DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.06.004

一种用于星载多波束相控阵的稀疏阵列

姚亚利,何海丹,温　剑,侯禄平,李秀梅,张　云
(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘　要:现有的技术较难满足星载多波束相控阵天线射频前端的通道间距,已有的研究工作大量集中在提高射频电路和芯片的集成度,提出采用稀疏布阵的方式来增加天线单元的平均间距,从而缓解现有技术条件下的高密度集成难题。设计了Ka频段八波束相控阵天线的稀疏布阵阵面,首先采用遗传算法优化设计64元稀疏子阵,子阵增益在±60°扫描范围内大于18.6 dB,该子阵沿4个象限镜像对称,便于高效设计将不规则分布的天线单元端口与规则排布的R组件端口进行互连的带状线转接板,然后随机旋转、平移36个子阵拼接成全阵,在一定程度上打乱子阵分布均匀性,以起到栅瓣抑制的作用。该方法具有简单、高效、快捷的优点,稀疏阵列的设计结果基本能满足工程应用需求,适用于星载多波束相控阵。

关键词:星载;多波束;相控阵;稀疏阵列
中图分类号:V443;TN91　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1674-7135(2022)06-0030-06

A sparse array for satellite-borne multi-beam phased array

YAO Yali, HE Haidan, WEN Jian, HOU Luping, LI Xiumei, ZHANG Yun
(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The existing is difficult to meet the channel spacing of the RF front-end of the satellite-borne multi-beam phased array antenna. The existing research work focuses on improving the integration of RF circuits and chips. A sparse array is proposed to increase the average spacing of the antenna elements, so as to alleviate the high-density integration problem. The sparse array of Ka-band eight-beam phased array antenna is designed. Firstly, genetic algorithm is used to optimize the 64-element sparse subarray, and the subarray gain is greater than 18.6 dB over the ±60° scanning range. The subarray is mirrored symmetrically along the four quadrants, which is convenient for the efficient design of the stripline transition board that interconnect the irregularly distributed antenna unit ports with the regularly arranged R module ports. Then 36 subarrays are randomly rotated and translated to form the full array. To some extent, the distribution uniformity of the subarray is disturbed to suppress the grating lobe. The method proposed is simple, efficient and fast. The design results of sparse array can basically meet the requirement of engineering applications, and is suitable for satellite-borne multi-beam phased array。

Key words: satellite-borne; multi-beam; phased array; sparse array

0　引言

低轨卫星通信是利用低地球轨道部署的向地面和空中用户提供宽带通信服务的新型星座网络,具有广覆盖、低延时、宽带化、低成本等特点。随着卫星制造和火箭发射成本的下降,采用低轨宽带卫星提供宽带接入服务已具备一定竞争力,低轨星座

收稿日期:2022-08-03;　**修回日期**:2022-09-17
引用格式:姚亚利,何海丹,温剑,等.一种用于星载多波束相控阵的稀疏阵列[J].空间电子技术,2022,19(6):30-35. YAO Y L, HE H D, WEN J, et al. A sparse array for satellite-borne multi-beam phased array[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(6):30-35.

建设迎来了猛烈的发展热潮[1]。

卫星平台作为重要的节点,通常需要同时与多个用户目标进行通信,为了提高孔径利用效率、减少设备、降低成本,星载天线往往需要同时形成多个波束[2-3]。多波束天线由于其能够高增益地覆盖较大的地面区域,又能根据需要调整波束形状,而得到深入研究和广泛应用[4]。

多波束天线按照其结构分可以分为 3 类:反射面式、透镜式和直接辐射相控阵。

反射面式多波束天线和透镜式多波束天线具有相似的结构,这两种结构的多波束天线应用的时间较早[5],对其研究也相对成熟。这两种天线在波束赋形上有一定优势,并且它们的波束形成网络结构相对简单,但是它们的聚束结构一般都比较庞大而不适合在低轨小卫星上使用。

直接辐射式相控阵[6]由可实现波束扫描的阵列天线构成,不需要庞大笨重的聚束结构,本身具有体积和重量优势,可以比较容易安装在卫星的表面上,大小卫星都可以使用。尽管成本相对较高,但随着相关技术和设备的日益成熟,从单个波束成本的角度来说,相控阵天线对于低轨小卫星不再是不可接受,越来越多的低轨小卫星开始采用相控阵天线,之前的铱星和“全球星”都采用了相控阵天线,新一代的 LeoSat、SpaceX“星链”[7]星座等也都采用了相控阵天线。

当需求从单波束提升为多波束,相控阵天线面临的主要问题是器件数量增多带来的集成和散热问题。若波束数量为 N,相比单波束相控阵,多波束相控阵中某些射频器件的数量增加为 N 倍。对于工作在 30 GHz 附近的接收天线来说,常规半波长阵列的单元间距已经小到 5mm 左右[8],对应的多波束收发通道间距则为 5mm/N,现有的很多芯片尺寸已经很难再减小来适应此间距的空间限制。

解决该难题主要有两个方向:一是提高芯片集成度,如采用晶圆级封装[9-10]等技术,使多波束 TR 组件尺寸满足天线单元间距的需要;二是增加天线单元间距,缓解芯片集成的压力。然而,若波束数量多达 8 个甚至更多,现有的芯片封装和集成技术很难实现半波长单元间距对应的多波束通道间距,且带来的高密度集成下的散热问题也难以解决。所以本文提出采用稀疏布阵的方式来增加天线单元的平均间距,从而缓解现有技术条件下的高密度集成及其散热难题。

为解决多波束相控阵天线的集成难题,本文对 Ka 频段八波束相控阵天线的阵面进行稀疏布阵设计,首先采用遗传算法对 4 个象限镜像对称的子阵进行稀疏布局,然后通过旋转、平移等方式进行子阵拼接合成 2304 元全阵,在一定程度上打乱了阵列的相对均匀性,在扩大单元间距的前提下,尽可能对栅瓣进行抑制。设计了带状线转接板将稀疏布阵后不规则分布的天线单元端口与规则排布的 R 组件端口进行互连。本文提出的方法具有高效、快捷的优点,计算结果基本能满足工程应用需求。

1　八波束相控阵天线

1.1　原理框图

八波束星载接收有源相控阵天线由天线阵面、R 组件、波束形成网络、变频组件、电源模块、波控器等组成[11]。其原理框图如图 1 所示。天线阵面由 N 个单元组成,电磁波信号经天线单元接收后,通过一分八功分器分为 8 路,共 $8\times N$ 路,再经接收前端实现 $8\times N$ 路信号的放大、移相、波束合成和下变频输出。与常规单波束相控阵天线相比,八波束相控阵天线的 R 组件通道数目变为 8 倍,即单通道所占面积变为 1/8,1.2 节中将详细说明该八波束相控阵天线的设计难点。

1.2　设计难点

八波束相控阵天线工作的中心频点为 30 GHz,按照栅瓣抑制条件,天线扫描至 60°对应的单元间距不应大于 5.3 mm。射频前端中,除去前级共用的驱动放大器和低噪声放大器等,其余单通道放大、滤波、移相等器件所占的面积不能超过(5.3 mm/8)×(5.3 mm/8),即 0.6625 mm×0.6625 mm,这对射频前端造成很大的集成压力。本文采用稀疏布阵方式,增加天线单元间的平均间距,以解决高密度集成难题。

稀疏阵列中的单元间距非均匀,而射频前端中各通道一般为等间距均匀分布,所以在阵面和射频前端之间需要设计由非均匀分布端口向等间距均匀分布的端口转换的带状线转接板。但是对于大规模阵列,天线单元数量和射频前端通道数过多,若稀疏阵列中的单元分布没有任何规律可循,那么转接板中的每一根带状线都要单独设计,还要避免交叉,设计复杂度高。本文拟采用以下方法解决该设计难题:

第一,将大规模阵列拆分为 36 个相同的子阵,

把大规模阵列优化设计的问题转变为子阵级的优化设计；

第二，将子阵的 4 个象限进行对称设计。

这样不仅降低了转接板设计的复杂度，而且提高了阵列优化设计的效率。

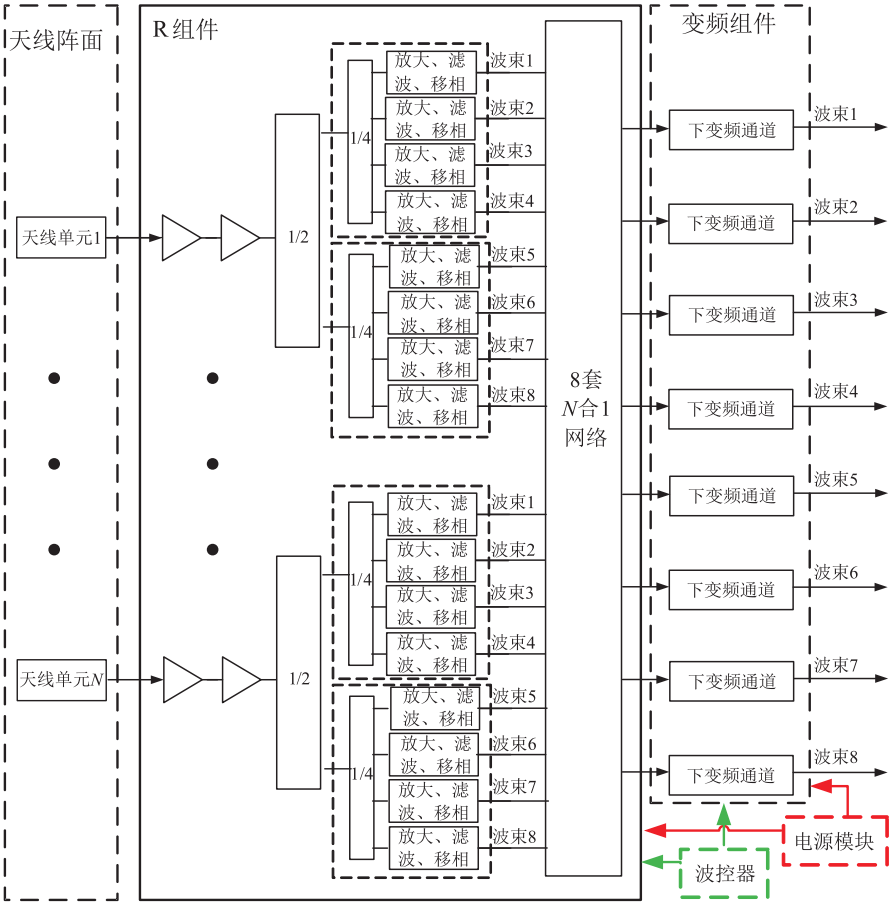


图 1　八波束相控阵天线原理框图

Fig. 1　Functional block diagram of eight-beam phased array antenna

2　稀疏阵优化设计

2.1　子阵优化设计

对单元间距为半波长（30 GHz 对应的半波长为 5 mm）的 18 × 18 均匀阵列使用遗传算法进行抽取，得到每个象限 16 个阵元，4 个象限镜像对称后得到 64 个阵元。阵列的平均单元间距稀疏至 11.8 mm，能够适应 R 组件的通道间距。

约束阵元数和孔径的稀疏阵列有着确定的稀疏率。在一定的稀疏率下优化布阵，就是在阵元数约束和孔径约束下实现阵元位置的设计。运用遗传算法进行阵列综合的研究中，适应度函数用来评价每个个体染色体的优劣[12]，通常根据具体问题的优化目标要求来构造。这里的优化目标包括天线方向图旁瓣电平 *SLL*、增益 *Gain* 等，而决策变量则是阵元位置、激励、相位等。

若需使阵列增益尽可能地大，而且旁瓣电平低于一定的期望值 *SLLd*，则适应度函数可以表示为：

$$Fitness = w1 \times \max(Gain) - w2 \times \min(SLL - SLLd, 0) \quad (1)$$

其中 $w1$，$w2$ 为权重系数。max 表示求最大值函数，min 表示求最小值函数，通过优化适应度函数 *Fitness* 的值，来优化阵元的位置，使方向图在低于一定副瓣的条件下，阵列增益尽可能的高。由于工程上需要最低增益也满足应用需求，其中 *Gain* 和 *SLL* 选取为最大扫描角度下的增益和旁瓣电平。

利用遗传算法[13-14]，采用轴对称布阵，从 18 × 18 半波均匀阵中抽取 64 个阵元，得到稀疏后的子阵布局如图 2 所示。子阵仿真结果如图 3 所示，子阵增益在扫描角（0°，0°）（0°，60°）（90°，60°）分别为 24.84、18.69、19.12 dB，旁瓣电平分别为 −12.52、−8.32、−8.43 dB。

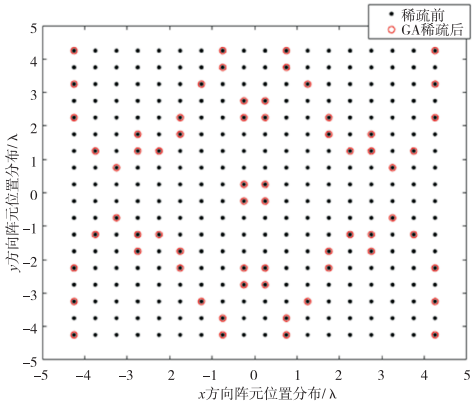
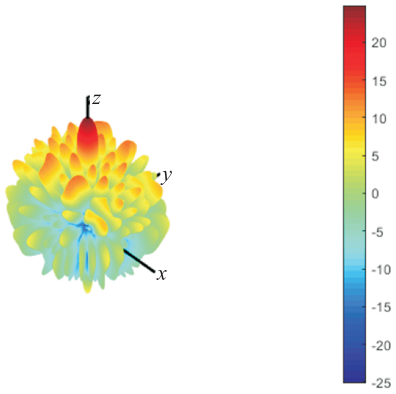
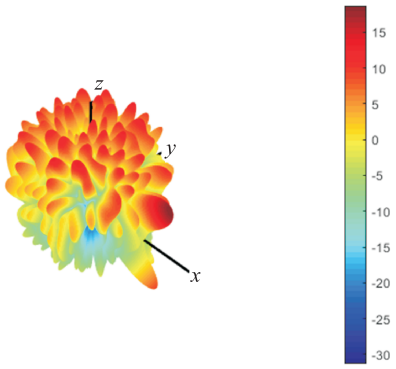


图 2　稀疏子阵布局

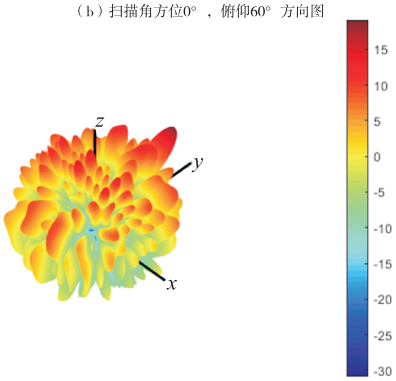
Fig. 2　Sparse subarray layout



(a) 扫描角方位0°，俯仰0° 方向图



(b) 扫描角方位0°，俯仰60° 方向图



(c) 扫描角方位90°，俯仰60° 方向图

图 3　子阵仿真结果

Fig. 3　Simulation results of subarray

2.2　全阵优化设计

对 36 个子阵直接拼接而成的 2 304 元全阵进行旋转和平移的操作,在一定程度上打乱阵列的相对均匀性,以改善阵列的性能,使大单元间距条件下副瓣得到一定改善,全阵布局如图 4 所示。全阵仿真结果如图 5 所示。全阵增益在扫描角(0°,0°)(0°,60°)(90°,60°)分别为 40.66,34.22,34.23 dB,旁瓣电平分别为 −17.11,−14.1,−14.9dB。由仿真结果可以看出,全阵的栅瓣相比子阵得到了一定抑制。

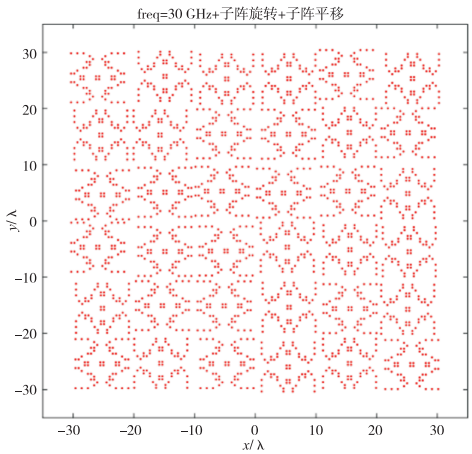
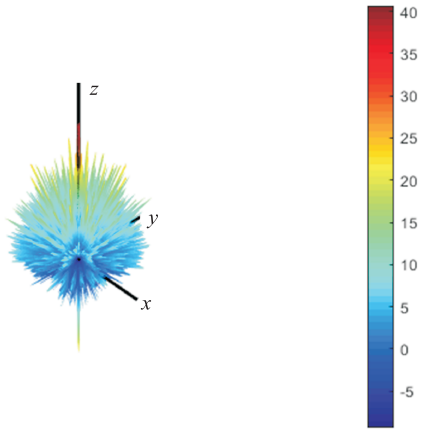
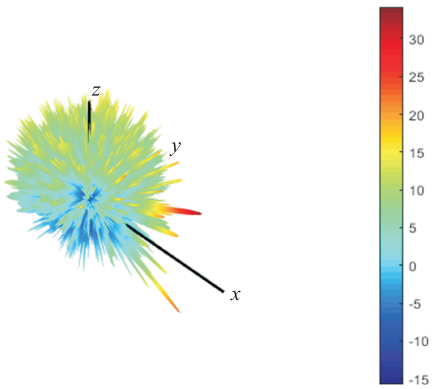


图 4　稀疏全阵布局

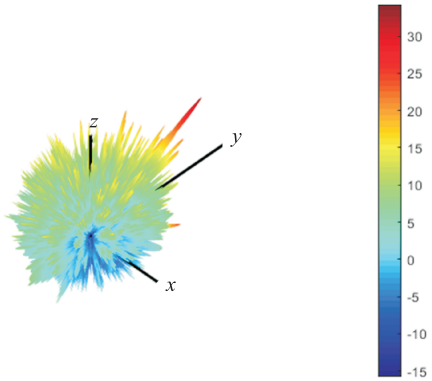
Fig. 4　The whole sparse array layout



(a) 扫描角方位0°，俯仰0° 方向图



(b) 扫描角方位0°，俯仰60° 方向图



（c）扫描角方位90°，俯仰60°方向图

图 5　全阵仿真结果

Fig. 5　Simulation results of the whole sparse array

3　转接板设计

接收天线子阵端口与 R 组件端口位置如图 6 所示，图中小矩形为微带贴片天线单元，红色圆点为 R 组件输入端口位置。天线单元采用的是同轴底馈的圆极化矩形微带贴片天线，贴片尺寸约为 3.2 mm × 2.4 mm，介质基板采用厚度为 30 mil 的 Rogers RT/duroid 5880。

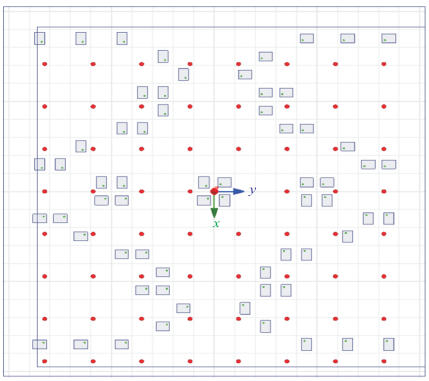


图 6　接收天线子阵端口与 R 组件端口位置示意图

Fig. 6　Diagram of the receiving subarray's ports location and R module's ports location

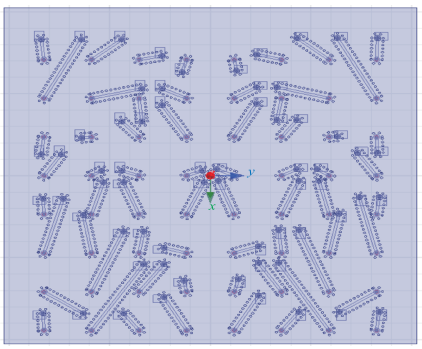


图 7　接收天线子阵过渡板设计版图

Fig. 7　The design layout of receiving subarray transition board

由图 6 可知，需要将稀疏布阵后不规则分布的天线单元端口过渡转接，与规则排布的 R 组件[15]端口进行互连。利用脚本语言和 Ansys HFSS 设计带状线过渡板，其版图如图 7 所示，其中最长的带状线仿真插入损耗在频率 30 GHz 小于 0.4 dB，不同长度带状线带来相位差可由 R 组件中的移相器补偿。

4　结论

多波束相控阵天线的射频前端通道数随波束数量的增多而成倍上涨，给射频电路的集成带来了巨大压力。已有的研究工作大量集中在提高射频电路和芯片的集成度，而本文从另外的角度来解决该问题，提出采用稀疏布阵的方式来增加天线单元的平均间距，从而缓解现有技术条件下的高密度集成难题。本文对 Ka 频段八波束相控阵天线的阵面进行稀疏布阵设计，首先采用遗传算法对 4 个象限镜像对称的子阵进行稀疏布局，然后通过旋转、平移等方式进行子阵拼接成全阵，并设计了带状线转接板将稀疏布阵后不规则分布的天线单元端口与规则排布的 R 组件端口进行互连。提出的方法具有高效、快捷的优点，且便于加工、组装和维护，计算结果基本能满足工程应用需求。目前仅开展了设计工作，后续将加工该阵面用于整机中进一步验证其性能。

参考文献：

[1]　刘佳. 低轨宽带卫星通信产业发展及前景分析[J]. 中国新通信，2021，23(1)：108-110.

[2]　杨涛，李磊，邹永庆. 星载多波束相控阵馈电反射面天线研究[J]. 天地一体化信息网络，2022，3(2)：12-19.

[3]　曹佳东. 星载大口径反射面天线多波束设计方法研究[D]. 西安：中国航天科技集团公司第五研究院西安分院，2021：1-5.

[4]　周乐柱，李斗，郭文嘉. 卫星通信多波束天线综述[J]. 电子学报，2001，29(6)：824-828.

[5]　易克初，李怡，孙晨华，等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报，2015，36(6)：161-176.

[6]　汪春霆，翟立君，徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术，2020，46(5)：493-504.

[7]　陈文江，陈麒安，陈宏铭，等. 低轨卫星通信的机遇、挑战与量测方案[J]. 中国集成电路，2022，31(6)：22-30+43.

[8]　张萌. Ku 频段低剖面宽带相控阵天线技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2022：10-14.

[9] 刘博源,江云,黄昭宇,等. 基于晶圆级封装的 W 波段微同轴天线小型化设计与实现[J]. 电子学报,2022,50(5):1098-1106.
[10] BOTTWINKEL B A. 发展中的半导体封装技术[J]. 中国集成电路,2019,28(12):41-42 +47.
[11] 俞浩辰. K/Ka 波段有源相控阵收发及波束控制电路研究[D]. 成都:电子科技大学,2022:9-15.
[12] 陈客松. 稀布天线阵列的优化布阵技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2006:41-42.
[13] 孙建邦,李建兵,王鼎,等. 基于实数编码遗传算法的稀布阵列综合[J]. 电讯技术,2022,62(9):1272-1277.
[14] 秦自立,杨冠,王方力,等. 改进遗传算法优化 MIMO 稀布阵列[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2021,19(3):442-447.
[15] 马东磊,于常永,史晓飞,等. Ka 频段有源瓦片天线的设计[J]. 空间电子技术,2022,19(3):90-93.

作者简介:姚亚利(1989—),河南洛阳人,博士研究生,高级工程师。主要研究方向为相控阵天线。E-mail:yylxidian@163.com