

Применение датчиков и беспроводных технологий для IoT

В статье подробно описаны некоторые наиболее распространенные применения «Интернета вещей» в промышленности, где для управления и контроля за критически важными процессами, а также для оповещения о различных событиях используются беспроводные датчики.

Тину Оза (Tinu Oza)

Беспроводные сенсорные сети (WSN) проникли практически во все мыслимые области нашей жизни — от «умных» домов и интеллектуальных носимых устройств до «Индустрии 4.0» и «умного» города. Они обеспечивают автоматизацию простого ручного труда с помощью дистанционно управляемых приводов и систем мониторинга посредством современных микроэлектромеханических систем (МЭМС). Эти относительно простые устройства с малым энергопотреблением раскрывают огромный потенциал в области сбора и анализа данных, применяемых для оценки различных систем, оборудования и целых производств.

В промышленном IoT (IIoT) для поддержки различных сенсорных узлов можно использовать беспроводные решения малого радиуса действия, сотовую связь и энергоэффективную сеть дальнего радиуса действия (LPWAN). Выбор средств промышленной связи зависит от того, является ли процесс критичным по времени, требуется ли получение данных в режиме реального времени и допускается ли осуществлять периодическую передачу данных с меньшими или большими интервалами. В зависимости от конкретной задачи существует множество вариантов использования IIoT, в которых могут быть задействованы различные сенсорные технологии и/или протоколы связи (рис. 1).

Мониторинг технологических процессов

Мониторинг технологических процессов, вероятно, станет самым главным способом применения промышленных беспроводных сенсорных сетей, поскольку для него требуется размещать и отслеживать от тысяч до десятков тысяч сенсорных узлов на огромных площадях. Этот централизованный метод отслеживания производственных операций позволяет реализовать стратегии прогнозного технического обслуживания, которые благодаря своей систематичности сводят к минимуму время простоя предприятия и снижают эксплуатационные расходы.

Обеспечение работоспособности станков

Узкоспециализированное оборудование используется во всем IIoT, поскольку мониторинг распространенных неисправностей имеет решающее значение для поддержания оптимальной производительности оборудования. Например, высокотехнологичные станки с числовым программным управлением (ЧПУ), способные выполнять прецизионную обработку деталей в режиме «24x7», часто сталкиваются с неисправностями, связанными с дисбалансом шпинделя.

При возникновении такой неисправности дисбаланс массы в системе шпинделя вызывает вибрацию станка, что в конечном итоге

Таблица 1. Беспроводные технологии, используемые в IoT

Параметры	Рабочая частота	Максимальная дальность	Пропускная способность	Задержка	Ширина полосы пропускания	Срок службы батареи	Количество устройств
WirelessHART	2,4 ГГц	~200 м	250 кбит/с	10–50 мс	3 МГц	Несколько лет	30 000
ISA 100.11a	2,4 ГГц	~200 м	250 кбит/с	~100 мс	5 МГц	Несколько лет	Неограниченно
LoRa	915 МГц (США), 868 МГц (Европа), 433 МГц (Азия)	5–20 км	0,3–50 кбит/с	–	7,8–500 кГц	Более 10 лет	50 000
NB-IoT (LTE Cat NB2)	Диапазоны сотовой связи	1–10 км	159 кбит/с	1,6–10 с (NB1)	180 кГц	Более 10 лет	100 000
LTE-M2 (LTE Cat M2)	Диапазоны сотовой связи	Более 11 км (M1)	4 Мбит/с (DL), 7 Мбит/с (UL)	10–15 мс (M1)	5 МГц	–	Более 100 000
Sigfox	868 МГц, 902 МГц	Более 50 км	100–600 бит/с	–	100–600 Гц	Более 10 лет	–
Bluetooth 5 Low Energy	2,4 ГГц	Менее 200 м (P2P), менее 1,5 км (mesh)	1–3 Мбит/с	Менее 3 мс	~2 МГц	–	32 767
Wi-Fi	2,4; 3,6; 4,9; 5; 5,9 ГГц	Менее 90 м	Более 54 Мбит/с	1–3 мс	~22 МГц	–	–

ухудшает точность и приводит к дальнейшему его повреждению, если вовремя не выполнить ремонт [1]. Как правило, подшипники внутри шпинделя анализируются на наличие вибраций, поскольку именно они позволяют валу оставаться на месте во время вращения, и для этих компонентов нехарактерные вибрации легко распознаваемы.

Акселерометры способны отслеживать и обнаруживать такие отказы станков, собирая данные о вибрации. Ультразвуковые и акустико-эмиссионные датчики могут выявить повреждения в подшипниках шпинделя до появления заметных вибраций, распознавая ультразвуковые акустические волны, возникающие в результате разрушения металла. Зная номинальный тепловой режим, датчики температуры способны обнаруживать температурные аномалии в различных важных компонентах станка. Индуктивный датчик тока определяет изменения тока, потребляемого электродвигателем, и таким образом помогает выявлять аномалии.

Эти же принципы применимы к любому крупному механизму, имеющему в своем составе большой электродвигатель. Краны, например, часто используются на производственных объектах для перемещения крупногабаритного и тяжелого оборудования, начиная с легковых автомобилей и заканчивая самолетами. Шкивы и электродвигатели можно обнаружить в механизмах конвейерных лент, которые используются в широком спектре промышленных объектов, включая добычу угля, пищевую промышленность и химическую сегрегацию. Акселерометры, датчики температуры и индуктивные датчики тока оптимальны для надлежащего мониторинга такого оборудования [2].

Мониторинг активов

Производители нефти и газа контролируют такие активы, как трубопроводы, распределенные по огромной территории. В этой отрасли любой ценой избегают возникновения утечек и разрывов, способных привести к гибели людей и ущербу окружающей среде. Существует несколько типичных видов серьезных неисправностей трубопровода, включая заводской дефект, неправильный монтаж, коррозию и такие внешние воздействия, как землетрясения, оползни и экстремальные погодные условия [3].

Устанавливаемые снаружи акселерометры способны контролировать скорость потока в трубопроводе, отслеживая вызванные им вибрации. Мониторинг трещин осуществляется с помощью ультразвукового обнаружения или методом поиска утечки магнитного потока. Коррозионные разрушения можно предотвратить, применив нескольких типов датчиков с использованием таких технологий, как RFID и волоконная оптика. Сейсмические датчики предоставляют карту недр, повышая эффективность морских буровых установок.

На предприятиях химической, пищевой и фармацевтической промышленности смесительные емкости перемешивают химические вещества и ингредиенты, добавляемые в смесь в точных пропорциях. Датчики, размещенные в ключевых

местах этих резервуаров, измеряют температуру, влажность, давление, значение pH и уровень заполнения, обеспечивая оптимальное выполнение технологических процессов практически без вмешательства оператора.

Протоколы «Интернета вещей», предусмотренные в системах мониторинга процессов, существенно различаются в зависимости от поставленной задачи. В таблице 1 перечислены часто используемые протоколы IoT и некоторые из их ключевых параметров. Часто беспроводные сенсорные сети отслеживают работоспособность

оборудования в пределах объекта, занимающего относительно небольшую площадь.

В тех случаях, когда небольшие объемы данных передаются нечасто, применяются энергоэффективные сети дальнего радиуса действия (LPWAN), такие как LoRa, Sigfox и NB-IoT, использующие метод узкополосной модуляции на субгигагерцевых частотах, что обеспечивает высокую дальность передачи сигнала. LPWAN известны не только дальностью действия, но и длительным временем автономной работы, превышающим 10 лет,

Примеры использования IIoT	Области применения	Применяемые технологии	Применяемые протоколы
Мониторинг технологических процессов/Прогностическое обслуживание	Контроль работоспособности станков (станки с ЧПУ, конвейерная лента)	Датчики температуры Камеры Датчики влажности Датчики давления Датчики уровня Газовые датчики Датчики приближения Акустические датчики Химические датчики Акселерометры	LPWAN WirelessHART ISA 100.11a Сотовая связь ZigBee
	Мониторинг оборудования (гидравлические шланги, трубопроводы, скважины, конденсатоотводчики, коррозия /целостность конструкций, сейсмический мониторинг, уровень заполнения резервуара)	Газовые датчики Химические датчики Датчики освещенности ИК-датчики Камеры	Wi-Fi Сотовая связь Bluetooth ISA 100.11a WirelessHART LPWAN
	Дистанционная визуализация (датчики силы, лазерные измерительные устройства, камеры)	Bluetooth-маячки RFID Камеры ИК-датчики	Bluetooth Wi-Fi UWB
Управление производственными объектами	Мониторинг здоровья и безопасности (выбросы/токсины) Мониторинг/управление окружающей средой (освещение, кондиционирование воздуха, «умная» система учета) Охрана периметра	Модули GPS	Сотовая связь LPWAN NB-IoT LTE-M1
Управление материальными ресурсами	Отслеживание материальных активов (RTLS)		
Управление транспортным парком	Отслеживание грузовиков, разработка маршрута		

Рис. 1. В зависимости от конкретного применения существует множество вариантов использования IIoT, в которых могут быть задействованы различные сенсорные технологии и/или протоколы связи

а также архитектурой «один ко многим», в которой тысячи устройств могут подключаться по беспроводной сети к шлюзу (когда сенсорные узлы исчисляются десятками тысяч, решающее значение приобретают технологии сбора энергии из окружающей среды и срок службы батареи).

Однако протоколы LPWAN обычно являются асинхронными, и передача данных осуществляется незапланированным образом. Поэтому они подвержены конфликтам при передаче данных на фоне невысокой пропускной способности сети, что не подходит для критически важных по времени задач IIoT, которым требуется детерминированная и надежная передача данных с низким коэффициентом битовых ошибок (BER). Отраслевые беспроводные сети, в частности WirelessHART и ISA100.11a, основаны на низкоскоростных беспроводных персональных сетях IEEE 802.15.4 (LR-WPAN). При максимальной дальности действия 200 м они имеют пропускную способность до 250 кбит/с и задержки 10–100 мс, обеспечивая эффективную связь в режиме реального времени для критически важных процессов.

Здоровье и безопасность

Мониторинг условий окружающей среды с помощью соответствующих интеллектуальных систем сигнализации имеет важное значение для защиты промышленных рабочих и поддержания бесперебойного функционирования. В зонах особого риска часто используются датчики газа и химических веществ.

В нефтегазовой промышленности отслеживание утечек легковоспламеняющегося метана имеет первостепенное значение для предотвращения взрывов возле скважин. В конденсатоотводчиках используется широкий спектр производственного оборудования, служащего для отбора конденсата из воздуха, предотвращая выброс пара в окружающую среду. Неисправный конденсатоотводчик не сможет задерживать капли воды из пара, что приведет к накоплению воды и разрыву паропроводов, последующему дорогостоящему ремонту и угрозам безопасности.

Для предотвращения подобных дорогостоящих поломок применяются акустические датчики и датчики температуры, контролируемые характеристики этих критически важных компонентов. Подземные шахты печально известны опасными условиями. Для обеспечения безопасных условий труда активно контролируются такие параметры среды, как концентрация монооксида углерода (угарного газа) и метана, а также скорость воздушного потока.

Для этих задач необходимы надежные и детерминированные протоколы, поэтому

часто связь внутри объекта осуществляется по протоколу WirelessHART или ISA100.11a. Хотя при использовании этих протоколов потребление электроэнергии на сенсорных узлах может быть больше, чем при эксплуатации других технологий беспроводных сенсорных сетей, таких как Bluetooth Low Energy (BLE) или LPWAN, возможность выполнять анализ и контроль в режиме реального времени имеет решающее значение для обеспечения адекватных мер безопасности.

Как WirelessHART, так и ISA100.11a были специально разработаны для применений в промышленных средах. WirelessHART — это беспроводная альтернатива существующим технологиям HART, а ISA100.11a был разработан Международным обществом автоматизации (ISA) для поддержки нескольких протоколов, уже используемых в промышленности, включая HART, Modbus, Foundation Fieldbus и ProfiBus. Оба протокола позволяют строить звездообразные и ячеистые сети с двунаправленной связью между хостом и датчиками [4].

Отслеживание активов с помощью RTLS

По сравнению с наружными системами отслеживания, которые полагаются на GPS и обычно обеспечивают точность около 10 м, внутренние системы позиционирования (IPS), в том числе системы определения местоположения в реальном времени (RTLS), могут достигать той же и даже более высокой точности, не принимая во внимание проблему плохого проникновения спутниковых сигналов через заводские стены. В таблице 2 перечислены некоторые из наиболее часто используемых RTLS.

Внутренние системы позиционирования применяются на производственных площадках для активного отслеживания перемещений оборудования, такого как вилочные погрузчики, и контроля за состоянием запасов при транспортировке по территории предприятия. Вне помещений, например на площадках для грузовых автомобилей, RTLS может использоваться для мониторинга и управления движением грузовиков, назначая погрузочную площадку и отслеживая погрузку/разгрузку грузов.

В зависимости от имеющегося беспроводного протокола системы внутреннего позиционирования используют либо метод трилатерации, либо метод «отпечатков» радиосигнала (fingertip). Трилатерация применяет расчетные расстояния для вычисления наиболее вероятных координат объекта. Метод отпечатков сравнивает текущие характеристики сигнала, исходящего от датчика, с ранее занесенными в базу наборами сигналов, полученных из разных местоположений (отпечатков), таким образом отслеживая перемещения датчика. С технической точки зрения реализация этого метода часто становится более сложной задачей. Для краткости в этом разделе будут рассмотрены два популярных протокола RTLS — Bluetooth и UWB.

Использование UWB для RTLS

Сверхширокополосная технология (UWB), по сути, посылает импульс энергии чрезвычайно короткой продолжительности (менее наносекунды), в результате чего получается

широкополосный сигнал. Отправка широкополосных импульсов энергии, как правило, является энергоемким процессом. Однако система UWB может быть спроектирована таким образом, чтобы сформировать радиочастотную сигнатуру с низкой вероятностью обнаружения (LPD) с низкой плотностью энергии, не создающей помех близко расположенному оборудованию.

Короткие импульсы, создаваемые при UWB-модуляции, позволяют точно оценивать задержку, что в конечном итоге помогает получить данные о местоположении объекта. Как правило, технология UWB использует информацию о времени прибытия сигналов (ToA) и разнице во времени прибытия сигналов (TDoA), генерируемых метками (маломощными источниками UWB-импульсов) и принимаемых датчиками или считывателями UWB.

Эти импульсы используются для прецизионной трехмерной локализации метки с точностью до сантиметра. Однако для успешного получения данных о местоположении необходима точная синхронизация времени между считывателями UWB, работающими в сети.

Частоты UWB распределены в диапазоне 3,1–10,6 ГГц. Как правило, в устройствах UWB предусмотрены плоские несимметричные антенны со всенаправленной диаграммой, обеспечивающие стабильный входной импеданс в широкой полосе частот. Благодаря своей эффективности в X-диапазоне частот сантиметровых длин волн и тому факту, что размеры антенн уменьшаются на более высоких частотах, эти антенны позволяют создавать решения небольшого форм-фактора, которые можно располагать на той же печатной плате, где смонтирована микросхема приемопередатчика [5].

Bluetooth-маячки

Помимо того что BLE уже является популярным протоколом малой дальности, модули BLE используются для систем определения местоположения в реальном времени. В таких системах имеются Bluetooth-маячки, передающие сигналы, используемые для определения местоположения. В частности, эти маячки могут применяться как датчики приближения, передавая пакеты данных в виде низкоэнергетических сигналов через заранее заданные интервалы времени (> 100 мс).

Расстояния вычисляются на основе данных показателя уровня принимаемого сигнала (RSSI) с помощью экстраполяции расстояний между узлами на основе математической зависимости между уровнем принимаемого сигнала и дальностью распространения радиочастотного сигнала в пространстве [6]. Это создает карту объектов в реальном времени, снабженную уникальными идентификаторами и тегами BLE с активно обновляемыми данными о местоположении. Поскольку протокол Bluetooth поддерживает большинство интеллектуальных устройств (например, смартфоны, планшеты, ноутбуки), это, вероятно, устранил потребность в специальном оборудовании и позволит существенно снизить затраты.

Во время как BLE поддерживает ячеистые топологии с двунаправленной связью,

Таблица 2. Технологии отслеживания материальных активов

Технология	Точность	Отслеживание в реальном времени	Дальность
Bluetooth	1–4 м	Да	~75 м
Wi-Fi	5–15 м	Да	~50 м
UWB	Менее 1 м	Да	~50 м
Пассивная RFID	Менее 1 м	Нет	~50 м

маячки BLE обычно обеспечивают только одностороннюю связь и поэтому ограничены звездообразными топологиями. В таких конфигурациях маячки подключаются к устройству/маршрутизатору с поддержкой Bluetooth, которые в свою очередь передают информацию в облако, обычно посредством сотовой связи или Wi-Fi.

Как упоминалось ранее, многие из этих маячков могут содержать мультипротокольные SoC с передатчиками субгигагерцевой беспроводной связи дальнего действия, применяемой для управления производственным освещением, отоплением, вентиляцией и кондиционированием и другой инфраструктурой с помощью интеллектуальных систем.

Обычно конструкции маячков BLE включают антенну с частотой 2,4 ГГц, размещенную на печатной плате, и модуль Bluetooth. В некоторых случаях модуль Bluetooth имеет встроенную керамическую антенну. Если бы устройство (маячок) работало по субгигагерцевому протоколу передачи данных, антенна на печатной плате была бы нецелесообразной из-за ее больших размеров.

Как правило, для определения местоположения BLE обычно использует метод трилатерации (RSSI). Для него хорошо подходит всенаправленная диаграмма направленности, обеспечивающая 360-градусную зону охвата в заводском цеху, при условии, что антенна соответствует импедансу передатчика, обеспечивая таким образом максимальную передачу сигнала и дальность действия (рис. 2). Однако BLE допускает реализацию алгоритма TDoA, в котором вычисляется либо два угла по одному сигналу маячка, либо три угла по двум сигналам. В этом случае, с использованием сложного картографирования и размещения BLE-маячков, оснащенных более сложными антенными решетками, появляется возможность создания трехмерной карты [7].

Управление транспортным парком

Схемы управления транспортным парком варьируются в зависимости от того, состоит ли он из легковых автомобилей, тракторных прицепов, железнодорожного подвижного состава, самолетов, судов или тяжелой техники. На грузовые автомобили приходится 70% грузов, перевозимых в США, что повышает роль логистики, включая ремонт, замену и плановое техническое обслуживание, в предотвращении неудовлетворительной работы транспортного парка. Как правило, для задач, выходящих за рамки завода, используется инфраструктура сотовой связи. Однако в случае локально эксплуатируемого оборудования, такого как тяжелая техника, работающая в шахте, целесообразно рассмотреть возможность применения LPWAN.

Телематика парка может взаимодействовать с инфраструктурами 2G, 3G и 4G и другими технологиями сотовой связи, специфичными для «Интернета вещей», например NB-IoT или LTE-M1. Сенсорные узлы могут состоять из модулей GPS, гироскопов, датчиков уровня и акселерометров. GPS предоставляет данные о местоположении, акселерометр определяет ориентацию автомобиля, а датчик уровня топлива измеряет расход топлива в режиме реального времени.

Заключение

В зависимости от требуемого уровня надежности, задержки передачи сигнала и гибкости промышленные сети могут работать с различными датчиками и протоколами связи. Мониторинг процессов, охрана труда и техника безопасности часто требуют обмена данными в режиме реального времени с использованием протоколов на основе IEEE 802.15.4 (например, ISA100.11a, WirelessHART), в то время как некоторые задачи по мониторингу активов

могут выиграть от использования большой дальности, предлагаемой LPWAN.

Отслеживание объектов внутри помещений осуществляется с помощью специальных систем локализации с алгоритмами на основе ToA или RSSI. С другой стороны, системы управления автопарком для получения данных о местоположении могут полагаться на GPS, но они должны передавать все данные датчиков в централизованный сервер посредством сотовой связи. Для этих целей можно использовать и LPWAN, если автопарк базируется на ограниченной территории. ■

Литература

1. Zhan W. et al. Optimization and Experiment of Mass Compensation Strategy for Built-In Mechanical On-Line Dynamic Balancing System // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 4.
2. Zhou C. et al. Industrial Internet of Things: (IIoT) applications in underground coal mines // Mining engineering. 2017. Vol. 69. No. 12.
3. Kishawy H., Gabbar H. Review of pipeline integrity management practices. International // Journal of Pressure Vessels and Piping. 2010. Vol. 87. No. 7.
4. Peter M. Industrial wireless mesh network architectures. L-com Global Connectivity. www.l-com.com/images/downloadables/white-papers/wp_wireless-industrial-mesh-networks.pdf
5. Lu Y., Huang Y., Chattha H. T., Cao P. Reducing Ground-Plane Effects on UWB Monopole Antennas // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. Vol. 10.
6. Boukerche A., Oliveira H. A. B. F., Nakamura E. F., Loureiro A. A. F. Localization systems for wireless sensor networks // IEEE Wireless Communications. 2007. Vol. 14. No. 6.
7. Bluetooth Direction Finding. www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/developer/RDF_Technical_Overview.pdf.

