

基于能量采集的WSN状态更新系统信息年龄研究

郝振超¹, 贾向东^{1,2}, 陈智¹, 许晋¹

(1. 西北师范大学 计算机科学与工程学院, 兰州 730070; 2. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 南京 210003)

摘要: 传统物联网系统中的传感器网络性能受自然能源不规则性和传感器电池尺寸的制约, 结合射频和非射频信号能量采集(EH)的优点并部署蜂窝网络, 可以获得信道等网络资源。提出一种由无线能量采集与传输子系统、蜂窝回程子系统、无线传感器状态更新子系统构成的物联网信息状态更新系统。构建能量采集和传输基站(EHTB)离散能量状态的马尔可夫链(MC)和MC状态转移矩阵, 得到EHTB的能量转移稳态概率和等待时间的统计描述。综合考虑蜂窝回程建立和EHTB能量传输过程, 推导出平均峰值信息年龄(PAoI)和平均信息年龄(AoI)的闭式表达式。在此基础上, 分析自然能量到达概率、能量传输概率、传感器尺寸等系统参数对平均PAoI和AoI的影响, 并比较有无蜂窝回程和最大比合并(MRC)下的平均PAoI和AoI。仿真结果表明, 虽然蜂窝回程会增加系统的平均PAoI和AoI, 但是采用MRC可以降低平均PAoI和AoI, 当能量到达概率为0.6时, 采用MRC能够使蜂窝回程对平均AoI的影响降低近20%, 相较传统的物联网系统, 该系统可以为传感器持续供电, 同时建立可靠的回程链路。

关键词: 无线通信; 无线能量传输; 蜂窝回程; 能量采集; 信息年龄

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 郝振超, 贾向东, 陈智, 等. 基于能量采集的WSN状态更新系统信息年龄研究[J]. 计算机工程, 2022, 48(11): 257-265.

英文引用格式: HAO Z C, JIA X D, CHEN Z, et al. Research on age of information of wireless sensor network status update system based on energy harvesting[J]. Computer Engineering, 2022, 48(11): 257-265.

Research on Age of Information of Wireless Sensor Network Status Update System Based on Energy Harvesting

HAO Zhenchao¹, JIA Xiangdong^{1,2}, CHEN Zhi¹, XU Jin¹

(1. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Wireless Communication Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

[Abstract] The performance of sensor networks in traditional Internet of Things (IoT) systems is restricted by the irregularity of natural energy and the size of sensor batteries. By combining the advantages of radio frequency and non-radio frequency signal Energy Harvesting (EH) and by deploying cellular networks, network resources such as channels can be obtained. An IoT information status update system composed of a wireless EH and transmission subsystem, a cellular backhaul subsystem, and a wireless sensor status update subsystem is proposed. The Markov Chain (MC) and MC state transition matrix of the discrete energy state of the Energy Harvesting and Transferring Beacon (EHTB) are constructed, and a statistical description of the steady-state probability and waiting time of the energy transfer of the EHTB is obtained. The closed-form expressions of the average Peak Age of Information (PAoI) and the average Age of Information (AoI) are derived by comprehensively considering cellular backhaul establishment and the EHTB energy transmission process. On this basis, the effects of system parameters such as natural energy arrival probability, energy transmission probability, and sensor size on the average PAoI and AoI are analyzed, and the average PAoI and AoI with and without cellular backhaul and Maximum Ratio Combination (MRC) are compared. The simulation results show that although cellular backhaul will increase the average PAoI and AoI of the system, the MRC can reduce the average PAoI and AoI. When the energy arrival probability is 0.6, the MRC can reduce the impact of cellular backhaul on the average AoI by nearly 20%. Compared with a traditional IoT system, this system can provide continuous power for sensors and establish reliable backhaul links.

基金项目: 国家自然科学基金(61861039)。

作者简介: 郝振超(1996—), 男, 硕士研究生, 主研方向为无线通信; 贾向东, 教授、博士; 陈智、许晋, 硕士研究生。

收稿日期: 2021-11-01 修回日期: 2021-12-28 E-mail: jiaxd@nwnu.edu.cn

[Key words] wireless communications; wireless energy transmission; cellular backhaul; Energy Harvesting (EH); Age of Information (AoI)

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0063096

0 概述

随着第五代无线通信业务的爆炸式增长,物联网(Internet of Things, IoT)技术得到快速发展,满足了人们对智慧生产和生活的需求。IoT配置大量传感器节点,将实时感知的数据传输到监控终端以实现监控管理,在此类实时感知监控系统中,监控终端需要获取最新的状态感知信息,从而进行准确判断,过时的状态信息将影响终端管理的正确性^[1]。然而,传统的性能指标(如吞吐量、时延、中断概率等)不足以反映数据新鲜度,其中:吞吐量在类似于先到先服务的排队系统中不能保证传输最新的数据^[2];时延仅反映传输快慢,没有考虑数据的生成时间;中断概率只考虑传输成功与否,没有考虑数据生成和等待时间。KAUL等^[3]提出信息年龄(Age of Information, AoI)的概念,从接收机角度将其定义为当前时间与最近一个接收数据分组生成时间的间隔,该时间间隔分3个部分反映时间消耗:第一部分是数据源生成数据所花费的时间;第二部分是数据包在通信节点上所需的服务时间;第三部分是数据包被成功解码到目的地之前在无线信道上所花费的时间。

AoI作为新的度量指标被引入监控系统后,研究人员结合排队理论^[4],从数据包在更新过程中有无抢占、有无自动重传请求(Automatic Repeat-Request, ARQ)等方面展开对AoI的研究^[5-6],如文献[7]在一般干扰约束下优化系统的信息新鲜度。但是在资源有限的物联网系统中,自然能源的不规则性以及传感器电池尺寸的限制均对能量采集(Energy Harvesting, EH)有很大影响^[8],因此,对EH系统的AoI进行分析尤其重要。文献[9]在无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)场景下研究EH,基于AoI的马尔可夫决策过程构建状态的更新策略方案。文献[10]研究传感器从自然界能源获取能量以发送状态更新的单源单目的节点系统的AoI。文献[11]考虑只有成功接收到一个更新包时才会产生下一个更新包的情况,研究EH无线传感器网络中平均AoI和峰值信息年龄(Peak Age of Information, PAoI),但其未考虑传感器生成状态更新的随机性。文献[12]通过一个随机的EH过程给传感器节点的电池进行充电,利用随机混合系统提出一种估计平均AoI的方法。文献[13]与文献[12]中的系统模型相同,不同的是,文献[13]主要研究状态更新生成策略,忽略了EH过程的随机性。为降低EH对平均AoI的影响,文献[14]联合电池状态和调节传输功率

来研究最优传输策略。文献[15]虽研究了传感器网络在无限电池、有限电池和单元电池3种情况下的AoI,但其假设能量到达服从泊松过程。文献[16]优化了资源约束下两跳状态更新系统的信息新鲜度。

除了非射频信号的EH外,射频信号的EH同样具有有效性,利用无线传播的广播特性,无线能量传输技术对传感器进行充电具有更强的可控性和可靠性。因此,来自射频信号的EH引起了研究人员的极大关注。文献[17]基于深度学习研究射频无线能量传输的无人机辅助数据采集的平均AoI最小化问题。文献[18]使用能量基站将能量传输给传感器,研究普通单源单目的节点传感器系统的AoI。文献[19]采用无线能量传输实现多传感器AoI系统的最优资源分配,但由于能量基站接入电网,导致其能效较低。因此,可以引入一个部署有能量采集和传输基站(Energy Harvesting and Transferring Beacons, EHTB)的无线能量采集和传输(Wireless Energy Harvesting and Transferring, WEHT)子系统来解决传感器能量受限问题。首先,EHTB从自然资源中获取能量并储存在大容量电池中,通过能量传输模式将射频信号传输到传感器;其次,传感器配备小型电路,将射频信号转换为直流电源(Direct Current, DC)供发送状态更新使用。因此,WEHT子系统克服了自然能源不规则问题,保持了无线电(或能量)传输方案提供稳定能量补充的优点。与此同时,物联网通常借助蜂窝网络进行部署,无线传感器网络可以与蜂窝网络协同工作。为了获得信道等网络资源,回程链路的建立也是影响状态更新传输时效性的另一个重要因素。

本文将自然能源EH与无线能量传输相结合,提出一种新型的EHTB和蜂窝回程辅助物联网信息状态更新系统,目的是提高能源效率,为传感器持续供电,同时建立可靠的回程链路。

1 系统模型与问题描述

1.1 系统模型

本文考虑图1所示的蜂窝通信场景下的物联网系统,该系统由蜂窝回程子系统、WEHT子系统和无线传感器状态更新子系统构成:蜂窝回程子系统包括一个宏基站(Microcell Base Station, MBS),通过低延迟光纤与核心网络相连;WEHT子系统由2个具有相同电池容量 B_H 的EHTB构成,分别表示为 EH_1 和 EH_2 ,用于从非射频信号中采集能量并以射频方式传输给传感器节点 S ;无线传感器状态更新子系统包含一个传感器节点 S 和一个目的节点 D ,由于物

理尺寸限制,传感器节点 S 只配备了小容量 B_s 的电池,用于储存来自 EH_1 和 EH_2 的能量。

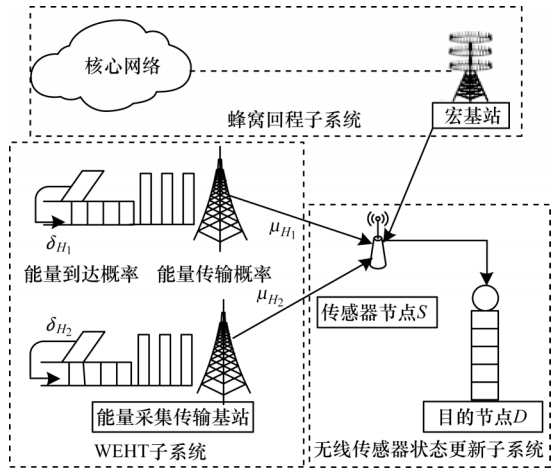


图 1 EHTB 和蜂窝回程辅助物联网信息状态更新系统

Fig.1 EHTB and cellular backhaul assisted IoT information status update system

为保证在 MBS 控制下协同工作,时间按等时隙划分, MBS 工作在频段 F_1 , EH_1 、 EH_2 和传感器节点 S 共享另一个频段 F_2 。传感器节点 S 以半双工 (Half Duplex, HD) 方式与 EH_1 和 EH_2 协同工作。 EH_1 和 EH_2 有 EH 和能量传输 2 种工作模式,在 EH 模式下, EHTB 从自然界的能源中获取能量,能量到达服从概率为 δ_{H_1} 和 δ_{H_2} 的伯努利分布^[20],对于相同性质的能量来源, $\delta_{H_1} = \delta_{H_2}$; 在能量传输模式下, EH_1 和 EH_2 分别以概率 μ_{H_1} 和 μ_{H_2} 发送能量信号。传感器节点 S 首先采集来自 EH_1 和 EH_2 的能量,在电池充满后,传感器节点或生成新的状态更新并向目的节点传输,或重新传输现有的状态更新直到状态更新在目的节点处被成功接收。另外,在目的节点成功接收一个状态更新数据包并产生一个新的更新时, MBS 以功率 P_m 将回程控制信号传送给传感器节点,以便进行网络资源管理^[21]。为减少回程对 AoI 的影响,本文采用 ARQ 和最大比合并 (Maximum Ratio Combination, MRC) 组合回程传输。在上述过程中,假设电池单元能量信号的功率为 P_v 。

所有的无线链路都服从瑞利衰落。在第 k 个时隙,网络节点 u 和 v 之间的信道衰落系数表示为 $h_{u,v}^k$, 其中, $u \in \{EH_1, EH_2, S, MBS\}, v \in \{S, D\}, |h_{u,v}^k|^2 \sim \exp(1)$ 。状态更新受方差为 σ_D^2 的加性高斯白噪声干扰,忽略噪声对 EH 的影响。

1.2 AoI 描述

在状态更新过程中,假设传输单元能量或状态更新占用一个时隙,在不失一般性的情况下,传输时隙被归一化。传感器节点的第 i 个状态更新产生时隙为 n_i , 并于时隙 n'_i 被目的节点成功接收。在时隙 n , 目的节点接收到的状态更新索引为 $N(n) = \max\{i|n'_i \leq n\}$, 最新收到的状态更新的生成时刻为 $U(n) = n_{N(n)}$, 因此,可得定义 1:

定义 1 (瞬时信息年龄) 在目的节点处收到状态更新的瞬时 AoI 为:

$$\Delta(n) = n - U(n) \tag{1}$$

本文考虑的 IoT 系统在成功接收状态更新后,传感器节点需获取回程信号。传感器节点在 HD 模式下工作,当回程信号被成功接收后,传感器节点才开始接收来自 EHTB 的能量信号,传感器节点充电完成后会产生一个状态更新,并在下一个时隙对其进行传输。

图 2 所示为 AoI 演变示例, $W_i = n_i - n'_{i-1}$ 表示第 i 个回程建立的时间, $S_i = n'_i - n_i$ 表示目的节点 D 成功接收第 i 个状态更新的服务时间, $Y_i = n'_i - n'_{i-1}$ 表示目的节点 D 连续 2 次成功接收状态更新之间的时间间隔,且 $Y_i = W_i + S_i$ 。在成功接收第 i 个状态更新后, AoI 被重置为数据包通过传输系统所经历的时延,之后继续随时间增加。

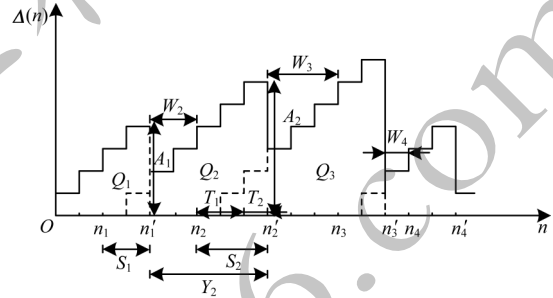


图 2 EHTB 和蜂窝回程辅助物联网系统的 AoI 演变示例
Fig.2 Example of AoI evolution for the EHTB and cellular backhaul assisted IoT system

根据定义 1, 将 PAoI 定义为在时隙 n 测量的 AoI 值, $\Delta(n) = Y_n + S_{n-1} - 1$, 则平均 PAoI 定义为:

$$A = E\{Y_n\} + E\{S_{n-1}\} - 1 \tag{2}$$

定义 2 (平均信息年龄) 对于一个被观察的时间区间 $(0, C)$, 状态更新系统的平均 AoI 为:

$$\Delta = \frac{1}{C} \int_0^C \Delta(n) dn \tag{3}$$

因此,假设时隙 N 内有 M 个状态更新成功传输, 则平均 AoI 表示为图 2 中多边形区域 Q_i 面积之和的平均值:

$$\Delta_N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M Q_i = \frac{M}{N} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_i \tag{4}$$

由于 $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{M}{N} = \frac{1}{E\{Y_i\}}$, 而 $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_i$ 是 Q_i 的算术平均值, 当 M 趋于无穷大时, $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_i$ 收敛于 $E\{Q_i\}$ 。平均 AoI 转换为:

$$\Delta = \lim_{N \rightarrow \infty} \Delta_N = \frac{E\{Q_i\}}{E\{Y_i\}} \tag{5}$$

Q_i 的面积可以进一步写为:

$$Q_i = S_{i-1} + (S_{i-1} + 1) + \dots + (S_{i-1} + Y_i - 1) = S_{i-1} Y_i + \frac{Y_i^2 - Y_i}{2} \tag{6}$$

从而得到:

$$E\{Q_i\} = E\{S_{i-1}Y_i\} + \frac{E\{Y_i^2\}}{2} - \frac{E\{Y_i\}}{2} \quad (7)$$

成功接收更新包的时间 S_{i-1} 与回程建立时间 W_i 和服务时间 S_i 之间都是独立的,因此, S_{i-1} 与 Y_i 相互独立, $E\{S_{i-1}Y_i\} = E\{S_{i-1}\}E\{Y_i\}$, 结合式(5)和式(7), 平均 AoI 为:

$$\Delta = E\{S_{i-1}\} + \frac{E\{Y_i^2\}}{2E\{Y_i\}} - \frac{1}{2} \quad (8)$$

2 EHTB 离散能量状态分析

2.1 EHTB 电池状态的 MC

EHTB 电池可能状态和电池能量状态之间的转换可以被建模为马尔可夫链(Markov Chain, MC), 其中, 每个状态代表 EHTB 电池的离散能量数量^[22]。每个 EHTB 有 $(B_H + 1)$ 种能量状态, 2 个 EHTB 有 $L = (B_H + 1)^2$ 种能量状态。函数 $\Psi(EH_a)$, $a \in \{1, 2\}$, $0 \leq \Psi(EH_a) \leq B_H$ 表示 EHTB 的电池中储存的能量数量, $\Psi(EH_a)$ 随着能量

采集和传输的增加而减少, 当 EHTB 采集一个能量单元时, $\Psi(EH_a)$ 增加 1, 在射频能量传输时, $\Psi(EH_a)$ 减少 1。在考虑 2 个 EHTB 时, 所得 MC 的第 l 个状态 $S_l = \{\Psi_l(EH_1)\Psi_l(EH_2)\}$, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$, 在一般情况下, 这些状态是随机的, 为了便于分析, 本文考虑设置 $B_H = 1$, 因此, 会得到 S_1, S_2, S_3, S_4 这 4 种状态, 其中, $S_1 \in \{0, 0\}$, $S_2 \in \{0, 1\}$, $S_3 \in \{1, 0\}$, $S_4 \in \{1, 1\}$ 。

2.2 MC 状态转移矩阵构建

状态转移矩阵 A 是 $(B_H + 1)^2 \times (B_H + 1)^2$ 大小的矩阵, 且 A_{ij} 表示从状态 S_j 到状态 S_i 的转移概率。状态转移概率取决于 EHTB 电池状态转换的连通性、EHTB 的 HD 模式、随机到达的能量和 EHTB 电池的状态(剩余能量单元的数量、满能量或空能量状态)。同时定义 $P_{a,j \rightarrow i}$ 为第 a 个 EHTB 从状态 j 到状态 i 的概率。2 个 EHTB 相互独立, 因此, $A_{i,j} = \mathbb{P}(S_j \rightarrow S_i)$ 可以写为 $A_{i,j} = P_{1,j \rightarrow k} P_{2,j \rightarrow k}$, 当 $B_H = 1$ 时, 状态转移矩阵如表 1 所示。

表 1 $B_H = 1$ 时的能量状态转移矩阵

Table 1 Energy state transition matrix when $B_H = 1$

状态	$\Psi(EH_1)\Psi(EH_2)$			
	$S_1:(0,0)$	$S_2:(0,1)$	$S_3:(1,0)$	$S_4:(1,1)$
$S_1:(0,0)$	$(1-\delta_{H_1})(1-\delta_{H_2})$	$(1-\delta_{H_1})\mu_{H_2}$	$\mu_{H_1}(1-\delta_{H_2})$	$\mu_{H_1}\mu_{H_2}$
$S_2:(0,1)$	$(1-\delta_{H_1})\delta_{H_2}$	$(1-\delta_{H_1})(1-\mu_{H_2})$	$\mu_{H_1}\delta_{H_2}$	$\mu_{H_1}(1-\mu_{H_2})$
$S_3:(1,0)$	$\delta_{H_1}(1-\delta_{H_2})$	$\delta_{H_1}\mu_{H_2}$	$(1-\mu_{H_1})(1-\delta_{H_2})$	$(1-\mu_{H_1})\mu_{H_2}$
$S_4:(1,1)$	$\delta_{H_1}\delta_{H_2}$	$\delta_{H_1}(1-\mu_{H_2})$	$(1-\mu_{H_1})\delta_{H_2}$	$(1-\mu_{H_1})(1-\mu_{H_2})$

2.3 MC 的平稳分布

通过构建能量状态转移矩阵, 利用状态转移矩阵的性质得到 MC 的平稳分布 $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_L\}$ 。通过本文状态转移矩阵的构建策略, 可以实现 MC 从状态 j 到 i 的任意转换, 且恒有 $\sum_{i=1}^L A_{i,j} = 1$ 。构建的状态转移矩阵 A 是非对称的, 其中, 状态 i 可以通过有限步数转移到状态 j , MC 的任意 2 个状态是连通的, 且矩阵 A 是列随机、不可化简和可逆的。因此, 从上述分析中可以得到定理 1:

定理 1 在 EHTB 和蜂窝回程辅助物联网信息状态更新系统中, EHTB 的能量状态可以用 MC 来表示。状态转移矩阵是列随机、不可化简和可逆的。MC 的平稳分布为:

$$\pi = (A - I + B)^{-1} b \quad (9)$$

其中: $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_L\}$; $L = (B_S + 1)^2$; $B_{i,j} = 1, \forall i, j$; $b = (1, 1, \dots, 1)^T$; I 为单位矩阵。

根据平稳分布 $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_L\}$, 可计算出 WEHT 子系统在任意时隙 n 的平均传输功率。当 $\Psi(EH_a) > 0$ 时, EHTB 在每个时隙中传输一个单元能量, 当 $\Psi(EH_a) = 0$ 时, 无能量传输。因此, 在第 l 个状态下用 $P_{H_1}(l)$ 和 $P_{H_2}(l)$ 表示传输的能量单元, 得到以下定义:

$$P_{H_a}(l) = \begin{cases} 1, & \Psi_l(EH_a) \geq 1 \\ 0, & \Psi_l(EH_a) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

WEHT 子系统提供的总平均稳定能量为:

$$P_H = \sum_{l=1}^L \pi_l (P_{H_1}(l) P_U) + \sum_{l=1}^L \pi_l (P_{H_2}(l) P_U) \quad (11)$$

$$\text{当 } \mu_{H_1} = \mu_{H_2}, \delta_{H_1} = \delta_{H_2} \text{ 时, } \sum_{l=1}^L \pi_l P_{H_1}(l) = \sum_{l=1}^L \pi_l P_{H_2}(l),$$

为了便于分析, 后文设置 $\delta_{H_1} = \delta_{H_2} = \delta_H$ 和 $\mu_{H_1} = \mu_{H_2} = \mu_H$ 。

2.4 EHTB 能量传输时间

在 EHTB 的电池能量状态已知后, 分析有限大小的传感器节点完全充电的时间。首先, 定义 $P_T(m)$ 为随机变量 T 的概率质量函数, 模拟在 m 个连续时间段内为传感器节点电池完全充电的随机时间, 然后对于 EHTB 的能量传输, 得到以下的能量评估策略, 传感器在 n 个连续时隙内从 EHTB 接收到的总平均能量 E_n 为:

$$E_n = \min \left\{ \mathbb{I}_{E_{n-1} < B_S} E_{n-1} + \eta E_{S_n}, B_S P_U \right\} \quad (12)$$

其中: $\eta (0 \leq \eta \leq 1)$ 为 RF-DC 的转换效率; \mathbb{I}_X 是 X 的指示函数。假设 EHTB 使用 MRC 技术, E_{S_n} 表示在第 n 个时隙从 EHTB 接收的总能量。通过使用式(11)中 EHTB 采集的总平均稳定能量可以得到:

$$E_{S_n} = \sum_{l=1}^L \pi_l \left[P_{H_1}(l) |h_1^n|^2 P_U + P_{H_2}(l) |h_2^n|^2 P_U \right] \quad (13)$$

因此,利用能量评估策略式(12),可以得到传感器节点的电池从2个EHTB充满电的总等待时间 T_m 的概率质量函数 $P_T(m)$ 为:

$$P_T(m) = \mathbb{P}\left\{\left(\sum_{n=1}^{m-1} E_{S_n} < B_S\right) \cap \left(\sum_{n=1}^m E_{S_n} \geq B_S\right)\right\} = \mathbb{P}\left\{\sum_{a=1}^2 \sum_{n=1}^{m-1} \left(\sum_{l=1}^L \pi_l P_{H_a}(l)\right) |h_a^n|^2 < \frac{B_S}{\eta} \cap \sum_{a=1}^2 \sum_{n=1}^m \left(\sum_{l=1}^L \pi_l P_{H_a}(l)\right) |h_a^n|^2 \geq \frac{B_S}{\eta}\right\} \quad (14)$$

由于给定时隙 n 信道增益和 $H_n = \sum_{a=1}^2 |h_a^n|^2$ 是一个Gamma随机变量^[23], $H_n \sim \text{Gamma}(2, 1)$,因此将 H_n 的分布函数 $F_{H_n}(x) = 1 - \frac{\Gamma(2, x)}{\Gamma(2)}$ 和概率密度函数 $f_{H_n}(x) = \frac{x}{\Gamma(2)} e^{-x}$ 代入式(14)得到:

$$P_T(m) = e^{-B_{Th}} \left[\frac{1 + B_{Th}}{(2(m-1))!} B_{Th}^{2(m-1)} - \frac{2(m-1)}{(2(m-1)+1)!} B_{Th}^{2(m-1)+1} \right], m > 1 \quad (15)$$

$$P_T(1) = \Gamma(2, B_{Th}), m = 1 \quad (16)$$

其中: $B_{Th} = \frac{B_S}{\eta \sum_{l=1}^L \pi_l P_{H_{(2)}}(l)}$

根据式(15)和式(16),利用 $\sinh(x) = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$ 和 $\cosh(x) = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$,得到传感器节点从EHTB获得 B_S 能量的等待时间 T 的一阶矩和二阶矩:

$$E\{T\} = \sum_{n=1}^{\infty} n P_T(n) = \frac{3}{4} + \frac{1}{2} B_{Th} + \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} B_{Th}\right) e^{-2B_{Th}} \quad (17)$$

$$E\{T^2\} = \sum_{n=1}^{\infty} n^2 P_T(n) = \frac{1}{4} B_{Th}^2 + B_{Th} + \frac{5}{8} + \left(\frac{3}{8} - \frac{5}{8} B_{Th}\right) e^{-2B_{Th}} \quad (18)$$

3 平均AoI和PAoI的计算与分析

本节分析EHTB和蜂窝回程辅助物联网信息状态更新系统的平均AoI和PAoI,根据式(2)和式(8)的定义,要得到平均AoI和PAoI,需要计算 $E\{Y_i^2\}$ 、 $E\{S_{i-1}\}$ 和 $E\{Y_i\}$,此外,由于 $Y_i = W_i + S_i$,还需要蜂窝回程建立时间的统计描述。

由图2可知, W_i 为第 i 个更新包传输的蜂窝回程建立时间。由于传感器节点采用MRC技术,因此 W_i 的概率质量函数为:

$$P_W(m) = \mathbb{P}\left\{\sum_{t=1}^{m-1} I_t < \gamma_{th}^M \cap \sum_{t=1}^m I_t \geq \gamma_{th}^M\right\} \quad (19)$$

其中: γ_{th}^M 为蜂窝回程成功传输阈值。在时隙 t ,从MBS接收到的回程信号能量 $I_t = P_M |h'_{M,S}|^2$,其中,

$|h'_{M,S}|^2 \sim \exp(1)$ 。将 I_t 代入式(19)得到:

$$P_W(m) = \mathbb{P}\left\{\sum_{t=1}^{m-1} |h'_{M,S}|^2 < \frac{\gamma_{th}^M}{P_M} \cap \sum_{t=1}^m |h'_{M,S}|^2 \geq \frac{\gamma_{th}^M}{P_M}\right\} \quad (20)$$

其中: $H_{M,S} = \sum_{t=1}^{m-1} |h'_{M,S}|^2$ 是一个Gamma随机变量^[24-25]。

将 $f_{H_{M,S}}(x) = \frac{x^{m-2}}{\Gamma(m-1)} e^{-x}$ 和 $F_{H_{M,S}}(x) = 1 - \frac{\Gamma(m-1, x)}{\Gamma(m-1)}$ 代入式(19)可以得到:

$$P_W(m) = \int_0^{\gamma_{th}^M/P_M} \int_{\gamma_{th}^M/P_M - x}^{\infty} f_{H_{M,S}}(x) dx f_{|h'_{M,S}|^2}(y) dy = \frac{e^{-\gamma_{th}^M/P_M}}{\Gamma(m-1)} \frac{1}{m-1} \left(\frac{\gamma_{th}^M}{P_M}\right)^{m-1} = \frac{e^{-\gamma_{th}^M/P_M}}{\Gamma(m)} \left(\frac{\gamma_{th}^M}{P_M}\right)^{m-1} \quad (21)$$

根据式(21),利用级数 $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$ 可得回程建立时间 W 的一阶矩和二阶矩:

$$E\{W\} = \sum_{m=1}^{\infty} m P_W(m) = e^{-\gamma_{th}^M/P_M} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m}{(m-1)!} \left(e^{\gamma_{th}^M/P_M}\right)^{m-1} = 1 + \frac{\gamma_{th}^M}{P_M} \quad (22)$$

$$E\{W^2\} = \sum_{m=1}^{\infty} m^2 P_W(m) = 3 \frac{\gamma_{th}^M}{P_M} + \left(\frac{\gamma_{th}^M}{P_M}\right)^2 + 1 \quad (23)$$

由图2可知,服务时间 $S_i = \sum_{m=1}^{M_{S_i}} T_m$,一个状态更新被成功接收的传输次数 M_{S_i} 是离散随机变量。当发生 M_{S_i} 次传输,意味着前 $M_{S_i}-1$ 次传输均不成功,直到第 M_{S_i} 次传输成功。因此,平均服务时间 S_i 为:

$$E\{S_i\} = E\{S_{i-1}\} = \sum_{M_{S_i}=1}^{\infty} M_{S_i} E\{T\} (1 - P_{suc})^{M_{S_i}-1} P_{suc} (a) = E\{T\} P_{suc} \times \frac{1}{(1 - (1 - P_{suc}))^2} = \frac{E\{T\}}{P_{suc}} \quad (24)$$

其中:(a)使用 $\sum_{n=1}^{\infty} n \cdot x^{n-1} = \frac{1}{(1-x)^2}$, $x < 1$ 。一阶矩 $E\{T\}$ 已在式(17)中给出,传感器节点 S 到目的节点 D 状态更新成功传输的概率为:

$$P_{suc} = \mathbb{P}\left\{\frac{P_U B_S |h'_{S,D}|^2}{\sigma_D^2} \geq \gamma_{th}^D\right\} = \exp\left(\frac{-\sigma_D^2 \gamma_{th}^D}{P_U B_S}\right) \quad (25)$$

目的节点连续2次成功接收状态更新之间的时间间隔 $Y_i = W_i + S_i = W_i + \sum_{m=1}^{M_{S_i}} T_m$ 。考虑到回程建立时间和服务时间之间的独立性,可以得到:

$$E\{Y_i\} = E\{W_i\} + E\{S_i\} \quad (26)$$

$$E\{Y_i^2\} = E\{W_i^2\} + E\{S_i^2\} + 2E\{W_i\}E\{S_i\} \quad (27)$$

其中: $E\{W_i\}$ 、 $E\{W_i^2\}$ 和 $E\{S_i\}$ 已在式(22)~式(24)中给出。因此,还需计算出 $E\{S_i^2\}$,根据定义 $S_i = \sum_{m=1}^{M_{S_i}} T_m$,得到 S_i^2 表示为:

$$S_i^2 = \left(\sum_{m=1}^{M_{S_i}} T_m\right)^2 = \sum_{m=1}^{M_{S_i}} T_m^2 + 2 \sum_{m=1}^{M_{S_i}} \sum_{t>m}^{M_{S_i}} T_m T_t \quad (28)$$

通过对条件期望进行运算可以得到:

$$E\{S_i^2|M_{S_i}\} = M_{S_i}E\{T^2\} + 2M_{S_i}(M_{S_i}-1)E^2\{T\} \quad (29)$$

然后进行如下计算:

$$E\{S_i^2\} = \sum_{M_{S_i}=1}^{\infty} E\{S_i^2|M_{S_i}\}(1-P_{\text{suc}})^{M_{S_i}-1}P_{\text{suc}} \quad (30)$$

将式(29)代入式(30)得到:

$$E\{S_i^2\} = \sum_{M_{S_i}=1}^{\infty} M_{S_i}E\{T^2\}(1-P_{\text{suc}})^{M_{S_i}-1}P_{\text{suc}} + 2 \sum_{M_{S_i}=1}^{\infty} M_{S_i}(M_{S_i}-1)E^2\{T\}(1-P_{\text{suc}})^{M_{S_i}-1}P_{\text{suc}} \quad (31)$$

通过使用文献[26]中的表达式(0.114), $E\{S_i^2\}$ 第二项可以写为:

$$2 \sum_{M_{S_i}=1}^{\infty} M_{S_i}(M_{S_i}-1)E^2\{T\}(1-P_{\text{suc}})^{M_{S_i}-1}P_{\text{suc}} = 2 \left(E^2\{T\} \frac{2-P_{\text{suc}}}{P_{\text{suc}}^2} - \frac{E^2\{T\}}{P_{\text{suc}}} \right) \quad (32)$$

因此,式(30)经过化简运算表示为:

$$E\{S_i^2\} = \frac{E\{T^2\}}{P_{\text{suc}}} + \frac{4E^2\{T\}(1-P_{\text{suc}})}{P_{\text{suc}}^2} \quad (33)$$

结合式(22)~式(24)、式(33)和式(8)可以得到平均AoI和PAoI,即定理2。

定理2 对于EHTB和蜂窝回程辅助物联网系统,传感器通过使用EHTB传输的能量进行状态更新,在蜂窝回程控制下,目的节点的平均AoI为:

$$\Delta = E\{S\} + \frac{1}{2(E\{W\} + E\{S\})} \cdot (E\{W^2\} + E\{S^2\} + 2E\{W\}E\{S\}) - \frac{1}{2} \quad (34)$$

平均PAoI为:

$$A = E\{W\} + E\{S\} \quad (35)$$

定理2表明了蜂窝回程和WEHT子系统对平均AoI和PAoI的影响。回程建立导致AoI增加,本文采用ARQ和MRC技术来降低回程的影响。虽然从式(34)和式(35)不能直观地发现WEHT子系统对平均AoI的影响,但在式(24)和式(33)中能够得到,在严格的能量约束下可以独立设计WEHT子系统和蜂窝回程子系统,这在实际工程应用中具有重要意义。

4 仿真结果与分析

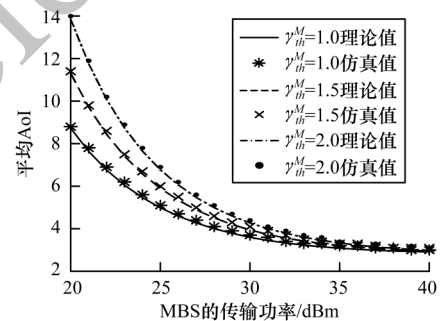
本文使用Matlab软件搭建仿真验证平台,从回程链路参数、自然能量到达概率、EHTB能量传输概率、传感器电池尺寸等角度分析所提物联网信息状态更新系统的平均AoI和PAoI。为符合实际无线通信场景的要求,整个系统在一个全球移动通讯系统信道上运行。在仿真过程中,只考虑小规模衰落,信道平均增益为1,网络节点位置随机选择,每组AoI(PAoI)通过1000次仿真的平均值获得。相关仿真参数配置如表2所示。

表2 仿真参数及其取值

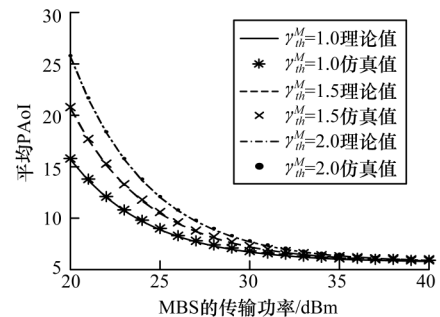
Table 2 Simulation parameters and their values

参数	符号	取值
载波频率/MHz	f_c	940
带宽/MHz	B_c	10
噪声功率/(dBm·Hz ⁻¹)	P_f	-174
MBS的发射功率/dBm	P_M	10~40
单元能量信号功率/dBm	P_U	15
EHTB的能量传输概率	μ_{H_1}, μ_{H_2}	0~1
EHTB的自然能量到达概率	$\delta_{H_1}, \delta_{H_2}$	0~1
能量转换效率	η	0.8
EHTB电池尺寸	B_H	5
传感器电池尺寸	B_S	1~3
传感器更新传输链路的信噪比阈值	γ_{th}^D	1
蜂窝回程链路信噪比阈值	γ_{th}^M	1.0, 1.5, 2.0
传感器节点与目的节点之间的距离/km	d_S	2
瑞利衰落信道功率	λ	1

图3所示为平均AoI和PAoI随回程链路参数的变化情况。从中可以看出:随着MBS发射功率 P_M 的增大,平均AoI和PAoI逐渐减小,且随着 P_M 的不断增大,平均AoI和PAoI变化缓慢;当 P_M 为定值时,回程阈值 γ_{th}^M 越高,回程传输可靠性越低,平均AoI和PAoI越大。MBS的高传输功率可以降低回程传输的中断概率,使回程下行链路中断概率趋于零,回程传输只需要一个时隙,但传输功率较小时,回程建立对状态更新的影响不可忽略,平均AoI和PAoI增加。通过ARQ和MRC可以提高重传的可靠性,降低回程对平均AoI和PAoI的影响。



(a)MBS传输功率与回程阈值对平均AoI的影响



(b)MBS传输功率与回程阈值对平均PAoI的影响

图3 MBS传输功率与回程阈值的影响

Fig.3 Effect of MBS transmission power and backhaul threshold

图4所示为自然能量到达概率 δ_H 、能量传输概率 μ_H 与回程对平均AoI和PAoI的影响,考虑对称EHTB,设置 $\delta_{H_1}=\delta_{H_2}=\delta_H, \mu_{H_1}=\mu_{H_2}=\mu_H$ 。从图4可以看出:随着 δ_H 的增加,平均AoI和PAoI减小,且平均PAoI大于平均AoI;平均AoI随着 μ_H 的增加而增加,这是由于部署的EHTB分别在HD模式下传输和采集能量,随着 μ_H 的增加,EH概率降低,从而降低了EHTB平均传输功率,增加了传感器充分充电的时间,因此,为了降低平均AoI,应选择较低的 μ_H 。图4(b)给出有无回程控制系统的AoI和PAoI比较,结果表明,在实际的系统中,回程的建立增加了AoI,尤其当 δ_H 较大时,需要考虑回程的影响。

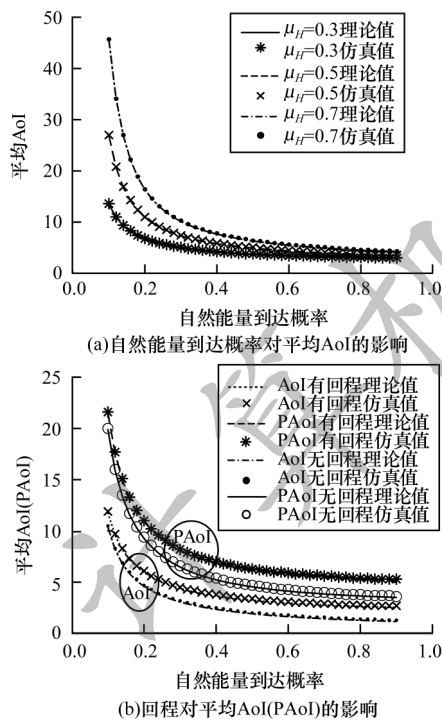


图4 自然能量到达概率与回程的影响

Fig.4 Effect of natural energy arrival probability and backhaul

图5所示为EHTB能量传输概率 μ_H 与回程对平均AoI和PAoI的影响。从中可以看出,平均AoI和PAoI随着 μ_H 的增加先增后减,因此,存在最优 μ_H^* (或 δ_H^*),在该点平均AoI和PAoI最小,但该最小值需要在 δ_H 和 μ_H 之间权衡。从图5(a)可以看出,当 $\mu_H < \mu_H^*$ 时,增加 μ_H 可以使传感器获得的能量增加,从而提高传感器传输的可靠性,降低平均AoI;反之,当 $\mu_H > \mu_H^*$ 时,由于EHTB在HD模式下工作, μ_H 增加使得EHTB获取能量的概率降低,从而降低了传感器传输的可靠性,导致平均AoI增加。图5(b)给出有无回程时系统的AoI(PAoI)比较结果,可以看出,回程的影响必须考虑。从图6可以看出,当 δ_H 较大时,平均AoI和PAoI的最小值在 μ_H 的最大值处,平均AoI和PAoI随着 μ_H 的减小而增加。这是因为 δ_H 较高时2个EHTB都能获得足够的能量,并对

电池充分充电,EHTB能量传输概率 μ_H 较高,传感器获得足够的能量进行状态更新传输,在这种情况下,较小的 μ_H 会导致延迟和包拥塞的增加,平均AoI和PAoI增加。在自然能源充足的情况下,EHTB频繁传输能量,平均AoI降低。

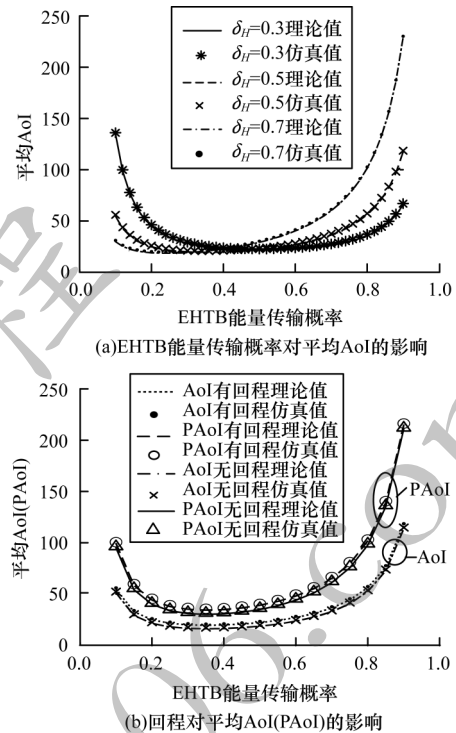


图5 EHTB能量传输概率与回程的影响

Fig.5 Effect of EHTB energy transmission probability and backhaul

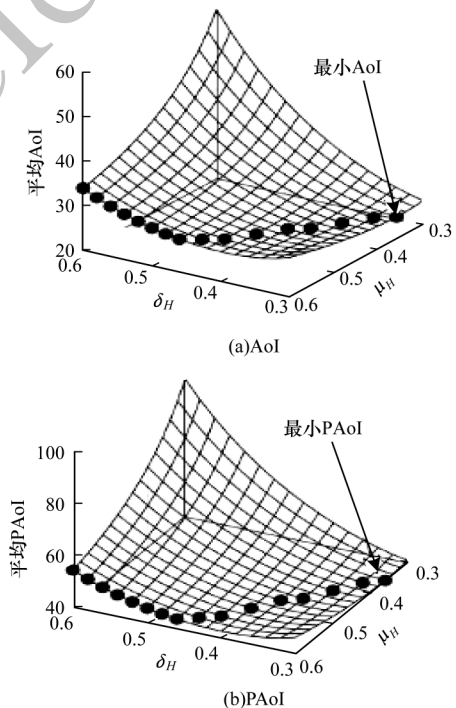


图6 不同能量传输与能量到达概率下的平均AoI和PAoI最小值

Fig.6 Average AoI and PAoI minimum values under different energy transmission and energy arrival probabilities

图7所示为传感器电池大小、MRC对平均AoI和PAoI的影响。从图7(a)可以看出,随着传感器电池容量的增大,平均AoI增加,这是因为在所提系统模型中,传感器只有在充满电后才开始发送状态更新,传感器电池容量越大,充分充电时间越长,虽然大容量传感器可以提高成功传输的概率,但AoI主要取决于传感器接收到来自EHTB的能量信号的时间。图7(b)给出在回程ARQ有MRC和ARQ无MRC系统中AoI(PAoI)的比较结果,可以看出,通过MRC可以显著降低平均AoI(PAoI)。

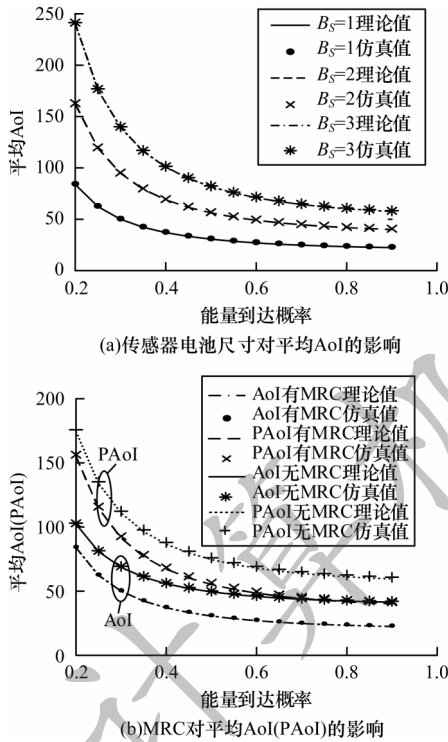


图7 传感器电池尺寸与MRC的影响
Fig.7 Effect of sensor battery sizes and MRC

图8所示为有无采用EH方案时的平均AoI。从中可以看出,由于自然能量随机性的影响,在使用EH供电时,系统AoI随着自然能源到达概率的减小而增加。虽然采用EH方案时平均AoI较高,降低了信息的新鲜度,但与传感器源利用电网能量传输信号的无EH方案相比,采用EH方案的传感器消耗的能量来自可再生能源,可视为零消耗,因此,其能量效率高于无EH方案。

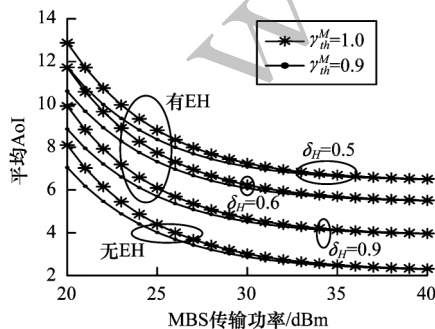


图8 有无能量采集时的平均AoI
Fig.8 Average AoI with or without energy harvesting

5 结束语

本文提出一种蜂窝通信场景下的信息状态更新系统。通过构建EHTB离散能量状态MC,得到EHTB传输能量的平稳分布和传感器充电时间的统计描述。推导平均AoI和PAoI的计算表达式,并分析系统参数、MRC以及回程对平均AoI和PAoI的影响。仿真结果表明,回程会增加平均AoI和PAoI,采用MRC后可以降低系统平均AoI(PAoI)。在本文中,为了便于分析,无线传感器状态更新子系统只考虑单一感知节点和单一状态信息接收节点的情况,但本文模型可以推广到多传感器状态更新子系统中。下一步将对无人机辅助边缘计算系统的信息年龄进行研究,通过联合优化无人机轨迹以实现能源效率最大化和平均AoI最小化的目的。

参考文献

- [1] 孙径舟,王乐涵,孙宇璇,等. 面向6G网络的信息时效性度量及研究进展[J]. 电信科学,2021,37(6):3-13. SUN J Z, WANG L H, SUN Y X, et al. Information timeliness metrics and research progress for 6G network [J]. Telecommunications Science, 2021, 37(6): 3-13. (in Chinese)
- [2] 路艺,贾向东,纪澎善,等. 多层无人机毫米波异构网络的吞吐量研究[J]. 计算机工程,2021,47(7):176-182. LU Y, JIA X D, JI P S, et al. Research on throughput of UAV-assisted multi-tier millimeter-wave heterogeneous networks[J]. Computer Engineering, 2021, 47(7): 176-182. (in Chinese)
- [3] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: how often should one update? [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 2731-2735.
- [4] KAUL S K, YATES R D, GRUTESER M. Status updates through queues [C]//Proceedings of the 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [5] ZENG Q S, CHEN Z C, JIA Y J, et al. Dynamic resource sharing for non-preemptive M/M/1/1 queueing system: an age of information perspective [C]//Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2021: 659-663.
- [6] SOYSAL A, ULUKUS S. Age of information in G/G/1/1 systems: age expressions, bounds, special cases, and optimization[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2021, 67(11): 7477-7489.
- [7] TALAK R, KARAMAN S, MODIANO E. Optimizing information freshness in wireless networks under general interference constraints [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(1): 15-28.
- [8] DABIRI M, EMADI M J. Average age of information minimization in an energy harvesting wireless sensor node [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Telecommunications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 123-126.
- [9] 赵悦超,杨涛,胡波. 无线传感器网络中基于信息年龄的状态更新策略[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(11):

- 29-34.
ZHAO Y C, YANG T, HU B. A status updating policy based on age of information in wireless sensor network[J]. *Microelectronics & Computer*, 2020, 37(11): 29-34. (in Chinese)
- [10] ARAFA A, YANG J, ULUKUS S, et al. Age-minimal transmission for energy harvesting sensors with finite batteries: online policies[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2020, 66(1): 534-556.
- [11] KRIKIDIS I. Average age of information in wireless powered sensor networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(2): 628-631.
- [12] FARAZI S, KLEIN A G, BROWN D R. Average age of information for status update systems with an energy harvesting server[C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops*. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2018: 112-117.
- [13] BACINOGLU B T, UYSAL-BIYIKOGLU E. Scheduling status updates to minimize age of information with an energy harvesting sensor[C]//*Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory*. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2017: 1122-1126.
- [14] TUNC C, PANWAR S. Optimal transmission policies for energy harvesting age of information systems with battery recovery[C]//*Proceedings of the 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2019: 2012-2016.
- [15] WU X W, YANG J, WU J X. Optimal status update for age of information minimization with an energy harvesting source[C]//*Proceedings of IEEE Symposium on Green Communications and Networking*. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2017: 193-204.
- [16] GU Y F, WANG Q, CHEN H, et al. Optimizing information freshness in two-hop status update systems under a resource constraint[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(5): 1380-1392.
- [17] LIU L S, XIONG K, CAO J, et al. Average AoI minimization in UAV-assisted data collection with RF wireless power transfer: a deep reinforcement learning scheme[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(7): 5216-5228.
- [18] LU Y, XIONG K, FAN P Y, et al. Online transmission policy in wireless powered networks with urgency-aware age of information [C]//*Proceedings of the 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference*. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2019: 1096-1101.
- [19] GU Q, WANG G P, FAN R F, et al. Optimal resource allocation for wireless powered sensors: a perspective from age of information [J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(11): 2559-2563.
- [20] HATAMI M, LEINONEN M, CODREANU M. AoI minimization in status update control with energy harvesting sensors[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(12): 8335-8351.
- [21] 吕亚平, 贾向东, 陈玉宛, 等. 面向密集热点区域的多层异构网络建模方案[J]. *计算机工程*, 2021, 47(7): 146-154.
- LÜ Y P, JIA X D, CHEN Y W, et al. Modeling scheme of multi-layer heterogeneous network for dense hotspot area[J]. *Computer Engineering*, 2021, 47(7): 146-154. (in Chinese)
- [22] YATES R D, KAUL S K. The age of information: real-time status updating by multiple sources[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, 65(3): 1807-1827.
- [23] MUDOI R. ASER of RQAM with MRC receiver over correlated Rayleigh fading channels [C]//*Proceedings of International Conference on Computing and Communication Systems*. Berlin, Germany: Springer, 2021: 523-530.
- [24] BLAGOJEVIC V, IVANIS P. Ergodic capacity for TAS/MRC spectrum sharing cognitive radio[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(3): 321-323.
- [25] ALOUINI M S, SIMON M K. Performance of coherent receivers with hybrid SC/MRC over Nakagami-m fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1999, 48(4): 1155-1164.
- [26] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[M]. 7th ed. [S. l.]: Elsevier Academic Press Publications, 2007.