

文章编号: 2095-4980(2019)04-0641-06

超宽带馈源技术发展综述

伍 洋¹, 杜 彪¹, 马 军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.中国科学院 新疆天文台, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 反射面天线是最主要的高增益天线形式, 在与无线电相关的各个领域具有广泛应用。随着科技的发展, 对于超宽带(UWB)反射面天线的要求日益迫切。因此, 作为反射面天线核心的馈源, 如何在超宽的频带内具有良好的阻抗特性、恒定的辐射特性和稳定的相位中心, 已成为当天线技术的研究热点。给出了超宽带馈源的设计要点, 总结了超宽带馈源的类型、特点和发展现状, 并对超宽带馈源设计技术的未来提出了展望。

关键词: 反射面天线; 超宽带; 馈源; Eleven 馈源; 四脊喇叭

中图分类号: TN822⁺.8

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0641

Overview of the development of Ultra-Wideband feed technology

WU Yang¹, DU Biao¹, MA Jun²

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

2.Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang 830011, China)

Abstract: As a representative high gain antenna, reflector antenna is widely used in the applications relating to radio. With the development of science and technology, the demand for Ultra-Wideband(UWB) reflector antenna is increasingly urgent. Therefore, in ultra-wide bandwidth, how to achieve good impedance performance, constant beam pattern and fixed phase center for the feed which is the key part of the reflector antenna, has become a hotspot in reflector antenna technologies. This paper gives the key specifications of UWB feed, presents its types, characteristics, and development status quo, as well as the prospects of the future.

Keywords: reflector antenna; Ultra-Wideband; feed; Eleven feed; quad-ridge flared horn

作为最主要的高增益天线形式, 反射面天线在卫星通信、雷达、导航、无线电监测、射电天文等领域得到了广泛应用。由于传统馈源的工作带宽仅在一个倍频程左右, 为实现超宽的频率覆盖, 一台反射面天线往往需要配备数套不同频段的馈源, 并通过一套复杂的馈源切换系统实现分时超宽带工作^[1-3]。或者通过多频段馈源网络^[4-5]、频率选择表面^[6-7]来实现同时的宽频段覆盖。但多频段的馈源网络不仅复杂庞大, 还难以实现多个倍频程的连续频率覆盖。若能够配备超宽带单波束馈源, 则反射面天线不仅能获得连续的超宽频带性能, 还可以有效减少接收机数量, 降低天线建设和运行维护成本。馈源是反射面天线的初级辐射器, 其主要功能是实现聚焦的空间电磁波与导行波转换。与一般的天线相比, 作为馈源的天线具有以下不同:

1) 设计的关注点不同。由于馈源用于照射反射面, 其主要关注照射角、照射电平参数, 而天线通常所追求的增益和旁瓣等指标, 则是通过反射面系统和对它照射来实现。此外, 为实现高效率, 反射面天线需要实现等相位的口径场, 因此位于反射面焦点的馈源必须具有恒定的相位中心。

2) 应用环境不同。由于馈源的设计与其所在的反射面天线相关, 在设计中必须考虑反射面的几何参数。位于反射面焦点附近的馈源主要用于接收被反射面汇聚的球面波, 许多情况下反射面位于馈源的近场, 因此馈源与反射面, 尤其是与副反射面之间的耦合需认真考虑。

因此, 作为馈源使用的超宽带天线, 不仅要具有超宽带的阻抗特性, 还必须在超宽频带内实现恒定的波束宽度与稳定的相位中心, 这对于实现反射面天线的高效率尤为重要。

收稿日期: 2018-11-11; 修回日期: 2018-12-11

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2014AA123601); 国家重点研发计划资助项目(2016YFE0100100); 国家自然科学基金青年基金资助项目(61701456)

目前, 见诸报道的超宽带馈源主要有对数周期馈源、Eleven 馈源、QSC(Quasi-Self-Complementary)馈源、Sinuous 馈源、四脊喇叭(Quad-Ridge Flared Horn, QRFH)^[8-14]等。这些馈源各具特点, 许多已得到实际的工程应用。本文总结了超宽带馈源的类型、特点和发展现状, 并对超宽带馈源设计技术的未来提出了展望。

1 非频变馈源

非频变天线于 1954 年由 V Rumsey 提出^[15], 其在结构上具有显著的自相似性, 并在理论上具有与频率无关的方向图和极宽的阻抗特性, 因此是超宽带馈源的重要实现方式。实现与频率无关结构的第一种方法是令天线的结构只由角度决定^[16], 而与其他尺寸无关, 也称为“角度条件”, 用这种方法可以得到连续的缩比天线, 如无限双锥天线、平面等角螺旋天线等。第二种方法是令天线的各种结构尺寸都按特定的比例, 即采用周期性结构。出于照射效率的考虑, 采用周期性结构的超宽带馈源更为普遍, Eleven 馈源、对数周期馈源、QSC 馈源、Sinuous 馈源都属于这一类型的馈源。

为实现定向辐射, 非频变馈源还需要引入地板。对于非频变天线形式的馈源来说, 虽然每一个频率都能找到对应的主要辐射位置, 但由于这些馈源的周期结构并不是完全随频率而变的, 且辐射位置距地板的高度也不是严格的 $1/4$ 波长, 因此实际上其性能随频率具有一定的变化。

1.1 对数周期馈源

对数周期天线^[17]是实现超宽带馈源的重要途径之一。它的方向性图、驻波比、阻抗等电气特性随频率的对数成周期性变化, 并在很宽的频带内能保持基本不变的电气特性^[18]。参考平行放置的对称振子具有的等化方向图特性, 对数周期馈源常常采用两对倾斜放置的对数周期天线, 能够在数个倍频程内实现两个极化的较高的照射效率。通过调整对数周期天线的倾斜角, 可以实现照射角的变化。由于自身结构特点, 对数周期馈源的相位中心随频率不断变化, 这也导致反射面天线效率的降低^[19-20]。对数周期馈源的另一个问题在于插入损耗较大, 这可以通过将低噪声放大器或功放尽量靠近馈电点来缓解^[21]。虽然照射效率较低, 但与其他馈源相比, 对数周期馈源结构简单, 且可实现非常宽的工作频带, 在体积和质量上也具有一定的优势, 因此得到了广泛应用。

美国的阿伦望远镜阵列(Allen Telescope Array, ATA)采用对数周期馈源(图 1), 在 0.5~11.2 GHz 的带宽内, 实现了较为恒定的波束宽度。



Fig.1 Log periodic antenna feed developed for ATA(0.5~11.2 GHz)
图 1 ATA 对数周期馈源(0.5~11.2 GHz)^[21]

1.2 Eleven 馈源

Eleven 天线由 Chalmers 理工大学于 2005 年提出(图 2), 可在超过 10 个倍频程的带宽内具有恒定的波束宽度和稳定的相位中心位置, 以及较好的阻抗特性^[22]。Eleven 天线的这些优点使其很适合于馈源的应用, 因此在其诞生后的 10 年里得到了蓬勃发展^[23-27]。Eleven 馈源借鉴了对数周期天线的设计, 并在馈电端引入金属反射板, 将天线的相位中心稳定在馈电点附近。与对数周期馈源相比, Eleven 馈源的相位中心随频率变化较小, 且高度较低。

Eleven 馈源的最主要缺点是天线需要四端口甚至八端口馈电, 要求数量更多且性能一致的低噪声放大器或功放, 导致馈电部分比较复杂。此外, 为给馈电点留出位置, 其附近的非频变结构被破坏, 影响了 Eleven 馈源在高频端的照射效率^[28], 限制了其频率向更高发展。

美国国立射电天文台 2006 年为其 42 m 望远镜研制了 150~1 700 MHz 的 Eleven 馈源^[29], 全频带内口径效率接近 60%。印度 2007 年为巨型米波射电望远镜(Giant Meterwave Radio Telescope, GMRT)研制了 200~800 MHz

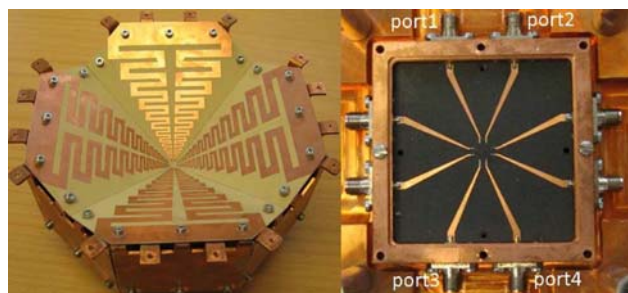


Fig.2 Eleven feed(2~13 GHz) developed at Chalmers University of Technology
图 2 Chalmers 理工大学研制的 2~13 GHz Eleven 馈源

的 Eleven 馈源^[30], 口径效率达到 50%。内蒙古的明安图频谱日向仪采用了 2 种 Eleven 馈源, 频率分别覆盖 0.4~2 GHz 和 2~15 GHz, 并通过宽带巴伦简化了馈电设计^[31]。VLBI2010 天线及平方公里阵(Square Kilometre Array, SKA)也都曾考虑采用 Eleven 馈源。

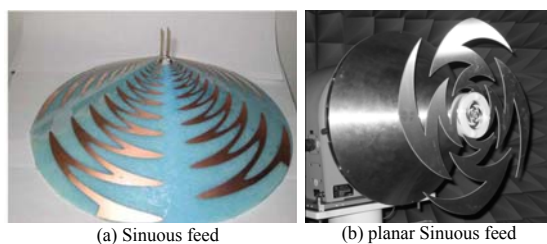
1.3 其他非频变馈源

除 Eleven 馈源外, 还有一些采用非频变结构的天线也能在 10 个倍频程左右的频带内实现较为恒定的阻抗特性和波束宽度^[32], 可作为馈源。Cornell 大学在 QSC 馈源(图 3)方面进行了多年研究, 研制出带宽达 10 个倍频程的 QSC 馈源^[10,33]。

Sinusous 馈源^[11,34](图 4)和螺旋天线^[35](图 5)也可在数个倍频程内实现较为恒定的阻抗和辐射特性, 但由于各种原因, 作为馈源实际应用的报道较少。



Fig.3 QSC feed(0.4~4GHz) developed at Cornell University
图 3 Cornell 大学研制的 0.4~4 GHz QSC 馈源^[10]



(a) Sinusous feed (b) planar Sinusous feed
Fig.4 Sinusous feeds of different types
图 4 不同形式的 Sinusous 馈源^[11,34]

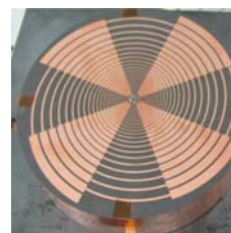


Fig.5 Helical antenna
图 5 螺旋天线^[35]

2 四脊喇叭

四脊喇叭利用脊波导截止波长较长的特性, 以逐渐张开的四脊波导实现能量的双极化宽频带定向辐射。其特点是馈电方便, 插入损耗较小。但其属于口径天线, 因此方向图和相位中心随频率有一定变化, 尤其是其 H 面的方向图随频率变窄, 影响了其在高频端的照射效率。

传统的 TEM 喇叭和双脊喇叭作为超宽带天线^[36]或超宽带馈源^[37]已经得到了广泛使用, 但仅能实现一个极化工作。2006 年左右, 四脊喇叭逐渐进入人们视野^[38], 由于在带宽、照射效率和馈电方式等方面具有较大优势, 四脊喇叭逐渐成为超宽带馈源的主流选择, 尤其是在射电天文和 VLBI 等领域得到了蓬勃的发展^[39]。

国内外的研究学者对其进行了大量的研究, 对四脊喇叭主要的设计参数与性能的关系进行了深入分析, 并为改善四脊喇叭在宽频带内的照射采取了多种方法, 主要包括: 改变脊片曲线和喇叭内壁曲线的函数及参数、采用优化的方法对脊曲线和喇叭内壁曲线进行赋形, 逐渐展宽脊宽, 在四脊喇叭口面增加扼流环, 以及在喇叭内部加载介质等^[40~43]。

中国电科 54 所针对 SKA 的需求, 研制了多款四脊喇叭(图 6、图 7)。通过优化脊片和喇叭内壁的曲线, 在喇叭口面增加扼流环的方式(图 7), 在 3:1 的带宽内(4.6~13.8 GHz)实现了 75%的口径效率^[44]。

澳大利亚的研究学者采用多种方式对四脊喇叭性能进行了提升(图 8), 在 6:1 的带宽内, 实现了 70%的照射效率^[45]。此外, 出于减少插入损耗的考虑, 国外学者开展了将低噪声放大器集成在四脊喇叭脊片中的尝试, 收到了良好的效果。

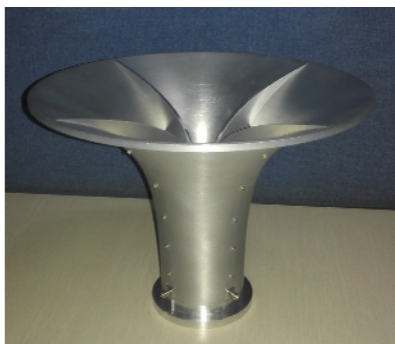


Fig.6 QRFH(1.6~9.6 GHz) developed for SKA
at the 54th Research Institute of CETC
图 6 SKA 研制的 1.6~9.6 GHz 四脊喇叭

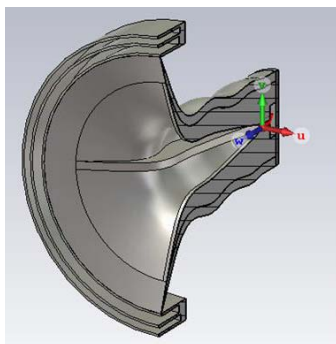


Fig.7 QRFH(4.6~13.8 GHz) developed for SKA
at the 54th Research Institute of CETC
图 7 SKA 研制的 4.6~13.8 GHz 四脊喇叭

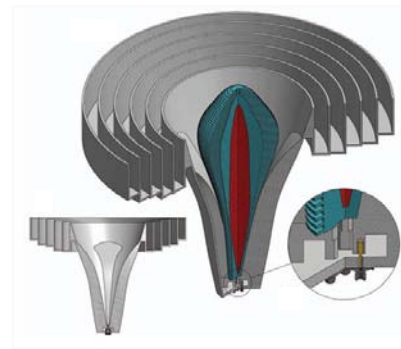


Fig.8 QRFH(0.6~4 GHz) developed at CSIRO
图 8 CSIRO 研制的 0.6~4 GHz 的介质加载四脊喇叭

3 超宽带馈源技术展望

3.1 一体化的仿真优化方法

一般来说,反射面天线设计分为反射面设计和馈源设计两部分,反射面设计与馈源设计一般以照射角和照射电平作为接口,两部分设计相对独立。该方法大大减少了天线设计的工作量,但由于馈源具有照射电平、波束等化、相位中心变化等多项技术指标,而这些指标综合影响着天线的整体性能,因此在设计中往往难以取舍。而反射面设计一般假设馈源为高斯照明^[46],对超宽带应用而言,由于馈源的各项技术指标随频率变化较大,难以实现在宽频带内反射面天线性能最优的目标。因此,超宽带馈源技术发展的一个方向在于以反射面天线的性能参数作为评价函数,采用优化算法,对宽带馈源的部分或全部初始设计参数进行优化,得到使反射面天线性能达到最优的优化后的宽带馈源设计参数并将其作为宽带馈源的最终设计参数^[47],从而避免馈源与反射面分离设计所引起的系统性能的损失,充分挖掘反射面天线系统的设计潜力。

3.2 基于可重构天线的相控阵馈源

相控阵馈源^[48]是放置在反射面天线焦平面附近,作为馈源使用的小型相控阵天线。虽然其主要用于形成多个可紧密交叠波束,但也可作为单波束馈源,以实现提高效率、抗电磁干扰、消除反射面变形等作用和功能。

可重构是指多天线阵列中各阵元之间的关系是可以根据实际情况灵活可变的,其主要通过调整状态可变器件,实现天线性能的可重构^[49]。频率重构是实现多频段、超宽带的有效途径。将频率可重构天线与相控阵馈源的概念相结合,通过频率重构实现超宽带频率覆盖,再对相应的阵列单元进行适当的激励,能够在宽频带内实现对反射面的良好照射,实现天线的高效率。基于可重构天线的相控阵馈源还有一个突出的优点:由于其波束宽度主要取决于馈源阵列的电尺寸,因此可根据需要调整馈源阵列的设计,以适应不同的照射角。而上节所述的各种超宽带馈源受制于结构,基本都在 55° 左右,虽然可以通过改变设计参数改变照射角,但范围有限,且会明显降低照射效率。

3.3 基于人工电磁材料的馈源

人工电磁材料^[50]是将人造单元结构以特定方式排列形成的具有特殊电磁特性的人工结构材料,由于其具有自然界中原有材料所不具备的独特性质,引起了国内外研究学者的广泛关注。

虽然在很多情况下,人工电磁材料是窄带和高损耗的,但当利用其工作于非谐振区的特性时,有可能在宽频带内应用。在超宽带馈源中,也可引入人工电磁材料,以改善馈源的性能,如在介质加载的四脊喇叭中采用人工电磁材料代替介质,以改善其辐射特性,或减小其介质损耗;在 Eleven 馈源等非平面非频变馈源的地板上进行人工电磁材料加载,使其扁平化,从而降低馈源的尺寸,这对于工作于较低频段的馈源很有意义。

4 结论

随着科技的进步,近十年来超宽带馈源技术得到了蓬勃发展,可实现的工作带宽持续展宽,照射效率也有所提高。本文给出了超宽带馈源的关键性能指标,总结了超宽带馈源的类型、特点和发展现状。虽然新形式的超宽带馈源不断见诸报道,但如何在更宽的频带内实现更高的性能,将是超宽带馈源技术永远的目标。

此外,文中所述各种主流超宽带馈源的照射角大抵相同,如何能改变其照射角,或研究出照射角更小、更大的新形式的馈源,以适应不同反射面天线的需求,也是超宽带馈源努力的方向。

参考文献:

- [1] IMBRIALE W. Large antennas of the deep space network[M]. New York:McGraw Hill, 2003.
- [2] CORTES-MEDELLIN G. The 64 m Sardinia radio telescope optics design[C]// International Symposium on Antennas and Propagation Society. San Antonio,TX,USA:IEEE, 2002.
- [3] PRESTAGE R M,CONSTANTIKES K T,HUNTER T R,et al. The green bank telescope[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8):1382-1390.
- [4] KIRILENKO A A,PEROV A O,STESHENKO S O,et al. Electrodynamic model of the three-band feed for VLBI 2010 radio telescope reflector[C]// International Conference on Antenna Theory and Techniques. Kharkiv,Ukraine:[s.n.], 2015.
- [5] ROEDERER A G. Antennas for space: some recent European developments and trends[C]// 18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. Dubrovnik,Croatia:IEEE, 2005.

- [6] RIGELSFORD J M,BENITO S M,VALLECCHI A. A tri-band inductive frequency selective surface sub-reflector for satellite communications systems[C]// 8th European Conference on Antennas and Propagation. Hague,Netherlands:IEEE, 2014.
- [7] LI M,BEHDAD N. Frequency selective surfaces for pulsed high-power microwave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013,61(2):677–687.
- [8] YANG J. Preliminary design of eleven feed for SKA band 1[C]// 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium. Beijing:IEEE, 2014.
- [9] ENGARGIOLA G. Non-planar log-periodic antenna feed for integration with a cryogenic microwave amplifier[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. San Antonio,TX,USA:IEEE, 2002:140–143.
- [10] CORTES-MEDELIN G. Non-planar quasi-self-complementary ultra-wideband feed antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011,59(6):1935–1944.
- [11] GAWANDE R,BRADLEY R. Towards an ultra-wideband low noise active sinuous feed for next generation radio telescopes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011,59(6):1945–1953.
- [12] AKGIRAY A,WEINREB S,IMBRIALE W A. The quadruple-ridged flared horn:a flexible,multi-octave reflector feed spanning $f/0.3$ to $f/2.5$ [C]// 7th European Conference on Antenna and Propagation. Sweden:IEEE, 2013:768–769.
- [13] HOWLAND P E,MAKSIMIUK D,REITSMA G. FM radio based bistatic radar[J]. IEE Proceedings–Radar,Sonar and Navigation, 2005,152(3):107–115.
- [14] WEINREB S,MANI H,ZHONG W,et al. Cryogenic 1.2 to 116 GHz receiver for large arrays[C]// The 12th European Conference on Antennas and Propagation. London,UK:IET, 2018.
- [15] RUMSEY V H. Frequency independent antennas[C]// IRE International Convention Record. New York:IEEE, 1957:114–118.
- [16] BALANIS C A. Antenna theory analysis and design[M]. Hoboken:Wiley–Interscience, 2005:612–614.
- [17] DUHAMMEL R H,ISBELL D E. Broadband logarithmically periodic antenna structure[C]// IRE International Convention Record. New York:IEEE, 1957:119–128.
- [18] MILLIGAN T A. Modern antenna design[M]. Hoboken,New Jersey,USA:John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [19] ERICSSON D,KILDAL P–S,WEINREB S. Study of efficiencies and phase centers of broadband log-periodic feeds for large offset dual-reflector antennas using formulas for bodies of revolution[C]// IEEE International Symposium Antennas and Propagation Society. Columbus,OH,USA:IEEE, 2003.
- [20] DYBDAL R. Defocusing loss for a log periodic-fed reflector[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985,33(7):809–812.
- [21] WELCH J,BACKER D,BLITZ L,et al. The Allen telescope array: the first widefield, panchromatic, snapshot radio camera for radio astronomy and SETI[J]. Proceedings of the IEEE, 2009,97(8):1438–1447.
- [22] OLSSON R,KILDAL P S,WEINREB S. The Eleven antenna: a compact low-profile decade bandwidth dual polarized feed for reflector antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006,54(2):368–375.
- [23] KILDAL P S,OLSSON R,YANG Y. Development of three models of the Eleven antenna: a new decade bandwidth high performance feed for reflectors[C]// 1st European Conference on Antennas and Propagation. Nice,France:IEEE, 2006.
- [24] YANG J,CHEN X,WADEFALK N,et al. Design and realization of a linearly polarized Eleven feed for 1–10 GHz[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letter, 2009(8):64–68.
- [25] YANG J,NYBERG D,YIN J. Impedance matrix of a folded dipole pair under Eleven configuration[J]. IET Microwaves Antennas Propagation, 2010,4(6):697–703.
- [26] YANG J,KILDAL P S. Optimization of reflection coefficient of large log-periodic array by computing only a small part of it[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011,59(6):1790–1797.
- [27] YANG J,PANTALEEV M,KILDAL P S,et al. Cryogenic 2–13 GHz Eleven feed for reflector antennas in future wideband radio telescopes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011,59(6):1918–1934.
- [28] KARANDIKAR Y B,KILDAL P S,YANG J. Reduction of radiation from central exciting region of Eleven feed and pattern improvements for VLBI2010 applications[C]// European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona,Spain:IEEE, 2010.
- [29] OLSSON R,KILDAL P S,SHIELDS M. Measurements of a 150 to 1700 MHz low loss Eleven feed for the 42 m radio telescope at Green Bank[C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society. Albuquerque,NM,USA:IEEE, 2006.
- [30] KARANDIKAR Y B,KILDAL P S. Optimization of 200–800 MHz Eleven feed for GMRT[C]// European Conference on Antennas and Propagation. Edinburgh,UK:IEEE, 2007.
- [31] DU B,NIU C F,WU Y,et al. An ultra-wideband feed for Chinese spectral radio heliograph array[C]// European Conference on Antennas and Propagation. Gothenburg,Sweden:IEEE, 2013.
- [32] HUFFMAN J,CENCICH T. Modal impedances of planar, non-complementary, N-fold symmetric antenna structures[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2005,47(1):110–116.

- [33] CORTÉS-MEPELLÍN G. Input impedance characterization of the QSC ultra wide band feed[C]// IEEE International Symposium Antennas and Propagation Society. San Diego,CA,USA:IEEE, 2008.
- [34] BUCK M C,FILIPOVIC D S. Two-arm sinuous antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008,56(5): 1229–1235.
- [35] KEFAUVER W N,CENCICH T P,FILIPOVIC D S. On the frequency-independent modes of a four-arm modulated arm width spiral[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013,61(9):4467–4475.
- [36] JACOBS B,ODENDAAL J W,JOUBERT J. An improved design for a 1–18 GHz double-ridged guide horn antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(9):4110–4118.
- [37] 刘兴隆,伍洋. 一种高能脉冲天线设计分析[J]. 无线电通信技术, 2011,37(6):37–39. (LIU Xinglong,WU Yang. Design and analysis of high power pulse antenna[J]. Radio Communications Technology, 2011,37(6):37–39.)
- [38] IMBRIALE W A,WEINREB S,MANI H. Design of a wideband radio telescope[C]// IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT,USA:IEEE, 2007.
- [39] 伍洋,杜彪,金乘进,等. 平方公里阵天线新技术综述[J]. 电波科学学报, 2016,31(2):413–419. (WU Yang,DU Biao,JIN Chengjin,et al. Overview of new antenna technologies for the square kilometre array[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016,31(2):413–419.)
- [40] BAUERLE R J,SCHRIMPF R,GYORKO E,et al. The use of a dielectric lens to improve the efficiency of a dual-polarized quad-ridge horn from 5 to 15 GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009,57(6):1822–1825.
- [41] AKGIRAY A H. New technologies driving decade-bandwidth radio astronomy: quad-ridged flared horn & compound-semiconductor LNAs[D]. California:Institute of Technology, 2013.
- [42] JACOBS O B,ODENDAAL J W,JOUBERT J. Quad-ridge horn antenna with elliptically shaped sidewalls[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013,61(6):2948–2955.
- [43] YANG J,FLYGARE J,PANTALEEV M,et al. BRAND: development of quadruple-ridge flared horn with spline-defined profile for band B of the wide band single pixel feed(WBSPF) advanced instrumentation program for SKA[C]// IEEE Antennas and Propagation International Symposium(APSURSI). Fajardo,Puerto Rico:IEEE, 2016.
- [44] XIE L,DU B,WU Y,et al. Design and optimization of a Quadruple-Ridged Flared Horn(QRFH) feed for SKA[C]// IEEE 7th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Auckland,New Zealand:IEEE, 2018.
- [45] DUNNING A,BOWEN M,BOURNE M,et al. An ultra-wideband dielectrically loaded quad-ridged feed horn for radio astronomy[C]// IEEE-APS Topical Conference. Turin,Italy:IEEE, 2015.
- [46] 杨可忠,章日荣,杨智友. 现代面天线新技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 1993. (YANG Kezhong,ZHANG Rirong, YANG Zhiyou. New techniques of modern reflector antenna[M]. Beijing:Posts & Telecom Press, 1993.)
- [47] XIE L,JIAO Y C,DU B,et al. Optimal design of a Ku/Ka-band wide-flare-angle corrugated horn using the differential evolution algorithm[J]. Progress in Electromagnetics Research Letter, 2016(59):27–33.
- [48] 伍洋,杜彪,金乘进,等. 射电望远镜相控阵馈源技术[J]. 电波科学学报, 2013,28(2):348–353. (WU Yang,DU Biao,JIN Chengjin,et al. Phased array feed technology for radio telescope[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013,28(2):348–353.)
- [49] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011. (ZHONG Shunshi. Antenna theory and techniques[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2011.)
- [50] 何应然. 人工电磁超材料波导的物理特性及其在光子器件上的应用[D]. 杭州:浙江大学, 2013. (HE Yingran. The special properties of metamaterial waveguides and their applications to photonic devices[D]. Hangzhou,China:Zhejiang University, 2013.)

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.

杜 彪(1962–), 男, 石家庄市人, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为卫星通信地球站天线、微波天线和馈源系统.

马 军(1978–), 男, 新疆维吾尔自治区昌吉市人, 高级工程师, 主要研究方向为射电天文技术与方法.