

无人机中继链路传播损耗及性能分析

胡续俊¹ 陈小敏¹ 朱秋明^{1,2} 祝梦卿¹ 陈兵¹

(1. 南京航空航天大学江苏省物联网与控制技术重点实验室, 南京, 211106;

2. 英国赫瑞瓦特大学工程与物理科学学院, 爱丁堡, EH14 4AS)

摘要: 针对两跳无人机中继通信场景, 综合考虑机身姿态、天线特性、气候状况及信道衰落等影响, 建立了两跳中继链路的传播损耗模型, 分析了传播损耗均值的计算方法, 推导了多径阴影复合衰落导致传播损耗随机起伏的统计特性。在此基础上, 进一步推导得到了两跳无人机中继系统的中断概率与误比特率的理论表达式。最后, 通过对郊区、山区和海洋场景的数值仿真, 验证了本文推导的理论结果的正确性, 并分析了无人机飞行高度、地面节点位置以及通信场景等因素对两跳中继系统性能的影响。

关键词: 无人机; 中继链路; 信道衰落; 传播损耗; 中断概率

中图分类号: TN98 **文献标志码:** A

Propagation Loss and Performance Evaluation of UAV Relay Link

Hu Xujun¹, Chen Xiaomin¹, Zhu Qiuming^{1,2}, Zhu Mengqing¹, Chen Bing¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Internet of Things and Control Technologies, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. School of Engineering & Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh, EH14 4AS, UK)

Abstract: For the dual-hop relay system of unmanned aerial vehicle (UAV), a propagation loss model of dual-hop relay link is established. The influence of fuselage feature, antenna characteristics, climate condition and channel fading are considered. Based on the model, the calculating methods of propagation loss are analyzed. Then the statistical characteristics of propagation loss with random fluctuation caused by composite fading including shadowing and multipath fading are derived. Furthermore, the theoretical expression of the outage probability and bit error rate (BER) of dual-hop UAV relay system is developed. Finally, through the numerical simulations in urban, mountainous and sea, the theoretical results accuracy obtained is verified and the impact of flight altitude, ground node position and communication scenarios on the performance of the dual-hop relay system is discussed.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); relay link; channel fading; propagation loss; outage probability

引 言

无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)具有结构简单和造价低廉等优点, 在通信、侦察、搜索

和环境监测等众多领域得到了广泛应用。近年来,将无人机作为高空中继平台,用于提高地面移动自组织网络(Mobile ad-hoc network, MANET)的连通性、覆盖范围和服务质量的相关研究得到了国内外学者的广泛关注^[1-7]。文献[1]研究了利用无人机中继平台提升网络的连通性,针对4种连通性准则的理论分析表明,单架无人机可提升约60%—240%的网络连通性。文献[2-3]研究了无人机中继的位置、指向及飞行路径的优化问题,其中文献[2]假设无人机采用多天线和波束成形技术,利用卡尔曼滤波法预测地面节点的移动位置,给出了一种基于最大信干比的无人机指向优化算法。文献[3]指出中继链路的遍历传输速率与无人机指向呈正弦函数关系,并据此提出了基于最小遍历传输速率门限的无人机数量及位置的动态规划算法。文献[1-3]均采用了随距离指数衰减的经验模型,该模型实现简单,但需要进行大量实测提供衰减指数,同时作者均仅考虑路径损耗因素,忽略了接收信号电平的随机起伏因素。文献[4-5]考虑阴影衰落和多径衰落的影响,其中文献[4]给出了单个无人机中继平台的有效统计覆盖区域。文献[5]提出一种采用编队飞行控制、基于分布式空时分组码的无人机协作网络系统,并通过飞行试验验证了该系统的可靠性。文献[6-7]重点考虑路径损耗叠加多径衰落的情况,分析单跳情况下中继传输方案及中断概率和遍历容量等系统性能指标。然而,大量地-空场景下的信道实测数据表明,阴影衰落普遍存在且不可忽略^[8-10],本文综合考虑机身姿态、天线特性、气候状况及阴影衰落等影响,建立了两跳中继链路的传播损耗模型。

无人机中继系统的布局、传输、优化和性能评估都与中继链路传播损耗的衰落特性密切相关。课题组曾对无人机单跳中继链路的多径阴影复合衰落模型进行研究,并指出其对无人机中继布局及优化的影响^[4]。在此基础上,本文将重点针对两跳无人机中继系统,研究综合考虑飞机姿态、天线特性及气候状况的中继链路传播损耗预测方法。据此,进一步考虑多径及阴影复合衰落因素,推导获得中继系统的中断概率与误比特率的理论性能表达式,并利用仿真验证理论推导的正确性。

1 系统模型

1.1 无人机中继网络模型

基于无人机中继的典型场景如图1所示,假设无人机中继平台的信号有效覆盖半径为 r_N ,为保证对地面各个子网络的无缝覆盖,单架无人机的有效覆盖区域可表示为 $d \times d$ 的方形区域,其中 $d = \sqrt{2}r_N$ 。

以无人机 R_1 为原点建立载体坐标系,无人机 R_2 在该坐标系中的坐标和投影分别记为 (X_2, Y_2, Z_2) 和 R'_2 ,则信号视距传播距离 $d_{R_1 R_2}$ 在载体坐标系中的方位角 φ' 可表示为

$$\varphi' = \begin{cases} \varphi'' & \text{其他} \\ \pi - \varphi'' & \varphi'' \geq 0, Y_2 < 0, -\pi \leq \varphi' \leq \pi \\ -\pi - \varphi'' & \varphi'' < 0, Y_2 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\varphi'' = \arcsin\left(\frac{Z_2}{\sqrt{Y_2^2 + Z_2^2}}\right) \quad -\pi/2 \leq \varphi'' \leq \pi/2 \quad (2)$$

$d_{R_1 R_2}$ 在载体坐标系中的俯仰角 θ' 可表示为

$$\theta' = \arccos\left(\frac{X_2}{|d_{R_1 R_2}|}\right) = \arccos\left(\frac{X_2}{\sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2}}\right) \quad 0 \leq \theta' \leq \pi \quad (3)$$

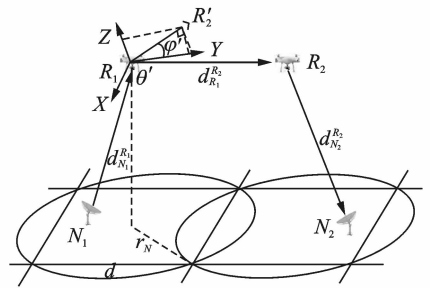


图1 无人机中继系统典型场景
Fig.1 Dual-hop UAV relay system

1.2 中继链路传播损耗

对于任意相邻两个子网络中的地面节点 N_1 和 N_2 , 若综合考虑天线增益、传播损耗和气候因素等, 接收信号的功率可建模为

$$P_r^{N_2} = P_t^{N_1} G_t^N G_r^{N_1} G_r^R G_t^R G_r^R G_t^R A_F^R A_F^R L_j L_R \alpha_{N_1}^R \alpha_{N_2}^R \quad (4)$$

式中: $P_t^{N_1}$, G_t^N 分别表示地面节点 N_1 的发射功率与发射天线增益; $P_r^{N_2}$, G_r^N 表示地面节点 N_2 的接收功率与接收天线增益; G_r^R , G_t^R 与 G_r^R , G_t^R 分别表示无人机中继 R_1 和 R_2 的接收天线与发射天线增益, 四者均由收发天线增益方向图和信号的离开角及到达角确定; A_F^R , A_F^R 对应无人机 R_1 和 R_2 的放大转发增益; L_j 表示地-空、空-空和空-地 3 段链路的传播路径损耗之和; L_R 表示降雨导致的额外损耗; $\alpha_{N_1}^R$, $\alpha_{N_2}^R$ 表示无线信号在地-空与空-地链路传播中受到大尺度衰落(阴影衰落)与小尺度衰落(多径衰落)而导致的随机衰落。为便于描述, 将式(4)改写为

$$P_r^{N_2} = P_t^{N_1} G_D \alpha \quad (5)$$

式中: $G_D = G_t^N G_r^N G_r^R G_t^R G_r^R G_t^R A_F^R A_F^R L_j L_R$ 表示中继链路的传播损耗均值, $\alpha = \alpha_{N_1}^R \alpha_{N_2}^R$ 表示随机衰落因素。

2 中继链路传播损耗分析

2.1 传播损耗均值

在无人机两跳中继链路中, 接收信号的平均功率不仅与发射功率有关, 还受到收发天线增益、转发增益、路径损耗和降雨损耗等因素的综合影响, 对应传播损耗的均值可进一步表示为

$$G_D = G_t^N G_r^N G_r^R G_t^R G_r^R G_t^R A_F^R A_F^R L_j L_R \quad (6)$$

式中: $L_j = 1/(L_{N_1}^R L_{R_1}^R L_{N_2}^R)$, $L_R = 1/(A_{N_1}^R A_{R_1}^R A_{N_2}^R)$ 分别表示整个中继链路等效的路径损耗与降雨损耗。由式(6)可以看出, 中继链路的传播损耗包含天线增益、转发增益、路径损耗及降雨损耗。

由于不同中继段的路径损耗计算方法类似, 不妨将地-空、空-空与空-地链路的路径损耗 $L_{N_1}^R$, $L_{R_1}^R$ 与 $L_{N_2}^R$ 统一用 L 表示, 则地-空、空-空与空-地链路的路径损耗可表示为^[11]

$$L = \left(\frac{4\pi f}{c} \cdot D \right)^2 \quad (7)$$

式中: D 表示地-空、空-空或空-地链路的传播距离; f 表示载波频率; c 表示光速。

降雨损耗的大小与雨滴的几何尺寸及其分布、降雨强度(或降雨率)、电波的极化方向、工作波长、接收地点的位置及海拔高度等诸多因素有关^[12]。根据文献[13]的国际电信联盟无线通信组(International telecommunication union-radio communications sector, ITU-R)雨衰分析方法, 地-空、空-空或空-地链路的降雨损耗(记为 A)可表示为

$$A = \gamma_R L_E \quad (8)$$

式中: γ_R 为衰减率, 单位为 dB/km; L_E 为穿越降雨区的等效路径长度。

鉴于无人机高度与姿态的实时变化, 收发天线的增益计算比较复杂。为表示方便, 将中继链路各天线的增益统一表示为

$$G = \eta * D = \eta * \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} \quad (9)$$

式中: D , η 分别为天线的方向性系数和天线辐射效率; $F(\theta, \varphi)$ 为归一化方向性函数, 反映了天线在不同方向的场分布; φ , θ 分别为方位角与俯仰角, 二者可通过求解视距路径在载体坐标系下的方位角与俯仰角获得。

针对图 1 所示两跳无人机中继系统, 假设不考虑雨衰情况, 各无人机均采用归一化全向天线和归一化转发增益, 信号覆盖区域边长 10 km, 载波频率 968 MHz。为了观测地面节点与覆盖区域中心的距离

d_s 以及无人机飞行高度 h 对整个中继链路传播损耗的影响,以 $h=1\text{ km}$, $d_s=0\text{ km}$ 情况下的传播损耗均值为参考值,图 2 给出了不同距离和飞行高度时相对参考值的额外损耗情况。由图 2 可以看出,(1)传播损耗均值随着 d_s 与 h 的增加而增大;(2)当 $h=1\text{ km}$ 时, d_s 分别取最小值与最大值情况下的中继链路传播损耗均值相差约 30 dB,当 $h>7\text{ km}$ 时, d_s 的变化对传播损耗均值的影响极小;(3)当 $d_s=0\text{ km}$ 时, h 分别为 1, 15 km 情况下的传播损耗均值相差约 47 dB,而当 $d_s=6\text{ km}$ 时, h 的变化对传播损耗均值的影响较小。

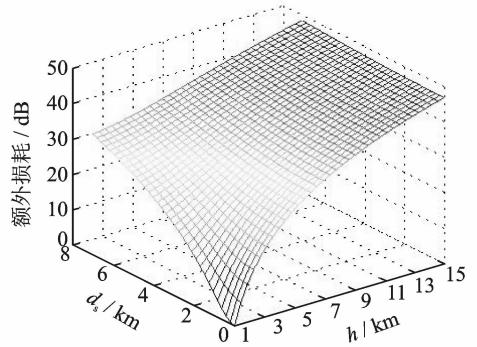


图 2 中继链路相对传播损耗均值

Fig. 2 Relative mean of propagation loss of relay link

2.2 传播损耗衰落特性

无线电波在传播过程中会受到阴影衰落与多径衰落的影响,使得接收端信号的功率呈现随机的起伏。其中,阴影衰落指建筑物、植被等障碍物以及机身遮挡等因素导致接收信号功率的缓慢起伏。阴影衰落通常可建模为对数正态分布^[14],即

$$f_{\beta}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln \bar{P})^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (10)$$

式中: \bar{P} 表示衰落功率均值, σ_x 表示阴影衰落的恶劣程度。

多径衰落是指信号在传播过程中由于受到复杂多样的传播环境影响,导致接收信号电平的快速起伏。目前,常用多径衰落模型包括瑞利、莱斯和 Nakagami。其中, Nakagami 分布比较灵活且已得到广泛应用,该分布可表示为^[15]

$$f_{\gamma}(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}x^2} \quad (11)$$

式中: $\Gamma(m)$ 和 $\Omega = E[x^2]$ 分别表示 Gamma 函数和多径衰落的平均功率。 $m \geq 0$ 用于描述信道衰落的恶劣程度;当 $m=0.5$ 和 1 时,该分布分别退化为单边高斯和瑞利分布;当 $m>1$ 时对应莱斯分布。

无人机-无人机之间的链路为典型的空-空链路,由于始终存在视距路径且没有遮挡,信号的衰落因素可以近似忽略。因此,整个中继链路传播损耗的随机衰落可建模为空-地和地-空两段链路信号衰落的级联,则

$$\alpha = \alpha_{N_1}^R \alpha_{N_2}^R = \beta_1 \gamma_1^2 \beta_2 \gamma_2^2 \quad (12)$$

式中: β_1, γ_1 与 β_2, γ_2 分别对应地-空与空-地传播链路上的阴影衰落与多径衰落。根据随机变量的性质,级联后的多径阴影复合衰落幅度的概率密度函数可表示为

$$f(x) = \int_0^{\infty} f_{\gamma_i}(x | \Omega) f_{\beta_i}(y) dy \quad i=1,2 \quad (13)$$

理论上将式(10,11)代入式(13)即可获得最终结果。然而,实际中该式不存在闭式解,从而对后续统计特性及系统性能闭式解推导造成很大困难。鉴于 Gamma 分布与对数正态分布比较相似,本文采用 Gamma 分布模型来建模阴影衰落^[16],则

$$f_{\beta}(x) = \frac{x^{m_s-1}}{\Gamma(m_s)(\Omega_s/m_s)^{m_s}} e^{-x/(\Omega_s/m_s)} \quad (14)$$

另外,可利用矩匹配方法计算获得二者参数的对应关系为

$$\begin{aligned} m_s &= 1/(e^{\sigma_s^2} - 1) \\ \Omega_s &= \bar{P} e^{\sigma_s^2/2} \end{aligned} \quad (15)$$

最后,将式(11,14)代入式(13),可得到地-空与空-地链路多径阴影复合衰落包络的理论分布为

$$f_{\alpha_{N_i}^{R_i}}(x) = \frac{4}{\Gamma(m_i)\Gamma(m_{s_i})} \left(\frac{m_i m_{s_i}}{\Omega_{s_i}}\right)^{\frac{m_i+m_{s_i}}{2}} \cdot x^{m_i+m_{s_i}-1} K_{m_i-m_{s_i}}\left(2x\sqrt{\frac{m_i m_{s_i}}{\Omega_{s_i}}}\right) \quad i=1,2 \quad (16)$$

式中: $m_i, m_{s_i} (i=1,2)$ 分别体现了地-空与空-地链路的多径衰落及阴影衰落的恶劣程度; $\Omega_{s_i} = \overline{P_i} e^{\sigma_{s_i}^2/2}$; $i=1,2$ 分别表示地-空与空-地链路的信道衰落平均功率; $K_\nu(\cdot)$ 表示第2类 ν 阶修正贝塞尔函数。该分布也称为 Generalized K(GK)分布,目前已被广泛应用于雷达、声纳和光通信建模等领域。

为了进一步获得级联后的中继链路信道衰落的等效概率分布,定义上述 GK 分布对应的矩生成函数为

$$M_{\alpha_{N_i}^{R_i}}(s) = \int_0^\infty \exp(-sy) f_{\alpha_{N_i}^{R_i}}(y) dy \quad i=1,2 \quad (17)$$

级联后信道衰落分布对应的矩生成函数为

$$M_\alpha(s) = \int_0^\infty \int_0^\infty \exp(-sy_1 y_2) f_{\alpha_{N_1}^{R_1}}(y_1) f_{\alpha_{N_2}^{R_2}}(y_2) dy_1 dy_2 = \frac{1/\sqrt{\pi}}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_{s_1})\Gamma(m_2)\Gamma(m_{s_2})} \cdot G_{2.4}^{4.2} \left(\frac{4m_1 m_{s_1} m_2 m_{s_2}}{\Omega_{s_1} \Omega_{s_2} s^2} \middle| \begin{matrix} 1, 1/2 \\ m_{s_1}, m_1, m_{s_2}, m_2 \end{matrix} \right) \quad (18)$$

式中: $G[\cdot]$ 表示 Meijer-G 函数。利用矩生成函数和概率密度函数的对应关系,可以最终推导获得空-地和地-空两段链路级联衰落 α 的包络理论分布为

$$f_\alpha(x) = L^{-1}[M_\alpha(s); x] = \frac{2}{x\Gamma(m_1)\Gamma(m_{s_1})\Gamma(m_2)\Gamma(m_{s_2})} \cdot G_{0.4}^{4.0} \left(\frac{m_1 m_{s_1} m_2 m_{s_2} x^2}{\Omega_{s_1} \Omega_{s_2}} \middle| \begin{matrix} - \\ m_{s_1}, m_1, m_{s_2}, m_2 \end{matrix} \right) \quad (19)$$

式中: $L^{-1}[\cdot]$ 表示拉普拉斯逆变换。

在此基础上,定义地面节点 N_2 接收信号的瞬时信噪比为

$$R = \frac{P_t^N G_D}{N_0} X^2 \quad (20)$$

式中: $N_0 = KT$ 表示噪声功率谱密度,其中 K, T 分别表示波兹曼常数与等效噪声温度。结合随机变量变换性质,可得接收信号瞬时信噪比的概率分布为

$$f_R(r) = \frac{1}{r\Gamma(m_1)\Gamma(m_{s_1})\Gamma(m_2)\Gamma(m_{s_2})} \cdot G_{0.4}^{4.0} \left(\frac{m_1 m_{s_1} m_2 m_{s_2} r}{\bar{R}} \middle| \begin{matrix} - \\ m_{s_1}, m_1, m_{s_2}, m_2 \end{matrix} \right) \quad (21)$$

式中 \bar{R} 表示平均信噪比,可表示为

$$\bar{R} = \frac{P_t^N G_D}{N_0} \Omega_{s_1} \Omega_{s_2} \quad (22)$$

为了验证本文推导获得的无人机两跳中继系统接收端瞬时信噪比分布的正确性,以3种典型场景为例,利用文献[17]提供的复合衰落随机生成方法对无人机中继链路接收端信噪比分布进行了统计验证。参考文献[8-10]的实测结果,令海洋、山区和郊区3个典型场景下的信道衰落参数为 $\sigma_{s_1} = \sigma_{s_2}$,分别为4.2 dB, 3.5 dB, 2.6 dB; $m_1 = m_2$,分别为9.6, 12.7, 9.4。图3比较了接收端信号瞬时信噪比的统计结果(统计样点数 10^6)及理论分布。从图3可以看到,各种场景下接收信号的瞬时信噪比统计结果与理论分布非常吻合,当位于郊区时,瞬时信噪比最集中,通信质量最好,而位于海洋时,通信质量最差。

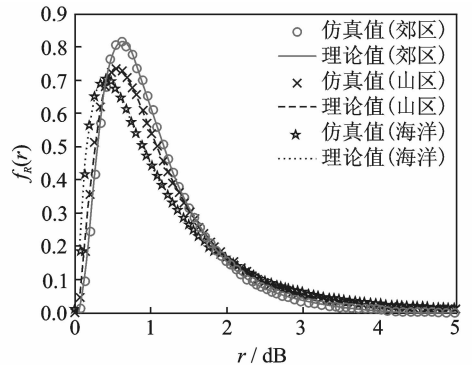


图3 不同场景瞬时信噪比分布
Fig. 3 Instantaneous SNR under different scenarios

2.3 衰落特性对系统性能的影响

中断概率定义为接收端瞬时信噪比低于接收机信噪比门限的概率。若地面节点 N_2 接收到信号的信噪比低于最低信噪比门限 r_0 , 则信道中断。因此, 中断概率为

$$P_{out} = \int_0^{r_0} f_R(r) dr \tag{23}$$

将式(21)代入式(23), 可得无人机两跳中继系统的中断概率表达式为

$$P_{out} = \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_s)\Gamma(m_2)\Gamma(m_s)} \cdot G_{1,5}^{4,1} \left(\frac{m_1 m_s m_2 m_s r_0}{R} \middle| \frac{1}{m_s, m_1, m_s, m_2, 0} \right) \tag{24}$$

误比特率是衡量无线通信系统性能的重要指标, 无人机中继系统的平均误比特率 (Average bit error rate, ABER) 定义为

$$\overline{P_e} = \int_0^{\infty} P_e(r) f_R(r) dr \tag{25}$$

式中: $f_R(r)$ 表示无人机中继链路接收信号瞬时信噪比分布; $P_e(r)$ 表示信噪比为 r 时信号的误比特率。若发射信号采用 BPSK 调制, 对应误比特率可表示为^[18]

$$P_e(r) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left(r \middle| \frac{1}{0, 1/2} \right) \tag{26}$$

因此, 利用式(21, 25, 26), 最终可推导两跳无人机中继系统的平均误比特率为

$$\overline{P_e} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\Gamma(m_1)\Gamma(m_s)\Gamma(m_2)\Gamma(m_s)} \cdot G_{2,5}^{4,2} \left(\frac{m_1 m_s m_2 m_s}{R} \middle| \frac{1, 1/2}{m_s, m_1, m_s, m_2, 0} \right) \tag{27}$$

3 数值仿真与验证

为验证本文推导的无人机两跳中继系统的中断概率和平均误比特率 (Average bit error rate, ABER), 假设信号覆盖区域边长 10 km, 发射功率 1 W, 载波频率 968 MHz, 无人机均采用归一化全向天线, 转发增益也归一化且不考虑降雨因素。

假设地面节点 N_2 采用不同信噪比门限的接收机, 对应门限余量分别为 0, -3, -6 dB。图 4 给出了山区场景下不同接收机中断概率随无人机飞行高度的变化情况。从图 4 可以看到, 不同接收机情况下的中断概率仿真结果与理论值吻合, (1) 当 h 不变时, Δr_0 越大, P_{out} 越大; 当 Δr_0 为定值时, 随着 h 的增加, P_{out} 逐渐增大; (2) 当 $P_{out} < 0.1$ 或 $P_{out} > 0.9$ 时, 随 h 的增加, P_{out} 缓慢增大; (3) 当 $0.1 \leq P_{out} \leq 0.9$ 时, h 的变化对 P_{out} 的影响很大, 这是由于地面节点 N_2 接收信号的瞬时信噪比主要集中在接收信号的平均信噪比附近, 随着 h 的增加, 地面节点 N_2 接收信号的平均功率逐渐减小并接近信噪比门限值, 从而导致 P_{out} 快速增大。

为了进一步观测不同场景下无人机飞行高度对中断概率的影响, 图 5 分别对海洋、山区和郊区场景下的无人机中继系统进行仿真。

从图 5 可以看到, 3 种场景下的中断概率仿真结果与理论值非常吻合: (1) 当所处场景不变时, 随着 h 的增加,

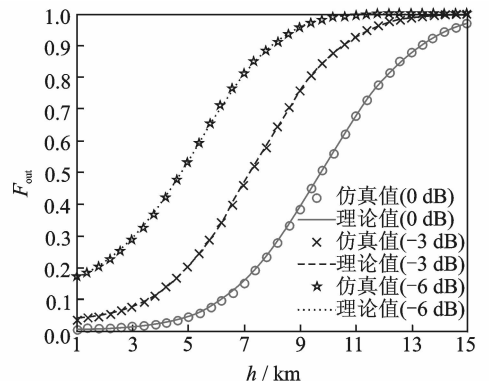


图 4 不同信噪比门限接收机中断概率与飞行高度关系

Fig. 4 Outage probability of receivers with different SNR thresholds at different altitudes

P_{out} 逐渐增大; (2) 当无人机处于低空飞行时, 该中继系统在郊区场景下的 P_{out} 最小, 在海洋场景下的 P_{out} 最大, 而 $h > 10$ km 时, 情况反之; (3) 当 $0.1 \leq P_{\text{out}} \leq 0.9$ 时, h 的变化对于郊区场景 P_{out} 的影响最大, 山区次之, 海洋最小。结合图 3 可以看到, 接收信号的瞬时信噪比相对集中于平均信噪比附近, 而郊区场景下接收信号的瞬时信噪比最集中, 故 h 变化所引起的接收信号平均信噪比变化对郊区场景 P_{out} 的影响最大。

为了进一步观测系统性能, 图 6 对典型场景下的平均误比特率进行了仿真。假设发射信号采用 BPSK 调制, 无人机飞行高度为 15 km 时, 接收信号信噪比为 5 dB, 且噪声功率固定, 统计样点数为 10^7 。

从图 6 可以看到, 3 种场景下的接收信号平均误比特率仿真结果与理论值较吻合: (1) 当场景固定时, 随着 h 的增加, 平均误比特率逐渐增大; 当 h 不变时, 该系统位于郊区场景下平均误比特率最大, 山区次之, 海洋最差; (2) 当 $h < 7$ km 时, 平均误比特率低于 0.001, 无人机中继系统具有较好的性能。

4 结束语

无人机中继链路在通信过程中由于受到自身姿态、天气状况、通信距离以及无线衰落等因素影响, 导致该链路通信质量下降。本文针对无人机两跳中继通信典型场景, 建立了两跳中继链路的传播损耗模型, 推导了接收端信号瞬时信噪比的概率分布, 并由此获得了该系统平均误比特率的理论表达式。最后, 通过计算机仿真验证了本文结论的正确性, 并分析了通信距离、通信场景和飞行高度等因素对无人机两跳中继系统性能的影响, 该结论对于无人机中继系统的规划和优化具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Han Z, Swindlehurst A L, Liu K J R. Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(7): 3533-3546.
- [2] Jiang F, Swindlehurst A L. Dynamic UAV relay positioning for the ground-to-air uplink [C]//2010 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). Miami, FL, USA; IEEE, 2010: 1766-1770.
- [3] Zhan P, Yu K, Swindlehurst A L. Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: Performance and optimization [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 2068-2085.
- [4] 朱秋明, 周生奎, 霍帅珂, 等. 无人机中继平台覆盖区域统计模型[J]. *航空学报*, 2014, 35(1): 223-229.
Zhu Qiuming, Zhou Shengkui, Huo Shuaike, et al. A statistical area coverage model for unmanned aerial vehicles as relay platforms [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 223-229.
- [5] Choi M, Lee H, Nam H. Cooperative UAV networks based on distributed space-time block codes [C]//2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Xi'an, China; IEEE, 2016: 454-458.
- [6] Park J, Park G, Roh B, et al. Performance analysis of asymmetric RF/FSO dual-hop relaying systems for UAV applications [C]//MILCOM 2013-2013 IEEE Military Communications Conference. San Diego, CA, USA; IEEE, 2013: 1651-1656.

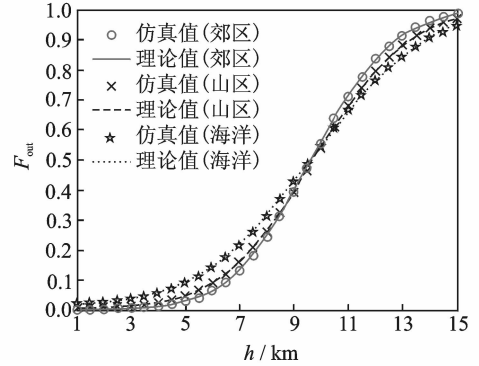


图 5 不同场景中中断概率与飞行高度关系
Fig. 5 Outage probability under different scenarios at different altitudes

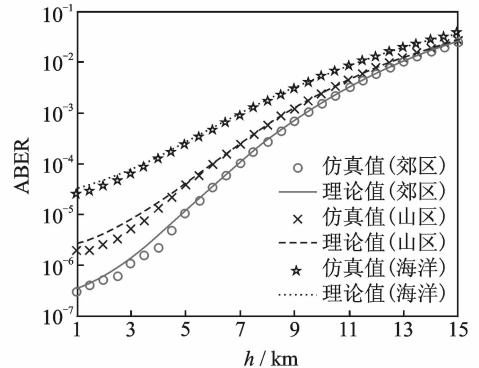


图 6 不同场景平均误比特率与飞行高度关系
Fig. 6 ABER under different scenarios at different altitudes

- [7] 欧阳键, 庄毅, 薛羽, 等. 非对称衰落信道下无人机中继传输方案及性能分析[J]. 航空学报, 2013, 34(1):130-140.
Ouyang Jian, Zhuang Yi, Xue Yu, et al. UAV relay transmission scheme and its performance analysis over asymmetric fading channels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(1):130-140.
- [8] Matolak D, Sun R. Air-Ground channel characterization for unmanned aircraft systems-part I: Methods, measurements, and models for over-water settings[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1):26-44.
- [9] Sun R, Matolak D W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems part II: Hilly and mountainous settings[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3):1913-1925.
- [10] Matolak D W, Sun R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: The near-urban environment [C]//Military Communications Conference. Tampa, FL, USA: IEEE, 2015:1656-1660.
- [11] 戴秀超, 朱秋明, 吕卫华, 等. Nakagami 衰落下无人机数据链抗干扰性能[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(3):584-591.
Dai Xiuchao, Zhu Qiuming, Lv Weihua, et al. Anti-jamming capability of UAV data-link under nakagami fading[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(3):584-591.
- [12] Zheng Y, Wang Y, Meng F. Modeling and simulation of path loss and fading for air-ground link of HAPs within a network simulator[C]//2013 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC). Beijing, China: IEEE, 2013: 421-426.
- [13] Series P. ITU-R P. 618-12-2015, propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems[S]. Geneva: International Telecommunication Union-Radio Communications Sector, 2015.
- [14] Black D M, Reudink D O. Some characteristics of mobile radio propagation at 836 MHz in the Philadelphia area [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1972, 21(2):45-51.
- [15] Zhu Q M, Dang X Y, Xu D Z, et al. Highly efficient rejection method for generating Nakagami-m sequences[J]. Electronics Letters, 2011, 47(19):1100-1101.
- [16] Abdi A, Kaveh M. On the utility of Gamma PDF in modeling shadow fading[C]//1999 IEEE 49th Vehicular Technology Conference. Houston, TX, USA: IEEE, 1999:2308-2312.
- [17] 周生奎, 朱秋明, 戴秀超, 等. 一种新的相关复合衰落模拟方法[J]. 应用科学学报, 2015, 33(5):470-480.
Zhou Shengkui, Zhu Qiuming, Dai Xiuchao, et al. A novel method for generation of correlated composite fading[J]. Journal of Applied Sciences, 2015, 33(5):470-480.
- [18] Trigui I, Laourine A, Affes S, et al. On the performance of cascaded generalized κ fading channels[C]//Proceedings of the 28th IEEE Conference on Global Telecommunications. Hawaii, USA: IEEE, 2009:5818-5822.

作者简介:



胡续俊(1992-),男,硕士研究生,研究方向:无人机中继信道建模和模拟,E-mail: sigalhu@foxmail.com。



陈小敏(1975-),女,副教授,博士,研究方向:无线通信、空时编码的信号检测和链路自适应技术。



朱秋明(1979-)男,博士,副教授,研究方向:MIMO 无线信道建模和模拟、航空数据链技术。



祝梦卿(1994-)男,硕士研究生,研究方向:航空信道建模和模拟。



陈兵(1970-),男,教授,研究方向:计算机网络、无线网络和认知无线电及下一代网络等。

(编辑:陈璐)