

Оценивание оперативности туманных вычислений в геоинформационных системах

А.Д. Хомоненко^{1,2}, А.Б. Кириенко², С.В. Пугачев¹

¹*Петербургский государственный университет путей сообщения императора
Александра I, Санкт-Петербург*

²*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург*

Аннотация: Предложено использовать туманные расчеты для обеспечения снижения нагрузки на устройства передачи данных и вычислительной системы в ГИС. Для повышения точности оценки оперативности туманных вычислений используется не Марковская модель многоканальной системы с очередями, «прогреванием» и «охлаждением». Предложен метод расчета вероятностно-временных характеристик не Марковской системы с очередями и с распределениями Кокса длительности «прогрева» и «охлаждения». Создана программа вычисления характеристик оперативности туманных расчетов. Решение может быть использовано в качестве программного средства прогнозной оценки характеристик оперативности доступа к геоинформационным системам с учетом особенностей технологии туманных вычислений и затрат на обеспечение информационной безопасности.

Ключевые слова: туманные вычисления, модель многоканальной системы обслуживания с очередями, «прогревание», «остужение», геоинформационные системы, распределение Кокса.

Поскольку в военном деле решаются специфические вопросы планирования и ведения боевых действий, выбора и использования средств вооружённой борьбы и т.п., то для решения таких задач разрабатываются специальные функционально-ориентированные геоинформационные системы (ГИС). Практически все решения по управлению войсками и оружием требуют геопространственной привязки.

ГИС, функционирующая в едином информационном пространстве, работает с применением различных форматов данных, в различных инструментальных системах. При этом, вне зависимости от внутреннего архитектурного устройства ГИС используемого программного обеспечения, пользователи могут одновременно просматривать, обрабатывать и анализировать всю имеющуюся пространственную информацию.

ГИС представляет собой совокупность вычислительных узлов, некоторые из которых могут находиться на значительном удалении друг от друга, функционирующая как единая связанная система.

Вычислительные узлы соединены друг с другом каналами связи и взаимодействуют путем обмена информацией. В ГИС содержится большое число узлов, представляющих как серверы, так и рабочие станции.

ГИС выполняет следующие функции:

- хранение и управление пространственными информационными ресурсами;
- совместное использование пространственных информационных ресурсов;
- сбор, хранение и обработка специализированной пространственной информации;
- информационное обеспечение формирования и принятия управленческих решений;
- поиск и предоставление потребителям информации в виде, удобном для анализа и использования;
- тематический анализ данных по направлениям деятельности;
- моделирование и прогнозирование процессов и явлений;
- обеспечение целостности, непротиворечивости, защищенности и безопасности пространственных информационных ресурсов.

Безопасность в ГИС обеспечивается применяемой системой защиты информации, которая должна обеспечивать комплексное решение задач от несанкционированного доступа, входящие в состав ГИС средства защиты не должны препятствовать нормальному функционированию ГИС, программно-технические средства, используемые для построения системы защиты информации, должны быть совместимы между собой (корректно работать совместно) и не должны снижать уровень защищенности информации [1].

Такие средства при своем функционировании непременно тратят вычислительный ресурс самой ГИС, что отрицательно влияет на оперативность обработки информации в ГИС, что также требуется учитывать.

Для решения указанных задач предлагается использовать модель туманных расчетов, которая рассматривается как самостоятельная концепция [2, 3], либо как развитие облачных вычислений [4]. Облачные вычисления обладают множеством известных достоинств и недостатков.

Достоинства облачных вычислений:

- гибкость ресурсов. Облачные сервисы предлагают эластичное масштабирование, что означает, что предприятия могут увеличивать или уменьшать ресурсы в зависимости от своих текущих потребностей;
- сокращение капитальных затрат. Нет необходимости инвестировать в собственное оборудование и дата-центры, что снижает капитальные затраты;
- доступность. Пользователи могут получить доступ к своим данным и приложениям из любого места, где есть интернет;
- резервное копирование и восстановление. Данные регулярно резервируются, и в случае сбоев сервисы облачного хранения часто предлагают средства для восстановления данных;
- обновления. Поставщики облачных сервисов обновляют свои системы, что значительно снижает груз обслуживания со стороны клиента;
- масштаб экономии. Облачные сервисы часто более доступны, поскольку издержки на обслуживание и ресурсы распределяются среди большого числа пользователей.

Недостатки облачных вычислений:

- зависимость от интернета. Доступ к облачным сервисам полностью зависит от наличия интернета;
-

- ограничения по контролю. Поскольку инфраструктура управляется поставщиком услуг, компании имеют ограниченный контроль над своими данными и ресурсами;
- безопасность и конфиденциальность. Хранение данных у третьих сторон влечет за собой проблемы безопасности и возможное нежелательное раскрытие информации;
- затраты на оплату по мере использования. Хотя облачные вычисления могут помочь сократить затраты, ошибки в управлении ресурсами могут привести к неожиданным расходам;
- проблемы с производительностью. В некоторых случаях облачные сервисы могут работать хуже, чем локальные решения, особенно если требуется большая пропускная способность или малый временной промежуток задержки (латентность);
- зависимость от поставщика. Переход на другого облачного поставщика может оказаться затруднительным, что создает риск «западения» в услуги конкретного поставщика.

Идеология организации туманных расчетов [5] позволяет снизить нагрузку на среду передачи данных и средства вычислительной системы. Модель туманных расчетов активно исследуется. Например, в [6] рассматривалась задача моделирования распределения нагрузки в системе на основе туманных вычислений.

В [7, 8] авторы использовали теорию очередей в одном случае для достижения баланса нагрузки в системе облачных вычислений и в другом случае – для расчета влияния мониторинга на систему облачных вычислений, в обоих случаях они рассчитали время предварительной и постобработки запросов и показали их влияние на общее время обработки. В статье [9] упомянуты проблемы безопасности и конфиденциальности и рекомендованы меры безопасности, с которыми приходится сталкиваться при развертывании

Интернета вещей. В [10] предложена архитектура промежуточного программного обеспечения для решения проблем безопасности, его промежуточное ПО безопасности действует как интеллектуальный шлюз, поскольку оно предназначено для предварительной обработки данных на границе сети. В зависимости от полученной информации данные могут либо обрабатываться и храниться локально в «тумане», либо посылаться в облако для дальнейшей обработки.

В ГИС информация циркулирует по четырем уровням, показанным на рис. 1.

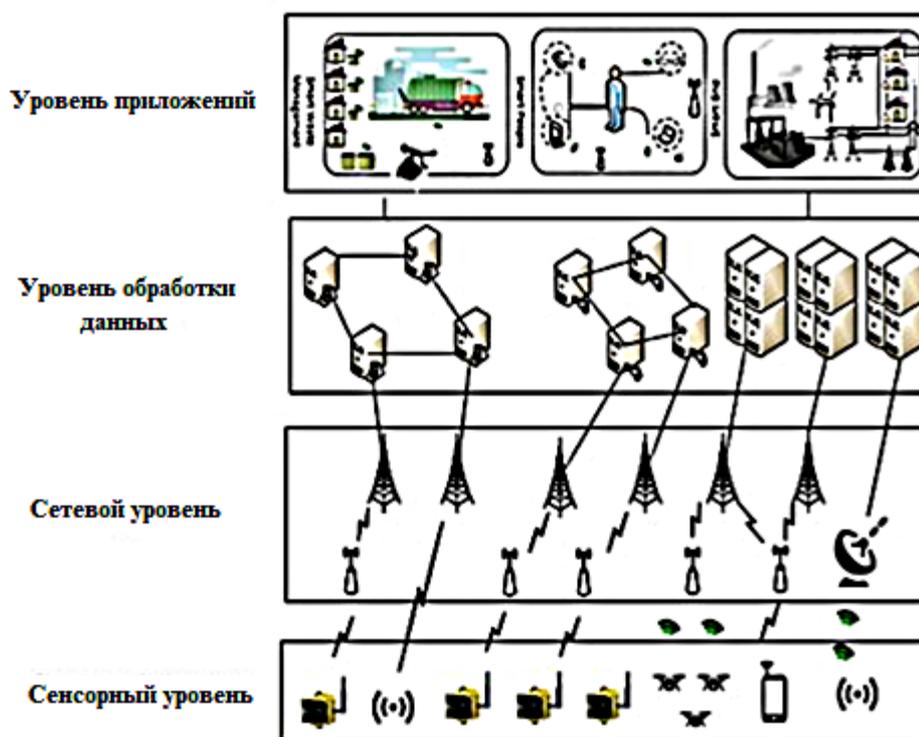


Рис. 1. – Уровни обмена информацией в ГИС

Нижний уровень, сенсорный, включает в себя датчики и сенсоры, которые в режиме реального времени собирают и обрабатывают геоинформационные данные, такие как картографические данные, спутниковые изображения, данные GPS-трекеров, погодные данные и другие. Далее эти данные отправляются на сетевой уровень.

Сетевой уровень представляет собой совокупность сетевых устройств, передатчиков, с помощью которых данные идут на наиболее важный уровень обработки данных.

На этом уровне размещены системы управления базами данных и хранилища данных, где данные анализируются, обрабатываются и разделяются для того, чтобы они могли быть пригодны для использования конечным пользователем.

Взаимодействие пользователей с программным интерфейсом ГИС осуществляется на уровне приложений, состоящих из облаков.

Для оценки характеристик оперативности туманных расчетов предлагается использовать модели многоканальных систем массового обслуживания (СМО), находящих применение при исследовании оперативности функционирования информационных систем.

Применим не Марковскую модель системы обслуживания с очередями «прогреванием» и «остужением», чтобы учесть особенности организации туманных расчетов и рассчитать характеристики времени ожидания выполнения запроса [11, 12]. Важной отличительной особенностью использования такой модели является то, что повышается точность задания исходных данных.

В распределенной ГИС распространено использование и подключение различных типов устройств и средств сбора информации друг к другу от разных поставщиков. В этой системе используются различные виды сенсоров всех типов, форм и размеров с разной или похожей функциональностью и в разных местах, все они имеют ограниченные возможности передачи. Поэтому все они подключены к локальным приемникам и передатчикам с гораздо более высокими возможностями передачи (расстояние передачи измеряется в километрах). Через эти дальние передатчики сенсоры отправляют пакеты данных на локальные серверы, этот процесс

мультипередачи имеет интенсивность λ поступления заявок с интенсивностью обработки («прогрева») на каждой станции μ^w .

Локальные серверы собирают переданные пакеты в очереди и обрабатывают их с интенсивностью μ (за среднее время $1/\mu$). Для некоторой обработки может также потребоваться дополнительная информация или данные, которые необходимо собрать или обработать на основных серверах или из основных баз данных, этот процесс («остужение») происходит с интенсивностью μ^c (рис. 2).

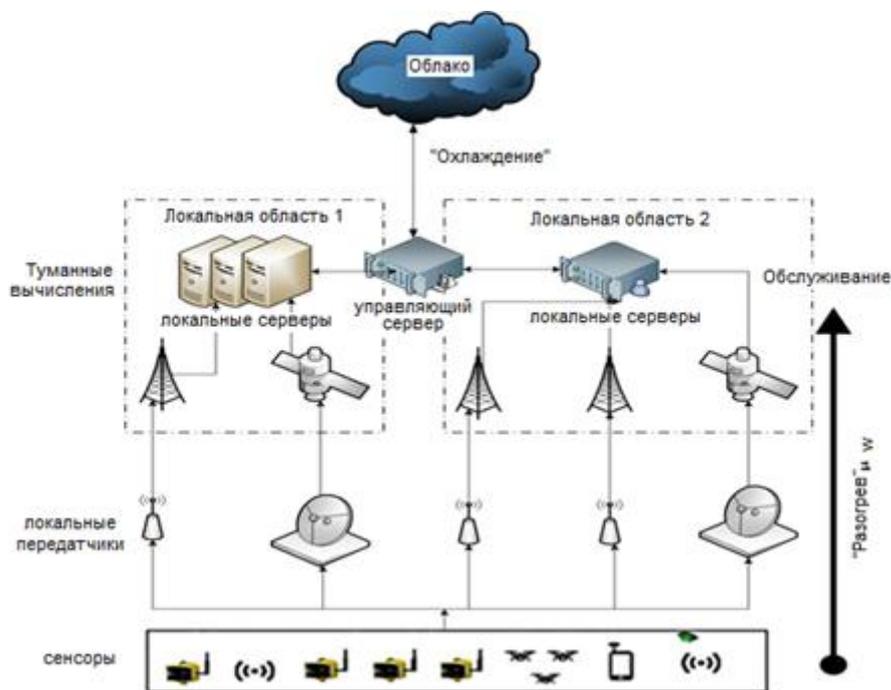


Рис. 2. – Схема туманных вычислений с использованием сенсоров (средств сбора пространственной информации)

Модель многоканальной СМО «прогреванием» и «остужением»

Считаем, что заданы:

процесс обработки данных на вычислительных узлах в виде не Марковской многоканальной СМО типа $M/M/C_2/C_2/n$;

μ^w – интенсивность обработки («прогрева»);

μ^c – интенсивность обработки («остужения»);

λ – интенсивность поступления пакетов данных (заявок) на обработку;

n – количество обслуживающих устройств (каналов обслуживания).

Допущения: входной поток заявок в систему постоянный. Заявки обрабатываются в порядке их поступления в систему.

Существует необходимость сведения случайного процесса к Марковскому путем представления распределения фазового типа и выравниваем первых двух начальных моментов, поэтому распределение длительности случайной величины (времени обслуживания или интервала между смежными заявками) зададим аппроксимирующим распределением Кокса r -го порядка [13] (рис. 3).

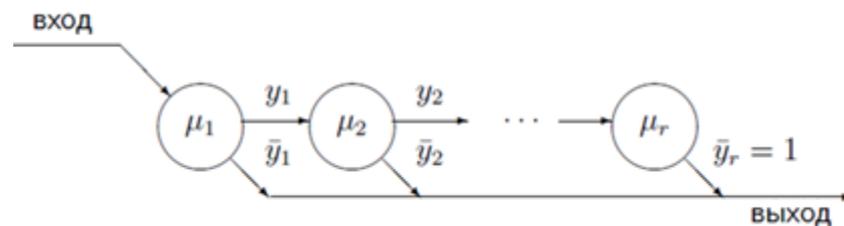


Рис. 3. – Схема распределения Кокса C_r

Такой подход получил широкое применение при исследовании не Марковских многоканальных систем массового обслуживания (см., например, [14]).

Состояние системы представляется вектором (n, j) , в котором n суть число серверов обработки, j – число передающихся с каждого датчика пакетов данных. Исследуемая система описывается с помощью двумерной цепи Маркова.

Перед началом обслуживания первая заявка попадает с интенсивностью λ в фазу 1 «прогрева». Окончание фазы 1 с интенсивностью $\mu_1^w u_1$ «прогрева» либо интенсивностью $\mu_1^c u_1$

«охлаждения» переводит заявку в фазу 2 процесса, а с интенсивностью $\mu_1^w \bar{y}_1$ «прогрева» либо с интенсивностью $\mu_1^c \bar{y}_1$ «охлаждения» – завершает процесс. Последнее имеет место после фазы 2 (интенсивности μ_2^w и μ_2^c).

Схема переходов между состояниями Марковского процесса, описывающая систему $M/M/C_2/C_2/n$, представлена на рис. 4.

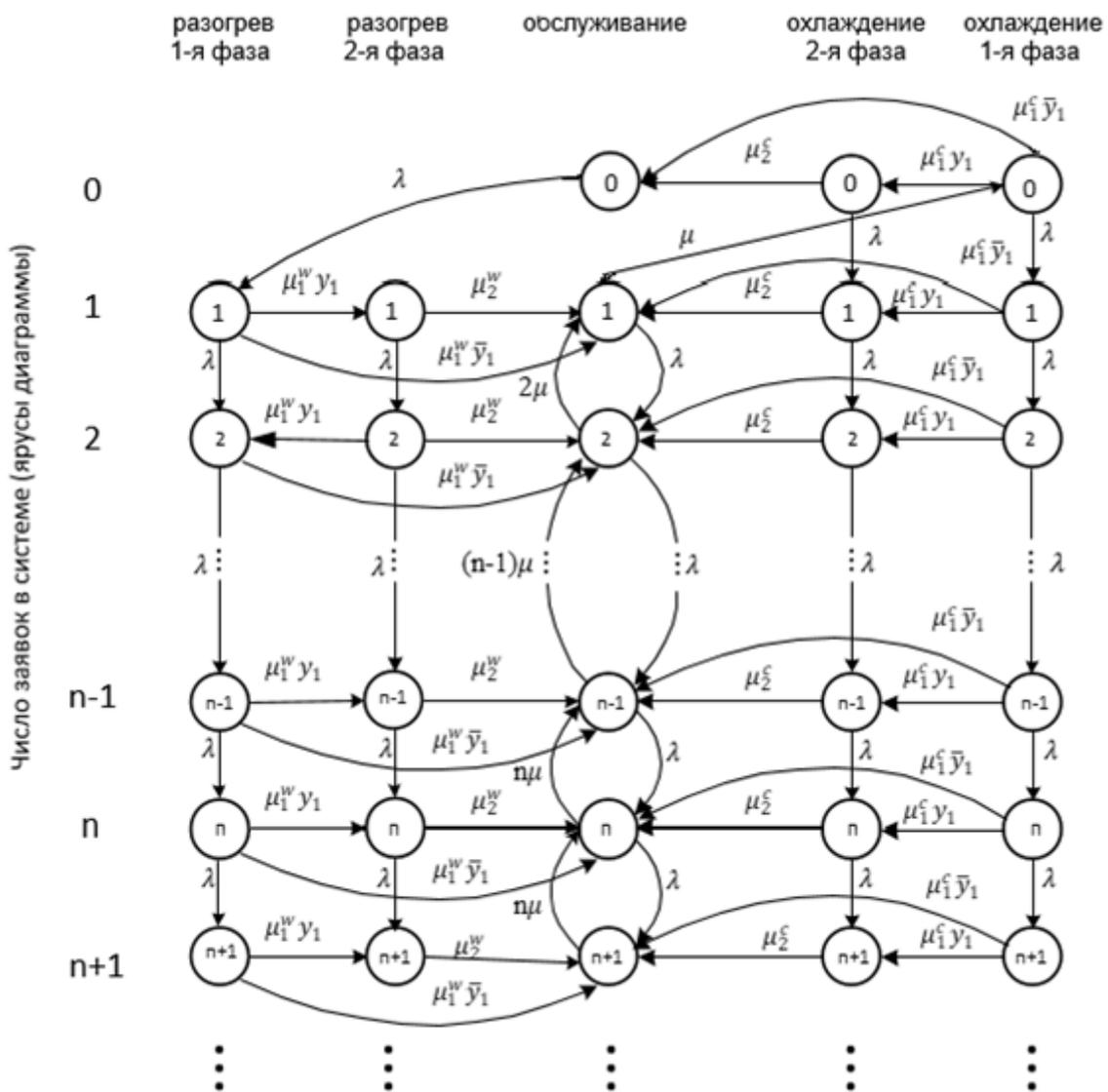


Рис. 4. – Схема переходов в многоканальной системе обслуживания с очередью типа $M/M/C_2/C_2/n$

На схеме переходов:

$j = 0$ – система свободна;

$j = 1$ – в системе 1 заявка;

$j = 2$ – в системе 2 заявки;

$j = n$ – в системе n заявок, в очереди 0 заявок;

$j = n+1$ – в очереди 1 заявка; $j = n+m$ – в очереди m заявок.

Обозначим через S_j множество всех возможных микросостояний системы, при которых на обслуживании находится ровно j заявок, а через σ_j – количество элементов в S_j . В соответствии со схемой, построим матрицы интенсивностей инфинитезимальных переходов:

$A_j [\sigma_j \times \sigma_{j+1}]$ – в S_{j+1} (по прибытию заявок),

$B_j [\sigma_j \times \sigma_{j-1}]$ – в S_{j-1} (по завершению обслуживания),

$C_j [\sigma_j \times \sigma_j]$ – в S_j (по завершению «остужения», «разогрева»),

$D_j [\sigma_j \times \sigma_j]$ – ухода из микросостояний j -го яруса.

Значение элемента (i, k) в любой из матриц задает интенсивность перехода из i -го состояния j -го яруса в k -е состояние смежного яруса. Для системы обслуживания с очередью типа $M/M/C_2/C_2/n$ матрицы A_j и B_j приведены на рис. 5.

$$A_0 = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}, \quad A_j = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad j=1, \dots, n.$$
$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dots, B_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n\mu & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Рис. 5. – Матрицы A_j и B_j .

Введем векторы-строки $\gamma_j = [\gamma_{j,1}, \gamma_{j,2}, \gamma_{j,3}, \gamma_{j,4}]$ нахождения СМО в микросостояниях j -го яруса. Запишем уравнения баланса переходов между состояниями системы:

$$\begin{aligned}\gamma_0 D_0 &= \gamma_1 B_1 + \gamma_0 C_0, \\ \gamma_j D_j &= \gamma_{j-1} A_{j-1} + \gamma_j C_j + \gamma_{j+1} B_{j+1}, \quad j = \overline{1, R},\end{aligned}$$

где R – число ярусов.

Временные характеристики рассчитываются с помощью метода, разработанного в статье [14]. Время ожидания поступившей в систему заявки определяется микросостоянием СМО сразу после ее прибытия. Для каждого яруса схемы переходов зададим вектор-строку $\pi_j = [\pi_{j,1}, \pi_{j,2}, \pi_{j,3}, \pi_{j,4}]$, финального распределения вероятностей микросостояний СМО сразу после поступления следующей заявки.

В векторе π_j компоненты суть относительные числа поступлений заявок, с появлением которых система перешла в очередное микросостояние:

$$\pi_j = \gamma_{j-1} A_{j-1} / \sum_{i=0}^R \gamma_i A_i \mathbf{1}_{i+1}.$$

Здесь $\mathbf{1}_{i+1}$ – вектор-столбец размера $\sigma_{i+1} \times 1$.

Определим матрицу $B_{n+1}(S)$ размерностью $h_{n+1} \times h_{n+1}$ условного преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) показательного распределения длительности интервала перед переходом СМО из микросостояний $(j+n, i)$, $i = 1, \dots, h_{n+1}$ при обслуживании, умноженной на вероятность перехода системы в одно из микросостояний $(j+n-1, l)$, $l = \overline{1, h_{n+1}}$. Элементы матрицы определяются соотношением вида:

$$b_{n+1,i,l}(s) = \frac{b_{n+1,i,l}}{\sum_{r=1}^{h_{n+1}} b_{n+1,i,r} + s}, \quad i, l = \overline{1, h_{n+1}}.$$

Задается также матрица $C_{n+1}(s)$ ПЛС распределения длительности переходов между микросостояниями системы на ярусе, обусловленного

фазами «остужения» («прогрева»). Матрица $C_{n+1}(s)$ имеет размерность $h_{n+1} \times h_{n+1}$, ее элементы рассчитываются с помощью соотношения вида:

$$c_{n+1,i,l}(s) = \frac{c_{n+1,i,l}}{\sum_{r=1}^{h_{n+1}} c_{n+1,i,r} + s}, i, l = \overline{1, h_{n+1}}.$$

Отметим, что k -заявка (сразу после ее поступления в очереди оказывается k заявок) «ждет» своей очереди то время, которое необходимо для продвижения k заявок в очереди и их обслуживания, и, вдобавок, время, необходимое на операции «остужения», если система находится в режиме «остужения». Соответственно, условное ПЛС времени ожидания k -заявки:

$$W_k(s) = \pi_{k+n} B_n^k(s) \sum_{i=0}^r C_{n+1}^i(s),$$

где r – число последовательных фаз «прогрева» и «остужения».

Исходные данные и результаты расчетов

Моделирование выполнялось для модели многоканальной СМО М/М/С₂/С₂/n при следующих исходных данных: входной поток заявок с постоянной интенсивностью $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 3$, $\mu = 1,8$, $\mu^w_1 = \mu^w_2$ и $\mu^c_1 = \mu^c_2 =$ от 1 до 5. При моделировании рассчитывались средняя продолжительность нахождения заявки в очереди w_q и средняя длительность ее пребывания в СМО w . Результаты приведены в таблицах 1 и 2. Исходные данные при моделировании соответствуют исходным данным статьи [7], в которой решалась задача расчета таких же характеристик для системы М/М/Е₂/Е₂/n – с распределениями длительности «прогрева» и «охлаждения», подчиненными закону Эрланга. Распределение Эрланга – частный случай распределения Кокса. Это позволило задать значения интенсивностей $\mu^w_1 = \mu^w_2$ и $\mu^c_1 = \mu^c_2$, а также значения вероятностей $y_1 = 1$, при которых после прохождения первой фазы «прогрева» и «остужения» обязательно происходит переход на вторую фазу, что имеет место в распределении Эрланга.

Таблица № 1

Среднее время ожидания и пребывания в СМО

в зависимости от числа каналов и интенсивностей «охлаждения»

n	3			4			5		
$\mu^c_1 = \mu^c_2$	1	3	5	1	3	5	1	3	5
w	12,61	12,44	12,41	8,2	7,84	7,78	7,21	6,92	6,87
w_q	7,19	7,02	6,99	1,42	1,23	1,20	0,395	0,246	0,233

Таблица № 2

Среднее время ожидания и пребывания в СМО в зависимости

от числа каналов и интенсивностей «прогрева» и «охлаждения»

n	3			4			5		
$\mu^c_1 = \mu^c_2$ $\mu^w_1 = \mu^w_2$	1	3	5	1	3	5	1	3	5
w	15,01	14,32	14,25	10,4	10,14	9,11	9,01	8,94	8,87
w_q	9,51	9,02	8,82	3,62	3,45	3,20	3,01	0,256	2,23

Как и следовало ожидать, результаты расчетов практически совпали. Это позволяет сделать вывод о адекватности результатов моделирования в обоих случаях.

Заключение

Разработанная модель информационной системы туманных расчетов может найти применение для прогнозной оценки оперативности функционирования ГИС с туманными вычислениями. При этом описан метод расчета стационарного распределения времени ожидания в многоканальной не Марковской системе обслуживания с очередями и распределениями, подчиненными закону Кокса 2-го порядка.

Написана программа оценивания вероятностно-временных характеристик туманных расчетов. Результаты компьютерных расчетов подтверждают достоверность предложенной модели и метода.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлениях разработки сетевых моделей массового обслуживания, позволяющих учесть распределенный характер обработки в геоинформационных системах, например, описанный в работах [15, 16], а также оценить оперативность обработки геоизображений [17, 18], в том числе с использованием в ГИС нейросетей [19–21]. Актуальным также представляется рассмотрение других аппроксимирующих распределений фазового типа [13, 14, 22].

Литература

1. Бурлов, В.Г., Грызунов, В.В., Сипович, Д.Е. Адаптивное управление доступностью в геоинформационной системе, использующей туманные вычисления // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. №. 9. С. 74-87.
2. Бородин, В.А. Интернет вещей-следующий этап цифровой революции // Образовательные ресурсы и технологии. Частное образовательное учреждение высшего образования «Московский университет имени СЮ Витте», 2014. № 2 (5). С. 178-181.
3. Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A., Katz, R., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D., Rabkin, A., Stoica, I., Zaharia, M. A view of cloud computing // Commun. ACM. 2010. Vol. 53, № 4. pp. 50–58. doi: 10.1145/1721654.1721672.
4. Vaquero, L.M., Rodero-Merino, L. Finding your Way in the Fog: Towards a Comprehensive Definition of Fog Computing // ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 2014. Vol. 44, № 5. Pp. 27-32.

5. Greenfield, D. Fog Computing vs. Edge Computing: What's the Difference? // Autom. World. 2016. URL: automationworld.com/fog-computing-vs-edge-computing-whatsdifference (дата обращения 11.12.2023).
 6. Мельник, Э.В., Клименко, А.Б. Применение концепции «туманных» вычислений при проектировании высоконадежных информационно-управляющих систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 273-283.
 7. Khalill, M.M., Khomonenko, A.D., Gindin, S.I. Load Balancing Cloud Computing with Web-Interface Using Multichannel Queuing Systems with Warming up and Cooling // Studies in Computational Intelligence, 2020, 868. pp. 385-393.
 8. Khalil, M.M., Khomonenko, A.D., Matushko, M.D. Measuring the effect of monitoring on a cloud computing system by estimating the delay time of requests // Journal of King Saud University, Computer and Information Sciences, Volume 34, Issue 7, 2022, pp. 3968-3972. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.02.001.
 9. Muhammad Saad . Fog Computing and Its Role in the Internet of Things: Concept, Security and Privacy Issues // International Journal of Computer Applications. 180, 32 (Apr 2018), 7-9. doi: 10.5120/ijca2018916829.
 10. Wissam Razouk, Daniele Sgandurra, Kouichi Sakurai. A new security middleware architecture based on fog computing and cloud to support IoT constrained devices // IML '17: Proceedings of the 1st International Conference on Internet of Things and Machine Learning. October 2017, No. 35. pp. 1–8.
 11. Калиниченко, С.В., Хомоненко, А.Д. Модель оценки оперативности функционирования распределённых автоматизированных систем при интеграции данных // Бюллетень результатов научных исследований: электронный научный журнал. – СПб.: ПГУПС, 2012. Вып. 5 (4). С. 47-57.
-

12. Рыжиков, Ю.И. Распределение числа требований в системе массового обслуживания «с разогревом». Проблемы передачи информации. Том IX, Вып. 1, 1973. С. 88-97.

13. Cox, D.R. A use of complex probabilities in the theory of stochastic processes // Proc. Cambr. Phil. Soc. 1955. V. 51, № 2. pp. 313-319. doi: 10.1017/S0305004100030231.

14. Хомоненко, А.Д. Численные методы анализа систем и сетей массового обслуживания. МО СССР, 1991. 197 с.

15. Шерстнев, В.С. Моделирование информационных потоков корпоративной распределенной геоинформационной системы // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов первой всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2003. Том 2. СПб.: ЦНИИТС. 2003. с. 137-141.

16. Curtin, K.M. Network analysis in geographic information science: Review, assessment, and projections // Cartography and geographic information science. 2007. Vol. 34. №. 2. pp. 103-111.

17. Church, R.L. Geographical information systems and location science // Computers & Operations Research. 2002. Vol. 29. №. 6. pp. 541-562.

18. Китов, А.Д. Компьютерный анализ и синтез геоизображений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 220 с.

19. Капралов, Е.Г., Кошкарев, А.В., Тикунов, В.С., Якубайлик, О.Э. и др. Основы геоинформатики. М.: Издательский центр "Академия", 2004. 408 с.

20. Соловьев Р.А., Тельпухов Д.В., Кустов А.Г. Автоматическая сегментация спутниковых снимков на базе модифицированной свёрточной нейронной сети UNET // Инженерный вестник Дона, 2017, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4433/.

21. Белоусов И.С., Рогачев А.Ф. Разработка глубокой нейронной сети

для сегментации проблемных участков сельскохозяйственных полей // Инженерный вестник Дона, 2022, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7864/.

22. Хомоненко, А.Д. Распределение времени ожидания в системах массового обслуживания типа $GI_q/H_k/n/R_{\leq \infty}$ // Автоматика и телемеханика. 1990. № 8. С. 91–98.

References

1. Burlov, V.G., Gryzunov, V.V., Sipovich, D.E. International Journal of Open Information Technologies. 2021. V. 9. № 9. pp. 74-87.
2. Borodin, V.A. Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii. 2014. № 2 (5). pp. 178-181.
3. Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A., Katz, R., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D., Rabkin, A., Stoica, I., Zaharia, M. A Commun. ACM. 2010. Vol. 53, № 4. pp. 50–58. doi: 10.1145/1721654.1721672.
4. Vaquero, L.M., Rodero-Merino, L. ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 2014. Vol. 44, № 5. pp. 27-32.
5. Greenfield, D. Autom. World. 2016. URL: automationworld.com/fog-computing-vs-edge-computing-whatsdifference (accessed 11/12/2023).
6. Mel'nik, E.V., Klimenko, A.B. Izvestiya TulGU. Technicheskie nauki. 2020. V. 2. pp. 273-283.
7. Khalill, M.M., Khomonenko, A.D., Gindin, S.I. Studies in Computational Intelligence, 2020, 868. pp. 385-393.
8. Khalil, M.M., Khomonenko, A.D., Matushko, M.D. Journal of King Saud University, Computer and Information Sciences, Volume 34, Issue 7, 2022, pp. 3968-3972. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.02.001.
9. Muhammad Saad International Journal of Computer Applications. 180, 32 (Apr 2018), pp. 7-9. doi: 10.5120/ijca2018916829.

10. Wissam Razouk, Daniele Sgandurra, Kouichi Sakurai IML '17: Proceedings of the 1st International Conference on Internet of Things and Machine Learning. October 2017, № 35. pp. 1–8.
11. Kalinichenko, S.V., Khomonenko, A.D. Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy elektronnyy nauchnyy zhurnal. SPb.: PGUPS, 2012. V. 5 (4). pp. 47-57.
12. Ryzhikov, Y.I. Problemy peredachi informatsii. V. IX, № 1, 1973. pp. 88-97.
13. Cox, D.R. Proc. Cambr. Phil. Soc. 1955. V. 51, № 2. pp. 313-319. doi: 10.1017/S0305004100030231.
14. Khomonenko, A.D. Chislennyye metody analiza sistem i setey massovogo obsluzhivaniya [Numerical methods for analyzing queuing systems and networks]. Ministerstvo oborony SSSR, 1991. 197 p.
15. Sherstnev, V.S. Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika: Sbornik dokladov pervoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii IMMOD-2003 (Proc. The first All-Russian scientific and practical conference IMMOD-2003). Tom 2. SPb.: TSNIITS. 2003. pp. 137-141.
16. Curtin, K.M. Cartography and geographic information science. 2007. Vol. 34. №. 2. pp. 103-111.
17. Church, R.L. Computers & Operations Research. 2002. Vol. 29. №. 6. pp. 541-562.
18. Kitov, A.D. Komp'yuternyy analiz i sintez geoizobrazheniy [Computer analysis and synthesis of geo-images]. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2000. 220 p.
19. Kapralov, E.G., Koshkarev, A.V., Tikunov, V.S., Yakubaylik, O.E. i dr. Osnovy geoinformatiki [Fundamentals of geoinformatics]. M.: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 408 p.



20. Solov'ev R.A., Tel'puhov D.V., Kustov A.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4433/.
21. Belousov I.S., Rogachev A.F. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7864/.
22. Khomonenko, A.D. Avtomatika i telemekhanika. 1990. № 8. pp. 91–98.

Дата поступления: 17.04.2024

Дата публикации: 5.06.2024