

星地测控链路中的功率控制策略研究

朱智宇¹, 孙林歌¹, 汪筱阳², 朱琳³, 田雨雷², 刘伟², 陈涛²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077;

2. 中国西安卫星测控中心, 西安, 710043; 3. 中国人民解放军 95607 部队)

摘要: 对于卫星来说, 能源是极其重要的资源, 为有效节约星上能源、延长卫星寿命, 研究了星地测控链路的功率控制策略; 首先, 分析了造成星地测控链路信号衰减的因素, 在此基础上, 建立了卫星下行链路信噪比计算模型, 然后, 在保证地面设备能够正确解调星上遥测数据的前提下, 在星地测控链路中, 提出了基于信噪比平衡准则的闭环功率控制策略, 最后, 利用构建的计算模型, 仿真分析了所提功率控制策略对卫星功耗的影响和对雨衰的抑制作用; 研究表明, 所提的功率控制策略能大幅降低卫星功耗, 且复杂度低, 具有工程实践性, 同时, 对雨衰有较强的抑制作用, 能有效提高设备跟踪时长, 保证卫星下行信号接收。

关键词: 星地测控链路; 功率控制; 信噪比均衡; 雨衰

Research on Power Control Strategy in TT&C Link Between Satellite and Ground

Zhu Zhiyu¹, Sun Linge¹, Wang Xiaoyang², Zhu Lin³, Tian Yulei², Liu Wei², Chen Tao²

(1. Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China; 3. Unit 95607)

Abstract: For satellites, energy is an extremely important resource. In order to save the energy and prolong the life of satellite, the power control strategy of TT&C link between satellite and ground is studied. First of all, the factors causing signal attenuation of TT&C link between satellite and ground are analyzed. On this basis, the calculation model of signal-to-noise ratio of satellite downlink is established. Then, on the premise that the ground equipment can demodulate the satellite telemetry data correctly, a closed-loop power control strategy based on the signal-to-noise ratio balance criterion is proposed in TT&C link between satellite and ground. Finally, the influence of the proposed power control strategy on satellite power consumption and rain attenuation is simulated and analyzed by using the calculation model. The results show that the proposed power control strategy can greatly reduce the power consumption of the satellite, and has low complexity and engineering practicality. At the same time, it has a strong inhibitory effect on rain attenuation and can effectively improve the tracking time of equipment to ensure the satellite downlink signal reception.

Keywords: TT&C link between satellite and ground; power control; signal-to-noise ratio equalization; rain attenuation

0 引言

卫星作为一种受限能源供电的系统, 其所拥有的能量是有限的, 所以能源是卫星机器重要的资源, 因此节约能耗变得至关重要。同时, 星地之间的无线测控链路具有不确定性和时变特性, 即使不存在其他信号干扰, 接收端也需要保持能够接收到信号的最低信噪比。如地面测控设备接收到的信号信噪比需要高于设备的最低解调门限, 才能保证遥测信号的正确接收。此外, 高频段卫星通信以其频段宽、设备小、抗干扰性强而受到越来越多用户的青睐, 然而其受大气环境的影响较大, 特别是降雨衰减(简称雨衰)非常严重, 在工程应用中受到严重制约^[1]。若云层高度 8 km, 降雨衰减量为 10 dB/km, 天线仰角为 70°时, Ka

频段下行链路降雨衰减可达 85.1 dB。针对上述问题, 采取功率控制方法可以有效节约卫星能源, 缓解星地测控链路雨衰情况。卫星下行功率控制就是根据地面测控设备反馈的信息, 周期性的调整卫星发射机功率, 在保证通信质量的情况下, 尽量减少卫星发射信号的功率, 从而降低卫星功耗。

近年来, 许多学者对无线通信中的功率控制问题进行了研究^[2-3]。文献 [4] 研究了多飞机着陆测距信号的功率控制问题, 推导了飞机的发射功率方程, 在无通信和有通信两种情况下分析了不同功率控制方法的优缺点。文献 [5] 针对传统蜂窝用户与 D2D 通信用户之间的同频干扰问题, 提出基于能效的 D2D 通信干扰协调与资源优化方案, 采用功率控制与资源分配分步进行的方式处理, 对于单个 D2D 用户的功率控制, 在蜂窝用户最小速率以及 D2D 用户

收稿日期: 2020-09-06; 修回日期: 2020-11-12。

基金项目: 试验技术研究项目资助(1900050068)。

作者简介: 朱智宇(1999-), 男, 河北涿鹿人, 本科, 主要从事导航通信、功率控制技术方向的研究。

通讯作者: 朱琳(1987-), 女, 陕西西安人, 博士, 主要从事网络通信方向的研究。

引用格式: 朱智宇, 孙林歌, 汪筱阳, 等. 星地测控链路中的功率控制策略研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 106-110.

和蜂窝用户最大功率的限制条件下, 通过优化 D2D 用户和蜂窝用户的功率使得 D2D 用户的能效最大。文献 [6] 研究了基于阈值的车联网信标传输功率控制算法, 在保证网络最大连通性前提下, 通过预设信道负载阈值, 规定信道负载的合理区间, 根据阈值调整目标节点载波侦测范围内所有车辆的信标传输功率, 将信道负载控制在一定范围内, 从而避免信道拥塞。文献 [7] 研究了 D2D 信道选择与功率控制策略, 在保证蜂窝用户服务质量的前提下, 提出了基于启发式的 D2D 信道选择算法, 为系统内的 D2D 用户找到合适的信道复用资源。文献 [8] 为减小短波信道对接收机 AD 后端信号输出功率的影响, 提出了对数混合的短波信道数字 AGC 算法, 分析了数字 AGC 的线性调整算法、对数调整算法、自然对数调整算法, 采用自然对数与对数混合式的调整算法, 实现了短波接收机 AD 后端数字信号功率稳定变化。然而, 对于星地测控链路的功率控制策略研究较少。

不论是高轨卫星还是低轨卫星, 星地之间的测控链路均受到空间距离、大气环境、电磁干扰等各种因素的影响, 具有不确定性和时间特性^[9]。具有这两种特性的无线通信系统的功率控制问题也逐渐成为学者们研究的热点^[10-11]。文献 [12] 针对传统双馈感应风力发电机 (DFIG) 的解耦控制无法响应电网的频率变化的问题, 研究了含 DFIG 互联系统的 AGC 优化控制, 建立了将风力作为“负的负荷”的两区域 AGC 模型, 通过引入改进的虚拟惯性控制使 DFIG 具有更好的频率响应能力。文献 [13] 针对信道状态信息存在时延和误差的情况, 提出了适用于多校区 MIMO-BC 的基于 Bayes 估计和数据流间功率分配的联合干扰相应对齐算法。文献 [14] 基于交互多模型数据关联算法和协方差控制的思想, 提出了多目标跟踪时基于目标特征的雷达跟踪功率分配算法, 根据运动状态的不同, 自适应的分配雷达的辐射功率。文献 [15] 基于物理层安全技术, 在分析加入了多个协作干扰者的 MIMO 无线通信系统的系统模型, 并同时考虑信道状态信息不确定性的基础上, 提出了安全速率最大化优化问题以寻找合适的功率分配方案, 并进一步基于一阶泰勒展开和 S-程序理论设计出了相应的鲁棒优化算法。

本文将功率控制策略引入星地测控链路中, 在考虑地面设备信号接收门限的基础上, 提出了一种基于信噪比平衡准则的闭环功率控制策略, 主要研究单向 (卫星下行) 功率控制策略。首先建立卫星下行链路信噪比计算模型, 利用模型计算卫星下行信号到达地面设备的链路信噪比, 在考虑地面设备最低解调门限的基础上, 设置地面设备解调阈值, 将下行链路信噪比与地面设备解调阈值相比较, 然后将比较结果通过设备上信号反馈给卫星, 最后卫星根据得到的反馈信息调整下行发射功率, 以达到功率控制的目的。

1 卫星下行链路信噪比计算模型

对数字链路而言, 卫星下行链路性能指标通常指在基

带信道上需要达到的比特误码率 (BER), 其表现在卫星信道中为卫星模拟信号的链路信噪比 C/N_0 的值。而影响卫星下行链路信噪比的主要指标包括卫星有效全向辐射功率 (S_{EIRP})、卫星天线增益 (G_s)、空间损耗 (L)、地面天线增益 (G_r)、地面系统等效噪声温度 (T)、地面馈线损耗 (L_k)。卫星下行信号链路信噪比计算方程为:

$$\left[\frac{C}{N_0} \right] = [S_{EIRP}] + [G_s] + [L] + \left[\frac{G_r}{T} \right] + [L_k] - [K] \quad (1)$$

式 (1) 中所有参数单位均为 dB, 玻尔兹曼常数 $K = 228.6$ dBW/k · Hz。其中空间损耗 L 主要包括自由空间传播损耗 (L_f)、大气吸收损耗 (A_g) 和降雨衰减 (L_r)。其中自由空间传播损耗可通过式 (2) 得到:

$$L_f = 10 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

其中: R 为星地之间的距离, λ 为信号波长, 一般采用通信带宽的中心频点的波长。

大气吸收引起的损耗主要与电磁波频率、地面设备海拔高度、天线仰角及水蒸气密度 (绝对湿度) 有关。当电磁波频率低于 10 GHz 时, 该损耗可以忽略不计^[16]。

降雨衰减是指电磁波进入雨层中引起的衰减。它包括雨粒吸收引起的衰减和雨粒散射引起的衰减。雨粒吸收引起的衰减是由于雨粒具有介质损耗引起的, 雨粒散射引起的衰减是由于电磁波碰到雨粒时被雨粒反射而再反射引起的。这种二次反射的电磁波的入射波与反射波方向无关, 称为二次散射。由于二次散射, 在原来的方向上入射的电磁波就被衰减了。雨衰的大小和雨滴直径与波长的比值有关, 而降雨率则与雨滴的半径有关。

降雨衰减损耗可通过式 (3) 得到:

$$L = h \cdot \csc \theta \cdot R_p \quad (3)$$

其中, h 为降雨高度, 单位为 km; θ 为地面设备天线仰角; R_p 为降雨衰减量, 单位为 dB/km, 与雨层结构有关。

2 功率控制策略及实现方法

这里主要研究基于信噪比平衡准则的闭环功率控制策略。即通过地面设备接收端测量接收的信噪比, 与设定的信噪比阈值相比较, 将比较结果反馈给卫星, 然后卫星通过调整下行 EIRP 来达到功率控制的目的。这样可以使卫星下行信号到达地面设备接收端的信噪比处于一定的范围内, 保证了地面设备能够正确解析卫星上传数据。

2.1 功率控制策略

将固定步进功率控制策略引入星地测控链路中, 在此策略下, 卫星接收到地面设备上功率控制命令后, 按照固定步进 (step) 调整卫星下行 EIRP。设地面设备接收端设定的信噪比阈值为 $(C/N_0)^{tar}$, 固定步进的功率控制策略如下:

$$S_{EIRP}^{t+1} = \begin{cases} S_{EIRP}^t - step, & \text{if } (C/N_0)^t > (C/N_0)^{tar} \\ S_{EIRP}^t + step, & \text{if } (C/N_0)^t < (C/N_0)^{tar} \end{cases} \quad (4)$$

其中, S_{EIRP}^t 表示 t 时刻卫星的有效全向辐射功率, $(C/N_0)^t$ 表示 t 时刻地面设备接收端的信噪比。

为了较快的对卫星功率进行控制，步进不应设置太小，同时，为避免地面设备接收端信噪比大幅振荡，超设备最低解调门限，步进亦不能设置太大，因此，需要选取合适的固定步进。

2.2 功率控制实现方法

由上述可知，功率控制的实现需要将地面设备的信噪比较结果反馈给卫星，因此，必须建立上下行测控链路。根据固定步进功率控制策略，地面测控设备仅需将信噪比较结果的大小情况反馈给卫星，则在上行信号中增加的字段较小，便于工程实现。然后卫星根据前一时刻功率大小情况，调整下一时刻功率输出即可。

鉴于此，可在地面设备基带中增加信号接收的信噪比与设定的遥测解调信噪比阈值比较结果，并将比较结果（增加的功率控制字段）添加到设备上行遥控指令中。当卫星在解析设备上行遥控指令后，得到地面比较结果，根据比较结果控制卫星下行 EIRP。功率控制流程见图 1 所示。

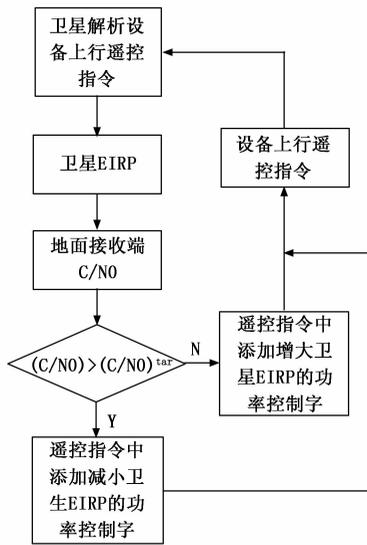


图 1 功率控制流程

3 仿真结果与分析

这里主要分析功率控制对卫星功耗的影响和对雨衰的抑制。仿真参数设置为卫星天线增益 $G_s = -12$ ，地面 G/T 值为 15，地面馈线损耗 $L_k = 2$ ，地面设备接收端信噪比阈值 $(C/N_0)^{tar} = 63$ 。

3.1 对卫星功耗的影响

考虑晴朗天气，星地测控链路工作在 S 频段，假设闭环功率控制的周期为 1 秒，卫星进站时的初始有效全向辐射功率 $S_{EIRP_initial} = 17$ ，以地面设备跟踪某低轨卫星为例，当功率控制的固定步进变化时，则卫星从进站到出站全过程中，地面设备接收端信噪比如图 2 所示，卫星 EIRP 变化如图 3 所示。

从图 2 中可以看出，当调整步进逐渐增大时，地面设备接收端信噪比能更快的收敛到设定的信噪比阈值，但是当收敛到阈值 63 dB 附近后，随着步进增大会出现较大

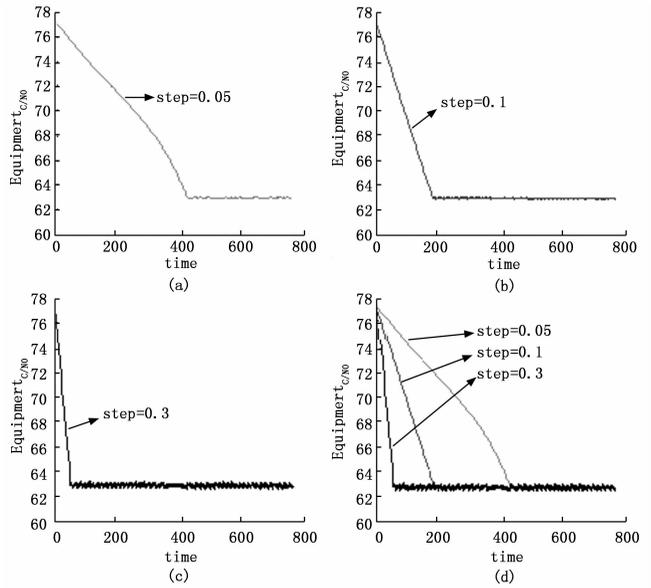


图 2 地面设备接收端信噪比变化图

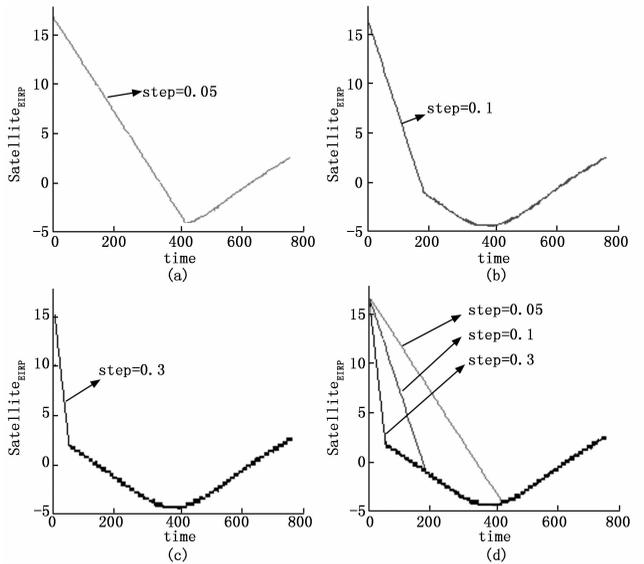


图 3 卫星 EIRP 变化图

振荡。

从图 3 中可以看出，当调整步进逐渐增大时，卫星 EIRP 减少的速率随之增大，当到达一定值时（此时地面设备接收端信噪比达到阈值），卫星 EIRP 的变化趋势不随步进增大而改变，由式 (1) 和 (2) 分析可知，此后卫星 EIRP 仅与卫星到地面设备的距离有关。地面设备跟踪卫星过程中，若地面设备接收端信噪比达到阈值时刻在卫星过顶前，则在卫星过顶前，卫星 EIRP 逐渐减小，在卫星过顶后，卫星 EIRP 逐渐增大；若地面设备接收端信噪比达到阈值时刻在卫星过顶后，则在地面设备接收端信噪比达到阈值前，卫星 EIRP 逐渐减小，在地面设备接收端信噪比达到阈值后，卫星 EIRP 逐渐增大。

当步进逐渐变化时，统计地面设备跟踪卫星全过程卫

星 EIRP 均值, 并计算卫星功耗降低百分比如表 1 所示。

表 1 卫星 EIRP 均值/功耗降低百分比变化

卫星初始 EIRP	EIRP 均值/功耗降低百分比		
	step=0.05	step=0.1	step=0.3
17dB	3.1737dB/95.86%	0.4217dB/97.80%	-0.7783dB/98.33%
14dB	1.5980dB/94.25%	-0.2157dB/96.21%	-0.9601dB/96.81%
11dB	0.2854dB/91.52%	-0.7003dB/93.24%	-1.0984dB/93.83%

从表 1 中可知, 对星地测控链路增加功率控制后, 能大幅降低卫星功耗。当卫星初始 EIRP 一定时, 适当增大功率控制步进, 能降低卫星功耗, 当功率控制步进一定时, 卫星初始 EIRP 越大, 降低功耗百分比越高。该现象表明, 功率控制步进较大能使卫星 EIRP 迅速降低, 达到收敛阈值, 从而降低跟踪全过程的 EIRP 均值, 达到降低功耗的目的。

3.2 对雨衰的抑制

考虑降雨天气, 在层状雨时, 假设融化层高度 $h = 3$ km, 降雨衰减量 $R_p = 0.35$ dB/km, 星地测控链路工作在 S 频段, 闭环功率控制的周期为 1 秒, 卫星进站时的初始有效全向辐射功率, 以地面设备跟踪某低轨卫星为例, 卫星从进站到出站全过程中, 降雨衰减情况如图 4 所示。当无功率控制 (No Power Control, NPC) 时, 地面设备接收端信噪比变化如图 5 所示。当进行功率控制时, 且功率控制步进变化时, 地面设备接收端信噪比变化如图 6 所示, 卫星 EIRP 变化如图 7 所示。

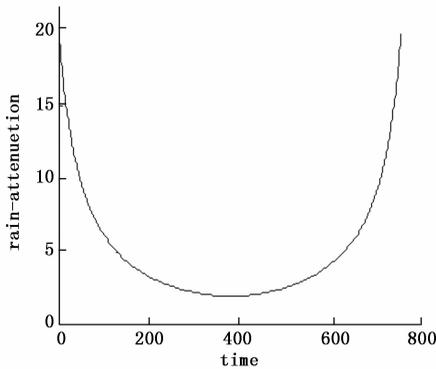


图 4 跟踪全过程的降雨衰减情况

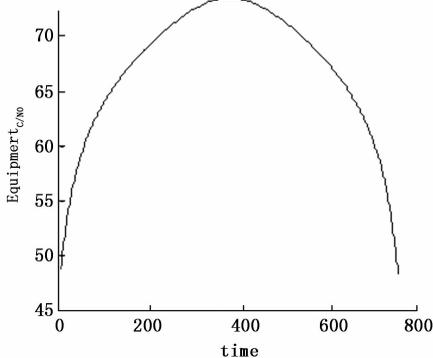


图 5 无 PC 时的地面设备接收端信噪比

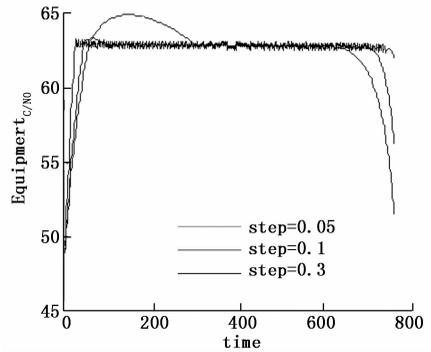


图 6 雨衰对地面设备接收端信噪比影响

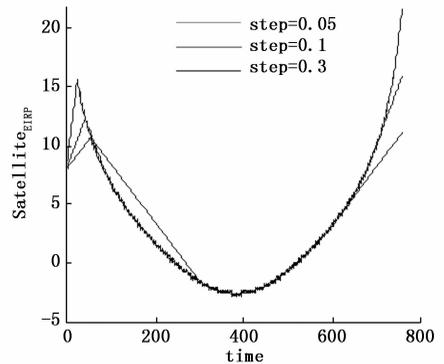


图 7 雨衰对卫星 EIRP 影响

从图 4 可知, 降雨衰减趋势与三角函数 \csc 一致, 即在跟踪刚开始时降雨衰减迅速增大, 然后逐步减缓, 在跟踪后期又迅速增大, 在变化速率上存在两边快、中间慢的现象。从图 5 中可以看出, 地面设备接收端信噪比变化曲线较图 4 更尖锐, 分析原因为当不进行功率控制时, 即卫星一致保持发送恒定的功率, 这时, 链路衰减主要由自由空间传播损耗 (L_f) 和雨衰 (L_r) 决定, L_f 变化曲线为抛物线, 与图 4 叠加后呈现为图 5 形态。另外, 由图 4 可得, 地面设备接收端信噪比在设定的阈值 (误差在 1 个步进) 以下的时段为 $T_0 \sim T_0 + 87$ s 和 $T_0 + 676 \sim T_0 + 759$ s, 共计 170 秒。

从图 6 中可以看出, 当步进设为 0.05 和 0.1 时, 地面设备接收端信噪比先增加超过设定阈值, 后回落接近设定阈值, 在跟踪后期, 又迅速低于设定阈值。分析原因为当进行功率控制时, 若功率控制步进设置较小, 前期控制的功率增加量虽然抵消了前期雨衰, 但随着雨衰在中期变化率迅速降低, 功率控制的响应速度跟不上雨衰的变化, 导致信噪比会超过设定阈值。而在跟踪后期, 随着雨衰变化率迅速增大, 功率控制的响应速度又跟不上雨衰的变化, 不能迅速的进行功率调整, 导致后期信噪比迅速低于设定阈值。当步进设为 0.3 时, 能较好的响应雨衰的变化率, 此时不存在信噪比在跟踪两端变化较大的情况。由图 7 可得, 步进为 0.05 时, 地面设备接收端信噪比在设定的阈值 (误差在 1 个步进) 以下的时段为 $T_0 \sim T_0 + 55$ s 和 $T_0 + 650 \sim T_0 + 759$ s, 共计 164 秒; 步进为 0.1 时, 地面设备接收端信噪比在设定的阈值 (误差在 1 个步进) 以下的时段为 T_0 。

$\sim T_0 + 43$ s 和 $T_0 + 712 \sim T_0 + 759$ s, 共计 90 秒; 步进为 0.3 时, 地面设备接收端信噪比在设定的阈值 (误差在 1 个步进) 以下的时段为 $T_0 \sim T_0 + 26$ s 和 $T_0 + 752 \sim T_0 + 75$ s, 共计 33 秒。综上所述, 在基于信噪比的闭环固定步进功率控制中, 适当的步进选择能有效的抑制雨衰, 降低雨衰对设备跟踪的影响, 同时可以大幅降低卫星功耗。

4 结束语

通过分析星地测控链路之间的衰减因素, 建立了卫星下行链路信噪比计算模型, 在星地测控链路中, 提出了一种工程可实现的基于信噪比均衡准则的闭环功率控制策略, 利用计算模型, 分析了所提功率控制策略对卫星功耗的影响和对雨衰的抑制。结果表明, 加入功率控制后, 能大幅降低卫星功耗, 功耗的节省量受卫星初始进站时的 EIRP 和功率控制步进决定, 且卫星初始进站时的 EIRP 越大或功率控制步进较大能更省功耗。在雨衰抑制方面, 选择合适的功率控制步进能有效抑制雨衰对设备跟踪的影响。

本文虽得出了一些有益的结论, 但是, 在涉及高频段 (Ku、Ka 等) 信号时, 建立的计算模型还需进一步细化和完善, 其中还有许多细节值得下一步深入研究。此外, 虽然功率控制策略在星地测控链路中有较好的应用前景, 但是由于卫星系统和地面系统分为两大系统, 在体制、接口等设计中, 还涉及到许多方面需要协调和克服。

参考文献:

- [1] 张建飞, 丁广, 杨建东, 等. 海上云层和降水对船载高频段卫星通信的影响 [J]. 电子学报, 2018, 46 (2): 381-386.
- [2] Jiang Y, Liu Q, Zheng F, et al. Energy-efficient joint resource allocation and power control for D2D communications [J]. IEEE Trans. On Vehicular Technology. 2016, 65 (5): 6119-6127.
- [3] Zhang R, Qi C, Li Y, et al. Towards energy-efficient underlaid device-to-device communications: a joint resource management approach [J]. IEEE Access. 2019 (7): 31385-31396.
- [4] 汪筱阳, 吴德伟, 戴传金. 多飞机着陆测距信号的功率控制策

(上接第 105 页)

器设计合理, 性能稳定, 运行可靠, 具有一定的通用性。为后续采用整体多模冗余体制的时序控制器产品提供了参考, 并对运载火箭的系列化产品研制具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 宋征宇. 运载火箭时序控制系统“标准型”的研究 [J]. 航天控制, 1998, 17 (2): 28-33.
- [2] 宋征宇. 新一代运载火箭电气系统体系架构的研究 [J]. 载人航天, 2016, 22 (3): 317-322.
- [3] 胡海峰, 宋征宇, 孙海峰. 新型中型运载火箭控制系统架构及发展 [J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 367 (2): 49-53.
- [4] 周恒保, 辛高波, 丁秀峰, 等. 新一代运载火箭时序控制系统设计 [J]. 上海航天, 2016, 33: 107-111.

- 略 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版). 2013, 14 (1): 75-79.
- [5] 韦世红, 黄祥, 王伟超. 基于能效的 D2D 通信系统的干扰协调与资源优化 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35 (7): 2120-2123.
- [6] 莫元富, 于德新, 包赛男, 等. 基于阈值的车联网信标传输功率控制算法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2017, 38 (3): 331-334.
- [7] 钱志鸿, 田春生, 王鑫, 等. D2D 网络中信道选择与功率控制策略研究 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41 (10): 2287-2293.
- [8] 宋斌斌, 金慧琴, 田伟, 等. 对数混合的短波信道数字 AGC 算法 [J]. 兵工自动化, 2018, 37 (4): 18-22.
- [9] LIU S, WU Y, LI L, et al. Optimal resource and power allocation with relay selection for RF/RE energy harvesting relay-aided D2D communication [J]. IEEE Access, 2019 (7): 89670-89686.
- [10] CHANG W, TENG J. Energy efficient relay matching with bottleneck effect elimination power adjusting for full-duplex relay assisted D2D networks using mm-wave technology [J]. IEEE Access, 2018, 6 (6): 3300-3309.
- [11] KUANG Z, LIU G, LI G, et al. Energy efficient resource allocation algorithm in energy harvesting-based D2D heterogeneous networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6 (1): 557-567.
- [12] 张俊武, 王德林, 陈斌, 等. 基于 PSO-GSA 算法的含 DFIG 互联系统 AGC 优化控制研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46 (13): 48-54.
- [13] 谢显中, 张森林, 李丹, 等. 基于 Bayes 估计和数据流间功率分配的联合干扰相位对齐算法 [J]. 电子学报, 2018, 46 (4): 984-991.
- [14] 张贞凯, 许姣, 田雨波. 多目标跟踪时的自适应功率分配算法 [J]. 信号处理, 2017, 33 (3A): 22-26.
- [15] 张雪麟, 王保云. 多干扰者协作的 MIMO 系统下功率分配算法设计 [J]. 计算机技术与发展, 2017, 27 (7): 120-125.
- [16] 宋拥军, 费雄骏. 卫星通信大气吸收损耗的计算方法 [J]. 无线电通信技术, 2000, 26 (6): 18-20.
- [5] 张拓, 党小鹏, 韩连刚, 等. 高可靠性小型固体动力运载火箭时序控制器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 135-138.
- [6] 朱旭锋, 柳柱, 谷岩. 电磁阀保持电流的自动调节系统设计研究 [J]. 航天控制, 2014, 32 (1): 94-98.
- [7] 朱源. 运载火箭火工品引爆线路电流计算和试验研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2017, 353 (3): 69-73.
- [8] 武杰, 陈灿辉, 朱红, 等. 高精度火工品控制电路测试方案的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3427-3429.
- [9] 马雪松, 姚静波, 解维奇, 等. 运载火箭时序仿真测试系统设计 [J]. 电子器件, 2015, 38 (2): 436-441.
- [10] 马雪松, 姚静波, 邓茂林, 等. 新一代运载火箭时序仿真系统信号完整性分析 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (1): 300-303.