

Навигационно-информационные решения для агротехники

Е. Старовойтов, к. т. н.¹, Е. Скиба²

УДК 629.056.8 | ВАК 2.2.2

Повышение эффективности сельскохозяйственного производства возможно благодаря внедрению робототехники и автоматизированных систем с искусственным интеллектом, освобождающих человека от выполнения монотонных операций в условиях воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды. В этой связи актуальными являются вопросы обеспечения высокоточной навигации и разработки датчиков обнаружения скрытых растительностью препятствий для автономных машинно-тракторных агрегатов (МТА), а также создание средств контроля за перемещением агротехники, прозрачностью деятельности сельхозпредприятий и расходом ГСМ. В статье представлены перспективные технические решения, позволяющие повысить безопасность эксплуатации и автономность агротехники, обеспечить контроль за ее перемещением.

ВЫСОКОТОЧНАЯ СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИЯ АГРОТЕХНИКИ

В современной агротехнике широко используется аппаратура спутниковой навигации, принимающая сигналы глобальных навигационных систем (ГНСС): ГЛОНАСС, GPS, BeiDou и Galileo. ГНСС-приемники позволяют определять координаты МТА, выдавать данные в систему параллельного вождения [1], систему управления беспилотным МТА или в телематическую платформу, предназначенную для мониторинга МТА.

Системы параллельного вождения позволяют достигнуть точности поддержания траектории движения в 20–40 см, достаточной для выполнения большинства сельскохозяйственных работ. Для выполнения некоторых операций точность должна быть увеличена до 2–4 см. ГНСС-приемник может обеспечить такие погрешности измерений только в режиме дифференциальных поправок, для получения которых он должен находиться в зоне покрытия контрольно-корректирующих станций.

При слабом сигнале ГНСС или его полной потере навигация невозможна. На условия приема сигнала навигационных спутников оказывают влияние рельеф местности и растительность; кроме того, при работе некоторых видов навесного оборудования (сельскохозяйственных орудий) могут возникать помехи, затрудняющие работу ГНСС-приемников [2].

Серьезной проблемой является то, что в отсутствие дифференциальных поправок от контрольно-корректирующих станций нельзя обеспечить автоматическое поддержание траектории МТА с погрешностью менее 40 см.

Дальнейшее совершенствование и улучшение характеристик, повышение эффективности ГНСС, а также спутниковых группировок типа «Сфера», «Рассвет-1», Starlink на низкой околоземной орбите (техн. жарг. – «низколетов») требует более глубокого исследования механизма ослабления радиосигнала на наклонных атмосферных трассах для создания методов его компенсации.

Учет потерь на трассе распространения радиосигнала с учетом влияния атмосферы Земли включает оценку поглощения в ионосфере, обусловленного столкновениями свободных заряженных частиц с нейтральными молекулами и атомами.

На частотах менее 3 ГГц влияние ионосферы может привести к задержке радиосигналов [3]. Эта задержка является одним из основных источников погрешности определения координат в одночастотных ГНСС-приемниках.

Суммарное среднеквадратическое отклонение (СКО) при измерениях псевдодальности до навигационного спутника составляет [4]:

$$\sigma = \sigma_{\text{шп}}^2 + \sigma_{\text{тр}}^2 + \sigma_{\text{ион}}^2 + \sigma_{\text{эф}}^2 + \sigma_{\text{мл}}^2 + \sigma_{\text{еш}}^2, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{шп}}$ – СКО ошибки измерений, обусловленной шумами приемника; $\sigma_{\text{тр}}$ – СКО ошибки измерений, вследствие тропосферной задержки; $\sigma_{\text{ион}}$ – СКО ошибки измерений, вызванной нескомпенсированной ионосферной

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

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

задержкой; $\sigma_{\text{эф}}$ – СКО ошибки измерений за счет координатно-эфемеридного обеспечения; $\sigma_{\text{мп}}$ – СКО ошибки измерений, вследствие многолучевости; $\sigma_{\text{еш}}$ – СКО ошибки измерений, обусловленной естественными шумами в зоне приема.

СКО ошибки измерений, вызванной ионосферной задержкой, равна:

$$\sigma_{\text{ион}} = \frac{t_c \cdot c}{5}, \quad (2)$$

где t_c – задержка сигнала; c – скорость света в вакууме.

Заряженные частицы в ионосфере замедляют распространение радиоволн с частотой менее 3 ГГц, формируя групповую задержку сигнала, которая составляет [3]:

$$t_c = 1,345 \cdot \frac{N_T}{f^2 \cdot 10^{-7}}, \quad (3)$$

где N_T – полное содержание электронов (эл/м²); f – частота (ГГц).

Групповое запаздывание радиоволн является одним из основных источников погрешностей определения координат одночастотным навигационным приемником ГНСС. При углах места менее 10° в условиях регулярной неоднородности ионосферы происходит возрастание ошибки измерений псевдодальности до навигационных спутников вдоль траектории распространения радиоволн.

Для снижения этих погрешностей требуются оценки влияния на групповые задержки радиоволн отклонения их реальных криволинейных траекторий от прямых линий. В свою очередь, наличие в зоне видимости навигационных спутников с углом места менее 10–15° позволяет улучшить точность определения местоположения [5].

Увеличение группового пути из-за замедления скорости распространения радиоволн в ионосфере определяется выражением:

$$\Delta L = 40,4 \cdot \frac{N_T}{f^2 \cdot \cos \theta}, \quad (4)$$

где θ – зенитный угол.

Вертикальное распределение концентраций электронов, нейтральных и заряженных компонент атмосферы определяется вариациями излучения Солнца. Анализ данных о солнечной активности позволяет рассчитать комплексные диэлектрические проницаемости атмосферы и вертикальное распределение показателя преломления для несущих частот спутниковых каналов.

Таким образом для нужд высокоточной спутниковой навигации может быть создана информационно-аналитическая система автономной коррекции данных о псевдодальностях до навигационных спутников в зависимости от плотности потока мощности излучения Солнца (рис. 1).

В состав этой системы должны входить:

- многопроцессорный сервер под управлением ОС Astra Linux;
- АРМ-операторы, специалисты и администраторы;
- система хранения и доступа к данным на основе СУБД PostgreSQL;
- специализированное программное обеспечение для численного расчета электронной концентрации в атмосфере;
- интерфейс для взаимодействия с потребителями на базе протокола REST HTTP.



Рис. 1. Схема информационно-аналитической системы автономной коррекции данных для нужд высокоточной спутниковой навигации

Система функционирует следующим образом:

1. осуществляется сбор данных о солнечной активности с серверов общедоступных источников (научных обсерваторий) и космических телескопов типа «Спектр-УФ»;
2. по исходным данным для заданных даты, времени и координат вычисляется электронная концентрация в атмосфере;
3. на основе полученного значения электронной концентрации модифицируется псевдодальность до навигационных спутников;
4. модифицированная псевдодальность передается потребителю.

Данные об электронной концентрации накапливаются в пополняемой базе данных, откуда могут быть извлечены для анализа и прогноза при последующих вычислениях.

Основным элементом является программное специализированное обеспечение, в котором для численных расчетов используется модель, учитывающая данные о солнечной активности, концентрацию нейтральных и заряженных компонент в атмосфере, ее температуру и поле ветра.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ В РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Обнаружение препятствий в растительности является одним из важнейших требований, необходимых для безопасного и безаварийного движения МТА. Густая растительность, проходимая для самоходного шасси, обычно затрудняет работу телекамер и ультразвуковых датчиков.

Для навигации сухопутного робота и обнаружения препятствий в густой растительности может быть использован импульсный радиодальномер с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с рабочим диапазоном 1,5–3,0 ГГц, обеспечивающий максимальную дальность измерений 20 м и разрешение 0,1 м [6].

В работе [7] оценивалось обнаружение скрытых растительностью препятствий в оптическом и радиодиапазонах. При использовании лазерной локационной системы (ЛЛС или лидара) на базе оптико-механического сканера дальность обнаружения препятствий составила от 0,1 м (густая трава) до 8 м (сладкая кукуруза). Радиодальномер с рабочей частотой 2,2 ГГц обеспечивал дальность измерений до 2,5 м.

На характеристики эхо-сигнала, отраженного от участка поверхности с растительным покровом, оказывает влияние период вегетации и содержание влаги в листьях растений, а также скорость и направление ветра. Кроме того, форма спектра эхо-сигнала зависит от конфигурации элементов растительности, их ориентации и направления колебаний, в результате чего ширина спектра для вертикально и для горизонтально поляризованной

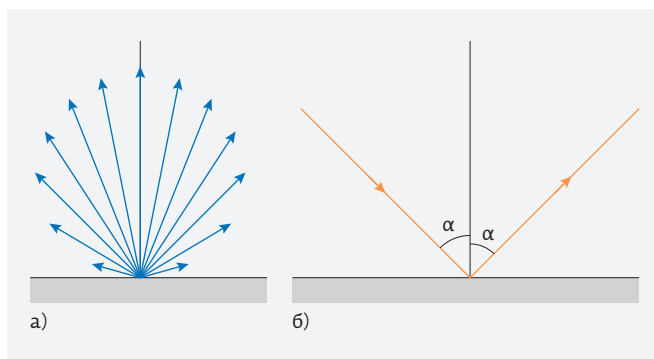


Рис. 2. Отражение света от поверхности: а – диффузное; б – зеркальное

радиоволны отличаются. При этом ширина спектра эхо-сигнала зависит от перемещения растительности относительно излучающей системы [8].

В то же время экспериментально подтверждено, что ЛЛС на базе технологии 3D Flash Ladar (без оптико-механического сканера) способны обнаруживать скрытую густой листвой сухопутную технику на дальностях в несколько сотен метров [9, 10]. Это возможно благодаря высокой чувствительности используемых в них фотодетекторов к отдельным фотонам и превышению отражательных характеристик металлических корпусов машин относительно растительности.

Это объясняется тем, что рассеяние излучения растительностью в общем случае имеет диффузный характер (рис. 2а), а коэффициент отражения определяется в соответствии с законом Ламберта:

$$r(\alpha) = \cos(\alpha), \quad (5)$$

где α – угол между направлением света и нормалью к поверхности.

Коэффициент зеркального отражения (рис. 2б) зависит от угла падения излучения, но даже при угле падения 90° зеркально отражается только часть света, а оставшееся диффузно рассеивается и/или поглощается, в зависимости от свойств материала и его индикатриссы отражения. Из-за сложности формы индикатриссы реальных объектов для описания зеркального отражения в компьютерной оптике широко используется модель Буи-Тунга Фонга:

$$r_3(\alpha) = \omega(\alpha, \lambda) \cdot \cos n(\alpha), \quad (7)$$

где λ – длина волны излучения; n – степень аппроксимации пространственного распределения зеркально отраженного света. Большие значения n соответствуют металлическим поверхностям, а малые – неметаллам.

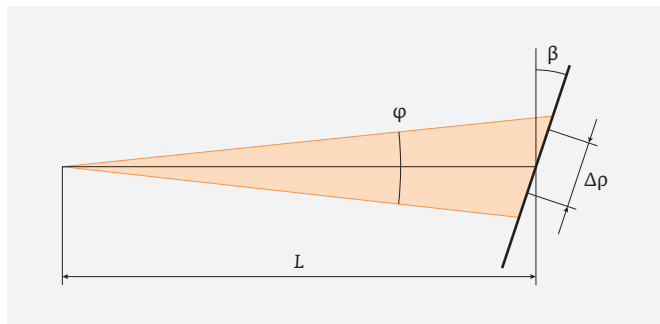


Рис. 3. Схема падения радиоволны на тонкий провод

Кроме того, большая информативность эхо-сигнала, принимаемого ЛЛС, связана с меньшей длиной волны излучения и короткой длительностью зондирующих импульсов. Наличие растительности (в том числе травы и злаков) увеличивает ширину спектра эхо-сигнала от поверхности, который хорошо описывается распределением Гаусса [11]:

$$P(t) = \sum_{i=1}^N \dot{P}_i \cdot \exp\left(-\frac{(t-t_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (8)$$

где $P(t)$ – принимаемый сигнал; \dot{P} – амплитуда эхо-сигнала от отдельного объекта; N – число объектов в створе

зондирующего импульса; t – время прохождения сигнала до объекта и обратно; σ – СКО амплитуды эхо-сигнала.

Кроме скрытых растительностью препятствий, для МТА представляет проблему обнаружение в условиях плохой видимости находящихся на его пути тонких протяженных препятствий (ТПП), к которым относятся провода, тросы, растяжки и т.д. В этой связи представляет большой интерес опыт применения радаров и ЛЛС для обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов на низкой высоте [12].

Результаты исследований показывают, что по эффективности обнаружения ТПП радары уступают ЛЛС. Периодическая структура проводов и тросов, соизмеримая с длиной волны радара, обуславливает линейное периодическое изменение коэффициента рассеяния вдоль ТПП, что в первом приближении можно представить как (рис. 3):

$$(\varphi, \beta) = 1 + \cos\left(\frac{2\pi \cdot L \cdot \varphi}{\Delta\rho \cdot \cos(\beta)}\right), \quad (9)$$

где φ – ширина диаграммы направленности; β – угол отклонения ТПП от нормали; L – дальность до ТПП; $\Delta\rho$ – период изменения коэффициента рассеяния.

Выражение (9) допустимо при $\varphi < 0,6^\circ$; $\beta \leq 30^\circ$; $L < 1000$ м; $\lambda = 3$ мм [12]. Использование радара возможно при углах ориентации ТПП относительно диаграммы

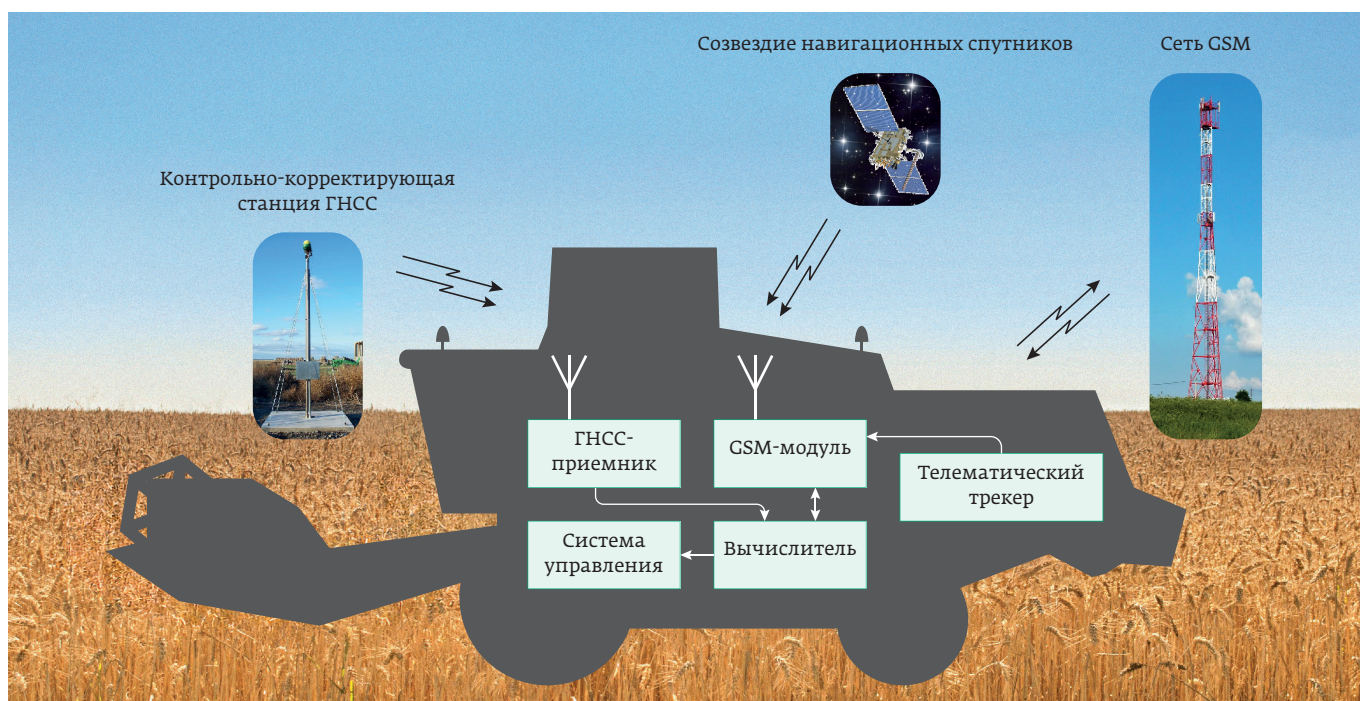


Рис. 4. Структурная схема системы мониторинга агротехники

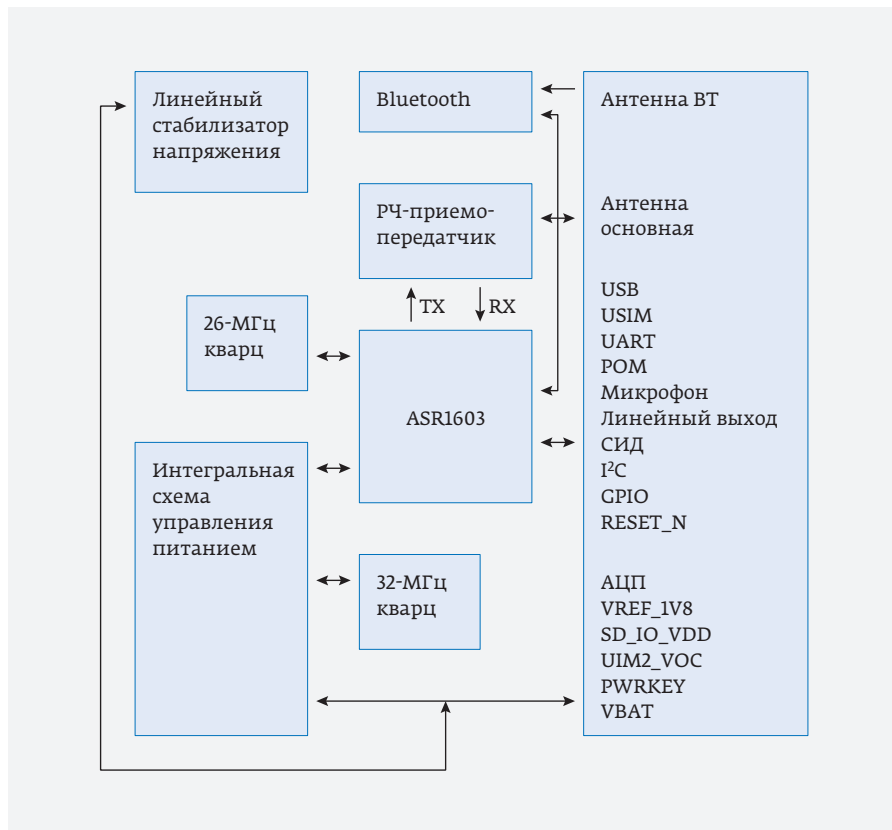


Рис. 5. Структурная схема модуля беспроводной связи PR1603 на базе стандарта LTE Cat. 1

направленности около 90°. Наблюдаемые на радиолокационных изображениях провода и тросы представляют собой прерывистые линии с редко расположенными штрихами (бликами).

Достоинство ЛЛС заключается в том, что они могут принимать диффузно отраженный сигнал, который слабо зависит от угла ориентации ТПП и его материала, а это позволяет обнаруживать препятствия из диэлектриков. За радаром остается преимущество перед ЛЛС в части независимости от метеоусловий.

МОНИТОРИНГ АГРОТЕХНИКИ

Одной из актуальных задач в сельском хозяйстве является отслеживание передвижения агротехники для контроля расхода ГСМ и перемещения продукции. Бортовая навигационно-информационная аппаратура должна обеспечивать непрерывное определение координат агротехники и их передачу вместе с информацией о техническом состоянии

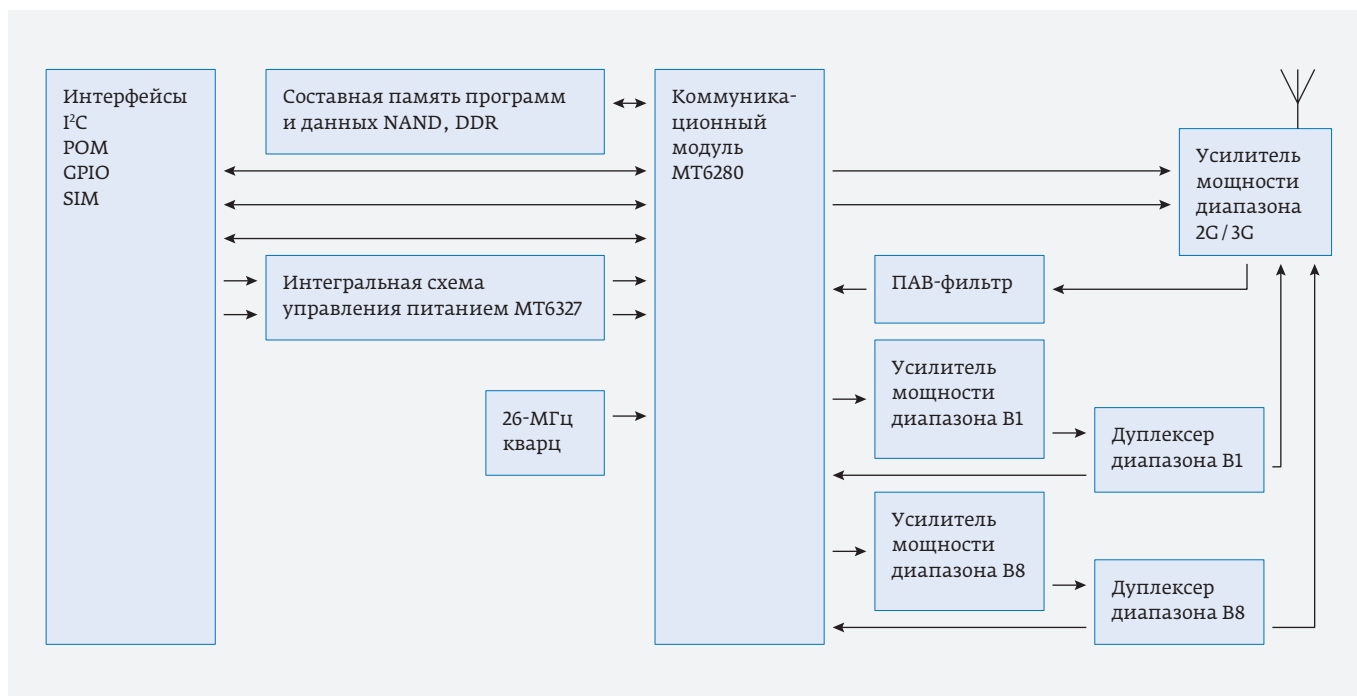


Рис. 6. Функциональная архитектура коммуникационного модуля ПН6280

МТА на сервер по каналам GSM 900/1800. Структурная схема системы мониторинга агротехники представлена на рис. 4.

Для передачи данных по каналам GSM 900/1800 могут быть использованы разработанные в АО «НИИМА «Прогресс» телематические модули для систем интеллектуального и автоматизированного управления ПР502, ПР503, ПР1603, ПР1803, ПН6280 [13]. Основные характеристики данных модулей представлены в табл. 1.

Модули сотовой связи ПР502 и ПР503 предназначены для подключения и передачи данных по GPRS. Основная область их применения – межмашинное взаимодействие (M2M).

Модули беспроводной связи ПР1603 (рис. 5) на базе стандарта LTE Cat. 1 предназначены для использования в промышленных контроллерах, в системах M2M и Интернета вещей (IoT), точках продаж (POS). Предусмотрены следующие варианты исполнения модулей: ПР1603 (LTE Cat. 1 + 2G), ПР1603Б (LTE Cat. 1 + 2G + Bluetooth), ПР1603Н (LTE Cat. 1 + 2G + ГНСС) и ПР1603БН (LTE Cat. 1 + 2G + Bluetooth + ГНСС).

Серия модулей беспроводной связи ПР1803 на базе стандарта LTE Cat. 4 применяется в роутерах, системах безопасности, в приложениях M2M (телематика) и POS. Варианты исполнения: ПР1803 (LTE Cat. 4 + 2G + 3G) и ПР1803Н (LTE Cat. 4 + 2G + 3G + ГНСС).

Таблица 1. Основные характеристики телематических модулей ПР502, ПР503, ПР1603, ПР1803, ПН6280

Параметры	ПР502	ПР503	ПР1603	ПР1803	ПН6280
Частотный диапазон, МГц	850, 900, 1800, 1900	850, 900, 1800, 1900	700, 800, 900, 1800, 2300, 2500, 2600	700, 800, 900, 1800, 2300, 2500, 2600	900, 1800, 2100
Скорость передачи данных	GPRS (класс 12): 85,6 Кбит/с	GPRS (класс 12): 85,6 Кбит/с	LTE Cat. 1: 10 Мбит/с («вверх»); 5 Мбит/с («вниз») GSM/GPRS/EDGE: 100 Кбит/с («вверх»); 85,6 Кбит/с («вниз»)	LTE Cat. 4: 150 Мбит/с («вверх»); 50 Мбит/с («вниз») UMTS/HSDPA/HSPA+: 5,76 Мбит/с («вверх»); 21 Мбит/с («вниз») GSM/GPRS/EDGE: 100 Кбит/с («вверх»); 85,6 Кбит/с («вниз»)	HSDPA: 14,4 Мбит/с HSUPA: 5,76 Мбит/с WCDMA PS: 384 Кбит/с GPRS: 85,6 Кбит/с EDGE: 236,8 Кбит/с
ГНСС	-	ГЛОНАСС/GPS	ГЛОНАСС/GPS	ГЛОНАСС/GPS	-
Bluetooth	-	BT 3.0	BT 4.0	-	-
Протоколы приема/передачи данных	TCP/IP, UDP, HTTP, FTP	TCP/IP, UDP, HTTP, FTP	TCP/IP, UDP/IP, HTTP/FTP, MQTT	TCP/IP, UDP/IP, HTTP/FTP, MQTT	TCP/UDP/HTTP/SMTP
Интерфейсы	UART, GPIO, USB, I ² C	UART, GPIO, I ² C, USB	UART, SDIO, PCM, I ² C, USB 2.0, GPIO	UART, SDIO, PCM, I ² C, USB 2.0, GPIO	UART, GPIO, I ² C, USB, PCM
Напряжение питания, В	3,4-4,2	3,4-4,2	3,4-4,2	3,4-4,2	3,4-4,2
Ток потребления, мА	280 (телефония, макс. мощность)	208 (телефония, макс. мощность)	-	-	-
Диапазон рабочих температур, °С	-30...70	-30...70	-30...70	-30...70	-40...85

Модуль ПН6280 (рис. 6) представляет собой модем, предназначенный для приема и передачи данных в интеллектуальных транспортных системах мониторинга автотранспортных средств, обеспечения работы в сетевых сетях 2G/3G, передачи и приема голосовых вызовов, СМС-сообщений, пакетных данных, обмена информацией в системе экстренного реагирования при авариях «ЭРА-ГЛОНАСС» [14]. Это первый коммуникационный модуль, специально разработанный под нужды российского рынка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени разработаны теоретические основы, позволяющие реализовать подсистему автономной коррекции данных о псевдодальностях до спутников для высокоточных ГНСС-приемников, которые могут быть использованы в системах параллельного вождения МТА и для управления беспилотной агротехникой. Радиолокационные и лазерные датчики позволяют обнаруживать скрытые растительностью препятствия, способные вызвать аварию и повредить МТА. Передача данных для мониторинга агротехники по каналам GSM 900/1800 может осуществляться с помощью существующих телематических модулей отечественной разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Левин А. А.** Основные критерии и задачи применения GPS оборудования в сельском хозяйстве // Сурский вестник. 2021. № 1(13). С. 52–55.
2. **Шевченко А. В., Мещеряков Р. В., Мигачев А. Н.** Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника // Проблемы управления. 2019. № 5. С. 3–18.
3. **Самойлов А. Г., Самойлов В. С., Насир С. А. Х.** Особенности распространения радиоволн на радиоприемах кос-

мический аппарат-земная станция // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 4. С. 21–27.

4. **Наконечный Г. В., Гальямов А. М., Петренко С. В.** Использование моделей компенсации погрешностей для получения оптимальных характеристик навигационных решений // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 4 (94). С. 104–109.
5. **Ларионов А. А., Агарышев А. И.** Возможности коррекции влияния ионосферы на точность определения координат приемников спутниковых радионавигационных систем // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / Науч. ред. Г. Я. Шайдуров. Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2011. С. 142–147.
6. **Голь С. А., Корнеев В. Е., Сигинова А. А.** Малодистантный радиодальномер с ЛЧМ наземного мобильного робота // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 5. № 12. С. 101–106.
7. **Matthies L., Bergh C., Castano A., Macedo J., Manduchi R.** Obstacle Detection in Foliage with Ladar and Radar. Proc. of the Eleventh International Symposium Robotics Research, Siena, Italy, 19–22 October 2003; Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 2005, vol. 15, pp. 291–300.
8. **Кравченко В. Ф., Кривенко Е. В., Луценко В. И., Луценко И. В., Соболяк А. В.** Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от суши // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4. № 4 (17). С. 3–29.
9. **Albota M., Aull B., Fouche D., Heinrichs R., Kocher D., Marino R., Mooney J., Newbury N., O'Brien M., Player B., Willard B., Zayhowski J.** Three-Dimensional Imaging Laser Radars with Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays // Lincoln Laboratory Journal, 2002, vol. 13, no. 2, pp. 351–370.
10. **Marino R., Davis W.** Jigsaw: A Foliage-Penetrating 3D Imaging Laser Radar System // Lincoln Laboratory Journal, 2005, vol. 15, no. 1, pp. 23–36.
11. **Wagner W., Ullrich A., Ducic V., Melzer T., Studnicka N.** Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. V. 60, issue 2, april 2006, pp. 100–112.
12. **Дановский В. Н., Ким В. Я., Лисицын В. М., Обросов К. В., Тихонова С. В.** Сравнение возможностей радиолокации и лазерной локации как методов информационного обеспечения безопасности маловысотного полета // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. № 4. С. 153–165.
13. **Чикваркин И. Б.** Линейка телематических модулей: достижения и перспективы развития // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2023. № 7. С. 118–121.
14. **Андреев Р. А., Попова Т. С., Федоров А. С.** Методика проведения сигнального тестирования устройств с поддержкой ЭРА-ГЛОНАСС // International journal of Professional Science. 2022. № 5. С. 71–82.

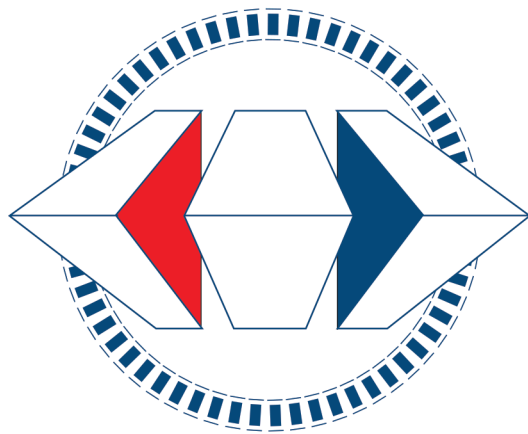
ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА | ТЕХНОЛОГИЯ | БИЗНЕС

ИНФОПРОСТРАНСТВО
ФЕССИОНАЛОВ

Мы на YouTube

Подписывайтесь

**28–30
НОЯБРЯ 2023**



**РОССИЙСКИЙ
ПРОМЫШЛЕННИК**
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА



**УСТОЙЧИВОСТЬ
И РАЗВИТИЕ**

СООРГАНИЗАТОРЫ:



**МИНПРОМТОРГ
РОССИИ**



**ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

EXPOFORUM

12+