

降雨损耗对 Q 频段地球静止轨道下行链路 I/N 分布的影响*

王静¹, 姚秀娟¹, 高翔¹, 智佳¹, 陈托¹, 董苏惠^{1,2}, 孙云龙¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要:针对 Q 频段通信链路受降雨、云雾及大气吸收等天气条件影响较大的传播特性, 基于对 Q 频段地球静止轨道卫星下行链路传播损耗的分析, 研究降雨损耗在地球站共址的干扰场景下对 I/N 分布的影响。提出与降雨分布相结合的 Q 频段下行链路传播损耗计算方法, 建立基于降雨衰减超出门限值的时间百分比 $p\%$ 的 I/N 函数模型, 分析 $p\%$ 对 I/N 分布的影响, 预测年均干扰分布情况。采用该方法对 ITU 实际登记的 CHINASAT-G-115.5E 卫星网络进行分析, 结果表明: $p\%$ 越低, 通信链路受降雨衰减的影响越明显。当 $p < 0.5$ 时, 衰减门限值变化较快; 在地球站和干扰卫星轨道经度固定的情况下, $p\%$ 越小, 年均 $1-p\%$ 时间内 I/N 的最小值越小。该方法可应用到研究其他轨道卫星的干扰分布中, 为干扰规避提供参考。

关键词: 频率重叠; 降雨衰减; Q 频段; 干扰计算; 下行链路

中图分类号: TN972 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2023)01-129-07

Influence of rain attenuation on the I/N distribution of Q-band geostationary satellite orbit downlink

WANG Jing¹, YAO Xiujuan¹, GAO Xiang¹, ZHI Jia¹, CHEN Tuo¹, DONG Suhui^{1,2}, SUN Yunlong¹

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Complex Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In view of the propagation characteristics of Q-band communication links that were severely affected by conditions such as rainfall, fog and atmospheric absorption, based on the analysis of the propagation loss of the Q-band geostationary satellite orbit downlink, the influence of rainfall attenuation on the I/N distribution under the interference scenario of the earth station co-location was studied. A method to calculate the propagation loss of Q-band downlink combined with rainfall distribution was proposed, and a functional model for I/N combined $p\%$ that the percentage of time when rainfall attenuation exceeds a threshold value was established. The influence of $p\%$ on the distribution of I/N was analyzed, and the average annual interference distribution was forecast. This method was used to analyze the influence of the CHINASAT-G-115.5E satellite network which was registered by the ITU, and the results show that the lower the $p\%$, the more obvious the influence of rain attenuation on the communication link. When $p < 0.5$, the attenuation threshold changes faster. When the location of earth station and the orbit longitude of the interfering satellite are fixed, the smaller the $p\%$, the smaller the minimum value of I/N in the annual average $1-p\%$ time. This method can be applied to study the interference distribution of other orbital satellites, and provide a reference for interference avoidance.

Keywords: frequency overlap; rainfall attenuation; Q-band; interference calculation; downlink

目前, 配置 Ka、Q、V 频段已是高通量卫星频率方案设计中的共识^[1], 随着商业卫星的发展, Ka 频段的应用逐渐趋于饱和, Q 频段(33 ~ 50 GHz)成为未来卫星系统发展的重要资源, 国内外主流卫星操作者将高速率、大容量等服务需求逐步向 Q 频段延展^[2]。欧空局的“阿尔法卫星”^[3]、欧洲通信卫星公司的 Eutelsat-65WA 及国内银河航天首发星, 均搭载了 Q 频段通信载荷,

用于开展一系列技术研发和试验项目^[1]。国内外纷纷提出 Q 频段卫星通信系统方案, 据国际电联(international telecommunication union, ITU)公开的卫星网络申报数据, 截至 2020 年 10 月, 仅 39.5 ~ 42.5 GHz 频段内已申报 926 份地球静止轨道(geostationary satellite orbit, GSO)卫星网络, 其中国内占 116 份, 随着 Q 频段卫星产品关键技术被不断突破, 未来搭载 Q 频段载荷的 GSO 卫星

* 收稿日期: 2021-04-01

基金项目: 中科院复杂航天系统电子信息技术重点实验室择优基金资助项目(Y42613A32S)

作者简介: 王静(1990—), 女, 山东威海人, 助理研究员, 博士, E-mail: wangj@nssc.ac.cn;

姚秀娟(通信作者), 女, 山东菏泽人, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: yaoxj@nssc.ac.cn

数量将十分可观,开展 Q 频段 GSO 卫星系统的干扰分析对支撑国内外频率协调具有重要意义。

目前,频谱干扰分析领域已提出一系列具有参考价值的研究成果,文献[4]研究了云雾和闪烁对近地轨道卫星的垂直自由空间激光链路性能的影响,文献[5]分析了 Ka 频段(27.5 ~ 30 GHz)近轨道间隔的 GSO 卫星间上行链路的干扰场景,文献[6]分析了 Ka 频段(25 GHz、27.55 GHz) GSO 系统间同向、反向等场景下的干扰评估模型,文献[7]研究了 Q 频段(39 GHz)遥感卫星的波束控制技术对信噪比(signal noise ratio, SNR)指标的影响,文献[8]研究了综合去极化效应的信噪比干扰计算模型,文献[9]研究了 IMT-2020(5G)系统对卫星广播系统的干扰仿真方法,文献[10-11]研究了非地球静止轨道(non-geostationary satellite orbit, NGSO)系统间的干扰分析模型。然而,Q 频段因其自身频谱传播特性,受降雨、云雾、大气等天气条件引起的链路损耗影响相比 Ka 等低频段尤为明显,由于受地形、气候、海拔的影响,全球降雨分布不均引起的衰减值差别可达上百 dB,其影响不容忽视。

本文针对 Q 频段 GSO 卫星的下行通信链路场景,提出一种与全球降雨分布相结合的通信链路传播损耗计算方法,分析降雨损耗与干扰噪声比(interference-to-noise ratio, INR) I/N 模型的函数变化特性,量化计算降雨损耗对 I/N 分布的影响,以国际电联实际登记的 CHINASAT-G-115.5E 为例,计算降雨、云雾、大气等多种天气因素引起的链路衰减分布情况,分析降雨损耗对 I/N 分布的影响,为 Q 频段 GSO 卫星系统干扰评估及地球站的选址提供参考。

1 Q 频段 GSO 卫星下行链路分析模型

1.1 传播损耗数学模型

受天气条件影响较大是 Q 频段用于卫星通信的主要局限性之一,相比 K/Ka 频段,降雨、云雾、大气吸收等天气条件对 Q 频段的链路衰减影响尤为严重。通常空间通信系统在自身系统链路设计和干扰分析时须考虑的主要传播损耗包括:自由空间传播损耗 L_{fs} 、降雨衰减 A_R 、大气吸收衰减 A_G 、云雾衰减 A_C 、闪烁 A_S 、晴空效应 A_{bs} 、去极化衰减 A_{xp} 等。对于通信频段高达 33 ~ 50 GHz 的 Q 频段,可用仰角较大($> 10^\circ$),闪烁、晴空效应及去极化对链路的影响可忽略不计。由此,给出 Q 频段 GSO 系统链路传播损耗 L_Q (用 dB 表示),如

式(1)所示。

$$L_Q = L_{fs} + A_G + A_R + A_C \quad (1)$$

1.2 I/N 数学模型及下行链路干扰场景

建议书 ITU-R S.1432-1 提出,以系统噪声百分数表示的干扰容限可转换成相应的 I/N ^[12-13],基于等效噪声温度增量百分比 $\Delta T/T$ 的门限值 6%,推导 I/N 应不超过 -12.2 dB,以下行链路为例,给出 I/N 如式(2)所示。

$$\frac{I}{N} = \frac{p_i \cdot g_i(\gamma) \cdot g(\theta)}{k \cdot T_e \cdot w \cdot l} \quad (2)$$

式中: I 表示受扰系统接收到的干扰信号功率,单位为 W; N 表示受扰系统接收机的等效噪声功率,单位为 W; p_i 表示干扰卫星的发射功率,单位为 W; $g_i(\gamma)$ 表示干扰卫星天线的发射增益, γ 表示干扰卫星发射天线的离轴角; $g(\theta)$ 表示受扰地球站天线的接收增益, θ 表示受扰地球站接收天线的离轴角; T_e 表示受扰地球站下行接收端的等效噪声温度,单位为 K; w 表示受扰系统下行通信链路的带宽,单位为 Hz; $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 表示波尔兹曼常数; l 表示干扰通信链路的传输损耗。

构建 Q 频段 GSO 卫星下行链路干扰分析场景如图 1 所示,其中,卫星 S 表示轨道经度为 l 的受扰 GSO 卫星, S_i 表示轨道经度在 $l \pm \Delta x$ 范围内的干扰 GSO 卫星,令卫星 S 和卫星 S_i 指向同一地球站位置,则卫星 S_i 的发射天线离轴角 $\gamma = 0^\circ$ 。

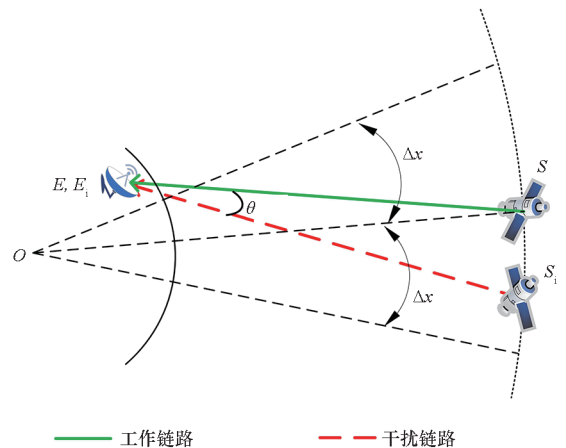


图 1 Q 频段 GSO 系统下行链路干扰分析场景

Fig. 1 Analysis scenarios of downlink interference between GSO satellites in Q-band

由式(1) ~ (2),给出 Q 频段两 GSO 卫星系统间下行链路的 I/N 计算公式。

$$\left(\frac{I}{N}\right)_Q = \frac{p_i \cdot g_i(0) \cdot g(\theta)}{k \cdot T_e \cdot w \cdot 10^{\frac{L_Q}{10}}} \quad (3)$$

对式(3)进行分贝值换算,得:

$$\left[\frac{I}{N} \right]_Q = P_i + G_i(0) + G(\theta) - T_E - W - L_Q - 228.60 \quad (4)$$

式中, $\left[\frac{I}{N} \right]_Q$ 、 P_i 、 $G_i(0)$ 、 $G(\theta)$ 、 T_E 、 W 分别表示 $\left(\frac{I}{N} \right)_Q$ 、 p_i 、 $g_i(0)$ 、 $g(\theta)$ 、 T_e 、 w 的分贝值,单位为 dB。

令 $L_{Q-R} = L_Q - A_R$, 可得基于降雨损耗的 I/N 模型如式(5)所示。

$$\left[\frac{I}{N} \right]_Q = [P_i + G_i(0) + G(\theta) - T_E - W - L_{Q-R} - 228.60] - A_R \quad (5)$$

1.3 I/N 函数特性分析

Q 频段链路传播损耗 L_Q 的各项因素中,以降雨损耗最为严重,由式(5)显然可知,叠加降雨损耗会导致 I/N 值减小,然而,由于降雨产生的时间和地域存在不确定性,难以对降雨引起的衰减进行精确计算,ITU-R 建议书提出基于多年的观测数据,针对时间概率估算衰减量门限值^[14]。因此,本节分析降雨损耗对 I/N 的影响,即分析时间概率与 I/N 的影响关系。由此,引入变量 p , $p\%$ 表示降雨衰减超出门限值的年均时间百分比(以下简称时间百分比),则 $1 - p\%$ 可表示年均 $1 - p\%$ 的时间内衰减量不超过门限值。

降雨衰减 A_R 计算模型参考 ITU-R P. 618-13 建议书,以 p 为参量的雨衰预测模型如式(6)所示,单位为 dB,且 $p \in [0.001, 10]$ 。

$$A_R(p) = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-[0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \alpha]} \quad (6)$$

式中: $A_{0.01}$ 表示 $p = 0.01$ 时对应的衰减值,单位为 dB; α 表示地球站仰角,单位为($^\circ$); β 表示修正参数,与 p 、地球站纬度 φ 以及地球站仰角 α 有关, β 的计算公式如式(7)所示。

$$\beta = \begin{cases} 0, p \geq 1 \text{ 或 } |\varphi| \geq 36^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36), p < 1 \text{ 且 } |\varphi| \geq 36^\circ, \alpha \geq 25^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \alpha, \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

由式(5)~(6),对 $\left[\frac{I}{N} \right]_Q(p)$ 求导,得:

$$\frac{d\left(\left[\frac{I}{N} \right]_Q(p)\right)}{dp} = \frac{d[-A_R(p)]}{dp} \quad (8)$$

由式(8)可见, $\left[\frac{I}{N} \right]_Q(p)$ 与 $-A_R(p)$ 单调性一致,因此,对式(6)进行如式(9)所示变换。

$$\begin{cases} A_R(p) = A_{0.01} \cdot \exp\left(\ln\left(\frac{p}{0.01}\right) \cdot [-0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \alpha]\right) \\ f(u) = A_{0.01} \cdot e^u \\ u(p) = h(p)g(p) \\ h(p) = \ln\left(\frac{p}{0.01}\right) \\ g(p) = -0.033 \ln(p) - (\beta \sin \alpha)p + k \\ k = -0.655 + 0.045 \ln(A_{0.01}) + \beta \sin \alpha \end{cases} \quad (9)$$

基于式(7)易求得 $\beta \sin \alpha \in [0, 0.23]$, 设定 $A_{0.01}$ 的最大值为 10^3 dB (实际上 Q 频段 $A_{0.01} \ll 10^3$ dB), 可推出 $k < 0$ 。

1) 当 $p > 0.01$ 时:

$h(p) = \ln\left(\frac{p}{0.01}\right) > 0$ 且单调递增; $g(p) = -0.033 \ln(p) - (\beta \sin \alpha)p + k < 0$ 且单调递减; 由单调函数乘积规律可知 $u(p)$ 单调递减。

2) 当 $0.001 < p \leq 0.01$ 时:

对 $u(p)$ 求导可得

$$\frac{du}{dp} = \frac{1}{0.01p}g(p) + \ln\left(\frac{p}{0.01}\right)\left(-\frac{0.033}{p} - \beta \sin \alpha\right)$$

根据 $g(p)$ 单调递减, 可得

$$g(p)_{\max} = g(0.001) < 0$$

令 $m(p) = \ln\left(\frac{p}{0.01}\right)\left[-\frac{0.033}{p} - \beta \sin \alpha\right]$, 基于

单调函数乘积规律, 易证 $m(p) \leq 0$; 因此, $\frac{du}{dp} < 0$, $u(p)$ 为单调递减函数。

综合 1) 和 2), 由复合函数单调性规律可知, $f(u)$ 为单调递减函数, 因此, $A_R(p)$ 在 $p \in [0.001, 10]$ 内单调递减, 由式(8)可推出 $\left[\frac{I}{N} \right]_Q(p)$ 单调递增。由此可知, 降雨衰减的 p 越小, I/N 越小。

2 Q 频段下行链路传播损耗影响分析

在 Q 频段下行链路的传播损耗影响分析中, 采用的计算模型见表 1。

选取 Q 频段 GSO 卫星 CHINASAT-G-115.5E 作为卫星 S, 通信频率选取 40 GHz, 在其星下点 $\pm 60^\circ$ 经度范围, $\pm 65^\circ$ 纬度范围内, 分析 A_R 、 A_C 、 A_G 对工作链路的衰减影响, 结果如图 2~5 所示。图 2~3 分别表示降雨衰减时间百分比为 0.01% 和 10%, 即 $p = 0.01$ 和 $p = 10$ 时, 降雨衰减 A_R 的分布。图中可见, 当 $p = 0.01$ 时, 在 $\pm 25^\circ$ 纬度范围内降雨衰减可达 100 ~

160 dB;而当 $p = 10$ 时,降雨衰减显著降低至 5 dB 以内,甚至大部分区域降到 3 dB 以下。图 4 为 $p = 0.1$ 的云雾衰减分布,图中大部分区域的云雾衰减在 20 dB 以下;图 5 为大气吸收引起的衰减情况,衰减成环状递增,大部分区域衰减集中在 3 dB 以下。

表 1 传播损耗影响分析中的计算模型

Tab.1 Calculation model in the analysis of the influence of propagation loss

模型名称	参考建议书
降雨衰减计算模型	ITU-R P. 618 ^[15]
降雨概率计算模型	ITU-R P. 837 ^[16]
地表温度数据	ITU-R P. 1510 ^[17]
地形高度数据	ITU-R P. 1511 ^[18]
云雾衰减计算模型	ITU-R P. 840 ^[19]
大气吸收衰减计算模型	ITU-R P. 676 ^[20]
参考标准大气数据	ITU-R P. 835 ^[21]

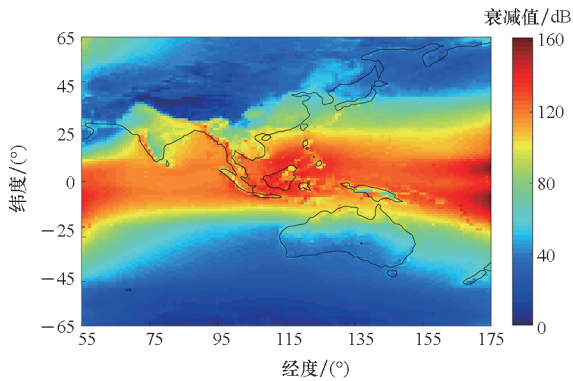


图 2 时间百分比为 0.01% 的降雨衰减分布
Fig.2 Distribution of rainfall attenuation with the time percentage of 0.01%

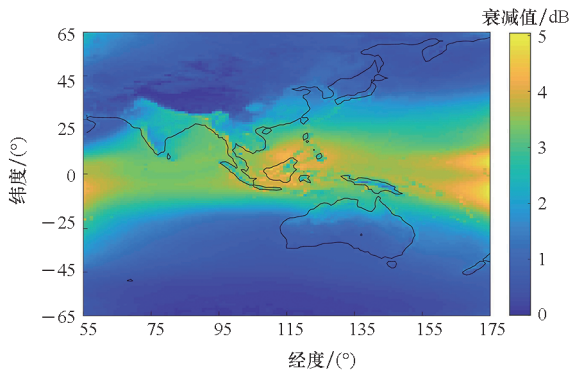


图 3 时间百分比为 10% 的降雨衰减分布
Fig.3 Distribution of rainfall attenuation with the time percentage of 10%

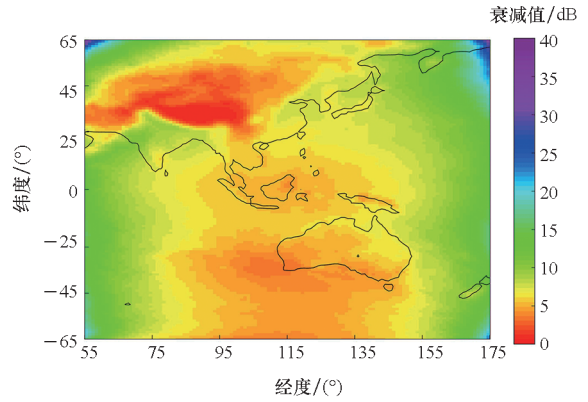


图 4 时间百分比为 0.1% 的云雾衰减分布
Fig.4 Distribution of cloud and fog attenuation with the time percentage of 0.1%

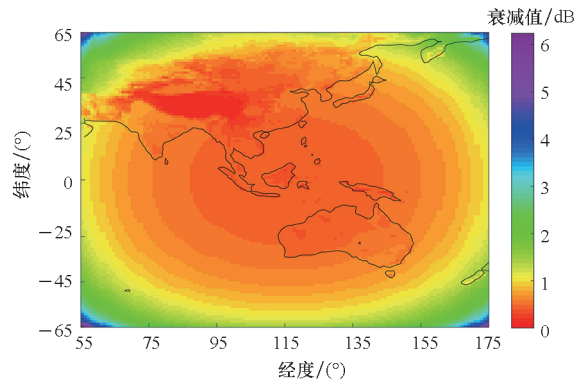


图 5 大气吸收引起的衰减分布
Fig.5 Distribution of atmospheric absorption attenuation

卫星链路处于正常工作状态的年均时间百分比称为系统链路可用度,若假定一年中系统链路的误比特率超过给定门限值的时间百分比为 $p_b\%$,则系统链路可用度 P 表示为 $P = 1 - p_b\%$ 。由图 2 ~ 5 可见, $p = 0.01$ 的降雨衰减的影响显著高于云雾和大气吸收引起的衰减,若以降雨衰减所对应的超出门限值的时间百分比 $p\%$ 近似代替系统链路的误比特率超过给定门限值的时间百分比 $p_b\%$,则系统链路可用度表示为 $1 - p\%$ 。

由此,基于式(1)计算的系统链路可用度为 99.99% 的链路总体损耗 L_0 如图 6 所示,整体趋势与降雨衰减分布相似,在 $\pm 25^\circ$ 纬度范围内衰减较高,可达 300 ~ 400 dB。基于 L_0 计算载噪比 C/N 的分布如图 7 所示,计算中采用的 CHINASAT-G-115.5E 参数如表 2 所示,极化方式为混合极化。基于 ITU 登记的 CHINASAT-G-115.5E 卫星网络资料的建链要求, C/N 须不少于 12 dB,以此规划地球站的可选区域如图 7 区域 A 所示。

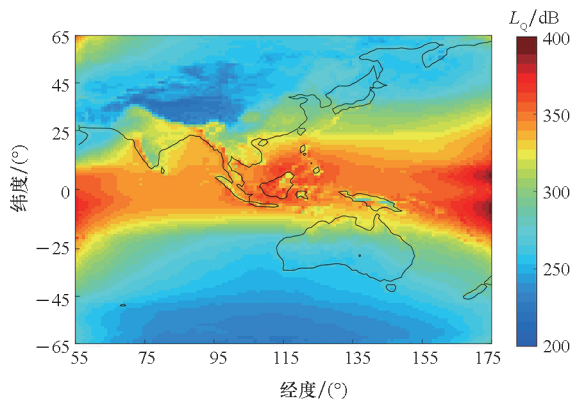


图 6 链路可用度为 99.99% 的 L_0 分布
Fig. 6 Distribution of L_0 with the 99.99% link availability

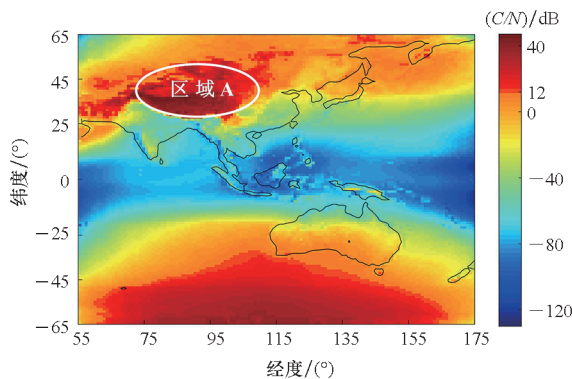


图 7 链路可用度为 99.99% 的 C/N 分布
Fig. 7 Distribution of C/N with the 99.99% link availability

表 2 CHINASAT-G-115.5E 下行链路
干扰场景波束及空口参数

Tab. 2 Beam and air interface parameters of downlink interference scenario of CHINASAT-G-115.5E

下行链路参数	取值
通信频率/GHz	40
通信带宽/MHz	250
地球站接收天线峰值增益/dBi	69.5
地球站接收天线波束宽度/(°)	0.06
卫星发射功率/dBW	30
卫星发射天线峰值增益/dBi	50
地球站接收机天线噪声温度/K	300

3 降雨损耗对 I/N 的分布影响分析

基于图 1 中建立的 Q 频段 GSO 卫星下行链路干扰分析场景,以 CHINASAT-G-115.5E 作为受扰卫星系统 S ,令 $\Delta x = 8^\circ$,即在 $115.5^\circ\text{E} \pm 8^\circ$ 范围

内布设干扰卫星 S_i ,干扰卫星参数设置同受扰卫星一致,参见表 3。地球站基于降雨量较小、适中、较多的原则,选取喀什 ($39.5^\circ\text{N}, 75.9^\circ\text{E}$)、密云 ($40.3^\circ\text{N}, 116.8^\circ\text{E}$)、三亚 ($18.4^\circ\text{N}, 109.7^\circ\text{E}$) 站,且喀什站位于图 7 的区域 A 中,依次分析 S 和 S_i 地球站共址的干扰场景。其中,星上天线方向图参考 ITU-R S. 672-4^[22],地球站天线方向图参考 ITU-R S. 580-6^[23]。

选取 $p\%$ 范围为 $[0.01\%, 10\%]$,以 0.01% 为步长,选取干扰卫星 S_i 的轨道经度与受扰卫星 S 的轨道经度间隔范围为 $[-8^\circ, 8^\circ]$,以 0.1° 为步长,计算喀什站的 I/N 分布如图 8 所示。从图 8 中选取部分 p 值进行截面,绘制如图 9 所示 I/N 特性曲线,其中,曲线 M0 为仅考虑自由空间损耗 L_{fs} 情况下,不同轨道间隔对应的 I/N 特性曲线。从图 9 中可见,仅考虑自由空间损耗 L_{fs} 时,满足 ITU-R S. 1432-1^[24] 中提出的 $I/N = -12.2$ dB 的干扰门限值的轨道间隔须满足 -6.32° 以下或 $+6.29^\circ$ 以上。

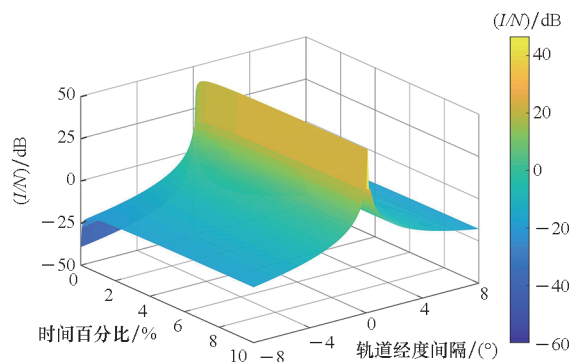


图 8 喀什站降雨损耗对 I/N 的影响分布
Fig. 8 Distribution of the influence of rainfall attenuation on I/N in Kashi station

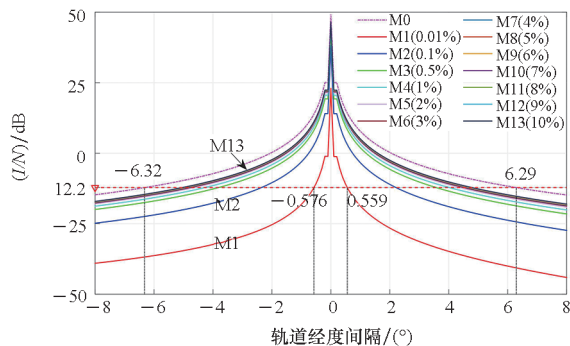


图 9 喀什站降雨损耗对 I/N 的影响曲线
Fig. 9 Curve chart of the influence of rainfall attenuation on I/N in Kashi station

图 9 中曲线 M1 ~ M13 分别表示不同 $p\%$ 下的 I/N 变化曲线,随着 $p\%$ 的减小,触及 $I/N =$

-12.2 dB 门限值的轨道间隔进一步缩小,当 $p\% > 0.5\%$ 时变化缓慢, $p\% \leq 0.5\%$ 时变化急剧。

对比密云和三亚站,其 I/N 分布图的整体趋势与图 8~9 基本一致,但对于相同的 p 值,三者触及 I/N 门限值的间隔角度差异较大。以 M0 (仅 L_{fs})、M2 ($p = 0.1$)、M13 ($p = 10$) 为例,对喀什、密云、三亚站的 I/N 曲线进行对比,结果如图 10 所示。

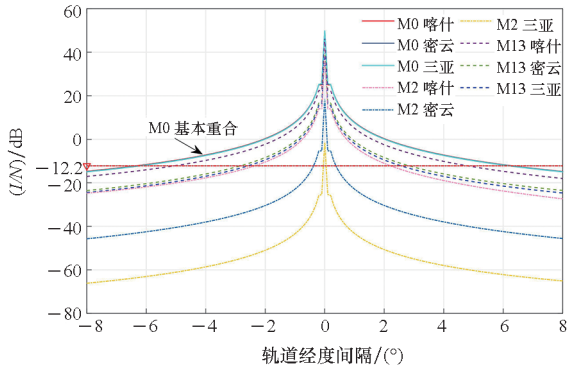


图 10 喀什站、密云站、三亚站的降雨损耗对 I/N 的影响对比

Fig. 10 Comparison of the influence of rainfall attenuation on I/N in Kashi, Miyun and Sanya stations

图 10 中三个地球站的 M0 曲线基本重合,触及 I/N 门限值的轨道经度间隔在 $\pm 6.3^\circ$ 左右;三亚站和密云站的 M13 曲线差距较小,与喀什站的 M13 曲线差距略大;密云站和三亚站的 M2 曲线触及 I/N 门限值的轨道经度间隔看似相近,密云站约为 $\pm 0.37^\circ$,三亚站约为 $\pm 0.045^\circ$,但仍存在一个数量级的差距,且二者与喀什站的差别明显。

此外,当 $p = 10$ 时,由图 3 可见,区域内降雨衰减在 5 dB 以下,且由图 5 可知大气吸收损耗 A_c 的衰减也低于 3 dB,此时,传播损耗 L_Q 的差异主要源于云雾衰减 A_c 。实质上,基于对降雨衰减分布的分析,降雨衰减在时间百分比为 1% 时,区域内降雨衰减 A_R 约在 24 dB 以下,与云雾衰减 A_c 的衰减值相近,据此,降雨衰减的时间百分比小于 1% 时, I/N 分布受雨衰的影响较大。

综合图 8~10,在干扰卫星与受扰卫星地球站共址场景下,若仅考虑自由空间损耗 L_{fs} ,地球站的选址对 I/N 的影响几乎可以忽略不计;若叠加降雨、云雾、大气吸收等传播损耗,则 I/N 与地面站所处位置的天气条件密切相关,不同地球站位置,因天气条件的不同, I/N 相差甚远,且降雨衰减的时间百分比 $p\%$ 越小,差距越大。

并且,基于 $p\%$ 计算的降雨衰减,表示预测年均 $1 - p\%$ 时间内降雨衰减的最大值,那么,图 9 ~

10 中 $p\%$ 对应的 I/N 特性曲线可预测年均 $1 - p\%$ 时间内 I/N 的最小值,记为 $(I/N)_p$ 。基于 1.3 节 I/N 函数特性分析可知: $p\%$ 越小, $(I/N)_p$ 越小;反之, $(I/N)_p$ 越大;若 $(I/N)_p \geq -12.2$ dB,可预测年均至少在 $1 - p\%$ 时间内存在干扰。如图 9 所示,在干扰卫星轨道经度间隔为 -0.576° ,共址地球站为喀什站的场景下,可预测卫星 CHINASAT-G-115.5E 的下行链路在年均 99.99% 的时间内存在干扰。

4 结论

针对 Q 频段 GSO 卫星通信链路受天气条件影响较大的问题,建立 Q 频段下行链路传播损耗数学模型,基于雨衰时间百分比建立 I/N 函数模型,并分析其单调递增的函数特性。以 CHINASAT-G-115.5E 为例,对 Q 频段 GSO 卫星下行通信链路的传播损耗进行分析,研究降雨损耗在地球站共址的干扰场景下对 I/N 分布的影响,分析结果表明:

1) 降雨衰减的时间百分比 $p\%$ 越低,通信链路受降雨衰减的影响越明显。当 p 在 0.5 以下时,衰减门限值变化较快,在 0.5 以上,变化缓慢,当 $p \geq 10$ 时,降雨衰减不超过 5 dB。

2) 在地球站共址的干扰场景下,仅考虑自由空间损耗时, I/N 受地球站位置影响甚小;叠加降雨、云雾和大气吸收等传播损耗因素,可缩小触及 I/N 门限值(-12.2 dB)的干扰卫星与受扰卫星的轨道经度间隔角度,且地球站降雨越多、时间百分比 $p\%$ 越低,轨道经度间隔越小。

3) 基于时间百分比 $p\%$,可计算年均 $1 - p\%$ 时间内 I/N 的最小值,若该最小值仍大于 -12.2 dB,可推测年均至少 $1 - p\%$ 时间内存在干扰。

参考文献 (References)

- [1] 袁丽,王悦,王权,等. Q/V 频段卫星通信发展现状与关键技术分析[J]. 无线电工程, 2021, 51(1): 78-86.
YUAN L, WANG Y, WANG Q, et al. Analysis of the development status and key technologies of Q/V band satellite communication[J]. Radio Engineering, 2021, 51(1): 78-86. (in Chinese)
- [2] GIGGENBACH D, LUTZ E, POLIAK J, et al. A high-throughput satellite system for serving whole Europe with fast Internet service, employing optical feeder links [C]// Proceedings of the 9th LTC Symposium, 2015.
- [3] VENTOURAS S, MARTELLUCCI A, REEVES R, et al. Assessment of spatial and temporal properties of Ka/Q band earth-space radio channel across Europe using Alphasat Aldo Paraboni payload [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(5): 477-501.

- [4] ASHRAF A, ZAGHLOUL A, SHAALAN A A, et al. Effect of fog and scintillation on performance of vertical free-space optical link from earth to low earth orbit satellite [J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2021, 39(3): 294 – 304.
- [5] ZHANG X Y, SHI H P, LIU H Y, et al. The uplink interference analysis between closely separated GSO FSS VSAT networks in the 27.5 ~ 30 GHz frequency band [C]// *Proceedings of IEEE 9th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*, 2019: 1 – 4.
- [6] 董苏惠, 姚秀娟, 高翔, 等. GSO 卫星系统布设中的通信干扰评估方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(11): 2184 – 2194.
- DONG S H, YAO X J, GAO X, et al. Communication interference assessment methods in GSO satellite system deployment [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46 (11): 2184 – 2194. (in Chinese)
- [7] TANI S, MOTOYOSHI K, SANO H, et al. An adaptive beam control technique for Q band satellite to maximize diversity gain and mitigate interference to terrestrial networks [J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2019, 7(1): 115 – 122.
- [8] 郭强, 刘波, 司圣平, 等. 卫星通信系统邻星干扰分析方法研究 [J]. *上海航天*, 2017, 34(3): 131 – 135.
- GUO Q, LIU B, SI S P, et al. Analysis method study of satellite communications system adjacent interference [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(3): 131 – 135. (in Chinese)
- [9] 韩锐, 张磊, 李伟, 等. 24.65 ~ 25.25 GHz 频段 IMT – 2020(5G) 系统对卫星广播系统干扰分析 [J]. *电信科学*, 2018, 34(7): 102 – 109.
- HAN R, ZHANG L, LI W, et al. Interference analysis between IMT – 2020 (5G) system and broadcasting satellite service system in the band of 24.65 ~ 25.25 GHz [J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(7): 102 – 109. (in Chinese)
- [10] 靳瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2018, 58(9): 833 – 840.
- JIN J, LI Y Q, ZHANG C, et al. Occurrence probability of co-frequency interference and system availability of non-geostationary satellite system in global dynamic scene [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2018, 58(9): 833 – 840. (in Chinese)
- [11] 李伟, 潘冀, 严康, 等. 基于协作的大规模 NGSO 星座间频率兼容共存研究 [J]. *北京邮电大学学报*, 2020, 43(6): 110 – 117.
- LI W, PAN J, YAN K, et al. Research on frequency compatibility of collaboration-based large-scale NGSO constellations [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, 43 (6): 110 – 117. (in Chinese)
- [12] WANG H T, LYU X Y, ZHONG L P. Interference-to-noise ratio estimation in long-term evolution passive radar based on cyclic auto-correlation [J]. *Electronics Letters*, 2021, 57(9): 375 – 377.
- [13] KANG K, PARK J M, KIM H W, et al. Analysis of interference and availability between satellite and ground components in an integrated mobile-satellite service system [J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2015, 33(4): 351 – 366.
- [14] SAMAD M A, DIBA F D, CHOI D Y. A survey of rain attenuation prediction models for terrestrial links—current research challenges and state-of-the-art [J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1207.
- [15] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems: ITU-R P.618-13[S]. Geneva: ITU, 2017.
- [16] ITU-R. Characteristics of precipitation for propagation modeling: ITU-R P.837-7[S]. Geneva: ITU, 2017.
- [17] ITU-R. Mean surface temperature: ITU-R P.1510-1[S]. Geneva: ITU, 2017.
- [18] ITU-R. Topography for earth-space propagation modelling: ITU-R P.1511-2[S]. Geneva: ITU, 2019.
- [19] ITU-R. Attenuation due to clouds and fog: ITU-R P.840-7[S]. Geneva: ITU, 2017.
- [20] ITU-R. Attenuation by atmospheric gases: ITU-R P.676-11[S]. Geneva: ITU, 2016.
- [21] ITU-R. Reference standard atmospheres: ITU-R P.835-6[S]. Geneva: ITU, 2017.
- [22] ITU-R. Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites: ITU-R S.672-4[S]. Geneva: ITU, 1997.
- [23] ITU-R. Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites: ITU-R S.580-6[S]. Geneva: ITU, 2004.
- [24] ITU-R. Apportionment of the allowable error performance degradations to fixed-satellite service (FSS) hypothetical reference digital paths arising from time invariant interference for systems operating below 30 GHz: ITU-R S.1432-1[S]. Geneva: ITU, 2006.