

АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ВДОВЕНКО

магистрант, младший научный сотрудник кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

vdovenko@cs.karelia.ru

ДМИТРИЙ ЖОРЖЕВИЧ КОРЗУН

кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

dkorzun@cs.karelia.ru

УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛОМ ПРОВЕРКИ УВЕДОМЛЕНИЙ ПО ПОДПИСКЕ МОБИЛЬНЫМ КЛИЕНТОМ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ*

Интеллектуальное пространство позволяет организовать сетевое взаимодействие множества участников на основе разделяемого использования информационного содержимого. Для отслеживания происходящих событий участник применяет операцию подписки, получая на постоянной основе уведомления об изменениях в информационном содержимом. Доставка уведомлений является негарантированной, что особенно проявляется в случае мобильных клиентов из-за частых сбоев беспроводной сети. В данной статье представлено решение с активной проверкой уведомлений. Предложена математическая модель управления интервалом проверки, позволяющая мобильному клиенту адаптироваться к текущему уровню потерь.

Ключевые слова: операция подписки, снижение потерь, интеллектуальные пространства, мобильные клиенты

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальное пространство (ИП) формирует сервисно-ориентированную систему, обеспечивающую [1], [6], [7] построение и доставку сервисов разнородными динамическими участниками вычислительной среды на основе их взаимодействия через разделяемое использование накапливаемого информационного содержимого и извлечение из него знаний. Примером ИП выступает система интеллектуального зала SmartRoom [8], [11], предоставляющая сервисы для проведения таких мероприятий, как конференции. Программная часть системы состоит из агентов, выполняемых на окружающих вычислительных устройствах (в помещениях), мобильных компьютерах пользователей (например, смартфоны) и удаленных сетевых ЭВМ (например, веб-серверы).

Операция подписки [3] является одним из ключевых механизмов для организации взаимодействия агентов в ИП. Агент отслеживает интересующую его информацию, устанавливая подписку на часть информационного содержимого ИП. Если агенты изменяют в ней информацию, то агент-подписчик получает уведомления. В рассматриваемом примере интеллектуального зала работа механизма подписки нарушается из-за потерь при доставке уведомлений по подписке. Эта особенность характерна для мобильных клиентов, так как беспроводная сеть подвержена сбоям при передаче данных [2], [5], [9].

В данной работе рассматривается задача проверки подписчиком наличия новых уведомлений для уменьшения последствий от потерь уведомлений. Как показано в [10], частые проверки приводят к излишним затратам ресурсов, поэтому необходимо адаптировать интервал проверки под текущее состояние системы. В статье представлена математическая модель для применения мобильным клиентом при адаптации интервала проверки к текущим условиям потерь уведомлений по подписке.

СИСТЕМЫ ПУБЛИКАЦИИ/ПОДПИСКИ

Модель публикации/подписки предназначена для организации взаимодействия большого числа участников и источников данных [4]. Участники – подписчики и издатели – формируют слабосвязанную распределенную систему. Издатель публикует данные, не зная обязательно, кто является подписчиком. Подписчик реагирует на публикацию данных, находящихся в поле его интересов, независимо от конкретного издателя. Со стороны подписчика не требуется выполнение разовых запросов для проверки изменений данных. Он использует долговременный запрос – подписку, по которой приходят уведомления. Информационный брокер обеспечивает хранение общего информационного содержимого и управляет подписками, динамически соединяя подписчиков и издателей.

Такой вариант реализован в платформе Smart-M3 [6], [7], позволяющей создавать ИП для построения сервисов в условиях разнообразия участвующих вычислительных устройств. При установке подписки между агентом и брокером организуется сетевое соединение. Если агент выполняется на мобильном устройстве (например, смартфоне), то особенности беспроводной связи приводят к частым сбоям в подписке: потеря уведомлений, разрыв сетевого соединения, переключение на другую беспроводную сеть.

Платформа Smart-M3 не гарантирует доставку уведомлений по подписке. Брокер хранит набор всех текущих подписок от агентов и регулярно проверяет состояние сетевых соединений. Уведомление должно быть отправлено агенту, если произошли соответствующие изменения содержимого. Такие уведомления будем называть пассивными. Некоторые уведомления не отправляются из-за перегрузки брокера. Брокер не отслеживает доставку уведомлений (за это может отвечать нижележащий протоколом, напр., протоколом TCP). Брокер завершает любую подписку, если обнаруживает потерю сетевого соединения.

Рассмотрим класс агентов, реализующих мобильных клиентов Smart-M3 приложения. Примером является система интеллектуального зала [8], в которой мобильные клиенты обеспечивают доступ пользователей (участников мероприятия) к сервисам поддержки этого мероприятия (пополнка, презентации, дискуссии и т. п.). В случае мобильных клиентов на работу подписки существенно влияют особенности беспроводной связи. Потеря сетевого соединения между клиентом и брокером обнаруживается на стороне брокера и клиента. Часть уже отправленных уведомлений (до обнаружения брокером потери соединения) не будет доставлена. После обнаружения потери брокер перестает уведомлять клиента об изменениях. Клиенту необходимо восстановить подписку. Ему не будут доставлены уведомления об изменениях в информационном содержимом ИП, произошедших за время восстановления.

В реальных условиях работы интеллектуального зала обнаружено, что для мобильных клиентов перечисленные потери уведомлений по подписке возникают часто. Требуются решения для ручного и автоматического восстановления сетевого соединения [11]. Они реализуются на стороне клиента в виде дополнительного механизма для уменьшения числа недоставленных уведомлений. Доставка уведомлений может быть улучшена за счет активного контроля, реализуемого индивидуально мобильным клиентом.

ИЗВЕСТНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТАВКИ УВЕДОМЛЕНИЙ

Известен ряд работ, в которых исследуются вопросы обеспечения доставки уведомлений

в системах публикации/подписки. В [9] рассмотрена задача быстрого восстановления компонент системы после сбоя. Предлагаемая там модель определяет качество функционирования подписки в зависимости от вероятностных характеристик потерь, доставки уведомлений и их своевременности. В отличие от рассматриваемого нами случая, модель предназначена для применения сетью брокеров, которые маршрутизируют передачу уведомлений. Качество обеспечения доставки уведомлений определяется построенным маршрутом в этой сети.

В [5] рассмотрена проблема своевременной доставки уведомлений. Задача доставки разбивается на подзадачи: управление поступающими изменениями, слежение за отключением подписчиков, отправка уведомлений активным подписчикам, хранение недоставленных уведомлений в буфере. В состав системы требуется вводить дополнительный модуль, следящий за всеми уведомлениями и проверяющий их доставку. В случае платформы Smart-M3 такой модуль должен быть реализован на стороне брокера, накладывая на последнего существенную дополнительную нагрузку.

В [4] представлена модель для оценки числа потерь на стороне подписчика. Выделены временные затраты: 1) время на установку подписки и ее завершение, 2) время на создание уведомления на стороне брокера и 3) время для получения уведомления последним подписчиком. Предполагается, что есть некоторый общий элемент, позволяющий динамически измерять указанные затраты для всех участников системы. В итоге получено выражение для вычисления вероятности потерь уведомлений по измеряемым временем затратам.

Предлагаемое нами в данной работе решение разработано с учетом возможностей платформы Smart-M3 и условий работы системы интеллектуального зала. Подписчиками выступают мобильные клиенты, находящиеся в условиях беспроводных сетей с частыми сбоями. Единственный брокер выполняет обслуживание подписок всех клиентов, не отслеживая доставку пассивных уведомлений.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДПИСКИ НА СТОРОНЕ МОБИЛЬНОГО КЛИЕНТА

Выделим параметры, которые клиент может измерить в ходе работы. Будем далее считать, что клиент работает с одной подпиской.

Уведомления по подписке доставляются по сети от брокера к клиенту. На стороне заданного клиента обозначим очередное уведомление как i , где i можно интерпретировать как последовательный номер уведомления. Уведомления приходят неравномерно. Обозначим через t_i интервал времени между событиями $i-1$ и i . Между событиями $i-1$ и i могут произойти изменения,

уведомления о которых не были доставлены клиенту из-за возникших сбоев. Предположим, что клиент имеет некоторый способ оценивания числа таких потерь. Обозначим это число как k_i — обнаруженное число потерь на интервале t_i . Зная k_i , можно определить интенсивность потерь λ . В общем случае она зависит от времени, то есть $\lambda = \lambda(t)$.

Для снижения потерь уведомлений клиент может управлять t_i за счет выполнения явного запроса к брокеру. Таким образом, клиент реализует доставку активных уведомлений. Если уменьшить t_i , то снизится число потерь k_i . Если увеличить t_i , то k_i может возрасти. Таким образом, клиент может реализовать адаптивную стратегию за счет активных уведомлений, чтобы сократить количество потерь k_i и в то же время не создать чрезмерной нагрузки из-за выполнения дополнительных запросов.

На число потерь в первую очередь влияет качество беспроводной связи, так как при сбоях соединения повторные уведомления брокером не высыпаются. Отметим, что число клиентов в ИП также влияет на число потерь, возникающих из-за повышенной нагрузки брокера.

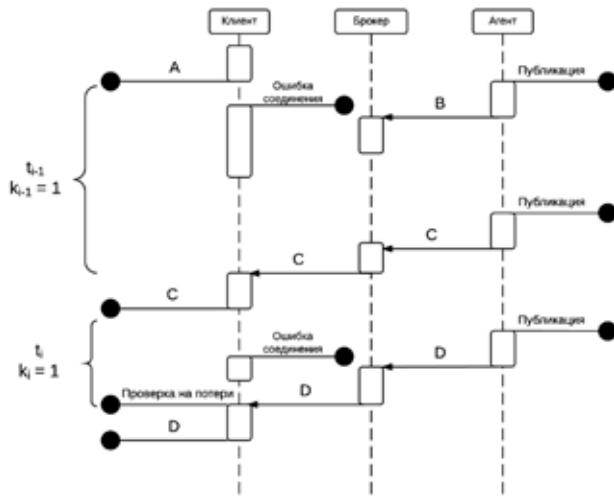


Рис. 1. Диаграмма последовательности взаимодействия сервиса и клиента по подписке

Диаграмма последовательности, поясняющая введенные параметры, представлена на рис. 1. Информационное содержимое ИП изменяется из-за публикации данных множеством агентов. Брокер уведомляет об этом клиента. Уведомление A было доставлено. Когда брокер отправил уведомление B , произошел сбой сетевого соединения, и B не доставляется клиенту. При получении уведомления C клиент вычисляет t_{i-1} и определяет $k_{i-1} = 1$. Для сокращения числа потерь уведомлений клиент выполняет явный запрос брокеру для проверки, происходили ли изменения. Обнаруживается потеря сетевого соединения. Клиент его восстанавливает, получает уведомление D и определяет $k_i = 1$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОМ ПРОВЕРКИ

Рассмотрим модель для адаптивного управления интервалом проверки t_i для наблюдаемого количества потерь k_i . Модель предназначена для построения адаптивной стратегии клиента при реализации активных уведомлений. Пусть задано начальное значение t_0 интервала проверки. Рассмотрим поведение клиента, развивающееся по времени $i = 1, 2, \dots$.

Если на t_{i-1} не было потерь ($k_{i-1} = 0$), то целесообразно аддитивное увеличение t_i для сокращения числа явных запросов (клиент наблюдает признаки того, что состояние сетевой связи хорошее). Получаем следующее выражение:

$$t_i = t_{i-1} + \delta, \quad (1)$$

где $\delta \geq 0$ – это некоторое фиксированное значение, на которое происходит увеличение интервала. Увеличение умеренное, чтобы снизить риск резкого роста числа потерь.

Рассмотрим ситуацию с потерями. Пусть на интервале t_{i-1} обнаружено, что $k_{i-1} > 0$. Следует уменьшить интервал t_i , используя мультипликативное уменьшение. Клиент пытается избежать возможных потерь. Уменьшение мультипликативное, так как клиент заинтересован в быстром достижении $k_i = 0$ в последующих наблюдениях. Для величины t_i получаем следующее выражение:

$$t_i = \alpha t_{i-1} + (1-\alpha) \frac{t_{i-1}}{k_{i-1}+1}, \quad k_{i-1} > 0, \quad (2)$$

где $0 < \alpha < 1$ – коэффициент для учета предыдущих наблюдений.

Выражения (1) и (2) составляют рекуррентную систему:

$$t_i = \begin{cases} t_{i-1} + \delta, & k_{i-1} = 0, \\ \frac{1 + \alpha k_{i-1}}{k_{i-1} + 1} t_{i-1}, & k_{i-1} > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Отметим, что (3) справедливо только для активных уведомлений. Когда приходит пассивное уведомление i , то значение t_i не может быть задано самим клиентом.

Рассмотрим два случая для (3), допускающие аналитическое решение. Они показывают экстремальные варианты для адаптивной стратегии.

Случай I (нет потерь): $k_i = 0$ для $i = 1, 2, \dots$.
 Заданы значения $t_0 > 0$ и $\delta > 0$. Решение для (3) принимает вид:

$$t_i = t_0 + \delta(i-1), i=1, 2, \dots$$

Следовательно, t_i растет линейно до бесконечности. Если нет потерь, то клиент постепенно приходит к состоянию, когда активные уведомления не требуются.

Случай 2 (постоянные потери): $k_i = k > 0$ для $i = 1, 2, \dots$. Заданы фиксированные значения $t_0 > 0$ и $0 < \alpha < 1$. Решение для (3):

$$t_i = t_0 \left(\frac{\alpha k + 1}{k + 1} \right)^{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

В силу $0 < (\alpha k + 1) / (k + 1) < 1$ получаем, что интервал проверок мультиплексивно уменьшается до нуля. Клиент быстро приходит к состоянию с частыми активными уведомлениями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для оценки и сравнения предложенной модели для адаптивной стратегии проведено имитационное моделирование. Определяемая представленной моделью адаптивная стратегия клиента зависит от распределения потерь уведомлений. Использовались следующие два вероятностных распределения для генерации значений k_i как неотрицательных целых чисел.

1) Значения для k_i выбираются равномерно на отрезке $[at_i, bt_i]$ для заданных параметров $0 < a < b$.

2) Значение для k_i имеет пуассоновское распределение со средним и отклонением λt_i для заданного значения $\lambda > 0$.

В выполненных экспериментах использовались значения $a = 0$, $b = 0,1$ и $\lambda = 0,05$. Зависимость k_i от t_i отражает факт, что число потерь пропорционально длительности интервала. Оба случая сходны, имитируя, что одно уведомление теряется в среднем каждые 20 с.

В табл. 1 представлены стратегии клиента, с которыми проводились эксперименты. Начальное значение для $t_0 = 20$ с, то есть на таком интервале в среднем происходит одна потеря. В экспериментах рассматривались последовательности уведомлений, где $0 < i \leq 100$.

На рис. 2 показано поведение t_i , управляемое по адаптивной стратегии модели (3) для двух распределений потерь. Интервал проверок t_i уменьшается линейно, что показано в (4), описывающей мультиплексивное уменьшение, если за единицу времени брать i . При равномерно распределенных потерях ненулевые значения k_i встречаются часто, что приводит к пилообразному поведению с большими пиками. При пуассоновском распределении потеря случай $k_i = 0$

Таблица 1 Параметры экспериментальных стратегий

Стратегия		Описание
Параметр	Значение	
Адаптивная стратегия	$\alpha = 0,5$	Определяется моделью (3). Значение $\alpha = 0,5$ трактует значимость предыдущих и текущего наблюдений в равной мере. Значение $\delta = 20$ с совпадает со средней длиной интервала для одной потери
		$\delta = 20$
Мультиплексивное уменьшение	0,5	Если $k_{i-1} > 0$, то t_i уменьшается в два раза. Если $k_{i-1} = 0$, то возврат $t_i = t_0$
Случайный выбор	$a = 10$	Случайная стратегия: t_i выбирается равномерно из интервала (a, b)
	$b = 30$	
Постоянный интервал проверки		Всегда используется $t_i = t_0$

имеет высокую вероятность, что приводит к пикам меньшей величины.

Второй тип проведенных экспериментов сравнивает предлагаемую адаптивную стратегию с более простыми (представлены в табл. 1). В этих экспериментах использовалось только пуассоновское распределение потерь с параметрами, как в предыдущих экспериментах. Отметим, что если бы распределение потерь зависело от времени, то предложенная адаптивная стратегия привела бы еще к большей разнице в сравнении с другими рассмотренными стратегиями.

На рис. 3 представлено поведение t_i для рассмотренных стратегий. В сравнении с адаптивной стратегией у остальных наблюдается низкое значение t_i , что приводит к чрезмерному использованию ресурсов клиентом (частые запросы).

Определим дополнительные показатели эффективности. Пусть k_{avg} будет средним числом потерь за все рассматриваемое время. Аналогично, пусть t_{avg} – средняя длина интервала проверки.

$$k_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i, \quad t_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i.$$

Клиент заинтересован в $k_{\text{avg}} \rightarrow \min$ и $t_{\text{avg}} \rightarrow \max$. Табл. 2 показывает сравнение пока-

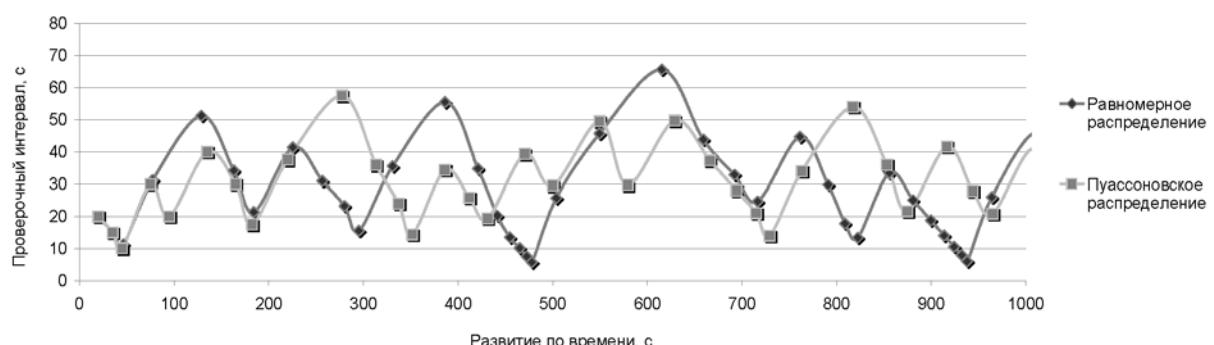


Рис. 2. Управление интервалом проверки при равномерном и пуассоновском распределении числа потерь k_i

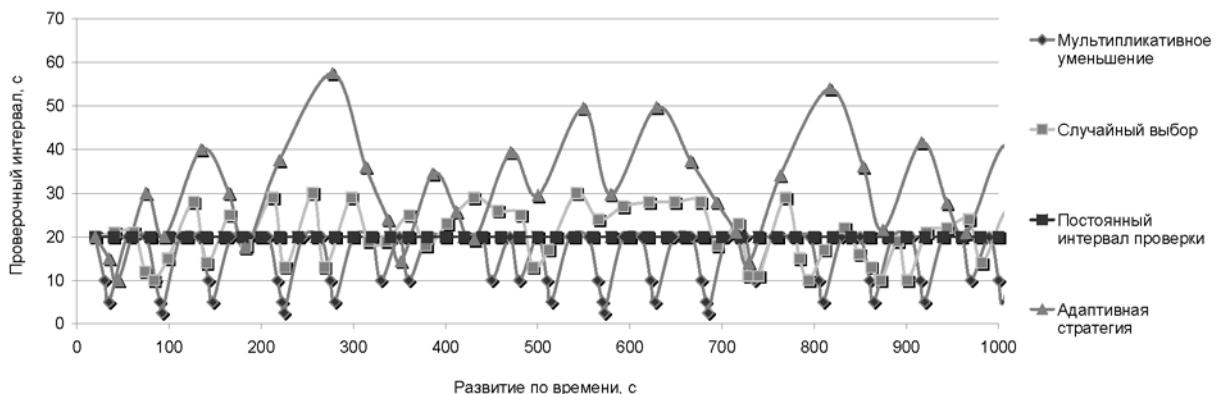


Рис. 3. Сравнение стратегий для контроля интервала проверок

зателей эффективности для разных стратегий. Стратегия мультипликативного уменьшения имеет худший результат по времени и лучший результат по числу потерь. Это связано с ее полуадаптивным характером, когда уменьшение быстрое, а рост интервала, наоборот, умеренный. Сравнительная эффективность стратегий случайного выбора и постоянного интервала проверки определяется независимостью потерь от времени и соответствующим подбором параметров стратегий под фиксированные характеристики распределения потерь. В целом можно заключить, что адаптивный алгоритм превосходит другие стратегии.

Таблица 2
Показатели эффективности для различных стратегий управления интервалом проверки уведомлений

Показатель эффективности		Мульти- пликативное умень- шение	Случа- йный выбор	Посто- янный инте- рвал про- верки	Адап- тивная страте- гия
k_{avg}	min	0,59	1,19	0,89	1,23
t_{avg}	max	14,23	19,87	20	28,8
$\lambda = \frac{k_{avg}}{t_{avg}}$	min	0,042	0,06	0,045	0,041
$\lambda_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{t_i}$	min	0,078	0,06	0,045	0,043

Для анализа зависимости стратегии от величины δ , см. модель (3), проведены эксперименты с варьированием δ . Полученные результаты представлены в табл. 3. Малые значения δ ведут

к меньшим потерям. Большие значения уменьшают нагрузку клиента на брокера. Как видно из таблицы, наиболее оптимальным значением является $\delta = 20$, что подтверждается результатами эксперимента, приведенными в табл. 2.

Таблица 3
Влияние параметра δ на показатели эффективности адаптивной стратегии

δ	10	20	40	60
Показатель эффективности	Значение			
k_{avg} (min)	1,06	1,14	0,89	1,23
t_{avg} (max)	22,01	24,76	32,6	43,86
$\lambda = \frac{k_{avg}}{t_{avg}} \rightarrow \min$	0,048	0,046	0,047	0,054
$\lambda_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{t_i} \rightarrow \min$	0,047	0,045	0,046	0,054

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследована задача проверки мобильным клиентом изменений в информационном содержимом интеллектуального пространства в условиях возникновения потерь пассивных уведомлений по подписке. С одной стороны, отсутствие явных проверок со стороны или редкое их использование может привести к существенным потерям. С другой стороны, частый активный опрос приводит к чрезмерной нагрузке как на клиента, так и на сеть и брокера. Нами предложена математическая модель управления интервалом проверки, позволяющая адаптировать явную проверку к наблюдаемой клиентом ситуации. Приведены имитационные эксперименты с полученной адаптивной стратегией управления.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (НИР № 2.2336.2014/К) и по заданию № 2014/154 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания (НИР № 1481).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корзун Д. Ж. Формализм сервисов и архитектурные абстракции для программных приложений интеллектуальных пространств // Программная инженерия. 2015. № 2. С. 3–12.
2. Ломов А. А. Взаимодействие программного агента на уровне сессии с интеллектуальными пространствами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: «Естественные и технические науки». 2013. № 8 (137). С. 118–121.
3. Ломов А. А., Корзун Д. Ж. Операция подписки для приложений в интеллектуальных пространствах платформы Smart-M3 // Труды СПИИРАН. 2012. № 4. С. 439–458.
4. Baldoni R., Beraldì R., Piergianni S., Virgillito A. Measuring notification loss in publish/subscribe communication systems // Dependable Computing, 2004. Proceedings. 10th IEEE Pacific Rim International Symposium on. IEEE, 2004. P. 84–93.
5. Bholat S., Strom R., Bagchi S., Yuan Yuan Z., Auerbach J. Exactly-once Delivery in a Content-based Publish/Subscribe System // Proc. Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN). IEEE, 2002. P. 7–16.
6. Honkola J., Laine H., Brown R., Tirkko O. Smart-M3 information sharing platform // Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC), 22–25 June 2010, Riccione, Italy. Washington: IEEE Computer Society, 2010. P. 1041–1046.
7. Korzun D., Balandin S., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A. Overview of Smart-M3 principles for application development // Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). Moscow, Physmatlit Publ., 2011. Vol. 4. P. 64–71.
8. Korzun D., Galov I., Balandin S. Development of smart room services on top of Smart-M3 // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT / S. Balandin and U. Trifonova, Eds. St. Petersburg, SUAI Publ., 2013. P. 37–444.
9. Pongthawornkamol T., Nahrestedt K., Wang G. Reliability and Timeliness Analysis of Fault-tolerant Distributed Publish/Subscribe Systems // 10th International Conference on Autonomic Computing (ICAC '13). 2013. P. 247–257.
10. Vdovenko A., Korzun D. Active Control by a Mobile Client of Subscription Notifications in Smart Space // Proc. 16th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT. Oulu, Finland, 27–31 Oct. 2014. P. 123–128.
11. Vdovenko A., Korzun D. Delivery of SmartRoom Services Using Mobile Clients // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT / S. Balandin and U. Trifonova, Eds. St. Petersburg, SUAI Publ., 2013. P. 215–216.

Vdovenko A. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Korzun D. Zh., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

CONTROL OF NOTIFICATION CHECK INTERVAL FOR SUBSCRIPTION FROM MOBILE CLIENTS IN SMART SPACE

The smart space supports network interactions of multiple participants through information sharing. For detection of ongoing changes a participant applies subscription operation, receiving notifications on a regular basis. Notification delivery is not guaranteed, especially in the case of mobile clients with frequent faults in the underlying wireless network. In this paper, we propose a solution with an active check of subscription notifications. We introduce a mathematical model for control the notification check interval, letting the client to adapt to the current loss level.

Key words: subscription, reduction of losses, smart spaces, mobile clients

REFERENCES

1. Korzun D. Zh. Formalism of services and architectural abstraction for software applications of smart spaces [Formalizm servisov i arkhitekturnye abstraktsii dlya programmnykh prilozheniy intellektual'nykh prostranstv]. *Programmnaya inzheneriya*. 2015. № 2. P. 3–12.
2. Lomov A. A. Session-level interaction of the agent with the smart space [Vzaimodeystvie programmnogo agenta na urovne sessii s intellektual'nymi prostranstvami]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2013. № 8 (137). P. 118–121.
3. Lomov A. A., Korzun D. Zh. Subscription operation for applications in smart spaces of Smart-M3 platform [Operatsiya podpiski dlya prilozheniy v intellektual'nykh prostranstvakh platformy Smart-M3]. *SPIIRAS Proc.* 2012. № 4. P. 439–458.
4. Baldoni R., Beraldì R., Piergianni S., Virgillito A. Measuring notification loss in publish/subscribe communication systems // Dependable Computing, 2004. Proceedings. 10th IEEE Pacific Rim International Symposium on. IEEE, 2004. P. 84–93.
5. Bholat S., Strom R., Bagchi S., Yuan Yuan Z., Auerbach J. Exactly-once Delivery in a Content-based Publish/Subscribe System // Proc. Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN). IEEE, 2002. P. 7–16.
6. Honkola J., Laine H., Brown R., Tirkko O. Smart-M3 information sharing platform // Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC), 22–25 June 2010, Riccione, Italy. Washington: IEEE Computer Society, 2010. P. 1041–1046.
7. Korzun D., Balandin S., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A. Overview of Smart-M3 principles for application development // Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). Moscow, Physmatlit Publ., 2011. Vol. 4. P. 64–71.
8. Korzun D., Galov I., Balandin S. Development of smart room services on top of Smart-M3 // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT / S. Balandin and U. Trifonova, Eds. St. Petersburg, SUAI Publ., 2013. P. 37–444.
9. Pongthawornkamol T., Nahrestedt K., Wang G. Reliability and Timeliness Analysis of Fault-tolerant Distributed Publish/Subscribe Systems // 10th International Conference on Autonomic Computing (ICAC '13). 2013. P. 247–257.
10. Vdovenko A., Korzun D. Active Control by a Mobile Client of Subscription Notifications in Smart Space // Proc. 16th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT. Oulu, Finland, 27–31 Oct. 2014. P. 123–128.
11. Vdovenko A., Korzun D. Delivery of SmartRoom Services Using Mobile Clients // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT / S. Balandin and U. Trifonova, Eds. St. Petersburg, SUAI Publ., 2013. P. 215–216.