

文章编号: 2095-4980(2015)01-0040-06

## 星载聚束 SAR 系统顶层参数优化设计

邓海涛, 董友彤, 王金峰

(中国电子科技集团公司 第 38 研究所, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 聚束模式是合成孔径雷达(SAR)的一种比较特殊的工作方式, 可以获得普通条带模式难以达到的超高分辨率图像。本文以高分辨率星载聚束 SAR 系统顶层参数设计为主要出发点, 结合详细的系统设计及仿真分析过程, 分析了聚束模式下大距离徙动、脉冲重复频率(PRF)选取、天线方向图设计等多方面的系统设计影响因素, 能够为星载聚束 SAR 顶层参数设计提供有效参考。

**关键词:** 合成孔径雷达; 高分辨率; 聚束模式; 顶层参数设计

中图分类号: TN958

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0040

## Top-level parameters optimization design for space-borne spotlight SAR system

DENG Haitao, DONG Youtong, WANG Jinfeng

(38 Institute of CETC, Hefei Anhui 230088, China)

**Abstract:** Spotlight mode is a special mode of Synthetic Aperture Radar(SAR), which can achieve higher resolution image than the ordinary strip-mode SAR. Starting from the top-level parameters design of high resolution space-borne spotlight SAR system, combining with the detailed analysis of system design and simulation process, many influence factors including long migration distance, Pulse Repetition Frequency(PRF), antenna pattern on spotlight SAR system design are analyzed. This work can provide a reference for space-borne spotlight SAR top-level parameters design.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar; high resolution; spotlight mode; top-level parameters design

在合成孔径雷达(SAR)系统中, 条带模式和聚束模式是合成孔径雷达的 2 种最常用的成像工作方式。条带模式能够进行连续大面积成像, 但受天线增益等方面的限制, 系统的方位向分辨率不能随着天线尺寸的减少而任意提高<sup>[1]</sup>。为了适应高分辨率成像的要求, 后来产生了聚束模式, 此模式通过控制雷达天线波束方向, 增加某一特定小区域的波束覆盖时间, 从而实现普通条带模式难以达到的超高分辨率图像<sup>[2]</sup>, 便于后期图像目标解译提取及变化检测处理等应用。

顶层参数设计在 SAR 系统设计中相当关键, 它决定了整个系统的工作方式、系统指标、系统时序、成像质量。因此, 在系统设计之初必须进行细致深入的仿真分析及优化设计。本文从高分辨率星载聚束 SAR 顶层参数设计出发, 结合系统设计与仿真, 充分考虑多方面的顶层参数设计影响因素, 主要包括聚束 SAR 的实现原理、距离徙动对系统时序及信噪比的影响、脉冲重复频率(PRF)的选择<sup>[3]</sup>与天线方向图的设计对系统模糊度的影响。

### 1 星载聚束 SAR 顶层参数设计与仿真

星载聚束 SAR 顶层参数主要包括分辨率、系统时序、波束转动角、波束入射角、PRF、信号带宽、脉冲宽度、数据率、系统灵敏度<sup>[4]</sup>、模糊度、天线方向图等, 它们之间相互关联和影响, 需要合理统筹设计。下面结合系统仿真过程, 充分考虑参数设计的主要影响因素, 给出星载聚束 SAR 顶层参数设计思路。

#### 1.1 聚束 SAR 分辨率分析

聚束模式合成孔径雷达是一种特殊的雷达工作模式, 可以获得条带模式 SAR 难以达到的超高分辨率图像。它通过控制雷达天线波束方向, 使其连续指向某一特定小区域, 从而使回波信号相干积累时间骤增, 实现较高的

收稿日期: 2014-03-15; 修回日期: 2014-04-28

基金项目: 国家高技术发展计划“863”基金资助项目(2011AA120404)

方位分辨率;通过提高发射线性调频信号的带宽,实现距离向高分辨率,从而获得区域内高几何分辨率的微波遥感图像<sup>[5]</sup>。

聚束工作模式的距离分辨率与条带式距离分辨率相同。理论上,距离分辨率为  $c/(2B_r \sin \eta)$ , 其中  $c$  为光速,  $\eta$  表示本地入射角,  $B_r$  表示雷达发射带宽。下面从多普勒历程的角度分析聚束工作模式如何实现高方位分辨率<sup>[6]</sup>。

星载 SAR 与地面目标间的斜距  $R(t)$  可表示为时间  $t$  的函数,可用如图 1 所示的星地斜距模型表示,即

$$R(t; R) = \sqrt{R^2 + (vt)^2 + 2Rvt \cos \varphi} \quad (1)$$

式中:  $R$  为  $t=0$  时的斜距;  $v$  为卫星运动的等效速度;  $\varphi$  为等效斜视角。这种距离变化关系可近似表示为  $t$  的二次函数,即

$$R(t; R) = R + \frac{\lambda}{2} \left( f_d t + \frac{1}{2} f_r t^2 \right) \quad (2)$$

式中:  $f_d = -\frac{2v}{\lambda} \cos \varphi$  为多普勒中心频率;  $f_r = \frac{2v^2}{\lambda R} \sin^2 \varphi$  为多普勒调频率。

在合成孔径时间  $T_s = \frac{R\theta}{v}$  内的多普勒带宽为:

$$B_d = f_r T_s = \frac{2v\theta}{\lambda} \sin^2 \varphi \quad (3)$$

式中  $\theta$  为聚束过程 SAR 天线相位中心的转动角度。理论上聚束工作模式的方位分辨率为:

$$\rho_a = \frac{v \sin \varphi}{B_d} = \frac{\lambda}{2\theta \sin \varphi} \quad (4)$$

可见聚束工作模式的方位分辨率主要由 SAR 天线相位中心的转动角度决定,波束转动角度越大,方位分辨率则越高。

### 1.2 距离徙动对系统时序及灵敏度的影响

由于聚束模式需要在方位向进行波束扫描,因此系统顶层设计必须考虑扫描带来的距离徙动对系统设计的影响,并进行系统损耗分析。

图 2 为某星载 SAR 系统波位选择斑马图,黑色阴影区域代表发射脉冲干扰及星下点干扰,为了规避干扰,测绘带(图中竖线)对应的回波区域必须落在斑马图可选的白色菱形区域<sup>[7]</sup>。

为方便参数分析与计算,绘制图 3 所示的聚束 SAR 三维简易几何关系图。如图所示:  $R1$  表示波束转动过程中的最小作用距离,  $R4$  表示波束转动过程中的最大作用距离,  $\theta$  为方位向波束扫描斜视角。可见:在系统波位参数设计时应充分考虑大距离徙动的影响,有效避开发射脉冲干扰和星下点干扰。

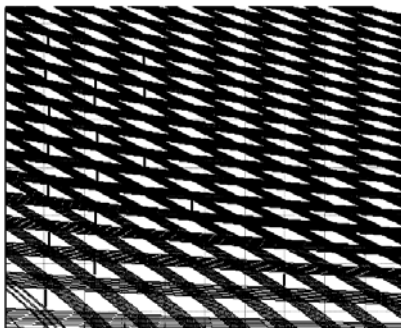


Fig.2 Zebra map  
图 2 斑马图

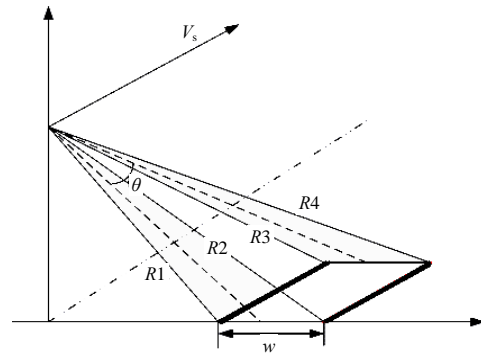


Fig.3 3-D imaging geometry for spotlight SAR  
图 3 聚束 SAR 三维几何关系

下面通过仿真研究距离徙动对系统时序设计的影响,设卫星轨道高度 530 km; 飞行速度 7 600 m/s; 波长 0.04 m; 中心入射角  $21^\circ \sim 50^\circ$ ; 方位向天线尺寸 5 m; 分辨力 0.3 m; 观测带宽度: 15 km(方位)  $\times$  15 km(距离)。

各波位下不同入射角对应的距离徙动和 PRF 选取情况如图 4、图 5 所示。

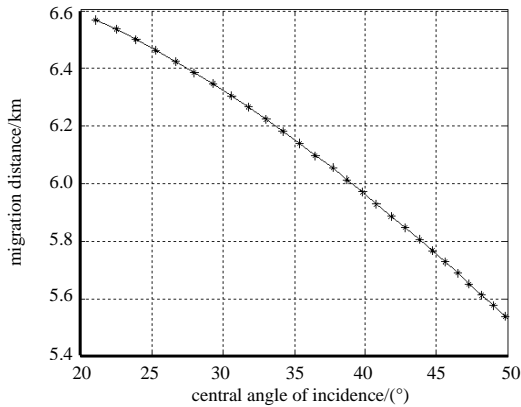


Fig.4 Migration distance under different beam positions  
图 4 各波位徙动距离

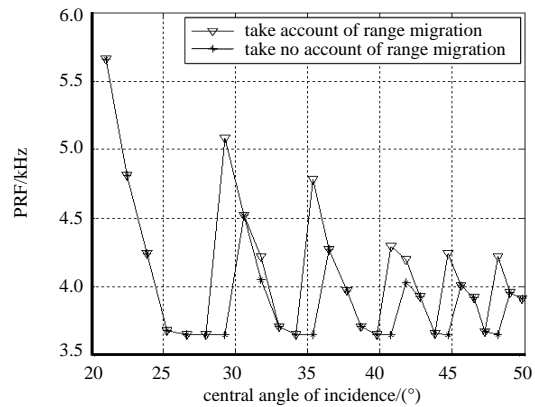


Fig.5 PRF under different beam positions  
图 5 各波位 PRF 设计

从仿真结果可以看出，聚束模式产生了大距离徙动现象，此时不能按照传统条带模式的方法进行时序设计，应进行相应的优化。此外，大距离徙动对 SAR 系统灵敏度也将带来一定的影响。系统灵敏度通常以等效噪声后向散射系数( $NE\sigma_0$ )表示<sup>[4]</sup>，SAR 图像信噪比要求越高， $NE\sigma_0$ 要求越低。根据 SAR 系统灵敏度<sup>[3]</sup>的计算方法，若系统最大方位向扫描角度为  $\pm 9^\circ$ ，此时系统灵敏度损失 0.161 4 dB；若系统最大方位向扫描角度为  $\pm 39^\circ$ ，此时系统灵敏度损失将达到 3.28 dB。

### 1.3 脉冲重复频率选取对系统模糊度的影响

雷达的模糊问题<sup>[8]</sup>是雷达的系统问题，它作为一种系统噪声影响雷达成像的结果，是衡量雷达性能的重要标志。在星载 SAR 系统参数设计过程中，PRF 的设计是首要解决的问题。PRF 的选择既要避开发射脉冲和星下点回波的干扰，又要考虑到距离模糊度和方位模糊度的指标要求。较高的 PRF 会增加距离模糊度和限制测绘带宽，因此 PRF 不能取得过高；较低的 PRF 又会使方位模糊度增加，两者之间应权衡考虑。在此主要研究 PRF 对方位模糊度的影响。

图 6 所示为聚束模式 SAR 方位模糊度示意图。聚束模式 SAR 与传统条带模式 SAR 的最大区别在于波束指向的变化。传统条带模式下，天线波束指向基本不发生改变；而对于聚束模式，雷达将不断地调整其波束指向，以保证在整个合成孔径时间内，始终将波束中心指向成像区域中心，这时雷达与成像目标之间的相对运动不能等效为天线方向图与成像目标之间的运动。由于目标和天线方向图之间不存在相对运动，因此对于成像区域中的点目标  $\sigma$  来说，其在天线方位向方向图中的位置，在整个合成孔径时间内，可以看成是固定不变的，因此该点的回波信号强度可视为常数，仅仅与其所对应的天线方向图的增益有关。

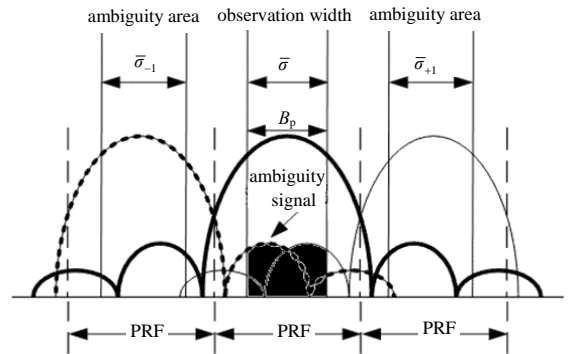


Fig.6 Spotlight mode SAR azimuth ambiguity  
图 6 聚束模式 SAR 方位模糊度示意图

同样，对其造成方位模糊的点  $\sigma_k (k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$  的回波强度也仅仅与其所对应的雷达天线方向图的增益有关，在合成孔径时间内，这些点的回波信号强度亦可视为常数。

因此，对于成像区域中的某一固定点来说，其天线方位向增益因子基本不变。由于各点的天线方向图增益不同，造成各点的回波信号强度不同，所以成像区域中方位向各点的方位模糊度已经不再相同，将受到目标对应的方位向中心频率的影响<sup>[8]</sup>。同样假定目标的散射率在整个天线方向图辐射带近似是均匀一致的，成像区内方位向各点的方位模糊度的计算可以由式(5)确定：

$$AASR(\sigma) \cong \frac{\sum_{m=-\infty, m \neq 0}^{\infty} G^2(f_\sigma + mf_0)}{G^2(f_\sigma)} \quad (5)$$

式中： $f_0$  为脉冲重复频率； $m$  为整数，一般取  $-10 \sim 10$ ，因为在此区间以外的  $m$  对方位模糊度的影响非常小；

$G$  是天线方位方向图;  $f_{\sigma}$  为目标  $\sigma$  对应的方位向中心频率。可见, 对于成像区域中不同位置的点, 方位模糊度是不尽相同的, 对于方位向基线上一系列的点, 它们的方位模糊度可以由方位模糊度函数  $AASR(\sigma)$  来度量。

下面通过仿真研究 PRF 选择对方位模糊度的影响。选择卫星轨道高度: 530 km; 飞行速度: 7 600 m/s; 波长: 0.04 m; 方位向天线尺寸: 5 m; 中心入射角:  $33^{\circ}$ ; 方位处理带宽  $B_p$ : 3 040 Hz。

从图 7 可以看到, 聚束模式下, 对于一固定的 PRF, 其方位向各点的方位模糊度是不同的, 不同的 PRF 所对应的方位模糊度曲线也是不一样的。曲线 A 中方位向各点的方位模糊性能变化较大, 视场中心点的方位模糊性能较好, 为  $-27$  dB 左右, 而视场边缘的方位模糊性能较差, 为  $-10$  dB 左右。若采用此曲线对应的 PRF 值, 将只能保证视场中心一小块区域的成像质量, 外围区域的成像质量将由于方位模糊带来的乘性噪声而迅速退化。曲线 B,C,D 的变化则相对平稳些, 整个视场内的图像质量基本趋于一致, 同时也能够满足方位模糊度小于  $-20$  dB 的要求。

为了更直观地体现方位模糊对成像的影响, 图 8~图 10 给出了在上述仿真参数下系统 PRF 为处理带宽  $B_p$  的 1.2 倍、1.3 倍、1.4 倍的地面点阵成像仿真结果。

图中, 左边为成像灰度图, 右边为方位向剖面图。通过方位向剖面图对比可以看出, PRF 为  $1.2B_p$  时, 方位向边缘混叠的模糊信号强度约为  $-25$  dB; PRF 为  $1.3B_p$  时, 方位向边缘混叠的模糊信号强度约为  $-40$  dB; PRF 为  $1.4B_p$  时, 方位向边缘混叠的模糊信号强度约为  $-44$  dB。因此在星载 SAR 系统设计过程中, 可在 PRF 必须遵循的条件下, 根据方位模糊度曲线图的变化情况, 选择合适的 PRF 来满足所需要达到的图像性能指标。

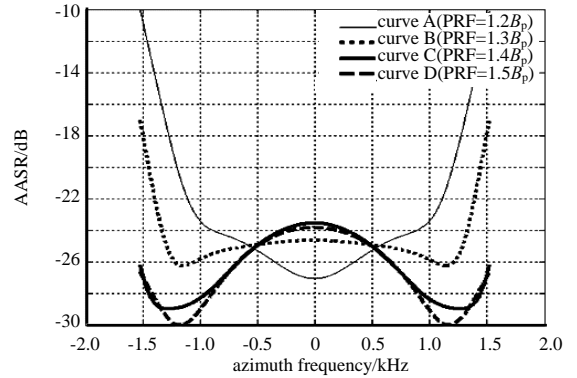


Fig.7 Azimuth ambiguity curves under different PRF  
图 7 不同 PRF 下的方位模糊度曲线

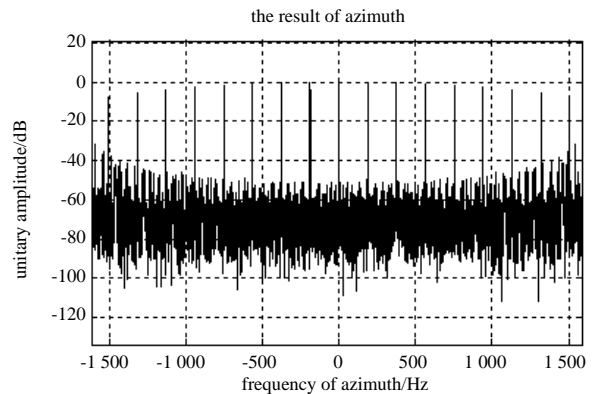
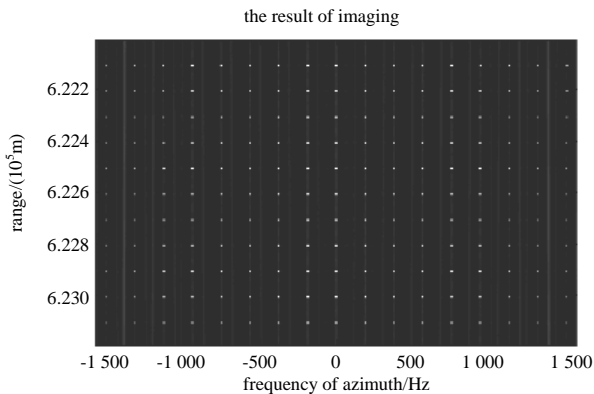


Fig.8 Imaging results(PRF= $1.2B_p$ )  
图 8 PRF 为  $1.2B_p$  时的成像结果

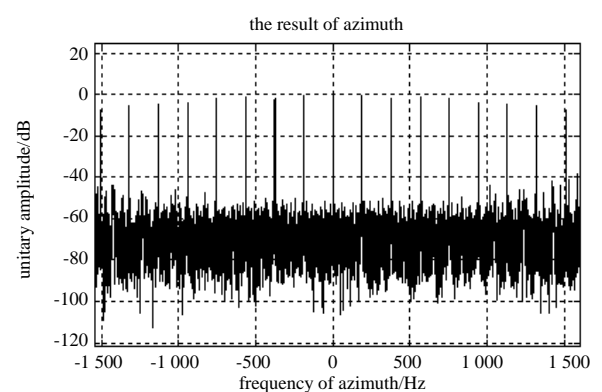
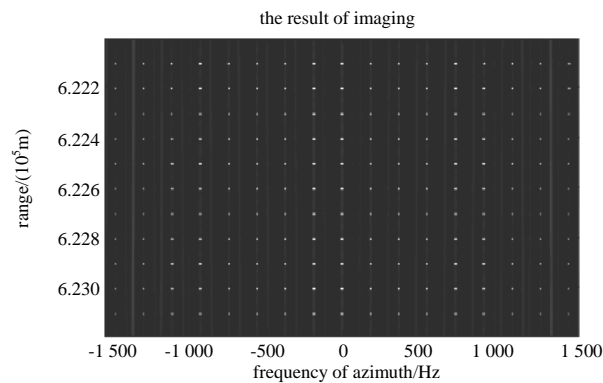


Fig.9 Imaging results(PRF= $1.3B_p$ )  
图 9 PRF 为  $1.3B_p$  时的成像结果

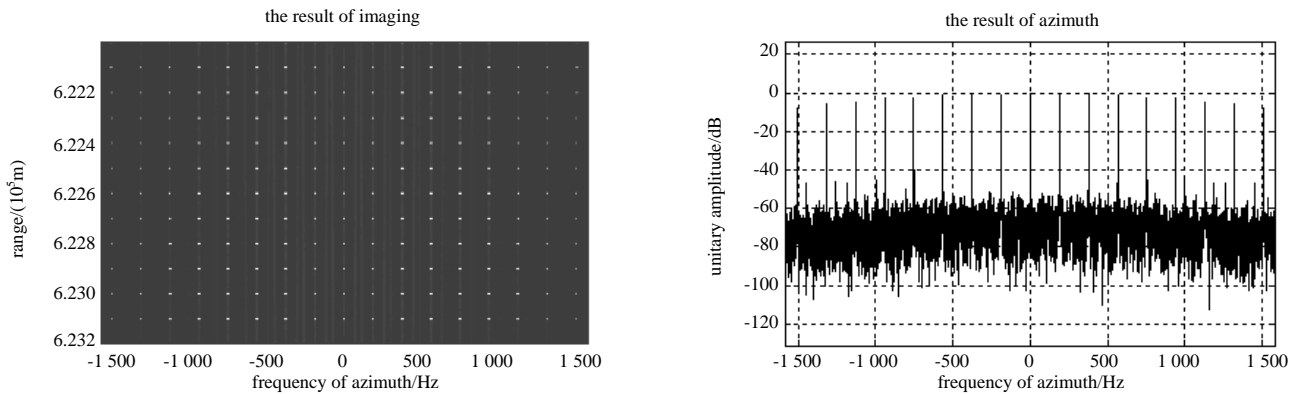


Fig.10 Imaging results( $PRF=1.4B_p$ )  
图10 PRF为 $1.4B_p$ 时的成像结果

#### 1.4 天线方向图设计对系统模糊度的影响

上面的方位模糊度仿真所用到的天线方向图是理想的辛格函数方向图,并且认为天线波束在扫描过程中天线方向图是固定不变的。然而在实际应用系统中,天线方向图要受到天线系统、姿态、误差等方面的影响和制约,天线方向图特性将发生改变,从而对模糊度造成了很大的影响。虽然方位波束扫描角的大小决定了聚束 SAR 图像的方位分辨率,但同时也限制了方位模糊度的大小。因此,在聚束 SAR 系统参数设计过程中,对于方位分辨率、方位模糊度、天线方向图三者之间的制约关系应进行折衷考虑,做到相应好的配置,符合相应的性能指标,从而达到优化设计的目的,限于篇幅这里不再详述。

## 2 结论

本文以星载聚束 SAR 系统顶层参数设计为出发点,结合详细的系统设计及仿真分析过程,充分考虑了多方面的设计影响因素,其中主要包括高分辨率的实现原理、距离徙动对系统时序及系统灵敏度的影响、脉冲重复频率的选择及天线方向图的设计对系统模糊度的影响,体现了系统顶层参数设计的细致性与严谨性,能够为星载聚束 SAR 顶层参数设计提供有效参考。

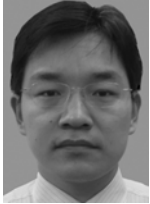
#### 参考文献:

- [1] 唐禹,王岩飞,张冰尘. 滑动聚束 SAR 成像模式研究[J]. 电子与信息学报, 2007,29(1):26-29. (TANG Yu,WANG Yanfei,ZHANG Bingchen. A study of sliding spotlight SAR imaging mode[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007,29(1):26-29.)
- [2] 陈颖颖,高阳,何永华. 星载合成孔径雷达不同工作模式下的 PRF 优化选取研究[J]. 现代电子技术, 2012,35(5):25-28. (CHEN Yingying,GAO Yang,HE Yonghua. Optimal selection of PRF for spaceborne synthetic aperture radar in different working mode[J]. Modern Electronics Technique, 2012,35(5):25-28.)
- [3] 许春蕾,宋红军. 聚束式合成孔径雷达系统设计中 PRF 的优化选取[J]. 现代雷达, 2006,28(5):1-4. (XU Chunlei,SONG Hongjun. Optimal of PRF selection in spotlight SAR system design[J]. Modern Radar, 2006,28(5):1-4.)
- [4] 盛磊,刘小平. SAR 系统灵敏度对成像质量的影响[J]. 电子测试, 2013,1(9):82-85. (SHENG Lei,LIU Xiaoping. Effects of SAR system sensitivity on imaging quality[J]. Electronic Test, 2013,1(9):82-85.)
- [5] 席龙梅,盛磊,葛家龙. 星载滑动聚束 SAR 模糊特性分析与仿真[J]. 上海航天, 2011,28(1):1-5. (XI Longmei,SHENG Lei,GE Jialong. Analysis and simulation of ambiguities on spaceborne sliding spotlight SAR[J]. Aerospace Shanghai, 2011, 28(1):1-5.)
- [6] 张福丹. 基于频率分集阵列的聚束 SAR 虚拟辐射源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(3):420-423. (ZHANG Fudan. Virtual radiation source of a spotlight SAR based on frequency diverse array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(3):420-423.)
- [7] 王玲军,周荫清,陈杰. 基于"斑马图"复用技术的分布式卫星 SAR 波位设计方法研究[J]. 宇航学报, 2006,27(6):1373-1377. (WANG Lingjun,ZHOU Yinqing,CHEN Jie. Beam position design for distributed satellite SAR based on multiplex coverage diagram[J]. Journal of Astronautics, 2006,27(6):1373-1377.)



- [8] 张永军,李彩萍. 合成孔径雷达模糊度分析[J]. 电子与信息学报, 2004,26(9):1455-1456. (ZHANG Yongjun,LI Caiping. Analysis of Synthetic Aperture Radar ambiguities[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004,26(9):1455-1456.

#### 作者简介:



邓海涛(1979-), 男, 湖北省京山县人, 高级工程师, 主要研究方向为 SAR/GMTI 信号处理系统仿真.email:denht@126.com.

董友彤(1989-), 男, 山东省梁山县人, 工程师, 主要研究方向为 SAR 信号处理系统仿真.

王金峰(1979-), 男, 山东省高唐县人, 工程师, 主要研究方向为 SAR/GMTI 信号处理系统仿真.

-----  
(上接第 39 页)

#### 参考文献:

- [1] 周文瑜,焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2008. (ZHOU Wenyu,JIAO Peinan. Technology of Over-the-Horizon Radar[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [2] 何友,修建娟,张晶炜,等. 雷达数据处理及应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2009. (HE You,XIU Jian-juan, ZHANG Jingwei,et al. Radar Data Processing with Applications[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [3] Yaakov Bar Shalom. Negative correlation and optimal tracking with Doppler measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001,37(3):1117-1120.
- [4] 毛滔,夏卫民,曲翠萍,等. 高频地波超视距雷达特点及应用研究[J]. 现代雷达, 2009,31(3):7-10. (MAO Tao,XIA Weimin,QU Cuiping,et al. A study on characteristics and applications of HF ground wave OTH radar[J]. Modern Radar, 2009,31(3):7-10.)
- [5] 胡松,柯亨玉,文必洋,等. 高频地波雷达下的多目标跟踪数据处理[J]. 武汉大学学报:理学版, 2003,49(3):391-395. (HU Song,KE Hengyu,WEN Biyang,et al. Multiple targets tracking data processing for HF ground wave radar[J]. Journal of Wuhan University Natural:Science Edition, 2003,49(3):391-395.)
- [6] Kameda H,Tsujimichi S,Kosuge Y. Target tracking under dense environments using range rate measurements[C]// Proceedings of the 37th SICE Annual Conference SICE '98. Chiba,Japan:[s.n.], 1998:927-932.
- [7] WANG Xuezhong,Darko Musicki,Richard Ellem,et al. Enhanced multi-target tracking with Doppler measurements[C]// Information, Decision and Control. Adelaide, Australia:[s.n.], 2007:53-58.
- [8] Samuels Blackman. Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking[J]. IEEE A&E Systems Magazine, 2004,19(1):5-18.
- [9] Gorji A A,Tharumarasa R,Kirubarajan T. Performance measures for multiple target tracking problems[C]// 2011 Proceedings of the 14th International Conference on Information Fusion(FUSION). Chicago,IL:[s.n.], 2011:1-8.

#### 作者简介:



罗亚(1990-), 女, 湖北省荆州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为地波雷达数据处理.email:luoya11@mails.tsinghua.edu.cn.

廖庆敏(1962-), 男, 重庆市人, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为图像和视频处理与分析领域中的算法研究、系统设计及其应用.

王德生(1946-), 男, 北京市人, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理和终端系统.