

一种前视阵列 SAR 系统的天线设计和分析方法

刘向阳*, 孟进, 刘许刚, 牛德智, 赵海燕
(西安通信学院, 陕西 西安 710106)

摘要:阵元数太多导致前视阵列 SAR 系统天线成本高和设计复杂, 如何以较少的阵元数获取较高的成像质量是前视阵列 SAR 系统面临的重难点问题. 根据系统成像质量要求, 结合波束扫描、栅瓣抑制等技术, 本文提出一种稀疏收发天线阵的设计方法. 理论分析和仿真实验结果表明, 该方法在保证一定成像质量的前提下, 有效降低了阵元数量, 提高了系统信噪比, 具有一定的应用价值.

关键词:前视阵列 SAR; 阵列天线设计; 波束形成; Chirp Scaling 成像

中图分类号:TN959.3 **文献标识码:**A

A method of antenna design and analysis for forward-looking array SAR system

LIU Xiang-Yang*, MENG Jin, LIU Xu-Gang, NIU De-Zhi, ZHAO Hai-Yan
(Xi'an Communications Institute, Xi'an, 710106, China)

Abstract: The large number of array elements leads to the high cost and high design complexity of forward-looking array SAR system. How to obtain higher imaging quality with fewer array elements is a difficult problem for forward-looking array SAR system. According to the quality requirements of system imaging, combined with beam scanning and grating lobe suppression technique, a design method of sparse transmitting and receiving antenna array is proposed. Theoretical analysis and simulation results show that the method can effectively reduce the number of array elements and improve the signal-to-noise ratio of the system, and has a certain application value.

Key words: forward-looking array SAR, array antenna design, beam forming, Chirp Scaling imaging

PACS: 84.40.Ba

引言

前视阵列合成孔径雷达 (Forward-looking Array Synthetic Aperture Radar, 前视阵列 SAR) 的阵列轴向与飞行航迹垂直, 具备实时获取平台前方观测场景三维图像的能力和全天时、全天候工作的优点, 适用于高频段 (Ka、Ku 等) 毫米波雷达的低空近距离对地观测^[1]. 除了三维地貌测绘、植被资源普查、地质灾害调查、重点设施监测等常规三维图像应用外, 前视阵列 SAR 在地物匹配制导、飞行器自主导航和降落等场合具有独特优势, 受到了广泛的关注和

研究^[2].

在前视阵列 SAR 中, 由于阵列长度长和信号波长短, 传统的密布阵列天线通常需要成百上千个阵元, 导致天线成本高和设计复杂度大, 限制了其进一步应用. 如何有效降低阵元数量成为前视阵列 SAR 中一个重要的研究内容, 具有较强的应用价值. 在降低阵元数量上, 常见方法主要有: 一是阵列非均匀稀疏. 吕岚、张晓玲等提出基于模拟退火法的阵列天线非均匀稀疏的方法, 有效减少了阵元数量并避免了栅瓣^[3, 4], 但非均匀排布不利于跨航向成像的快速处理, 且阵列的稀疏度有限. 二是采用多输入多输出

收稿日期: 2017-06-06, 修回日期: 2017-09-21

Received date: 2017-06-06, revised date: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金 (61640006, 61771015); 陕西省自然科学基金 (2015JM6307)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61640006, 61771015); Supported by Shaanxi Natural Science Foundation of China (2015JM6307)

作者简介 (Biography): 刘向阳 (1982-), 男, 河北石家庄人, 讲师, 博士, 主要研究领域为毫米波成像、信号仿真与动目标检测.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xiangyangliu@mail.xidian.edu.cn

(MIMO) 技术. 马超、Weiβ M. 等分别提出了基于分时相干 MIMO 的阵列天线稀布方案^[5-7], 有效减少了阵元数目, 但由于发射和接收阵元的孔径都仅略大于波长的一半, 发射和接收增益十分有限, 导致雷达作用距离小或回波信噪比低. 三是采用阵列稀疏采样和压缩感知技术. 假定地面散射源稀疏的情况下, 韦顺军、Gao Lei 等分别研究了接收天线阵非均匀稀疏布下基于压缩感知的阵列 SAR 三维成像^[8-10], 李学仕、孙光才等研究了 MIMO 与压缩感知理论相结合的下视阵列 SAR 三维成像^[11], 不仅有效减少了阵元数目, 还在一定程度上实现了跨航向超分辨; 然而实际中, 大部分雷达复图像的稀疏度不高且运算量十分巨大, 限制了其大范围应用. 为此, 从阵元稀布、系统信噪比和二维成像质量等多方面综合考量, 研究利用发射波束的零点来抑制接收栅瓣和波束扫描以实现观测条带有效覆盖的方法, 提出了前视阵列 SAR 系统天线稀疏排布的方案, 显著降低了阵元数量, 提高了收发增益, 保证了成像质量和效率, 为前视 SAR 系统设计提供新的解决方案.

论文的安排如下: 第一节详细给出稀疏收发天线设计的思路和方法; 第二节通过定量分析, 从多个方面与其它天线设计方案进行了比较; 第三节通过关键成像指标的仿真实验, 验证本方案的可行性; 第四节对本方法的优点进行简要小结.

1 系统收发天线设计

前视阵列 SAR 系统的对地观测构型如图 1 所示. 图中蓝色区域为观测条带, 载机在观测条带上方 H 米处沿观测条带方向水平匀速飞行, 速度为 V . 雷达发射波束指向平台前下方 (本文采用波束扫描实现观测条带的有效覆盖, 图 1 给出了两个波束情况下的观测示例). 假定接收和发射天线均为独立的阵列天线, 两天线平行排列且垂直于平台飞行方向, 如图 1 所示. 定义载机飞行方向为沿航向, 以 X 轴表示; 收发阵列方向为跨航向, 以 Y 轴表示, 且两阵列中心为 Y 轴零点; 高度方向为 Z 轴, 且以水平地面为 Z 轴零点. 三个坐标轴的方向排列符合笛卡尔直角坐标系规则.

为了获得较高的跨航向分辨率, 接收天线通常较长, 若采用密布阵列 (阵元间距小于波长的一半), 通常需要成百上千个阵元. 为了降低阵元数量并保证成像效率, 考虑将接收阵列均匀稀疏排列. 假定阵列天线长度为 L_r , 接收阵元间距为 d_r ($d_r > \lambda$, 其中 λ 表示波长), 则接收阵元数量为 $N_r = L_r/d_r$. 由

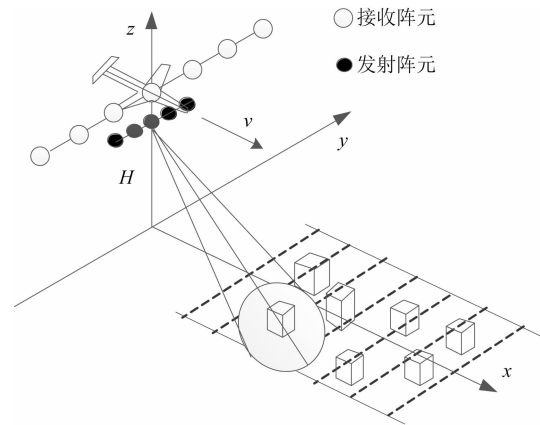


图 1 前视阵列 SAR 系统对地观测示意图
Fig. 1 The depict of ground observation model for forward-looking array SAR

于阵元间距加大, 相应地可以适当增加接收阵元的孔径, 提高接收增益. 但是, 阵列稀疏排布将会带来接收栅瓣, 降低了成像质量, 其中不考虑移相加权情况下接收栅瓣的方位角将会满足下式:

$$\sin\theta_{\theta_0} = k \cdot \frac{\lambda}{d_r}, 0 < |k| \leq \frac{d_r}{\lambda} \quad k \text{ 为整数} \quad (1)$$

从雷达成像角度考虑, 接收栅瓣将显著降低成像系统的跨航向峰值旁瓣比和跨航向积分旁瓣比, 必须有效抑制栅瓣才能实现跨航向成像. 实验发现, 一种可行的方法是使得发射波束的零点位置与接收栅瓣位置相同, 利用发射波束的零点来有效降低收发总波束的栅瓣水平. 假定发射天线采用均匀密布阵, 阵元间距为 $\lambda/2$, 发射天线长度为 L_t (这里暂时不根据发射波束宽度限制发射天线长度), 则阵元数量为 $N_t = 2L_t/\lambda$. 如果对发射阵列进行合适的周期加权, 并假定其波束零点的展宽系数为 γ ($\gamma = 1, 2$ 等), 则发射波束的零点位置 θ_{θ_0} 可以表示为

$$|\sin\theta_{\theta_0}| = (\gamma + n) \frac{\lambda}{L_t}, \gamma \leq |\gamma + n| \leq \frac{L_t}{\lambda} \quad n \text{ 为整数} \quad (2)$$

需要说明的是, 这里的窗函数要选用周期窗函数, 即波束零点的位置是周期的. 实现表明, 有些窗函数的波束零点不是周期的, 不能用于此处. 目前经测试, 矩形窗、周期式 Hamming 窗、周期式 Hanning 窗都可以.

要想获得较为理想的积分旁瓣比水平, 接收栅瓣必须落入到发射波束的零点位置, 即满足

$$\frac{\lambda}{d_r} = m \frac{\lambda}{L_t}, m \geq \gamma \quad m \text{ 为整数} \quad (3)$$

因此, 接收阵元间距与发射阵列长度满足 $L_t =$

md_r , 其中 $m \geq \gamma, d_r > \lambda$. 则发射和接收天线的总阵元数量 N_r 可以表示为

$$N_r = N_t + N_r = \frac{2md_r}{\lambda} + \frac{L_r}{d_r} \quad (4)$$

若假定 λ, L_r 和 γ 已知, 则当 $m = \gamma, d_r = \sqrt{\lambda L_r / 2\gamma}$ 时, 式(4)取最小值 $N_{r,\min} = 2\sqrt{\lambda L_r / \lambda}$. 此时发射天线长度 $L_t = \sqrt{2\gamma\lambda L_r / 2}$, 发射波束宽度 $\Delta\theta_t = \sqrt{2\lambda\gamma / L_r}$. 可见, γ 越小, 收发阵元总数量越小, 但跨航向积分旁瓣比可能更高. 同时, 由于 L_t 较大, 发射波束宽度会非常窄, 甚至远小于观测条带的宽度 θ_c . 为了实现观测带的全覆盖, 可以采用波束扫描技术, 而且发射阵列天线的波束扫描可以通过移相来实现. 而且, 对于发射和接收阵列构型来说, 当波束扫描时, 发射波束的零点和接收栅瓣仍然可以重合, 有效实现栅瓣的抑制. 若假定相邻两个波束的重合度为 μ (μ 为小于 1 的正数), 则所需的波束扫描数可以表示为

$$N_s = \frac{\theta_c}{\Delta\theta_t(1-\mu)} \quad (5)$$

可见, 该方法的不足是为了实现观测条带的有效覆盖, 发射波束需要波束扫描, 会占用沿航向观测时间. 幸运的是, 由于观测场景在三维空间上的稀疏性^[12-13], 沿航向稀疏采样后仍可以有效实现三维成像, 为跨航向波束扫描提供了充足的观测时间.

由式(5)的最优结果可知, 发射波束宽度与接收阵列长度密切相关, 当实际接收天线长度较长时, 发射波束宽度会非常窄, 不仅需要较多的扫描周期, 还会造成扫描数较大、波束难以控制、接收阵元数少而影响后续波束形成中的旁瓣抑制. 在这种情况下, 可以不使用式(4)的最优解, 而是选择一个次优解. 受以上方法的启发, 次优解的计算方法是, 指定允许的最小发射波束宽度 $\Delta\theta_t$ (当 $\Delta\theta_t > \sqrt{2\lambda\gamma / L_r}$ 时), 根据波束展宽系数 γ 、公式 $L_t = \gamma\lambda / \Delta\theta_t$ 和公式(3)首先确定发射阵列长度和接收阵元间距, 然后计算发射和接收阵元数量. 与最优解结果相比, 该方法会增加总的阵元数量, 但减少了波束扫描数量. 而且, 与密布阵方法相比, 该方法也会显著降低阵元总数量.

2 系统成像质量分析和性能比较

以上收发阵列方案能否用于前视阵列 SAR 成像, 还需要结合成像性能指标进一步分析. 衡量系统成像质量时, 常用的指标有分辨率、峰值旁瓣比和积分旁瓣比^[14]. 此处主要探讨跨航向天线阵列分布,

因此考虑跨航向分辨率、跨航向峰值旁瓣比和跨航向积分旁瓣比三个指标. 主要有以下几点: (1) 由于有效抑制了接收栅瓣, 跨航向分辨率仅与接收阵列加权有关, 与发射方向图的关系不密切. (2) 跨航向峰值旁瓣比尽管与发射方向图也有关, 但主要取决于接收阵列加权处理的旁瓣水平, 而且也容易获得较满意的旁瓣水平. (3) 跨航向积分旁瓣比与发射方向图、接收阵列加权处理均十分密切. 仿真实验结果表明, 跨航向积分旁瓣比水平与下面三点有关: (1) 要想获得较理想的积分旁瓣水平, 必须用发射波束的零点有效抑制全部的接收栅瓣. (2) 如果采用矩形窗对发射阵列加权, 即使接收阵列采用较深的加权函数, 积分旁瓣比都将大于 -10 dB. (3) 如果采用 Hamming 或 Hanning 窗对发射阵列加权, 接收阵列的加权深度只要小于 -30 dB, 积分旁瓣比都会小于 -10 dB, 满足跨航向成像要求, 下一节将通过仿真实验来验证.

下面, 进一步从天线阵元数量、跨航向分辨率、收发阵列增益三个方面, 将本文方法与现有的密布阵^[15]、非均匀阵^[3]、MIMO 方法^[5]进行比较.

从阵元数量考虑, 密布阵方法的阵元数量为 $2L_r/\lambda$; 非均匀阵方法的阵元数量为 $\beta L_r/\lambda$, 其中 β 为小于 2 的常数; MIMO 方法的阵元数量为 $2\sqrt{2L_r/\lambda}$; 本方法的最优阵元数量为 $2\sqrt{2\gamma L_r/\lambda}$. 可见, 阵元数量最少的是 MIMO 方法, 其次是本方法, 这两种方法的阵元数量处于同一个数量级, 在阵列较长时都远小于其它两种方法.

从跨航向分辨率考虑, 密布阵、非均匀阵和本方法的分辨率均为 $R_c\lambda/L_r$, 其中 R_c 表示场景中心斜距; MIMO 方法的分辨率为 $R_c\lambda/(2L_r)$, 为其它方案的一半. 如果本方法想获得与 MIMO 方法相同的分辨率, 需要增加一个相同的发射阵列且两个发射阵列分开放置于接收阵列两端, 因此总阵元数会增加 50%.

从收发增益和信噪比角度考虑, 假定密布阵方法的接收和发射总增益为 A , 则非均匀阵方法的接收和发射总增益与密布阵方法相同, 也为 A . 对于 MIMO 方法, 由于发射天线孔径仅为密布阵方法的 θ_c/π , MIMO 方法的收发总增益仅为 $A\theta_c/\pi$, 因此 MIMO 方法的作用距离较近或系统信噪比较低, 限制了其进一步应用. 对于本方法, 由于接收阵元间距增大, 每个接收阵元的孔径可以适当增加, 接收增益约是密布阵方法的 $\sqrt{2L_r/\lambda\gamma}$ 倍; 同样, 发射天线孔径

也较大,发射天线的增益是密布阵方法的 $\theta_c/\sqrt{2\lambda\gamma/L_r}$ 倍,因此总的收发增益约为 $AL_r\theta_c/\lambda\gamma$. 可见,本方法的总增益最大. 因此,在毫米波组件发射功率较小的情况下,本方法可以增加作用距离或提高相同距离情况下的信噪比,对前视阵列 SAR 系统设计和实现,具有较强的实用价值.

以上四种天线阵方法的性能结果如表 1 所示. 可见,本方案也显著降低了阵元数量,提高了系统信噪比,有利于前视阵列 SAR 系统的实现,但该系统的成像质量有待于进一步仿真实验验证.

表 1 四种天线阵方法的性能比较

	阵元数量	分辨率	收发总增益
密布阵	$2L_r/\lambda$	$R_c\lambda/L_r$	A
非均匀阵	$\beta L_r/\lambda$	$R_c\lambda/L_r$	A
MIMO	$2\sqrt{2L_r/\lambda}$	$R_c\lambda/(2L_r)$	$A\theta_c/\pi$
本文方法	$2\sqrt{2\gamma L_r/\lambda}$	$R_c\lambda/L_r$	$AL_r\theta_c/\lambda\gamma$

3 仿真实验

假定发射信号波长为 3 mm,接收天线长度为 9.6 m,若采用均匀密布阵列,相邻阵元间距为 1.5 mm,则接收阵元数量为 6400 个. 而如果采用本文方法,假定 $\gamma=2$,所需的发射和接收阵元数量分别为 114 个,总阵元数为 228 个,阵元数量降为原来的 3.6%. 此时,发射波束宽度约为 0.035 弧度. 假定方位向波束宽度为 30 度(0.52 弧度),相邻波束的重合度为 10%,则扫描波束数量约为 17 个. 为了降低波束数量,如果将扫描波束数量降为 9 个,则发射阵元数降为 56 个,而接收阵元数量提高到 228 个,总阵元数量增加了 25%. 此时,与密布阵方式相比,阵元约为它的 4.5%,同样也显著降低了阵元数量. 仿真实验的基本参数如表 1 所示.

表 2 前视阵列 SAR 系统稀疏阵列天线基本参数

中心波长/mm	3	接收天线总长度/m	9.6
脉冲带宽/MHz	500	场景中心斜距/km	1
脉冲时宽/ μ s	2	跨航向分辨率/m	0.5
采样频率/MHz	600	距离向分辨率/m	0.55

图 1 给出了发射阵元数为 56 个和接收阵元数为 228 个时发射和接收的双程方向图,其中发射波束采用 Hamming 窗加权,此时发射波束宽度为 0.7 弧度(4.0 度),如图 2 所示. 接收阵列在成像时进行

加窗处理,窗函数为 -35 dB 的切比雪夫窗. 图 3 给出了收发双程的方向图,其中峰值旁瓣比为 -35 dB,积分旁瓣比为 -17 dB,完全满足跨航向成像的要求.

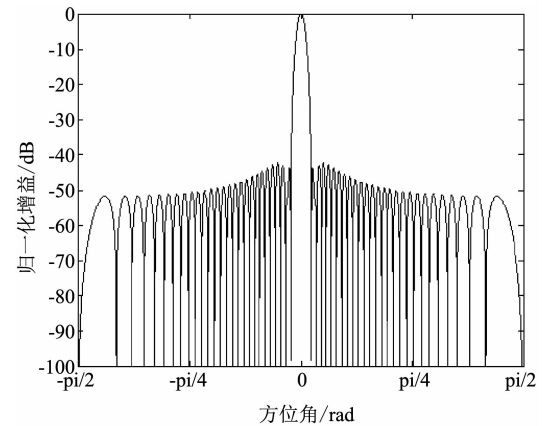


图 2 发射天线方向图

Fig. 2 Transmitting antenna pattern

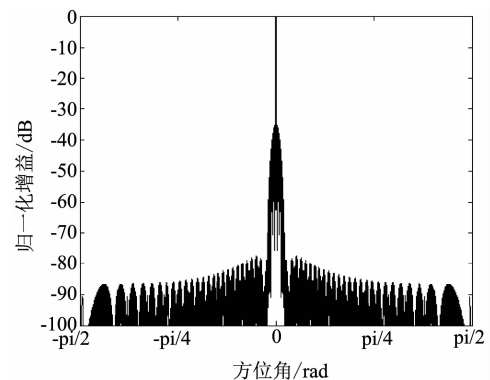


图 3 收发天线双程方向图

Fig. 3 Two-way pattern of transmitting and receiving antenna

进一步,假定场景中心斜距为 1 km,则跨航向分辨率约为 0.5 m. 同时,假定发射脉冲为线性调频信号,信号带宽为 500 MHz,脉冲宽度为 2 μ m,距离向窗函数为 -30 dB 的切比雪夫窗,则距离向分辨率约为 0.5 m. 图 4 给出了场景中心处一个点散射源的二维成像图,图 5 给出了该散射源图像的距离向和跨航向剖面图. 其中,成像方法采用了文献 [14] 的 Chirp Scaling 成像算法. 然后,仿真 9 个呈田字形的点散射源的回波. 其中,这 9 个点散射源的幅度相同、相位随机,且相邻点散射源的间距为 1 m. 图 6 给出了这 9 个点散射源回波的成像结果. 可见,在这种天线构型下,本方法也实现了所有点散射源的有效成像和准确定位.

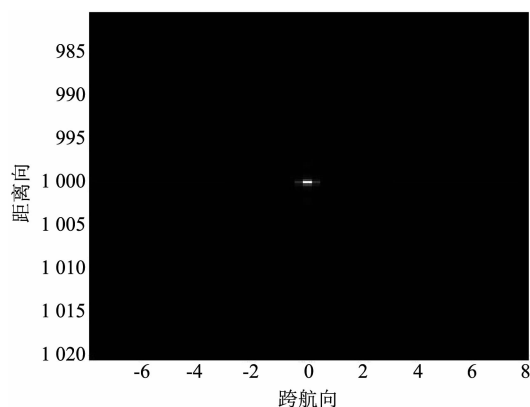


图4 点散射源的成像结果

Fig. 4 The image of point scattering source

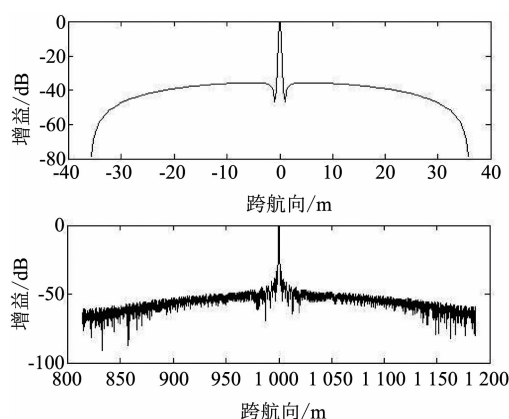


图5 点散射源图像的剖面图

Fig. 5 Profile of point scattering source image

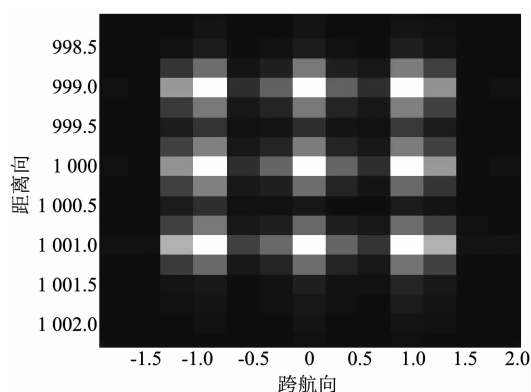


图6 9个点散射源的成像结果

Fig. 6 The image of nine scattering sources

以上实验结果表明,该方法可以有效实现前视阵列 SAR 的跨航向成像,且显著减少了阵元数量,有利于前视阵列 SAR 天线的实现。

4 结论

提出基于密布发射阵列、均匀稀疏接收阵列和

波束扫描的稀疏阵列设计方案,不仅有效降低了阵元数量,还具有以下几点好处:一是发射天线采用较长的阵列天线以形成窄波束,提高了发射增益,且较大的接收阵元间隔也为适当提高接收阵元增益提供了空间,最终提高了接收回波信噪比;二是发射窄波束缩小了每个波束的场景宽度,为采用简单、高效的跨航向距离徙动校正算法提供了条件;三是有效实现了跨航向成像,且接收阵元均匀排布使得跨航向成像时可以采用 FFT 等快速算法。

References

- [1] PANG Bo, DAI Da-Hai, XING Shi-Qi, *et al.* Development and perspective of forward-looking SAR imaging technique [J]. *Systems Engineering and Electronics*, (庞礴, 代大海, 邢世其, 等. 前视 SAR 成像技术的发展与展望. 系统工程与电子技术), 2013, **35**(11): 2283 - 2290.
- [2] Ren X Z, Sun J T, Yang R L. A new three-dimensional imaging algorithm for airborne forward-looking SAR [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(1): 153 - 157.
- [3] LV Lan, ZHANG Xiao-Ling, WEI Shun-Jun. Forward-looking 3-D SAR imaging model using optimization of array by simulated annealing [J]. *Computer Engineering and Applications*, (吕岚, 张晓玲, 韦顺军. 基于模拟退火法的优化线阵的前视三维 SAR 模型. 计算机工程与应用), 2012, **48**(2): 135 - 138.
- [4] Lv L, Zhang X L, Cao Z J. A forward-looking 3-D imaging model using unequally spaced array [C]. *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 2010, Chengdu, pp. 1 - 4.
- [5] MA Chao, GU Hong, SU Wei-Min, *et al.* Algorithm for airborne forward-looking imaging radar based on multiple input multiple output antenna array [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, (马超, 顾红, 苏卫民, 等. 多输入多输出阵列的机载前视雷达成像算法. 电波科学学报), 2015, **30**(1): 21 - 28.
- [6] Weiß M., Gilles M.. Initial ARTINO Radar Experiments [C]. *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2010, Aachen, pp. 857 - 860.
- [7] Hou Y L, Li D J, Hong W. The thinned array time division multiple phase center aperture synthesis and application [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008, Boston, pp. 25 - 28.
- [8] WEI Shun-Jun, ZHANG Xiao-Ling. Linear array SAR 3-D imaging based on compressed sensing [J]. *Journal of Astronautics*, (韦顺军, 张晓玲. 基于压缩传感的线阵 SAR 三维成像方法研究. 宇航学报), 2011, **32**(11): 2403 - 2409.
- [9] Gao L, Zeng Y G, Wang L D. Design of array for airborne forward looking SAR based on compressed sensing [C]. *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing*, 2014, Guilin, 473 - 476.
- [10] Wei S J, Zhang X L, Shi J. Linear array SAR imaging via compressed sensing [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, **117**, 299 - 319.

- [11] LI Xue-Shi, Sun Guang-Cai, Xu Gang, *et al.* A new method of downward-looking 3D-SAR based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, (李学仕, 孙光才, 徐刚, 等. 基于压缩感知的下视三维 SAR 成像新方法. *电子与信息学报*), 2012, **34**(5): 1017 - 1023.
- [12] LIU Xiang-Yang, WANG Jing, NIU De-Zhi, *et al.* The method on echo sparse sampling and three-dimensional imaging for forward-looking array SAR[J]. *ACTA Electronica Sinica*, (刘向阳, 王静, 牛德智, 等. 前视阵列 SAR 回波稀疏采样及其三维成像方法. *电子学报*), 2017, **45**(1): 74 - 82.
- [13] LIU Xiang-Yang, YANG Jun-Gang, MENG Jin, *et al.* Sparse three-dimensional imaging based on Hough transform for forward-looking array SAR in low SNR[J]. *Journal of Radars*, (刘向阳, 杨君刚, 孟进, 等. 低信噪比下基于 Hough 变换的前视阵列 SAR 稀疏三维成像. *雷达学报*), 2017, **6**(3): 316 - 323.
- [14] LI Wen-Chen, LU Hong-Tao, SONG Sheng-Li, *et al.* Outfield experimentation and evaluation techniques of SAR image quality[J]. *Radar Science and Technology*, (李文臣, 陆洪涛, 宋胜利, 等. SAR 图像质量外场试验与评估技术. *雷达科学与技术*), 2012, **10**(6): 613 - 617, 623.
- [15] CHEN Qi, YANG Ru-Liang. Research of Chirp Scaling Imaging Algorithm for Airborne Forward-Looking SAR[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, (陈琦, 杨汝良. 机载前视合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法研究. *电子与信息学报*), 2008, **30**(1): 228 - 232.

(上接第 65 页)

反演误差均保持在 $\pm 20\%$ 以内。

(3) 云底高度在 2 km 以下的低层水云对大气层顶太赫兹辐射光谱没有影响, 中层水云的影响对太赫兹辐射的影响较大。并且, 随着光学厚度的增加、云底高度的增大, 对亮温值的影响增大。而其对于反演结果的影响, 同样随着光学的增加、云底高度的增加而增大。云底高为 4 km 以下、光学厚度在 10 以内的中云, 对于粒子尺度大于 $50 \mu\text{m}$ 、冰水路径大于 10 g/m^2 的卷云, 反演误差均保持在 $\pm 25\%$ 以内。

上述工作主要对多重查找表反演过程中地表和大气因素的影响进行了分析, 并定量计算了算法的反演误差。然而, 在实际反演过程中还需要考虑模式误差以及仪器测量误差等因素对反演结果的影响。如何正确评估这些因素对反演结果的影响, 并设计合适的传感器组合方式和观测方式以减少大气参数和模式在反演中的参与度, 是下一步研究的主要工作。

References

- [1] Mendrok J, Baron P, Yasuko K. Studying the potential of Terahertz radiation for deriving ice cloud microphysical information[C]. *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII*, 2008: p710704.
- [2] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, *et al.* Submillimeter-wave cloud ice radiometer: simulations of retrieval algorithm performance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D3): 4028.
- [3] Evans K F, Wang J R, Racette P E, *et al.* Ice cloud retrievals and analysis with the Compact Scanning Submillimeter Imaging Radiometer and the Cloud Radar System during CRYSTAL-FACE [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, **44**: 839 - 859.
- [4] Liebe H J. MPM—An atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1989, **10**(6): 631 - 650.
- [5] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, *et al.* Modeling of submillimeter passive remote sensing of cirrus clouds[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**: 184 - 205.
- [6] Gasiewski A J. Numerical sensitivity analysis of passive EHF and SMMW channels to tropospheric water vapor, clouds, and precipitation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(5): 859 - 870.
- [7] Evans K F, Evans A H, Nolt I G, *et al.* The prospect for remotensing of cirrus clouds with a submillimeter-wave spectrometer[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38**: 514 - 525.
- [8] Rydberg B, Eriksson P, Buehler S A, *et al.* Non-Gaussian Bayesian retrieval of tropical upper tropospheric cloud ice and water vapor from Odin-SMR measurements[J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2009, **2**: 621 - 637.
- [9] LI Shu-lei, LIU Lei, GAO Tai-chang, *et al.* Sensitivity analysis of terahertz wave passive remote sensing of cirrus microphysical parameters[J]. *Acta. Phys. Sin.* (李书磊, 刘磊, 高太长, 等. 太赫兹波被动遥感卷云微物理参数的敏感性试验分析. *物理学报*) 2016, **65**: 134102.
- [10] LI Shu-lei, LIU Lei, GAO Tai-chang, *et al.* Retrieval method of cirrus microphysical parameters at terahertz wave based on multiple lookup tables[J]. *Acta. Phys. Sin.*, (李书磊, 刘磊, 高太长, 等. 基于多重查找表的太赫兹波段卷云微物理参数的反演方法. *物理学报*) 2017, **66**: 054102.
- [11] Buehler S A, Eriksson P, Kuhn T, *et al.* ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, **91**(1): 65 - 93.
- [12] GU Jun-xi. Dictionary of Atmospheric Science[M]. (大气科学辞典, 顾钧禧). Beijing: China Meteorological Press, 1994: 117.