

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.020

引用格式: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. [XU Mao-ge, CHAI Lin. Technical Status and Development Suggestion of China's Deep Space Antenna Arraying[J]. Telecommunication Engineering, 2014,54(1):109-114.]

我国深空天线组阵技术现状与发展思考^{*}

徐茂格^{**},柴 霖

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:深空天线组阵是深空测控通信重要的发展方向,近年来国内相关科研院所开展了大量的理论算法研究,相关单位也开展了样机研制以及多次对星演示验证试验。首先,系统地给出了天线组阵的基本概念与内涵,并与射电天文组阵和传统相控阵开展了对比分析;其次,总结归纳了国内现阶段研究成果,包括合成算法研究情况与典型试验验证情况;最后,结合国外最新发展情况,给出了后续大规模可扩展宽带组阵研究方向的发展建议。

关键词:深空探测;测控通信;天线组阵;演示验证试验

中图分类号:V476;TN820.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)01-0109-06

Technical Status and Development Suggestion of China's Deep Space Antenna Arraying

XU Mao-ge, CHAI Lin

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Antenna arraying is the important development area of deep space TT&C. In recent years, domestic research institutes have done a lot of work on the algorithm, principle prototype and demonstration experiment. Firstly, the concept and meaning of antenna arraying are presented, and the comparison between deep space antenna arraying to radio, astronomy arraying and phased array is provided. Then the domestic research status is summarized, including combine algorithms and experiments. Based on the latest development of foreign countries, suggestions for researching large number of antenna wideband arraying are given.

Key words: deep space exploration; TT&C; antenna arraying; demonstration experiment

1 引言

我国月球探测取得重大进展之后,开展深空探测是我国航天发展的必然选择。根据规划,我国深空探测将以火星探测为重点,逐步实现绕、落、回等目标,为进一步扩展远距离探测能力,远期还将安排木星探测任务^[1]。综合分析各个阶段任务的测控需求可以看出,未来深空探测对深空测控通信系统有如下需求:

(1)更高的测量精度需求:10亿公里距离上定位精度达到数 km 甚至数十 km,要求地基直接测量

的角精度达到数 nrad;

(2)更高的数据传输速率需求:10亿公里距离上的数据传输速率达到数 Mb/s,甚至数十 Mb/s;

(3)更灵活的任务适应性需求:由于深空探测任务周期长,比如小行星伴飞取样返回任务可能长达数十年,则要求未来的飞控任务管理模式将更多地依赖星上自主。

特别是在数据传输方面,以首次火星探测任务为例,我国现有的最大口径深空站在4亿公里上支

* 收稿日期:2013-08-26;修回日期:2013-11-19 Received date:2013-08-26;Revised date:2013-11-19

** 通讯作者:xumaoge@163.com Corresponding author:xumaoge@163.com

持的数据传输速率只有几十 kb/s, 只能勉强满足首次火星探测最低数据接收要求, 无法满足后续火星详查探测以及更远距离的深空探测任务。在测控通信领域, 提高系统容量的典型方案包括建造更大口径天线(美国国家航空航天局最大口径深空站是70 m)、开发更低噪声的接收机、使用更接近香农极限的编译码等, 这些技术的开发潜力极已经很有限, 一个必然的技术发展方向就是通过多个中小口径天线以组阵的方式来替代单个大口径天线^[2]。

本文首先系统地对比了深空天线组阵与射电天文组阵和传统相控阵的相同点与不同点, 分析了深空天线组阵的技术需求, 在此基础上总结了国内研究现状, 并提出了后续发展建议。

2 天线组阵的概念与内涵

从多个中小口径天线组阵的角度出发, 天线组阵技术的研究大致可分为两类:

(1)一类是以大地测量、地球旋转以及射电天文等科学的研究为目的, 主要工作是观测频谱为纯噪声的射电源, 展开射电天文成像以及高精度的射电源位置和大地测量; 出发点是用天线阵来构建复合干涉仪, 技术手段是干涉测量与成像; 主要技术指标在于要求高的信号检测灵敏度、宽频带覆盖、大视场以及高的角度分辨率; 实时性要求不强, 主要是事后处理与分析^[3];

(2)另一类是集中在深空测控通信任务, 主要工作是接收探测器下发的下行信号并最大程度地恢复出来, 重点在于提高数据接收质量, 主要出发点是用天线阵替代单个大口径天线, 具备单个大口径天线的链路接收能力, 主要技术手段是信号合成, 核心技术指标是最大化合成增益, 并要求尽可能地实时处理, 可以简称为测控通信组阵。

可以看出, 射电天文组阵与测控通信组阵的共同点在于要求高的信号检测灵敏度, 典型的区别在于因为执行任务的背景不同因而接收信号的形式以及对后端处理的要求上有所不同。在条件允许的情况下, 可以共用两者的天线及射频前端, 比如美国喷气动力实验室发射的“旅行者”航天器到达海王星时就利用了戈尔斯顿的测控通信阵(一个70 m和两个34 m口径天线)与新墨西哥的甚大规模射电天文阵(VLA, 27个25 m口径天线)组阵, 成功提高了“旅行者”的返回数据量。

从信号合成的角度出发, 测控通信组阵与一般

的相控阵系统在核心的衡量指标上是一样的, 即强调最大化合成增益, 基本概念也都是将从各个不同的天线接收的信号经过差异补偿后相干相加使得有用信号得到加强, 其区别在于: 第一, 传统的相控阵系统属于紧凑型阵列, 子阵元间的间距一般是波长的二分之一, 因此在信号合成中考虑的重点是补偿通道间的幅度和相位差; 第二, 测控通信的天线组阵属于分布式阵列, 阵元间的间距长达几千个波长, 通道间不仅仅存在幅度和相位的差异, 还存在时变的时延以及多普勒。

下面给出测控通信组阵的信号模型以及系统设计的技术需求分析。假设第1个天线和第*i*个天线接收的信号可以表示为

$$Y_1(t) = \sqrt{P_1} \exp(j[w_c t + \Delta d(t) \cdot \text{Sqrt}(w_{sc} t + \theta_{sc}) + \theta_{di}(t) + \theta_0]) \quad (1)$$

$$Y_i(t) = \sqrt{P_i} \exp(j[w_c(t - \tau_i) + \Delta d(t - \tau_i) \cdot \text{Sqrt}(w_{sc}(t - \tau_i) + \theta_{sc}) + \theta_{di}(t) + \theta_0]) \quad (2)$$

其中, w_c 表示下行信号载波频率, $\Delta d(t)$ $\text{Sqrt}(w_{sc} t + \theta_{sc})$ 表示调制数据, $\theta_c(t)$ 表示多普勒, τ_i 表示第*i*个天线和第一个天线间的延迟, $\Delta\theta_i(t)$ 表示差分多普勒。

将每个 $Y_1(t)$ 、 $Y_i(t)$ 复下变频后得到

$$X_1(t) = \sqrt{P_1} \exp(j[w_l t + \Delta d(t) \cdot \text{Sqrt}(w_{sc}(t) + \theta_{sc}) + \theta_c(t) + \theta_0]) \quad (3)$$

$$X_i(t) = \sqrt{P_i} \exp(j[w_l t - w_c \tau_i + \Delta d(t - \tau_i) \cdot \text{Sqrt}(w_{sc}(t - \tau_i) + \theta_{sc}) + \theta_c(t - \tau_i) + \Delta\theta_c(t) + \theta_0]) \quad (4)$$

其中, w_l 表示中频频率。比较 $X_1(t)$ 和 $X_i(t)$ 可以看出, 天线间接收的中频信号存在载波相位差 $w_c \tau_i + \theta_{di}(t) - \theta_{di}(t - \tau_i)$, 数据上的时延差为 τ_i 。

可以看出: 对两个接收天线来说, 空间上的传输时延反映在接收信号上的差异表现在两个方面: 一是载波上的相位差, 包括射频传输时延引入的相位差, 以及两个天线位置不同引入的差分多普勒等; 二是调制数据上是射频传输时延引入的数据码元相位差。

因此, 深空天线组阵信号合成主要包括两方面的工作: 一是信号间差异的估计与补偿, 包括时延以及差分多普勒; 二是信号最佳合成, 也就是通过最优复权值估计算法对信号加权求和, 确保信号相干相加以获得最大合成信噪比。

3 国内研究现状

深空测控通信组阵最早由美国喷气推进实验室(JPL)于1965年提出^[4-5], 最初是利用现有天线组

阵以支持某些应急任务。从 1996 年开始到 2003 年历时 8 年, 美国深空网(DSN)部署了 3 套下行组阵系统, 都采用了全频谱组阵技术, 开启了深空测控通信天线组阵的新篇章。国内从 2005 年左右开始了深空测控通信天线组阵技术的研究。

3.1 理论研究情况

在理论研究方面, 国内的研究热点是针对 JPL 提出的经典相位修正算法, 如图 1 所示, 包括 Simple、Sumple、Eigen、最小二乘法 (LS) 开展仿真分析^[6], 并在此基础上提出了各种改进措施^[6-15]: 为了快速计算 Eigen 最优权值, 文献[7]给出了两种迭代算法即 PM 和 PMFM 算法; 文献[8]利用 SUMPLE 算法中相位差估计值之间的几何关系, 提出了基于相位差的递推最小二乘滤波方法; 针对 BPSK 数传信号; 文献[11]提出循环自相关的相位差估计方法, 理论分析和仿真实验表明, 循环自相关具有更好的低信噪比相位差估计性能; 文献[14]指出在进行全频谱合成时, 应首先考虑采用 Sumple 算法。可以看出, 国内在组阵合成技术的算法研究方面主要集中在对最优相位修正的设计上, 较少从系统层面给出技术需求分析与相应措施。

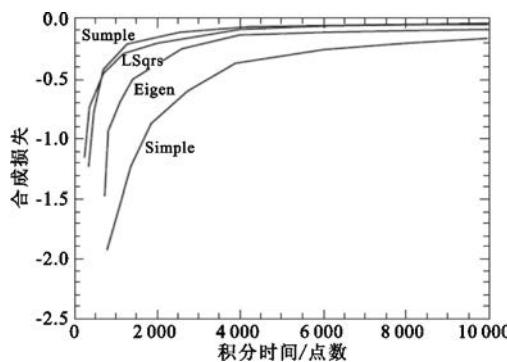


图 1 经典的相位修正算法

Fig. 1 The classical phase revision algorithms

3.2 试验验证情况

在理论研究的同时, 国内多个研究单位也积极开展了组阵系统的设计、合成基带原理样机的研制以及对星演示试验。

具有里程碑意义的是在 2010 年 9 月, 北京跟踪与通信技术研究所抓总建立了我国首个天线组阵试验系统, 原理框图如图 2 所示。系统由 4 m×12 m 双频天线组成, 其中天线和射频链路由中国电科第五十四研究所研制, 合成基带由北京遥测技术研究所研制, 天线布局如图 3 所示。2010 年 10 月, 开始利

用“嫦娥二号”卫星、欧空局太空望远镜等深空目标进行技术验证试验, 合成效率优于 91%, 达到了预期试验效果^[16]。

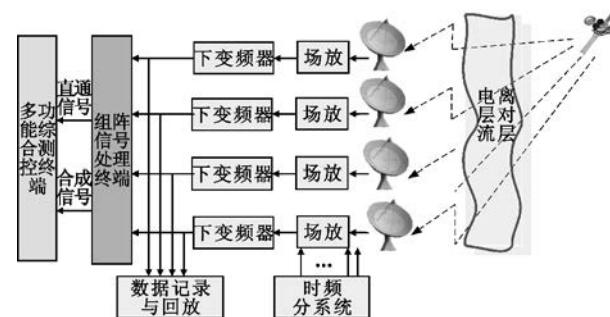


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment system



图 3 天线组阵试验系统天线布局

Fig. 3 The antenna layout of antenna arraying experiment

中国电科第十研究所在天线组阵方面也做了大量研究工作, 2011 年 9 月成功研制了四通道合成基带原理样机。为了验证真实工作环境下的合成性能, 2011 年 11 月在北京借助现有的 4 m×12 m 天线阵, 对位于拉格朗日 L2 点的“嫦娥二号”开展了下行信号的实时合成试验。这是国内首次对月球以远距离的探测器开展的下行微弱信号实时合成试验, 试验期间接收的 1.5 Mb/s 数传单天线 E_b/N_0 约 0.5 dB, 基本上属于数传基带工作门限, 试验结果表明合成效率也超过了 95%^[17]。

2012 年, 为了进一步验证合成基带对异构天线的适应性, 中国电科第十研究所又在某测控站再次开展了以“异构/异地/高频”为典型特点的演示试验, 如图 4 所示。“异构”指的是组阵天线口径不同、建造年代不同、执行任务的背景不同、设备一致性差(特别是通道间的信噪比存在较大差异)。“异构”组阵的意义在于能够把现有测控资源整合起来, 将多个小天线拼成一个大天线使用。“异地”的本质在于各个接收天线使用相互独立的时频源, 不受测控站地域限制, 实现更为灵活的组阵, 其典型特

点是通道间存在明显的频差。“高频”指的是下行采用了 X 频段。试验结果表明:标准 TT&C 实测合成增益等于理论上的最优合成增益加减 0.05 dB;单天线接收的数传信号极其微弱,以至于单路信号接收机无法锁定,预计单路 E_b/N_0 为 -1.5 dB 左右,两路合成后接收机成功锁定,试验获得了圆满成功。

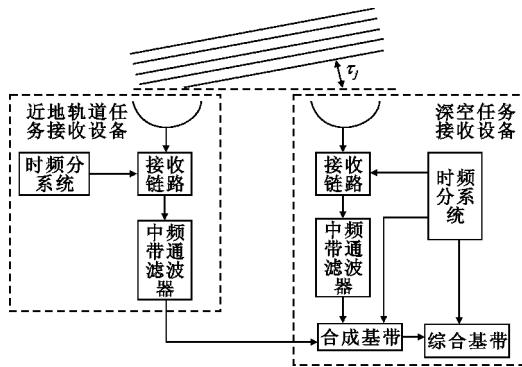


图 4 “异构/异地/X 频段”组阵试验示意图
Fig. 4 Antenna arraying experiment diagram of different architecture/different place /X band

4 国外最新研究进展

在深空测控通信领域 JPL 一直引领着天线组阵技术的发展方向。近年来,在 JPL 技术支持下美国国家航空航天局(NASA)规划将建设新一代的基于组阵的深空主干网^[18],其组阵系统的显著特点在于:频段全面升级到 Ka 频段;合成信号带宽上百兆赫;布设数百个中等大小(约 12 m)抛物面天线组成的天线阵,相当于 70 m 天线 10 倍的下行链路能力;在功能上满足行星雷达、射电科学以及天文观测等需求。

在上百个天线阵的规划建设中,NASA 初步计划首先研究出 25 副天线的布局,以此为基础,后续可以通过优化插入 75 副天线从而形成 100 副天线的最优布局;再在 100 副天线的基础上,优化可以形成 400 副天线的布局。也就是通过简单的在先前布局上增加更多的天线形成一系列新的布局,这也形成一个合理的建造顺序^[18]。

JPL 目前正在开展的工作是建造两个 6 m 天线和一个 12 m 天线组成的试验系统,根据这一试验系统得到的结论将用来开发更大规模的 12 m 天线阵列。该试验系统设计方案中,工作频段是 X 频段和 Ka 频段,支持 100 MHz 带宽的信号合成。

欧空局(ESA)近年来也加大了深空天线组阵方

面的研究,后续建设规划拟采取组阵的方式将 G/T 值在现有 35 m 站的基础上提高 10 dB。拟采取分步实施的方式,第一步建设的天线阵 G/T 值将比现有 35 m 提高 6 dB,基本等效 NASA 70 m 口径天线。在阵列结构方面考虑两个备选方案:一个方案是 4 个 35 m 天线组阵,另一个方案是 1 个 35 m 再加 9 个 20 m 天线组阵^[19-20],其中第二种方案比较灵活,阵列的可用度较高,方便扩展。

5 后续发展建议

后续超远距离(10 亿公里)的深空探测任务要求地面系统等效口径超过了 100 m,组阵系统的设计上可以采取两种途径:一是小规模(数个)的大口径天线组阵;二是大规模(数十上百个)的中小口径天线组阵。

建议采用大规模中小口径天线组阵,首先是因为从费效比角度分析,随着天线口径加大,加工制造的成本呈几何级数增加,相对而言大规模的中小口径组阵的成本相对较低;其次是中小口径天线波束较宽,降低了单天线指向精度要求,并且中小口径天线空域覆盖较大,有利于开展行星表面或附近的同时多个探测器的测控;还有就是大规模组阵抗单点故障的能力较强,比如 100 个天线组阵,如果其中一个天线因为故障不能执行任务,系统的 G/T 值损失只有约 0.04 dB。

在小规模的接收下行组阵方面,国内技术发展相对比较成熟,具备了执行任务的能力。后续的研究重点应该放在大规模宽带可扩展天线组阵上,这里的大规模指的是天线数超过数十个,宽带指的是合成信号带宽超过数十 MHz,可扩展指的是支持系统建设的阶段化,规模可扩展。

6 大规模宽带可扩展天线组阵关键技术

对于大规模宽带可扩展天线组阵,建议开展以下关键技术研究。

(1) 天线布局优化设计。在以大口径天线为基础的深空天线组阵中,单元天线间的间距通常在数百个甚至上千个波长,若单元波束内合成波束附近有较强的栅瓣或旁瓣将直接导致目标附近行星、太阳及其他航天器的信号作为干扰信号进入接收通道。小规模组阵中,天线个数过小使得瞬时合成波束带有较高的旁瓣,而且不随具体布局而变,因此一般都未开展针对合成波束旁瓣的优化。组阵布局优

化研究是大规模阵的一个首要问题^[21-22]。

(2) 大规模宽带合成终端。大型阵对组阵信号的要求是组阵单元天线数可扩展、合成方式的多样性, 也就是要求组阵信号处理有灵活的信号处理结构以及高速数据信号处理能力。为此建议在信号处理结构上相关合成应从时域转向频域处理, 也就是在频域完成波束形成。

(3) 采取多种措施提高单个天线的 G/T 值。在各天线 G/T 值基本一致的情况下, 36 副天线合成增益约 15.6 dB, 46 副天线合成增益约 16.6 dB, 76 副天线合成增益约 18.8 dB; 可以看出对于大规模阵, 随着单元天线数的增加性能提高的增量下降, 此时需要折衷考虑增加单个天线的 G/T 值的成本以及增加天线数的成本, 比如对 76 副天线来说, 若能将单元天线的 G/T 值增加 3 dB, 则可以将天线数减少为 36 副。因此对于大规模阵应该采取多种措施尽量提高单个天线的 G/T 值, 包括采取低成本高效率天线反射面技术以及多频段馈源场放一体化制冷技术等。

(4) 时频/射频信号远距离传输技术。大规模阵布局范围通常在数 km 内, 传统电缆时频/射频信号远距离传输不仅损耗较大而且稳定性较差, 建议开展组阵时频/射频链路的优化设计以及基于高稳光纤的时频/射频信号远距离传输技术研究。

(5) 多个深空任务同时测控支持。大规模阵强调同时多任务(多目标)支持的能力, 通过划分子阵, 不同的子阵指向不同的航天器。需针对运行管理、指挥显示等功能体系结构进行补充建设。

(6) 监视控制系统快速故障排查, 包括模块化方式设计, 部件可替换, 支持即查即用。

(7) 高效系统测试及标校程序。

7 结束语

根据我国火星以及其他更远行星探测的任务需求分析可以看出, 在测控通信领域星地传输链路能力始终是一个需要突破的技术瓶颈。在现有技术水平下建设更大口径的天线从技术和成本方面都难以承受, 一个重要的解决途径将是天线组阵。经过多次对星试验验证, 国内相关单位已经掌握了小规模天线组阵的核心技术, 具备了执行深空任务的能力。建议后续开展大规模可扩展天线组阵相关关键技术的前期研究, 以满足未来超远距离(10 亿公里以上)的深空探测任务的需求。

参考文献:

- [1] 侯欣宾, 王立. 我国火星探测发展设想 [C]//全国第七届深空探测年会. 北京: 中国宇航学会, 2012: 9-13.
- [2] HOU Xin-bin, WANG Li. The Proposed Mars Exploration Roadmap in China [C]//Proceedings of the 7th Annual Symposium of CSA-CDSET. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2012: 9-13. (in Chinese)
- [3] 柴霖, 许秀玲. 深空测控体系结构与技术发展 [J]. 电讯技术, 2010, 50(8): 1-6.
- [4] CHAI Lin, XU Xiu-ling. Architecture and Technology Development of Deep Space TT&C Communication System [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(8): 1-6 (in Chinese).
- [5] Smoulters A B, van Haarlem M P. Perspectives on Radio Astronomy: Technologies for Large Antenna Arrays [C]// Proceedings of 1999 Conference on ASTRON. Dwingeloo, The Netherlands: [s. n.], 1999: 49-58.
- [6] Rogstad D H, Mileant A. 深空网的天线组阵技术 [M]. 李海涛, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] Rogstad D H, Mileant A. Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network [M]. Translated by LI Hai-tao. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [8] Mileant A, Hinedi S. Overview of Arraying Techniques in the Deep Space Network [R]//TDA Progress Report 42-104. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 1991: 109-139.
- [9] 党宏杰. 天线组阵信号 Sumple 与 Simple 算法的仿真研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(4): 78-82.
- [10] DANG Hong-jie. Simulation of Sumple and Simple Algorithm for Aligning Arrays of antennas [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2008, 19(4): 78-82. (in Chinese)
- [11] 史学书, 王元钦. 深空组阵 Eigen 算法及其低信噪比合成性能分析 [J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 2347-2353.
- [12] SHI Xue-shu, WANG Yuan-qin. Performance of Deep Space Eigen Combining Algorithm in Low SNR Condition [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(6): 2347-2353. (in Chinese)
- [13] 孔德庆, 施浒立. 天线组阵中相位差的递推最小二乘估计与滤波 [J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 211-216.
- [14] KONG De-qing, SHI Hu-li. The Recursive Least Squares Estimation and Filtering of Phase Differences in Antenna Arraying [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 211-216. (in Chinese)
- [15] 孔德庆, 施浒立. 非均匀天线组阵 SUMPLE 合成相位补偿及信号强度估计 [J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 632-650.
- [16] KONG De-qing, SHI Hu-li. Phase Wandering Correction

- and Signal Intensity Estimation of SUMPLE Algorithm for Non-uniform Antenna Arraying [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(4): 632–65. (in Chinese)
- [10] 孔德庆, 施浒立. 非均匀天线组阵 SUMPLE 权值信噪比及信号合成性能分析 [J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 1941–1946.
- KONG De-qing, SHI Hu-li. Study of Weights Performance and Combining Loss of SUMPLE Algorithm for Non-uniform Antenna Arraying [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 1941–1946. (in Chinese)
- [11] 孔德庆. 天线组阵中基于循环相关的 BPSK 信号合成方法研究 [J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2080–2085.
- KONG De-qing. The Combining Algorithm of BPSK Signal Antenna Arraying Based on Cyclic Correlations [J]. ACTA Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2080–2085. (in Chinese)
- [12] 赵晓明, 冯恩信, 姜家持. 一种用于深空网天线组阵的基于归一化权的 Matrix-Free Power Method [J]. 遥测遥控, 2009, 30(4): 15–20.
- ZHAO Xiao-ming, FENG En-xin, JIANG Jia-chi. A Normalized-Weight-Based Matrix-Free Power Method in DSN Antenna Arraying [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(4): 15–20. (in Chinese)
- [13] 钟晓玲, 周三文, 李海涛, 等. 天线组阵信号合成技术的研究 [J]. 遥测遥控, 2007, 28(S1): 43–48.
- ZHONG Xiao-ling, ZHOU San-wen, LI Hai-tao, et al. Research on the Antenna Arraying Signal Combining Technique [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(S1): 43–48. (in Chinese)
- [14] 周三文, 卢满宏, 黄建国. 天线组阵全频谱合成效率分析 [J]. 遥测遥控, 2009, 30(2): 46–52.
- ZHOU San-wen, LU Man-Hong, HUANG Jian-guo. Analysis on combining Efficiency of Full-Spectrum Combining [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(2): 46–52. (in Chinese)
- [15] 史学书. 深空组阵算法合成性能对比分析研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2012, 23(1): 98–103.
- SHI Xue-shu. Analysis and Comparison of Deep Space Arraying Combining Algorithm [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2012, 23(1): 98–103. (in Chinese)
- [16] 洪家财, 杨文革, 侯孝民, 等. 天线下行组阵技术及其试验验证研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(1): 58–62.
- HONG Jia-cai, YANG Wen-ge, HOU Xiao-min, et al. Study on Downlink Antenna Array Technology and Its Test Verifying [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2011, 22(1): 58–62. (in Chinese)
- [17] 徐茂格, 赵卫东. 深空天线组阵试验及分析 [C]//第 26 届飞行器测控年会. 南京: 中国宇航学会, 2012: 349–353.
- XU Mao-ge, ZHAO Wei-dong. The experiment analysis of deep space antenna array [C]//Proceedings of 26th Conference on Spacecraft TT&C Technology in China. Nanjing: Chinese Society of Astronautics, 2012: 349–353. (in Chinese)
- [18] Navarro R, Bunton J. Signal processing in the deep space array network [R]//IPN Progress Report 42–157. Cambridge: High Energy Astrophysics Division, 2004: 1–17.
- [19] Statman J, Bagri D, Yung C, et al. Optimizing the antenna size for the deep space network array [R]//IPN Progress Report 42–159. Cambridge: High Energy Astrophysics Division, 2004: 1–8.
- [20] Rawson S, Fornaroli M, Bozzi M, et al. Future Architectures for ESA Deep Space Ground Stations [C]//Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation. Rome, Italy: IEEE, 2011: 720–724.
- [21] Bozzi M, Cametti M. Future Architectures for ESA Agency Deep-Space Ground Stations [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(1): 254–263.
- [22] 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.
- XU Mao-ge. Design of the Layout of Large Scale Antenna Arrays for Deep Space Communication [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(1): 7–10. (in Chinese)
- [23] 闫春生. 深空大规模天线组阵型设计 [C]//第 26 届飞行器测控年会. 南京: 中国宇航学会, 2012: 342–348.
- YAN Chun-sheng. The Geometric design of Large Scale Antenna Arrays [C]//Proceedings of the 26th Conference of Spacecraft TT&C Technology in China. Nanjing: Chinese Society of Astronautics, 2012: 342–348. (in Chinese)

作者简介:



徐茂格(1982—),男,四川遂宁人,2008 年于南京理工大学获信息与通信工程专业博士学位,现为高级工程师,主要从事深空测控通信技术研究工作;

XU Mao-ge was born in Suining, Sichuan Province, in 1982. He received the Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2008. He is now a senior engineer. His research concerns deep space TT&C and communications.

Email: xumaoge@163.com

柴 霖(1969—),男,河南济源人,博士,研究员,主要研究方向为飞行器测控通信。

CHAI Lin was born in Jiyuan, Henan Province, in 1969. He is now a senior engineer of professor with the Ph. D. degree. His research concerns spacecraft TT&C communication.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>