

文章编号: 2095-4980(2019)05-0850-04

SKA 天线副反射面缝隙影响分析

伍 洋^{1,2}, 解 磊¹, 杜 彪^{1,2}, 杨文宁¹, 刘国玺^{1,2}

(1.中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 河北 石家庄 050081; 2.射电天文技术联合实验室, 北京 100012)

摘 要: 面板缝隙会引起天线增益的下降和噪声温度的提高, 对追求极致灵敏度的射电望远镜而言, 其影响不可忽略。针对国际大科学工程平方公里阵(SKA)的核心设备——15 m 双偏置格里高利天线, 结合具体的结构设计和制造工艺, 对副反射面缝隙的影响进行分析。通过电磁分析指导结构设计, 有效抑制了面板缝隙对天线灵敏度的影响, 保证了 SKA 天线的性能。

关键词: 射电望远镜; 平方公里阵; 面板缝隙; 噪声温度

中图分类号: TN820

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0850

Investigation on the effects of the panel gaps of the SKA dish sub-reflector

WU Yang^{1,2}, XIE Lei¹, DU Biao^{1,2}, YANG Wenning¹, LIU Guoxi^{1,2}

(1.The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050081, China;

2.Joint Laboratory for Radio Astronomy Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: Leakage through the panel gaps of the dish leads to gain loss and noise temperature increment. For the radio telescope antenna, which peruses ultra-high sensitivity, this effect cannot be ignored. This paper investigates the leakage and resulting noise temperature variance of the Square Kilometre Array(SKA) dish sub-reflector, in conjugated with the structure design and manufacture procedure of the panels. By electromagnetic analysis, the effect of the leakage due to various panel designs is evaluated, and the structure design of the sub-reflector panel is decided, fulfilling the requirement of SKA.

Keywords: radio telescope; Square Kilometre Array; panel gaps; noise temperature

平方公里阵(SKA)^[1-2]是由全球超过 10 个国家计划建造的、世界最大的综合孔径射电望远镜, 以实现平方公里量级的接收面积, 相当于 140 个足球场大小。SKA 将建在澳大利亚、南非及非洲南部 8 个国家的无线电宁静区域, 分布在 3 000 km 范围, 频率覆盖 50 MHz~20 GHz。SKA 致力于回答人类认识宇宙的一些基本问题, 特别是关于第一代天体形成、星系演化、宇宙磁场、引力的本质、地外生命与地外文明、暗物质和暗能量等。

SKA 的核心组成部分——中频阵列将由分布在 3 000 km 内的 2 500 面反射面天线组成。SKA 天线采用下偏置格里高利形式^[3], 工作频率为 350 MHz~20 GHz, 主反射面有效口径为 15 m, 副反射面在最大方向超过 5 m。天线结构采用方位转台——俯仰丝杠形式。灵敏度(即有效接收面积与系统噪声温度的比值)是射电望远镜最重要的指标^[4]。对阵列望远镜而言, SKA 的每个天线单元都需要有高的天线效率, 此外, 为减少来自外部环境的噪声, 天线应具有较低的旁瓣, 尤其是远旁瓣。

面板是反射面天线研制的关键之一^[5-6]。对大口径反射面天线, 分块面板较整体面板更为可行, 尤其是对 SKA 而言, 分块面板在成本、制造、运输和技术成熟度等方面具有明显优势。但面板缝隙也不可避免地对天线的性能产生了影响^[7-8]: 首先, 面板缝隙的漏失降低了天线的效率, 减小了有效接收面积; 其次, 地面的噪声通过面板缝隙进入接收机, 增加了天线的噪声温度。因此面板缝隙在效率和噪声两方面对望远镜的灵敏度产生负面影响, 在设计中必须加以考虑。本文介绍了面板缝隙漏失的理论分析方法, 并结合具体的结构设计和制造工艺, 利用数值方法对副反射面缝隙的影响进行了分析。通过电磁仿真, 分析了不同面板结构下缝隙漏失及噪声温度的变化, 通过选定漏失影响较小的面板结构设计, 有效抑制了面板缝隙对天线灵敏度的影响, 满足了 SKA 天线的设计要求。

1 面板缝隙影响分析

1.1 理论分析

面板缝隙对天线性能的影响可分为两部分：一是增益的损失；二是噪声温度的升高。由于缝隙的存在，破坏了反射面的连续性，照射在缝隙处的电磁场未能沿轴向辐射出去，降低了天线的增益。而从缝隙四散的电磁波又破坏了天线应有的远场方向图，使得天线的远旁瓣抬高，进而引起噪声温度升高。因此，面板缝隙的存在对于射电望远镜的灵敏度存在双重的负面影响。

面板缝隙的影响对低频影响大，高频影响小。这是因为面板缝隙可以看做一个缝隙天线，而理论上缝隙天线的宽度可以是无限窄的，但其电尺寸却与波长相关。令缝隙的宽度为 W_{gap} ，其造成的接收面积损失^[9]如下：

$$A_{gap} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \lambda_i, & W_{gap} < \frac{\lambda}{2} \\ \sum_{i=1}^N W_{gap} l_i, & W_{gap} > \frac{\lambda}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中： l_i 为第 i 条缝隙的长度； N 为缝隙的数量。

由于低频时 λ 较长， A_{gap} 较大，缝隙造成的接收面积损失大于其物理面积。当缝隙的宽度大于工作波长的一半时，缝隙造成的接收面积损失等于其物理面积。由式(1)可以看出，面板缝隙的影响主要取决于其长度，而宽度仅对波长与缝隙宽度接近或更短时才发挥作用。

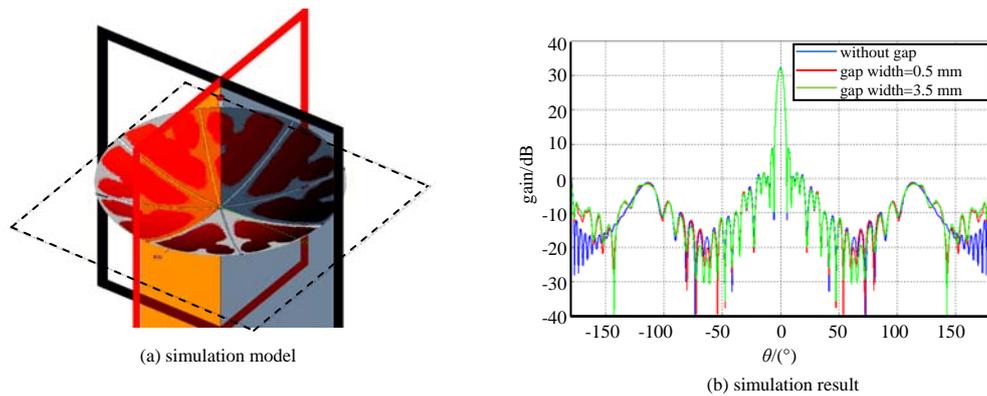


Fig.1 Full wave simulation model and result of the panel gap effect
图 1 天线面板缝隙影响全波仿真模型及结果

1.2 全波分析

由于天线的面板存在一定厚度，面板下方一般也有支撑结构，这些结构会对天线的远场方向图造成影响，加之缝隙方向与电磁波极化的影响，通过解析的方法精确估算面板缝隙的影响比较困难。因此需要使用全波的分析方法，如矩量法。

数值法较解析法能够得到更为精确的结果。图 1 以 5 m 口径的抛物面天线为例，在 1 GHz 计算了不存在面板缝隙、存在宽度为 0.5 mm 和 3.5 mm 的“米”字形缝隙时，天线性能的变化。

有无面板缝隙对增益的影响很小，对天线的远旁瓣影响明显，不同宽度的缝隙影响类似，与式(1)的定性分析一致。需要注意，仿真结果与式(1)推测的增益损失有较大差异，更接近于实际情况，即在忽略面板缝隙影响下，仿真得到的天线效率略低于实测结果。这也从侧面说明，解析方法仅能对面板缝隙漏失进行定性分析。

对于射电望远镜，噪声温度至关重要，而天线的远旁瓣与环境噪声温度密切相关，因此必须仔细对待面板缝隙的影响。综合考虑各方面因素，SKA 天线副反射面采用图 2 所示的面板分块形式，即由中间 1 块，周围 5 块，以及 4 块扩展面组成，整个副反射面由桁架结构的背架支撑。

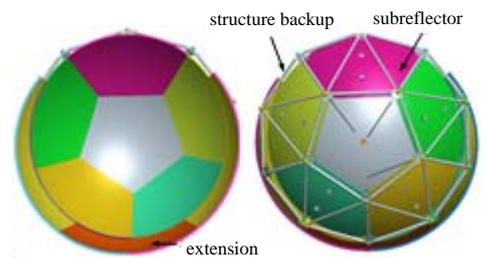


Fig.2 Sub-reflector of the SKA dish
图 2 SKA 天线副反射面

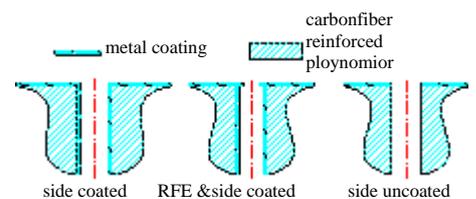


图 3 Types of the panel gap of the SKA dish
图 3 SKA 天线副反射面缝隙形式

副反射面板采用表面金属化的碳纤维复合材料制造。由于面板缝隙的长度和分布已经决定，因此研究的重点在于控制缝隙的漏失，使之满足反射效率 $>99.75\%$ 的要求^[10]。

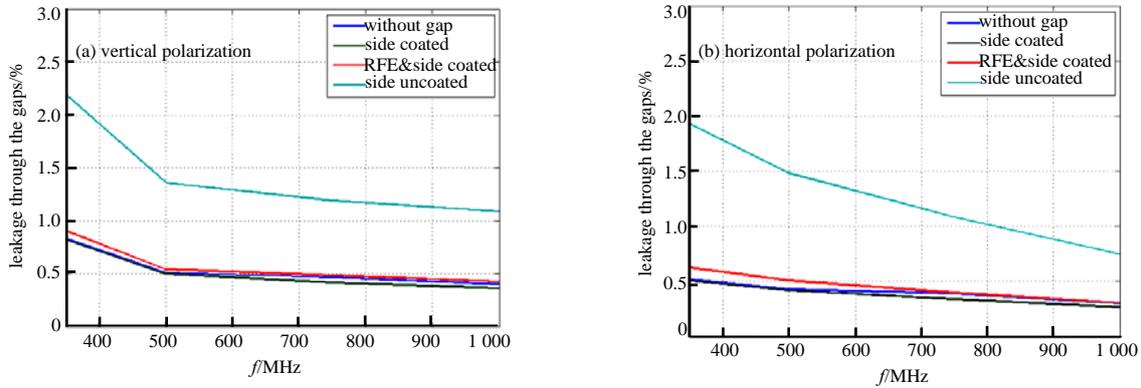


Fig.4 Leakage from the sub-reflector with frequency
图 4 副反射面缝隙能量漏失随频率的变化

考虑具体的面板制造工艺，针对侧边金属化、翻边+侧边金属化和侧边非金属化 3 种情况(如图 3 所示)，分别建立副反射面模型。利用矩量法在不同频率计算了不同极化的馈源照射下，副反射面后向散射能量占总散射能量的比值，结果如图 4 所示。可以看出，由于缝隙的存在，侧边非金属化的副反射面后方的能量占总能量的比值较无缝隙的情况明显升高，即部分能量通过缝隙漏失，且这一现象在低频段更为明显；而侧边金属化，这一影响明显被减弱，这是由于相邻面板侧边的金属层形成了一个平行波导，对一定极化的电磁波具有屏蔽作用；面板是否翻边则几乎没有影响。

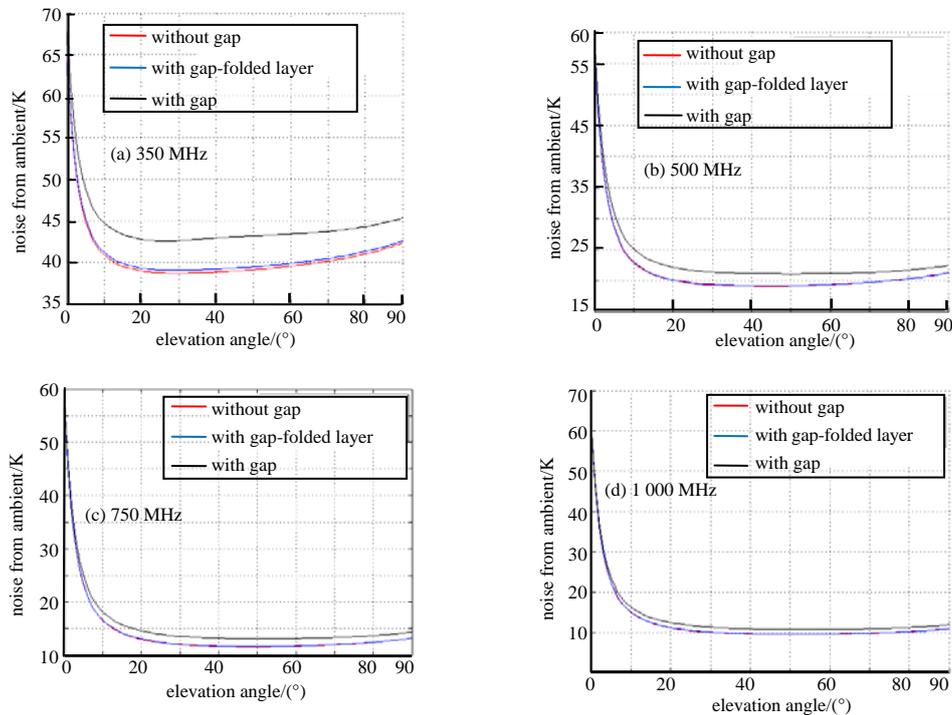


Fig.5 Antenna noise from the ambient with elevation
图 5 天线的环境噪声温度随仰角的变化

表 1 给出了面板缝隙分别为 1 mm 和 2 mm 时，垂直极化激励下，副反射面后向散射能量占总散射能量的比值。可以看出，在考虑数值误差的情况下，2 种条件下的结果十分接近，即面板缝隙宽度在低频段的影响极小，2 mm 宽度的缝隙不会对噪声温度产生明显影响。

表 1 不同宽度面板缝隙的影响分析
Table 1 Effect of the width of the panel gap

f/MHz	1 mm				2 mm			
	without gap	side coated	RSE& side coated	side uncoated	side coated	RSE& side coated	side uncoated	
350	0.810	0.835	0.859	2.439	0.822	0.907	2.194	
500	0.509	0.502	0.504	1.412	0.499	0.543	1.412	
750	0.425	0.431	0.435	1.362	0.414	0.484	1.362	
1 000	0.399	0.422	0.404	1.235	0.364	0.427	1.235	

2 副面缝隙对噪声温度影响分析

通过计算 SKA 天线的全方向图,可以得到不同的缝隙条件下天线噪声温度随仰角的变化,如图 5 所示。可以看出,存在缝隙的情况下,天线的环境噪声温度较无缝条件下有所升高,这是由于地面的噪声可以通过缝隙进入馈源。而通过面板侧边的金属化,这一效应被大大减弱,在 1 GHz 已经可以忽略。因此,SKA 副反射面板在制造中,必须保证侧边的金属化。

3 结论

本文结合具体的结构设计和制造工艺,针对 SKA 天线副反射面缝隙的影响进行了分析,确定了结构的设计指标。通过电磁分析指导结构设计,有效抑制了面板缝隙对天线灵敏度的影响,保证了 SKA 天线的性能。

参考文献:

- [1] WILKINSON P N. The hydrogen array[C]// IAU C131,ASP Conference Series. San Francisco,CA:[s.n.], 1991:428-432.
- [2] DEWDNEY P E,HALL P J,SCHILIZZI R T,et al. The square kilometre array[J]. Proceedings of the IEEE, 2009,97(8):1482-1496.
- [3] 杜彪,伍洋,周建寨,等. 平方公里阵中国验证天线光学设计[J]. 中国科学:信息科学, 2015,45(8):1001-1014. (DU Biao, WU Yang,ZHOU Jianzhai,et al. Optical design of the Dish Variation Antenna-China(DVA-C) for the square kilometer array[J]. Scientia Sinica:Informationis, 2015,45(8):1001-1014.)
- [4] CHRISTIANSEN W N,HGBOM J A. Radio telescopes[M]. London:Cambridge University Press, 1969.
- [5] 许谦,温浩兴,王娜,等. 新疆 110 m 射电望远镜(QTT)天线高精度面板结构研制挑战[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2017,47(5):059502-1-059502-11. (XU Qian,WEN Haoxing,WANG Na,et al. Development challenges for the Xinjiang 110 m radio telescope(QTT) high accuracy panel structures[J]. Scientia Sinica:Physica,Mechanica & Astronomica, 2017, 47(5):059502-1-059502-11.)
- [6] 金超,尉飞,李金良,等. 65 m射电望远镜面板精密成形原理与应用[J]. 电波科学学报, 2015,30(1):1-7. (JIN Chao,WEI Fei,LI Jinliang,et al. Principle and application of precision forming for panel of 65 m radio telescope[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015,30(1):1-7.)
- [7] THOMAS B A,VOLAKIS J L. Scattering by gaps and cracks[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagations, 1989, 37(6):744-750.
- [8] SHAVIT R,SMOLSKI A P,COOK C J. The interpanel gap scattering effect in a compact range[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagations, 1991,39(4):480-484.
- [9] PEENS-HOUGH A. Dishes element memo 03,system requirements model for total intensity sensitivity[R]. 2014.
- [10] NIEHAUS H,PEENS-HOUGH A,KUSEL T,et al. Dish structures requirements specification[R]. SKA-TEL-DSH-0000011, Rev A, 2014.

作者简介:



伍 洋(1984-), 男, 安徽省芜湖市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为反射面天线与馈源技术,email:yangwu10@163.com.

解 磊(1986-), 男, 河北省保定市人, 在读博士研究生, 工程师, 主要研究方向为反射面天线与馈源技术.

杜 彪(1962-), 男, 石家庄市人, 博士, 主要研究方向为卫星通信地球站天线、微波天线、馈源系统.

刘国玺(1970-), 男, 石家庄市人, 本科, 主要研究方向为反射面天线结构设计.

杨文宁(1986-), 男, 河北省沧州市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为反射面天线结构设计.