

# 面向低轨卫星星座的 多星协作信号检测技术

## Multi-Satellite Cooperative Signal Detection for Low Earth Orbit Constellations

王虎威/WANG Huwei, 叶能/YE Neng, 安建平/AN Jianping

(北京理工大学, 中国 北京 100081)

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)



**摘要:**低轨(LEO)卫星通信因其时延低、路损小且单星成本低等优势,近年来已成为全球通信领域的研究热点。面向未来数千乃至数万颗规模的LEO卫星星座,多星协作信号处理技术可以充分运用多颗卫星的信号收发与处理能力,挖掘低轨卫星星座的规模优势,是使能未来6G空天地一体泛在互联的关键技术。分析了多星协作信号检测技术的典型技术路线和实现方案,并探寻多星协作虚拟阵列信号检测技术在未来大规模LEO卫星星座中的应用前景。

**关键词:**低轨卫星星座;多星协作;虚拟阵列;信号检测

**Abstract:** Low Earth Orbit (LEO) satellite communications have become a research hotspot in the communication field in recent years due to its low latency, small path loss, and low-cost platform. With thousands to tens of thousands of satellites in the future LEO constellations, cooperative signal processing technology can tap the scale advantages of the mega constellation by utilizing the distributed transceiving and processing capability of multiple satellites, which makes it a promising technology to enable ubiquitous access in 6G. The recent research progress related to multi-satellite cooperative signal detection technology is analyzed, concerning both the technical routes and the implementation scenarios. Besides, the application prospect of multi-satellite cooperation technology based on the concept of the virtual array in LEO constellations is also explored.

**Keywords:** LEO constellations; multi-satellite cooperation; virtual array; signal detection

卫星通信具有覆盖范围广、通信距离远、组网灵活等优点,是一种能够满足泛在连接以及个性化传输需求的强有力选择。其中,低轨(LEO)卫星通信系统以低时延、小路损、低单星成本等优势,近年来逐渐受到各国移动通信研究人员的重视<sup>[1-5]</sup>。

相较于地面移动通信,LEO卫星通信系统覆盖更广,更适合在戈壁、

沙漠、高山、森林、海洋、空中等无人区进行全球通信;相较于高轨卫星通信,LEO卫星通信系统延时更小、速率更高,且具备轻小型化的终端,支持全球随遇接入,可实现真正意义上的全球泛在连接<sup>[6]</sup>。当前全球各国正在积极抢占LEO卫星通信的发展先机,提出大量LEO巨型星座建设规划。例如,美国Space X公司计划在近地轨道发射4.2万颗卫星,组成巨型星座,其中约1.2万颗已被允许发射;中国相继推出“虹云”“鸿雁”等星

座计划,加快了LEO卫星星座的发展步伐。

传统的卫星通信系统通常使用单颗卫星,将信号从用户转发到信关站。然而,LEO卫星高度较低,单星覆盖范围小,可用时间短,且星地链路存在阴影衰落和多普勒效应等问题,很难保证数据传输的高速率和高可靠性。为此,研究人员开展了各种技术和策略研究来提高LEO卫星通信系统的容量和频谱效率。多输入多输出(MIMO)作为一种使能技术,

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105004

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210930.1247.004.html>

网络出版日期: 2021-09-30

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(62101048、62071038、61771051、61971038)

通过在收发两端配置多根天线构成拥有多个信道的通信系统,可以在同一时刻利用多个信道传输数据来更好地利用空间自由度,从而显著提高系统容量。考虑到LEO卫星星座的多用户可能同时处于多星覆盖区域,我们可以借鉴地面MIMO系统,利用多星协作传输技术来获得分集增益,从而提高LEO卫星通信系统的吞吐量和可靠性。

## 1 LEO卫星星座发展现状

### 1.1 LEO卫星星座的全球部署情况

20世纪80年代,小卫星技术的兴起促进了LEO卫星星座的发展。从90年代起,发射组网并运营的LEO卫星方案有Iridium、Orbcomm和Globalstar星座计划。随后,LEO卫星星座的发展经历了低谷时期。近年来,由于地球同步轨道资源限制以及LEO卫星制造和发射等技术的突破,LEO卫星星座逐步表现出巨大的发展潜力和广泛的应用前景。2013年,“另外三十亿人”(O3b)星座部署实施,正式拉开了全球卫星互联网的发展序幕。随后,全球兴起了LEO卫星星座的研究和建设热潮,典型的有Starlink、OneWeb、Telesat等。以Starlink为例,其系统空间段由两个星座组成:一个是LEO星座,计划在高度为1 110~1 325 km的83个轨道面上部署4 425颗Ka和Ku波段卫星;另一个是甚低轨星座,将在更低的340 km轨道部署7 518颗V波段卫星,总卫星数达11 943颗<sup>[7]</sup>。

近年来,中国LEO卫星星座呈现出快速发展的态势。2020年4月,中国首次将“卫星互联网”纳入“新基建”的范畴,卫星互联网的建设已上升至国家战略高度<sup>[8]</sup>。在“十三五”规划期间,以航天科技、航天科工为首

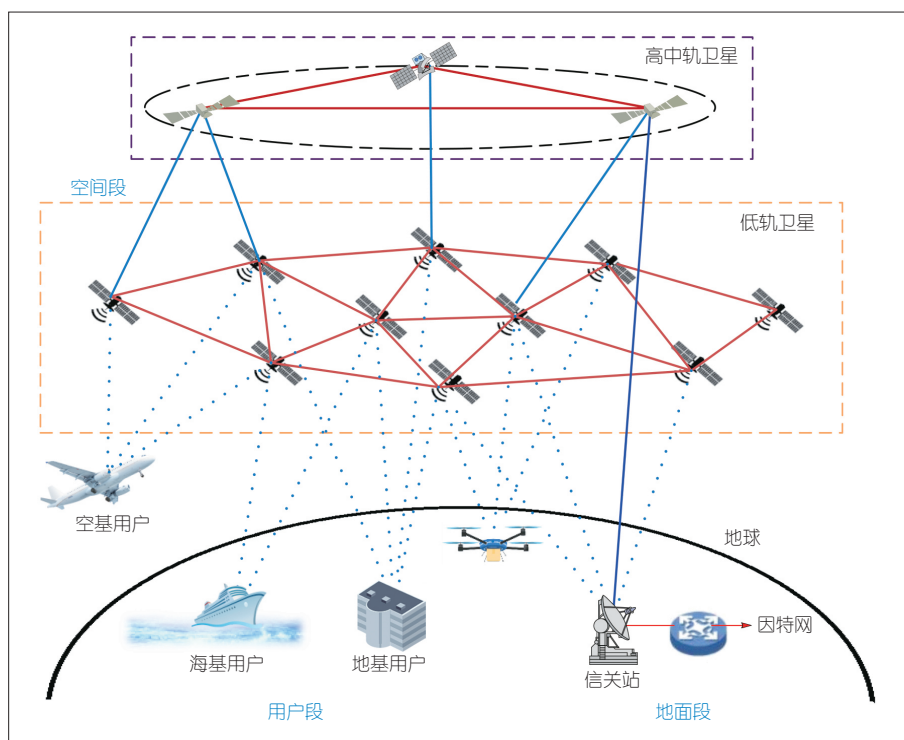
的央企卫星集团提出了各自的卫星互联网计划,推出了“虹云”“鸿雁”星座计划并发射了试验星。其中,“鸿雁”星座由航天科技集团提出,为中国首套全球LEO卫星通信系统,由300多颗LEO卫星组成;“虹云”星座是航天科工集团提出的,由156颗轨道高度为1 000 km的LEO卫星组成。民营企业银河航天计划发射650颗卫星,通过规模化研制低成本、高性能的5G卫星,打造LEO宽带通信卫星星座并成功发射首发星。2021年4月,中国星网集团正式成立,将为中国卫星星座的建设和发展注入强大动力<sup>[9]</sup>。

### 1.2 典型LEO卫星星座系统架构

LEO卫星轨道高度在2 000 km以内,相较于中高轨卫星具有信号更强、部署更快、传输时延更低等优势,近年来吸引了业界广泛的研究兴趣。LEO卫星星座系统架构如图1所示,包括空间段、地面段和用户段3部分。

空间段即卫星星座,由多颗LEO卫星组成,同时兼容中高轨,采用星间链路实现互联互通;地面段主要实现卫星星座的管理与运营,是系统的控制中心、数据交换中心、运营中心,由信关站、测控站、移动通信网络、运控系统、综合网管系统和业务支撑系统组成;用户段主要由接入网及接入终端组成,包括车载站、舰载站、机载终端、电脑以及手持移动终端等。LEO卫星星座的多星系统架构及星上处理能力为多星协作信号检测的实现奠定了基础。通过星间链路与星上处理转发,可以实现全球组网和数据交换。

面向未来数千颗至数万颗规模的LEO巨型星座,星地链路的高路径损耗、阴影衰落以及LEO卫星高速移动所导致的多普勒效应,给通信系统的可靠性带来了严峻挑战。因此,需要研究适配LEO卫星星座的通信信号处理技术来提升谱效、能效,并提



▲图1 低轨卫星星座系统架构

高传输可靠性。相较于传统卫星通信系统,巨型星座的特点给LEO卫星通信系统带来多重覆盖能力,而来源于移动通信领域的MIMO技术则为多星协作传输提供了借鉴意义。

## 2 卫星MIMO技术与信号检测技术

多星协作的关键是结合MIMO技术来实现空间分集效果,从而提高传输性能。本节中,我们探讨卫星MIMO技术与MIMO信号检测技术。

### 2.1 卫星MIMO技术

MIMO技术的基本原理是在无线通信系统的发送端和接收端配置多副天线,使信号在发送端能够利用多根天线进行独立传输,并在接收端利用多根天线恢复原始信息。这样能够充分利用空间资源,在不增加发射功率和带宽的前提下产生分集复用增益,提升系统信道容量、传输速率及可靠性指标,并且可以充分利用与空时码结合产生的编码增益。MIMO技术现已成为4G、5G等移动通信系统的关键技术<sup>[10-12]</sup>。

2005年,卫星MIMO系统开始受到业界的广泛关注,而与之相关的信道模型、系统设计和编码技术等研究也相继展开。由于星地视线(LOS)信道条件限制了信号多径分集的数量,从而限制了MIMO的增益潜力。天线反射器尺寸较大、散射环境缺失,这都使得卫星无法部署具有足够间距的天线,以获得较大的信号去相关<sup>[13]</sup>。为获取MIMO增益,目前将MIMO技术应用到地球同步轨道(GEO)卫星通信系统主要有如下几种方案(如图2所示):一种是极化卫星MIMO系统<sup>[14]</sup>,在GEO卫星和地面终端各配置双极化天线,包括左旋圆极化天线(LHCP)和右旋圆极化天线

(RHCP),利用极化分集获取MIMO增益;另一种是分布式卫星MIMO系统<sup>[15]</sup>,利用两颗GEO卫星与地面设备构成空间分集。此外,还有一种同时运用空间分集和极化分集的方案<sup>[16]</sup>,该方案由两颗高轨卫星和一个地面移动终端组成,每颗卫星均配有一副双极化天线,地面移动终端配有两副双极化天线,同时利用极化分集和空间分集构成分布式双极化卫星移动MIMO系统。

为了提高现有卫星资源的容量和频谱效率,可以在GEO通信系统中广泛使用协作传输,这可以带来较大的MIMO增益。针对日益增加的数据传输需求,LEO卫星星座因其庞大的星座规模而具备了更大的分集增益潜力,因此面向LEO卫星星座开展卫星MIMO与多星协作技术研究将为解决日益增加的数据传输挑战提供广阔思路。

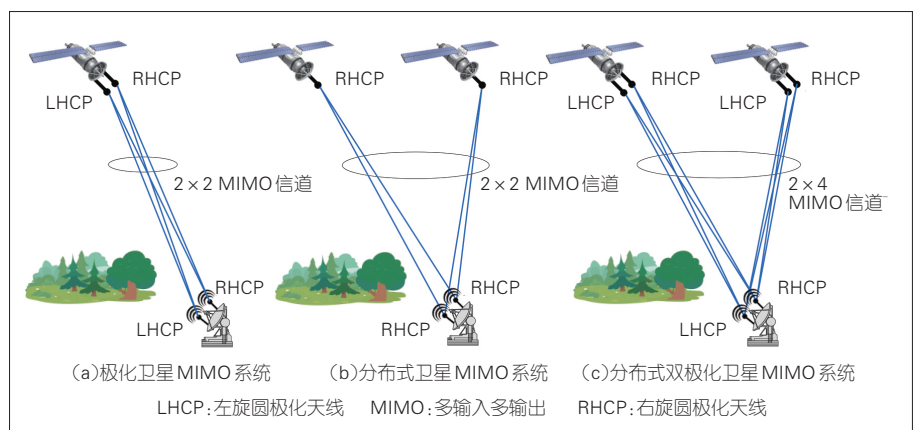
### 2.2 MIMO信号检测算法

MIMO技术引入了天线间信号干扰,因此需要先进的信号检测技术对接收信号进行处理。最大似然检测算法理论上拥有最佳检测性能,但其复杂度随着天线数目呈指数增长,在实际系统中难以应对系统用户数目较多的情况。目前针对MIMO系统,典型信号检测算法包括以下几种:

第1种是线性信号检测算法,包括最大比合并检测算法,即匹配滤波器检测算法、迫零检测算法以及最小均方误差检测算法等。线性信号检测算法主要依据干扰置零的思想对接收的向量进行线性加权,即通过一个检测滤波矩阵对接收信号进行线性处理,从而把相互干扰重叠的信号分离开来,再对每个用户的信号进行检测。线性信号检测算法的计算复杂度相对较低。

第2种是非线性信号检测算法,包括干扰抵消多用户检测算法、正交(QR)分解检测算法等。线性检测虽然复杂度低,但性能相对较差。为提高信号检测的可靠性,非线性检测利用判决反馈的原理,即当已经检测出这层符号时,就将其从待检测符号中消除,再继续检测其他信号,从而减小干扰并提高判决可靠性。但这样做也增加了计算的复杂度。

LEO星座卫星数量更庞大,布局更密集,分集增益潜力也更大,且星上处理资源有限,还面临信号处理复杂度上升的巨大挑战。为此,研究面向LEO卫星星座的多星协作虚拟阵列信号检测技术,能够充分挖掘LEO卫星星座的空间分集增益,从而提高传输速率和可靠性,满足下一代通信系统高速泛在的连接需求。



▲图2 3种卫星MIMO系统示意图



### 3 基于协作的卫星通信虚拟阵列信号检测技术

MIMO 技术在密集散射多径传播信道中能够实现高 MIMO 容量增益,而在星地 LOS 环境中性能却严重下降。由于卫星尺寸和硬件实现的限制, MIMO 技术很难直接应用于现有的卫星平台。虚拟 MIMO 技术通过多设备的分布式协作来模拟一个 MIMO 系统,使得分布的无线设备组成虚拟天线阵列,从而突破了终端天线数的制约<sup>[17-19]</sup>。虚拟 MIMO 技术有望于在多星协作架构下获取较高的 MIMO 增益。本节中,我们基于协作的卫星通信虚拟阵列信号检测技术展开介绍。

#### 3.1 单星多节点信号检测

单星信号检测为多星协作信号检测提供了基础。由单星对终端设备信号检测发展到多颗卫星进行星间协作处理的卫星虚拟阵列信号检测技术,实现了多星信号检测增益。针对单星信号检测,目前业界广泛采用的是单星多节点卫星 MIMO 通信系统(如图 3 所示),该系统采用陆地移动卫星信道建模,包括 1 颗卫星和  $N$  个设备终端。地球站要检测多颗卫星节点的数据,考虑卫星通信系统的多路中继,假设上行链路和下行链路信道都分配单独的频带以充分补偿多普勒频移,且由于星地链路时延问题不假定信道互易性,此时卫星接收到来自  $N$  个终端的数据可以写成:

$$\mathbf{y}_s = \sum_{k=1}^N \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k x_k + \mathbf{n}_s, \quad (1)$$

其中,  $x_k$  是终端  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) 的传输符号,  $\mathbf{H}_k$  为上行链路信道矩阵,  $\mathbf{u}_k$  为终端  $k$  的发送权向量,  $\mathbf{n}_s$  表示加性高斯白噪声。经过中继转发后卫星将接收到的数据传输到地球站,地球站接收到的数据表示为:

$$\mathbf{r} = a\mathbf{G}\mathbf{y}_s + \mathbf{n}, \quad (2)$$

其中,  $a$  为转发器增益,  $\mathbf{G}$  为下行链路信道矩阵,  $\mathbf{n}$  表示地球站处的加性高斯白噪声。将式(1)的结果带入式(2),得到:

$$\mathbf{r} = a\mathbf{G} \left( \sum_{k=1}^N \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k x_k + \mathbf{n}_s \right) + \mathbf{n} = a\mathbf{G}\mathbf{H}_1 \mathbf{u}_1 x_1 + a\mathbf{G}\mathbf{H}_2 \mathbf{u}_2 x_2 + \dots + a\mathbf{G}\mathbf{H}_N \mathbf{u}_N x_N + a\mathbf{G}\mathbf{n}_s + \mathbf{n}. \quad (3)$$

要获取设备终端的数据,地球站采用了一种基于零空间的干扰删除方法来消除冗余终端数据,又使用组合向量来逐步检索,最后通过最大化条件概率密度函数来恢复终端节点数据。研究表明,在单星多节点卫星 MIMO 通信系统中,系统传输性能会随着终端数量的增加而恶化,在设备终端和地球站布置更多天线可以补偿这种性能损失<sup>[20]</sup>。

#### 3.2 多星单节点信号检测

针对多星系统,一种典型的多星单节点下行链路信号检测方法如图 4 所示。系统中  $N$  颗卫星与特定的一个地球站通信。其中,所有卫星均配

备单天线,地球站配备多天线。所有卫星同时向地球站发送数据,并在地球站处逐个检测。假设所有链路的完整信道状态信息在地球站处可用,那么地球站处接收到的数据可以表示为:

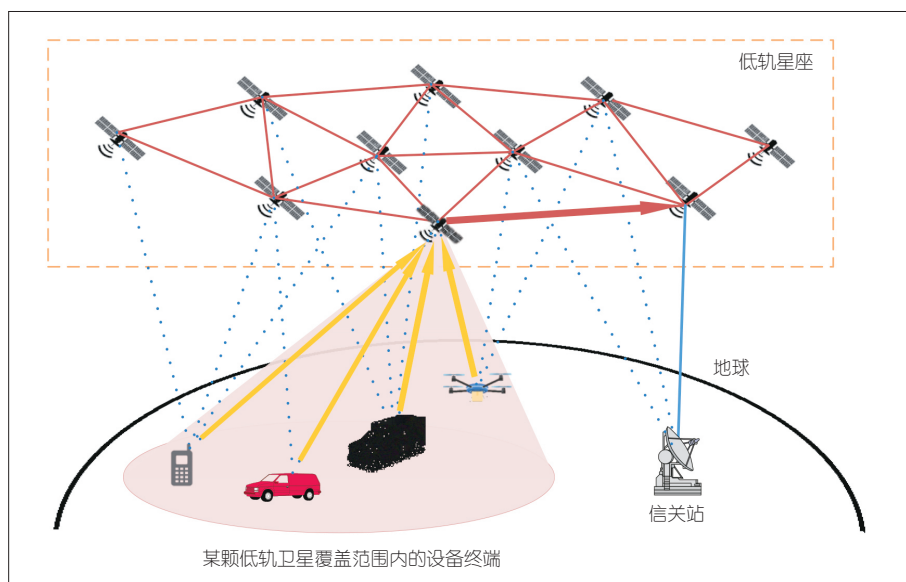
$$\mathbf{r} = \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i x_i + \mathbf{n}, \quad (4)$$

其中,  $x_i$  是卫星  $i$  的传输符号 ( $i = 1, 2, \dots, N$ ),  $\mathbf{h}_i$  为卫星  $i$  对应的下行信道矩阵,  $\mathbf{n}$  表示地球站处的加性高斯白噪声。要在地球站处检测出卫星  $i$  的信号,式(4)可以表示为:

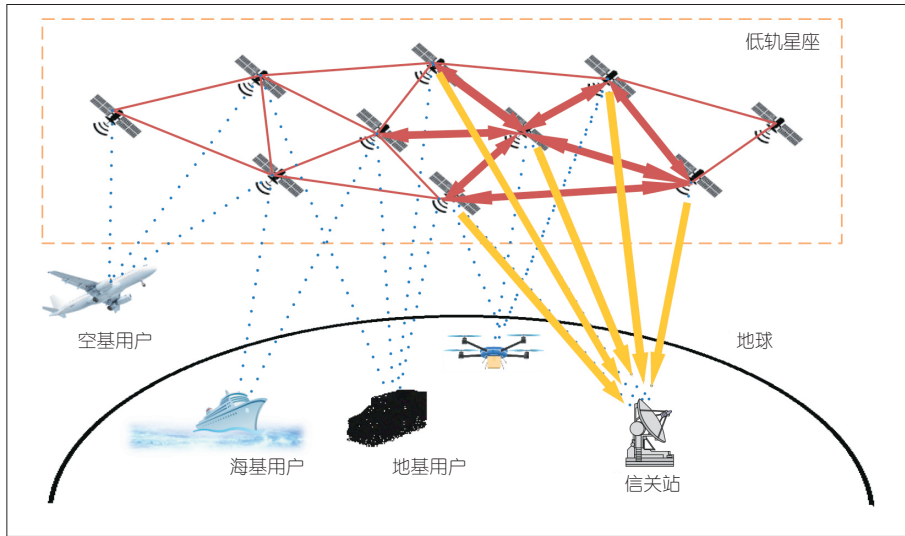
$$\mathbf{r} = \mathbf{h}_1 x_1 + \mathbf{h}_2 x_2 + \dots + \mathbf{h}_N x_N + \mathbf{n}. \quad (5)$$

从式(5)可看出,  $\mathbf{h}_i x_i$  包含了所要检测的卫星  $i$  的信号。式中的其他项在地球站处被视为检测信号  $x_i$  的干扰,要消除这些干扰,研究人员提出了一种新的干扰消除方法——基于标准矩母函数方法,假设向量  $\mathbf{R}^N$  位于列向量  $\mathbf{r}$  的零空间中,即  $\mathbf{R}^N \mathbf{r} = \mathbf{0}$ 。首先消除第一颗卫星的信号,将式(4)左乘  $\mathbf{h}_1$  的左零矩阵  $\mathbf{R}_1^N$  可得:

$$\mathbf{R}_1^N \mathbf{r} = \mathbf{R}_1^N \mathbf{h}_i x_i + \left( \mathbf{h}_1 x_1 + \mathbf{h}_2 x_2 + \dots + \mathbf{h}_N x_N \right) + \mathbf{R}_1^N \mathbf{n}, \quad (6)$$



▲图3 单星多节点信号检测示意图



▲图4 多星单节点信号检测示意图

其中,第一项  $R_1^N h_i x_i$  中包含有效信号  $x_i$ , 所有其他项被视为对于此有效信号的干扰, 且  $R_1^N h_1 x_1 = 0$ , 此时可将式(6)表示为:

$$R_1^N r = R_1^N h_i x_i + (R_2^N h_2 x_2 + \dots + R_N^N h_N x_N) + R_1^N n \quad (7)$$

接下来消除第二颗卫星的信号, 将式(6)左乘  $h_2$  的左零矩阵  $R_2^N$  可得:

$$R_2^N R_1^N r = R_2^N R_1^N h_i x_i + R_2^N R_1^N h_3 x_3 + \dots + R_2^N R_1^N h_N x_N + R_2^N R_1^N n \quad (8)$$

以此类推, 依次进行处理消除, 最终得到:

$$R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_{(i+1)}^N R_{(i-1)}^N \dots R_2^N R_1^N r = R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N h_i x_i + R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N n \quad (9)$$

可将式(9)写成:

$$y_i = Ah_i x_i + An, \quad (10)$$

其中,  $A = R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N$ ,  $y_i = R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N r$ . 噪声协方差矩阵为  $K = E(R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N(n))(R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N(n))^H$ , 将式(9)乘以  $K^{-1/2}$  可得:

$$y_i = K^{-1/2} R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_2^N R_1^N r = K^{-1/2} R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N h_i x_i + w, \quad (11)$$

其中,  $w$  是均值和方差都为0的向量。通过最大化条件概率密度函数, 可在地球站处检测出节点  $i$  的信号:

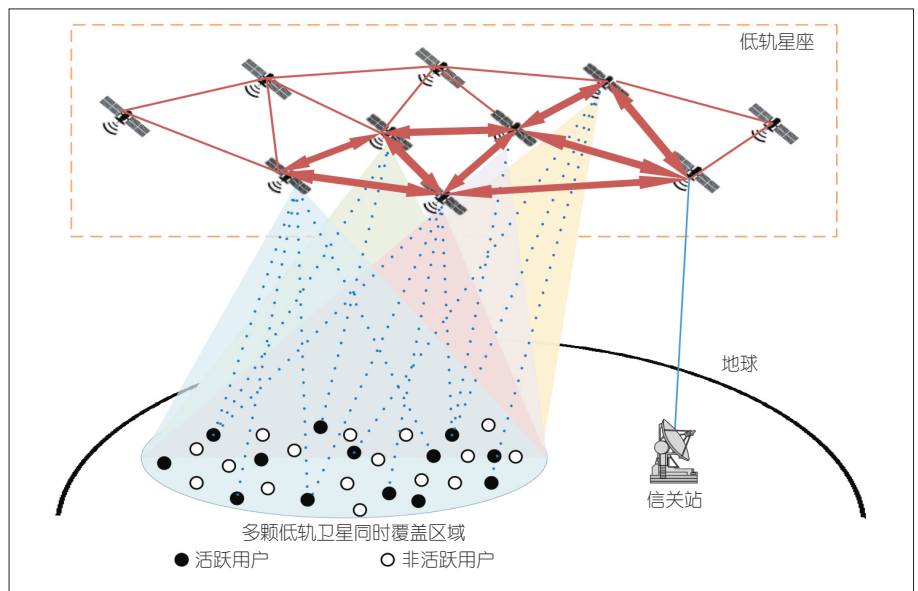
$$\hat{x}_i = \arg \min_{\hat{x}_i} \|y_i - K^{-1/2} R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N h_i x_i\|^2 \quad (12)$$

研究表明, 在多星单节点信号检测系统中, 要实现良好的性能, 地球站处的天线数量应比卫星数量多<sup>[21]</sup>。单星多节点信号检测和多星单节点

信号检测为多星多节点虚拟阵列信号检测的研究奠定了基础。

### 3.3 多星多节点信号检测

相较于单星多节点和多星单节点信号检测, 多星多节点信号检测包含的检测终端设备数目更多, 符合下一代通信中的泛在连接需求。在实际的LEO卫星星座中, 同一区域内的物联网设备终端往往同时被同一星座的多颗卫星覆盖。这些卫星可以接收设备终端的数据包, 协作检测将为其传输性能带来额外增益。由此, 一种面向低轨卫星星座的多星多节点通信系统模型被提出, 具体如图5所示。在一个时隙中, 系统中  $N$  颗卫星到  $U$  个用户终端的传输模型等价于一个虚拟MIMO系统。其中, 多颗卫星组成一个巨大的天线阵列, 与地面多节点进行数据交换。系统构建了一个离散多用户信号传输模型, 地面多个终端的分布区域由同一信关站控制的多颗卫星覆盖。在多星多节点信号检测系统中, 由于每个节点和星之间都有相对多普勒效应的影响, 考虑载波频率偏移引起的相移  $\theta_{u,i}^{(j)}$ , 将终端  $u$  的发射信号设为  $x_u$ 。如果在时



▲图5 多星协作虚拟阵列信号检测示意图

隙  $j$  存在  $K$  个碰撞的分组, 并假设  $K$  个分组来自终端  $u_1, u_2, \dots, u_K$ , 并且考虑从终端  $u_1, u_2, \dots, u_K$  到卫星  $i$  的传播时延  $\tau_{u_1, i}, \tau_{u_2, i}, \dots, \tau_{u_K, i}$ , 那么在时隙  $j$  中的卫星节点  $i$  处的  $K$  个碰撞分组的第  $k$  个接收符号如式 (13):

$$y_i^{(j)}(k) = \sum_{u=u_1}^{u_K} h_{u,i}^{(j)} s_u(k - \tau_{u,i}) e^{j\theta_{u,i}^{(j)}} + z_i^{(j)}(k), \quad (13)$$

其中,  $h_{u,i}^{(j)}$ 、 $\tau_{u,i}$  分别表示信道参数以及在时隙  $j$  中从终端  $u$  到卫星  $i$  的时延,  $z_i^{(j)}(k)$  表示接收端的加性高斯白噪声。该信道被假设为莱斯信道, 并且假设信道系数和相移在一个时隙是不变的。研究人员提出一种低轨卫星网络中的多卫星协作随机接入方案。该方案设计了一种基于单载波交织频分多址的分组结构, 克服了用户传播时延对卫星节点接收信号的影响, 保证接收信号的同步<sup>[22]</sup>。

#### 4 结束语

多星协作信号检测技术将为未来 6G 天地一体化网络的建设提供重要技术支撑。本文中, 我们对 LEO 卫星星座发展现状进行了简要介绍, 并就多星协作信号检测技术、卫星 MIMO 技术、MIMO 信号检测算法及多星协作检测相关技术路线展开了分析, 挖掘了 LEO 星座在使能未来空天地一体泛在互联中的广阔应用前景, 探索了多星协作虚拟阵列信号检测技术的实现方案。面向 LEO 卫星星座, 多星信号同步、星上计算与星间通信资源权衡等诸多问题给多星协作信号处理技术带来了极大挑战, 未来人们还需在星间不完全同步、星上资源强受限的条件下进一步解决上述问题。

#### 参考文献

- [1] 孙震华. 与 5G/6G 融合的低轨星座思考 [J]. 卫星与网络, 2019, 19(10): 26-33
- [2] AN J P, WANG K, WANG S, et al. Antenna array calibration for IoT oriented satellites: from orthogonal CDMA to NOMA [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(6): 28-36. DOI:10.1109/MWC.001.2000106
- [3] 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. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020181
- [4] 席博, 洪涛, 张更新. 卫星物联网场景下基于节点选择的协作波束成形技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42: 2882-289
- [5] LEYVA-MAYORGA I, SORET B, POPOVSKI P. Inter-plane inter-satellite connectivity in dense LEO constellations [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(6): 3430-3443. DOI:10.1109/TWC.2021.3050335
- [6] 汪春霆, 翟立君, 卢宁宁, 等. 卫星通信与 5G 融合关键技术与应用 [J]. 国际太空, 2018(6): 11-16. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2366.2018.06.005
- [7] PORTILLO IDEL, 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. DOI:10.1016/j.actaastro.2019.03.040
- [8] 李刚. 卫星互联网时代的技术攻坚者 [J]. 科学中国人, 2020: 62-64
- [9] 国务院国有资产监督管理委员会. 国资委关于组建中国卫星网络集团有限公司的公告 [EB/OL]. (2021-04-28) [2021-08-06]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588030/n2588924/c18286531/content.html>
- [10] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(6): 1201-1221. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307
- [11] MOLISCH A F, RATNAM V V, HAN S Q, et al. Hybrid beamforming for massive MIMO: a survey [J]. IEEE communications magazine, 2017, 55(9): 134-141. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600400
- [12] 杨贵德, 周渊平, 夏文龙. 协同信道空时优化 MIMO 无线传输系统 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40(1): 102-107. DOI: 10.11999/JEIT170321
- [13] SCHWARZ R T, DELAMOTTE T, STOREK K U, et al. MIMO applications for multibeam satellites [J]. IEEE transactions on broadcasting, 2019, 65(4): 664-681. DOI:10.1109/TBC.2019.2898150
- [14] BYMAN A, HULKONEN A, ARAPOGLOU P D, et al. MIMO for mobile satellite digital broadcasting: from theory to practice [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2016, 65(7): 4839-4853. DOI: 10.1109/TVT.2015.2462757
- [15] HOFMANN C, STOREK K U, SCHWARZ R T, et al. Spatial MIMO over satellite: a proof of concept [C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2016: 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2016.7510945
- [16] 郭庆, 张硕, 杨明川, 等. 分布式双极化卫星移动 MIMO 信道模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(5): 50-56. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.05.009
- [17] CHUNG J M, KIM J, HAN D. Multihop hybrid virtual MIMO scheme for wireless sensor networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2012, 61(9): 4069-4078. DOI:10.1109/TVT.2012.2213620
- [18] CHANG H W, WANG L C. A low-complexity uplink multiuser scheduling for virtual MIMO systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2016, 65(1): 463-466. DOI: 10.1109/TVT.2015.2394368
- [19] SOORKI M N, MANSHAEI M H, MAHAM B, et al. On uplink virtual MIMO with device relaying cooperation enforcement in 5G networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2018, 17(1): 155-168. DOI: 10.1109/TMC.2017.2707540
- [20] M K A. Data detection in large MIMO satellite communication systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(5): 1032-1035. DOI:10.1109/LWC.2021.3056555
- [21] ARTI M K. Data detection in multisatellite communication systems [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2020, 56(2): 1637-1644. DOI: 10.1109/TAES.2019.2928666
- [22] ZHAO B, REN G L, ZHANG H N. Multisatellite cooperative random access scheme in low earth orbit satellite networks [J]. IEEE systems journal, 2019, 13(3): 2617-2628. DOI:10.1109/JSYST.2018.2870416

#### 作者简介



王虎威, 北京理工大学在读硕士研究生; 主要研究领域为卫星通信、无线宽带通信、MIMO 技术等。



叶能, 北京理工大学特别副研究员、硕士生导师; 主要研究领域为非正交多址通信、空天智能安全通信等; 发表论文 30 余篇, 获授权专利 10 余项。



安建平, 北京理工大学网络空间安全学院院长、教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士、常务理事; 研究领域聚焦空天信息网络与安全、空间信号处理; 主持完成了 40 余项国家级科研项目, 获国家、国防和省部级科技奖 9 项; 发表论文 100 余篇, 获授权发明专利 100 余项。