

# 机载双天线前视 SAR 系统成像分析

刘光炎, 胡学成, 林幼权

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210013)

**摘要:** 针对机载 SAR 前视模式与一般正侧视模式存在的明显不同, 详细分析了前视 SAR 的多普勒特性及其方位模糊问题。依据前视 SAR 的特性, 结合波束锐化与 RD 成像算法, 仿真得到了前视 SAR 的点目标图像, 验证了分析的正确性。

**关键词:** 前视模式; 合成孔径雷达; 多普勒频率; 方位分辨率

**中图分类号:** TN974; TN958 **文献标识码:** A

## Imaging analysis for airborne dual-antenna forward-looking SAR system

Liu Guangyan, Hu Xuecheng, Lin Youquan

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, Jiangsu, China)

**Abstract:** Based on the difference between the forward-looking mode and the side-looking mode of airborne SAR system, the Doppler properties and azimuth ambiguity of the forward-looking SAR (FSAR) mode are analyzed. According to the FSAR property, the point target image is simulated by BS and RD algorithm. The simulation proves the analysis is right.

**Key words:** forward-looking mode; SAR; Doppler frequency; azimuth resolution

## 1 引言

前视 SAR 系统是指平台的飞行方向与距离向一致、与方位向垂直的合成孔径雷达系统, 它与一般的正侧视 SAR 系统恰好相反, 成像原理也有所不同, 其平台的飞行方向与距离向一致, 造成不同方位的目标具有不同的多普勒史, 且飞行航迹两边的对称目标具有相同的多普勒特性, 即存在多普勒模糊。本文讨论了解模糊的方法和方位成像压缩的方法, 并用仿真分析验证了该方法的正确性, 得到了点目标的图像。

## 2 机载前视 SAR 的多普勒特性

### 2.1 航迹线上目标的多普勒特性<sup>[1]</sup>

建立如图 1 所示的机载斜视 SAR 坐标系, 可知其多普勒频率、多普勒调频斜率及多普勒带宽分别为:

$$f_D = 2v/\lambda \sin \alpha \sin \theta \quad (1)$$

$$f_{DR} = -2/(\lambda R_0) v^2 (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta)$$

$$\Delta f_D = 2v/\lambda \Delta \alpha \cos \alpha \sin \theta \quad (2)$$

式中  $v$  为载机飞行速度,  $\alpha$  为波束投射角,  $\Delta \alpha$  为投射方向的波束角,  $\theta$  为波束投射面与零多普勒面的夹角。

前视模式下 ( $\theta = 90^\circ$ ), 照射区航迹线上目标的多普勒频率及多普勒带宽分别为:

$$f_D = 2v/\lambda \sin \alpha \quad (3)$$

$$\Delta f_D = 2v/\lambda \Delta \alpha \cos \alpha \quad (4)$$

可见前视模式的多普勒带宽与距离向的波束角有关。而  $\Delta \alpha = \lambda/D_r$ ,  $D_r$  为距离向天线长度, 于是有:

$$\Delta f_D = 2v/D_r \cos \alpha \quad (5)$$

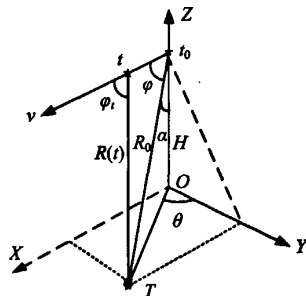


图 1 斜视 SAR 的几何模型

### 2.2 非航迹线上目标的多普勒特性

前视 SAR 不同于一般的侧视 SAR, 它是指飞行方向与距离向一致的特殊类型的 SAR, 如图 2 所示,

收稿日期: 2007-04-20

作者简介: 刘光炎(1968-), 男, 高工, 博士, 主要研究方向为 SAR 系统及信号处理等; 胡学成(1964-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为信号及 SAR 系统、成像等; 林幼权(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为 SAR 系统、动目标检测等。

在此种模式下,沿航迹线上的点才是标准的正前视,其余各点皆为前斜视,因此  $t$  时刻 SAR 到非航迹线上的目标的距离为:

$$R(t) \approx \sqrt{R_0^2 + (vt)^2 - 2R_0 vt \cos(90^\circ - \alpha)} + y^2 \quad (6)$$

式中,  $R_0$  为  $t=0$  时刻 SAR 到照射中心的距离,  $\alpha$  为前视时的投射角,  $y$  为目标与 SAR 的 Y 坐标之差, 设  $R_1 = \sqrt{R_0^2 + y^2}$ , 则雷达至目标的距离为:

$$R(t) = \sqrt{R_1^2 + (vt)^2 - 2R_0 vt \sin \alpha} \quad (7)$$

按泰勒级数展开,得:

$$R(t) = R_1 - R_0 v \sin \alpha / R_1 t + v^2 / 2 (1/R_1 - R_0^2 \sin^2 \alpha / R_1^3) t^2 + \dots \quad (8)$$

则非航迹线上点目标的多普勒质心及多普勒斜率参数为:

$$f_D = (2/\lambda R_0 v \sin \alpha) / R_1 = 2v/\lambda \sin \alpha \cos \Delta \varphi \quad (9)$$

$$f_{DR} = -2v^2/\lambda [1/R_1 - (R_0^2 \sin^2 \alpha) / R_1^3] \quad (10)$$

多普勒带宽为:

$$\Delta f_D = 2v/\lambda \Delta \alpha \cos \alpha \cos \Delta \varphi \quad (11)$$

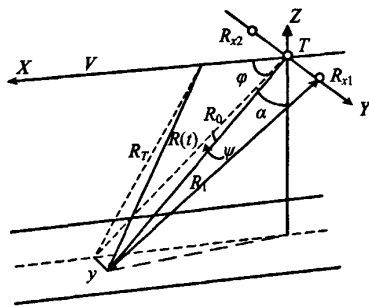
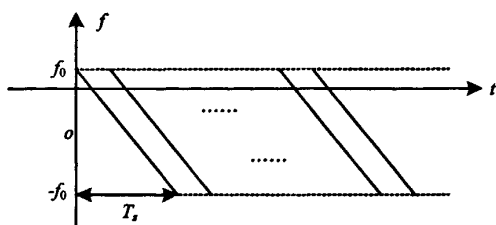


图2 机载前视 SAR 的几何模型

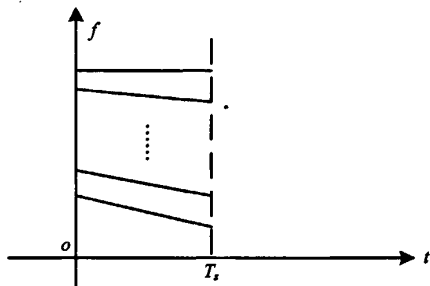
可见前斜视 SAR 的多普勒带宽不但与距离向的波束角有关,而且与方位地面距离有关。  $\cos \Delta \varphi = R_0 / R_1$ ,  $\Delta \varphi$  为  $R_0$  与  $R_1$  之间的夹角,即目标相对于雷达的方位角。

由(9)、(10)式可知,目标的多普勒参数不但与斜距、投射角有关,而且与方位向的地面距离  $y$  有关,不同的方位向地面距离有不同的多普勒频率,其多普勒历程如图3所示。图中  $T_s$  表示一个合成孔径的时间,  $t$  轴表示多普勒向时间轴,  $f$  轴表示多普勒频率轴。图3(a)为正侧视模式下的多普勒历程,图3(b)为前视模式下的多普勒历程,由图可见,前视模式下的多普勒历程与正侧视模式下的多普勒历程差别十分明显,因此,两者的方位向处理存在明显不同;对于 SAR 的正侧视模式(图3(a)),在时间-多普勒域,使用传统的匹配滤波方法就能压缩其多普勒信号,达到方位高分辨的目的;而对于 SAR 的前视模式(图3(b)),由于同一距离门内不同点目标具有不同的多普勒历程,因此,使用

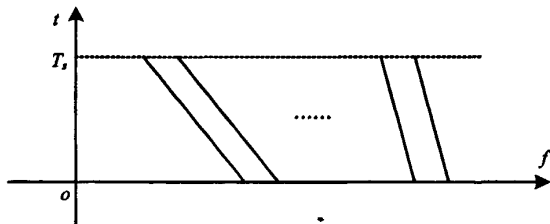
传统的匹配滤波在时间-多普勒域去压缩多普勒信号,很难达到高分辨的目的;但是当我们变换坐标系,考虑多普勒-时间域内前视 SAR 的多普勒历程(图3(c)),可以看到它与正侧视模式下点目标的多普勒历程十分类似,因此对于不同方位位置的点目标,在多普勒-时间域使用不同的方位参考函数进行匹配滤波就可以很好地压缩多普勒信号,达到高分辨的目的。



(a) 正侧视 SAR 的多普勒史



(b) 前视 SAR 的多普勒史



(c) 前视 SAR 多普勒史 (变换坐标系后)

图3 前视 SAR 的多普勒特性

### 3 前视 SAR 方位解模糊

前视 SAR 由于相对于飞行航迹两侧有对称的点目标,它们到单天线的距离相等,于是存在左右方位模糊。但是,对于双天线接收的前视 SAR 系统来说,情况要复杂一些;对于只有 2 个天线(其中 1 个天线既发射又接收)的前视 SAR 系统,见图 4,图中目标  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  关于两天线的中点线对称,目标  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  关于航迹线对称,由于目标  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  相对于  $R_{x1}$  所走的距离相同,目标  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  相对于  $R_{x2}$  所走的距离相同,因此存在方位模糊;对于 3 个天线的前视 SAR 系统(中间天线发射,两边对称的天线  $R_{x1}$ 、 $R_{x2}$  接收,见图 5),同理存在方位模糊。为便于分析,我们考虑同一距离门只有 3 个目标

的情况来讨论方位解模糊。

假设目标  $i$  的雷达散射切面为  $\sigma_i$ , 相对于同一雷达各目标的散射切面有差别。在 1 个合成孔径时间后, 2 个天线就可获得多普勒-时间域内(经傅里叶变换)3 个点目标的原始数据, 如图 6 所示。用  $\delta f$  表示不同目标对同一个天线的频率差,  $\Delta f$  表示同一目标对

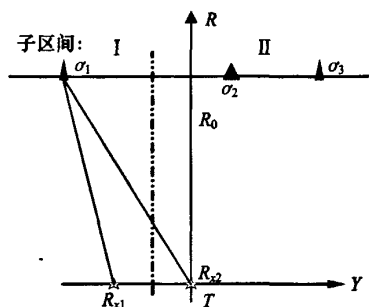


图 4 双天线前视解模糊几何图

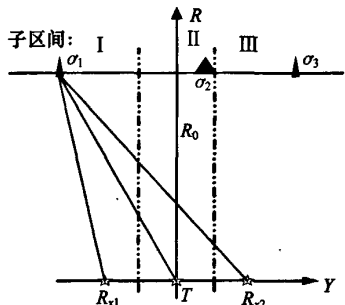


图 5 三天线前视解模糊几何图

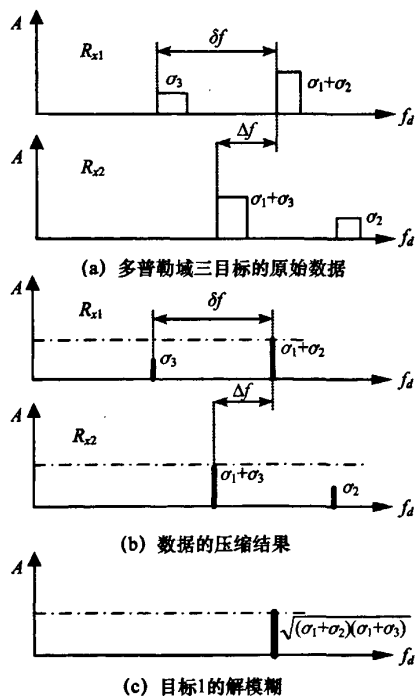


图 6 前视 SAR 的方位解模糊示意图

不同天线的频率差, 由图 4~5 知, 目标 1、2 相对于  $R_{x1}$  是模糊的, 目标 1、3 相对于  $R_{x2}$  是模糊的, 如图 6(a) 所示; 经方位压缩后表示为图 6(b), 此时并未解除方位模糊, 当将  $R_{x2}$  的方位压缩数据向右移动, 使  $\sigma_1 + \sigma_2$  和  $\sigma_1 + \sigma_3$  在同一个位置上, 然后将二者相乘并开方, 就可得到  $\sigma_1$ , 见图 6(c), 当然要求  $\sigma_1 \gg \sigma_2, \sigma_3$ , 在实际情况中这是可以得到满足的, 即对不同的天线, 选择大的  $\sigma_i$ 。

$$\sigma_1 \approx \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (12)$$

同理, 可以得到  $\sigma_3$  和  $\sigma_2$ 。从以上分析可知, 该方法解除方位模糊并不完美, 但是却很有效。

#### 4 前视 SAR 的方位压缩<sup>[2-3]</sup>

方位压缩前, 假设距离压缩已完成, 且距离徙动、雷达平台的扰动已进行了补偿, 雷达发射与接收天线在任何时候都覆盖同一区域, 则距离压缩后的信号可表示为:

$$s(\tau, t) = A(\tau) \exp(-j2\pi R(t)/\lambda) \quad (13)$$

式中  $\lambda$  为电磁波波长,  $R(t)$  为收发双程距离,  $A(\tau)$  为距离压缩后的幅度项。方位压缩就是在一个合成孔径内, 用匹配滤波对(13)式的信号进行压缩。

如前所述, 对于前视 SAR 模式, 位于同一距离门、不同方位位置的目标具有不同的多普勒史, 因此, 不同方位位置的目标应使用不同的方位参考函数来压缩其多普勒史。但这将带来巨大的计算量, 实际应用中为了节约计算时间, 在多普勒-时间域, 将同一距离门的原始数据分成多个子部分(多普勒锐化), 每一子部分产生一个匹配参考函数进行相关匹配压缩, 然后将每一子部分的压缩结果合并成整个压缩结果, 完成方位压缩。由此可见, 双天线接收前视 SAR 的方位压缩是将方位向的波束先进性锐化(锐化比由实际的计算复杂度决定), 再通过匹配滤波来实现的。可见, 此种算法有别于文献[1~2]所提出的方法, 可以大大减少成像时间, 提高成像效率。

#### 5 仿真试验

使用波束锐化和 RD 算法, 结合方位解模糊, 使用图 7 所示的流程, 本文对机载 SAR 系统进行了点目标的仿真试验, 仿真参数为: 雷达至点目标的距离为 7150m, 飞行速度为 200m/s, 波长为 0.03m, 飞行方向采样点数为 8192, 天线间距为 10m, 脉冲重复频率为 1500Hz, 带宽为 100MHz。

仿真时, 在多普勒域将同一距离门的原始数据分成 16 个子部分, 取 16 个匹配参考函数用于方位压缩, 人为地设置一强反射点, 其对称的是弱(下转第 41 页)

电磁环境信息可视化还不够,另外还要求电磁环境可视化系统在做出正确的态势估计后,给出几套辅助决策方案,其中应包括雷达使用、电子对抗措施、兵力机动等方面的几套备选方案,供指挥员选择,这样才能真正节省时间,争取主动。

(5)准确显示。战时能准确显示、评估出战场的电磁环境态势;平时能模拟出逼真的战场电磁环境,供指挥员和操作员训练。

## 5.6 网络服务

网络服务主要完成两种功能:一是网络通信,即实现数据的收发、传输;二是实现简单的网络管理。

## 6 结束语

随着电子技术在军事领域的广泛应用,军事电子

(上接第 34 页)反射模糊点,经解方位模糊后,压缩得到点目标的图像。图 8 是使用本文算法对点目标的成像结果图,由图可见,该方法能对点目标进行有效成像,成像精度较高。

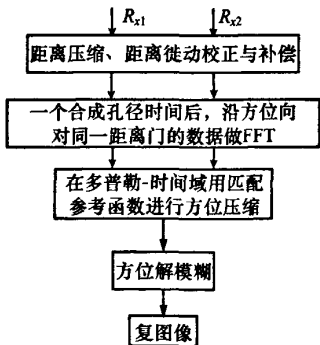


图 7 双天线接收前视 SAR 成像处理流程图

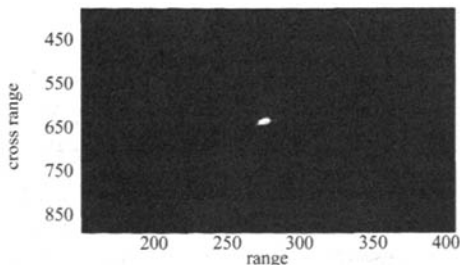


图 8 前视 SAR 点目标成像

## 6 结束语

前视 SAR 与一般正侧视 SAR 成像原理有所不同,其平台飞行方向与距离向相一致,因此,前视 SAR 的多普勒性质、系统参数有其特殊性。前视 SAR 存在方位

装备的种类将更加繁多,电磁信号将更加密集,作战空间的电磁环境将更加复杂。能否掌握电磁频谱的控制权、科学有序地使用频率、使各种武器装备合理使用、形成一个统一的整体,将直接影响战争的胜负。因此,只有加强装备使用中的无线电管理,强化频率的有序使用,才能最大限度地避免电磁环境的恶化和电磁干扰的产生,提高总体作战能力。■

### 参考文献:

- 1 沈国勤.电磁频谱管理技术构架体系探析[J].中国无线电, 2006(4):20-24.
- 2 王英志,章新华,张新杰.战场电磁环境可视化研究[J].现代防御技术,2004(6):38-42.

向模糊问题,依据目标特性能较好地解决方位模糊,结合不同的成像算法,利用多普勒滤波分组的方法可以大大提高成像的进度,得到较高质量的目标图像。

仿真成像试验证明前视 SAR 成像是可以实现的, 成像精度较高, 但与其他高精度成像方法<sup>[4-7]</sup>相比, 成像精度相对欠佳, 因此, 还需要进一步优化系统配置、研究高精度成像算法。

### 参考文献:

- 1 公峨,刘光炎.前视 SAR 系统的方位分辨率特性[J].信号处理,2003(8).
- 2 Dai Shengli, Liu Min, Wiesbeck W. The latest development of high resolution imaging for forward looking SAR with multiple receiving antennas [R]. Proc. IEEE, GRS. Symp., IGARSS'2001, USA, 2001.
- 3 Dai Shengli, Wiesbeck W. System configuration and processing method for forward looking SAR with two receiving antennas [R]. Proc. IEEE, GRS. Symp., IGARSS'99, Hamburg, Germany, 1999.
- 4 Sutor T, Witte F, Moreira A. A new sector imaging radar for enhanced vision-SIREV[J]. Proceeding of SPIE, 1999, 3691: 39-47.
- 5 Soumekh M. Synthetic aperture radar signal processing with Matlab algorithms[M]. Prentice-Hall, New Jersey, 1999.
- 6 Davison GW, Cumming I. Signal properties of spaceborne squint-mode SAR[J]. IEEE Trans. GRS, 1997, 35(3): 611-617.
- 7 Mittermayer J, Wendler M, Krieger G, et al. Data processing of an innovative forward looking SAR system for enhanced vision[R]. Proc. of EUSAR 2000, Munich, Germany, 2000.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>