

基于共频带传输的卫星通信系统功率控制仿真分析

张金贵¹, 潘申富¹, 王 静², 韩明钢¹

(1. 中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050081;

2. 河北科技大学 信息科学与工程学院, 石家庄 050018)

摘要: 对基于共频带传输的卫星通信系统的功率控制进行了研究, 比较了不同种类的卫星、转发器、通信频段的特点, 搭载 Ku 频段或 C 频段同步卫星的透明卫星转发器可以进行共频带通信; 仿真分析了降雨对系统上下行链路的影响, 天线口径越大, 受下行雨衰影响越小; 分析了传统功率控制方法不适用于基于共频带传输卫星通信系统; 通过链路计算及推导, 设计了通过控制目标用户上行链路信噪比的方法, 限制目标用户信号占用卫星的最大功率; 系统链路建立后, 利用闭环功率控制, 补偿上下行链路雨衰; 并对功率控制方法进行了仿真分析。

关键词: 共频带传输; 功率控制; 雨衰; 直接序列扩频; 卫星通信; 目标用户

Simulation and Analysis of Power Control of Satellite Communication Systems Based on Common Frequency Transmission

ZHANG Jingui¹, PAN Shenfu¹, WANG Jing², HAN Mingyue¹

(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

2. Hebei University of Science and Technology School of Information Science and Engineering, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: To address the characteristics of different types of satellites, transponders, communication frequency bands, research on the power control of satellite communication system base on common frequency transmission is carried out. The transparent satellite transponder equipped with Ku band and C band synchronous satellite can achieve co-band communication, and the influence of rainfall on the system's up link and down link is simulated and analyzed. The larger antenna aperture, the less affected it is by downlink rain attention, and traditional power control methods are not suitable for common frequency band transmission satellite systems; Through link calculation and derivation, a method for controlling the signal-to-noise ratio of the target user's uplink and downlink is designed, limiting the occupancy of satellite maximum power for target user's signals; After the system link is built, closed-loop power control is used to compensate rain attenuation in uplink and downlink and simulate and analyze the power control method.

Keywords: common frequency transmission; power control; rain attention; direct sequence spread spectrum; satellite communication; target user

0 引言

卫星通信具有通信距离远、覆盖范围广、通信成本低、通信容量大、支持业务种类多、受地面环境影响小等优点, 可以满足山区、海洋、沙漠等其他通信方式无法覆盖区域的通信需求。卫星通信在抗震救灾、航空航

天等民用通信领域和武器平台等军用通信领域得到广泛使用。

随着卫星通信需求的越来越多, 对卫星资源的竞争也日趋激烈, 出现了没有卫星资源可用的情况。因此需要研究提高卫星资源的利用率, 甚至在没有卫星资源的条件下, 依托空中可视卫星进行低速率应急卫星通信。

收稿日期:2024-01-23; 修回日期:2024-03-12。

作者简介:张金贵(1980-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:张金贵,潘申富,王 静,等. 基于共频带传输的卫星通信系统功率控制仿真分析[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4):109-114.

基于共频带传输的卫星通信系统通过控制通信信号的功率建立可靠通信链路,实现低速率卫星通信^[1-2]。

1 共频带传输原理

共频带传输是指多个用户的发射信号在时域和频域完全重叠或部分重叠^[3]。通过直接序列扩频技术将目标用户发送信号在频域展开,使得信号的功率谱密度低于噪声功率谱密度,与卫星转发器上的一个或多个其他用户信号共频带传输^[4]。

地球静止轨道卫星波束范围较大,能够覆盖我国大部分疆域,可以保证任何区域内都能实施共频带传输通信,卫星位置稳定,避免了寻星问题。而低轨道卫星和中轨道卫星虽然有较小的传输延迟,但由于和地球自转周期不同,导致上空出现较长时间没有卫星的情况。与其相比只有地球静止轨道卫星能够实现全时对所有区域覆盖,它产生的传输延迟虽然稍大,但与信号搜寻低轨道卫星或地球静止轨道卫星所耗费时间相比,这种传输延迟就显得微不足道。因此搭载地球静止轨道卫星进行共频带通信^[5]。

一个卫星上搭载多个卫星通信有效载荷,即卫星转发器。卫星转发器根据信号处理方式分为透明转发器、处理转发器。透明转发器只对接收信号变频、放大等不做解调处理;处理转发器除对信号进行放大和频率变换外,还可进行基带信号处理、基带交换、调制变换、波束交链、转发器交链等功能。根据共频带传输基本原理可知,要想将发射信号与正常卫星信号上进行共频带通信,就必须保证在信号到达卫星后,只是单纯地滤波、放大后进行透明转发,而不进行星上处理。若是选择星上处理式转发器,有可能将用于共频传输的信号经过处理后过滤去除,不能完成共频带通信信号的传递^[6]。

卫星转发器的通信频段主要有 C、Ku、Ka 等频段,通过分布情况看,C 频段转发器的波束范围大,有的波束可以跨国覆盖,因此 C 频段转发器适用于国际远距离或洲际远距离业务。Ku 频段转发器的波束一般可以覆盖一个区域或一个国家,因此 Ku 频段适用于国内业务。Ka 频段的转发器大多为点波束,波束覆盖范围较小,需要星上铰链处理,不满足共频带通信需求。同时,我国处于亚热带地区降雨量较多,因此也需考虑雨衰对卫星信号的影响。通过研究发现雨衰的大小取决于雨滴半径和电磁波波长的比值;Ku 频段电磁波的波长与雨滴大小接近,受雨衰的影响较大,一般在 10 dB 以内。C 频段电磁波波长较长,与雨滴大小相差甚远,受雨衰的影响较小,雨衰影响可以忽略。综合 C 频段和 Ku 频段卫星转发器适于共频带传输通信,虽然 Ku 频段受雨衰影响较大,但通过功率控制可以弥补雨衰的影响^[7]。

综上所述,基于共频带传输的卫星通信系统需要满

足如下条件,静止轨道卫星、透明卫星转发器、Ku 或 C 通信频段;通过直接序列扩频技术降低目标用户信号的功率谱密度。

2 传统功率控制方法

卫星通信系统中,为了有效对抗环境雨衰的变化所导致的信道传输特性变化,采用上行功率控制 UPC (Up Power Control), 该方法是功率控制最简单、经济有效的手段之一,使信号到达卫星后的功率值在满足链路可靠传输要求的有效范围之内。工程上常用上行链路功率控制有开环、闭环和反馈环 3 种方式^[8-9]。

2.1 开环功率控制

开环功率控制的思路是利用卫星的特点对上行链路的衰减进行估算,通过对信标的衰减计算出上行链路的信号衰减。首先在较为理想的环境下,即晴天条件下估算出信标参考值,假设此种环境下信标不受雨衰等影响。降雨条件下,实时估计信标功率值,信标晴天功率与雨天功率的差即为雨衰,通过调整上行链路衰减器补偿上行雨衰。开环功率控制是国内比较常用雨衰补偿方法,通过信标估计进行开环的功率控制,这是系统中最简单有效的方法^[10-11]。图 1 给出了开环功率控制系统框图。

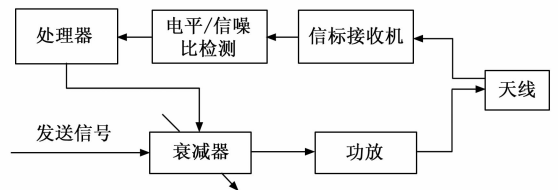


图 1 开环功率控制系统框图

卫星会不断发射信标信号,其目的是用于地面站进行对星处理,所以可以测量信标信号的功率,通过频率衰减之间的关系,进行相应的折算用于估计通信信号衰减情况。不同频率之间的雨衰变换有很多种方法,根据 ITU-R 中所给出的频率变换公式:

$$\frac{A_u}{A_d} = \frac{\varphi(f_u)}{\varphi(f_d)}$$

其中:

$$\varphi(f) = \frac{f^{1.72}}{1 + 3 \times 10^{-7} \cdot f^{3.44}}$$

以上两式适用于 7~50 GHz 的频率范围,Ku 频段 f_u 和 f_d 分别为 14 GHz 和 12 GHz。

2.2 闭环功率控制

闭环功率控制是指中心站利用通过转发器转发回来的信号,进行上行链路的信号衰减估计,相对于利用信标进行折算的衰减进行功率控制的方法,省去了额外接收信标信号的信标接收机,只需要将信号单独分出一路

计算信号的信噪比,再与晴天时的测量值进行对比,对上行链路进行补偿,控制发射功率达到补偿的目的,如图2所示。该技术首先需要知道下行信号的衰减值,然后折算出相应频段上行链路的衰减值,但是随着雨衰程度的变化,需要知道上下行频率衰减的折算关系,然后进行即时转化进行补偿^[12-13]。

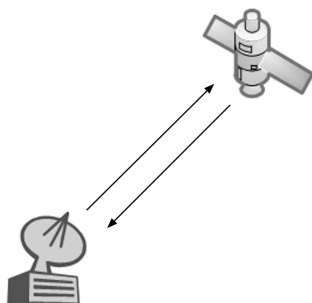


图2 闭环功率控制

从实现复杂度来说开环方案比较简单,闭环功率控制对雨衰的补偿更准确,涉及的设备也比较少,但是本站能否接收到卫星转发器的载波,与卫星通信系统的结构有关,因此闭环功率控制的使用是受一定条件限制的。

2.3 反馈环功率控制技术

反馈环功率控制主要是构建中心站与远端站之间的交互机制,远端站发送接收信号的电平或者信噪比至中心站,然后中心站进行决策,通过控制信道,通知远端站进行功率调节或者远端站自行进行决策,用以补偿上行链路的衰减^[14]。这种机制控制精度比较高,但是系统的控制与设备代价高,需要考虑整个网络的特性,资源分配通过网管中心统一调配,图3给出了反馈环功率控制技术。

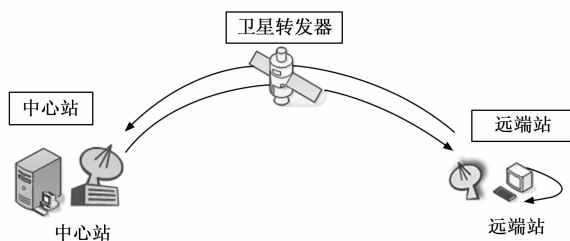


图3 反馈环功率控制技术框图

传统的功率控制方法主要考虑地球站接收信号电平或信噪比,没有考虑目标用户信号是否超额占用卫星功率,导致目标用户信号对转发器其他用户信号的影响增大。

3 雨衰对共频带卫星通信系统影响

降雨是一种普遍存在的现象,所有无线电信号在传播过程中遇到降雨,必然会受到降雨的影响,只是通信

频段不同,受降雨影响的程度不同。如果在卫星通信信号传输区域发生降雨,雨滴会吸收信号的功率,并且也会导致散射现象,从而导致信号功率衰减。若降雨影响严重,还会导致信号在传播过程中出现去极化效应。受雨衰的影响,信号在传播过程中降低了信号质量,从而降低了系统的可用度。因此卫星通信系统在使用过程中必须考虑降雨的影响。雨点大小直接影响雨衰的强度,如果信号波长相对雨点直径较大,散射衰减影响较大;如果信号波长相对雨点直径较小,吸收损耗影响较大。无论散射还是吸收损耗起主要作用,信号在其传播方向上都呈现出衰减趋势。并且,信号波长同雨点直径数值越接近,雨衰影响就会越明显,信号功率衰减便会越大。

卫星通信系统的主要通信频率有C频段4~6 GHz、Ku频段12~14 GHz、Ka频段30~40 GHz,通信频段越高信号波长与雨点直径越接近,雨衰影响越大,即信号功率在传播工程中的衰减越大。工程上,一般雨衰对C频段的影响可以忽略不计,中雨区上行链路的衰减为1 dB左右,下行衰减仅为0.4 dB左右,即使是暴雨区上行链路总衰减也仅为1 dB左右。雨衰对10 GHz以上信号影响比较明显,在做链路计算时需要考虑雨衰的影响,对于Ku频段卫星通信系统,小雨引起的链路衰减1 dB左右,中雨引起的链路衰减5 dB左右,大到暴雨引起的链路衰减10 dB以上^[15-17]。

降雨引起信号功率衰减的同时,还会导致天线接收信号的能力下降。原因是降雨会产生热噪声,对接收天线的输入端产生影响,等效为天线热噪声,主要表现为天线的G/T值降低,接收信号的信噪比降低。工程上,当雨衰增加1 dB,热噪声温度会相应增加57 K。降雨引起热噪声的影响随着天线所在纬度降低而逐渐减小,因为信号从降雨区穿过的路径越短,降雨所导致的信号衰减现象就会越小。而热噪声温度增幅会随着雨衰的降低而减小^[18-19]。

4 共频带传输卫星通信系统功率控制计算

如图4所示,共频带传输卫星通信系统主要由本端地球站、远端地球站等组成。通过控制各地球站输出目标用户信号的功率不超额占用卫星功率,降低目标用户信号对其他用户信号的影响,抑制雨衰对链路可靠性的影响。

4.1 目标用户信号占用卫星最大功率

在基于共频传输的卫星通信系统中,目标用户信号与多个其他用户信号叠加在一起通信,其它用户信号可以视为目标用户信号的干扰信号;目标用户信号的功率明显小于其它用户信号总功率,目标用户信号与信道原有的热噪声混淆在一起,相当于是增加了链路信道的热噪声功率,造成其他用户信号信噪比恶化。

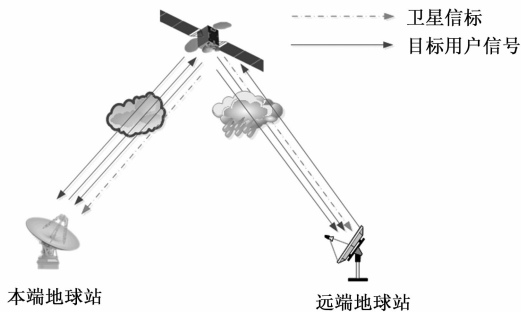


图 4 基于共频带传输的卫星通信系统组成

为控制目标用户信号对其他用户信号的影响，要求地面任意口径天线接收目标用户信号后，地球站接收机底噪抬高小于 λ dB，即目标用户信号对其他用户信号的影响小于 λ dB。理论计算，通过控制上行信噪比，可以满足上述要求，具体推导过程如下。

基于共频带传输的卫星通信系统中地球站发射目标用户信号，则卫星接收目标用户信号的上行载噪比^[20-21]可表示为：

$$\left[\frac{C}{N_0}\right]_U = [EIRP_{DS}] - [L_U] + \left[\frac{G}{T}\right]_s - [k] \quad (1)$$

地面天线接收目标用户信号的下行载噪比^[22-23]为：

$$\left[\frac{C}{N_0}\right]_D = [EIRP_{DS}] - [L_U] + [G_s] - [L_D] + \left[\frac{G}{T}\right]_E - [k] \quad (2)$$

目标用户信号总的接收载噪比可表示为：

$$(10^{[C/N_0]_{DS}/10})^{-1} = (10^{[C/N_0]_U/10})^{-1} + (10^{[C/N_0]_D/10})^{-1} \quad (3)$$

其中：

$$L_i = \left(\frac{4\pi d}{\lambda_i}\right)^2 = \left(\frac{4\pi f_i d}{c}\right)^2 \quad (i = U, D)$$

$$[G_s] = [EIRP_{ss}] - [SFD] -$$

$$[BO_o] + [BO_i] + 10\lg(4\pi/\lambda^2)$$

$$d = 42164.6 \times [1.023 - 0.302\cos(\varphi_1 - \varphi_0)\cos\theta_0]$$

式中， $[*]$ 时为用 dB 表示的数值。 $EIRP_{DS}$ 为目标用户信号的发射功率（天线出口）， L_U 为上行链路的损耗， L_D 为下行链路的损耗， λ_U 为上行链路波长， λ_D 为下行链路波长， f_U 为上行链路频率， f_D 为下行链路频率， d 为地球站距卫星的距离， φ_1 为卫星星下点的经度， φ_0 和 θ_0 分别为地球站的经度和纬度。 $(G/T)_s$ 为卫星接收品质因数， $\left(\frac{G}{T}\right)_E$ 为目标用户地球站的品质因数。 BO_i 为转发器的输入补偿， BO_o 为转发器的输出补偿， SFD 为转发器的饱和通量密度， k 为波尔兹曼常数，为 -228.6 dB/K。 G_s 为卫星转发器增益，指的是从卫星天线入口经过变频器和放大器后到卫星天线出口的品质增益。

根据目标用户信号的带宽，可以计算得到目标用户

信号上、下行链路的载噪比 $(C_0/N_0)_U$ 、 $(C_0/N_0)_D$ 及目标用户信号总的载噪比 $(C_0/N_0)_{DS}$ ，这样就可以得到目标用户信号对转发器其他用户信号的影响 λ (dB) 为：

$$[\lambda] = 10\lg(1 + 10^{[C_0/N_0]_{DS}/10}) \quad (4)$$

实际上，由于接收站的天线口径不同，目标用户信号对转发器其他用户信号的影响也不同。由于难以知道转发器其他用户信号接收站的站型，为了有统一的标准来评价，可以等效到星上来研究，这样就不需要考虑接收站的站型。

因为公式 (3) 可得：

$$(10^{[C/N_0]_{DS}/10})^{-1} > (10^{[C/N_0]_U/10})^{-1} \quad (5)$$

$$\left[\frac{C}{N_0}\right]_{DS} < \left[\frac{C}{N_0}\right]_U \quad (6)$$

等效为：

$$[\lambda] = 10\lg(1 + 10^{[C_0/N_0]_{DS}/10}) \leq 10\lg(1 + 10^{[C_0/N_0]_U/10}) \quad (7)$$

由式 (7) 可以看到，如果目标用户信号对转发器其他用户信号的影响不大于 λ dB，则任意口径天线的地面站接收转发器其他用户信号，其信噪比损失一定小于 λ dB。

根据上述的推导，为保证该约束条件，可要求目标用户信号导致的卫星接收转发器其他信噪比恶化小于 λ dB。由式 (7) 可知，目标用户信号的上行载噪比的上限为：

$$\left[\frac{C_0}{N_0}\right]_{U-MAX} \leq 10\lg(10^{[\lambda]/10} - 1)$$

综上所述基于共频带传输的卫星通信系统，通过控制目标用户信号的上行信噪比，控制目标用户信号占用卫星最大功率。

4.2 幅频特性补偿

Ku 频段卫星通信系统的频段范围为 500 MHz，带内幅频特性波动达 ± 3 dB，为了准确控制地球站的发射功率，需要标定上、下行链路在 Ku 频段范围内射频通道的增益，并进行补偿。具体方法如下：

上行通道增益是指地球站终端输出口至天线出口通道增益，包括天线发射增益、线损、功放增益、分合路器引起的插损和波导损耗等。下行通道增益是指地面终端输入口至天线入口通道增益，包括天线接收增益、线损、接收机增益、分合路器引起的插损和波导损耗等。

在整个 Ku 频带范围内，以 50 MHz 为步进测量 10 个不同频点处的通道增益值，依据卫星转发器中心频率与 10 个标定频率的频率偏差，选择频率偏差最小的频率处的发射接收通道增益作为实际通道增益。

4.3 功率控制方法

4.3.1 占用卫星最大功率标定

本端地球站依据卫星 G/T 值，上行信噪比 $[C_0/N_0]$

$N_0]_U$; 计算目标用户信号最大发射功率:

$$EIRP = [C_0/N_0]_U + L_U - K - G/T_S + 10 * \text{LOG}(BW_{DS})$$

其中: L_U 为上行链路损耗, G/T_S 为本端地球站所在区域卫星的 G/T 值, K 为泊尔茨曼常数, BW_{DS} 为目标用户信号带宽。

在无降雨条件下, 本端地球站自发自收本站目标信号, 估计目标信号功率; 本端地球站比较并记录目标用户信号功率和信标功率的差 μ 。

4.3.2 功率控制

本端地球站以最大发射功率发射目标用户信号;

本端地球站实时估计信标功率、目标用户信号功率, 实时比较信标功率与目标用户信号功率的差 Δ_{b-s} ;

远端地球站收到本端地球站信号后, 将接收本端地球站信号的信噪比 E_b/N_0 上报本端地球站;

本端地球站将对端地球站接收目标用户信号的信噪比 E_b/N_0 与接收门限 E_b/N_{0th} 进行比较, 如果信噪比大于接收门限, 向下调整本端地球站的发射功率; 反之, 向上调整本端地球站的发射功率。假设 E_b/N_0 与 E_b/N_{0th} 的差值为 Δ_{E_b/N_0} , 步进值分界上限 B_T , 步进值分界下限 B_B , 本端地球站的功率调整量为 Δ_P , 具体调整过程如下:

如果 $|\Delta_{E_b/N_0}| > B_T$, $\Delta_{E_b/N_0} > 0$; 则 $\Delta_P = -B_T$;

如果 $|\Delta_{E_b/N_0}| > B_T$, $\Delta_{E_b/N_0} < 0$; 则 $\Delta_P = B_T$;

如果 $B_T \geq \Delta_{E_b/N_0} \geq B_B$; 则 $\Delta_P = -B_B$;

如果 $-B_B \geq \Delta_{E_b/N_0} \geq -B_T$; 则 $\Delta_P = B_B$;

其他情况下 $\Delta_P = E_b/N_0 - E_b/N_{0th}$ 。

在功率调整过程中, 信标功率与目标用户信号功率的差 Δ_{b-s} 满足: $\Delta_{b-s} \leq \mu$;

上限 B_T 和下限 B_B 可以根据实际情况调整。

该功率控制方法的优点是通过对目标用户信号功率与信标功率的相对差, 限制目标用户信号占用卫星功率, 避免了发射机、接收机等设备的增益随温度变化导致系统超额占用卫星功率控制问题; 降低了工程应用的复杂度。

5 仿真结果分析

5.1 降雨对共频带卫星通信系统影响

C 频段卫星通信系统受雨衰影响可以忽略, 因此不做仿真分析, 针对雨衰对 Ku 频段共频带卫星通信系统的影响进行仿真分析。信息速率 2.4 kbps, 扩频带宽 36 MHz, 上行雨衰范围 0~20 dB; 下行雨衰范围 0~20 dB, 地球站天线口径 2.4 m、0.5 m。

上行链路存在雨衰时, 基于共频传输的卫星通信系统目标用户信号接收性能如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 随着上行链路雨衰增大, 基于共频传输的卫星通信系统的目标用户信号接收性能近似

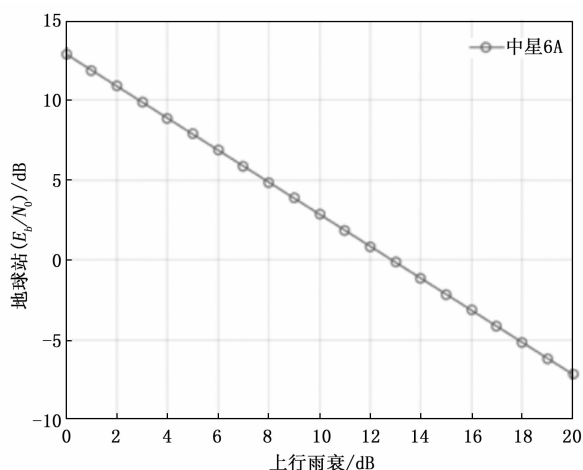


图 5 上行雨衰影响

呈线性降低。因为上行雨衰会导致上行链路接收信噪比、下行链路接收信噪比同时减小相同的量, 因此目标用户信号接收信噪比会线性减小。

下行链路存在雨衰时, 基于共频传输的卫星通信系统中目标用户信号接收性能如图 6 所示。

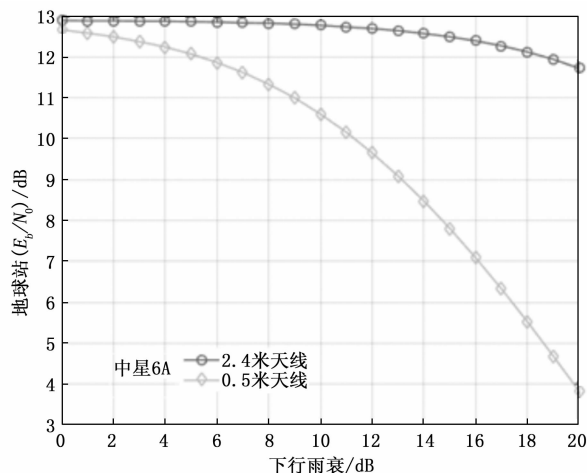


图 6 下行雨衰影响

从图 6 中可以看出, 2.4 m 天线时, 随着下行链路雨衰增大, 基于共频传输的卫星通信系统中目标用户信号的接收性能降低较少约 1.5 dB。因为, 下行雨衰不但导致目标用户信号接收功率降低, 同时导致转发器其他用户信号接收功率降低, 2.4 m 天线接收能力强, 接收的转发器其他用户信号功率大, 转发器其他用户信号是决定下行链路接收信噪比的主要因素, 因此目标用户信号的接收信噪比降低较少。0.5 m 天线接收能力弱, 接收的转发器其他用户信号功率小, 转发器其他用户信号和热噪声都是决定下行链路接收信噪比的因素, 下行雨衰虽然导致目标用户信号接收功率和转发器其他用户信号接收功率都降低, 但系统噪声功率基本不变, 因此目标用户信号的接收信噪比随下行雨衰增加而明显降

低, 降雨导致接收性能损失达 10 dB。

5.2 功率控制仿真

目标用户信号仿真条件信息速率 2.4 kbps, 扩频带宽 36 MHz, 地球站天线口径 2.4 m, 功率控制的精度 0.2 dB, 解调门限 $E_b/N_{0th} = 6.5$ dB。系统抗雨衰能力的大小与地球站的发射能力有关, 对功率控制方法验证无影响, 因此选择上行雨衰值为 5 dB、下行雨衰值为 4 dB进行仿真, 仿真结果如图 7 所示。

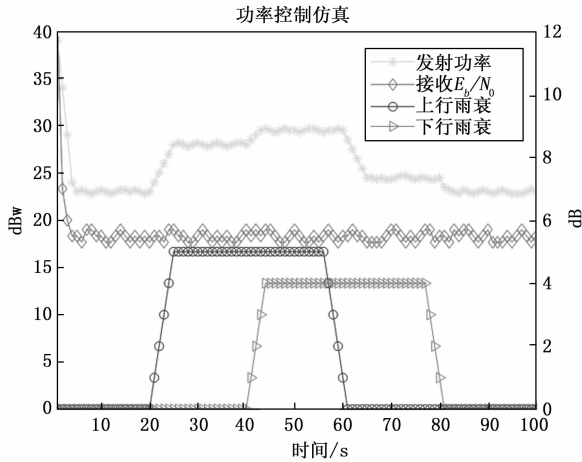


图 7 功率控制仿真

从图 7 中可以看出仅上行雨衰 5 dB 时, 目标用户信号的发射功率的增大 5 dB; 上行雨衰 5 dB 且下行雨衰 4 dB 时, 目标用户信号的发射功率增大 5.8 dB; 仅下行雨衰都为 4 dB 时, 目标用户信号的发射功率的增大 0.8 dB。在功率控制过程中, 上下行链路雨衰目标用户信号的 E_b/N_0 始终在 5.5 dB 左右波动, 满足链路可靠性需求。 E_b/N_0 的波动幅度 0.2 dB, 与高斯白噪声的分布特性及数字信噪比估计的精度有关。

6 结束语

本文介绍了基于共频带传输的卫星通信系统的基本原理, 仿真分析了降雨对共频带传输卫星通信系统的影响, 研究了传统功率控制方法应用于基于共频带传输卫星通信系统的不足之处, 提出了一种适用于基于共频带传输的卫星通信系统功率控制方法。该方法一方面可以补偿上下行链路雨衰, 保证系统可靠建链; 另一方面可以控制系统上行功率, 避免目标用户信号对转发器其他用户信号的影响。该功率控制方法的研究有利于基于共频带传输卫星通信系统的推广应用。基于共频带传输的卫星通信系统具有较强的抗干扰能力、抗截获能力, 因此可以应用于航天测控、无人机前向控制等对安全性要求较高的场合。

参考文献:

[1] 吕子平, 梁 鹏, 陈正君. 卫星移动通信发展现状及趋势

[J]. 卫星应用, 2016 (1): 48-55.

- [2] 万佑红, 王锁萍. 基于最优控制的 DS-CDMA 系统功率控制 [J]. 电路与系统学报, 2009, 14 (4): 87-91.
- [3] 张冬英, 田红心. 一种卫星信道叠加通信的方法及设计 [J]. 空间电子技术, 2007, 2 (1): 57-65.
- [4] 王立功. DS-CDMA 卫星通信系统关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [5] 赵 鸿, 卿朝进, 查光明. CDMA 系统容量优化 [J]. 移动通信, 2006, 2 (1): 88-91.
- [6] 张邦宁, 张 健, 郭道省. 应用 DS 扩频信号的卫星重叠通信研究 [J]. 通信学报, 2005, 26 (5): 57-62.
- [7] 王 鹏, 赵 宇, 曹达仲. 多载波 CDMA 容量的研究 [J]. 电子与信息学报, 2007, (29) 1: 169-173.
- [8] 李斌成, 李 影. 一种 FDMA-DAMA 卫星通信网功率控制方案 [J]. 无线电工程, 2016, 46 (5): 75-79.
- [9] 陈 鹏, 吴成杰, 朱俊清, 等. 卫星通信系统中功率控制的设计分析 [J]. 数字通信史, 2022 (3): 66-68.
- [10] 吴必旗, 宋 颖. 卫星通信系统中功率控制的设计分析 [J]. 无线互联科, 2020, 17 (19): 9-10.
- [11] 谢德芳, 翁木云, 郭兴阳. Ka 频段卫星上行链路开环功率控制算法研究 [J]. 空军工程大学学报, 2002, 3 (1): 39-42.
- [12] 王 喜, 朱小流, 廖晓谈. 卫星通信系统中的功率控制技术 [J]. 通信与广播电视, 2009 (1): 1-4.
- [13] GAO Y, ZHANG X, YANG D. A novel power control algorithm on the reverse link of CDMA systems [C] // IEEE 65th Vehicular Technology Conference, 2007, 15 (3): 2832-2836.
- [14] EI-OSERY A, ABDALLAH C. Distributed power control in CDMA cellular systems [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42 (4): 152-159.
- [15] 郝学坤, 张小来, 李文铎. 卫星通信链路中的雨衰动态特性分析 [J]. 无线电工程, 2006, 36 (10): 54-55.
- [16] 张俊祥, 崔爱红, 梁冀生. 降雨对卫星链路的影响分析 [J]. 无线电工程, 2005, 35 (12): 11-13.
- [17] 柳长源, 杨 龙, 卢 迪. 降雨衰减对移动卫星系统通信的影响及补偿 [J]. 信息技术, 2004, 6 (28): 19-20.
- [18] 于 森, 康 健. Ka 频段卫星通信系统雨衰混合补偿算法 [J]. 吉林大学学报, 2015 (1): 33-35.
- [19] 张燕宁, 邓国忠. 降雨对 Ku 波段卫星通信的影响及对策 [J]. 海河水利, 2001 (2): 26-27.
- [20] 杨清森, 杨仁庆, 赵春昊. 卫星通信的链路性能分析 [J]. 数字通信世界, 2019 (7): 16-19.
- [21] 彭文标, 刘馨琼, 严朝军, 等. 卫星传输系统链路计算与分析 [J]. 三峡大学学报, 2011, 33 (3): 39-42.
- [22] 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 (7): 25-27.
- [23] 李志国, 卫 颖. 卫星通信链路计算 [J]. 指挥信息系统与技术, 2014, 1 (5): 73-76.