

天地一体化物联网体系架构及干扰分析研究

张更新¹, 丁晓进², 曲至诚¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学物联网学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对未来物联网“万物互联”需求, 在分析空间信息网络和天基接入网络体系架构的基础上, 设计天地一体化物联网体系架构, 并针对天地共存场景进行干扰分析。具体而言, 首先, 在卫星网络与地面网络融合研究的基础上, 结合控制面与数据解耦的先进设计理念, 针对物联网接入网和终端的具体特点, 设计天地融合的低轨卫星物联网体系架构, 其包含天基骨干网、天基接入网、地面物联网、核心网和多模态物联网终端, 并给出天基控制面流程; 其次, 分别针对星间频谱共享场景和星地频谱共享场景进行干扰分析, 并相应给出初步分析结果。

关键词: 空间信息网络; 天地一体化信息网络; 物联网; 干扰分析

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200204

Research on Space-Based Integrated Internet of Things Architecture and Interference Analysis

ZHANG Gengxin¹, DING Xiaojin², QU Zhicheng¹

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

2.School of Internet of things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: Considering “internet of everything” of the future internet of things (IoT), the space-based integrated IoT architecture was designed, and the interference scenarios of the coexistence of satellite and ground was analyzed, with the aid of analyzing the architectures of the spatial information network and space-based access network. Specifically, firstly, relying on both the integration of satellite network and ground network, and the advanced design concept of decoupling control and data, a space-based satellite IoT architecture was designed in the presence of the specific characteristics of access network and terminals, which included space-based backbone network, space-based access network, ground-based IoT, core network and multimodal IoT terminals. Moreover, the process of space-based control plane was also given. Secondly, interference analysis was carried out for satellite spectrum sharing scenario and satellite-ground spectrum sharing scenario respectively, and preliminary analysis results were presented.

Keywords: spatial information network, space-integrated-ground information network, internet of things, interference analysis

1 引言

天地融合网络的体系架构可以归纳为以下3种形式: 天星地网、天基网络和天网地网。天星地网结构比较简单, 系统通过地面多个信关站完成大部分功能, 卫星一般采用透明转发方式, 由于卫星之间不进行组网, 因此系统复杂度较低, 典型系统包括移动用户目标系统 (Mobile User Objective System, MUOS)、全球星系统等。天基网络结构利用星间链路互联的方式构成卫星网

络, 完成信息采集、处理、传输等功能, 地面信关站只是一个补充的角色, 卫星一般采用处理转发或柔性转发的方式, 具有较强的稳健性, 一般用于军事需求, 典型系统有铱星系统、美军先进极高频 (Advanced Extremely High Frequency, AEHF) 系统等。天网地网结构介于两者之间, 将地面网络和卫星网络互联构成一体化空间信息网络, 在实现全球无缝覆盖的同时, 不需要全球布设地面信关站即可完成整个系统的管理和控制, 在一定

程度上减少了系统的维护成本和技术复杂度。考虑到未来卫星物联网作为地面物联网的补充和延伸的地位，天网地网结构或将更加适用于卫星物联网的建设，需在之前的研究基础上进一步深入，探索适应于物联网特点的体系架构设计。

2 天地一体化物联网体系架构

2.1 空间信息网络体系架构

空间信息网络是以天基、空基、地基的各类平台（GEO卫星或MEO卫星、LEO卫星、平流层飞艇、气球和飞机或无人机、地面系统等）为载体，实时获取、传输和处理空间信息的网络系统。空间信息网络通过组网互联，实时采集、传输和处理海量数据，实现卫星遥感、卫星导航和卫星通信的一体化集成应用与协同服务，具有覆盖范围广、灵活性高等多种特点。图1是一种空间信息网络体系架构，按其组成结构可分为：GEO卫星骨干网、运行控制网、升空平台、服务增强卫星网、接入网和地面骨干网。

2.2 低轨卫星物联网体系架构设计

考虑未来空间信息网络多功能融合的发展趋势，作为重要的空间信息服务之一，低轨卫星物联网应当涵盖在未来空间信息网络的发展框架之内^[1]。同时，低轨卫星物联网作为地面物联网的补充和延伸而存在，在体系架构设计中应当考虑其与地面现有网络的适应性与融合性。

为此，从低轨卫星物联网系统背景出发，图2给出了天地一体化信息网络中的接入网架构^[2-3]。在考虑同地面5G移动通信系统深度融合的同时，充分发挥天地一体化信息网络各层功能，研究设计天地融合低轨卫星物联网体系架构，并基于此研究物联网控制信令与数据业务分离策略、低轨卫星物联网接入与业务一体化设计方案。系统架构设想如图3所示。

以下主要针对该体系架构设计中的天基部分做简要说明。该体系架构天基部分主要由天基骨干网与天基接入网组成。从与地面5G移动通信网融合的角度出发，低轨卫星物联网与地面移动通信网共享同一核心网设施。由于该场景中天基网侧主要负责用户寻址、用户接入控制、用户会话管理等功能，因此可遵循5G控制面、数据面分离的基本思想，将核心接入与移动性管理功能（Mobility Management Function, AMF）和会话管理功能（Session Management Function, SMF）两个功能节点延伸进天基网控制平面。同时，因天基网络具有独特的资源分配、调度、管控方式，故而可将天地融合管控中心与上述两个功能节点合并，组成天基网控制平面的地面段，即天地融合协议控制网关。该网关的主要用途在于向控制平面空间段传输核心网控制面指令及天基网络资源调度指令。在本架构设计中，控制平面空间段由天基骨干网节点和天基接入网节点共同组成，但各自功能和服务对象各有侧重。考虑平台存储、处理能力及稳定性，部署于骨干网节点的天基控制器主要利用GEO骨

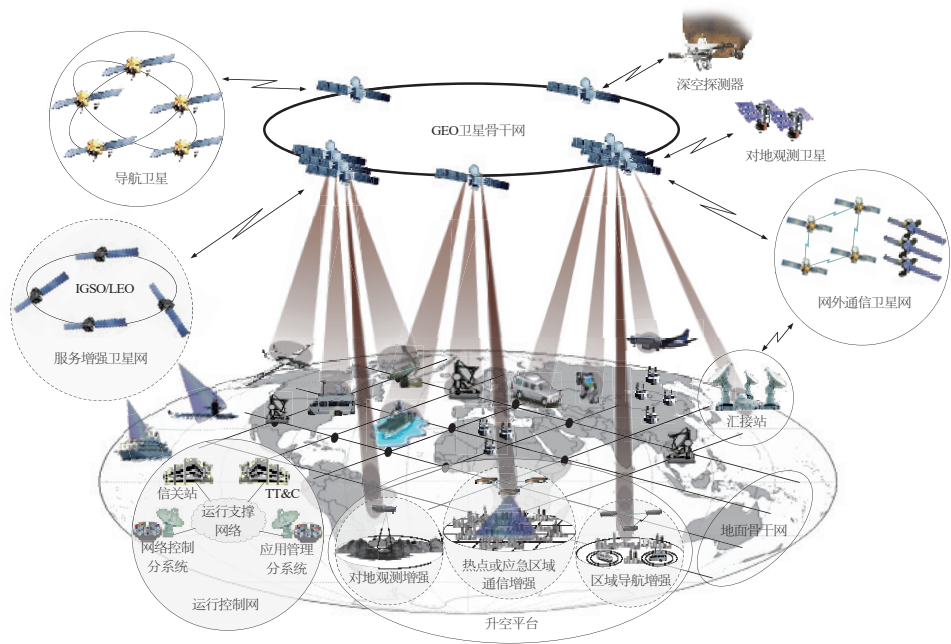


图1 空间信息网络体系架构

干节点广覆盖的广播波束对其覆盖区域内的低轨及地面终端进行控制信息的高效传输。作为对骨干网控制单元的备份和补充,部署于天基接入网节点的天基控制器将为服务热点区域及暂无骨干网节点覆盖区域传输控制信

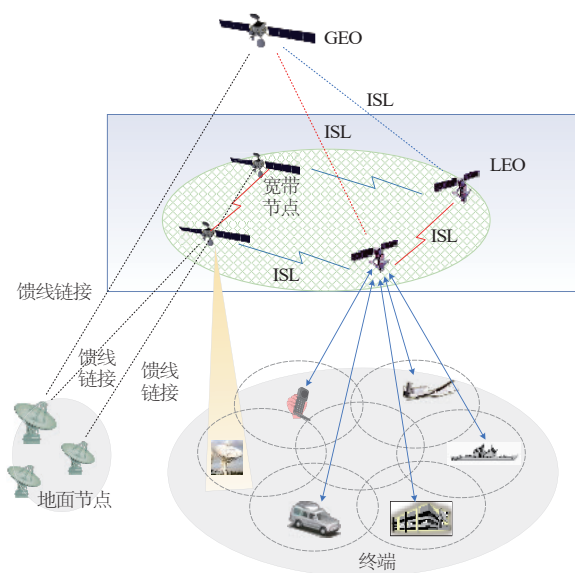


图2 天地一体化信息网络中接入网架构

息。在与骨干网覆盖区域重叠时,该段控制器受天基骨干控制器直接控制;当飞临区域无骨干网节点覆盖时,则自动启用该段控制器。天基控制面N2(星)参考点用于两段天基控制器之间的控制信令调度,用以完成整个天基接入网内的资源分配。为与地面控制平面相匹配,天基控制器部署有AMF、SMF的星载版本,同时通过资源控制单元接收资源调度指令。

星载控制器通过天基控制面N1(星)参考点,向物联网终端传输接入控制、资源调度等信息,同时部分采用面向连接传输的终端通过其自身N1(星)参考点,向天基控制器请求接入资源。在获得接入资源信息或完成接入申请后,终端向对应的接入节点发起数据传输,而后天基接入网通过天地融合数据网关与地面接入网共同使用核心网资源。

在天地融合物联网场景的终端侧,由于空、海包括偏远陆地区域与地面接入网相对独立,因此部署在上述区域的终端仅能通过天基接入网传输其业务数据;而部署于地基接入网与天基接入网重叠覆盖区域的终端,可通过自身环境感知、业务需求、终端能力等因素,灵活地选择合适的接入网进行业务传输。

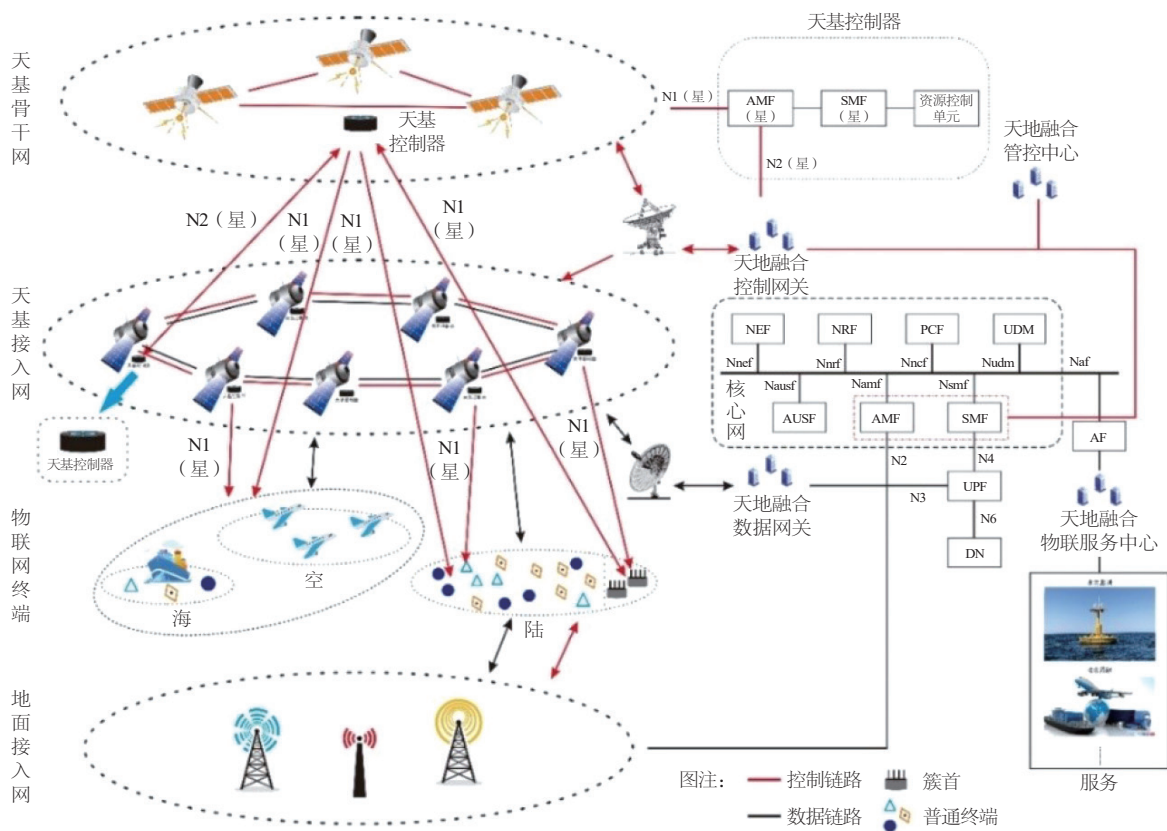


图3 天地融合低轨卫星物联网系统架构设想

由此前的分析可知，在天地融合物联网场景中，物联网终端模态、业务需求的多样性导致各类业务对网络的要求是不一样的。为此，借鉴地面5G移动通信系统服务化架构（Service Based Architecture, SBA）的部署策略，采用控制平面与数据平面相分离的方式。由于天基接入网与地面接入网共享同一核心网，因此其控制/数据分离策略应与地面移动通信网保持一致。在5G核心网中，AMF和SMF是控制面的两个主要节点，用以调度其余各节点对应不同的网络切片，满足多样化的服务需求。5G核心网的数据面（或称用户面）由用户面功能（User Plane Function, UPF）主导，其负责接入网与核心网之间的会话对接，以及接入网与第三方数据网（Data Network, DN）之间的连接。在天地融合的低轨卫星物联网中，控制平面与数据平面分离示意如图4所示。

本节主要描述基于天基网的控制面、数据面流程。

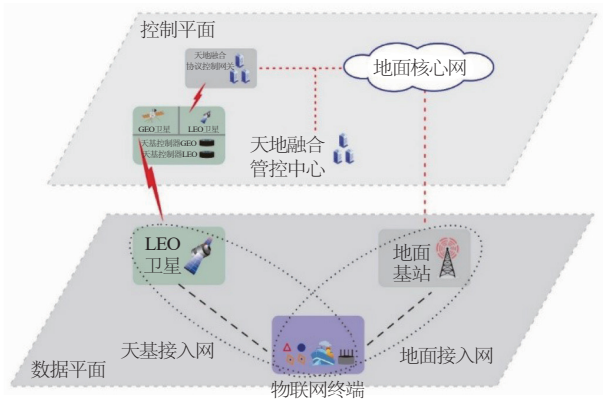


图4 控制平面与数据平面分离示意

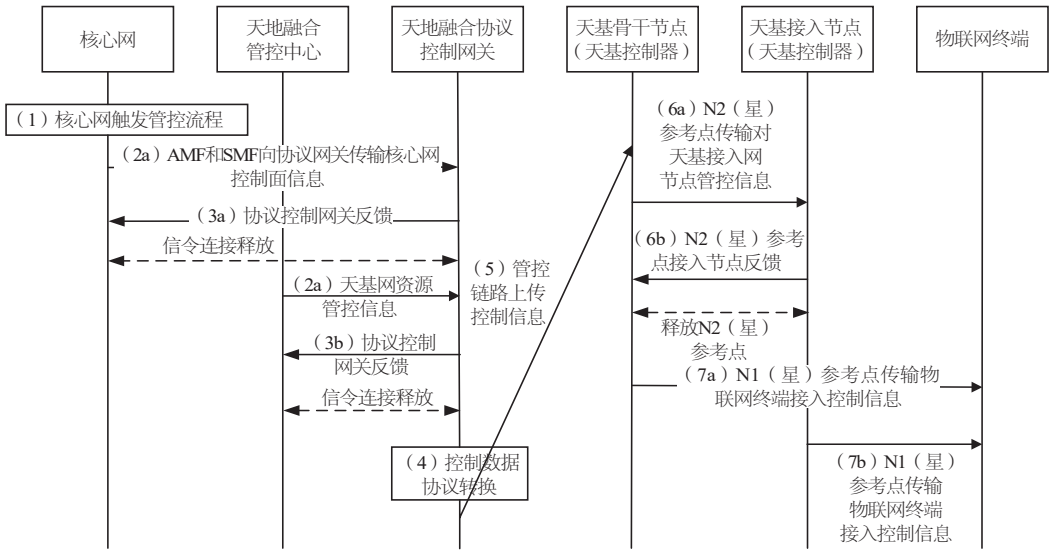


图5 天基控制面流程

根据上文的体系架构设计，天基网控制平面分为地面段和空间段，以资源管控为例，描述天基控制面流程，如图5所示。

天基控制面流程由核心网侧发起，根据前文所述，核心网的AMF及SMF节点和天地融合管控中心分别负责向天地融合协议控制网关传输核心网控制面信息和天基网资源管控信息。控制类信息数据在网关汇聚进行数据融合处理及协议转换后，由管控链路上传天基控制器。由于我国（包括部分海外基地）设站的局限性，故考虑利用骨干网天基控制器进行控制数据的接收处理。当接入网节点飞入骨干网覆盖区域时，接入网控制器通过N2（星）参考点与骨干网控制器进行控制信息交互。而后，根据双方控制器约定，分别对所承担的服务区域利用N1（星）参考点向物联网终端传输接入控制等信息。

3 天地共存时干扰分析

3.1 卫星系统间干扰

对于卫星业务而言，当采用空间频率复用技术提高系统频谱利用率时，由于天线方向图的旁瓣效应，两个波束之间不可能完全隔离，从而可能导致两个信号之间发生共信道干扰。当LEO星座卫星系统与GEO星座卫星系统之间进行频谱共享时，很有可能会发生不同系统间波束重叠的情况，因而其共信道干扰问题更加严重，主要来自下面几种情况。

- (1) 同一卫星的相邻点波束之间或多或少会有相互干扰，这种现象在点波束的边缘区域尤其明显。
- (2) 对于采用极轨道的卫星通信系统来说，卫星会

在地球两极区域集中产生非常严重的卫星之间的相互干扰,此时可通过波束的关闭来避免同频干扰,前两种情况作为系统内部的干扰,在系统设计时就需要考虑,因而在本研究中暂不考虑。

(3) 总有一段时间会出现两个系统重叠覆盖同一区域或者某一系统的发射天线主瓣对准另一系统接收天线的事件,此时,必然存在系统之间的相互干扰问题。如图6所示,由于同时有多个卫星同频率工作,加上地球站和卫星天线方向图旁瓣效应的存在,使得GEO卫星在接收到所需信号的同时,会接收到LEO系统的上行链路信号,而GEO地球站也可能接收到LEO系统的下行链路信号;同时,LEO系统会接收到GEO系统的干扰信号,因此频率共享的LEO星座卫星系统与GEO系统之间互相给对方造成干扰。

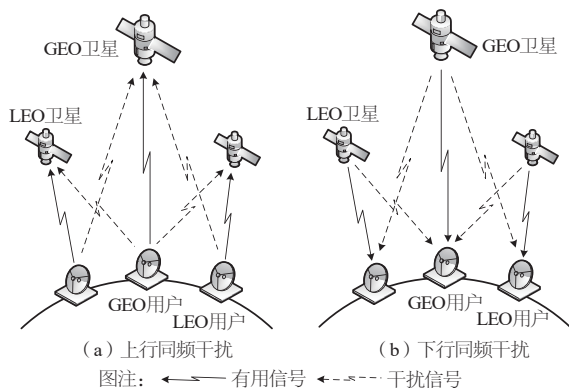


图6 LEO与GEO卫星上下行同频干扰示意

3.2 星地间干扰

卫星通信系统与地面移动通信系统间干扰产生的根本原因在于各国对于频率资源的划分规则不尽相同。由于卫星波束的广覆盖特性,其天线波束无法与实际国界线相吻合,在卫星波束跨越两个国家时,不同的频率划分规则将会导致两个系统之间的相互干扰。根据无线电规则^[4], 1 885~2 025 MHz及2 110~2 200 MHz频段被划分给国际移动通信系统(International Mobile Telecommunications, IMT)使用。该频段的使用权包括地面移动通信系统与卫星移动通信系统。目前在上述频段中,除1 980~2 010 MHz和2 170~2 200 MHz外的剩余频段均已被地面移动通信系统部署使用,而仅存60 MHz频段的划分仍处于争执阶段。

卫星通信系统与地面移动通信系统间共享频率时,双方都会对对方系统产生同频干扰。相较于地面移动通信系统,卫星通信链路传播距离远、损耗大,因此在考虑干扰问题时,通常仅认为当部分卫星用户距地面移动

通信设施较近时才会对其造成干扰^[5]。干扰情形如图7所示。另一方面,地面移动通信系统对卫星产生的干扰情形如图8所示,假定国家A将争议频段用于地面移动通信,国家B将该频段用于卫星移动通信,以卫星系统作为分析对象时,其受干扰情形为:

(1) 地面移动通信基站与终端在卫星移动通信系统上行链路对移动通信卫星产生干扰;

(2) 地面移动通信基站在卫星移动通信系统下行链路对卫星移动终端产生干扰。

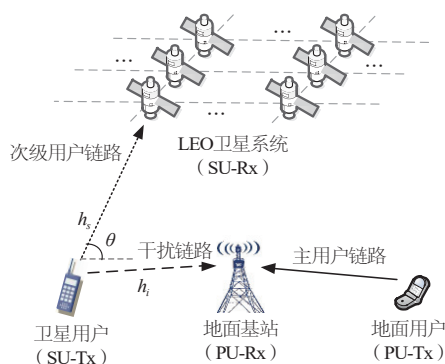


图7 卫星系统对地面系统产生干扰示意

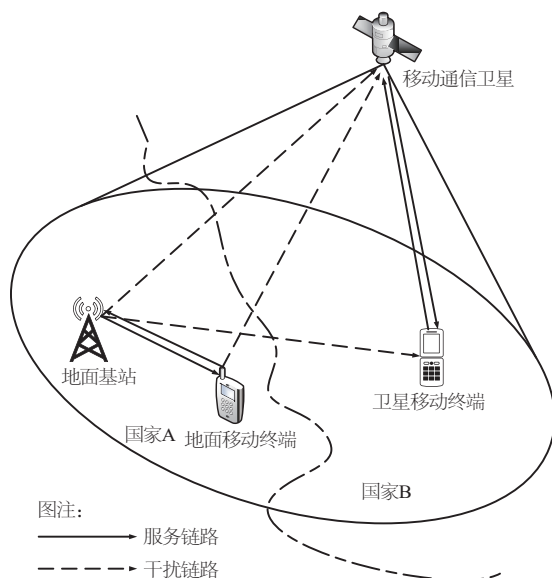


图8 地面移动通信系统对卫星产生干扰示意

3.3 分析结果

3.3.1 单星单用户之间的干扰分析

(1) 上行链路

考虑物联网终端低功耗、低成本的需求,其一般选用较低的L波段(1~2 GHz)以及S波段(2~4 GHz)的

低频段进行通信。由于采用的频率较低，卫星的波束覆盖较大，因此假定卫星在覆盖区域内的天线增益保持不变。考虑到GEO卫星相对固定，而LEO卫星一直处于运动中，因此假定GEO用户的天线保持对准GEO卫星，而LEO用户天线垂直于地面。GEO和LEO用户的天线方向图如图9所示，其余仿真参数见表1。

仿真起始时刻，两颗卫星的星历参数见表2。

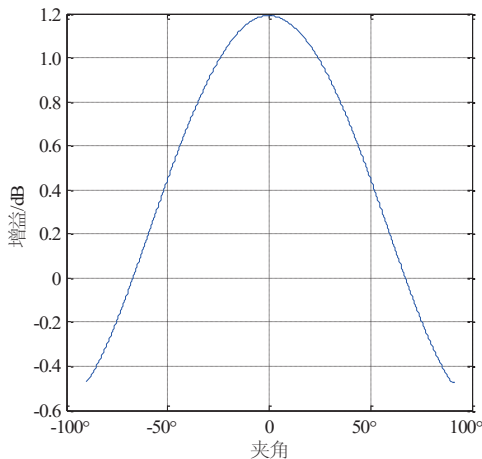


图9 GEO和LEO用户的天线方向图

表1 仿真参数

卫星系统	GEO	LEO
工作频率/GHz	1.62	1.62
卫星天线增益/dB	40	16
卫星热噪声温度/K	350	350
卫星发射功率/W	10	6
用户热噪声温度/K	320	320
用户发射功率/W	1	1
用户天线最大增益/dB	1.2	1.2
信号带宽/kHz	20	20

表2 仿真起始时刻卫星的星历参数
(2018年5月13日0:00:00)

卫星名称	半长轴/km	偏心率	倾角	升交点 赤经	近地点 幅角	真近点角
GEO	42 164.0	0	0	106.107°	0	229.363°
LEO	7 158.14	0	86.4°	251.600°	0	0

上行链路24 h内GEO卫星和LEO卫星受干扰的情况如图10所示。其中，蓝线为不受干扰时接收信号的载噪比，红线为受到干扰时接收信号的载噪比。图10（a）为GEO卫星在受到LEO用户干扰情况下的信号质量变化曲线，从中可以看出，由于GEO卫星波束较宽，GEO卫星会一直受到LEO用户的干扰。图10（b）为LEO卫星在受到GEO用

户干扰情况下的信号质量变化曲线，从中可以看出，由于LEO卫星相对地面运动，因而一颗LEO卫星与其用户的可通信时间是断续的，在LEO卫星进行通信时，也会受到干扰。

由于LEO系统可通信的时间较短，为便于观察，选取LEO系统可通信的时间段，将图10中两图时间尺度缩短，可得到信号的具体变化情况如图11所示。可以看出，二者之间的干扰影响很大，而且在通信的过程中一直存在，给GEO卫星的信号质量带来近15 dB的衰减，对LEO卫星信号质量会造成十几甚至二十吉字节的衰减。

(2) 下行链路

现对如下场景进行分析：GEO卫星位于105° E上空，LEO卫星轨道高度为780 km，轨道倾角为86.4°，LEO用户与GEO用户位置相同，均位于赤道，坐标为（0° ,105° E）。天线指向与上行链路分析时相同，其余仿真参数同表1。

下行链路GEO用户和LEO用户受干扰的情况如图12所示。图12（a）中，在受到LEO卫星干扰的情况下，GEO用户的信号质量产生了十几甚至二十吉字节的衰减，随着LEO卫星的运动在不断变化，距离较近时干扰大，较远时干扰小。图12（b）中，由于LEO卫星相对地面运动，因而一颗LEO卫星与其用户的可通信时间是断续的，在LEO用户进行通信时，GEO卫星给LEO用户的信号质量带来近15 dB的衰减。

3.3.2 用户位于不同纬度位置的干扰分析

(1) 上行链路

由于GEO卫星位于赤道上空，而GEO用户的天线设定为对准GEO卫星，用户位于不同的纬度位置影响天线的指向，从而对卫星的接收增益造成影响，因而下面对用户位于不同纬度位置的干扰进行分析。LEO用户与GEO用户位置相同，经度均为105° E，纬度逐渐同步增加。地面用户与对应的卫星通过上行链路进行通信。GEO卫星和LEO卫星系统的具体仿真参数保持不变。上行链路不同纬度的卫星信号质量如图13~图15所示。

由图13~图15可以看出，随着用户位置纬度的提升，GEO卫星未受干扰的原信号质量会随着卫星和用户之间距离的增加而有所减小，GEO卫星受干扰的信号质量会有略微上升。LEO卫星的信号质量会有所缓解，尤其是在高纬度地区，此时LEO和GEO系统的通信链路之间形成一定的夹角，从而对LEO卫星造成的干扰有所缓解。但是，应当看出，用户位于不同纬度的位置带来的影响很小，信号质量变化也很小。

(2) 下行链路

同样地，对用户位于不同纬度位置的下行链路

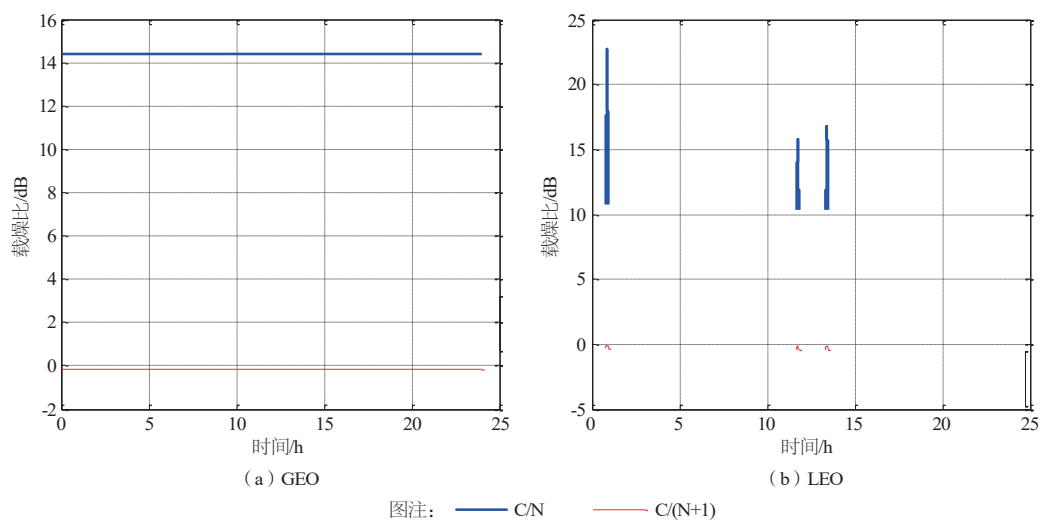


图10 上行链路24 h内GEO卫星和LEO卫星受干扰情况

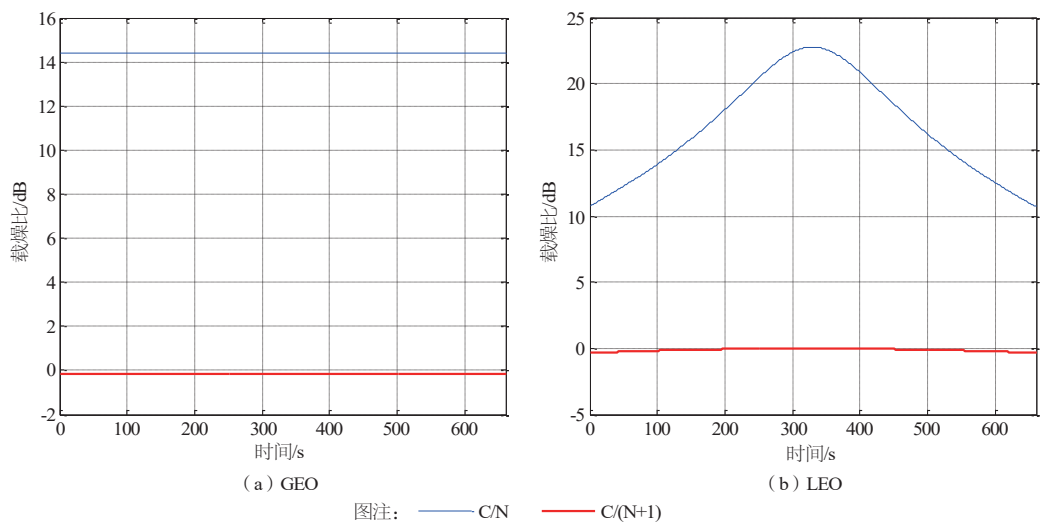


图11 信号的具体变化情况

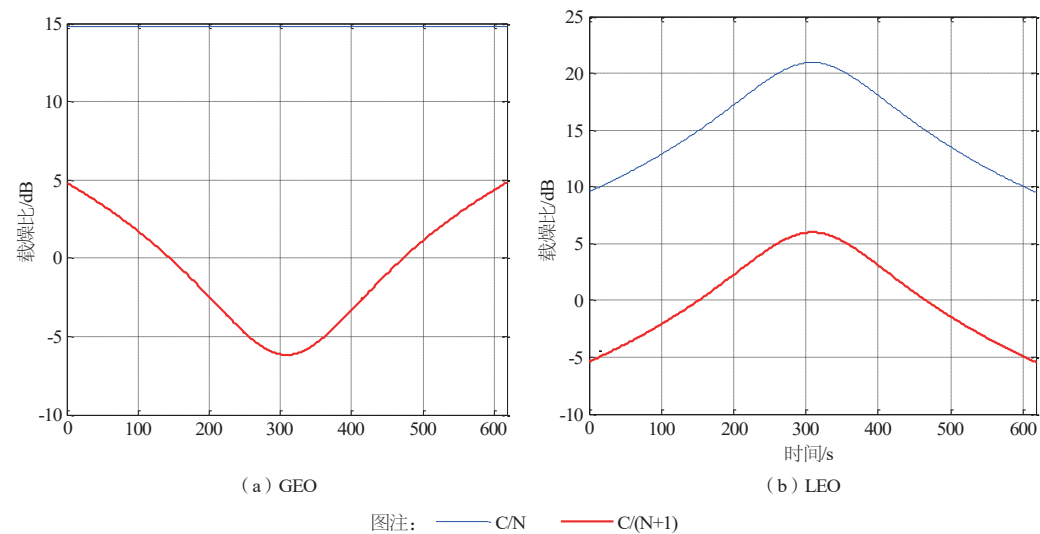


图12 下行链路GEO用户和LEO用户受干扰情况

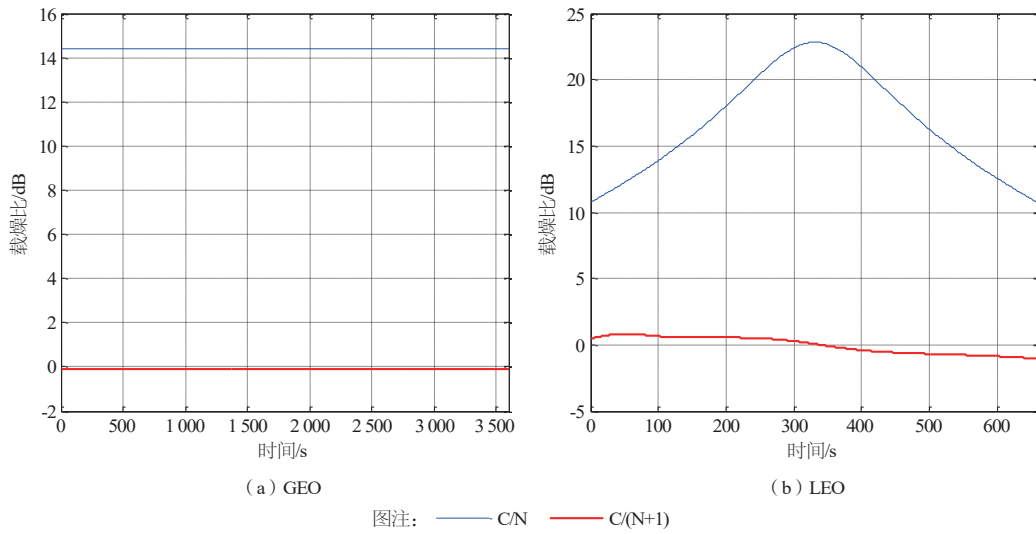


图13 上行链路卫星信号质量 (用户纬度: 10° N)

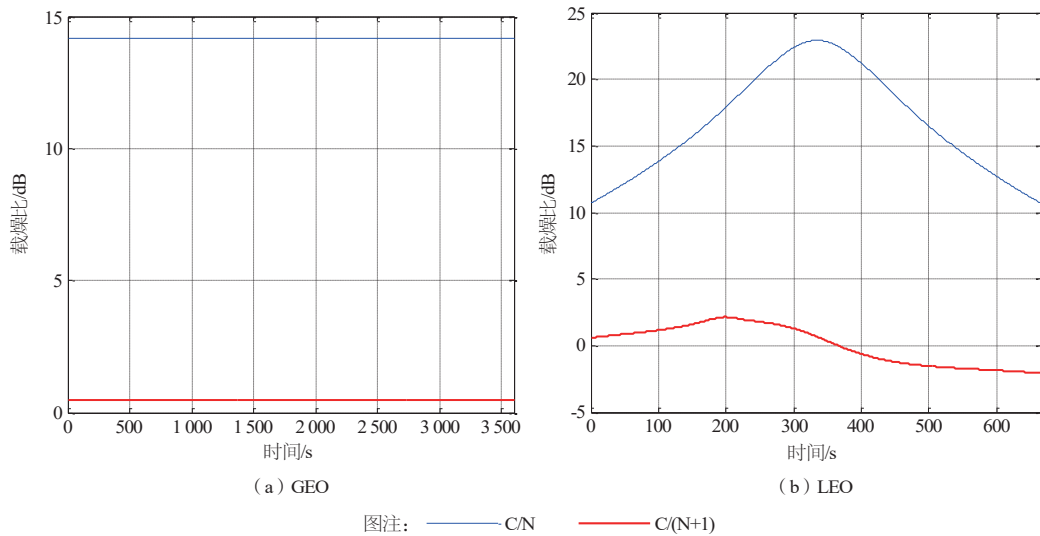


图14 上行链路卫星信号质量 (用户纬度: 30° N)

进行分析。LEO用户与GEO用户位置相同，经度均为105° E，纬度逐渐同步增加。由图16~图18可以看出，与上行链路类似，随着用户位置纬度的提升，GEO和LEO用户的信号质量会逐渐变好，尤其当纬度达到50° 时，不同系统之间的同频干扰影响很小，几乎可以忽略不计。

这是由于地面用户的天线一直对准各自的卫星，GEO系统的通信链路相对朝南，而LEO系统的通信链路仍然位于用户头顶附近，两个链路之间形成隔离角，干扰链路的接收天线增益很低，从而两个系统之间的干扰很小。

由图16~图18可以进一步看出，随着用户位置纬度的提升，GEO用户未受干扰的原信号质量会随着卫星和用户之间距离的增加而有所减小，GEO卫星受干扰的

信号质量会有略微上升，LEO卫星的信号质量也略微有所上升；但是，用户位于不同纬度的位置带来的影响很小，信号质量变化也很小。

3.3.3 LEO星座与GEO系统间干扰分析

仿真场景星座设计参考美国铱星 (Iridium) 系统的轨道参数。仿真所用窄带LEO星座卫星通信系统空间分系统由66颗LEO卫星组成，依照Walker星座进行构建，卫星分布在6个轨道面上，每个轨道面上部署11颗卫星，LEO卫星轨道高度为780 km，轨道倾角为86.4°，在波束边缘通信仰角为8° 时，可实现对全球的无缝覆盖。GEO卫星系统由3颗GEO卫星组成，可实现对中低纬度地区的无缝覆盖。

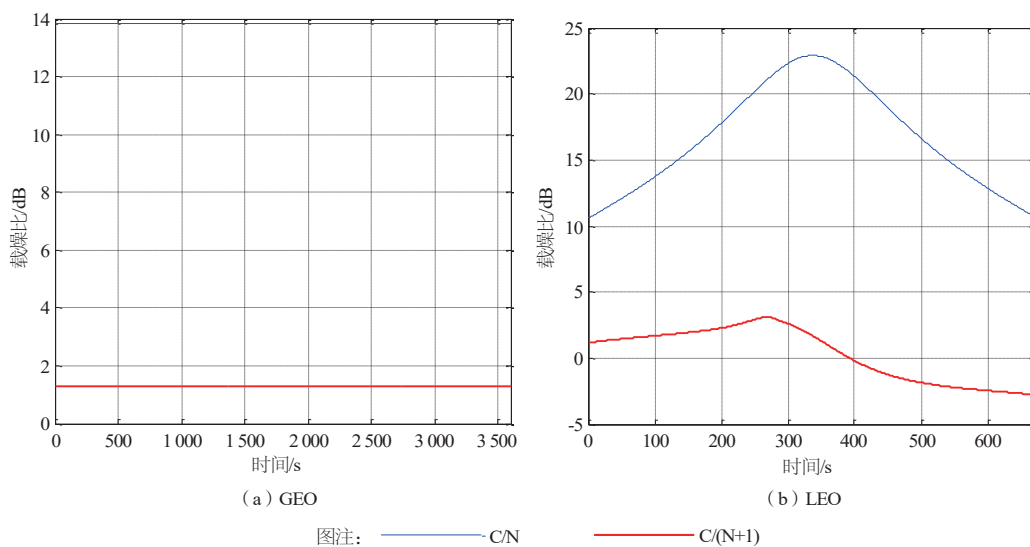


图15 上行链路卫星信号质量 (用户纬度: 50° N)

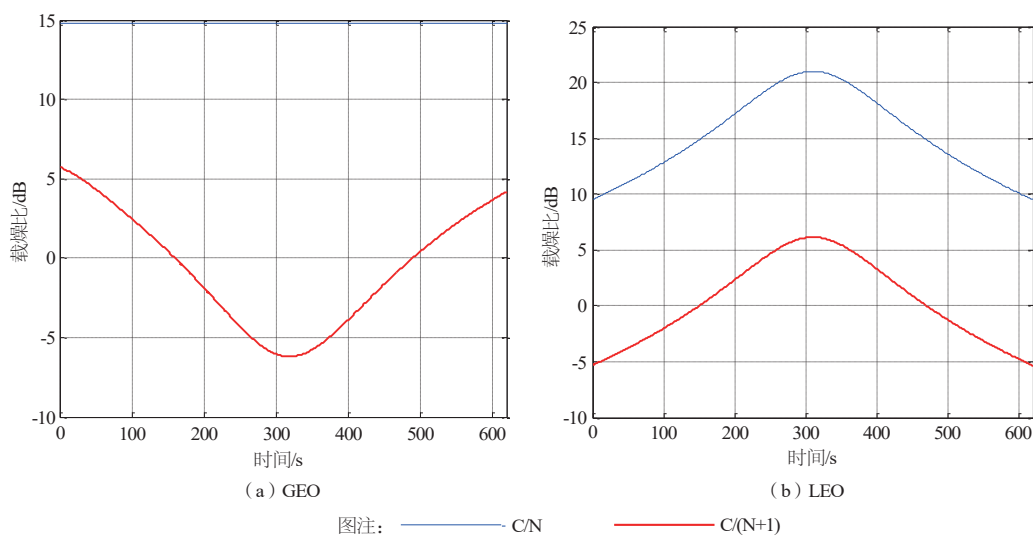


图16 下行链路用户信号质量 (用户纬度: 10° N)

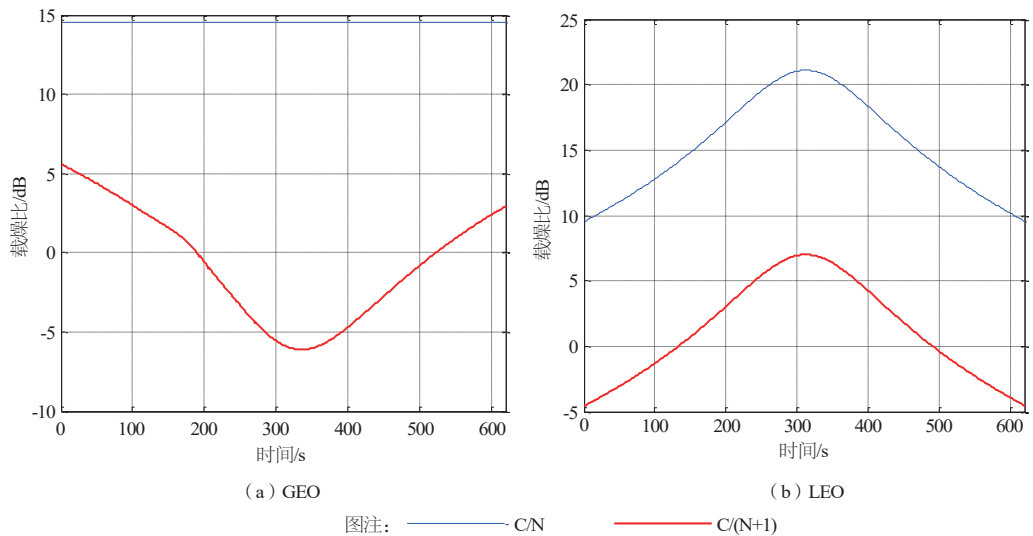


图17 下行链路用户信号质量 (用户纬度: 30° N)

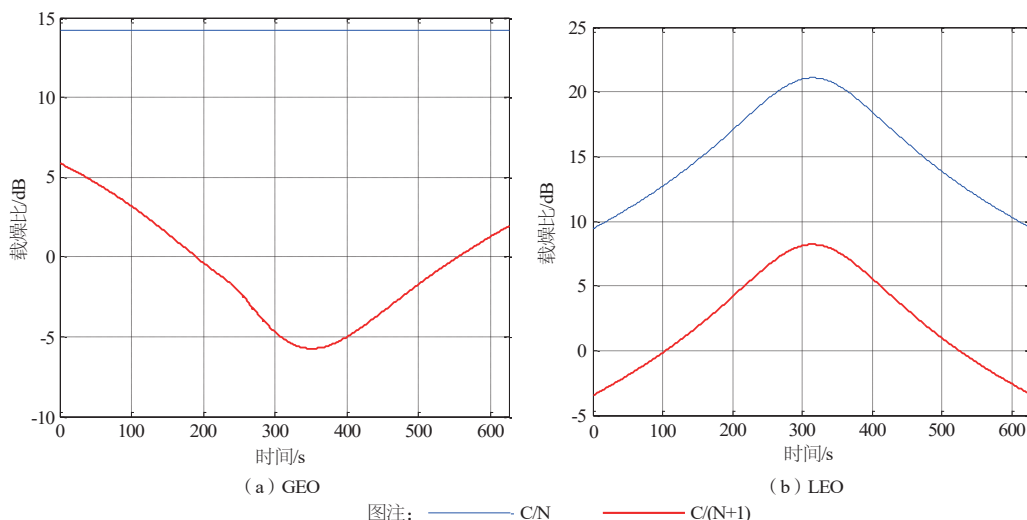


图18 下行链路用户信号质量 (用户纬度: 50° N)

(1) 上行链路

下面针对窄带LEO星座系统与GEO系统间的上行链路进行干扰分析。因为LEO星座中的卫星互相之间具有相似性，且卫星作为上行链路的接收端，所以现选取其中一颗LEO卫星作为分析对象，同理选择一颗GEO卫星，对多个GEO和LEO用户对系统的干扰展开研究。仿真中，GEO用户分布在中低纬度地区，用户之间纬度和经度皆间隔 15° ，最高纬度 45° ，LEO用户分布在全球区域，用户之间纬度皆间隔 12° ，中低纬度（南北纬 36° ）的用户之间经度间隔 12° ，其余地区用户之间经度间隔 $18^\circ \sim 36^\circ$ 。地面用户与卫星通过上行链路进行通信，GEO用户的天线保持对准GEO卫星，LEO用户天线垂直于地面，LEO卫星的天线则根据运动的轨迹在不同的LEO用户之间进行切换。具体仿真参数与前文相同。

图19和图20分别为24 h范围内上行链路中GEO和LEO卫星接收到的信号质量变化情况，从中可以看出，由于频率较低，波束较宽，受到干扰的影响很大。其中，由于GEO卫星覆盖范围广，其接收到的信号质量下降了30 dB左右，且一直遭受干扰；同时受到干扰的强烈影响，除了南北极区，信号质量下降了20 dB左右。

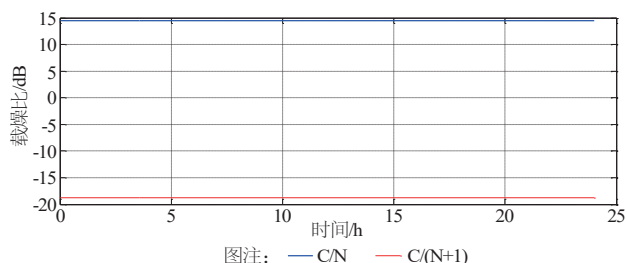


图19 24 h内上行链路中GEO卫星接收到的信号质量变化情况

(2) 下行链路

下面针对窄带LEO星座系统与GEO系统间的下行链路进行干扰分析，由于LEO通信系统对全球实现覆盖，而GEO卫星对中低纬度地区实现覆盖，作为下行链路的接收端，用户分布的经度范围对干扰没有影响，现分别针对位于不同纬度位置的用户进行分析，对多个GEO和LEO卫星对系统的干扰展开研究。地面用户与卫星通过下行链路进行通信，GEO用户的天线保持对准GEO卫星，LEO用户天线垂直于地面，LEO卫星的天线则根据运动的轨迹在不同的LEO用户之间进行切换。

由图21中GEO和LEO用户接收到的信号质量的累积分布可以看出，用户的纬度位置对于GEO用户的信号质量影响不明显，而LEO用户的信号质量会随着纬度的上升有所上升，但总体而言，无论是GEO用户还是LEO用户，受到干扰的影响很大。

3.3.4 星地间干扰分析

本节主要分析地面移动通信系统对天地融合低轨卫星物联网系统中LEO接入节点的干扰情形，仿真参数参照ITU-R M.1850建议书中明确的IMT卫星部分空中接口定义。

LEO卫星所受集总干扰水平如图22所示，其中考虑地面基站 (Base Station, BS) 有3种基本部署方式，分别为乡村宏部署 (Macro Rural, MR)、郊区宏部署 (Macro Suburban, MS)、市区宏部署 (Macro Urban, MU)。由于单颗卫星覆盖范围的降低，从图22中可以清晰地反映出在高仰角条件下，即使考虑最恶劣的单一部署环境，地面终端 (User Equipment, UE) 对卫星的影响将降至容限之下，但地面基站对卫星的干扰仍处于不可接受范畴内。

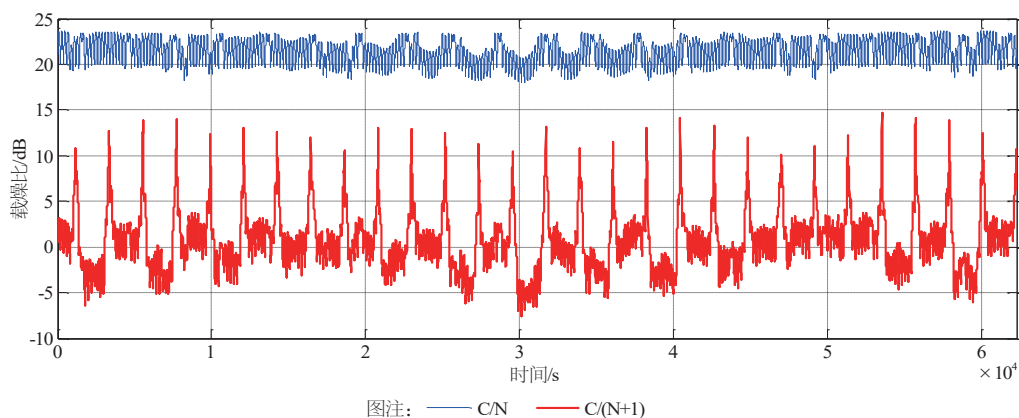


图20 24 h内上行链路中LEO卫星接收到的信号质量变化情况

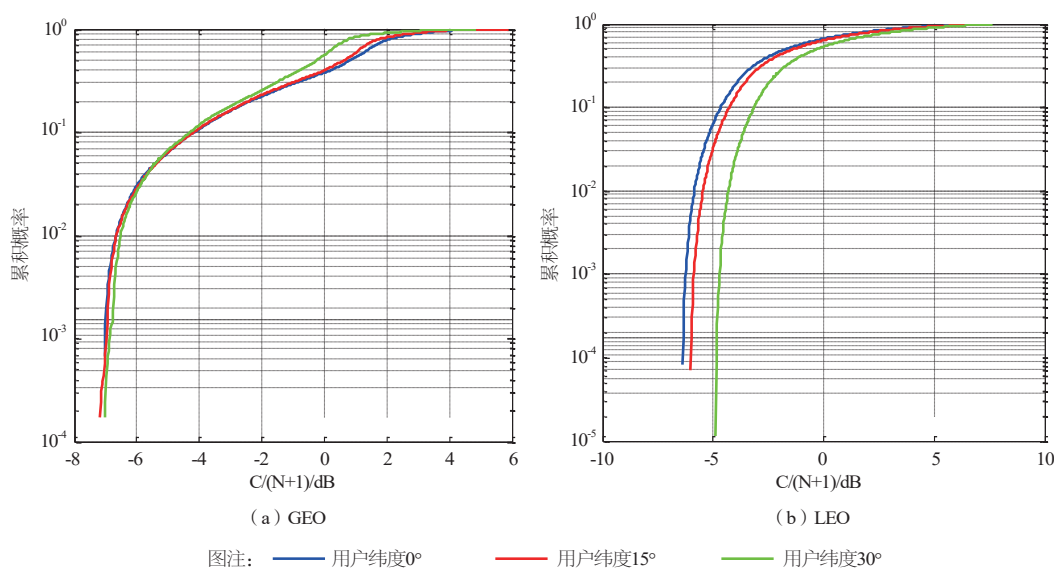


图21 GEO与LEO用户接收到的信号质量的累积分布

4 结束语

本文构思了天地融合低轨卫星物联网系统的体系架构,并对星地共存干扰场景进行了分析。首先,在空间信息网络的大背景下,详细分析了天地融合场景下低轨卫星物联网系统的体系架构,给出了低轨卫星物联网系统各部分组成、功能以及相互之间的连接关系。借鉴地面5G移动通信技术的先进理念,在体系架构设计中采用了控制平面与数据平面分离的思路。然后,对未来潜在的卫星系统间、卫星系统与地面系统间干扰场景进行分析,初步分析结果显示在卫星系统间,由于物联网系统所用频段较低,导致波束较宽,若不采取隔离措施,星间干扰难以避免;星地系统间,地面终端对卫星系统所产生的影响可以忽略,但地面基站对卫星系统将造成不

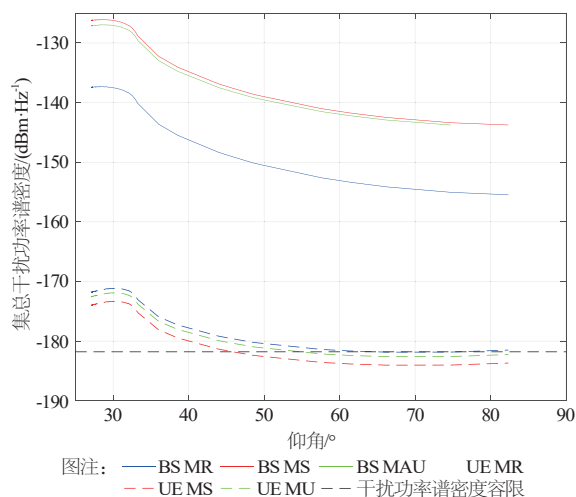


图22 LEO卫星所受集总干扰水平

可忽略的影响，需要通过合理方式进行规避，为未来天地一体化物联网发展提供有效参考。

参考文献：

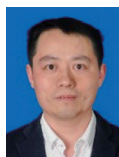
- [1] BACCO M, BOERO L, CASSARA P, et al. IoT applications and services in space information networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 31-37.
- [2] 吴曼青, 吴巍, 周彬, 等. 天地一体化信息网络总体架构设想[J]. 卫星与网络, 2016(3): 30-36.
WU M Q, WU W, ZHOU B, et al. The overall framework of the satellite terrestrial integrated information network[J]. Satellites and Networks, 2016 (3): 30-36.
- [3] YAO H, WANG L, WANG X, et al. The space-terrestrial integrated network: An overview[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 178-185.
- [4] MARCUS M. WRC-19 issues: A survey[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(1): 2-3.
- [5] ROIVAINEN A, YLITALO J, KYROLAINEN J, et al.

Performance of terrestrial network with the presence of overlay satellite network[C]//2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 5089-5093.

[作者简介]



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。



丁晓进（1981—），男，南京邮电大学物联网学院副教授，主要研究方向为卫星通信、卫星物联网、机器学习等。



曲至诚（1992—），男，南京邮电大学通信与信息工程学院博士生，主要研究方向为卫星通信、空间信息网络等。