

通信卫星 转发器的 主要性能参数

亚洲卫星公司 吴波洋

通信卫星转发器的主要参数为G/T、SFD与EIRP。相关参数在用户载波的链路计算和卫星通信的系统设计中起着关键作用,卫星通信工程师应对其有深入的了解。本文拟从转发器参数在链路估算中的使用、参数说明及计算方法、参数的测量与验证、参数在使用中的变化和取值比较等方面,试作简要介绍,以期广大的卫星通信用户能够选好和用好转发器资源。

1 链路估算与转发器参数

在卫星信道中传输的载波应该满足一定的载噪比要求。卫星通信系统的设计过程中,多采用链路估算手段,预估上下行载波的C/(N+I)与载波所需的最低C/N之差值,即系统余量,以便决定地面天线口径和功放输出功率等设备参数。链路估算的方法通常为,先分别求得上行和下行的C/N、C/I,再算出系统的C/(N+I),最后得到系统余量。

下行链路的C/N估算公式为,

$$\begin{aligned} C/N_D &= EIRP_S - Loss_D + G/T_{E/S} + (228.6 - BW_N) \\ &= (EIRP_{Sat} - OPBO) - Loss_D + G/T_{E/S} + (228.6 - BW_N) \end{aligned}$$

式中, EIRP_S和EIRP_{Sat}分别为载波的下行EIRP和转发器的饱和EIRP,载波的输入回退值OPBO为前两者之差, G/T_{E/S}为地球站的接收系统品质因数, Loss_D为下行传输损耗, BW_N为载波的噪声带宽。

上式表明,转发器EIRP在下行C/N中起到关键作用。由于载波EIRP受限于转发器功率分配,地面接收系统G/T值受限于天线口径,下行C/N难以提高。

上行链路的C/N估算公式为,

$$\begin{aligned} C/N_U &= EIRP_E - Loss_U + G/T_{Sat} + (228.6 - BW_N) \\ &= (PFD + Loss_U - G_0) - Loss_U + G/T_{Sat} + (228.6 - BW_N) \\ &= [(SFD_{Sat} - IPBO) + Loss_U - G_0] - Loss_U + G/T_{Sat} \\ &\quad + (228.6 - BW_N) = SFD_{Sat} - IPBO - G_0 + G/T_{Sat} \\ &\quad + (228.6 - BW_N) \end{aligned}$$

式中, PFD为载波在卫星天线口面上的通量密度, SFD_{Sat}为卫星转发器的饱和通量密度,载波的输入回退值IPBO为前两者之差, EIRP_E为载波的上行EIRP, Loss_U为总的上行传输损耗, G₀为单位面积理想天线的增益, G/T_{Sat}为卫星接收系统的品质因数。

上式表明,转发器的G/T直接影响上行C/N,而通过调整转发器SFD,可以提高上行EIRP,从而改善上行C/N。

系统C/N由上行和下行C/N共同决定。如果上下行C/N的数值相当,系统C/N将比上下行C/N低约3 dB。这时,可

以采取调低转发器 SFD 灵敏度、同时增加上行功率的手段,提高上行 C/N。当上行 C/N 远高于下行 C/N 时,系统 C/N 的最大值可以接近于下行 C/N。相应措施有利于充分发挥卫星 EIRP 和接收天线增益等性能。

2 转发器参数说明

2.1 G/T、SFD 与 EIRP

G/T 被称为 figure of merit, 即接收系统的品质因数。G/T 为接收天线增益 G 与接收系统噪声温度 T 之比值, 单位为 dB/k, 其计算公式为,

$$G/T = G_R - T_s$$

式中, G_R 为卫星天线的接收增益, T_s 为卫星接收系统的噪声温度。

饱和通量密度 SFD 的定义为, 当转发器被推到饱和和工作点时, 上行载波在接收天线口面所达到的通量密度, 单位为 dBW/m²。SFD 反映卫星转发器对上行功率的需求量, 它与 G/T 的关系为,

$$SFD = \text{constant} + \text{attn} - G/T$$

式中的 constant 为反映转发器增益的计算常数, 其数值多在 -100 与 -90 之间。constant 越小, 转发器的增益就越高; attn 为转发器的增益调整量, 它可被地面遥控改变, 用于调整 SFD 的灵敏度。用户在作链路计算时, 应向卫星公司了解相关转发器 attn 的当前设置值, 并且据此对原由图表提供的 SFD 数据作修正。

EIRP 为卫星转发器在指定方向上的辐射功率, 单位为 dBW。它为天线增益与功放输出功率之对数和, 其计算公式为,

$$EIRP = P - \text{Loss} + G_T$$

上式中, P 为功率放大器的输出功率, Loss 为功放输出端与天线馈源之间的馈线损耗, G_T 为卫星天线的发送增益。

G/T 和 SFD 反映卫星接收系统在其服务区内的性能, 这两个参数与卫星接收天线的增益线性相关。EIRP 反映转发器的下行功率, 它与卫星发送天线的增益线性相关。

卫星天线增益随天线指向与工作频率而变。天线服务区中不同地点的转发器参数各不相同。用户可以从卫星公司所提供的城市参数表或者 G/T 与 EIRP 的等值线分布图中查询各地的转发器参数。不同转发器在同一地点的参数略有不同。有的卫星公司还为用户提供特定转发器的参数。

2.2 系统噪声温度

卫星接收系统的噪声温度主要由天线和低噪声放大器的噪声

温度所构成。折算到天线馈源端的系统噪声温度的计算公式为,

$$T_s = T_a + (L_p - 1)T_1 + L_p T_e \quad (\text{dBK})$$

式中, T_a 和 T_e 分别为天线和低噪声放大器的噪声温度, L_p 为天线和放大器之间的馈线损耗, T_1 为馈线的环境温度。由于卫星天线指向温度较高的地球表面, T_a 远高于 T_e 。不过, 星上的馈线损耗较大, 上式中折算到天线馈源端的后两项噪声因子也不容小觑。

需要注意的是, 不同公司所选的系统噪声温度 T_s 可能略有出入, 而这将影响 G/T 的取值。

3 参数的测量、验证与取值

3.1 参数的测量

转发器的三个主要参数分别与卫星天线的收发增益线性相关。因此, 天线增益的测量成为求取转发器参数的关键。

卫星天线通常采用反射面阵型或者馈源阵列阵型的方法, 使服务区内的天线增益等值线图符合设计要求。经过计算机优化设计而制成的天线, 需在一定的微波近场测试条件下, 进行方向图测试, 以便验证设计和制造效果。被测天线将被安装在可旋转的天线座上, 在俯仰和方位的不同角度上作几次水平或垂直方向的扫描, 测得相关剖面的增益分布曲线。经过数学处理, 这些分别沿水平和垂直方向分布的增益曲线将被合成为一个增益分布等值线图。将平面的等值线图按照特定的卫星轨位和天线指向点, 投射到立体的地球表面上, 就能得出卫星天线在其服务区内的增益分布图。天线增益图通常可以选用几种不同的地图投影方式。

上述扫描测试、数学处理以及地图投影的过程将在不同极化的几个特定频点上重复进行, 以便产生分别对应于相关极化和频点的等值线图。经过数学处理, 可以从这几个特定极化和频点的等值线图推算出对应于每个转发器中心频率的天线增益等值线图。

由已知的接收系统噪声温度, 对天线接收增益图作线性修正, 可以得到相应的 G/T 值分布图。由已知的转发器功放输出功率和馈线损耗, 对天线发送增益图作线性修正, 可以得到相应的 EIRP 分布图。

卫星制造商向用户提供的转发器参数表中的 G/T、SFD 与 EIRP 数据, 均按各地的地理经纬度, 直接或间接取自 G/T 与 EIRP 分布图。

3.2 参数的验证

在卫星的发射和定轨过程中,天线的反射面、馈源系统和展开机构有可能遭受机械损伤和温差变形。天线增益以及G/T和EIRP等参数可能因此而被改变。为了解在轨卫星的转发器参数是否符合设计要求,卫星在发射定轨后,需对相关参数作一系列的在轨测试。

G/T、SFD与EIRP参数的在轨测试通常只测每个转发器在测试站点的具体数值,以便验证特定地点的参数是否符合设计要求。此外,还将通过连续改变卫星姿态的方式,分别在地图上的几个水平和垂直方向上测试G/T和EIRP的分布曲线。通过对比在轨数据和地面测试数据的变化趋势,可以验证在轨卫星的工作参数是否在整个服务区内符合设计要求。

一般情况下,尽管在轨测试的结果符合设计要求,供用户使用的转发器参数仍以地面测试数据为准。

3.3 参数的取值方法

各家卫星公司的转发器参数取值方法可能略有不同。

在卫星公司向用户提供的技术文件中,转发器参数的城市列表有可能采用工作在相同频段和极化的所有转发器参数中的平均数据,也可能采用最差数据。在卫星公司向潜在用户提供的宣传资料中,转发器参数的城市列表通常采用同频段转发器参数的算术平均值。

在是否考虑天线的热变形、天线指向误差、测量误差、短期增益变化、信道间的差异,以及卫星寿命末期的器件老化等因素的影响方面,不同的参数取值方法会使转发器参数产生1 dB甚至更多的差值。

不同卫星公司在各自的技术文件中所提供的干扰计算参数也不相同。干扰计算参数通常采用普遍情况估算,也有的按最坏条件估算。通过对比各家公司的链路计算表,可以发现卫星公司所用反极化干扰、邻星干扰,和交调干扰参数取值差异。干扰参数的保守取值可以确保实际效果优于链路估算。

4 使用中的参数变化

4.1 主备份切换与波束切换

为了提高系统的可靠性,星上的主要通信部件采用主备份设计。为了使系统能适应不同的用户需求,部分卫星的转发器信道可在不同天线波束或者不同频段之间进行切换。主备用部件切换与波束频段切换需要引入额外的开关和相应的插入损耗,切换前后的转发器参数可能会有零点几dB的改变。

4.2 器件老化

下行EIRP大致为功放输出功率与天线发送增益之和。转发器的功率放大器将随使用时间的推移而逐渐老化,放大器的输出功率也将随之而降低。卫星上的电能来自太阳能电池板和蓄电池。电池板的光电转换效率和蓄电池的充放电效率都会随时间的推移而逐渐降低。在卫星工作寿命末期,电源供应不足也可能限制功放的输出功率。卫星寿命末期的下行EIRP将因此而降低。

4.3 卫星的姿态变化

通信卫星的在轨姿态变化将改变星上天线的指向,从而改变与天线覆盖区有关的性能参数。三轴稳定卫星采用飞行器所用的俯仰轴(pitch)、滚动轴(roll)和偏航轴(yaw)描述卫星的在轨姿态。当星体分别在三个轴上产生偏转时,天线的覆盖区将相应作东西、南北和旋转变换。服务区边缘的参数受卫星姿态变化的影响通常远大于波束中心。卫星上的姿态控制系统会自动对星体的对地姿态作微调,使之尽可能保持不变。

4.4 卫星的轨位保持精度

静止卫星的轨道位置会受各种自然力的影响而产生漂移。卫星测控站将定期对卫星作南北方向和东西方向的机动控制,以使卫星的轨道漂移保持在一定的范围内。静止通信卫星的轨位保持精度要求通常为 ± 0.1 度。亚太地区的多数卫星公司都将轨位保持精度提高到 ± 0.05 度。

当卫星漂离地面天线的波束中心时,转发器参数将因为地面天线的增益下降而不能被充分利用。表1列出了不同口径的C和Ku频段地面天线在卫星漂移0.05度和0.1度时的增益下降量。表中的数据表明,卫星漂移0.1度时的地面天线增益下降量数倍于仅漂移0.05度时,高频段和大口径天线所受影响远

表1 不同口径地面天线的增益下降量

	0.05 deg					0.1 deg				
	1.8m	2.4m	3m	4.5m	6.2m	1.8m	2.4m	3m	4.5m	6.2m
4.2 GHz	0.00	0.01	0.01	0.02	0.05	0.02	0.03	0.04	0.10	0.19
6.425 GHz	0.01	0.02	0.03	0.06	0.11	0.04	0.07	0.10	0.23	0.44
12.75 GHz	0.03	0.06	0.09	0.21	0.40	0.14	0.24	0.38	0.84	1.60
14.5 GHz	0.04	0.07	0.10	0.23	0.43	0.15	0.26	0.41	0.91	1.74

大于低频段和小口径天线。相关数据可用于估算卫星轨位漂移对转发器参数的影响。数据对比证明了提高轨位保持精度的必要性。

5 比较转发器参数时的考虑因素

5.1 转发器参数的取值

在比较转发器参数时应该注意到,在卫星的同一个频段和极化上,不同转发器的参数略有不同;在卫星设计制造过程的不同阶段,前后参数略有不同;在卫星工作寿命中的不同阶段,转发器参数会有变化;此外,不同卫星公司的参数取值原则也可能有差异。

就目前由美国和欧洲制造的通信卫星而言,所能提供的转发器性能相差不多。卫星和转发器的参数不同主要因设计要求而异。比较参数时应考虑服务区的覆盖面和等值线分布等多加考虑。一般说来,天线口径和增益、以及功放输出功率是硬指标,而系统噪声温度和馈线损耗则为软指标。相关数据的选择处理都将影响转发器参数的取值。

5.2 分配给用户载波的 EIRP

带宽和功率同为转发器的重要资源。对于用户而言,关心的应该是载波 EIRP,或为单位带宽的 EIRP,而非转发器 EIRP。载波功率在转发器功率中所占的比例,通常体现在载波的输出回退量上。载波输出回退为转发器饱和输出功率与载波下行功率之差值。在同样的转发器 EIRP 条件下,载波的输出回退越小,载波所占功率的比例就越大,载波的 EIRP 也就越高。

当载波在转发器中的功率占用率与带宽占用率相平衡时,载波输出回退的计算公式为,

$$OPBO_C = OPBO_{Xpd} + 10 \lg(BW_{Xpd} / BW_C)$$

式中, $OPBO_{Xpd}$ 为整个转发器的线性输出回退量, $OPBO_C$ 为载波的输出回退量, BW_C 和 BW_{Xpd} 分别为载波和转发器的带宽。

上式表明,转发器的线性输出回退量和转发器带宽都直接影响到载波的 EIRP 值。

转发器的线性输出回退量为转发器饱和功率与线性功率(转发器中所有载波在线性工作条件下的总输出功率)之差值。线性输出回退量越小,转发器中的载波可被分配到的功率就越大。装有线性器的转发器的线性输出回退量较低,载波所分配得到的 EIRP 可以比普通转发器中的高约 1.5 dB。此外,同一个载波在不同带宽的转发器中的分配功率也不同。工作在带

宽为 36 MHz 的转发器中的载波 EIRP 可比 72 MHz 转发器的高约 3 dB。

5.3 邻星协调对转发器参数的限制

为了减轻对邻星载波的干扰,卫星公司可能已在邻星协调中作出承诺,限制本系统内的上、下行天线口径和载波功率谱密度,从而使转发器不能在实际使用中充分发挥其设计性能。此外,当同频段同服务区的邻星系统有小口径上行天线、或者本系统有小口径接收天线时,如果对来自邻星的上行和下行干扰估计不足,也将降低转发器的载波干扰比,从而使实际使用中的系统余量低于链路估算值。

5.4 天线仰角的考虑

地面天线的仰角极低时,地面热噪声将进入天线的近旁瓣甚至主瓣,从而提高天线噪声温度,降低地面系统的 G/T 值。天线仰角低,从地球站到卫星的传输距离长,载波的自由空间损耗也较大。仰角低时,载波穿越降雨区的距离也较长, Ku 频段载波在降雨时所受的衰耗和噪声增量将相应增大。这些因素都可能抵消掉部分的转发器 EIRP。

5.5 卫星在轨寿命的考虑

卫星在轨工作 6 到 12 个月后,星上的各个分系统都经过测试,日渐增加的用户载波使系统进入半负荷甚至满负荷状态,电源系统也经过星蚀期间的充放电考验。这时的卫星已渡过发射后的风险期,性能参数也最为稳定。

随着在轨工作年限的增加,星上的器件逐渐老化,转发器的性能参数也可能随卫星剩余工作寿命的缩短而变差。

5.6 管理与服务的影响

用户通过地面天线而实际用到的转发器参数会受卫星的轨位保持精度和天线指向精度的影响。在每年春分和秋分前后的星蚀期间,需要由星上蓄电池配合太阳能电池板提供电能。卫星的供电能力和转发器的输出功率在某种程度上取决于蓄电池的充放电控制。由此可见,卫星测控也将间接影响转发器的性能参数。

严格的用户设备及载波管理可以避免和减少干扰,从而更好地发挥转发器的性能。良好的售前和售后服务也可以帮助用户合理设计卫星通信系统,从而充分利用转发器的性能。由此可见,选择好的卫星公司,或许与选择好的卫星转发器同等重要。