn}。



图 1 前斜 SAR 在斜平面内的成像几何示意图 Fig. 1 SAR imaging geometry diagram in squint plane

由图 1 可知,若雷达在 AB 运动期间的对回波 信号作相干处理,可以得到高的方位向分辨,其分辨 方向为雷达相对目标转动方向,即 DE 方向。方位 向分辨率大小 ρ_a 由雷达相对目标的转角 θ_{syn} (即合 成角)决定^[4]:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\theta_{\rm syn}} \tag{1}$$

式中,λ为雷达工作波长。

距离向分辨率大小 ρ, 由发射信号的带宽 B, 决定,距离向分辨率方向为孔径中心时刻目标相对雷达视线方向。

$$\rho_r = \frac{C}{2B_r} \tag{2}$$

式中, C为光速。

对回波数据进行二维成像处理得到的高分辨率

· 616 ·

图像是地面目标区域在斜平面的投影。

3 前斜 SAR 地距分辨力

对于俯冲 SAR,斜平面内的 SAR 图像需要转换 到地平面,斜平面的分辨率转换到地平面分辨率存 在一个几何转换关系。

3.1 斜地转换系数

图 2 是由斜平面的分辨力投影到地平面内的分 辨力的投影几何关系示意图。设成像点位置为 C。 图中, θ 为前斜角,和通常定义的斜视角互余; θ_g 为 前斜角在水平面的投影; α 为下倾角; β 为下视角; ρ_a 为斜平面方位分辨力; ρ_{ga} 为地距方位分辨力; ρ_r 为斜平面距离分辨力; ρ_{gr} 为地距距离分辨力。



图 2 俯冲前斜 SAR 成像几何示意图 Fig.2 SAR imaging geometry diagram in squinted-looking SAR in diving condition

斜地转换系数定义为

$$k_a \triangleq \frac{\rho_{ga}}{\rho_a} \tag{3}$$

$$k_r \triangleq \frac{\rho_{gr}}{\rho_r} \tag{4}$$

通过解算可获得相应的斜地转换系数:

$$k_a = \frac{\sin\theta\cos\beta}{\sqrt{2\cos\theta\sin\beta\sin\alpha + \cos^2\alpha + \cos^2\beta + \sin^2\theta - 2}}$$
(5)

$$k_r = \sqrt{\frac{2\cos\theta\sin\beta\sin\alpha + \cos^2\alpha + \cos^2\theta\cos^2\beta - 2\cos^2\theta}{2\cos\theta\sin\beta\sin\alpha + \cos^2\alpha + \cos^2\beta + \sin^2\theta - 2}}$$
(6)

3.2 前斜 SAR 地距分辨力

在成像过程中还需要进行加窗等处理工作,因 此,地平面的距离向分辨力可表示为

$$\rho_{gr} = k_w k_r \rho_r = \frac{k_w k_r c}{2B_r} \tag{7}$$

其中,*k_w*为降低距离向副瓣电平进行加窗处理引入的主瓣展宽系数,*k_r*为式(6)的距离向斜地转换因子。

地平面方位向分辨力可表示为

$$o_{ga} = k_w k_a \rho_a = k_w k_a \cdot \frac{\lambda R}{2 V_a T_a \sin\theta} \tag{8}$$

式中, k_a 为方位向斜地转换因子,R为雷达相位中心到成像点的距离, V_a 为雷达平台的飞行速度, T_a 为合成孔径时间。

4 俯冲前斜 SAR 分辨力分析

前斜 SAR 成像分辨力包括距离向地距分辨力 和方位向分辨力,从式(7)和式(8)的前斜 SAR 分辨 力公式可以看出,方位分辨力主要由孔径时间、前斜 角、下视角及弹道倾角等决定;而距离分辨力除了与 带宽有关外,还与前面的几个角度有关。

下面分析前斜角、下视角和下倾角在某些特殊角度关系下的成像分辨力。

(1)当 $\theta_g = 90^\circ, \alpha = 0$ 时 斜地转换系数:

$$k_a = 1$$

 $k_r = 1/\cos\beta$

地面分辨力:

$$\rho_{ga} = k_w \cdot \frac{\lambda R}{2 V_a T_a}$$
$$\rho_{gr} = \frac{k_w c}{2 B_r \cos\beta}$$

这就是正侧视 SAR, 雷达天线存在下视角时的 子孔径分辨力。其中, 方位向分辨力只与工作波长、 平台速度、成像距离、合成孔径时间有关, 而地面距 离向分辨力除与工作带宽相关外, 还与下视角有关。

对于全孔径成像,则有:

$$T_a = \frac{\theta_a \cdot R}{V_a} \approx \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{R}{V_a}$$

则:

$$\rho_{ga} = k_w \cdot \frac{\lambda R}{2 V_a T_a} = k_w \cdot \frac{D}{2}$$

式中,D为实天线口径宽度。

这正是正侧视全孔径方位分辨力。

(2)当
$$\theta_g = 90^\circ, \alpha = 0, \beta = 0$$
时
 $k_a = 1$

$$\rho_{ga} = k_w \cdot \frac{\lambda R}{2 V_a T_a}$$
$$\rho_{gr} = \frac{k_w c}{2 B_r}$$

这就是正侧式,无下视角时的分辨力,距离向分 辨力只与工作带宽相关。

(3)当 $\theta_{\sigma} = 0$ °时

方位向分辨力 ρ_{ga} = ∞。此时,方位上无法通过 合成孔径分辨目标。

(4)前斜 SAR 的分辨力举例

设雷达平台的速度为 500 m/s,成像距离为 20 km,合成孔径时间为300 ms,线性调频信号带宽 为100 MHz,工作波长为8.6 mm。

图 3 是在固定 $\alpha = 20^{\circ}$ 、 $\beta = 30^{\circ}$ 的情况下,前斜角 θ 从 15°到 40°变化地面分辨力的变化趋势。图 4 是 固定倾角为 $\alpha = 20^{\circ}$,前斜角为 $\theta = 20^{\circ}$,下视角从 20° 变化到 40°,分辨力的变化趋势。图 5 是固定前斜角 为 $\theta = 20^{\circ}$,下视角 $\beta = 20^{\circ}$,下倾角从 20°变化到 40°, 分辨力的变化趋势。



图 3 分辨力随前斜角的变化趋势 Fig.3 Resolution curve with the squint angle



图 4 分辨力随下视角的变化趋势 Fig.4 Resolution curve with the under – looking angle



图 5 分辨力随下倾角的变化趋势 Fig.4 Resolution curve with the downward angle

从图 3 可以看出,前斜角越大,方位分辨力越高,在固定下视角的情况下,前斜角的变化也会导致距离向分辨力的变化。从图 4 可以看出,在固定前斜角和下倾角的情况下,随着下视角增大,距离向分辨力和方位向分辨力都会下降。从图 5 可以看出,在固定前斜角和下视角的情况下,下倾角的变化也会导致分辨力的变化,特别是方位向分辨力受到的影响更大。

5 结束语

本文从 SAR 成像几何关系及成像原理出发给 出了俯冲阶段 SAR 的斜距分辨力和地距分辨力数 学表达式,可为 SAR 成像系统设计者提供帮助。

由于俯冲阶段影响成像性能的空间角度关系的 复杂性,从分辨力公式可以看出,俯冲前斜 SAR 的 地平面分辨力在距离向和方位向在空间上是相关 的,因此,要获得良好的成像分辨力需要对各空间角 度提出较高的要求^[5]。下视角不宜太大,否则将导 致距离向地距分辨力的急剧降低,同时也会影响到 方位向地距离分辨力。

参考文献:

[1] 俞根苗,尚勇,邓海涛,等.弹载侧视合成孔径雷达信号 分析及成像研究[J].电子学报,2005,33(5):778-782.
YU Gen - miao, SHANG Yong, DENG Hai - tao, et al. Signal Analysis and Imaging Processing of Missile - Borne Side looking SAR[J]. Acta Electronica Sinica,2005,33(5):778-782.(in Chinese)

- [2] 谢华英,范红旗,赵宏钟,等.SAR 成像导引头的弹道设计 与优化[J].系统工程与电子技术,2010,32(2):332-337.
 XIE Hua - ying, FAN Hong - qi, ZHAO Hong - zhong, et al. Trajectory design and optimization for a SAR seeker[J].System Engineering and Electronics,2010,32(2):332-337. (in Chinese)
- [3] Beard G. Performance factors for airborne short dwell squinted radar sensors [D]. London: University of London, 2010:37 – 52.
- [4] Cumming I G, Wong F H. 合成孔径雷达成像一算法与实现[M].洪文,胡东辉,译.北京:电子工业出版社, 2007:98-101.
 Cumming I G, Wong F H. Synthetic aperture radar imaging: algorithm and implementation [M]. Translated by HONG Wen, HU Dong hui. Beijing: Publishing House of Electronic
- [5] Jeremy H, David L. Terminal guidance using a Doppler Beam Sharpening radar[C]//Proceeding of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. [S.1.]: AIAA, 2003:57 – 96.

Industry, 2007:98 - 101. (in Chinese)

作者简介:

常 军(1971一),男,四川宜宾人,硕士,高级工程师,主 要从事雷达制导系统总体技术研究,已发表论文 20 余篇;

CHANG Jun was born in Yibin, Sichuan Province, in 1971. He is now a senior engineer with the M.S. degree. His research concerns the system design for radar – guided technology. He has published more than 20 papers.

Email: changjun_email@sina.com

刘玉文(1966—),男,山东潍坊人,硕士,高级工程师,主 要从事末制导技术研究,已经发表论文10余篇;

LIU Yu – wen was born in Weifang, Shandong Province, in 1966. He is now a senior engineer with the M.S. degree. His research concerns the terminal guidance technology. He has published more than 10 papers.

任培宏(1966—),男,江苏扬州人,硕士,研究员,主要从事 雷达系统、雷达信号处理等方面的工作,已发表论文 10余篇;

REN Pei – hong was born in Yangzhou, Jiangsu Province, in 1966. He is now a senior engineer of professor with the M.S. degree. His research concerns radar system, radar signal processing, etc. He has published more than 10 papers.

杨 勇(1978—),男,辽宁抚顺人,博士,高级工程师,主要从事雷达系统、雷达信号处理、图像处理等方面的工作,已发表论文 10 余篇。

YANG Yong was born in Fushun, Liaoning Province, in 1978. He is now a senior engineer with the Ph.D. degree. His research interests include radar system, radar signal processing, image processing, etc. He has published more than 10 papers.