密集网络中的及时机会式泛洪

Purbesh Mitra Sennur Ulukus 马里兰大学帕
克分校电气与计算机工程系，马里兰州大学公园市
20742 pmitra@umd.edu ulukus@umd.edu

arXiv:2301.00798v2 [cs.IT] 8 Mar 2023

摘要——我们研究由 n 个节点组成的全连接无线网络中的信息传播。网络从生成新信息的源节点接收泊松更新。节点与相邻节点传播其可用信息，以维持网络的及时性。在这项工作中，我们提出两种信息传播方案，一种是半分布式方案，另一种是全分布式方案。在半分布式方案中，最新鲜的节点使用导频信号与网络交互，并以完整的可用更新速率 B 传播信息。在全分布式方案中，每个节点以完整更新速率 B 传播固定持续时间的信息。两种方案都实现了 $O(1)$ 年龄伸缩，而半分布式方案对于任何对称随机泛洪策略都具有最佳年龄性能。我们将结果与近期提出的 ASUMAN 方案 **[1],** 进行比较，该方案同样实现了 $O(1)$ 年龄性能，但节点需要具备年龄感知能力。

一、引言

八卦传播是一种信息共享机制，节点会随机向相邻节点传输自身数据。八卦传播无需集中式调度，特别适用于密集网络中的通信。文献中提出了许多谣言传播算法，例如 [2]–[4], ，旨在最大化信息扩散的效果。文献 [5] 从及时性的角度研究了谣言传播算法。文献 [5] 的分析采用版本年龄指标，这是文献 [6]–[20] 中衡量信息新鲜度的指标之一。

文献 [5] 的分析表明，对于一个包含 n 个节点的全连接网络，如果每个节点以固定速率 λ 进行 gossip，则任意单个节点的平均版本年龄会随网络规模 n 按 $O(\log n)$ 的比例增长。后续研究表明，通过引入特定的网络机制（例如聚类 [21]–[23], 、文件分片和网络编码 [24]），可以改善年龄伸缩。后续工作还研究了及时泛洪抵御对抗性行为的鲁棒性，例如干扰[25] 和时间戳篡改 [26], ； 考察可靠信息源和不可靠信息源对 gossip 中年龄的影响 [27], ； 并研究非泊松更新（任意更新间隔）对缓存更新树形网络中及时性的影响 [28]。

本文关注现有八卦传播方案的另一方面，即为所有节点分配统一的传播速率。统一速率泛洪的一个主要缺点是，它为信息相对陈旧和相对新鲜的节点分配相同的传播速率，从而对网络的时效性表现产生负面影响。本文的目标是高效且分布式地在用户之间动态分配网络的总泛洪容量，从而实现机会式信息传播，使信息更新鲜的节点以更高的传播速率进行八卦传播。

首篇探讨统一速率泛洪低效问题的论文是 [1] ，该论文提出了 ASUMAN 方案。这是一种机会式信息传播方案，假设节点具备年龄感知能力。在 ASUMAN 中，由于节点具备年龄感知能力，每当源节点更新自身时，网络中的所有节点都会同步，并开始一个新的信息传播帧。新帧开始时，节点会停止 gossip，并在等待一段与其当前年龄成正比的退避期后发送一个短导频信号。这样，最新鲜的节点会最先开始 gossip，因为它们的退避期最短；相对较旧的节点收到最新鲜节点的导频信号后，则不会进行 gossip。如果某一帧中的新鲜节点数量超过一个，那么可以根据收到的导频信号估算该数量，并由这些节点平均分配总更新速率 $B = n\lambda$ 。文献 [1] 中的分析表明，单个节点的版本年龄随网络规模 n按 $O(1)$的量级增长。

尽管 ASUMAN 实现了更好的年龄性能，但其系统模型在实际应用中面临一些挑战。其中一个挑战是，当多个节点具有相同的最小年龄时，它们会同时发送导频信号。因此，多个短信号会在空中重叠，导致无法正确识别最小年龄节点，并在通信节点之间造成干扰。ASUMAN 的另一个缺点是，节点必须具备年龄感知能力。当源节点更新自身状态时向节点发送信号即可实现这一点，但这会增加简单信息传播模型的复杂性。

gossip 方案	年龄伸缩
[1] 中提出的 ASUMAN	$2\frac{\lambda_e}{\lambda}+1$
本文提出的半分布式方案	$2\frac{\lambda_e}{\lambda}$
本文提出的全分布式方案	$(1+e)\frac{\lambda_e}{\lambda}$

不同信息传播方案的年龄缩放比较，表 I。

本文提出了两种新的信息传播方案，一种是半分布式方案，另一种是全分布式方案，两者均能达到$O(1)$性能。这些方案能够规避前文提到的缺点。在半分布式方案中，每当节点从源节点获得更新时，就会向相邻节点发送导频信号，并以最大容量开始传播，直到收到其他某个节点发送的信号。在全分布式方案中，每

当节点从源节点获得更新时，它会以最大容量进行固定持续时间的八卦传播，然后停止。表 I 展示了这些方案的年龄缩放比较。此外，我们证明，在瞬时最大泛洪速率受限的条件下，半分布式信息传播方案在所有可能的对称泛洪方案中具有最佳年龄性能。为了进行分析，我们采用与 [1], [5], 类似的随机混合系统（SHS）表述 [29], ，计算节点的平均稳态版本年龄。

II. 系统模型

我们考虑一个由源节点0和一组标记为 $\mathcal{N} = \{1, 2, \ldots, n\}$的节点组成的泛洪网络，如图1所示。源节点以速率 λ_e通过泊松到达更新其信息，并以总速率 λ 向网络发送泊松更新。为简单起见，我们考虑一个对称网络，即每个节点以速率$\frac{\lambda}{n}$ 从源节点接收更新。在及时信息传播相关文献 [5], [20]–[26], 中，假设网络中的每个节点以速率 λ进行gossip；因此，在每个节点都与其他$(n-1)$个节点连接的全连接网络中，每个节点 i 以速率 $\frac{\lambda}{n-1}$与节点 j 进行gossip。因此，网络的总更新容量为$B = n\lambda$。与本文的 [1], 一样，我们考虑将这一总更新速率 B 动态分配给用户。一旦为某个节点分配了传播速率，在全连接网络中，该节点便以相同的速率与其$(n-1)$个邻居节点进行gossip。

因此，该网络的瞬时 gossip 速率上限为 B 。如果任意时刻有多个节点传输，且瞬时 gossip 总速率超过 B, 就会产生干扰，导致泛洪数据丢失。因此，为实现有效 gossip，在任意时刻，瞬时 gossip 总速率必须小于或等于 B。我们的工作旨在提升此类网络的及时性。为了衡量第 i 个节点的及时性，我们使用版本年龄，记作 $\Delta_i(t)$。该指标表示在时间 t，与源节点可用的数据相比，第 i 个节点的数据落后了多少个版本。用数学形式表示为

$$\Delta_i(t) = N_s(t) - N_i(t), \tag{1}$$

其中， $N_s(t)$ 和 $N_i(t)$ 分别表示在时间 t 源节点和第 i 个节点上可用的数据版本。我们将时间 t 各节点的年龄记为年龄向量 $\mathbf{\Delta}(t) = [\Delta_1(t)\ \Delta_2(t) \ldots, \Delta_n(t)]$。当源节点更新自身时，所有节点的年龄都增加 1。如果源节点向某个节点发送更新，该节点的年龄就变为 0。当节点 i 向节点 j 发送 gossip 更新时，它会存储版本最新的数据，即第 j 个节点的年龄变为 $\hat{\Delta}_j(t) = \Delta_{\{i,j\}}(t) = \min\{\Delta_i(t)\ \Delta_j(t)\}$。

III. 半分布式信息传播

本节将介绍半分布式信息传播方案。这样做的动机是让网络中最新的节点以最大容量进行八卦传播。假设我们将第 k 个源节点到第 i 个节点的更新记为 $t_k^{(i)}$ 。在该方案中，在时间 $t_k^{(i)}$ ，节点 i 向网络中的

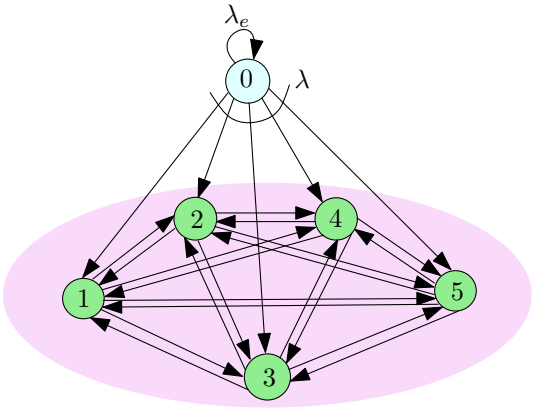


图1. 源节点0以速率 λ_e 更新自身，并以总速率 λ向节点$\mathcal{N} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 均匀发送更新，即向每个节点以速率 $\lambda/5$ 发送。节点之间以总更新速率 B进行 gossip。

所有其他节点发送一个短导频信号，并以速率 B 开始向其他节点进行速率相同的八卦传播。在八卦传播过程中，如果节点 i 从任何其他节点接收到导频信号，则会停止八卦传播。我们将任意时刻 t 的通信节点定义为 $\mathcal{M}(t)$。由于两个泊松到达同时发生的概率为 0，即 $\mathbb{P}(|\mathcal{M}(t)| \geq 2) = 0$，因此这里不会遇到类似 ASUMAN [1] 中导频信号重叠的问题。

我们研究单个节点的平均稳态年龄，记为

$$a_i = \lim_{t\to\infty} a_i(t) = \lim_{t\to\infty} \mathbb{E}[\Delta_i(t)], \tag{2}$$

特别是，网络规模 n 如何影响 a_i，见定理1。

定理1 若 $B = n\lambda$，则半分布式泛洪网络中节点 a_i的平均版本年龄按 O的尺度增长 (1)。

证明：我们使用 [29]的SHS表述。注意，对于任意时刻 t, 通信节点都是网络中年龄最小的节点。将这个最小年龄记为 $\Delta_{\min}(t) = \min\{\Delta_1(t)\ \Delta_2(t) \ldots, \Delta_n(t)\}$。由 [5], 可知, $\lim_{t\to\infty} \mathbb{E}[\Delta_{\min}(t)] = \frac{\lambda_e}{\lambda}$。由于对于任意给定的 t，只有年龄最小的节点在进行 gossip，因此我们可以将系统的状态转移表示为仅包含一种转移类型的SHS，即 $\mathcal{Q} = 0$。我们选择测试函数$\psi_i : \mathbb{B}^n \times [0, \infty) \to \mathbb{B}$，其中 $i \in \mathcal{N}$，如下

$$\psi_i(\mathbf{\Delta}(t), t) = \Delta_i(t). \tag{3}$$

现在，根据 [29, 定理 1], ，我们将扩展生成函数计算为

$$\mathbb{E}[(L\psi_i)(\mathbf{\Delta}(t), t)] = \sum_{(j,\ell)\in\mathcal{L}} \lambda_{j,\ell}(\mathbf{\Delta}(t), t)\mathbb{E}\big[\psi_i(\phi_{j,\ell}(\mathbf{\Delta}(t), t)) - \psi_i(\mathbf{\Delta}(t), t)\big], \tag{4}$$

其中， $\mathcal{L}$ 表示所有可能的状态转移。我们将重置映射定义为 $\phi_{j,\ell}(\mathbf{\Delta}(t)\ t) = \hat{\mathbf{\Delta}}(t) = [\hat{\Delta}_1(t), \hat{\Delta}_2(t) \ldots, \hat{\Delta}_n(t)]$

如下

$$\hat{\Delta}_i(t) = \begin{cases} \Delta_i(t)+1, & \text{if } j=0, \ell=0 \\ 0, & \text{if } j=0, \ell=i \\ \min(\Delta_j(t), \Delta_\ell(t)), & \text{if } j\in\mathcal{N}, \ell=i \\ \Delta_i(t), & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{5}$$

更新速率 $\lambda_{j,\ \ell}$ 给出如下

$$\lambda_{j,\ell}(\boldsymbol{\Delta}(t),t) = \begin{cases} \lambda_e, & \text{if } j=0, \ell=0 \\ \frac{\lambda}{n}, & \text{if } j=0, \ell=i \\ \frac{B}{n-1}\mathbb{I}\{j=\mathcal{M}(t)\}, & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{6}$$

其中，$\mathbb{I}\{\cdot\}$ 表示指示函数。现在，我们可以将（4）重写为

$$\begin{aligned} &\mathbb{E}[(L\psi_i)(\boldsymbol{\Delta}(t),t)] \\ &= \mathbb{E}\Big[\lambda_e(\Delta_i(t)+1-\Delta_i(t)) + \frac{\lambda}{n}(0-\Delta_i(t)) \\ &\quad + \sum_{j\in\mathcal{N}} \frac{B}{n-1}\mathbb{I}\{j=\mathcal{M}(t)\}\left(\Delta_{\{j,i\}}(t)-\Delta_i(t)\right)\Big]. \end{aligned} \tag{7}$$

由于通信节点始终是最小年龄节点，我们可以写为

$$\begin{aligned} &\mathbb{E}[(L\psi_i)(\boldsymbol{\Delta}(t),t)] \\ &= \lambda_e - \frac{\lambda}{n}a_i(t) + \mathbb{E}\Big[\sum_{j=\mathcal{M}(t)} \frac{B}{n-1}(\Delta_{\min}(t)-\Delta_i(t))\Big] \\ &= \lambda_e - \frac{\lambda}{n}a_i(t) + \frac{B}{n-1}(a_{\min}(t)-a_i(t)). \end{aligned} \tag{8}$$

现在，由于版本年龄是时间的分段常数函数，我们得到

$$\frac{d\mathbb{E}[\psi_i(\boldsymbol{\Delta}(t),t)]}{dt} = \frac{d\mathbb{E}[\Delta_i(t)]}{dt} = 0, \tag{9}$$

对于任意连续点 t，因此，根据 [29] 中给出的 Dynkin公式，（8）中的期望值为 0。于是，（8）变为

$$0 = \lambda_e - \frac{\lambda}{n}a_i(t) + \frac{B}{n-1}(a_{\min}(t)-a_i(t)). \tag{10}$$

因此，单个节点的平均年龄表示为

$$a_i(t) = \frac{\lambda_e + \frac{B}{n-1}a_{\min}(t)}{\frac{\lambda}{n}+\frac{B}{n-1}}. \tag{11}$$

为计算稳态平均年龄，我们将 (11) 中的 $t\to\infty$ 代入，得到

$$a_i = \frac{\lambda_e + \frac{B}{n-1}\frac{\lambda_e}{\lambda}}{\frac{\lambda}{n}+\frac{B}{n-1}}. \tag{12}$$

最后，为了计算平均年龄的标度，我们使用 $B=n\lambda$，得到

$$\lim_{n\to\infty} a_i = \lim_{n\to\infty} \frac{\lambda_e}{\lambda}\left(\frac{1+\frac{n}{n-1}}{\frac{1}{n}+\frac{n}{n-1}}\right) = \frac{2\lambda_e}{\lambda}, \tag{13}$$

至此，证明完成。 ■

接下来，我们将证明，对于任何可能的八卦传播方案，只要对瞬时 gossip 方案施加约束，该半分布式方案就能获得最佳的版本年龄性能——如定理 2 所示。

定理2 对于最大瞬时传播速率为 B 的任意对称网络，半分布式信息传播方案可使节点的平均年龄达到最小。

证明：假设采用任意传播策略。由于总传播速率有上界 B，因此有

$$\sum_{j,i\in\mathcal{N},j\neq i} \lambda_{j,i}(\boldsymbol{\Delta}(t),t) \le B, \quad \forall t. \tag{14}$$

根据网络的对称性，可写为

$$\mathbb{E}\left[\sum_{j\in\mathcal{N},j\neq i} \lambda_{j,i}(\boldsymbol{\Delta}(t),t)\right] \le \frac{B}{n-1}. \tag{15}$$

注意，式 (14) 中的求和遍历所有 i,j，而式 (15) 中的求和仅遍历 j。现在令扩展生成函数等于 0，可得

$$\begin{aligned} &\frac{\lambda}{n}a_i(t) + \mathbb{E}\left[\sum_{j\in\mathcal{N},j\neq i} \lambda_{j,i}(\boldsymbol{\Delta}(t),t)\Delta_i(t)\right] \\ &\qquad = \lambda_e + \mathbb{E}\left[\sum_{j\in\mathcal{N},j\neq i} \lambda_{j,i}(\boldsymbol{\Delta}(t),t)\Delta_{\{j,i\}}(t)\right]. \end{aligned} \tag{16}$$

利用式 (15) 中的不等式以及根据定义有 $\Delta_{\{j,i\}}(t)\ge\Delta_{\min}(t)$ 这一事实，我们可以将式 (16) 改写为

$$\frac{\lambda}{n}a_i(t) + \frac{B}{n-1}a_i(t) \ge \lambda_e + \frac{B}{n-1}a_{\min}(t). \tag{17}$$

将 $t\to\infty$ 代入式 (17)，并利用 $a_{\min}(t)$ 的表达式，可得

$$a_i \ge \frac{\lambda_e + \frac{B}{n-1}\frac{\lambda_e}{\lambda}}{\frac{\lambda}{n}+\frac{B}{n-1}}, \tag{18}$$

其中，不等式右侧是采用所提出的半分布式策略时节点的平均年龄。证明至此完成。 ■

IV. 全分布式传播

本节将介绍一种全分布式传播策略。在 ASUMAN [1], 中，节点需要具备年龄感知能力；而在半分布式方案中，节点需要在网络中实现基于导频信号的通信。我们对这些方案加以改进，并提出一种无需年龄感知或导频信号传输的传播策略。在该方案中，每当节点 i 于时间 $t_k^{(i)}$ 从源节点收到更新时，便以速率 B 向所有其他节点进行传播，持续时间固定为 δ，随后停止，如图 2 所示。我们在定理 3中研究该方案的年龄性能。

定理3 若 $B=n\lambda$，全分布式传播网络中节点的平均版本年龄按 $O(1)$ 的尺度变化。

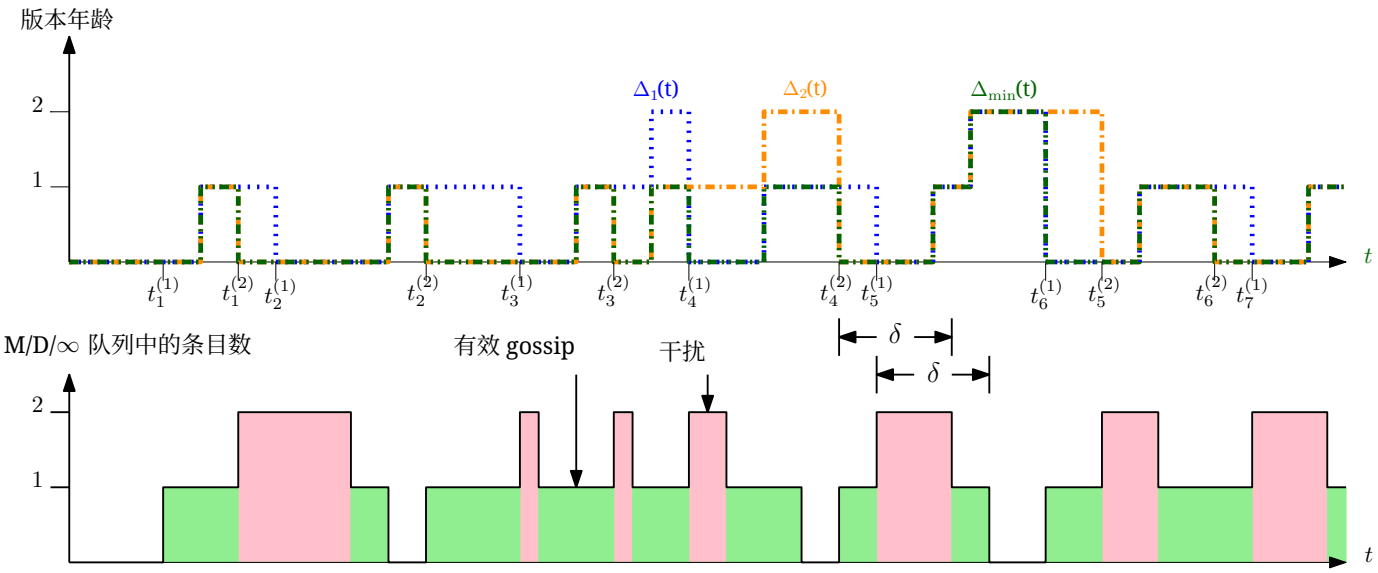


图 2. 双节点网络中的分布式八卦传播。在每个 $t_k^{(i)}$， $\Delta_i(t)$ 变为零，节点 i 开始 gossip，持续时间为 δ。相应的 M/D/∞ 队列表示同时进行 gossip 的节点数量。只有当恰有一个节点进行 gossip 时，才会发生有效 gossip。多个节点同时进行 gossip 会产生干扰，从而不会带来净八卦传播。

证明：从图 2 可以看出，在任意给定时刻，只要存在有效 gossip，就只有最小年龄节点负责。这是因为，只有在单个节点进行 gossip 时，才可能发生有效 gossip；在这种情况下，该节点必须是最小年龄节点。相反，当多个节点以速率 B 进行 gossip 时，由于干扰，不会发生有效 gossip。此外，源节点的每次更新都是速率为 λ 的泊松到达，而 gossip 会立即开始，持续时间为 δ。因此，该系统等价于一个 M/D/∞ 队列。现在，根据 [30], [31], ，我们知道任意一般 M/G/∞ 队列的平稳分布都服从泊松分布，

$$\pi_k = \frac{(\lambda/\mu)^k e^{-\lambda/\mu}}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \ldots, \tag{19}$$

其中， π_k 是队列中有 k 个条目的平稳概率。对于该 M/D/∞ 队列，$\mu = \frac{1}{\delta}$。由于只有当队列中有一个条目时才会发生有效 gossip，因此有效 gossip 速率为

$$\tilde{B} = \pi_1 B = \lambda\delta e^{-\lambda\delta} B. \tag{20}$$

其余分析与定理 1 相同。因此，˜我们可以直接在 (12) 中用 B 替换 B，从而得到第 i 个节点的平均年龄：

$$a_i = \frac{\lambda_e + \frac{\tilde{B}}{n-1}\frac{\lambda_e}{\lambda}}{\frac{\lambda}{n} + \frac{\tilde{B}}{n-1}}. \tag{21}$$

利用 $B = n\lambda$ 并在 (21) 中取 $n \to \infty$，可得年龄伸缩为

$$\lim_{n\to\infty} a_i = \lim_{n\to\infty} \frac{\lambda_e + \frac{\lambda\delta e^{-\lambda\delta} n\lambda}{n-1}\frac{\lambda_e}{\lambda}}{\frac{\lambda}{n} + \frac{\lambda\delta e^{-\lambda\delta} n\lambda}{n-1}} \tag{22}$$

$$= \frac{\lambda_e}{\lambda}\left(1 + \frac{1}{\lambda\delta e^{-\lambda\delta}}\right), \tag{23}$$

由此证明得证。 ■

最后，我们注意到，完全分布式八卦传播方案在 (23) 中的年龄表达式取决于所选的八卦传播时长 δ。因此，我们可以通过选择使平均年龄最小的最优 δ，来改进 (23) 中的年龄表达式。由于$\lambda\delta e^{-\lambda\delta} \le \frac{1}{e}$，最大值出现在 $\delta^* = \frac{1}{\lambda}$，分布式八卦传播的平均年龄下界为

$$\frac{\lambda_e}{\lambda}\left(1 + \frac{1}{e^{-1}}\right) = 1 + ( ) \frac{\lambda_e}{\lambda}。$$

e — δ

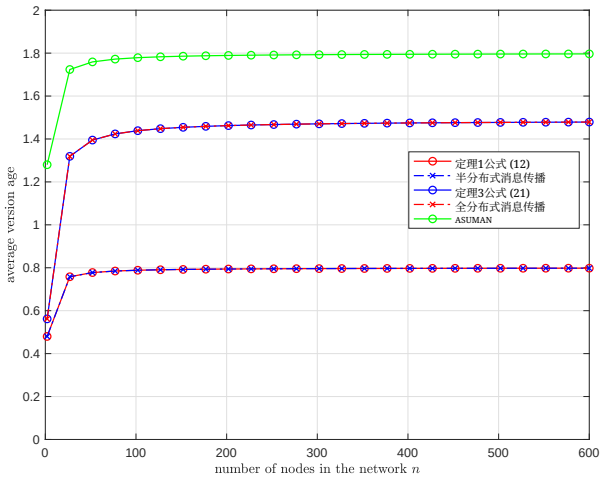
这一结果符合我们的直觉，因为如果 过小，就没有足够的时间进行八卦传播。另一方面，如果 δ 过大，由于同时进行八卦传播的节点造成的干扰，就无法实现有效 gossip。有效 gossip 速率 B达到最大值时，可实现˜最小年龄，而此时 $\tilde{B}|_{\delta^*} = \frac{B}{e}$。

V. 数值结果

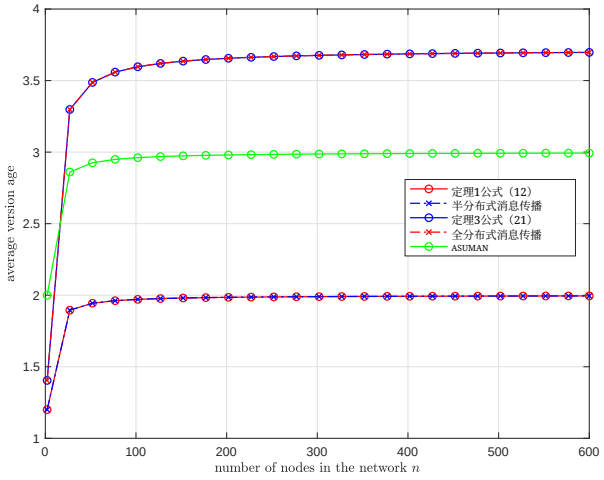
本节展示所提出的两种信息传播方案的仿真结果，并将其与理论推导得出的年龄表达式进行比较。我们还展示 ASUMAN [1] 作为基准的结果。

图 3 分别展示了$\frac{\lambda_e}{\lambda} = 0.4$、$\frac{\lambda_e}{\lambda} = 1$ $\frac{\lambda_e}{\lambda} = 2$ 3 3 3 的数值结果，对应图 (a)、图 (b) 和图 (c)，且所有情况下均为 $\lambda = 1$。从图中可以明显看出，所有 gossip 方案的性能均为 $O(1)$，其中半分布式信息传播方案的性能最佳。

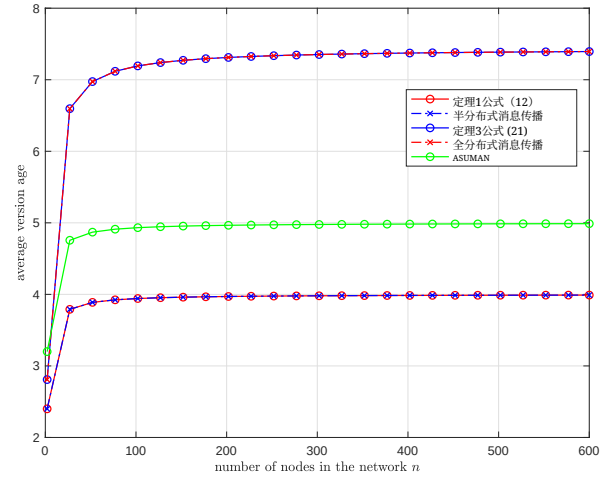
在图 3(a) 中，当$\frac{\lambda_e}{\lambda} = 0.4 < \frac{1}{e-1}$时，ASUMAN 在三种方案中表现出最差的年龄性能。然而，在图 3(b) 和图 3(c) 中，即对于 $\frac{\lambda_e}{\lambda} > \frac{1}{e-1}$，ASUMAN 的表现劣于半分布式方案，但优于全分布式方案。这符合我们的直觉，因为在 ASUMAN 中，我们利用源节点



(a) $\frac{\lambda_e}{\lambda} = 0.4$



(b) $\frac{\lambda_e}{\lambda} = 1$



(c) $\frac{\lambda_e}{\lambda} = 2$

图 3. 半分布式、全分布式和 ASUMAN 方案下，单个节点的平均版本年龄随网络中节点总数的变化。 n

自身更新的信息来更高效地分配传播速率，而在全分布式方案中，多个节点同时进行 gossip 会产生干扰，从而损失部分总传播速率。当源节点到网络的更新速率 λ 相较于源节点自身更新速率 λ_e 较高时，这种干扰效应会更加明显。我们选择 $\delta = \frac{1}{\lambda} = 1$ 进行仿真，以获得全分布式 gossip 的最小平均年龄。

对于 ASUMAN，渐近年龄按 $\lim_{n\to\infty} \frac{\lambda_e}{\lambda} \left(\frac{1+\frac{n}{n-1}}{\frac{1}{n}+\frac{n}{n-1}} \right) = \overline{2\frac{\lambda_e}{\lambda}+1}$ 的比例变化，而另外两种方案分别得到 $2\frac{\lambda_e}{\lambda}$ 和 $(1+e)\frac{\lambda_e}{\lambda}$，如式 (13) 和 (23) 所示（其中 δ 经过优化），并列于表 I。数值仿真结果与推导公式完全吻合。随着比率 $\frac{\lambda_e}{\lambda}$ 增大，所有方案的平均年龄都会增加，这是因为与网络相比，源节点更新得更加频繁；从图 3(a) 到图 3(b) 再到图 3(c) 可以观察到这一点。

六、结论

我们为全连接网络提出了一种半分布式和一种全分布式八卦传播方案。半分布式方案允许最新鲜的节点通过导频信号在网络中通信，并以满负荷进行八卦传播。对于任何对称网络，在瞬时谣言传播速率受限的条件下，该方案都能实现可能达到的最低平均年龄。另一方面，在全分布式方案中，最新鲜的节点以满负荷进行八卦传播，持续时间固定。只有在没有多个节点同时传播所造成的干扰时，才会发生有效的八卦传播，因此有效传播仅占总时间的一部分。我们提出的两种方案都具有 $O(1)$ 年龄性能。与我们之前的工作 ASUMAN 相比，后者同样实现了 $O(1)$ 年龄伸缩；本工作有所改进，因为我们不再要求节点具备年龄感知能力，也不要求节点发送导频信号来预留信道。

参考文献

[1] P. Mitra 和 S. Ulukus。ASUMAN：网络中基于信息年龄感知的多址更新。载于 Allerton 会议，2022 年 9 月。[2] Y. Minsky。《低成本、快速且可靠地传播谣言》。博士论文，康奈尔大学，2002 年 3 月。[3] D. Shah。《谣言传播算法》。Foundations and Trends in Networking, 3(1):1–125，2008 年。[4] S. Sanghavi、B. Hajek 和 L. Massoulie。《多消息谣言传播》。IEEE 信息论汇刊，53(12):4640–4654，2007 年 12 月。[5] R. D. Yates。《网络中的谣言年龄》。载于 IEEE 信息论国际研讨会，2021 年 7 月。[6] S. K. Kaul、M. Gruteser、V. Rai 和 J. Kenney。《最小化车载网络中的信息年龄》。载于 IEEE 信息通信会议，2011 年 3 月。[7] A. Kosta、N. Pappas 和 V. Angelakis。《信息年龄：一种新概念、指标和工具》。载于 Foundations and Trends in Networking，第 12 卷，第 162–259 页，2017 年 11 月。[8] Y. Sun、I. Kadota、R. Talak 和 E. H. Modiano。《信息年龄：衡量信息新鲜度的新指标》。载于《信息年龄》，第 12 卷，第 1–224 页，2019 年 12 月。[9] R. D. Yates、Y. Sun、D. Brown、S. K. Kaul、E. Modiano 和 S. Ulukus。《信息年龄：入门与综述》。IEEE 通信领域精选期刊，39(5):1183–1210，2020 年 5 月。[10] J. Cho 和 H. Garcia-Molina。《网络爬虫的有效页面刷新策略》。ACM 数据库系统汇刊，28(4):390–426，2003 年 12 月。

[11] J. Zhong、R. D. Yates 和 E. Soljanin。《本地缓存刷新的两种新鲜度指标》。载于 IEEE 信息论国际研讨会，2018 年 6 月。[12] A. Maatouk、S. Kriouile、M. Assaad 和 A. Ephremides。《错误信息年龄：一种用于状态更新的新性能指标》。IEEE/ACM 网络汇刊，28(5):2215–2228，2020 年 10 月。[13] M. Bastopcu 和 S. Ulukus。《谷歌学术应该更频繁地更新谁？》。载于 IEEE 信息通信会议，2020 年 7 月。[14] B. Abolhassani、J. Tadrous、A. Eryilmaz 和 E. Yeh。《动态内容的新鲜缓存》。载于 IEEE 信息通信会议，2021 年 5 月。[15] M. Wang、W. Chen 和 A. Ephremides。《实时计数过程重构：队列中的信息新鲜度》。载于 IEEE 国际通信会议，2019 年 7 月。[16] M. Bastopcu 和 S. Ulukus。《缓存更新系统中的信息新鲜度》。IEEE 无线通信汇刊，20(3):1861–1874，2021 年 3 月。[17] M. Bastopcu 和 S. Ulukus。《在缓存存储容量受限的情况下最大化缓存系统的信息新鲜度》。载于阿西洛马会议，2020 年 11 月。[18] P. Kaswan、M. Bastopcu 和 S. Ulukus。《并行中继网络中基于新鲜度的缓存更新》。载于 IEEE 信息论国际研讨会，2021 年 7 月。[19] M. Bastopcu 和 S. Ulukus。《及时追踪种群中个体的感染状态》。载于 IEEE 信息通信会议，2021 年 5 月。[20] R. D. Yates。《及时信息传播》。载于 IEEE 信号处理进展无线通信研讨会，2021 年 9 月。[21] B. Buyukates、M. Bastopcu 和 S. Ulukus。《具有社区结构的网络中的信息传播年龄》。载于 IEEE 信号处理进展无线通信研讨会，2021 年 9 月。[22] B. Buyukates、M. Bastopcu 和 S. Ulukus。《簇化信息传播网络中的信息版本年龄》。IEEE 通信领域精选期刊，3(1):85–97，2022 年 3 月。[23] M. Bastopcu、B. Buyukates 和 S. Ulukus。《采用二元新鲜度指标的信息传播》。载于 IEEE 全球通信大会，2021 年 12 月。[24] P. Kaswan 和 S. Ulukus。《结合文件分片与网络编码的及时信息传播》。载于 IEEE 信息论国际研讨会，2022 年 6 月。[25] P. Kaswan 和 S. Ulukus。《存在干扰攻击时环形网络中的信息传播年龄》。载于阿西洛马会议，2022 年 10 月。[26] P. Kaswan 和 S. Ulukus。《信息传播年龄对时间戳篡改的易感性》。载于 IEEE 信息论研讨会，2022 年 11 月。[27] P. Kaswan 和 S. Ulukus。《基于年龄的信息传播中的可靠与不可靠信息源》。参见 arXiv:2302.03006。[28] P. Kaswan 和 S. Ulukus。《缓存更新网络中采用非泊松更新的信息年龄》。参见 arXiv:2301.13830。[29] J. Hespanha。《随机混杂系统的建模与分析》。IEEE 论文集——控制理论与应用，153(5):520–535，2006 年 1 月。[30] G. Bolch、S. Greiner、H. de Meer 和 K. S. Trivedi。《排队网络与马尔可夫链：建模与性能评估及计算机科学应用》。约翰·威立父子出版公司，2006 年。[31] G. F. Newell。《M/G/∞ 队列》。SIAM 应用数学杂志，14(1):86–88，1966 年 1 月。