直升机机载新体制成像探测技术研究

孟自强*，韩晓东，李晓明
航空工业雷华电子技术研究所，江苏 无锡 214063

摘　要：随着中国陆军航空兵直升机战场监视及火控打击能力要求的提高，战场区域多角度观测成像的实际工程应用需求愈加迫切，需要发展直升机机载新体制成像探测技术。针对实际作战应用需求，具体探究了直升机机载全景合成孔径雷达(SAR)、有人／无人协同前视SAR、直升机机载三维SAR成像等新体制成像探测技术。从技术角度具体介绍了其工作原理及技术发展，指出在未来战争中的应用前景及作战使用方式，并探讨了该技术在直升机平台上应用存在的难点。

关键词：直升机；新体制SAR；成像探测；作战使用；应用前景

中图分类号：TN957　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.05.074

未来战争将是在包括天、空、地、海和电磁等多维度、一体化环境下进行的体系化作战，具备信息多源化、环境复杂化、网络实时化、平台多样化等特点。中国陆军航空兵（简称陆航）直升机作为系统作战网络中的重要节点之一，执行战场监视、信息共享、指挥控制、火控打击等多种任务，是作战体系中夺取超低空制空权，实现在“一树之高”对敌地面、低空、超低空目标打击的重要力量[1]。

直升机的定位和作战任务要求机载雷达必须具备空空、空地、空海、地图测绘、成像、识别等多种功能。陆航直升机经常面对空中、地面及海面目标等复杂目标，为保证对整个战区目标环境的实时动态监控，需要对空中和地面或海面目标进行同时探测，完成复合多任务。空地探测是直升机雷达多功能探测中的重要功能，需要在复杂环境下进行高分辨成像，实现对地面建筑、桥梁、指挥中心等关键目标的精确聚焦。合成孔径雷达（SAR）[2,3]作为一种主动微波成像系统工具，可实现全天时、全天候、远距离成像，距离向通过发射大时带信号及脉冲压缩技术实现高分辨，方位向通过载机运动合成虚拟孔径及相干累加实现高分辨，从而提供二维高分辨率图像。因此，陆航直升机需要SAR这种微波成像工具在复杂环境下完成空地探测任务。

在对地探测模式下，传统的SAR成像一般工作在侧视模式，仅能实现对载机飞行航线左右两侧场景的高分辨成像，但对航向前后方，尤其对正前方感兴趣区域不具备高分辨二维成像能力，存在固有成像盲区[4]。而现代战争快速变化的实际作战环境中，除传统侧视、斜视成像功能外，对战场全方位、多角度信息快速及时获取的应用需求也越来越迫切，如火控雷达需要对其正前方待攻击目标区域进行实时监视，战场监视雷达需要获取载机周围各个方向的目标动态，目标高程信息的获取可为目标精确打击提供更为丰富的辅助参考数据。因此，需要针对具体作战应用需求发展直升机平台的新体制成像探测技术。

本文针对陆航直升机实际作战应用需求，从工程应用角度探究了直升机机载全景SAR、有人/无人协同前视SAR、直升机机载三维SAR成像等新体制SAR成像技术。首先对其工作原理进行介绍，分析了国内外发展现状；然后针对该技术在直升机平台在战场的应用前景及作战使用方式进行了探讨，并指出了其在直升机平台具体实现的技术难点。

1 直升机机载全景SAR成像技术

直升机机载全景SAR成像是一种基于旋转天线的新型合成孔径雷达成像技术[5,6]。将天线安装在直升机旋翼叶片的端部或者固定在旋翼上方的刚性支架上，利用叶片的旋转运动形成合成孔径得到高分辨图像，实现目标探测和目标定位。该成像技术的空间几何模型如图1所示，雷达天线安装于长度为L、角速度为ω的旋转结构端部，通过

收稿日期：2018-04-10；　退修日期：2018-04-19；　录用日期：2018-04-26
基金项目：航空科学基金（2015ZD07006）
* 通信作者 . Tel.：0510-85707381　E-mail：mengziqiang@hotmail.com
引用格式：Meng Ziqiang, Han Xiaodong, Li Xiaoming. Study on imaging technology for new helicopter-borne Synthetic Aperture Radar [J].Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (05): 74-78. 孟自强，韩晓东，李晓明．直升机机载新体制成像探测技术研究 [J]. 航空科学技术，2018，29 (05)：74-78.

向与垂直方向成 θ 的方向发射波束，借助匀速旋转运动在地面形成 360° 的波束脚印，从而完成目标场景回波录取和成像。该成像模式不需要直升机平台的运动就可以完成周围 360° 全景成像，具有高时空分辨率、短重访周期、成像范围大等特点，适用于直升机在悬停状态下对战场区域的实时监视。

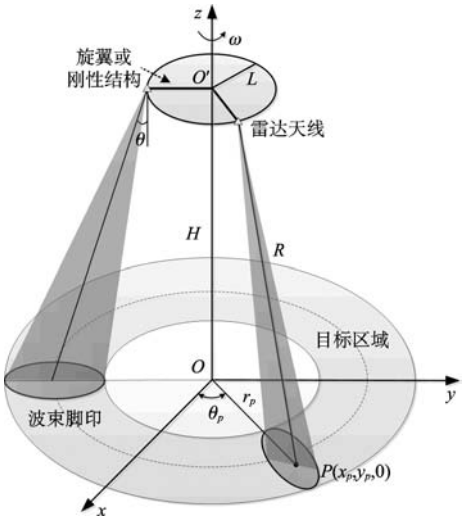

图 1　直升机机载全景 SAR 成像空间几何模型

Fig.1　Geometry model of helicopter-borne overall-view SAR imaging

全景 SAR 成像雷达的概念最早由德国宇航局提出[5]，从 20 世纪 90 年代开始，全景 SAR 的相关理论开始初步研究。1999 年，欧洲直升机公司和德国的多尼尔公司共同合作研制出了第一台样机——Heliradar 毫米波引导与防撞雷达，并进行了外场飞行试验。飞行试验验证了雷达系统在大雾、降雨和降雪等恶劣的气候环境中具有危险物探测和告警功能，并获得了高分辨的 SAR 图像[1]。

从作战使用角度讲，直升机机载全景 SAR 成像技术未来可应用于战场监视雷达。在直升机悬停状态下，可根据待探测目标区域与载机的距离来调整载机高度和波束下视角大小；由于方位向分辨率取决于合成孔径长度，根据实际分辨率要求设置方位向波束宽度和旋转角速度大小。

基于以上分析，针对现有直升机平台，要实现直升机机载全景 SAR 成像，存在如下技术难点：

(1) 天线旋翼支架气动性能分析与设计

要在现有直升机平台实现全景 SAR 成像，需要将雷达天线安装在旋翼叶片端部或旋翼上方的刚性支架上。若将天线直接安装于旋翼叶片，会影响原有旋翼气动性能，安装于旋翼上部的固定刚性支架相对易于实现，但仍需对安装后的气动性能进行分析和设计。

(2) 大方位重构角下的数据处理

与传统直线 SAR 不同，该成像构型中波束运动轨迹为圆形曲线，即天线随着直升机的旋转形成方位向圆形合成孔径。此时，SAR 成像的方位高分辨率依赖于大的方位重构角即波束旋转角，而大的重构角需要将斜距历程展开至高阶形式，导致回波二维频谱难以获取，回波数据处理难度大。

(3) 高效成像算法设计

基于目前技术研究现状，现有的直升机机载全景 SAR 成像算法往往存在效率低、计算量大以及方位分辨率低等问题，难以直接应用于实际工程，设计出高效的成像算法需求迫切。

2 有人 / 无人协同前视 SAR 成像技术

相对于传统单基 SAR 模式，双基前视 SAR[7] 作为一种新型双基成像模式，结合了双基平台分置、几何配置灵活等优势。其中一个平台前视工作、两平台协同飞行可为成像提供足够的多普勒带宽，实现前视二维成像，能够有效弥补单基 SAR 无法对正前方目标二维成像的缺陷[8, 9]。面对日益复杂的现代作战环境，借助双基前视 SAR 成像体制，将有人直升机和无人直升机协同构成双基前视 SAR，两运动平台通过波束对准，同时指向目标区域，可有效实现正前方目标区域探测、定位和精确打击，同时隐蔽性好、抗干扰能力强。图 2 给出了有人 / 无人协同前视 SAR 成像的几何模型。其中，无人直升机作为接收机，前视接收目标场景回波；有人直升机作为发射机，工作于侧视或斜视模式，发射电磁波，同时对无人直升机进行指挥控制。

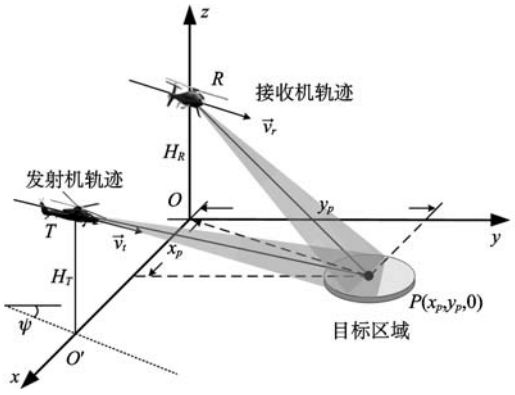

图 2　有人 / 无人协同前视 SAR 成像几何模型

Fig.2　Geometry model of cooperative forward looking SAR imaging of manned/unmanned aerial vehicles

双基前视 SAR 早期由德国应用科学研究所学者提出，在对其前视二维成像的可行性分析的基础上利用单站固定式双基前视模式开展了探索性试验，获取了该构型下的双基前视二维图像[10]。之后相关学者对星－机联合双基前视 SAR 构型的特性进行了理论分析，并完成了以 TerraSAR-X 卫星作为发射机、安装在 C-160 运输机上的相控阵多功能成像雷达（PAMIR）作为接收平台的星－机联合双基前视 SAR 试验，获得了清晰的二维 SAR 图像[11]。目前，国内相关高校和研究单位也进行了研究，但大多针对固定翼飞机平台展开，并无针对直升机平台的相关报道。

20 世纪初，美国针对“阿帕奇”直升机开展了有人/无人协同探测技术研究，并于 2009 年和 2011 年分别完成了“阿帕奇”Block III 搭载“无人机战术通用数据链组件”（UTA）首飞和远程遥控“灰鹰”无人机的试验，试验中，“阿帕奇”低空指挥，无人机高空侦测，获得了地面的高低两种视角图像[12]。

从作战使用角度讲，有人/无人协同前视 SAR 可利用无人直升机深入敌方前线，前视接收目标回波信号，完成前视 SAR 成像；有人直升机工作于安全敌后方，用于指挥无人直升机，通过信息共享、任务综合和资源优化，协同完成目标探测与识别、态势评估、战术决策、武器发射与制导等作战过程，缩短杀伤链、提高生存能力和综合任务效能。

基于以上分析，要实现有人/无人协同前视 SAR 成像，存在如下技术难点：

（1）最优航迹规划与协同

双基构型下，成像分辨率受收/发平台与目标之间双基夹角的影响。实际作战场景中，需要根据作战任务需求，在保障成像分辨率和我方安全前提下进行最优航迹规划，按成像要求进行双基前视的构建与协同飞行。

（2）航迹调制耦合条件下双基运动补偿

与单基 SAR 运动补偿不同，对于收、发双基平台机动飞行的非理想航迹，其运动误差均体现在回波数据中，引入耦合相位调制信息，反解并补偿运动误差是成像的必要前提。

（3）二维空变下的成像算法设计

相较于传统单基 SAR 存在的一维距离空变，双基前视 SAR 由于运动速度和方向的差异性，除固有的距离空变外，增加了方位空变特性，二维空变特性导致成像算法设计难度增大。

3 直升机机载三维 SAR 成像技术

传统 SAR 成像仅可获取航迹方向（方位向）和波束视线方向（距离向）的二维高分辨率图像，无法获取目标的高度维信息。而三维 SAR 成像系统在跨航迹方向安置多个收发天线，并通过虚拟合成大量的虚拟阵元以满足第三维采样率需求，从而可实现航向—跨航向—高度向的三维成像[13]。其成像几何模型如图 3 所示，其中，长虚线表示载机航迹方向，即 x 方向；垂直于航迹方向为跨航向，即 y 方向，雷达天线沿该轴方向分布；雷达波束视线方向即距离向为图中点虚线；图中短虚线表示与距离向和跨航向垂直的斜高向。借助沿跨航向不同天线阵列与目标的相位历程差异，可反解出目标的高度信息。从信号处理流程上，分别将回波变到距离向—方位向二维频域及距离向—斜高向二维频域，并进行相应的脉冲压缩和距离徙动校正，即可实现距离向—方位向—斜高向三维分辨，然后根据成像几何关系，经几何形变校正便可得到沿航向—跨航向—高度向的三维图像。

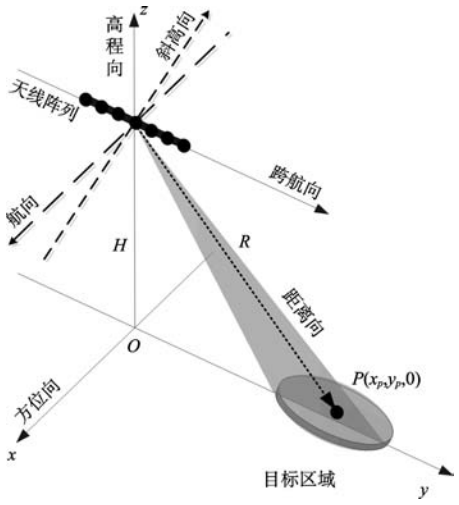

图 3 三维 SAR 成像几何模型

Fig.3 Geometry model of three dimensional SAR imaging

德国应用自然科学研究协会（FGAN）针对三维 SAR 成像技术开展了较多研究。目前，比较典型的有机载下视三维成像雷达（ARTINO）和多功能相控阵成像雷达（PAMIR）。ARTINO 工作于 Ka 波段，搭载在无人机平台上，雷达天线分布在机翼两侧，该雷达具备 0.2m×0.2m×0.2m 的三维成像能力[14, 15]；PAMIR 工作于 X 波段，最高分辨率可达 0.1m，5 组平行通道使 PAMIR 具备三维成像功能。国内中科院针对三维 SAR 成像系统也开展了相关技术研究。

从作战使用角度讲，针对直升机平台，可将三维 SAR 成像思想与全景 SAR 成像技术进行结合，将全景 SAR 雷

达天线改装成沿垂直运动方向的天线阵列，即雷达天线阵列按与刚性支架垂直的方向分布，运动过程中天线阵列始终与航迹方向垂直，如此便可在方位向和距离向之外的第三维形成基线，实现全景三维 SAR 成像探测。在跨航迹方向安置线性多输入多输出（Multiple Input and Multiple Output，MIMO）天线阵列是一种较为理想的三维 SAR 天线方案。

基于以上分析，要实现直升机机载三维 SAR 成像，存在如下技术难点：

（1）三维 SAR 成像天线阵列构型设计

斜高向分辨率是利用垂直航向线阵所获取，受机翼或直升机平台体积限制，三维 SAR 系统阵元数量有限，需要在现有 MIMO 阵列基础上基于直升机平台设计天线阵列构型，以获取更多目标信息，提高斜高向分辨能力。

（2）三维 SAR 成像算法设计

相对传统二维 SAR 成像算法，三维成像过程需要同时处理距离向—方位向和距离向—斜高向二维数据，数据形式更为复杂，且直升机平台振动会对数据处理造成影响，因此，需要针对直升机平台设计快速高效的成像算法。

4 结束语

全景 SAR、有人 / 无人协同前视 SAR 以及三维 SAR 可满足陆航直升机对作战区域多角度成像探测的需求。本文针对以上三种新体制 SAR 成像技术在直升机平台的应用前景和作战使用进行了具体分析和探讨，指出了平台实现的技术难点，为后续技术研究提供一定的理论指导。 AST

参考文献

[1] 何晓晴，徐永胜，赵勇 . 国外武装直升机火控雷达发展综述 [J]. 电讯技术，2008，45（2）：26–31.
He Xiaoqing，Xu Yongsheng，Zhao Yong. An overview of the development of fire-control radar for attack helicopters [J]. Telecommunication Engineering，2008，45（2）：26–31.（in Chinese）

[2] Cumming I G，Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data：algorithms and implementation[M]. Norwood，MA：Artech House，2004.

[3] 保铮，邢孟道，王彤 . 雷达成像技术 [M]. 北京：电子工业出版社，2005.
Bao Zheng，Xing Mengdao，Wang Tong. Radar imaging technology [M]. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2005.（in Chinese）

[4] Sun G C，Jiang X W，Xing M D，et al. Focus improvement of highly squinted data based on azimuth nonlinear scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2011，49（6）：2308–2322.

[5] Kreitmair S W，Wolframm A P. HeliRadar a rotating antenna synthetic aperture radar for helicopter all weather operations[C]// Proceedings of the AGARD–59 th Guidance and Control Panel，1994：56–62.

[6] Kreitmair S W，Klausing H，Wolframm A P，et al. HeliRadar：a synthetic aperture radar with rotating antennas [C]// Proceedings of the European Microwave Conference，Madrid，1993：972–974.

[7] Wu J，Yang J，Huang Y. Bistatic forward：looking SAR theory and challenges[C]// Proceedings of IEEE Radar Conference，2009.

[8] Yang J，Huang Y，Yang H，et al. A first experiment of airborne bistatic forward：looking SAR：preliminary results [C]//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium（IGARSS），Melbourne，2013：4202–4204.

[9] Espeter T，Walterscheid I，Klare J，et al. Bistatic forward-looking SAR：results of a spaceborne–airborne experiment [J]. IEEE Geoscience Remote Sensing Letters，2011，8（4）：765–768.

[10] Balke J. Field test of bistatic forward：looking synthetic aperture radar [C]// Proceedings 2005 International Radar Conference，Arlington，Virginia，USA，2005：424–429.

[11] Walterscheid I，Espeter T，Klare J，et al. Bistatic spaceborne：airborne forward：looking SAR [C]// Proceedings European Conf. Synthetic Aperture Radar EUSAR，Aachen，Germany，2010：986–989.

[12] 喻光正 . 直升机雷达的发展 [J]. 雷达科学与技术，2003，1（2）：65–68.
Yu Guangzheng. Review for helicopter radar development [J]. Radar Science and Technology，2003，1（2）：65–68.（in Chinese）

[13] Budillon A，Evangelista A，Schirinzi G. Three-dimensional SAR focusing from multipass signals using compressive sampling[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing，2011，49

(1)：488–499.

[14] Klare J，Weiss M，Peters O，et al. ARTINO：a new high resolution 3D imaging radar system on an autonomous airborne platform[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium，2006：3842 –3845.

[15] Klare J，Cerutti Maori D，Brenner A，et al. Image quality analysis of the vibrating sparse MIMO antenna array of the airborne 3D imaging radar ARTINO[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium，2007：5310 – 5314.

作者简介

孟自强（1988— ） 男，博士，工程师。主要研究方向：雷达信号及数据处理。

Tel：0510–85707381

E-mail：mengziqiang@hotmail.com

韩晓东（1981— ） 男，博士，高级工程师。主要研究方向：雷达系统设计及信号处理。

李晓明（1981— ） 男，博士，研究员。主要研究方向：雷达系统设计及信号处理。

Study on Imaging Technology for New Helicopter-borne Synthetic Aperture Radar

Meng Ziqiang*，Han Xiaodong，Li Xiaoming

AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute，Wuxi 214063，China

Abstract: With the increasing demand of battlefield surveillance and fire control attack for army aviation helicopters，the practical engineering application demand of multi-angle observation and imaging in battlefields becomes more and more urgent. Thus it is necessary to develop helicopter-borne new system imaging detection technologies. In view of practical combat application requirements，some new Synthetic Aperture Radar（SAR）imaging technologies were explored in detail，such as helicopter-borne overall-view SAR，cooperative forward looking SAR of manned/unmanned aerial vehicles，and helicopter-borne three dimensional SAR. Their work principles and technical development were introduced from the technical perspective. The application prospect and operational mode in the future battle were pointed out，and the technical difficulties existing in the implementation on the helicopter platform were also discussed.

Key Words: helicopter；new system SAR；imaging detection；operational mode；application prospect

Received: 2018–04–10； **Revised:** 2018–04–19； **Accepted:** 2018–04–26

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China（2015ZD07006）

***Corresponding author.Tel.:** 0510–85707381 **E-mail:** mengziqiang@hotmail.com