

Ka频段“动中通”地球站操作技术要求分析

温瑞清¹, 靳 瑾², 黄 振²

(1.北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081;

2.清华大学北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

摘要: 深入研究当前Ka频段FSS GSO“动中通”地球站的操作技术指标, 结合国际电信联盟《无线电规则》和相关技术建议书, 建立各个技术指标的理论分析模型, 分析相关技术指标之间的内在制约逻辑, 和对同频邻星干扰的抑制原理。然后, 按照相同的研究思路, 分析Ka频段NGSO系统“动中通”地球站的工作场景, 研究应用场景差异对技术要求各项指标的影响。该研究成果对未来制定NGSO系统“动中通”地球站的操作技术要求提供一定的参考。

关键词: Ka频段卫星系统; 动中通; 卫星固定业务; 对地静止轨道; 非对地静止轨道

中图分类号: TN972

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021005

Analysis of Technical and Operational Requirements for Earth Stations in Motion in Ka-band

WEN Ruiqing¹, JIN Jin², HUANG Zhen²

1.School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2.Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Current technical and operational requirements for FSS GSO ESIM in Ka-band was in-depth researched. Referring to Radio Regulations and ITU recommendations, a model for theoretical calculation was established and restraining logic between each requirement and theory of depressing interference to adjacent satellites was analyzed. Then working conditions of NGSO ESIM in Ka-band was analyzed using the similar methods and the differences between GSO ESIM and NGSO ESIM and the influences on requirements of NGSO ESIM was illustrated. The results of this article provided some references for setting technical and operational requirements of NGSO ESIM.

Keywords: Ka-band satellite system, earth stations in motion, FSS, GSO, NGSO

1 引言

“动中通”系统指在移动中通过对卫星的准确跟踪保持卫星通信连续不间断的地面站通信系统, 通常包括车载、机载、舰载等多种形式。从技术组成来看, “动中通”主要由自动跟踪系统和卫星通信系统两部分组成。随着宽带卫星移动通信需求的不断发展, “动中通”系统的频率范围也从起初的C频段和Ku频段扩展到了在大容量传输方面更有优势的Ka频段。为了高效合理地利用Ka频段资源, 同时尽量减少对其他系统产生的有

害干扰, 各国及相关机构对Ka频段“动中通”地球站规定了操作和技术要求。参考文献[1]和参考文献[2]分别在该要求的基础上建立不同种类“动中通”地球站与地面上其他业务地球站的干扰链路模型进行评估, 并通过分析得出相关“动中通”地球站在配置时与其他业务地球站的保护距离指标。参考文献[3]在我国工业和信息化部发布“动中通”的地球站指标之前, 通过对国外Ka频段“动中通”的分析, 结合国内情况, 给出了当时对国内“动中通”地球站技术规范的考虑。本文则从指标要求

收稿日期: 2021-01-11; **修回日期:** 2021-03-02

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2020YFB1804800); 自然科学基金(No. 91738101); 上海市市级科技重大专项(No. 2018SHZDZX04)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China(No. 2020YFB1804800), The National Natural Science Foundation of China(No. 91738101), Science and Technology Major Project of Shanghai(No. 2018SHZDZX04)

原理入手,建立卫星业务之间的干扰链路模型,结合国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)《无线电规则》相关内容、国际电信联盟建议书以及我国工业和信息化部规定的Ka频段发射信号的“动中通”地球站操作和技术要求,深入探究对地静止轨道(Geostationary Satellite Orbit, GSO)卫星固定业务(Fixed Satellite Service, FSS)的技术规范,并对该规范在非对地静止轨道(Non-Geostationary Satellite Orbit, NGSO)上的推广提出一些参考性建议。

2 Ka频段FSS GSO“动中通”地球站技术要求及分析

目前,我国工业和信息化部、美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)、欧洲电信标准化协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)等国内外机构,均根据无线电规则和ITU建议书的相关内容,对Ka频段“动中通”地球站的各项技术指标发布了详细的要求。现根据我国2019年工业和信息化部《关于规范对地静止轨道卫星固定业务Ka频段设置使用“动中通”地球站相关事宜的通知》^[4](以下简称工业和信息化部《通知》)的内容,分别对偏轴等效全向辐射功率、低仰角衰减补偿、交叉极化隔离度、地球站天线口径、地球站天线指向误差这几项指标,从干扰规避的角度,建立相关的模型进行理论分析。

2.1 偏轴等效全向辐射功率

2.1.1 技术要求

根据国际电信联盟2016版《无线电规则》^[5]的第五条“频率划分”中的规定,与FSS通信的Ka频段“动中通”地球站的操作须符合2015年世界无线电通信大会(World Radiocommunication Conference, WRC)第156号决议^[6]。该决议的附件1中给出了29.5~30 GHz频段内FSS GSO“动中通”地球站的偏轴等效全向辐射功率(Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP)密度值的規定,在地球站天线与相关卫星偏离2°以上时,在GSO的3°以内任何方向的EIRP密度不得超过表1数值。

该EIRP限值标准不仅被我国采用,美国和欧洲国家地区的限值标准同样沿用了表1的内容,在FCC和ETSI的相关文件中有所体现。总结上述文件内容,中国、美国和欧洲地区的限值标准见表2。换算和对比后发现欧洲的限值标准与表1的内容及条件相符合,美国的限值仅严格了0.48 dB/Hz,与表1限值基本符合。

实际上,表1的限值标准在2000年修订的ITU-R建议书S.524中就已经出现,并一直沿用到2006年最新修订的

表1 29.5~30.0 GHz频段内FSS GSO“动中通”地球站的偏轴EIRP密度限值^{注1}

角 θ ^{注2}	每40 kHz的最大EIRP
$2^\circ \leq \theta \leq 7^\circ$	$(19-25 \log \theta)$ dB(W/40 kHz)
$7^\circ < \theta \leq 9.2^\circ$	-2 dB(W/40 kHz)
$9.2^\circ < \theta \leq 48^\circ$	$(22-25 \log \theta)$ dB(W/40 kHz)
$48^\circ < \theta \leq 180^\circ$	-10 dB(W/40 kHz)

注1:这些限值是在晴空条件下得到的,同时声明了如果网络采用了上行链路功率控制,那么这些值应该包括上行链路功率控制产生的余量;同时该限值针对同一40 kHz频段内仅一个相关频率的“动中通”系统,若同一频率还存在其他同步发射的并采用码分多址的FSS GSO系统,那么需要在这个限值的基础上减小 $10 \log(N)$ dB, N 为同频同步发射的相关卫星接受波束内“动中通”地球站的数量。

注2:表1和表2中的 θ 指和地球站天线焦点与目标卫星连线所成的夹角,中国和美国离轴角采用该定义。

表2 各国规定的Ka频段“动中通”地球站偏轴EIRP密度限值

国家	单位	偏轴角 θ 或 ψ ^{注1}	EIRP密度限值	
			同极化	交叉极化
中国	dB(W/40 kHz)	$2^\circ \leq \theta \leq 7^\circ$	$19-25 \log \theta$	$9-25 \log \theta$
		$7^\circ < \theta \leq 9.2^\circ$	-2	-12
		$9.2^\circ < \theta \leq 48^\circ$	$22-25 \log \theta$	-
		$48^\circ < \theta \leq 180^\circ$	-10	-
美国(GSO弧切线方向)	dB(W/MHz)	$2^\circ \leq \theta \leq 7^\circ$	$32.5-25 \log \theta$	$22.5-25 \log \theta$
		$7^\circ < \theta \leq 9.2^\circ$	11.5	-
		$9.2^\circ < \theta \leq 19.1^\circ$	$35.5-25 \log \theta$	-
		$19.1^\circ < \theta \leq 180^\circ$	3.5	-
美国(GSO弧正交方向)	dB(W/MHz)	$2^\circ \leq \theta \leq 7^\circ$	$35.5-25 \log \theta$	$22.5-25 \log \theta$
		$7^\circ < \theta \leq 9.2^\circ$	14.4	-
		$9.2^\circ < \theta \leq 19.1^\circ$	$38.5-25 \log \theta$	-
		$19.1^\circ < \theta \leq 180^\circ$	6.5	-
欧洲	dB(W/40 kHz)	$2^\circ \leq \psi \leq 7^\circ$	$19-25 \log \psi - K^{[12]}$	$9-25 \log \psi - K$
		$7^\circ < \psi \leq 9.2^\circ$	$-2-K$	$-12-K$
		$9.2^\circ < \psi \leq 48^\circ$	$22-25 \log \psi - K$	-
		$48^\circ < \psi \leq 180^\circ$	$-10-K$	-

注1: ψ 指与天线主轴所成的夹角,欧洲地区离轴角采用该定义。

注2: K 值的界定与表1中的注1原理类似:

- (1)任何时间仅有一个“动中通”地球站在给定载波频率上传输时, $K=0$;
- (2)多个“动中通”地球站在给定载波频率上以相同EIRP传输时, $K=10 \log(N)$, N 为同时传输的“动中通”地球站数目;
- (3)多个“动中通”地球站在给定载波频率上以不同EIRP传输时, $K=10 \log(EIRP_{\text{avg}}/EIRP_{\text{lim}})$, 其中 $EIRP_{\text{avg}}$ 为集总EIRP值,由申请人声明, $EIRP_{\text{lim}}$ 为指定频段工作的“动中通”地球站轴上EIRP。

S.524建议书^[7]中。建议书S.524中关于29.5~30 GHz频段的EIRP密度指标的建议没有详细的理论依据,但是使用了统计学方法支持该限值的合理性。在宽带“动中通”地球站的需求还没有增加时,其限值更多情况下更加针对固定位置地球站;对于使用移动地球站(Earth Stations On Mobile Platforms, ESOMP)的FSS系统是否适用的问题,在ITU报告书S.2223^[8]中进行了相关的论证。ITU-R

报告书S.2223给出了一个具有参考意义的研究。该研究对比了相近的口径天线在固定地球站和移动地球站上配置时，测量出的偏轴性能，最终得出结论：当依照现有标准部署天线时，口径相近的天线部署在不同种类地球站时的偏轴性能也是相似的。参照该结论，在分析“动中通”地球站技术指标的建模过程中，可以一定程度上忽略“动中通”地球站的移动所造成的影响，使“动中通”地球站可以参照其他典型地球站制定其指标。

2.1.2 理论分析

为了从理论层面上得到接近建议书S.524中的限值，本文沿用建议书S.524中的一些假定条件，对GSO FSS干扰链路进行建模和计算，以避免对邻星的同频干扰为目标，得到一套EIRP密度限值，再与建议书的限值做对比。干扰链路模型如图1所示。

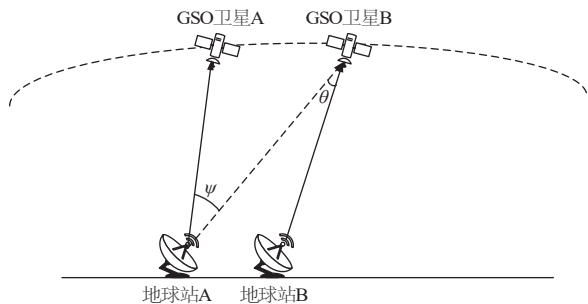


图1 GSO FSS上行干扰链路模型（系统A→系统B）

在该模型中计算系统B受到系统A的上行链路干扰，图1中实线代表地球站的视轴方向（卫星天线主瓣与地球站天线主瓣均在视轴上），虚线代表系统A对系统B的上行链路干扰。表3列出了一些该模型的假设条件，以达到最大干扰的情况。

表3 GSO FSS干扰链路预算假设条件

假设对象	假设值
两系统极化方式	同极化工作
受扰卫星视轴与干扰地球站夹角 θ	0°（地球站A与地球站B重合）
干扰地球站视轴到被干扰卫星夹角 ψ	2°
两地球站到受扰卫星的仰角	20°
受扰卫星接收端天线效率 η	70%
受扰卫星接收端等效噪声温度 T	800 K
受扰卫星接收端品质因数 G/T	12.4 dB/K
收发端馈线和晴天大气损耗 $L_{f,atmos}$	5 dB
接收端干扰噪声比 $(I/N)_b$	-12.2 dB
载波频率	29.5 ~ 30 GHz
参考带宽B	40 kHz

其中，受扰卫星接收端等效噪声温度 T 沿用了建议书S.524利用数据库计算EIRP密度时的假定，接收端干扰噪声比 I/N 的标准则是按照ITU建议书S.1323^[9]对GSO FSS系统的同频干扰的限值。下面在参考带宽内对干扰进行计算以反推出EIRP密度限值。

干扰地球站A对被干扰卫星B的干扰计算

$$I=EIRP_A(\psi)+G_{dB}(\theta)-L_{fs}-L_{f,r,atmos}$$
 (1)

依照 I/N 的标准，得到干扰可以允许的最大值为

$$I_{th}=(I/N)_{th}+N=(I/N)_{th}+10\log(kTB)$$
 (2)

将式(2)的限值以及表3中的假设条件代入式(1)即可得到40 kHz带宽条件下，地球站偏轴2°方向上的EIRP最大值

$$EIRP_{th}(2^{\circ})=(I/N)_{th}-(G/T)_B+L_{fs}+L_{f,r,atmos}+10\log(kB)$$
 (3)

ITU建议书S.465给出了可供干扰评估的GSO FSS地球站天线参考辐射方向图，在该建议书和其他可供参考的建议书中给出的天线方向图均在偏轴处呈现 $E-25\log\psi$ （ E 为某常数）的递减规律。因此只需要算出偏轴2°处的EIRP限值，再根据递减规律即可得到全角度的偏轴EIRP限值，但是在 $48^{\circ}\leq\psi\leq180^{\circ}$ 处的限值上，参照建议书S.524的内容，考虑到溢出效应，另外规定为-10 dB(W/40 kHz)。依照上述合理假设和链路预算反推的结果可以得到推算出的EIRP密度，并与ITU建议书S.524中的限值做对比，如图2所示。

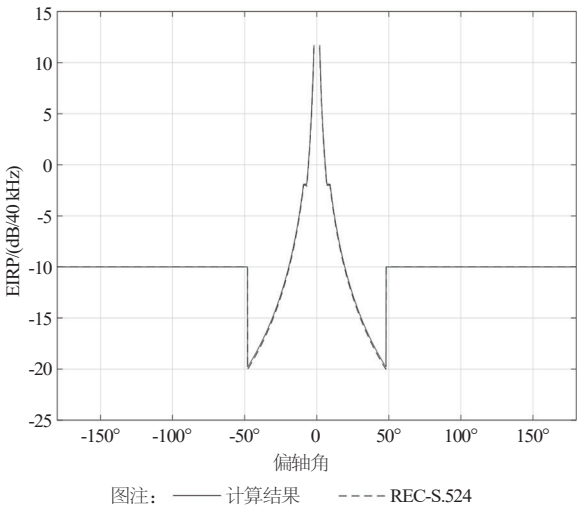


图2 计算得到的EIRP密度限值与建议书中EIRP密度限值对比

通过对比可以发现，以避免对其他FSS GSO系统的同频干扰为目标，按照表3假设计算出的限值与ITU建议书S.524中规定的限值几乎一样。需要注意的是，表3假设的情况没有考虑其他余量，这与ITU建议书S.524中限值的假设情况是相符的。由以上结果可以做出合理推测：ITU建议书S.524中对29.5 ~ 30 GHz频段FSS地球站的EIRP

密度的限值规定是基于避免对其他FSS系统产生同频干扰的前提得到的。这将对其他FSS“动中通”系统制定EIRP密度限值具有参考意义。

2.2 低仰角衰减补偿

2.2.1 技术要求

WRC-15第156号决议和工业和信息化部通知中,在规范了“动中通”地球站偏轴EIRP密度限值的同时,均对于低仰角的情况做出了特殊规定,具体见表4。

表4 低仰角情况下EIRP密度限值的增加

指向GSO的仰角 ϵ	EIRP频谱密度的增加/dB
$\epsilon \leq 5^\circ$	2.5
$5^\circ < \epsilon \leq 30^\circ$	$3 - 0.1\epsilon$

该指标考虑到了距离增加和大气吸收的共同影响,是为了保证低仰角条件下的“动中通”地球站到GSO上的载波功率和高仰角条件下“动中通”地球站到GSO上的载波功率相同,以在GSO获得相同的功率通量密度。同样地,在ITU建议书S.524中也出现了该指标,但并未给出具体的推算过程,现从该指标的出发点考虑,以补偿高低仰角损耗为目标计算低仰角下对EIRP密度的补偿值并与建议书中的规定做对比。

2.2.2 理论分析

从地球站到GSO上,不同仰角的地球站有大气吸收损耗和自由空间损耗两种损耗的增加,均是由于高低仰角下从地球站到达GSO的路径长度不同而导致的损耗的变化,只需要计算得到低仰角情况比90°仰角情况多出的损耗,并给予对应的补偿即可。高低仰角下从地球站到GSO的路径如图3所示。

从图3中可以看到,低仰角地球站到GSO的路径在大气和自由空间中的传输距离均比高仰角地球站的长,故大气吸收损耗和自由空间损耗均有所增加。自由空间损耗计算式如下

$$L_k = 92.44 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (4)$$

其中, d 为从地球站到GSO的传播距离,单位为km; f 为载波频率,单位为GHz。由式(4)很容易就可以得到自由空间上产生的损耗差。下面计算大气吸收损耗。

为了精确计算大气吸收损耗值,需要进一步讨论电波在大气中的传输情况。大气分层中,从90 km高度左右的中间层顶往上,空气处于高度电离的状态,大气密度很小,水汽含量极少,大气吸收损耗可以忽略不计。本文参照ITU建议书P.835^[10]中给出的全球年平均参考大气数据,考虑到不同高度上大气密度的不均匀,逐线计算

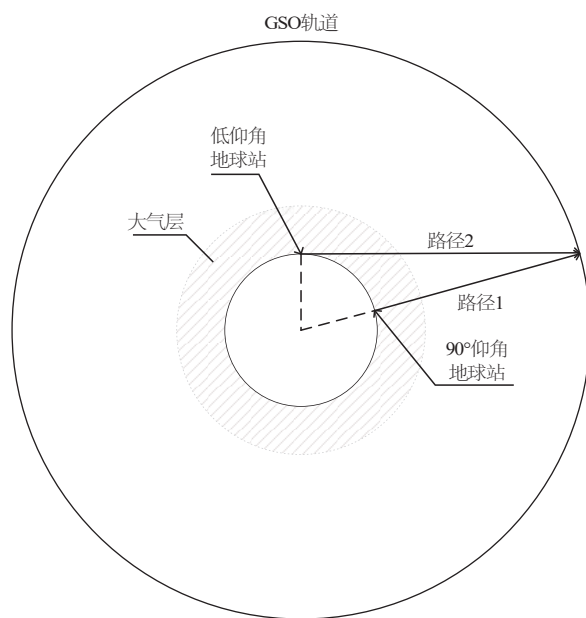


图3 高低仰角下地球站到GSO路径示意
(说明图中未体现大气折射)

发生大气折射的0~100 km范围内大气吸收损耗。考虑大气折射后的传播路径如图4所示。

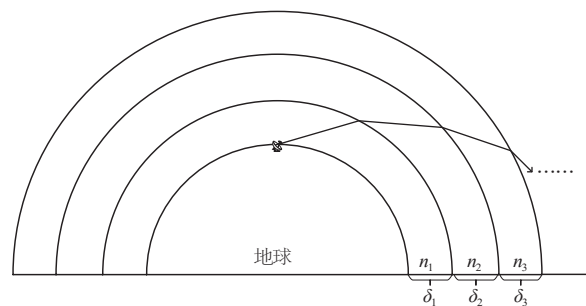


图4 考虑大气折射后的传播路径

利用ITU建议书P.453^[12]给出的精确的大气无线电折射率公式如下

$$n = 1 + \left(\frac{77.6P_d}{T} + \frac{72e}{T} + \frac{3.75 \times 10^5 e}{T^2} \right) \times 10^{-6} \quad (5)$$

其中, P_d 为干燥大气压力(单位为hPa), e 为水蒸气压力(单位为hPa), T 为绝对温度(K)。这些参量都是高度的函数,参考ITU建议书P.835的内容代入即可得到 n 在不同高度下的数值。

由几何关系,假设地球站海拔为0时,不同高度下的视在仰角的余弦值如下

$$\cos \varphi(h) = \frac{R_e n(0)}{(R_e + h)n(h)} \cos \varphi_0 \quad (6)$$

其中, R_e 为地球半径, h 为对地高度, φ_0 为地球站发射电波的视在仰角。由式(5)、式(6)可以计算出0~100 km大气吸收衰减

$$L_{\text{atmos}} = \int_0^{100} \frac{\gamma(h)}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi(h)}} dh \quad (7)$$

气体比衰减(单位: dB/km)采用ITU建议书P.676附件1^[11]中给出的计算式

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820 f(N''_{\text{Oxygen}}(f, h) + N''_{\text{WaterVapour}}(f, h)) \quad (8)$$

其中, γ_o 和 γ_w 分别为干空气和水汽条件下的比衰减(单位为dB/km), N''_{Oxygen} 和 $N''_{\text{WaterVapour}}$ 则为氧气和水蒸气复折射率的虚部, 根据ITU建议书P.676中给出的氧气和水蒸气的谱线数据, 得到不同高度下二者的复折射率值。其中需要用到的大气温度和压力分布值采用ITU建议书P.835给出的全球年平均参考大气数据, 在此条件下计算得到不同高度下比衰减的值。

为便于MATLAB运算, 将积分转化为分段求和的形式

$$L_{\text{atmos}} = \sum_i \frac{\gamma(h)}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi(h)}} \delta_i \quad (9)$$

采用ITU建议书P.676中给出的修正以更加精确地进行求和估算, 每层的厚度和底部高度分别如下

$$\delta_i = 0.0001 e^{\frac{i-1}{100}} \quad (10)$$

$$h_i = 0.0001 \frac{e^{\frac{i-1}{100}} - 1}{\frac{1}{e^{100}} - 1} \quad (11)$$

由此, 将从 $i=1$ 的层损耗求和至 $i=922$, 可以计算出不同路径的0~100 km高度大气吸收损耗 L_{atmos} 。

经计算得到不同仰角下的地球站与90°仰角地球站损耗差以及按照3~0.1ε的规律将0~30°仰角地球站进行补偿后的低仰角与高仰角损耗差如图5所示。

由图5可以看到, 在依照建议书等文件中针对FSS GSO地球站在29.5~30 GHz频段低仰角补偿的规定进行补偿后, 5~30°范围内的损耗差均被控制在1 dB以内。需要注意的两点。一是, 图5的曲线是在取全球年平均参考大气的相关数据后计算得到的, 根据地区不同及季节不同, 该曲线会存在波动, 故严格按照实际曲线进行补偿是无法实现的; 图5中可以看到按照建议书内容进行补偿后高低仰角的损耗差均小于1 dB, 所以采用3~0.1ε的补偿规律在满足要求的前提下, 不会对GSO同频上行链路协调造成大的影响。二是, 在地球站仰角小于5°后, 大气吸收损耗将会急剧增加, 此时补偿难以弥补损耗增加, 这是由于低仰角情况下大气折射导致的路径弯曲严重, 导致大气吸收损耗迅速增加, “动中通”地球站应尽量避免在5°以下的仰角工作。根据《无线电规则》第六章第21.15款对于

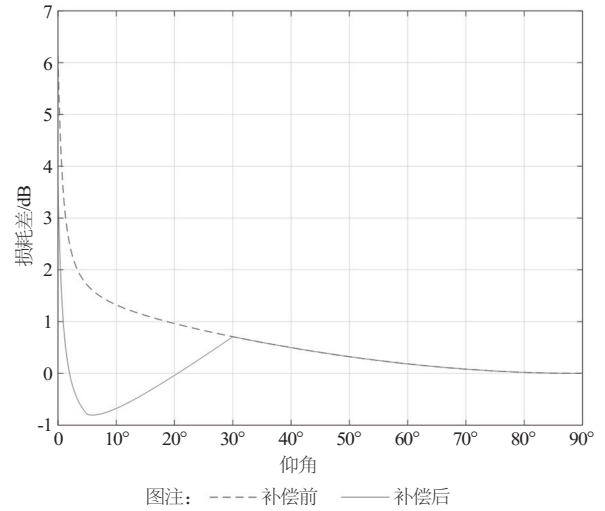


图5 应用低仰角限值增加策略前后低仰角地球站与高仰角地球站路径损耗差

地球站最小仰角的规定, 典型的GSO FSS“动中通”地球站正常工作时仰角应不小于10°。

2.3 交叉极化隔离度

2.3.1 技术要求

理论上, 两个正交极化波是完全隔离的, 但实际信号的极化会由于收发设备误差、传播过程中的去极化作用等原因导致主极化信号在交叉极化方向上存在泄漏, 从而引入交叉极化损耗。衡量交叉极化优劣的指标为交叉极化隔离度(Cross-Polarization Isolation, XPI)

$$XPI = 10 \log \frac{P_{Co}}{P_X} \quad (12)$$

其中, P_{Co} 为信号在主极化方向上的功率, P_X 为该信号在正交极化方向上的功率。与XPI对应的另一个能够体现交叉极化泄漏对本系统影响的指标称为交叉极化鉴别度(Cross-Polarization Discrimination, XPD)

$$XPD = 10 \log \frac{P_{Co1}}{P_{X2}} \quad (13)$$

其中, P_{Co1} 为本系统信号在主极化方向上的功率, P_{X2} 为干扰信号的正交分量在本系统信号主极化方向上的功率。

在工业和信息化部通知的附件中, 提出了交叉极化隔离度的有关要求: 除机载“动中通”地球站外, 其他类型的“动中通”地球站工作时天线的交叉极化隔离度应始终大于20 dB。现就此规定进行理论分析。

2.3.2 理论分析

该指标的制定主要针对利用双极化工作进行频率复用的系统, 为了便于分析, 假定干扰系统和被干扰系统

除了极化方式,其余的工作状态是完全一致的,此时针对二者中的任意一个系统进行干扰分析即可。在此假定前提下,本系统在正交极化方向上的功率分量,与干扰系统在本系统主极化方向上的功率分量相同,即式(12)和式(13)中的 P_x 与 P_{x2} 相等,有

$$\text{XPD}=\text{XPI} \quad (14)$$

ITU建议书P.619^[13]中给出了由极化不匹配导致的同极化损耗计算式

$$A_c=10\log(1+10^{-0.1\text{XPD}}) \quad (15)$$

由式(15)得到的同极化损耗随XPD的变化规律如图6所示。

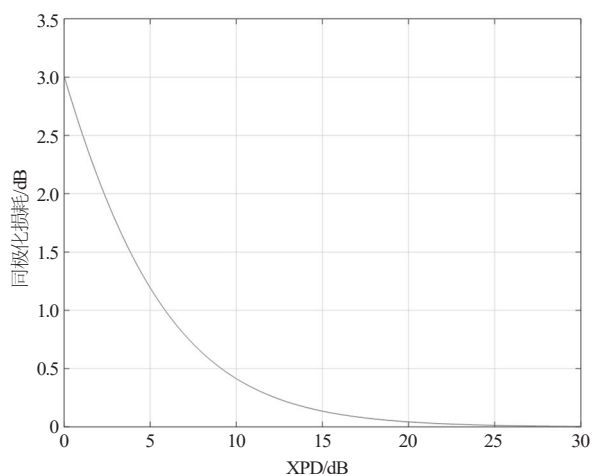


图6 同极化损耗随XPD的变化规律

从图6中可以看到,当XPD为20 dB时,同极化损耗几乎为0,由式(14)又得知此时XPI也为20 dB,即XPI应在20 dB以上来最大程度减少同极化损耗。此结论对在双极化方式下工作的任何一对设备相同的频率复用系统都具有参考意义。对于“动中通”地球站,该指标也是合理的。

2.4 地球站天线口径

2.4.1 技术要求

在《无线电规则》和相关的ITU建议书中,均没有对Ka频段GSO FSS地球站的天线口径进行强制的规定,工业和信息化部通知的附件则规定所使用的抛物面天线口径或非抛物面天线电性能等效口径均不得小于0.45 m。

2.4.2 理论分析

天线口径 D 对波束的主要影响为天线增益 G 和主瓣及第一旁瓣宽度,天线增益通常指最大辐射方向上信号功率增加的倍数,主瓣宽度和第一旁瓣宽度以《无线电规则》附录8附件3给出的地球站天线参考辐射图。它们与天线口径 D 的关系如下

$$G=\eta\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (16)$$

$$\phi_m=\frac{20\lambda}{D}\sqrt{G-G_1} \quad (17)$$

$$\phi_r=15.85\left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0.6} \quad (18)$$

$$G_1=2+15\log\frac{D}{\lambda} \quad (19)$$

其中, η 为天线效率, λ 为波长, G_1 为第一旁瓣增益, ϕ_m 和 ϕ_r 为主瓣宽度的一半和第一旁瓣宽度的一半。

由式(16)可以看出天线口径 D 与天线增益 G 成正比,但是天线口径不是决定发射功率的唯一要素,天线输入端的信号功率与天线增益共同决定了地球站发射端的EIRP

$$\text{EIRP}=G\times P \quad (20)$$

故限制地球站天线尺寸的出发点不在控制信号功率上。从式(17)的角度分析,天线口径 D 直接影响了主瓣宽度,而控制主瓣宽度的目的在于防止主瓣覆盖到邻星从而造成同频干扰,所以限制地球站天线尺寸的目的是规避干扰。现对GSO FSS系统邻星干扰的几何模型进行建模并推算出一个合理的天线口径 D 指标与工业和信息化部指标进行对比。

目前大多数GSO上,相邻的同频同覆盖范围的卫星之间的地心间隔角一般不会小于 2° 。以地心为原点建立球坐标系,两个轨道间隔角 2° 的同频GSO卫星,在其所有的同覆盖范围内可能出现的“动中通”地球站。对这两个卫星的顶心角的分布如图7所示。

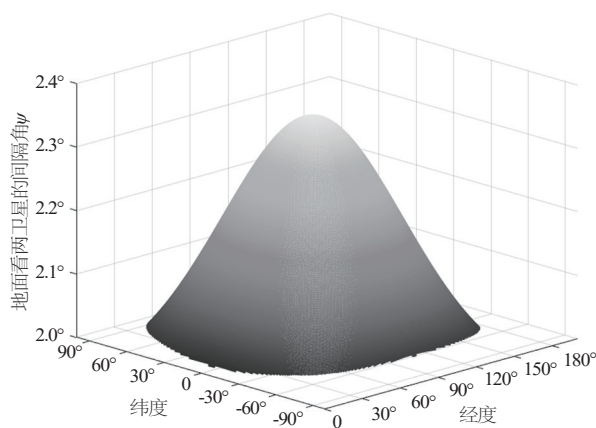


图7 两相邻卫星同覆盖范围内地面顶心角分布

从图7的间隔角分布得到:从地面上看,GSO上两相邻卫星的顶心角 ψ 最小仍大于 2° 。经计算,最小的顶心角 $\psi_{\min}=2.0054^\circ$ 。 2° 以外的方向上有EIRP密度限值的规定来保证不会对邻星造成干扰,而 2° 以内的区域主要为天线

的主波束。若主瓣部分覆盖到邻星则干扰会超出6%的门限值，为避免这种情况的发生，需要控制天线口径从而改变主瓣的宽度。式（17）可以得到主瓣宽度与天线口径的关系，考虑到“动中通”天线存在指向误差，而大多数GSO FSS“动中通”系统的跟踪误差均能控制在 0.2° 以内，故加入 0.2° 的指向误差在此基础上得到主瓣范围，如图8所示。

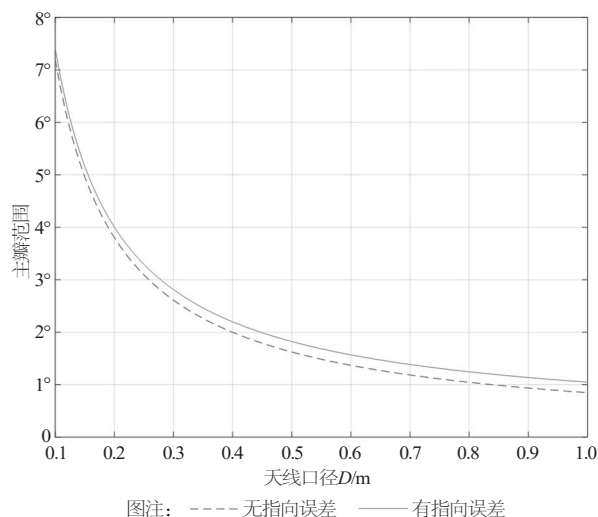


图8 主瓣范围与天线口径的关系

从图8中可以看出，在考虑天线的指向误差之后，主瓣最大范围为 2° 时对应的天线口径为 0.45 m 。这与工业和信息化部通知中对“动中通”地球站的天线口径要求一致，该指标是合理且必要的。

2.5 地球站天线指向误差

2.5.1 技术要求

“动中通”地球站与静中通地球站都需要天线具有对目标卫星的跟踪功能，并且要避免对同频段工作的相邻卫星的干扰，这就要求跟踪系统要有一定的精度。对于广泛应用的甚小口径卫星终端站（Very Small Aperture Terminal, VSAT）通信系统，其天线一般被安装在固定的基座上。随着时间的推移，天线和基座会由于气候和地理因素不断地产生积累误差，在很小的积累误差下，VSAT仍会保持工作而不调整，但一般的业界惯例是若VSAT的指向误差积累到一定程度时，专门的工作人员会对该站点的天线指向重新进行矫正。对于ESOMP通信系统，与一般的VSAT不同，由于天线一般安装在汽车、飞机、轮船等移动平台上，故需要根据移动平台的姿态和地理位置持续调整天线指向，以保证指向精度。在WRC-15第156号决议和其他ITU相关文件中并未对“动

中通”地球站的天线指向精度进行规定；在工业和信息化部《通知》中则规定了“动中通”地球站指向目标卫星天线主瓣轴的指向误差应小于 0.2° ，一旦指向误差大于 0.5° 则 100 ms 内停止发射，直到误差恢复至小于 0.2° 时才可继续发射。ITU报告书S.2223也对相同的指标进行了论证，结合S.2223的研究内容，从避免干扰的角度对该指标进行分析。

2.5.2 理论分析

为了仿真该指标对控制指向误差的作用，首先需要得到指向误差的分布，ITU建议书S.1857说明了运动导致的指向误差具有长尾特性，概率密度函数不会因为指向误差数值的加大而快速衰变，高斯分布符合这一特征。为了体现指向误差的统计学特征，以高斯分布模拟指向误差大小的分布，考虑到目前为止的大多数天线跟踪系统可以将指向误差控制在 0.2° 以内，将指向误差的分布指定为均值为0，标准差为0.2的高斯分布。根据指向误差的方向特性将误差角分为方位角误差和仰角误差两个分量，通过小角度近似，得到误差角和这两个分量的关系。小角度下的几何关系如图9所示。

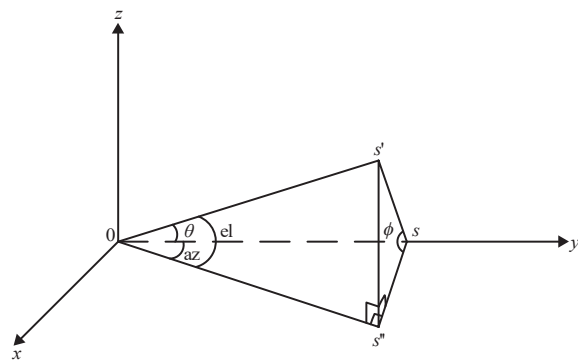


图9 误差角和方位角仰角分量几何关系（小角度近似）

其中， θ 为误差角，服从均值为0，标准差为0.2的高斯分布， az 为误差角的方位角分量， el 为误差角的仰角分量。 OS 为没有误差时天线的预期指向矢量， OS' 为天线的实际指向矢量。令 OS 为单位矢量，有下列关系成立：

$$|OS| = |OS'| = |OS''| = 1 \quad (21)$$

目前大多数天线跟踪系统可以将指向误差控制在 0.2° 以内，在这种小角度条件下有

$$SS' = 2 \sin \frac{\theta}{2} \approx 2 \times \frac{\theta}{2} = \theta \quad (22)$$

$$SS'' = 2 \sin \frac{el}{2} \approx 2 \times \frac{el}{2} = el \quad (23)$$

$$SS'' = 2 \sin \frac{az}{2} \approx 2 \times \frac{az}{2} = az \quad (24)$$

$$\angle OS'S' = \frac{180^\circ - el}{2} \approx 90^\circ \quad (25)$$

$$\angle OS'S = \frac{180^\circ - az}{2} \approx 90^\circ \quad (26)$$

由式(25)、式(26)，结合立体几何定理，可以得到
 $\angle SS'S' \approx 90^\circ$ (27)

于是在三角形 $SS'S'$ 中下列关系成立

$$az = \theta \times \cos \phi \quad (28)$$

$$el = \theta \times \sin \phi \quad (29)$$

在中高纬度地区，方位角误差分量为主要误差分量，同时GSO上邻星的间隔角对于地球站的天线主要体现在从地球站天线到两卫星方位角的间隔上，故以方位角的误差代表地球站的指向误差；并采取ITU报告书S.2223和工业和信息化部《通知》中规定对大于 0.5° 的指向误差的情况停止传输的措施。仿真所得的方位误差角分布如图10所示。

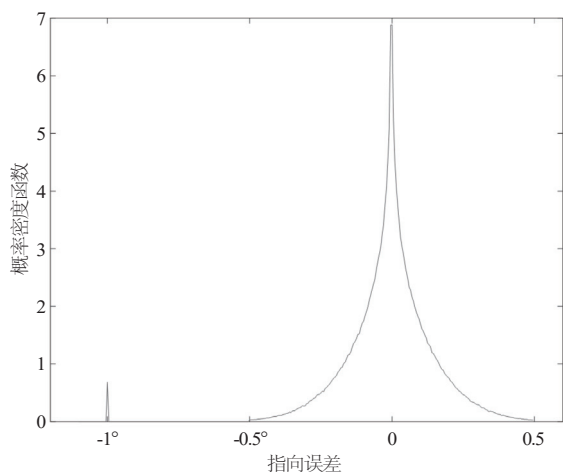


图10 方位角指向误差

图10中，为了方便统计，采取和ITU报告书S.2223相同的方法，方位角指向误差绝对值大于 0.5° 时，在统计过程中统一归到 -1° 的区域内，在图10中表现为 -1° 的一个冲激。由该冲激的积分值，计算得到该指标下仅有0.34%的时间内会出现停止传输的情况，在指向误差绝对值小于 0.5° 的范围内计算该指向误差导致的偏轴增益变化。考虑到用于FSS地球站参考辐射方向图在近主瓣区域均表现出 $E-25\log\phi$ 的特征，所以由指向误差角换算成增益变化值的计算式如下

$$\Delta G = (E - 25\log\phi) - (E - 25\log(\phi + \theta)) = 25\log(\phi + \theta) - 25\log\phi \quad (30)$$

其中， ϕ 为偏轴角，对于该仿真取天线口径为0.5 m，此时 $E-25\log\phi$ 的方向图特征在 ϕ 至少大于 2° 的情况下成立，

θ 为指向误差，服从图10中 $\pm 0.5^\circ$ 范围内的分布。代入偏轴角为 2.5° 的情况，得到的增益变化概率密度函数如图11所示。

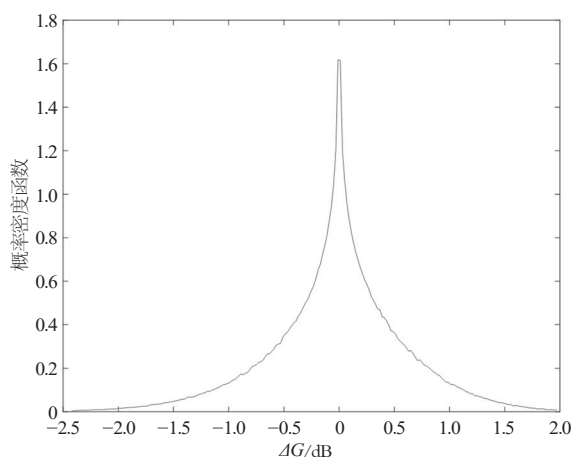


图11 指向误差导致的偏轴 2.5° 处增益变化概率密度函数

对于地球站天线基座固定的GSO FSS系统，忽略气候地理变化导致的误差，图12还可以理解为，由于“动中通”天线的指向误差导致的GSO FSS“动中通”地球站相对于静中通地球站近主瓣区域内增益的变化分布， ΔG 的正负表示其对不同侧邻星的偏轴增益增加量。根据该分布估计出近主瓣处增益变化不大于1 dB的概率为88.9%，不大于2 dB的概率为99.3%，增益变换量最大为2.42 dB。由上述结果得到以下结论，在应用了工业和信息化部《通知》中关于指向误差的指标后，相对于固定地球站，“动中通”地球站对邻星潜在干扰的增加大概率不会高于1 dB，几乎不会高于2 dB，一定不会高于2.5 dB，没有在邻星干扰上产生大的威胁。该结论对于指向误差以方位角为主的，天线方向图具有 $E-25\log\phi$ 特征的所有地球站均有参考意义。

3 对Ka频段NGSO“动中通”地球站技术要求的思考

近年来，NGSO卫星系统成为卫星通信发展热点。目前的“动中通”地球站操作技术要求都是针对GSO FSS系统制定的，针对NGSO“动中通”系统，有必要制定与GSO FSS系统类似的一系列指标。类比上文分析的针对GSO FSS“动中通”地球站的相关技术要求，现对NGSO“动中通”地球站的部分指标做出具有参考价值的分析。

3.1 偏轴等效全向辐射功率

对于GSO FSS系统，不同系统对应的卫星均在同步

轨道上运行,在Ka频段根据给定的干扰标准制定一套固定的EIRP密度限值,即可适用于所有在该频段工作的GSO FSS系统。而在NGSO系统的干扰问题中,每个NGSO系统具有不同的星座构型,与其同频同向工作的其他NGSO卫星可能分布在目标卫星任何方位的任何高度上,故NGSO“动中通”在规避邻星干扰的问题上比GSO“动中通”更加复杂。另外,NGSO“动中通”地球站除了要规避邻星干扰,更重要的是,要避免对同频同向上的GSO FSS系统造成严重干扰。综合以上因素,最终制定的EIRP密度限值需要满足:避免对其他同频NGSO系统可能产生的干扰;避免对GSO卫星的干扰。

3.2 低仰角衰减补偿

对于NGSO系统,与GSO系统相同,其地球站均会出现低仰角传输的情况,将图3模型的轨道稍做修改,即可得到针对不同高度的NGSO轨道的低仰角与高仰角地球站由路径不同导致的损耗差,如图12所示。

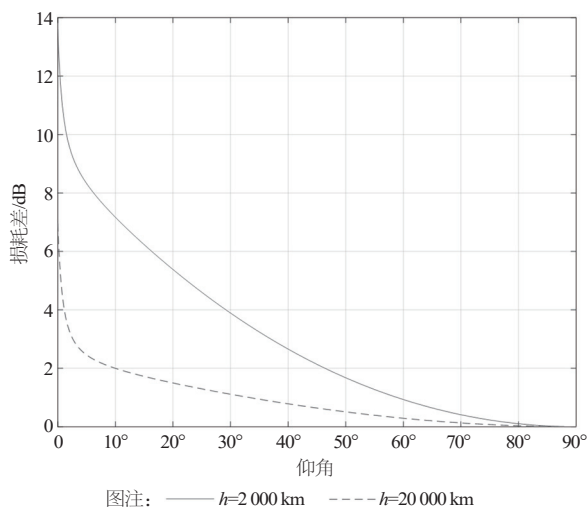


图12 不同轨道高度下高低仰角地球站的路径损耗差

可以发现,轨道高度越低的系统,其低仰角条件下相对90°仰角的路径损耗就会越大,同时损耗随仰角的变化率也会越大。这主要是由于在低轨道高度情况下,低仰角相对高仰角自由空间损耗差增大的缘故。据此,若对不同轨道高度下的NGSO系统低仰角地球站的上行路径进行限值放宽,则应当根据不同的轨道高度制定不同的规则。同时对于低轨道高度的地球站,应尽量避免在过低的仰角下工作。

3.3 地球站天线口径和指向误差

在分析GSO FSS系统天线口径指标时,主要目标是

在误差范围内,地球站天线的主瓣不会指向邻星。对于NGSO系统,由于星地距离短,使用小口径天线是发展趋势。考虑到两个不同NGSO系统的星座内的两个同频同向卫星间隔角情况复杂,选取OneWeb系统和GW-1系统两个典型NGSO星座统计两周时间某中纬度地球站同时指向两个系统卫星的视线夹角,其累计分布函数如图13所示。

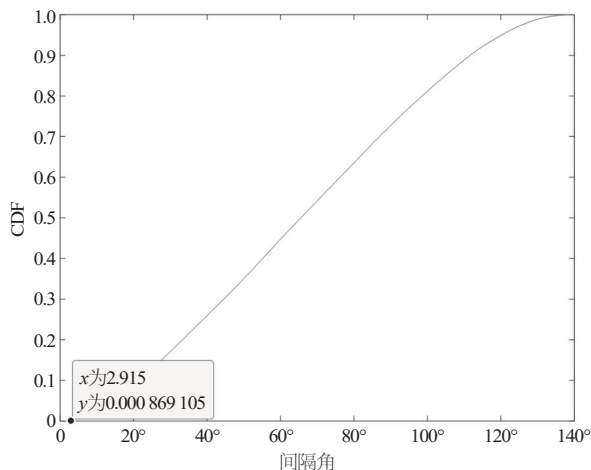


图13 某中纬度地球站对两星座内卫星夹角累积分布函数

若对此系统采用ITU建议书S.1324^[14]中0.87%的时间容限标准,再采用ITU建议书S.1323的内容,对该仿真情景下超出限值的干扰的持续时间不得超出10%的容限时间,即对于该系统0.087%的时间百分比允许超出6%总噪声容限标准。从图14中可以计算出间隔角大约在2.915°以内时所占的时间百分比为0.087%,即主瓣范围不得超出2.915°。结合图8,考虑指向误差后天线口径应不小于0.3 m。需要注意的是,由于Walker星座的分布特性,随着纬度的上升,地面上空的卫星分布相对更密集,由此得到的天线口径指标也会不同,通过仿真得到低纬度地区运行的地球站天线口径指标不小于0.2 m即可;而对高纬度地区的地球站则更严格,甚至出现需要天线口径大于1 m才能满足规避干扰的结果。同时,不同系统星座间干扰情况也不尽相同,故实际“动中通”系统的天线口径还应根据情况做出限制。

3.4 交叉极化隔离度

在2.3节关于交叉极化隔离度的分析中,交叉极化隔离度的要求是根据频率复用的工作特点得到的,该结论对任何系统具有普适性。故对于NGSO“动中通”系统,若使用频率复用,仍然可以采用相同的交叉隔离度指标。

3.5 保护GSO的传输策略

在NGSO系统对GSO的保护上, 3.1节指出了针对单条干扰链路需要进行功率限值以避免干扰, 而《无线电规则》第六章条款22.5D中, 从等效功率通量密度(Equivalent Power Flux Density, EPFD)的角度也限制了NGSO FSS系统对GSO的干扰, 其规定了一个NGSO FSS系统的所有地球站在GSO任何点处产生的EPFD在给定的百分比时间内不得超出给定的限值, 对于29.5~30 GHz频段的要求为: 40 kHz参考带宽内, 在100%的时间内EPFD不得超过 $-162 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 。但是, 在“动中通”地球站与NGSO星座上的卫星建立通信链路的过程中, 不可避免地会出现某个时刻地球站天线的主瓣指向很接近GSO轨道的情况, 从而可能导致对同频GSO卫星的EPFD超出限值。这是需要极力避免的情况, 所以与NGSO卫星通信的“动中通”地球站应当具备在天线视轴与GSO轨道夹角小到某限值时及时停止传输的功能, 以避免对GSO卫星的潜在干扰。

3.6 保护地面系统的传输策略

NGSO“动中通”系统的上行链路会对地面系统的基站产生干扰, 为了保护地面基站, 需要对地球站的最低工作仰角和与地面系统的距离进行一定的限制。参考文献[2]提供了一种评估GSO FSS“动中通”地球站上行链路对地面同邻频业务干扰的方法, 对干扰链路进行建模和预算; 如果仿真结果显示可能产生严重干扰, 则应用上行链路功率控制算法, 尽量降低“动中通”的旁瓣功率辐射; 并以海上“动中通”为例进行仿真, 得出了合理的保护距离。该思路也可以应用到对NGSO“动中通”系统的评估和优化中, 建立如图14所示的干扰模型。

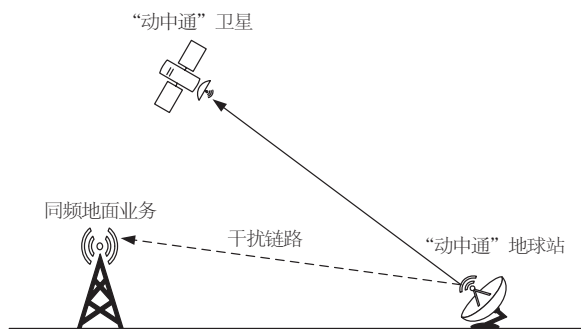


图14 “动中通”对地面业务的干扰模型

最差干扰情况下只考虑“动中通”地球站仰角的变化, “动中通”地球站、卫星与地面站几何上共面, 地面站天线的主瓣指向“动中通”地球站。针对不同最

低仰角限制, 可以计算出不同的保护距离指标。若由于“动中通”的分布限制了保护距离不能过大, 则对具体的系统应用上行链路功率控制算法, 有利于进一步缩小保护距离。

参考文献:

- [1] MENANOR S K, MWANGI E, KAMUCHA G. Assessment of the interference effects from land earth stations in motion to fixed service stations[C]//2019 IEEE AFRICON. Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [2] AHIAGBE E E, TETTEY D K, JO H S. Methods to evaluate and mitigate the interference from maritime ESIM to other services in 27.5-29.5 GHz band[C]//2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2018.
- [3] 张晓燕, 杨夏青, 武秀广. Ka频段“动中通”地球站频率使用技术规范研究[J]. 中国无线电, 2018(10): 29-33.
ZHANG X Y, YANG X Q, WU X G. Research on requirements of frequency using for earth stations in motion in Ka-band[J]. China Radio, 2018 (10): 29-33.
- [4] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于规范对地静止轨道卫星固定业务Ka频段设置使用“动中通”地球站相关事宜的通知[J]. 中国无线电, 2019(7): 8-9.
Ministry of Industry and Information Technology. Notifications about requirements for installing GSO FSS earth stations in motion in Ka-band by Ministry of Industry and Information Technology[J]. China Radio, 2019 (7): 8-9.
- [5] International Telecommunication Union. Radio regulations(edition 2016)[M]. Geneva: ITU, 2016.
- [6] International Telecommunication Union. Final acts WRC-15[M]. Geneva: ITU, 2015.
- [7] International Telecommunication Union. Maximum permissible levels of off-axis EIRP density from earth stations in geostationary-satellite orbit networks operating in the fixed-satellite service transmitting in the 6 GHz, 13 GHz, 14 GHz and 30 GHz frequency bands: ITU-R S.524-9[S]. 2006.
- [8] International Telecommunication Union. Technical and operational requirements for GSO FSS earth stations on mobile platforms in bands from 17.3 to 30.0 GHz: ITU-R S.2223-1[S]. 2016.
- [9] International Telecommunication Union. Maximum permissible levels of interference in a satellite network (GSO/FSS; non-GSO/FSS; non-GSO/MSS feeder links) in the fixed-satellite service caused by other codirectional FSS networks below 30 GHz:

ITU-R P.1323-2[S]. 2002.

- [10] International Telecommunication Union. Reference standard atmospheres: ITU-R P.835-6[S]. 2017.
- [11] International Telecommunication Union. Attenuation by atmospheric gases and related effects: ITU-R P.676-12[S]. 2019.
- [12] International Telecommunication Union. The radio refractive index: Its formula and refractivity data: ITU-R P.453-14[S]. 2019.
- [13] International Telecommunication Union. Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth: ITU-R P.619-4[S]. 2019.
- [14] International Telecommunication Union. Analytical method for estimating interference between non-geostationary mobile-satellite feeder links and geostationary fixed-satellite networks operating co-frequency and codirectionally: ITU-R S.1324[S]. 1997.

[作者简介]



温瑞清（1998-），北京理工大学信息与电子学院本科生，主要研究方向为卫星通信等。



靳瑾（1985-），清华大学北京信息科学与技术国家研究中心副研究员，主要研究方向为空间信息系统，涵盖航天器动力学与控制、航天任务分析、卫星通信等。



黄振（1969-），清华大学北京信息科学与技术国家研究中心副研究员，主要从事仿生学信号处理、大数据电磁频谱监测、新体制无源定位和卫星有效载荷技术研究工作。