



专题：手机直连卫星通信

面向手机直连的星载相控阵：关键技术与未来展望

焦凌霄^{1,2}, 李文静^{1,2}, 童建飞^{1,2}, 李记锋^{1,2}

(1. 上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 200120;

2. 上海市卫星互联网重点实验室, 上海 200120)

摘要：手机直连卫星通信传输距离远、链路损耗大的特点，对星载相控阵的能力提出了新要求。通过分析手机直连卫星场景的实际需求，概述了不同波束成形架构的优劣，提出了合适的波束成形架构选择策略，探讨了频分双工体制下双频共口径圆极化天线阵设计，阐述了星载相控阵堆叠集成架构和芯片关键工艺技术。给出了在手机直连卫星场景下，星载相控阵未来的发展方向和关键技术路径。

关键词：手机直连卫星；相控阵；波束成形；天线阵

中图分类号：TP393

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024096

Satellite phased arrays for direct-to-handset satellite: key technologies and future vision

JIAO Lingxiao^{1,2}, LI Wenjing^{1,2}, TONG Jianfei^{1,2}, LI Jifeng^{1,2}

1. Shanghai Satellite Network Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China

2. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China

Abstract: To address the long distance and significant loss in satellite-to-ground wireless link, new demands are imposed on satellite phased arrays by direct-to-handset satellite. By analyzing the practical requirements of direct-to-handset satellite, the advantages and disadvantages of various beamforming architectures were outlined, then the proper selection strategy of beamforming architecture was proposed. Subsequently, dual-band shared-aperture circularly-polarized antenna arrays under frequency division duplexing (FDD) were discussed. In addition, the stacking and integration architecture of phased arrays was reviewed, and several key fabrication technologies for components and chips were introduced. Finally, the outlook and key technologies of satellite phased arrays for direct-to-handset satellite were presented.

Key words: direct-to-handset satellite, phased array, beamforming, antenna array

0 引言

手机直连卫星为卫星通信领域打开了广阔的

大众市场，是标志着卫星通信从小众市场走向大众市场的重要一步。专业机构预测，预计到2027年，全球卫星通信终端市场的规模将达

108.992 4亿美元。手机直连卫星通信对卫星天线提出了极高的要求。以全球星系统^[1]为例,其终端等效全向辐射功率需要达到30 dBm。即便按照低轨卫星系统推算,同时考虑目前智能手机内置天线的增益普遍小于-5 dBi,其终端的传导功率需求仍远超5G标准对于Power Class 2类型手机终端的传导功率要求。一些终端厂商尝试了不同方案以提升手机天线的增益,如华为Mate 60 Pro系列手机通过天线叠加实现了较弱的波束成形;而小米14 Ultra手机则通过外置的卫星信号增幅仪提升了天线增益。对于下行链路,虽然已经有相关成果展示了在折叠屏手机上实现圆极化天线的技术^[2],但对于普通手机常见的使用场景而言,手机接收天线还需要考虑至少3 dB的极化损耗。整体而言,手机天线和射频前端的发射接收能力仍不足以弥补星地链路的巨大信号损耗。因此,迫切需提升星载天线的接收和发射能力,进而提高星载相控阵波束成形的增益。

除了考虑星载相控阵的高成形增益,还需要考虑手机终端大规模接入和低轨卫星高动态场景下的波束跳跃和多波束覆盖问题^[3-4],并确保不对地面网络造成干扰,因此需要卫星支持快速切换的多波束成形。在平衡成本和功耗的前提下,需要考虑采用模拟、数字、混合等多种波束成形架构,以解决手机直连卫星场景下的多波束覆盖问题。

此外,高频信号的衰减更显著,手机直连卫星通信主要采用L/S/C频段,而这些频段已被地面网络、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)等服务占用。卫星通信通常采用频分双工(frequency-division duplex, FDD)体制,需要成对的频谱资源,而预计手机直连将需要更高的带宽,这可能导致在L/S/C等低频段难以找到频带足够宽且相邻的频谱对,需要考虑扩大上下行频谱间隔^[4]。因此,收、发之间可能无法共用同一套阵列,设计双频共口径天

线阵成为星载相控阵设计中的关键技术之一。

本文从关键技术和未来展望两个方面探讨手机直连场景下的星载相控阵设计。首先,综述当前广泛采用的波束成形架构,比较它们的优劣,并结合手机直连的实际需求讨论波束成形架构的选择方案;其次,探讨FDD体制下天线阵设计的关键技术,展示双频共口径圆极化天线阵的若干关键技术点,并对学术界和工业界的解决方案进行综述;然后,综述星载相控阵堆叠架构和功能模块划分时需要考虑的关键问题,并介绍比较星载相控阵芯片的若干关键工艺;最后,给出在手机直连场景下,星载相控阵未来的发展方向和关键技术。

1 波束成形架构

宽带卫星通信对波束管理提出了更严格的要求,以确保卫星能够灵活调整波束的各项参数,包括但不限于波束宽度、指向、功率以及波束间带宽等。这种调整能够实现接入网卫星功率的动态分配、波束的动态重构以及波束的灵活调整。本节对模拟、数字和数模混合波束成形架构进行详细梳理,并分析在不同场景下手机直连卫星对波束成形架构的需求。

1.1 模拟波束成形

模拟波束成形(analog beamforming, ABF)是最传统的波束成形方式,其基本思路是在模拟域实现信号的移相,根据移相的位置不同,可分为射频移相、本振移相、中频移相和基带移相。目前主流的方式是采用结构相对简单的射频移相,即在射频域对阵元的相位进行调控。ABF中不同移相位置的优缺点对比见表1。

在射频域,ABF又可分为电路型ABF和可调移相器型ABF,ABF架构如图1所示,其中,ADC和DAC分别为模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)和数模转换器(digital-to-analog converter, DAC)。



表1 ABF 中不同移相位置的优缺点对比

ABF 分类	优点	缺点
射频移相	可共享一些器件，如混频器、滤波器等 结构相对简单	移相器线性度有限，信号劣变 混频器后端可能需要功分器，功分器占用面积较大
本振移相	本振移相器非线性影响较小	不能共用混频器、滤波器等器件 本振需加缓冲器以增强本振驱动能力
中频移相	中频移相器比射频移相器寄生小	不能共用混频器、滤波器等器件 中频移相器体积大
基带移相	精度相对高 基带信号可并行多路，成倍增加并行处理能力	电路复杂，功耗大

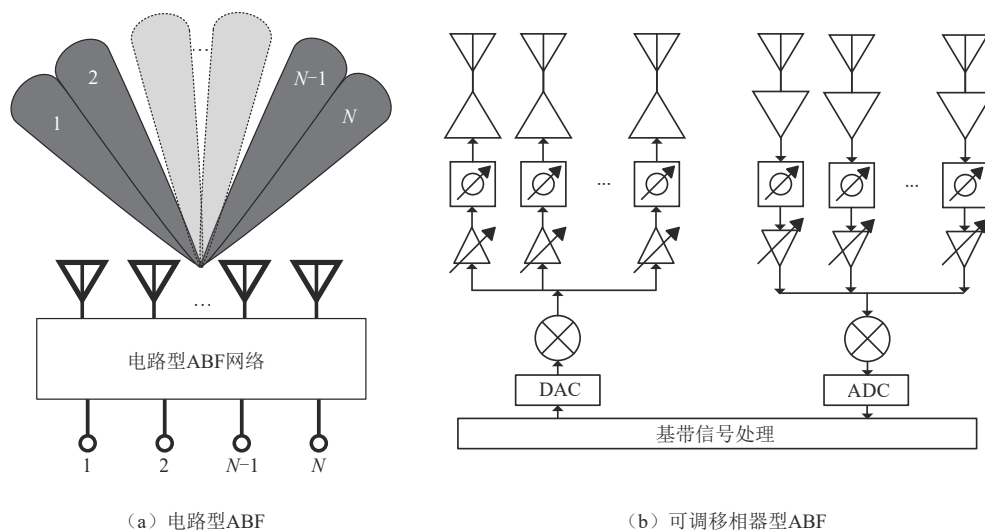


图1 ABF 架构

电路型 ABF 的馈电网络通常由一系列移相器件和功分器件组成，通过不同端口的输入可实现不同指向的波束^[5]。常见的馈电网络包括 Blass 矩阵、Butler 矩阵和 Nolen 矩阵等。电路型 ABF 中的波束方向是预先确定的，其可实现的扫描角度无法灵活配置或重构，因此灵活性较差。电路型 ABF 能够同时生成多个波束，但是如果需要增加波束数量，就需要设计大规模的无源电路网络，这会带来较大的损耗和复杂的结构。

目前主流的 ABF 方式是可调移相器型 ABF，其基本思路是在射频前端实现信号相位的控制，并形成波束。但是 ABF 有一些固有的技术缺陷：首先，模拟移相器大多是多比特控制的，会引入量化误差，使得精确控制波束变得困难；其次，ABF 的波束成形网络相对固定，难以实现阵元幅

度加权，因此在高水平的旁瓣抑制方面受限，同时难以灵活地进行阵列拼接；最后，在 ABF 系统中，为支持多波束须增加移相器、衰减器等部件，硬件资源的开销几乎与波束数量成正比。

纯粹的 ABF 架构无法满足当前对波束灵活重构，高速切换以及阵列可拼接、重构的要求。因此，将数字波束成形（digital beamforming, DBF）与 ABF 结合，形成数模混合波束成形的一部分，是提升其应用能力的机会。

1.2 数字波束成形

DBF 架构如图 2 所示，在 DBF 阵列中，接收机对接收到的信号进行阵元级别的检测和数字化，然后在数字领域内进行处理，以形成所需的波束。在发射端，发射机对每个单元的输出信号进行数字合成，然后上变频到射频，从而形成发

射波束。其中,第 p 个波束可以写成如下有限冲激响应(finite impulse response, FIR)的形式:

$$y_p[n] = \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{K-1} a_{m,p}[k] x_m[n-k] \quad (1)$$

其中, $x_m[n-k]$ 是第 m 个阵元在基带的复数数据, $a_{m,p}[k]$ 是波束 p 在时间 k 和空间 m (阵元位置)上的数字权重,包括幅度和相位两个权重系数。从式(1)可以看出,DBF芯片的核心功能就是在数字域对量化的子波束信号与量化的移相和幅度权值进行对应的多位乘、加运算。

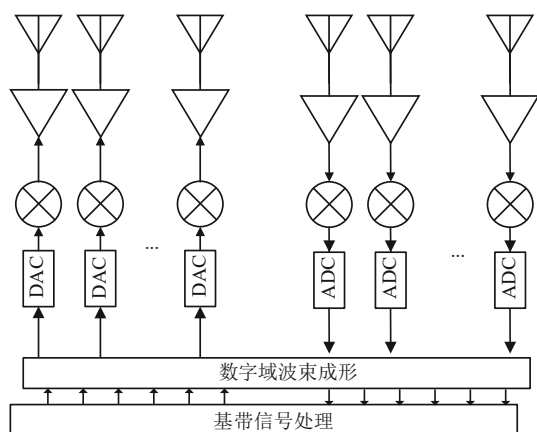


图2 DBF架构

DBF能够实现最高的灵活性,并具有以下优点:首先,在生成多个同时波束时,不需要额外的硬件开销;其次,DBF具有极高的灵活性,可以支持阵元幅度加权和灵活的波束重构,同时支持动态、灵活的子阵列分配,便于扩展整个阵列的规模;最后,纯DBF架构理论上可以实现子载波或资源块级别的独立波束成形预编码,支持基于波束成形的大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)。此外,DBF可以实现真时延(true-time delay, TTD)波束成形技术^[6]。TTD技术通过在时域上对每个阵元信号进行延迟操作,进而改变信号在阵元之间的传播时间来达成信号的相干叠加并实现对波束的控制。相比于通过相位调控的方式实现波束成形,基于TTD的相控阵可以在宽频带内保持波束指向的恒

定,因此可以消除波束倾斜的现象。

然而,DBF的每个阵元通道都需要配备ADC或DAC。当阵元规模庞大时,ADC和DAC电路的功耗将会非常大。同时,由于数据量巨大,DBF对采样到数字信号处理器间的数据接口也提出了极高的要求。如1 000通道以上的DBF系统,其ADC采样后的数据速率将达到Tbit/s的水平,这对高速接口电路的复杂度、功耗及驱动能力带来了严峻的挑战。

1.3 混合波束成形

混合波束成形(hybrid beamforming, HBF)在牺牲一定的灵活性和扫描性能的同时,融合了ABF和DBF的优点。相较于纯DBF架构,它无须在每个阵元通道上使用ADC和DAC,从而减少了数字域的数据处理量并节省了功耗;而与纯ABF架构相比,它提供了更高的灵活性,并大大降低了多波束场景下射频通道移相器和衰减器的数量。HBF架构如图3所示。

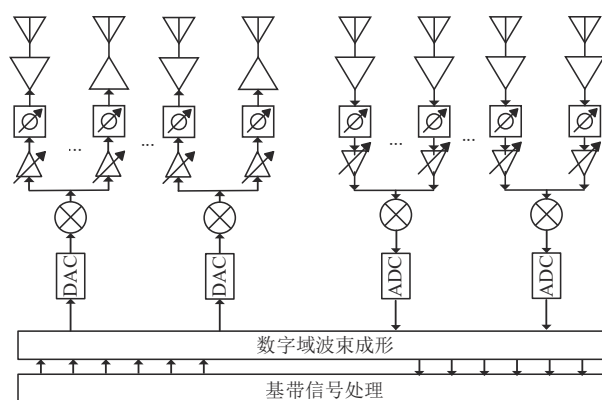


图3 HBF架构

最新的研究表明,HBF架构有3种实现思路,如图4所示。

第1种是从波束成形信号增强的角度出发,采用模拟+数字两级波束成形方案^[7],如图5所示。ABF作为子阵级单元,形成如图5所示波束包络,实现波束增强和较差波束扫描能力;DBF作为第二级,实现合成和波束成形,达到精细化的波束

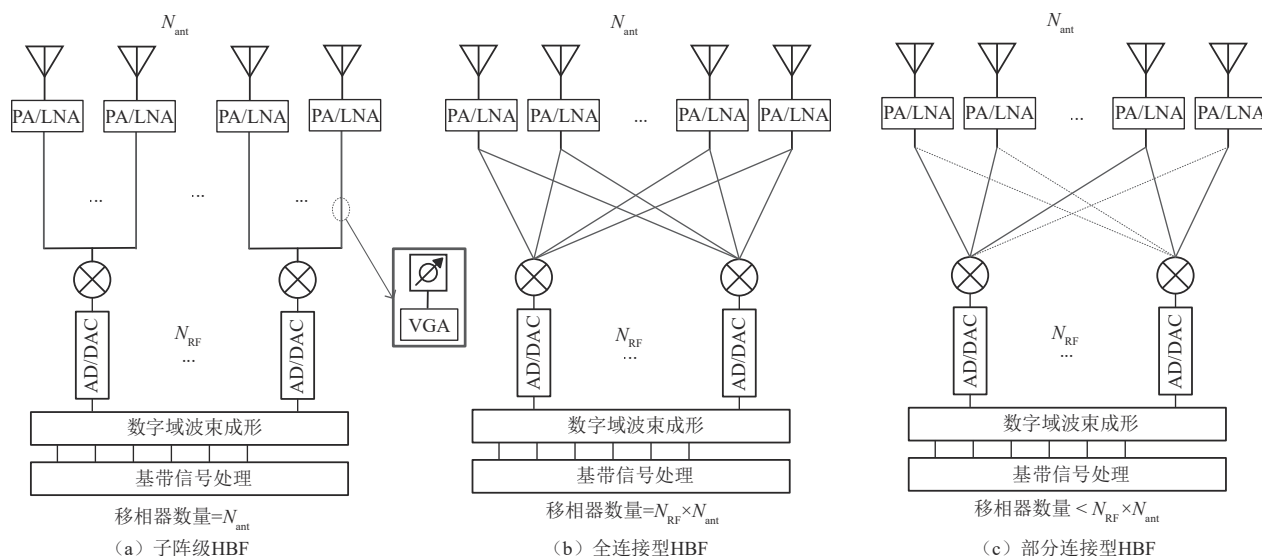


图4 3种HBF架构

控制。在这种HBF架构中，多波束跳跃局限于一个ABF形成的包络中，因此小区范围将会缩小。

第2种是从多用户或大规模MIMO的角度出发，在数字域和模拟域实现两级的MIMO预编码和空间解码。相比上一类采用ABF子阵方式的HBF，此类HBF系统需要在每个数字链路和天线之间用移相器进行全连接^[8]。这种全连接的架构可以得到逼近DBF的扫描范围和灵活度，但是会使ABF网络变得极其复杂。

最新的研究集中在第3种，即去除部分采样链路和天线之间的移相器连接，以得到部分连接或者分组连接的ABF网络^[9]。该方案的目标是利用最小的硬件、最低算法复杂度和最少计算量，逼近纯DBF架构的频谱效率^[8]，其本质是一类优化问题。目前，针对此类HBF的研究主要基于射频链路数学模型，集中在波束成形预编码算法的研究上，尚无实物系统出现。且此类HBF的ABF网络涉及射频链路和移相器的复杂连接，其硬件复杂度和可实现性尚待论证。另外，由于卫星通信系统功率受限，且信道欠散射，其空间分集增益不足，因此在当前低轨卫星系统中实现大规模MIMO的可行性尚待论证。

HBF架构具有满足高功率窄波束、精确波束指向和降低功耗的需求，尤其对于未来系统中的超大规模相控阵系统，其可有效平衡硬件复杂度、功耗和波束成形灵活度，因此是有效的潜在选择。

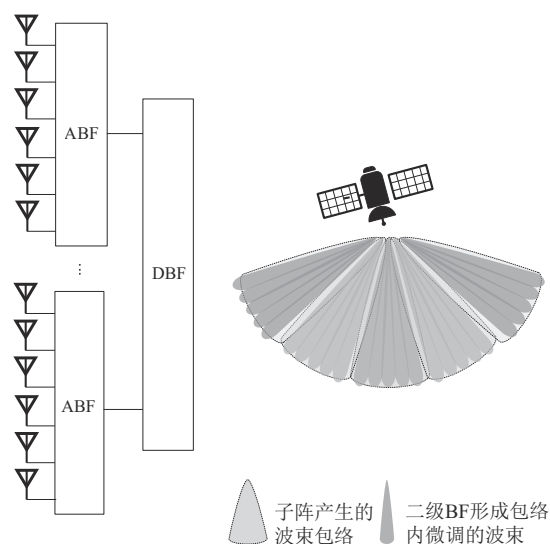
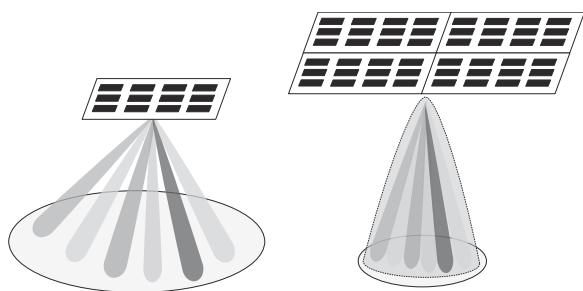


图5 模拟+数字两级混合波束成形波束

1.4 手机直连场景下的波束成形架构

规模较小的DBF阵列和规模较大的HBF阵列跳波束范围对比，如图6所示。纯DBF架构的相控阵展现出最高的波束成形灵活性，可以在较

大的范围内实现跳波束,如图6(a)所示。为了进一步提升星载相控阵的波束增益,可能需要在卫星上部署超大规模的相控阵。然而,受制于卫星平台的载荷和数据处理能力,采用纯DBF架构处理这一规模的阵列并非现实可行。相比之下,采用如图6(b)所示HBF架构的相控阵,其跳波束范围会明显缩小,因此需要在卫星跳波束范围与阵列增益之间进行权衡。特别是对于存量手机直连卫星的技术路线而言,以缩小跳波束范围为代价采用HBF架构的超大规模阵列,可进一步降低对终端天线和发射功率的要求。



(a) 规模较小的DBF阵列覆盖 (b) 规模较大的HBF阵列覆盖

图6 规模较小的DBF阵列和规模较大的HBF阵列
跳波束范围对比

2 双频共口径圆极化天线阵

FDD上下行频段分离导致的天线和射频链路的变化示意图如图7所示,FDD体制通常会选择频率相近的成对上下行频段,因此收发通道可共用一套天线阵,并在每个阵元上采用双工器的方式隔离收发频段的信号。而受制于频谱资源紧张,如果扩大上下行频段的间隔,可以省去成本较高的双工器,但是必须装载两套天线阵分别用于收发。

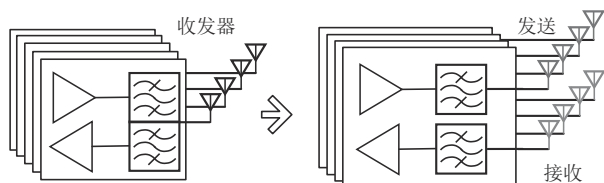


图7 FDD上下行频段分离导致的天线和射频链路的变化示意图

收发共口径天线阵在同一个天线阵面上,采用多个天线嵌套或者单一双频天线阵元的方式同时集成收发两个天线阵。在卫星载荷受限的情境下,收发天线阵共口径是实现相控阵的轻量化和集成化目标的有效技术。在给定相同口径的条件下,收发阵列共口径的方式可以获得更大的天线阵口径;同时由于收发阵列共享射频前端,有助于实现星载相控阵的轻量化和集成化,因此是实现星载相控阵的首选方案。但是收发共口径相控阵的设计实现存在以下五大挑战。

(1) 发射链路对接收链路干扰的挑战。收发天线阵共享阵面后,其馈电网络和射频前端会相互靠近,导致电路的隔离度降低。一方面会使发射功率直接进入接收链路,造成接收链路的饱和甚至损坏;另一方面,发射链路在接收频段的噪声会进入接收机,导致接收信号淹没在噪声中。

(2) 实现宽扫描角、宽带双圆极化天线阵的挑战。现有圆极化天线阵在大扫描角度下轴比会明显恶化,需在满足宽带和宽扫描角的要求下,实现双频阵列的良好圆极化性能。

(3) 双频天线阵的布局挑战。收发频段满足整数倍频率比时,可以以高频阵元间距作为基准,低频采用高频阵元间距的整数倍间距布局,因此仍然可以保持整个阵列布局的周期性。如果收发频段不满足整数频率比,阵列布局周期性被打破,因此需要考虑高低频两套天线的布局问题。

(4) 阵元之间的同频和异频解耦的挑战。为了保证相控阵在较宽的扫描角度内不出现栅瓣,阵元间距要求小于或等于半波长,而阵元间距的减小将导致相邻阵元之间的耦合加重,使阵列方向图产生畸变。

(5) 收发阵列相互遮挡的问题。当天线辐射能量时,相邻的异频天线辐射体上将产生感应电流,进而产生散射场,散射场的叠加会对激励天线的正常辐射形成干扰,造成辐射方向图的畸变。



2.1 收发电路隔离提升及阵元解耦技术

有两种方法解决收发耦合的问题：一是利用合理的电路布局，结合多层封装技术，实现天线阵馈电网络的物理隔离；二是在电路设计上增强收发通道的隔离度，例如，在收发通路间增加电磁隔离、屏蔽结构，并提高收发链路滤波器的带外抑制水平。

为了保证相控阵在较宽的扫描角度内不出现栅瓣，阵元间距要求小于或等于半波长，而阵元间距的减小将导致相邻阵元之间的耦合加重，阵列方向图产生畸变。尤其对于圆极化阵列，阵元间的异频耦合会导致圆极化的轴比带宽严重降低，同时也会影响圆极化阵列的扫描角度。目前，阵元解耦的方法主要有两类。一类是采用缺陷地结构（defected ground structure, DGS）、电磁带隙（electromagnetic band gap, EBG）结构和金属墙技术，其主要思路为阻断相邻阵元间的电流耦合路径^[10]。另一类则是采用抵消的方法，如加载寄生单元的方法，此方法利用寄生单元产生新的耦合路径，以抵消原有的耦合路径电流；如中和线技术，在阵元间引入一条电流路径，以抵消相邻阵元间的表面波耦合；利用超表面的天线阵解耦技术^[11]，该技术控制超表面反射的部分电磁波来消除阵元间的耦合波。

2.2 宽扫描角、宽带双圆极化天线阵技术

双圆极化天线阵可以提高信号的极化纯度和抗干扰能力，但是对于大扫描角度相控阵，保持天线阵的宽带圆极化轴比是一个难点。实现宽扫描角、宽带双圆极化天线阵的一种方法是采用嵌套顺序旋转法进行圆极化阵列的设计。嵌套顺序旋转法的基本思路是：首先，将一个 2×2 的子阵作为基本组成单元，以第一个阵元为基准，其剩下的3个阵元按照顺时针或逆时针分别旋转 90° 、 180° 和 270° ；然后，将这个子阵看作一个阵元，并对其进行同样的旋转操作^[12]。对于大规模的天线阵，可采用周期延拓的方式对阵元数量进行拓

展^[13]，如图8所示。上述方法中的阵元可以是线极化也可以是圆极化天线。理论上，在阵元数目相同的前提下，线极化阵元构成的圆极化阵列增益比圆极化阵元构成的圆极化阵列增益低3 dB^[14]。在实际阵列设计时，建议采用圆极化阵元，并将其设计为中心对称，这样阵元和子阵的顺序旋转不区分顺时针和逆时针方向，调整馈电端口的相位即可实现左右旋圆极化的灵活切换。

2.3 非整数频率比的双频天线阵布局技术

目前，双频天线阵布局方式如图9所示，主要分为3类：第1类是对高低频阵元进行交织排列布局（如图9（a）所示），将低频、大阵元间距的阵元交织嵌入高频、小阵元间距阵元的间隙中，实现孔径的共用。这种布局一般需要将低频阵元布局在高频阵元之上，以充分利用阵列的高度空间，但是会导致低频辐射体对高频辐射的遮挡，造成高频阵列的方向图畸变。第2类是对高低频单元进行嵌套布局（如图9（b）所示），将一个天线嵌套在另一个天线的内部。一个典型的例子是开孔贴片结构^[15]，该结构是将低频天线开孔，并将高频单元嵌入其中，实现双频单元的周期性排列。此方法适用于频率比为偶数的双频阵面布局。第3类是层叠结构（如图9（c）所示），在低频阵元辐射体的上方布局高频阵元，这种结构可以避免低频阵元对高频阵元的遮挡，但是由于需要在低频阵元上方额外叠加高度，因此不利于实现低剖面的目标。

2.4 收发阵列免遮挡技术

阵列遮挡导致的方向图畸变问题和部分解决方案如图10所示。当天线辐射能量时，相邻的异频天线辐射体上将产生感应电流，进而产生散射场，散射场的叠加会对激励天线的正常辐射形成干扰，造成辐射方向图的畸变，如图10（a）所示。解决此问题主要有4类方法：第1类方法是减小低频辐射体的面积以减小遮挡面积，但是这

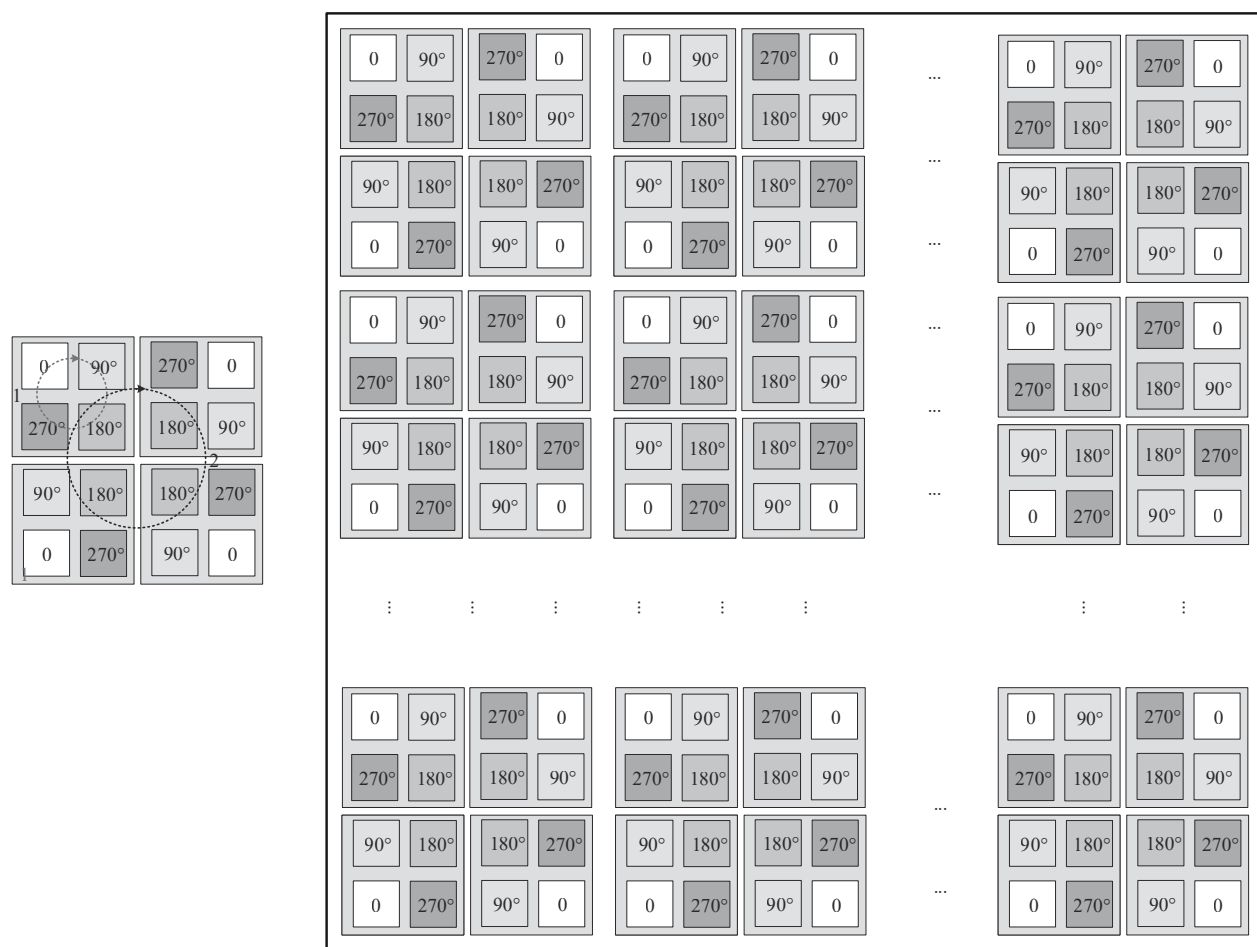


图8 采用嵌套顺序旋转和周期延拓法的宽角度、宽带圆极化阵列技术

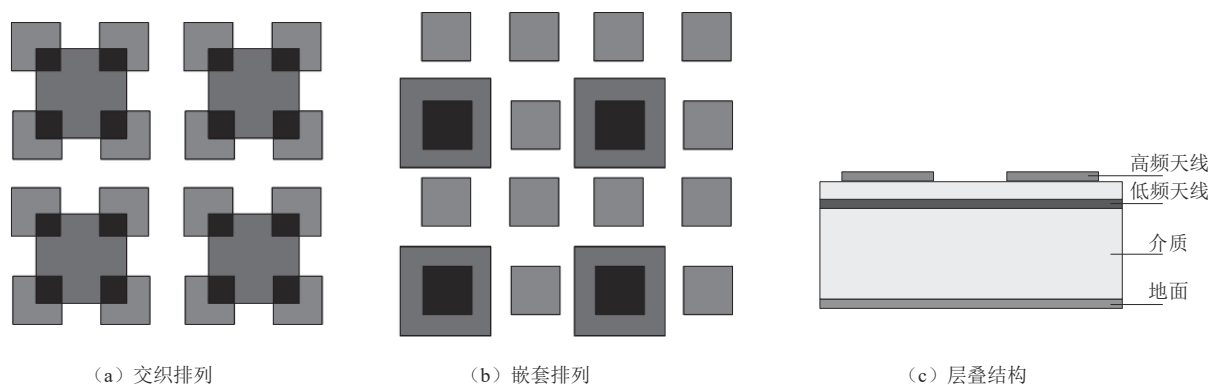


图9 双频天线阵布局方式

可能会增大低频天线的阻抗匹配难度，因此需要对天线的结构进行精细的设计^[16]。第2类方法是在天线上加载电抗元件等方式对辐射体上的感应电流进行抑制，这种方法易实现且不会明显增大天线的复杂度，但是会对低频天线的带宽和增益

产生影响。第3类方法是采用电磁隐身斗篷的结构^[17]，即在低频辐射体周围包裹超材料，引入额外的散射场对原有的散射场进行抵消，达到降低散射场强度的目的，如图10(b)所示。第4类方法是采用复合超表面实现透波天线^[18]作为上方的

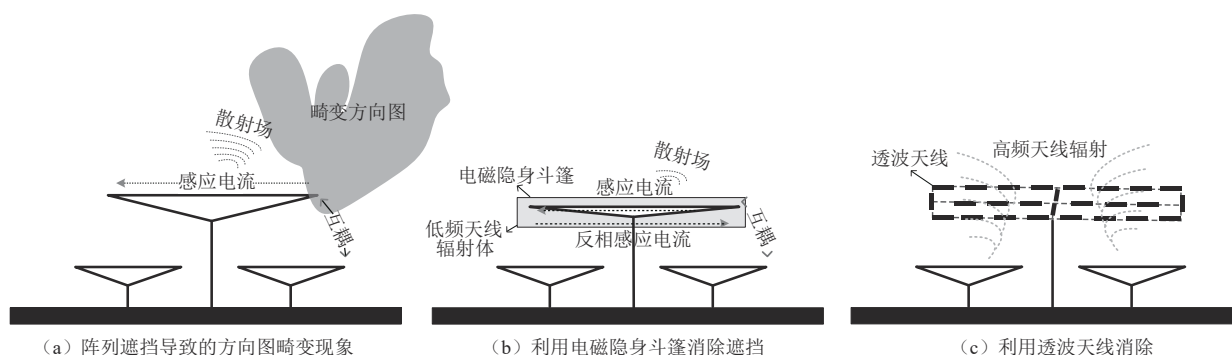


图10 阵列遮挡导致的方向图畸变问题和部分解决方案

低频辐射体，在保证效率的同时，避免干扰下方高频阵元的辐射，如图10(c)所示。

3 相控阵系统集成与器件技术

3.1 堆叠架构与功能模块划分

在星载相控阵系统中，不同的功能组件由不同的器件工艺实现，以满足不同组件对于性能、成本和可靠性的要求。因此，星载相控阵系统的集成方式是其设计中的重要方面。根据其功能集成和堆叠方式，相控阵可分为砖式和瓦式两种结构^[19]，如图11所示。其中，砖式结构是相对传统的实现方式，其天线阵列由一系列分布于不同电路板上的线形天线阵列组合而成，其中每个子线阵的电路板上都装配有相对完整的收发组件，包括射频放大器、滤波器、开关阵列和功率分配器等。此后再经过射频线缆和接口与后方集成度相对较高的数字组件连接。这种结构具有较大的相对表面积，因此利于散热。但是在大规模阵列的场景中，这种结构需要数量庞大的射频线缆和连接器，因此依赖于人工装配；且由于天线方向垂直于天线的口径，集成度较低，也不利于降低天线剖面 and 实现载荷轻量化的目标。因此，砖式相控阵的整体成本较高，也不利于大规模的自动化生产。

目前，星上相控阵载荷的主流堆叠方式为瓦式结构。瓦式结构将不同的功能组件划分为功能层，以平行于天线阵面的方向进行集成组装，类似层叠的瓦片结构。功能层之间通过电路过孔或

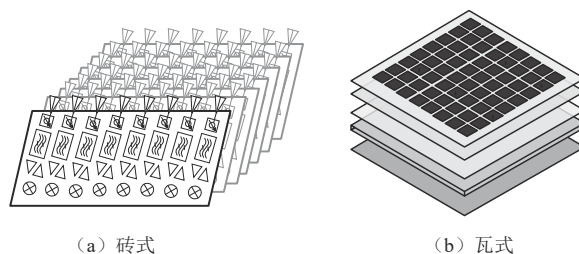


图11 砖式和瓦式堆叠

者扣具的方式进行连接，因此不需要大量使用线缆和连接器，从而缩短了馈线长度，减少了损耗，同时节省了线缆和连接器的成本。而在天线阵布局方面，瓦式相控阵可灵活采用垂直或者平行阵列口径的天线阵元，为天线的设计提供了足够的自由度。对于大规模、高功率阵列的散热需求，瓦式相控阵可以在发射组件、数据处理组件等功能层之间插入散热模块，采用被动散热或者风冷/液冷主动散热的方式，对发热量大的功能层进行针对性的重点冷却，从而保证整个相控阵系统温度分布得相对均匀。最后，瓦式架构方便实现标准化和模块化的子阵，从而有利于超大规模阵列的拼接。瓦式相控阵具有高集成、低剖面、高可量产性的特点，可以满足手机直连卫星场景下的相控阵载荷轻量化和大规模生产的需求。

在设计和实现超大规模相控阵的过程中，追求最大限度地复用功能或结构单元，以便重复使用子阵，提高整个阵面可扩展性。手机直连卫星网络大规模组网的需求需要最大化地采用成熟的

制造和封装技术，因此需致力于充分利用现有的成熟商业产业链。此外，随着硅基数字集成电路工艺节点的进步，异质集成技术和封装技术的发展，收发机芯片和模数/数模转换芯片的高度集成化已成为可能，这使得多通道的单片集成成为现实。功能模块和子阵的合理划分能够显著降低整个相控阵的复杂度，并带来显著的成本效益。在相控阵载荷中，不同模块的划分应基于天线阵列与后端电路耦合的考量，通常在模组级、封装级和芯片级进行^[20]。

3.2 先进器件与芯片工艺技术

当前的器件和芯片实现工艺主要分为硅基和化合物半导体两类。硅基工艺的工艺节点相对较高，非常适合实现高集成度的数字芯片，但是其具有电子迁移率低、击穿电压低、功率密度低、热导率低等缺点，不适合实现大功率射频器件。硅基互补金属氧化物半导体工艺（complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS）有多种演进类型，一些改进型的硅基 CMOS 工艺可以实现高阻衬底的效果，同时可有效提高开关速度，此类工艺为硅基 CMOS 设计实现移相等无源电路、低噪声放大器（low-noise amplifier, LNA）和射频开关等射频前端器件提供了可能。此类改进型 CMOS 工艺的缺点是其芯片流片费用较高，但是大批量规模化生产可显著降低单片芯片成本。

基于化合物半导体的芯片工艺具有高电流密

度、高功率、低噪声和高频率的特点，目前主流工艺有基于砷化镓（GaAs）或氮化镓（GaN）的高电子迁移率晶体管（high electron mobility transistor, HEMT）和异质结晶体管（heterojunction bipolar transistor, HBT）。此类工艺不适合实现高集成的数字芯片，但非常适合实现射频功率放大器、射频 LNA 和射频开关等大功率、低噪声的射频前端器件。另一种特殊的工艺为基于锗硅（SiGe）的双极性 CMOS 工艺，这种工艺可以在单个芯片上同时实现双极性晶体管（bipolar-junction transistor, BJT）和 CMOS 晶体管，其中 BJT 可以满足模拟和射频电路所需的高增益、高频率和低噪声的需求，而 CMOS 晶体管可以满足数字电路所需的低功耗、高集成的需求，因此 BiCMOS 工艺适合实现一些集成数字控制功能的射频、模拟及数模混合芯片。

星载相控阵中各芯片和器件的实现工艺及特点见表 2。

4 未来展望

4.1 超大规模可折叠天线阵

为了克服手机直接连接卫星通信时遇到的挑战，特别是手机发射功率的限制和星地链路的巨大损耗，卫星天线阵列需要具备极高的成形增益，这就要求星载相控阵天线拥有非常大的口径规模。在这种背景下，超大规模的可折叠相控阵天线技术成为关键：在发射阶段，天线可以保持折叠状态，从

表 2 星载相控阵中各芯片和器件的实现工艺及特点

器件	工艺技术	特点
移相器、衰减器	硅基 CMOS	一些改进型 CMOS 工艺的高阻衬底可提供高 Q 的无源器件，同时可集成低损耗的开关以及数字控制电路
射频功率放大器	GaAs/GaN	高电流密度、高功率、低噪声，非常适合实现射频功率放大器
射频 LNA	GaAs/GaN/SiGe/硅基 CMOS	化合物半导体 LNA 具有最好的噪声和增益，成本较高；CMOS 工艺的 LNA 性能尚可，成本低，抗辐照
射频开关	GaAs/SiGe/硅基 CMOS	化合物半导体 LNA 具有最好的噪声和增益，成本较高；CMOS 工艺的 LNA 性能尚可，成本低，抗辐照
ADC/DAC 芯片	硅基 CMOS	方便实现高集成、低功耗的数字电路；抗辐照
DBF 芯片	硅基 CMOS	方便实现高集成、低功耗的数字电路；抗辐照



而便于在火箭的有限空间内进行搭载，有效节约运载资源，提升发射的经济性；天线展开后，可以充分利用卫星太阳翼的表面空间，不仅优化了使用空间，还有助于减轻卫星本身的载重压力。

美国 AST Spacemobile 公司的 BlueWalker 3 卫星便是采用此技术的典型案例。作为 Bluebird 星座计划中的试验卫星，BlueWalker 3 旨在为全球用户提供手机直连卫星的宽带服务。据其官方网站披露，该试验星搭载的天线在完全展开状态下的面积约为 64 m^2 。这种设计使天线能够在折叠状态下装入火箭，并在达到预定轨道后展开。在中国，商业航天企业银河航天已成功完成了名为“翼阵合一”的卫星的二维展开关键技术的攻关。

此外，韩国釜山大学的研究团队开发了一种新型可折叠天线^[21]，该天线无论在折叠还是展开状态下都能正常工作，并且支持线极化和圆极化两种极化模式。尽管目前这项技术仅应用于小型卫星，但其设计理念和技术路径对于大型天线阵列的开发具有重要的参考价值。

4.2 同时同频全双工技术

在手机直连卫星通信的场景中，全双工技术不仅能够显著提升频谱资源的利用效率，增强数据传输的吞吐量，并且能有效降低端到端的通信延迟。此外，全双工相控阵技术能在同一载波频率上，同时实现收发波束，这一创新为大规模手机用户接入卫星网络的波束资源管理带来了更高的灵活性和自由度。

在全双工通信技术的实现过程中，关键挑战在于如何有效消除发射信号对接收信号的干扰。目前，研究的热点方向包括：通过收发天线的不同极化方式，达到天线极化隔离的效果；操纵收发信号的反相，进行模拟信号的对消处理^[22]；在阵元或子阵级别上，实施数字信号的对消技术^[23]。

4.3 基于星群的分布式相控阵技术

传统相控阵和分布式相控阵^[24-25]如图 12 所

示，从原理上看都是利用信号的相干叠加来增强目标方向的信号增益，抑制其他方向的干扰，从而提高信噪比和空间分辨率。而与传统相控阵通常部署在一个节点不同，分布式相控阵的子阵可以部署在不同的节点上。具体到卫星场景，分布式相控阵可以利用多个小型的卫星平台形成一个相对松散的相控阵系统，这样，每个相控阵单元节点可以搭载在如 CubeSat 等小卫星上。因此，在手机直连卫星的场景下，分布式相控阵巧妙地避免了在单一卫星上加载超大规模的天线阵列，从而大幅降低生产和发射的成本。同时，相比于传统相控阵，分布式相控阵分开部署节点的特点决定了其可以灵活调节阵元之间的拓扑并方便地进行扩展，这为实现不同的波束覆盖提供了方便。另外，阵元之间的灵活变化也提升了系统整体的容错性^[24]。

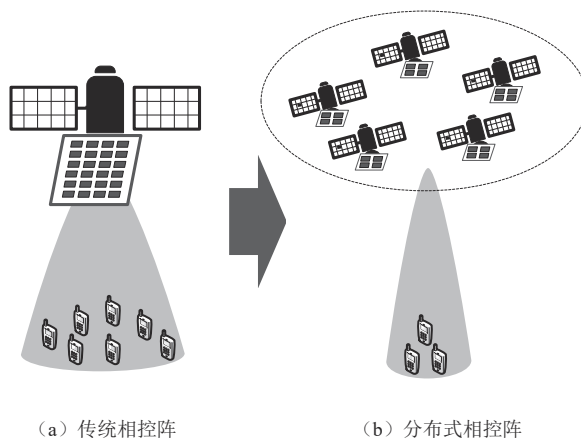


图 12 传统相控阵和分布式相控阵

然而，目前分布式相控阵系统还停留在理论和学术研究的层面，其面临的问题有以下几个方面。

(1) 分布式相控阵的单元间距超过半波长，因此其辐射方向图会出现严重的栅瓣。消除栅瓣的思路与传统相控阵类似，一是通过打破子阵/阵元之间的周期性抑制栅瓣；二是采用锥削的思路，调整每个卫星的功率实现栅瓣的抑制。

(2) 相控阵单元之间需要时间和相位精确同

步,这就要求精确控制每个卫星节点的相位、时延和相对位置。这需要高效的星间交互链路、精确的测距方法和精确的星群控制^[26]。

(3) 空间干扰会影响星群运动的稳定性,进而导致星群的分布拓扑失效,因此需要研究卫星的自主导航、制导和控制算法,精确调整卫星的位置和姿态^[24]。

5 结束语

本文系统地介绍了面向手机直连卫星场景的星载相控阵关键技术,涵盖了波束成形技术、收发共口径圆极化天线阵技术以及集成和器件技术。最后,从超大规模可折叠阵列、全双工通信和分布式相控阵技术的角度,展望了未来手机直连星载相控阵的发展前景。

参考文献:

- [1] FCC. Globalstar user terminal transmitter antenna port conducted narrowband out-of-band emissions (OOBE) test plan: 3-3-99[R]. 2024.
- [2] ZHANG X P, WEI K P, LI Y, et al. A polarization reconfigurable antenna for satellite communication in foldable smart-phone[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(12): 9938-9943.
- [3] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [4] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [5] GUO Y J, ANSARI M, FONSECA N J G. Circuit type multiple beamforming networks for antenna arrays in 5G and 6G terrestrial and non-terrestrial networks[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(3): 704-722.
- [6] ROTMAN R, TUR M, YARON L. True time delay in phased arrays[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(3): 504-518.
- [7] 胡荣, 李秀梅, 邓娟, 等. 基于混合波束赋形的低轨通信卫星相控阵天线架构研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 90-97.
HU R, LI X M, DENG J, et al. Research on the architecture of phased array antenna of LEO communication satellites based on hybrid beamforming[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 90-97.
- [8] ZHANG J, YU X H, LETAIEF K B. Hybrid beamforming for 5G and beyond millimeter-wave systems: a holistic view[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 77-91.
- [9] QI C H, LIU Q, YU X H, et al. Hybrid precoding for mixture use of phase shifters and switches in mmWave massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(6): 4121-4133.
- [10] CHAN K H, IKEUCHI R, HIRATA A. Effects of phase difference in dipole phased-array antenna above EBG substrates on SAR[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013(12): 579-582.
- [11] ZHU Y F, CHEN Y K, YANG S W. Decoupling and low-profile design of dual-band dual-polarized base station antennas using frequency-selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(8): 5272-5281.
- [12] CHIEH J C S, YEO E, FARKOUH R, et al. Development of flat panel active phased array antennas using 5G silicon RFICs at Ku-and Ka-bands[J]. IEEE Access, 2020, 8: 192669-192681.
- [13] 杨镛. 微波毫米波宽角扫描圆极化天线阵列[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
YANG Y. Microwave and millimeter wave wide angle scanning circularly polarized antenna arrays[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [14] HARAZ O, SEBAK A R. Advancement in microstrip antennas with recent applications[M]. Rijeka: IntechOpen, 2013.
- [15] SHAFI L L, CHAMMA W A, BARAKAT M, et al. Dual-band dual-polarized perforated microstrip antennas for SAR applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(1): 58-66.
- [16] 贾飞飞. 小型化多频共口径基站天线关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
JIA F F. The research on miniaturized multi-band shared-aperture base station antennas[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [17] SORIC J, RA'DI Y, FARFAN D, et al. Radio-transparent dipole antenna based on a metasurface cloak[J]. Nature Communica-



- tions, 2022, 13(1): 1114.
- [18] 杨圣杰. 面向 5G/B5G 的滤波与透波天线及双频共口径基站阵列的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- YANG S J. Research on filtering and electromagnetic-transparent antennas and dual-band aperture-shared base station antenna arrays for 5G/B5G applications[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [19] HERD J S, CONWAY M D. The evolution to modern phased array architectures[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(3): 519-529.
- [20] CHALOUN T, BOCCIA L, ARNIERI E, et al. Electronically steerable antennas for future heterogeneous communication networks: review and perspectives[J]. IEEE Journal of Micro-waves, 2022, 2(4): 545-581.
- [21] HWANG M, KIM G, KIM S, et al. Origami-inspired radiation pattern and shape reconfigurable dipole array antenna at C-band for CubeSat applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(5): 2697-2705.
- [22] PARK K, MYEONG J, REBEIZ G M, et al. A 28-GHz full-duplex phased array front-end using two cross-polarized arrays and a canceller[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(1): 1127-1135.
- [23] ERDEM M, GURBUZ O, OZKAN H. Integrated linear and nonlinear digital cancellation for full duplex communication[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(1): 20-27.
- [24] TUZI D, AGUILAR E F, DELAMOTTE T, et al. Distributed approach to satellite direct-to-cell connectivity in 6G non-terrestrial networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(6): 28-34.
- [25] ABDELSEDEK M Y, KURT G K, YANIKOMEROGLU H. Distributed massive MIMO for LEO satellite networks[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2022, 3: 2162-2177.

- [26] NANZER J A, MGHABGHAB S R, ELLISON S M, et al. Distributed phased arrays: challenges and recent advances[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(11): 4893-4907.

[作者简介]



焦凌霄 (1991-), 男, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为射频电路、天线和 5G/6G 关键技术。



李文静 (1979-), 女, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信。



童建飞 (1994-), 男, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信和 5G/6G 关键技术。



李记锋 (1975-), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信和 5G/6G 关键技术。