

基于波束成形的低轨卫星物联网接入技术

谢旭旭, 丁晓进, 洪 涛, 张更新

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 融合地面物联网与卫星物联网, 实现万物互联愿景, 是未来天地融合网络发展的必然趋势。卫星物联网作为地面物联网强有力的补充, 能够解决地面物联网服务范围受限的缺陷, 但随着物联网规模的扩大, 卫星载荷有限的难题会逐渐突出, 将导致卫星难以满足日益增加的终端数目的通信需求。多输入多输出 (MIMO) 技术是地面5G的关键技术, 也是6G卫星通信中的重要研究方向, 考虑将MIMO中的波束成形技术引入低轨卫星物联网, 实现空域资源的充分利用, 从而达到提高系统容量的目的。针对波束成形技术的实施条件和卫星物联网的特征, 讨论若干相关研究内容, 包括信道模型、波束成形准则、单星负载均衡接入技术和面向干扰抑制的多星协作波束成形接入技术。

关键词: 融合网络; 低轨卫星物联网; 波束成形

中图分类号: TP927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023007

LEO Satellite Internet of Things Access Technology Based on Beamforming

XIE Xuxu, DING Xiaojin, HONG Tao, ZHANG Gengxin

College of Telecommunications&Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China

Abstract: The integration of terrestrial communication and satellite communication for internet of things (IoT) is the inevitable trend of the development of wireless communication network, to achieve the vision of the connection of everything. As a supplement to terrestrial IoT, satellite IoT can make up the flaws of terrestrial IoT. However, with the expansion of IoT scale, it will be difficult for satellites to meet the communication needs of increasing number of IoT terminals, because the problem of limited satellite load will become increasingly prominent. Multiple-input multiple-output (MIMO) technology is the key technology of terrestrial 5G, and also an important research direction of satellite communication in the future 6G. The beamforming(BF) technology was introduced in MIMO into the low earth orbit (LEO) satellite based IoT, to made full use of spatial resources and significantly improved system capacity. In view of the implementation conditions of BF technology and the characteristics of satellite IoT, several related issues were discussed, included channel model, BF criterions, load balancing access technology of one satellite and cooperative BF access technology of several satellites.

Keywords: integrated network, LEO satellite IoT, beamforming

0 引言

无线通信飞速发展, 人们不再仅仅满足于人与人之间的通信, 更加注重人与物、物与物之间的通信, 憧憬

“万物互联”时代的到来。5G的三大应用场景之一, 海量机器类通信 (massive Machine Type Communication, mMTC), 每平方千米可支撑100万台设备, 助力地面物

收稿日期: 2022-09-15; **修回日期:** 2023-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U21A20450); 江苏省前沿引领技术基础研究专项 (No.BK20192002); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX22_0940)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U21A20450), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province, Major Project (No.BK20192002), The Postgraduate Research and Practice Innovation Program of Jiangsu Province Under Grant(KYCX22_0940)

联网技术发展,使电子医疗、智能家居、智慧城市等场景成为可能^[1-2]。地面物联网的应用场景存在制约,一是地表限制,地球表面约30%是陆地,约70%是海洋,地面物联网只能在相对小的范围内提供有效的覆盖^[3];二是成本制约,人迹罕至的地方和极端地形区域,如沙漠、戈壁、荒原、悬崖、峡谷、陡坡等,物联网需求少,建设基站性价比低,地面物联网难以覆盖;三是灾害破坏,地面物联网容易受到地面灾害破坏,如火山喷发、地震、洪水等。这些制约使得仅仅依靠地面物联网还远不能实现“万物互联”的远大愿景。将视线投向太空,卫星物联网具有广覆盖的突出优点,并且不受地表地形、地势的影响,能够打破地面物联网的制约,但卫星上载荷有限,服务能力受限制。结合地面物联网和卫星物联网的优势,以地面物联网实现“深度”覆盖,卫星物联网解决“广度”覆盖问题,然后构建天地融合一体化的物联网是未来的发展趋势^[4]。

在卫星物联网中,低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星物联网由于往返时延短、路径损耗低,适合物联网终端小型化、低功耗设计需求,越来越受到人们的关注。参考文献[5]针对低轨卫星物联网的体系架构设计问题,从LEO卫星星座结构、高效频谱分配、异构网络兼容性、接入和路由协议等方面对基于LEO卫星星座的物联网架构进行了讨论。参考文献[6]基于体验质量(Quality of Experience, QoE)优化特定区域上的卫星轨道参数,为低轨卫星星座配置提供轨道参数。参考文献[7]进一步考虑了轨道平面间卫星链路(Inter Satellite Link, ISL),以扩大物联网应用的覆盖范围。这些都是低轨卫星物联网研究的基础。

随着物联网终端部署数量的增加,卫星的广覆盖特性将带来单颗卫星需要服务大量物联网终端的难题。传统的多波束传输技术,如7色复用技术,能通过给相邻的波束分配不重叠的频谱来抑制波束间的共信道干扰,从而增加系统容量,但其频谱利用率仍较低。为了进一步提高频谱利用率,相邻波束采用同样频谱的全频率复用方案被提出,这种方案中,波束间的干扰是影响系统容量的重要因素^[8]。因此,如何抑制波束间的干扰是实施全频率复用方案的重要研究点。

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术是地面5G中最重要的技术之一,能在同样的带宽内传输多路数据,频谱利用率高,并且可以通过波束成形和多用户检测技术有效抑制波束间的干扰,也是6G卫星通信的重要研究方向^[9]。参考文献[10-12]研究了MIMO技术在卫星上的应用,但针对的都是宽带场景,并没有考虑更多窄带物联网终端数量下MIMO技术

的应用。本文在低轨卫星窄带物联网场景下,讨论有关MIMO技术中波束成形的若干研究内容^[9],包括信道模型、波束成形准则、单星负载均衡接入技术和面向干扰抑制的多星协作波束成形接入技术。

1 信道模型

现有的卫星移动通信信道模型,一般针对高轨卫星移动通信系统,对低轨卫星移动通信信道模型研究较少,针对MIMO低轨卫星通信的更少。因此,有必要研究适用于MIMO低轨卫星通信的信道模型,为设计传输方法、分析系统性能、估计信道参数等工作奠定基础。

传统的卫星通信一直依赖于C频段和Ku频段,但是随着社会对宽带服务的需求越来越大,为了以更低的成本获得更高的带宽,更高频段的毫米波的开发和使用获得了广泛关注,比如Ka、Q、V频段,但是更高的频段信号在传播过程中经历的大气衰减和降雨衰减明显增加,需要建立对应的信道模型,MIMO低轨卫星通信的信道模型与工作的频段息息相关^[12]。此外,根据无线信道建模理论,MIMO低轨卫星通信信道可以表示为一般多径信道的形式,为克服信道的频率选择性衰落,简化波束成形的实施,需采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,将频率选择性衰落信道转化为多个并行的平坦衰落信道^[15]。

下面从时延、多普勒频移、信道衰落和天线阵列响应4个方面讨论MIMO低轨卫星信道特点。

(1) 低轨卫星与中轨卫星、高轨卫星相比,虽然具有更小的传播时延,但是与地面无线信道相比,其传播时延较大^[16]。并且,卫星通信信道经过的大气环境复杂,如电离层与平流层会引起时延等,复杂的传播环境增加了精确信道模型建立的复杂度。

(2) 低轨卫星高速运动,造成卫星与终端之间的多普勒频移可达几十到几百kHz,并且随着工作频段的增大而增加,这是低轨卫星通信的突出特点。

(3) 信道衰落分为大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落主要指自由空间损耗,因为卫星通信中信号传输经过的自由空间路径占总路径的95%以上,此外云雾和降雨等也会影响信号衰减程度;卫星通信中的小尺度衰落一般服从莱斯分布,莱斯分布由莱斯因子的大小决定,卫星覆盖范围广,卫星服务区域内的地形复杂,在平坦的平原地带,莱斯因子偏大,在反射径较多的森林地带,莱斯因子偏小。

(4) 决定平面阵列天线的阵列响应的变量是到达(离开)角。卫星与终端之间的超长距离,不仅使得地面反射径的距离远小于星地距离,在卫星侧观察到的同

一终端的不同多径信号的到达（离开）角趋于相同，即卫星端的角度扩展几乎为0；而且使得短时间内卫星移动的距离小于星地距离，也就是说，短时间内卫星端的到达（离开）角也趋于相同^[17]。

时延和多普勒频移都可在卫星星历和终端位置已知的情况下通过计算得到，信道衰落和阵列响应也可通过信道估计求得，这些参数的求取并不难，困难的是在大时延、高多普勒频移的情况下获取可靠的信道信息。首先，星地通信固有的大时延导致估计的信道信息存在过时的可能，使用过时信道信息进行波束成形设计会大大降低性能；其次，星地之间固有的多普勒频移导致信道信息快速变化，估计的信道信息生存周期短，难以应用于波束成形设计。因此，在低轨卫星通信中，使用统计信道信息进行波束成形设计更符合实际^[18]，即在信道相干时间内获取信道在时间维度上的统计信息，并用于波束成形设计。建立统计信道信息的一个要点是前面所提到的卫星端同一终端的角度扩展几乎为0，并且阵列到达（离开）角变化慢，这是在星上实施MIMO技术的突出优点，当卫星侧天线阵列的位置和朝向确定时，各个终端在卫星侧的到达（离开）角仅由其位置唯一确定。

前面讨论了MIMO低轨卫星系统使用时间维度的统计信道信息的必要性，接下来，针对低轨卫星窄带物联网，讨论运用空间维度的统计信道信息的可能性。随着人们对“万物互联”的需求增加，未来在基站无法覆盖的区域也会部署大量的物联网终端，而低轨卫星的广覆盖特性将导致服务区内终端数量大量增加，面向单个物联网终端的波束成形设计并不能满足海量物联网终端通信需求。基于此，再考虑两个因素，首先，窄带物联网终端对传输速率通常要求较低，面向终端的波束成形设计存在性能溢出的情况^[13-14]；其次，大量物联网终端的发送报文短，使得信道估计变得困难。因此，需要寻找新的信道信息获取方法，比如可以构建区域化信道信息，即获取空间维度上的统计信道信息，区域内的终端在时域、频域、码域或能量域进行区分，将能够在符合终端低功耗、低成本要求的基础上尽可能实现更多终端的接入。

2 波束成形准则

波束成形常见的设计准则有3种。

第一种设计准则以消除终端间的干扰为主要目的，例如，终端配置单天线时的迫零（Zero Forcing, ZF）法^[19]，终端配置多天线时的块对角化（Block Diagonalization, BD）法^[20]。基于这种准则下的波束成形向量一般都有闭合解，计算复杂度很低，但是这种准则在消除波束间干扰的同时也会削弱目标终端的有用信号功率，所以它的性能不是最

优的。

第二种设计准则以信干噪比（Signal to Interference and Noise Ratio, SINR）为指标，通常可以建模为两类优化问题：一类是在终端SINR约束下的发送功率最小化；另一类是发送功率约束下的系统效用（例如和容量或总速率）最大化。考虑到卫星载荷受限的特点和终端之间的公平通信，研究卫星发送功率约束下的最大化最小SINR问题。针对此类问题，有一种重要、有效的方法是基于上下行链路对偶的思想，这种思想最早由RASHID-FARROKHI F^[21]和VISOTSKY M^[22]等发现，他们的研究表明，下行链路中终端SINR约束下的功率最小化波束成形问题可以在上行链路中通过迭代的方式求解。SCHUBERT M等^[23]通过上下行链路对偶性，利用特征向量求解了功率约束下的最大化最小SINR问题。除了基于上下行链路对偶的方法，凸优化方法也在此类准则下的波束成形设计中发挥了重要作用，WIESEL A等^[24]首先通过凸优化理论获得了功率最小化问题可行解存在的充分必要条件，后利用最大化最小SINR问题与功率最小化问题之间的可逆性，提出了解决最大化最小SINR问题的一种基于固定点迭代的求解算法和一种基于二分法的求解算法。

第三种设计准则以信漏噪比（Signal to Leakage and Noise Ratio, SLNR）为指标，最早由SADEK M等^[25-26]提出，相比于迫零法和块对角化法，这种设计准则考虑了噪声的影响，具有更好的性能，并且没有天线限制（所有用户的天线数目之和应小于发送端的天线数目）。相比于基于SINR准则的波束成形方案，该准则下的波束成形向量没有耦合问题，可以直接推导出闭合解，计算复杂度低，但性能稍微差一点。

载荷受限是卫星通信的固有缺陷，复杂的波束成形算法在卫星上并不适用，尽管一般都有更好的性能。因此，设计复杂度低、性能较优的波束成形算法也是MIMO低轨卫星通信的重要研究方向。例如，参考文献[10, 27]运用迫零预编码思想来抑制干扰，从而显著提高了多波束卫星的吞吐量。参考文献[12]针对低轨卫星通信提出了一种MIMO传输策略，其中下行预编码采用SLNR指标，显著降低了计算复杂度。参考文献[28]在用户端也采用平面天线阵列的情况下，以最大化系统和速率为目标，通过巧妙地证明将预编码向量的设计问题转换为标量变量的设计问题，并且设计了低复杂度的机器学习算法进行求解，大大降低了复杂度。此外，当天线规模非常大时，全数字波束成形将会带来极大的射频链路开销，因此结合数字和模拟波束成形优点的混合波束成形也得到了重点研究^[29-30]。

3 单星负载均衡接入技术

卫星覆盖范围广，物联网终端种类繁多，不同区域内终端数量和业务服务质量（Quality of Service, QoS）需求差异性大，使得卫星物联网业务在时空两个维度上不断变化，容易导致业务繁忙区域网络资源紧张，而业务空闲区域网络资源得不到充分利用的资源分配不均现象。传统的多波束卫星中，波束需要通过波束成形网络（Beamforming Network, BFN）来生成，BFN通常是固定的，或者以很慢的速度变化，在业务空时动态变化的卫星物联网场景下，将导致各波束出现“劳逸不均”“忙闲过度”现象，造成资源浪费。

跳波束技术是一种能够灵活分配资源的技术^[31]，旨在利用较少的波束跳变来实现传统多波束系统的覆盖，从而提高系统的实际吞吐量和资源利用效率。但是在现有跳波束通信系统中，波束的形状、大小通常是一致的，并不能完全面向业务进行跳波束设计。而在MIMO低轨卫星系统中，卫星使用相控阵天线。相控阵天线和传统多波束天线相比具有极大的优势，其主要特点是可以自由地对波束进行控制，能够在业务空时动态变化的情况下灵活改变跳波束的指向、宽度和形状，实现面向业务的多波束负载均衡。例如，在某森林地带发生火灾，森林中监测终端都发出预警信息，该地带的通信需求急剧上升，低轨卫星可以通过缩小覆盖该地带的波束

大小或将此地带的业务分配到多个波束内，实现波束间的负载均衡，保障物联网终端高并发接入需求，单星多波束负载均衡示意如图1所示。

以两个波束的参数调整做初步的仿真，仿真的条件是：星上相控阵为平面阵，阵元之间的间距为 $\lambda/2$ ，初始时刻产生两个指向不同覆盖范围大小相同的波束，其中一个波束由于业务量的增加，波束内时频资源紧张，而邻近的另一个波束由于波束业务量少，波束内的时频资源得不到充分的利用，信关站向星上多波束相控阵上传波束参数调整的指令，均衡两个波束业务量。表1给出了波束参数对比以及波束范围内节点数目对比。可以看出通过波束参数的调整均衡了两个波束内激活节点的数目，提高了两个波束内的时频资源利用率。

表1 波束参数对比以及波束范围内节点数目对比

参数	天线阵大小	相位变化/ $^{\circ}$	覆盖范围半径/km	覆盖节点数(波束1/波束2)/个
调整前	7×7	0	$r_1=r_2=180$	150万/80万
波束1调整后	6×6	+2.8	$r'_1=225$	110万/120万
波束2调整后	8×8	+4.2	$r'_2=155$	

4 面向干扰抑制的多星协作波束成形接入技术

近年来，随着卫星互联网浪潮的兴起，为了满足全

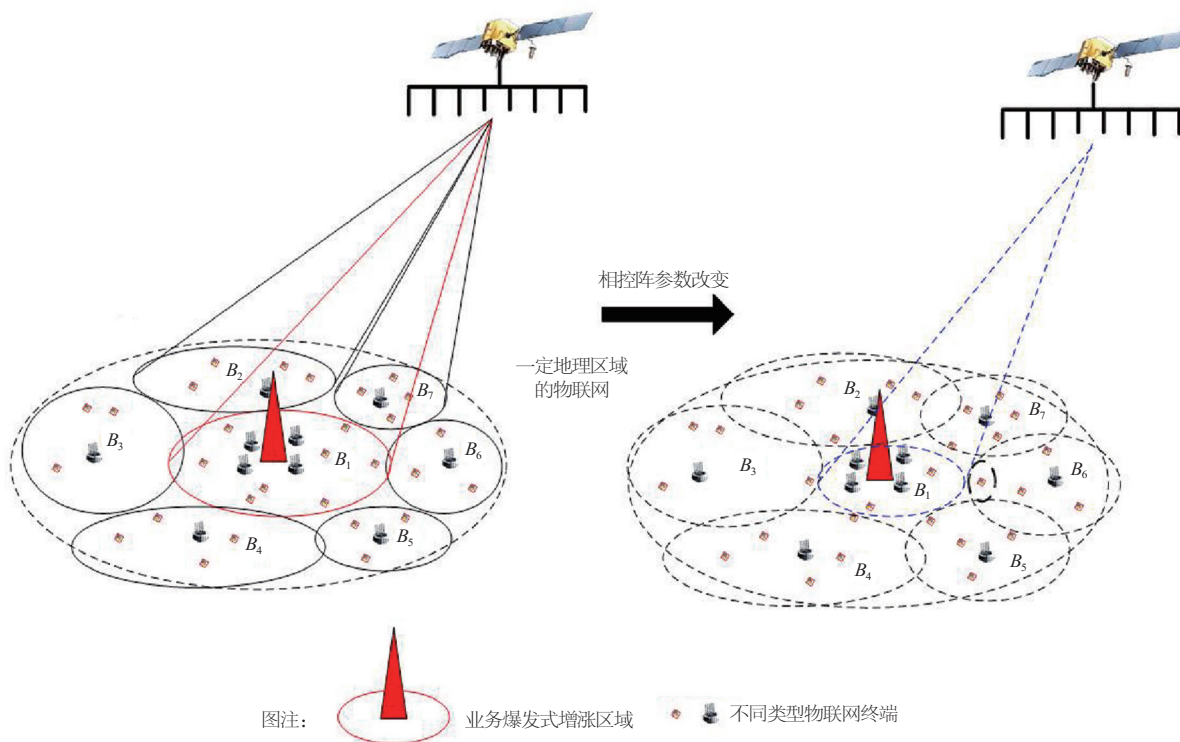


图1 单星多波束负载均衡示意

球全天时覆盖和宽带高速应用需求,低轨卫星星座成为发展的重点。随着低轨卫星发射数目的增加,未来低轨卫星之间的干扰问题不容忽视,如何实现低轨卫星服务重叠区域内终端的可靠通信也是研究重点。

在多星共视、干扰严重的场景下,传统方法可通过用户调度、波束管理和功率分配等方式来规避终端之间干扰^[32-34],所用方法涉及时域、频域、波束域和功率域等资源,但是停留在资源优化配置阶段。参考文献[35]引入空域资源,通过使用多星协作波束成形和串行干扰抵消(Successive Interference Cancellation, SIC)来消除多星共视引起的多址干扰,但是所使用的协作波束成形只考虑了终端相对于卫星天线阵列的方向,并没有涉及信道的衰减情况。对于MIMO低轨卫星通信系统,如果卫星与终端之间的信道信息完全可行有效,利用终端信道信息抑制或增强来自(发送给)某终端的信号强度来实现多星共视区域内终端的有效接入是可行的,其能充分利用无线资源的空间可分离性,并且卫星端天线规模越大,天线空间分辨率越高,干扰抑制性能越好。

简化后的面向干扰抑制的多星协作波束成形场景如图2所示,两颗卫星重叠区域内的物联网终端选择一颗卫星接入时,将会对另一颗卫星产生同频干扰,可在这颗卫星上使用波束成形技术来抑制干扰。

具体优化模型为

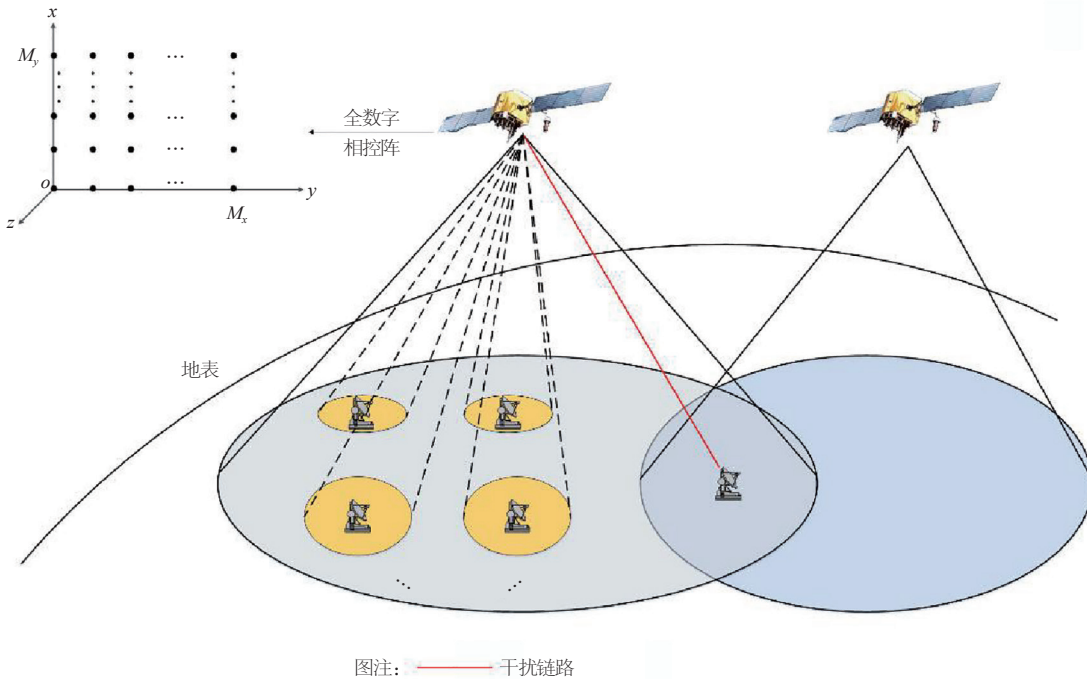


图2 面向干扰抑制的多星协作波束成形场景

$$Q = \begin{cases} \max_{\{w\}} \sum_{i=1}^K R_i \\ \text{s.t. } R_k = \log_2(1 + \text{SINR}_k), k=1, 2, \dots, K \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\text{SINR}_k = \frac{|w_k^H h_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |w_k^H h_i|^2 + \sum_{j=1}^{K'} |w_k^H h_j|^2 + \frac{1}{\rho} \|w_k\|^2} \quad (2)$$

其中, K 表示终端个数, K' 表示重叠区域干扰终端个数, w_k 表示第 k 个终端的接收波束成形矢量, h 表示卫星与终端之间的信道矢量, ρ 表示信噪比。

优化问题 Q 的求解可以根据广义瑞丽熵的性质求得,这里不再赘述。

主要的仿真参数设计如下:终端数目 $K=14$, $K'=1$,卫星配置的阵列天线规模为 $M_x=M_y=16$,天线间的间距都为半波长;信道莱斯因子 $\kappa_k=10$ dB;终端位置和卫星位置与速度通过软件STK产生,阵列响应通过终端与卫星之间的俯仰角计算得到。面向干扰抑制的波束成形性能对比如图3所示。

从图3中可以看出,面向干扰抑制的多星协作波束成形能够有效抑制来自重叠覆盖区的干扰,当 K' 数目非常多时,性能提升会更加明显。

然而,卫星间的协作通常需要建立星间链路,以共

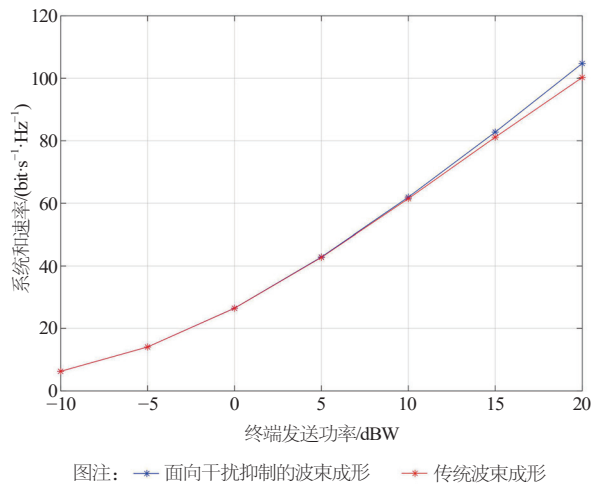


图3 面向干扰抑制的波束成形性能对比

享信道信息和实现其他信息交互, 而ISL的建立及星间同步非常困难。首先, ISL传输波束窄, 低轨卫星高速运动, 导致ISL波束搜索、目标定位、捕获和跟踪都比较困难; 其次, 由于ISL传输距离较远, 高频信号衰减大, 给接收机灵敏度、信号检测质量和接收性能都带来了挑战。因此, 与地面基站之间的协作通信相比, 依靠ISL的卫星间协作通信还有许多工作要做。

参考文献:

- [1] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. The Internet of Things: a survey[J]. Computer Networks, 2010, 54(15): 2787-2805.
- [2] ZANELLA A, BUI N, CASTELLANI A, et al. Internet of Things for smart cities[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(1): 22-32.
- [3] Coverage Maps. Available[Z].
- [4] 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.
- [5] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. LEO satellite constellation for Internet of Things[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18391-18401.
- [6] DAI C Q, ZHANG M J, LI C, et al. QoE-aware intelligent satellite constellation design in satellite Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 4855-4867.
- [7] 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.
- [8] WANG W J, LIU A, ZHANG Q, et al. Robust multigroup multicast transmission for frame-based multi-beam satellite systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 46074-46083.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] VÁZQUEZ M Á, PÉREZ-NEIRA A, CHRISTOPOULOS D, et al. Precoding in multibeam satellite communications: present and future challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(6): 88-95.
- [12] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1851-1865.
- [13] 3GPP. Service requirements for machine-type communications (Release 13): TS 22.368[S]. 2014.
- [14] WU G, TALWAR S, JOHNSON K, et al. M2M: From mobile to embedded Internet[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(4): 36-43.
- [15] HWANG T, YANG C Y, WU G, et al. OFDM and its wireless applications: a survey[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1673-1694.
- [16] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CONTI M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2624-2639.
- [17] 3GPP. Study on new radio (NR) to support nonterrestrial networks (Release 15): TR 38.811[S]. 2020.
- [18] GAO X Q, JIANG B, LI X, et al. Statistical eigenmode transmission over jointly correlated MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(8): 3735-3750.
- [19] WIESEL A, ELDAR Y C, SHAMAI S. Zero-forcing precoding and generalized inverses[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(9): 4409-4418.
- [20] SPENCER Q H, SWINDLEHURST A L, HAARDT M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 461-471.
- [21] RASHID-FARROKHI F, LIU K J R, TASSIULAS L. Transmit beamforming and power control for cellular wireless systems[J].

- IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1437-1450.
- [22] VISOTSKY E, MADHOW U. Optimum beamforming using transmit antenna arrays[C]//Proceedings of 1999 IEEE 49th Vehicular Technology Conference (Cat. No.99CH36363). Piscataway: IEEE Press, 2002: 851-856.
- [23] SCHUBERT M, BOCHE H. Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(1): 18-28.
- [24] WIESEL A, ELDAR Y C, SHAMAI S. Linear precoding via conic optimization for fixed MIMO receivers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(1): 161-176.
- [25] TARIGHAT A, SADEK M, SAYED A H. A multi user beamforming scheme for downlink MIMO channels based on maximizing signal-to-leakage ratios[C]//Proceedings of (ICASSP '05) IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2005: 1129-1132.
- [26] SADEK M, TARIGHAT A, SAYED A H. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5): 1711-1721.
- [27] ARNAU J, DEVILLERS B, MOSQUERA C, et al. Performance study of multiuser interference mitigation schemes for hybrid broadband multibeam satellite architectures[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012(1): 1-19.
- [28] LI K X, YOU L, WANG J H, et al. Downlink transmit design for massive MIMO LEO satellite communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(2): 1014-1028.
- [29] YOU L, QIANG X Y, LI K X, et al. Hybrid analog/digital precoding for downlink massive MIMO LEO satellite communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 5962-5976.
- [30] YOU L, QIANG X Y, LI K X, et al. Massive MIMO hybrid precoding for LEO satellite communications with twin-resolution phase shifters and nonlinear power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(8): 5543-5557.
- [31] ANGELETTI P, FERNANDEZ P D, RINALDO R. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system performance and payload architecture analysis[C]//Proceedings of 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2006: 11-14.
- [32] COUBLE Y, ROSENBERG C, CHAPUT E, et al. Two-color scheme for a multi-beam satellite return link: impact of interference coordination[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 993-1003.
- [33] LIU S J, LIN J K, XU L X, et al. A dynamic beam shut off algorithm for LEO multibeam satellite constellation network[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(10): 1730-1733.
- [34] LOUCHARTE A, CIBLAT P, POULLIAT C. Power allocation for uplink multiband satellite communications with nonlinear impairments[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(8): 2713-2717.
- [35] WANG X D, XI B, SHI X Y, et al. Cooperative beamforming aloha for asynchronous LEO satellite IoT networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.

[作者简介]



谢旭旭（1999—），男，南京邮电大学通信与信息工程学院博士生，主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等。



丁晓进（1981—），男，南京邮电大学通信与信息工程学院副教授，主要研究方向为频谱感知、卫星通信等。



洪涛（1982—），男，南京邮电大学通信与信息工程学院副教授，主要研究方向为多天线收发系统、卫星通信等。



张更新（1967—），男，南京邮电大学通信与信息工程学院教授，主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等。