

卫星隐蔽通信技术综述



A Review of Satellite Covert Communication Technologies

邓娜/DENG Na¹, 邢成文/XING Chengwen²,
赵楠/ZHAO Nan¹

(1. 大连理工大学, 中国 大连 116024;
2. 北京理工大学, 中国 北京 100081)
(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202405009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241017.1325.002.html>

网络出版日期: 2024-10-17

收稿日期: 2024-08-06

摘要: 卫星网络中隐蔽通信技术能够为泛在信息传输提供高层级的通信安全保障。基于此, 对卫星通信网络的隐蔽通信技术进行系统综述, 首先, 简要介绍了卫星通信网络架构、卫星隐蔽通信典型场景、隐蔽通信的基本模型, 以及卫星通信网络模型和性能指标; 然后, 分别从信息编码、波形设计和传输策略等方面回顾了现有隐蔽通信技术研究的最新进展; 最后, 展望了卫星隐蔽通信技术的若干未来研究方向。

关键词: 卫星通信; 隐蔽通信; 信息编码; 波形设计; 传输策略

Abstract: In satellite networks, covert communication technology can provide high-level communication security for ubiquitous information transmission. To this end, this paper provides a systematic overview of covert communications in satellite communication networks. Firstly, this paper briefly introduces the satellite communication network architecture, typical satellite covert communication scenarios, fundamental covert communication model as well as satellite communication network model and covert performance metrics. Then, the latest progress in existing covert communication research is reviewed from different aspects of information encoding, waveform design, and transmission strategies. Finally, several future research directions are provided for satellite covert communications.

Keywords: satellite communication; covert communication; information encoding; waveform design; transmission strategy

引用格式: 邓娜, 邢成文, 赵楠. 卫星隐蔽通信技术综述 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 55-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405009

Citation: DENG N, XING C W, ZHAO N. A review of satellite covert communication technologies [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 55-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405009

作为未来全球通信网络的重要组成部分, 卫星通信网络是实现信息网络的全域连续覆盖和普惠共享的有效补充, 可应用于偏远地区通信、海洋作业及科考宽带、航空飞机宽带和应急救援通信等民用领域, 以及军事通信中继、情报侦查、打击引导和预警探测等军事领域^[1]。第3代合作伙伴计划 (3GPP) 已针对卫星通信网络与地面5G网络融合开展了相关研究, 并认为超高密度的低轨星座网络将成为6G网络的一部分, 将在全球通信服务上发挥关键作用。近年来, 以星链、一网、超低轨通遥一体卫星星座等代表性的庞大星座计划, 推动了新一轮的卫星通信网络发展浪潮, 充分体现了卫星网络的发展前景和重要地位^[2]。然而, 随着通信业务的快速发展, 无线通信过程中的各类保密和敏感数据呈

现海量增长, 无线通信安全问题也愈发受到用户重视。与地面移动通信网络相比, 卫星通信网络的电磁波广播特性具有更远的传输距离和更广阔的无线覆盖, 使得卫星通信链路更易受到监听、干扰和非法接入等恶意攻击。同时, 卫星通信网络的三维广域覆盖特性使得恶意节点可以在空、天、地任意位置均能够实施非法手段, 且被动监听模式导致难以发现恶意节点进行处置。此外, 2019年世界无线电通信大会 (WRC-19) 第35号决议要求卫星运营商提交实际部署卫星系统的轨道特性参数, 使得恶意节点可以预测卫星的轨道和位置, 并提前做好攻击或窃听的准备。基于此, 卫星通信网络面临着严峻的信息传输安全挑战。

为了保证信息传输的安全性, 传统方法主要包括隐写术、加密技术和物理层安全通信技术。隐写术是将隐秘信息嵌入到图像或音频等数字媒介中, 使得第三方无法察觉隐秘信息传输行为^[3], 而加密技术采用密钥对隐秘信息进行加密/解密操作, 在无密钥的情况下无法解码信息内容^[4]。二者均

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62371086、62325103); 辽宁省自然科学基金联合基金项目 (2023-MSBA-015); 航空科学基金项目 (2022Z001063001); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (DUT24MS015)

工作在网络层或应用层中，易于移植到卫星通信网络。然而，随着设备算力的增长和量子计算技术的发展，信息破译能力将会显著提升，隐写术或加密技术难以保证信息的安全传输。由此，需要将信息传输的安全保障机制下移至物理层，直接在物理信号实现更高级别的通信安全，这对具有广播特性的无线通信场景尤为重要。物理层安全通信技术利用合法信道和窃听信道之间的差异性在物理层信号传输上实现完全保密，有效防止第三方通过窃听信道截获信息^[5]。现有的物理层安全传输策略主要有两类：一类是通过信息编码、波束成形、人工噪声和中继协作干扰等技术增大合法信道与窃听信道之间的速率差异性，即提升保密容量；另一类是利用无线信道的互易性、随机性及空间唯一性来生成具有天然随机性的密钥对传输数据进行物理层密钥加密，而信道信息的唯一性使得所传输数据不会因恶意节点的计算能力提高而被破译。由此可知，物理层安全通信技术可以使得恶意节点能够检测出物理信号，但无法解析信号的具体内容。虽然这能保护具体传输的信息不被破解，但仍无法保证足够的通信安全性。一旦恶意节点检测到通信行为，可以定位至辐射源位置并发动物理攻击，使合法节点受到安全威胁，这在军事领域中体现得尤为明显。例如，2023年初俄军士兵的通信行为使得临时驻点位置泄露遭到乌军突袭。因此，亟需在物理信号传输层面实现能够隐藏通信行为而不被第三方察觉的安全通信。

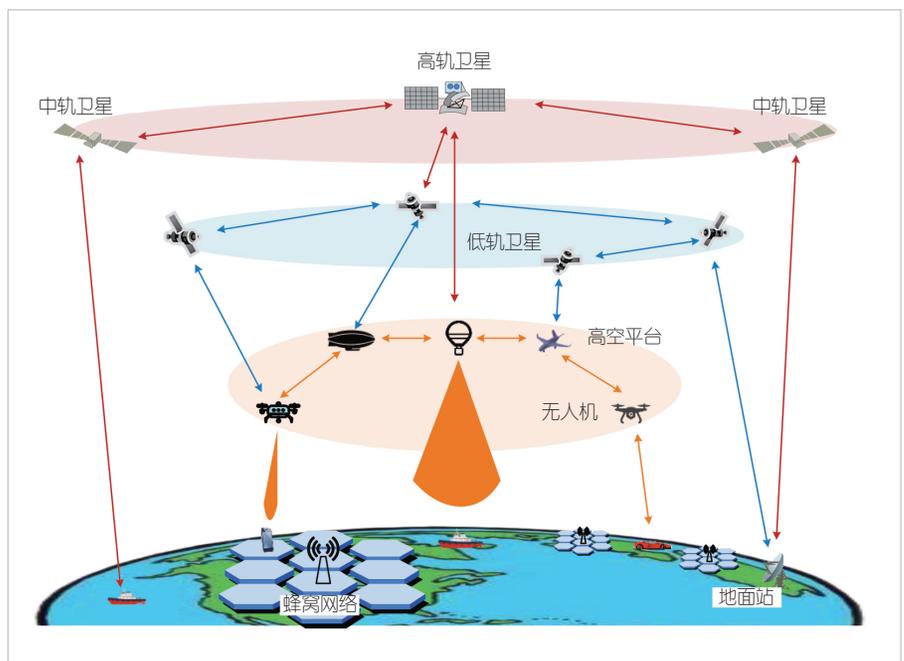
为实现更高层次的安全传输，隐蔽通信技术，又称为低截获通信，作为一种保证无线安全的新物理层技术而备受关注。与现有的物理层安全通信技术不同，隐蔽通信技术通常通过模拟环境噪声或其他自然信号，来隐藏信息传输的行为，使所传输的信号看起来像是环境噪声的一部分，从而不引起监测者察觉。早期的隐蔽通信技术主要采用流星余迹通信技术和扩频通信技术来提高通信的隐蔽性。流星余迹通信的隐蔽性主要依赖于无线电波的方向性反射和间歇突发传输特性^[6]，而扩频通信技术将高功率谱密度的窄带信号扩展至低功率谱密度的宽带信号，使其淹没在背景噪声或者公用信号中^[7]。然而，这两项技术主要偏向于工程应用实现，难以有效解析信息隐蔽性和传输性能的理论边界，无法指导隐蔽通信技术的进一步方向。2013年，

BASH等学者从假设检验和信息传输理论角度对隐蔽通信理论进行了一项开创性研究^[8]，揭示了加性白噪声信道的隐蔽通信容量，即著名的平方根定律：发送方在 n 次信道使用条件下能够可靠且隐蔽传输的最大信息比特与 \sqrt{n} 成比例。在此基础上，研究人员在不同信道假设下研究了隐蔽通信的理论边界性能^[9-12]。然而，现有的研究工作大多集中在基于经典囚徒模型的三节点和噪声受限场景，难以直接应用于更复杂的卫星通信网络隐蔽通信场景。同时，卫星网络所体现的规模化、高动态、独特的信号传播特征和干扰受限等特性使得电磁频谱环境更加复杂，为通信的隐蔽性研究带来了诸多挑战，有待进一步研究与发展。为此，本文将对卫星网络的隐蔽通信理论与技术进行全面介绍。

1 卫星隐蔽通信基础

1.1 卫星通信网络架构

传统的卫星通信网络主要是地面通信设备和中轨/高轨通信卫星的直连通信，而近年来随着空中和小型卫星平台技术的进步，逐渐在传统网络中引入了低轨通信卫星、高空通信平台和低空通信平台。这些新平台的出现形成了一种新型大规模多层卫星互联网架构，具有多种层间/层内链路以及接入链路，能够为广域空间内的各类应用提供信息保障。根据各平台的高度，卫星互联网的架构可以分为天基网络、空基网络和地面网络3个部分，如图1所示。



▲图1 多层卫星通信网络架构

天基网络利用星间光通信链路和星地微波链路在全球范围内提供互联网接入服务,包括高轨卫星、中轨卫星和低轨卫星。卫星的高度范围与其提供的服务直接相关,其中轨道高度越高,信号覆盖区域越大,通信延迟时间越长。高轨卫星因具有最广泛的信号覆盖区域而主要用于提供卫星电话和无线广播服务,中轨卫星通常用于全球定位系统,而低轨卫星则因其低时延、高吞吐量和低成本等优势主要应用于移动互联网。然而,卫星的广域覆盖特性和无线信道的开放性使得卫星通信系统面临着严峻的信息传输安全风险。此外,低轨卫星的低成本特性使得低轨卫星星座的大规模部署成为可能,在提供更稳定、更高效的信息服务的同时,也给网络安全管理带来了风险和挑战。

空基网络可以看作是天基网络的延伸,对地面用户具有更好的信道条件和更低的通信时延,主要包括高空平台和低空平台。高空平台由位于15~25 km之间的平流层中的飞艇、飞机和气球组成。高空平台具有区域级的信息服务潜力,可以作为天基网络和地面用户之间的中继转发器,在区域覆盖和接收信号强度之间取得了良好的折中。低空平台主要由飞行高度为0~4 km的无人机组成,其中无人机的优势与高空平台类似,但更接近地面网络,具有快速灵活部署的特征,强大的视距通信链路,以及额外的自主可控的设计自由度。此外,无人机基站可以为偏远、人口稠密和灾害地区的地面用户实时建立、增强和恢复蜂窝覆盖。然而,空基网络的视距传播条件也会给信息传输的安全性带来严峻的挑战,同时高空/低空平台因具有高机动性也常会被用作信息截获的平台。

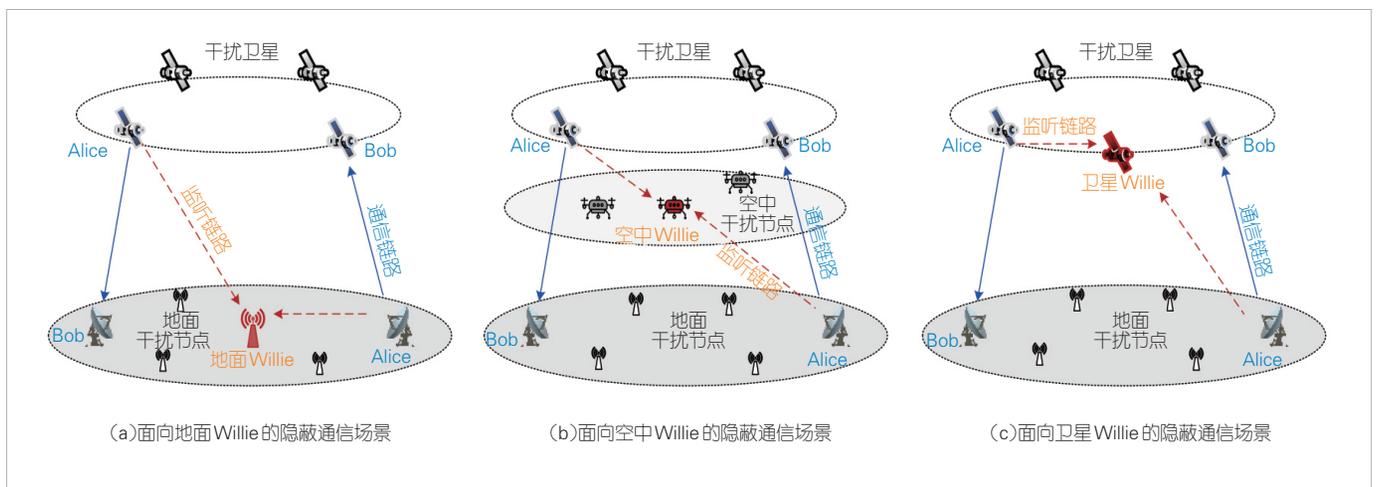
地基网络是由宏蜂窝网络、微蜂窝网络和Wi-Fi网络等不同子网组成的异构无线接入网,服务于不同的行业,如工

业物联网、智慧城市、自动驾驶等。地基网络需要提前部署固定的信息网络基础设施,因前期部署代价高昂而难以服务偏远、沙漠和海洋等区域。相较于天基网络和空基网络,地基网络所能提供的通信区域范围有限,但无线服务更为稳定和高效。然而,由于无线信号的广播特性,合法和非法接收器均能够接收到来自无线空中接口的数据信号,同样为地基网络的通信安全带来了风险。

1.2 卫星隐蔽通信典型场景

隐蔽通信的经典模型是SIMMONS提出的Alice-Bob-Willie三方囚徒模型,其中发送方Alice致力于可靠地将数据发送给接收机Bob,同时确保通信本身不被监听者Willie察觉。基于此,隐蔽通信与传统通信的最大差异在于存在第三方Willie对信号的检测特性。结合卫星通信网络的多层架构,监听者Willie在不同高度时所经历的电磁环境差异较大,信号检测特性也较为悬殊。因此,本文将基于Willie高度将卫星隐蔽通信典型场景分为3类,即地面Willie、空中Willie与卫星Willie,如图2所示。通过对不同典型场景、信号传输方向、监听者个数和功能进行组合可衍生出更多复杂的隐蔽通信场景。

图2(a)给出了面向地面Willie的卫星隐蔽通信场景,其中Willie位于地面,对来自地面Alice或卫星Alice的隐蔽信号进行检测。若Alice是卫星发射机,由于星地传播距离通常较远,距离较近的地面Willie和地面Bob可能会经历类似的信道特性,使得Willie和Bob对卫星所发的无线信号具有类似的检测特性,导致二者或都检测到信号,或都无法检测到信号,这对同时满足通信隐蔽性和可靠性的隐蔽通信技术提出了极大的挑战。若Alice是地面发射机,为了对抗卫



▲图2 卫星隐蔽通信典型场景

星接收机 Bob 所经历的长距离路损, Alice 需要提升自身的信号功率, 这同时也有利于地面 Willie 进行信号检测, 从而使隐蔽通信变得更为艰难。

图 2 (b) 给出了面向空中 Willie 的典型场景, 其中空中飞行器位于地面和卫星轨道之间用来监听地面 Alice 或卫星 Alice 的通信行为。在该场景中, 无论 Alice 是卫星发射机还是地面发射机, 空中 Willie 因具有一定高度而使其监听链路的信号传播距离小于 Alice-Bob 通信链路的信号传播距离。同时, 空中 Willie 所接收的信号传播环境往往是无遮挡的, 显著优于近地传播环境。这些因素使得通过降低发射功率以增强通信隐蔽性的传统方法不再适用。此外, 空中 Willie 的自主移动性使其能够灵活地调整检测位置, 给卫星通信带来了极大安全威胁。

图 2 (c) 给出了面向卫星 Willie 的典型场景, 其中卫星作为监听者检测来自地面 Alice 或卫星 Alice 的信号。在该场景中, 卫星的广域覆盖优势也有利于卫星 Willie 进行广域范围的监听, 同时卫星的周期移动性使其可监听范围进一步扩展, 且对地面的监视和监听活动难以及时发现和干扰, 这种天然的隐蔽性为卫星作为窃听者提供了优势。此外, 世界主要国家和商业公司都在积极部署大规模的低轨卫星星座, 抢占稀缺的轨道和频谱资源, 导致太空敌我卫星混杂。在进行正常星地或星间通信时, 卫星 Willie 可能会改变轨道到更近的位置或与合适位置的卫星协同进行窃听或监视。这将给卫星通信网络带来严峻的安全挑战。

1.3 隐蔽通信基本模型

在隐蔽通信中, Alice 以一定概率传输信息并试图提高其传输性能, 且躲避 Willie 监测, 而 Willie 尽力正确地检测到 Alice 是否在发送信号。Willie 根据其检测到的信号矢量执行决策行为, 即通过二元假设检验来判断 Alice 是否发射信号。考虑卫星通信网络的大规模特性, 信号会受到噪声和干扰的影响, 卫星隐蔽通信的基本模型可以建模为公式 (1) 所示的假设检验问题:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_0: y_w[i] &= \sum_{k \in \Phi} \sqrt{\mu_k h_{kw}} x_k[i] + n_w[i], \\ \mathcal{H}_1: y_w[i] &= \sqrt{\mu_a h_{aw}} x_a[i] + \sum_{k \in \Phi} \sqrt{\mu_k h_{kw}} x_k[i] + n_w[i], \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $i=1, 2, \dots, L$ 为信道使用或采样索引。 $y_w[i]$ 和 $x_a[i]$ 分别为 Willie 的接收信号和 Alice 的发射信号, $x_k[i]$ 为干扰源的发射信号。 $n_w[i]$ 为接收端的加性高斯白噪声。 μ_a 和 μ_k 分别为 Alice 和干扰源的发射功率, h_{aw} 和 h_{kw} 分别表示 Alice 到 Willie 和干扰源到 Willie 之间的信道增益。 \mathcal{H}_0 和 \mathcal{H}_1 分别对应于 Alice 保持静默状态的零假设和 Alice 正在发送信号的备选

假设。

在典型的隐蔽通信中, Willie 根据其平均接收信号功率 \bar{P}_w 和预先设置的功率检测门限 ξ 来决定 Alice 处于信息发送状态 \mathcal{D}_1 或保持静默状态 \mathcal{D}_0 , 其中平均接收信号功率为:

$$\bar{P}_w = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |y_w[i]|^2. \quad (2)$$

当 $\bar{P}_w > \xi$, Willie 判断 Alice 进行了信号传输; 反之, Alice 保持静默。根据二元假设检验的判决准则, Willie 可能出现虚警和漏检错误, 则应的虚警概率表示为 $\alpha = P_r(\mathcal{D}_1 | \mathcal{H}_0)$ 以及漏检概率为 $\beta = P_r(\mathcal{D}_0 | \mathcal{H}_1)$ 。此时, Willie 致力于恰当设置功率检测阈值来最小化总误检概率 $\alpha + \beta$, 而 Alice 通过编码波形设计、资源分配和干扰协同等来增强 Willie 的总误检概率。

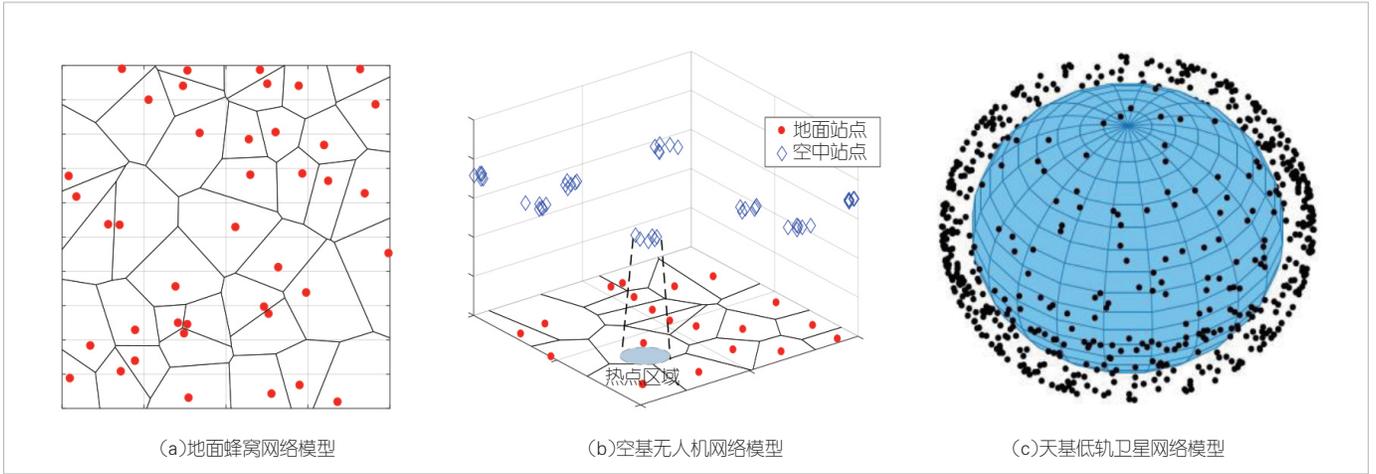
1.4 卫星通信网络模型

从隐蔽通信模型中可知, 决定通信隐蔽性的是 Willie 在两种实践假设下所接收信号强度特性的差异, 而决定通信性能的则是 Bob 的接收信号质量。这些因素均与卫星通信网络中各层无线节点的空间拓扑结构以及无线信道特性密切相关。

首先, 关注空间拓扑结构的建模问题。对于地基网络, 以地面蜂窝网络为例, 地面基站的空间位置坐标虽然可以从各运营商处获取, 但从位于不同位置的接收机的角度来看, 绝对坐标相同的地面基站其相对位置也是可变的, 因而呈现出随机网络拓扑特性。此外, 确定性的网络拓扑只能依托系统级仿真方法对所关注的信号特性进行研究, 需要消耗大量的算力、时间和存储资源。基于此, 许多理论研究工作将地面蜂窝站点建模为一个二维的空间随机点过程以体现出网络拓扑的可变性和随机性^[13], 如图 3 (a) 所示, 其中红色 “·” 为地面基站, 黑色线条用以表征小区边界。

空基网络与地基网络的最大差异在于每个空中节点的位置属性多了一个高度维度, 因此可采用标签空间随机点过程来建模空基网络的空间拓扑^{[14][15]}, 其中空间随机点过程表征了空中站点在地面上映射的水平位置, 而标签则表征空中节点的高度, 可以是一个固定值或者服从某个概率分布的随机变量。如图 3 (b) 所示, 针对无人机集群用于服务地面热点区域的场景, 可建模为一个固定标签的泊松簇过程, 其中无人机在地面投影的水平位置建模为一个泊松簇过程, 高度为一个固定值。

对于天基网络, 以低轨巨型星座网络为例, 鉴于低轨卫星节点往往位于距离地球表面的一定海拔高度上, 通常采用



▲图3 卫星通信网络空间拓扑模型

一个三维球面的二项式点过程建模低轨巨型星座网络节点的空间拓扑^[6]，其中在每个时刻点上各卫星位置的集合可认为是一次随机空间点过程的实现。基于此，由卫星移动性导致的星座网络空间分布的可变性便可由空间点过程的随机性来体现。低轨巨型星座网络模型的示意图如图3(c)所示。

然后，关注无线信道的建模问题。无线信道建模通常分为大尺度衰落和小尺度衰落两部分。对于地基网络，地面收发机之间的无线信号传播大多经历各类散射体和遮挡物。因此，小尺度衰落通常建模为瑞利衰落或Nakagami衰落，而大尺度衰落则建模为与距离相关的幂率路损模型 $\ell(d) = \kappa d^{-\alpha}$ ，其中 α 和 κ 分别为路损指数和参考距离的路损偏置^[13]。对于空基网络，主要涉及空-地链路和空-空链路两种信道。其中，空-地链路信道可能会受到建筑物或山脉等物体的遮挡，需要同时考虑视距和非视距传播特性，并且根据不同的环境设置不同的视距传播概率以及相应的信道模型参数^[17]。空-空链路通常是无遮挡的传播环境，因而建模为视距传播信道。对于天基网络，主要涉及星地链路、星空链路和星间链路三类信道。其中，星间链路通常是无遮挡的传播环境，因而可直接建模为自由空间传播信道。相比于其他信道，星地/星空链路^[18]的卫星信号通常要穿越较远的物理距离，且无线电信号会历经自由空间损耗以及降水、气体吸收、云层、对流层闪烁和信号去极化等引起的衰减。同时，由于卫星与地面设备（或机载设备）间的距离远大于天线间距，且卫星天线附近没有散射体，导致星地/星空链路信道存在着极强的空间相关性。而低轨卫星的高移动性导致其与地面节点间的相对移动而产生多普勒效应，使得卫星信道的建模变得极其复杂。常用的统计信道模型有瑞利信道、阴影-莱斯信道和Nakagami信道模型。此外，天基网络还存在地球遮挡问题，即并非所有卫星均能与地面/空中/卫星接收

机进行信息交互，部分卫星信号则会受到地球遮挡。

1.5 隐蔽通信性能指标

与仅关注信息传输可靠性和效率问题的传统通信不同，隐蔽通信还需要关注第三方Willie的信号检测问题。以下介绍表征Alice-Bob链路隐蔽特性和传输特性的基本性能指标。

1) 监听性能

Willie的监听性能决定了Alice-Bob链路的隐蔽特性，可以采用虚警概率 $\alpha = P_r(\mathcal{D}_1 | \mathcal{H}_0)$ 和漏检概率 $\beta = P_r(\mathcal{D}_0 | \mathcal{H}_1)$ 进行衡量。假设Alice发送隐蔽信息和保持静默状态的先验概率分别为 π_0 和 π_1 ，Willie的错误检测概率可以表示为 $P_{\text{error}} = \pi_0 \alpha + \pi_1 \beta$ 。在等先验概率情况下，通常也采用总误检概率 $\alpha + \beta$ 直接表征Willie的错误检测特性。为了表征隐蔽边界特性，一般考虑Alice处于较恶劣的信息传输环境，即Willie预先知悉一些统计先验信息，包括Alice发送信息的先验概率和Willie在两种假设下检测样本的概率分布。假设 \mathbb{P}_0 和 \mathbb{P}_1 分别表示Willie在零假设 \mathcal{H}_0 和备选假设 \mathcal{H}_1 成立条件下所接收信号样本 $y_w[i], i = 1, 2, \dots, L$ 的联合概率分布。在等先验概率情况下，Willie采用最优检测方法达到的最小总误检概率为：

$$\alpha + \beta = 1 - \mathcal{V}_T(\mathbb{P}_0, \mathbb{P}_1), \tag{3}$$

其中 $\mathcal{V}_T(\mathbb{P}_0, \mathbb{P}_1)$ 是关于两个概率分布 \mathbb{P}_0 和 \mathbb{P}_1 的总变分距离。然而，在复杂或高维信号的检测场景中，总变分距离通常难以直接计算。基于此，通过Pinsker不等式，可以得到最小总误检概率的下界：

$$\alpha + \beta \geq 1 - \sqrt{0.5\mathcal{D}(\mathbb{P}_0 || \mathbb{P}_1)}, \tag{4}$$

其中 $\mathcal{D}(\mathbb{P}_0 || \mathbb{P}_1)$ 是相对熵或Kullback-Leibler散度，用于量化

两个概率分布之间差异程度。

Alice 和 Willie 互不了解对方的先验信息，给隐蔽通信带来了可能性。具体地，Willie 不清楚 Alice 的发送时间、信号频率、时长以及实时信道信息，同时 Alice 也不了解 Willie 的信号检测策略和实时信道信息。若保证严格的隐蔽通信，需要在给定任意小的隐蔽约束 $\varepsilon > 0$ ，Alice 的信息传输行为在 Willie 处的总错检概率超过 $1 - \varepsilon$ ，即 $\alpha + \beta \geq 1 - \varepsilon$ 。目前隐蔽通信的相关研究通常假设 Willie 采用基于最小错误检测准则的最优检测方法，并对 Alice 的传输策略进行设计优化，如发射功率、传输速率或预编码矢量等。因此，当 Willie 采用非最优检测方法时，Alice-Bob 通信链路可以获得更高的隐蔽性。

2) 通信性能

隐蔽通信在满足隐蔽约束下需要提升 Alice-Bob 链路的传输速率和可靠性，因此 Alice 的通信策略设计需要兼顾 Willie 的检测能力和 Bob 的解码能力。这涉及隐蔽通信领域中信息隐蔽性与信息可靠性之间的矛盾。当 Alice 发送信号，Bob 的接收信号表示为：

$$y_b = \sqrt{\mu_a h_{ab}} x_a + \sum_{k \in \Phi} \sqrt{\mu_k h_{kb}} x_k + n_b, \tag{5}$$

其中 x_a 和 x_k 为单位功率符号， h_{ab} 和 h_{kb} 分别为 Alice-Bob 链路和干扰源到 Bob 的信道增益， n_b 是噪声。Alice-Bob 链路信干噪比 (SINR) 为：

$$\text{SINR}_b = \frac{\mu_a h_{ab}}{\sum_{k \in \Phi} \mu_k h_{kb} + \sigma^2}, \tag{6}$$

其中 σ^2 是噪声功率。若干扰节点集合是空集，则 Alice-Bob 链路的接收 SINR 将退化为信噪比 (SNR)。基于 SINR 表达式，可以研究信息传输成功概率 $P_r(\text{SINR} > T)$ 作为衡量信息可靠性指标，以及依托于 SINR 的其它通信性能指标，如传输容量、传输时延等性能指标。在研究这些通信指标的同时还要考虑信息传输的隐蔽性约束，则定义 Alice 的隐蔽传输容量为在满足隐蔽约束 $\alpha + \beta \geq 1 - \varepsilon$ 条件下 Alice 与 Bob 之间的信道容量^[10]，即：

$$C = \log(1 + \text{SINR}_b), \text{ s.t. } \alpha + \beta \geq 1 - \varepsilon. \tag{7}$$

类似地，也可定义基于隐蔽约束的其它通信性能指标。为了有效降低隐蔽通信的截获率，往往考虑监听者 Willie 处于最佳工作条件并具有最优检测性能，所得结果则对应于 Alice-Bob 隐蔽通信所面临的最差情况。

2 隐蔽通信关键技术

隐蔽通信的核心思想是在信息传输过程中不断引入随机性和不确定性因素来混淆 Willie 的检测过程，从而达到隐蔽信息传输行为的目的。本节从信息编码、波形设计和传输策略研究等方面回顾了隐蔽通信的解决方法，如表 1 所示，其

▼表1 隐蔽通信关键技术分类及特点

关键技术	文献	方法	特点
信息编码	[8-19]	随机编码方法	低功率或低码重的隐蔽约束 解码复杂度高
	[20-21] [22-24]	级联编码方案	满足低码重约束,达到隐蔽容量 解码复杂度较低
波形设计	[25-27]	传统扩频波形	低功率谱特性 先进信号检测技术破坏其隐蔽性
	[28-30]	混沌扩频波形	更好的非周期性、相关性 逼近高斯白噪声的统计特性
	[31-34]	WFRFT 波形	星座图具有旋转和模糊特性 通信信号呈现类高斯特性
	[35-38]	变换域波形	基于环境感知设计信号基础波形伪噪声性质,规避干扰频段
非协同传输	[39-40]	噪声不确定性	
	[41-43]	信道不确定性	环境不确定性实现非零隐蔽速率
	[44]	时间不确定性	
	[45-47]	功率控制策略	增强 Willie 的不确定性
	[48-53]	多天线技术	增强 Willie 的不确定性 提升 Bob 的有用信号功率
协同传输	[54-57]	单干扰机辅助	结合人工噪声、全双工和非正交多址技术,充分利用干扰机的协同干扰提升 Willie 的总错检概率
	[58-61]	多干扰机辅助	利用多干扰机的协同机制,增强 Willie 的不确定性,降低 Bob 的干扰功率

WFRFT: 加权类分数傅里叶变化

中根据是否需要干扰机协同辅助将传输策略研究分为非协同和协同两种类别。

2.1 隐蔽编码方法研究

为了满足通信系统中的隐蔽性约束, Alice需要在加性高斯白噪声信道下对所发送的消息进行低功率的高斯随机编码^[8]或在二进制对称信道下进行低码重的二进制随机编码^[9], 其中高斯随机码字的功率和二进制随机码字的码重与码字序列长度 n 呈现不大于 \sqrt{n} 的正比例关系。如果 Alice 的编码策略不满足上述约束, Willie 对以上两种信道下所接收的信号分别进行功率检测或非零符号数统计可以轻易地得出 Alice 的信息传输状态; 反之, Willie 的接收信号可以近乎噪声序列, 从而达到信息隐蔽的目的。虽然随机编码技术引入了不确定性, 但它们在实际系统中难以实现, 且隐蔽接收机的解码复杂度也较大。然而, 传统的线性编码难以满足低功率或轻量级的隐蔽约束。针对该问题, LAMARCA 等提出了一种基于图的非线性编码与传统线性编码进行串接级联而构建的一种非线性编码, 并将其用于二进制对称信道中隐蔽通信^[20], 其中隐蔽性是通过 Willie 未知的加扰序列保证的, 并采用仿真验证了所提编码策略的隐蔽有效性。文献[21]采用了类似的串接级联编码思路, 提出了适用于二进制对称信道和离散无记忆信道的 Reed-Solomon 与随机编码级联方案, 并理论证明了所提方案可以达到隐蔽且可靠传输的信道容量, 同时编解码算法具有多项式的复杂度。通过将随机编码和脉冲位置调制进行级联, BLOCH 等提出并证明了另一种在离散无记忆信道下能够达到极限隐蔽容量的编码方案^[22], 其中脉冲位置调制的稀疏性保证了信息传输的隐蔽性, 而通过码字长度的适当选取可以达到平方根律的信息容量。此外, BLOCH 还结合了多层编码和脉冲位置调制技术设计了一种低复杂度的优化编码方案^[23], 以在二进制输入离散无记忆信道上达到隐蔽通信的极限容量, 并改进脉冲调制技术使得所提编码方案能够在加性高斯白噪声信道达到隐蔽通信的极限容量^[24]。虽然文献[62-63]在卫星隐蔽通信中引入了极化码和低密度奇偶校验码, 但所用编码方法主要用于增强信息传输的可靠性, 而并非是隐蔽性。

2.2 隐蔽波形设计研究

为了降低 Willie 信号检测正确的可能性, Alice 无线信号波形的优化设计是极其关键的一环, 其中现有研究工作主要聚焦于扩频技术和变换域两类波形设计方法。

扩频技术是在两次世界大战期间为无线射频通信免受探测、干扰和窃听而设计的。该技术构成了最早且最持久的一

种物理层安全方法。本质上, 扩频方法是在宽带的调制波形上传输窄带的基带信源信号, 使得所发送的信号波形可以淹没在背景噪声或者公用信号中, 从而显著提高通信系统的隐蔽特性。典型的扩频技术包括跳频扩频 (FHSS)、直接序列扩频 (DSSS) 及其组合, 广泛应用于诸多卫星与军事通信系统。由于扩频系统的接收机需要根据扩频序列的先验知识进行同步解扩, 因此该系统的隐蔽性能与扩频序列特性息息相关, 序列周期越长以及随机性越高, 则信息传输隐蔽性越好。BEAULIEU 等基于 Neyman-Pearson 检测理论, 提出了用于 FHSS 信号检测的相干和非相干截获接收机结构, 并推导了检测概率与虚警概率的理论表达式^[25], 用来表征传输隐蔽性能。为了提高 DSSS 信号的低截获性能, WIK 和 LINDBLAD 在文献[26]中提出了一种新型高速率扩频码生成方法, 并依托低通滤波器使扩频码具有多电平幅度, 以去除 DSSS 信号的谱线, 从而降低检测概率。NOWAK 等利用 ZINC 波形作为扩频信号来提高 DSSS 系统的传输和隐蔽性能^[27], 介绍了新型 DSSS 系统的时谱特征和传输信号的隐蔽性, 验证了 ZINC 波形的隐蔽性优于典型的伪噪声信号波形。在卫星通信领域中, 卫星重叠通信技术可以将扩频信号叠加至一般用户的通信信号中以隐藏通信行为^[64-65]。随着通信侦察技术的发展, 已出现大量有效检测和估计方法去截获扩频信号的关键参数, 使得扩频通信的低截获性能大打折扣^[66-67]。

针对上述问题, 一种方法是采用混沌序列代替传统扩频序列为卫星隐蔽通信提供了一种新型序列选择, 其中混沌序列具有更好的非周期性、相关性及逼近于高斯白噪声的统计特性^[28]。文献[29]研究了混沌序列通信系统中同步/异步和相干/非相干截获接收器和能量检测器的截获概率性能, 结果显示与传统扩频序列相比, 混沌序列可以显著降低截获特性, 体现了混沌序列通信系统在隐蔽性能上的优势。然而, 在已知混沌序列概率特性的条件下, 文献[30]设计了一种最佳截获接收机结构, 其结果表明混沌扩频序列的隐蔽性并不优于传统扩频序列。另一种提升通信隐蔽性的方法是引入一种新型时频域分析工具, 即加权分数阶傅里叶变换 (WFRFT)。WFRFT 处理后的调制信号比特能量均匀对称分布, 星座图在不同参数下表现出旋转和模糊特性, 导致通信信号呈现出类高斯的统计特性, 使得 WFRFT 具有了隐蔽的传输能力, Willie 更难准确地检测到 Alice 的通信行为^[31]。为了提高卫星通信的隐蔽能力, 文献[32]提出了一种基于多输入多输出系统的多层 WFRFT 方案, 其中每个发射天线作为一层具有唯一 WFRFT 参数, 使得 WFRFT 处理的信号能够有效地抵抗参数扫描的信息截获方法。文献[33]在卫星成对载

波多址中使用本地信号副本进行自干扰抵消,提出一种基于WFRFT的卫星信号掩盖方法。文献[34]结合WFRFT信号的种类高斯化特性与混沌映射轨迹的抗截获特性,提出一种基于物理层安全的双极化卫星联合调制方案,以进一步提高卫星信号的隐蔽性能。

上述工作主要关注基于时频域变换的波形设计方法。与之不同的是,变换域通信系统不以某种信号特征为主进行波形设计,而是通过感知周边电磁环境,在收发两端设计出相同的基础调制波形。该波形具有伪噪声性质且规避了干扰频段,从而降低了信号被截获的概率,同时也有效地提高了通信抗干扰能力^[35]。基于此,文献[36]的作者提出了一种基于变换域通信技术并重叠于卫星通信链路中的隐蔽通信系统,其中该系统将隐蔽信号叠加在卫星通信系统原业务信号上,通过透明转发器进行隐蔽信息转发。在文献[37]中,作者提出了一种基于频域加权的均方误差感知失真度量方法以评价变换域重叠隐蔽通信系统的隐蔽性能。针对变换域通信系统中传统基函数设计未考虑隐蔽性的短板,文献[38]提出了一种双门限基函数设计方法,综合考虑误码率性能与隐蔽性能,给出最佳的判决门限,使得通信系统在隐蔽性能符合通信系统要求的前提下,实现误码率性能的提升。文献[68]基于变换域通信技术思想提出了一种基于多载波直接序列码分多址的智能卫星隐蔽通信技术,其中发射端根据感知的实际电磁环境对多载波直接序列码分多址的系统参数进行动态调整,将隐蔽信息主动与背景干扰信息在时频域重叠,从而达到隐蔽信息传输的目的。

2.3 非协同隐蔽传输方法研究

根据平方根律可知,随着编码的码字位数趋于无穷时,隐蔽速率趋于0。因此,如何打破平方根律的基本限制实现非零隐蔽传输速率成为隐蔽通信领域中一个关键问题。由平方根律证明过程可知增强隐蔽传输性能的关键点在于弱化Willie统计假设检验的检测能力,而其中涉及了一个理想假设,即Willie精确知悉背景噪声和Alice发送信号序列的统计特性。然而,在实际场景中,Willie仅能知悉有限或不确定的Alice信号特性信息和环境噪声信息。例如,背景噪声是各种噪声源的集合,如热噪声、信号泄露、非理想滤波器的量化噪声等,使得Willie无法精准估计噪声的真实统计特性,进而难以区分接收信号中的噪声和实际传输信号。因此,这些不确定性使得Willie难以依托最优统计假设检验方法进行信号检测,进而弱化了Willie统计假设检验的检测能力。

在信息传输过程中,Willie对环境感知的不确定性可以

为Alice实现非零隐蔽速率带来机会。LEE等学者在2015年基于信息论证明了在Willie对背景噪声功率等级不确定的条件下Alice可以获得非零隐蔽速率,而且噪声不确定性使得Willie难以确定性地检测到Alice的信号传输^[39]。同时,由于Willie对噪声功率等级的估计与实际不一致,这导致隐蔽通信系统存在一个信噪比临界值。当Bob的信噪比小于该临界值时,Willie即使检测了无穷多个信号样本也无法发现Alice的信号传输行为。随后,文献[40]研究了有界和无界两种类型的噪声不确定性模型,并使用贝叶斯统计和隐蔽中断概率作为关键指标来分析隐蔽性能。结果表明两种噪声不确定性模型均可以实现非零隐蔽速率。除了噪声不确定性,实际通信环境中的信道状态信息对于所有接收机均是不确定的,因此Alice可以有额外的维度来隐藏信息传输行为。文献[41]研究了块衰落信道上的隐蔽通信,给出了Willie的最优辐射计检测门限,以及结果表明信道状态信息的不确定性确实能够实现非零隐蔽速率。SHAHZAD等学者研究准静态块衰落信道上隐蔽通信的两种情况,即Willie知悉理想的信道状态信息或信道状态信息的统计分布。通过对比两种情况,研究结果表明在较大的检测误差范围内,即使Willie获知了较好的信道状态信息也并不能提高其检测性能^[42]。TA和KIM研究了噪声和信道不确定性如何影响对瑞利衰落信道的隐蔽性能,其中结果表明噪声不确定性可以加剧信道不确定性对隐蔽性能的影响^[43]。此外,平方根律中假设检验问题的建模暗示了一个关于Willie不合理假设,即若Alice试图发送信息,Willie知晓Alice具体的发送时间和信号时长,这显然与实际并不相符的。基于此,文献[44]研究了在加性高斯白噪声场景下当Willie并不知晓发送时间对隐蔽性能的影响,其中结果表明当Alice的发送时间对于Willie来说是未知的,且Willie需要始终监测所有时隙中信号的变化情况,此时Alice可以实现非零隐蔽传输速率。文献[69]研究了空地一体化网络中的上行隐蔽通信问题,其中噪声不确定度用于分析Willie的最小错误检测概率以度量信息传输的隐蔽特性,并以此作为隐蔽约束,通过优化发送功率和非规则高斯信号因子以最小化隐蔽通信系统的中断概率。

由于不确定性有利于信息传输隐蔽性,Alice主动设计隐蔽增强的传输方案以加剧Willie接收信号功率的随机性,如多天线和功率控制等技术。对于功率控制技术,信息隐蔽传输的机理是增强发射功率的随机性或设计发射功率以降低被Willie发现的概率。YAN等在加性高斯白噪声信道下考虑一个基于有限块长的时延敏感隐蔽通信系统,提出了均匀随机分布的发射功率方案来提高信息传输的隐蔽性能,结果说明隐蔽传输的信息量与随机功率等级数呈现对数增长的规

律^[45]。HU等学者采用信道反转功率控制方案实现瑞利衰落信道模型下的隐蔽通信,其中所采用的功率控制策略可以保证接收机Bob的接收信号功率恒定,同时也防止Willie利用信道状态信息去准确估计噪声,进而增强了隐蔽通信性能^[46]。类似地,MA等研究了基于信道反转功率控制的隐蔽通信方案,其中考虑传统的和截断的信道反转功率控制方案,给出了最优检测阈值和最小总误差概率的表达式,并提出了优化发送端功率控制参数以最大化有效隐蔽吞吐量^[47]。对于多天线技术,波束成型可以减少传输方向中的信号泄漏,从而提高无线信道的隐蔽性能。文献[48]研究了非理想信道状态信息场景下多输入单输出信道的隐蔽通信问题,其中Alice配置多天线而Willie和Bob的接收机均是单天线。结果表明,Alice在获得Willie完整信道状态信息前提下可以通过多天线波束成型得到非零隐蔽速率,并在获得非理想信道状态信息的情况下通过优化波束成型矢量和发射功率以最大化隐蔽速率。文献[49]考虑了Willie配置多天线的隐蔽通信场景,分析了天线数对可达隐蔽通信速率的影响。结果表明与单天线场景对比,Willie天线数的稍许增长会显著降低隐蔽速率。对于多输入多输出的隐蔽通信场景,其中Alice、Bob和Willie均配置多天线,文献[50]给出了不同系统配置下的最大隐蔽速率,如Alice对Willie信道状态信息的知悉情况,有无共享密钥码本以及发射天线的数量等。结果显示,在一定发射天线配置和加性高斯白噪声信道条件下,多输入多输出的隐蔽容量收敛于其信道容量。JAMALI等考虑了多天线与毫米波相结合的隐蔽通信场景^[51],将Alice的天线阵列分为两个独立子阵列,其中一个子阵的定向波束对准Bob用于传输数据,而另一个子阵的定向波束对准Willie作为干扰信号,以增强数据传输的隐蔽性。文献[52]将多天线技术与中继相结合进一步解决低功率约束导致收发机传输性能差的问题,设计了直达中继协调传输策略,提出了一种基于半定松弛的线搜索方法来获得全局最优波束形成矢量,平衡了直连链路和中继链路,满足隐蔽性要求,同时实现了最大隐蔽率。文献[53]利用智能反射面对无线信道进行重构来解决传输的隐蔽性和可靠性的折中问题,从而打破了传输隐蔽性、可靠性、延迟和吞吐量之间的基本限制。文献[70]将毫米波与大规模天线阵列技术迁移至卫星系统,推导了该系统的下行隐蔽容量,提出了一种度量指标来评估毫米波大规模多输入输出信道的内在稀疏性,研究了对卫星隐蔽通信容量的影响。

2.4 协同隐蔽传输方法研究

尽管Alice可以通过上述编码、波形设计、功率控制和

多天线等技术自主增强信息传输隐蔽性,但在Alice-bob-Willie典型三节点场景中引入干扰机Jammer这类第四方辅助节点,则会更有利于隐蔽性能的显著提升。其中,干扰机的主要作用机理是通过发送干扰信号影响Willie的接收信号特性。根据辅助干扰机的个数,可以将相关工作分为两类:单干扰机辅助隐蔽传输方法和多干扰机辅助隐蔽传输方法。

对于单干扰机辅助场景,首先考虑存在一个额外的Jammer辅助信息隐蔽传输的场景。SOBERS等考虑Jammer不了解Alice是否会发送信息和发送的时间的场景,其中Jammer将以随机功率始终在发送高斯白噪声信号^[54]。研究结果表明干扰机辅助Alice可以隐蔽传输与使用信道次数成比例的信息比特,即可以达到非零的隐蔽速率。其次,结合非正交多址技术,Alice本身就可以充当Bob的友好干扰机并且与非隐蔽接收机进行协同增强Bob的隐蔽传输性能,其中利用非隐蔽接收机需要强功率提升其通信性能作为掩护,将所传输的隐蔽信息隐藏在非隐蔽接收机的公开信号中^[55-56]。进一步地,KANG等将非正交多址技术引入到卫星物联网以增强信息的隐蔽传输^[57]。此外,结合全双工技术,隐蔽接收机Bob采用全双工接收来实现同时接收Alice的隐蔽信息和产生对Willie的人工噪声,使得Bob本身就成为了友好干扰机。文献[71]研究了一种信道衰落条件下的全双工无线隐蔽通信系统,其中该系统的全双工隐蔽接收机Bob产生的人工噪声对Willie的接收信号的统计特性产生不确定性。结果表明,该技术虽然可以给隐蔽通信带来机会,但会在Bob处引起自干扰,因此需要仔细管理发射功率等级。该文献研究了如何选择最佳人工噪声功率范围,以及隐蔽信息的最佳传输概率,从而最大限度地增大Willie的检测误差。考虑实际场景中Willie位置难以预先知悉,文献[72]提出了一种针对Willie位置不确定的隐蔽通信方案,其中该方案在限制隐蔽中断概率的情况下,最大限度地提高了多天线发射机与全双工隐蔽接收机之间的连接吞吐量。文献[73]考虑了Willie仅能获取信道状态信息统计特性的场景,其中结果表明全双工隐蔽接收机所产生的人工噪声能够提高无限块长度的隐蔽通信性能,而且通过优化Alice发送功率与Bob的人工噪声功率,可以减少Bob中断通信的可能性。文献[74]基于干扰机增强隐蔽传输的思想研究了低轨卫星通信系统的隐蔽性能,其中无人机作为卫星隐蔽通信的干扰机,推导了隐蔽速率和窃听者的错误检测概率。在此基础上,作者提出了一个遗传算法,通过优化无人机的发射功率和轨迹方案来得到最优隐蔽速率。

对于多干扰机辅助场景,首先考虑实际场景中干扰机的位置不确定性。SOLTANI等假设潜在友好干扰机集合服从

一个二维泊松点过程,提出了距离 Willie 最近的友好干扰节点产生人工噪声的隐蔽增强传输策略,并证明了在合适的点过程密度和路径损耗指数配置下 Alice 能够可靠且隐蔽地向 Bob 发送与信道使用数成线性比例的信息比特^[58]。同时,该论文还考虑了多个 Willie 协作截获 Alice 信息的场景,并给出隐蔽传输信息比特的极限性能,且结果说明在路损指数大于 2 的场景是无法提供更高的隐蔽容量。在相同的无线网络拓扑假设的基础上,ZHENG 等研究了多天线辅助隐蔽通信的性能,其中 Alice 的阵列部署模式考虑了集中式和分布式两种天线系统,并在随机几何理论框架下分析和优化了隐蔽通信的吞吐量性能,研究了小尺度信道衰落和大尺度路径损耗的共同影响^[59]。结果表明,无论发射天线个数是多少,两种天线系统的隐蔽吞吐量与干扰源密度和干扰功率无关,其中集中式天线系统的隐蔽吞吐量要优于分布式天线系统,且性能差异会随着天线数的增长而变大。

然后,考虑多个干扰机之间的协同问题。文献[60]针对多个干扰机辅助隐蔽通信系统提出了一种非协调干扰机选择方案,其中该方案选择对隐蔽接收机的瞬时信道增益低于预设阈值的干扰机来生成人工噪声以增强 Willie 的不确定性。因此,所提策略会严重降低 Willie 的检测正确性,而对隐蔽接收机的通信质量影响较小。此外,在 Willie 检测错误概率大于给定值的隐蔽约束下,通过优化干扰机的选择预设阈值和信息传输速率去实现隐蔽吞吐量最大化。HE 等同样研究了干扰机集合服从二维泊松点过程的隐蔽通信场景,但与文献[58]不同的是假设所有干扰机均发出相同功率的人工噪声^[61]。作者分析了在给定 Willie 隐蔽性和 Bob 传输可靠性双重约束下 Alice 和 Bob 之间的隐蔽通信吞吐量。结果说明在干扰受限网络中干扰源的密度和发射功率均不影响隐蔽吞吐量,而当干扰足够小且与接收机噪声功率等级相当时,隐蔽吞吐量随着干扰机的密度或发射功率的增加而增加。FENG 等采用类似的网络拓扑建模方法来研究大规模多层低轨卫星星座网络场景中的隐蔽通信问题^[75],通过功率控制策略将卫星隐蔽信号掩盖在卫星网络的同频干扰中,从而对抗窃听卫星通信信息的地面站点。

3 未来卫星隐蔽通信研究方向与挑战

近年来,虽然隐蔽通信研究已经做了大量工作,卫星隐蔽通信理论与技术研究也开始逐步推进,并具有非常广阔的应用前景,但仍有许多悬而未决的问题需要进一步研究。本节将结合卫星通信网络特征对其中涉及的技术挑战与未来发展方向展开论述。

3.1 实际隐蔽编码方案

诸多前期研究的结果表明常规的线性编码方案所得码字的码重无法满足隐蔽性约束,而基于随机化编码策略虽然能够达到隐蔽信息传输的极限性能,但在实际应用中存在计算效率低、解码复杂度高和可行性低等问题。当前有一些初步的研究工作通过线性与非线性编码的串接级联方案在特定信道模型下可以达到隐蔽通信的极限容量,但相关方案缺少严格的理论分析,对于卫星通信信道的适用性仍需要进一步研究和讨论。特别是,卫星通信具有高动态、长传播时延、信道条件变化快等特性,因此面向卫星隐蔽通信的中短编码方案是一个亟待解决的关键问题。

3.2 抗干扰的隐蔽波形设计

卫星通信网络的规模化发展和频谱的稀缺使得卫星隐蔽通信的三类场景中同频聚合干扰成为影响信息传输可靠性和隐蔽性的关键因素之一。同频聚合干扰作为一种新的不确定性因素为提升通信隐蔽性带来了新的契机,但对于隐蔽接收机的成功接收亦会产生重要影响。从复杂的电磁信号环境中,隐蔽接收机能够提取并识别出发射机的信号波形是信息传输的基础,同时该信号波形需要呈现出类环境噪声的非周期规律特性,从而避免被恶意节点所察觉。因此,基于 WFRFT 的变换域波形设计在干扰受限的卫星隐蔽通信领域还需要进一步深入研究。

3.3 非理想信道状态信息

为了便于方案设计和性能分析,现有的隐蔽通信研究工作往往假设可以获取理想的信道状态信息,用于波束成型和功率控制方案设计。然而,在实际场景中,卫星位置的高动态变化、背景噪声和同频干扰的存在,通常使发射端难以获取理想的信道状态信息,而所估计的信道状态信息通常都会存在误差项,严重影响信息传输的隐蔽性和可靠性。此外,传统基于导频的闭环反馈式信道估计方法也会有暴露通信行为的风险,而 Willie 通常是非主动响应式的接收机,Willie 检测链路的信道状态信息更加难以获取。因此,如何设计隐蔽式的信道估计方法和利用非理想状态信息是未来卫星隐蔽通信研究领域中的难点问题。

3.4 主动攻击式 Willie

在大多现有隐蔽通信研究中,通常假设恶意 Willie 处于静止且被动的状态。然而,在实际卫星通信场景中,卫星、航空器、无人机等各类通信载体均有主动移动的侦测能力,甚至具有电磁攻击能力。因此,Willie 在检测过程中可以相应地改变自身的探测位置、检测决策规则,甚至发射恶意干

扰信号等方式。例如, 无人机 Willie 在巡查过程不断被被动式检测信号, 同时可以根据接收信号强度动态改变检测位置和检测功率阈值。一旦发现 Alice 有一些可疑的行为, Willie 可以逐步靠近并对检测决策规则予以调整进行深度检测和分折, 从而更精确地判断 Alice 是否在发送信号。然而, 目前有关隐蔽通信的研究很少考虑主动 Willie, 可以进一步探索研究, 从而为隐蔽传输提供更彻底的保护。

3.5 干扰机协同方案设计

信号发射机之所以能够传输给隐蔽接收机而不被恶意节点发现, 原因主要是将其发送信号隐藏在恶意节点对电磁环境感知的不确定性中, 包括环境噪声、信道增益或人工噪声等不确定性因素, 从而避免被恶意节点发现。其中, 能够被隐蔽通信系统所主动掌控的不确定性因素是友好干扰机产生的人工噪声, 而卫星通信乃至空地一体化网络中节点规模性使得基于干扰机的隐蔽通信极具应用前景。然而, 针对节点的异构性、网络协议的差异性和卫星信号的独特传播特性, 如何从众多网络节点中选取合适的干扰机以及多个干扰机如何高效协同进行隐蔽通信, 仍是未来研究的一大挑战。

4 结束语

卫星网络中隐蔽通信技术能够为全域泛在信息传输提供有效的通信安全保障。为此, 本文综述了从物理层信号层面提供安全保护的隐蔽通信技术。首先介绍了卫星通信网络的基本架构和卫星隐蔽通信的几个典型场景, 讨论了隐蔽通信的基本模型和所涉及的卫星通信网络模型, 以及简要总结了信息隐蔽和信息传输两方面的关键性能指标。随后, 根据信息传输过程的不同阶段进行分类, 分别介绍了面向隐蔽通信的信息编码、波形设计、传输策略等关键技术, 其中传输策略根据是否需要友方发射机协同辅助又分为基于不确定性的非协同传输策略和基于干扰机协同的隐蔽传输策略。最后, 对卫星隐蔽通信存在的技术挑战和未来研究方向进行了展望。

参考文献

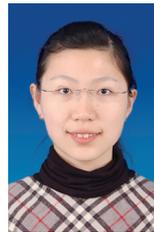
- [1] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2021, 23(1): 70–109. DOI: 10.1109/COMST.2020.3028247
- [2] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状 [J]. *通信学报*, 2022, 43(5): 177–189
- [3] FRIDRICH J. *Steganography in digital media: principles, algorithms, and applications* [M]. New York: Cambridge University Press, . DOI: 10.5555/1721894
- [4] DIFFIE W, HELLMAN M. New directions in cryptography [J]. *IEEE*

- transactions on information theory*, 1976, 22(6): 644–654. DOI: 10.1109/TIT.1976.1055638
- [5] LIU Y L, CHEN H H, WANG L M. Physical layer security for next generation wireless networks: theories, technologies, and challenges [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2017, 19(1): 347–376. DOI: 10.1109/COMST.2016.2598968
- [6] 李赞, 刘增基, 沈健. *流星余迹通信理论与应用* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011
- [7] 朱近康. *扩展频谱通信及其应用* [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993
- [8] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D. Limits of reliable communication with low probability of detection on AWGN channels [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2013, 31(9): 1921–1930. DOI: 10.1109/JSAC.2013.130923
- [9] BLOCH M R. Covert communication over noisy channels: a resolvability perspective [J]. *IEEE transactions on information theory*, 2016, 62(5): 2334–2354. DOI: 10.1109/TIT.2016.2530089
- [10] WANG L G, WORNELL G W, ZHENG L Z. Fundamental limits of communication with low probability of detection [J]. *IEEE transactions on information theory*, 2016, 62(6): 3493–3503. DOI: 10.1109/TIT.2016.2548471
- [11] TAHMASBI M, BLOCH M R. First- and second-order asymptotics in covert communication [J]. *IEEE transactions on information theory*, 2019, 65(4): 2190–2212. DOI: 10.1109/TIT.2018.2878526
- [12] ARUMUGAM K S K, BLOCH M R. Covert communication over a K-user multiple-access channel [J]. *IEEE transactions on information theory*, 2019, 65(11): 7020–7044. DOI: 10.1109/TIT.2019.2930484
- [13] LU X, SALEHI M, HAENGGI M, et al. Stochastic geometry analysis of spatial-temporal performance in wireless networks: a tutorial [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2021, 23(4): 2753–2801. DOI: 10.1109/COMST.2021.3104581
- [14] SHI X M, DENG N. Modeling and analysis of mmWave UAV swarm networks: a stochastic geometry approach [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2022, 21(11): 9447–9459. DOI: 10.1109/TWC.2022.3176906
- [15] DENG N, WEI H C, HAENGGI M. Modeling and analysis of air-ground integrated networks with flexible beam coverage [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2023, 22(11): 8170–8184. DOI: 10.1109/TWC.2023.3260470
- [16] WANG X, DENG N, WEI H C. Coverage and rate analysis of LEO satellite-to-airplane communication networks in terahertz band [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2023, 22(12): 9076–9090. DOI: 10.1109/TWC.2023.3268097
- [17] AL-HOURANI A, KANDEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2014, 3(6): 569–572. DOI: 10.1109/LWC.2014.2342736
- [18] ARAPOGLOU P D, LIOLIS K, BERTINELLI M, et al. MIMO over satellite: a review [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2011, 13(1): 27–51. DOI: 10.1109/SURV.2011.033110.00072
- [19] CHE P H, BAKSHI M, JAGGI S. Reliable deniable communication: hiding messages in noise [C]//*Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory*. IEEE, 2013: 2945–2949. DOI: 10.1109/ISIT.2013.6620765
- [20] LAMARCA M, MATAS D. A non-linear channel code for covert communications [C]//*Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2019: 1–7. DOI: 10.1109/WCNC.2019.8885672
- [21] ZHANG Q S, BAKSHI M, JAGGI S. Covert communication with polynomial computational complexity [J]. *IEEE transactions on information theory*, 2020, 66(3): 1354–1384. DOI: 10.1109/TIT.2019.2955987

- [22] BLOCH M R, GUHA S. Optimal covert communications using pulse-position modulation [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 2825–2829. DOI: 10.1109/ISIT.2017.8007045
- [23] KADAMPOT I A, TAHMASBI M, BLOCH M R. Multilevel-coded pulse-position modulation for covert communications over binary-input discrete memoryless channels [J]. IEEE transactions on information theory, 2020, 66(10): 6001–6023. DOI: 10.1109/TIT.2020.3019996
- [24] KADAMPOT I A, TAHMASBI M, BLOCH M R. Codes for covert communication over additive white Gaussian noise channels [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2019: 977–981. DOI: 10.1109/ISIT.2019.8849662
- [25] BEAULIEU N C, HOPKINS W L, MCLANE P J. Interception of frequency-hopped spread-spectrum signals [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 1990, 8(5): 853–870. DOI: 10.1109/49.56391
- [26] WIK A M, LINDBLAD A L. A novel LPI concept using filtered spreading codes [C]//Proceedings of MILCOM '96 IEEE Military Communications Conference. IEEE, 1996: 90–94. DOI: 10.1109/MILCOM.1996.568590
- [27] NOWAK M S, LOCICERO J L, UCCI D R. Bandlimited covert data communications using zinc waveforms [C]//Proceedings of MILCOM. IEEE, 2002: 1018–1023. DOI: 10.1109/MILCOM.2002.1179615
- [28] KADDOUM G. Wireless chaos-based communication systems: a comprehensive survey [J]. IEEE access, 2016, 4: 2621–2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730
- [29] YU J, YAO Y D. Detection performance of chaotic spreading LPI waveforms [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2005, 4(2): 390–396. DOI: 10.1109/TWC.2004.842948
- [30] SEDAGHATNEJAD S, FARHANG M. Detectability of chaotic direct-sequence spread-spectrum signals [J]. IEEE wireless communications letters, 2015, 4(6): 589–592. DOI: 10.1109/LWC.2015.2469776
- [31] 梅林, 房宵杰, 沙学军. 基于加权类分数傅叶变换的变换域通信系统 [J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(3): 38–44. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2017.03.009
- [32] ZHAI D, DA X Y, HU H, et al. Satellite anti-interception communication system based on WFRFT and MIMO [C]//Proceedings of 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). IEEE, 2018: 305–310. DOI: 10.1109/ICCSN.2018.8488243
- [33] 桑之昂, 刘亚南, 刘子威, 等. 基于WFRFT的卫星信号掩盖方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(1): 339–345
- [34] 倪磊, 达新宇, 胡航, 等. 基于MP-WFRFT的多维联合调制卫星隐蔽通信研究 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45(4): 1183–1191
- [35] 侯文达, 付天晖, 隋晓杰, 等. 变换域通信系统研究现状与问题分析 [J]. 信息技术, 2024, 48(1): 24–29, 36. DOI: 10.13274/j.cnki.hdzj.2024.01.004
- [36] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 一种基于变换域通信系统的卫星隐蔽通信系统 [J]. 信息与控制, 2014, 43(5): 524–528. DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2014.0524
- [37] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 变换域重叠隐蔽通信系统的隐蔽性度量方法 [J]. 高技术通讯, 2014, 24(5): 472–478. DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2014.05.005
- [38] 梁源, 达新宇, 张喆, 等. 隐蔽通信中变换域通信系统双门限基函数设计 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 11–16. DOI: 10.13245/j.hust.171103
- [39] LEE S, BAXLEY R J, WEITNAUER M A, et al. Achieving undetectable communication [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2015, 9(7): 1195–1205. DOI: 10.1109/JSTSP.2015.2421477
- [40] HE B, YAN S H, ZHOU X Y, et al. On covert communication with noise uncertainty [J]. IEEE communications letters, 2017, 21(4): 941–944. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2647716
- [41] SHAHZAD K, ZHOU X Y, YAN S H. Covert communication in fading channels under channel uncertainty [C]//Proceedings of IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2017: 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108525
- [42] SHAHZAD K, ZHOU X Y. Covert wireless communications under quasi-static fading with channel uncertainty [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 16: 1104–1116. DOI: 10.1109/TIFS.2020.3029902
- [43] TA H Q, KIM S W. Covert communication under channel uncertainty and noise uncertainty [C]//Proceedings of ICC 2019 – 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019: 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761935
- [44] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D. Covert communication gains from adversary's ignorance of transmission time [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2016, 15(12): 8394–8405. DOI: 10.1109/TWC.2016.2614502
- [45] YAN S H, HE B, ZHOU X Y, et al. Delay-intolerant covert communications with either fixed or random transmit power [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2019, 14(1): 129–140. DOI: 10.1109/TIFS.2018.2846257
- [46] HU J S, YAN S H, ZHOU X B, et al. Covert communications without channel state information at receiver in IoT systems [J]. IEEE Internet of things journal, 2020, 7(11): 11103–11114. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2994441
- [47] MA R Q, YANG X Q, PAN G F, et al. Covert communications with channel inversion power control in the finite blocklength regime [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(4): 835–839. DOI: 10.1109/LWC.2020.3046508
- [48] PENG X, WANG J Q, XIAO S, et al. Strategies in covert communication with imperfect channel state information [C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685518
- [49] SHAHZAD K, ZHOU X Y, YAN S H. Covert wireless communication in presence of a multi-antenna adversary and delay constraints [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(12): 12432–12436. DOI: 10.1109/TVT.2019.2948608
- [50] BENDARY A, ABDELAZIZ A, KOKSAL C E. Achieving positive covert capacity over MIMO AWGN channels [J]. IEEE journal on selected areas in information theory, 2021, 2(1): 149–162. DOI: 10.1109/JSAIT.2021.3053862
- [51] JAMALI M V, MAHDAVIFAR H. Covert millimeter-wave communication: design strategies and performance analysis [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(6): 3691–3704. DOI: 10.1109/TWC.2021.3123307
- [52] WANG M L, XU Z, XIA B, et al. DF relay assisted covert communications: analysis and optimization [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(3): 4073–4078. DOI: 10.1109/TVT.2022.3220336
- [53] WANG M L, XIA B, YAO Y, et al. Fundamental limit among covertness, reliability, latency and throughput for IRS-enabled short-packet communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(4): 3886–3900. DOI: 10.1109/TWC.2023.3312796
- [54] SOBERS T V, BASH B A, GOECKEL D, et al. Covert communication with the help of an uninformed jammer achieves positive rate [C]//Proceedings of 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2015: 625–629. DOI: 10.1109/ACSSC.2015.7421206
- [55] TAO L W, YANG W W, YAN S H, et al. Covert communication in downlink NOMA systems with random transmit power [J]. IEEE

- wireless communications letters, 2020, 9(11): 2000–2004. DOI: 10.1109/LWC.2020.3011191
- [56] WANG M C, YANG W W, LU X B, et al. Channel inversion power control aided covert communications in uplink NOMA systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(4): 871–875. DOI: 10.1109/LWC.2022.3149279
- [57] KANG B C, YE N, QI B. Comparisons on covert performances of NOMA in satellite Internet of things [C]//Proceedings of Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp). IEEE, 2021: 318–322. DOI: 10.1109/ComComAp53641.2021.9652913
- [58] SOLTANI R, GOECKEL D, TOWSLEY D, et al. Covert wireless communication with artificial noise generation [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(11): 7252–7267. DOI: 10.1109/TWC.2018.2865946
- [59] ZHENG T X, WANG H M, NG D W K, et al. Multi-antenna covert communications in random wireless networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(3): 1974–1987. DOI: 10.1109/TWC.2019.2900915
- [60] ZHENG T X, YANG Z T, WANG C, et al. Wireless covert communications aided by distributed cooperative jamming over slow fading channels [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(11): 7026–7039. DOI: 10.1109/TWC.2021.3080382
- [61] HE B, YAN S H, ZHOU X Y, et al. Covert wireless communication with a Poisson field of interferers [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(9): 6005–6017. DOI: 10.1109/TWC.2018.2854540
- [62] WU J Y, CHEN C F, BU X Y. Polar code-aided frequency offset estimation algorithm in satellite covert communication carrier synchronization [C]//Proceedings of IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2020: 1340–1344. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085165
- [63] XUE R, WANG Y C. A satellite overlapping covert communication scheme based on LDPC-DCSK transmission technology [C]//Proceedings of 2020 The 9th International Conference on Networks, Communication and Computing. ACM, 2020: 147–151. DOI: 10.1145/3447654.3447675
- [64] QIAN Y B, MA L, LIANG X W. Symmetry chirp spread spectrum modulation used in LEO satellite Internet of Things [J]. IEEE communications letters, 2018, 22(11): 2230–2233. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2866820
- [65] YANG Y, ZHU L D, MAO X, et al. The spread spectrum GFDM schemes for integrated satellite-terrestrial communication system [J]. China communications, 2019, 16(12): 165–175. DOI: 10.23919/JCC.2019.12.013
- [66] TSATSANIS M K, GIANNAKIS G B. Blind estimation of direct sequence spread spectrum signals in multipath [J]. IEEE transactions on signal processing, 1997, 45(5): 1241–1252. DOI: 10.1109/78.575697
- [67] KOIVISTO T, KOIVUNEN V. Blind despreading of short-code DS-CDMA signals in asynchronous multi-user systems [J]. Signal processing, 2007, 87(11): 2560–2568. DOI: 10.1016/j.sigpro.2007.04.012
- [68] CHEN C F, WANG S, LI L, et al. Intelligent covert satellite communication for military robot swarm [J]. IEEE access, 2019, 8: 5363–5382. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2963320
- [69] WANG D Y, QI P H, ZHAO Y, et al. Covert wireless communication with noise uncertainty in space-air-ground integrated vehicular networks [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(3): 2784–2797. DOI: 10.1109/TITS.2021.3098790
- [70] XU J P, BAI L, ZHOU L, et al. Covert downlink mmWave communication for massive MIMO LEO satellite [M]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 653–664. DOI: 10.1007/978-981-19-6052-9_59
- [71] SHAHZAD K, ZHOU X Y, YAN S H, et al. Achieving covert wireless communications using a full-duplex receiver [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(12): 8517–8530. DOI: 10.1109/TWC.2018.2878014
- [72] CHEN X Y, SUN W, XING C W, et al. Multi-antenna covert communication via full-duplex jamming against a warden with uncertain locations [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(8): 5467–5480. DOI: 10.1109/TWC.2021.3068096
- [73] XU T Z, XU L, LIU X Y, et al. Covert communication with A full-duplex receiver based on channel distribution information [C]//Proceedings of 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). IEEE, 2018: 1–4. DOI: 10.1109/ISAPE.2018.8634312
- [74] LI X M, DUAN G D, YAN S H, et al. Optimizing UAV jammer for covert communication of LEO satellite system [C]//Proceedings of 10th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech). IEEE, 2022: 156–161. DOI: 10.1109/ISCTech58360.2022.00032
- [75] FENG S H, LU X, SUN S M, et al. Covert communication in large-scale multi-tier LEO satellite networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2024, PP(99): 1–12. DOI: 10.1109/TMC.2024.3396793

作者简介



邓娜，大连理工大学副教授；主要研究领域为B5G/6G无线通信网络、无线能量传输、无人机通信、隐蔽通信、智能通信等。



邢成文，北京理工大学教授；主要研究领域为机器学习、统计信号处理、凸优化、多元统计和阵列信号处理。



赵楠，大连理工大学教授；主要研究领域为人工智能、智能反射面、通感一体化、无人机通信、安全与隐蔽通信。