

基于干扰对齐的 NGSO 星座系统同频干扰抑制

杜冰¹, 李家旺¹, 王先梅¹, 李伟², 刘向南¹, 张海君¹

(1. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083; 2. 国家无线电监测中心, 北京 100037)

摘要: 针对当前太空中, 非静止卫星轨道 (NGSO) 星座系统日益增加, 使用相同频段、轨道邻近的卫星网络越来越多, NGSO 星座系统之间以及 NGSO 星座系统与传统的静止卫星轨道 (GSO) 星座系统之间的同频干扰日益严重的问题, 提出利用无线通信中的干扰对齐算法, 根据卫星网络的传输信道信息, 在发射端匹配特征信道的预编码矩阵, 缓解低轨卫星网络同频干扰问题, 在此基础上以 ChinaSat、OneWeb 和 Fortran 系统进行仿真, 对利用干扰对齐算法前后的干扰数值进行比较, 证明了此方法的可行性, 为今后此类问题的研究提供了参考。

关键词: 卫星移动通信系统; 非静止卫星轨道; 同频干扰; 干扰对齐

中图分类号: TN927

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021236

Suppression of co-channel interference in NGSO constellation system with interference alignment

DU Bing¹, LI Jiawang¹, WANG Xianmei¹, LI Wei², LIU Xiangnan¹, ZHANG Haijun¹

1. School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

Abstract: Aiming at the problem that in the current space, non-geostationary satellite orbit (NGSO) constellation systems were increasing day by day, there are more and more satellite networks nearby orbiting using the same frequency band, and the problem of co-channel interference between NGSO constellation systems and between NGSO constellation systems and traditional geostationary satellite orbit (GSO) constellation systems had become increasingly serious, the interference alignment algorithms of wireless communication was proposed, which matches the precoding matrix of the characteristic channel at the transmitter according to the transmission channel information of the satellite network to alleviate the co-channel interference problem of the low-orbit satellite network. The ChinaSat, OneWeb and Fortran systems were used to simulate and compare the interference values before and after using the interference alignment algorithms, which proves the feasibility of the proposed method and provides a reference for future research on such problems.

Keywords: satellite mobile communication system, non-geostationary satellite orbit, co-channel interference, interference alignment

1 引言

近几年, 卫星通信得到了迅速发展, 非静止卫星轨道 (NGSO, non-geostationary satellite orbit) 通信系统相较于静止卫星轨道 (GSO, geostationary satellite orbit) 通信系统链路传播损耗小、传输时延

小, 采用极轨道或大倾角轨道时可为高纬度地区提供服务, 成为当前卫星通信发展的热点。然而, 卫星频率资源是有限的, 国际电信联盟 (ITU, international telecommunication union) 对于频率的申请实行“先登先占”的原则^[1], 各国争相向太空发射低轨卫星, 同频干扰是一个亟待解决的问题。同频干

收稿日期: 2021-09-04; 修回日期: 2021-12-03

通信作者: 王先梅, xmwang@ustb.edu.cn

基金项目: 国家优秀青年科学基金资助项目 (No.61822104)

Foundation Item: The National Science Found for Excellent Young Scholars (No.61822104)

扰指的是 2 个或多个卫星系统使用的载波频段可能会有部分重叠，此时，一个卫星系统载波所携带的信号对其他系统来说就是无用信号，会对接收机造成干扰。

关于解决同频干扰，频率兼容的技术可从空间、功率、信号分割 3 个角度去考虑^[2]。文献[3]利用马尔可夫链推导出一个 GSO 地球站的保护区，NGSO 地球站不允许分布在保护区，然后基于期望干扰和 GSO 卫星的中断约束，推导出最能保证系统性能的保护半径大小。从而协调了 GSO 星座系统与 NGSO 星座系统的频谱共存，本质上属于空间域的一种隔离技术。文献[4]中提到，OneWeb 低轨卫星星座系统采用一种被称为“渐进俯仰”的专利技术，通过调整卫星姿态以及发射功率以避免对 GSO 卫星的强烈干扰。这属于一种空间域和功率域结合的干扰缓解技术。在信号分割方面，文献[5]提出了一种使用假设检验以及最大后验的频谱策略来区分 GSO 星座信号与干扰 NGSO 信号和噪声，有针对性地保护 GSO 星座系统。

干扰对齐是在对干扰网络容量分析中出现的一种思想。这种思想已经对有线和无线通信网络中的可接入信令维度的数量产生了一系列基本解决方案。文献[6]研究了一种底层频谱共存机制，在多波束卫星与同一频谱内的单波束卫星共存场景下，利用干扰对齐减轻了认知发射机在正常上行链路模式下对主接收机的干扰，证明干扰对齐可有效缓解卫星通信中的同频干扰问题。传统的香农理论仍然是干扰对齐算法的基础，这些算法包括预编码、盲对齐和遍历对齐等，并直接或间接应用于无线干扰网络、协作通信网络、认知无线网络和有线多单播网络等网络结构。盲干扰对齐要求信道条件必须满足一定的特殊性，实际情况难以符合，导致其实用性不强。遍历对齐方案虽然简单，但其一个重要限制是等待互补状态所涉及的时延会随着用户数的增加而增加，不适合大规模 NGSO 星座系统。本文提出利用干扰对齐中的预编码技术^[7]来解决低轨卫星系统中的同频干扰问题。预编码技术先在发射端对信号进行处理，使干扰信号方向性更强，减小所占的信道容量，这样就可以减弱甚至消除干扰对期望接收到的信号的影响。本文方法与现有的一些处理干扰的方法（例如：①将干扰忽略不计。②对干扰信号进行解码然后重构干扰信号，最后消除干扰。③将信号正交化以减小干扰）不同，预编码是减小干扰信号所

占的信号维度，使系统获得最大自由度^[8]。

2 NGSO 星座系统下行干扰模型建立

星座系统的通信干扰主要是由于频谱重叠产生的，因为频谱资源短缺，重叠在所难免。本文考虑的干扰为下行链路中的干扰，即卫星上的发射机向地球站传输信号时，同时有其他卫星上的发射机发射信号造成干扰。

对 Ka 频段的传播特性研究表明：在不考虑天气影响的情况下，对于 L/S 频段的移动卫星信道模型的一些基本思想也同样适用于 Ka 频段^[9]，因此在建立通信链路信道模型时，有 2 种无线信道模型可供参考，即 Lutz 模型和 Corazza 模型。Lutz 模型将卫星与地球站之间的信道分为“好”“坏”2 种状态，又称两状态模型^[10]；Corazza 模型假设接收信号中的直射信号分量和多径信号分量均受到阴影遮蔽的作用，是全阴影模型^[11]。Lutz 模型和 Corazza 模型均适用所有的卫星移动通信信道环境，但相比较来说，Lutz 模型适用于描述静止卫星轨道信道的传播特性，Corazza 模型适用于描述非静止卫星轨道信道的传播特性^[12]。

2.1 NGSO 星座系统与 GSO 星座系统之间的干扰模型

在图 1 所示的干扰场景中，位于 GSO 卫星上的发射机所发射的信号被 GSO 地球站接收到，链路“GSO 卫星-GSO 地球站”为有用信号链路，信道用 H_{GG} 表示。“NGSO 卫星-GSO 地球站”为干扰信号链路，信道用 H_{LG} 表示。

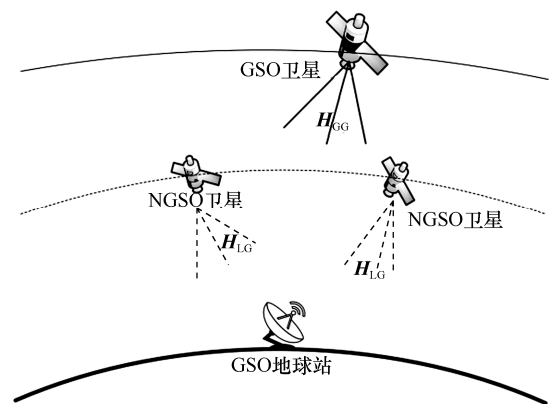


图 1 NGSO 星座系统干扰 GSO 星座系统下行链路示意

H_{GG} 信道中存在直射信号分量且假设没有阴影遮蔽，采用 Lutz 模型中的“好状态信道”，接收信号的包络 r_1 服从莱斯分布，其概率密度函数为

$$f_{\text{Rice}}(r_1) = \frac{r}{\sigma_1^2} \exp\left[-\frac{r_1^2 + z_1^2}{2\sigma_1^2}\right] I_0\left(\frac{r_1 z_1}{\sigma_1^2}\right) \quad (1)$$

其中, z_1 为直射波信号的幅度, σ_1^2 为平均多径功率, $I_0(\cdot)$ 为零阶修正贝塞尔函数^[13]。

令 s 为接收信号的功率, 则 $s = r_1^2$, s 的概率密度函数为

$$f_{\text{Rice}}(s) = \frac{1}{2\sigma_1^2} \exp\left[-\frac{s + z^2}{2\sigma_1^2}\right] I_0\left(\frac{z\sqrt{s}}{\sigma_1^2}\right) \quad (2)$$

式(2)可以看成 \mathbf{H}_{GG} 模型的理论计算表达式。

对于 NGSO 星座系统信道建立选择 Corazza 模型, 可以认为其信道的概率分布服从莱斯和对数正态的联合分布, 其信号包络 r_2 服从

$$f(r_2) = \int_0^\infty f\left(\frac{r_2}{z_2}\right) f_z(z_2) dz_2 \quad (3)$$

其中, $f(r_2 | z_2)$ 是某一给定阴影条件下的莱斯分布 $f(r_2 | z_2) =$

$$\frac{2(K+1)r_2}{z_2^2} \exp\left[-(K+1)\frac{r_2^2}{z_2^2}\right] I_0\left(\frac{2r_2}{z_2} \sqrt{K(K+1)}\right) \quad (4)$$

其中, $I_0(\cdot)$ 为零阶修正贝塞尔函数, K 为莱斯因子, 阴影 z_2 服从对数正态分布

$$f_{z_2}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma z h}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \mu}{h\sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

其中, $h=(\ln 10)/20$, μ 和 σ^2 分别为 $\ln z$ 的均值和方差。

由式(4)、式(5)可得接收信号包络 r_2 的概率密度函数为

$$f_{r_2}(r) = \frac{2(k+1)r}{h\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-k) \cdot \int_0^\infty \frac{1}{z_2} \exp\left[-\frac{(k+1)^2 r^2}{z_2^2} - \frac{(\ln z_2 - \mu)^2}{2(h\sigma)^2}\right] I_0\left(\frac{2r\sqrt{k(k+1)}}{z_2}\right) dz_2 \quad (6)$$

式(6)可看成 \mathbf{H}_{LG} 模型的理论计算表达式。

建立 GSO 星座系统的发射-接收信号模型为

$$\mathbf{y}_G = \mathbf{H}_{\text{GG}} \mathbf{x}_G + \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{\text{LG},j} \mathbf{x}_{L,j} + \mathbf{n} \quad (7)$$

其中, \mathbf{y}_G 是 GSO 地球站的接收信号矩阵, \mathbf{x}_G 是由 GSO 卫星产生的发送信号矩阵, $\mathbf{x}_{L,j}$ 是第 j 个 NGSO 卫星产生的发送信号矩阵, 行数为发送的信号比特

数, 列数为天线数, $\mathbf{H}_{\text{GG}} \mathbf{x}_G$ 是 GSO 卫星经过空间传输后的信号矩阵, $\sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{\text{LG},j} \mathbf{x}_{L,j} + \mathbf{n}$ 是 NGSO 卫星经过空间传输后对于 GSO 地球站产生的干扰信号矩阵, \mathbf{n} 是信道噪声矢量, 参考由天体辐射产生的宇宙噪声, 其概率分布函数为高斯分布, 均值为零, 具有很平稳的功率频谱密度^[14]。

根据 ITU 的 Article 22 中的定义^[15], EPFD 是所有干扰源对接收机的权重和, 在干扰场景中, 干扰信号的 EPFD 为

$$(\text{EPFD})_r = \sum_{j=1}^K P_{\text{LG},j} \frac{h_{\text{LG},j}}{4\pi r^2} \frac{g_{G,j}}{g_{G,\text{MAX}}} \quad (8)$$

其中, EPFD 单位为 $\text{dB}(\text{W}/\text{m}^2)$, $\frac{g_{G,j}}{g_{G,\text{MAX}}}$ 为归一化因子, 其分子和分母分别是接收机的额外增益及最大额外增益, r 为发射机天线波束在地面上的覆盖半径, $P_{\text{LG},j}$ 为第 j 个 NGSO 卫星的发射信号功率。根据 ITU 的标准, 在 17.7~19.7 GHz、22.55~23.55 GHz 以及 24.45~24.75 GHz 波段中, 任何 1 MHz 带宽的波段干扰信号的 EPFD 的值应低于以下标准

$$\text{EPFD} < \begin{cases} -115, 0 < \theta \leq 5^\circ \\ -115 + 0.5(\theta - 5), 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \\ -105, 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (9)$$

其中, θ 为以地球站水平面为参考平面的到达角。

除了对干扰信号的 EPFD 的限制这一标准衡量以外, 传统的载干比^[15]配以辅助参考, 即接收到信号的有效载波功率 C 与干扰信号 I 功率比值为

$$\frac{C}{I} = \frac{P_G h_{\text{GG}}}{\sum_{j=1}^K [P_{\text{LG},j} h_{\text{LG},j}]} \quad (10)$$

其中, h_{GG} 和 $h_{\text{LG},j}$ 分别为目标信道矩阵 \mathbf{H}_{GG} 和 $\mathbf{H}_{\text{LG},j}$ 中的元素。

2.2 NGSO 星座系统之间的干扰模型

在图 2 所示的干扰场景中, 位于 NGSO₁ 卫星上的发射机所发射的信号被 NGSO₁ 地球站接收到, 链路“NGSO₁ 卫星-NGSO₁ 地球站”为有用信号链路, 信道用 $\mathbf{H}_{\text{LG},0}$ 表示。“NGSO₂ 卫星-NGSO₁ 地球站”为干扰信号链路, 信道用 $\mathbf{H}_{\text{LG},1}$ 和 $\mathbf{H}_{\text{LG},2}$ 表示。

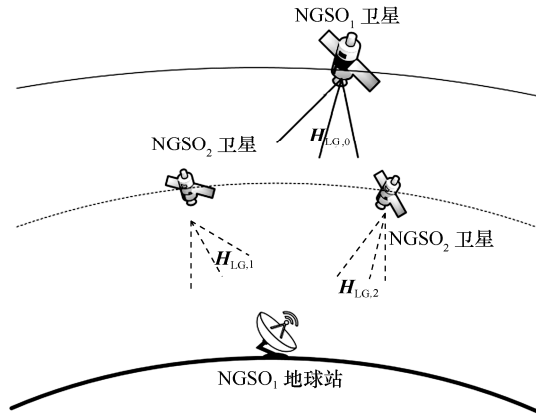


图 2 NGSO 星座系统之间下行链路干扰示意

信道模型全部选择 Corazza 模型,可建立 NGSO 系统的发射-接收信号模型为

$$\mathbf{y}_L = \mathbf{H}_{LG} \mathbf{x}_L + \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{LG,j} \mathbf{x}_{L,j} + \mathbf{n} \quad (11)$$

其中, \mathbf{y}_L 是 NGSO 地球站的接收信号矩阵, \mathbf{x}_L 是由 NGSO 卫星产生的发送信号矩阵, $\mathbf{H}_{LG} \mathbf{x}_L$ 是 NGSO 卫星经过空间传输后的信号矩阵, $\sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{LG,j} \mathbf{x}_{L,j} + \mathbf{n}$ 是其他 NGSO 卫星经过空间传输后对于 NGSO 地球站产生的干扰信号矩阵。

3 干扰对齐和噪声抑制

3.1 干扰对齐原理

在卫星通信中如何规避不同卫星之间的同频干扰,从而实现卫星之间的频率兼容是值得思考的,本文借鉴多小区通信中的干扰对齐技术方案思路,利用 MATLAB 来编写干扰对齐算法,将通过干扰对齐后得出的数据与 ITU 所给的阈值相比较,验证此算法能否实现 NGSO 星座系统之间与 GSO 星座系统和 NGSO 星座系统之间的干扰规避。

3.1.1 NGSO 星座系统与 GSO 星座系统之间的干扰对齐

如 2.1 节的图 1 所示,对 GSO 星座系统下行链路发射-接收信号模型做如下修改。

$$\mathbf{y}_G = \mathbf{H}_{GG} \mathbf{F}_G \mathbf{x}_G + \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{LG,j} \mathbf{F}_{LG,j} \mathbf{x}_{L,j} + \mathbf{n} \quad (12)$$

\mathbf{F}_G 和 $\mathbf{F}_{LG,j}$ 都是发送端的预编码矩阵, \mathbf{H}_{GG} 和 \mathbf{H}_{LG} 分别是表征 GSO 星座系统传输链路的信道矩阵和 NGSO 卫星与 GSO 地球站之间的信道矩阵。要得到目标信号 \mathbf{x}_G , 则要求 \mathbf{x}_G 的接收波束方向 $\mathbf{H}_{GG} \mathbf{F}_G$ 与其他信号的接收波束方向 $\mathbf{H}_{LG,1} \mathbf{F}_{LG,1}, \dots, \mathbf{H}_{LG,k} \mathbf{F}_{LG,k}$ 构成

的空间没有交集,即要求满足

$$\mathbf{H}_{GG} \mathbf{F}_G \notin \text{span}(\mathbf{H}_{LG,1} \mathbf{F}_{LG,1}, \dots, \mathbf{H}_{LG,k} \mathbf{F}_{LG,k}) \quad (13)$$

其中, $\text{span}(\mathbf{X})$ 为矩阵 \mathbf{X} 的列向量生成的空间。

预编码矩阵是为了消除来自其他卫星的同频干扰。采取对目标信道矩阵 \mathbf{H} 进行奇异值分解 (SVD, singular value decomposition) 来得到发送端的预编码矩阵 \mathbf{F}_G , 如式(14)所示。

$$\mathbf{F}_G = \mathbf{V}_x \quad (14)$$

其中, \mathbf{V}_x 是将目标信道矩阵 \mathbf{H}_{GG} 进行 SVD 分解后的右奇异值矩阵的前 x 列矢量构成的矩阵, x 是发送比特流数。

假设存在 2 个 NGSO 卫星对 GSO 星座系统通信链路产生了干扰,对于 GSO 星座系统信号链路的目标信道来说,干扰对齐的思路就是把这 2 个 NGSO 卫星产生的干扰信号压缩到同一维度的信号空间内,即

$$\text{span}(\mathbf{H}_{LG,1} \mathbf{F}_{LG,1}) = \text{span}(\mathbf{H}_{LG,2} \mathbf{F}_{LG,2}) \quad (15)$$

干扰对齐技术模型如图 3 所示,其原理是:如果干扰信号空间 $\text{span}(\mathbf{H}_{LG,j} \mathbf{F}_{LG,j})$ 能够被压缩到更小的子空间,使其维度小于接收端的维度 n ,并且目标信号与干扰子空间彼此正交,则在接收端可以将目标信号和干扰信号分离,实现目标信号的有效接收。

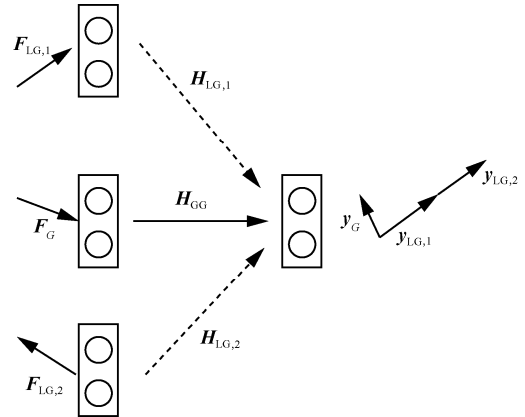


图 3 干扰对齐技术模型

图 3 中, \mathbf{y}_G 为 GSO 地球站接收信号矩阵, $\mathbf{y}_{LG,1}$ 和 $\mathbf{y}_{LG,2}$ 均为 NGSO 地球站接收信号矩阵。

3.1.2 NGSO 星座系统之间的干扰对齐

对 NGSO 星座系统下行链路的发射-接收信号模型做如下修改。

$$\mathbf{y}_L = \sum_{j=0}^K \mathbf{H}_{LN,j} \mathbf{F}_{LN,j} \mathbf{x}_{L,j} + \mathbf{n} \quad (16)$$

其中, \mathbf{y}_L 是 NGSO 地球站的接收信号矩阵, $\mathbf{x}_{L,0}$ 是由 NGSO 卫星产生的发送信号矩阵, $\mathbf{x}_{L,j}(j \neq 0)$ 是第 j 个 NGSO 卫星产生的发送信号矩阵, 其干扰对齐的思路与 GSO-NGSO 星座系统实现方法基本一致, 不同之处在于其首个预编码矩阵的建立是由 \mathbf{F}_G 变成了 $\mathbf{F}_{LN,0}$, 进而通过对齐信号接收波束空间得到其余干扰源产生的信号预编码矩阵。

3.2 噪声抑制原理

在实现干扰对齐后, 接收端的目标信号和干扰信号被分割开, 可以使用常见的迫零算法^[16]使干扰信号规避为零, 但随之产生的噪声会更大, 而在卫星通信中要求干扰信号低于一个门限值, 所以采取消除干扰和控制噪声功率两方面折中的方法, 即最小均方误差检测 (MMSE, minimum mean square error) 算法, 该算法的目的是尽可能减小发送信号 \mathbf{x} 和接收信号 $\mathbf{W}_{MMSE}^H \mathbf{y}$ 之间的均方误差, 即

$$\arg \min E \left[\left\| \mathbf{x}_G - \mathbf{W}_{MMSE}^H \mathbf{y}_G \right\|^2 \right] \quad (17)$$

关于其加权矩阵 \mathbf{W}_{MMSE}^H 的计算, 表达式为

$$\mathbf{W}_{MMSE}^H = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (18)$$

其中, \mathbf{I} 是单位矩阵, σ_n^2 是接收信号 \mathbf{y} 的方差, \mathbf{H}^H 是信道矩阵 \mathbf{H} 的共轭转置。

通过此信号处理后, 即实现了对于减少干扰成分和降低接收端信号功率的折中, 得到接收端的输出信号形式, 即

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{mmse} &= \mathbf{W}_{MMSE}^H \mathbf{y}_G = \\ & \left[(\mathbf{H}_{GG}^H \mathbf{H}_{GG} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_{GG}^H \right] \cdot \\ & \left[\mathbf{H}_{GG} \mathbf{F}_G \mathbf{x}_G + \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{LG,j} \mathbf{F}_{LG,j} \mathbf{x}_{L,j} + \mathbf{n} \right] = \\ & (\mathbf{H}_{GG}^H \mathbf{H}_{GG} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_{GG}^H \mathbf{H}_{GG} \mathbf{F}_G \mathbf{x}_G + \\ & (\mathbf{H}_{GG}^H \mathbf{H}_{GG} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{LG,j} \mathbf{F}_{LG,j} \mathbf{x}_{L,j} + \\ & (\mathbf{H}_{GG}^H \mathbf{H}_{GG} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_{GG}^H \mathbf{n} = \\ & \hat{\mathbf{x}}_G + (\mathbf{H}_{GG}^H \mathbf{H}_{GG} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{LG,j} \mathbf{F}_{LG,j} \mathbf{x}_{L,j} + \mathbf{n}_{mmse} \quad (19) \end{aligned}$$

对于经过 MMSE 算法处理后的接收信号 \mathbf{y}_G , 只需要满足干扰信号 $\hat{\mathbf{x}}_G + (\mathbf{H}_{GG}^H \mathbf{H}_{GG} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \cdot \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{LG,j} \mathbf{F}_{LG,j} \mathbf{x}_{L,j}$ 低于门限值, 即

$$\hat{\mathbf{x}}_{LG} \leq \hat{\mathbf{x}}_{LG_{th}} \quad (20)$$

3.3 干扰规避流程

总结来看, 利用干扰对齐技术方案规避星座系统之间同频干扰的流程如图 4 所示。

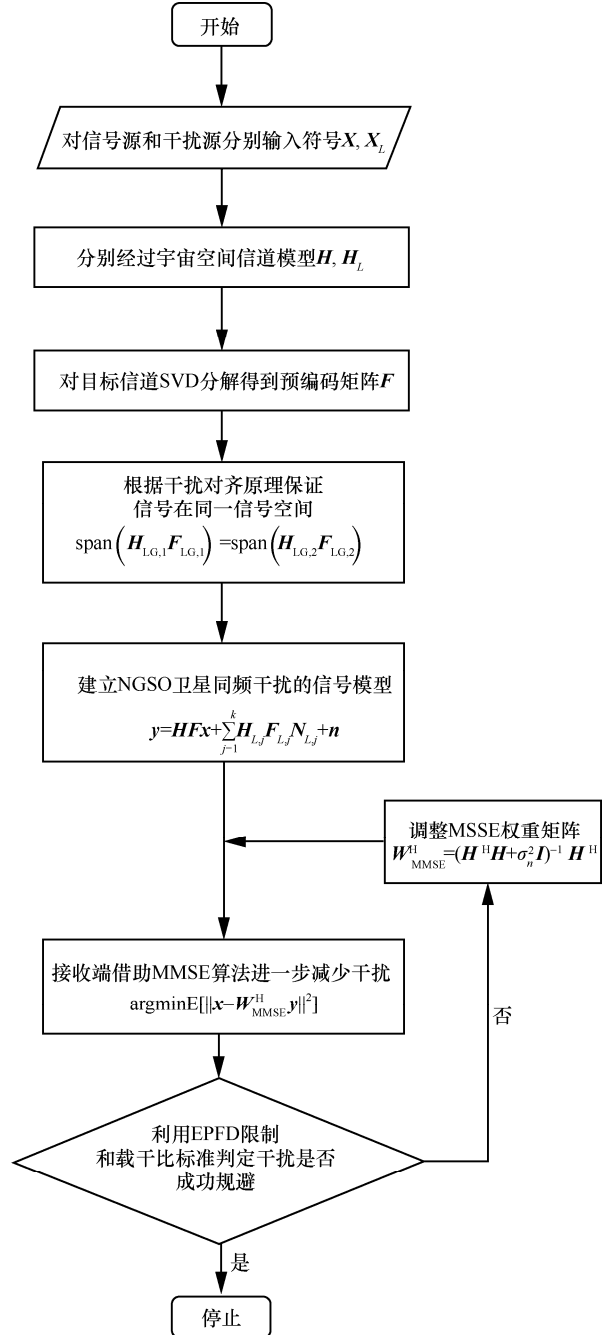


图 4 干扰对齐技术方案规避星座系统之间同频干扰流程

4 仿真结果与分析

本文方案的仿真场景通过 MATLAB 实现, 通过比较利用干扰对齐技术前后的干扰参数值来表

明本文方法对于规避星座系统同频干扰的可行性。

4.1 OneWeb 系统干扰 ChinaSat 系统

GSO 星座系统选择 ChinaSat 系统，NGSO 星座系统选择 OneWeb 系统。在频率方面，查阅 ITU 资料库可知这 2 个系统以及下面提到的 Fortran 系统下行链路工作频率主要集中在 Ka 波段。故建立仿真场景时主要考虑 Ka 波段的频率兼容性情况。

下行链路仿真时设置的参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 OneWeb 系统相关参数

参数类型	参数值
轨道高度/km	1 200.0
轨道平面数	36
每平面卫星数	55
工作频段/GHz	17.7~17.95
发射功率/dBW	14.3
发射机天线类型	REC-1528
发射机天线增益/dBi	36.1
极化方式	左旋圆极化

表 2 ChinaSat 系统相关参数

参数类型	参数值
轨道高度/km	35 786.0
工作频段/GHz	17.6375~17.8875
发射功率/dBW	15.2
发射机天线类型	椭圆波束天线
发射机天线增益/dBi	32
极化方式	左旋圆极化
接收机天线类型	REC-465
接收机天线增益/dB	32

仿真结果如图 5 和表 3 所示。其中 C/N 为载噪比， $C/(N+I)$ 为载干噪比， C/I 为载干比。

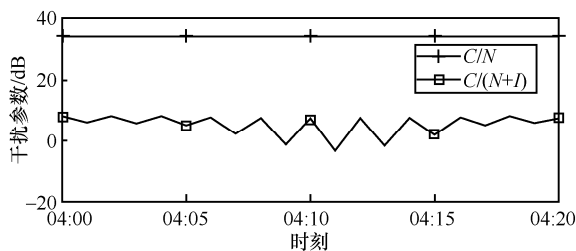


图 5 OneWeb 系统干扰 ChinaSat 系统的干扰参数

由图 5 和表 3 可知，干扰系统使通信链路的载噪比下降约 30 dB，且干扰 EPFD 值为 $-157.9 \sim$

$-158.5 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ ，满足 ITU 所给的最小阈值 $-115 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 。系统载干比为 $5 \sim 6 \text{ dB}$ 。利用干扰对齐的方法，在发送端加入预编码矩阵，可以使数据更具有指向性地发送给接收端。将通过干扰对齐后的系统信息与之前相比较，如图 6 和图 7 所示。

表 3 OneWeb-ChinaSat 干扰信息

时刻	干扰 EPFD 值/(dB(W·m ⁻²))	载干比/dB
04:00	-157.968 1	4.969 7
04:01	-158.059 0	5.419 5
04:02	-157.993 2	5.832 5
04:03	-158.134 5	5.779 6
04:04	-158.119 4	5.517 4
04:05	-158.066 6	5.644 2
04:06	-158.148 8	5.402 4
04:07	-158.116 0	5.795 6
04:08	-158.038 9	5.700 2
04:09	-158.403 0	5.544 7
04:10	-157.946 0	5.529 8
04:11	-158.396 6	5.720 9
04:12	-158.063 6	5.281 5
04:13	-158.025 1	5.441 3
04:14	-158.154 4	6.108 0
04:15	-158.267 0	5.868 5
04:16	-158.064 4	5.037 2
04:17	-157.999 0	5.400 7
04:18	-158.160 6	5.636 8
04:19	-158.049 5	5.037 4
04:20	-158.219 9	5.676 8

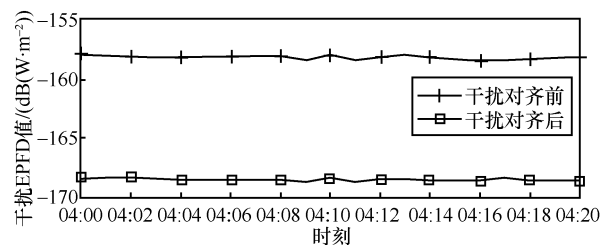


图 6 EPFD 值比较

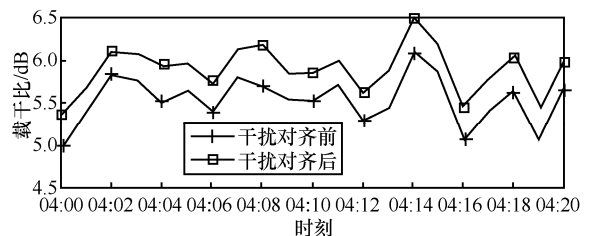


图 7 C/I 比较

4.2 Fortran 系统干扰 OneWeb 系统

在 NGSO 星座系统的建立上选取中国的 Fortran 系统, 对于 Fortran 系统干扰 OneWeb 系统, 仿真时设置的参数如表 4 和表 5 所示。

表 4 Fortran 系统相关参数

参数类型	参数值
轨道高度/km	1 040.0
轨道平面数	13
每平面卫星数	12
工作频段/GHz	17.7~17.8 GHz
发射功率/dBW	12.2
发射机天线类型	REC-1528
发射机天线增益/dBi	42
极化方式	左旋圆极化

表 5 OneWeb 系统相关参数

参数类型	参数值
轨道高度/km	1 200.0
工作频段/GHz	17.7~17.95
发射功率/dBW	14.3
发射机天线类型	REC-1528
发射机天线增益/dBi	36.1
极化方式	左旋圆极化
接收机天线类型	抛物线天线
接收机波束宽度	0.61°

进行仿真可得相关干扰参数及干扰信息, 如图 8 和表 6 所示。

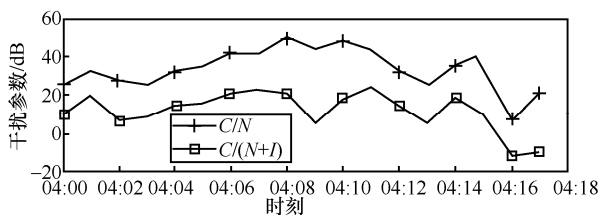


图 8 Fortran 系统干扰 OneWeb 系统的干扰参数

由图 8 和表 6 可知, 在 NGSO 星座系统之间干扰系统的 EPFD 值大部分在 $-164\sim-184\text{ dB(W/m}^2)$ 范围内, 04:09 时刻干扰 EPFD 值较大, 约为 $-156\text{ dB(W/m}^2)$ 。满足 ITU 所给的最小阈值, 载干比在 7~8 dB 范围内, NGSO 星座系统间的干扰与 NGSO 星座系统和 GSO 星座系统间的干扰不同之处在于信道模型不一样, 概率服从的分布不同, 但依然可以采用干扰对齐的方法。利用干扰对齐算法结果如图 9 和图 10 所示。

表 6 OneWeb-Fortran 干扰信息

时刻	干扰 EPFD 值/(dB(W·m ⁻²))	载干比/dB
04:00	-179.960 342	8.041 1
04:01	-184.599 117	7.150 6
04:02	-176.751 479	8.392 6
04:03	-182.630 900	7.848 4
04:04	-179.007 917	7.768 6
04:05	-178.802 040	7.342 0
04:06	-177.779 460	7.985 4
04:07	-179.609 360	7.491 3
04:08	-166.556 363	7.597 9
04:09	-155.954 665	7.963 4
04:10	-164.404 241	7.801 9
04:11	-177.340 856	7.507 1
04:12	-181.844 337	7.712 0
04:13	-180.788 091	7.207 6
04:14	-183.394 874	7.491 2
04:15	-176.0111 45	7.465 4
04:16	-179.249 148	7.588 1
04:17	-164.320 810	7.258 9

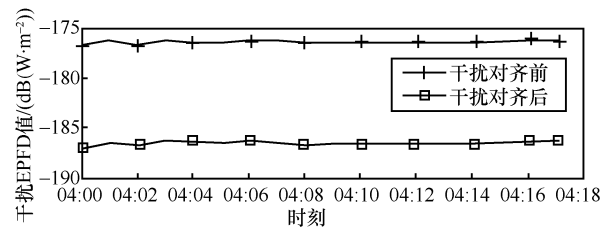


图 9 EPFD 值比较

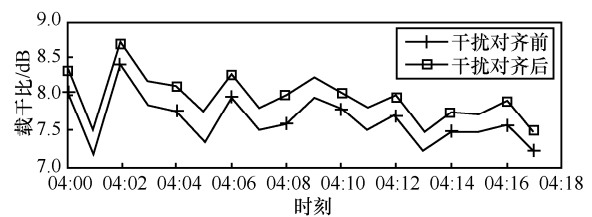


图 10 C/I 比较

4.3 干扰对齐算法分析

比较采用干扰对齐算法前后的 EPFD 值及 C/I 可知, 干扰对齐算法能够显著降低干扰系统的 EPFD 值, 约为 10 dB; 通信链路的载干比也有略微提升, 约为 0.3 dB。在移动通信中, 干扰对齐算法是解决同频干扰的重要手段, 与传统规避干扰信号的方法相比可显著提高频谱利用率, 提高系统容量, 从仿真结果可以看出它适用于改善 NGSO 星座

系统之间或 NGSO 星座系统与 GSO 星座系统之间的干扰情况。

5 结束语

总体来说,无论是 OneWeb 系统干扰 ChinaSat 系统还是 Fortran 系统干扰 OneWeb 系统,干扰系统的 EPFD 值都符合 ITU 标准,目标通信链路的载干比也有所提升。干扰对齐技术减小了对目标通信链路的影响,然而干扰系统自身的通信性能难免有所下降。根据 ITU 标准,后申请的 NGSO 星座系统不得对所有 GSO 星座系统以及先申请的 NGSO 星座系统产生有害干扰,因此在规划 NGSO 星座系统时,如何避免对优先级较高的星座系统产生干扰是首要问题。本文采用源自陆基移动通信的干扰对齐算法,对干扰信号进行预编码技术处理,使干扰能够在接收端重叠在一起,减小干扰信号的功率通量密度,从而减弱干扰对期望信号的影响。

参考文献:

- [1] 靳亚娜. “先登先占”的卫星频率和轨道资源[J]. 中国无线电, 2018(2): 46.
JIN Y N. "First on, first occupation" satellite frequency and orbital resources [J]. China Radio, 2018(2): 46.
- [2] IPPOLITO L J. Satellite communications systems engineering[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2017.
- [3] ZHANG C, JIANG C X, KUANG L L, et al. Spatial spectrum sharing for satellite and terrestrial communication networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(3): 1075-1089.
- [4] 林莉, 左鹏, 张更新. 美国 OneWeb 系统发展现状与分析[J]. 数字通信世界, 2018(9): 22-23, 18.
LIN L, ZUO P, ZHANG G X. Development situation and analysis of OneWeb System[J]. Digital Communication World, 2018(9): 22-23, 18.
- [5] ZHANG C, JIANG C X, JIN J, et al. Spectrum sensing and recognition in satellite systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2502-2516.
- [6] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Interference alignment for spectral coexistence of heterogeneous networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013(1): 46.
- [7] 廖文兵. 多小区多天线干扰抑制技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
LIAO W B. Research on multi-cell MIMO interference suppression techniques[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [8] 马琰. MIMO-Y 信道的多天线冗余处理算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
MA Y. The multi-antenna redundant processing algorithm of MIMO-Y channel[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [9] 韩宾. 一种 Ka 频段 LMS 信道模型[J]. 微计算机信息, 2008, 24(12): 107-109.
HAN B. A Ka-band LMS channel Model[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(12): 107-109.
- [10] LUTZ E, CYGAN D, DIPPOLD M, et al. The land mobile satellite communication channel-recording, statistics, and channel model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(2): 375-386.
- [11] CORAZZA G E, VATALARO F. A statistical model for land mobile satellite channels and its application to nongeostationary orbit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(3): 738-742.
- [12] 郑剑文. 特定环境下卫星移动通信信道全阴影模型的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
ZHENG J W. Study of satellite mobile communication channel corazza model under certain environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [13] 王雅慧. 非静止轨道卫星通信系统容量分析与接入控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
WANG Y H. Research on capacity analysis and access control strategy of non-geostationary orbit satellite communication system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [14] RODDY D. Satellite communications(4th Edition)[M]. New York: The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [15] ITU-R. Radio regulations[R]. 2015.
- [16] 高维廷, 李辉, 翟海天. 基于最小均方误差的串扰消除多用户检测算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(11): 132-134.
GAO W T, LI H, ZHAI H T. Successive interference cancellation multi-user detection algorithm based on minimum mean square error[J]. Computer Engineering, 2011, 37(11): 132-134.

[作者简介]



杜冰 (1981-), 女, 北京人, 博士, 北京科技大学助理教授, 主要研究方向为航空通信、数据链、网络编码、合作通信和认知无线电。

李家旺 (1997-), 男, 河北廊坊人, 北京科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信、卫星通信。

王先梅 (1974-), 女, 山东烟台人, 博士, 北京科技大学副教授, 主要研究方向为信号处理、机器学习。

李伟 (1984-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 国家无线电监测中心高级工程师, 主要研究方向为无线电系统间频率兼容技术、频谱管理新技术新应用等。

刘向南 (1997-), 男, 甘肃金昌人, 北京科技大学博士生, 主要研究方向为通感一体化通信、边缘计算、卫星通信。

张海君 (1986-), 男, 辽宁朝阳人, 博士, 北京科技大学教授, 主要研究方向为 6G 移动通信、人工智能与无线网络、卫星通信、机器学习与大数据等。