

Отечественные электронные компоненты и модули для робототехники

Е. Старовойтов к. т. н.¹, Е. Скиба²

УДК 621.38 | ВАК 2.2.2

В настоящее время развитие многих областей экономики связано с широким внедрением в них изделий робототехники, самостоятельно выполняющих сложные задачи либо с минимальным участием человека-оператора. Роботизация обеспечивает качественно новый уровень развития производства, транспорта, специальной техники и т. д. Для интенсивного развития отечественной робототехники необходим переход на электронные компоненты и модули российской разработки, что позволит преодолеть зависимость промышленности от иностранных производителей комплектующих.

Конструкция практически любого робота включает большое количество комплектующих разных типов, многие из которых являются критическими для полноценного функционирования изделия. Основные характеристики робота определяются его системой управления, возможности которой в свою очередь зависят от используемых электронных компонентов. Не будет преувеличением сказать, что микроэлектроника является одним из основных драйверов развития робототехники.

Интенсивное развитие отечественной робототехники в значительной степени сдерживается зависимостью промышленности от иностранных производителей комплектующих, в том числе ограниченной номенклатурой российской компонентной базы и существующими решениями.

В статье представлены разработки отечественной промышленности, которые предлагается использовать для импортозамещения электронных компонентов и модулей иностранного производства, применяемых в робототехнике.

К типовым функциональным модулям робота относятся: управляющие микроконтроллеры обработки сигналов чувствительных датчиков,

микроконтроллеры для подключения к каналам информационного обмена, навигационные и чувствительные датчики, интерфейсы связи с другими системами и оператором (рис. 1).

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ

Управление роботом включает в себя обработку команд управления и информации от чувствительных датчиков, для чего используются микропроцессорные системы. Выбор архитектуры микропроцессорной системы определяется типом и назначением робота.

При использовании мини-ЭВМ и микропроцессоров требуются дополнительные модули памяти



Рис. 1. Типовые функциональные модули системы управления мобильного робота

¹ АО «НИИМА «Прогресс», заместитель начальника отдела разработки смешанных СВЧ-модулей.

² АО «НИИМА «Прогресс», начальник отдела главного конструктора.

с необходимым объемом и быстродействием, выполненные в виде отдельных конструктивных элементов. По этой причине в робототехнике широко распространены более компактные и специализированные однокристалльные микроконтроллеры, выигрывающие по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению.

Для системы управления робота простой конструкции может быть достаточно единственного микроконтроллера в виде одной микросхемы (монопроцессорная система управления).

Одной из основных решаемых микроконтроллером задач является вычисление абсолютных и относительных координат исполнительных органов. При достаточно сложной кинематике и высокой скорости подвижных частей для решения обратной задачи кинематики может оказаться недостаточно одного микроконтроллера. Также это относится к решению обратной задачи динамики. Здесь возникает необходимость использования на втором уровне управления многопроцессорных структур с распараллеливанием решения задачи.

Дальнейшее усложнение конструкции робота связано с использованием уже нескольких микроконтроллеров, составляющих мульти- или многопроцессорную систему управления. Число используемых микроконтроллеров зависит от их производительности, а синтез алгоритмов их совместной работы выполняется исходя из требований к функционированию в режиме реального времени.

Многопроцессорные системы управления могут быть:

- централизованными или иерархическими;
- децентрализованными;
- мультиагентными.

Второй и третий типы систем являются сложными в реализации и имеют высокую стоимость, поэтому используются в ограниченном количестве.

В наиболее распространенной централизованной многопроцессорной системе управления исполнительные органы (механизмы) связаны с микроконтроллерами, которые, в свою очередь, управляются ЭВМ разных уровней. Пример такой системы показан на рис. 1.

Так, типовая схема программного управления состоит из нескольких микроконтроллеров, каждый из которых управляет одним или несколькими блоками (например, приводами), и центрального микроконтроллера (или ЭВМ), предназначенного для совместного группового управления устройствами второго уровня.

На втором уровне решаются задачи последовательной коррекции типа компенсатора, перекрестных связей, компенсации вариаций полезной нагрузки на рабочих органах и т. д. Выполнение функций адаптивного и интеллектуального управления, обработка информации от датчиков также выполняются отдельными микроконтроллерами.

Использование микроконтроллеров, объединенных в локальную сеть, позволяет реализовать распределенную систему группового управления роботами и робототехническими комплексами.

В отечественной робототехнике может применяться разработанный в АО «НИИМА «Прогресс» микроконтроллер К1948ВК018.

32-разрядный микроконтроллер на ядре RISC-V («Амур») К1948ВК018 имеет развитую периферию и аппаратный блок, поддерживающий отечественные стандарты защиты информации. Наличие 16-разрядного таймера с поддержкой ШИМ позволяет использовать микроконтроллер для управления аналоговыми устройствами, например электроприводами.

К1948ВК018 имеет 16 Кбайт RAM- и 8 Кбайт ROM-памяти, 256 бит OTP-памяти, блок вычисления контрольной суммы (CRC) и ускоритель симметричной криптографии, интерфейсы SPI, I²C, UART GPIO (16- и 8-разрядные), SPI Flash (QSPI).

НАВИГАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

Мобильные роботы все шире применяются в различных сферах деятельности, позволяя исключить необходимость присутствия там человека. Основными задачами, выполняемыми системой управления мобильных роботов, являются ориентация в пространстве, определение собственных координат и своего положения относительно других объектов, необходимых для прокладки маршрута.

Основным датчиком, позволяющим определять собственные координаты подвижного объекта вне помещений является навигационный приемник глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Для приема сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS/SBAS/GALILEO в АО «НИИМА «Прогресс» был разработан навигационный модуль ПРО-04М, на базе которого создана навигационная аппаратура (рис. 2). Основные



Рис. 2. Аппаратура навигационная ПРО-04/ПРО-04М

характеристики модуля ПРО-04М указаны в табл. 1.

Модуль ПРО-04М определяет текущие координаты и скорость носителя в реальном масштабе времени, формирует секундную метку времени и обменивается информацией с внешними устройствами.

Применение приемников ГНСС для определения местоположения робота будет затруднено в случае экранирования созвездия навигационных спутников рельефом местности или искусственными сооружениями, а при отсутствии сигнала навигационных спутников внутри экранированного помещения использование приемника ГНСС не представляется возможным.

Полноценной альтернативой ГНСС вне помещений являются локальные системы навигации (ЛСН), позволяющие определять координаты робота в плотной городской застройке, складках местности и в условиях воздействия мощных помех. Для развертывания ЛСН необходима установка подвижных или стационарных радионавигационных опорных станций (РОС), в зоне действия которых создается навигационное поле.

Доступность сигнала ЛСН обеспечивает непрерывную навигацию, независимо от наличия сигнала ГНСС.

В этой связи представляет интерес разрабатываемая АО «НИИМА «Прогресс» комплексированная навигационная система услуг навигации («КОНСУЛ») на основе ЛСН, в которой используются СБИС собственной разработки [1].

ЛСН «КОНСУЛ» может работать в запросном и в беззапросном режимах. В первом случае абонентский терминал потребителя должен включать в себя радиопередатчик. Для работы в беззапросном режиме осуществляется синхронизация абонентских терминалов и РОС.

Основные характеристики версии ЛСН «КОНСУЛ» на базе технологии LTE, работающей в беззапросном режиме, представлены в табл. 2.

Таблица 1. Основные характеристики модуля ПРО-04М

Параметр	Значение
Частотный диапазон, коды	L1 GPS C/A, L1 ГЛОНАСС СТ, GALILEO E1B, E1C SBAS L1
Количество каналов слежения	44
Режимы работы	Автономный, дифференциальный
Погрешность измерений в автономном режиме (СКО)	
Координаты на плоскости, м	<2,5
Высота, м	<4,0
Скорость, м/с	<0,03
Секундная метка времени (1PPS), нс	<30
Погрешность измерений в автономном режиме	
СКО, м	1,5
Время первого определения	
Холодный старт, с	<27
Теплый старт, с	<25
Горячий старт, с	<2
Повторный захват, с	<1
Чувствительность	
Обнаружение при холодном старте, дБмВт	-147
Обнаружение при горячем старте, дБмВт	-155
Слежение, дБмВт	-161
Частота выдачи данных, Гц	1, 2, 5, 10
Используемые системы координат	ПЗ-90.11, WGS-94
Протоколы выдачи информации	NMEA-0183 v. 4.10, v 00 binary
Условия эксплуатации	
Максимальная скорость, м/с	515
Максимальная высота, м	18 000
Максимальное ускорение, g	3,0
Диапазон рабочих температур, °С	-40...85
Потребляемая мощность	
Обнаружение, мВт	130
Слежение, мВт	70
Энергосберегающий режим (скважность 1 : 10), мВт	15
Напряжение питания, В	1,8
Габариты, мм	14,3×13,7×2,6
Интерфейсы	2 порта RS-232 (LVCMOS)

Таблица 2. Основные характеристики версии ЛСН на базе технологии LTE

Параметр	Значение
Используемый радиointерфейс	LTE-UTRA, 3GPP Release 9
Диапазон рабочих частот навигационного канала, МГц	350...370
Рабочая частота канала связи, МГц	250/2400
Ширина канала, МГц	5/10/20
Погрешность определения местоположения абонентского терминала, м	>0,1
Скорость передачи данных, Мбайт/с	3
Площадь покрытия, км ²	100

Группа из 2–6 РОС, расположенных на одной территории и излучающих на разных частотах, позволяет сформировать так называемые «соты» с кодовым разделением сигналов, из которых формируется радионавигационное поле ЛСН (рис. 3).

Перспективная ЛСН на базе технологии LTE является составной частью программно-аппаратной платформы для системы интеллектуальной навигации с использованием технологии искусственного интеллекта, разрабатываемой АО «НИИМА «Прогресс».

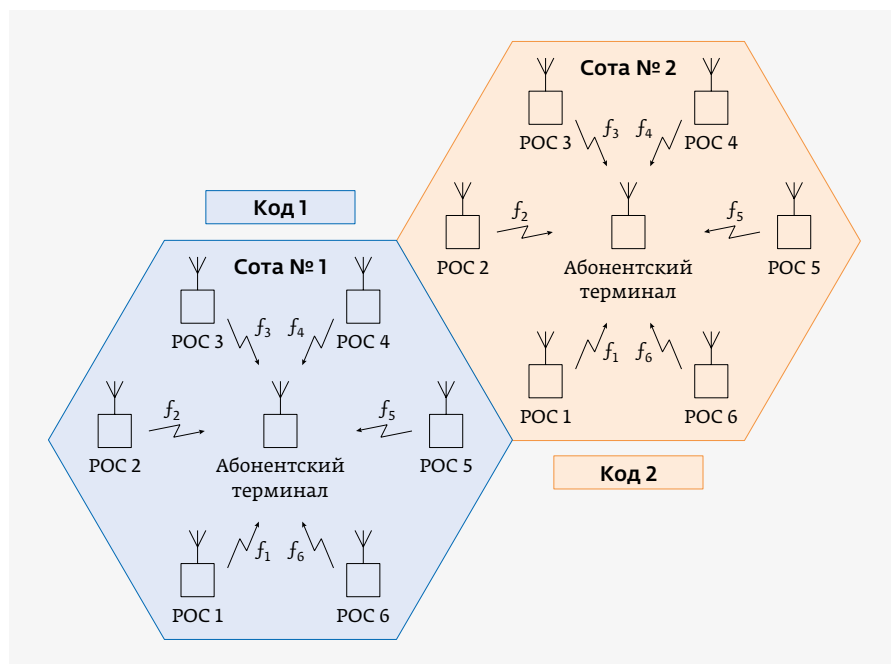


Рис. 3. Сотовая структура радионавигационного поля ЛСН

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ

К основным направлениям расширения функциональных возможностей мобильных роботов относится применение методов искусственного интеллекта. Искусственный интеллект используется в роботах для решения следующих задач:

- обработки информации от датчиков;
- оценки внешней обстановки и принятия решений;
- планирования поведения;
- управления движением;
- взаимодействия с человеком-оператором, другими роботами и оборудованием.

В интеллектуальных роботах выполняется комплексирование данных от чувствительных датчиков, работающих на разных принципах. Совместная обработка информации от этих датчиков повышает степень ее достоверности, снижает погрешности измерений и увеличивает надежность системы управления. При этом методы искусственного интеллекта могут использоваться и в самих датчиках, то есть на нижних уровнях обработки информации об окружающей среде [2].

Примером данного подхода является применение методов искусственного интеллекта для комплексирования инерциальной навигационной системы и спутникового навигационного приемника [3].

Методы искусственного интеллекта широко применяются в системах технического зрения для распознавания сложных образов в режиме реального времени. Необходимый уровень искусственного интеллекта мобильного робота зависит от степени неопределенности маршрута и сложности среды перемещения, а также выполняемых задач.

Особенность систем на базе искусственного интеллекта состоит в использовании механизмов хранения и обработки знаний для реализации роботом своих функций в неопределенных условиях внешней среды при случайных возмущающих воздействиях. Такие системы могут обладать средствами самообучения и пополнения знаний.

Самообучение интеллектуальных систем позволяет частично или полностью автоматизировать решение различных сложных аналитических задач, а комбинация различных видов самообучения позволяет добиться автоматизации большинства рутинных операций, выполняемых человеком-оператором.

АО «НИИМА «Прогресс» разрабатывает аппаратно-программный комплекс средств программно-аппаратной



Рис. 4. Внешний вид вычислителя NM Mezzo mini

платформы для системы интеллектуальной навигации с использованием технологии искусственного интеллекта, предназначенный для бесшовной навигации подвижных объектов на открытой местности, в условиях городской застройки, в зонах с затрудненным приемом сигналов ГНСС, в промышленных сооружениях и объектах критической инфраструктуры, внутри помещений.

В данном аппаратно-программном комплексе реализуются алгоритмы навигации с использованием методов искусственного интеллекта для анализа полного набора доступных навигационных данных, включая данные ГНСС, локальное радионавигационное поле, окружающую электромагнитную обстановку, видеоданные, результаты лазерного сканирования, а также, по необходимости, данные от других датчиков.

В качестве вычислительных средств используются нейропроцессорные вычислители отечественного производства, входящие в состав абонентских терминалов, устанавливаемых на подвижном объекте, и на сервере обработки информации.

Для использования на сервере может быть применен вычислительный модуль NM Card (разработка АО НТЦ «Модуль»), построенный на основе многоядерного DSP-процессора на базе оригинальной архитектуры Neuro Matrix Core 4 с управляющим RISC-процессором ARM Cortex A5 в форм-факторе PCI-e. Вычислитель в режиме реального времени решает задачи цифровой обработки больших массивов 32- и 64-разрядных данных с плавающей точкой одинарной и двойной точности.

Абонентский терминал потребителя должен иметь собственный вычислитель типа NM Mezzo mini (разработка АО НТЦ «Модуль», рис. 4), предназначенный для реализации нейронных сетей, цифровой обработки сигналов и изображений. Основные характеристики вычислителей NM Card и NM Mezzo mini указаны в табл. 3.

Таблица 3. Основные характеристики вычислителей NM Card и NM Mezzo mini

Параметр	NM Card	NM Mezzo mini
Процессоры		
DSP	16 тензорных ядер NMC4-1 ГГц	16 тензорных ядер NMC – 1 ГГц
RISC	5 RISC ядер Arm Cortex A5 – до 800 МГц, L2 Cache – 512 Кб	5 RISC ядер Arm Cortex A5 – до 800 МГц
Производительность	FP32-512 GFLOP/s FP64-128 GFLOP/s	FP32-512 GFLOP/s FP64-128 GFLOP/s
Память	5 Гб, 32 Гб/с	5 Гб, 32 Гб/с
Внутренняя память	76 Мбит	-
Потребляемая мощность	12 Вт / 35 Вт (макс.)	12 Вт / 25 Вт (макс.)
Интерфейсы	4×PCIe 2.0, Ethernet 10/100 Мбит/с (EDCL), GPIO (8 выходов), JTAG, SPI	4×PCIe 2.0 (Root и Endpoint), Ethernet 100 Мбит/с, GPIO (7 выходов), JTAG, SPI, UART/CAN, RTC*
Диапазон рабочих температур, °C	-60...85	-60...85
Корпус	1444 HFCBGA	1444 HFCBGA

* Пропускная способность интерфейсов межпроцессорного обмена 160 Гбит/с.

ИНТЕРФЕЙСЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА И МОДУЛИ СВЯЗИ

Для информационного обмена между чувствительными датчиками и вычислительными средствами системы управления робота, а также для подключения внешнего оборудования используются различные многоканальные интерфейсы.

Кроме того, с развитием робототехнических систем становится актуальной их интеграция с существующими сетями беспроводной связи для передачи команд управления, приема информации с борта, обновления программного обеспечения, облачных вычислений и т. д.

В настоящее время в робототехнике, особенно в бытовых и сервисных роботах, для информационного обмена широко применяется интерфейс USB, который может быть реализован с использованием созданных в АО «НИИМА «Прогресс» микросхем 1943BX015 и 1943BV015.

Микросхема 1943BX015 представляет собой концентратор интерфейса USB 2.0 и предназначена для обеспечения канала обмена между хостом и одним или несколькими устройствами на скорости до 480 Мбит/с. Микросхема определяет и устанавливает одно восходящее и до четырех нисходящих подключений в наборе с синтезатором частоты на основе ФАПЧ (PLL), блоками физического уровня интерфейса USB 2.0 и блока управления энергопотреблением.

Микросхема преобразования интерфейса USB 2.0 в последовательный и параллельный интерфейсы 1943BV015 предназначена для преобразования интерфейса USB 2.0 High Speed 480 Мбит/с в набор скоростных последовательных интерфейсов UART, JTAG, SPI параллельные интерфейсы FIFO и порты прямого ввода вывода GPIO.

Основные характеристики микросхемы 1943BV015 указаны в табл. 4.

Беспроводные интерфейсы связи Wi-Fi и Bluetooth кроме обмена данными также позволяют осуществлять навигацию мобильных роботов внутри экранированных помещений и закрытых сооружений, в которых невозможен прием сигналов ГНСС и ЛСН.

Для контроля за перемещением объектов в закрытых помещениях широко используется Bluetooth Low Energy (BLE) – радиочастотная технология беспроводной связи, представляющая собой энергосберегающий вариант технологии персональной сети Bluetooth (PAN), предназначенный для использования устройствами, подключенными к сети Интернет [4].

BLE использует скачкообразную перестройку частоты в нелицензируемом диапазоне радиочастот 2,4 ГГц для связи находящихся на расстоянии 10...20 м устройств с максимальной скоростью 1 Мбит/с при потребляемой мощности 0,01...0,50 Вт. Устройства с поддержкой BLE могут отключаться или переводиться в спящий режим

Таблица 4. Основные характеристики микросхемы преобразования интерфейса USB 2.0 в последовательный и параллельный интерфейсы 1943BV015

Параметр	Значение
Кол-во нисходящих портов, шт.	4
Кол-во преобразователей транзакций (МТТ), шт.	4
Поддерживаемые режимы восходящего порта	Full Speed (12 Мбит/с) High Speed (480 Мбит/с)
Поддерживаемые режимы нисходящих портов	Low Speed (1,5 Мбит/с) Full Speed (12 Мбит/с) High Speed (480 Мбит/с)
Напряжение питания, В	2,97...3,63
Динамический ток, мА	≤400
Диапазон рабочих температур, °С	-60...85
Корпус	МК 5157.64-1

между подключениями длительностью не более нескольких секунд, что позволяет снизить потребляемую ими мощность.

Для определения координат объектов в технологии BLE используются методы, использующие показатель уровня принимаемого сигнала (RSSI) и угол прихода сигнала (AoA), что позволяет обеспечить погрешность измерений около 0,1 м.

Созданный в АО «НИИМА «Прогресс» Wi-Fi + Bluetooth модуль ПР32-В3 предназначен для вычисления текущих

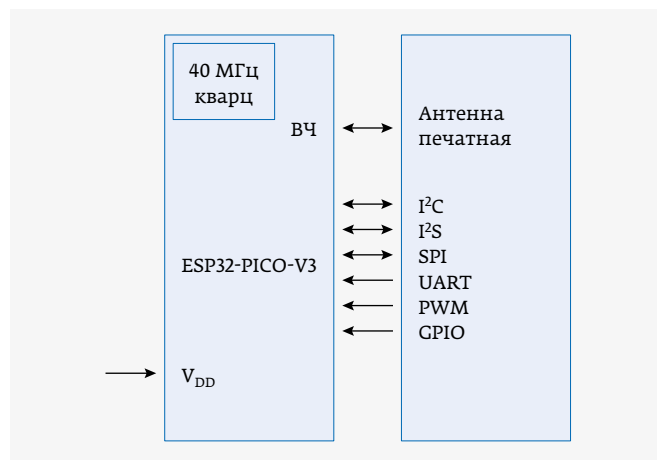


Рис. 5. Структурная схема модуля ПР32-В3

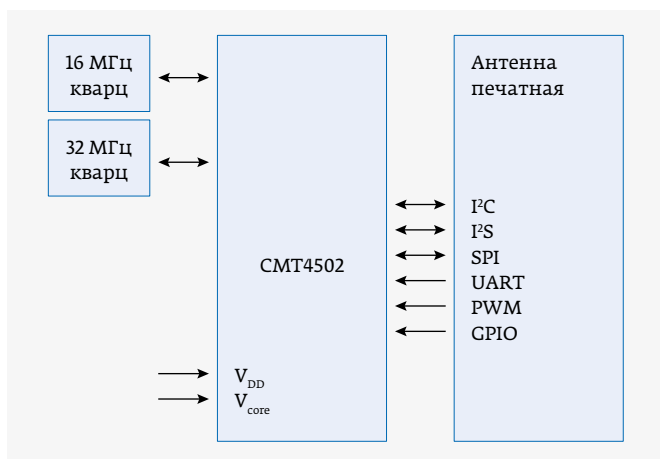


Рис. 6. Структурная схема модуля ПР4502

координат и скорости объекта в реальном масштабе времени в автономном и дифференциальном режимах, формирования секундной метки времени и обмена информацией с внешней аппаратурой (рис. 5). Еще одна разработка АО «НИИМА «Прогресс» – ПР4502 Bluetooth-модуль (рис. 6), предназначенный для реализации беспроводного канала связи и навигации. Основные характеристики модулей ПР32-В3 и ПР4502 указаны в табл. 5.

Для построения ЛСН также могут быть дополнительно использованы модули беспроводной связи, в которых применяются технологии GSM и LTE.

Таблица 5. Основные характеристики модулей ПР32-В3 и ПР4502

Параметр	ПР32-В3	ПР4502
Процессор	ESP32 embedded, Xtensa dual-core	MT4502 ARM® Cortex™-M0-bit processor, Up to 48 MHz
Wi-Fi	Стандарт 802.11 b/g/n	-
Скорость передачи данных	150 Мбит/с	-
Агрегация фреймов	A-MPDU, A-MSDU	-
Поддержка защитного интервала, мкс	0,4	-
Частоты рабочего канала, МГц	2412...2484	-
Bluetooth	v4.2 BR/EDR and BLE	Стандарт 5.0
Частоты рабочего канала, МГц	-	2 400...2 483
Память		
ROM	448 Кб (загрузки, функционал ядра)	128 Кб
SRAM	520 Кб (данные приложения)	128 Кб
SRAM (RTC)	16 Кб	-
Flash память	4 Мб (SPI Flash)	512 Кб
Интерфейсы		
UART	2 шт.	1 шт. (115 200 бод)
SPI	-	1 шт.
GPIO	-	Конфигурируемые выводы
Антенна	Встроенная (PCB)	Встроенная (PCB)
Напряжение питания, В	3,3	1,8...3,3
Чувствительность, дБм	-	-96
Мощность, дБм	-	≤8
Вывод прерывания	Есть	-
Используемые профили и протоколы	-	AP, GATT, SM, L2CAP, LL, RF-PHY

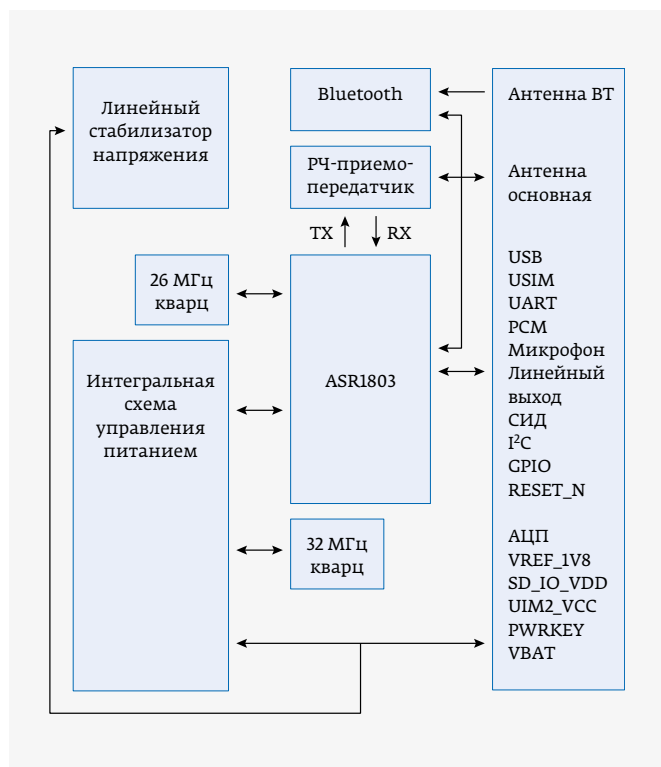


Рис. 7. Структурная схема модуля PP1803

Предлагаемый АО «НИИМА «Прогресс» навигационно-связной модуль PP1803 предназначен для обеспечения беспроводной связи на базе стандарта LTE Cat. 4. Структурная схема модуля представлена на рис. 7, а его основные характеристики указаны в табл. 6.

Представленные решения отечественных разработчиков позволяют реализовать основные блоки систем управления и навигации роботов различного назначения. Таким образом облегчается задача локализации производства на территории России наиболее распространенных типов роботов: промышленных, транспортных, сервисных и т. д.

Разработанные к настоящему времени навигационно-связные модули и задел по ЛСН позволяют осуществлять эксплуатацию мобильных роботов независимо от доступности сигналов ГНСС, в том числе в закрытых помещениях и сооружениях.

Расширение функциональных возможностей мобильных роботов, в первую очередь повышение их автономности, уже в ближайшее время будет достигаться за счет применения методов искусственного интеллекта. Создаваемые системы интеллектуальной навигации позволят обеспечить бесшовную навигацию роботов на открытой местности, в плотной городской застройке, на промышленных объектах и в закрытых сооружениях, экранирующих сигналы навигационных спутников ГНСС и от РОС из состава ЛСН.

Таблица 6. Основные характеристики навигационно-связного модуля PP1803

Параметр	Значение
Частотный диапазон LTE Cat. 4.	FDD-LTE: B3/B7/ B20 TDD-LTE: B38 UMTS/HSDPA/HSPA+: B1/B8 GSM/GPRS/EDGE: B3/B8
Поддерживаемые сетевые протоколы	TCP/IP, UDP/IP, HTTP/FTP
Скорость передачи данных	HSPA+: DL/UL 42/5,76 Мбит/с LTE Cat 4: DL/UL 150/50 Мбит/с
Технология передачи голоса	VoLTE
Интерфейсы	UART, USB, GPIO, I ² C, SDIO
Навигация по ГНСС	ГЛОНАСС/GPS
Напряжение питания	3,4...4,2 В
Варианты исполнения	LTE Cat. 4 + 3G + 2G (PP1803) LTE Cat. 4 + 3G + 2G + ГНСС (PP1803Н)
Габариты, мм	30,0 × 30,0

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корнеев И. Л., Кузнецов А. С., Королев В. С.** Режимы работы локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ». Потребители системы «КОНСУЛ» // НАНОИНДУСТРИЯ. Спецвыпуск. 2021. 7с. Т. 14 (107). С. 57–59.
2. **Юревич Е. И.** Сенсорные системы в робототехнике: учебное пособие. СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2013. 100 с.
3. **Аль Битар Н., Гаврилов А. И., Халаф В.** Методы на основе искусственного интеллекта для повышения точности интегрированной навигационной системы при отсутствии сигнала ГНСС. Аналитический обзор // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 3 (107). С. 3–28.
4. **Скиба Е. С.** Системы отслеживания активов на складах // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2023. № 1. С. 74–78.