



专家视点

手机直连卫星系统及其星载相控阵天线分析与建议

陈山枝¹, 王策^{1,2}

(1. 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室, 北京 100191;
2. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100089)

摘要: 手机直连卫星通信系统备受关注, 分析了3种技术路线, 指出5G NTN将是主流技术。阐述手机直连卫星通信系统在发展过程中面临的挑战与应对方案, 指出星载相控阵天线是提升网络性能的核心要素。进一步深入分析星载相控阵天线的现状、趋势与挑战, 权衡单星性能与星座规模、初期研发成本与长期运维成本、技术风险与系统可靠性, 通过系统级多目标优化, 提出发展5G NTN星载相控阵天线的建议与权衡策略, 为我国建设与5G NTN手机直连卫星系统相关的工程和实践提供参考, 并为6G星地融合全球竞争奠定基础。

关键词: 手机直连卫星通信系统; 星载相控阵天线; 星载数字波束成形; 系统级多目标优化

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2026001

Analysis and suggestions for direct-to-mobilephone satellite systems and their satellite-borne phased array antennas

Chen Shanzhi¹, Wang Ce^{1,2}

1. National Key Laboratory of Wireless Mobile Communication, China Information and Communication Technology Group Co., Ltd., Beijing 100191, China
2. CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China

Abstract: The direct-to-mobilephone satellite system has attracted much attention, covering three technical routes. It was pointed out that 5G NTN would be the mainstream technology for the direct-to-mobilephone satellite system. The challenges confronted and corresponding solutions adopted by the direct-to-mobilephone satellite system during its development process were expounded. It was pointed out that the satellite-borne phased array antenna was the core and key element for enhancing network performance. A further in-depth analysis was conducted on the current situation, trends, and challenges of the satellite-borne phased array antenna. Trade-offs were made between single-satellite performance and constellation scale, initial research and development costs and long-term operation and maintenance costs, as well as technical risks and system reliability. Through system-level multi-objective optimization, suggestions and trade-off strategies for the development of the satellite-borne phased array antenna were proposed, providing references for 5G NTN engineering and practices in China.

Key words: direct-to-mobilephone satellite system, satellite-borne phased array antenna, satellite-borne digital beam-forming, system-level multi-objective optimization



0 引言

卫星移动通信相当于将地面铁塔上的基站或直放站搬到卫星平台上，对应的星上处理方式或透明转发方式，根据轨道可分为高轨卫星通信、中轨卫星通信与低轨卫星通信。高轨卫星只需要3颗即可实现全球覆盖，凭借其广阔的静态覆盖区，适用于电视广播和泛在通信服务；低轨卫星星座则凭借低时延和更低路径损耗，成为实现全球无缝实时宽带通信的主力。

卫星移动通信根据其服务对象和终端形态，主要可分为两大类。一类是以Ka、Ku等高频频段为主的宽带接入，其终端通常是体积较大、功耗较高的抛物面天线卫星地球站与便携式相控阵平板卫星终端，旨在提供高速宽带数据接入，如手机通过Wi-Fi接入卫星终端再接入互联网，本文将此类卫星终端称为“星猫”，就如家庭光纤宽带接入的“光猫”（光调制解调器）。另一类是以L、S等低频段为主的手机直连卫星通信，其目标是利用信号覆盖广的优势，让普通手机这类小型化终端能直接与卫星连接。

美国星链（Starlink）在低轨卫星的宽带接入领域领先，在轨约9000颗卫星，全球已发展900万个用户，即“星猫”用户。而当前卫星互联网发展的新赛道是普通手机直连卫星。

地面蜂窝移动通信的优势是容量，支持密集用户接入；卫星通信的优势则是覆盖，支持稀疏用户接入。两者各有优势，是互补关系。传统卫星通信技术体制多，每个卫星系统都不兼容，没有规模经济，卫星终端成本和通信费用高。目前，全球卫星通信用户总数还在千万量级，产业规模十分受限，长期演进和可持续发展仍面临挑战。地面移动通信则从1G的数十个标准演进到全球一个5G标准，技术先进，全球漫游互通，目前全球移动通信用户总数达57亿，具有显著规模经济优势。针对上述问题，笔者在2018年就提

出“5G体制兼容、6G系统融合”的卫星互联网技术发展路线^[1-2]。5G体制兼容是指卫星通信采用5G技术和标准，对卫星通信信道环境和低轨卫星高速运动进行优化，发挥5G技术和产业规模优势。6G系统融合是指将卫星通信和地面移动通信从一开始设计时就作为一个有机整体进行统一设计。目前，“5G体制兼容、6G系统融合”技术发展路线已得到业界高度认可，第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）正在推进5G非地面网络（non terrestrial network, NTN）的标准化工作；2025年3月，在3GPP关于6G的标准研讨会上，全球50多家公司支持地面移动通信和卫星通信标准统一设计，卫星通信成为6G标准第1版的重要组成部分。

手机直连卫星通信的核心目标是消除地面移动通信网络覆盖盲区，共同构建全球无缝覆盖与立体覆盖的通信网络。从技术体制来看，主要存在3种技术路线^[3]，其中5G NTN将是主流技术路线。然而，无论采用何种技术路线，都面临频率资源与干扰协调、严峻的上下行链路预算，以及有限的系统容量与数据速率等多重共性挑战。

在众多技术与工程挑战中，星载大型相控阵天线的性能已成为决定系统成败的关键。它直接决定了卫星的覆盖能力、链路质量和系统总容量。鉴于此，本文重点研究用于手机直连卫星的星载相控阵天线，剖析其关键技术，在性能收益、复杂度、成本相互制约的多维约束模型中进行系统级多目标优化，并提出切实可行的5G NTN星载相控阵天线发展建议。

1 手机直连卫星通信技术、趋势及挑战

1.1 手机直连卫星通信技术与趋势

手机直连卫星通信是指消费者的普通智能手机不需要依赖地面基站或专用卫星终端（即“星猫”），直接通过卫星实现语音、短信或数据通信的移动通信技术。其核心目标是消除通信盲区

(如海洋、沙漠、偏远山区、空中), 构建全球无缝覆盖的空天地一体化网络。手机直连卫星示意图如图 1 所示。从所采用的技术体制来看, 手机直连卫星通信主要有以下 3 种技术路线^[3]。

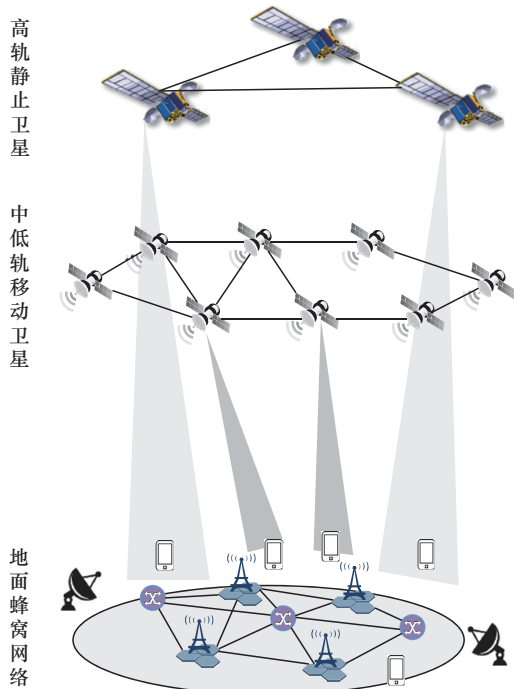


图1 手机直连卫星示意图

(1) 基于现有卫星通信体制的手机直连卫星通信

该方案基于在轨卫星的现有卫星通信体制, 如铱星 (Iridium) 系统、全球星 (Globalstar) 系统或天通一号卫星系统, 为公众用户定制新双模手机。该方案俗称“新手机、旧卫星”。由于使用的是已在轨卫星, 该方案的优势是商用部署快, 但不足是新定制手机必须集成卫星通信专用芯片, 手机成本高且面临终端小型化、卫星天线内置等挑战, 且受制于在轨卫星能力和手机内置天线, 通信速率低, 仅提供千比特每秒量级的速

率, 只能解决基本通信问题, 是一种过渡方案。

(2) 基于现有地面移动通信体制的手机直连卫星通信

该方案基于现有地面移动通信体制 (如 4G、5G) 实现存量手机直连卫星, 用户既不需要更换已用手机, 也不需要对其进行改动, 而是由卫星和网络侧进行改动和增强, 将改造后的 4G/5G 基站上星以应对卫星通信场景中的深度衰落、高时延和大频偏、切换控制等挑战, 可将其视为一种合法的伪基站方案。

地面移动通信与卫星移动通信有较大的差异, 见表 1。存量手机的无线信号收发能力是针对与地面基站相距数百米到数千米的距离而设计的, 难以应对数百到上千千米星地链路 (如星链低轨卫星距地在 500 km 左右) 的巨大信号损耗, 只能大幅增强卫星侧网络设备的能力, 星上需要配置超大规模相控阵天线阵列以提升信号收发能力。例如, 美国卫星通信公司 AST SpaceMobile 的新一代 Bluebird-6 卫星使用的相控阵天线在展开后面积达到约 223 m², 其卫星质量约为 6 000 kg, 成本高达数亿美元, 带来了功耗、体积、质量、成本等一系列新挑战。另外, 相对固定的地面基站, 手机运动时速最大为数百千米 (坐火车时); 而低轨卫星的时速超过 2.7 万千米^[4]。因此, 为适应存量手机, 对卫星的轨道高度、波束对齐与跟踪等也有特殊要求和限制, 导致用户通信速率和系统容量等受限^[5]。该方案俗称“旧手机、新卫星”或“存量手机方案”, 优势在于 4G/5G 存量手机就能直连卫星, 不足是需要新部署高性能低轨卫星星座, 卫星复杂度高且成本高, 是一种中间方案。

表 1 地面移动通信与低轨卫星移动通信的差异

对比项	地面移动通信	低轨卫星移动通信
基站与手机间的距离	数百米到数千米	300 km 到 2 000 km
相对运动速度	地面基站不动, 手机运动 < 500 km/h	低轨卫星运动 27 000 km/h
单基站 (单星) 覆盖范围	< 10 km	数百千米到数千千米



(3) 基于5G NTN体制的手机直连卫星通信

该方案由手机和卫星网络侧对同步问题、多普勒频偏、无线信号损耗等进行系统级优化增强，俗称“新手机、新卫星”。该方案的优势在于实现了系统性能（用户速率、卫星容量）在手机和卫星间的复杂度和成本的系统性平衡，是相对较优的方案。相比于存量手机方案，链路预算更具优势，可减少星载相控阵天线面积。新手机是单模手机，同时支持5G NTN和TN功能，主要涉及物理层时序和同步方面的增强，硬件成本基本没有变化，且市场开拓较为容易。缺点在于需要有卫星移动通信（MSS）频段；或通过无线电监管政策创新，允许卫星通信运营商在没有地面基站覆盖的区域复用地面移动运营商（MNO）的频段。

实现5G NTN标准的新部署卫星的复杂度处于中等水平。依据手机电池寿命等因素，目前业界手机的换机周期大约为3年，该周期内5G NTN卫星建设与组网也能基本成熟，使得公众用户在换机时能直接使用5G NTN/TN的手机直连卫星服务。此外，相较于Ka/Ku相控阵平板卫星终端（即“星猫”），5G NTN/TN手机通信模组

具有成本低、体积小、质量轻的优势，更易于广泛应用于多个行业，如汽车、低空无人机、野外作业机器人等。

目前，爱立信、泰雷兹和高通联合声明将共同研制5G NTN卫星系统；全能空间公司（Omni-space）以及中国信科、中国移动、中兴通讯、紫光展锐等也开展了基于NTN标准的手机直连卫星研发和在轨验证工作；太空探索技术公司（SpaceX）也正在积极参与5G NTN的标准化工作。

以上3种手机直连卫星通信技术路线的对比见表2^[3]。本文认为5G NTN将是未来手机直连卫星的主流技术。

1.2 手机直连卫星通信的挑战与应对

1.2.1 挑战

手机直连卫星通信的主要挑战包括频率资源与干扰、链路预算与系统容量、用户数据速率与服务体验。其中，频率资源稀缺性是核心瓶颈。

(1) 频率资源稀缺性与干扰管理

适合卫星通信的频段（如L、S、C波段，以及部分Ku/Ka波段）是有限的自然资源。这些频段需要同时服务于传统卫星业务（电视广播、固定卫星

表2 3种手机直连卫星通信技术路线的对比^[3]

对比项	技术路线1：基于现有卫星通信体制	技术路线2：基于现有地面移动通信体制	技术路线3：基于5G NTN体制
技术方案	私有/专用，手机厂商主导	私有/专用，卫星厂商主导，与地面运营商合作	5G NTN标准
终端类型	定制手机，集成专用卫星通信终端模组，双模手机（如华为Mate 60 Pro集成天通卫星终端模块，苹果iPhone 14集成Globalstar卫星终端模块）	4G/5G存量手机	5G NTN手机
终端实现方式	传统卫星电话模式，使用专用卫星通信协议和频段	现有手机不进行任何改动，由卫星和网络处理各种技术问题	5G NTN标准
典型星座或参与公司	Iridium、Globalstar、Inmarsat、天通一号	AST SpaceMobile、Lynk、Starlink GEN 2.0 Mini	中国信科、Omni-space、爱立信、泰雷兹、高通等
面临的挑战	采用卫星通信专用协议，手机需要定制，无法迅速做大生态链	对卫星的轨道、天线、通信频率等有更高要求，如AST SpaceMobile使用223 m ² 天线阵列	需要开展协同组网、协议增强、设备兼容等
手机和卫星的形态变化	新手机、旧卫星，即“新定制手机”+“已有星座”	旧手机、新卫星，即“存量手机”+“新建星座”	新手机、新卫星，即“新研手机”+“新建星座”
系统的特点	手机支持双模、面临实现挑战、成本偏高，通信速率低、用户体验差，但商用部署快	为提高速率，星载天线阵面大，卫星复杂度、成本高、实现难度大	手机成本没有变化，新建卫星复杂度处于中等水平，系统综合成本低

服务、气象卫星、科学探测等)、地面移动通信(4G/5G/6G)以及新兴的卫星互联网星座。同时,频谱资源由国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)协调分配。受手机形态和功耗的影响,手机直连卫星能采用的频段只能在8 GHz以下,如L、S、C波段。为手机直连卫星分配新的、大带宽的专用全球频段极其困难且耗时漫长,需要协调各个国家和各行业的利益。

卫星覆盖范围广,但手机终端天线小、增益低、方向性差,极易受到来自地面或其他卫星的同频或邻频干扰,也更容易干扰他人。设计能在复杂干扰环境下可靠工作的接收机和高效的干扰协调/规避机制是巨大挑战。稀缺的频谱资源直接限制了可用的通信带宽,而带宽不足是制约用户数据速率和系统容量的根本物理因素之一。

(2) 链路预算与系统容量挑战

卫星距离远,尤其是地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星,距离约36 000 km,信号衰减随距离的平方增加而增加。低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星虽然距离近(距离为几百千米),但其高速移动导致多普勒频移严重,需要波束间和卫星间频繁切换,通信链路保持较为困难^[6]。手机受自身形态的影响,无法配备大型高增益定向天线,只能依赖全向或弱定向天线,导致接收到的信号能量微弱,发射功率也受限,同时还要考虑电池和辐射安全等因素。卫星手机建立和维持卫星链路比地面蜂窝移动网的耗电量大得多,这对手机电池的续航时间构成了挑战。

单颗卫星的转发器功率、带宽和处理能力有限。为了提高容量,需要将卫星覆盖区域划分为众多更小的点波束,进行频率、时间和空间复用。然而,这需要复杂的波束成形技术和强大的星上处理能力。即使拥有强大的点波束技术,根据香农定理,可用的总频谱带宽直接决定了整个卫星系统理论上的容量上限^[6]。稀缺的频谱资源成为系统容量难以提升的硬约束。

(3) 数据速率与服务体验挑战

受限于链路预算(信号弱)和可用带宽(频谱窄),目前主流手机直连卫星服务,如天通、北斗短报文、Iridium、Globalstar、物联网(Internet of things, IoT)主要提供短消息服务(short message service, SMS)、应急短报文或极低速率的数据传输服务(传输速率从几千比特每秒到几十千比特每秒)。这与地面4G/5G动辄几十兆比特每秒到吉比特每秒的速率相差甚远,导致用户实际体验较差^[4]。实现语音通话(如天通、部分Iridium服务)功能已属不易,这需要相对较好的链路条件和系统资源分配。当前,特别是在现有可用频谱技术条件下,为普通手机终端提供视频通话或高速上网服务的实现难度是极高的。建设和维护卫星网络成本高昂,终端也需要特殊设计(如额外天线)。这些成本最终会转嫁给用户,导致服务资费远高于地面蜂窝移动网,进而影响服务的规模普及和用户体验。

1.2.2 应对策略和技术创新

应对手机直连卫星挑战是一个系统工程。虽然频率稀缺是核心物理瓶颈,但通过技术创新,包括频谱共享、波束成形、采用更低轨道的LEO卫星(从1 000 km降到500 km)、星地融合等,以及国际标准推动和国际协调等多管齐下的方式,我们正在逐步突破相关限制,朝着提供更广覆盖、更高容量、更低时延和更优用户体验度的目标迈进。

(1) 应对频率资源稀缺性与干扰的核心策略

采用更先进的调制方式和信道编码技术,在相同带宽和信噪比下提升频谱效率。在法规允许的前提下,通过技术创新,让卫星系统与地面5G/6G系统在特定频段实现智能、动态的频谱共享。

在卫星侧,部署大型相控阵天线,生成大量高增益、超窄、可快速成形和移动的点波束。这些点波束能够精确对准用户,大幅提升信号强度,同时通过空间隔离显著抑制同频干扰^[5]。在终端侧,在手机中集成小型化多天线(如4~8单



元)和初级波束成形能力,以提升增益并抑制干扰,但这一技术难度较大,是当前的研发热点。在接收端,采用串行干扰消除、基于AI的干扰识别与抑制等技术,基于实时信道状态和干扰地图,动态分配频率、时隙和功率等资源^[7]。

(2) 应对链路预算与系统容量挑战的策略

在卫星侧增加卫星发射功率,以补偿下行链路损耗。提升天线增益,方向性集中能量。在卫星上完成信号的解调、解码、交换、重新编码调制等,避免噪声和干扰累积,提升链路质量,并实现灵活的路由和波束间切换。将卫星覆盖区划分为数百甚至数千个独立的更小波束,实现频率和空间复用,这是提升系统容量的核心,但其复用能力仍受限于可用的总频谱带宽^[6]。

在终端侧集成更效率率的卫星通信专用天线(如改进的全向天线)。探索相控阵天线小型化,实现弱定向性和初步波束跟踪能力。在增大终端发送功率方面,可采用功耗平衡方案,包括动态功率控制,并提升功率转换效率,以降低功耗。

(3) 提升数据速率与服务体验的策略

更高的频谱效率和更宽的有效带宽是提升速率的物理基础。通过更强的链路预算,如提升卫星功率和增益、改进终端天线等,能够在可用带宽上实现更高阶的调制和更可靠的传输。同时,通过优化路由、降低时延,以增强覆盖范围与连接稳定性。

2 星载相控阵天线的现状、趋势与挑战

2.1 现状与趋势

星载数字波束成形(digital beamforming, DBF)超大规模相控阵天线是手机直连卫星通信系统的核心关键组件,直接决定了卫星覆盖能

力、系统容量和抗干扰性能。以下是其技术现状与发展趋势的解析。

2.1.1 现状: 巨型星座驱动技术实用化

通道数实现飞跃式增长,单星天线单元数从早期的数十通道发展到数千通道(以Starlink V2为里程碑)。采用全数字化架构,每个天线单元独立配备模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)/数模转换器(digital-to-analog converter, DAC)以及射频链,实现波束级精准控制。在星上进行实时处理,采用航天级现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)或DBF专用芯片,完成波束成形、干扰抵消等算法^[8]的运算。核心部署案例与技术参数见表3。

星载DBF超大规模相控阵天线的核心优势包括:超精细波束扫描,生成窄波束,提升频谱复用率;动态容量分配,通过DBF实时调整波束形状与功率,将容量集中到高需求区域;抗干扰能力,在数字域生成自适应零陷,抑制恶意干扰或邻星同频干扰^[8]。

星载DBF超大规模相控阵天线的技术瓶颈包括:功耗与散热,如1 500通道的DBF天线功耗达4 kW,占卫星总功耗的60%;计算复杂度,波束调度与实时校准需要较大算力,星上处理芯片需要具备抗辐射设计;成本与可靠性,单面DBF天线成本超500万元,空间辐射环境导致器件失效率升高。

2.1.2 发展趋势: 向超大规模天线演进

星载DBF是手机直连卫星的核心部件,其发展趋势是向万个单元、TB级容量演进,但成本与功耗仍是当前面临的主要瓶颈。星载DBF超大规模相控阵天线的发展趋势见表4。

表3 核心部署案例与技术参数

系统	阵列规模	频段	技术特点
Starlink V2 Mini	1 600阵元, 6.21 m ²	1 610~2 500 MHz	支持几十个独立波束, 芯片化的DBF, 支持等通量密度和干扰抑制功能
AST SpaceMobile	2 368阵元, 64 m ²	617~960 MHz, 1 805~2 200 MHz	直接兼容4G/5G频段, 普通手机不需要改造即可连接

表4 星载DBF超大规模相控阵天线的发展趋势

参数	现状(2023年)	2025—2027年目标	2030+远景
单元数量	1 600 (Starlink V2)	3 000+	5 000+
波束数量	50+	1 000+	2 000+
功耗效率/(W·通道 ⁻¹)	2	1	0.5
成本/(元·通道 ⁻¹)	1 500	800	200

主要的突破性技术包括元器件创新和架构创新两方面。在元器件创新方面,将DBF从基于FPGA实现改为采用专用芯片,同时全面采用氮化镓(GaN)或磷化铟(InP)功率管,并增加开环数字预失真(digital pre-distortion, DPD),以提高效率,降低功耗;在架构创新方面,通过空分及频分,降低波束间干扰,使阵面解耦,降低DBF复杂度^[8]。

2.2 约束与挑战

星载DBF超大规模相控阵天线面临的核心约束与挑战可归纳为“四维极限”,即物理极限、资源极限、技术极限和成本极限。

(1) 物理极限

物理极限源于空间环境的残酷约束。一方面是热管理瓶颈,千级单元的DBF功耗达4 kW,集中在小面积(如3.5 m²)天线板上,功率密度极大。太空无对流散热,仅靠热辐射和导热板,温差需要控制在±5°C内(否则射频性能漂移),热设计占天线系统总质量的30%^[9]。另一方面是空间辐射摧毁问题,高能宇宙粒子击中DBF芯片导致逻辑翻转,因此必须采用抗辐照FPGA或专用芯片,但会增加成本。

(2) 资源极限

资源极限体现在星上稀缺资源的争夺上。典型冲突案例较多:若为DBF增加500通道,需要多耗电800 W,意味着要牺牲4台激光终端的供电;波束计算量每提升1倍,需要增加2 kg屏蔽铜,相应地会减少10 kg燃料,进而缩短卫星寿命^[9]。

(3) 技术极限

技术极限受超大规模系统的物理法则限制。

相位同步方面,万通道相位差需要<1°,现有太空时钟抖动难以满足这一要求;空间同步方面,天线单元间距误差需要< $\lambda/50$, λ 为电磁波波长,但卫星热变形远超此要求;单元密度提升导致耦合加剧,当单元间距< λ 时,互耦使波束指向误差非线性增长。此外,自适应波束成形、干扰抑制、实时校准等算法的复杂度也会呈爆炸式增长^[8]。

(4) 成本极限

成本极限凸显了商业航天的经济模型矛盾。千通道阵列成本超过500万元,占整星成本的25%,且低轨卫星设计寿命仅7年,需要配置大量器件冗余,进一步增加了质量和成本,给卫星运营商带来更大的折旧压力。

星载DBF超大规模相控阵的约束本质是“在极端环境下的超复杂系统优化问题”,包括:物理层要对抗热、抗辐射和力学的三重挑战;系统层要在能源、质量和算力的铁三角中博弈;应用层要为廉价手机提供贵族级太空链路。

3 星载相控阵天线的关键技术与发展建议

3.1 关键技术与解决方案

星载DBF超大规模相控阵天线的关键技术突破需要攻克“三高”难题,即高密度、高实时性、高可靠性。以下是分层级技术解决方案与核心创新点。

(1) 超大规模阵列架构:万个通道级系统优化

超大规模DBF计算复杂度极高,功耗与实时性不可兼得。为解决这一问题,可以考虑阵面解耦,降低DBF复杂度。



(2) 天上实时处理：抗辐射算力引擎

超大规模波束调度对算力的要求极高，需要研制抗辐射的专用芯片，甚至需要采用抗辐射AI加速器架构。

(3) 低成本批量生产：商业航天范式革命

商业航天需要具备低成本批量生产能力，具体包括：采用模块化可重构架构，如64通道标准子阵；建设柔性产线，采用汽车电子级制造标准，可降低40%成本；实现SoC支持天上重编程，功能迭代不需要发射新卫星；优化冗余策略，取消通道级冷备，采用相邻卫星波束覆盖重叠区系统级备份方式。

3.2 5G NTN星载相控阵天线发展建议

(1) 超大规模阵列的系统级多目标优化

在手机直连卫星通信中，星载DBF超大规模相控阵天线的收益、复杂度、成本与功耗构成相互制约的“多维平衡模型”，需要做系统级多目标优化。核心参数关联模型如图2所示。以下是其内在关系的量化分析与优化策略。

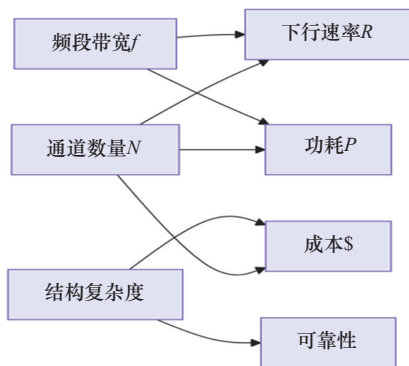


图2 核心参数关联模型

收益（以通信速率为衡量指标）的核心驱动因素可表示为： $R \propto N \times f \times \eta$ 。其中， η 表示频谱效率， f 表示频段带宽， N 表示通道数量。通道数量和频段带宽是通信速率提升的乘数因子，但它们的提升受制于功耗与成本上限。天线通道数量的正负代价见表5。

结构复杂度的关键指标包括单元间距密度

（以 $\lambda/2@f$ 为衡量标准）和热管理层级（即散热通道与面积的比值）。热变形会导致波束指向偏差 $>0.2^\circ$ ，因此，需要增重20%来强化结构^[9]。

表5 天线通道数量的正负代价

N提升效应类别	正向收益	负向代价
通信速率	线性增长	功耗升高
波束分辨率	干扰抑制增强	制造良率降低（每增加1 000通道，良率下降5%）
系统容量	空间复用倍增	同步精度要求提高（相位误差容限降低30%）

相控阵天线面积（对应阵元数）直接影响每波束吞吐率，进而间接影响网络性能。同时，更大的相控阵面积还会导致功耗和成本快速增长，需要根据具体任务需求（如覆盖范围、分辨率、实时性等）和约束条件（如预算、技术成熟度、发射能力等）进行多目标优化。

5G NTN系统优化通常需要权衡单星性能与星座规模、初期研发成本与长期运维成本、技术风险与系统可靠性。系统能力与整星成本对比如图3所示。假设低轨卫星通信系统的频段为2 GHz，带宽为20 MHz，轨道高度为508 km。

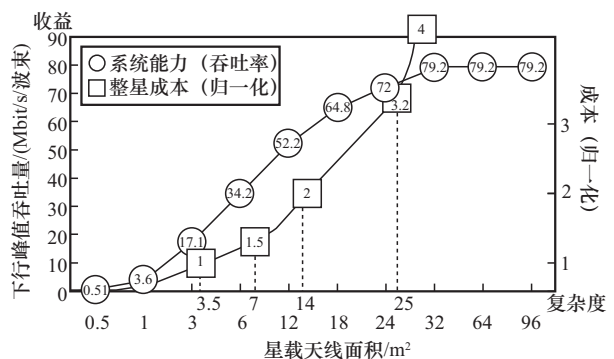


图3 系统能力与整星成本对比

由图3可知，采用更多阵元数的大面积天线，可提供更窄波束或更高增益，从而使单颗卫星的覆盖范围更大，每波束吞吐率更高。然而，天线面积增大，总功耗会显著增加，需要配备更大的太阳能板及电池，同时需要更复杂的散热系统，这增加了控制电路和材料的成本，

制造复杂度也大幅提升。同时，间接增加了卫星的质量和体积，提高了发射成本（以千克计价）。图3显示，更多阵元数的极端大面积天线，其成本上升的速度和获得的性能收益不成正比。相比于存量手机直连卫星方案，5G NTN链路预算更具优势，可适度减少星载相控阵天线面积。多目标优化后， 14 m^2 、 25 m^2 是平衡系统能力与整星成本的较为合适的相控阵面积。考虑新材料和新技术对成本及功耗的贡献，结合图3中曲线的拐点， 50 m^2 也是未来演进的具备性价比的相控阵面积。

（2）单星性能极限与系统总经济性的权衡

卫星互联网系统设计面临的核心权衡在于单星性能极限与系统总经济性。采用大规模天线（高阵元数）的卫星固然在技术指标上具有先进性，但其引发的“成本连锁反应”同样惊人。如果固执于用少量“超级卫星”组网，系统的总成本（研发+制造+发射+运维）极高，且风险极高。破解此难题的关键在于从“单星思维”转向“系统思维”，即通过增加卫星数量，构建一个更优化、更具韧性的星座系统。

“增加卫星数量”并非简单地以量取胜，而是一种精准的系统级成本优化和风险分散策略。它与大面积天线路线形成了有效的互补与平衡，可以考虑降低单星复杂度与成本，实现“规模经济”，与其造一颗造价过亿元、重达数吨的“大卫星”，不如用同样的成本造10颗造价千万元、质量更轻的“小卫星”。标准化、模块化的卫星设计更适合大规模流水线生产，如同特斯拉生产电动车一样，能显著降低单位成本。伴随我国ZQ-3、CZ-12A等可重复使用火箭的试验成熟，未来轻量化卫星的总发射成本会更低。考虑当前Starlink上万颗在轨卫星，带来的包括太空拥堵、碎片等系列问题，我国5G NTN卫星互联网系统建设，不能靠单纯增加卫星数量，需要更精准的系统和本成本优化。通过部署足够数

量的、具备适度大面积天线（而非极端大面积）的卫星，完全可以在系统级别达到甚至超过由少量“大卫星”组成的星座的总吞吐率，关键在于优化整个网络的资源调度和负载均衡。卫星数量多，也可增强系统韧性与灵活性，降低系统性风险。在一个由数千颗卫星组成的星座中，单颗卫星的失效对整体服务的影响微乎其微，系统可以快速通过相邻卫星进行补偿。最后，卫星网络可以开展渐进式部署与升级，大规模星座可以通过分批次发射和部署，从而更快地提供初始服务，同时边运营边升级技术。后续批次的卫星可以融入最新技术，以保持整个系统的技术先进性。

综上所述，在卫星互联网系统设计中，“增加卫星数量”与“提升单星天线性能”并非对立的选择，而是一个需要系统优化的平衡。当单星性能（特别是通过增大天线面积）的提升触及成本边际效益急剧下降的拐点时，转向增加卫星数量，是一条更为明智和经济的技术路径。它通过将集中式的复杂性与成本转化为分布式的规模性与韧性，实现了在系统总成本、性能、可靠性和可演进性上的最优解。

（3）星载柔性折叠天线

在卫星互联网星座的竞争中，星载柔性折叠天线是一项革命性的技术，其核心优势在于，它解决了“大口径”与“小发射体积”这一对根本矛盾。

星载柔性折叠天线最直接、最核心的优势是极高的发射收纳比。与传统的刚性天线或金属天线相比，柔性天线采用轻质薄膜、柔性复合材料等，其面密度（单位面积质量）极低，在发射时仅占用极小的体积。这使得卫星可以携带一个展开后面积巨大（如数十甚至上百平方米）的天线，却只占用一个很小的发射空间。柔性折叠天线通过其可展开的特性，能够实现比传统相控阵天线大得多的物理口径，从而实现更窄波束或更高增益。同时，轻量化的柔性天线也能实现平台解耦。



大型刚性天线对卫星平台的承重、刚性和结构设计提出了极高要求。轻量化的柔性天线则对平台的冲击小，可以与更多标准化的、相对简单的卫星平台进行集成。从长远来看，柔性天线更适合卷对卷等大规模自动化生产工艺，具有巨大的降本潜力。

星载柔性折叠天线巧妙地利用“柔性”和“可展开”两个特性，将高性能的天线与经济高效的发射部署结合在一起，完美地支撑了通过“增加卫星数量”来构建强大星座系统的战略，是推动卫星互联网走向更高性能、更低成本的核心引擎之一。目前，SpaceX（星链 V2.0 卫星的部分版本）、亚马逊（柯伊伯计划）、AST 等公司都在积极研发和应用此类技术。

4 结束语

本文系统分析了手机直连卫星系统的主要挑战，指出 5G NTN 将是主流技术方案及星载 DBF 超大规模相控阵天线是实现手机直连卫星通信系统的核心组件。本文通过研究其关键技术瓶颈，分析其面临的核心约束与挑战，指出星载 DBF 超大规模相控阵的约束本质是“在极端环境下的超复杂系统优化问题”；通过构建收益、复杂度、成本与功耗的“多维约束模型”来量化分析，进行系统级多目标优化，给出 5G NTN 星载相控阵天线阵面规模的设计建议，旨在促进我国快速构建巨型低轨卫星通信系统。需要指出的是，本文的分析不仅有利于 5G NTN 手机直连卫星系统的设计与建设，也有利于未来 6G 星地融合技术与产业的发展。

参考文献：

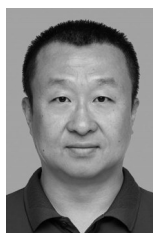
- [1] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
Chen S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.

- [2] Chen S Z, Sun S H, Kang S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication: the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [3] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 星地融合移动通信系统与关键技术: 从 5G NTN 到 6G 的卫星互联网发展[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2024.
Chen S Z, Sun S H, Kang S L, et al. Satellite-ground integrated mobile communication systems and key technologies: from 5G NTN to 6G satellite internet development[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2024.
- [4] Del Portillo I, Cameron B G, Crawley E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [5] Chen S Z, Liang Y C, Sun S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.
- [6] Chen S Z, Sun S H, Miao D S, et al. The trends, challenges, and key technologies of beam-space multiplexing in the integrated terrestrial-satellite communication for B5G and 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(6): 77-86.
- [7] Oestges C, Clerckx B. MIMO wireless communications: from real-world propagation to space-time code design[M]. Pennsylvania: Academic Press, 2020.
- [8] Mailloux R J. Phased array antenna handbook (3rd ed.) [M]. Massachusetts: Artech House, 2017.
- [9] Wertz J R, Larson W J. Space mission analysis and design[M]. California: Microcosm Press, 1999.

【作者简介】



陈山枝（1969-），男，博士，中国信息通信科技集团有限公司教授级高级工程师、博士生导师、副总经理、总工程师、科技委主任，无线移动通信国家重点实验室主任，主要研究方向为 6G、星地融合移动通信与卫星互联网、车联网等。



王策（1978-），男，中信科移动通信技术股份有限公司高级工程师，移动通信事业部副总工程师，主要研究方向为移动通信、5G NTN 星载基带、星载手机直连相控阵天线、宽带卫星相控阵终端等。