

无人机测控链路信道传播损耗模型研究

彭继强, 梁少然

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘要: 无人机测控链路的稳定可靠是确保无人机充分发挥军事和民用效能的重要保证之一。针对无人机测控链路系统设计中的空间传播损耗精确计算问题, 参考 ITU-R(国际电信联盟无线电通信组)P.528 传播损耗模型, 从自由空间损耗、大气吸收损耗和可变损耗三个方面进行了仿真研究, 获得了视距条件下三种损耗衰减与传播频率、通信距离、通信终端高度等参数的一般关系。根据提出的传播损耗精确计算方法, 对某无人机典型应用场景下的传播损耗进行了分析计算。与传统损耗模型的计算结果相比, 采用的方法可以获得更加精确的计算结果, 对无人机测控装备的设计研制具有重要的借鉴意义。

关键词: 无人机数据链; 自由空间损耗; 大气吸收损耗; 可变损耗

中图分类号: TN911.22; V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0047-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220613001

引用格式: 彭继强, 梁少然. 无人机测控链路信道传播损耗模型研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 47-52.

The research on propagation loss model in the design of UAV data link

PENG Jiqiang, LIANG Shaoran

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: The stability and reliability of UAV data link is one of the important guarantees to ensure the full play of military and civilian effectiveness. Aiming at the propagation loss in the design of a UAV data link, free space loss, atmospheric absorption loss, and variability loss were studied in this paper based on the ITU-R P.528 model. The relationship between loss values and frequency, distance, and height was obtained. According to the propagation loss calculation method proposed in this paper, the propagation loss in typical UAV application scenarios is calculated and analyzed. Compared with the traditional calculation model, the present method can obtain more accurate results, which is important for the development of UAV data link equipment.

Keywords: UAV data link; Free space loss; Atmospheric absorption loss; Variability loss

Citation: PENG Jiqiang, LIANG Shaoran. The research on propagation loss model in the design of UAV data link[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 47-52.

引 言

近年来, 无人机在军用领域和民用领域发挥了越来越重要的作用^[1-5]。无人机测控链路是无人机系统的重要组成部分, 主要用于完成无人机遥控、遥测和载荷信息的传输。在无人机测控链路设计中, 为实现作用距离、传输速率等指标要求, 会针对空间传播损耗设计适当的发射功率和天线增益。功率或增益过大, 会增加设备体积、重量和功耗; 过小, 则会降低链路传输质量, 进而影响任务效能甚至危及平台安全。在工程应用中, 传统的链路传播损耗计算一般是参考 GJB 6703—2009 的要求和以往工程经验, 在满足自由空间损

耗的前提下预留不低于 6 dB ~ 10 dB 的衰落裕度^[6], 这是一种应用较多的简要计算方法。在基于 GJB 6703—2009 的传统计算方法中, 根据传输频率和通信距离计算自由空间损耗, 在此基础上综合考虑信号发射功率、发射和接收天线增益、发射损耗和接收损耗等影响因素, 计算接收信号的电平值, 再与接收机灵敏度进行比较获得链路电平衰落裕度。当衰落裕度满足 GJB 6703—2009 要求的范围时, 链路电平满足设计要求。除了在自由空间损耗的基础上预留衰落裕度的方法外, 将总传播损耗分为几种不同损耗分别计算是另外一类应用较多的损耗计算方法。文献[7]针对海上甚高频 (Very High Frequency, VHF) 通信网络, 将海上传

输损耗分解为三种损耗分别进行计算, 最终获得了海上 VHF 通信损耗计算模型。文献[8]通过计算自由空间损耗、大气吸收损耗和雨雪衰减, 提出了一种适用于地空高速通信链路的传播损耗预测方法, 通过对具体地区典型场景下链路损耗计算, 对所提方法进行了验证。文献[9]借助 Longley-Rice 传播模型, 计算了海上通信信号传播损耗, 并通过与实验数据比较, 验证了该模型对海上传播环境较好的适应性。上述方法虽然针对具体的应用场景建立了损耗计算模型, 但是仍然存在频段使用范围小、不能反映通信信道随机变化对传输损耗的影响等不足, 导致无法获得较大频率范围和空间范围的精确计算模型。为了获得更精确的损耗计算结果, 指导精细化设计, 本文参考 ITU-R P.528 传播损耗模型, 从自由空间损耗、大气吸收损耗和可变损耗三个方面对无人机测控链路空间传播损耗进行了分析和仿真计算, 并且针对无人机视距链路主用的传输频段, 包括 C 波段 (4 GHz ~ 8 GHz)、L 波段 (1 GHz ~ 2 GHz) 和 UHF 频段 (主要为低于 1 GHz), 进行了重点分析, 对无人机视距链路设计具有借鉴意义。

1 空间传播损耗模型

在无人机测控应用领域, 地空链路和空空链路主要的传输方式是视距传输。影响视距传播损耗的因素有多种, 其中主要因素有自由空间损耗、大气吸收损耗以及与时间概率相关的可变损耗等。由于无人机测控链路受多种因素影响, 较难通过统一的模型对空间传播损耗进行预测, 因此对上述三种损耗逐一进行建模研究, 在此基础上确定无人机地空链路和空空链路传播损耗计算模型。

1.1 自由空间损耗

在无人机空间传播损耗模型中, 测控信号主要通过视距路径进行传播, 可将该路径视为自由空间传播路径。自由空间是一种均匀连续的各向同性介质空间, 无线信号在自由空间中的传播损耗是指由于电磁波的空间扩散而引起的信号衰减^[10]。自由空间损耗 L_f 可表示为

$$L_f = 32.44 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (1)$$

式中: d 表示发射天线和接收天线之间的距离, 单位为 km; f 表示无线信号的工作频率, 单位为 MHz。

根据上式可知, 自由空间传播损耗与两天线

之间的距离 d 和工作频率 f 近似呈对数增长关系, 即随着距离 d 和频率 f 的增加, 自由空间损耗呈对数规律增长。

1.2 大气吸收损耗

大气吸收损耗主要分为水蒸气吸收损耗和氧气吸收损耗, 两种损耗值的计算过程类似。大气吸收损耗 A_a 可表示为

$$A_a = \gamma_o r_o + \gamma_w r_w \quad (2)$$

式中: γ_o 表示氧气吸收率, 单位是 dB/km; r_o 表示无线电波传播路径经过氧气吸收层的距离, 单位为 km; γ_w 表示水蒸气吸收率, 单位是 dB/km; r_w 表示无线电波传播路径经过水蒸气吸收层的距离, 单位为 km。

氧气吸收率和水蒸气吸收率与无线电波工作频率相关, 对应关系如图 1 所示。在无人机视距链路主用的 L 波段和 UHF 波段, 水蒸气吸收率基本保持为 0, 在 C 波段水蒸气吸收率开始增加。氧气吸收率在无人机视距链路主用频段上随着频率增加而增加。整体来看, 当频率较低时, 水蒸气吸收率保持在 0 值附近; 超出 L 波段后, 随着传输频率的增大, 水蒸气吸收率逐渐增加。水蒸气的吸收率变化曲线表明低频传输时水蒸气吸收率基本可忽略, 但是当频率约高于 10 GHz 时, 水蒸气吸收率快速增加。根据氧气吸收率变化曲线可知, 随着传输频率增加, 氧气吸收率持续增加, 但增长速度逐渐放缓。在工程应用中, 可通过插值方式获得氧气吸收率和水蒸气吸收率。

氧气吸收层和水蒸气吸收层位于地球表面,

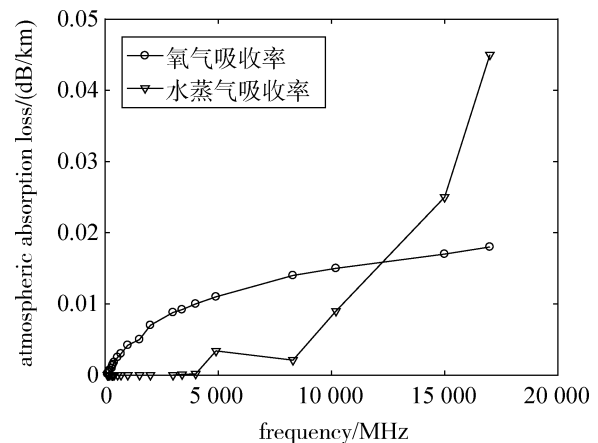


图 1 大气吸收率与频率的关系

Fig. 1 The relationship between atmospheric absorption loss and frequency

有效厚度分别为 T_0 和 T_w 。无线电波穿过吸收层的距离可通过射线跟踪方法计算。射线跟踪是指利用几何光学理论，确定无线电波在大气中传播的实际路径。大气被建模为多层同心壳体，折射率随同心壳体层数增加呈指数递减规律。单层大气中的射线跟踪几何关系满足式(3)所示的斯内尔定律。图2中给出了单层大气跟踪射线的几何结构。从地球表面开始，通过每层大气迭代跟踪，直至到达终端的高度。

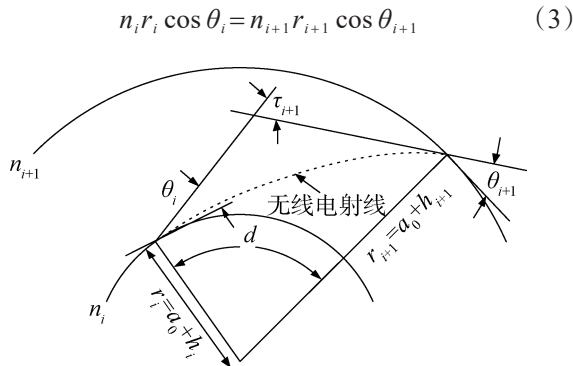


图2 单层大气跟踪射线几何结构
Fig. 2 The geometric construction of a single atmosphere layer

射线穿过吸收层的几何形状可分为三种形式。第一种为两个终端都在吸收层内部，对应图3中的 β_1 ；第二种为一个终端位于吸收层内，另一个终端位于吸收层外，对应图3中的 β_2 ；第三种为两个终端都位于吸收层外，但是有一部分传输路径穿过了吸收层对应图3中的 β_3 。根据两个终端的高度和吸收层的有效厚度进行几何计算，可以得到吸收层中包含的有效射线距离。分别计算氧气吸收层和水蒸气吸收层中的射线距离，再结合式(2)可计算得到大气吸收损耗。

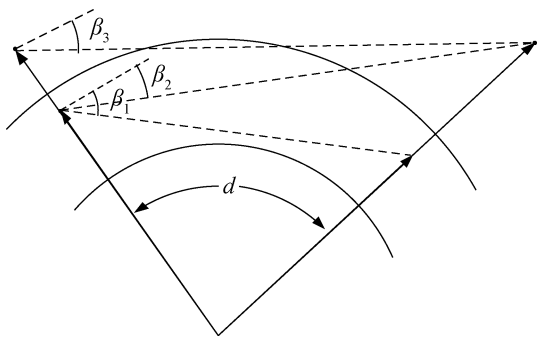


图3 可能的几何形状
Fig. 3 The possible geometric constructions

取两个终端高度分别为10 m和8 000 m，不同频率下，通信距离对大气吸收损耗的影响关系如图4所示，图中给出了L波段至C波段的计算结果。由图中结果可以看出，在L波段和C波段范围内，当通信频率不变时，随着通信距离的增加，大气吸收损耗基本呈线性增加趋势。对比L波段和C波段内不同频率下的损耗曲线可以看出，传输频率越高，大气吸收损耗增加的速度越快。

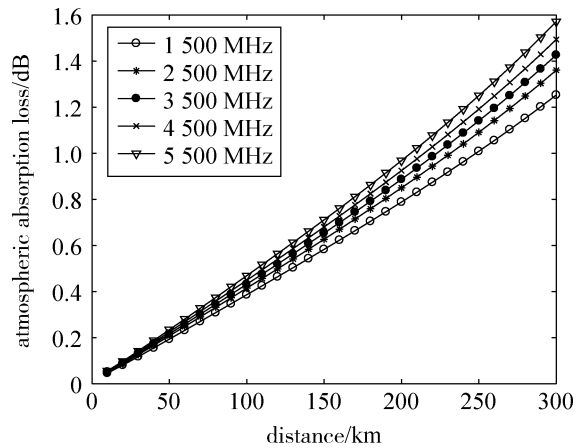


图4 不同频率下,距离对大气吸收的影响
Fig. 4 The effect of distance to atmospheric absorption with different frequencies

取两个终端的高度相同，通信距离为200 km。在视距条件下，不同高度下，传输频率对大气吸收的影响关系如图5所示。图中给出了0~30 GHz的计算结果，在无人机视距链路主用的UHF波段、L波段和C波段，大气吸收损耗逐步增加，增长速度较慢。从整体来看，在0~30 GHz范围内，当传输频率低于约20 GHz时，随着传输频率的增加，大气吸收损耗逐渐增加，且增长速度逐步加快；当传输频率处于20 GHz~25 GHz范围内时，大气吸收损耗出现峰值；传输频率高于25 GHz后，大气吸收损耗逐渐降低。

1.3 可变损耗

可变损耗与感兴趣的时间可用性 q 有关，在航空应用领域，建议采用95%的时间可用性用于指导设计。长期可变性和对流层多径引起的损耗是组成可变损耗的主要部分，两种因素对可变总损耗的贡献度可通过以下公式进行计算。

$$Y_t(0.5) = Y_c(0.5) + Y_\pi(0.5) \quad (4)$$

$$Y = [(Y_c(q) - Y_c(0.5))^2 + (Y_\pi(q) - Y_\pi(0.5))^2]^{0.5} \quad (5)$$

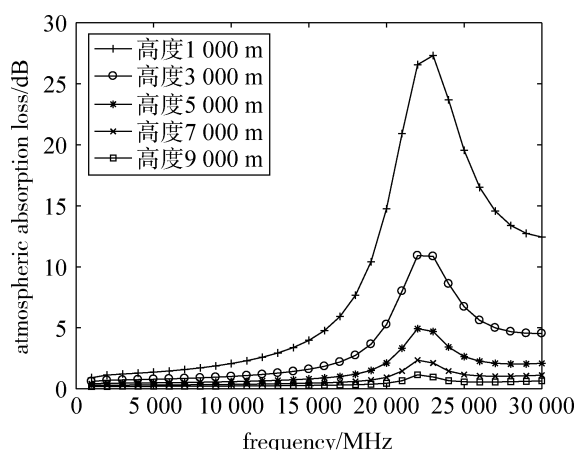


图 5 不同高度下, 频率对大气吸收的影响

Fig. 5 The effect of frequency to atmospheric absorption with different frequencies

$$Y_t = \begin{cases} Y_l(0.5) + Y_r, & q < 0.5 \\ Y_l(0.5) - Y_r, & q \geq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中: Y_t 表示总的可变损耗, Y_l 表示长期可变性引起的损耗, Y_r 表示对流层多径引起的损耗。下面分别对长期可变性和对流层多径引起的损耗进行说明。

长期可变性的统计分布数据基于大量地点和周期时间内的测量数据得到, 表示以小时为周期的测量中值的变化统计规律。利用时间可用性对中间计算参数进行插值处理, 通过计算逆互补累积正态分布函数 $Q^{-1}(q)$, 获得不同时间可用性下的长期可变损耗。函数 $Q^{-1}(q)$ 的计算可参见 ITU-R P.1057 建议书^[11]。

对流层多径对总可变损耗的贡献度符合 Nakagami-Rice 分布, 通过调整统计模型的参数能够实现对无衰落、轻微衰落、中等衰落和重度衰落等不同程度的衰落信道的模拟^[12]。图 6 中给出了不同时间可用性条件下 Nakagami-Rice 衰落分布的变化情况。图中纵坐标表示损耗值, 横坐标 K 为一无量纲数值。 K 值是一个与初始计算条件相关的中间变量, 在模型适用范围内, 根据不同的传输频率以及收发终端高度等条件, 计算中间变量 K , 不同 K 值表示不同的对流层多径信道。 K 值和时间可用性 q 进行插值, 可得对流层多径对总损耗的影响。由图中曲线可以看出, 在同一 K 值条件下, 损耗值随着时间可用性的增加由负值逐渐转变为正值, 并且当时间可用性接近 1 时, 损耗最大值位于 15 dB~20 dB, 会对通信链路产生较大的影响。

在实际应用中, 根据时间可用性 q 和 K 值进行插值计算可获得给定条件下对流层多径对总可变损耗的影响。

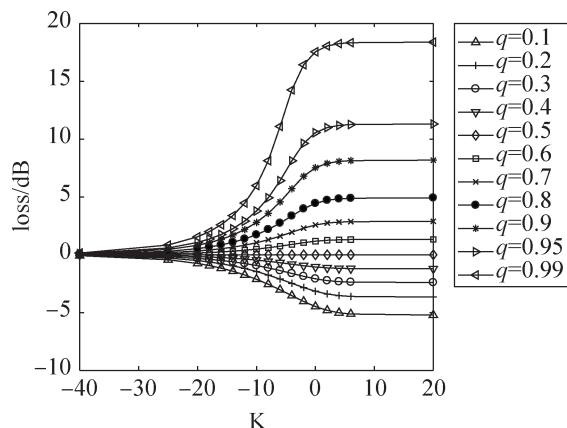


图 6 Nakagami-Rice 衰落分布

Fig. 6 Nakagami-Rice distribution

取两终端的高度分别为 10 m 和 8 000 m, 图 7 中给出 95% 时间可用性下, 通信距离和传输频率对可变损耗的影响关系。在无人机视距链路主用的 UHF 波段、L 波段和 C 波段, 可变损耗值的变化趋势呈现先增加、再放缓、再增加的特点。从整体来看, 在 0~30 GHz 范围内呈现类似的变化规律, 并且当传输距离固定不变时, 传输频率对可变损耗的影响较小。

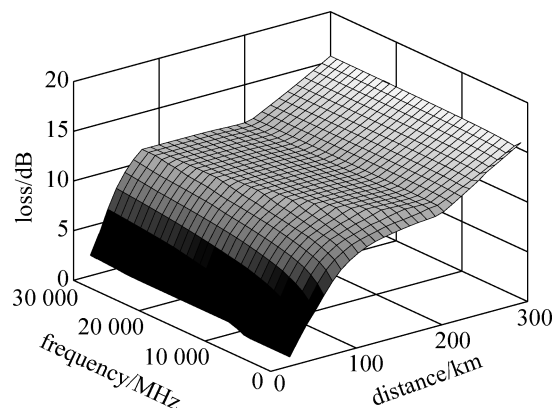


图 7 距离和频率对可变损耗的影响

Fig. 7 The effect of distance and frequency to variability loss

2 传播总损耗

进行无人机测控链路损耗分析时需综合考虑自由空间损耗、大气吸收损耗和可变损耗, 首先

对三部分损耗值分别进行计算,然后叠加可得传输总损耗。下面对无人机典型地空链路进行传输损耗分析。两个终端的高度分别为10 m和8 000 m,通信频率范围为1 000 MHz~8 000 MHz,通信距离为50 km~300 km。使用传统方法分析时,大气吸收损耗根据经验取1 dB,衰落裕度按照GJB 6703—2009中的要求取中间值8 dB。使用本文方法分析时,天线采用垂直极化,时间可用性取95%,采用标准大气环境。图8所示为采用传统方法和本文方法计算得到的传输总损耗与通信距离和传输频率的关系。图9所示为传统方法和本文方法的计算结果差值。

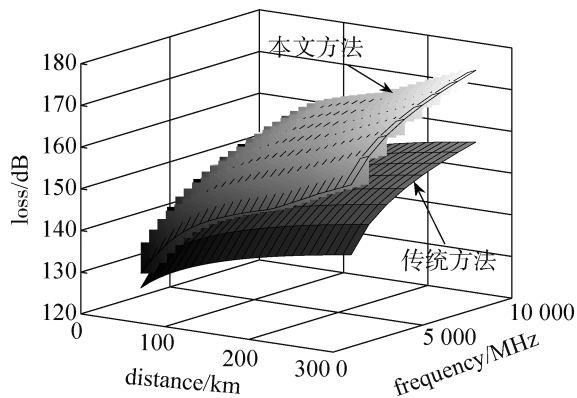


图8 距离和频率对两种计算结果的影响

Fig. 8 The effect of frequency and distance to total loss

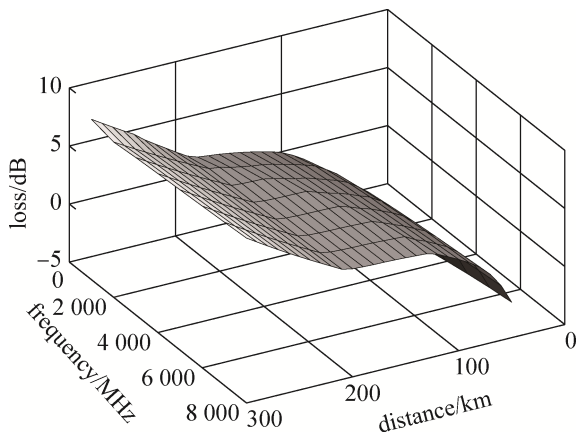


图9 两种方法差值对比

Fig. 9 The difference value of two methods

由图8可以看出,采用传统方法和本文方法获得的结果有较为明显的差异。从图9中给出的差值结果可以看出,在一定范围内,传统方法的计算结果高于本文方法的计算结果,最大差值超过

4 dB。这表明,若采用本文的方法,在链路损耗预算值更低时,也能保证链路的时间可用性超过95%。相应地,对天线增益和设备功放的功率等的要求更低,可有效降低工程实现难度。超出一定范围后,传统方法的计算结果低于本文方法。这表明,如果采用传统方法进行链路设计,最终获得的时间可用性将低于95%,链路传输质量可能无法保证。

3 结束语

传播损耗的精确计算是进行无人机测控链路精细化设计的重要前提。本文通过计算自由空间损耗、大气吸收损耗和可变损耗得到了空间传播损耗的计算模型。与传统的链路设计方法相比,本文方法获得的结果更加准确,有利于降低测控设备的体积和功耗,另外还能够获得电平衰落储备值与链路时间可用性的对应关系,使设计人员对链路传输质量的把控更加直观。本文方法可应用于无人机测控工程领域,其他与应用场景紧密相关的地空多径损耗和障碍物衍射损耗等,需结合具体环境参数进行针对性分析。

参考文献

- [1] 康冬寒. 无人机测控与信息传输技术发展综述[J]. 计算机产品与流通, 2019, (3): 123.
- [2] 廖小罕, 黄耀欢, 徐晨晨. 面向无人机应用的低空空域资源研究探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2607-2620. LIAO Xiaohan, HUANG Yaohuan, XU Chenchen. Views on the study of low-altitude airspace resources for UAV applications[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2607-2620.
- [3] 陈群策. 无人机技术在通信网络优化中的应用探讨[J]. 通讯世界, 2020, 27(3): 58-59.
- [4] 龙真青. 地形测绘工程中无人机的具体应用[J]. 地矿测绘, 2021, 3(6): 57-58.
- [5] 沈中泽. 应急救援领域无人机应用现状及分析[J]. 网络安全技术与应用, 2021(11): 133-134.
- [6] 中国人民解放军总参谋部第二部. GJB 6703—2009 无人机测控系统通用要求[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2009-05-25.
- [7] 陈亮, 金永兴, 胡勤友, 等. 海上VHF无线通信传输损耗[J]. 中国航海, 2015, 38(3): 1-4. CHEN Liang, JIN Yongxing, HU Qinyou, et al. Transmis-

- sion loss in maritime VHF communications system[J]. Navigation of China, 2015, 38(3): 1-4.
- [8] 王炜涛, 周璐. 一种地空高速通信链路传播损耗计算方法[J]. 通信技术, 2017, 50(6): 1144-1148.
WANG Weitao, ZHOU Lu. Propagation-loss calculation of ground-to-air high-speed communication link[J]. Communications Technology, 2017, 50(6): 1144-1148.
- [9] 陈旗, 谢金辉. 船舶通信侦察系统距离估算研究[J]. 船舶电子对抗, 2016, 39(4): 29-34.
- [10] 胡续军, 陈小敏, 朱秋明, 等. 无人机中继链路传播损耗及性能分析[J]. 数据采集与处理, 2018, 33(4): 732-739.
HU Xujun, CHEN Xiaomin, ZHU Qiuming, et al. Propagation loss and performance evaluation of UAV relay link[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2018, 33(4): 732-739.
- [11] 国际电联无线电通信全会. ITU-R P.1057 建议书与无线电传播建模相关的概率分布[S]. 2019.
- [12] 朱秋明, 徐大专, 王成华, 等. Nakagami 衰落包络的空时频相关性研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 134-139.
ZHU Qiuming, XU Dazhuan, WANG Chenghua, et al. Research on the space-time-frequency correlation for Nakagami fading envelope[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(1): 134-139.

[作者简介]

彭继强 1982年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无人机数据链。

梁少然 1991年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为无人机数据链。

(本文编辑: 杨秀丽)