

# Беспроводная платформа локализации мобильных объектов компании Nanotron

для горнодобывающей промышленности

**Одной из актуальных задач горнодобывающей промышленности является повышение безопасности труда шахтеров. Эта статья знакомит читателей с беспроводной локализационной платформой компании Nanotron, предназначенной для мониторинга мобильных объектов, и предлагает пути повышения безопасности и эффективности работ, выполняемых в шахтах.**

Томас Ферсте (Thomas Foerste)  
T.Foerste@nanotron.com

Татьяна Кривченко  
tkr@efo.ru

## Оперативная эффективность в шахтах

Наблюдение в реальном времени за людьми и машинами в шахтах не только помогает во многих случаях повысить безопасность работников, но и приводит к увеличению эффективности производственных процессов, а также позволяет сократить время возврата инвестиций.

Поскольку в шахтах навигационные спутниковые системы недоступны, то нужны альтернативные методы локализации для определения координат объектов. При этом можно выделить системы локализации, в которых необходимо вычислять только относительные расстояния между объектами, и системы, требующие знания абсолютных координат. Компания Nanotron производит компоненты для отслеживания относительных расстояний и абсолютных координат, а также для создания смешанных систем. Рассмотрим несколько примеров приложений, где нужно определять абсолютные координаты или относительные расстояния.

## Пример оптимизации перевозок материалов в шахтах

Узкие подземные дороги часто предназначены для проезда по туннелю только одного транс-

портного средства, что приводит к снижению пропускной способности (рис. 1). Дополнительные объездные пути и перекрестки со светофорами ведут к дальнейшему снижению скоростей. Вместе с тем наблюдение за движением транспортных средств позволяет предугадать точное время прибытия транспорта к светофору. Светофоры, работающие по требованию, значительно сокращают время простоя. Дополнительное наблюдение за приближающимся к светофору транспортом оптимизирует работу светофора и увеличивает пропускную способность. Если, например, три машины движутся к светофору друг за другом в одном направлении, то оптимизация могла бы заключаться в том, чтобы светофор дал возможность проехать всем трем машинам за один период своей работы, не разрывая движение колонны для того, чтобы разрешить проезд одному грузовику по пересекающемуся пути. Результатом будет являться повышение пропускной способности и экономия горючего. Это только общий пример оптимизации движения в шахтах, требующий знания абсолютных координат транспортных средств. Организаторы движения в шахтах, безусловно, смогут найти больше возможностей для повышения эффективности перевозок в каждом конкретном случае.



Рис. 1. Подземный туннель в шахте

## Пример автоматизации контроля доступа

Автоматический мониторинг людей в шахтах может осуществляться даже если они находятся внутри транспортного средства, движущегося по туннелю. Система мониторинга определяет личность водителя и пассажиров в реальном времени при приближении к контрольному пункту, оснащённому шлагбаумом. Базируясь на информации о расстоянии до приближающихся объектов и о том, с какой стороны они движутся, система контроля доступа открывает ворота в такой момент, чтобы приближающийся транспорт, имеющий право на проезд, мог бы проследовать контрольный пункт без остановок. При анализе направления,

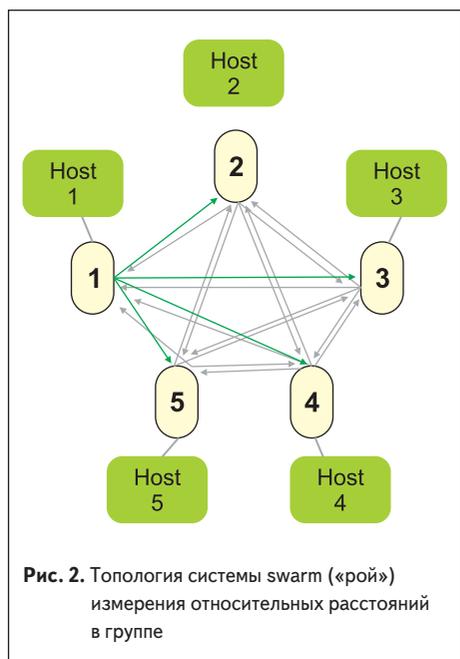


Рис. 2. Топология системы swarm («рой») измерения относительных расстояний в группе

по которому приближается транспортное средство, в такой системе потребуются знание абсолютных координат. Если направление не имеет значения, то необходимыми данными будет являться только относительное значение расстояния до приближающегося к шлагбауму объекта.

### Пример системы предотвращения столкновений

Ограниченная видимость и утомление водителя становятся главными причинами большинства аварий с участием транспортных средств в шахтах. Своевременное предупреждение водителей и пешеходов шахтеров о приближающихся транспортных средствах помогает предотвратить гибель и ранения людей, порчу машин и оборудования. Для построения такой системы машины и люди в шахтах оснащаются электронными метками, позволяющими выполнять автоматический мониторинг относительных расстояний мобильных объектов между собой. Если какое-либо расстояние не удовлетворяет требованиям безопасности, например шахтер находится

слишком близко к транспортному средству, то сигнал тревоги предупреждает человека о возможном столкновении.

### Платформа swarm контроля относительных расстояний

В системе swarm («рой») компании Nanotron все узлы могут свободно перемещаться и измерять относительные расстояния между собой (рис. 2). Узлы определяют расстояния до своих соседей путем обмена пакетами с ними и измерения времени распространения радиосигналов (ToF — Time of Flight), скорость которых известна и равна скорости света. При этом радиоузлы являются автономными и никакая дополнительная инфраструктура не требуется.

Электронные радиоузлы, называемые метками, прикрепляются к объектам, за которыми осуществляется наблюдение, — людям, транспортным средствам, ценным грузам.

Имеются различные виды аппаратного исполнения мобильных меток. Можно выделить четыре обязательные составляющие радиометки — приемопередатчик nanoLOC, микроконтроллер, антенна и источник питания (рис. 3). Благодаря линейно-частотной модуляции приемопередатчик nanoLOC компании Nanotron позволяет определять время поступления радиосигнала с точностью до нескольких наносекунд. Микроконтроллер содержит программу, учитывающую все особенности аппаратной части и поддерживающую по последовательному каналу аппаратно независимый командный интерфейс (API — Application Peripheral Interface) для связи с хост-процессором. Приемопередатчик и микроконтроллер с интегрированным программным обеспечением swarm предлагаются компанией Nanotron в виде модулей swarm.

На рис. 4 показаны два возможных аппаратных исполнения модуля swarm. Первый вариант представляет собой отладочную плату BNSWR01S (рис. 4а), а второй — компактный радиомодуль swarm Bee LE (рис. 4б).

Функциональные возможности узлов swarm определяются их встроенным программным обеспечением. С точки зрения логики поведения в сети узлы swarm бывают одного из трех типов: активный, пассивный и sniffер.

Активный узел всегда имеет управляющий хост-процессор, по команде которого он иницирует процесс измерения расстояния между двумя узлами и обменивается данными с другими узлами. Активный узел может перейти в пассивный режим. Пассивный узел может не иметь управляющего хост-процессора. Он не иницирует процесс измерения расстояния и не обменивается информацией с другими узлами, а только отвечает на запросы измерения расстояния от других узлов. Sniffer слушает эфир и передает информацию своему хост-процессору, он не может иницировать запросы на измерение расстояния и передачу данных.

В сети swarm возможно выполнение следующих основных типов операций:

- идентификация узлов;
- измерение расстояния;
- передача данных;
- прослушивание сети.

Каждый узел сети swarm имеет уникальный идентификатор, заданный во время начального конфигурирования узла. Кроме этого каждому прибору назначается класс для выполнения групповых операций в системе. Периодически с установленным интервалом времени узлы swarm автоматически отправляют широковещательные идентификационные рассылки, в которых передаются идентификатор, класс узла и режим его работы. При желании эта функция может быть деактивирована. Каждый узел, получая идентификационные сообщения из сети от своих соседей, автоматически формирует и хранит в своей памяти таблицу присутствующих в сети узлов с указанием времени последнего полученного идентификационного сообщения. По запросу хост-процессора модуль swarm предоставляет информацию о присутствующих в сети узлах в последовательный канал.

Имея список присутствующих в сети узлов, активный узел может иницировать элементарный цикл измерения расстояния до любого узла в сети. После завершения этой операции хост-процессор активного узла получает результат измерения расстояния. Кроме того, активный узел автоматически выполняет широковещательную рассылку с результатом измерения, если такая рассылка была разрешена при конфигурировании. Таким образом, все узлы, находящиеся в зоне радиослышимости, получают результат измерения и сохраняют его в памяти swarm-

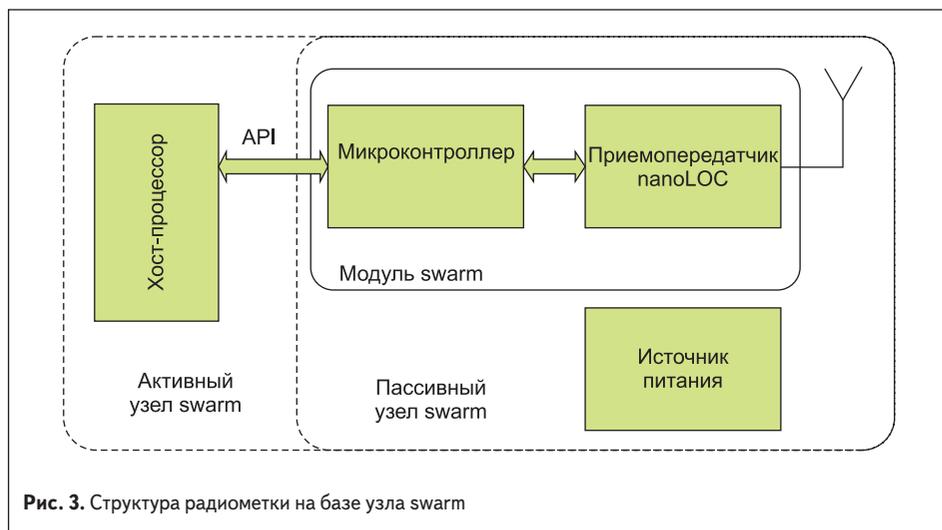


Рис. 3. Структура радиометки на базе узла swarm



Рис. 4. Варианты исполнения модулей swarm:  
а) отладочная плата BNSWR01S;  
б) радиомодуль swarm Bee LE

модуля в специальной таблице расстояний, которую может запрашивать хост-процессор. Хост-процессор может запрашивать таблицу расстояний любого узла. Каждый узел может запретить измерять расстояния до себя.

Помимо измерения расстояний в сети swarm-узлы способны обмениваться произвольными данными. Например, пересылать информацию со своих датчиков в диспетчерскую или, наоборот, получать из центра сообщения для шахтеров. Обмен данными в сети swarm осуществляется между активными узлами. Каждый активный узел посылает сообщение длиной до 128 байт на другой активный узел, используя соответствующую API-команду. Если хост-процессор узла-приемника «хочет» получить данные, он должен заранее разрешить нотификацию данных. При поступлении из сети сообщения приемный модуль swarm сохраняет его в своей памяти и сообщает хост-процессору о том, что принято новое сообщение от определенного узла. Хост-процессор может запросить у модуля swarm принятое сообщение.

Кроме применения специализированных пакетов передачи данных, существует и возможность передавать данные внутри пакетов, предназначенных для измерения расстояния. Для этого узел, иницирующий измерение, при помощи соответствующих API-команд должен, во-первых, разрешить передавать данные во время измерения расстояния и, во-вторых, заполнить данными специальный буфер, который будет использоваться при выполнении ближайшей операции по измерению расстояния.

Наконец, помимо адресной передачи данных в сети swarm предусмотрена и широковещательная рассылка данных.

Модули swarm могут переводиться в энергосберегающий режим по команде API, которая устанавливает длительность интервала времени, начинающегося сразу после выполнения модулем идентификационной рассылки и в течение которого модуль остается в рабочем режиме. Когда энергосберегающий режим включен, модуль swarm может отвечать на запросы измерения расстояния и обмена данными только в этот установленный интервал бодрствования. Все пакеты, посланные в другие моменты времени на модуль, находящийся в энергосберегающем режиме, игнорируются.

Ожидание необходимого момента времени для передачи данных на модуль, находящийся в энергосберегающем режиме, выполняется встроенным программным обеспечением модулей swarm. Конечный программист, разрабатывающий программу для хост-процессора, должен понимать, что API-команда хост-процессора будет передана на удаленный модуль не сразу — сначала она будет сохранена в буфере локального модуля swarm. Из-за ограниченного объема памяти модули swarm могут хранить только один пакет данных для передачи его на удаленный модуль.

Таким образом, платформа swarm помогает построить систему беспроводной связи мобильных объектов, позволяющую узлам контролировать расстояния между собой,

обмениваться дополнительными данными и при этом экономить энергию источника питания, периодически переходя в спящий режим.

### Система фиксированной локализации для определения абсолютных координат объектов

Локализационная система, определяющая абсолютные координаты объектов, содержит фиксированные радиоузлы с известными координатами, которые называются анкерами и являются референсными точками. Фиксированная система Nanotron измеряет не время распространения радиосигналов, как это происходит в системе swarm, а временную разницу поступления радиосигнала от мобильной метки на синхронизированные анкера (метод TDoA — Time Difference of Arrival). В этом случае мобильная метка излучает только идентифицирующий ширококвещательный сигнал и затем может переходить в спящий режим. Определение координат в системе фиксированной локализации не входит в задачу мобильной метки. Возможность для метки передавать только один очень короткий ширококвещательный пакет приводит к существенному снижению ее энергопотребления.

Задачу вычисления координат в системе фиксированной локализации Nanotron выполняет сервер, на который поступает информация от анкеров о времени поступления идентификационных сообщений мобильных меток. Поскольку

анкеры неподвижны, их соединяют стандартной проводной локальной сетью, обеспечивающей быстрый канал передачи данных между анкерами и сервером локализации. Проводная магистраль передачи данных с высокой пропускной способностью снижает нагрузку эфира, что позволяет увеличивать число одновременно обслуживаемых мобильных меток.

В зависимости от задачи абсолютные координаты объекта могут определяться в одномерной, двумерной или трехмерной координатных системах.

Особенность навигации внутри шахт состоит в том, что мобильные объекты перемещаются вдоль длинных и узких туннелей и стволов и обычно бывает достаточно знать только расстояние, пройденное вдоль туннеля. Информация о высоте и ширине не является существенной в большинстве случаев. Это значительно облегчает задачу локализации. Позиция может быть определена при помощи одномерной координатной системы, измеряющей расстояния от начала туннеля. В такой системе кривая, повторяющая форму туннеля, отображается на единственную координатную ось X. Изменения координат по осям Y и Z не рассматриваются (рис. 5). Каждая такая одномерная координатная система, соответствующая определенному туннелю, называется секцией. Поскольку шахта содержит множество туннелей и стволов, то центральное программное обеспечение на сервере представляет информацию от большого количества одномерных локализационных систем — секций (рис. 6).

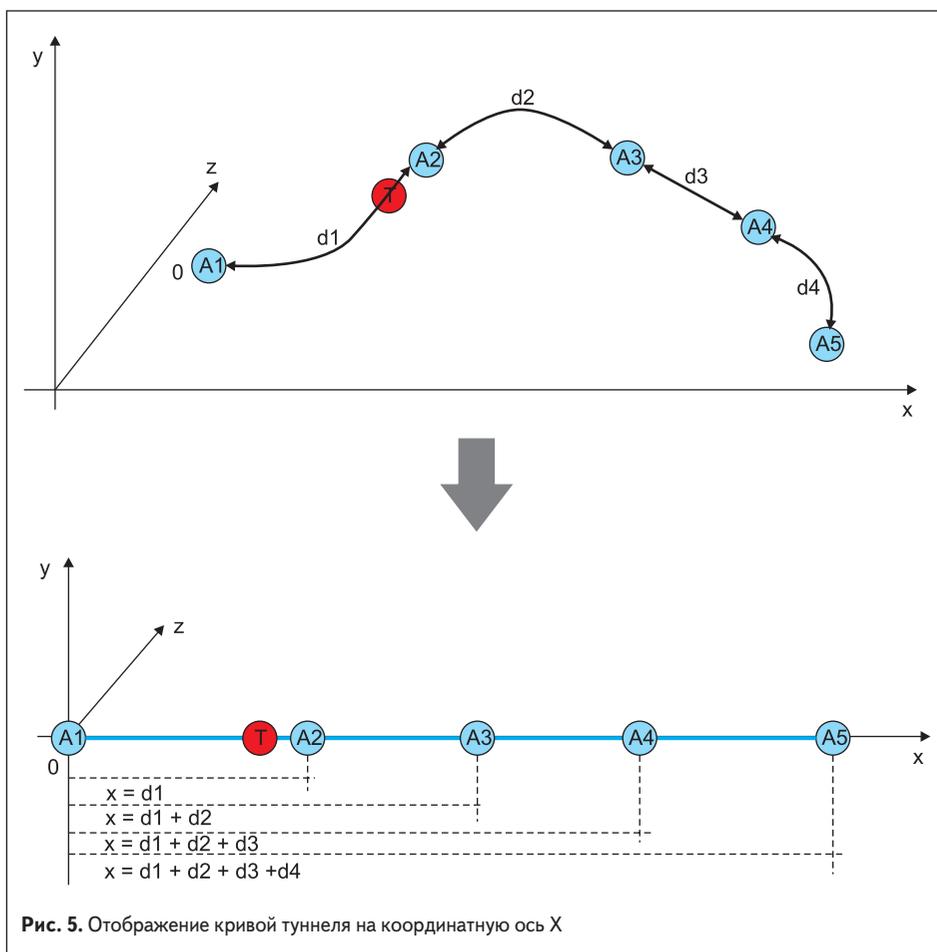


Рис. 5. Отображение кривой туннеля на координатную ось X

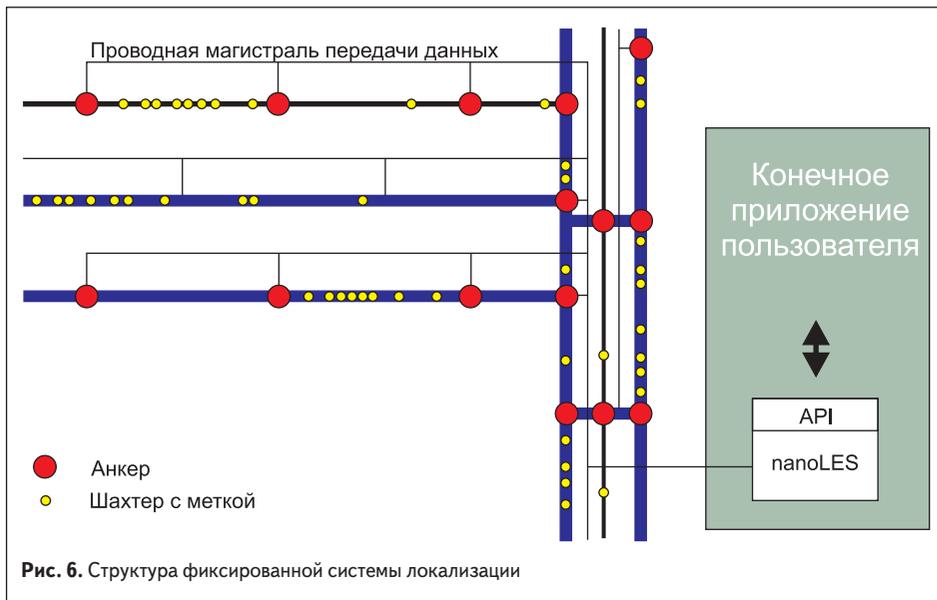


Рис. 6. Структура фиксированной системы локализации

В качестве единой магистрали данных, связывающей анкера с локализационным сервером, чаще всего используется канал Ethernet, но существуют и другие варианты проводной или даже беспроводной связи. При этом выбранный способ передачи должен обеспечивать достаточную пропускную способность, необходимую для мониторинга заданного количества мобильных объектов с требуемой частотой обновления координат. Локализационная технология Nanotron имеет возможность выдерживать большие значения задержек (до 300 мс) передачи данных в магистрали, связывающей анкера.

Все данные, собранные системой, можно разделить на два типа — данные реального времени и сохраненные исторические данные. Данные реального времени обеспечивают наблюдение за перемещениями в шахте в то время, когда эти перемещения происходят. Сохраненные исторические данные позволяют восстановить картину позже.

Программное обеспечение на сервере состоит из двух частей — локализационной программы nanoLES, поставляемой компанией Nanotron, и конечным приложением пользователя. Локализационная программа nanoLES принимает по локальной сети первичную информацию от анкеров и выполняет вычисление координат. Приложение пользователя на сервере получает значения координат от программы nanoLES через порт TCP, реализует необходимый для задачи графический интерфейс или преобразует информацию о координатах в события, интересующие пользователя. Например, тот факт, что рабочий приближается к воротам, может вызвать событие — открытие ворот, если рабочий имеет право на проход. В пакет программного обеспечения Nanotron входит демонстрационная версия конечного приложения, позволяющая наблюдать за перемещением мобильных меток в графической форме.

Мобильные радиоузлы, называемые метками, так же, как и в системе измерения относительных расстояний, прикрепляются к объектам, за которыми осуществляется наблюдение. Мобильные метки фиксированной системы

локализации могут быть построены на базе тех же самых модулей swarm Bee LE (рис.7в), что и в системе swarm, поскольку идентификационные широкополосные пакеты, рассылаемые swarm-узлами, имеют формат, воспринимаемый анкерами фиксированной системы локализации Nanotron. Такой модуль может, в частности, встраиваться в устройство управления лампой на каске шахтера. Для построения мобильной метки на базе модуля swarm Bee LE требуется только подключить питание и антенну. Вместе с тем, благодаря наличию последовательного интерфейса и документированных API-команд, имеется возможность усложнить функции мобильной метки. Так, добавив хост-процессор, разработчик сможет использовать преоператчик nanoLOC как беспровод-

ной канал связи между мобильным объектом и всей системой, а также выполнять измерение относительных расстояний между объектами. Наличие возможности переходить в энергосберегающие режимы позволяет использовать модуль swarm Bee LE в устройствах с батарейным питанием.

Кроме встраиваемых радиомодулей, компания Nanotron предлагает ряд готовых мобильных меток в корпусе. Метки nanoTAG RX (рис. 7а) имеют ударопрочное и влагозащищенное исполнение для применения на транспортных средствах и в опасных зонах. Метки имеют выводы для подключения внешнего источника питания и выполняют все функции стандартных меток фиксированной системы локализации и дополнительно могут посылать данные опциональных MEMS-датчиков в пакетах, предназначенных для локализационного сервера, что дает возможность применять дополнительные методы фильтрации при определении координат.

Метки nanoTAG LP (рис. 7б) имеют такую же функциональность, что и nanoTAG RX, но не требуют подключения внешнего источника питания, поскольку содержат встроенную батарею питания.

Метки nanoTAG, разработанные для системы фиксированной локализации, представлены на рис. 7г. Они имеют перезаряжаемый LiPo-аккумулятор и датчик ускорения для определения факта движения. Пользователь имеет возможность задать различную частоту излучения широкополосных рассылок для режима, когда метка находится в движении и для неподвижного состояния.

Для реализации фиксированных узлов компания Nanotron предлагает использовать готовые анкера в корпусе и два варианта исполнения встраиваемых анкеров (рис. 8).



Рис. 7. Варианты исполнения мобильных меток системы фиксированной локализации: а) nanoTAG RX; б) nanoTAG LP; в) swarm Bee LE; г) nanoTAG

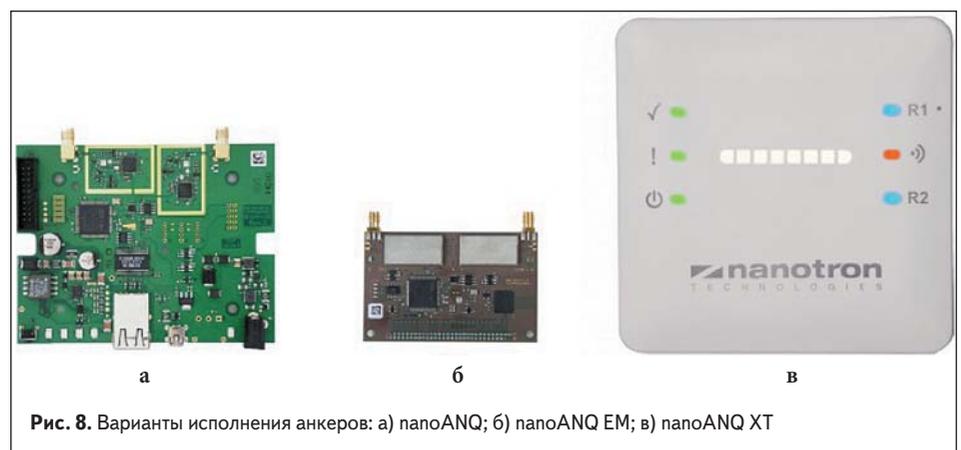


Рис. 8. Варианты исполнения анкеров: а) nanoANQ; б) nanoANQ EM; в) nanoANQ XT

Все анкера поставляются со встроенным сетевым интерфейсом для автоматического обмена пакетами по проводной магистрали данных.

Встраиваемый модуль nanoANQ (рис. 8а) представляет собой анкер, который имеет физический порт Ethernet с функцией PoE. Для присоединения внешних антенн предназначены два разъема SMA. Таким образом, можно использовать две антенны, направленные в противоположные стороны от анкера вдоль туннеля.

Встраиваемый анкер nanoANQ EM (рис. 8б) является новой продукцией компании Nanotron. Он имеет более компактное исполнение и меньшую стоимость. Для связи с коммуникационной проводной магистралью этот модуль содержит интерфейс 10/100 Мбит/с Ethernet, предназначенный для работы в режимах МП или RMP с трансивером Ethernet физического уровня. Разработчики также могут реализовать какой-либо другой интерфейс для организации магистрали передачи данных, например оптоволоконный или интерфейс RS-422. Модуль nanoANQ EM позволяет выполнять соединение точка-точка или гирляндное соединение (daisy chain). Он также хорошо подходит для взрывозащитного исполнения, поскольку обладает малым энергопотреблением и опциональной буферной памятью для временного хранения данных на анкере, если нарушена коммуникационная инфраструктура, например в результате аварии. Анкер, изображенный на рис. 8в, поставляется в корпусе и имеет влагозащищенное исполнение IP65, встроенные антенну и узел PoE.

## Планирование фиксированной системы мониторинга

Системные интеграторы применяют встраиваемую локализационную платформу Nanotron для создания законченной охранной системы или системы мониторинга в шахте. Процесс интеграции системы начинается с планирования, разработки программного обеспечения верхнего уровня, включает установку на объекте и дальнейшее сопровождение. Для помощи инсталляторам компания Nanotron предоставляет примеры программного обеспечения верхнего уровня и аппаратные средства.

При планировании фиксированной системы мониторинга следует учитывать длину туннеля и необходимое максимальное количество меток, частоту обновления координат, а также детали производственного процесса, во время которого происходит перемещение наблюдаемых объектов.

Конфигурация шахты и коммуникационная инфраструктура, которая уже может существовать (или может не существовать) в шахте, определяет разбивку системы мониторинга на отдельные секции.

Плотность людей в различных сценариях обычно определяет максимально необходимую пропускную способность системы, в то время как число работающих в шахте людей позволяет вычислить общее количество

требуемых в системе меток. Ожидаемое время работы меток без смены батарей определяет тип используемой метки.

Важный параметр системы — точность позиционирования. Эта характеристика зависит от окружения, в котором будет разворачиваться система. Одним из основных источников погрешностей определения расстояния в системе Nanotron является многолучевое распространение сигналов. Тесты показали, что в большинстве случаев удается достигнуть того, чтобы погрешности лежали в пределах 3 метров с доверительной вероятностью 95%. Вместе с тем отмечается, что погрешность, вызванная многолучевым распространением для каждой точки системы, является систематической, поэтому в стационарных системах можно добиться снижения погрешности, вводя дополнительные корректирующие поправки.

Количество анкерных, меток и максимальное расстояние между анкерами — это важнейшие, но не единственные факторы, влияющие на стоимость системы мониторинга. Принимая во внимание, что длина туннелей составляет несколько десятков, сотен, а в некоторых случаях и тысяч километров, значительный вклад в стоимость системы может вносить цена магистрали передачи данных, связывающей анкера. Снижение стоимости магистрали передачи данных часто обеспечивается тем, что коммуникационная инфраструктура в шахтах устанавливается не только для решения задач локализации. Встраиваемые анкера Nanotron позволяют системным интеграторам внедрить локализационную функциональность в уже существующую коммуникационную инфраструктуру шахты.

На стоимость системы в целом оказывает влияние и такой параметр, как расстояние между анкерами. Максимальное расстояние между анкерами зависит от набора факторов, одним из которых является используемая частота. Для подземного мониторинга оптимальна частота 2,4 ГГц. Более высокие частоты быстрее затухают с расстоянием и, следовательно, могут поддержать только ограниченные отрезки. Более низкие частоты, 434 и 868 МГц, позволяют передавать сигналы на более далекие расстояния, но из-за ограниченности ширины частотной полосы возрастает погрешность позиционирования.

На частоте 2,4 ГГц многие факторы влияют на максимальное расстояние между анкерами. Особое значение имеют ширина и высота туннеля, поскольку радиосигнал распространяется в форме эллиптического луча и энергия сигнала поглощается тем больше, чем ближе расположены стены туннеля. Не менее важным фактором является и выбор антенны. Патч-антенны и директорные антенны создают узкие направленные пучки, концентрирующие энергию в одном или двух заданных направлениях. Встраиваемая система локализации компании Nanotron обеспечивает полную свободу в выборе места установки антенны. После установки не требуется никакой

калибровки. В фиксированной системе локализации Nanotron анкера имеют возможность измерять расстояния между собой. Это очень важно для выполнения регулярных проверок исправности инфраструктуры системы, в частности выявления анкерных местоположений, которые изменились. Аналогично могут быть идентифицированы и заменены анкера, у которых повреждены антенны, например проходящими рядом транспортными средствами.

Тесты, проведенные инженерами Nanotron в шахтах, показали, что при стандартной длительности посылки 1 мкс даже в узких туннелях шириной 2,6 м анкера могли работать на расстояниях 450–500 м со стандартными патч-антеннами.

Аппаратная часть сервера, на котором запускается локализационное программное обеспечение, вносит относительно небольшой вклад в общую стоимость системы. Она может представлять собой сетевое устройство, соединенное с оптоволоконной магистралью или шиной Ethernet.

## Заключение

Технология Nanotron представляет собой гибкую встраиваемую платформу беспроводной локализации для построения разнообразных охраняемых систем в условиях отсутствия навигационных спутников. Локализационная платформа Nanotron способна определять как абсолютные координаты, так и относительные расстояния. Точность и быстродействие технологии позволяют осуществлять мониторинг объектов в режиме реального времени, а также сохранять данные для последующего анализа. Задачей системных интеграторов, которые используют технологию Nanotron для создания законченного проекта, является планирование системы в целом, выбор меток и анкерных, интеграция системы с оборудованием шахты, разработка программного обеспечения верхнего уровня на сервере и, возможно, усовершенствование программного обеспечения мобильных меток в соответствии с требованиями технического задания.

Вместе с решением основной задачи — повышения уровня безопасности работ, системы мониторинга мобильных объектов в шахтах могут одновременно способствовать увеличению эффективности производственных процессов. ■

## Литература

1. Nanotron's embedded location platform for surface and underground mines. 2014 White Paper on Mine Safety from Nanotron Technologies GmbH.
2. Swarm API 2.02. Document from Nanotron Technologies GmbH.
3. Кривченко Т. Программно-аппаратные методы измерения расстояния по времени распространения радиосигнала при помощи приемопередатчика nanoLOC // Беспроводные технологии. 2012. № 3.
4. [www.wless.ru](http://www.wless.ru)