



IMT 频率用于手机直连卫星的可行性研究

章凌凡, 姬天相, 程日涛, 黄曜明, 曹天洋, 朱立坤
(中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080)

摘要: 频率选择是开展手机直连卫星发星工作的首要问题, 也是发星的技术基础。为此, 对手机直连卫星通信频率选择进行分析研究, 先从政策、国内外协调层面分析国际移动通信 (International Mobile Telecommunications, IMT) 频率用于手机直连卫星的可行性, 再从技术层面研究 IMT 频率的星间互调及星地干扰影响。通过完善用频方案, 为开展不同轨位手机直连卫星的应用提供高可靠性、高可用度的选频思路, 这对加快手机直连卫星系统建设具有重要意义。

关键词: 手机直连卫星; IMT 频率; 互调干扰; 星地干扰

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025240

Feasibility research on the use of IMT frequencies for direct-to-cell satellite communication

ZHANG Lingfan, JI Tianxiang, CHENG Ritao, HUANG Yaoming, CAO Tianyang, ZHU Likun
China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China

Abstract: Frequency selection is the primary consideration and technical foundation for launching satellites for direct to cell-satellite communication. To this end, the frequency selection for such communication systems was analyzed and studied. The feasibility of using International Mobile Telecommunications (IMT) frequencies for direct-to-cell satellite communication was analyzed from the perspectives of policy and international coordination. It then investigated the technical impacts, specifically inter-satellite intermodulation and satellite-to-ground interference, within the IMT frequency bands. By refining the frequency utilization plan, a highly reliable and available frequency selection approach was provided for various orbital applications of direct-to-cell satellite. This work is of great significance for accelerating the development of direct to cell-satellite systems.

Key words: direct-to-cell satellite, IMT frequency, intermodulation interference, satellite-to-ground interference

收稿日期: 2025-02-28; 修回日期: 2025-08-11

通信作者: 章凌凡, zhanglingfan@cmdi.chinamobile.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U24B2053)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U24B2053)

0 引言

国家提出了高速泛在、天地一体信息基础设施要求,同时伴随第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)的非地面网络(non terrestrial network, NTN)技术标准演进,这促进了卫星和地面蜂窝通信的融合发展。以星地融合的方式提供手机直连卫星服务,满足全覆盖、全天候、全天时通信需求,是实现泛在连接的必由途径。手机直连卫星能力受限于商用手机射频能力及星地链路大损耗,频率适合选用L、S频段,该频段也是地面无线通信的黄金频段。卫星选频需要遵循国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)干扰协调要求,面向天地一体化,需要满足在星地无相互干扰的前提下,对手机直连卫星的频率资源进行规划分配。

现阶段,卫星与地面蜂窝网络的同频干扰问题是研究热点。文献[1]基于手机直连卫星系统会对相邻区域/国家的非合作地面蜂窝网络造成有害干扰,提出了一种针对“划界”隔离部署场景的手机直连卫星系统对地面蜂窝网络的干扰分析方法。文献[2]针对L、S频段,就NTN卫星与其他移动卫星网络的频率共存问题展开了研究。文献[3]针对手机直连非地球静止轨道(non-geostationary orbit, NGSO)卫星通信场景,分析了其他各同频空间业务的频率协调方案。上述研究均未全面分析卫星、地面基站、普通手机及NTN手机共享频谱的问题,也未针对不同轨道卫星的应用场景细化比较。基于此,考虑未来6G星地融合^[4]要将地面国际移动通信(International Mobile Telecommunications, IMT)频率用于卫星通信,本文深入研究星地同邻频的干扰影响,以及干扰隔离距离等关键问题。

本文主要解决上述相关研究的不足,聚焦政策和技术两方面。用频政策方面,本文对我国境

内的移动卫星业务(mobile satellite service, MSS)和IMT频率使用进行了分析,指出ITU正引导IMT频率用于手机直连卫星。技术分析方面,本文对互调干扰进行计算建模,推导出星载设备收发频率间隔特性,同时综合不同轨道卫星的应用场景,建立了适用于星地、地地之间同邻频干扰分析模型,提供了IMT频率用于手机直连卫星的干扰分析方法,旨在推动星地频率融合共享的技术发展。

1 手机直连卫星用频政策分析

现阶段,手机直连卫星的选频基于两个原则:一是符合ITU《无线电规则》频率划分,首选MSS频率;二是次选地面IMT频率,需要提前与地面运营商及其他卫星运营商完成频率使用协调^[5]。

1.1 MSS频率用于手机直连卫星的政策可行性

我国境内L、S频段的MSS频率目前均已被卫星操作者使用。基于ITU《无线电规则》,若需要使用该部分的频率,要与其他操作者完成干扰规避协调。目前,我国境内经许可商用MSS频率的卫星操作者有中国星网、北斗导航卫星、天通一号卫星、海事卫星、铱星等。

与上述卫星操作者开展协调的难度较大:北斗导航卫星、天通一号卫星皆需要与军方协调;中国星网低轨星座涉及敏感信息通信,其本身用于卫星窄带通信的频率资源不足,协调难度极大;铱星和海事卫星属于美国管理、国内代理的模式,跨国协调难度大且时间周期长。因此,卫星移动业务MSS频率协调难度大,在我国用作手机直连卫星的可行性较低。

1.2 IMT频率用于手机直连卫星的政策可行性

IMT频率用于手机直连卫星,能够推进卫星通信真正进入大众消费市场,在此过程中,采用基于3GPP NTN的技术路线,可促进面向6G星地融合的产品及芯片的发展,进而形成共享的产业



链保障机制，最终降低卫星通信产业的成本^[6-7]。

现阶段，ITU《无线电规则》规定，IMT频率用于手机直连卫星属于使用非划分频率，需要按照4.4条款要求使用，即若手机直连卫星采用地面IMT频率，频率协调优先级低且不受保护，在受到其他合规业务造成的干扰时，不得提出保护要求。该条款无法保障IMT频率用于手机直连卫星时干扰协调的优先级。同时，ITU也正引导IMT频率用于手机直连卫星，ITU的1.13议题组专题讨论并推动部分IMT频率拟用于手机直连卫星，并计划于2027年将该部分频率引入ITU《无线电规则》，进而可真实用于手机直连卫星业务。1.13议题组讨论的拟用于手机直连卫星的IMT候选频率组合见表1^[8-9]。

表1 ITU 1.13议题讨论的拟用于手机直连卫星的IMT候选频率组合

序号	方向	频率/MHz	方向	频率/MHz
1	上行	807~849	下行	852~894
2	上行	880~915	下行	925~960
3	上行	832~862	下行	791~821
4	上行	1 920~1 980	下行	2 110~2 170
5	上行	1 710~1 785	下行	1 805~1 880
6	上行	1 850~1 920	下行	1 930~2 000
7	上行	1 710~1 780	下行	2 110~2 180
8	上行	2 000~2 020	下行	2 180~2 200
9	上行	2 010~2 025	下行	1 880~1 920
10	上行	2 500~2 570	下行	2 620~2 690

ITU 1.13议题组讨论的IMT备选频率集中于800 MHz（序号1~3）和2 GHz（序号4~10）附近。其中，800 MHz广泛应用于物联网业务，未来可演进至卫星物联网应用，而2 GHz附近频率是适合用于手机直连卫星的用户频率，现网有大量的蜂窝基站及用户使用，伴随3GPP NTN标准演进，未来手机直连卫星业务可使用IMT频率，卫星应用可借鉴地面成熟产业体系，促进星地融合，实现天地一体网络。

2 IMT频率用于手机直连卫星的干扰技术分析

随着5G网络覆盖愈加完善及手机资费逐步下降，大量用户由4G迁移至5G网络，同时2G退网，地面运营商进行频率重耕，使得地面IMT频率空出，可释放至卫星使用。频率分配既需要满足星载收发互调干扰要求，又不能与地面蜂窝主力频点和业务规划冲突。本文基于高低轨卫星不同场景，展开IMT频率用于手机直连卫星的干扰技术分析，其中地球静止轨道（geostationary earth orbit, GEO）卫星采用物联网非地面网络（internet of things-non-terrestrial networking, IoT-NTN）技术路线，7色频率复用，单波束4载波，单载波下行180 kHz/上行12路15 kHz，总带宽需求上下行各5 MHz；低地球轨道（low earth orbit, LEO）卫星采用新空口非地面网络（new radio-non-terrestrial network, NR-NTN）技术路线^[10]，参考现阶段星链（Starlink）手机直连低轨卫星在新西兰、日本等地的商用情况，地面运营商提供IMT上下行各5 MHz的频段。

2.1 星载互调干扰计算模型

对于星载互调干扰，高低轨卫星场景的分析方法一致。由于星载天线采用共馈设计，卫星上下行频率的信号经过功率放大后时，会产生许多组合频率信号，其中一部分可能落在卫星接收带内，产生互调干扰。对于非线性系统，较低阶的互调产物强度越大，干扰越明显。由于星载设备的发射和接收的功率大，高阶互调产物也会引起带内干扰，卫星选频时需要考虑最多13阶的互调情况。互调干扰 $f_{IM}=mf_b-nf_d$ 或 $f_{IM}=mf_d-nf_b$ ， $m、n=0,1,2,3,\dots$ ，其中， f_{IM} 为互调频率， $m+n$ 为互调的阶数 p ， f_b 为起始频率， f_d 为截止频率， $f_d>f_b$ ）

对于用户侧，若终端发射上行起始频率为 f_1 ，截止频率为 f_1+BW （BW为分配卫星带宽），

卫星下行起始频率为 f_2 ，截止频率为 f_2+BW ，分别计算上行（下行）引起的互调干扰是否在下行（上行）的频段带内。在多阶互调干扰的计算中，通常仅重点计算满足 $m-n=1$ 的互调产物，原因主要有以下两点。

(1) 该互调产物 f_{IM} 与对端的 f_1 和 f_2 的间隔相对较小，更靠近有用信号，也更有可能落在接收的频段内。

(2) 对于非线性系统，满足 $m-n=1$ 的互调产物 f_{IM} ，相较于同阶其他的互调产物，其强度更高。互调干扰的计算模型如下。

上行对下行频段方向： $f_2 \leq f_{IM(上行)} \leq f_2 + BW$ ，先代入 $f_{IM} = mf_b - nf_d$ ，得：

$$f_2 \leq mf_1 - (m-1)(f_1 + BW) \leq f_2 + BW \quad (1)$$

而 $f_2 \leq f_{IM(上行)} \leq f_2 + BW$ ，代入 $f_{IM} = mf_d - nf_b$ ，得：

$$f_2 \leq m(f_1 + BW) - (m-1)f_1 \leq f_2 + BW \quad (2)$$

共同推导得出：

$$BW \times (m-1) \leq |f_2 - f_1| \leq BW \times m \quad (3)$$

星地融合终端 NTN 手机既能接入卫星网络，也能接入地面蜂窝网络，参考现蜂窝网的上下行频率使用情况，分配上行频率 f_1 较低，下行频率 f_2 较高， $|f_2 - f_1| = f_2 - f_1$ ，代入阶数 $p=m+n$ ， $m-n=1$ ，即 $m = (P+1)/2$ ，得出：

$$BW/2 \times (P-1) \leq f_2 - f_1 \leq BW/2 \times (P+1) \quad (4)$$

同理，下行对上行频段方向： $f_1 \leq f_{IM(下行)} \leq f_1 + BW$ ，得出结果与式（4）一致。

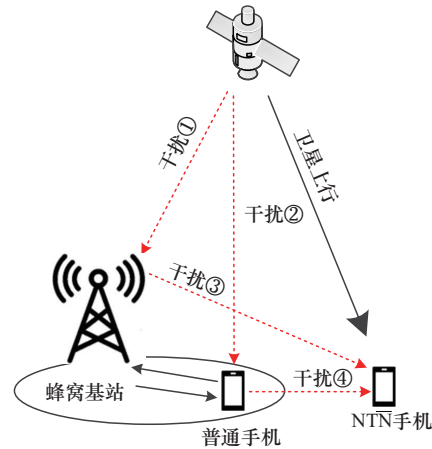
收发频率差在 $\left[\frac{BW}{2} \times (P-1), \frac{BW}{2} \times (P+1)\right]$

区间内会产生带内互调干扰，因此，本文建议选择的收发频率间隔大于 $BW/2 \times (P+1)$ 。卫星上下行选频时，当带宽为 5 MHz 时，收发频率间隔大于 35 MHz，则满足星载非线性设备的 13 阶无互调干扰要求。

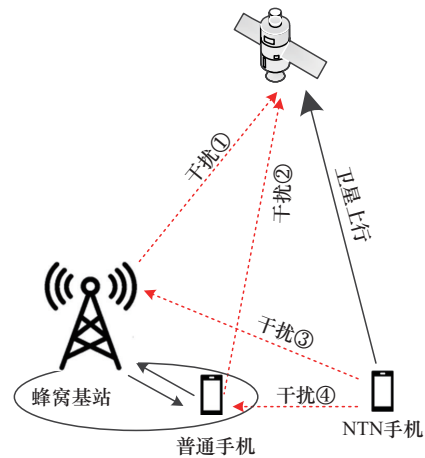
2.2 星地干扰计算模型

2.2.1 星地同邻频干扰场景

根据 ITU 1.13 议题拟用于手机直连卫星 IMT 备选频率范围，选择 2 GHz 左右频率开展星地同邻频干扰场景分析。星地同邻频干扰场景如图 1 所示。



(a) 卫星下行（地面IMT下行频段用作卫星下行）



(b) 卫星上行（地面IMT上行频段用作卫星上行）

图1 星地同邻频干扰场景

地面 IMT 下行频段用作卫星下行主要考虑的干扰场景有：干扰①（卫星发射对蜂窝基站接收的干扰）、干扰②（卫星发射对普通手机接收的干扰）、干扰③（蜂窝基站发射对 NTN 手机接收的干扰）、干扰④（普通手机发射对 NTN 手机接收的干扰）。

地面 IMT 上行频段用作卫星上行主要考虑的干扰场景有：干扰①（蜂窝基站发射对卫星接收



的干扰)、干扰②(普通手机发射对卫星接收的干扰)、干扰③(NTN手机发射对蜂窝基站接收的干扰)、干扰④(NTN手机发射对普通手机接收的干扰)。

NTN手机具备卫星与地面网络自接入与切换的能力,在蜂窝基站覆盖区域接入地面网络,只在蜂窝基站无覆盖或覆盖信号较差状态下切换至卫星网络。在同一位置,NTN手机接入卫星网络,且普通手机接入地面网络的可能性不大。同时,NTN手机和普通手机的发射功率小,两者之间干扰不明显,本文对干扰④场景引起的上下行干扰不作分析。

2.2.2 星地干扰计算模型

星地干扰分为同频干扰和邻频干扰,变量加方括号[]表示电平值,取 $10\lg()$ 计算,计算模型为:

$$[I_{SF}] = [EIRPSD] + [G_R] - [G_o] - [PL] + [N] - [I_o] \quad (5)$$

$$[I_{NF}] = [EIRPSD] + [G_R] - [G_o] - [PL] + [N] - [I_o] + [ACIR] \quad (6)$$

其中, $[I_{SF}]$ 为同频干扰余量, $[I_{NF}]$ 为邻频干扰余量, $[EIRPSD]$ 为发射端有效辐射功率谱密度, $[G_R]$ 为天线接收增益, $[G_o]$ 为天线旁瓣抑制, $[PL]$ 为链路损耗, $[N]$ 为集总数量, $[I_o]$ 为接收端干扰门限, $[ACIR]$ 为相邻信道干扰比。

在蜂窝基站、普通手机与卫星之间的双向同邻频干扰场景下, $[I_{SF}]$ 和 $[I_{NF}]$ 计算值越低,表示受到的干扰越少,当值为负值时,星地干扰可克

服,当值为正值时,存在星地干扰。

在NTN手机与蜂窝基站的双向同邻频干扰场景下,需要分析地面的同邻频隔离距离。具体方法是利用3GPP TR 36.873^[11]及3GPP TR 36.874^[12]中城市、农村场景的视距(line-of-sight, LOS)与非视距(non-line-of-sight, NLOS)传播模型。考虑城市环境光缆和基站部署较为密集发达,与农村情况差异较大,因此本文基于农村NLOS条件传播模型开展分析。农村NLOS条件传播模型如图2所示。首先,计算NTN手机与蜂窝基站之间的 $[I_{SF}]$ 和 $[I_{NF}]$,然后将计算值定义为最大允许自由空间传播损耗,代入农村NLOS条件的传播模型,从而得出同频或邻频的干扰隔离距离。3GPP农村NLOS条件传播模型参数见表2。

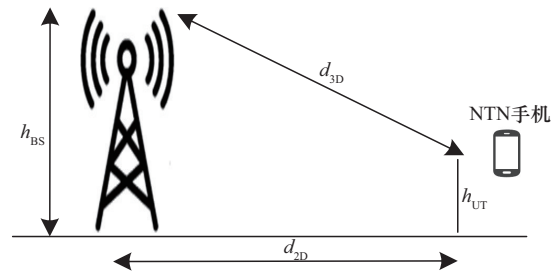


图2 农村NLOS条件传播模型

星地干扰计算流程如图3所示。

基于已完成同频和邻频干扰的计算模型,重点对模型中的指标值进行取值分析(共6项指标在第2.2.3节确定取值),然后代入形成手机直连

表2 3GPP农村NLOS条件传播模型参数

参数	数值
农村NLOS条件传播模型	$PL_{3D-RMa-NLOS} = 161.04 - 7.1 \times \lg W + 7.51 \lg h - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \times \lg h_{BS} + (43.42 - 3.1 \times \lg h_{BS}) \times (\lg d_{3D} - 3) + 20 \times \lg fc - (3.2 \times (\lg(17.625))^2 - 4.97) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$
街道宽度 W/m	20
建筑物平均高度 h/m	15
架设铁塔高度 h_{BS}/m	20
终端高度 h_{UT}/m	1.5
工作频段 fc/GHz	2
最大允许自由空间传播损耗 $PL_{3D-RMa-NLOS}/dB$	等效 $[I_{SF}]$ 和 $[I_{NF}]$
蜂窝基站与NTN手机距离 d_{3D}/m	同频或邻频的干扰隔离距离

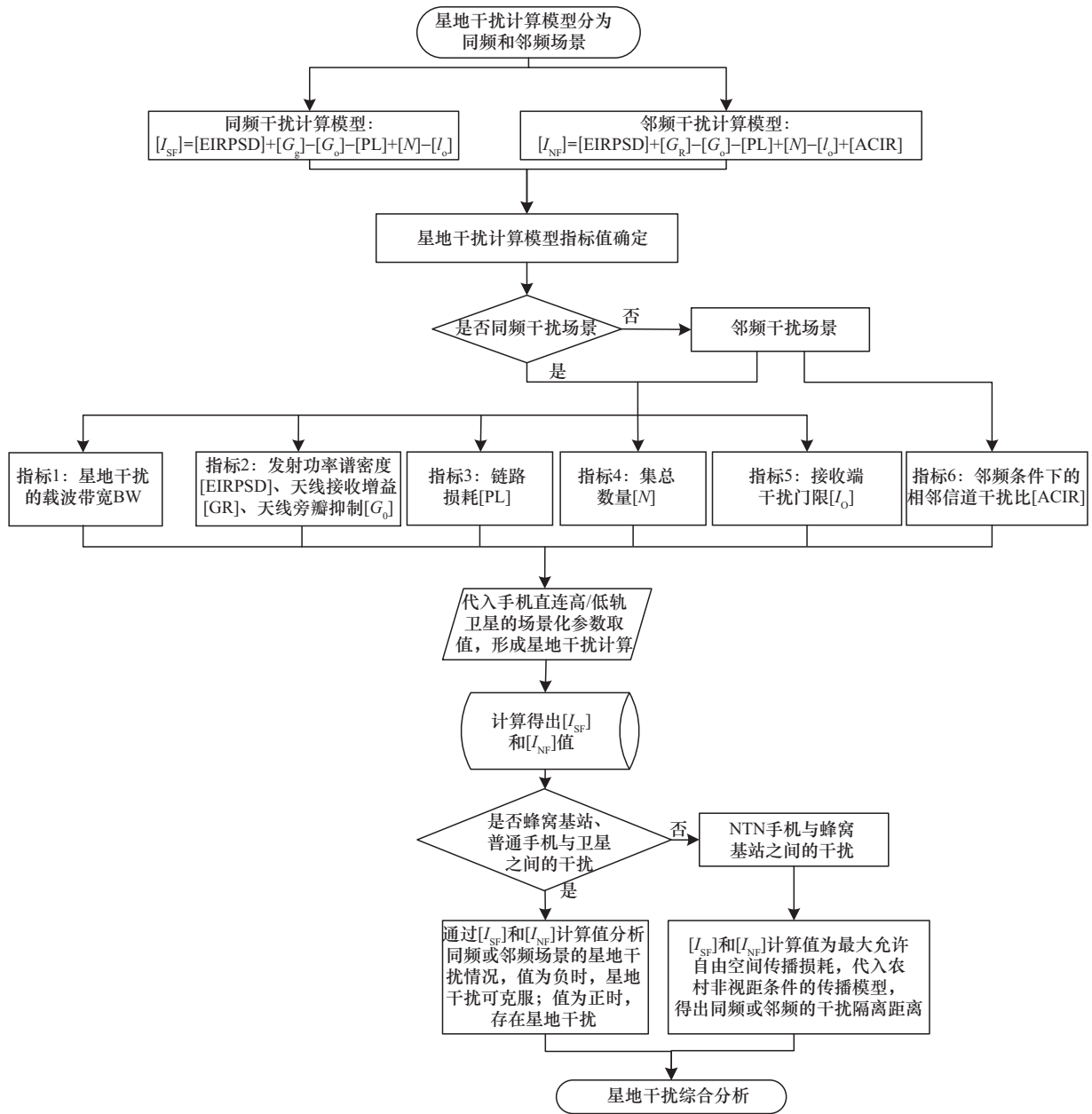


图3 星地干扰计算流程

GEO/ LEO 卫星场景下的星地干扰计算表（如第 2.2.4 节所示），计算得出不同干扰方向的 $[I_{SF}]$ 和 $[I_{NF}]$ 值，并于第 2.2.5 节完成：蜂窝基站、手机与卫星之间的干扰分析；NTN 手机与蜂窝基站之间的干扰分析。

2.2.3 星地干扰计算模型指标值确定

指标 1 星地干扰的载波带宽 BW

NTN 手机和卫星基站载波带宽配置：对于

手机直连 GEO 卫星场景，支持短报文或语音等窄带数据，NTN 手机和卫星基站的载波带宽按照 IOT-NTN 的最小带宽 180 kHz 下行/15 kHz 上行取值；对于手机直连 LEO 卫星场景，支持宽带业务，NTN 手机和卫星基站的载波带宽按照 NR-NTN 的最小带宽 5 MHz 下行/5 MHz 上行取值。

普通手机的载波按照 NR 的最小带宽 5 MHz



下行/5 MHz上行取值。

指标2 发射功率谱密度[EIRPSD]、天线接收增益 $[G_R]$ 、天线旁瓣抑制 $[G_o]$

参考3GPP TR 38.821^[13]，S频段下，GEO星载[EIRPSD]典型值为89 dBm/MHz，卫星天线 $[G_R]$ 的典型值为51 dBi；600 km轨道面的LEO星载[EIRPSD]典型值为64 dBm/MHz，卫星天线 $[G_R]$ 的典型值为30 dBi。

蜂窝基站[EIRPSD]：依据无线电监测中心对基站测试，FDD RRU射频单通道满功率 $[P_T]$ 的典型值为42.1 dBm@20 MHz，基站天线发射增益 $[G_T]$ 为17 dBi。 $[EIRPSD]=[P_T]+[G_T]-[BW]$ ，则手机直连GEO/LEO卫星场景下，蜂窝基站[EIRPSD]为46.09 dBW/MHz。

终端[EIRPSD]：普通手机的参数取值参照3GPP TR 36.101^[14]，其中，存量普通手机的等效全向辐射功率（equivalent isotropically radiated power, EIRP）取23 dBm；NTN手机按照现阶段3GPP讨论的终端EIRP提升指标为26 dBm。 $[EIRPSD]=[EIRP]-[BW]$ ，代入普通手机的带宽5 MHz，则普通手机的[EIRPSD]为16.01 dBW/MHz；在NTN手机直连GEO卫星场景下，代入IOT-NTN带宽15 kHz，则该场景下NTN手机的[EIRPSD]为44.24 dBW/MHz；在NTN手机直连LEO卫星场景下，代入NR-NTN带宽5 MHz，则该场景下NTN手机的[EIRPSD]为19.01 dBW/MHz。

蜂窝基站天线增益及旁瓣抑制取值：依据主流基站天线指标进行取值，天线接收增益 $[G_R]$ 为17 dBi；蜂窝基站天线具备对卫星方向的旁瓣抑制能力，则 $[G_o]$ 取值为15 dB。

手机天线接收增益：普通手机天线接收增益 $[G_R]$ 为-3 dBi，NTN手机通过独立天线设计提升3 dB增益，NTN手机天线接收增益 $[G_R]$ 为0 dBi。

发射功率谱密度[EIRPSD]、天线接收增益 $[G_R]$ 、天线旁瓣抑制 $[G_o]$ 取值见表3。

表3 发射功率谱密度[EIRPSD]、天线接收增益 $[G_R]$ 、天线旁瓣抑制 $[G_o]$ 取值

系统参数	取值
星载天线增益 $[G_R]$ /dBi	51 (GEO) /30(LEO)
星载[EIRPSD]/(dBm·MHz ⁻¹)	89 (GEO) /64(LEO)
蜂窝基站[EIRPSD]/(dBm·MHz ⁻¹)	46.09
普通手机[EIRPSD]/(dBm·MHz ⁻¹)	16.01
NTN手机[EIRPSD]/dBm	44.24 (GEO) /19.01(LEO)
蜂窝基站天线旁瓣抑制 $[G_o]$ /dB	15
基站天线接收增益 $[G_R]$ /dBi	17
普通手机天线接收增益 $[G_R]$ /dBi	-3
NTN手机天线接收增益 $[G_R]$ /dBi	0

指标3 链路损耗[PL]

卫星、蜂窝基站、终端之间传输链路经过不同的传播和衰减，链路损耗[PL]由以下部分叠加而成：

$$[PL]=[PL_b]+[PL_R]+[PL_g]+[PL_S]+[PL_F] \quad (7)$$

其中，[PL]为链路损耗， $[PL_b]$ 为自由空间传播损耗， $[PL_R]$ 为人体损耗， $[PL_g]$ 为大气损耗， $[PL_S]$ 为闪烁损耗， $[PL_F]$ 为极化损耗，以上单位均为dB。

自由空间传播损耗 $[PL_b]$ ：取值主要与星地距离 d 和频率 f_c 强相关。 $[PL_b]=32.45+20\lg(f_c)+20\lg d$ ，取2 GHz的IMT频率，则 f_c 为2 000 MHz；GEO卫星位于同步轨道，考虑星远点仰角30°覆盖， d 为 3.9×10^8 m，计算得出 $[PL_b]=190.24$ dB；LEO卫星位于600 km轨道面，考虑星远点仰角30°覆盖， d 为 1.2×10^6 m，计算得出 $[PL_b]=160.00$ dB。

人体损耗 $[PL_R]$ ：普通手机在通话时，会尽量贴靠人体耳朵，遮挡引起人体损耗，参照3GPP TR 38.811^[15]，普通手机 $[PL_R]$ 一般取值3 dB；考虑NTN手机的使用时，星地链路损耗过大，建议通话时为免提状态，规避人体损耗，NTN手机 $[PL_R]$ 取值为0 dB。

大气损耗 $[PL_g]$ ：大气层对不同频率的无线电波会产生不同影响，低于6 GHz的频率，3GPP TR 38.811规定大气损耗主要为电离层离子体对信号的吸收损耗，国际无线电咨询委员会（Inter-

national Radio Consultative Committee, CCIR) 第 719-1 号统计报告显示, 2 GHz 频率下的 $[PL_g]$ 取值为 0.1 dB^[16]。

闪烁损耗 $[PL_S]$: 参照 3GPP TR 38.811 描述, 2 GHz 频率下电磁波对流层闪烁的影响可忽略, 电离层闪烁损耗考虑赤道南北约 20° 以内区域, 其他纬度电离层闪烁可以忽略不计, 我国除南海外, 大部分领土位于北纬 20° 以外区域, $[PL_S]$ 取值为 0.3 dB。

极化损耗 $[PL_F]$: 卫星用户侧的星载天线采用圆极化电磁波进行辐射, 终端采用线极化的全向天线进行收发, 考虑 3 dB 的极化失配, 外加线缆及集成损耗 1 dB, $[PL_F]$ 取值为 4 dB。

链路损耗取值见表 4。

表 4 链路损耗取值

系统参数	取值
蜂窝基站与卫星之间 $[PL]$ /dB	194.64 (GEO) /164.40 (LEO)
普通手机与卫星之间 $[PL]$ /dB	197.64 (GEO) /167.40 (LEO)

指标 4 集总数量 $[N]$

GEO 卫星采用窄带业务和多波束频率复用, 单星覆盖范围大, 设定地面 IMT 频率存在与卫星同频或邻频的基站数量为 100 000 站, 基站激活率为 20%, 单小区蜂窝用户数为 20; LEO 卫星星座覆盖全球, 单星覆盖范围较小, 同样设定地面 2 GHz 频段 LEO 卫星单星覆盖区域存在同邻频基站平均数量为 1 000 站, 基站激活率为 20%, 单小区蜂窝用户数为 20。集总数量取值见表 5。

表 5 集总数量取值

系统参数	取值
蜂窝基站发射集总数量 $[N]$ /dB	43.00 (GEO) /23.00 (LEO)
普通手机发射集总数量 $[N]$ /dB	56.00 (GEO) /36.00 (LEO)

指标 5 接收端干扰门限 $[I_0]$

含卫星侧、蜂窝基站侧、终端侧 3 部分的接收干扰门限取值, 干扰门限取值以最小接收功率

谱密度并预留实施余量为基准。对于 6 GHz 以下频率, 干扰门限值与噪声系数、带宽和解调的信噪比有关。接收干扰门限 $[I_0]$ 可通过 TR 38.817-01 计算:

$$[I_0] - 174 \text{ dBm} + [NF] + 10 \times \lg(BW) + [SNR] + [IM] \quad (8)$$

其中, BW 为射频接收传输带宽配置, 作为功率谱密度的分母, 取 1×10^6 Hz, BW 值为 10^6 。 $[SNR]$ 为解调信噪比, 单位为 dB, 根据 3GPP TS 38.141^[17], NR 最低解调信噪比为 -2 dB。 $[IM]$ 为预留的实施余量, 单位为 dB, 考虑不影响最小接收功率, 干扰门限下降至其一半, 预留的实施余量取值为 -3 dB。 $[NF]$ 为系统噪声系数, 单位为 dB。

3GPP TR 38.863^[18]关于卫星的 NF 分贝值进行了定义, 其中 GEO 卫星的 $[NF]$ 为 7.3 dB, 轨道面 1 200 km 以下 LEO 卫星的 $[NF]$ 为 4.3 dB。代入式 (8), 得出 GEO 卫星场景下卫星干扰门限为 -111.7 dBm/MHz, LEO 卫星场景下卫星干扰门限为 -114.7 dBm/MHz。

3GPP TR 38.817^[19-20]关于地面蜂窝基站的 $[NF]$ 进行了定义, 其中广域基站的 $[NF]$ 为 5 dB。代入式 (8), 广域基站的干扰门限为 -114 dBm/MHz。

3GPP TR 36.101 对演进的通用陆地无线接入 (evolved universal terrestrial radio access, E-UTRA) 频段下不同带宽的最小接收功率谱密度进行取值定义, E-UTRA 各频段统计的最小接收功率谱密度 -106.2 dBm@1.4 MHz (换算后为 107.7 dBm/MHz), 考虑 3 dB 的实施余量, 得出普通手机和 NTN 手机的干扰门限为 -110.7 dBm/MHz。干扰门限取值见表 6。

表 6 干扰门限取值

系统参数	取值
卫星 $[I_0]$ / (dBm·MHz ⁻¹)	-111.7 (GEO) /-114.7 (LEO)
蜂窝基站 $[I_0]$ / (dBm·MHz ⁻¹)	-114
普通手机 $[I_0]$ / (dBm·MHz ⁻¹)	-110.7
NTN 手机 $[I_0]$ / (dBm·MHz ⁻¹)	-110.7

**指标6 邻频条件下的相邻信道干扰比[ACIR]**

相邻信道干扰比 (adjacent channel interference ratio, ACIR) 考虑了发射机的邻道泄漏比 (adjacent channel leakage ratio, ACLR) 和接收机的相邻信道选择性 (adjacent channel selectivity, ACS)。ACIR用于衡量目标信道内接收到的有用信号功率与接收到的来自相邻信道的干扰信号功率之间的比值, 表示为:

$$[\text{ACIR}] = \frac{1}{\frac{1}{[\text{ACLR}]} + \frac{1}{[\text{ACS}]}} \quad (9)$$

3GPP TR 38.821对卫星、蜂窝基站、终端的[ACLR]和[ACS]指标进行了规定。ACLR和ACS取值见表7。

表7 ACLR和ACS取值

相邻信道参数	取值
卫星[ACLR]/dB	-14 (GEO) / -24 (LEO)
卫星[ACS]/dB	-38 (GEO) / -38 (LEO)
普通及NTN手机[ACLR]/dB	-30
普通及NTN手机[ACS]/dB	-33
蜂窝基站[ACLR]/dB	-45
蜂窝基站[ACS]/dB	-52

2.2.4 星地干扰计算

基于IMT频率场景下,用于手机直连GEO/LEO卫星场景的星地干扰计算上下行方向分别见表8、表9。

2.2.5 星地干扰分析

(1)蜂窝基站、手机与卫星之间干扰分析:邻频条件下,蜂窝基站、普通手机对卫星系统的邻频干扰余量为负数,表明地面对卫星邻频干扰可控;卫星对蜂窝基站、普通手机干扰余量为负数,证明蜂窝基站、手机与卫星之间的邻频干扰可控。同频条件下,蜂窝基站对GEO卫星存在42.16 dB干扰余量,蜂窝基站对LEO卫星存在34.40 dB干扰余量,普通手机对GEO卫星存在37.08 dB干扰余量,普通手机对LEO卫星存在29.33 dB干扰余量,蜂窝基站、手机对卫星同频干扰明显,同频不可共存。同频条件下,GEO卫星对蜂窝基站存在10.36 dB干扰余量,LEO卫星对蜂窝基站存在15.60 dB干扰余量,GEO卫星对普通手机存在-0.94 dB干扰余量,LEO卫星对普通手机存在4.23 dB干扰余量,其中,仅GEO卫星对普通手机的同频干扰可控,而GEO/LEO卫

表8 手机直连GEO/LEO卫星场景下的星地干扰计算(上行方向)

参数	蜂窝基站对卫星	普通手机对卫星	NTN手机对蜂窝基站
发射频率范围/MHz	f_1 至 $(f_1+\text{BW})$	f_1 至 $(f_1+\text{BW})$	f_1 至 $(f_1+\text{BW})$
链路损耗[PL]/dB	194.64 (GEO) /164.40 (LEO)	197.64 (GEO) /167.40 (LEO)	—
发射功率谱密度[EIRPSD]/ (dBm·MHz ⁻¹)	46.09 (GEO) /46.09 (LEO)	16.01 (GEO) /16.01 (LEO)	44.24 (GEO) /19.01 (LEO)
基站天线旁瓣抑制[G _o]/dB	15.00	0	0
天线接收增益[G _R]/dB	51 (GEO) /30 (LEO)	51 (GEO) /30 (LEO)	17.00
集总个数[N]/dB	43.00 (GEO) /23.00 (LEO)	56.00 (GEO) /36.00 (LEO)	1
接收端干扰门限[I _o]/ (dBm·MHz ⁻¹)	-114.70 (GEO) /-117.70 (LEO)	-114.70 (GEO) /-117.70 (LEO)	-114.00
[ACIR]/dB	-45.80	-38.64	-52.03
同频干扰余量[I _{SF}]/dB	42.16 (GEO) /34.40 (LEO)	37.08 (GEO) /29.33 (LEO)	175.24 (GEO) /150.01 (LEO)
邻频干扰余量[I _{NF}]/dB	-3.63 (GEO) /-11.40 (LEO)	-1.55 (GEO) /-9.32 (LEO)	123.21 (GEO) /97.98 (LEO)
农村NLOS传播模型下同频 隔离距离 d_{3D} /m	—	—	8 000 (GEO) /2 000 (LEO)
农村NLOS传播模型下邻频 隔离距离 d_{3D} /m	—	—	400 (GEO) /90 (LEO)

表9 手机直连 GEO/LEO 卫星场景下的星地干扰计算(下行方向)

参数	卫星对蜂窝基站	卫星对普通手机	蜂窝基站对 NTN 手机
发射频率范围/MHz	f_2 至 (f_2+BW)	f_2 至 (f_2+BW)	f_2 至 (f_2+BW)
链路损耗[PL]/dB	194.64 (GEO) /164.40 (LEO)	197.64 (GEO) /167.40 (LEO)	—
发射功率谱密度[EIRPSD] (dBm·MHz ⁻¹)	89.00 (GEO) /64.00 (LEO)	89.00 (GEO) /64.00 (LEO)	52.11 (GEO) /52.11 (LEO)
基站天线旁瓣抑制[G ₀]/dB	15.00	0	0
天线接收增益[G _R]/dB	17.00	-3.00	0
集总个数[N]/dB	0	0	0
接收端干扰门限[I _O] (dBm·MHz ⁻¹)	-114.00	-110.70	-110.70
[ACIR]/dB	-52.00	-33.05	-45.27
频干扰余量[I _{SF}]/dB	10.36 (GEO) /15.60 (LEO)	-0.94 (GEO) /4.23 (LEO)	156.79 (GEO) /156.79 (LEO)
邻频干扰余量[I _{NF}]/dB	-41.64 (GEO) /-36.41 (LEO)	-34.00 (GEO) /-28.76 (LEO)	111.52 (GEO) /111.52 (LEO)
农村 NLOS 传播模型下同频隔离距离 d_{3D} /m	—	—	3 200 (GEO) /3 200 (LEO)
农村 NLOS 传播模型下邻频隔离距离 d_{3D} /m	—	—	230 (GEO) /230 (LEO)

星对蜂窝基站、LEO 卫星对普通手机的同频干扰明显，同频不可共存。

综上，手机直连 GEO/LEO 卫星场景皆可实现基于邻频的星地频谱共存，若将 IMT 频率用于卫星系统，需要将地面同频频段进行腾退。

(2) NTN 手机与蜂窝基站之间干扰分析：邻频条件下，NTN 手机上行会对邻频蜂窝基站产生干扰，GEO 卫星场景需要留出约 400 m 隔离距离，LEO 卫星场景需要留出约 90 m 隔离距离，而蜂窝基站下行存在对 NTN 手机的干扰，GEO/LEO 卫星场景均需要约 230 m 隔离距离。同频条件下，NTN 手机上行对同频蜂窝基站产生干扰更恶劣，GEO 卫星场景需要留出约 8 000 m 隔离距离，LEO 卫星场景需要留出约 2 000 m 隔离距离，而蜂窝基站下行存在对 NTN 手机的干扰，GEO/LEO 卫星场景均需要约 3 200 m 隔离距离。

综上，同频条件下，NTN 手机与蜂窝基站所需的隔离距离要求太大，这会造成偏远地区或海上的通信覆盖出现大量的盲区。邻频条件下，NTN 手机与蜂窝基站具备实现地理隔离的条件。

3 结束语

本文基于政策层面，分析了 ITU 正推进 IMT

频率用于手机直连卫星。同时，在技术层面，本文构建了星载互调干扰计算模型，保障了 IMT 频率在星载收发信道的合理分配，避免星载高功率放大设备工作在非线性状态而引起的交调干扰，有效支撑手机直连卫星的收发频率分配；设计了星地干扰计算模型，根据高低卫星轨道链路状态及带宽资源，实现卫星与手机、基站的星地之间，NTN 手机与蜂窝基站之间的同邻频干扰计算，并对计算结果进一步论证分析，得出同邻频干扰规避下的星地频谱分配方法，以及 NTN 手机和地面蜂窝基站的地理隔离条件。本文的研究有效证明了 IMT 频率用于手机直连卫星的场景具备可行性，为卫星与地面操作者的频率干扰协调奠定了坚实的技术基础，为将来手机自适应切换和接入卫星和蜂窝基站提供判决依据，同时也为卫星运营商、地面运营商以及设备制造商在星地频谱管控、资源调度、干扰规避等技术方向的融合提供了思路。后续研究将进一步推动我国手机直连卫星技术发展及应用落地。

参考文献：

[1] 丁鲜花, 陈媛, 简晨, 等. IMT 频段手机直连卫星系统对地面蜂窝网络的干扰分析[J]. 信息通信技术, 2023, 17(6): 56-62.

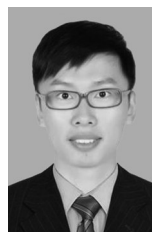


- DING X H, CHEN Y, JIAN C, et al. Interference analysis between direct-to-cellular and cellular network in the frequency band identified for IMT[J]. *Information and Communications Technologies*, 2023, 17(6): 56-62.
- [2] PASTUKH A, TIKHVINSKIY V, DYMKOVA S, et al. Challenges of using the L-band and S-band for direct-to-cellular satellite 5G-6G NTN systems[J]. *Technologies*, 2023, 11(4): 110.
- [3] 王丽冲, 孙晨华, 赵伟松, 等. 手机直连 NGSO 卫星业务中扩展 L 频段频率协调方案研究[J]. *天地一体化信息网络*, 2024, 5(2): 53-62.
- WANG L C, SUN C H, ZHAO W S, et al. Research on extended L-band frequency coordination scheme in mobile direct connection to NGSO satellite service[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2024, 5(2): 53-62.
- [4] FENG W, GE N, LU J H. Coordinated satellite-terrestrial networks: a robust spectrum sharing perspective[C]//*Proceedings of the 2017 26th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [5] 工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率资源划分规定[EB]. 2023.
- MIIT. Regulations on the allocation of radio frequency resources of the People's Republic of China[EB]. 2023.
- [6] 刘硕, 李侠宇, 赵坚, 等. 手机直连卫星的可用频率分析[J]. *空间电子技术*, 2024, 21(6): 92-96.
- LIU S, LI X Y, ZHAO J, et al. Frequency analysis of satellite-direct-to-phone[J]. *Space Electronic Technology*, 2024, 21(6): 92-96.
- [7] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. *电信科学*, 2023, 39(2): 25-36.
- SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication for mobile phone direct connection: key technologies, development status and future prospects[J]. *Telecommunication Science*, 2023, 39(2): 25-36.
- [8] ITU-R. Studies on possible new allocations to the mobile-satellite service for direct connectivity between space stations and International Mobile Telecommunications (IMT) user equipment to complement terrestrial IMT network coverage: resolution COM6/9 (WRC-23)[R]. 2023.
- [9] 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.
- [10] 陈孟尝, 李文彬, 许建新, 等. 基于 3GPP 的 NTN 解决方案和关键技术研究[J]. *邮电设计技术*, 2024(12): 41-47.
- CHEN M C, LI W B, XU J X, et al. Research on 3GPP based NTN solution and key technologies[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2024(12): 41-47.
- [11] 3GPP. Technical report: study on 3D channel model for LTE (Release 12): 3GPP TR 36.873 V12.2.0[R]. 2015.
- [12] 3GPP. Technical report: study on integrated access and backhaul (IAB): 3GPP TR 38.874 V17.0.0 [R]. 2022.
- [13] 3GPP. Technical report: non-terrestrial networks (NTN) related RF and co-existence aspects: 3GPP TR 38.821 Version i40[R]. 2025.
- [14] 3GPP. Technical report: evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); user equipment (UE) radio transmission and reception: 3GPP TR 36.101 V16.7.0[R]. 2020.
- [15] 3GPP. Technical report: study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: 3GPP TR 38.811 Version f40[R]. 2020.
- [16] ITU-R. Attenuation by atmospheric gases: ITU-R P. 676 FRENCH[S]. 2009.
- [17] 3GPP. Technical specification: base station (BS) conformance testing for NR: 3GPP TS 38.141 V18.1.0 [R]. 2023.
- [18] 3GPP. Technical report: study on NR support for satellite access: 3GPP TR 38.863 V18.1.0 [R]. 2023.
- [19] 3GPP. Technical report: general aspects for user equipment (UE) radio frequency (RF) for NR: 3GPP TR 38.817-01 V15.11.0[R]. 2023.
- [20] 3GPP. Technical report: general aspects for base station (BS) radio frequency (RF) for NR: 3GPP TR 38.817-02 V15.11.0[R]. 2023.

[作者简介]



章凌凡 (1986-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司无线所高级工程师, 主要研究方向为空天地一体化网络、NTN 领域的相关政策、产业、标准和前沿技术等。



姬天相 (1992-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司无线所工程师, 主要研究方向为卫星通信网络规划设计、空天地一体化网络等。



程日涛（1976-），男，中国移动通信集团设计院有限公司总工办无线专业总工程师、正高级工程师，主要研究方向为空地一体化网络总体设计等。



曹天洋（1985-），男，中国移动通信集团设计院有限公司无线所工程师，主要研究方向为NTN前沿技术等。



黄曜明（1982-），男，中国移动通信集团设计院有限公司无线所高级工程师，主要研究方向为空地一体化网络、无线网络规划设计等。



朱立坤（1991-），男，中国移动通信集团设计院无线所工程师，主要研究方向为空地一体化网络规划及NTN前沿技术等。