

无人机中继平台覆盖区域统计模型

朱秋明^{1, 2, *}, 周生奎¹, 霍帅珂¹, 陈小敏¹, 徐大专¹

1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009

摘要: 针对中继信号覆盖区域确定性模型没有考虑信道随机衰落影响的问题, 提出了一种基于中断概率的无人机(UAVs)中继平台信号覆盖半径统计模型。通过将中继链路建模为包含路径损耗、阴影衰落和多径衰落的复合分布模型, 推导获得中继信号覆盖半径的概率分布, 并给出一种利用中断概率数值求解覆盖半径的方法。仿真结果表明, 信道衰落对覆盖半径影响非常大, 当中断概率小于10%时, 覆盖半径仅为无衰落信道时的一半。研究结果对移动自组织网络(MANETs)中的中继网络的无人机最优布置、飞行策略以及网络性能评估等具有重要的参考价值。

关键词: 无人机; 移动自组织网络; 中继平台; 覆盖区域; 信道建模; 中断概率

中图分类号: V217⁺.1; TP393.03

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2014)01-0223-07

地面移动自组织网络节点数目和活动范围不断扩大, 以及复杂地形环境如高山、建筑物遮挡等因素, 导致网络连通性和吞吐量下降。无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAVs)具有结构简单和造价低廉等优点, 在民用和军用通信领域已得到广泛应用。将无人机作为移动自组织网络(Mobile Ad-hoc Networks, MANETs)的高空中继平台, 连通不同地面移动子网或孤立节点从而提高网络连通性的相关研究受到越来越多关注^[1-6]。早期研究主要集中在组网算法、媒体访问控制(Media Access Control, MAC)和路由层协议等方面^[1-3], 近期学者开始研究无人机中继的最优布置、飞行路径和网络性能优化等问题^[5-8]。其中, 文献[5]分析了中继节点采用不同转发策略时的网络容量; 文献[6]定义了4种连通性准则并给

出对应无人机最优的中继布局和飞行路径, 指出单无人机中继系统可提高60%至240%的网络连通性, 文献[7]则进一步研究了多无人机中继的最优飞行路径问题; 文献[8]提出采用遍历归一化传输速率作为中继链路的性能指标, 并利用优化算法获得无人机机身对地面节点的最优指向。

研究表明, 无人机最优布置、飞行路径及中继网络性能都与中继信号的传播及覆盖密切相关。文献[8]针对第3代移动通信网络推导了高空中继平台的信号覆盖范围, 文献[9]进一步分析了视距、非视距以及混合模式对中继链路覆盖区域的影响。然而, 文献[5]~文献[8]均假设中继链路为理想的自由空间传播, 并采用确定性的分析方法, 而没有考虑多径与多普勒等因素对信号传播的随机影响, 所获结论必然与实际情况有所

收稿日期: 2013-03-26; 退修日期: 2013-04-17; 录用日期: 2013-05-28; 网络出版时间: 2013-06-06 13:21

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130606.1321.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(61172077, 61172078); 航空科学基金(20120152001); 中国博士后科学基金(2013M541661); 中央高校基本科研业务费(NS2012075, NZ2012012); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj130115); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

* 通讯作者 Tel.: 025-84896490-420 E-mail: zhuqiuming@nuaa.edu.cn

引用格式: Zhu Q M, Zhou S K, Huo S K, 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. 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.

差异。因此,本文在中继信号覆盖区域确定性模型的基础上,综合考虑传播路径损耗、多径衰落以及阴影衰落的影响,提出了一种基于中断概率的覆盖区域统计模型。

1 中继系统几何模型

高空无人机中继平台覆盖区域几何模型如图1所示,假设机载天线安装于机身下方且向下全向辐射,地球半径 R 约为 6 370 km,无人机高度记为 H ,中继信号的传播距离记为 d ,则有效覆盖区域(球冠 DPE 面积)为

$$S = 2\pi R h \quad (1)$$

式中: h 为 PF 的长度。在直角三角形 ADF 和 DFO 中分别运用勾股定理可得

$$h = \frac{d^2 - H^2}{2H + 2R} \quad (2)$$

此时天线辐射的最小波束宽度为

$$\theta = \arctan \frac{g}{H + h} \quad (3)$$

式中:

$$g = \frac{\sqrt{(d^2 - H^2)(4RH + 4R^2 - d^2 + H^2)}}{2H + 2R} \quad (4)$$

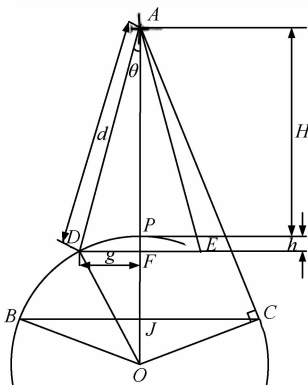


图1 无人机中继系统的几何关系

Fig. 1 Geometric relationships for UAV relay system

若不考虑无人机发射信号功率限制、通信容量和障碍物遮挡,则最大覆盖区域(球冠 BPC 面积)由中继信号传播距离决定。利用式(1)和式(2)可得有效覆盖面积最大值为

$$S_{\max} = 2\pi R \frac{RH}{R + H} \quad (5)$$

对应天线辐射最小波束宽度的最大值为

$$\theta_{\max} = \arccos \frac{\sqrt{H^2 + 2RH}}{R + H} \quad (6)$$

2 中继平台覆盖半径

无人机飞行高度一般为数百至数千米远小于地球半径,图1中的 $\angle COA$ 可表示为

$$\angle COA = \arctan \frac{\sqrt{H^2 + 2RH}}{R} \quad (7)$$

飞行高度为 4 km 和 15 km 时, $\angle COA$ 分别小于 2° 和 4° 。因此,圆弧 BPC 与直线 BC 长度基本一致,球冠 DPE 面积也近似等于以 P 为中心的平面圆面积,结合式(1)可得覆盖半径 r 为

$$r = \sqrt{\frac{R(d^2 - H^2)}{R + H}} \quad (8)$$

若不考虑发射功率和天线波束限制因素,中继信号最大传播距离可表示为

$$d_{\max} = \sqrt{H^2 + 2RH} \quad (9)$$

则最大覆盖半径可表示为

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{2R^2 H}{R + H}} \quad (10)$$

图2仿真给出了无人机处于不同高度时,中继信号的最大传播距离和覆盖半径曲线。由图可见:①无人机处于数百至数千米高度时,中继信号覆盖半径约为 50~300 km;②中继信号最大传播距离与覆盖半径基本相等,原因在于中继高度远小于地球半径,导致图1中的 $\angle BCA$ 非常小,因而 CJ (最大覆盖半径)和 CA (最大传播距离)长度近似相等。另外,进一步简化式(9)和式(10)可得二者的近似表达式为

$$r_{\max} \approx d_{\max} \approx \sqrt{2RH} \quad (11)$$

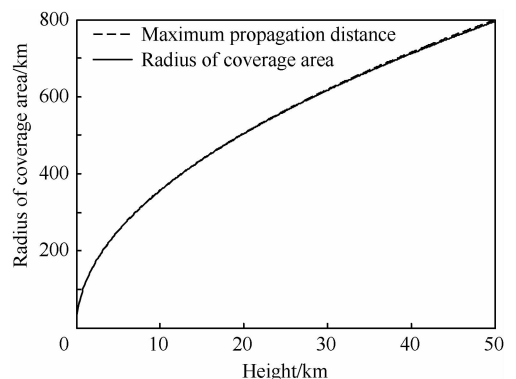


图2 传播距离、覆盖半径与中继高度对应关系

Fig. 2 Relationships between propagation distance and radius of coverage area with height of the relay platform

一般情况下,无人机中继平台的覆盖区域由飞行高度和信号最大传播距离决定,而最大传播距离与中继链路信道状况有关。假设中继系统的性能指标如误比特率等已知,则地面节点的最低信噪比门限也随之确定,进而可求出中继链路的最大传播距离。地面节点接收信号平均功率可表示为^[10]

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{A_f \Delta L} \quad (12)$$

式中: P_t 为无人机发射功率; G_r 、 G_t 分别为收发天线增益; ΔL 为大气折射、雨衰等恶劣天气以及极化、馈线损耗等因素对接收功率的额外损耗; $A_f = (4\pi d/\lambda)^2$ 为自由空间信号传播路径损耗,其中 λ 为波长。接收机噪声因素一般采用等效噪声温度 $N_0 = KT$, T 为接收端等效噪声温度, K 为波尔兹曼常数。

假设接收端最低信噪比门限为 γ_0 , 则自由空间信号传播路径损耗应满足如下条件:

$$A_f \leq \frac{P_t G_t G_r}{\Delta L K R_b T \gamma_0} \quad (13)$$

式中: R_b 为信息传输速率。若不考虑信道随机衰落,对应最大传播距离均值为

$$\bar{d} \leq \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{\Delta L K R_b T \gamma_0} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2} \quad (14)$$

将式(14)代入式(8)可得无人机中继平台的覆盖半径均值为

$$\bar{r} \leq \sqrt{\frac{R \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{16\pi^2 \Delta L K R_b T \gamma_0} - H^2 \right)}{R + H}} \quad (15)$$

3 基于中断概率的覆盖半径

3.1 信道衰落模型

无线信号传播过程中通常受到路径损耗、阴影衰落和多径衰落3种因素影响,导致中继链路的最大传播距离不确定。路径损耗表示大尺度范围内(通常为几十至数百个波长距离)无线信号传播衰减的均值,地空通信环境下可近似等于自由空间传播损耗。无人机中继链路信号衰减模型可表示为

$$L_t = (4\pi d/\lambda)^2 L_s L_m \quad (16)$$

式中: L_s 、 L_m 分别为路径损耗基础上的阴影和多径随机衰落。阴影衰落也称慢衰落,通常服从对数正态分布,其表达式如下:

$$f_{L_s}(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x l} e^{-\frac{(\ln l - \ln L_0)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (17)$$

式中: L_0 为路径损耗均值; σ_x 为阴影衰落程度,实测 $\sigma_x = 1.5 \sim 7$ dB^[11]。文献[12]指出 Gamma 分布与实测数据也非常吻合且易于后续数学分析, Gamma 分布可表示为

$$f_{L_s}(l) = \frac{l^{m_s-1}}{\Gamma(m_s)(\Omega_s/m_s)^{m_s}} e^{-l/(\Omega_s/m_s)} \quad (18)$$

式中: $m_s = 1/(e^{\sigma_x^2} - 1)$; $\Omega_s = L_0 e^{\sigma_x^2/2}$; $\Gamma(m)$ 为 Gamma 函数。

多径衰落也称快衰落,表示阴影慢衰落基础上接收信号幅值的快速起伏,目前广泛采用 Nakagami 分布模型^[13], 对应信号功率衰落服从 Gamma 分布, Nakagami 分布可表示为

$$f_{L_m}(l) = \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{L}_s}\right)^m l^{m-1} e^{-\frac{m}{\bar{L}_s} l} \quad (19)$$

式中: $\bar{L}_s = E(r^2)$ 表示多径随机衰落平均功率; $m \geq 0$ 表示衰落因子,用于描述信道衰落的恶劣程度,值越小信道越恶劣,实测 $m = 1.2 \sim 10$ 。

结合式(16)、式(18)和式(19),可得无人机中继链路传播衰减的复合衰落分布为

$$f_{L_t}(l) = \int_0^\infty f_{L_m}(l|x) f_{L_s}(x|L_0) dx = \frac{2}{\Gamma(m)\Gamma(m_s)} \left[\frac{mm_s}{(4\pi d/\lambda)^2} \right]^{\frac{m+m_s}{2}} l^{\frac{m+m_s}{2}-2} \cdot K_{m_s-m} \left[2 \sqrt{\frac{mm_s}{(4\pi d/\lambda)^2}} l \right], l > 0 \quad (20)$$

式中: $K_{m_s-m}(\cdot)$ 表示第2类 $m_s - m$ 阶修正贝塞尔函数。该分布也称为 Gamma-Gamma(G-G)分布,在雷达、声纳和光通信信道建模领域已得到应用^[14-15]。

3.2 覆盖半径统计值

中断概率定义为地面接收瞬时信噪比低于信噪比门限的概率,即

$$P_{\text{out}} = \int_0^{\gamma_0} f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (21)$$

式中: $f_\gamma(\gamma)$ 为接收瞬时信噪比分布。信噪比门限对应的信道传播衰减为 A/γ_0 , 故中断概率可等价

$$P_{\text{out}} = \int_{A/\gamma_0}^\infty f_{L_t}(l) dl = 1 - F_{L_t}(d) |_{l=A/\gamma_0} \quad (22)$$

式中: $A = \frac{P_t G_t G_r}{\Delta L K R_b T}$; $F_{L_t}(d, l)$ 为复合衰落累积概率密度函数,利用文献[16]中的式(3)可得

$$F_{L_f}(d) \Big|_{l=A/\gamma_0} = \pi \csc(\pi(m_s - m)) \cdot \left[\frac{\left(\frac{m_s m}{(4\pi d/\lambda)^2 \gamma_0}\right)^m F_2\left(m; 1 - m_s + m, 1 + m; \frac{m_s m}{(4\pi d/\lambda)^2 \gamma_0}\right)}{\Gamma(m_s) \Gamma(1 - m_s + m) \Gamma(1 + m)} - \frac{\left(\frac{m_s m}{(4\pi d/\lambda)^2 \gamma_0}\right)^{m_s} F_2\left(m_s; 1 + m_s - m, 1 + m_s; \frac{m_s m}{(4\pi d/\lambda)^2 \gamma_0}\right)}{\Gamma(m) \Gamma(1 + m_s - m) \Gamma(1 + m_s)} \right] \quad (23)$$

式中: $\csc(\cdot)$ 为余割函数。由概率论性质可知, 式(23)累积概率密度函数关于变量 $m_s m l / (4\pi d/\lambda)^2$ 单调递增且可逆, 所以 $F_{L_f}(d, l)$ 关于变量 d 单调增减, 关于变量 l 单调递增。因此, 结合式(22)和式(23)可得

$$d \leq F_{L_f}^{-1}(1 - P_{\text{out}}) \quad (24)$$

式中: $F_{L_f}^{-1}(x)$ 为累积概率密度函数以 d 为变量的逆函数。

将式(24)代入式(8), 可得基于中断概率的覆盖半径统计模型为

$$r \leq \sqrt{\frac{R((F_{L_f}^{-1}(1 - P_{\text{out}}))^2 - H^2)}{R + H}} \quad (25)$$

3.3 切线法求逆函数

直接利用 $F_{L_f}^{-1}(x)$ 求解 d 比较困难, 本文采用数值计算方法。首先, 定义误差函数

$$N(d) = x - F_{L_f}(d) \quad (26)$$

易证误差函数单调递增且对应导数为(证略)

$$\dot{N}(d) = - \frac{\pi \csc(\pi(m_s - m))}{\Gamma(m_s) \Gamma(1 - m_s + m) \Gamma(1 + m)} \cdot \left(\frac{m_s m}{(4\pi/\lambda)^2 \gamma_0} \right)^m B + \frac{\pi \csc(\pi(m_s - m))}{\Gamma(m) \Gamma(1 + m_s - m) \Gamma(1 + m_s)} \cdot \left(\frac{m_s m}{(4\pi/\lambda)^2 \gamma_0} \right)^{m_s} C \quad (27)$$

式中:

$$B = -2md^{-2m-1} \cdot$$

$$F_2\left(m; 1 - m_s + m, 1 + m; \frac{m_s m}{(4\pi d/\lambda)^2 \gamma_0}\right) - 2m^2 m_s \frac{A}{\gamma_0} d^{-2m-1} \cdot$$

$$F_2\left(1 + m; 2 + m, 2 - m_s + m; \frac{m_s m}{(4\pi d/\lambda)^2 \gamma_0}\right) \frac{1}{(1 - m_s + m)(1 + m)(4\pi d/\lambda)^2} \quad (28)$$

$$C = -2m_s d^{-2m_s-1} \cdot$$

$$F_2\left(m_s; 1 + m_s - m, 1 + m_s; \frac{m_s m}{(4\pi d/\lambda)^2 \gamma_0}\right) - 2m_s^2 m \frac{A}{\gamma_0} d^{-2m_s-1} \cdot \frac{F_2\left(1 + m_s; 2 + m_s, 2 + m_s - m; \frac{m_s m}{(4\pi d/\lambda)^2 \gamma_0}\right)}{(1 - m_s + m)(1 + m)(4\pi d/\lambda)^2} \quad (29)$$

然后, 利用式(30)进行迭代,

$$d_{i+1} = d_i - \frac{N(d_i)}{\dot{N}(d_i)} \quad (30)$$

令初始值 $d_0 = \frac{\lambda \sqrt{A/\gamma_0}}{4\pi}$, 计算精度可根据实际需求设定。

4 数值仿真与应用

4.1 确定性模型仿真

下面利用无人机中继链路参数对上述结论进行仿真验证, 假设收发端采用全向天线且天线增益归一化 $G_t = G_r = \Delta L = 1$, 发射功率 $P_t = 1$ W, 无线信号载波频率 $f_0 = 400$ MHz, 数据速率 $R_b = 1$ Mbps, $KT = 4 \times 10^{-19}$ dB/Hz。图3仿真给出了不同中继高度和信噪比门限值下的覆盖半径均值。由图可见: ①随着中继高度增加, 信号覆盖半径迅速增加, 增长速率与信噪比门限无关, 且与式(11)近似表达式吻合; ②随着信噪比门限下降, 信号覆盖半径迅速增加。由于中继高度远小于覆盖半径, 增长速率近似满足如下条件:

$$r_0 \approx \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{16\pi^2 \Delta L K R_b T}} \gamma_0^{-1/2} \quad (31)$$

若综合考虑中继高度和信噪比门限的限制因素, 覆盖半径最大值可表示为

$$r_{\max} \approx \min \left\{ \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{16\pi^2 \Delta L K R_b T}} \gamma_0^{-1/2}, \sqrt{2RH} \right\} \quad (32)$$

为便于比较, 图3给出了 r_{\max} 随着中继高度和信噪比门限的变化曲线(星号线表示)。

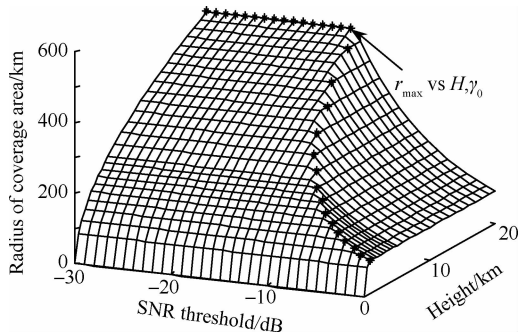


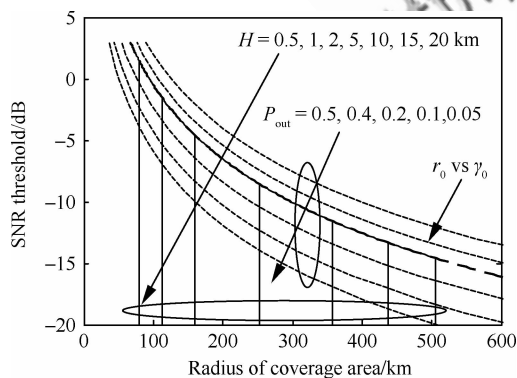
图3 信噪比门限、中继高度与覆盖半径关系

Fig. 3 Relationships between radius of coverage area with SNR threshold and height of the relay platform

4.2 概率模型仿真

结合图3和式(31)和式(32)可知,覆盖半径与信噪比门限成反比关系,不同中继高度对应递减曲线的一段区间如图4所示,图中粗虚线表示不同中断概率下式(31)对应理论值,实线表示中继平台不同高度时的最大覆盖半径。

在此基础上,若考虑信道随机衰落因素,覆盖半径还与中断概率有关。假设中继信道服从 $m=1.2, m_s=2$ 的复合衰落分布模型,利用本文切线法求解式(25),可得不同中断概率下覆盖半径曲线如图4中各细虚线所示。由图可见:①覆盖半径确定时,信噪比门限增大,中断概率将增加;②信噪比门限确定时,中断概率减小,覆盖半径迅速下降。值得强调的是,覆盖半径最大值(即图中实线),与中断概率或信道衰落无关,仅由最大传播距离决定。



---- Results from Eq.(31) with different outage probability
| Maximum radius of coverage area with different height of the relay platform

图4 信噪比门限与覆盖半径的关系曲线

Fig. 4 SNR threshold versus radius of coverage area

为观测不同恶劣程度信道对覆盖半径及中断概率的影响,利用信道平均衰落情况下的覆盖半径进行归一化,发现所获曲线与信噪比门限值无关。

图5仿真给出了恶劣、中度和微弱3种典型阴影衰落信道下,归一化覆盖半径与中断概率的对应关系曲线。由图可见:①信道衰落对覆盖半径影响非常大,当中断概率小于10%时,3种衰落情况下的归一化覆盖半径均小于0.5;②信道衰落越恶劣,中断概率对覆盖半径影响越大。对于 $\sigma_x=9.3$ dB情况,中断概率从50%降至30%时,覆盖半径约缩小一半;③信道衰落越微弱,覆盖半径对中断概率的影响反而越大。原因在于接收信号功率相对集中分布在均值附近,覆盖半径小于归一化半径时,大部分情况下瞬时信噪比高于信噪比门限,导致无中断情况发生;反之,覆盖半径大于归一化半径时,大部分情况瞬时信噪比低于信噪比门限,导致大量中断产生。

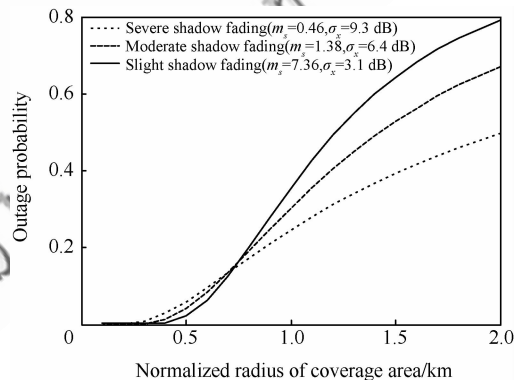


图5 中断概率与归一化覆盖半径的对应关系

Fig. 5 Relationships between normalized radius of coverage with outage probability

5 结论

无人机作为地面移动自组网的高空中继平台可用于扩展网络覆盖范围、提高连通性及降低网络功耗。本文通过建立中继信号覆盖的几何模型,推导获得了覆盖半径的理论表达式。在此基础上,重点分析多径阴影衰落信道对中继信号覆盖的影响,提出了一种基于中断概率的覆盖区域统计模型并进行数值仿真验证。研究结论可用于辅助无人机与地面移动网络协同中继通信的系统

设计与性能优化,后续工作还将进一步考虑地面建筑物或山脉等地形、机载天线以及网络信号相互干扰等因素对中继覆盖的影响。

参 考 文 献

- [1] Gu D L, Ly H, Hong X, et al. C-ICAMA, a centralized intelligent channel assigned multiple accesses for multi-layer ad-hoc wireless networks with UAVs [C]//IEEE Wireless Communication Network Conference, 2000, 2: 879-884.
- [2] Xu K, Hong X, Gerla M, et al. Landmark routing in large wireless battlefield networks using UAVs[C]//IEEE Military Communication Conference, 2001, 1: 230-234.
- [3] Perumal S, Baras J S, Graf C J, et al. Aerial platform placement algorithms to satisfy connectivity, capacity and survivability constraints in wireless ad-hoc networks[C]//IEEE Military Communications Conference, 2008:1-7.
- [4] Ou Y J, Zhuang Y, Xue Y, 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. (in Chinese)
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.
- [5] Kramer G, Gastpar M, and Gupta P. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(9): 3037-3063.
- [6] Zhu H, Swindlehurst A, Liu K J. Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3533-3546.
- [7] Xu Z X, Yuan J, Wang Y, et al, UAV relay network to provide communications in mobile ad hoc networks [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(2): 150-155. (in Chinese)
徐赞新, 袁坚, 王钺, 等. 一种支持移动自组网通信的多无人机中继网络[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(2): 150-155.
- [8] 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.
- [9] El-Jabu B, Steele R. Cellular communications using aerial platforms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(3): 686-700.
- [10] Feng Q X, McGeehan J, Nix A R. Enhancing coverage and reducing power consumption in peer-to-peer networks through airborne relaying[C]//IEEE 65th Vehicular Technology Conference, 2007: 954-958.
- [11] Rappaport T. Wireless communications: principles and practice[M]. New Jersey Prentice Hall PTR, 1996.
- [12] Abdi A, Kaveh M. On the utility of Gamma PDF in modeling shadow fading[C]//IEEE 49th Vehicular Technology Conference, 1999, 3: 2308-2312.
- [13] Nakagami M. The m-distribution: a general formula of intensity distribution of rapid fading statistical methods of radio wave propagation[M]. Japan: W C Hoffman, 1960.
- [14] Lewinsky D. Nonstationary probabilistic target and clutter scattering models [J]. IEEE Transactions on Antenna Propagation, 1983, 31(3): 490-498.
- [15] Gu M, Abraham D A. Using McDaniel's model to represent non-Rayleigh reverberation[J]. IEEE Transactions on Oceanic Engineering, 2001, 26(3): 348-357.
- [16] Bithas P S, Sagias N C, Mathiopoulos P T, et al. On the performance analysis of digital communications over generalized-K fading channels [J]. Communications Letters, 2006, 10(5): 353-355.

作者简介:

朱秋明 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 无线电波传播环境建模与验模, 航空数据链关键技术。

Tel: 025-84896490-420

E-mail: zhuqiuming@nuaa.edu.cn

A Statistical Area Coverage Model for Unmanned Aerial Vehicles as Relay Platforms

ZHU Qiuming^{1,2,*}, ZHOU Shengkui¹, HUO Shuaike¹, CHEN Xiaomin¹, XU Dazhuan¹

1. *College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

2. *China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China*

Abstract: Traditional area coverage models for the airborne relay of mobile ad-hoc networks (MANETs) fail to take the channel fading into consideration. A new statistical area coverage model is proposed in this paper based on the outage probability for wireless relay communications with unmanned aerial vehicles (UAVs). Firstly, the fading of the relay channel, including path loss, shadowing and multipath fading, is modeled by composite fading distribution. Then, an expression in the form of outage probability for coverage radius is derived and a numerical computation method is provided. The simulations show that channel fading has a great effect on coverage radius, which is only half of the radius in a non-fading situation when the outage probability is below ten percent. These findings are of considerable significance for optimal UAVs arrangement as well as the flight control and performance analysis of the relay networks with UAVs.

Key words: unmanned aerial vehicles (UAVs); mobile ad-hoc networks (MANETs); relay platform; coverage area; channel modeling; outage probability

Received: 2013-03-26; **Revised:** 2013-04-17; **Accepted:** 2013-05-28; **Published online:** 2013-06-06 13:21

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130606.1321.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61172077, 61172078); Aeronautical Science Foundation of China (20120152001); China Postdoctoral Science Foundation(2013M541661); Fundamental Research Funds for the Central Universities (NS2012075,NZ2012012); Funds for the Postgraduate Creative Base in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (kfjj130115); Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

* **Corresponding author.** Tel.: 025-84896490-420 E-mail: zhuqiuming@nuaa.edu.cn