

基于信息及时性的航空自组网生存性解析方法研究



邓娜¹, 卫海超²

1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024

2. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026

摘 要: 航空自组网需将航空器感知的环境信息及时地与目标进行交互以实时决策。然而, 现有网络生存性研究大多关注信息在网络中有效传输问题, 而忽略了航空自组网是集信息感知、传输与处理决策为一体的端到端复杂网络。为此, 本文提出了基于信息及时性的航空自组网生存性解析框架, 其中, 信息年龄是接收端最新成功接收且用于决策的感知数据的生存时间以表征信息及时性。针对航空自组网场景, 本文提取航空器空间分布特性、信息感知的时间动态性和信号传播衰减特性, 采用球面泊松点过程和伯努利到达过程构建航空自组网的空时网络模型。考虑两种极限重传策略, 通过将信息年龄指标分解为端到端的传输时延和连续成功传输的感知间隔时间, 并利用随机几何和排队理论推导了平均峰值信息年龄的解析表达式。数值分析研究关键系统参数对信息年龄的影响, 给出了使信息年龄有限的临界系统参数值(如信息感知频率、信息传输时长和网络节点密度), 为实际航空自组网设计提供了理论指导。

关键词: 航空自组网; 生存性解析; 信息年龄; 随机几何; 排队论

中图分类号: TN915.01

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.04.010

网络生存性是指网络遭受攻击、故障或意外时, 能够及时完成关键服务的能力。然而, 这是从定性角度表征网络生存性, 无法量化, 也无法解析何种方法可以增强网络生存性及其增量。因此, 需要根据目标网络的主要功能, 将该定义转化为可量化解析的评估指标。航空自组网的功能是将航空器感知的环境数据及时可靠地与控制端或其他航空器进行信息交互, 用于实时决策^[1-2]。通常, 实时决策更关注环境的最新状态信息, 当感知数据包因自组网遭受干扰或故障等原因而无法传输时, 在源节点或中继节点会出现积压现象, 接收机无法及时获取最新环境状态信息进行决策。这使得决策产生偏差, 导致航空自组网不能及时完成关键服务。因此, 如何量化解析环境感知数据的及时性是研究航空自组网生存性的基本前提。

然而, 现有网络生存性研究主要关注的是网络层面中信息流的有效流通问题, 并未考虑实时决策更注重的是环境感知信息的及时性传输问题。Al-Kuwaiti 等^[3]提出了一

种可生存系统的形式化定义, 认为网络生存性需要满足可靠性、可用性、容错性和安全性等属性才能认为是可生存的网络, 并通过故障率、修复率、故障平均间隙或平均修复时间等量化指标对生存性性能进行统计建模分析。基于上述指标, 学者们利用连续时间马尔可夫链建模无线传感网的节点状态变化, 分析节点的平均无故障时间、可靠度、可用度及使用寿命对生存性进行综合量化解析, 以评估整个网络生存性^[4-5]。进一步考虑节点的移动性。李化邓等^[6]构建了一个基于连续时间马尔可夫链的节点分布模型, 结合单节点的状态转移模型, 以网络的稳态连通概率为指标评估了无线传感网的生存性, 并通过数值分析和模拟仿真验证了该模型的可行性。Xu Li 等^[7]提出网络韧性度作为衡量网络生存性的量化指标, 并构建了链路传输可靠性、网络连通性和网络韧性度之间的映射关系。由于大规模网络的韧性度复杂, 难以计算, 学者们设计了一种基于模拟退火算法和粒子群优化算法的混合算法以高效计算无线传感网的韧

收稿日期: 2024-08-06; 退修日期: 2024-11-01; 录用日期: 2025-01-07

基金项目: 航空科学基金(2022Z001063001)

引用格式: Deng Na, Wei Haichao. Research on the analytical method for survivability of airborne Ad-Hoc networks based on information timeliness[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(4): 83-90. 邓娜, 卫海超. 基于信息及时性的航空自组网生存性解析方法研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(4): 83-90.

性度,降低了求解网络韧性度的时间复杂度^[8]。基于马尔可夫过程建模网络状态转移和分析网络生存性的研究范式,现有文献研究了蜂窝网络在灾害恢复^[9]、资源耗尽^[10]和大面积中断^[11]等情况时网络的生存特性,其中将网络连接性或连通性以及其它数学映射,如用户满意度、时延等,作为衡量生存性的关键指标。

信息流在网络中的有效流通对于保障信息及时性至关重要。然而,若不满足数据传输的及时性,即使网络始终处于可靠连通状态对于实时决策也无济于事。对于航空自组网这种集信息感知、信息传输与信息处理为一体的端到端复杂信息网络,其信息及时性并非单纯地等价于信息流通有效性,而是包括了信息感知、无线传输及信息处理相结合的一个综合效率问题。环境感知数据的及时性取决于当前环境状态和用于决策的环境感知信息之间的差异性,与环境状态变化快慢和数据包在无线网络中的传输时延具有强相关性。具体而言,航空节点对环境感知频率越高,需要传输的感知数据包就越多,在源节点或中继节点中的缓存时间就越长,使得接收机用于决策的环境信息与当前环境状态时间间隔就越长,差异就可能会越大。若传输效率越高,数据传输延迟就越短,接收机用于当前决策的感知信息则越贴近当前环境状态,其中传输效率与无线传输特性息息相关,包括无线衰落、干扰和无线带宽资源等。由此,控制端用于最新决策的环境信息自其产生以来在网络中的生存时间,即信息年龄^[12],可作为航空自组网的生存性量化指标,其中若信息年龄始终大于一定阈值,则意味着航空自组网无法及时地将最新感知数据传输至控制端,造成决策偏差。

基于此,本文提出信息年龄作为解析航空自组网的生存性量化指标,并建立其与信息感知过程和无线传输过程之间的映射关系。利用随机几何理论和排队理论分别构建航空自组网的空间拓扑模型和环境数据感知的时变模型。引入无线信号传播特性,考虑两种极限重传策略,通过将信息年龄指标分解为端到端的传输时延和连续成功传输的感知间隔时间,推导了两种重传策略的平均峰值信息年龄的理论表达式以解析自组网的生存性性能。数值分析研究了环境感知频次、自组网密度、航空器高度和信息传输时长等关键系统参数对信息年龄的影响。

1 系统模型

1.1 网络模型

由于航空飞行器通常位于距离地球表面一定高度的高

空中,本文考虑航空自组网的节点均分布在距离地心半径为 $R=R_{\text{earth}}+H$ 的球面上,其中, R_{earth} 为地球半径, H 为距离地球表面的高度,如图1所示。为表征航空自组网节点分布的不规则和随机性,本文将航空自组网的收发机节点位置建模为分布在一个球面上的双极齐次泊松点过程。其中,航空器信息发射机的位置服从一个密度为 λ 的球面泊松点过程(PPP) Φ ,且每个发射机在一个随机方向且距离为 r_0 处的球面上关联一个专属接收机,即泊松双极模型^[13]。发射端到接收端之间的信号强度主要受两个因素影响,其中大尺度路损建模为路损指数为 α 的幂律路损函数 $l(r)=r^{-\alpha}$,小尺度衰落建模为常用瑞利衰落模型,即假设功率衰落系数服从均值为1的指数分布。

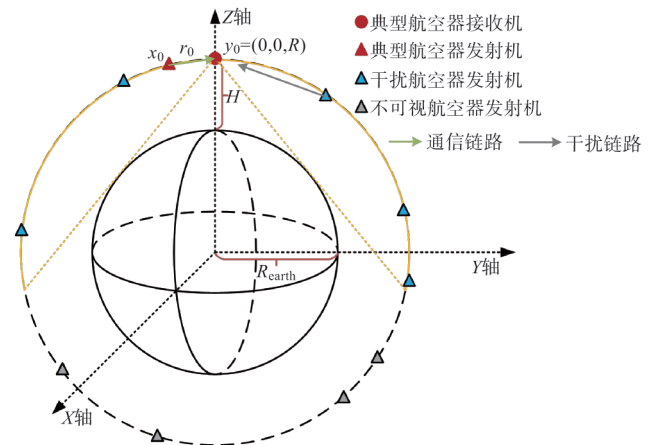


图1 航空自组网的空间分布模型示意

Fig.1 The illustration of spatial distribution model for airborne ad hoc networks

本文考虑一个等时隙的离散传输系统,其中时隙长度为 T_s 。假设不同发射机的感知数据过程建模为独立的伯努利到达过程,其中数据包的到达率(感知频率)为 ζ ,即在每个时隙中发射机以概率 ζ 感知环境并生成一个 K 信息比特的数据包。考虑每个感知数据包在时隙的起始边界瞬间到达航空器的队列。假设每个航空器具有无限容量的队列缓冲区来存储感知数据包,并采用先到先服务原则来传输队列中首个数据包。若航空器的缓存队列非空,在时隙的起始边界以概率 p 发送数据包,即自组网中常用的ALOHA协议,且在一个时隙中仅发送一个数据包。若成功传输数据包,接收机向发射机反馈一个确认信号,即ACK信号,随后发射机将成功传输的数据包从缓存队列中清除,而接收机将会以该感知数据包作为依据进行决策。若未能成功传输数据包,接收机向发射机反馈NACK信号,且依然根据上一

次成功接收的感知数据包进行决策。本文考虑两种极限重传策略研究信息及时性的边界特性：一种是发射机不重传数据包，直接清除当前队列首位数据包，避免累积过多的环境感知数据；另一种是发射机在下一个时隙以概率 p 重传该数据包直至成功传输，即无限重传策略，保证接收端不会遗漏发射机所感知的环境信息。

1.2 信息年龄

由于航空器通常会解析最新接收到的环境感知数据包进行决策判断，感知数据在航空自组网中的生存时间可用于表征航空器决策时所用的环境信息与当前环境状态的差异性，即信息的及时性。若环境感知数据的生存时间越长，数据所反映的环境和当前环境的差异性可能越大，导致错误决策的可能性越大。基于此，假设每个感知数据包到达发射机的队列时均赋有时间戳，本文采用信息年龄(AoI)来度量航空自组网中的信息及时性，定义为^[12]

$$\Delta(t) = t - U(t) \quad (1)$$

式中， $U(t)$ 是在当前 t 时刻接收端最新成功接收数据包的时间戳。从定义可知，AoI表征了当前用于决策的环境感知数据包在网络中的生存时间。图2给出了典型航空器发射机与接收机的AoI示例，其中 a_n 表示发射机第 n 个数据包的感知时刻点， d_n 表示发射机成功传输第 n 个数据包的时刻点。如图2所示，当接收端成功收到第 n 个数据包，将AoI值设置为 $\Delta(d_n) = d_n - a_n$ ，然后线性增加到一个峰值，直到下一个成功接收数据包的时刻点。

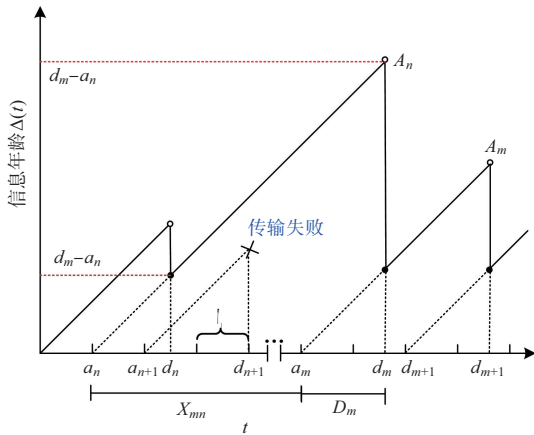


图2 信息年龄与时间变化曲线

Fig.2 The age of information versus time

基于此，可得连续两次成功传输期间的信息年龄，表示为

$$\Delta(t) = \begin{cases} d_n - a_n, & t = d_n \\ \Delta(d_n) + t - d_n, & d_n < t < d_m \end{cases} \quad (2)$$

式中， n 和 m 为接收端连续两个成功接收到数据包索引。为了体现航空自组网中环境信息及时性的边界性能，本文采用峰值AoI去衡量网络最差情况下的信息及时性^[13]，定义为在下一个数据包成功传输的时刻点当前数据包的最高AoI值。基于此，峰值AoI表征了一个数据包在网络中的最大生存时间。此时，可得图2中第 n 个数据包的峰值AoI，表示为

$$A_n = \sup \{ \Delta(t); t \in [d_n, d_m] \} = d_m - a_n = (d_m - a_m) + (a_m - a_n) \quad (3)$$

这表明第 n 个数据包的峰值AoI能够分解为如下两项，其中 $X_{\text{inter}} = a_m - a_n$ 是发射端连续两次成功传输数据包(数据包 n 和数据包 m)的感知时间差，而另一项 $D_m = d_m - a_m$ 是一个成功传输数据包(数据包 m)的端到端传输延迟。

1.3 数据包的传输模型

根据Slivnyak's定理^[14]，通过在任意球面位置增加一对航空器收发机作为典型收发机对进行研究，所得结果可以表征整体网络的平均性能。如图1所示，假设典型接收机 $y_0 = (0, 0, R)$ 位于球面天顶位置，其对应的典型接收机记为 x_0 ，其相对距离为 $r_0 = |x_0 - y_0|$ ，则在第 k 个时隙中接收机的信干噪比(SINR)为

$$\text{SINR}_k = \frac{h_{x_0,k} \ell(r_0)}{\sum_{x \in \Phi \cap \Omega} h_{x,k} \ell(|x - y_0|) B_{x,k} \mathbf{1}(Q_{x,k} > 0) + \sigma_n^2} \quad (4)$$

式中， Ω 是典型接收机 y_0 由地球遮挡而形成的可视区域(如图1中黄色曲线对应的球冠区域)。 $h_{x,k}$ 是在第 k 个时隙中发射机 x 到典型接收机的小尺度功率衰减系数， $B_{x,k}$ 为在第 k 个时隙中发射机 x 是否发送数据的伯努利随机变量，其中以概率 p 为1且以概率 $1-p$ 为0。 $Q_{x,k}$ 是在第 k 个时隙中发射机 x 的缓存队列中数据包个数， $\mathbf{1}(Q_{x,k} > 0)$ 为示性函数，即当 $Q_{x,k} > 0$ 时，该函数为1，否则为0。 $|x - y_0|$ 为发射机 x 到典型接收机的距离， σ_n^2 为相对发送功率的归一化噪声功率。

根据香农公式，可得典型收发机对的传输速率为 $C_k = W \log_2(1 + \text{SINR}_k)$ ，其中， W 是传输带宽。当满足 $C_k T_s \geq K$ ，则表示典型发射机成功传输感知数据，反之传输失败。

2 信息及时性分析

本文通过推导平均峰值AoI的理论表达式去量化分析航空自组网的信息及时性，并研究各关键系统参数对信息及时性的影响。根据1.2节中峰值AoI的定义，可得 $\bar{A} = E[A_n] = E[D_m] + E[X_{\text{inter}}]$ 。因此，平均峰值AoI可以通过分析数据包的平均端到端传输时延和连续成功传输的平均感知

间隔时间。感知数据包的端到端传输时延是指其到达发射机的时刻与成功传输至接收机的时刻之差,与发射机的调度和重传策略相关,通过排队理论进行建模分析。根据1.1节中发射机的环境信息感知模型,数据包的到达过程服从一个伯努利(Bernoulli)随机过程,而数据包的服务过程与具体的重传策略有关。连续成功传输的感知间隔时间是指连续两次成功传输数据包的感知时间差,取决于数据包的感知频率及其从源节点传输至目的节点的成功概率,同样与重传策略有关。因此,以下将分别考虑两种极限重传策略来分析平均峰值AoI。

2.1 无重传策略

当发射机采用不重传的策略时,位于缓存队列首位的数据包将根据ALOHA协议以概率 p 接入信道进行数据传输,且一旦进行数据传输,无论成功与否,都会离开缓存队列。此时,可以将感知数据的传输过程建模为一个Geo/Geo/1的队列模型,其中到达率为 ζ ,服务率为 p 。根据文献[15],当 $p > \zeta$ 时,数据包的平均端到端传输时延为

$$E[D_m] = (1 - \zeta)(p - \zeta)^{-1} T_s \quad (5)$$

当 $p \leq \zeta$ 时,则 $E[D_m] = \infty$ 。该结果说明ALOHA的调度概率需要大于数据包的感知频率,否则数据包将在发射节点不断积压而引入无穷大的信息年龄。此时,虽然航空自组网依然流通数据,但所流通的数据包始终是过时数据,难以用于实时决策,实质上网络生存性极差或处于死亡状态。

对于连续成功传输的感知时间间隔 X_{inter} ,数据包的成功传输概率取决于事件 $C = \{C_k T_s \geq K\}$ 的发生概率。显然,成功传输概率与通信链路SINR的统计特性具有强相关性,而连续成功传输的感知间隔时间与不同时隙的链路SINR以及数据包的感知行为特性有关。针对该问题,考虑在给定航空自组网拓扑 Φ 的条件下,信道小尺度功率增益在不同时隙的独立性使得各时隙的成功传输事件是独立的。因此,本文首先关注在给定网络拓扑 Φ 条件下的成功传输事件,记为 $C_\Phi = \{C_k T_s \geq K | \Phi\}$,然后给出连续成功传输的感知时间间隔的条件概率分布,最后对点过程 Φ 求期望得到连续成功传输的平均间隔时间。在每个时隙中,发射节点以概率 ζ 进行数据感知,并在给定网络拓扑 Φ 以概率 $P(C_\Phi)$ 成功将数据包传输至节点,连续成功传输的感知间隔时间服从如下条件几何分布

$$P(X_{\text{inter}} = n T_s | \Phi) = (1 - \zeta P(C_\Phi))^{n-1} \zeta P(C_\Phi) \quad (6)$$

其中条件成功传输概率 $P(C_\Phi)$ 表示为

$$\begin{aligned} P(C_\Phi) &\stackrel{(a)}{=} P(W T_s \log_2(1 + \text{SINR}_k) > K | \Phi) \stackrel{(b)}{=} \\ &E(\exp(-r_0^\alpha \tilde{K} (\sum_{x \in \Phi \cap \Omega} h_{x,k} \ell(x - y_0)) \times \\ &B_{x,k} I(Q_{x,k} > 0) + \sigma_n^2)) | \Phi) = \\ &e^{-r_0^\alpha \tilde{K} \sigma_n^2} \prod_{x \in \Phi \cap \Omega} (1 - \zeta + \frac{\zeta}{1 + r_0^\alpha \tilde{K} \ell(x - y_0)}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\tilde{K} = 2^{K/(WT_s)} - 1$,步骤(a)利用了小尺度功率系数服从指数分布。步骤(b)利用了各干扰源的小尺度功率系数服从指数分布, $B_{x,k}$ 是以概率 p 为1的伯努利随机变量,以及队列 $Q_{x,k}$ 非空的稳态概率是 ζp^{-1} 。

根据式(6)中的几何分布,连续成功传输的平均感知间隔时间可以表示为

$$\begin{aligned} E(X_{\text{inter}}) &= T_s E_\Phi [\zeta P(C_\Phi)]^{-1} = \\ &\frac{T_s e^{r_0^\alpha \tilde{K} \sigma_n^2}}{\zeta} E_\Phi \prod_{x \in \Phi \cap \Omega} (1 - \zeta + \frac{\zeta}{1 + r_0^\alpha \tilde{K} \ell(x - y_0)})^{-1} \stackrel{(c)}{=} \\ &\frac{T_s}{\zeta} e^{r_0^\alpha \tilde{K} \sigma_n^2 - \lambda \int_\Omega (1 - \zeta + \frac{\zeta}{1 + r_0^\alpha \tilde{K} \ell(x - y_0)})^{-1} dx} \stackrel{(d)}{=} \\ &\frac{T_s}{\zeta} e^{r_0^\alpha \tilde{K} \sigma_n^2} \exp\left\{\frac{4\pi R^2 \zeta \ell \sin^2(\bar{\theta}/2)}{1 - \zeta} \times \right. \\ &\left. F(1, 2/\alpha; 1 + 2/\alpha; -\frac{(2R \sin(\bar{\theta}/2))^\alpha}{(1 - \zeta) r_0^\alpha \tilde{K}})\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

步骤(c)利用泊松点过程的概率生成泛函, $E \prod_{x \in \Phi} f(x) = \exp(-\lambda \int_{\mathbb{R}^2} (1 - f(x)) dx)$,以及步骤(d)采用了球坐标系转化方法,文献[16]中恒等式和高斯超几何函数 $F(\cdot)$ 的定义。此外,根据图1中的几何关系,可以推导出可视区域的临界点与Z轴的临界仰角 $\bar{\theta} = 2\arccos(R_{\text{earth}}/R)$ 。

综合式(5)和式(8),则可以得到无重传策略的平均峰值AoI。

2.2 无限重传策略

当发射机采用无限重传的策略时,发射机的每个感知数据包必然会传输至接收机,因此连续成功传输的感知时间间隔实际等于数据包的感知时间间隔。根据1.1节中发射机的环境信息感知模型,每个时隙以概率 ζ 进行环境感知,则

$$E(X_{\text{inter}}) = T_s \zeta^{-1} \quad (9)$$

对于端到端传输时延,发射机根据ALOHA协议将位于队列首位的数据包以概率 p 接入信道进行数据传输,且在给定航空自组网拓扑 Φ 条件下以概率 $P(C_\Phi)$ 成功传输,即每个时隙将以概率 $pP(C_\Phi)$ 成功传输数据,并在失败时将数据包保留在队列首位等待下一次调度重传直至成功传输。此时,可以将感知数据的传输过程建模为一个Geo/

Geo/1 的队列模型,其中到达率为 ζ ,服务率为 $pP(C_\Phi)$ 。当 $pP(C_\Phi) > \zeta$ 时,可得数据包在给定网络分布条件下的平均端到端传输时延为

$$E[D_m|\Phi] = (1 - \zeta) (pP(C_\Phi) - \zeta)^{-1} T_s \quad (10)$$

当 $pP(C_\Phi) \leq \zeta$ 时,则 $E[D_m|\Phi] = \infty$ 。由于 Φ 是随机点过程,式(10)中条件成功概率 $P(C_\Phi)$ 和条件端到端传输时延 $E[D_m|\Phi]$ 仍然是随机变量,需要进一步对 Φ 进行期望操作得到平均端到端传输时延。然而,将式(7)的条件成功概率直接代入式(10)中,无法直接使用点过程的概率生成泛函得到最终结果。基于此,由于式(10)是关于 $P(C_\Phi)$ 的凸函数,则采用詹森不等式求得平均端到端传输时延的下界,表示为

$$E[D_m] = E[E[D_m|\Phi]] \geq (1 - \zeta) (pE[P(C_\Phi)] - \zeta)^{-1} \quad (11)$$

如此可将时延问题转化为求解平均成功传输概率,表示为

$$E[P(C_\Phi)] = P(WT_s \log_2(1 + \text{SINR}) > K) = E[e^{-r_0^\alpha \tilde{K} \sigma_s^2} \prod_{x \in \Phi \cap \Omega} 1 - q_x + \frac{q_x}{1 + r_0^\alpha \tilde{K} \ell(|x - y_0|)}] \quad (12)$$

式中, q_x 表示航空器 x 的队列非空且被调度发送数据的概率。在无限重传策略下,接收机的SINR依赖于所有航空发射机的队列状态,另外,接收机的SINR也会影响各航空发射机的队列状态。因此,条件成功概率与队列状态是互相耦合的,将其进行解耦分析是极具挑战性的。

针对该问题,采用文献[17]提出的独立干扰源近似法去解耦条件成功概率与队列状态来得到近似的平均成功传输概率。在给定航空自组网拓扑 Φ 条件下,感知数据的传输过程建模为一个到达率为 ζ 、服务率为 $pP(C_\Phi)$ 的Geo/Geo/1 队列模型,可得航空器 x 的队列非空且被调度的概率为 $q_x = \min(p, \zeta(P(C_\Phi))^{-1})$ 。随后,采用平均成功概率 $M_1 = E(P(C_\Phi))$ 近似 $P(C_\Phi)$,即 $q_x \approx \bar{q} = \min(p, \zeta(M_1)^{-1})$ 。代入式(12)以及利用泊松点过程的概率生成泛函,得到如下非线性方程

$$M_1 = E[e^{-r_0^\alpha \tilde{K} \sigma_s^2} \prod_{x \in \Phi \cap \Omega} 1 - \bar{q} + \frac{\bar{q}}{1 + r_0^\alpha \tilde{K} \ell(|x - y_0|)}] = e^{-r_0^\alpha \tilde{K} \sigma_s^2 - \pi \lambda \bar{q} \int_0^{\infty} \frac{1 - e^{-\frac{1}{1 + r_0^\alpha \tilde{K} r^{-\alpha/2}}}}{r} dr} \quad (13)$$

采用迭代求解方法。令初值 $\bar{q}_0 = \min(p, \zeta)$,代入式(13)求得 M_1 初值 $M_1^{(0)}$,并利用 $\bar{q}_{n+1} = \min(p, \zeta(M_1^{(n)})^{-1})$ 和式(13)进行迭代求解。最后,将平均成功概率 M_1 代入式(11),得到平均端到端传输时延。当 $pM_1 \leq \zeta$ 时, $E[D_m] = \infty$,意味着较小的平均成功传输概率会使得网络的信息年龄无限大,导致

接收端始终收到的数据是严重过时的环境感知信息,无法进行实时决策。

3 数值结果

本节给出两种策略下基于信息年龄的航空自组网的生存性性能的数值结果,其中主要系统参数的默认值为 $R_{\text{earth}} = 6371\text{km}$, $T_s = 0.2\text{ms}$, $\alpha = 2.5$, $H = 40\text{km}$, $r_0 = 5\text{km}$, $\zeta = 0.4$, $W = 1\text{MHz}$, $K = 1000$, $p = 0.9$ 。数值分析中的网络平均航空器发射机默认个数为 $N = 10000$,用于计算航空发射机密度 $\lambda = N/(4\pi(R_{\text{earth}} + H)^2)$ 。

图3比较了两种策略在不同航空器密度和时隙长度配置下的平均峰值AoI性能。结果表明,无重传策略的信息年龄低于无限重传策略。同时,随着时隙的增加,两种策略的平均峰值AoI会先减小后增加,存在一个最优时隙长度使得平均峰值AoI最小。这是因为短时隙会使得数据包在队列中等待时间变短,但导致了较低成功传输概率,进而触发多次重传或增加接收机等待下一个成功传输数据的时间间隔。另外,长时隙增加数据包的成功传输概率,但长时隙本身就会增加信息年龄。因此,存在一个最优时隙长度。此外,当 T_s 使得单次传输的成功概率足够高,无限重传策略趋于不重传策略,导致两种策略的信息年龄差趋于0。从图3中可以看出,当 T_s 小于一定值后,平均峰值AoI会迅速提升,特别是无限重传策略。这是因为当前 T_s 会导致极低的成功传输概率,使得数据包到达率大于缓存队列的服务率,引起了无穷大的队列等待时间。该现象揭示了网络生存性关于时隙长度的临界特性,且无重传策略的临界时隙长度小于无限重传。

图4给出了不同通信距离下平均峰值AoI与感知数据

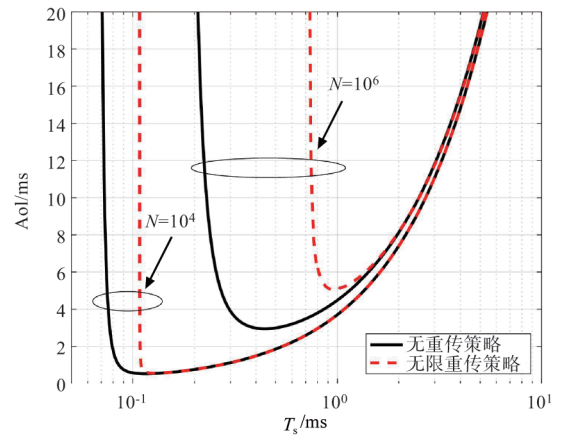


图3 平均峰值AoI与时隙长度之间的关系

Fig.3 The average peak AoI versus the slot length

包到达率之间的关系。结果显示较短通信距离会提升数据传输成功概率,降低了平均峰值AoI。随着感知频率的增加,两种传输策略的平均峰值AoI均会先降低后增加,因此存在最优数据感知频率。这是由于感知频率的增加会降低感知数据的时间间隔,使得信息年龄变小,而随着感知频率持续增加,数据包会大量累积在缓存队列中,延长了数据包的等待服务时间。同时,结果显示对于较小感知频率,无限重传策略的信息年龄低于无重传策略,而较大感知频率会导致相反的现象。这是因为在感知频次较低的场景中,保证数据传输成功是信息年龄性能的关键,这使得无限传输策略具有优势。然而,在感知频次较高的场景中,尽快让最新感知数据从缓存队列中输出,避免数据累积是提升信息年龄的关键。此时,无重传策略即使不能保障数据的无损传输,但可以及时将最新数据传输至接收机,反而更具信息及时性。从图4中可以看出,当感知频率大于一定值后,平均峰值AoI会迅速提升。这是因为当前的成功传输概率,使得缓存队列的服务率小于感知频率,引起了无穷大的队列等待时间,揭示了网络生存性关于数据感知频率的临界特性,且无重传策略的临界感知频率大于无限重传。

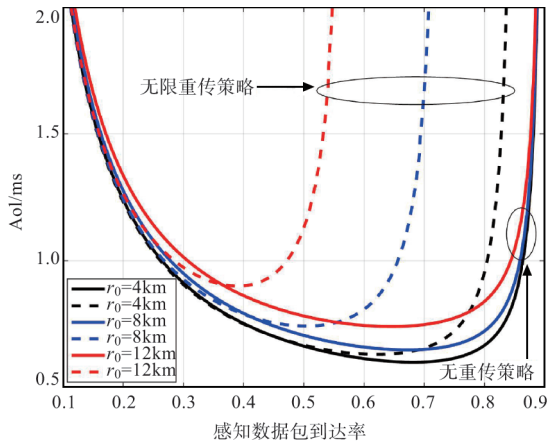


图4 平均峰值AoI与数据包到达率之间的关系

Fig.4 The average peak AoI versus the packet arrival rate

图5展示了不同航空器高度对两种策略平均峰值AoI性能的影响。由于航空器高度会影响到航空自组网所在的区域面积,本文考虑两种网络配置:一种是保持网络的平均航空器个数 N 不变,另一种是保持网络的默认节点密度 λ 不变。当节点个数不变时,峰值AoI随着航空器高度的增加呈现先增大后减小的变化趋势,这是由于高度的增大使得典型接收机的可视区域增大,导致可能干扰节点变多,降低了传输成功概率。随着高度的持续增大,航空器密度变小,使得整体干扰强度变小,提升了传输成功概率。当节点密

度不变时,峰值AoI随着高度的增加呈现先迅速增大后缓慢增长的变化趋势,其中迅速增大的原因与不变节点个数的配置一致,而缓慢增长的原因在于网络节点密度不变的情况下,高度增大只能增加可视区域,但远端节点的干扰影响较小,使得成功传输概率缓慢减小,导致信息年龄缓慢增加。

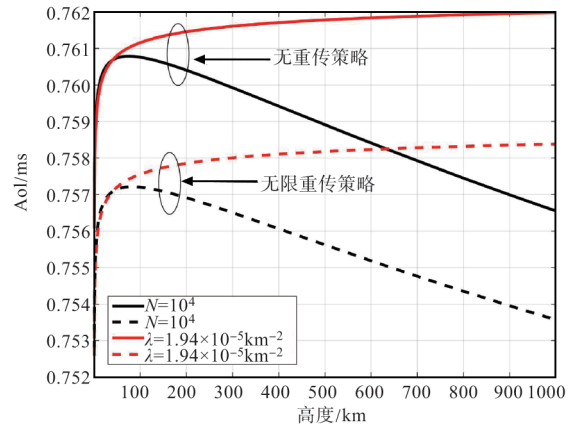


图5 平均峰值AoI与航空器高度之间的关系

Fig.5 The average peak AoI versus the aircraft height

图6展示了在不同ALOHA调度概率配置下航空器密度如何影响平均峰值AoI性能,其中航空器密度通过平均航空器个数 N 进行控制。结果表明两种策略在较大调度概率情况下会产生较低的信息年龄。随着密度的增加,平均峰值AoI呈现先缓慢增加后迅速增长的趋势。具体原因如下:对于无重传策略,根据式(8)的结果,航空器密度主要影响连续成功传输的感知时间间隔,且呈现指数式变化。对于无限重传策略,航空器密度主要影响数据包的端到端传输时延,且当航空器密度大于临界值时,成功传输概率会变低至缓存队列的服务

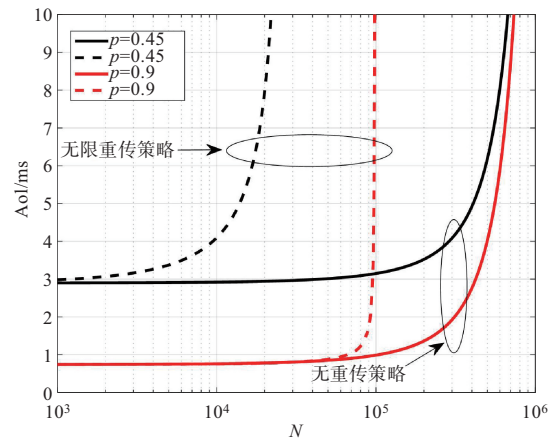


图6 平均峰值AoI与航空器密度之间的关系

Fig.6 The average peak AoI versus the aircraft density

率小于数据包到达率,进而导致无穷大的端到端时延。

4 结论

为表征集信息感知、传输和决策为一体的端到端网络生存性,本文提出将信息及时性作为量化航空自组网生存性的性能指标,克服了现有网络生存性分析仅考虑网络信息流通的问题。基于此,构建了综合考虑网络节点空间变化和环境感知动态时间特征的大规模航空自组网信息及时性分析框架。采用平均峰值信息年龄来量化信息及时性以表征网络生存性,将其分解为感知数据包的端到端传输时延和连续成功传输的感知间隔时间,并利用随机几何和排队理论推导出无重传和无限重传两种策略下平均峰值信息年龄的解析表达式。通过研究,可以得出以下结论:

(1)存在最优的信息传输时长和信息感知频率使得平均峰值信息年龄最小化。

(2)存在使得平均峰值信息年龄有限的临界系数参数值,如信息传输时长、信息感知频率和航空自组网节点密度。本文的理论结果是在两种极限重传策略和先入先出的队列服务规则下进行推导的,可以为一般性的重传策略提供参考价值,但不能直接应用。未来将考虑有限次重传策略和更为一般性队列服务规则,以使得所提理论分析框架适用于更广泛的场景。

AST

参考文献

- [1] 卢晓东,王一鸣,王伟.通信约束下UAV集群协同拦截任务分配算法[J].航空科学技术,2024,35(4):18-24.
Lu Xiaodong, Wang Yiming, Wang Wei. Multi-target assignment methods for UAV swarm under communication constraints[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35 (4):18-24.(in Chinese)
- [2] 雷毅飞,王露禾,贺泊茗,等.基于深度强化学习的多无人机空战机动策略研究[J].航空科学技术,2024,35(3):111-118.
Lei Yifei, Wang Luhe, He Bomeng, et al. Research on multi-UAV air combat maneuver strategy based on deep reinforcement learning[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35 (3):111-118.(in Chinese)
- [3] Al-Kuwaiti M, Kyriakopoulos N, Hussein S. A comparative analysis of network dependability, fault-tolerance, reliability, security, and survivability[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009, 11(2):106-124.
- [4] Shen Shigen, Han Risheng, Guo Lizheng, et al. Survivability evaluation towards attacked WSNs based on stochastic game and continuous-time Markov chain[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(5): 1467-1476.
- [5] 石琼,丁英华,秦丽,等.无线传感器网络可生存性评估研究[J].中北大学学报(自然科学版),2020,41(5):418-430+436.
Shi Qiong, Ding Yinghua, Qin Li, et al. Survivability assessment for wireless sensor networks[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 418-430+436.(in Chinese)
- [6] 李化邓,李雷,施化吉.无线传感器网络的生存性评估[J].计算机应用研究,2018,35(8):2450-2453.
Li Huadeng, Li Lei, Shi Huaji. Survivability evaluation in wireless sensor network[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(8): 2450-2453.(in Chinese)
- [7] Xu Li, Zhang Jing, Tsai P, et al. Uncertain random spectra: a new metric for assessing the survivability of mobile wireless sensor networks[J]. Soft Computing, 2017, 21(10): 2619-2629.
- [8] Yu Jintao, Yu Zhen, Ding Mingli, et al. Research on the tenacity survivability of wireless sensor networks[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11: 3535-3544.
- [9] Kaji H, Paropkari R A, Beard C, et al. Survivability and disaster recovery modeling of cellular networks using matrix exponential distributions[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(3): 2812-2824.
- [10] Pietrantuono R, Ficco M, Palmieri F. Survivability analysis of IoT systems under resource exhausting attacks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2023, 11: 3277-3288.
- [11] Gajić M, Lange S, Vatten T, et al. Survivability assessment of 5G network slicing during massive outages[C]. 2023 13th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling, 2023:1-8.
- [12] Kaul S, Yates R, Gruteser M. Real-time status: How often should one update? [C]. 2012 IEEE INFOCOM, 2012: 2731-2735.
- [13] Inoue Y, Masuyama H, Takine T, et al. A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2019, 65(12):8305-8324.

- [14] Haenggi M. Stochastic geometry for wireless networks[M]. New York: Cambridge University Press, 2012.
- [15] Atencia I, Moreno P. A discrete-time GEO/G/1 retrial queue with general retrial times[J]. Queueing Systems, 2004, 48:5-21.
- [16] Gradshteyn I, Ryzhik I. Table of integrals, series, and products seventh edition[M]. U.S.: Academic Press, 2007.
- [17] Deng Na, Haenggi M. The end-to-end performance of rateless codes in Poisson bipolar and cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(11):8072-8085.

Research on the Analytical Method for Survivability of Airborne Ad-Hoc Networks Based on Information Timeliness

Deng Na¹, Wei Haichao²

1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: The airborne Ad-Hoc network needs to interact with the target in a timely manner based on the environmental information sensed by the aircraft for real-time decision-making. However, most of the existing research on network survivability focuses on the effective transmission of information within the network, while ignoring that the airborne Ad-Hoc network is an end-to-end complex network integrating information sensing, transmission, and processing decision-making. To address this issue, this paper proposed an analytical framework for the survivability of airborne Ad-Hoc networks based on the information timeliness, where the age of information (AoI) represents the survival time of the latest successfully received sensing data used for decision-making at the receiver, characterizing the information timeliness. For the airborne Ad-Hoc network scenario, via extracting the spatial distribution characteristics of aircraft, the time dynamics of information sensing, and the signal propagation attenuation characteristics, this paper adopted a spherical Poisson point process and Bernoulli arrival process to establish the spatio-temporal network model of the airborne ad-hoc network. Considering two extreme retransmission strategies, the AoI metric is decomposed into end-to-end transmission delay and the interval between successive successful transmissions. By using stochastic geometry and queuing theory, an analytical expression is derived for the average peak AoI. Numerical analysis investigated the impact of key system parameters on the AoI, providing the critical system parameter values such as information sensing frequency, information transmission duration, and network node density that keep the AoI finite. This offers theoretical guidance for the practical design of airborne Ad-Hoc networks.

Key Words: airborne Ad-Hoc network; survivability analysis; age of information; stochastic geometry; queueing theory

Received: 2024-08-06; Revised: 2024-11-01; Accepted: 2025-01-07

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2022Z001063001)