

Введение

В архитектуре существующих крупномасштабных распределенных компьютерных систем в настоящее время преобладает синхронная платформа клиент-сервер (например, World Wide Web, CORBA, J2EE, COM+). В системах клиент-сервер существуют две роли: компонент действует как клиент, если он требует данные или функциональные возможности от другого компонента, или он действует как сервер, если он отвечает на запрос клиента. Кроме того, клиент блокируется после того, как он отправил запрос, до тех пор, пока не придёт соответствующий ответ.

Существуют приложения, которые не могут быть реализованы эффективно при использовании технологии запрос/ответ. При их реализации, когда информация, предоставляемая одной службой, зависит от информации, поставляемой другой службой, использование этой технологии, приводит к решению, которое не масштабируется и предоставляет данные, которые могут быть неточными и неполными. Например, эта архитектура не очень хорошо подходит для реализации информационно-управляемых приложений, таких как поставка новостей, квотирование запасов, управление воздушным движением, распространение аукционных предложений и пр., из-за несоответствий между требованиями, предъявляемыми этими приложениями, и характеристиками платформы клиент-сервер.

В отличие от этого новая асинхронная платформа Публикация/Подписка непосредственно отражает поведение, свойственное информационно-управляемым приложениям, так как такая коммуникация является косвенной, инициируемой производителями информации. Производители издают уведомления и поставляют их подписчикам-потребителям посредством специальной службы уведомлений, которая разделяет производителей и потребителей информации. Поэтому платформа Публикация/Подписка наилучшим образом поддерживает взаимодействие распределённых информационно-управляемых приложений.

Гибкость механизма выбора уведомлений, используемого потребителями для того, чтобы определить именно те уведомления, которыми они интересуются, является важнейшим фактором при реализации всей службы уведомлений. С этой точки зрения механизм выбора уведомления на основе содержимого сообщения является наиболее предпочтительным решением, так как позволяет по-

высить избирательность фильтров этого механизма посредством оценки содержимого уведомления.

Использование наиболее избирательного механизма выбора уведомлений по их содержимому в сравнении с выбором на основе канала или выбором на основе темы позволяет повысить эффективность функционирования, гибкость всей системы, и, в целом, облегчает её расширяемость и непрерывное изменение с целью адаптации к изменениям в объединяемых ею приложениях. Самым сложным в такой реализации является обеспечение масштабируемости системы. Избирательность фильтров механизма выбора уведомлений, которые должны быть применены в крупномасштабных системах, оказывает большое влияние на масштабируемость любой службы уведомления на основе содержимого, поэтому, самая *актуальная проблема* при разработке систем Публикация/Подписка на основе содержимого – это создание масштабируемой маршрутизации уведомлений от их производителей к потребителям.

К сожалению, существующие службы уведомления на основе содержимого сообщения не достаточно разработаны, чтобы использоваться в крупномасштабных распределенных средах. Большинство существующих служб уведомления являются централизованными, или используют простые не достаточно эффективные алгоритмы маршрутизации. Все эти подходы приводят к серьезным проблемам в масштабируемости крупномасштабных распределённых систем. В связи с этим, *актуальной задачей* является исследование возможностей улучшения масштабируемости маршрутизации на основе содержимого сообщения и разработка алгоритмов, поддерживающих это свойство.

В монографии рассмотрены возможности улучшения масштабируемости алгоритмов маршрутизации на основе содержимого сообщения, которые не полагаются на глобальное знание обо всех активных подписках. Рассмотрены модифицированные алгоритмы маршрутизации на основе тестового покрытия и слияния фильтров.

В развитие данного направления исследований весомый вклад внесли многие отечественные и зарубежные ученые: С.В. Востокин, В.В. Воеводин, Л.Е. Карпов, А.С. Нариньяни, А.А. Цимбал, Э. Таненбаум, Грегор Хоп и другие. Значительных успехов в практической реализации существующих сервисов уведомлений достигли зарубежные ученые, такие как А. Карцанига, Д. Розенблюм, А. Вольф,

Дж. Бриццони, Ди Нитто, Е. Трацанелла, Дж. Банавар, Л. Опирчал, Дж. Кугола, А. Фуджетта, Дж. Бэйкон.

Целью проводимых авторами исследований является повышение эффективности инфраструктуры передачи сообщений в распределённых информационных системах за счёт модернизации алгоритмов маршрутизации для обеспечения их масштабируемости и самостабилизации. В соответствии с данной целью были решены следующие задачи.

Проанализированы существующие системы передачи сообщений для выявления недостатков существующих подходов и определения путей их преодоления. Разработана формальная спецификация этих систем, которая позволила определить, что означает для системы передачи сообщений на основе архитектуры Публикация/Подписка «правильность» её функционирования и выполнение требований безопасности и живучести. Формализация систем Публикация/Подписка, позволяет описывать их поведение и проводить сравнительный анализ реальных систем с целью повышения эффективности процесса их функционирования. Существующие подходы к исследованию систем Публикация/Подписка используют интуитивное представление «правильности» их поведения, предложенная спецификация полезна не только для понимания деталей функционирования таких систем, она позволяет корректно оценивать «правильность» их функционирования.

Разработана обобщённая структура маршрутизации на основе содержимого, которая основана на предложенной формальной спецификации систем Публикация/Подписка и позволяет абстрактно описывать поведение алгоритмов маршрутизации, условия их самостабилизации и корректности функционирования. Предлагаемая структура жестко связывает продвижение уведомлений с таблицами маршрутизации и позволяет настраивать её абстрактную функцию на конкретный алгоритм маршрутизации. Предлагаемый подход является достаточно гибким и позволяет на его базе реализовывать и исследовать различные алгоритмы маршрутизации. Сформулирован универсальный критерий достаточности, позволяющий сравнивать возможные реализации предложенной обобщенной структуры и обосновывать корректность их поведения.

В предложенную обобщенную структуру маршрутизации встроена функция самостабилизации системы, использующая ме-

тод аренды подписки, когда подписки клиентов не постоянны, и периодически должны возобновляться, что позволяет системе восстанавливаться от произвольных переходных ошибок в пределах допустимого времени. Кроме того, в предложенную обобщенную структуру маршрутизации внедрен механизм издания рекламных объявлений, что позволяет осуществлять гораздо больший контроль над публикацией уведомлений, и обеспечивает масштабируемость системы.

В соответствии с разработанной обобщенной структурой маршрутизации рассмотрен ряд перспективных алгоритмов, использующих различные механизмы: «наводнение», простую маршрутизацию, маршрутизацию на основе идентичности и на основе покрытия фильтров с целью их модификации для обеспечения задачи масштабируемости.

Функционирование предлагаемой службы передачи уведомлений рассмотрено на примерах реализации простых, событийно-управляемых приложений с использованием разработанных алгоритмов маршрутизации и инфраструктуры системы Rebeca. Проведен сравнительный анализ предложенных алгоритмов маршрутизации и получены оценки их основных характеристик. Полученные аналитические результаты сопоставлены с результатами экспериментов для подтверждения их адекватности.

Монография состоит из теоретической и практической частей.

Теоретическая часть представляет формальную спецификацию системы Публикация/Подписка, обобщенную структуру и ряд алгоритмов маршрутизации.

Практическая часть представляет реализацию службы уведомления системы Публикация/Подписка, которая использует разработанные алгоритмы маршрутизации с поддержкой рекламных объявлений. Представлена детализированная оценка реализованных алгоритмов и программ.

Полученные результаты могут быть использованы при реализации различных интеграционных решений при разработке их инфраструктуры передачи сообщений: в распределенных виртуальных организациях, распределенных вычислениях, в распределенных корпоративных информационных системах с целью повышения эффективности их функционирования за счёт обеспечения масштабируемости и самостабилизации.

Структурно монография состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и 5 приложений.

В первой главе показано, что для распределённых информационных систем, состоящих из множества удалённых приложений, выполненных на различных аппаратно-программных платформах, необходима разработка новых интеграционных решений, обеспечивающих эффективное и надежное взаимодействие между приложениями. Рассмотрены основные интеграционные задачи и проблемы, возникающие при их решении, определены преимущества *слабого связывания* интегрируемых приложений. Проведён анализ существующих способов интеграции приложений и обоснован выбор *асинхронной телекоммуникационной парадигмы Публикации/Подписки*. Проведён анализ существующих методов выбора уведомлений в таких системах, обоснован выбор уведомлений на основе их содержимого, а также необходимость дополнительных исследований, разработки новых более гибких алгоритмов маршрутизации.

Для понимания, сравнения и модернизации существующих систем обмена сообщениями, использующих механизм выбора уведомлений на основе содержимого, необходима разработка формальной спецификации, описывающей их семантику.

Во второй главе представлена спецификация систем публикации/подписки, использующая синтаксис линейной временной логики и обеспечивающая формальную основу для исследования системы (например, «правильности» её поведения). В рамках введенной спецификации дано определение системы публикации/подписки, отвечающей требованиям безопасности и живучести, которые должны быть удовлетворены для того, чтобы обеспечить корректное поведение системы. Условие безопасности гарантирует, что только соответствующие уведомления будут доставлены потребителям и что каждое уведомление будет доставлено не более одного раза. Условие живучести гарантирует, что, если потребитель осуществил некоторую подписку, то после определённого времени все соответствующие ей уведомления будут ему доставлены. Предлагаемая спецификация адаптирована к системам, отвечающим требованиям самостабилизации.

На основе введенной спецификации рассмотрена модель системы с асинхронным способом передачи сообщений, где топология

взаимосвязей брокеров представлена как связный неориентированный ациклический граф. В рамках введенной модели рассмотрены два сценария поведения системы: первый, когда система свободна от ошибок и, второй, когда система терпима к ошибкам при условии реализации в её структуре свойства самостабилизации. Стабилизация поведения системы реализуется с помощью методик, обеспечивающих восстановление системы от возникших произвольных переходных ошибок в пределах допустимого времени.

На основе предложенной модели введено формальное описание множества уведомлений, инициируемых каждым брокером согласно текущей конфигурации маршрутизации, и предложен алгоритм перенаправления уведомлений, основанный на таблице маршрутизации брокера. Введенные понятия конфигурации маршрутизации и перенаправления уведомлений позволили определить условия корректного поведения как статических, так и динамических систем публикации/подписки. Рассмотрен механизм рекламных объявлений, дано определение системы публикации/подписки с рекламными объявлениями, отвечающей требованиям безопасности и живучести.

В третьей главе предложена обобщённая структура для алгоритмов маршрутизации на основе содержимого сообщения. Формализация конфигурации маршрутизации введена на основе понятия допустимой маршрутной конфигурации, которая гарантирует, что все нужные уведомления будут доставлены потребителю. Поскольку в динамических системах публикации/подписки невозможно гарантировать, что маршрутная конфигурация всегда является «правильной», для них было введено понятие слабо допустимой маршрутизации, которая гарантирует, что после завершения процесса обновления соответствующих подписок, клиентам будут доставлены все интересующие их уведомления.

Для введенной формализации маршрутной конфигурации и обобщённой структуры маршрутизации дана иллюстрация их абстрактных функций в виде примеров конкретных алгоритмов маршрутизации. Введены достаточные условия, которым абстрактная функция структуры должна удовлетворять для того, чтобы конкретный алгоритм маршрутизации был корректным. Обобщённая структура маршрутизации использована для описания ряда алгоритмов и доказательства их «правильности» согласно введённому

критерию корректности: с «наводнением», с простой маршрутизацией, на основе идентичности фильтров, на основе покрытия и на основе слияния фильтров. Алгоритм, основанный на идентичности маршрутов, является упрощённой версией алгоритма, основанного на покрытии, а предложенный алгоритм, основанный на слиянии маршрутов, является более сложным и построен на основе объединения фильтров, позволяющего существенно сократить их количество. Рассмотрено также использование рекламных объявлений, и алгоритмы маршрутизации со самостабилизацией, построенные на основе метода аренды подписки.

Реализация систем публикации/подписки, являющаяся практической частью проведенных исследований, описана в *четвертой главе*, приведены примеры событийно-управляемых приложений, использующих службу уведомления архитектуры Rebeca. Использование в качестве единой среды для анализа и сравнения различных алгоритмов маршрутизации службы уведомления Rebeca обосновано тем, что эта служба полагается на разработанную обобщённую структуру фильтрации и может служить основой для оценки тех положений, которые были описаны в предыдущих главах. Как доказательство работоспособности предложенных алгоритмов, были рассмотрены следующие примеры приложений: самообновляющиеся веб-страницы, торговля акциями и виртуальная медицинская организация. Эти примеры показывают, что основные функциональные возможности разработанного прототипа являются работоспособными.

В *пятой главе* дана детализированная оценка разработанных алгоритмов маршрутизации на основе содержимого. Особое внимание обращено на специфические характеристики этих алгоритмов: размер таблиц маршрутизации и сложность фильтров, продвигающих уведомления. Выполненные эксперименты основаны на рабочем прототипе (службе Rebeca), позволившем осуществить корректное сравнение рассмотренных алгоритмов маршрутизации. Помимо размеров таблиц маршрутизации и сложности фильтров был исследован эффект местоположения потребителей, выполнена оценка «несовершенного» слияния фильтров.

В *заключении* приведены основные полученные теоретические и практические результаты, выводы и направления будущих исследований.

В *приложении 1* приведен анализ существующих моделей распределенных систем, послуживший основой выбора предлагаемого интеграционного решения.

В *приложениях 2 и 3* приведены обзор и анализ существующих сервисов уведомлений, послужившие основой выбора для проведения представленных исследований службы уведомлений архитектуры Rebeca.

В *приложениях 4 и 5* для виртуальной медицинской организации, представленной в качестве реализованного приложения, приведены более подробные описания процессов выполнения фазы Формирование и фазы Деятельность.