

深空小规模天线上行组阵布局分析研究

郭劲松 洪家财

(装备学院 北京 101416)

摘要: 针对天线上行组阵中阵元布局对远场功率合成增益影响的问题,给出了组阵地面布局的要求,包括阵元间最小距离、布局紧凑性、灵活性、可扩展性和经济性等。在此基础上对小规模组阵(阵元数3~36)布局进行了分析,设计了不同阵元时对应合成增益最高的布局方式。最后用计算机仿真各种布局情况下在月球量级远场目标点的功率合成增益,比较远场功率合成增益大小并总结了一些规律,结果表明各阵元的最优布局与理论分析相符。考虑组阵规模的可扩展性给出了16元阵、36元阵的最优布局,可为实际应用提供参考。

关键词: 天线组阵;上行组阵;天线布局;功率增益;深空测控

中图分类号: TN820.1⁺5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Analysis on the layout of small-scale antenna uplink arraying for deep space

Guo Jinsong Hong Jiakai

(Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: The requirements of the array layout is given to solve the problem of the effect of antenna layout to the far-field power combining gain in antenna uplink arraying, including the minimum distance between elements, the compactness, flexibility, scalability and economical of layout. The layout of small-scale array(3~36 array elements) is analyzed, and of the highest power gain of different array element is designed. Then, using computer simulate lunar distance far-field power gain of different layouts, the gain value is compared and summed up some rules. The simulation results show that the optimal layout is consistent with theoretical analysis. considering the scalability of arraying scale, reference layout of 16 and 36 array elements is given.

Keywords: antenna arraying; uplink array; layout of antenna arrays; power gain; deep-space TT&C

1 引言

随着深空测控通信距离遥远,信号衰减增大,对测控系统的资源优化配置要求也随之增加^[1-2]。深空测控需求催生了许多新技术的出现和发展^[3-4],对测控天线加工精度和天线增益要求提高可以有效提高深空测控通信能力^[5-6],但是依靠增大单个天线口径来提高链路信噪比的传统方法其效果不再明显,当天线口径较大时,将面临天线重力下垂、风负荷加大、热变形、天线面加工精度、维护成本等方面的问题。此外,通过增加发射功率来提高链路信噪比的方法也遇到了瓶颈,并且发射功率太大将不利于地面工作人员的安全,利用小天线组阵代替单个大天线的方法进行深空探测将是未来发展的趋势^[7]。

天线组阵下行技术已经得到成功应用,而天线上行组阵的可行性已经得到验证,我国也在开展天线上行组阵的研究,未来将利用大量小天线建设大规模天线组阵,而初期

将会建设规模较小的组阵进行试验验证,后期逐步扩大组阵规模,提升深空测控能力。

天线上行组阵可以有效提高发射天线的功率合成增益,提供比单个天线高得多的等效全向辐射功率(EIRP),一个重要的应用就是在航天器紧急情况下,给增益非常低的发射控制指令^[8]。由于多种原因,在深空测控通信中发射功率的理想合成增益值不可能达到,其中一个影响因素与地面天线有关,对于给定数量和规格的天线,组阵的合理布局对增益的提高有重要意义,特别是各方面技术要求达到极限时,合理的布局有利于增益的提高。目前对大规模组阵研究和天线下行组阵技术研究较多,而对小规模天线上行组阵布局研究较少。

本文对天线组阵布局的要求进行了总结,对小规模组阵布局进行了理论分析和仿真验证,比较不同布局时远场同一点功率合成增益的大小,总结出布局的一些规律,综合

考虑组阵的紧凑性、子阵划分灵活性、组阵规模扩展等因素,给出了 16 元阵和 36 元阵的最佳参考布局。

2 天线组阵布局要求

天线上行组阵主要目的是提高发射信号的上行数据率,即提高 EIRP 值。在单个天线辐射功率、天线增益以及天线数量确定的情况下,要最大限度的提高远场合成功率增益,要求对各阵元地面布局进行合理设计,布局的要求主要从以下几方面考虑^[9-11]:

1) 阵元间无相互遮挡的影响,在天线最低工作仰角的条件下,根据天线口径的大小,可以计算出阵元间的最小距离。如图 1 所示,天线口径为 D ,最低工作仰角为 α ,由几何关系可计算出组阵阵元间最小无遮挡间隔为: $L_{\min} = D/\sin\alpha$ 。

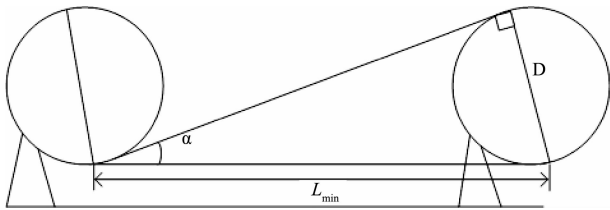


图 1 遮挡对天线间隔的要求

2) 布局应该紧凑,以便于精确修正对流层水汽变化引起的相位误差^[12]。天线阵系统的信号合成损失主要由阵元间的相位对齐误差决定。天线间距越小,信号传输的大气特性相似度越高,由大气引起的相位漂移误差越小,其接收信号相位的相关度就越高。由于对流层水汽变化的典型尺寸为几百米,间隔小于该尺寸的相位变化可以看成相关的,微分相位变化的幅度相应减小。对于在给定基线上的大气相位误差,其大小随频率的升高而增大,因此在 Ka 频段时对大气相位误差的要求更为重要。

此外布局紧凑可减少组阵的占地面积,缩短电缆铺设长度,减少系统成本。

3) 布局应使天线阵能够产生低旁瓣的瞬时合成波束,以尽量减少来自目标附近行星、太阳或其他航天器的噪声,甚至可以分裂阵波束以同一频率跟踪多个航天器,实现同时多任务工作。

4) 布局应该具备各阵元灵活划分和组合以达到改变子阵规模的能力。不同深空测控任务要求不同数量的天线,通过划分子阵可以改变组阵规模,合理分配利用资源。可以用不同子阵同时对一个航天器进行数据上传和下行接收,也可同时对多个航天器进行工作。重大任务中,若某一阵元出现故障,可以迅速利用周围阵元代替工作,保证任务连续不中断。

5) 组阵规模的可扩展性。由于技术条件和实际需求,天线组阵系统建设初期阵元数量较少,随着任务需求的增加,要能够在原有组阵的基础上增加天线,实现组阵规模扩展,功能提升。

6) 此外,天线布局要有足够的土地展开范围,各阵元通过电缆连接到一个操作控制中心,各阵元由中心控制进行工作。

3 小规模组阵布局分析

我国正在研究用天线上行组阵用于提高深空上行链路能力^[7],今后大规模组阵将是在小规模的基础上扩展而来,因此对小规模天线组阵的布局进行分析是必要的。

在天线上行组阵中,主要考虑远场目标处的功率合成增益值。组阵天线对深空同一目标发射信号,场强在远场实现干涉叠加,干涉条纹形状与目标点和地面天线的相对位置有关,直接影响合成增益的大小。各阵元相对于目标点的距离差为零时,合成功率增益最大。两天线组阵时,航天器接收到的信号功率比单个天线时增加 6 dB,三天线组阵时信号功率可以增加 9.5 dB。

从天线组阵布局的要求可以知道,直线布局形式的远场干涉条纹类似于明暗相间的杨氏双缝干涉条纹,功率加强区域和减弱区域交替出现。阵元数增加时,左右对称的阵元增加导致远场合成功率相消增加,不利于功率合成。实际中,直线布局对占地面积条件要求苛刻,布局也不紧凑,此方法不可取。

对于最简单的三元阵布局,可以利用正三角形良好的对称性来进行布局,在正三角形中心设立组阵系统操作控制中心,可以实现电缆长度最短。对于四元阵,可以考虑 2×2 方形和 Y 形布局,如图 2,还可从正三角形的扩展性考虑对四元阵进行菱形布局,可知方形布局对称性和紧凑性最好,可在其中心设立组阵系统操作控制中心,并实现电缆铺设长度最短。

4元阵Y形布局

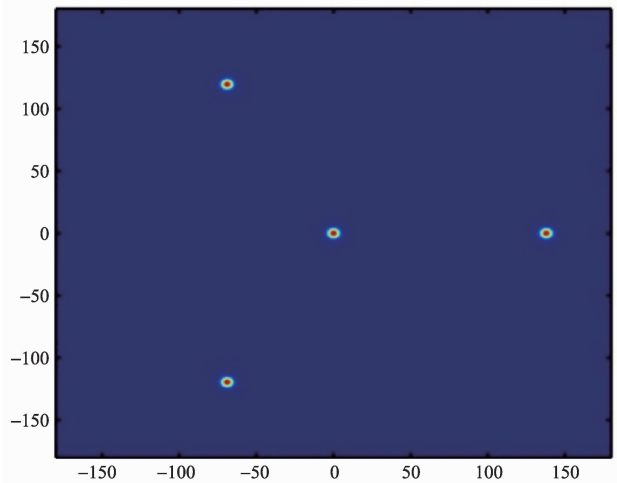


图 2 四元阵 Y 型布局

用同样的方式分析,可以利用正六边形良好的对称性对六元阵进行布局,而七元阵可以在正六边形中心增加一个阵元实现,这样布局的紧凑性最好,如图 3。七元阵这种布局在理论上要优于其圆形布局,因为相邻阵元间隔一定时,圆周上阵元数量越多圆半径越大,阵元越分散,紧凑性

变差,增加了布局总面积。

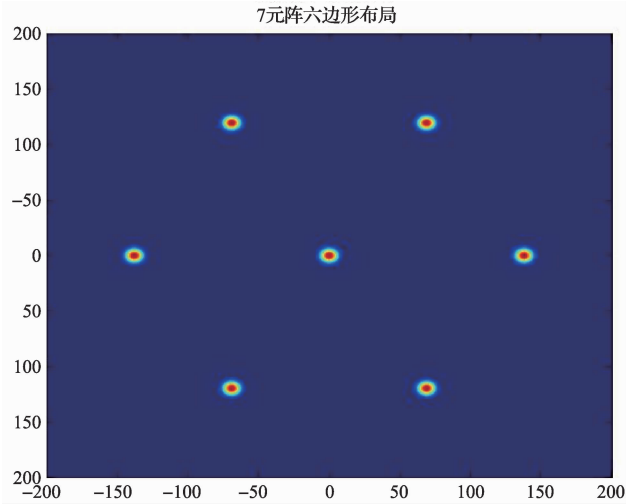


图3 7元阵正六边形布局

随着阵元数量的增加,组阵布局的方式选择增多。例如,对于九元阵,其方形布局应该优于菱形布局、圆形布局等,其中菱形布局如图4。对于16元阵同样有此结论,此外,从六元阵、七元阵的扩展性出发,可以设计出16元阵的另一种布局方式(本文称作16-DK型布局),如图5所示。该布局对称性较好,各阵元与相邻阵元的距离相等,而在其方形布局中不能满足这一条件,此外这种布局的扩展性比方形布局扩展性更好。

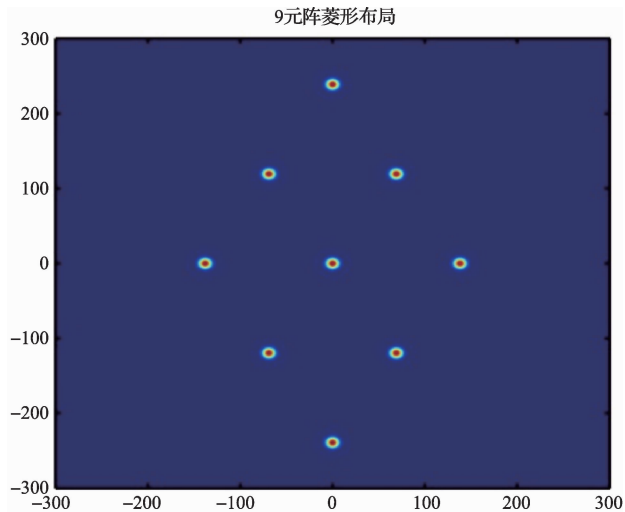


图4 9元阵菱形布局

利用16-DK型布局良好的可扩展性,在此基础上设计出36元阵的36-DK型布局,如图6所示。此外对于36元阵还可以用三个边长依次增大的正六边形组合布局,如图7,此布局对称性很好,但是可扩展性没有36-DK型扩展性好。这两种布局中相邻阵元的距离相等,而36元阵的方形布局不具备这一特点。

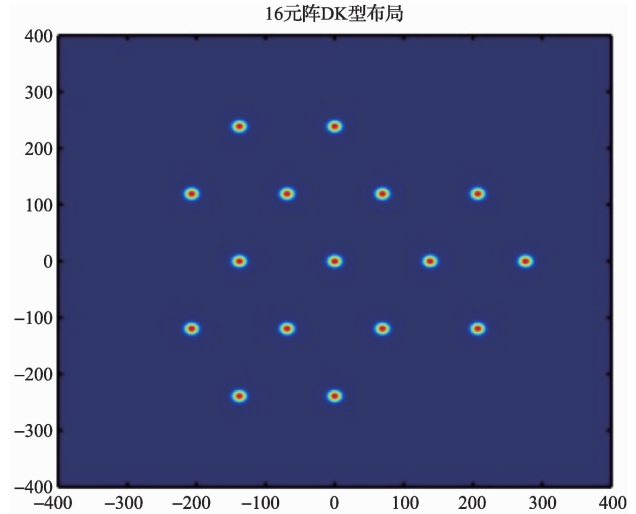


图5 16元阵DK型布局

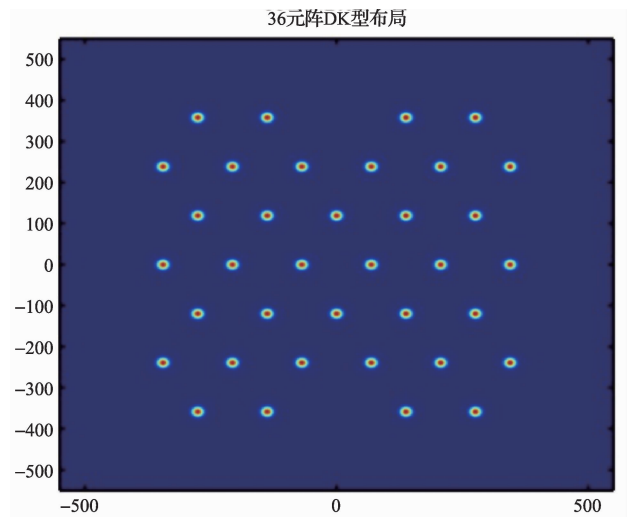


图6 36元阵DK型布局

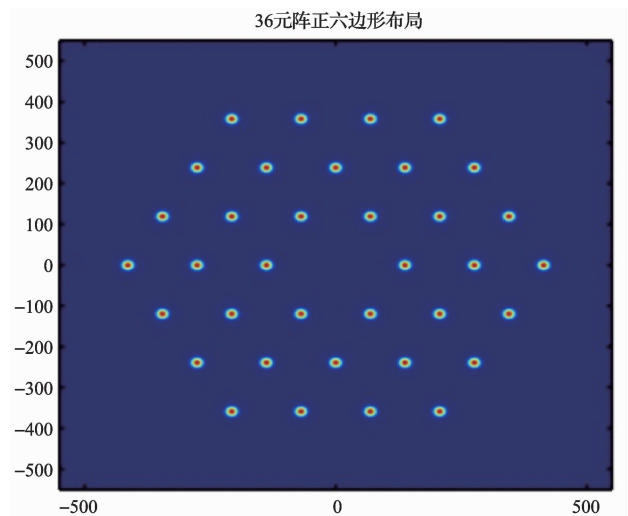


图7 36元阵正六边形布局

4 布局仿真分析

根据以上分析,下面通过 MATLAB 软件进行仿真验证不同阵元时的最佳布局方式。综合考虑组阵的上下行链路以及成本因素,选用 12 m 口径天线仿真^[11],频率设为 2 GHz,设最小跟踪仰角 $\alpha = 5^\circ$,利用公式 $L_{\min} = D/\sin\alpha$ 计算出天线间隔 $L_{\min} = 138$ m,以天线地面分布平面建立 xoy 坐标系,取月球量级远场距离 $z = 40$ 万千米点的合成功率进行测试,对比不同阵元时,相应不同布局情况的远场辐射合成功率相对于单个天线辐射时的增益值。

表 1 不同阵元数、不同布局时的远场功率合成增益比较

布局方式	直线	方形	菱形	正六边形	圆形	其他			
三元阵	9.539					9.541(正三角形)			
四元阵	12.034	12.038	363	12.038	362	12.036(Y型)			
七元阵	16.879				16.897	16.894			
九元阵	19.05	19.077	28	19.077	27	19.073			
16元阵	23.96	24.06	82	24.068	1	24.045	24.069	6(DK型)	
36元阵		31.092	88	31.092	83	31.096	7	31.096	0(DK型)

3)由于正六边形对称性很好,故其布局的功率合成增益最高,布局紧凑性最优,但对阵元数量要求苛刻,可扩展性不强,如 36 元阵的正六边形布局。

4)16 元阵、36 元阵的 DK 布局兼顾了对称性和扩展性,且 16-DK 布局远场合成增益最高,而 36-DK 布局合成增益低于正六边形布局,这是因为正六边形的对称性更好。但其子阵划分的灵活性很好,中间阵元与其相邻阵元可以构成七元阵正六边形布局形式的子阵,且扩展性最好,而增益只是略低于正六边形。因此综合考虑建议使用 16-DK 和 36-DK 型布局。

5)从布局可以看出,布局的对称性很重要,且可以利用正三角形和正六边形的扩展来进行布局,如菱形布局也可以看着两个正三角形的组合,而 DK 型布局也可以看着多个正六边形的组合。

5 结 论

本文对天线上行组阵的小规模布局进行了分析,从远场功率合成增益大小的角度出发,理论分析并仿真比较了 3~36 元阵对应不同布局的功率合成增益值,仿真结果与理论分析相符,并总结得出了一些规律。考虑到天线组阵的可扩展性,对 16 元阵、36 元阵的不同布局进行了比较,设计了 16-DK、36-DK 两种布局形式。后续将从组阵合成波束全阵旁瓣优化、子阵旁瓣优化、大规模组阵布局优化、上行组阵载波相位标校以及相位误差分析等方面进行研究。

参考文献

[1] 吴伟仁. 深空测控通信系统工程与技术[M]. 北京:科

表 1 列出了不同阵元数、不同布局时的远场功率合成增益值(黑色字体表示不同阵元时对应功率合成增益最大的布局方式)。

对仿真结果进行分析,可总结出以下规律:

1)直线布局的合成效果最差,圆形布局其次,二者紧凑性差,对场地要求较高。

2)三元阵正三角形布局的合成增益优于直线布局增益,与理论分析相符。方形布局合成增益略微优于菱形布局,因为方形对称性和紧凑性好于菱形,其占地面积也更小。

学出版社,2013.

- [2] 陈怀艳,王宝龙,郝莉娜. 航天测控系统测试资源优化配置策略[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(4): 281-288.
- [3] 高丽娟,蒋太杰. 通信新技术解决深空通信问题研究[J]. 电子设计工程,2014(22):167-170.
- [4] 任海玉,高翔,闫毅,等. 基于虚拟仪器的深空信道仿真器的设计与实现[J]. 电子测量技术,2010,33(3): 89-92.
- [5] 俞建,赵杰. 远场暗室条件下圆极化天线增益不同测试方法分析研究[J]. 国外电子测量技术,2014(9): 34-36.
- [6] 孙永江,金华松,于建成,等. 船载测控天线面精度测试及调整方法[J]. 国外电子测量技术,2013,32(9): 18-21.
- [7] 徐茂格,柴霖. 我国深空天线组阵技术现状与发展思考[J]. 电讯技术,2014,54(1):109-114.
- [8] 闫春生. 深空大规模天线组阵阵型设计[C]//第 26 届飞行器测控年会,南京:中国宇航学会,2012: 342-348.
- [9] 徐茂格. 深空大规模天线组阵布局设计[J]. 飞行器测控学报,2013,32(1):7-10.
- [10] 史学书,王元钦. 深空大规模天线阵布局优化方法研究[J]. 宇航学报,2010,31(2):478-484.
- [11] 史学书,党宏杰,洪家财,等. 利用梯度算法优化深空天线阵布局[J]. 装备学院学报,2013,24(1):73-76.

(下转第 75 页)