



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108712202 A

(43)申请公布日 2018.10.26

(21)申请号 201810468891.1

(22)申请日 2018.05.16

(71)申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区100084信箱82
分箱清华大学专利办公室

(72)发明人 靳瑾 张晨 李婷 晏坚 匡麟玲

(74)专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

代理人 徐宁 孙楠

(51) Int. Cl.

H04B 7/185(2006.01)

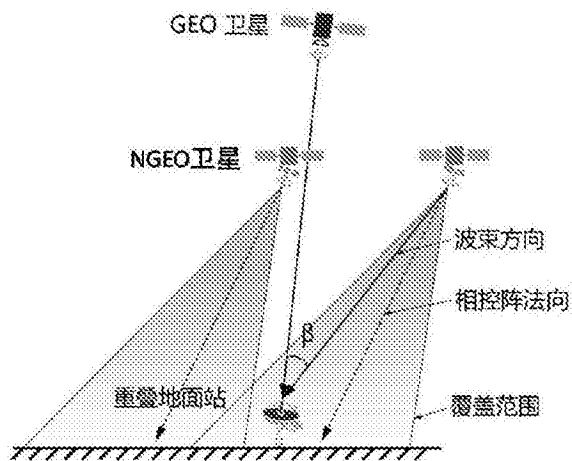
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

通过偏转天线指向规避同频干扰的方法及卫星通信系统

(57)摘要

本发明涉及一种通过偏转天线指向规避同频干扰的方法及卫星通信系统,其包括:在NGEO通信卫星上设置有一个以上的星载天线;确定NGEO卫星通信系统的星座构型以及地面用户类型和分布情况,选择变量描述NGEO卫星通信系统上天线的法向方位;根据ITU的关于GEO卫星系统的干扰保护规定,选择一组衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 α ;根据卫星通信系统对自身通信质量的要求,确定一组衡量卫星通信系统链路质量的指标 β ;根据指标 α 和指标 β 建立相控阵天线法向方位的非线性优化模型;通过迭代求解优化变量,输出一套最优的相控阵天线偏转指向设置方案。本发明保证了自身的通信链路质量和可靠性要求,使得该卫星系统能够与GEO卫星系统有效地同频共存。



CN 108712202 A

1. 一种通过偏转天线指向规避同频干扰的方法,其特征在于包括以下步骤:

1) 在NGEO通信卫星上设置有一个以上的星载天线;

2) 确定NGEO卫星通信系统的星座构型以及地面用户类型和分布情况,选择变量描述NGEO卫星通信系统星上天线的法向方位;

3) 根据ITU的关于GEO卫星系统的干扰保护规定,选择一组衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 α ;

4) 根据卫星通信系统对自身通信质量的要求,确定一组衡量卫星通信系统链路质量的指标 β ;

5) 根据指标 α 和指标 β 建立相控阵天线法向方位的非线性优化模型;

6) 通过迭代求解优化变量,输出一套最优的相控阵天线偏转指向设置方案。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤3)中,衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$,其中每个指标均不能超过ITU相关建议书中规定的限值, $\alpha_i \leq \alpha_{i\text{th}}, i = 1, \dots, n$;其中, n 表示指标的个数, α_i 表示第*i*个用于描述系统干扰程度的干扰指标; $\alpha_{i\text{th}}$ 表示第*i*个指标对应应在ITU建议书中规定的限值。

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤4)中,衡量卫星通信系统链路质量的指标 $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_n]^T$, β_i 表示第*i*个用于衡量卫星通信系统链路质量的指标, $i = 1, \dots, n$ 。

4. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤2)中,根据自身系统业务需求设置NGEO卫星通信系统的星座构型和地面用户类型及分布情况,包括星座的轨道类型、轨道面数,每个轨道面的轨道根数及面内卫星分布情况;地面用户的类型、地面同频小区中心的平均距离和地面同频小区内地面用户的密度。

5. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤2)中,描述NGEO卫星通信系统星上天线的法向方位的变量选择方法为:以卫星和地心的连线为轴,星上相控阵天线的法向方位用两个角自由度描述 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$, θ_1 为角自由度1, θ_2 为角自由度2;并用时间变量*t*来描述相控阵天线法向方位调整与时间的关系。

6. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤5)中,相控阵天线法向方位的非线性优化模型为:

优化变量: $\theta(t)$;

目标函数: $\max\{\beta\}$;

约束条件: $\alpha_i \leq \alpha_{i\text{th}}, i = 1, \dots, n$,以及其他已有通信指标约束。

7. 如权利要求1~6任一项所述的方法,其特征在于:所述步骤3)和步骤4)中,确定相应的对GEO卫星系统的干扰及自身通信质量的方法为:首先计算出NGEO卫星通信系统与GEO卫星系统的相对位置关系;然后利用计算得到的相对位置关系求取用于描述对GEO卫星系统的干扰及自身通信质量的对应指标。

8. 一种基于如权利要求1~7任一项所述方法的通过偏转天线指向规避同频干扰的NGEO卫星通信系统,其特征在于:它包括位于多个轨道面的若干颗NGEO卫星组成的星座及位于全球或低纬度地区的若干地球站;每颗卫星有一个以上的星载天线;NGEO卫星通信系统中的各卫星根据所述方法输出的最优相控阵天线偏转指向设置方案,选取现有的实现方式对星载天线指向的偏转控制,实现了在规避与同步轨道卫星发生同频干扰的同时,自身

通信链路性能不显著恶化的目的。

9. 如权利要求8所述的系统,其特征在于:所述实现方式采用天线跟随卫星星体转动,通过卫星的姿态控制来偏转天线指向;或采用天线自身相对星体转动,包括通过调整相控阵天线的安装法向的静态实现方式,以及通过机械或电子控制方式动态地调整天线法向方位。

10. 一种通过偏转天线指向规避同频干扰的优化设计系统,其特征在于:该系统包括初始化模块、星上天线法向方位描述模块、干扰程度指标设置模块、链路质量指标设置模块、非线性优化模型建立模块和方案输出模块;

所述初始化模块用于确定NGEO卫星通信系统的星座构型以及地面用户类型和分布情况,同时每个NGEO通信卫星上设置有一个以上的星载天线;

所述星上天线法向方位描述模块用于选择变量描述NGEO卫星通信系统星上天线的法向方位;

所述干扰程度指标设置模块根据ITU的关于GEO卫星系统的干扰保护规定,选择一组衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 α ;

所述链路质量指标设置模块根据卫星通信系统对自身通信质量的要求,确定一组衡量卫星通信系统链路质量的指标 β ;

所述非线性优化模型建立模块根据指标 α 和指标 β 建立相控阵天线法向方位的非线性优化模型;

所述方案输出模块通过迭代求解优化变量,输出一套最优的相控阵天线偏转指向设置方案。

通过偏转天线指向规避同频干扰的方法及卫星通信系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种航天工程通信技术领域,特别是关于一种通过偏转天线指向规避同频干扰的方法及卫星通信系统。

背景技术

[0002] 近年来,以SpaceX、OneWeb为代表的新兴商业航天企业提出建设低轨星座为全球提供互联网接入服务,并加紧布局抢占发展先机,一场由技术革新和商业资本驱动卫星互联网发展浪潮正席卷全球。国际电信联盟 (ITU) 作为联合国负责管理全球频谱资源和轨位资源的重要机构,针对频率申请实行“先到先得”的原则,后申请的系统需要向有优先级的卫星系统提出频率协调,不得对需要保护的系统尤其是同步卫星系统产生有害干扰。巨大的频谱需求和有限的频率资源之间的矛盾是约束众多卫星互联网发展的关键难点,如何与GEO卫星系统实现有效的同频共存成为NGEO系统面临的当务之急。

[0003] 目前,面对采用Ku和Ka频段的NGEO卫星系统与GEO卫星系统之间存在潜在的频率干扰问题,主要的缓解干扰的技术为:当NGEO卫星位于中低纬地区上空时,通过关闭部分波束来减小单颗卫星的覆盖区域,增大与GEO卫星链路的分离角,形成空域隔离来减小干扰;当NGEO卫星位于赤道上空附近时,卫星关机,停止提供服务。为了保证NGEO星座整体覆盖范围不受影响,通常采用备份星提高低轨星座的覆盖重数,极大增加了星座总成本。

[0004] 近期,Oneweb公司提出了一种名为“Progressive Pitch”的技术,其基本原理是卫星天线逐渐倾斜配合卫星波束关闭,卫星天线始终在轨道平面内朝赤道方向倾斜,且倾斜的角度随着纬度的降低而增大,具有南北半球对称的特性;当卫星接近赤道上空时卫星必须关机并完成天线倾斜角度快速反转操作。该方法能够达到规避对GEO卫星系统同频干扰的效果,但会导致中低纬度地区的地球站接入低仰角卫星,整个通信系统的载噪比受到严重影响。以OneWeb星座的1200km轨道高度为例,采用该技术后,星地链路最远可能增长3倍,相应载噪比下降达到9dB以上。而且卫星每一轨都需要在南北纬低纬度地区反复调整天线指向,对于低轨卫星,一个轨道周期为几十分钟,这种频繁调整天线指向的操作对卫星的可靠性和寿命都提出了很高的挑战。

发明内容

[0005] 针对上述问题,本发明的目的是提供一种通过偏转天线指向规避同频干扰的方法及卫星通信系统,其在有效规避对GEO卫星系统(包括但不限于卫星通信系统)的同频干扰前提下,不显著降低系统载噪比、不增加卫星个数、卫星系统无需关机、还可通过设置静态的偏转角度方案避免频繁的星上操作,保证了自身的通信链路质量和可靠性要求,使得该卫星系统能够与GEO卫星系统有效地同频共存。

[0006] 为实现上述目的,本发明采取以下技术方案:一种通过偏转天线指向规避同频干扰的方法,其特征在于包括以下步骤:1) 在NGEO通信卫星上设置有一个以上的星载天线;2) 确定NGEO卫星通信系统的星座构型以及地面用户类型和分布情况,选择变量描述NGEO卫星

通信系统星上天线的法向方位;3) 根据ITU的关于GEO卫星系统的干扰保护规定,选择一组衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 α ;4) 根据卫星通信系统对自身通信质量的要求,确定一组衡量卫星通信系统链路质量的指标 β ;5) 根据指标 α 和指标 β 建立相控阵天线法向方位的非线性优化模型;6) 通过迭代求解优化变量,输出一套最优的相控阵天线偏转指向设置方案。

[0007] 进一步,所述步骤3)中,衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$,其中每个指标均不能超过ITU相关建议书中规定的限值, $\alpha_i \leq \alpha_{ith}, i = 1, \dots, n$;其中, n 表示指标的个数, α_i 表示第 i 个用于描述系统干扰程度的干扰指标; α_{ith} 表示第 i 个指标对应应在ITU建议书中规定的限值。

[0008] 进一步,所述步骤4)中,衡量卫星通信系统链路质量的指标 $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_n]^T$, β_i 表示第 i 个用于衡量卫星通信系统链路质量的指标, $i = 1, \dots, n$ 。

[0009] 进一步,所述步骤2)中,根据自身系统业务需求设置NGEO卫星通信系统的星座构型和地面用户类型及分布情况,包括星座的轨道类型、轨道面数,每个轨道面的轨道根数及面内卫星分布情况;地面用户的类型、地面同频小区中心的平均距离和地面同频小区内地面用户的密度。

[0010] 进一步,所述步骤2)中,描述NGEO卫星通信系统星上天线的法向方位的变量选择方法为:以卫星和地心的连线为轴,星上相控阵天线的法向方位用两个角自由度描述 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$, θ_1 为角自由度1, θ_2 为角自由度2;并用时间变量 t 来描述相控阵天线法向方位调整与时间的关系。

[0011] 进一步,所述步骤5)中,相控阵天线法向方位的非线性优化模型为:

[0012] 优化变量: $\theta(t)$;

[0013] 目标函数: $\max\{\beta\}$;

[0014] 约束条件: $\alpha_i \leq \alpha_{ith}, i = 1, \dots, n$,以及其他已有通信指标约束。

[0015] 进一步,所述步骤3)和步骤4)中,确定相应的对GEO卫星系统的干扰及自身通信质量的方法为:首先计算出NGEO卫星通信系统与GEO卫星系统的相对位置关系;然后利用计算得到的相对位置关系求取用于描述对GEO卫星系统的干扰及自身通信质量的对应指标。

[0016] 一种基于上述方法的通过偏转天线指向规避同频干扰的NGEO卫星通信系统,其特征在于:它包括位于多个轨道面的若干颗NGEO卫星组成的星座及位于全球或低纬度地区的若干地球站;每颗卫星有一个以上的星载天线;NGEO卫星通信系统中的各卫星根据所述方法输出的最优相控阵天线偏转指向设置方案,选取现有的实现方式对星载天线指向的偏转控制,实现了在规避与同步轨道卫星发生同频干扰的同时,自身通信链路性能不显著恶化的目的。

[0017] 进一步,所述实现方式采用天线跟随卫星星体转动,通过卫星的姿态控制来偏转天线指向;或采用天线自身相对星体转动,包括通过调整相控阵天线的安装法向的静态实现方式,以及通过机械或电子控制方式动态地调整天线法向方位。

[0018] 一种通过偏转天线指向规避同频干扰的优化设计系统,其特征在于:该系统包括初始化模块、星上天线法向方位描述模块、干扰程度指标设置模块、链路质量指标设置模块、非线性优化模型建立模块和方案输出模块;所述初始化模块用于确定NGEO卫星通信系统的星座构型以及地面用户类型和分布情况,同时每个NGEO通信卫星上设置有一个以上

的星载天线;所述星上天线法向方位描述模块用于选择变量描述NGEO卫星通信系统星上天线的法向方位;所述干扰程度指标设置模块根据ITU的关于GEO卫星系统的干扰保护规定,选择一组衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 α ;所述链路质量指标设置模块根据卫星通信系统对自身通信质量的要求,确定一组衡量卫星通信系统链路质量的指标 β ;所述非线性优化模型建立模块根据指标 α 和指标 β 建立相控阵天线法向方位的非线性优化模型;所述方案输出模块通过迭代求解优化变量,输出一套最优的相控阵天线偏转指向设置方案。

[0019] 本发明由于采取以上技术方案,其具有以下优点:1、本发明通过优化相控阵天线指向方案增大与GEO卫星系统的链路隔离角,在有效规避对GEO卫星系统的同频干扰前提下,不显著降低系统载噪比、不增加卫星个数、卫星系统无需关机,还可通过设置静态的偏转角度方案避免频繁的星上操作,保证了自身的通信链路质量和可靠性要求。2、本发明与已有的GEO卫星系统同频共存方案相比,能够以简单的实现形式规避对GEO卫星系统的同频干扰,同时最大可能的保证自身系统的通信质量需求,且不增加卫星个数、卫星系统无需关机、还可通过设置静态的偏转角度方案避免频繁的星上操作,提高系统可靠性。3、本发明能增大星座的平均覆盖能力,规避对GEO卫星系统的干扰,结合卫星通信系统自身的通信链路质量需求优化天线指向的偏转方向和偏转程度,可以满足自身通信服务质量和可靠性的要求,降低为规避对GEO卫星系统的干扰所付出的代价。

附图说明

[0020] 图1a是现有技术中通常情况下的天线安装示意图;

[0021] 图1b是本发明具体实施方式中偏转天线指向方案示意图;

[0022] 图2a是本发明实施例中相控阵不偏转时全球地面站的可工作时间百分比示意图;

[0023] 图2b是本发明实施例中相控阵最优偏转时全球地面站的可工作时间百分比示意图;

[0024] 图3a是本发明实施例中相控阵不偏转时全球地面站的有效接收信号强度示意图;

[0025] 图3b是本发明实施例中相控阵最优偏转时全球地面站的有效接收信号强度示意图;

[0026] 图4a是本发明实施例中相控阵不偏转时的星座和覆盖范围示意图;

[0027] 图4b是本发明实施例中相控阵最优偏转时的星座和覆盖范围示意图。

具体实施方式

[0028] 对于非同步轨道卫星系统(NGEO)尤其是低轨(LEO)卫星通信系统而言,单星覆盖能力有限且低纬度地区覆盖重数较低,LEO卫星通信系统与GEO卫星系统的链路夹角会随着纬度的降低而降低,易知,低纬度地区的同频干扰问题是最为严重。相控阵天线是低轨星座载荷发展的趋势之一。然而当前的相控阵天线波束扫描角度范围有限,大多数使用相控阵天线的LEO卫星通信系统只能为低纬度地区提供连续的一重覆盖。当LEO卫星运行到低纬度地区上空时,当仅有的一条LEO链路对GEO卫星系统产生干扰时只能被迫关机,卫星通信系统无其他可用链路,无法正常工作。如图1a、图1b所示,当LEO卫星偏转相控阵天线的指向时,增大了LEO与GEO卫星系统间链路隔离角,同时增大星座的平均覆盖重数。在当前卫星链路

可能与GEO卫星系统链路发生同频干扰时地面站切换到下一颗LEO卫星,卫星系统无需关机即可实现对GEO系统的干扰规避。优化天线指向的偏转方向和角度大小,能够保证地面站接入下一颗LEO卫星时的链路损耗不会显著增加。

[0029] 偏转卫星系统天线指向的方式有多种,可以是天线跟随卫星星体转动,即通过卫星的姿态控制来偏转天线指向;也可以是天线自身相对星体转动,包括通过调整相控阵天线的安装法向(天线偏转安装)来静态实现方式,以及通过机械或电子控制动态地调整天线法向的方式。此外,结合卫星通信系统自身的链路质量要求以及对GEO卫星系统的干扰保护标准,设计相控阵天线的法向优化方案,以达到在不干扰GEO卫星系统的前提下自身获取较好通信质量和提高可靠性的目的。下面结合附图和实施例对本发明进行详细的描述。

[0030] 本发明提供一种通过偏转天线指向规避同频干扰的方法,该方法用于NGEO卫星通信系统中,其包括以下步骤:

[0031] 1) 在NGEO通信卫星上设置有一个以上的星载天线;

[0032] 2) 确定NGEO卫星通信系统的星座构型以及地面用户类型和分布情况,选择变量描述NGEO卫星通信系统星上天线的法向方位;

[0033] 根据自身系统业务需求设置NGEO卫星通信系统的星座构型和地面用户类型及分布情况,包括但不限于以下几个方面:星座的轨道类型、轨道面数,每个轨道面的轨道根数及面内卫星分布情况;地面用户的类型、地面同频小区中心的平均距离和地面同频小区内地面用户的密度等;

[0034] 描述NGEO卫星通信系统星上天线的法向方位的变量选择方法为:由于卫星的天线需要与地面用户天线建立链路,以卫星和地心的连线为轴,星上相控阵天线的法向方位可以用两个角自由度描述 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$, θ_1 为角自由度1, θ_2 为角自由度2,其中,天线法向的偏转不局限于在卫星轨道平面或其他任意平面内;并用时间变量 t 来描述相控阵天线法向方位调整与时间的关系,但是若为天线的偏转安装,则属于静态偏转方式,即天线法向方位与时间无关;

[0035] 3) 根据ITU的关于GEO卫星系统的干扰保护规定,选择一组衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$,如干扰噪声比 I/N 、载干比 C/I 等,其中每个指标均不能超过ITU相关建议书中规定的限值,即 $\alpha_i \leq \alpha_{i,th}, i = 1, \dots, n$;其中, I 表示干扰信号功率; N 表示GEO卫星系统接收机噪声功率, C 表示GEO卫星系统接收端的载波信号功率; n 表示指标的个数, α_i 表示第 i 个用于描述系统干扰程度的干扰指标; $\alpha_{i,th}$ 表示第 i 个指标对应于ITU建议书中规定的限值;

[0036] 4) 根据卫星通信系统对自身通信质量的要求,确定一组衡量卫星通信系统链路质量的指标 $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_n]^T$,如接收机载噪比 C/N 和地面站可用时长占比等; β_i 表示第 i 个用于衡量卫星通信系统链路质量的指标, $i = 1, \dots, n$;

[0037] 5) 根据指标 α 和指标 β 建立相控阵天线法向方位的非线性优化模型;

[0038] 相控阵天线法向方位的非线性优化模型为:

[0039] 优化变量: $\theta(t)$;

[0040] 目标函数: $\max\{\beta\}$;

[0041] 约束条件: $\alpha_i \leq \alpha_{i,th}, i = 1, \dots, n$,以及其他已有通信指标约束,例如,接收端信噪比SNR大于接收机信噪比门限、地面站可用时长占比满足系统可用时间占比要求等等;

[0042] 6) 通过迭代求解优化变量 $\theta(t)$, 从而输出一套最优的相控阵天线偏转指向设置方案。

[0043] 上述步骤3) 和步骤4) 中, 确定相应的对GEO卫星系统的干扰及自身通信质量的方法为: 首先计算出NGEO卫星通信系统与GEO卫星系统的相对位置关系, 如通信链路距离, 干扰链路距离以及通信链路及干扰链路的夹角等等; 然后利用计算得到的相对位置关系求取用于描述对GEO卫星系统的干扰及自身通信质量的对应指标。

[0044] 基于上述方法, 本发明还提供一种通过偏转天线指向规避同频干扰的NGEO卫星通信系统, 其包括位于多个轨道面的若干颗NGEO卫星组成的星座及位于全球或低纬度地区的若干地球站; 每颗卫星有一个以上的星载天线。其中, NGENO卫星通信系统中的各卫星根据上述方法输出的最优相控阵天线偏转指向设置方案, 选取现有的实现方式对星载天线指向的偏转控制, 实现了在规避与同步轨道卫星发生同频干扰的同时, 自身通信链路性能不显著恶化的目的。在本实施例中, 实现方式可以是天线跟随卫星星体转动, 即通过卫星的姿态控制来偏转天线指向; 也可以是天线自身相对星体转动, 包括通过调整相控阵天线的安装法向(天线偏转安装)等静态实现方式, 以及通过机械或电子控制等方式动态地调整天线法向方位。

[0045] 本发明还提供一种通过偏转天线指向规避同频干扰的优化设计系统, 其包括初始化模块、星上天线法向方位描述模块、干扰程度指标设置模块、链路质量指标设置模块、非线性优化模型建立模块和方案输出模块。

[0046] 初始化模块用于确定NGEO卫星通信系统的星座构型以及地面用户类型和分布情况, 同时每个NGEO通信卫星上设置有一个以上的星载天线;

[0047] 星上天线法向方位描述模块用于选择变量描述NGEO卫星通信系统星上天线的法向方位;

[0048] 干扰程度指标设置模块根据ITU的关于GEO卫星系统的干扰保护规定, 选择一组衡量卫星通信系统对GEO卫星系统干扰程度的指标 α ;

[0049] 链路质量指标设置模块根据卫星通信系统对自身通信质量的要求, 确定一组衡量卫星通信系统链路质量的指标 β ;

[0050] 非线性优化模型建立模块根据指标 α 和指标 β 建立相控阵天线法向方位的非线性优化模型;

[0051] 方案输出模块通过迭代求解优化变量, 输出一套最优的相控阵天线偏转指向设置方案。

[0052] 实施例:

[0053] 卫星通信系统为一个低轨(LEO) Walker星座, N_{es} 个地面站在全球密集均布。LEO星座与GEO带存在下行频率重叠, 两个系统的轨道参数如表1所示。

[0054] 表1 LEO星座和GEO带的仿真参数

	参数	LEO 星座	GEO 带
[0055]	轨道高度 $h(\text{km})$	1200	35788.1
	轨道倾角 $i(\text{deg})$	89.4	0
	卫星数 N	189	360
	轨道面数 P	9	1
	相位因子 F	5	0

[0056] 选取天线坐标系下的滚转角 Ψ 和俯仰角 Θ 来描述星上天线法向的方位,假设天线偏转安装(与时间无关),则 $\theta = [\Psi, \Theta]^T$;选取干扰噪声比 I/N 作为衡量卫星系统对GEO系统干扰程度的指标,根据ITU建议书的相关规定, I/N 要小于等于ITU规定的-12.2dB的门限值;选取载噪比 C/N 、地面站可用时长占比 $\bar{\delta}$ 作为衡量卫星系统链路质量的指标。

[0057] 在确定了描述变量和评价指标后,需确定相应的对GEO系统的干扰及自身通信质量的计算方法。本实例采用统计的方法解析计算LEO星座对GEO带的干扰及自身通信质量。对于一个星座而言,星座中的参考卫星状态一旦确定,星座其他卫星的状态也唯一地确定,即整个星座在时间域的遍历实际上等价于参考卫星在状态可行域的遍历。由于LEO星座为Walker星座构型,参考卫星的状态可以定义为 $x = [\Omega_0 M_0]^T$,其中 Ω_0 和 M_0 分别为参考卫星的升交点赤经和平近点角。则其他卫星的状态可以表示为:

$$[0058] \quad \begin{cases} \Omega_{i,j} = \Omega_0 + i(2\pi/P) \\ M_{i,j} = M_0 + 2\pi \left(\frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \right) \end{cases} \quad i=0, \dots, P-1, j=0, \dots, S-1 \quad (1)$$

[0059] 其中, N 为卫星数, P 为轨道面数, F 为相位因子。

[0060] 将时间域映射到状态域,每一个时间采样点对应一个参考卫星状态采样点。假设参考卫星的 Ω_0 和 M_0 空间被 N_d 个离散点等分,则共 N_d^2 个状态,每个状态采样点对应的星座中其他卫星的状态都可以通过(1)式计算获得。对于第 k 个状态采样点,定义第 m 个地面站可用为存在至少一颗LEO卫星可以与其建立链路,且链路辐射到各GEO系统接收端的 I/N 均小于-12.2dB,对应 $\delta_{i,k} = 1$,否则 $\delta_{i,k} = 0$;定义第 m 个地面站的所建链路接收端的载噪比为 $(C/N)_{i,k}$ 。遍历整个状态空间,通过空间几何关系和链路预算公式计算得到第 m 个地面站的可用时长占比 $\bar{\delta}_i = \sum_{k=1}^{N_d^2} \delta_{i,k}$,接收端平均信噪比为 $\overline{(C/N)}_i = \sum_{k=1}^{N_d^2} (C/N)_{i,k}$ 。

[0061] 进一步,构造以下非线性优化模型:

[0062] 优化变量: $[\Psi, \Theta]^T$;

[0063] 目标函数: $\max \left\{ \min \left(\overline{(C/N)}_i \right) \right\}, i=1, 2, \dots, N_{es}$;

[0064] 约束条件: $\begin{cases} \frac{I}{N} \leq -12.2 \\ \min(\bar{\delta}_i) \geq 95\%, i=1, 2, \dots, N_{es} \end{cases}$;

[0065] 利用表2中提供的轨道常量和LEO、GEO系统通信参数以及上述解析算法完成相应仿真,通过不断迭代输出最佳偏转天线指向为 $\Psi = -5.26^\circ$, $\Theta = 11.57^\circ$ 。下面对比偏转天线安装与常规天线安装($\Psi = 0^\circ$, $\Theta = 0^\circ$)的仿真结果。如表3所示,可以发现最差地面站平

均可用时间百分比从69.23%提升到了95.11%，而最差地面站有效接收功率仅23.18dB下降到22.08dB，仅牺牲了不到2dB的载噪比，换取了地面站可用时长的大幅度提升。

[0066] 表2轨道参数及LEO和GEO系统通信参数

参数	值
地球引力常数	$398600\text{km}^3/\text{s}^2$
海平面重力加速度	9.80665 m/s^2
地球赤道半径	6378 km
地球旋转速率	7.292115×10^{-5} rad/s
下行频率	18.48GHz
玻尔兹曼常数	$1.38 \times 10^{-23}\text{ W}/(\text{Hz K})$
带宽	500MHz
最小可见仰角	10°
GEO 卫星	
最大离轴角	8.56°
发射功率	19dBW
最大发射增益	52dBi
3dB 半波束角	0.82°
GEO 用户	
最大接收增益	50 dBi
天线口径	2.4m
噪声温度	200K
干扰噪声比门限	-12.2dB
LEO 卫星	
最大离轴角	46°
发射功率	12dBW
最大发射增益	31.54
3dB 半波束角	3.2°
LEO 用户	
最大接收增益	41dBi
天线口径	0.75
噪声温度	200K
载噪比门限	12.2dB

[0069] 表3最差地面站通信性能对比

[0070]

名称	相控阵不偏转 ($\Psi=0^\circ$, $\Theta=0^\circ$)	相控阵最优偏转 ($\Psi=-5.26^\circ$, $\Theta=11.57^\circ$)
平均工作时间百分比 (%)	69.23	95.11
平均有效接收功率 (dB)	23.18	22.08

[0071] 如图2a~图3b所示,对比了表3中两种情况下的有效工作时间百分比和有效接收功率,可以发现在采用本实例优化的静态天线偏转后,低纬度地区的LEO地面站可工作时间百分比得到了显著改善,所付出的代价是低纬度地区地面站的有效接收功率存在一定1到2dB的降低,对LEO系统的链路质量影响很小。图4a、图4b给出了表3中列出两种星座的波束覆盖情况,可以发现当偏转相控阵天线的安装方向后,卫星波束的覆盖范围被扩大了,进一步提高了在低纬度地区LEO星座的覆盖重数。

[0072] 需要指出的是,本实施例所给出的极轨Walker星座、天线静态偏转角度方案和建模与优化方法等都是本发明所涉及的技术的一种实现,该技术不局限于极轨星座或Walker星座,不局限静态的天线偏转角度方案,不局限于I/N、C/N、可用时长占比等评价指标和解析建模与优化方法。此外,该技术方案也不局限于规避对GEO卫星的干扰,也可应用于规避对某些非静止轨道卫星系统的同频干扰,例如工作在8000km高度赤道轨道的O3b卫星系统。

[0073] 由上述分析可知,本发明提出的通过偏转天线指向规避与同步轨道卫星干扰的卫星通信系统,能够有效地规避对GEO系统的同频干扰,不显著降低系统载噪比、不增加卫星个数、卫星系统无需关机、还可通过设置静态的偏转角度方案避免频繁的星上操作,保证了自身的通信链路质量和可靠性要求。

[0074] 上述各实施例仅用于说明本发明,各个步骤都是可以有所变化的,在本发明技术方案的基础上,凡根据本发明原理对个别步骤进行的改进和等同变换,均不应排除在本发明的保护范围之外。

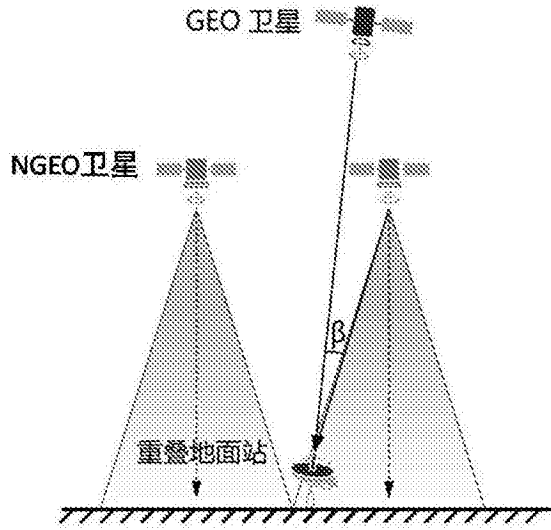


图1a

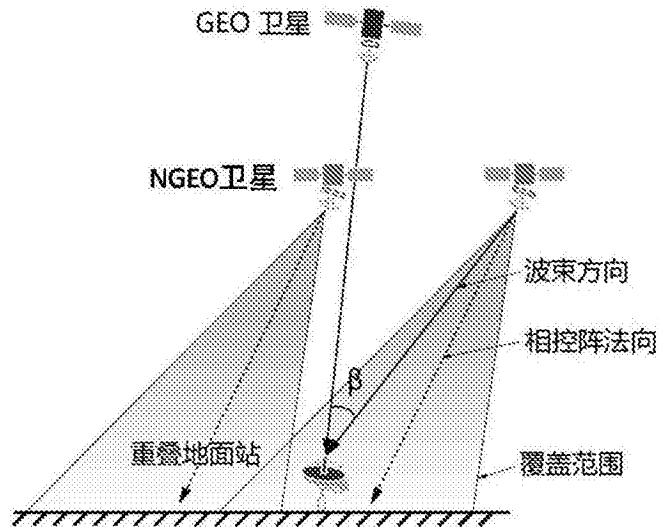


图1b

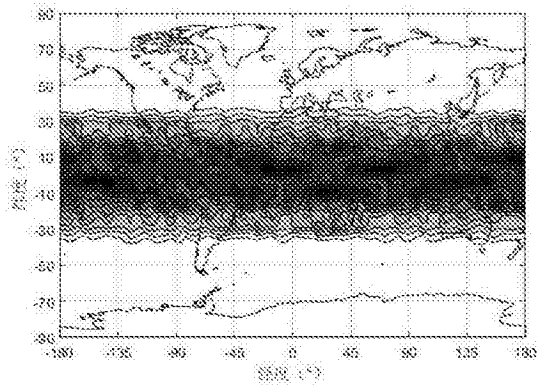


图2a

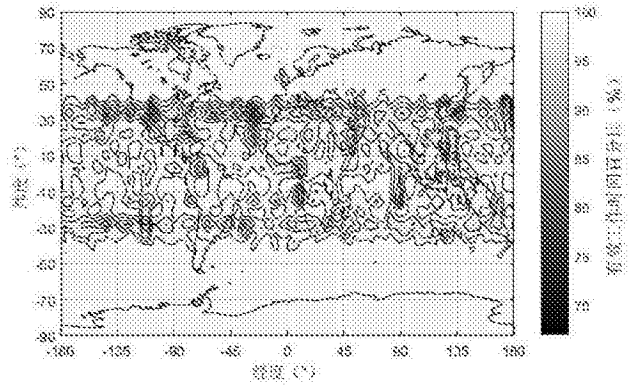


图2b

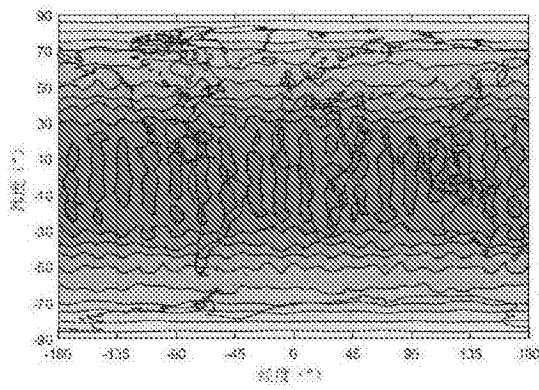


图3a

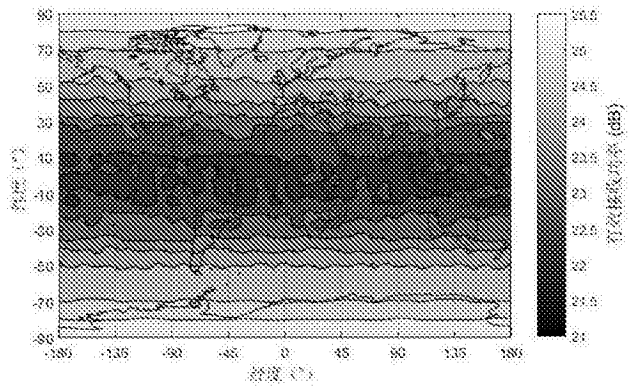


图3b

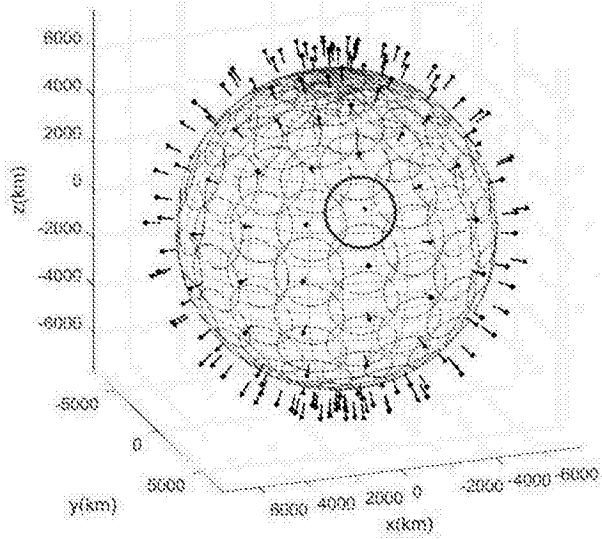


图4a

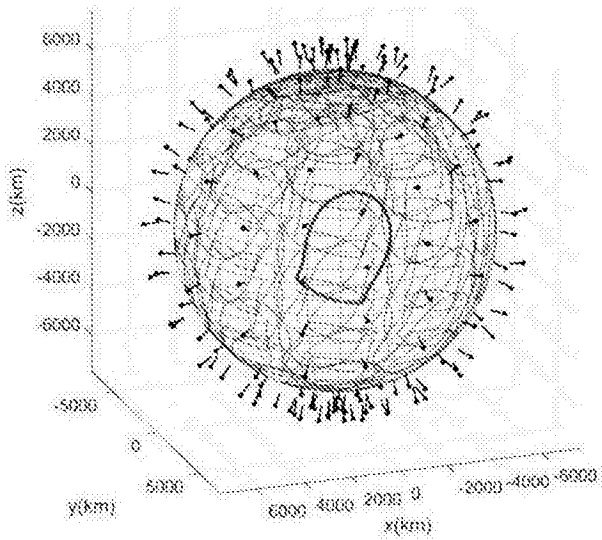


图4b