



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113014305 B

(45) 授权公告日 2023. 02. 03

(21) 申请号 202110200644.5

(22) 申请日 2021.02.23

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113014305 A

(43) 申请公布日 2021.06.22

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学
地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

(72) 发明人 贾敏 张曦木 顾学迈 郭庆

(74) 专利代理机构 哈尔滨华夏松花江知识产权
代理有限公司 23213

专利代理师 岳昕

(51) Int. Cl.

H04B 7/185 (2006.01)

H04W 16/14 (2009.01)

H04W 16/22 (2009.01)

H04W 28/24 (2009.01)

(56) 对比文件

CN 102474749 A, 2012.05.23

EP 3657837 A1, 2020.05.27

WO 2021002866 A1, 2021.01.07

李国权等.基于干扰效率多蜂窝异构无线网络最优基站选择及功率分配算法.《电子与信息学报》.2020,(第04期),

Min Jia et.al.Intelligent Resource Management for Satellite and Terrestrial Spectrum Shared Networking toward B5G.《IEEE Wireless Communications》.2020,第27卷(第01期),

Min Jia 等.Energy Efficient Cognitive Spectrum Sharing Scheme Based on Inter-Cell Fairness for Integrated Satellite-Terrestrial Communication Systems.《IEEE》.2018,

钟旭东等.基于合作博弈的认知卫星网络信道分配与上行功率控制算法.《计算机科学》.2020,(第01期),

刘玉涛等.认知无线电中的功率和频谱联合分配算法.《哈尔滨工业大学学报》.2011,(第01期), (续)

审查员 刘旭

权利要求书2页 说明书16页 附图6页

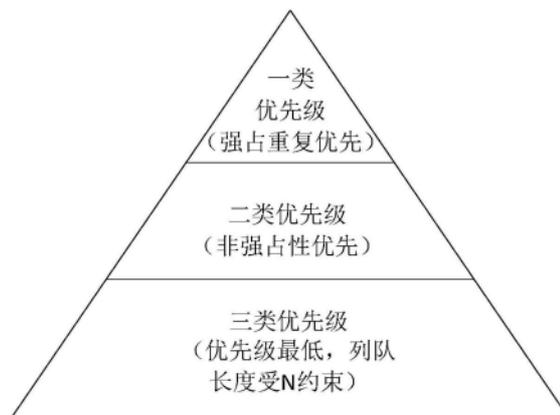
(54) 发明名称

基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法

(57) 摘要

基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法,涉及信息与通信技术领域,是为了解决目前星地频谱共享网络资源受限的问题,以及在频谱效率及干扰估计方面存在或部分存在的资源利用率不高的问题,本发明兼顾延迟约束,干扰约束和资源约束,提出了基于二元凸优化的OEJR方案来限制干扰并提高能源效率,并分析了其复杂性.限制实际分配方差的上限和每个波束的所需容量,基于最大误差最小保证不同波束之间的公平性.仿真结果表明,在牺牲了一小部分计算复杂度的前提下,所提算法的总体能效,吞

吐量和资源利用率得到了提高。



CN 113014305 B

[接上页]

(56) 对比文件

王伟. 卫星互联网跨层调度及资源分配方法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(电子期刊)》.2014, (第03期),

马腾滕. 虚拟无线接入网资源分配技术研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(电子期

刊)》.2022, (第01期),

贾敏 等. 基于业务优先级的认知卫星网络频谱分配方法.《通信学报》.2019,

董亚男. 基于凸优化理论的D2D通信系统公平性资源分配研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(电子期刊)》.2019,

1. 基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法,其特征是:它包括以下步骤:

步骤一、生成三类接入网络的优先级列队分别为:第一类接入网络的优先级列队L1、第二类接入网络的优先级列队L2和第三类网络接入列队L3;

其中:第一类接入网络的优先级列队L1的已接入网络的用户的数量为 i_1 、待接入网络的用户的数量为 h ;

其中:第二类接入网络的优先级列队L2的已接入网络的用户的数量为 j 、待接入网络的用户的数量为 l ;

其中:第三类接入网络的优先级列队L3的已接入网络的用户的数量为 k 、待接入网络的用户的数量为 n ;

所述 i_1 、 h 、 j 、 l 、 k 和 n 均为正整数;

步骤二、基于比例公平准则优先接入第一类接入网络的优先级列队L1直至 $h=0$;

步骤三、若 $n>N$,基于比例公平准则接入第三类接入网络的优先级列队L3,若 $n\leq N$ 且 $l>0$,则基于比例公平准则接入第二类接入网络的优先级列队L2;所述 N 为迭代次数,所述 N 为正整数;

步骤四、初始化对偶变量初始值为 ρ^1 、 λ^1 、 μ^1 、 v^1 ,相应迭代步长 Δ^p 、 Δ^λ 、 Δ^μ 、 Δ^v ,最大迭代次数 N_{iter} 和精度 ε ;

步骤五、外循环体循环步骤:令迭代次数指示变量的初始值 i 为1,设定各点波束的初始带宽为 $B_m^i = B_{total}/M$,初始功率为 $P_m^i = P_{total}/M$,其中 $m=1, \dots, M$; M 为点波束个数,所述 M 为正整数;参数 B_{total} 和 P_{total} 的含义分别为:总带宽和总功率;

步骤六、外循环体中的内循环体步骤;

步骤七、将 ρ^i 、 λ^i 、 μ^i 、 v^i 、 B^i 及 P^i 输入,更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} ;

步骤八、二项逼近迭代步骤,具体为:更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} ;

步骤九、将 ρ^i 、 λ^i 、 μ^i 、 v^i 、 B^i 及 P_{opt}^{i+1} 的值代入迭代函数,计算优化带宽 B_{opt}^{i+1} ;

步骤十、二项逼近迭代,具体为:更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} ,完成一次基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化;

步骤十一、更新内循环迭代因子,结束内循环;

步骤十二、将 ρ^i 、 λ^i 、 μ^i 、 v^i 、 B_{opt}^{i+1} 及 P_{opt}^{i+1} 更新对偶变量;

步骤十三、在出现外循环结束条件时,结束外循环并将步骤十获得的分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} 作为资源优化结果输出。

2. 根据权利要求1所述的基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法,其特征在于步骤十一中,内循环结束条件为:误差的绝对值小于0.0001。

3. 根据权利要求2所述的基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法,其特征在于步骤十三中,结束外循环的条件是:当 $\left|P_{total} - \sum_{i=1}^M P_{opt}^{i+1}\right| < \varepsilon$ 、 $\left|B_{total} - \sum_{i=1}^M B_{opt}^{i+1}\right| < \varepsilon$ 、 $P_{total} \geq \sum_{i=1}^M P_{opt}^{i+1}$

和 $B_{total} \geq \sum_{i=1}^M B_{opt}^{i+1}$ 同时满足或者 $i = N_{iter}$ 。

4. 根据权利要求3所述的基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法,其特征在于步骤十三中,在未出现外循环结束条件时,则令 $i = i+1$,返回步骤五继续进行迭代。

5. 根据权利要求4所述的基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法,其特征

在于步骤十二中,将 ρ^i 、 λ^i 、 μ^i 、 v^i 、 B_{opt}^{i+1} 及 P_{opt}^{i+1} 更新对偶变量采用的是现有次梯度法实现的。

基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及信息与通信技术领域,具体涉及在星地频谱共享网络中对既能保证能够按照优先级模型接入,又能抑制组件间干扰的最优能效资源管理方法的研究。

背景技术

[0002] 在产业界,未来5G通信和卫星网络相结合,可以充分发挥卫星和地面各自的优势,相互弥补各自的不足,大大提高网络终端可容纳的用户数量以及用户体验。在远洋通信、应急通信、军用通信、防汛救灾、科考勘探等,应用空间巨大。英国电信集团(BT)首席网络架构师NeilMcRae对6G通信进行了展望,他认为6G将是“5G+卫星网络”,在5G的基础上集成卫星网络来实现全球覆盖,并有望在2025年得到商用。世界上第一颗商用卫星早在1965年便由美国发射成功,从那以后,卫星通信技术开始发展起来,并取得越来越广泛的应用。如今,多种通信服务都应用到了通信卫星,卫星通信不仅在军事领域起到关键作用,也影响着人类的生产、生活方式。近年来波音、空客、亚马逊、Google、Facebook、SpaceX等高科技企业纷纷投资卫星通信领域,提出了OneWeb、Starlink等十余个低轨卫星通信系统方案,目标是实现全球互联网覆盖,若这些方案得以实施,未来五年内将有20000余颗低轨卫星进入太空。国内低轨卫星通信系统建设提上日程,将开启千亿市场面对国外发展迅猛的低轨卫星通信系统,国内航天科技和航天科工集团分别提出了“鸿雁”和“虹云”卫星通信星座计划,我国亦将进入卫星与地面联合通信时代。在学术界,2018年11月,我国科技部拟将“与5G/6G融合的卫星通信技术与原理验证”课题,列入国家重点研发计划“宽带通信和新型网络”重点专项中,说明卫星和地面联合通信在未来通信领域的重要性,卫星通信将在5G/6G通信时代有广阔的应用前景。随着卫星通信系统的快速发展,人们对由通信系统所提供业务的多样性及业务质量提出了更高的要求。近年来,卫星通信系统和地面通信系统都得到了高速发展,然而这些通信方式也存在着其固有不足,通过卫星通信与地面通信的有机组合形成星地一体化系统可以有效的弥补单一系统的不足之处,从而为用户提供无论何时何地的高质量通信。从民用通信的发展趋势来看,通信正从少量业务接入走向超密集组网,星地频谱共享的资源分配方案将成为未来的主流。卫星和地面网络的频谱共享来源于卫星通信和地面通信本身的发展需求。

发明内容

[0003] 本发明是为了解决目前星地频谱共享网络资源受限的问题,以及在频谱效率及干扰估计方面存在或部分存在的资源利用率不高的问题,从而提供一种基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法。

[0004] 一种基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法,它包括以下步骤:

[0005] 步骤一、生成三个优先级列队等待数量分别是L1列队h,L2列队l,L3列队n以及网络中接入的三类优先级数量分别是i,j,k;

[0006] 步骤二、优先基于比例公平准则接入L1队列至h=0;

[0007] 步骤三、若 $n > N$, 基于比例公平准则接入L3, 若 $n \leq N$ 且 $l > 0$ 则基于比例公平准则接入L2;

[0008] 步骤四、对偶变量初始值为 $\rho^1, \lambda^1, \mu^1, v^1$, 相应迭代步长 $\Delta^\rho, \Delta^\lambda, \Delta^\mu, \Delta^v$, 最大迭代次数 N_{iter} 和精度 ϵ ;

[0009] 步骤五、外循环体: 令迭代次数指示变量 $i = 1$, 设定各点波束的初始带宽为 $B_m^i = B_{total}/M$, 初始功率为 $P_m^i = P_{total}/M$, 其中 $m = 1, \dots, M$;

[0010] 步骤六、内循环体执行以下步骤:

[0011] 步骤七、将 $\rho^i, \lambda^i, \mu^i, v^i, B^i$ 及 P^i 输入, 更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} ;

[0012] 步骤八、二项逼近迭代, 更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} 。

[0013] 步骤九、将 $\rho^i, \lambda^i, \mu^i, v^i, B^i$ 及 P_{opt}^{i+1} 的值代入迭代函数, 计算优化带宽 B_{opt}^{i+1} ;

[0014] 步骤十、二项逼近迭代, 更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} 。

[0015] 步骤十一、更新内循环迭代因子, 内循环结束条件: 误差的绝对值小于0.0001结束内循环;

[0016] 步骤十二、使用次梯度法, 将 $\rho^i, \lambda^i, \mu^i, v^i, B_{opt}^{i+1}$ 及 P_{opt}^{i+1} 更新对偶变量;

[0017] 步骤十三、外循环结束条件, 如果 $\left| P_{total} - \sum_{i=1}^M P_{opt}^{i+1} \right| < \epsilon$ 、 $\left| B_{total} - \sum_{i=1}^M B_{opt}^{i+1} \right| < \epsilon$ 及

$P_{total} \geq \sum_{i=1}^M P_{opt}^{i+1}$, $B_{total} \geq \sum_{i=1}^M B_{opt}^{i+1}$ 同时满足或者 $i = N_{iter}$, 则结束大循环转到输出, 否则 $i = i + 1$, 转

步骤五继续进行迭代。

[0018] 本发明具有以下特点和显著进步:

[0019] 1、本发明在卫星与地面频谱共享网络频谱集成的基础上, 建立了干扰模型, 分析了卫星与地面频谱共享网络的干扰机制, 并进行覆盖分析;

[0020] 2、结合比例公平算法, 提出了基于多类排队模型的联合非抢占式和抢占式资源分配方案, 以确保一流业务的抢占重复优先权。与三类服务相比, 具有N策略的二类服务非抢占式接入网络。利用生成函数方法, 得出各类的队列长度分布, 平均等待时间及其他一些相关性能。仿真结果表明, J-NPAP算法可以保证一流服务的绝对优先级, 并且由于N策略, 队列长度不会太长;

[0021] 3、本发明兼顾延迟约束, 干扰约束和资源约束, 提出了基于二元凸优化的OEJR方案来限制干扰并提高能源效率, 并分析了其复杂性。限制实际分配方差的上限和每个波束的所需容量, 基于最大误差最小保证不同波束之间的公平性。仿真结果表明, 在牺牲了一小部分计算复杂度的前提下, 所提算法的总体能效, 吞吐量和资源利用率得到了提高。

附图说明

[0022] 图1是星地频谱共享网络中业务优先级模型示意图;

[0023] 图2是星地频谱共享网络中组件间的干扰场景示意图;

[0024] 图3是第一类优先级业务接入数量随可用信道数量变化情况仿真示意图;

[0025] 图4是基于加权优先级算法三类优先级业务接入数量随可用信道数量变化情况仿真示意图;

- [0026] 图5是基于J-NPAP的比例公平算法三类优先级业务接入数量随可用信道数量变化情况仿真示意图；
- [0027] 图6是三类优先级业务接入数量随可用信道数量变化情况仿真示意图；
- [0028] 图7是传统匈牙利算法三类优先级业务接入数量随可用信道数量变化情况仿真示意图；
- [0029] 图8是五种算法下系统容量对比仿真示意图；
- [0030] 图9是五种算法下系统能效对比仿真示意图；
- [0031] 图10是五种算法下分配的容量与业务需求的方差对比仿真示意图；

具体实施方式

[0032] 具体实施方式一、基于优先级准入控制的功率带宽联合资源优化方法包括以下步骤

[0033] 步骤一、生成三个优先级列队等待数量分别是L1列队h,L2列队l,L3列队n以及网络中接入的三类优先级数量分别是i,j,k；

[0034] 步骤二、优先基于比例公平准则接入L1队列至h=0；

[0035] 步骤三、若n>N,基于比例公平准则接入L3,若n≤N且l>0则基于比例公平准则接入L2；

[0036] 步骤四、对偶变量初始值为 $\rho^1, \lambda^1, \mu^1, v^1$,相应迭代步长 $\Delta^p, \Delta^\lambda, \Delta^\mu, \Delta^v$,最大迭代次数 N_{iter} 和精度 ε ；

[0037] 步骤五、外循环体:令迭代次数指示变量 $i=1$,设定各点波束的初始带宽为 $B_m^i = B_{total}/M$,初始功率为 $P_m^i = P_{total}/M$,其中 $m=1, \dots, M$ ；

[0038] 步骤六、内循环体执行以下步骤:

[0039] 步骤七、将 $\rho^i, \lambda^i, \mu^i, v^i, B^i$ 及 P^i 输入,更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} ；

[0040] 步骤八、二项逼近迭代,更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} 。

[0041] 步骤九、将 $\rho^i, \lambda^i, \mu^i, v^i, B^i$ 及 P_{opt}^{i+1} 的值代入迭代函数,计算优化带宽 B_{opt}^{i+1} ；

[0042] 步骤十、二项逼近迭代,更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} 。

[0043] 步骤十一、更新内循环迭代因子,内循环结束条件:误差的绝对值小于0.0001结束内循环；

[0044] 步骤十二、使用次梯度法,将 $\rho^i, \lambda^i, \mu^i, v^i, B_{opt}^{i+1}$ 及 P_{opt}^{i+1} 更新对偶变量；

[0045] 步骤十三、外循环结束条件,如果 $\left| P_{total} - \sum_{i=1}^M P_{opt}^{i+1} \right| < \varepsilon$ 、 $\left| B_{total} - \sum_{i=1}^M B_{opt}^{i+1} \right| < \varepsilon$ 及

$P_{total} \geq \sum_{i=1}^M P_{opt}^{i+1}$ 、 $B_{total} \geq \sum_{i=1}^M B_{opt}^{i+1}$ 同时满足或者 $i = N_{iter}$,则结束大循环转到输出,否则 $i = i+1$,转

步骤五继续进行迭代；

[0046] 以上是该发明具体的实现步骤。下面从算法复杂度进行阐述分析。

[0047] 本实施方式提出的算法空间复杂度与四种对比算法都为 $S(n) = O(n)$ 。在时间复杂度方面,假设二项逼近法的算法复杂度为 $O(n)$,实际迭代次数为 N ,点波束个数为 M ,子算法的复杂度分别是 $O(nM)$, $O(nM)$ 和 $O(3+M)$ 。因此,本发明所提出的OEJR整体算法的复杂度为 T

$T(n) = O(2nNM + 3N + MN)$ 。

[0048] 对比算法一的时间复杂度 $T(n) = O(2sNM + 2N + MN)$ ，对比算法二和对比算法三的时间复杂度 $T(n) = O(sNM + 2N + MN)$ ，对比算法四的时间复杂度 $T(n) = O(1)$ 。所有算法中UBUP算法复杂度为常数阶复杂度最低，其他四种算法复杂度都是线性阶。由于本发明所提出的OEJR算法及约束较为复杂 n 远大于 s ，且迭代次数也大于其他算法，因此，相较于对比算法，本发明所提出的算法复杂度较高。然而所提算法的复杂度是线性阶，因此在实际应用中依然可行。

[0049] 工作原理：

[0050] 本发明是为了解决目前星地频谱共享网络资源受限的问题，中在频谱效率及干扰估计方面存在或部分存在的以下问题：

[0051] (1)、忽略了业务优先级；

[0052] (2)、忽略了混合共信道干扰约束的研究；

[0053] (3)、资源利用率不高；

[0054] (4)、能效较低；

[0055] (5)、未考虑功率与带宽的耦合性；

[0056] (6)、未考虑波束间公平性；

[0057] 本发明方法的流程如表1所示：

[0058] 表1

 基于准入控制的联合资源迭代方法

算法 1 基于 J-NPAP 比例公平的用户准入控制方法

1 生成三个优先级队列等待数量分别是 L1 队列 h , L2 队列 l , L3 队列 n 以及网络中接入的三类优先级数量分别是 i, j, k 。

2 优先基于比例公平准则接入 L1 队列至 $h=0$

3 若 $n > N$, 基于比例公平准则接入 L3, 若 $n \leq N$ 且 $l > 0$ 则基于比例公平准则接入 L2。

算法 2 基于能效最优的星地联合功率分配方法(MEJR)

1 对偶变量初始值为 ρ^1 、 λ^1 、 μ^1 、 ν^1 , 相应迭代步长 Δ^ρ 、 Δ^λ 、 Δ^μ 、 Δ^ν , 最大迭代次数 N_{iter} 和精度 ε 。

2 外循环体:

3 初始化: 令迭代次数指示变量 $i=1$, 设定各点波束的初始带宽为

$$B_m^i = B_{total} / M, \text{ 初始功率为 } P_m^i = P_{total} / M, \text{ 其中 } m=1, \dots, M。$$

4 内循环体:

将 ρ^i 、 λ^i 、 μ^i 、 ν^i 、 B^i 及 P^i 代入公式 (3-48) 中, 更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} 。

二项逼近迭代, 更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} 。

将 ρ^i 、 λ^i 、 μ^i 、 ν^i 、 B^i 及 P_{opt}^{i+1} 的值代入(18), 计算优化带宽 B_{opt}^{i+1} 。

二项逼近迭代, 更新获得分配给每个点波束的最优功率 P_{opt}^{i+1} 。

更新内循环迭代因子

内循环结束条件: 误差的绝对值小于 0.0001 结束内循环

5 使用次梯度法, 将 ρ^i 、 λ^i 、 μ^i 、 ν^i 、 B_{opt}^{i+1} 及 P_{opt}^{i+1} 更新对偶变量。

6 外循环结束条件, 如果 $\left| P_{total} - \sum_{i=1}^M P_{opt}^{i+1} \right| < \varepsilon$ 、 $\left| B_{total} - \sum_{i=1}^M B_{opt}^{i+1} \right| < \varepsilon$ 及

$P_{total} \geq \sum_{i=1}^M P_{opt}^{i+1}$, $B_{total} \geq \sum_{i=1}^M B_{opt}^{i+1}$ 同时满足或者 $i = N_{iter}$, 则结束大循环转到输出, 否则 $i=i+1$, 转步骤 (3) 继续进行迭代。

7 完成资源优化配置, 输出 B_{opt}^{i+1} 及 P_{opt}^{i+1} 。

[0059]

[0060] 本发明针对星地频谱共享网络构建业务优先级模型如图1所示, 若令 $L_1(t) = h$ 表示时刻 t 队列 L1 中等待的呼叫数, $L_2(t) = l$ 表示在时刻 t 队列 L2 中等待的呼叫数, $L_3(t) = n$ 表示在时刻 t 队列 L3 中等待的呼叫数。 $I_1(t) = i$ 表示时刻 t 已经接入的一级呼叫数, $I_2(t) = j$ 表示在时刻 t 已经接入的第二类呼叫数, $I_3(t) = k$ 表示在时刻 t 已经接入的三级呼叫数, 联合强占非强占优先级策略 (J-NPAP) 可以表述为:

[0061] (1) 网络中一级优先用户通常为军事通信用户, 具有最高优先权即强占重复优先权, 队列 L1 中有呼叫始终优先接入网络。L2 或 L3 列对用户被打断回到等待队列, 当其再次接入网络时, 重新开始数据传输。

[0062] (2) 当网络接入一个二级呼叫时, 如果队列 L1 和 L2 中无其他一级和二级呼叫或者队列 L1 中无其他呼叫且队列 L3 中等待接入的呼叫数目超过 N , 则系统转为 L3 队列中的进行

呼叫接入,否则系统将继续为L2队列中呼叫服务。

[0063] (3)当网络接入一个三级呼叫时,如果队列L3中的呼叫数不超过N且队列L2中有呼叫等待,则系统转为L2队列中的呼叫服务。

[0064] 当系统空闲时,且队列L1、L2与L3中均无呼叫等待,则有呼叫到达可立即接入,同一优先级普通用户接入遵循比例公平准则。当网络繁忙时,J-NPAP通过引入N来控制二级呼叫相对于三级呼叫的优先性。当队列L3中呼叫数为 $[1, N]$ 时,第二类呼叫具有非强占优先权;而当队列L3中呼叫数为 $[N, \infty)$ 时,此非强占优先权消失。当 $n \leq N$ 时,J-NPAP优先级模型退回到绝对优先级模型,并且队列L1始终具有强占重复优先权。

[0065] 因此,基于提出的优先级模型,本发明的优先级函数中一级优先级用户面向军事通信业务具有绝对优先权,二级优先级业务相较于三级优先级业务在保证网络不过分拥堵的前提下具有非强占优先权。此外,在同一优先级的业务按照比例公平接入。

[0066] 该优先级模型在时刻t系统的状态 $X(t)$ 为

$$[0067] X(t) = \{I_1(t), I_2(t), I_3(t), L_1(t), L_2(t), L_3(t); t \geq 0\}$$

[0068] 系统所对应的状态空间为

$$[0069] \Omega = \{(i, j, k, h, l, n); 0 \leq i+j+k \leq m, i, j, k, h, l, n \geq 0\}$$

[0070] 假设三类呼叫到达服从均值为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的泊松分布,持续时间服从参数为 μ_1, μ_2, μ_3 的负指数分布。因此系统状态 $\{X(t), t \geq 0\}$ 是一个六维的马尔可夫过程。令 $\lambda \equiv \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \rho \equiv \rho_1 + \rho_2 + \rho_3$,定义服务强度 $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} \quad i=1,2,3$,该参数刻画了网络的繁忙程度。当 $\rho \equiv \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 < m$

时, $X(t)$ 是遍历的。

[0071] 遍历性证明:

[0072] 定理1:当且仅当 $\rho \equiv \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 < m, X(t)$ 是遍历的。

[0073] 证明:基于我们建立的优先级模型, $X(t)$ 为不可约,非周期的马尔可夫过程。 $q_{ss'}$ 表示状态转移概率, $s, s' \in \Omega$ 。对于状态 $s = (i, j, k, h, l, n), s \in \Omega$,其转出概率 $q_s = \lambda + h\mu_1 + l\mu_2 + n\mu_3$ 。

[0074] 定义 $\gamma_f(s) = \sum_{s \neq s'} q_{ss'}(f(s') - f(s))$,我们考虑函数

$$[0075] f(s) = (i, j, k, h, l, n) = \frac{i+h}{\mu_1} + \frac{j+l}{\mu_2} + \frac{k+n}{\mu_3}$$

[0076] 则有 $\gamma_f(s) = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 - (h+l+n)$ 。其中,当 $h+l+n=m$ 时,所有资源都被占用, $s \in \Omega'$ 有

$$[0077] \gamma_f(s) = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 - m$$

[0078] 其中 $\Omega' = \{(i, j, k, h, l, n); h+l+n=m\}$

[0079] 假设 $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 < m$,则对任意满足条件 $0 < \varepsilon \leq \frac{m - (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)}{\lambda + m \max(\mu_1, \mu_2, \mu_3)}$ 的 ε ,条件偏移量

$$\frac{\gamma_f(s)}{q_s} \leq -\varepsilon \quad s \in \Omega$$

[0080] 因此,基于Foster's准则,若 $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 < m$ 成立,马尔可夫过程 $X(t)$ 是遍历的。

[0081] 若 $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 \geq m$,当 $s \in \Omega$ 时,

[0082] $\gamma_f(s) = \sum_{s \neq s'} q_{ss'}(f(s') - f(s)) = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 - (i + j + k) \geq 0$

[0083] 当 $s \in \Omega - \Omega'$ 时, 网络资源空闲

[0084] $\gamma_f(s) = \sum_{s \neq s'} q_{ss'}(f(s') - f(s)) = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 - (i + j + k) > 0$

[0085] $\sum_{f(s') < f(s)} q_{ss'}(f(s') - f(s)) = -(i + j + k) \geq -m$

[0086] 基于Kaplan条件, $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 \geq m$, 马尔可夫过程 $X(t)$ 非遍历。证毕。

[0087] 因此, $\rho \equiv \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 < m$ 是 $X(t)$ 遍历的充要条件, 从而 $X(t)$ 存在唯一的稳态分布。在稳态条件 $\rho \equiv \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 < m$ 下定义

[0088] $p_{i,j,k,h,l,n} = \lim_{t \rightarrow \infty} P((I_1(t), I_2(t), I_3(t), L_1(t), L_2(t), L_3(t)) = (i, j, k, h, l, n)) \quad (i, j, k, h, l, n) \in \Omega$

[0089] 为简化公式, 当网络资源充分时: $i + j + k < m$ 且 $h = l = n = 0$ 则 $p_{i,j,k}$ 记为 $p_{i,j,k}^0$

[0090] 当网络繁忙时: $i + j + k = m, h > 0, k = m - i - j$ 则 $p_{i,j,k,h,l,n}$ 记为 $p_{i,j,h,l,n}^0$

[0091] 基于遍历性证明, 可以对生灭过程构建平衡方程组如下:

[0092] (1) $i + j + k < m, i, j, k \geq 0$, 用户密度低, 网络服务强度低, 网络资源充足,

[0093] $(\lambda + i\mu_1 + j\mu_2 + k\mu_3) p_{i,j,k} = \lambda_1 p_{i-1,j,k} + \lambda_2 p_{i,j-1,k} + \lambda_3 p_{i,j,k-1} + (i+1)\mu_1 p_{i+1,j,k} + (j+1)\mu_2 p_{i,j+1,k} + (k+1)\mu_3 p_{i,j,k+1}$

[0094] (2) $i + j + k = m, i, j, k \geq 0$, 用户密度高, 网络服务强度高, 网络资源稀缺, 对网络进行分类讨论:

[0095] (i) $i = 0, j = 0, k = m$ 时存在边界方程:

[0096] $(\lambda + m\mu_3) p_{0,0,h,1,n} = \lambda_2 p_{0,0,h,1-1,n} + \lambda_3 p_{0,0,h,1,n-1} + m\mu_3 p_{0,0,h,1+1,n} \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n \leq N\}} + m\mu_3 p_{0,0,h+1,1,n} \delta_{\{h>0\}} + \mu_1 p_{1,0,h,1,n+1} (\delta_{\{h=0\}} \delta_{\{l=0\}} + \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n>N\}}) + \mu_1 p_{1,0,h,1+1,n} \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n \leq N\}} + \mu_2 p_{0,1,h,1,n+1} (\delta_{\{h=0\}} \delta_{\{l=0\}} + \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n>N\}})$

[0097] (ii) $0 < i < m, 0 < j < m, k = m - i - j$

[0098] $(\lambda + i\mu_1 + j\mu_2 + (m - i - j)\mu_3) p_{i,j,h,1,n} = \lambda_1 p_{i,j,h-1,1,n} + \lambda_2 p_{i,j,h,1-1,n} + \lambda_3 p_{i,j,h,1,n-1} + i\mu_1 p_{i,j,h+1,1,n} \delta_{\{h>0\}} + j\mu_2 p_{i,j,h,1+1,n} \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n \leq N\}} + (m - i - j)\mu_3 p_{i,j,h,1,n+1} (\delta_{\{h=0\}} \delta_{\{l=0\}} + \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n>N\}}) + (i+1)\mu_1 p_{i+1,j,h,1+1,n} \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n \leq N\}} + (i+1)\mu_1 p_{i+1,j,h,1,n+1} (\delta_{\{h=0\}} \delta_{\{l=0\}} + \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n>N\}}) + (j+1)\mu_2 p_{i,j+1,h+1,1,n} \delta_{\{h>0\}} + (j+1)\mu_2 p_{i,j+1,h,1,n+1} (\delta_{\{h=0\}} \delta_{\{l=0\}} + \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n>N\}}) + (m - i - j + 1)\mu_3 p_{i,j-1,h+1,1,n} \delta_{\{h>0\}} + (m - i - j + 1)\mu_3 p_{i-1,j,h,1+1,n} \delta_{\{h=0\}} \delta_{\{n \leq N\}}$

[0099] (iii) $i = m, j = 0, k = 0$ 时存在边界方程:

[0100] $(\lambda + m\mu_1) p_{m,0,h,1,n} = \lambda_1 p_{m,0,h-1,1,n} + \lambda_2 p_{m,0,h,1-1,n} + \lambda_3 p_{m,0,h,1,n-1} + m\mu_1 p_{m,0,h,1+1,n} \delta_{\{h>0\}} + m\mu_1 p_{m,0,h,1+1,n} \delta_{\{h>0\}} + \mu_2 p_{m,1,h+1,1,n} \delta_{\{h>0\}} + \mu_3 p_{m-1,0,h+1,1,n} \delta_{\{h>0\}}$

[0101] 其中, $\delta_{\{A\}} = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$

[0102] 定义生成函数方程:

[0103] $Y_{i,j}(z_1, z_2, z_3) = \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} z_1^h z_2^l z_3^n$

[0104] $\Pi_{i,j}(z_2, z_3) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^N p_{i,j,0,l,n} z_2^l z_3^n$

$$[0105] \quad \Psi_{i,j,l}(z_3) = \sum_{n=N+1}^{\infty} p_{i,j,0,l,n} z_3^{n-1}$$

$$[0106] \quad \begin{aligned} \Phi_{i,j}(z_1, z_2, z_3) &= \sum_{h=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} z_1^h z_2^l z_3^n \\ &= z_1 \Upsilon_{i,j}(z_1, z_2, z_3) + z_2 \Pi_{i,j}(z_2, z_3) \\ &\quad + z_3 \sum_{l=0}^{\infty} z_2^l \Psi_{i,j,l}(z_3) + \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,0,0,n} z_3^n \end{aligned}$$

[0107] 将 $z_2=1, z_3=1, z_1=1, z_3=1$ 与 $z_1=1, z_2=1$ 分别带入生成函数方程:

$$[0108] \quad \begin{aligned} \Phi_{i,j}(z_1, 1, 1) &= \sum_{h=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} z_1^h \\ &= z_1 \Upsilon_{i,j}(z_1, 1, 1) + \Pi_{i,j}(1, 1) \\ &\quad + \sum_{l=0}^{\infty} \Psi_{i,j,l}(1) + \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,0,0,n} \end{aligned}$$

$$[0109] \quad \begin{aligned} \Phi_{i,j}(1, z_2, 1) &= \sum_{h=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} z_2^l \\ &= \Upsilon_{i,j}(1, z_2, 1) + z_2 \Pi_{i,j}(z_2, 1) \\ &\quad + \sum_{l=0}^{\infty} z_2^l \Psi_{i,j,l}(1) + \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,0,0,n} \end{aligned}$$

$$[0110] \quad \begin{aligned} \Phi_{i,j}(1, 1, z_3) &= \sum_{h=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} z_3^n \\ &= \Upsilon_{i,j}(1, 1, z_3) + \Pi_{i,j}(1, z_3) \\ &\quad + z_3 \sum_{l=0}^{\infty} \Psi_{i,j,l}(z_3) + \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,0,0,n} z_3^n \end{aligned}$$

$$[0111] \quad \begin{aligned} \left. \frac{\partial}{\partial z_1} \Phi_{i,j}(z_1, 1, 1) \right|_{z_1=1} &= \sum_{h=1}^{\infty} h \left(\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} \right) \\ &= \left[\Upsilon_{i,j}(z_1, 1, 1) + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \Upsilon'_{i,j}(z_1, 1, 1) \right] \Big|_{z_1=1} \end{aligned}$$

$$[0112] \quad \begin{aligned} \left. \frac{\partial}{\partial z_2} \Phi_{i,j}(1, z_2, 1) \right|_{z_2=1} &= \sum_{l=1}^{\infty} l \left(\sum_{h=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} \right) \\ &= \left[\frac{\partial}{\partial z_2} \Upsilon_{i,j}(1, z_2, 1) + \Pi_{i,j}(z_2, 1) + \Pi'_{i,j}(z_2, 1) \right] \Big|_{z_2=1} + \sum_{l=1}^{\infty} l \Psi_{i,j,l}(1) \end{aligned}$$

$$[0113] \quad \begin{aligned} \left. \frac{\partial}{\partial z_3} \Phi_{i,j}(1, 1, z_3) \right|_{z_3=1} &= \sum_{n=1}^{\infty} n \left(\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{h=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} \right) \\ &= \left[\frac{\partial}{\partial z_3} \Upsilon_{i,j}(1, 1, z_3) + \frac{\partial}{\partial z_3} \Pi_{i,j}(1, z_3) \right. \\ &\quad \left. + z_3 \sum_{l=0}^{\infty} \Psi'_{i,j,l}(z_3) \frac{\partial}{\partial z_3} \Upsilon_{i,j}(1, 1, z_3) \right] \Big|_{z_3=1} \\ &\quad + \sum_{l=0}^{\infty} \Psi_{i,j,l}(1) + \sum_{n=0}^{\infty} n p_{i,j,0,0,n} \end{aligned}$$

[0114] 一类优先级平均等待队长:

$$E(L_1) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \frac{\partial}{\partial z_1} \Phi_{i,j}(z_1, 1, 1) \Big|_{z_1=1} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{h=1}^{\infty} h \left(\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} \right)$$

$$= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \left[\Upsilon_{i,j}(z_1, 1, 1) + z_1 \frac{\partial}{\partial z_1} \Upsilon'_{i,j}(z_1, 1, 1) \right] \Big|_{z_1=1}$$

[0115] 二类优先级平均等待队长:

$$E(L_2) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \frac{\partial}{\partial z_2} \Phi_{i,j}(1, z_2, 1) \Big|_{z_2=1} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{l=1}^{\infty} l \left(\sum_{h=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} \right)$$

$$= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \left[\frac{\partial}{\partial z_2} \Upsilon_{i,j}(1, z_2, 1) + \Pi_{i,j}(z_2, 1) + \Pi'_{i,j}(z_2, 1) \right] \Big|_{z_2=1} + \sum_{l=1}^{\infty} l \Psi_{i,j,l}(1)$$

[0116] 三类优先级平均等待队长:

$$E(L_3) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \frac{\partial}{\partial z_3} \Phi_{i,j}(1, 1, z_3) \Big|_{z_3=1} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{n=1}^{\infty} n \left(\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{h=0}^{\infty} p_{i,j,h,l,n} \right)$$

[0117]

$$= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \left[\frac{\partial}{\partial z_3} \Upsilon_{i,j}(1, 1, z_3) + \frac{\partial}{\partial z_3} \Pi_{i,j}(1, z_3) \right. \\ \left. + z_3 \sum_{l=0}^{\infty} \Psi'_{i,j,l}(z_3) \frac{\partial}{\partial z_3} \Upsilon_{i,j}(1, 1, z_3) \right] \Big|_{z_3=1} \\ \left. + \sum_{l=0}^{\infty} \Psi_{i,j,l}(1) + \sum_{n=0}^{\infty} n p_{i,j,0,0,n} \right]$$

[0118] 根据Little定理进一步推出稳态条件下三类用户的平均等待时间:

[0119] $E(W_1) = \frac{E(L_1)}{\lambda_1}$

[0120] $E(W_2) = \frac{E(L_2)}{\lambda_2}$

[0121] $E(W_3) = \frac{E(L_3)}{\lambda_3}$

[0122] 推导结果可以看出, J-NPAP优先级模型平均等待时长受到参数N的影响, 一类优先级平均等待时长最短, 二类优先级平均等待时长比三类优先级短。其中, 二类优先级和三类优先级平均等待时间与N相关。当n<N时, J-NPAP优先级模型退回到传统优先级模型。因此, 我们可以通过调整参数N的大小来折中控制二级用户相对于三级用户的优先性和网络阻塞率。

[0123] 2、基于J-NPAP的比例公平接入准则

[0124] 根据权利要求1优先级建模, 不同优先级列队之间按照J-NPAP三级优先级模型接入保证高优先级用户接入比例。在同优先级之内为兼顾网络吞吐量和同优先级用户公平性, 不能够简单的采取轮训算法, 匈牙利算法和最大载干比算法。基于此, 本发明兼顾不同优先级用户优先权不同的特点以及同优先级用户的公平性。本发明采取基于J-NPAP的比例公平接入准则。在同优先级内采取比例公平接入准则, 在一段时间窗内不重复为同一用户提供服务的也能够保证一些边缘用户不会一直无法接入网络。

[0125] 同一优先级内用户接入准则可以表示为:

$$[0126] \quad P_n^i(t) = \frac{B \log_2(1 + SINR_n^i(t))}{\bar{R}_n(t)}$$

[0127] 其中, $SINR_n^i(t) = \frac{1}{N_i} \sum_{m=0}^{N_i-1} SINR_n^m(t)$, $\bar{R}_n(t) = (1 - \frac{1}{T})\bar{R}_n(t-1) + \frac{1}{T}R_n(t-1)$ 。 $\bar{R}_n(t)$ 表示时间窗内的

吞吐量, $R_n(t-1)$ 表示用户n在(t-1)传输时间间隔内的吞吐量。

[0128] 本发明提出的资源分配算法遵循联合业务优先级和比例公平算法准则。当用户海量接入时,为保证高优先级用户平均等待时间最低的同时满足同一优先级业务之间的公平性。不同优先级接入遵循本发明提出的优先级模型准则,当同一优先级接入时遵循比例公平准则。

[0129] 3、星地频谱共享网络中可能存在的组件间的干扰场景如图1所示。

[0130] 图2星地频谱共享网络中组件间的干扰场景

[0131] 存在M个卫星活跃用户和N个地面基站,第m个卫星终端接收到的卫星下行链路信号功率 $P_R(m)$ 可以表示为:

$$[0132] \quad P_R(m) = P_{if} G_T^{SAT}(m) G_R^{FSS}(0) L_S$$

[0133] 其中: P_{if} 为卫星的发射功率;

[0134] $G_T^{SAT}(m)$ 为卫星到第m个FSS终端的天线发射增益;

[0135] $G_R^{FSS}(0)$ 为卫星终端接收卫星信号的天线接收增益;

[0136] L_S 为自由空间路径损耗, $L_S = \left(\frac{c}{4\pi df}\right)^2$, $c = 3 \times 10^8$ m/s为电磁波传播速度, $d = 35786$ km为卫星和终端的距离, f 为卫星信号传输使用的频率。

[0137] 在频率 f_k 上工作的第m个卫星FSS下行链路会受到工作在 f_k 的FS基站的干扰。在频率 f_k 上,第m个卫星用户受到来自第n个地面基站的干扰 $I_m(n, k)$ 可示为:

$$[0138] \quad I_m(n, k) = P_T^{FS}(n) [G_T^{FS}(\theta_{m,n})] [G_T^{FSS}(\theta_{n,m})] L(d, f_k)$$

[0139] 其中, $P_T^{FS}(n)$ 为第n个地面FS基站的发射功率;

[0140] $G_T^{FS}(\theta_{n,m})$ 为当天线偏斜角为 $\theta_{n,m}$ 时,地面FS基站的天线增益, $\theta_{n,m}$ 表示第n个地面FS基站对第m个卫星FSS终端的偏斜角;

[0141] $G_T^{FSS}(\theta_{m,n})$ 为当天线偏斜角为 $\theta_{m,n}$ 时,卫星FSS终端的接收天线增益; $L(d, f) = \left(\frac{c}{4\pi df}\right)^2$ 为自由空间路径损耗, d 为发送端和接收端的距离。

[0142] 第m个卫星波束下行链路在信道k工作时,该卫星波束中的整个地面FS网络对其加性干扰可以表示为:

$$[0143] \quad I_m(k) = \sum_{n=1}^N I_m(n, k)$$

[0144] 进一步考虑波束之间干扰,用户接收到的有用信号功率 P_r^i 和干扰信号功率 I_r^i 分别可以由以下公式计算。

$$[0145] \quad P_r^i = \gamma P_i^i G_{\max} G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

$$\begin{aligned}
I_{down}^{co} &= \sum_{m=1}^M \gamma P_t^m G_{m,i} G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \\
[0146] \quad &= \sum_{m=1}^M \gamma P_t^m \frac{G_{m,i}}{G_{max}} G_{max} G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \\
&= \sum_{m=1}^M \gamma P_t^m h_{m,i} G_{max} G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2
\end{aligned}$$

[0147] 式中 P_t^m —— 卫星分配给波束 B_m 的发射功率；

[0148] G_r —— 卫星用户的接收天线增益；

[0149] G_{max} —— 卫星天线的最大增益；

[0150] $G_{k,i}$ —— 波束 B_k 在波束 B_i 上的天线增益。

[0151] 构建波束间干扰系数矩阵 H_{down}^{co}

$$[0152] \quad H_{down}^{co} = \frac{1}{G_{max}} \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,M} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \cdots & G_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{M,1} & G_{M,2} & \cdots & G_{M,M} \end{bmatrix}$$

[0153] 卫星终端收到的有用信号,波束间共信道干扰信号,地面干扰以及噪声,接收信号可以表示为:

$$[0154] \quad Y_m = (\mathbf{h}_m^s)^H \boldsymbol{\omega}_m S_m(t) + (\mathbf{h}_m^s)^H \sum_{j \neq m} \boldsymbol{\omega}_j S_j(t) + (\mathbf{h}_m^{bs})^H \boldsymbol{\omega}_t x(t) + (\mathbf{h}_m^u)^H \boldsymbol{\omega}_u x_u(t) + n_m(t)$$

[0155] 在星地频谱共享网络下行链路中,第 m 个卫星 FSS 终端,在第 k 个信道接收信号时的信干噪比 SINR 为:

$$[0156] \quad SINR_{down} = \frac{P_s}{I_{down}^{co} + I_m(k) + N_0}$$

[0157] 其中, $I_m(k)$ —— 来自地面的干扰

[0158] I_{down}^{co} —— 在卫星多波束复用的场景中,卫星通信系统采用多波束天线技术和频率复用技术,能在不同波束的同频信道内同时和多个卫星终端通信,在这种情况下,波束的旁瓣增益对其他同频波束会造成严重的载波之间干扰;

[0159] N_0 —— 环境热噪声。

[0160] 卫星网络占用带宽大小 B_i , 系统容量可以表示为:

$$[0161] \quad C(m, k) = B_i (1 + SINR_{down}(m, k))$$

[0162] 利用上述公式,求得信道容量矩阵为:

$$[0163] \quad \mathbf{C}_{down} = \begin{pmatrix} C(1,1) & \cdots & C(1,K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C(M,1) & \cdots & C(M,K) \end{pmatrix}$$

$$[0164] \quad C_{satellite} = \sum_{n=1}^N C_{down}$$

[0165] 进一步可以推导出网络能量效率为:

$$\begin{aligned}
\eta_{EE} &= \frac{\sum_{n=1}^N C_{down}}{P_{tot}} = \frac{B_i \log_2(1 + SINR_{down}(m, k))}{P_{tot}} \\
&= \frac{B_i \log_2(1 + \frac{P_s}{I_{down}^{co} + I_m(k) + N_0})}{P_{tot}} \\
[0166] \quad &= \frac{B_i \log_2(1 + \frac{\gamma P_i^j G_{max} G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2}{\sum_{m=1}^M \gamma P_i^m h_{m,j} G_{max} G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 + \sum_{n=1}^N P_T^{FSS}(n) \Gamma_{G_T}^{FSS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{G_T}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma L(d, f_k) + B_i N_0})}{\xi \sum_{f=0}^F \sum_{i=1}^{|K_f|} P_{if} + P_C} \\
&= \frac{B_i \log_2(1 + \frac{P_i^j}{\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FSS}(n) \Gamma_{G_T}^{FSS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{G_T}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma L(d, f_k) + \alpha B_i N_0})}{\xi \sum_{f=0}^F \sum_{i=1}^{|K_f|} P_i^j + P_C}
\end{aligned}$$

[0167] 对上述的覆盖分析,进行优化问题描述。

[0168] 在实际的多波束卫星通信系统中,有很多实时的业务,如视频音频流,时延性能是重要的评估标准,波束的平均时延限制可以转化为每个波束的最小业务需求,实际分配容量应高于时延所决定的业务需求,才能保证通信的服务质量,因此时延确定的通信需求是实际分配容量的下限,如公式所示:

$$[0169] \quad C_i \geq \frac{T_i}{(1-e_i)D_i}$$

[0170] 其中 e_i 表示点波束 B_i 传输信道的误包率,一般来说 $(1-e_i)D_i > 1$ 。

[0171] 评估系统性能的方法有很多种,比如最大化系统容量和公平性及最小化点波束业务需求和分配给该点波束容量的差值等。考虑到星地频谱共享网络星上资源受限的问题,本文的评估标准是最大化网络的能量效率。采用二阶差分优化目标函数,在满足约束条件的基础上,使分配的信道容量与业务需求的差值达到最小。综上分析,可以将该优化问题抽象成以下数学模型(以下称为原问题):

$$[0172] \quad \max f(P, W) = \max_{\{P_i, W_i\}} \sum_{i=1}^M \eta_{EE} = \frac{\sum_{n=1}^N C_{down}}{P_{tot}}$$

$$[0173] \quad \text{s. t. } C_i \leq T_i \quad (a)$$

$$[0174] \quad C_i \geq \frac{T_i}{(1-e_i)D_i} \quad (b)$$

$$[0175] \quad \sum_{i=1}^M P_i \leq P_{total} \quad (c)$$

$$[0176] \quad \sum_{i=1}^M B_i \leq B_{total} \quad (d)$$

$$[0177] \quad (T_i - C_i)^2 \leq \varepsilon \quad (e)$$

[0178] 公式(a)表示分配的容量不能超过其业务需求,即每个点波束的业务需求是所分配的容量的上限,公式(b)指定了所分配容量的下限,公式(c)和公式(d)表明卫星的功率和

带宽资源是有限的。公式 (e) 表明每一个波属下的带宽需求方差的上限。我们基于minmax最大误差最小,将每一个波束实际分配和需求的方差作为约束条件约束,约束每一个点波束的实际分配和需求的方差更能保障波束间公平性。这样构建了我们的问题模型,然后对问题求解。原问题是一个非线性规划问题,每个点波束分配的功率和带宽是相互耦合的,因此很难获得原问题的全局最优解。

[0179] 基于优化问题描述,本发明针对STSSN提出一种基于能效最优的联合资源分配算法(OEJR),对于资源分配问题,通过引入非负的拉格朗日乘子 ρ 、 λ 、 μ 和 ν 可以得到该优化问题的拉格朗日函数:

$$\begin{aligned}
 L_1(\mathbf{P}, \mathbf{W}, \boldsymbol{\rho}, \lambda, \mu, \nu) &= -\eta_{EE} + \sum_{i=1}^M \rho_i \left(\frac{T_i}{(1-e_i)D_i} - C_i \right) + \lambda \sum_{i=1}^M (P_i - P_{total}) + \mu \sum_{i=1}^M (B_i - B_{total}) + \nu ((T_i - C_i)^2 - \varepsilon) \\
 &= - \frac{B_i \log_2 \left(1 + \frac{P_i^j}{\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,i} + \alpha \sum_{n=1}^N P_i^{FS}(n) \Gamma G_i^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma G_i^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma L(d, f_k) + \alpha B_i N_0} \right)}{\xi \sum_{j=0}^F \sum_{i=1}^{K_j} P_i^j + P_c} \\
 &\quad + \sum_{i=1}^M \rho_i \left(\frac{T_i}{(1-e_i)D_i} - C_i \right) + \lambda \sum_{i=1}^M (P_i - P_{total}) + \mu \sum_{i=1}^M (B_i - B_{total}) + \nu ((T_i - C_i)^2 - \varepsilon)
 \end{aligned}$$

[0181] 其中, $\mathbf{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_M\}$, $\mathbf{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_M\}$, $\boldsymbol{\rho} = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M\}$ 。

[0182] 由于目标优化函数中考虑了波束之间的同频干扰问题,因此上述优化问题不属于凸优化范畴,因此设法考虑该问题的对偶问题。

[0183] 定义拉格朗日对偶函数 $g(\rho, \lambda, \mu, \nu)$ 如下:

$$[0184] \quad g(\boldsymbol{\rho}, \lambda, \mu, \nu) = \min_{\mathbf{P}, \mathbf{B}} L(\mathbf{P}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\rho}, \lambda, \mu, \nu)$$

[0185] $g(\rho, \lambda, \mu, \nu)$ 把 $L(\mathbf{P}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\rho}, \lambda, \mu, \nu)$ 看成变量 \mathbf{P}, \mathbf{B} 的函数所得到的最小值。假设 $\mathbf{P}^*, \mathbf{B}^*$ 是原问题 $f(\mathbf{P}, \mathbf{B})$ 最优解,即 $f(\mathbf{P}^*, \mathbf{B}^*) = p^*$, $g(\rho, \lambda, \mu, \nu)$ 与 p^* 有以下关系。

$$\begin{aligned}
 g(\boldsymbol{\rho}, \lambda, \mu, \nu) &= \min_{\mathbf{P}, \mathbf{B}} L(\mathbf{P}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\rho}, \lambda, \mu, \nu) \\
 &= \min_{\mathbf{P}, \mathbf{B}} \left(-f(\mathbf{P}, \mathbf{B}) + \sum_{i=1}^M \rho_i \left(\frac{T_i}{(1-e_i)D_i} - C_i \right) + \lambda \sum_{i=1}^M (P_i - P_{total}) \right. \\
 &\quad \left. + \mu \sum_{i=1}^M (B_i - B_{total}) + \nu \sum_{i=1}^M ((T_i - C_i)^2 - \varepsilon) \right) \\
 &\leq -f(\mathbf{P}^*, \mathbf{B}^*) + \sum_{i=1}^M \rho_i \left(\frac{T_i}{(1-e_i)D_i} - C_i^* \right) + \lambda \sum_{i=1}^M (P_i^* - P_{total}) \\
 &\quad + \mu \sum_{i=1}^M (B_i^* - B_{total}) + \nu \sum_{i=1}^M ((T_i - C_i)^2 - \varepsilon) \\
 &\leq f(\mathbf{P}^*, \mathbf{B}^*) = p^*
 \end{aligned}$$

[0187] 由于原问题是非凸的,我们构造拉格朗日对偶问题,满足Slater强对偶条件所以主问题和对偶问题对偶间隙为0,有相同的最优值。至此对偶问题满足主可行,对偶可行,互补松弛性,符合KKT条件。当且仅当满足KKT条件时对偶目标的最大值=主目标的最小值=原凸优化问题的最小值=我们所追求的能效最大值。

[0188] 在上述公式中不等式成立的原因是由于 $\mathbf{P}^*, \mathbf{B}^*$ 位于原问题的可行域内,公式(a)~(e)均满足,且拉格朗日乘子大于等于0。由公式知,如果将 $L(\mathbf{P}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\rho}, \lambda, \mu, \nu)$ 看成变量 \mathbf{P}, \mathbf{B} 的函数,在整个定义域内取下确界,得到的结果即为 $g(\rho, \lambda, \mu, \nu)$,它表示原问题最优值 p^* 的一个下界。

[0189] 为了减小 $g(\rho, \lambda, \mu, \nu)$ 值与最优值 p^* 的差距,需要寻找最优下界,即所有下界中最

大的那个值。因此,可以得到拉格朗日对偶问题如公式所示。

$$[0190] \quad \max g(\rho, \lambda, \mu, \nu)$$

$$[0191] \quad \text{s. t. } \lambda \geq 0$$

$$[0192] \quad \mu \geq 0$$

$$[0193] \quad \rho_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, M)$$

$$[0194] \quad \nu \geq 0$$

[0195] 假设上述拉格朗日对偶问题的最优值为 d^* , d^* 与原问题最优值 p^* 之间存在以下关系式:

$$[0196] \quad d^* \leq p^*$$

[0197] 通过以上分析可知,从对偶问题的角度来求解原问题的最优解,能最小化对偶间隙 $|p^* - d^*|$ 。本文通过拉格朗日对偶理论以及次梯度法迭代进行求解原问题的最优下界。具体来说,对偶问题的求解可以分为以下三个步骤。

[0198] 步骤一:波束间带宽分配。对于给定的对偶变量 ρ 、 λ 、 μ 和 ν ,基于KKT条件,将 $L(P, B, \rho, \lambda, \mu, \nu)$ 对每一个 B_i ($i=1, 2, \dots, M$)求偏导,可以得出近似解 B_i^* 肯定满足公式:

$$[0199] \quad -\frac{1}{\xi \sum_{f=0}^F \sum_{i=1}^{K_f} P_t^i + P_C} - \rho_i + \frac{\mu}{C_i'} = 2\nu(T_i - C_i)$$

$$C_i' = \log_2 \left(1 + \frac{P_t^i}{\sum_{m=1}^M P_t^m h_{m,i} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{\text{FS}}(n) \Gamma_{G_T^{\text{FS}}}(\theta_{m,n}) \Gamma_{G_T^{\text{FSS}}}(\theta_{n,m}) \Gamma L(d, f_k) + \alpha B_i N_0} \right)$$

$$[0200] \quad \frac{\alpha N P_t^i B_i}{\ln 2 \left(\frac{\left(\sum_{m=1}^M P_t^m h_{m,i} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{\text{FS}}(n) \Gamma_{G_T^{\text{FS}}}(\theta_{m,n}) \Gamma_{G_T^{\text{FSS}}}(\theta_{n,m}) \Gamma L(d, f_k) + \alpha B_i N \right)^2}{+ P_t^i \left(\sum_{m=1}^M P_t^m h_{m,i} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{\text{FS}}(n) \Gamma_{G_T^{\text{FS}}}(\theta_{m,n}) \Gamma_{G_T^{\text{FSS}}}(\theta_{n,m}) \Gamma L(d, f_k) + \alpha B_i N \right)} \right)}$$

[0201] 对于该公式,由于方程的复杂性很难求出 B_i 其解析解,但是通过分为高信噪比和低信噪比两种情况可以得到近似解 B_i^* 。因此进行分类讨论,在低SINR情况下,即 $\text{SINR} \ll 1$ 时,使用 $\ln(1+x) \approx x$ 近似,在高SINR情况下,即 $\text{SINR} \gg 1$ 时,使用部分泰勒展开式 $\ln(1+x) \approx x - x^2/2$ 近似,在SINR取值介于上述两种情况之间时的功率最优值 P_i^{opt} 采用二项逼近法来求得近似解 P_i^* 。用二项逼近法搜索功率近似解的具体实现子步骤如下:

[0202] (子步骤1)初始化:输入系统总带宽 W_{total} ,收敛精度 ε ,令 $\lambda = (1 + \sqrt{5})/2$,初始区间 $[a, b] = [0, B_{\text{total}}]$, $a_1 = a + (1 + \lambda)(b - a)$, $\varphi_1 = \varphi(a_1)$, $a_2 = a + \lambda(b - a)$, $\varphi_2 = \varphi(a_2)$ 。

[0203] (子步骤2)若 $|a_2 - a_1| > \varepsilon$ 成立,则转步骤(3);否则转步骤(4)。

[0204] (子步骤3)若 $\varphi_1 < \varphi_2$ 成立,则 $b = a_2$, $a_2 = a_2$, $\varphi_2 = \varphi_1$, $a_1 = a + (1 - \lambda)(b - a)$, $\varphi_1 = \varphi(a_1)$,转步骤(2);否则 $a = a_1$, $a_1 = a_2$, $\varphi_1 = \varphi_2$, $a_2 = a + \lambda(b - a)$, $\varphi_2 = \varphi(a_2)$,转步骤(2)。

[0205] (子步骤4)输出: $B^* = (a_1 + a_2)/2$, $\varphi^* = \varphi(B^*)$ 。

[0206] 该方法是在搜索区间内适当插入两点,通过迭代使搜索区间无限缩小,满足一定精度后即可得到近似解 B_i^* ,进而得到最优解 $B_i^{\text{opt}} = \max(0, B_i^*)$ 。算法中涉及的目标函数

$\varphi(B_i)$ 如公式所示。

$$[0207] \quad \varphi(B_i) = \frac{2\nu(T_i - B_i \log_2(1 + \frac{P_i^j}{\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N_0}))}{\xi \sum_{f=0}^F \sum_{i=1}^{K_f} P_i^f + P_C} + \rho_i \frac{\mu}{\log_2(1 + \frac{P_i^j}{\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N_0})} - \frac{\alpha N P_i^j B_i}{\ln 2 \left(\left(\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N \right)^2 + P_i^j \left(\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N \right) \right)}$$

[0208] 步骤二:波束间功率分配。

[0209] 把子问题一求出的 B_i^{opt} 带入公式,首先将 C_i 对 P_i ($i=1, 2, \dots, M$)求偏导

$$[0210] \quad C_i' = -B_i \frac{1}{\ln 2 \left(\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N_0 + P_i^j \right)}$$

[0211] 进一步,将 $L(P, B, \rho, \lambda, \mu, \beta)$ 对每一个 P_i ($i=1, 2, \dots, M$)求偏导,可以得到:

$$[0212] \quad \begin{aligned} & -B_i \frac{1}{\ln 2 \left(\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N_0 + P_i^j \right)} \left(\xi \sum_{f=0}^F \sum_{i=1}^{K_f} P_i^f + P_C \right)^{-1} \\ & + B_i \log_2 \left(1 + \frac{\xi P_i^j}{\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N_0} \right) \left(\xi \sum_{f=0}^F \sum_{i=1}^{K_f} P_i^f + P_C \right)^{-2} \\ & = \left(2\nu(T_i - B_i \log_2(1 + \frac{P_i^j}{\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N_0})) - \rho_i \right) \\ & \quad \square B_i \frac{1}{\ln 2 \left(\sum_{m=1}^M P_i^m h_{m,j} + \alpha \sum_{n=1}^N P_T^{FS}(n) \Gamma_{T_i}^{FS}(\theta_{m,n}) \Gamma_{T_i}^{FSS}(\theta_{n,m}) \Gamma(d, f_k) + \alpha B_i N_0 + P_i^j \right)} - \lambda \end{aligned}$$

[0213] 从而,可以利用上文所介绍的二项逼近法求得近似解 $P_i^*, P_i^{opt} = \max\{0, P_i^*\}$ 。

[0214] 步骤三:对偶变量更新。在得到 P^{opt} 与 B^{opt} 后,此时对偶问题的优化变量仅有对偶变量 $\rho, \lambda, \mu, \nu, \beta$,如公式所示。对偶变量的最优值可以采用次梯度法来更新对偶变量的取值。次梯度法是通过设置梯度如公式所示。

$$[0215] \quad \begin{aligned} (\rho^{opt}, \lambda^{opt}, \mu^{opt}, \nu^{opt}, \beta^{opt}) &= \arg \max_{\rho, \lambda, \mu, \nu, \beta} g(\rho, \lambda, \mu, \nu, \beta) \\ &= \arg \max_{\rho, \lambda, \mu, \nu, \beta} \min L(P^{opt}, W^{opt}, \rho, \lambda, \mu, \nu, \beta) \end{aligned}$$

$$[0216] \quad \rho_i^{n+1} = \left[\rho_i^n - \Delta_{\rho_i} \left(C_i^{opt} - \frac{T_i}{(1-e_i)D_i} \right) \right]^+$$

$$[0217] \quad \lambda^{n+1} = \left[\lambda^n - \Delta_{\lambda} \left(P_{total} - \sum_{i=1}^M P_i^{opt} \right) \right]^+$$

$$[0218] \quad \mu^{n+1} = \left[\mu^n - \Delta_{\mu} \left(B_{total} - \sum_{i=1}^M B_i^{opt} \right) \right]^+$$

$$[0219] \quad \nu^{n+1} = \left[\nu^n - \Delta_{\nu} \left(\varepsilon - (T_i - C_i)^2 \right) \right]^+$$

[0220] 其中 $[x]^+ = \max\{0, x\}$, n 表示迭代次数, Δ^n 表示标量步长序列。只要选择的迭代步长合理, 用次梯度法就可以保证对偶变量收敛在最优值, 从而保证该优化问题的收敛性。虽然由此得出的最优解即为原问题最优解的最优下界, 但是只要保证迭代次数足够大, 就可以让对偶间隙 $|p^* - d^*|$ 接近于零。

[0221] 本实施方式具有以下特点和显著进步:

[0222] 1、本发明在卫星与地面频谱共享网络频谱集成的基础上, 建立了干扰模型, 分析了卫星与地面频谱共享网络的干扰机制, 并进行覆盖分析;

[0223] 2、结合比例公平算法, 提出了基于多类排队模型的联合非抢占式和抢占式资源分配方案, 以确保一流业务的抢占重复优先权。与三类服务相比, 具有 N 策略的二类服务非抢占式接入网络。利用生成函数方法, 得出各类的队列长度分布, 平均等待时间及其他一些相关性能。仿真结果表明, J -NPAP 算法可以保证一流服务的绝对优先级, 并且由于 N 策略, 队列长度不会太长;

[0224] 3、本发明兼顾延迟约束, 干扰约束和资源约束, 提出了基于二元凸优化的 OEJR 方案来限制干扰并提高能源效率, 并分析了其复杂性。限制实际分配方差的上限和每个波束的所需容量, 基于最大误差最小保证不同波束之间的公平性。仿真结果表明, 在牺牲了一小部分计算复杂度的前提下, 所提算法的总体能效, 吞吐量和资源利用率得到了提高。

[0225] 以下通过具体的仿真实验说明本实施方式取得的显著进步:

[0226] 图3是第一类优先级业务接入数量随可用信道数量变化情况仿真示意图;

[0227] 仿真结果表明, 随着系统总功率增大, 系统容量不断增大, 传统的匈牙利算法在用户接入过程只考虑信道条件, 忽略了业务优先级, 由于低优先级业务量要高于高优先级业务量, 低优先级用户信道条件好的数量相较于高优先级业务要高一些, 因此更多的低优先级业务在重负荷网络中先接入网络, 高优先级业务反而失去了优先性。基于加权优先级的资源管理算法增加高优先级业务接入权重, 仍然不能保证一类优先级网络包括军事通信等重要网络的强占重复优先权。本方法所提出的基于 J -NPAP 比例公平算法, 首先保证一类优先级业务的绝对优先权。

[0228] 图7是匈牙利算法三类优先级业务接入数量随可用信道数量变化情况仿真示意图;

[0229] 仿真结果表明, 随着系统总功率增大, 系统容量不断增大, 传统的匈牙利算法在用户接入过程只考虑信道条件, 忽略了业务优先级, 由于低优先级业务量要高于高优先级业务量, 低优先级用户信道条件好的数量相较于高优先级业务要高一些, 因此更多的低优先级业务在重负荷网络中先接入网络, 高优先级业务反而失去了优先性。基于加权优先级的资源管理算法增加高优先级业务接入权重, 仍然不能保证一类优先级网络包括军事通信等重要网络的强占重复优先权。本方法所提出的基于 J -NPAP 比例公平算法, 首先保证一类优先级业务的绝对优先权。

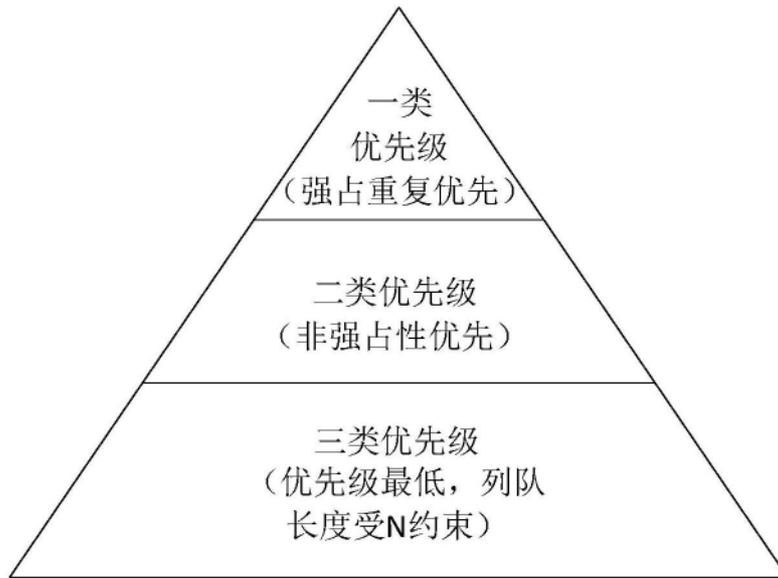


图1

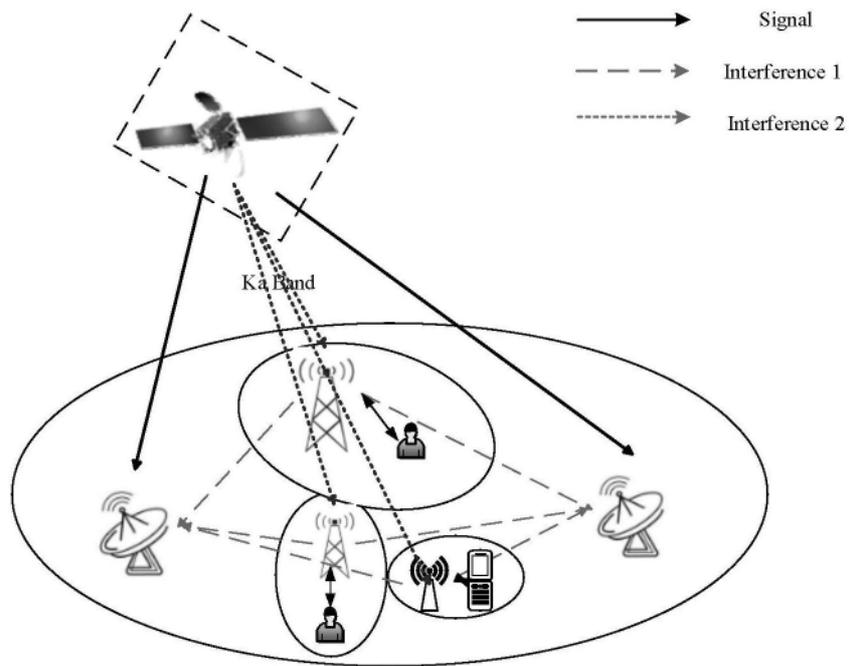


图2

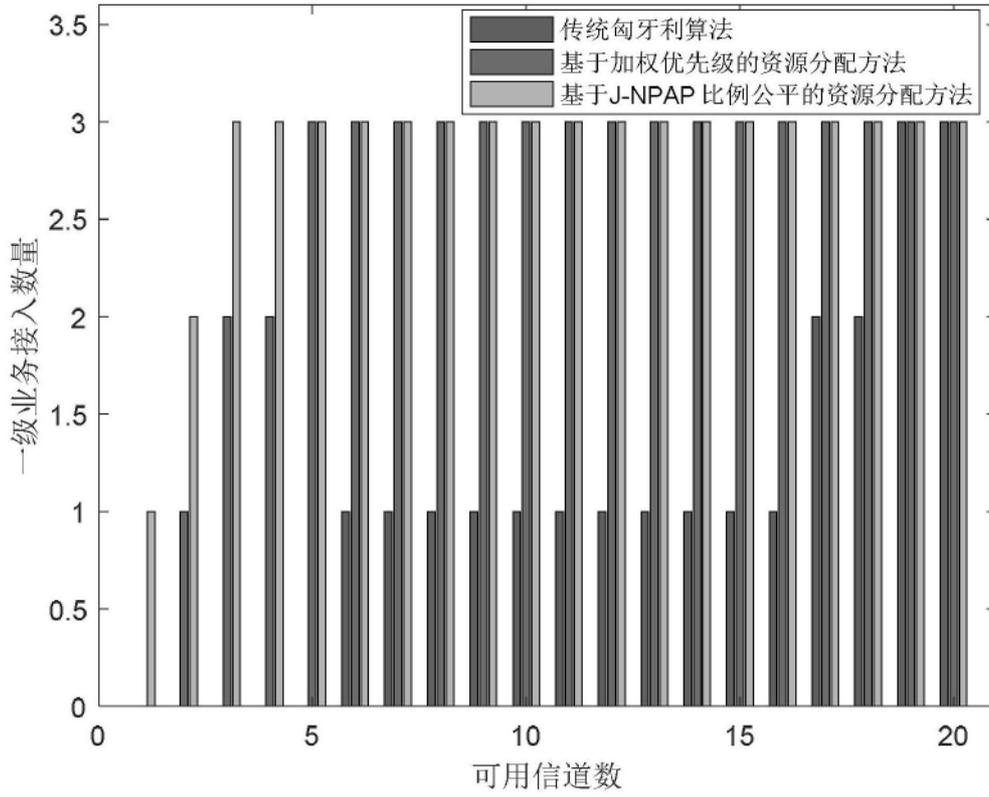


图3

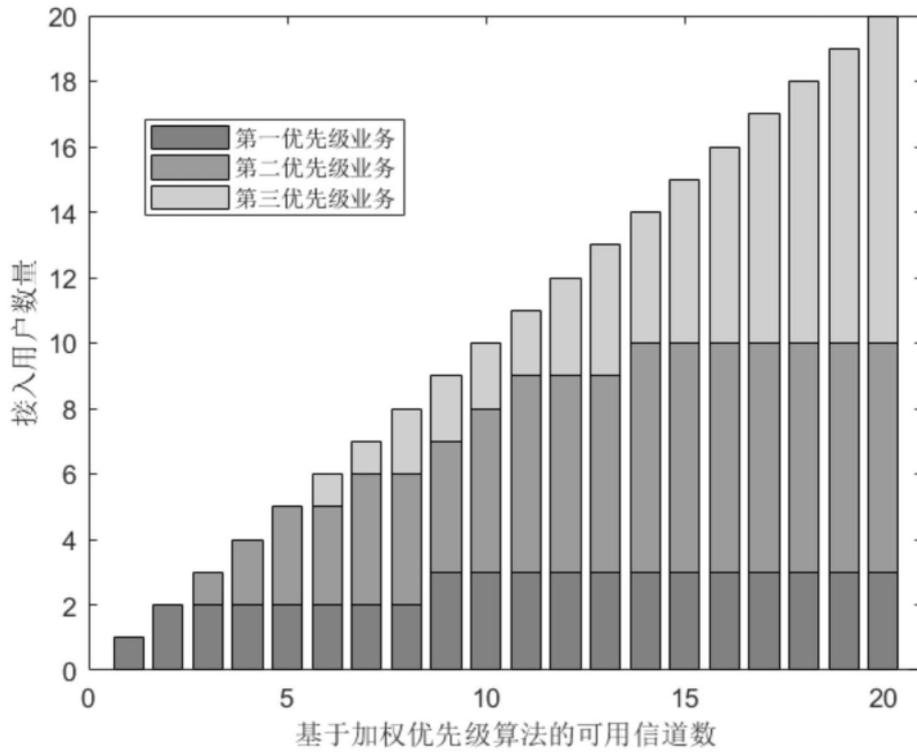


图4

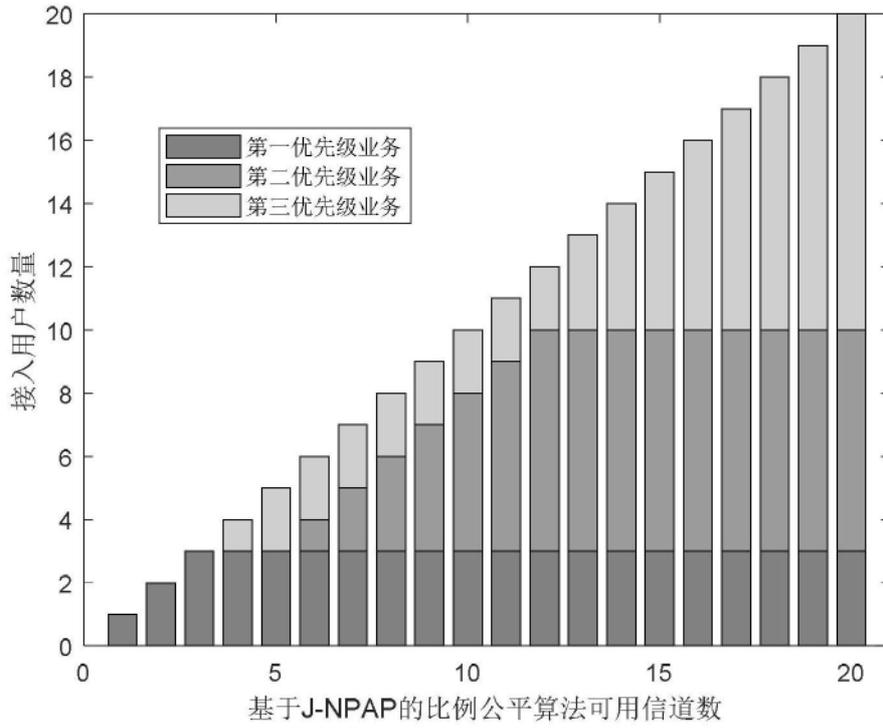


图5

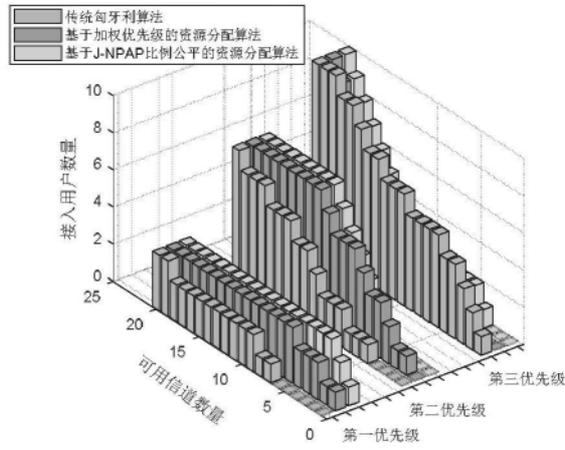


图6

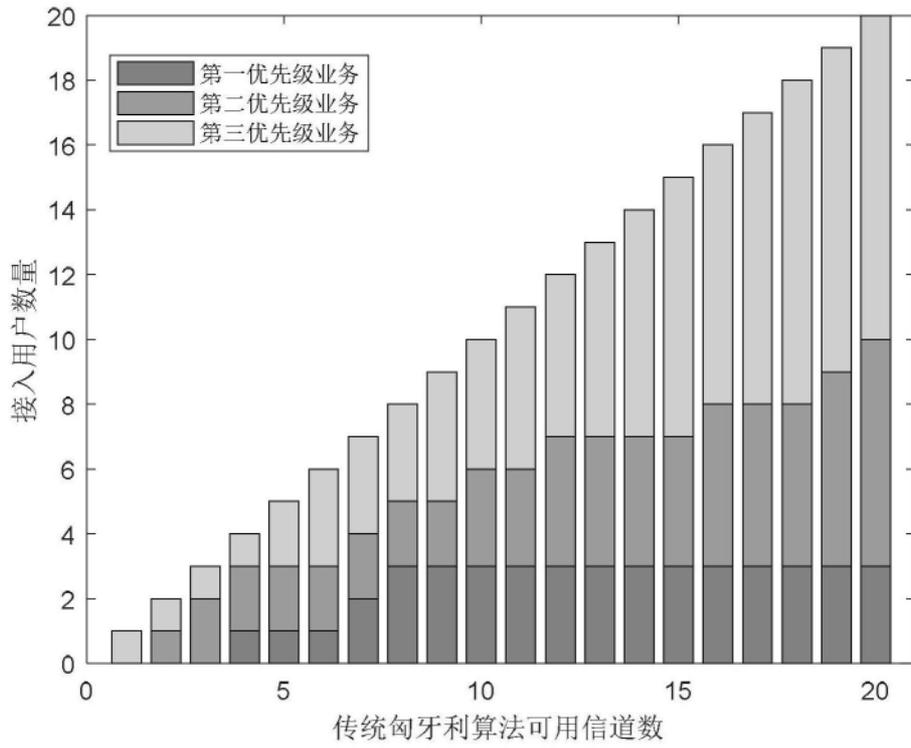


图7

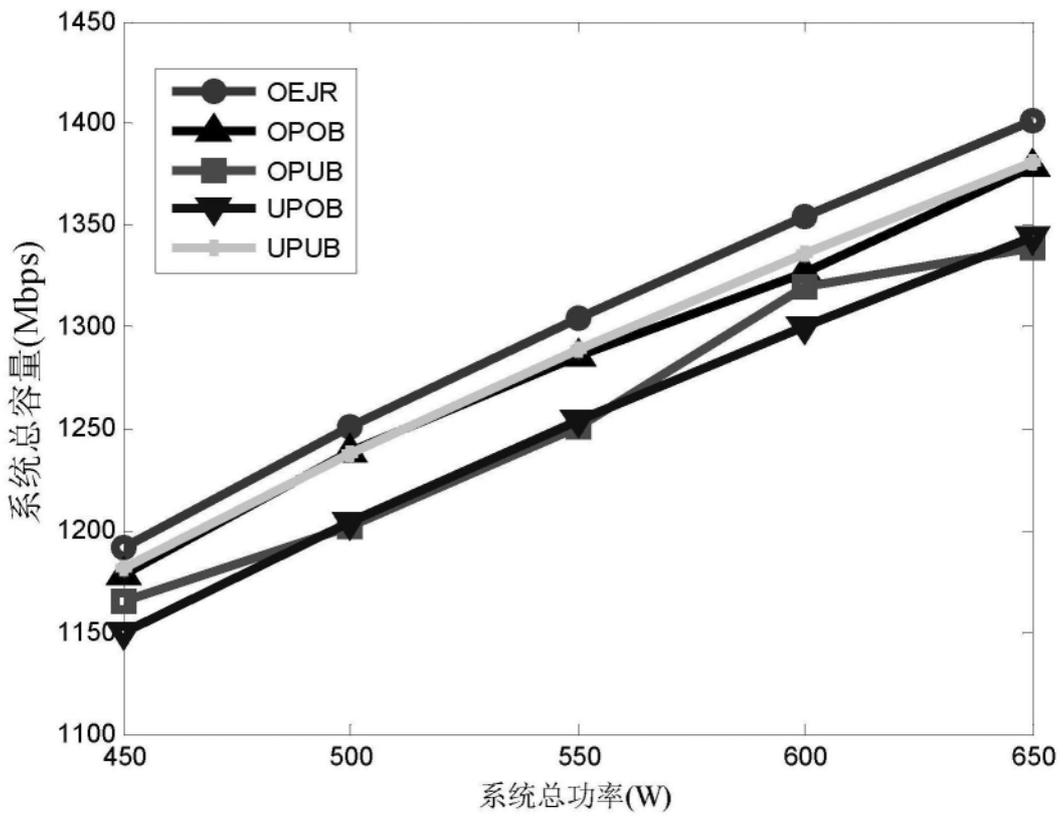


图8

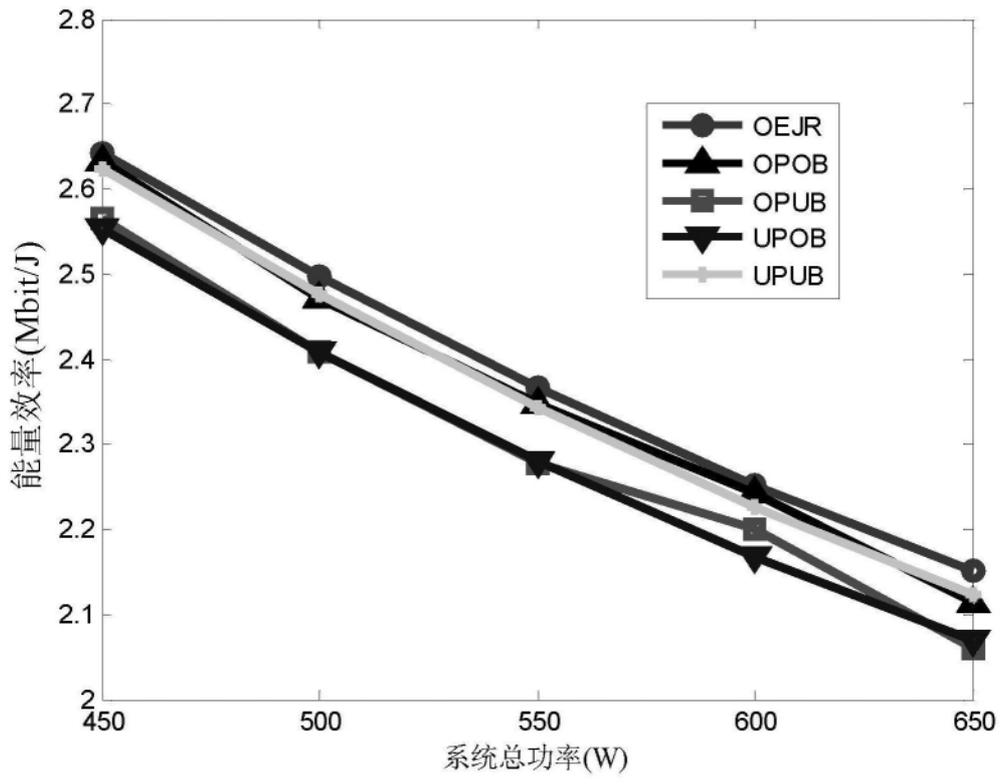


图9

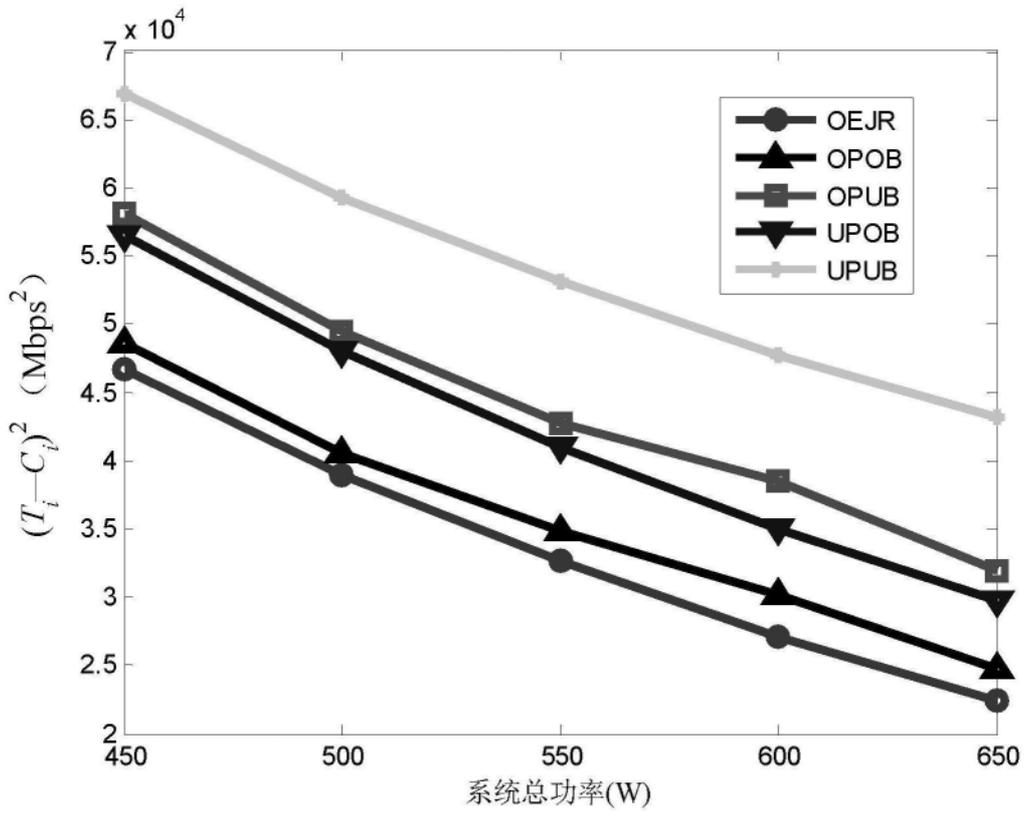


图10