

分忙闲站点的限定($K=2$)轮询控制系统分析研究

杨志军 孙洋洋

(云南大学信息学院 昆明 650500)

摘要 为了保障系统公平性并提高轮询控制系统的工作效率,提出了区分忙闲站点的限定($K=2$)轮询控制系统。系统在限定($K=2$)轮询服务的基础上,依托站点忙闲状态,采用并行调度控制方式仅对有数据分组的忙站点提供发送服务。采用概率母函数和嵌入式马尔科夫链的方法建立了系统的数学模型,并精确解析了系统平均排队队长和平均等待时延等重要性能参数。仿真实验结果表明:理论计算值与模拟仿真值近似相等,说明理论分析正确合理。该模型既能保障系统公平性,又能避免对空闲站点查询,同时还能节省转换查询时间,从而提高了系统利用率和工作效率。与已有限定($K=1$)轮询控制方式相比,所提系统具有更好的 QoS 保障。

关键词 $K=2$,分忙闲,工作效率,并行调度,QoS 保障

中图分类号 TN911 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.009

Analysis and Study on Limited($K=2$) Polling Control System with Busy and Idle Sites

YANG Zhi-jun SUN Yang-yang

(School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract From the perspective of ensuring the fairness of the system and improving the efficiency of the polling control system, this paper proposed a limited ($K=2$) polling control system with busy and idle sites. Based on the limited ($K=2$) polling service, the system adopts parallel control mode to send service only to the busy sites with data group. The model can not only guarantee the fairness of the system, but also avoid the query of idle sites, and save the conversion query time, thereby improving the system utilization and work efficiency. This paper established the mathematical model of the system by using the probabilistic mother function and the embedded Markov chain method, and dissected the important performance parameters such as average queue leader and average waiting delay. The theoretical calculation is approximately equal to the simulation value, which indicates that the theoretical analysis is correct and reasonable. Compared with the existing limited ($K=1$) polling control method, the proposed model has better QoS guarantee.

Keywords $K=2$, Busy and idle, Work efficiency, Parallel scheduling, QoS guarantee

轮询控制系统具有无竞争、公平性良好、资源分配合理的特点,在智能交通与现代网络中应用广泛^[1]。文献[2-3]分析了轮询控制系统在无线传感器网络中的应用。文献[4]研究了其在无线网络数据采集系统中的应用。

文献[5]利用有限时间分析求解限定服务系统,并将其应用于集中控制的宽带无线网。单一的门限和完全服务不能在不同的站点中划分优先级以改进系统性能;而限定服务可以根据不同站点区分优先级,从而应用于 G/G/1/K 轮询控制系统的序数优化^[6]。另外,对于门限服务和完全服务,在站点信息分组较多的情况下,服务器在服务当前站点的信息分组时容易造成排队等待服务的站点得不到服务而产生“饥饿”现象,从而降低系统公平性,而限定服务则保障了系统公平性,防止了该现象的发生。文献[7]构建“完全+门限”轮询服务两级模型系统以区分业务优先级,但是这种按照固定路径的查询包括空闲站点在内的所有站点,使得信道利用率受到限

制且增加了系统的复杂性,系统服务灵活性也大大降低。

在 IEEE 802.11 标准中,无线网络 PCF 协议均采用限定 ($K=1$)轮询控制方式,但是该方式并不能区分网络业务的优先级。文献[8]通过对限定 ($K=N$)服务系统 K 取不同值,可以区分业务优先级和不同服务类型, K 值越大,一次发送的信息分组就越大,优先级也越高,从而达到多优先级的控制方式。然而,文献[8]并没有对限定 ($K>1$)服务策略作理论分析。随着现代网络技术的快速发展,限定 ($K=1$)服务策略已不能满足实际需要,迫切需要限定 ($K>1$)轮询控制策略,使得既能区分业务优先级又兼顾系统公平性,同时为限定服务的后续研究奠定理论基础。

轮询控制系统中,服务器对无数据分组的空闲站点的查询会浪费系统资源。文献[9]通过只对有数据分组发送需求的忙站点分配信道来避免空闲查询,且服务器完成对当前站点的发送信息后需要经过一个转换查询时间才能对下一个需

收到日期:2018-04-25 返修日期:2018-06-20 本文受国家自然科学基金项目(61461054,61461053)资助。

杨志军(1968—),男,博士,研究员,主要研究方向为计算机通信网络,E-mail:353738698@qq.com(通信作者);孙洋洋(1993—),男,硕士生,主要研究方向为轮询控制系统与无线网络。

要信息发送的站点提供服务。并行调度控制方式^[10],就是把查询和服务过程进行并行处理,从而避免消耗系统的转换查询时间。

针对上述问题,本文提出了忙闲站点的限定(K=2)轮询系统模型(Free and busy limited K=2,FK2)。系统采用限定(K=2)的服务策略:

- 1)若站点中信息分组的个数少于或等于 1,则服务器服务该站点中的一个信息分组或不服务;
- 2)若站点中信息分组的个数为 2,则服务器服务该站点中的两个信息分组;
- 3)若站点中信息分组的个数多于 2,则服务器依然只服务该站点中的两个信息分组。

系统根据站点是否有数据分组发送需求,将其区分为忙闲状态,每轮查询根据站点缓冲区状态更新轮询调度表,服务器仅对有服务需求的忙站点提供发送服务;且通过采用并行调度的方式节省了转换查询时间,进一步降低了系统时延。多年以来轮询控制系统的分析研究多数采用概率母函数和嵌入式马尔科夫链的方法对系统中的各个性能参数进行分析研究。文献[11-12]也是采用概率母函数和嵌入式马尔科夫链相结合的方法来分析轮询控制系统与轮询排队论模型。本文同样采用概率母函数和嵌入式马尔科夫链^[13-14]的方法,深入分析了模型的平均排队队长与平均等待时延等重要性能参数,并且通过仿真实验验证了系统理论分析的正确性和合理性。

1 系统模型

1.1 模型描述

FK2 系统中有 N 个站点和一个服务器,如图 1 所示。服务器首先对站点的状态进行更新,这样服务器只对有发送需求的忙站点提供发送服务。由于服务器查询的忙站点均有数据分组等待服务,因此在服务时间长于转换查询时间的条件下,服务器可以在对当前站点服务的同时采用捎带技术完成对下一个站点的查询,在完成对当前站点的服务后,立即开始对下一个忙站点的服务。这样,服务器在站点间的切换不再消耗查询转换时间,还清除了空闲查询,从而降低了系统的平均排队队长和平均等待时延。服务过程中采用限定(K=2)服务方式,即每次轮询仅发送 2 个信息分组。

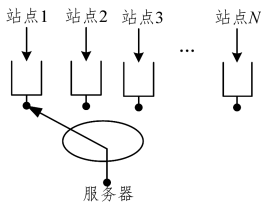


图 1 轮询系统模型

Fig.1 Polling system model

1.2 变量定义

$\xi_i(n)$: 站点 $i(i=1,2,\dots,N)$ 在 t_n 时刻所缓存的信息分组的个数;

$v_i(n)$: 服务器对 i 号站点按限定服务完成信息分组发送所需要的时间;

$\eta_j(v_i)$: 在 $v_i(n)$ 时间内进入 $j(j=1,2,\dots,N)$ 号站点的

信息分组的个数。

1.3 模型假设条件

1)到达各站点的信息分组服从独立同分布的泊松分布,其分布的概率母函数、均值、方差分别是 $A(z), \lambda = A'(1), \sigma_a^2 = A''(1) + \lambda - \lambda^2$;

2)服务器对任意一个信息分组的服务时间服从独立同分布的概率分布,其分布的概率母函数、均值、方差分别是 $B(z), \beta = B'(1), \sigma_b^2 = B''(1) + \beta - \beta^2$;

3)每个站点内的存储器有足够大的缓存容量,不会丢失数据信息;

4)对于进入到存储器内的信息分组,将按照先到先服务(FCFS)的策略进行发送。

1.4 概率母函数

假定在 t_n 时刻 $i(i=1,2,\dots,N)$ 号忙站点接受服务器的发送服务,当 i 号忙站点按限定(K=2)服务的规则对存储器内缓存的信息分组完成服务后,服务器转去服务 $i+1$ 号忙站点, $i+1$ 号站点在 t_{n+1} 时刻接受服务器的服务。定义随机变量 $\xi_i(n)$ 为 $i(i=1,2,\dots,N)$ 号忙站点在 t_n 时刻存储器内缓存的等待服务的信息分组的个数,则在 t_n 时刻系统状态可表示为 $[\xi_1(n), \xi_2(n), \dots, \xi_N(n)]$ 。轮询系统的站点数量相对确定,服务开始时刻系统状态是可数的,离散时间可数状态变量可构成嵌入式马尔科夫链,在系统稳定的条件下,该马尔科夫过程是齐次、不可约、非周期的,并且有唯一的稳态分布。稳态状态下的概率分布为 $p[\xi_i(n) = x_i; i=1,2,3,\dots,N]$ 。在 t_{n+1} 时刻,系统的状态可表示为: $\{\xi_1(n+1), \xi_2(n+1), \xi_3(n+1), \dots, \xi_N(n+1)\}$ 。

轮询控制系统的状态变化可以用马尔科夫链来描述,在系统稳定的条件下,该马尔科夫过程是齐次、不可约、非周期的,并且有唯一的稳态分布。在 $N\lambda\beta < 1$ 的系统稳定^[15]条件下,其概率分布的母函数被定义为:

$$G_i(Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_N) = \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_i=0}^{\infty} \dots \sum_{x_N=0}^{\infty} \pi_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) Z_1^{x_1} Z_2^{x_2} \dots Z_i^{x_i} \dots Z_N^{x_N}, i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

当服务器在 t_{n+1} 时刻开始对 $i+1$ 号忙站点服务时,有关系式:

$$\begin{cases} \xi_j(n+1) = \xi_j(n) + \eta_j(v_i), & j \neq i \\ \xi_i(n+1) = \eta_i(v_i) \end{cases} \quad (2)$$

则系统在 t_{n+1} 时刻的状态变量的母函数为:

$$\begin{aligned} G_{i+1}(z_1, z_2, \dots, z_N) &= \lim_{t \rightarrow \infty} E\left[\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j^{(n+1)}}\right] \\ &= B_i^2\left(\prod_{j=1}^N A_j(z_j)\right) \frac{1}{z_i^2} [G_i(z_1, z_2, \dots, z_N) - z_i G_i'(z_1, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N) - G_i(z_1, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N)] \\ &\quad + G_i(z_1, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N) + B_i\left[\prod_{j=1}^N A_j(z_j)\right] \\ &\quad G_i'(z_1, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N) - G_i(0, 0, \dots, 0) + \sum_{j=1}^N A_j(z_j) G_i(0, 0, \dots, 0) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $i=1,2,\dots,N, G_i(0,0,\dots,0)$ 为 t_n 时刻全部 N 个站点存储器内存储的信息分组数均为 0 时的系统状态变量概率分布母函数。

1.5 平均排队队长

定义 1 在 t_n 时刻,第 i 号站点开始接受发送服务时,第 j 号站点存储器内缓存的等待传输的信息分组数为 $g_i(j)$,由式(4)计算可得:

$$g_i(j) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_N \rightarrow \infty} \frac{\partial G_i(z_1, z_2, \dots, z_N)}{\partial z_j} \quad (4)$$

$$i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N$$

定义 2 当 $z_i=0$ 时,数据信息数 $g_{i0}(j)$ 为:

$$g_{i0}(j) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, z_{i+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial G_i(z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N)}{\partial z_j} \quad (5)$$

$$i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N$$

定义 3 随机变量 (x_j, x_k) 的联合矩 $g_i(j, k)$ 为:

$$g_i(j, k) = \lim_{x_1, x_2, \dots, x_{N+1}} \frac{\partial^2 G_i(z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_k, \dots, z_N)}{\partial z_j \partial z_k} \quad (6)$$

$$i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, N$$

对式(3)求二阶偏导可得:

$$g_{i+1}(j, k) = \theta\lambda [B''(1)\lambda^2 + \lambda^2\beta] + c\lambda^2 + \lambda\beta [2g_i(k) - g'_{i0}(k) - 2g_{i0}(k)] + g_i(j, k) + \lambda\beta [2g_i(j) - g'_{i0}(j) - 2g_{i0}(j)], i \neq j \neq k \quad (7)$$

$$g_{i+1}(j, i) = \theta\lambda [B''(1)\lambda^2 + \lambda^2\beta - 2\lambda\beta] + (\lambda\beta - 1)[2g_i(j) - g'_{i0}(j) - 2g_{i0}(j)] + 2\lambda\beta g_i(i) + c\lambda^2 + g_i(j, i), i \neq j \quad (8)$$

$$g_{i+1}(j, j) = \theta\lambda [B''(1)\lambda^2 + A''(1)\beta] + g_i(j, j) + \lambda\beta [4g_i(j) - 2g'_{i0}(j) - 4g_{i0}(j)] + A''(1)C, i \neq j \quad (9)$$

$$g_{i+1}(i, i) = \theta\lambda [B''(1)\lambda^2 + A''(1)\beta + 4 - 4\lambda\beta] + (4\lambda\beta - 4)g_i(i) + A''(1)C + g_i(i, i) \quad (10)$$

其中, λ 为到达率, β 为服务时间, $C = G_i(0, 0, \dots, 0)$, $\theta = \frac{NC}{1 - N\lambda\beta}$

根据式(7)和式(8)计算 $\sum_{i=1}^N g_{i+1}(j, k)$, 得到:

$$\theta\lambda [NB''(1)\lambda^2 - 4\lambda\beta + \lambda] - [2g_j(k) - g'_{j0}(k) - 2g_{j0}(k)] - [2g_k(j) - g'_{k0}(j) - 2g_{k0}(j)] + 2\lambda\beta [\sum_{i=1}^N g_i(j) + \sum_{i=1}^N g_i(k)] - \lambda\beta [\sum_{i=1}^N g'_{i0}(j) + \sum_{i=1}^N g'_{i0}(k)] - 2\lambda\beta [\sum_{i=1}^N g_{i0}(j) + \sum_{i=1}^N g_{i0}(k)] = 0 \quad (11)$$

根据式(9)和式(10)计算 $\sum_{i=1}^N g_{i+1}(j, j)$, 得到:

$$\theta\lambda [NB''(1)\lambda^2 + 4 - 4\lambda\beta] + 4\lambda\beta \sum_{i=1}^N g_i(j) - 2\lambda\beta \sum_{i=1}^N g'_{i0}(j) - 4\lambda\beta \sum_{i=1}^N g_{i0}(j) + \theta A''(1) - 4g_j(j) = 0 \quad (12)$$

对式(11)计算 $\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N$, 对式(12)计算 $\sum_{j=1}^N$, 两式化简后得到

平均排队队长为:

$$g_i(i) = \frac{\theta\lambda^2}{4(1 - N\lambda\beta)} [N\lambda B''(1) + N\lambda\beta - 4N\beta - \lambda\beta + \frac{4 + \beta A''(1) - N\beta A''(1)}{\lambda} + \frac{A''(1)}{\lambda^2}], i=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

1.6 平均等待时延

定义信息分组平均时延为信息分组进入站点存储器到其开始被发送出去的这段时间:

$$E[\tau_{w_i}] = \frac{g_i(i)}{\theta\lambda^2} - \frac{1}{\lambda} - \frac{A''(1)}{(2\lambda)^2} = \frac{1}{4(1 - N\lambda\beta)} [N\lambda B''(1) + N\lambda\beta - \lambda\beta + \frac{\beta A''(1) - N\beta A''(1)}{\lambda} + \frac{N\lambda B''(1)}{\lambda^2}] \quad (14)$$

1.7 平均查询周期

系统平均查询周期是指两次查询同一站点的平均时间间隔,由服务时间和查询转换时间组成,由系统一阶求导得出:

$$\theta = \frac{NC}{1 - N\lambda\beta} \quad (15)$$

1.8 系统吞吐量

系统吞吐量是指单位时间内系统所能传输的信息分组的个数:

$$T = N\lambda\beta \quad (16)$$

2 实验分析

2.1 实验仿真

根据以上所建立的 FK2 系统模型,在系统稳定条件下进行数值计算和仿真实验,且 FK2 系统理论值由式(13)一式(16)计算得出。

实验仿真在 MATLAB 2014a 平台完成。通过函数生成以 λ_i 为均值的泊松分布序列,模拟站点中到达的信息分组数量。仿真模拟的通信过程处于理想状态,即所有信息分组全部发送成功,丢包率和重传率为零。归一化后,时间轴按时间隙划分。

1)采用并行调度方式,无转换查询时间;

2)每个站点在任一单位时隙内进入其存储器内的信息分组数服从泊松分布;

3)对称控制系统即到达各站点的信息分组服从相同的概率分布;

4)系统稳定条件为: $N\lambda\beta < 1$;

5)图 2—图 5 是一个服务器,20 个站点,服务时间 β 为 2,到达率 λ 取值 $[0.001:0.001:0.01]$ 为条件;

6)图 6 是一个服务器,取 10 与 20 个站点,服务时间 β 取 2,到达率 λ 取值 $[0.001:0.001:0.01]$ 为条件;

7)实验数据的统计与计算都是在实验循环 10 万次以上获得;

8)图 7 是一个服务器,20 个站点,服务时间 β 取 2 与 3 作为对比,到达率 λ 取值 $[0.001:0.001:0.01]$ 为条件;

9)图 8—图 9 是一个服务器,20 个站点,服务时间 β 为 2,到达率 λ 取值 $[0.001:0.001:0.01]$ 为条件。

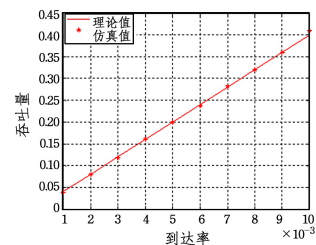


图 2 吞吐量变化 ($N=20, \beta=2$)

Fig. 2 Variation of throughput ($N=20, \beta=2$)

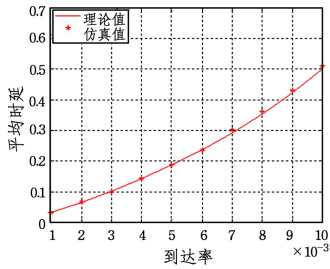


图 3 平均等待时延的变化 ($N=20, \beta=2$)

Fig. 3 Variation of average dealy ($N=20, \beta=2$)

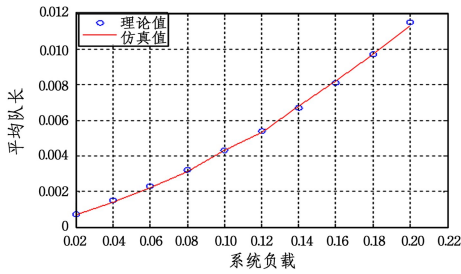


图 4 平均排队队长的变化 ($N=20, \beta=2$)

Fig. 4 Variation of average queue length ($N=20, \beta=2$)

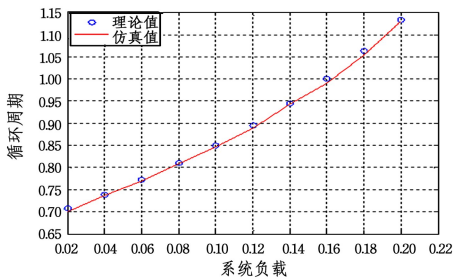


图 5 查询周期的变化 ($N=20, \beta=2$)

Fig. 5 Variation of query cycle ($N=20, \beta=2$)

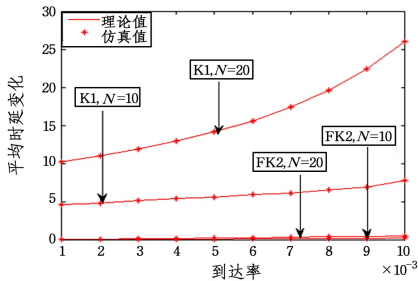


图 6 FK2 与限定 ($K=1$) 时延的比较 ($\beta=2$)

Fig. 6 Comparison of FK2 and limited ($K=1$) delay ($\beta=2$)

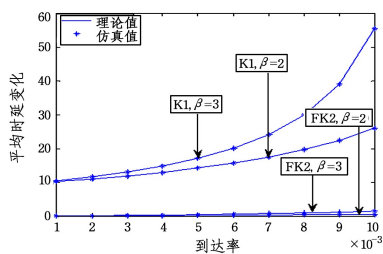


图 7 FK2 与限定 ($K=1$) 时延的比较 ($N=20$)

Fig. 7 Compared of FK2 and limited ($K=1$) delay ($N=20$)

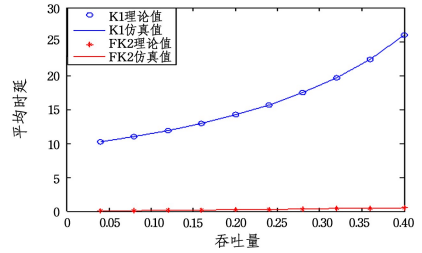


图 8 平均等待时延的比较 ($N=20, \beta=2$)

Fig. 8 Comparison of average waiting delay ($N=20, \beta=2$)

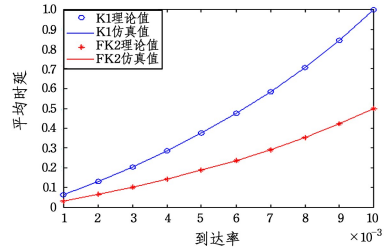


图 9 平均等待时延的比较 ($N=20, \beta=2$)

Fig. 9 Comparison of average waiting delay ($N=20, \beta=2$)

2.2 结果分析

从图 2—图 5 可以看出,本文采用的概率母函数与嵌入式马尔科夫链的理论分析方法能较为合理地描述 FK2 轮询控制系统,理论计算值和计算机仿真值的近似程度较好。

图 3 描述了平均等待时延与站点信息分组到达率的关系。可以看出,平均等待时延随到达率的增加呈线性增加趋势,这是因为信息分组的到达过程随着到达率的增加而增加,从而增大了整个系统的平均等待时延。图 2 描述了吞吐量与站点信息分组到达率的关系,从中也可以看出系统吞吐量随站点信息分组到达率的加大呈线性增大趋势。另一方面,图 3 中显示到达率的增大同时也会造成平均等待时延的增加。因此,在考虑如何提高系统吞吐量时,还应该以系统平均等待时延作为约束条件。

FK2 控制系统的核心为采用限定 ($K=2$) 的服务策略,再通过区分站点忙闲状态并且采用并行调度转换控制方式来提高系统效率。与普通限定 ($K=1$) 相比,其具备以下优势。

由图 6—图 7 可以看出,相比于普通限定 ($K=1$) 系统,FK2 系统在平均等待时延方面得到极大改善。图 6 表明,随着系统到达率的增大,普通限定 ($K=1$) 的平均等待时延急剧增加,而 FK2 系统的平均等待时延则变化缓慢并趋于稳定;且当站点个数 N 由 10 增加到 20 时,普通限定 ($K=1$) 的平均等待时延增加迅速,而 FK2 系统则增加缓慢。图 7 描述了当服务时间 β 由 2 增加到 3 时,普通限定 ($K=1$) 的平均等待时延同样增加迅速,变化较大,而 FK2 系统的平均时延变化缓慢,极不明显。这是因为,FK2 系统每次查询忙站点能够发送 2 个信息分组,相比于限定 ($K=1$) 增加了信息分组的发送个数,并且不再查询空闲站点,也减少了站点之间的转换查询时间,使得系统的服务效率得以提升。

由图 8 可以看出,限定 ($K=1$) 系统在吞吐量增加时,系统的平均等待时延迅速增加,而 FK2 系统在相同条件下的平均等待时延增加得较为缓慢。因此,在相同的平均等待时延

条件下,FK2系统拥有更大的吞吐量,从而提高了系统的工作效率和资源利用率。

根据限定服务轮询系统模型,推导得出分忙闲并行调度限定($K=1$)轮询系统(Free and busy parallel limited $K=1$, FK1)。在此选取平均等待时延作为比较指标,实验结果如图9所示,随着信息分组到达率的增加,FK1系统与FK2系统能被很好地区分,且FK2系统的平均等待时延明显小于FK1系统,正如文中所述,限定($K=2$)服务策略每次能发送2个信息分组,相比于限定($K=1$)策略增加了每次能发送的信息分组个数,因此FK2系统在兼顾系统公平性的同时还降低了平均等待时延。

轮询控制系统具有无竞争及服务质量(Quality of Service, QoS)保障等优点。QoS的关键技术指标包含吞吐量、时延和时延变化等。如图2、图3、图6—图9所示:FK2系统可以实现更高的吞吐量,极大地降低系统时延且时延变化缓慢,具有良好的QoS保障。

结束语 本文提出的FK2系统采用限定($K=2$)服务策略:每次发送2个信息分组,再根据站点的忙闲状态仅对有服务需求的忙站点进行服务,采用并行调度的控制方式又进一步降低了系统的查询耗能,从而提高了系统的工作效率。采用概率母函数和嵌入式马尔科夫链的方法建立了系统模型,精确解析了系统的平均排队队长、平均等待时延、平均查询周期和系统吞吐量等特性参数。

轮询方式可以提供无冲突的信息接入且为时延敏感类业务提供时延保障,一直是无线传感器网络MAC层的一种重要的调度控制方式,而传统的超密集无线传感器网络被推荐作为蜂窝网络的补充,基于MIMO通信技术提出了5G超密度蜂窝网络。相信FK2轮询控制系统在5G的优化与改进中必将发挥突出作用^[16]。

参考文献

- [1] ZHAO J J, GU Z Q, XUE L. A Joint Design Method of Hierarchical Topology Control and Network Resource Allocation in WSN[J]. Journal of Automation, 2015, 41(3): 646-660. (in Chinese)
赵继军, 谷志群, 薛亮. WSN中层次型拓扑控制与网络资源配置联合设计方法[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 646-660.
- [2] GUAN Z, ZOU D, DING H W. Parallel scheduling two-stage polling control sensor network MAC protocol analysis [J]. Journal of Intelligent Systems, 2014, 9(4): 438-443. (in Chinese)
官铮, 邹丹, 丁洪伟. 并行调度两级轮询控制传感器网络MAC协议分析[J]. 智能系统学报, 2014, 9(4): 438-443.
- [3] JIANG Q Y, ZHANG Y Y. Server push method based on fuzzy comprehensive decision [J]. Computer Science, 2014, 41(5): 86-90. (in Chinese)
蒋乾悦, 张亚英. 基于模糊综合决策的服务器推送方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(5): 86-90.
- [4] YU Y Y, HUANG Q, WANG L. FPGA-based dynamic priority polling strategy in Ad Hoc network data acquisition system research and application [J]. Journal of Yunnan University, 2014, 36(1): 16-20. (in Chinese)
于艳艳, 黄倩, 王磊. 基于FPGA的动态优先轮询策略在Ad Hoc网络数据采集系统中的研究与应用[J]. 云南大学学报, 2014, 36(1): 16-20.
- [5] HORNG S C, YANG F Y. Optimization of broadband wireless networks with centralized control using memetic algorithm[C]// International Conference on Information Networking. Maui, USA: IEEE, 2014: 572-577.
- [6] HORNG S C, LIN S Y. Ordinal optimization of G/G/1/K polling systems with k-limited service discipline[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2009, 140(2): 213-231.
- [7] YANG Z J, DING H W, CHEN C L. Full-service and threshold-service two-stage polling system $E(x)$ characteristics analysis [J]. Journal of Electronics, 2014, 42(4): 774-778. (in Chinese)
杨志军, 丁洪伟, 陈传龙. 完全服务和门限服务两级轮询系统 $E(x)$ 特性分析[J]. 电子学报, 2014, 42(4): 774-778.
- [8] WINANDS E M M, ADAN I J B F, VAN HOUTUM G J. A state-dependen polling model with k-limited service[J]. Probability in the Engineering and Information Science, 2009, 23(2): 385-408.
- [9] ZHAO W B, TANG X Y. Scheduling sensor data Collection with daynastic trsfic patterns[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(4): 789-802.
- [10] GUAN Z, ZHAO D F, ZHAO T Y. A discrete time two Level mixed service parallel polling model[J]. Journal of Electronics 2012, 29(2): 10-11.
- [11] HE M, GUAN Z, BAO L Y. Wireless sensor network polling access control average query cycle analysis [J]. Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2637-2644. (in Chinese)
何敏, 官铮, 保利勇. 无线传感器网轮询接入控制平均查询周期分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2637-2644.
- [12] ZHANG S N, QIU K N, ZHANG W G. UM-BUS bus performance modeling and evaluation based on queuing theory [J]. Computer Science, 2017, 44(S1): 504-509. (in Chinese)
张少楠, 邱柯妮, 张伟功. 基于排队论的UM-BUS总线性能建模与评估[J]. 计算机科学, 2017, 44(S1): 504-509.
- [13] YU M, HU Z Y. Higher Order Markov Random Field and Its Application in Scene Understanding [J]. Journal of Automation, 2015, 41(7): 1213-1234. (in Chinese)
余淼, 胡占义. 高阶马尔科夫随机场及其在场景理解中的应用[J]. 自动化学报, 2015, 41(7): 1213-1234.
- [14] LI Q K, LI M, JIA X C. Closed-loop supply chain system switching control with Markov jump parameters[J]. Journal of Automation, 2015, 41(12): 2081-2091. (in Chinese)
李庆奎, 李梅, 贾新春. 具有Markov跳变参数的闭环供应链系统切换控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(12): 2081-2091.
- [15] KIM J, KIM B. Stability of a cyclic polling system with an adaptive mechanism[J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2015, 11(3): 763-777.
- [16] GE X, TU S, MAO G, et al. 5G Ultra Dense Cellular Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 72-79.