

卫星通信链路上/下行及单/双通道计算方法研究

金宇婷, 邢斯瑞, 孙伟, 赵博, 韩旭天

(长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 针对卫星 X 波段通信系统链路设计需求, 详细研究了传输过程中的各项损耗、干扰及系统指标和特性, 提出了卫星通信系统的上、下行及单、双通道情况下的多种链路计算方法, 并通过实际示例验证该计算模型的可行性。该计算方法模型可用于卫星通信系统的参数选择、信号质量链路能力的预测, 对卫星通信系统的设计具有指导意义。

关键词: 卫星通信; 链路计算; 上/下行及单/双通道; 载噪比

中图分类号: TN83

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212208

中文引用格式: 金宇婷, 邢斯瑞, 孙伟, 等. 卫星通信链路上/下行及单/双通道计算方法研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(7): 74-77.

英文引用格式: Jin Yuting, Xing Sirui, Sun Wei, et al. Research on uplink/downlink and single/dual channel calculation method of satellite communication link[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(7): 74-77.

Research on uplink/downlink and single/dual channel calculation method of satellite communication link

Jin Yuting, Xing Sirui, Sun Wei, Zhao Bo, Han Xutian

(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: According to the design requirements of satellite X-band communication system link, studying detailly various losses, interferences in the transmission process, system indexes and characteristics, a variety of link calculation methods for uplink/downlink, single/dual channels of satellite communication system are proposed, and the feasibility of the calculation model is verified by practical examples. The calculation method model can be used for parameter selection of satellite communication system, prediction of signal quality and link capability, and it has guiding significance for the design of satellite communication system.

Key words: satellite communication; link calculation; uplink/downlink and single/dual channel; carrier noise ratio

0 引言

随着社会的急速发展, 卫星已广泛应用于气象、城市规划、农业、林业等民用和军用的诸多领域^[1-4]。相对于传统的有线或无线通信方式而言, 卫星通信有以下优点: 覆盖范围较广、通信容量较大、传输距离长、地理环境空间限制弱、经济效益高等, 已成为我国远距离传输的支柱科技^[5-6]。

对于卫星通信, 充足的星地链路余量是保证其稳定传输、信号质量的前提。因此, 正确且全面的链路计算方法是至关重要的。目前对链路计算过程噪声及干扰的研究还不够细致。文献[7]提出了一种 ku 频段下的卫星通信链路计算方法, 但未考虑链路雨衰的影响; 文献[8]提出了多种干扰条件下的卫星通信链路计算模型, 但是未考虑双通信传输时互相干扰等影响。本文将对星地通信过程中各种可能存在的噪声及干扰进行研究, 包括传输损耗(自由空间传输损耗、大气衰减、雨衰、星地天线极化损耗与对准误差、天线罩损耗)和系统损耗(解调损耗、滤波及非线性损失、极化复用损耗)等, 优化链路计算方法, 精确得到链路余量结果, 为卫星的通信系统的设计和地面接收站的建设提供技术支持。同时依托吉林一号宽幅 01 系列卫星网络和长春地面站, 进行通信链路的上/下行、单/双通道的实际应用举例, 验证此方法的可行性和可靠性, 为星地的通信系统设计提供理论依据。

化损耗与对准误差、天线罩损耗)和系统损耗(解调损耗、滤波及非线性损失、极化复用损耗)等, 优化链路计算方法, 精确得到链路余量结果, 为卫星的通信系统的设计和地面接收站的建设提供技术支持。同时依托吉林一号宽幅 01 系列卫星网络和长春地面站, 进行通信链路的上/下行、单/双通道的实际应用举例, 验证此方法的可行性和可靠性, 为星地的通信系统设计提供理论依据。

1 卫星链路构成及相关参数

卫星链路计算涉及卫星发射与接收参数、地面站发射与接收参数、空间传输信道参数等。图 1 为卫星与地面站通信示意图。由地面站发送信号卫星接收的通信链路为上行, 由卫星发射信号地面站接收的通信链路为下行。

1.1 有效全向辐射功率

有效全向辐射功率(EIRP)是描述地面站或卫星系统发射能力的, 它是考量发射机输出功率 P_T 、馈线损耗 L_1 和天线辐射能力(增益 G_T)的综合指标。用分贝数表示如

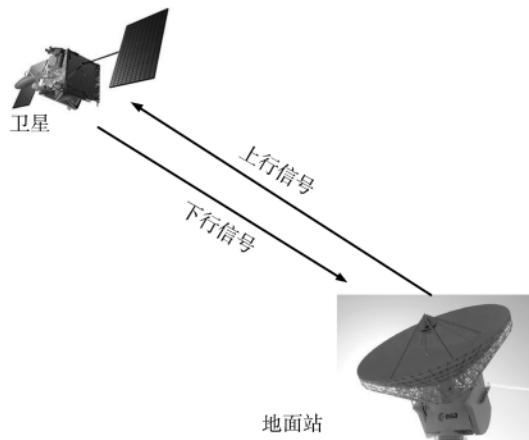


图 1 星地链路构成示意图

式(1)所示。当其他条件不变时,EIRP 值越大,星地链路余量值越大,但还应考虑整个传输系统应工作在最佳线性区,因此,合理控制 P_T 、 L_1 和 G_T 对于系统设计尤为重要。

$$[\text{EIRP}] = [P_T] + [G_T] - [L_1] \quad (1)$$

1.2 接收系统品质因数 G/T

接收系统品质因数 G/T 是衡量接收系统好坏的重要参数。 G 表示接收天线增益, T 表示接收系统的等效噪声温度,其主要部分为接收天线与低噪放的噪声温度。

1.3 门限信噪比

载噪比(C/N)是用来表示载波信号与载波噪声关系的指标,载噪比越高表示载波相对噪声越强,数据传输质量越好。上述载波信号包括传输信号和调制载波的信号,在设计链路时,为了尽可能方便地比较传输信号相对于噪声的关系,通常选用信噪比(E_b/N_0)指标,当用分贝数表示时二者关系如式(2)所示^[9]:

$$[E_b/N_0] = [C/N] + [B] - [R_b] \quad (2)$$

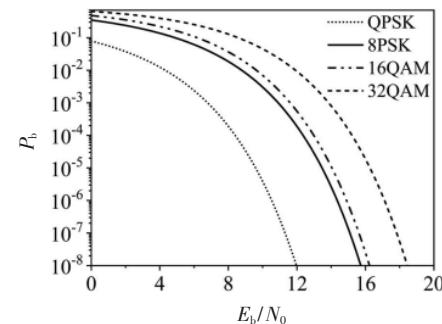
其中, B 表示载波噪声带宽, R_b 表示载波信息速率。误比特率 P_b 是表征卫星通信系统传输性能的重要指标,指在传输过程中发生差错的比特数占总比特数的比例,是一种概率表示。在二进制传输中,码元差错率即是比特差错率,而在多进制传输中码元差错率可由比特差错率得出。对于 QPSK、8PSK 和 QAM 调制方式的通信系统,误比特率 P_b 见式(3)~式(5)^[9]:

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \quad (3)$$

$$P_b = \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{3E_b}{N_0}} \times \sin \frac{\pi}{8} \quad (4)$$

$$P_b = 4 \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \times Q^2 \left(\sqrt{\frac{3 \times \log_2 M \times E_b}{(M-1) \times N_0}}\right) \quad (5)$$

其中,16QAM 调制 $M=16$,32QAM 调制 $M=32$ 。由此可见,误比特率 P_b 与信噪比 E_b/N_0 成正比关系,用 MATLAB 仿真结果如图 2 所示,当信噪比 E_b/N_0 越高时,误比特率 P_b 越小,系统的性能越优。通常在通信系统设计时,优先确定系统的调制方式及误比特率 P_b 要求,进而确定信号

图 2 多种调制方式的 P_b 随 E_b/N_0 的变化图

传输所需的最小信噪比,即门限信噪比($[E_b/N_0]_{\text{门限}}$)。

1.4 自由空间传输损耗

卫星通信的优点之一是传输距离长,也正因如此,电磁波在此过程中有着极大的衰减,占整个空间衰减的 90%以上。自由空间传输损耗与电磁波的频率 f (MHz)和传输的距离 d (km)成正比。距离 d (km)与地球半径 r (km)、卫星轨道高度 h (km)、最低发射接收仰角 α (°)成正比,根据几何关系可由式(6)给出。自由空间传输损耗 L_2 (dB)用分贝数表示由式(7)给出^[10]。

$$d = (r+h)/\cos(\alpha/57.3) \cdot \cos(\alpha/57.3 + \sin^{-1}(r \cdot \cos(\alpha/57.3)/(r+h))) \quad (6)$$

$$L_2 = 20[d] + 20[f] + 32.45 \quad (7)$$

1.5 大气吸收衰减、雨衰等其他损耗

大气中有多种气体、颗粒对不同频段的电磁波的吸收衰减是不同的,对于卫星传输的 X 波段的信号,其中主要的衰减来自于垂直高度(h_1)小于 10 km 的大气中的氧气和水汽。根据 ITU-R P.678 建议书(无线电波在大气气体中的衰减)可知,给出了多种计算模型,均可得到单位距离上大气中的氧气和水汽对电磁波的衰减量。对于 X 波段的电磁波信号,其总衰减量为 0.013 dB/km,因此当电磁波垂直穿过大气层时,衰减量约为 0.013 h_1 ,当仰角为 θ_1 时,衰减量约为 0.013 $h_1/\sin\theta_1$,可对整个弧段内的衰减量积分取均值,得到平均的大气吸收衰减 L_3 。

$$L_3 = \text{AVERAGE} \left(\int 0.013 \cdot \frac{h_1}{\sin\theta_1} d\theta_1 \right) \quad (8)$$

若在卫星数据传输过程中有降水,则也会对电磁波信号有衰减。根据 ITU-R P.838-3 建议书(预测方法中使用的雨天衰减的具体模型)可知,雨衰(γ_R)(dB/km)与降雨强度(R)(mm/h)的关系为: $\gamma_R = kR^\alpha$ 。其中 k 和 α 为信号频率和电磁波与降雨倾斜夹角(θ_2)的函数,由建议书查表可知。一般降雨时云层高度(h)不大于 5 km,则雨衰 L_4 为:

$$L_4 = \gamma_R \cdot h / \sin\theta_2 \quad (9)$$

在卫星信号传输的过程中,还会有卫星与地面站的极化误差损耗、对准误差损耗、天线罩损耗(根据地面站有无天线罩确定)等其他损耗。在接收系统处理信号时,还会有解调损耗、滤波及非线性损失、极化复用损耗等,以上这些在计算链路时不可忽略,数值可由卫星和地面

站的相关指标参数确定。

2 卫星下行链路的计算方法

2.1 单通道链路的计算方法

卫星的下行链路计算通常是将实际接收信号的信号质量(E_b/N_0)与一定条件指标下的门限信号质量($(E_b/N_0)_{\text{门限}}$)做对比,裕度值即为衡量链路设计优良的判断。载温比(C/T)是载波功率与等效噪声温度的比值,当用分贝数表示时可由 EIRP、 L 和 G/T 导出如下^[9]:

$$[C/T] = [\text{EIRP}] - [L] + [G/T] \quad (10)$$

此处 L 为卫星电磁波信号传输路径所经过的总衰减,包括自由空间传输损耗、大气吸收衰减、雨衰、极化误差损耗、对准误差损耗、天线罩损耗等。 K 为玻尔兹曼常数,当用分贝数时,载噪比(C/N)可表示为:

$$[C/N] = [C/T] - [B] - [K] \quad (11)$$

因此,由式(2)、式(10)、式(11)可知:

$$\begin{aligned} [E_b/N_0] &= [C/N] + [B] - [R_b] = [C/T] - [B] - [K] + [B] - [R_b] \\ &= [C/T] - [K] - [R_b] = [\text{EIRP}] - [L] + [G/T] - [K] - [R_b] \end{aligned} \quad (12)$$

因此,当卫星与地面站的系统参数确定时,可计算得出信号接收的信噪比($[E_b/N_0]$),其与系统解析信号的门限信噪比($[E_b/N_0]_{\text{门限}}$)做差,即为星地通信系统下行的链路余量。在理论上,余量大于 0 信号即可传输,但在工程应用中,一般认为使其大于 3 dB 可保证系统稳定工作。在此值得注意的是,数据接收处理过程中,会有系统损耗如解调损耗、滤波及非线性损失等,若数据进行纠错码处理,会有相应的编码增益,这些应在链路设计时悉数考虑。

2.2 双通道链路的计算方法

为尽可能多地在单位时间内下传更大的数据量,通常卫星会根据天线的极化复用原理进行双通道数据同时传输,因此需要考虑其中一个通道对另一个通道的干扰问题,即左旋信号的右旋分量对右旋信号和右旋信号的左旋分量对左旋信号皆为干扰(N_0),反映到信号质量上仍可用信噪比($[E_b/N_0]$)来衡量。极化隔离度(P)为天线主极化和交叉极化的差值,可以表征天线主极化的纯净度。因此需要对 2.1 节的信号信噪比进行补充。此干扰可加入到系统等效噪声里等效为其一部分,再计算出单通道的信号信噪比,根据式(13)和式(14),可推导出通信系统双通道传输时的信号质量为:

$$[(E_b/N_0)_{\text{单}}] = 10 \cdot \log(E_b/N_0) \quad (13)$$

$$[P] = 10 \cdot \log(E_b/N_0) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} [(E_b/N_0)_{\text{双}}] &= 10 \cdot \log(E_b/(N_0 + N_0)) \\ &= 10 \cdot \log\left(\frac{E_b}{E_b \cdot 10^{-\frac{[(E_b/N_0)_{\text{单}}]}{10}} + E_b \cdot 10^{-\frac{[P]}{10}}}\right) \\ &= 10 \cdot \log\left(\frac{1}{10^{-\frac{[(E_b/N_0)_{\text{单}}]}{10}} + 10^{-\frac{[P]}{10}}}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

此时计算得出的信噪比($[(E_b/N_0)_{\text{双}}]$)其与系统解析信

号的门限信噪比($[E_b/N_0]_{\text{门限}}$)做差,即为星地通信系统双通道传输条件下的链路余量。同样需考虑解调损耗、滤波及非线性损失、编码增益等,经过校正的计算方法更真实准确。

3 卫星上行链路的计算方法

卫星上行通信一般为单通道信号传输,它与卫星下行通信单通道的链路计算方法是一个互逆的过程,将发射系统和接收系统调换即可,按照上述方法可得到上行链路余量数值。但是值得注意的是,卫星通信系统接收信号的信噪比($[E_b/N_0]$)不仅要比门限信噪比($[E_b/N_0]_{\text{门限}}$)大,有余量,还应满足接收信号电平大于接收系统能解析信号的最低电平要求,二者取余量数值小者为星地上行通信系统的链路余量值。

4 应用实例

本文依托吉林一号宽幅 01 系列卫星网络和长春地面发射接收站,根据星地参数,计算星地上/下行、单/双通道的链路余量,验证此方法的可行性。表 1 分别给出了卫星的高速下行链路和上行遥控链路的详细指标参数,给后续表 2 星地下行通信单、双通道计算示例和表 3 星地上行通信链路计算示例提供输入。

表 1 星地通信系统指标参数

		参数	值
总体	(1)	轨道高度/km	535
参数	(2)	最小传输仰角/(°)	5
	(3)	卫星 EIRP/dBW	30
下行	(4)	调制方式及码速率	1.5 Gb/s(32QAM)、 1.2 Gb/s(16QAM)、 900 Mb/s(8PSK)、 600 Mb/s(QPSK)
链路	(5)	下行 P_b	$\leq 10^{-7}$
	(6)	地面站 $G/T/(dB/K)$	35
	(7)	地面站处理损失/dB	3
上行	(8)	地面站 EIRP/dBW	75
链路	(9)	调制方式及码速率	16 000 b/s(BPSK)
	(10)	上行 P_b	$\leq 10^{-6}$
	(11)	卫星 $G/T/(dB/K)$	-35
	(12)	卫星处理损失/dB	3
	(13)	上行 P_b	$\leq 10^{-6}$

在链路计算过程中,可根据参数(1)、(2)及式(6)、式(7)计算得出自由空间传输损耗 L_2 ,根据卫星参数、地面站参数及式(8)、式(9),可计算大气吸收衰减 L_3 、雨衰 L_4 ,加上地面站多项指标参数极化误差损耗、对准误差损耗、天线罩损耗(根据地面站有无天线罩确定)等统称其他损耗,本星地链路条件下预估总衰减 4 dB。在地面站处理信号时,解调损耗、滤波及非线性损失等统称为信号处理损耗,高阶调制时损耗较大,可由地面站参数获取,这也是使用高阶调制需要突破的技术难关之一。吉林一号宽幅 01 系列卫星编码方式采用标准 LDPC 编码,因此

编码增益为 6.5 dB。星地上/下行、单/双通道通信链路计算方法示例如表 2 和表 3 所示。

表 2 星地下行通信单、双通道计算示例

参数	QPSK	8PSK	16QAM	32QAM
轨道高度/km	535	535	535	535
最小传输仰角/(°)	5	5	5	5
传输频率/MHz	8 400	8 400	8 400	8 400
自由空间传输损耗/dB	-177.6	-177.6	-177.6	-177.6
卫星 EIRP/dBW	30	30	30	30
其他损耗/dB	-4	-4	-4	-4
地面站 G/T/(dB/K)	35	35	35	35
接收的信号电平/dBW	-116.6	-116.6	-116.6	-116.6
玻尔兹曼常量/(dBW/HzK)	-228.6	-228.6	-228.6	-228.6
接收端信号 C/N ₀ /dBHz	112	112	112	112
符号速率/(Mb/s)	600	900	1 200	1 500
符号速率/dB	87.8	89.5	90.8	91.8
信号处理损耗/dB	-3	-3	-4.5	-4.5
编码增益/dB	6.5	6.5	6.5	6.5
信号 E _b /N _{0(单通道)} /dBHz	27.7	26	23.2	22.2
E _b /N ₀ 门限/dBHz	11.7	14.7	15.6	19.0
单通道余量/dB	16	11.3	7.6	3.2
天线极化隔离度/dB	24	24	24	24
信号 E _b /N _{0(双通道)} /dBHz	22.8	21	18.3	17.3
双通道余量/dB	11.1	6.3	2.7	-1.7

表 3 星地上行通信链路计算示例

参数	方法一	方法二
轨道高度/km	535	535
最小传输仰角/(°)	5	5
传输频率/MHz	7 250	7 250
自由空间传输损耗/dB	-176.4	-176.4
地面站 EIRP/dBW	55	55
其他损耗/dB	-4	-4
卫星天线至接收机增益/dB	-8	--
接收的信号电平/dBW	-133.4	--
接收机灵敏度/dBW	-140	--
余量/dB	6.6	--
卫星 G/T/(dB/K)	--	-35
玻尔兹曼常量/(dBW/HzK)	--	-228.6
接收端信号 C/N ₀ /dBHz	--	68.2
符号速率/(b/s)	--	16 000
符号速率/dB	--	42.0
信号处理损耗/dB	--	-3
信号 E _b /N ₀ /dBHz	--	23.2
E _b /N ₀ 门限/dBHz	--	10.5
余量/dB	--	12.7

表 2 分别计算了卫星通信系统下行信号在单/双通道条件下的链路余量值。可见,在单通道情况下,4 种速率及调制方式数据传输余量充足,设计合理,可做常规任务需求使用。在双通道情况下,前 3 种速率及调制方式数据传输满足使用需求,但是 32QAM 的 1 500 Mb/s

速率没有余量,需重新设计,有以下几种方案可供选择:(1)增大最小传输仰角;(2)增大卫星 EIRP 或使用增益更高的编码方式;(3)选取地面站 G/T 值更大的或解调性能更优的地面站;(4)提高天线极化隔离度。前 3 种方案可同时增加单/双通道的通信余量,方案 4 单通道通信余量不变,只增加双通道通信余量。经计算,当其他条件不变时,天线极化隔离度提高到 26.8 dB 以上,32QAM 的 1 500 Mb/s 速率数据传输余量为正,可满足使用需求。

星地上行通信链路余量计算需考虑两个方面,如表 3 所示,方法一是通过电平大小计算,方法二是通过信号质量计算。若要信号稳定传输,二者皆须满足且以余量较小者为星地上行通信系统的最终链路余量值。

5 结论

本文根据卫星 X 波段通信系统链路需求,详细研究了传输过程中的各项损耗、干扰及系统指标和特性,提出了星地通信的上/下行和单/双通道的多种链路计算方法,并依托吉林一号宽幅 01 系列卫星网络和长春地面站,通过实际示例验证该计算模型的可行性。该计算方法模型可用于卫星通信系统的参数选择、信号质量链路能力的预测,对卫星通信系统的设计具有指导意义。

参考文献

- [1] 张财广,熊博莅,匡纲要.光学卫星遥感图像舰船目标检测综述[J].电波科学学报,2020,35(5):637-647.
- [2] 郭子千,郭月朋.卫星遥感技术在森林资源调查中的运用分析[J].种子科技,2020,38(18):125-126.
- [3] 盛佳慧,饶鹏.基于风云气象卫星的土壤湿度数据降尺度方法研究[J].红外与毫米波学报,2021,40(1):74-88.
- [4] 许益乔,张占月,王登林,等.军地遥感卫星联合使用问题研究[J].中国电子科学研究院学报,2021,16(1):81-86.
- [5] 张勇.浅析卫星通信的近期发展和展望[J].电子元器件与信息技术,2020,4(12):59-60.
- [6] 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.
- [7] 李子龙,娄景艺,屈晓旭.Ku 频段卫星通信链路计算[J].通信技术,2015,48(6):622-666.
- [8] 刘冠邑,张海勇,任重.干扰条件下卫星通信链路计算模型研究[J].通信技术,2018,51(10):2279-2286.
- [9] 樊昌信,曹丽娜.通信原理[M].北京:国防工业出版社,2013.
- [10] 陈振国,杨鸿文,郭文彬,等.卫星通信系统与技术[M].北京:北京邮电大学出版社,2003.

(收稿日期:2021-10-06)

作者简介:

金宇婷(1991-),通信作者,女,硕士,工程师,主要研究方向:卫星数据传输系统设计,E-mail:yuting910701@163.com。

邢斯瑞(1987-),男,硕士,副研究员,主要研究方向:卫星通信系统设计。

孙伟(1989-),男,硕士,助理研究员,主要研究方向:卫星通信系统设计。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所