



研究与开发

天通卫星终端对C波段卫星地球站的干扰分析与研究

黄宁, 陈子龙, 陶洪波, 宫剑, 张明远
(国家无线电监测中心检测中心, 北京 100041)

摘要: 通过分析天通卫星终端产生的二次谐波杂散对C波段卫星固定业务系统下行造成的同频干扰, 基于不同的杂散发射限值要求, 考虑在不同信道环境中天通卫星终端分布的情况, 采用蒙特卡洛仿真方法, 比较了卫星地球站天线在不同仰角和不同水平距离条件下天通卫星终端对卫星地球站的干扰情况, 并给出了天通卫星终端与C波段卫星地球站兼容共存的相关技术条件和建议。

关键词: 天通卫星终端; 杂散发射; C波段卫星地球站; 同频干扰

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025108

Interference analysis and research on Tiantong satellite terminal to C-band satellite earth station

HUANG Ning, CHEN Zilong, TAO Hongbo, GONG Jian, ZHANG Mingyuan
The State Radio Monitoring Center Testing Center, Beijing 100041, China

Abstract: The co-channel interference caused by the second harmonic spurious emissions from Tiantong satellite terminal to the downlink of C-band satellite fixed service system was analyzed. Based on different spurious emissions requirement limits, considering the distribution of Tiantong satellite terminals in different channel environments, the Monte Carlo simulation method was used to compare the interference condition of Tiantong satellite terminal to satellite earth stations at different elevation angles of satellite earth station antennas and the isolation distance between Tiantong satellite terminal and satellite earth stations. The relevant suggestions were given for the co-existence of Tiantong satellite terminal and C-band satellite earth stations.

Key words: Tiantong satellite terminal, spurious emission, C-band satellite earth station, co-channel interference

0 引言

根据国际电信联盟《无线电规则》和《中华人民共和国无线电频率划分规定》, C波段

(3 400~4 200 MHz) 被划分用于卫星固定业务系统的下行频段^[1]。我国的C波段卫星系统应用涉及重大卫星工程、行业卫星通信应用、航天卫星研制、卫星国际出口等多个领域^[2]。C波段卫星

收稿日期: 2024-12-04; 修回日期: 2025-04-08

通信作者: 陶洪波, taohongbo@src.org.cn



地球站包括测控站、通信双向地球站、通信单收地球站、广播电视卫星地球站。其中，广播电视卫星地球站数量最多，已超6万个。

目前，业界针对5G基站对C波段卫星地球站产生的干扰进行了大量的分析^[2-5]，并提出了可用于促进两个系统共存的潜在技术。2018年12月，工业和信息化部印发了《3 000~5 000 MHz频段第五代移动通信基站与卫星地球站等无线电台(站)干扰协调管理办法》，该管理办法明确了5G基站与卫星地球站的干扰协调程序，以及C频段卫星地球站低噪声放大器(low noise amplifier, LNA)和低噪声块下变频器(low noise block converter, LNB)的技术要求。管理办法的颁布解决了5G基站对卫星地球站的干扰协调问题。文献[6]研究了5G上行链路对C波段卫星接收器的干扰情况，重点分析了C波段5G用户终端设备的带外(out of band, OOB)辐射对C波段卫星地球站的干扰情况，并提出了在一定距离情况下这种干扰的危害。

然而，针对天通终端对C波段卫星地球站的干扰分析和研究较少。近年来，卫星互联网发展迅速，全球主要国家积极推动卫星星座的建设，星地融合网络成为未来6G的重要演进趋势^[7-8]。手机直连面向公众领域，提供无处不在的泛在连接，是未来通信的重要发展方向，成为星地融合下的产业研究热点^[9-10]。我国已出现多种支持直连天通卫星的移动终端产品。由于天通卫星终端上行发射频率为1 900~2 010 MHz，它的二次谐波杂散频率落在3 700~4 200 MHz范围内，会对C波段卫星地球站产生同频干扰，造成C波段卫星地球站无法正常接收卫星信号。同频干扰由于频段完全重合，无法通过滤波等方式分离，因此会直接导致底噪的抬升、信噪比的下降，造成的

危害极大。因此，亟须进行天通卫星终端对C波段卫星地球站的干扰分析。

本文针对L波段天通终端发射频率的二次谐波杂散，基于目前天通卫星终端的射频技术指标定义的通用杂散发射限值要求，以及3GPP TS 38.521-1^[11]中对5G终端共存杂散要求，在调研我国C波段卫星系统典型参数的基础上，对天通卫星终端与C波段卫星地球站的干扰和共存问题进行仿真和研究，并给出了在不同杂散限值下的干扰协调的建议。本文的研究为未来卫星互联网终端射频技术要求的合理制定提供了一定的参考。

1 卫星地球站干扰限值

1.1 卫星地球站系统组成

在卫星通信系统中，用户之间通过卫星地球站以卫星为中继进行通信。从卫星到卫星地球站方向的无线链路为下行链路，从卫星地球站到卫星方向的无线链路为上行链路。为保证上、下行链路互不干扰，卫星系统的上、下行链路使用不同的频段。一般情况下，卫星地球站由天线、发射设备、接收设备、信道终端设备、通信控制器和电源六大部分组成^[12]。卫星地球站根据业务的要求，可以同时具有发送设备和接收设备，也可以只有发送设备或接收设备。

卫星地球站接收端的基本构成如图1所示，包括卫星接收天线、馈线、高频头、功分器和卫星信号接收机。其中，高频头的基本构成如图2所示，包括LNA、混频器、本振和中频放大器等。卫星地球站通过接收天线对卫星转发的下行信号进行接收，再利用馈线将信号传送到高频头，高频头对信号放大且下变频后，再传送给室内的功分器和卫星信号接收机。

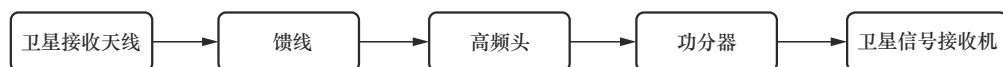


图1 卫星地球站接收端的基本构成

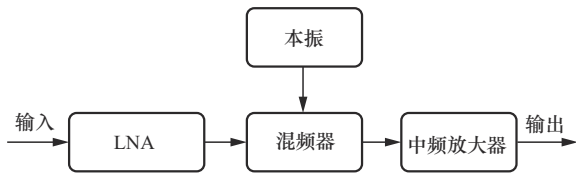


图2 高频头的基本构成

1.2 干扰保护准则

根据国际电联ITU-R S.1432-1^[13]建议书,在卫星地球站(含卫星测控站、卫星监测站)工作频段及其相邻频段,干扰信号限值为晴空条件下卫星地球站接收系统噪声功率的6%,即晴空条件下卫星地球站接收系统噪声功率减少12.2 dB,超过该限值的干扰信号可能对卫星地球站造成有害干扰。

卫星地球站接收天线输出端口处的等效噪声温度的计算式为:

$$T_e = T_a + (L_l - 1)T_0 + L_l T_{e2} \quad (1)$$

其中, T_a 为天线噪声温度,单位为K, L_l 为馈线损耗,线性单位, T_0 为参考温度,取值290 K, T_{e2} 为LNA或LNB噪声温度,单位为K。

接收机热噪声的计算式为:

$$N_0 = 10 \lg k_B T_e B \quad (2)$$

其中, k_B 为玻尔兹曼常数,即 1.38×10^{-23} J/K, B 为测量噪声带宽,单位Hz。

卫星地球站的工作频率为3 700~4 200 MHz,带宽为500 MHz,假设天线噪声温度为42 K,馈线损耗为0.1 dB,LNB噪声温度为45 K,将相应数据代入式(1)和式(2)可得:

$$T_e = 42 + \left(10^{\frac{0.1}{10}} - 1 \right) \times 290 + 10^{\frac{0.1}{10}} \times 45 = 95 \text{ K}$$

$$N_0 = 10 \lg \left(1.38 \times 10^{-23} \times 95 \times 500 \times 10^6 \right) = -121.8 \text{ dBW} = -91.8 \text{ dBm}$$

干扰信号限值为晴空条件下卫星地球站接收系统噪声功率的6%,则卫星地球站接收天线输出端口处的干扰信号限值 $I = -91.8 \text{ dBm} - 12.2 \text{ dB} = -104.0 \text{ dBm}/500 \text{ MHz}$,即 $-131.0 \text{ dBm}/\text{MHz}$ 。根据国际电联ITU-R S.2199-0^[14]的报告,当卫星地球

站接收到的干扰信号总功率超过 -60 dBm 时,LNB将产生饱和干扰,导致卫星地球站无法正常工作。此限值远远小于 -60 dBm ,因此将 $-131 \text{ dBm}/\text{MHz}$ 作为干扰门限,用于判定卫星地球站是否受到干扰。

2 仿真模型和仿真参数分析

2.1 仿真场景

C波段是卫星地球站的重要频段之一,卫星地球站与天通卫星终端共存场景示意图如图3所示。在共存场景中,C波段卫星地球站和卫星通信时,天通卫星终端产生的二次谐波杂散会使C波段卫星地球站产生同频干扰。

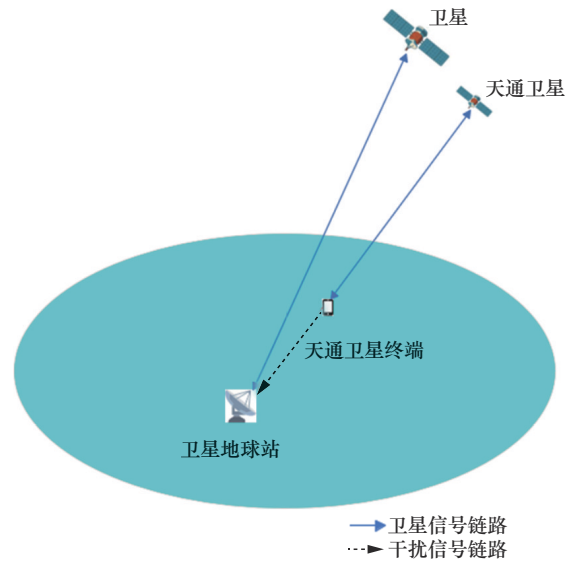


图3 卫星地球站与天通卫星终端共存场景示意图

2.2 仿真方法

本文采用蒙特卡洛仿真方法。蒙特卡洛仿真基于随机抽样产生大量事件(实验),并根据模型来描述物理现象,常被用于评估不同无线电通信系统之间的潜在干扰^[5],如广播、点对点、点对多点、雷达、移动网络、航空和卫星通信等,可提供任一时刻的平均干扰概率信息。它允许解决具有概率解释的问题,对于模拟涉及众多可变参数的系统非常有效。



2.3 仿真参数

卫星系统中卫星和卫星地球站的相关参数见表1, 卫星为静止轨道卫星, 其经度选择 59°E、85°E 和 113°E。卫星地球站假设其经纬度为 120°E、40°N。

表1 卫星和卫星地球站的相关参数

参数名称	参数取值
频率	3 700~4 200 MHz
卫星经度	59°E/85°E/113°E
卫星高度	35 786 km
卫星地球站经纬度	120°E、40°N
卫星地球站天线模型	ITU-R S.465-6
卫星地球站最大天线增益	35.5 dBi
地球半径	6 378 km

2.3.1 通信指向角和距离计算

卫星通信中, 通信指向角是指方向角和仰角。卫星地球站仰角和方向角示意图如图4所示, Y轴表示北方向, XY平面为地平面。方向角是从某点的指北方向线起, 依顺时针方向到目标方向线之间的水平夹角, 其中目标方向线是天线指向线到地平面的垂直投影。仰角是接收站所在地的地平面水平线与天线中心线所形成的夹角。

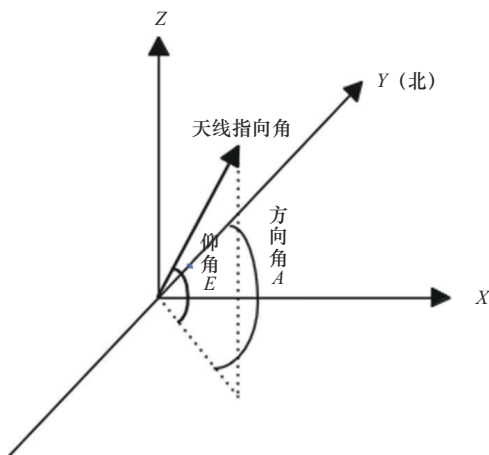


图4 卫星地球站仰角和方向角示意图

卫星地球站天线的方向角 A 、仰角 E 和卫星与卫星地球站的距离 d 的计算式分别如下所示^[15]:

$$A = 180^\circ - \arctan \frac{\tan(\phi_s - \phi_g)}{\sin \theta_g} \quad (3)$$

$$E = \arctan \frac{\cos(\phi_s - \phi_g) \cos \theta_g - \frac{R_e}{R_e + h_e}}{\sqrt{1 - [\cos(\phi_s - \phi_g) \cos \theta_g]^2}} \quad (4)$$

$$d = (R_e + h_e) \sqrt{1 + \left(\frac{R_e}{R_e + h_e}\right)^2 - 2 \frac{R_e}{R_e + h_e} \cos(\phi_s - \phi_g) \cos \theta_g} \quad (5)$$

其中, ϕ_g 、 θ_g 分别为卫星地球站的经度和纬度, ϕ_s 为卫星所在轨道位置的经度, R_e 为地球半径, h_e 为静止卫星距离地面的高度。卫星地球站相对于卫星相关参数示意图如图5所示。

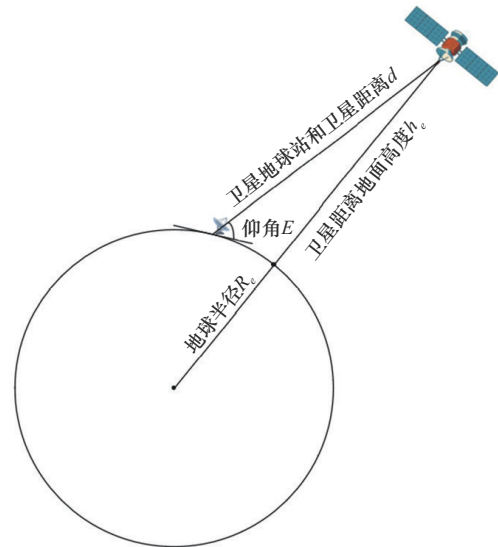


图5 卫星地球站相对于卫星相关参数示意图

卫星地球站天线指向角与卫星、卫星地球站的位置有关, 将表1中卫星经度和卫星地球站经纬度参数代入式(3)~式(5), 可以得到卫星地球站天线的指向角和卫星与卫星地球站的距离, 见表2。

2.3.2 卫星地球站天线模型

卫星地球站天线模型采用 ITU-R S.2196^[16] 中第2.1.4节推荐的天线模型, 具体如下。

如果 $\frac{D}{\lambda} > 54.5$, 则:

表2 卫星地球站天线的指向角和卫星与卫星地球站的距离

卫星地球站 经度 $\phi_{g'l}$ / (°)	卫星地球站 纬度 $\theta_{g'l}$ / (°)	卫星经度 $\phi_{s'l}$ / (°)	卫星地球站 天线方向角 A' / (°)	卫星地球站 天线仰角 E' / (°)	卫星与卫星地球站的 距离 d /km
116	40	59	247.3	16.3	39 926
116	40	85	223.1	33.8	38 279
116	40	113	184.7	43.6	37 510

$$G(\phi) = \begin{cases} G_{\max} - 0.0025 \left(\frac{D}{\lambda} \phi \right)^2, & 0 \leq \phi < \phi_m \\ G_1, & \phi_m \leq \phi < \phi_r \\ 32 - 25 \lg \phi, & \phi_r \leq \phi < \phi_{\min} \\ 32 - 25 \lg \phi, & \phi_{\min} \leq \phi < 48^\circ \\ -10, & 48^\circ \leq \phi \leq 180^\circ \end{cases} \quad (6)$$

$$\phi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\max} - G_1} \quad (8)$$

$$\phi_r = 15.85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0.6} \quad (9)$$

$$\phi_{\min} = \max \left(1^\circ, 100 \frac{\lambda}{D} \right) \quad (10)$$

$$G_1 = 2 + 15 \lg \left(\frac{D}{\lambda} \right) \quad (7) \quad \text{否则:}$$

$$G(\phi) = \begin{cases} G_{\max} - 0.0025 \left(\frac{D}{\lambda} \phi \right)^2, & 0 \leq \phi < 0.9\phi_{\min} \\ \max \left(G_{\max} - 0.0025 \left(\frac{D}{\lambda} \phi \right)^2, 32 - 25 \log_{10} \phi \right), & 0.9\phi_{\min} \leq \phi < \phi_{\min} \\ 32 - 25 \log_{10} \phi, & \phi_{\min} \leq \phi < 48^\circ \\ -10, & 48^\circ \leq \phi \leq 180^\circ \end{cases} \quad (11)$$

$$\phi_{\min} = \begin{cases} \max \left(1^\circ, 100 \frac{\lambda}{D} \right), & \frac{\lambda}{D} \geq 50 \\ \max \left(2^\circ, 114 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-1.09} \right), & \frac{\lambda}{D} < 50 \end{cases} \quad (12)$$

其中, D 为天线口面直径, λ 为信号波长, G_{\max} 为天线最大增益, 单位为dBi, ϕ 为与主波束轴所形成的夹角, $G(\phi)$ 为偏离主波束方向角度 ϕ 上的增益, 单位为dBi, G_1 为第一旁瓣增益, 单位为dBi, ϕ_m 为主瓣与第一旁瓣增益相交点偏离主波束轴角度, ϕ_r 为第一旁瓣增益与旁瓣包络相交点偏离主波束轴角度, ϕ_{\min} 为主瓣与旁瓣增益包络交点偏离主波束轴角度。

2.3.3 信道模型

3GPP TR38.901^[17]中定义了城市宏 (urban macro, UMa) 小区和农村宏 (rural macro, RMa) 小区两种场景。场景又进一步分为视距 (line of sight, LOS) 环境和非视距 (non-line of sight, NLOS) 环境。视距环境是指终端与基站之间无

遮挡, 非视距环境是指终端与基站之间有遮挡。在分析卫星地球站和天通卫星终端的共存问题时, 信道模型选用3GPP TR38.901标准下城市和农村两种环境, 通过仿真探究在不同环境下, 卫星地球站和天通卫星终端的共存条件。

3 仿真结果分析

3.1 天通终端通用杂散限值为-30 dBm/MHz的干扰分析

根据目前天通卫星终端在1~12.75 GHz频段范围内的通用杂散限值不能超过-30 dBm/MHz的规定, 在仿真中将天通卫星终端谐波杂散功率值设置为-30 dBm/MHz。信道模型选用3GPP TR38.901标准下城市和农村两种环境, 仿真参数见表3。

-30 dBm/MHz杂散限值条件下城市NLOS环境和农村LOS环境的仿真结果见表4、表5。表4、表5展示了卫星地球站天线仰角分别为16.3°、



表3 仿真参数

参数名称	城市环境	农村环境
卫星地球站高度	20 m	10 m
天通终端高度	1.5 m	1.5 m
信道模型	3GPP TR38.901 UMa NLOS	3GPP TR38.901 RMa LOS
天通终端数量	160个	160个
天通终端分布类型	高斯分布 (方差=1)	高斯分布 (方差=1)
卫星地球站天线的仰角	16.3°、33.8°、43.6°	16.3°、33.8°、43.6°
仿真事件次数	20 000	20 000

33.8°、43.6°时, 天通卫星终端对不同仰角、不同水平距离范围下的卫星地球站的干扰仿真结果。其中, 水平距离为卫星地球站天线与天通卫星终端之间的水平距离, 示意图如图6所示。本文通过改变仿真参数水平距离范围中的最小水平距离, 来寻找符合本文第1节中描述的干扰限值临界点。仿真结果表明, 为保证卫星地球站接收天线输出端口的干扰信号不超过-131.0 dBm/MHz的干扰门限, 城市NLOS环境需要保证110 m以上的水平距离, 农村LOS环境需要保证2.1 km以上的水平距离。

表4 -30 dBm/MHz杂散限值条件下城市NLOS环境的仿真结果

卫星地球站 天线仰角/ (°)	水平距离范围/m	平均干扰信号电平/ (dBm·MHz ⁻¹)
16.3	100~1 000	-130.3
	110~1 000	-131.3
33.8	90~1 000	-130.6
	100~1 000	-131.8
43.6	90~1 000	-130.8
	100~1 000	-132.02

表5 -30 dBm/MHz杂散限值条件下农村LOS环境的仿真结果

卫星地球站 天线仰角/ (°)	水平距离范围/km	平均干扰信号电平/ (dBm·MHz ⁻¹)
16.3	2~3	-130.8
	2.1~3	-131.2
33.8	1.5~3	-130.6
	1.6~3	-131.2
43.6	1.4~3	-130.4
	1.5~3	-131.2

卫星地球站天线

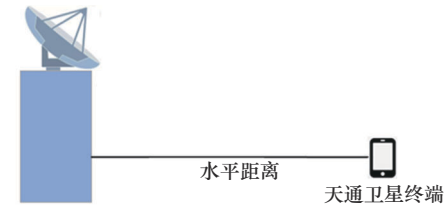


图6 卫星地球站天线与天通卫星终端之间的水平距离示意图

3.2 天通终端杂散限值为-50 dBm/MHz的干扰分析

3GPP 38.521-1标准的6.5.3.2小节中对终端射频的规定: 5G NR n1频段 (上行频率是1 920~1 980 MHz) 的保护频段3 300~4 200 MHz的杂散限值不能超过-50 dBm/MHz。由于5G NR n1频段与天通卫星终端的上行频率非常接近, 因此, 假定未来天通终端也可以实现在3 700~4 200 MHz频段的杂散功率小于-50 dBm/MHz, 仿真中采用-50 dBm/MHz作为限值, 其他参数同表3。-50 dBm/MHz杂散限值条件下城市NLOS环境和农村LOS环境的仿真结果见表6、表7。结果表明, 在城市NLOS环境下, 水平距离在10 m以上即可保证干扰限值; 在农村LOS环境下, 大于60 m的水平距离可保证干扰限值。

表6 -50 dBm/MHz杂散限值条件下城市NLOS环境的仿真结果

卫星地球站 天线仰角/ (°)	水平距离范围/km	平均干扰信号电平/ (dBm·MHz ⁻¹)
16.3	10~1 000	-131.0
33.8	10~1 000	-131.0
43.6	10~1 000	-131.0

表7 -50 dBm/MHz杂散限值条件下
农村LOS环境的仿真结果

卫星地球站 天线仰角/ (°)	水平距离范围/m	平均干扰信号电平/ (dBm·MHz ⁻¹)
16.3	50~3 000	-130.9
	60~3 000	-131.6
33.8	30~3 000	-130.6
	40~3 000	-131.9
43.6	30~3 000	-130.8
	40~3 000	-132.1

4 结束语

本文首先对卫星地球站组成和干扰保护指标进行介绍, 然后对仿真场景、仿真方法和仿真中要用到的参数进行说明, 最后通过蒙特卡洛仿真分别分析了两种天通卫星终端谐波杂散功率条件下对卫星地球站的干扰情况。由仿真结果可知, 天通卫星终端对卫星地球站的干扰因素包括天通卫星终端杂散值、卫星地球站天线的仰角、信道环境以及天通卫星终端和卫星地球站的水平距离范围。当杂散限值为-50 dBm/MHz时, 在城市NLOS环境下, 天通终端对卫星地球站的干扰在10 m以上距离可忽略; 在农村LOS环境下, 需要40~60 m的水平隔离距离。当杂散限值为-30 dBm/MHz时, 在城市NLOS环境下, 天通终端与卫星地球站的水平距离需要100~110 m; 在农村LOS环境下, 需要1 500~2 100 m的水平隔离距离。如果未来天通或其他卫星互联网终端可以实现-50 dBm/MHz的杂散限值, 将更加有利于与C波段卫星地球站的兼容共存。

参考文献:

- [1] 工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率划分规定[EB]. 2023.
Ministry of Industry and Information Technology. People's Republic of China regulations on radio frequency allocation[EB]. 2023.
- [2] 陈海航, 蔡灵伟, 范凌峰. 5G基站与C波段卫星地球站的干扰协调问题[J]. 中国无线电, 2019(11): 66-67.

- CHEN H H, CAI L W, FAN L F. Interference coordination between 5G base station and C-band satellite earth station[J]. China Radio, 2019(11): 66-67.
- [3] MIAO X X, YANG M C. Co-channel interference between satellite and 5G system in C band[M]//Machine Learning and Intelligent Communications. Cham: Springer International Publishing, 2021: 410-416.
- [4] 文羽中. 5G设备对C波段卫星地球站的干扰分析[J]. 中国新通信, 2021, 23(6): 50-51.
WEN Y Z. Interference analysis of 5G equipment to C-band satellite earth station[J]. China New Telecommunications, 2021, 23(6): 50-51.
- [5] 杨帆, 代明, 刘飞飞, 等. C频段广播电视卫星接收站抗5G基站干扰兼容性评估及技术指标分析[J]. 广播与电视技术, 2021, 48(1): 126-135.
YANG F, DAI M, LIU F F, et al. Compatibility evaluation and technical index analysis of C-band broadcasting satellite receiving stations against 5G base station interference[J]. Radio & TV Broadcast Engineering, 2021, 48(1): 126-135.
- [6] LAGUNAS E, TSINOS C G, SHARMA S K, et al. 5G cellular and fixed satellite service spectrum coexistence in C-band[J]. IEEE Access, 2020, 8: 72078-72094.
- [7] SUN Y H, PENG M G, ZHANG S J, et al. Integrated satellite-terrestrial networks: architectures, key techniques, and experimental progress[J]. IEEE Network, 2022, 36(6): 191-198.
- [8] TIRMIZI S B R, CHEN Y F, LAKSHMINARAYANA S, et al. Hybrid satellite-terrestrial networks toward 6G: key technologies and open issues[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8544.
- [9] 何元智, 肖永伟, 张世杰, 等. 全球泛在连接新模式: 手机直连卫星关键技术及挑战[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1591-1603.
HE Y Z, XIAO Y W, ZHANG S J, et al. A novel pattern for global ubiquitous interconnection: key technologies and challenges of direct-to-smartphone[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(5): 1591-1603.
- [10] 刘会, 叶阳, 丁志东, 等. 星地融合下的手机直连关键技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 10-17.
LIU H, YE Y, DING Z D, et al. Research on key technologies of direct-to-handset under satellite-terrestrial integrated network[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 10-17.
- [11] 3GPP. User equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone: TS 38.521-1 V18.4.0[S]. 2024.
- [12] 维明世, 冯建利. 卫星通信[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
LUO M S, FENG J L. Satellite communications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.



- [13] ITU. 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[S]. 2006.
- [14] ITU. Studies on compatibility of broadband wireless access systems and fixed-satellite service networks in the 3 400-4 200 MHz band: ITU-R REPORT S.2199[S]. 2010.
- [15] 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.
- [16] ITU. Methodology on the modelling of earth station antenna gain in the region of the antenna main-lobe and the transition region between the minimum angle of the reference antenna pattern and the main-lobe: ITU-R S. 2196[S]. 2010.
- [17] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR 38.901 V18.0.0[S]. 2024.

[作者简介]



黄宁 (1992-), 女, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为电磁兼容性分析、无线电设备检测等。



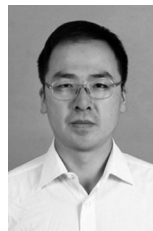
陈子龙 (1988-), 男, 国家无线电监测中心检测中心助理工程师, 主要研究方向为电磁兼容性分析、无线电设备检测等。



陶洪波 (1977-), 男, 国家无线电监测中心检测中心副主任、高级工程师, 主要研究方向为无线电设备检测技术、电磁兼容性分析、标准化制定、无线电专用测量仪表设计开发等。



宫剑 (1977-), 女, 国家无线电监测中心检测中心高级工程师, 主要研究方向为5G、6G、无线接入系统和毫米波雷达设备检测方法。



张明远 (1982-), 男, 国家无线电监测中心检测中心高级工程师, 主要研究方向为无线接入、RFID、雷达、卫星、微波、基站和直放站等无线电测量和检测。