

高轨卫星通信系统链路预算模型设计

曹晓伟¹, 徐永强², 宋 强³, 付小彬¹, 魏瑞刚¹, 郑宝辉¹

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081;

2. 中国人民解放军陆军航空兵学院 陆军航空兵研究所, 北京 101123;

3. 中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对高轨卫星通信系统链路设计的工程需求开展研究, 为链路参数优化与工程设计提供量化依据; 基于高轨卫星通信系统链路的轨道特性和传输损耗规律, 对卫星通信系统链路模型开展系统性分析, 针对多参数耦合问题采用固定参数逐一分析方法, 解析链路关键指标并推导链路预算核心公式, 计算不同地理位置、雨衰、天线口面尺寸下的链路参数关系并完成预算结果分析, 同时结合工程实践经验分析功率带宽比在实际应用中的特殊影响; 经数据计算与规律分析, 明确了不同影响因素对链路传输的作用机制, 推导得到完整的卫星通信系统链路预算核心公式, 完成多场景下的链路预算结果分析, 并厘清功率带宽比的工程应用影响规律; 相关研究成果可直接应用于卫星链路的工程设计环节, 为卫星转发器资源租用、地球站设备选型提供科学依据, 满足工程设计的实际应用需求。

关键词: 卫星通信; 高轨卫星; 链路预算; 载噪比; 余量

Design of Communication Link Budget Model for High-Orbit Satellites

CAO Xiaowei¹, XU Yongqiang², SONG Qiang³, FU Xiaobin¹, WEI Ruigang¹, ZHENG Baohui¹

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. Institute of Army Aviation, Aviation School of the Chinese People's Liberation Army,
Beijing 101123, China;

3. Unit 91550 of the Chinese People's Liberation Army, Dalian 116023, China)

Abstract: Research on the engineering requirements for link design in high-orbit satellite communication systems is conducted, with a quantitative support for link parameter optimization and engineering design presented. Based on the orbital characteristics and transmission loss principles of high-orbit satellite communication links, a satellite communication link model is systematically analyzed. For the multi-parameter coupling issue, a fixed-parameter sequential analysis method is used to resolve key link indicators and derive the core formulas for link budget, and to calculate the relational characteristics of link parameters under different geographical locations, rain attenuation conditions, and antenna aperture sizes, with a comprehensive analysis of budget results conducted. Additionally, combined with engineering practice experience, this paper analyzes the specific impacts of the power-bandwidth ratio in practical applications, clarifies the action mechanisms of different influencing factors on link transmission through data computation and regularity analysis, deduces a complete set of core link budget formulas for the satellite communication system, accomplishes the link budget result analysis under multiple scenarios, and elucidates the influence rules of the power-bandwidth ratio in engineering applications. Research results can be directly applied to the engineering design of satellite links, offering a scientific basis for leasing satellite transponders and selecting earth station equipment, thus meeting practical application requirements.

Keywords: satellite communication; high-orbit satellite; link budget; carrier-to-noise ratio; margin

0 引言

随着全球化和信息化的跨越式发展, 高效可靠的通

信手段已成为支撑全球互联的核心纽带。卫星通信作为打破空间地理局限, 具有广域覆盖特性的关键技术途径, 自诞生以来就表现出巨大的潜力和价值^[1]。从 20

收稿日期: 2025-12-25; 修回日期: 2026-01-26。

作者简介: 曹晓伟(1993-), 男, 博士, 工程师。

引用格式: 曹晓伟, 徐永强, 宋 强, 等. 高轨卫星通信系统链路预算模型设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(6): 181-189.

世纪 40 年代的地外通信中继构想,到如今的多元化多层次服务,从单一轨道到多轨道组网,从简单的通信中继到现在的多系统集成融合,卫星通信领域正迎来前所未有的发展契机^[2]。卫星通信技术凭借其地理环境适应性强、覆盖范围广域化、传输容量规模化等核心优势,已成为构建全球一体化信息网络的关键支撑技术,为跨区域信息交互、偏远地区通信保障及全域网络互联互通提供了不可替代的基础支撑^[3]。卫星通信正在从传统的补充型网络逐步升级为主干网络,深入理解和研究卫星通信技术,对于推动社会进步、促进经济发展以及维护国家利益具有深远的意义。

依据人造卫星运行轨道高度的差异化特征,卫星通信系统可划分为高轨道卫星、中轨道卫星及低轨道卫星 3 大类别。其中,高轨卫星运行于地球同步轨道,其无需像中低轨卫星那样依赖大规模星座组网即可构建连续通信链路,可实现除南北两极部分区域外的全球通信覆盖。这一显著优势使得高轨卫星通信系统成为区域级通信保障、广域覆盖场景下的优选技术方案,在远距离通信、偏远地区网络覆盖等领域具有不可替代的应用价值^[4-5]。作为早期主用的卫星通信系统,高轨卫星系统推广应用时间长、范围广,技术方案成熟可靠,已有的基建配套设施完善,现有系统仍可以持续提供数十年的稳定服务。相比于高轨卫星通信系统已经发展推广了几十年,中低轨道卫星系统的基础设施相对薄弱,仍将长期处于持续更新完善的过程,因而高轨卫星通信系统在很长一段时间内仍将作为主流通信手段^[6-7]。

卫星链路预算作为卫星通信系统工程设计的核心环节,其技术价值与工程意义贯穿于系统从方案论证、指标设计、设备选型到在轨运维的全生命周期,是保障系统通信性能达标、资源配置优化及工程可行性的关键技术支撑^[8]。从最初的概念构想就需要进行链路预算分析,用于指导系统设计;中期技术实现时需要根据实际设计与早期设计方案的差异,根据链路预算进行系统可实现性评估;后期设备投入运营后,也需要根据链路预算获取系统底数,方便运营时在安全范围内操作。链路预算本质上属于定量分析方法,通过将发射端到接收端整个通信链路涉及的功率增强和信号衰减进行核算,由此做出判断,系统通信链路是否满足预定的通信要求^[9-11]。卫星系统中功率、频谱、重量和空间都是极为宝贵的资源,过度的系统冗余会造成系统笨重、成本高昂,过低的系统余量会增加系统风险,突发因素会导致通信质量恶化甚至中断,严重时候会直接导致任务失败。链路预算可以指导工程师在诸多系统变量中寻得一个平衡点,通过合理分配和预留系统余量,确保通信链路在恶劣环境下依旧可以满足通信最低限度,从而以最

小的资源代价获得最优的系统性能。

1 高轨卫星通信系统概述

卫星通信系统作为典型的天基通信架构,其核心组成单元涵盖通信卫星、地球站、测控分系统及监测管理分系统,各单元通过功能协同构建完整的天一地通信网络。通信卫星作为卫星通信系统空间段的核心功能载体,主要承担空间中继转发的关键职能,是实现跨区域信号传输的核心枢纽。其工作机制为:接收发射地球站上行链路传输的信号后,通过星上转发器完成信号的放大、变频处理(或经星上处理单元实现信号调制处理),再经下行链路转发到目标接收地球站,从而实现信号的跨区域中继传输。地球站作为卫星通信系统的地面核心接口设备,承担着用户终端与卫星链路的适配接入功能。通过集成无线信号收发模块、调制解调模块和信号处理模块,地球站可以完成用户终端到卫星侧的连接和协议适配,从而实现通信业务的接入与传输。测控系统作为保障卫星稳定运行的支撑系统,主要承担卫星在轨期间的轨道和姿态管控,包括:卫星发射阶段的轨道跟踪测量以及入轨过程中的参数校准,为卫星的准确入轨提供数据支撑;卫星在轨运行期间,对卫星的姿态进行持续监测,并依据测控数据对卫星出现的姿态偏差进行修正,从而保证通信链路的可靠稳定。业务监控管理分系统承担着卫星通信系统的运维管控功能,实现对空间段卫星和地面段地球站业务状态和工作参数的集中管理和动态监控,包括卫星转发器的输出功率、天线波束指向及增益特性等。通过改变卫星系统参数确保通信系统在各种工况情况下满足预期设计指标。

工程上卫星链路仅关注从地球站上行到通信卫星,经由卫星转发,下行到地球站的路径,进行链路预算设计时,忽略测控系统和监控系统对系统的影响。

2 卫星链路设计基本概念

链路预算可以简单考虑 3 个要素:发射站、接收站和用于中继的卫星。链路预算就是用来描述 3 者变化对整个系统的影响。3 者之间的通信关系如图 2 所示^[12]。

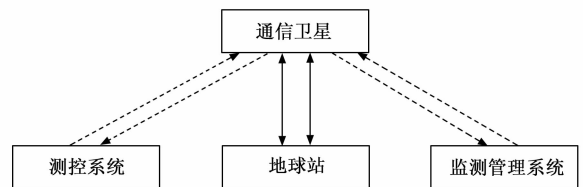


图 1 卫星通信系统的基本组成

链路预算分析主要包含正推法与反推法两种思路,具体应用逻辑如下:1) 正推法:在发射站发射功率、收发两端天线口径参数已确定,且卫星转发器工作状态

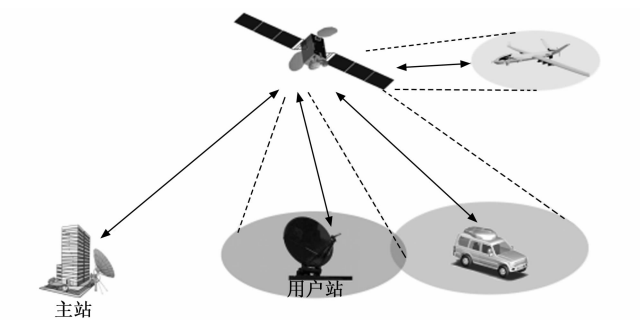


图 2 卫星链路传输示意图

参数(如饱和输出功率、增益特性等)明确的前提下,基于预设的系统余量指标,通过链路损耗量化、增益计算及参数耦合分析,推导发射站可实现的最大信息传输速率;2)反推法:在系统余量指标预设的条件下,结合发射站与接收站的核心技术参数(如天线增益、噪声温度等)及卫星转发器的运行状态参数,通过链路载噪比(C/N, carrier-to-noise ratio)计算、损耗叠加分析,先求解链路实际可获得的总载噪比与系统余量,进而反推满足预设系统余量要求时,发射站所需配置的有效全向辐射功率(EIRP, effective isotropic radiated power)和发射天线的口径^[13]。卫星链路预算时可以遵循以下步骤^[14-15]:

- 1) 根据用户需求或通信系统规定明确卫星系统的网络结构和通信体制;
- 2) 确定网络结构后,明确系统准备采用的通信卫星参数,包括卫星转发器的类型、工作频率、具体工作参数等;
- 3) 确定发射站和接收站的参数,包括站址信息(经纬度和海拔)、载波信息(调制编码方式、接收门限、滚降系数等)、其他信息(天线口径尺寸、功放功率、占用带宽等);
- 4) 将链路预算的参数代入进行计算,通过调整3)中其他信息的参数,如增大天线口径等,满足系统余量的要求。

2.1 链路预算参数

根据前文分析,卫星链路分析时可以简化为3要素,因此可以将链路计算的参数分为3类:卫星参数、发射/接收地球站参数、外界传输参数,如表1~3所示。

表 1 卫星链路卫星参数

卫星参数名称	符号
卫星星下点经度	λ_s
占用转发器带宽	B
卫星上/下行频段	f_u/f_d
卫星饱和通量密度	SFD
总输入/输出补偿	BO_i/BO_o

表 2 卫星链路地球站参数

地球站参数名称	符号
所处的经度/纬度	φ_T/λ_T
天线口径	D
天线增益	G
站星距	d
天线的品质因素	G/T
有效全向辐射功率	EIRP

表 3 卫星链路传输参数

传输参数名称	符号
上行/下行传播损耗	L_{FS}
指向损耗	L_p
大气、雨衰损耗	L_a

1) 俯仰角 φ_e :

高轨卫星因运行在地球同步轨道而具有独特的轨道特性,其轨道偏心率趋近于0,星下点位置长期保持固定,且星下点始终位于赤道上空,维度为0。为了建立稳定的通信链路,地球站要求天线的波束中心精确对准目标卫星。由于地球站地理位置差异,相对于卫星的空间几何关系不同,因此形成了不同的天线仰角和方位角参数。

假定地球站纬度为 φ_T , 经度为 λ_T , 通信卫星星下经度定义为 λ_s , 卫星与地球站之间的纬度差为 $\Delta\varphi = |0 - \varphi_T|$, 经度差为 $\Delta\lambda = |\lambda_s - \lambda_T|$ 。根据球面三角几何原理,天线工作时的仰角 φ_e 为:

$$\varphi_e = \arctan \left[\frac{\cos\beta - \left(\frac{R}{R+h}\right)}{\sqrt{1 - \cos^2\beta}} \right] \tag{1}$$

其中: β 为地心角,表示地球站与卫星在地心处的夹角 $\cos\beta = \cos(\Delta\varphi) \times \cos(\Delta\lambda)$ 。

工程上将公式(1)简化处理:

$$\varphi_e = \arctan \left[\frac{\cos\Delta\varphi \times \cos\Delta\lambda - 0.151}{\sqrt{1 - (\cos\Delta\varphi \times \cos\Delta\lambda)^2}} \right] \tag{2}$$

其中:0.151表示地球平均半径 R 与卫星到地心距离 $R+h$ 比值的近似值, $\frac{R}{(R+h)} \approx 6\,378/(6\,378 + 35\,786.6) \approx 6\,378/42\,164.6 \approx 0.151$ 。

2) 方位角 φ_a :

方位角用于描述以某点指向另一点的方向,通常以正北为基准,顺时针方向计量。

计算方位角 φ_a 时^[16],需要用到中间变量 φ_0 ,可以表示为:

$$\varphi_0 = \arctan \left[\frac{\sin(\Delta\lambda)}{\sin(\Delta\varphi) \cdot \cos(\Delta\lambda) - \cos(\Delta\varphi) \cdot \tan\beta_i} \right]$$

其中: β 是卫星轨道倾角, 对静止卫星通常为 0。

进一步简化为:

$$\varphi_0 = \arctan \left[\frac{\sin(\Delta\lambda)}{\sin(\Delta\varphi) \cdot \cos(\Delta\lambda)} \right]$$

需要说明的是, 上述公式计算值是以正南为基准, 我国地处北半球, 以正北为 0° 的标准需要进行转化。

以我国大陆情况为例, 地球站地处北半球, 当卫星在地球站的东侧, 即 $\Delta\lambda > 0$, 则 $\varphi_a = 180^\circ - \varphi_0$; 当卫星在地球站的西侧, 即 $\Delta\lambda < 0$, 则 $\varphi_a = 180^\circ + \varphi_0$ 。

3) 站星距 d :

β 为地球站与卫星下点的地心角, 根据余弦定理, 地球站与卫星之间的直线距离 d 为:

$$d = \sqrt{(R+h)^2 + R^2 - 2R(R+h)\cos\beta} \quad (3)$$

将球心角公式代入上式可得:

$$d = \sqrt{(R+h)^2 + R^2 - 2R(R+h)\cos(\Delta\varphi) \cdot \cos(\Delta\lambda)} \quad (4)$$

将地球平均半径 R 与卫星到地心距离 $R+h$ 的值代入式 (4), 公式可以简化为:

$$d = 42164 \times \sqrt{1.023 - 0.302 \cdot \cos(\Delta\varphi) \cdot \cos(\Delta\lambda)} \quad (5)$$

4) 天线增益 G :

针对高轨卫星, 主流的天线形式依旧为抛物面天线, 抛物面天线增益 G 可以根据口面大小进行估算:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = \eta \left(\frac{\pi D f}{c} \right)^2 \quad (6)$$

其中: η 为天线效率, D 为天线口面直径, λ 为工作频点的波长, f 为工作频点, c 为光速。

天线效率 η 在天线领域可以进一步细化为照射不均匀、溢出损失、口面加工误差、阻抗失配损失等因素, 在工程中针对高轨卫星通信中抛物面天线效率一般为 $50\% \sim 60\%$, 工程计算时 η 取 0.55。根据公式 (6), 当天线工作频段确定时, 天线增益 G 可以通过改进天线辐射效率 η 、增大天线口径 D 的方式进行提高。

需要特别说明的是, 地球站所配置的同一口面天线在发射与接收链路中存在显著的参数差异: 考虑到发射链路 & 接收链路的频率 f 存在差异, 与之对应的发射天线增益 G_T 与接收天线增益 G_R 也呈现出显著的数值分化特征。这一参数差异直接影响链路传输性能的评估精度, 因此在卫星通信系统的链路预算计算过程中, 需对发射与接收天线增益进行区分, 避免因参数混淆导致预算结果偏差。

5) 热噪声与噪声温度:

热噪声是卫星通信链路中无法规避的固有噪声类型, 其根源在于导体内部的无规则热运动。电子的随机运动将形成杂乱的电信号, 进而对有效通信信号的传输造成干扰。作为衡量噪声特性的核心参数, 噪声温度将

器件内部热噪声等效为一个电阻温度。实际工程应用中, 噪声温度越低, 表明器件或系统的噪声抑制能力越强, 通信质量越有保障^[17]。

在卫星通信系统的噪声分析中, 主要聚焦于两大噪声来源: 地球站天线的噪声温度和接收机的噪声温度。这两类噪声温度的叠加效应共同决定了卫星链路的整体噪声水平, 其数值大小直接影响系统接收灵敏度的阈值与通信链路的最大可达距离。

天线侧的噪声温度可以表示为:

$$T_{\text{total_ant}} = \eta \cdot T_{\text{ant}} + T_{\text{feed}} = \eta \cdot T_{\text{ant}} + (1 - \eta) \cdot T_0 = \frac{T_{\text{ant}}}{L} + \left(1 - \frac{1}{L}\right) \cdot T_0 \quad (7)$$

其中: T_{ant} 表示天线接收的外部噪声温度, 包括天线自身损耗引入的热噪声和由天线方向图接收引入的外部环境噪声, T_{feed} 表示馈线自身损耗等效的噪声温度, η 表示馈线效率, $\eta = \frac{1}{L}$, L 表示馈线功率损耗 (真值, 非分贝值)。 T_0 表示馈线物理环境温度 (通常取 290 K)。

由上式可知, 若要降低天线侧的噪声温度, 可以从提高天线效率、合理选址降低环境噪声影响、降低馈线介质损耗等方面进行改善。

对于接收机这种多个单元级联情况, 接收机总的有效噪声温度 T_{eRX} 为:

$$T_{\text{eRX}} = T_{\text{LNA}} + \frac{T_{\text{MX}}}{G_{\text{LNA}}} + \frac{T_{\text{IF}}}{(G_{\text{LNA}} \cdot G_{\text{MX}})} \quad (8)$$

根据公式 (8) 可知, 接收机总的有效噪声温度 T_{eRX} 很大程度由第一级级联器件决定, 在接收机中即 LNA 的增益 G_{LNA} 决定。当第一级器件的增益很大时, 对于后面多级器件的噪声有抑制作用, 接收机的总噪声温度取决于第一级器件的噪声温度, 即:

$$T_{\text{eRX}} \approx T_{\text{LNA}} \quad (9)$$

因此在接收机器件选型时, LNA 要选择高增益、低噪声温度的器件, 从而获得更优的系统性能。

6) 地球站的 G/T 值:

为了评估卫星接收链路的接收性能, 工程上增益噪声温度比 (G/T 值, gain-to-noise temperature ratio) 用作为核心评价指标, 定义为天线接收增益与系统总噪声温度的比值, 单位为 dB/K:

$$G/T = G_R - 10 \times \lg T \quad (10)$$

其中: G_R 为地球站天线的接收增益, T 为系统等效噪声温度, 在卫星接收链路中主要由天线噪声温度和接收机噪声温度叠加而成, 基于工程经验总噪声温度 T 取 180 K。

G/T 值表征了通信系统的接收灵敏度, G/T 值越高表明系统对微弱信号的捕获和解调能力越强, 能够实现远距离的信号接收, 因此在深空探测、射电天文观测等极端通信场景中具有重要应用价值。根据公式 (10)

可知,改善系统接收性能可以通过增大接收增益或者降低系统总噪声温度,从而系统设计时可以从天线性能参数和射频接收机参数方面进行优化。

7) 传输损耗参数:

(1) 自由空间损耗:在卫星链路预算中,空间损耗是决定信号传输损耗的主要因素,其本质是电磁波扩散导致的功率信号衰减。相较于大气损耗、雨衰等损耗,空间损耗幅度最大,是链路预算中考量的主要损耗源,其与信号传播距离和频率有关^[18]。

由传输方程可知自由空间损耗 L_{FS} 为:

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (11)$$

其中: d 为站星距 (km)。工程中对公式进行简化,当工作频率单位为 MHz 时,可以表示为: $L_{FS} = 32.45 + 20\lg[f(\text{MHz})] + 20\lg[d(\text{km})]$ 当工作频率单位为 GHz 时,可以表示为:

$$L_{FS} = 92.45 + 20\lg[f(\text{GHz})] + 20\lg[d(\text{km})]$$

(2) 大气损耗:卫星通信中,电磁波在大气层传播时会产生损耗,大气损耗主要由对流层和电离层产生。对流层中气体分子、水汽都会形成选择性吸收损耗,电离层中的电离分子会导致电波能量衰减。

大气层引起的衰减主要取决于工作频率,氧气和水蒸气有着不同的吸收峰,实际工作中需要根据工作频率考虑大气损耗的影响。在 10 GHz 以下频段大气损耗较小,随着频率增高,大气损耗 L_a 逐渐增大。不同地理位置也会导致地球站有着不同的天线仰角,低仰角存在较大的传播路径,损耗会相应增加,建站选址时需要特别考虑。空气湿度大时,水蒸气的吸收效果会增强,损耗会增大,因此沿海、热带地区的损耗会高于干燥、高纬度地区。雨衰作为大气损耗的核心组成部分,高频段链路预算时要单独考虑。

电离层损耗主要体现在吸收、散射、折射、法拉第旋转等,对于较低频率 (HF、VHF) 影响较大,当工作频率高于 10 GHz 时,电离层损耗通常较小。我国大陆地区广东韶关一带处于电离层闪烁影响区域,实际工程中针对地球站工作频率和地理位置进行相应补偿。

(3) 指向损耗:在传输方程计算时,发射和接收天线的增益均采用的是天线的最大增益,这意味着系统中收发天线轴向实现了精确对准,当某一天线出现指向不精确时,会导致实际的增益低于天线的最大增益值,从而使得链路接收到的信号功率降低,从而形成指向损耗。

指向损耗 L_p 由很多因素造成,如天线设计初期机械结构指向偏差、环境应力 (重力、风载、温度) 造成的天线结构形变、机械伺服结构无法实现精确的跟星、卫星位置漂移、卫星轨道的星历数据不准确都会造成卫

星系统产生指向损耗。工程上通过设置指向精度指标、链路提前设置指向损耗余量、引入信标跟踪等方式降低对系统的影响。

(4) 传输总损耗:传输总损耗可以表示为自由空间损耗、大气损耗、指向损耗三者的总和。

8) 有效全向辐射功率 EIRP:

在卫星通信系统中, $EIRP$ 是衡量发射端信号辐射能力的核心指标,其物理定义为卫星或地球站发射天线在波束中心轴向上的辐射功率,数学表达式为天线发射功率 P_T 和天线增益 G 的乘积:

$$EIRP = P_T \cdot G_T \quad (12)$$

9) 卫星饱和通量密度 (SFD):

饱和通量密度 (SFD, saturation flux density) 是卫星通信系统上行链路设计与性能评估的核心参数。卫星转发器通常选用行波管放大器作为核心功率放大器件,而该类器件存在输出功率饱和的固有特性。当上行链路输入信号驱动卫星转发器的输出功率达到饱和阈值 (即最大输出功率) 时,卫星接收天线口面位置所对应的功率通量密度,即被定义为饱和通量密度:

$$\varphi_M = \frac{EIRP}{(4\pi d^2)} \quad (13)$$

结合自由空间损耗公式,公式可以改写成:

$$\varphi_M = EIRP - L_{FS} - 10 \cdot \lg\left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) \quad (14)$$

通过 SFD 可以计算地面站所需的 $EIRP$, SFD 越小,地面站实现饱和所需的 $EIRP$ 值越低,工程上可以采用小口径天线满足设计目标; SFD 越大,需要满足卫星饱和的 $EIRP$ 越大,对于地面站的要求越严苛,需要采用大口径天线或提高功放功率来满足指标。需要说明的是, SFD 并不是一个固定值,实际使用中会根据情况进行调整。如特殊环境 (特大暴雨天气) 下降低 SFD 值,确保上行链路在信号衰减加剧情况下也能保障通信链路联通。 SFD 值可以表征系统的运行状态,当上行链路的功率密度过高 (大于 SFD) 时,转发器会工作在非线性区域,会产生信号失真、频谱畸变;当下行链路的功率密度过低 (小于 SFD) 时,转发器处于非饱和状态,通信效率降低,造成资源浪费。

10) 输入/输出补偿:

在卫星通信系统中,当链路中有多个载波同时工作时,为了有效利用功率放大器,行波管工作在输出饱和点附近,会产生互调干扰分量。互调干扰如果落在卫星工作频带内,会降低卫星的工作性能,如果落到其他频带,可能会干扰其他系统,为减少互调干扰,需要对功放采用适当的输入、输出回退,使功放不进入饱和区域,这个减少量就定义为输入补偿 (BO_i , input back off) / 输出补偿 (BO_o , output back off)^[19]。

2.2 卫星链路载噪比的计算

以晴天情况为例, 将卫星链路拆分为两段计算, 从地球站到卫星端的上行链路和从卫星端到地球站的下行链路两部分^[20-22]。

2.2.1 上行链路 $(C/T)_u$

卫星的上行链路是由地球站向卫星传输信号的链路, 即地球站发送信号, 卫星接收信号。

1) 地球站的 $EIRP_u$:

地球站的 $EIRP_u$ 值可以根据发射天线的发射功率和天线增益, 依据公式得到, 即:

$$EIRP_u = \frac{P_T \cdot G_T}{L_T L_{FTX}} = P_T + G_T - L_T - L_{FTX} \quad (15)$$

其中: L_T 表示发射天线波束指向带来的指向损耗, L_{FTX} 表示天线和功放之间的损耗。

采用上述算法可以获得天线的 $EIRP_u$ 值, 但工程中为了实现系统最大效率, 上行链路中要使得卫星转发器工作在饱和状态。因此, 可以在卫星转发器饱和和工作情况下, 反向确定此时地球站发射天线的 $EIRP_u$, 即:

$$EIRP_u = SFD + L_{FS} + 10 \cdot \lg\left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) \quad (16)$$

其中: SFD 可以通过运营商公布的卫星数据进行获取, L_{FS} 表示自由空间损耗, 考虑到其他如极化损耗、大气吸收损耗等, 上行链路的损耗表示为 L_U :

$$EIRP_u = SFD + L_U + 10 \cdot \lg\frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (17)$$

2) 卫星 G/T 值:

上行链路中卫星的 G/T 值作为一个定值分析。

3) 上行链路的 C/N :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_u = EIRP_u + \left(\frac{G}{T}\right)_u - L_U - k \quad (18)$$

其中: $EIRP_u$ 表示地球站上行发送的 $EIRP$, $(G/T)_u$ 表示卫星接收系统的品质因数, L_U 表示上行链路总损耗, k 表示玻尔兹曼常数 (取 -228.6 dB)。

链路性能还有其他的表征方式, C/T 表示载波功率对系统噪声温度之比:

$$\frac{C}{T} = \left(\frac{C}{N}\right)k \quad (19)$$

实际工作中需要考虑多载波情况, 计算中需要加入输入补偿 BO_i :

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{T}\right)_u &= EIRP_{uM} + \left(\frac{G}{T}\right)_u - L_U = \\ SFD - BO_i + \left(\frac{G}{T}\right)_u - 10 \cdot \lg\frac{\lambda^2}{4\pi} - L_U \end{aligned} \quad (20)$$

2.2.2 下行链路 $(C/T)_d$

卫星的下行链路是由卫星向地球站传输信号的链路, 即卫星发送信号, 地球站接收信号。

卫星 $EIRP_d$ 可以根据运营商提供的公开数据获取,

表示卫星的发射能力:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = EIRP_d + \left(\frac{G}{T}\right)_d - L_D - k \quad (21)$$

对于下行链路, 还需要考虑 $EIRP$ 的输出补偿 BO_o :

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{T}\right)_d &= EIRP_{dM} + \left(\frac{G}{T}\right)_d - L_D = \\ EIRP_d - BO_o + \left(\frac{G}{T}\right)_d - L_D \end{aligned} \quad (22)$$

2.2.3 卫星交调 $(C/T)_{IM}$

当卫星转发器工作在多载波情况时, 高功放的非线性特性会引入互调失真 (如三阶互调 $IM3$), 产生新的干扰频率分量。这些干扰信号落入到工作频带内, 会形成交调噪声, 可以看作一个“非线性的噪声源”, 其功率可以等效为一种附加噪声温度, 从而得到交调 $(C/T)_{IM}$:

$$\left(\frac{C}{T}\right)_{IM} = \frac{P_c}{(k \cdot T_{IM} \cdot B)} \quad (23)$$

其中: P_c 为单载波功率 (W), T_{IM} 为交调等效噪声温度 (K), B 为系统带宽 (Hz), k 为玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K)。

工程上利用三阶交调功率进行表示, 交调 $(C/T)_{IM}$ 可以表示为:

$$\left(\frac{C}{T}\right)_{IM} = P_c - 10 \cdot \lg T_{IM} - 228.6 \quad (24)$$

其中: -228.6 为玻尔兹曼常数的对数值 $[10 \lg(k)]$ 。

上式在工程使用中进行了参数修正, 按照如下经验值进行计算:

$$\left(\frac{C}{T}\right)_{IM} = 32 + 10 \cdot \lg[B(\text{MHz}) \times 0.7] - 168.6 \quad (25)$$

其中: 带宽 B (MHz) 表示计算中采用 MHz 带宽。

2.2.4 卫星链路总 $(C/T)_{Total}$

卫星系统链路总的 $(C/T)_{Total}$ 需要叠加交调影响:

$$\left(\frac{C}{T}\right)_{Total}^{-1} = \left(\frac{C}{T}\right)_u^{-1} + \left(\frac{C}{T}\right)_d^{-1} + \left(\frac{C}{T}\right)_{IM}^{-1} \quad (26)$$

2.2.5 载波参数

载波作为一个高频周期信号, 本身不携带信息, 通过调制技术可以将低频信息搭载到高频载波上, 载波参数就是用来描述这些相关特性。

当调制编码方式确定后, 信息速率和发射速率的相对关系随之确定, 带宽系数确定后, 噪声带宽和载波间隔也固定下来。系统设计时, 对于门限误码率和门限值、门限值都进行了约束, 从而总载波数也固化下来。

载波门限 C/T 与比特能量门限 E_b/N_0 的线性关系:

$$\left(\frac{C}{T}\right)_{\text{门限}} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{门限}} \times R_b \times k \times \eta \tag{27}$$

其中： R_b 为信息速率， k 为玻耳兹曼常数， η 为系统效率因子。

工程上更多是以 dB 形式进行计算，上式可以简化为：

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{T}\right)_{\text{门限}} &= \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{门限}} + 10 \cdot \lg R_b + 10 \cdot \lg k + \\ 10 \cdot \lg \eta &= \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{门限}} + 10 \cdot \lg R_b (\text{kbps}) - 198.6 \end{aligned} \tag{28}$$

工作频带内的总载波数 N_c 可以表示为：

$$N_c = \left(\frac{C}{T}\right)_{\text{Total}} - \left(\frac{C}{T}\right)_{\text{门限}} - L_m \tag{29}$$

其中： L_m 为链路余量。

2.2.6 卫星的功率带宽比

系统在有限卫星资源（功率和带宽）下，为进一步衡量资源分配利用率情况，工程中常采用功率带宽比来表征：

$$\eta_s = \frac{P_M}{B_s} \tag{30}$$

其中： η_s 为卫星转发器的功率带宽比， P_M 为多载波情况下传输链路占总载波数的比值， B_s 为载波占用卫星转发器的带宽，在工程实践中，卫星运营商要求功率带宽比 η_s 控制在 1 以下，同时考虑到双站互通，需要同时关注地球站 A 发 B 收和 B 发 A 收下的功率带宽比，以某一链路达到最大临界值即为系统的最大临界值。

当两个地球站互通时，当功率带宽比超标时，可通过降低信息速率，减少带宽占用；改变调制编码方式，降低调制门限值，降低功率使用。

2.2.7 下行链路的功率谱密度

与上线链路类似，上行时需要关注卫星的饱和通量密度，下行时需要考虑卫星对地的功率谱密度，避免干扰地面通信设备。

功率谱密度（PSD，power special density）可以表示为：

$$PSD_{\text{地面}} = EIRP_d - L_{FS} - 10 \cdot \lg B \tag{31}$$

其中： B 表示信号带宽。

国际电信联盟（ITU-R）对卫星下行 $PSD_{\text{地面}}$ 有标准要求，要满足 $PSD_{\text{地面}} < PSD_{\text{ITU}}$ 。工程设计时可适当降低发射功率满足要求。

3 链路预算实例分析

结合真实场景下卫星链路情况，分析不同状态参数对链路情况的影响。目前 Ku 频段以全国波束为主，支持覆盖中国大陆区域。目前在轨运行的 Ku 频段卫星包

括中星 6D 卫星、中星 10 号卫星、亚太 5C 卫星等。本节以中星 10 号卫星为例进行分析，卫星定点经度为东经 110.5°，波束覆盖中国大陆地区以及西亚和南亚的部分国家和地区，可以为上述区域提供稳定的通信和数据传输，大带宽特性可以满足数据多媒体的需求。中星 10 号卫星的波束覆盖如图 3 所示。

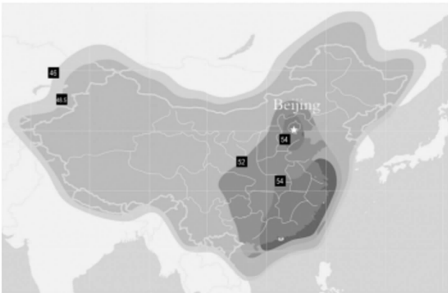


图 3 中星 10 号卫星覆盖图

通过公开资料，Ku 频段转发器的 SFD 通常在 $-90 \sim -75 \text{ dBW/m}^2$ 内，在本节中假定卫星转发器 SFD 取 -90 dBW/m^2 ，定义总输入补偿为 6 dB，总输出补偿为 3 dB。中星 10 号卫星 Ku 频段的上行工作频率为 14.0~14.5 GHz，下行工作频率为 12.25~12.75 GHz，链路计算以工作频段的中间频率计算，即上行工作频率为 14.25 GHz，下行工作频率为 12.5 GHz。

3.1 卫星链路与地理位置的关系

由于 Ku 频段卫星为全国波束，波束的中心区域和边缘存在差异，根据卫星运营商公开技术手册，卫星 EIRP 波动为 47.5~56.8 dBW， G/T 为 0~11 dB/K。

表 3 卫星链路传输参数

城市	经度/(°)	纬度/(°)	EIRP/dBW	(G/T)/(dB/K)
北京	116.4	39.9	54.0	5.7
武汉	114.3	30.6	55.0	8.9
广州	113.2	23.2	56.2	10.2
呼和浩特	111.7	40.8	50.8	4.5
喀什	76	39.5	48.4	2.3
拉萨	91.2	29.7	48.1	2.0

根据已有材料可以获得不同城市的经纬度和卫星在不同城市的 EIRP、 G/T 值分布，中星 10 号的 EIRP、 G/T 值在全国呈现“东南高、西北低”的特点，在广州地区 EIRP 可以达到 56.2 dBW，在喀什地区只有 48.4 dBW。

假定以 0.9 m 口径天线进行互通收发测试，地球站 A 位于北京，地球站 B 选择不同地理位置，分析地理位置对系统信息速率的影响。规定地球站采用 40 W 发射机，门限 E_b/N_0 设定为 5.2 dB。对比不同地理位置下的最大信息速率。

相近经度下的信息速率如表 4 所示。

表 4 相近经度下不同地理位置的最大信息速率

接收城市 B	北京	武汉	广州
最大信息速率/kbps	10 000	12 000	12 700

相近纬度下的信息速率如表 5 所示。

表 5 相近纬度下不同地理位置的最大信息速率

接收城市 B	北京	呼和浩特	喀什
最大信息速率/kbps	10 000	5 500	3 300

由于地理位置差异，上下行链路并不会同时达到发射机的最大功耗，当一条链路达到饱和时即为最大信息速率。

根据不同地理位置下的最大信息速率，可以发现卫星波束资源分布的不均匀导致同一通信参数下相同的通信设备，在不同位置通信速率会有着显著差异。在进行地球站选址设计时，既要考虑经纬度（如高纬度地区的低仰角问题）带来的空间链路差异，还要考虑卫星波束不平衡造成的影响。针对高纬度地区，适当增大天线口径来弥补信息速率的不足。

3.2 卫星链路与天线口面的关系

根据上文理论分析，天线口面尺寸会影响天线的增益，进而会限制卫星系统的最大信息速率。假定地球站 A、B 都布置于北京，地球站 A 采用 0.9 m 天线，对比地球站 B 采用不同口径天线下的最大信息速率，如表 6 所示。

表 6 不同天线口面的最大信息速率

地球站 B 口径/m	2.4	0.9	0.6	0.45
最大信息速率/kbps	20 000	10 000	4 400	2 500

不同口径天线进行互通时，地球站 B 天线口径减小，为满足对通要求，信号从地球站 B 传输到地球站 A 时需要增大发射功率。在发射机功率固定情况下，最大信息速率会受到限制。

3.3 卫星链路与地球站载波门限 E_b/N_0 的关系

载波门限值可以理解为通信系统的“听力下限”，当通信质量过低时，接收机不足以识别信号，数据传输会发生错误。最大信息速率是在满足门限值约束的情况下，选择不同的调制编码方式来逼近香农极限的过程。卫星系统可以通过自适应调制和编码适应不同天气场景的通信需求，这在本文中不详细展开，仅分析载波门限对于最大信息速率的影响。假定系统可以调整为不同的 E_b/N_0 ，从理论层面对比同等条件下系统的最大信息速率情况，实际情况中需要同步调整系统的调制编码方

式，并不能完全保证系统进行单一变量分析，如表 7 所示。

表 7 不同载波门限的最大信息速率

$(E_b/N_0)/\text{dB}$	2.6	5.2	7.9	10.4
最大信息速率/kbps	18 300	10 000	5 400	3 000

作为系统维持可靠通信的最低限度，载波门限越小，对应的总载波数越少，同等信息速率下每载波所需的功放功率越小。在固定发射机功率情况下，可以获得更高的信息速率。

3.4 卫星与降雨的关系

随着工作频率的增大，降雨对于卫星通信的影响是显著的，会使传输链路承受巨大的衰减，甚至会造成通信中断。根据降雨强度值和降雨衰减量可以预测地区的雨衰损耗。根据中国气象局《卫星通信雨衰预警系统》可以获取实时降雨衰减预测。根据行业惯例，国内雨衰强度大致分为 3 个等级：低雨衰地区（西北/华北）典型值 0.5~2 dB，中雨衰地区（华东/华中）典型值 2~5 dB，高雨衰地区（华南/沿海）典型值 5~10 dB^[23-24]。

假设以 0.9 m 口径天线进行互通收发测试，地球站 A 部署在北京，地球站 B 部署在广州，分析不同降雨量下与晴天情况下的信息速率对比，如表 8~10 所示。

表 8 不同载波门限的最大信息速率(A 站降雨,B 站不降雨)

雨衰值/dB	0	1.5	3.5	8
最大信息速率/kbps	12 700	10 400	6 500	2 300

表 9 不同载波门限的最大信息速率(B 站降雨,A 站不降雨)

雨衰值/dB	0	1.5	3.5	8
最大信息速率/kbps	12 700	C	5 700	2 000

表 10 不同载波门限的最大信息速率(A 站降雨,B 站降雨)

雨衰值/dB	0	1.5	3.5	8
最大信息速率/kbps	12 700	9 000	5 700	2 000

由于地理带来的差异，不同地球站作为发送端时，发射功放功率不同，因此链路余量不同，对降雨的衰减补偿能力也有所差异。单站降雨和双站同时下雨情况对比，可以看出双站的最大信息速率是与单站降雨情况下信息速率较低站点的信息速率相同的。对于特殊天气造成的信息速率受限问题，可临时调整地球站的发射功率，以弥补雨衰带来的损失。

表中不同降雨衰减用于模拟极端情况下，如特大暴雨（雨衰大于 15 dB）对卫星通信造成的影响情况，常规情况下可依据“平均年度 99.9% 时间的降雨衰减”进行估算即可。

3.5 卫星与载波编码的关系

载波编码通过增加冗余校验,提高抗干扰能力,但会降低有效信息速率。在不同降雨条件下,通过降低调制阶数可提升符号速率,抵消雨衰造成的信息速率降低。载波编码与卫星链路信息速率的定量分析超出本文的范围,在此不再展开^[25]。

通过现场实测,进行30组重复实验取均值对比,预测值与实测数据均值偏差不大,误差在200 kbps以内,证明了预算方法的可行性。

4 结束语

本文按照链路预算流程,分析各个参数对链路结果的影响,并通过多个示例分析了链路参数对信息速率的影响。卫星系统是一个受多种参数共同作用的系统工程,链路设计更是一个不断折中优化的过程,依据用户需求和可用资源,不断调整配置参数更新预算结果。预算结果更多的是辅助项目设计,指导工程人员在设计时选择合理的技术体制和载波配置;借助功带比的计算,合理规划卫星转发器资源的租用方案,实现转发器带宽与功率资源的匹配优化,降低系统运行成本;基于链路预算合理选择地球站的天线口面和功放参数,避免设备性能冗余导致的资源浪费和成本冗余;综合链路损耗和工程可靠性,精确设置链路余量指标,在保证通信链路稳定有效的前提下,实现资源配置与性能需求的动态平衡。

参考文献:

- [1] 刘旭光,何文雯,李浩,等.卫星互联网发展及星链系统通信能力分析[J].航天电子对抗,2025,41(5):36-40.
- [2] 朱立东.空天地海一体化网络:从立体覆盖到全域智联[J].移动通信,2025,49(10):1.
- [3] 徐茂哲.面向空天地一体化系统的协作通信性能研究[D].上海:华东师范大学,2024.
- [4] 宋传志.卫星移动通信发展现状与未来发展研究[J].科技创新导报,2020,17(9):121-122.
- [5] 但子恒.面向低轨卫星星座的多星协作传输性能研究[D].北京:北京邮电大学,2024.
- [6] 贵重,李艳,李云翔,等.卫星通信发展趋势与展望[J].电信工程技术与标准化,2023,36(11):82-85.
- [7] 李殷乔,熊玮,孙治国.中国高轨移动通信卫星系统发展的机遇与挑战[J].国际太空,2020(4):36-41.
- [8] 张燕.利用Excel实现卫星链路计算[J].电信快报,2018(3):36-40.
- [9] 杨新华,刘杨,雷迪伟.动中通卫星通信系统链路预算及实例分析[J].通信技术,2018,51(1):24-29.
- [10] 李志国,卫颖.卫星通信链路计算[J].指挥信息系

统与技术,2014,5(1):73-76.

- [11] KANG E, SHIN W, PARK Y, et al. Link budget analysis of low earth orbit satellites considering antenna patterns and wave propagation in interference situations [C] //2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Sydney, Australia, 2022.
- [12] GONGORA T J M, VARGAS R C, ARAGÓN Z A, et al. Link budget analysis for LEO satellites based on the statistics of the elevation angle [J]. IEEE Access, 2022, 10: 14518-14528.
- [13] 朱校通,郝建强.高轨卫星通信系统链路预算软件设计[J].通信技术,2013,46(7):25-27.
- [14] 佚名.简说卫星链路预算[J].卫星电视与宽带多媒体,2010(7):62-67.
- [15] 朱军.基于GEO卫星的“动中通”系统设计与关键技术研究[D].南京:南京理工大学,2008.
- [16] 贺晓文,何建东.关于便携式卫星通信系统设计问题的探讨[J].中国信息化,2013(14):13-13.
- [17] 高娜娜,黄国策.码分多址卫星通信网中干扰与噪声的分析计算[J].空军工程大学学报(自然科学版),2001(5):45-47.
- [18] 高光英,高永明,董正宏.空间通信电磁传播影响分析[J].中国新通信,2012,14(19):32-35.
- [19] 谷俊博,周东方,邓海林,等.卫星通信链路传输参数计算的均衡逼近方法[J].信息工程大学学报,2022,23(1):1-8.
- [20] 徐挺,兰海,张宏江.静止轨道卫星通信链路的预算与分析[J].中国空间科学技术,2020,40(3):83-92.
- [21] 张金贵,王静,王维猛,等.基于卫星的共频带传输链路性能仿真分析[J].计算机测量与控制,2025,33(6):240-246.
- [22] MEBREK M A, ABDERRAHMANE L H, HIMEUR A, et al. Configuration and calculation of link budget for a connection via a geostationary satellite for multimedia applications in the Ka band [J]. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2012, 6: 466-470.
- [23] 康健,李信,高岷.Ku频段卫星链路降雨衰减特性分析[J].吉林大学学报(信息科学版),2009,27(4):354-358.
- [24] KANELLOPOULOS S A, PANAGOPOULOS A D, KOUROGIORGAS C I, et al. Satellite and terrestrial links rain attenuation time series generator for heavy rain climatic regions [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(6): 3396-3399.
- [25] 刘军.卫星链路预算初步通俗解析(上)[J].卫星与网络,2010(z1):66-68.