

Ku 频段相控阵馈源设计

牛晟璞, 杜彪

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对国际合作的平方公里阵 SKA (square kilometer array) 项目中的关键技术之一, 相控阵馈源, 以天线的灵敏度为目标, 设计了 Ku 频段的相控阵馈源; 首先, 通过对天线的焦面场进行分析, 确定了阵列的尺寸; 接着, 选择最合适的阵元形式, 设计阵元并进行优化; 然后对阵列的排布形式进行研究, 通过对比矩形排布和六边形排布对天线辐射特性的影响, 以天线的灵敏度为目标, 选择合适的阵列排布方式; 再对阵元间距对天线辐射特性的影响进行了研究, 选择最佳的阵元间距, 使系统的灵敏度达到最优; 确定阵列的几何参数后, 以此阵列作为反射面天线的馈源, 对天线的辐射特性进行仿真; 最后, 给出仿真结果, 通过仿真结果可以看出天线性能良好, 达到了项目的指标要求。

关键词: SKA; 相控阵馈源; 反射面天线; 焦面场; 灵敏度

Design of a Phased Array Feed at Ku Band

Niu Shengpu, Du Biao

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at one of the key technologies in the Square Kilometer Array, the international cooperation project. Phased array feed at Ku band is designed with the sensitivity of the antenna as the goal. Firstly, the dimension of the array is determined by the analysis of the focal field; next, a suitable array element is selected and the design parameters are optimized; then the arrangement of the array is studied by comparing the effect of rectangle arrangement and hexagonal arrangement on the radiation characteristics of antenna. the arrangement of the array is determined, taking the sensitivity as the standard; Afterwards, the effect of the array element spacing on the sensitivity is studied, and the best array elements spacing which makes the sensitivity of the system optimal is selected; the geometrical parameters of the array is determined, after that the array is used as the feed of the reflector antenna, and the radiation characteristics of the antenna is simulated; Finally, the simulation results are given, we can see that the performance of the antenna is good and it achieves the goals of the project.

Keywords: SKA; phased array feed; reflector antenna; focal field; sensitivity

0 引言

国际合作的平方公里阵 SKA 是世界上最大的综合孔径射电望远镜项目, SKA 概念的提出就是为了揭开宇宙未知之谜, 并开展宇宙黑暗时期探测, 寻找孕育生命的摇篮, 探测外星生命^[1]。射电望远镜需要探测来自宇宙深处的未知信号, 所以天线的波束需要对全空域进行扫描。如果射电望远镜天线的波束较窄, 那么完成一次全空域扫描则需要较长的时间。增加天线的波束可以有效的解决射电望远镜视场小、巡天速度慢的问题。

传统的多波束技术(馈源组)主要以在焦平面安装馈源阵增加馈源数量的方式达到多波束的目的^[2-3], 天线的波束数量与馈源数量一致。使用馈源组技术实现多波束的主要缺点在于:

1) 各馈源的相位中心受馈源物理尺寸的限制而相距较远,

导致相邻波束间隔较大, 难以实现真正意义上的全天区覆盖;

2) 理论上馈源的焦点只有一个, 所以偏离焦点的馈源会造成焦面场与馈源口面场失配, 致使偏轴波束性能下降, 限制了波束的数量。

尽管馈源组也被称为“焦平面阵列”, 但并没有体现阵列天线的特点^[4]。

相控阵馈源^[5]技术可以很好的解决上述问题, 相控阵馈源的波束数量主要取决于波束合成网络的处理能力。首先由于相控阵馈源的相位中心与激励有关, 所以合成的波束所对应的馈源相位中心能够彼此靠近, 使得波束间隔可控, 实现连续的视场覆盖。其次由于相控阵馈源接收面积较大, 通过适当的加权能够较好地匹配焦面场, 提高非轴向波束的性能, 从而允许望远镜接收入射角更大的来波, 扩大了望远镜的视场。此外, 相控阵馈源还有补偿反射面变形、消除电磁干扰^[6-8]以及减小望远镜结构扰动影响^[9-12]的功能

国际合作的 SKA 项目将相控阵馈源技术列入了研究计划, 本文以 SKA 为依托, 以天线的灵敏度为标准, 在 Ku 频段进行相控阵馈源设计。

1 相控阵馈源天线的信噪比

对于深空探测、射电天文等无线电应用, 要接收遥远的星际距离的极其微弱的来波信号。灵敏度是评价射电望远镜天线性能最主要的指标之一, 是对其能探测到的最弱点源的度量。根据灵敏度的定义:

收稿日期: 2018-01-22; 修回日期: 2018-02-05。

基金项目: 政府间科技合作项目(2016YFE0100100); 国家高技术研究发展计划(2014AA123601)。

作者简介: 牛晟璞(1992-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事反射面天线馈源技术方向的研究。

杜彪(1962-), 男, 河北石家庄人, 研究员、博士、博士生导师、所首席专家、所副总工程师, 主要从事卫星通信地球站天线、微波天线和馈源系统方向的研究。

$$S = \frac{A_e}{T_{\text{sys}}} \quad (1)$$

式中, A_e 为天线的有效接收面积, T_{sys} 为天线系统的噪声温度。对于给定的人射波功率密度 S_m , 射电望远镜的灵敏度反映为天线的信噪比 SNR:

$$\frac{A_e}{T_{\text{sys}}} = \frac{k_B}{S_m} \text{SNR} \quad (2)$$

式中, k_B 为玻尔兹曼常数。

图 1 为 N 元相控阵馈源阵列及波束合成原理框图。

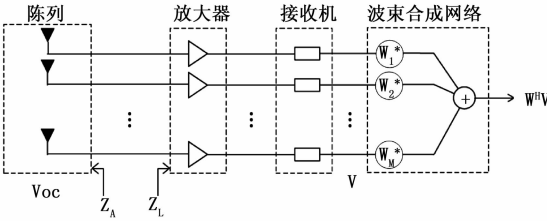


图 1 N 元相控阵馈源系统框图

相控阵馈源阵列将接收到的信号输送到后续接收链路, 然后通过波束合成网络加权输出。向量 v_{oc} 代表相控阵馈源阵列各阵元的开路电压向量, Z_A 为阵列互阻抗矩阵, Z_L 为单元端接负载的阻抗矩阵。每个接收机输出的电压向量由列向量 v 表示, 则最后的输出电压可以表示为 $V_{out} = \omega^H v$ 。式中 ω 是相控阵馈源作为发射阵列时阵列的激励, 其共轭 ω^* 则代表了相控阵馈源作为接收阵列所对应的波束合成因子; H 表示共轭转置。

接收机的输出电压向量 v 由信号 v_{sig} 、噪声 v_{noise} 和干扰 v_{int} 三部分组成。

$$v = v_{sig} + v_{noise} + v_{int} \quad (3)$$

其中: $v_{noise} = v_{rec} + v_{loss} + v_{ext}$, v_{ext} 是由外部噪声引起的, 主要包括地面噪声, 热物体噪声和天空噪声, v_{loss} 是由于阵列损耗引起的, 包括欧姆损耗和介质损耗, v_{rec} 是放大器前端到接收机的噪声引起。

实际应用中的噪声、干扰, 甚至承载信息的信号都可以看作随机过程, 考虑到接收机输出电压的统计特性, 其相关矩阵可以使用抽样估计描述为:

$$R_v = E[vv^H] \quad (4)$$

输出电压的相关矩阵可以表示为^[13]:

$$R_v = R_{sig} + R_{noise} + R_{int} \quad (5)$$

假设存在一个转换矩阵 Q , 使得:

$$v = Qv_{oc} \quad (6)$$

那么有:

$$Q = gZ_L(Z_L + Z_A)^{-1} \quad (7)$$

其中: g 是放大器的增益, 则:

$$R_v = QR_{v_{oc}}Q^H \quad (8)$$

所以当干扰为 0 时, 输出波束的天线信噪比为:

$$R_{SNR} = \frac{\omega^H R_{sig} \omega}{\omega^H R_{noise} \omega} \quad (9)$$

可以看出, 当环境、信号源等一定时, R_{SNR} 是关于 ω^* 的函数, 将上式对 ω^* 求偏导, 得:

$$\frac{\partial SNR}{\partial \omega^*} = \frac{[R_{sig} \omega]_n}{\omega^H R_{noise} \omega} - \frac{\omega^H R_{sig} \omega [R_{sig} \omega]_n}{(\omega^H R_{noise} \omega)^2} \quad (10)$$

式中, $[R\omega]_n = \frac{\partial}{\partial \omega^*} \omega^H R \omega$, 当上式为 0 时, R_{SNR} 有极大值, 于是有:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega^H R_{sig} \omega}{\omega^H R_{noise} \omega} \right) R_{noise} \omega &= \lambda R_{noise} \omega \\ &= R_{sig} \omega \end{aligned} \quad (11)$$

上式中, λ 为矩阵 $\left(\frac{\omega^H R_{sig} \omega}{\omega^H R_{noise} \omega} \right)$ 的特征值, 其最大值 λ_{max} 对

应着 R_{SNR} 的最大值。所以有:

$$\begin{aligned} R_{sig} &= V_{sig} V_{sig}^H \\ \lambda_{max} R_{noise} \omega &= V_{sig} V_{sig}^H \omega \end{aligned} \quad (12)$$

式中: λ_{max} 和 $V_{sig}^H \omega$ 都是标量; 而 ω 是一个相对值, 故在求解 ω 时可以忽略, 得到观测点源时最大信噪比所对应的波束合成因子:

$$\omega = R_{noise}^{-1} V_{sig} \quad (13)$$

2 Ku 频段相控阵馈源设计

SKA 项目需要在 Ku 频段进行多波束观测。本节针对具体的反射面天线, 进行 Ku 频段相控阵馈源设计。

2.1 明确相控阵馈源的设计目标

本文相控阵馈电的反射面天线为前馈的抛物面天线, 口径为 13 m, 半照射角为 25° , 项目要求同时产生 4 个波束, 单个波束的增益达到 60 dB, 噪声温度低于 130 K。

2.2 焦面场分析

图 2 在 12.5 GHz 计算了平面波从不同角度入射时天线焦平面的场分布。

从图 2 中可以看出, 平面波沿轴向入射时, 入射波经抛物面天线反射后汇聚在天线的焦点附近, 场分布呈波纹状分布, 总体上随场点到焦点距离的增大而减小。而随着入射波角度的偏移, 天线焦斑逐渐偏离反射面焦点。

2.3 阵列尺寸

项目计划在 Ku 频段同时产生 4 个瞬时波束, 分别在轴向的两侧有两个波束, 图 3 给出了入射角间隔 Ku 频段 HPBW 的平面波在天线焦平面的场分布, 4 个波束分别在偏离轴向 -1.5 HPBW, -0.5 HPBW, 0.5 HPBW 和 1.5 HPBW 角度处。

从图 3 可以看出中间两个焦面场的中心相距 32.8 mm, 每个分别偏离轴向 16.4 mm, 可以看出当阵列半径达到 75 mm 时, 入射的能量大部分可被吸收。由于受到阵元尺寸和项目要求的限制, 可能与上图尺寸有少许出入, 但理论上应尽量覆盖整个焦环。

2.4 阵元设计

开口波导是最简单的辐射器, 能够辐射电磁波。波导的功率容量大、插损小, 使得波导能够在微波波段或频率比较高的频段上传输电磁波能量, 具有口面分布容易控制、辐射效率高、结构紧凑、性能稳定可靠、容易实现窄波束和低副瓣或极低副瓣等诸多优点。

基于以上优点, 本文采用开口波导作为阵元。波导口采用方形口, 为了降低阵元与 LNA 之间的失配噪声, 在波导单元上添加同轴转换。建立模型并以驻波比为目标对模型进行优化, 得到最终的波导单元模型如图 4 所示。

波导单元模型优化后的驻波比如图 5 所示。

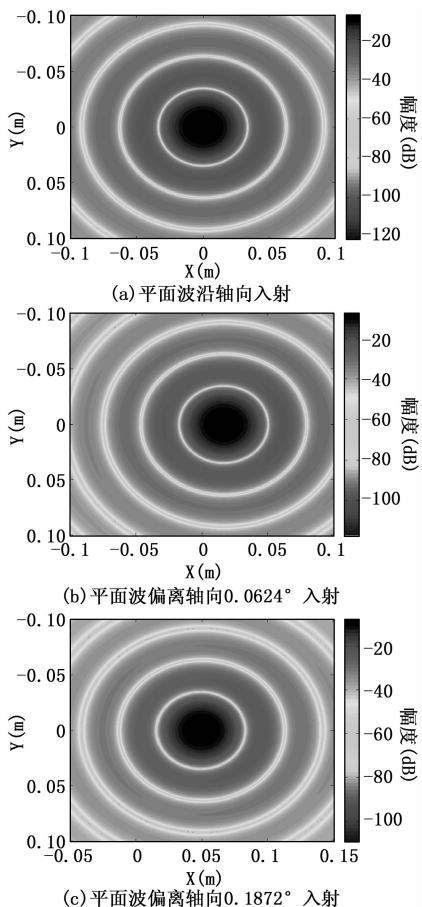


图 2 平面波从不同角度入射时天线的焦面场

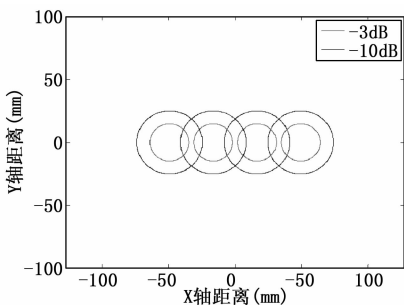


图 3 反射面天线焦面场分析

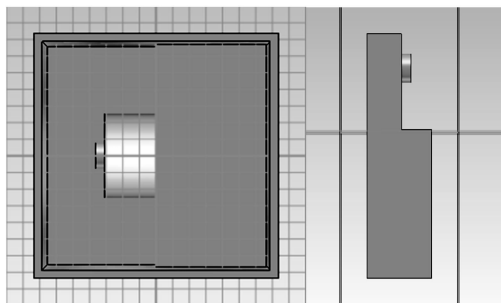


图 4 馈源阵列单元模型

从图 5 可以看出, 单个阵元在整个频段内的驻波比在 1.05~1.35 之间, 驻波性能良好。

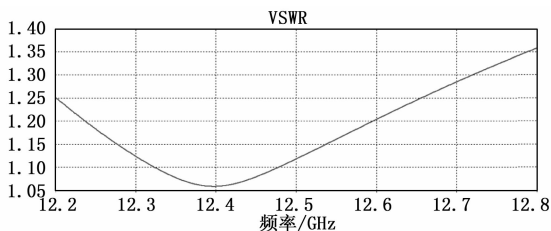


图 5 阵元的驻波比

2.5 阵列排布确定和阵元间距选取

常见的二维阵列排布有矩形阵和六边形阵。两种排布方式的采样间距不同, 六边形阵列的采样间距比矩形阵列的采样间距要大。所以, 六边形阵列可以采用较大的阵元间距, 并且与矩形阵列相比性能不会降低。较大的阵元间距既降低了阵列单元之间的耦合, 还减少了阵元的数量。

以开口波导阵列为研究对象, 分别对 9 元, 16 元, 25 元, 36 元的矩形阵和 7 元, 19 元, 37 元的六边形阵进行仿真, 得到天线的噪声、增益和灵敏度随阵元间距的变化, 仿真结果如图 6 和图 7 所示。

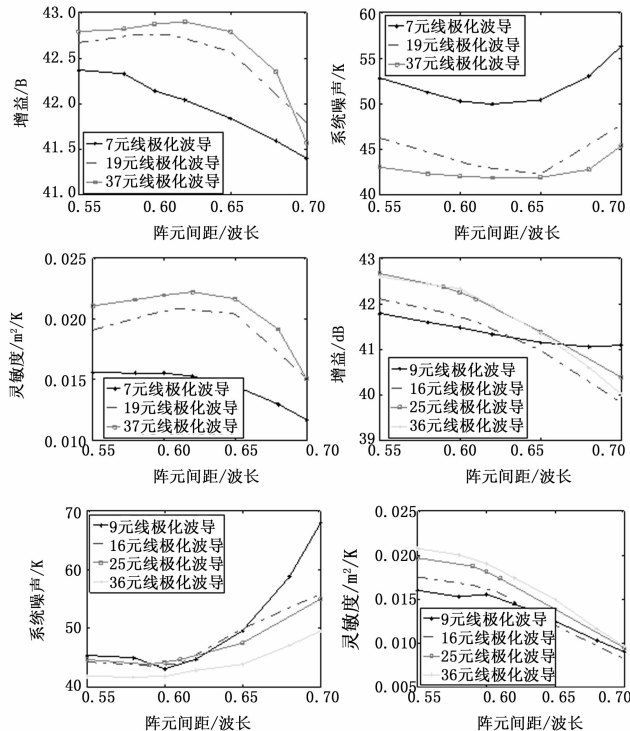


图 6 六边形和矩形阵列性能

从图 6 可以看出布阵形式相同时, 单元个数越多, 天线的增益越大, 灵敏度越高。从图 7 可以看出, 当单元个数相差较少时, 六边形阵的增益和灵敏度都高于矩形阵。

图 8 为 19 元六边形阵和 16 元矩形阵与焦面场的匹配图。

从图 8 可以看出, 天线单元个数相差较少时, 六边形阵与焦面场的匹配比矩形阵与焦面场的匹配好。

通过以上分析, 可以看出六边形阵可以用较少的单元个数实现较高的灵敏度, 因此六边形排布更适合本文。

项目计划利用 20 余个阵元产生 4 个波束。本文利用 7 个阵元组成一个六边形阵, 产生一个波束, 每两个相邻阵列共用

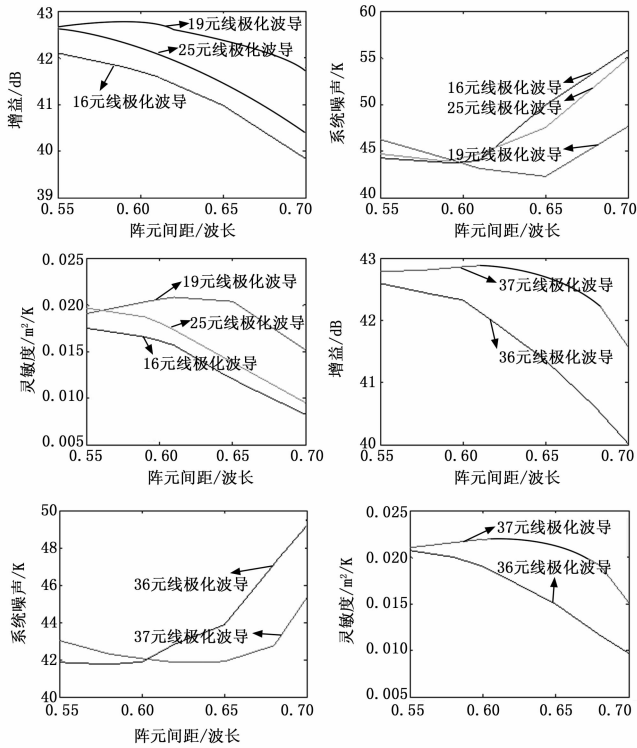


图7 单元个数相近的六边形和矩形阵列性能对比

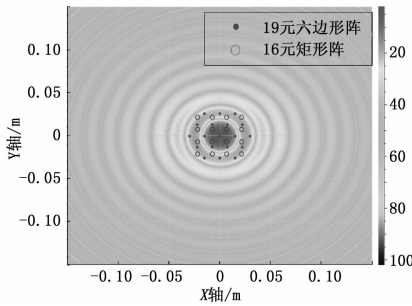


图8 六边形阵和矩形阵与焦面场匹配图

两个阵元, 其模型如图9所示。

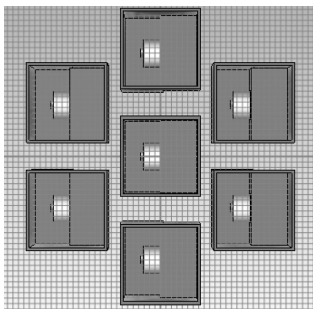


图9 六边形阵模型

通过仿真得到天线的增益、效率、噪声温度和灵敏度随阵元间距的变化如图10所示。

从图10可以看出, 可以看出随着阵元间距的增大, 天线的效率和增益先增大后减小, 系统的噪声温度先降低后升高, 系统的灵敏度先升高后降低, 在 $d=0.72\lambda$ 时达到最高。所以最终阵元间距为 0.72λ 。

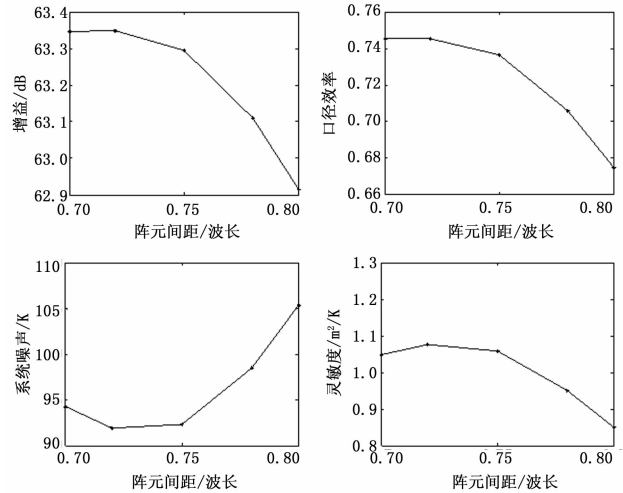


图10 阵元间距对系统性能的影响

3 仿真结果与分析

通过上述分析确定最后的阵列设计参数如下表所示。

表1 PAF 参数

技术参数		数值
阵列	阵元形式	开口波导
	阵元数量	22
	阵列排布	六边形
	阵元间距	0.72λ
	极化	单线
波束合成网络	瞬时波束数量	4
	各波束所用单元	7

最终模型如图11所示。

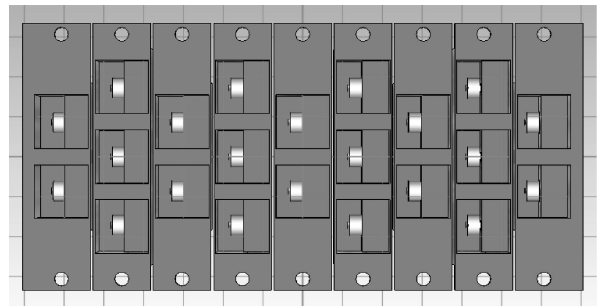


图11 馈源阵列模型

通过仿真得到馈源阵列每个单元在整个频段内的驻波比如图12所示。

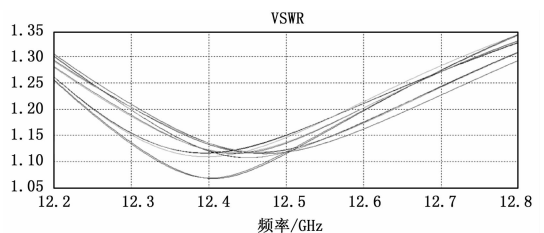


图12 馈源阵列驻波比