



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110278024 A

(43)申请公布日 2019.09.24

(21)申请号 201910727794.4

(22)申请日 2019.08.07

(71)申请人 清华大学

地址 100000 北京市海淀区双清路30号

申请人 上海清申科技发展有限公司

(72)发明人 靳瑾 李婷 林子翹

(74)专利代理机构 北京超凡宏宇专利代理事务
所(特殊普通合伙) 11463

代理人 徐彦圣

(51)Int.Cl.

H04B 7/185(2006.01)

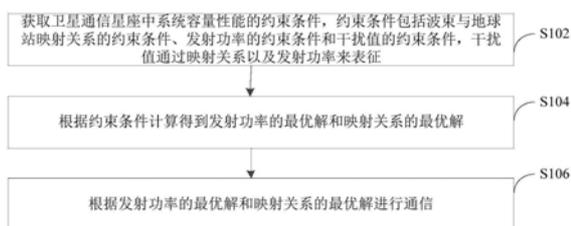
权利要求书2页 说明书11页 附图4页

(54)发明名称

卫星通信星座的系统容量优化方法和装置

(57)摘要

本发明提供了一种卫星通信星座的系统容量优化方法和装置,涉及卫星通信的技术领域,卫星通信星座包括多个非地球同步轨道卫星,所述方法包括:获取卫星通信星座中系统容量性能的约束条件,约束条件包括波束与地球站映射关系的约束条件、发射功率的约束条件和干扰值的约束条件,干扰值通过映射关系以及发射功率来表征;根据约束条件计算得到发射功率的最优解和映射关系的最优解;根据发射功率的最优解和映射关系的最优解进行通信,保证不对同频地球同步轨道卫星通信系统进行干扰的情况下,达到最大的系统容量。



1. 一种卫星通信星座的系统容量优化方法,其特征在于,所述卫星通信星座包括多个非地球同步轨道卫星,所述方法包括:

获取所述卫星通信星座中系统容量性能的约束条件,所述约束条件包括波束与地球站映射关系的约束条件、发射功率的约束条件和干扰值的约束条件,所述干扰值通过所述映射关系以及所述发射功率来表征;

根据所述约束条件计算得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解;

根据所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解进行通信。

2. 根据权利要求1所述的系统容量优化方法,其特征在于,所述约束条件包括波束与地球站需满足的预设映射关系、干扰值需小于干扰门限值、发射功率需在功率阈值范围内以及所述卫星通信星座中各个卫星的时空特性变化范围与预设轨道构型相对应。

3. 根据权利要求2所述的系统容量优化方法,其特征在于,根据所述约束条件计算得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解,包括:

根据干扰特性和约束特性进行求解计算,得到各条链路上的发射功率和映射关系;

将所述各条链路上的发射功率和映射关系进行迭代计算,分别得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解。

4. 根据权利要求3所述的系统容量优化方法,其特征在于,根据干扰特性和约束特性进行求解计算,得到各条链路上的发射功率和映射关系,包括:

通过所述多个非地球同步轨道卫星的发射功率和映射关系的乘积的累加和表征干扰值,将所述干扰值与干扰门限值进行计算,得到符合通信业务要求的各条链路上的发射功率和映射关系。

5. 根据权利要求1所述的系统容量优化方法,其特征在于,所述方法还包括:

根据所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解计算得到最大吞吐量。

6. 根据权利要求3所述的系统容量优化方法,其特征在于,根据所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解计算得到最大吞吐量,还包括:

根据下式计算得到最大吞吐量:

$$\min_{\{A,P\}} - \sum_{i=1}^{S-K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} c_{i,j}$$

$$s.t. \quad C1: I_{th} - \sum_{i=1}^{S-K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} q_{i,j} p_{i,j} \geq 0$$

$$C2: 1 - \sum_{j=1}^N a_{i,j} \geq 0, \quad \forall i$$

$$C3: 1 - \sum_{i=1}^{S-K} a_{i,j} \geq 0, \quad \forall j$$

$$C4: p_{i,j} \in [0, P_{\max}], \quad \forall i, j$$

$$C5: a_{i,j} \in [0, 1], \quad \forall i, j$$

其中, $a_{i,j}$ 表示第 i 个波束与第 j 个地球站的映射关系, $p_{i,j}$ 表示第 i 个波束到第 j 个地球站的发射功率大小, $c_{i,j}$ 代表每条链路的最大通信速率, $q_{i,j}$ 为乘积系数, I_{th} 为干扰门限值。

7. 根据权利要求1所述的系统容量优化方法,其特征在于,所述方法还包括:
调整所述卫星通信星座的调制方式。

8. 根据权利要求7所述的系统容量优化方法,其特征在于,所述调制方式包括自适应调制编码方式、脉码调制方式、相位键控调制方式、正交振幅调制方式和最小移频键控调制方式中的一种或多种。

9. 根据权利要求1所述的系统容量优化方法,其特征在于,在根据所述约束条件计算得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解之前,还包括:

进行凸优化问题转化操作,以使转化后满足凸优化问题的标准形式。

10. 一种卫星通信星座的系统容量优化装置,其特征在于,所述卫星通信星座包括多个非地球同步轨道卫星,所述装置包括:

获取模块,用于获取所述卫星通信星座中系统容量性能的约束条件,所述约束条件包括波束与地球站映射关系的约束条件、发射功率的约束条件和干扰值的约束条件,所述干扰值通过所述映射关系以及所述发射功率来表征;

计算模块,用于根据所述约束条件计算得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解;

通信模块,用于根据所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解进行通信。

卫星通信星座的系统容量优化方法和装置

技术领域

[0001] 本发明涉及卫星通信技术领域,尤其是涉及一种卫星通信星座的系统容量优化方法和装置。

背景技术

[0002] 按照卫星轨道分类,卫星通信系统包括地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit Satellite,GSO)卫星通信系统和非同步轨道(NGSO)卫星通信系统。相比于GSO卫星,位于中、低轨道的NGSO卫星系统具有传播时延短、链路损耗小等优势。由于单颗NGSO卫星覆盖范围十分有限,可通过轨道设计组成星座实现全球、全时覆盖。

[0003] 随着NGSO卫星的增加,相同频率、临近轨道的卫星越来越多,这使得NGSO星座与GSO卫星系统的同频干扰问题日益严重。此外,由于实际应用中需考虑变量较多且调制方式较为复杂,经常出现资源分配不均的情况,以使NGSO星座不能达到最佳的系统容量。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供卫星通信星座的系统容量优化方法和装置,保证不对同频地球同步轨道通信系统进行干扰的情况下,达到最大的系统容量。

[0005] 第一方面,本发明实施例提供一种卫星通信星座的系统容量优化方法,所述卫星通信星座包括多个非地球同步轨道卫星,所述方法包括:

[0006] 获取所述卫星通信星座中系统容量性能的约束条件,所述约束条件包括波束与地球站映射关系的约束条件、发射功率的约束条件和干扰值的约束条件,所述干扰值通过所述映射关系以及所述发射功率来表征;

[0007] 根据所述约束条件计算得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解;

[0008] 根据所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解进行通信。

[0009] 在可选的实施方式中,所述约束条件包括波束与地球站需满足的预设映射关系、干扰值需小于干扰门限值、发射功率需在功率阈值范围内以及所述卫星通信星座中各个卫星的时空特性变化范围与预设轨道构型相对应。

[0010] 在可选的实施方式中,根据所述约束条件计算得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解,包括:

[0011] 根据干扰特性和约束特性进行求解计算,得到各条链路上的发射功率和映射关系;

[0012] 将所述各条链路上的发射功率和映射关系进行迭代计算,分别得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解。

[0013] 在可选的实施方式中,根据干扰特性和约束特性进行求解计算,得到各条链路上的发射功率和映射关系,包括:

[0014] 通过所述多个非地球同步轨道卫星的发射功率和映射关系的乘积的累加和表征干扰值,将所述干扰值与干扰门限值进行计算,得到符合通信业务要求的各条链路上的发

射功率和映射关系。

[0015] 在可选的实施方式中,所述方法还包括:

[0016] 根据所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解计算得到最大吞吐量。

[0017] 在可选的实施方式中,根据所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解计算得到最大吞吐量,还包括:

[0018] 根据下式计算得到最大吞吐量:

$$\begin{aligned} & \min_{\{A,P\}} - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} c_{i,j} \\ \text{s.t. } & C1: I_{th} - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} q_{i,j} p_{i,j} \geq 0 \\ & C2: 1 - \sum_{j=1}^N a_{i,j} \geq 0, \quad \forall i \\ & C3: 1 - \sum_{i=1}^{S \cdot K} a_{i,j} \geq 0, \quad \forall j \\ & C4: p_{i,j} \in [0, P_{\max}], \quad \forall i, j \\ & C5: a_{i,j} \in [0, 1], \quad \forall i, j \end{aligned}$$

[0020] 其中, $a_{i,j}$ 表示第 i 个波束与第 j 个地球站的映射关系, $p_{i,j}$ 表示第 i 个波束到第 j 个地球站的发射功率大小, $c_{i,j}$ 代表每条链路的最大通信速率, $q_{i,j}$ 为乘积系数, I_{th} 为干扰门限值。

[0021] 在可选的实施方式中,所述方法还包括:

[0022] 调整所述卫星通信星座的调制方式。

[0023] 在可选的实施方式中,所述调制方式包括自适应调制编码方式、脉码调制方式、相位键控调制方式、正交振幅调制方式和最小移频键控调制方式中的一种或多种。

[0024] 在可选的实施方式中,在根据所述约束条件计算得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解之前,还包括:

[0025] 进行凸优化问题转化操作,以使转化后满足凸优化问题的标准形式。

[0026] 第二方面,本发明实施例提供一种卫星通信星座的系统容量优化装置,所述卫星通信星座包括多个非地球同步轨道卫星,所述装置包括:

[0027] 获取模块,用于获取所述卫星通信星座中系统容量性能的约束条件,所述约束条件包括波束与地球站映射关系的约束条件、发射功率的约束条件和干扰值的约束条件,所述干扰值通过所述映射关系以及所述发射功率来表征;

[0028] 计算模块,用于根据所述约束条件计算得到所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解;

[0029] 通信模块,用于根据所述发射功率的最优解和所述映射关系的最优解进行通信。

[0030] 本发明实施例提供了一种卫星通信星座的系统容量优化方法和装置,卫星通信星座包括多个非地球同步轨道卫星,根据卫星通信星座中系统容量性能的约束条件计算发射功率的最优解和与地球站的映射关系的最优解,实现发射功率与映射关系的联合优化,可以保证不对同频地球同步轨道通信系统进行干扰的情况下,达到最大的系统容量。

[0031] 本发明的其他特征和优点将在随后的说明书中阐述,并且,部分地从说明书中变得显而易见,或者通过实施本发明而了解。本发明的目的和其他优点在说明书以及附图中所特别指出的结构来实现和获得。

[0032] 为使本发明的上述目的、特征和优点能更明显易懂,下文特举较佳实施例,并配合所附附图,作详细说明如下。

附图说明

[0033] 为了更清楚地说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对具体实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施方式,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0034] 图1为本发明实施例提供的一种卫星通信星座的系统容量优化方法流程图;

[0035] 图2为本发明实施例提供的另一种卫星通信星座的系统容量优化方法流程图;

[0036] 图3为本发明实施例提供的非地球同步轨道卫星通信星座的系统吞吐量曲线对比变化示意图之一;

[0037] 图4为本发明实施例提供的非地球同步轨道卫星通信星座的接收端集总干扰曲线对比变化示意图之一;

[0038] 图5为本发明实施例提供的非地球同步轨道卫星通信星座的系统吞吐量曲线对比变化示意图之二;

[0039] 图6为本发明实施例提供的非地球同步轨道卫星通信星座的接收端集总干扰曲线对比变化示意图之二;

[0040] 图7为本发明实施例提供的一种卫星通信星座的系统容量优化装置的功能模块图。

具体实施方式

[0041] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0042] 随着NGSO卫星的增加,相同频率、临近轨道的卫星越来越多,这使得NGSO星座与GSO卫星系统的同频干扰问题日益严重。根据ITU的规定,中、低轨道卫星在通信时必须采取措施避免对GSO卫星产生有害干扰,在满足自身通信需求的前提下控制发射功率,可以有效避免潜在的同频干扰。目前在功率控制方面的研究较少,主要控制方案有:自适应功率控制技术、下行自适应FEC编码技术、反馈功率控制技术、功率分配技术等。这些方案基本上都是监测NGSO卫星系统接收端的链路质量如信噪比、等效功率通量密度等,当可能产生同频干扰时,按一定规则或方法调整发射功率,以避免潜在干扰。

[0043] 由于这些方案在工程实现上有一定难度,在实际中,较为常见的做法是关闭其发射机以避免干扰,而对于其他不产生干扰的链路,其对应发射机通常处于最大功率发射状态。由于发射机被关闭,当前某些链路将无法继续为地球站提供通信服务。因此,为保证通

信的连续,地球站通常处于多星覆盖的情况,当某一链路无法继续通信时,地球站将接入新的NGSO卫星链路以保证通信的连续。此时,按照何种规则接入NGSO卫星系统将直接影响到呼叫阻塞率、切换开销等系统性能。考虑到NGSO卫星系统通信的特点,目前较为常见的多星覆盖接入策略有距离优先策略、覆盖时间优先策略、最大仰角优先策略等。此外,由于地球表面地形的起伏、大气环境的变化、地物遮挡等问题,在通信时还需要根据实际情况调整调制方式,以在不同的环境下保证通信质量。

[0044] 因此,为了保证NGSO通信系统连续稳定,且不对其他GSO通信系统产生干扰,在设计时往往需要考虑很多的变量,同时,各种不同的控制策略如功率控制、多星接入、调制方式等较为复杂,很可能导致星上资源分配不均,整个NGSO星座系统的性能无法达到最佳。

[0045] 基于此,本发明实施例提供一种卫星通信星座的系统容量优化方法和装置,可以保证不对同频地球同步轨道通信系统进行干扰的情况下,达到最大的系统容量。

[0046] 为便于对本实施例进行理解,首先对本发明实施例所公开的一种卫星通信星座的系统容量优化方法进行详细介绍。

[0047] 图1为本发明实施例提供一种卫星通信星座的系统容量优化方法流程图。

[0048] 参照图1,卫星通信星座的系统容量优化方法应用于移动通信中卫星通信系统技术领域,卫星通信星座包括多个非地球同步轨道卫星,包括以下步骤:

[0049] 步骤S102,获取卫星通信星座中系统容量性能的约束条件,约束条件包括波束与地球站映射关系的约束条件、发射功率的约束条件和干扰值的约束条件,干扰值通过映射关系以及发射功率来表征。

[0050] 步骤S104,根据约束条件计算得到发射功率的最优解和映射关系的最优解。

[0051] 步骤S106,根据发射功率的最优解和映射关系的最优解进行通信。

[0052] 在实际应用的优选实施例中,根据卫星通信星座中系统容量性能的约束条件计算发射功率的最优解和与地球站的映射关系的最优解,实现发射功率与映射关系的联合优化,可以保证不对同频地球同步轨道通信系统进行干扰的情况下,达到最大的系统容量。

[0053] 其中,约束条件包括波束与地球站需满足的预设映射关系、干扰值需小于干扰门限值、发射功率需在功率阈值范围内以及卫星通信星座中各个卫星的时空特性变化范围与预设轨道构型相对应。

[0054] 需要说明的是,NGSO卫星系统的干扰规避约束,根据国际电联现有的协议框架规定,NGSO卫星系统不得对GSO卫星系统产生有害干扰,干扰评价指标(干扰门限值)通常为GSO卫星系统接收端集总干扰噪声比或等效功率通量密度,且针对不同的频段、不同的干扰评价指标设定了不同的干扰保护标准,在此不作限定。

[0055] NGSO卫星系统的发射功率约束,为了避免对空间中其他系统的干扰,同时满足系统自身的通信质量需求,NGSO系统的发射功率 P 需要限定在一定区间内:其中,上限 P_{\max} 为发射机所能发射的最大值,下限 P_{\min} 为满足接收端载噪比门限的发射功率最小值,以保证自身的链路的质量;当发射功率 P 等于零时,则表示发射机关机,停止发射。

[0056] NGSO卫星系统自身的轨道构型约束,即NGSO卫星系统须在其设定的轨道上运行,各NGSO卫星的时空特性变化范围需与NGSO卫星预定的轨道构型对应。

[0057] 为了更加清楚地获知发射功率以及映射关系的最优解计算方式,上述实施例中的步骤S104,包括:

[0058] 1、根据干扰特性和约束特性进行求解计算,得到各条链路上的发射功率和映射关系。

[0059] 其中,通过多个非地球同步轨道卫星的发射功率和映射关系的乘积的累加和表征干扰值,将干扰值与干扰门限值进行计算,得到符合通信业务要求的各条链路上的发射功率和映射关系。

[0060] 2、将各条链路上的发射功率和映射关系进行迭代计算,分别得到发射功率的最优解和映射关系的最优解。

[0061] 进一步的,上述方法还包括:根据发射功率的最优解和映射关系的最优解计算得到最大吞吐量,并根据最大吞吐量使系统容量最优化。

[0062] 根据下式计算得到最大吞吐量:

$$\begin{aligned} & \min_{\{A,P\}} - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} c_{i,j} \\ \text{s.t. } C1: & I_{th} - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} q_{i,j} p_{i,j} \geq 0 \\ C2: & 1 - \sum_{j=1}^N a_{i,j} \geq 0, \quad \forall i \\ C3: & 1 - \sum_{i=1}^{S \cdot K} a_{i,j} \geq 0, \quad \forall j \\ C4: & p_{i,j} \in [0, P_{\max}], \quad \forall i, j \\ C5: & a_{i,j} \in [0, 1], \quad \forall i, j \end{aligned}$$

[0064] 其中, $a_{i,j}$ 表示第*i*个波束与第*j*个地球站的映射关系, $p_{i,j}$ 表示第*i*个波束到第*j*个地球站的发射功率大小, $c_{i,j}$ 代表每条链路的最大通信速率, $q_{i,j}$ 为乘积系数, I_{th} 为干扰门限值。

[0065] 本发明实施例需要同时满足上述约束条件,在此基础上,通过发射功率和映射关系的联合优化,分配系统资源以提高系统容量。

[0066] 考虑一个NGSO星座系统和GSO卫星系统同频共存的场景,NGSO系统由*S*颗NGSO卫星和*N*个地球站组成,每颗NGSO卫星上安装有*K*个电扫相控阵波束。

[0067] 定义NGSO星座系统的发射功率矩阵 $P = [p_{i,j}] (S \cdot K) \times N$,NGSO卫星上波束和地球站的映射关系矩阵 $A = [a_{i,j}] (S \cdot K) \times N$,其中, $p_{i,j}$ 表示第*i*个波束到第*j*个地球站的发射功率大小,每个 $p_{i,j}$ 满足 $P_{\min} \leq p_{i,j} \leq P_{\max}$ 或 $p_{i,j} = 0$; $a_{i,j}$ 表示第*i*个波束与第*j*个地球站的映射关系,若NGSO星座的第*i*个波束与*j*个NGSO地球站建立链路,则对应 $a_{i,j}$ 取值为1,否则取值为0。具体实现方法如图2所示,包括以下步骤:

[0068] 步骤S201,确定优化目标,即NGSO星座系统的某一种系统性能,在此不作限定,本发明实施例可以系统容量性能为例,根据系统容量性能设置相应的约束条件,利用约束条件构造出满足约束条件的约束方程,其中,约束方程需包含干扰约束方程、对功率矩阵*P*的约束方程和对波束映射关系矩阵*A*的约束方程。

[0069] 这里,为了更加准确地计算出发射功率和映射关系的最优解,在根据约束条件计算得到发射功率的最优解和映射关系的最优解之前,通常还包括:

[0070] 进行凸优化问题转化操作,以使转化后满足凸优化问题的标准形式。

[0071] 步骤S202,对系统性能和约束方程适当转化,以使转化后满足凸优化问题的标准形式;

[0072] 步骤S203,对凸优化问题进行求解,分析卫星和地球站之间的所有潜在链路的干扰特性与约束特性,分别得到每条潜在链路上的发射功率 $p_{i,j}$ 和NGSO卫星星上波束和地球站映射关系 $a_{i,j}$ 。

[0073] 步骤S204,迭代计算 $p_{i,j}$ 和 $a_{i,j}$ 的最优解 $\bar{p}_{i,j}$ 和 $\bar{a}_{i,j}$,得到最优解矩阵 P_{opt} 和 A_{opt} 。

[0074] 在求解过程中,每条潜在链路发射功率 $p_{i,j}$ 所在的矩阵 P_0 经过干扰特性与约束特性优化后得到发射功率矩阵 P_1 ,其中,矩阵 P_1 确定映射关系矩阵 A_1 ,通过映射关系矩阵 A_1 来优化发射功率矩阵 P_1 得到新的发射矩阵 P_2 , P_2 又确定得到了映射关系矩阵 A_2 ,以此类推,不断地互相迭代至收敛得到最后的 $\bar{p}_{i,j}$ 和 $\bar{a}_{i,j}$ 。

[0075] 步骤S205,根据每条链路上的传播状态、链路余量调整调制方式,在满足工程所需余量的条件下,最大化链路速率,使系统容量 C_{opt} 达到最优。

[0076] 作为一种可能的实施例,本实例中考虑系统容量指标为吞吐量 T_m 。NGSO与GS0星座卫星系统的仿真参数分别如下表1、表2所示:

[0077] 表1

[0078]

参数	值
NGSO 卫星个数 S	8
NGSO 卫星轨道高度	20182 km
NGSO 卫星轨道倾角	53 °
NGSO 卫星轨道偏心率	0
NGSO 卫星波束数 K	每颗星 8 个波束
NGSO 地球站个数 N	64
NGSO 星座系统下行通信频点	20.075 GHz
NGSO 星座系统下行通信带宽	49 MHz
NGSO 卫星星上波束的发射功率最大值	9.9 dBW
NGSO 卫星星上波束的发射功率最小值	5.5 dBW
NGSO 卫星星上波束的峰值增益	39.9dBi
NGSO 地球站接收天线峰值增益	38.7 dBi

[0079] 表2

[0080]

参数	值
GSO 卫星位置	128 °E
GSO 地球站位置	128 °E, 0°N (GSO 卫星星下点)
GSO 卫星系统下行通信频点	20.075 GHz

[0081]

GSO 卫星系统下行通信带宽	36MHz
GSO 卫星发射功率	3.6 dBW
GSO 卫星发射天线峰值增益	55 dBi
NGSO 地球站接收天线峰值增益	33.7 dBi

[0082] 定义发射功率矩阵 $P = [p_{i,j}]_{(S \cdot K) \times N}$, 其中, S, K, N 由上表给出, 每个 $p_{i,j}$ 满足 $0 \leq p_{i,j} \leq P_{\max}$ 。

[0083] 定义波束链路分配矩阵 $A = [a_{i,j}]_{(S \cdot K) \times N}$, 设 $a_{i,j} \in \{0, 1\}$ 表示NGSO星座的第 i 个波束与第 j 个NGSO地球站的映射关系, 本实例假设一个波束同一时间最多只能与一个地球站建立通信链路, 反之亦然, 因此波束分配元素 $a_{i,j}$ 满足:

$$[0084] \quad \begin{cases} \sum_{j=1}^N a_{i,j} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^N a_{i,j} \leq 1 \end{cases}$$

[0085] 通过以上定义, 我们可以将吞吐量 T_m 通过下式表示:

$$[0086] \quad T_m = \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} c_{i,j}$$

[0087] 其中, $c_{i,j}$ 代表每条链路的最大通信速率。

[0088] 由于NGSO星座系统与GSO卫星系统使用同一通信频点, 当NGSO星座的第 i 个波束与第 j 个地球站建立下行通信链路时, NGSO星座的第 i 个波束会对GSO地球站接收端产生同频干扰, 对应的干扰值 $I_{i,j}$ 可表示为:

$$[0089] \quad I_{i,j} = p'_{i,j} G_{\text{ngt}}(\theta_1) G_{\text{gr}}(\theta_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{i,j}} \right)^2$$

[0090] 其中, $G_{\text{ngt}}(\theta_1)$ 为NGSO星上波束在GSO地球站方向上的发射增益, $G_{\text{gr}}(\theta_2)$ 为GSO地球站在第 i 个波束所在NGSO卫星方向上的接收增益, $d_{i,j}$ 为第 i 个波束所在NGSO卫星到GSO地球站的距离, $p'_{i,j}$ 为NGSO波束发射功率 $p_{i,j}$ 折算到重叠频段的等效发射功率, 其关系为:

$$[0091] \quad p'_{i,j} = p_{i,j} \min \left(\frac{W_g}{W_{ng}}, 1 \right)$$

[0092] 其中, W_{ng} 为NGSO星座系统下行通信带宽, W_g 为GS0星座系统下行通信带宽, 因此, 干扰值 $I_{i,j}$ 与发射功率 $p_{i,j}$ 的关系可以表示成如下形式:

$$I_{i,j} = q_{i,j} p_{i,j}$$

$$[0093] \quad q_{i,j} = G_{ngt}(\theta_1) G_{gr}(\theta_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{i,j}} \right)^2 \min \left(\frac{W_g}{W_{ng}}, 1 \right)$$

[0094] 其中, $q_{i,j}$ 为系数, 则GS0地球站接收到来自NGSO星座的集总干扰 I 计算如下:

$$[0095] \quad I = \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} I_{i,j} = \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} q_{i,j} p_{i,j}$$

[0096] 综上, NGS0星座系统应满足以下约束条件:

[0097] 系统发射功率 $p_{i,j}$ 满足 $0 \leq p_{i,j} \leq P_{\max}$ 。

[0098] 系统一个波束只能与一个地球站建立通信链路, 反之亦然。

[0099] 系统应满足干扰规避条件, 干扰值低于干扰判别标准 I_{th} (干扰噪声比门限值为 -12.2dB)。

[0100] 应用联合优化方法, 为求得系统性能吞吐量 T_m 的最大值, 具体步骤如下:

[0101] 首先构造出此问题的优化问题与约束方程, 即:

$$\begin{aligned}
 & \max_{\{A, P\}} \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} c_{i,j} \\
 & s.t. \quad C1: \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} q_{i,j} p_{i,j} \leq I_{th} \\
 & \quad C2: \sum_{j=1}^N a_{i,j} \leq 1, \quad \forall i \\
 & \quad C3: \sum_{i=1}^{S \cdot K} a_{i,j} \leq 1, \quad \forall j \\
 & \quad C4: 0 \leq p_{i,j} \leq P_{\max}, \quad \forall i, j \\
 & \quad C5: a_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j
 \end{aligned}$$

[0103] 将此问题转化为凸优化问题, 即转化模型的相应条件, 使之满足凸优化问题的标准形式。转化过程如下: 目标函数为求吞吐量 T_m 的最大值, 将此最大化问题转换为求最小化问题; 优化变量为发射功率 $p_{i,j}$ 和波束链路 $a_{i,j}$, 其中 $p_{i,j}$ 为连续变量, $a_{i,j}$ 为非连续变量, 将 0-1 非连续变量 $a_{i,j}$ 放松成取值范围为 $[0, 1]$ 的连续变量, 最终结果为:

$$\begin{aligned}
& \min_{\{A, P\}} - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} c_{i,j} \\
& s.t. \quad C1: I_{th} - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} q_{i,j} p_{i,j} \geq 0 \\
[0104] \quad & C2: 1 - \sum_{j=1}^N a_{i,j} \geq 0, \quad \forall i \\
& C3: 1 - \sum_{i=1}^{S \cdot K} a_{i,j} \geq 0, \quad \forall j \\
& C4: p_{i,j} \in [0, P_{\max}], \quad \forall i, j \\
& C5: a_{i,j} \in [0, 1], \quad \forall i, j
\end{aligned}$$

[0105] 求解该问题:列出拉格朗日函数:

$$\begin{aligned}
[0106] \quad L(A, P, \lambda, \mu, \eta) = & - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} c_{i,j} - \lambda \left(I_{th} - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \sum_{j=1}^N a_{i,j} q_{i,j} p_{i,j} \right) \\
& - \sum_{j=1}^N \mu_j \left(1 - \sum_{i=1}^{S \cdot K} a_{i,j} \right) - \sum_{i=1}^{S \cdot K} \eta_i \left(1 - \sum_{j=1}^N a_{i,j} \right)
\end{aligned}$$

[0107] 其中, λ, μ, η 均为拉格朗日乘子, 初始化拉格朗日乘子, 运用拉格朗日对偶分解法求解该问题, 其中原问题的对偶函数为:

$$[0108] \quad \theta(\lambda, \mu, \eta) = \inf \{L(A, P, \lambda, \mu, \eta) | 0 \leq p_{i,j} \leq P_{\max}, a_{i,j} \in [0, 1], \forall i, j\}$$

[0109] 将此对偶函数分解成一个主问题和 $(S \cdot K) \times N$ 个子问题求解, 其中每个子问题的最优解 $\bar{p}_{i,j}$ 和 $\bar{a}_{i,j}$ 满足 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 最优化条件, 迭代计算 $p_{i,j}$ 和 $a_{i,j}$ 的最优解 $\bar{p}_{i,j}$ 和 $\bar{a}_{i,j}$ 。在迭代计算 $\bar{a}_{i,j}$ 的过程中, 由于约束条件 C2 和 C3 中存在互相耦合、制约的关系, 因此引入图论中的二分模型, 求取问题转化为二分图最小权匹配问题, 利用 Kuhn-Munkres 算法完成最小权匹配, 从而更新计算得到 $\bar{a}_{i,j}$;

[0110] 重复迭代直至收敛, 计算出凸优化问题的最优解 $\bar{p}_{i,j}$ 和 $\bar{a}_{i,j}$, 得到最优解矩阵 P_{opt} 和 A_{opt} , 并计算出吞吐量 T_m 最优值;

[0111] 在上述吞吐量最优值计算的基础上, 可再调整卫星通信星座的调制方式, 使吞吐量 T_m 达到更优值。

[0112] 其中, 调制方式包括但不限于自适应调制编码方式 (ACM)、脉码调制方式 (PCM)、相位键控调制方式 (PSK/DPSK/QPSK)、正交振幅调制方式 (QAM) 和最小移频键控调制方式 (MSK) 中的一种或多种。

[0113] 针对在 GSO 同频共存场景下的 NGSO 星座系统, 通过联合优化方式, 实现已经规避了干扰的卫星中的发射功率、优化波束链路的分配, 并调整调制方式等系统资源, 以提升系统的整体容量。

[0114] 作为一种可选的实施例,若NGSO星座系统由于干扰值超出干扰门限,为保证NGSO星座系统正常的通信业务进行,则将相应链路进行通断、切换等操作,使得映射关系或分配功率发射变化,此时则通过本发明实施例提供的通过发射功率和映射关系的联合优化方法,重新对系统性能进行优化。

[0115] 为突显本发明实时优化方法的优化性能,现将本发明实施例与传统分配策略1、2分别进行对比分析,其中,分配策略1、2描述如下:

[0116] 分配策略1:当前NGSO星座系统采用的空域隔离的方式以规避对GSO的有害同频干扰,设置链路分离角为 6° ,在此基础上从地球站的角度,以“最大仰角准则”分配星上波束资源。

[0117] 分配策略2:采用与分配策略1相同的干扰规避策略,设置链路分离角为 6° 的空域隔离;在此约束下,以链路通信速率 $c_{i,j}$ 作为权值,采用KM算法求解最大权分配问题,根据求解结果完成相应的星上波束资源分配。

[0118] 由图4、6可知,三种方法均能有效规避NGSO星座系统对GSO卫星系统的有害干扰。如图3所示,NGSO星座系统使用本发明实施例方法时对应的系统吞吐量整体高于使用分配策略1时的系统吞吐量,平均高出6.1%;由图5、6所示,本发明实施例方法和分配策略2在集总干扰约束较弱的情况下对应的NGSO星座系统吞吐量的差异较小;但轨道条件较差时,GSO地球站接收的集总干扰约束变强,本发明实施例方法相比分配策略2,吞吐量的最差值提高了11.6%。

[0119] 由上述分析可知,本发明实施例通过调整NGSO星座系统中发射机的发射功率、NGSO卫星星上波束和地球站的映射关系、调整调制方式等系统资源,可以保证不对同频地球同步轨道通信系统进行干扰的情况下,优化资源分配,使系统容量达到最优。

[0120] 如图7所示,本发明实施例还提供一种卫星通信星座的系统容量优化装置,卫星通信星座包括多个非地球同步轨道卫星,装置包括:

[0121] 获取模块,用于获取卫星通信星座中系统容量性能的约束条件,约束条件包括波束与地球站映射关系的约束条件、发射功率的约束条件和干扰值的约束条件,干扰值通过映射关系以及发射功率来表征;

[0122] 计算模块,用于根据约束条件计算得到发射功率的最优解和映射关系的最优解;

[0123] 通信模块,用于根据发射功率的最优解和映射关系的最优解进行通信。

[0124] 本发明实施例提供的卫星通信星座的系统容量优化装置,与上述实施例提供的卫星通信星座的系统容量优化方法具有相同的技术特征,所以也能解决相同的技术问题,达到相同的技术效果。

[0125] 本发明实施例所提供的卫星通信星座的系统容量优化方法和装置的计算机程序产品,包括存储了程序代码的计算机可读存储介质,所述程序代码包括的指令可用于执行前面方法实施例中所述的方法,具体实现可参见方法实施例,在此不再赘述。

[0126] 所属领域的技术人员可以清楚地了解到,为描述的方便和简洁,上述描述的系统 and 装置的具体工作过程,可以参考前述方法实施例中的对应过程,在此不再赘述。

[0127] 另外,在本发明实施例的描述中,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是

两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0128] 所述功能如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0129] 在本发明的描述中,需要说明的是,术语“中心”、“上”、“下”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。此外,术语“第一”、“第二”、“第三”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0130] 本发明实施例还提供一种电子设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,处理器执行计算机程序时实现上述实施例提供的卫星通信星座的系统容量优化方法的步骤。

[0131] 本发明实施例还提供一种计算机可读存储介质,计算机可读存储介质上存储有计算机程序,计算机程序被处理器运行时执行上述实施例的卫星通信星座的系统容量优化方法的步骤。

[0132] 最后应说明的是:以上所述实施例,仅为本发明的具体实施方式,用以说明本发明的技术方案,而非对其限制,本发明的保护范围并不局限于此,尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,其依然可以对前述实施例所记载的技术方案进行修改或可轻易想到变化,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改、变化或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明实施例技术方案的精神和范围,都应涵盖在本发明的保护范围之内。

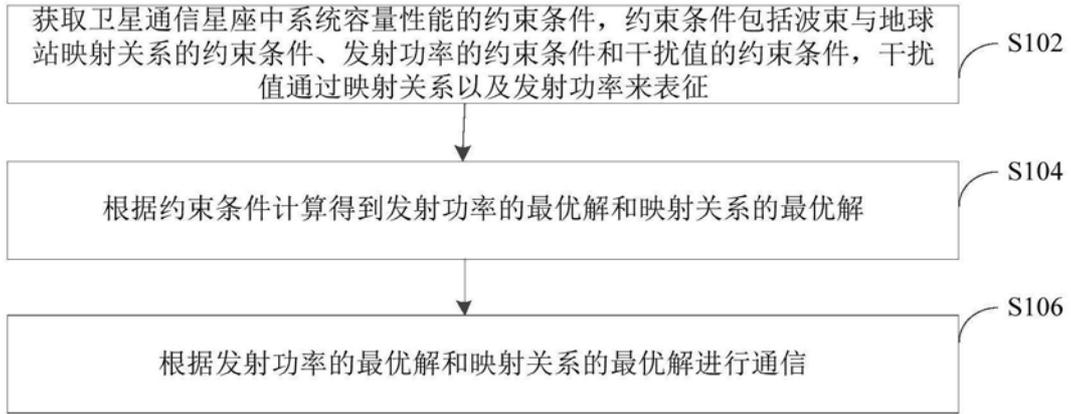


图1

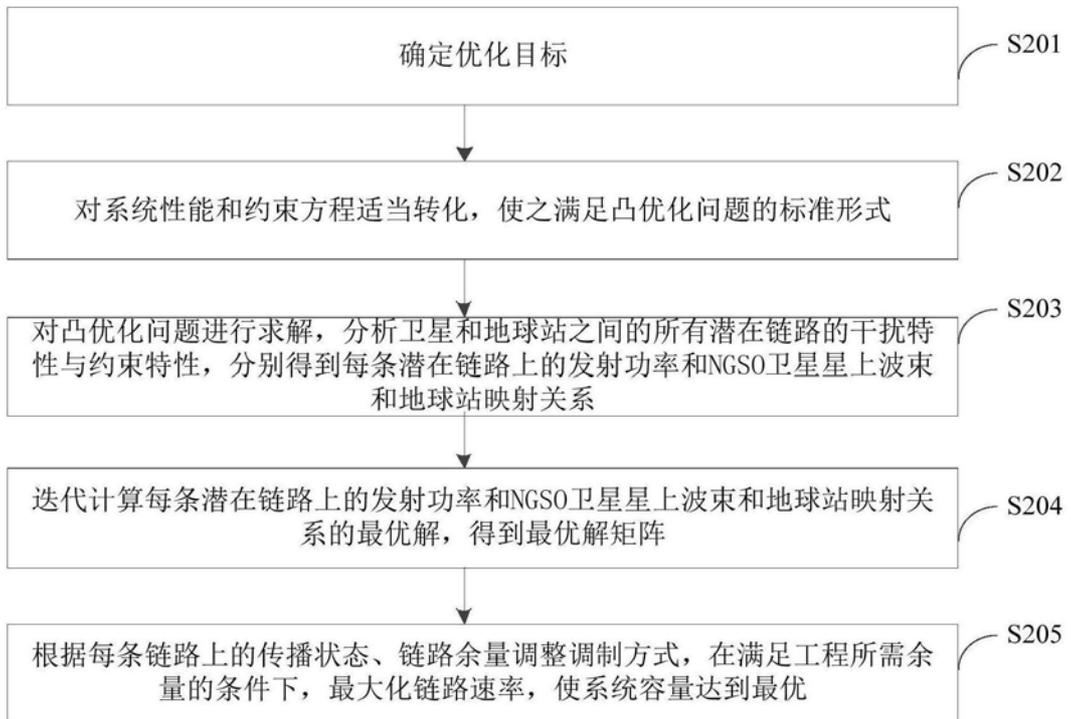


图2

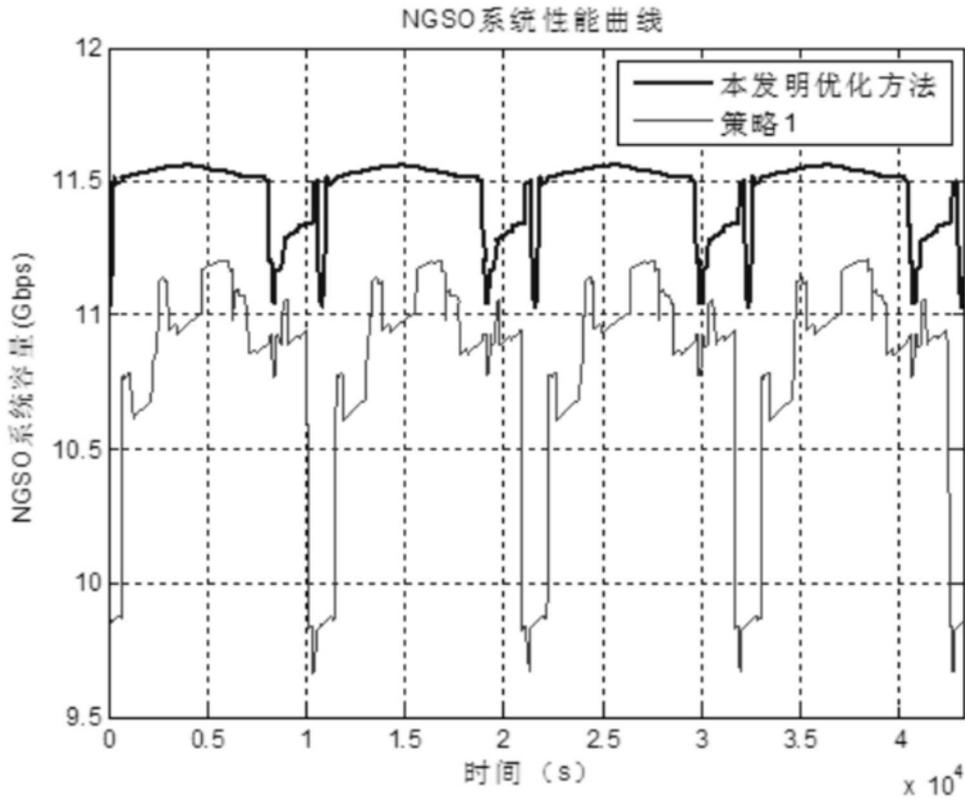


图3

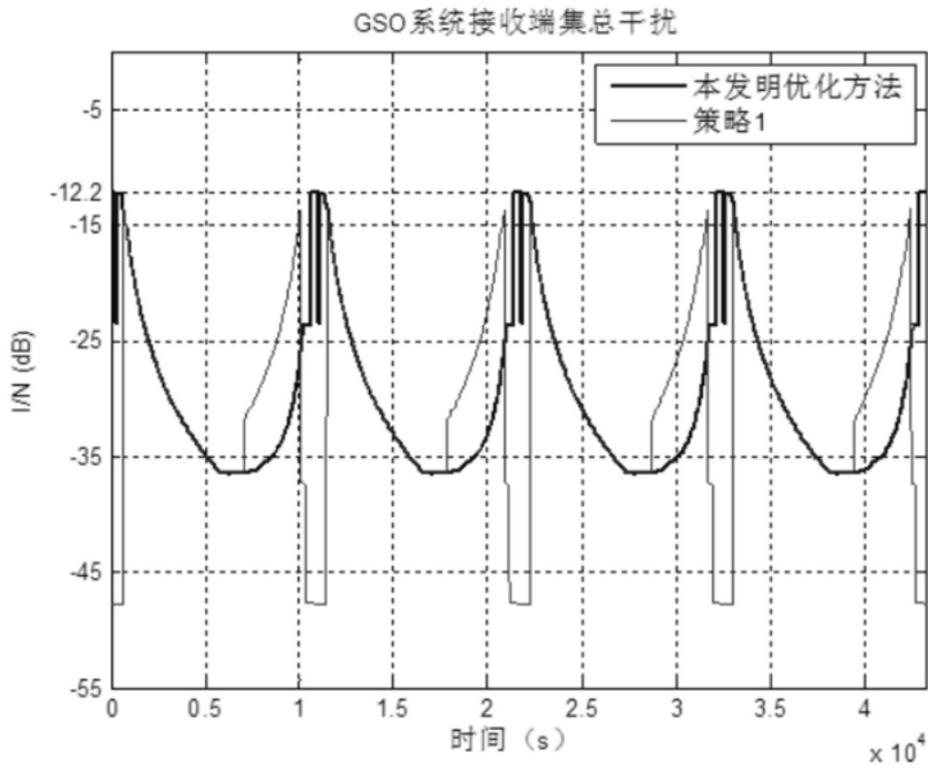


图4

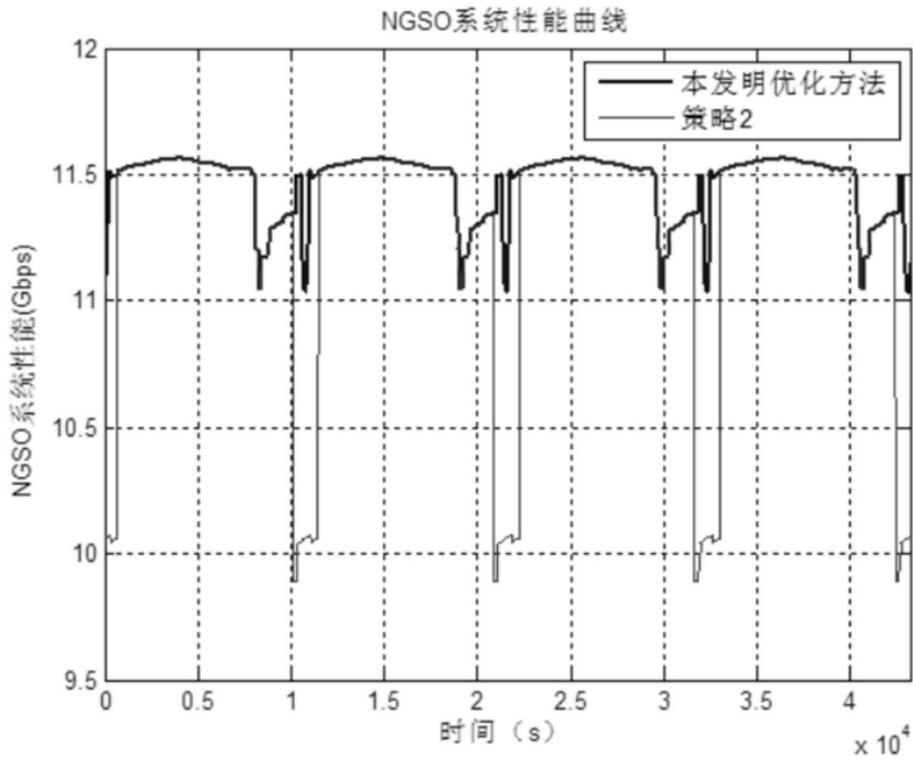


图5

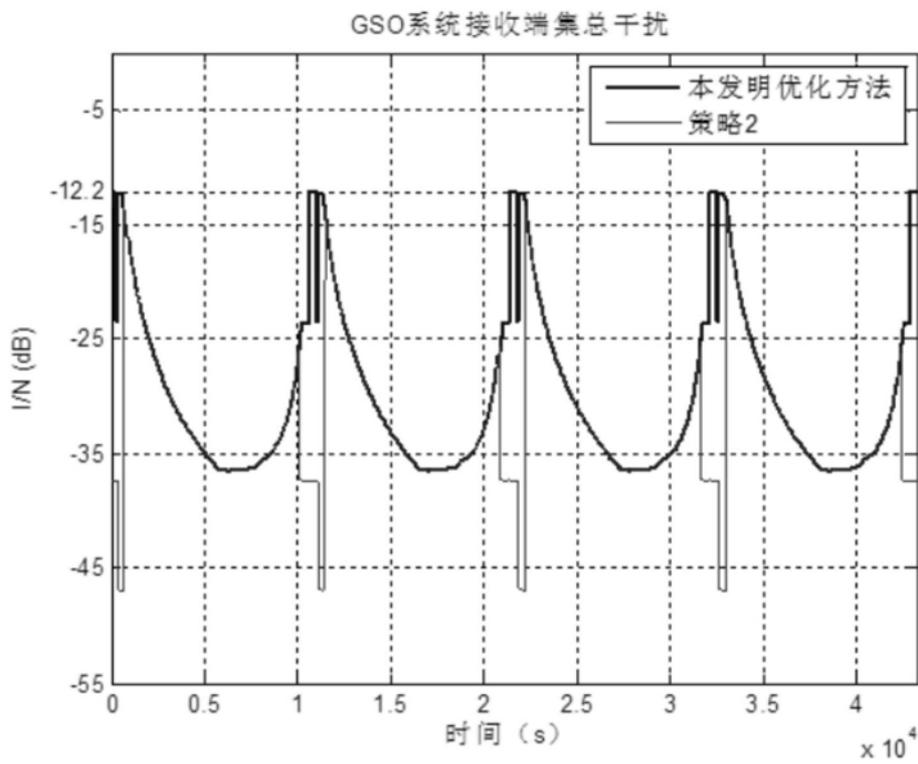


图6



图7