

Санников Михаил Александрович, бакалавр
Уфимский университет науки и технологий
Sannikov Mikhail Aleksandrovich
Ufa University of Science and Technology

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ PUBLISH/SUBSCRIBE ДЛЯ ОБМЕНА ДАННЫМИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ APPLICATION OF THE PUBLISH/SUBSCRIBE MODEL FOR DATA EXCHANGE IN DISTRIBUTED ROBOTIC SYSTEMS

Аннотация. Рассмотрена модель publish/subscribe как основа обмена данными между компонентами распределённых робототехнических систем. Проанализированы принципы DDS и ROS 2, политики качества обслуживания, особенности надёжной и ненадёжной доставки, а также подходы к разделению телеметрии, сенсорных потоков и управляющих сообщений.

Abstract. The publish/subscribe model is reviewed as a basis for data exchange between components of distributed robotic systems. DDS and ROS 2 principles, quality-of-service policies, reliable and best-effort delivery, and separation of telemetry, sensor streams, and control messages are analyzed.

Ключевые слова: Publish/subscribe, DDS, ROS 2, робототехника, QoS, распределённые системы.

Keywords: Publish/subscribe, DDS, ROS 2, robotics, QoS, distributed systems.

Введение

Робототехническая система редко состоит из одного монолитного процесса. Камеры, лидары, одометрия, планировщик движения, контроллеры приводов, интерфейс оператора и диагностические сервисы работают с различной частотой и имеют разные требования к доставке данных. При прямом соединении каждого производителя информации со всеми потребителями число связей быстро растёт, а изменение одной подсистемы начинает затрагивать остальные. Модель publish/subscribe уменьшает связанность: отправитель публикует данные в логический канал, а заинтересованные потребители подписываются на него.

Data Distribution Service (DDS) формализует data-centric publish/subscribe и предоставляет механизмы управления качеством обслуживания, обнаружения участников и доставкой данных [1]. В ROS 2 коммуникационный слой абстрагирован через RMW и может использовать реализации DDS или другие совместимые middleware [3]. Такой подход удобен для робототехники, поскольку позволяет строить распределённый граф узлов без фиксированного центрального брокера. Цель статьи – рассмотреть, как свойства publish/subscribe и политики QoS должны соотноситься с различными классами робототехнического трафика.

Принципы DDS и распределённого обмена

В DDS основными сущностями являются DomainParticipant, Publisher, Subscriber, DataWriter, DataReader и Topic. Производитель записывает типизированные данные через DataWriter, а потребитель получает их через соответствующий DataReader. Согласование выполняется по имени темы, типу данных и совместимым политикам качества обслуживания [1]. Такая схема отделяет семантику данных от конкретного сетевого адреса узла и упрощает динамическое подключение новых потребителей.

На сетевом уровне спецификация DDSI-RTPS определяет взаимодействие между реализациями DDS и ориентирована на работу поверх стандартных IP-сетей. Протокол предусматривает как best-effort, так и надёжный обмен, механизмы обнаружения и отсутствие обязательной центральной точки отказа [2]. Для мобильных роботов это принципиально: состав участников может меняться, часть вычислений может выполняться на борту, а часть – на внешнем компьютере или операторской станции.



При этом логическая независимость компонентов не отменяет физические ограничения сети. Большие сообщения фрагментируются, беспроводной канал теряет пакеты, а большое число подписчиков увеличивает объём трафика. Поэтому тема должна проектироваться не только по смыслу данных, но и с учётом частоты публикации, размера сообщения и того, действительно ли каждому потребителю требуется каждый экземпляр.

Политики качества обслуживания

Ключевое преимущество DDS – возможность задавать разные политики QoS для разных тем. В ROS 2 профиль QoS включает, в частности, history, depth, reliability и durability [4]. Политика history определяет, сколько образцов сохраняется в очереди; depth ограничивает её глубину; reliability выбирает best effort или reliable; durability определяет необходимость сохранения данных для поздно подключившихся потребителей.

Для высокочастотных сенсорных потоков, например кадров камеры или данных лидара, часто важнее получить свежий образец, чем гарантированно доставить каждый предыдущий. В таком случае best effort и небольшая глубина очереди уменьшают риск накопления устаревших данных. Для команд управления, событий безопасности и результатов, которые нельзя незаметно потерять, предпочтительна надёжная доставка. Однако reliable не означает отсутствие задержек: при потерях сеть должна тратить ресурсы на подтверждения и повторные передачи.

В DDSI-RTPS надёжность реализуется с использованием служебных сообщений, позволяющих обнаруживать пропуски и запрашивать недостающие последовательности [2]. В беспроводных сетях это создаёт дополнительный трафик, а крупные сообщения повышают вероятность того, что потеря одного фрагмента задержит сборку всего образца. Поэтому настройка надёжности должна учитывать размер сообщений и качество канала. Исследования производительности ROS 2 показывают, что характеристики middleware зависят от конфигурации и сценария обмена [5].

Разделение классов робототехнического трафика

Рациональная архитектура не должна использовать один и тот же профиль доставки для всех тем. Сенсорные потоки, телеметрия, команды и события имеют разные свойства. Для телеметрии состояния допустимо периодическое обновление с небольшой очередью: если несколько предыдущих значений устарели, достаточно получить последнее. Для управляющей команды, наоборот, необходимо дополнительно учитывать срок её актуальности: запоздалая команда может быть хуже потерянной.

Политики deadline, lifespan и liveliness помогают описывать временные свойства обмена. Deadline задаёт ожидаемый интервал поступления данных, lifespan ограничивает срок жизни образца, а liveliness позволяет контролировать наличие активного производителя [6]. В робототехническом контуре это позволяет не только доставлять сообщения, но и обнаруживать деградацию источника. Например, отсутствие обновлений одометрии в течение заданного времени должно рассматриваться как отказ или переход в аварийное состояние.

Отдельно следует проектировать диагностический и сервисный трафик. Логи, метрики и служебные запросы полезны для эксплуатации, но при перегрузке не должны вытеснять команды управления или критичные измерения. Если сеть общая, приоритеты обеспечиваются сочетанием частоты публикации, размера очередей, QoS и сетевых механизмов. Чем раньше классы трафика разделены на уровне архитектуры, тем проще обеспечить предсказуемое поведение системы.

Масштабирование и отказоустойчивость

Publish/subscribe упрощает расширение системы: новый подписчик может подключиться к существующей теме без изменения кода производителя. Это полезно при добавлении записи, визуализации или алгоритма анализа данных. Однако масштабирование увеличивает стоимость обнаружения и передачи. Многоадресная рассылка потенциально



уменьшает число копий одного сообщения, но её эффективность зависит от реализации и конфигурации сети; при высокой нагрузке поведение может отличаться от интуитивно ожидаемого [7].

Для надёжной эксплуатации важно избегать скрытых зависимостей между узлами. Если безопасность движения зависит от внешнего компьютера, потеря беспроводного канала превращается в системный отказ. Критические функции остановки, контроля приводов и локального восприятия целесообразно сохранять на борту. Внешние узлы могут получать телеметрию и формировать высокоуровневые задания, но робот должен иметь определённый безопасный режим при исчезновении связи.

Наблюдаемость также должна быть частью архитектуры. Необходимо контролировать частоту публикаций, пропуски deadline, состояние liveliness и загрузку канала. Это позволяет отличать отказ источника от перегрузки сети и быстрее находить несогласованные QoS-профили, из-за которых издатель и подписчик могут не установить совместимое взаимодействие.

Заключение

Модель publish/subscribe хорошо соответствует распределённой структуре современных робототехнических систем. DDS предоставляет типизированный обмен, обнаружение участников и богатый набор QoS, а ROS 2 использует middleware-абстракцию для интеграции таких механизмов в граф робототехнических узлов [1, 3]. Основное практическое преимущество состоит не только в снижении связанности, но и в возможности задавать разные свойства доставки для разных классов данных.

Сенсорные потоки целесообразно ориентировать на свежесть данных и ограничение очередей, критические команды – на контролируемую надёжность, а диагностические сообщения – на невмешательство в основной контур. Политики deadline, lifespan и liveliness дополняют транспортную надёжность временными требованиями. Такой подход повышает предсказуемость распределённой системы и позволяет адаптировать обмен к реальным ограничениям мобильной сети

Список литературы:

1. Object Management Group. Data Distribution Service (DDS), Version 1.4. OMG Document formal/2015-04-10. 2015.
2. Object Management Group. DDS Interoperability Wire Protocol (DDSI-RTPS), Version 2.5. OMG Document formal/2022-04-01. 2022.
3. Open Robotics. ROS 2 Documentation: Middleware Implementations. ROS 2 Documentation.
4. Fernandez E. ROS 2 Quality of Service Policies. ROS 2 Design. 2019.
5. Maruyama Y., Kato S., Azumi T. Exploring the Performance of ROS2 // Proceedings of the 13th International Conference on Embedded Software. 2016.
6. Open Robotics. ROS QoS – Deadline, Liveliness, and Lifespan. ROS 2 Design.
7. Peeroo K., Popov P., Stankovic V. Exploring the Effects of Multicast Communication on DDS Performance. 2022

