ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТУПА БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ К РАДИОНАВИГАЦИОННОМУ ПОЛЮ С УЧЕТОМ НАВИГАЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИДОРОЖНОЙ ЗОНЫ

С.С. Веркин, *канд. техн. наук*
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-2-1-204-209

Аннотация. *В статье исследуются навигационные особенности придорожных зон и их влияние на точность определения местоположения беспилотных транспортных средств. Предложен метод учета этих особенностей при оценке доступности радионавигационного поля для спутниковой аппаратуры и точности позиционирования беспилотников в сложных физико-географических условиях придорожных территорий. Результаты исследования могут быть полезны для разработки требований к спутниковой аппаратуре и точности определения местоположения беспилотных транспортных средств в контексте организации дорожного движения.*

Ключевые слова: *беспилотное транспортное средство; глобальное радионавигационное поле; доступность; точность позиционирования; навигационные особенности придорожной полосы; требования к показателю доступности.*

В настоящее время, беспилотное движение транспортных средств – одно из самых перспективных направлений использования информационных технологий в различных сферах: от космических и воздушных до наземных, морских и подводных [1-5]. Это направление важно по нескольким причинам. Во-первых, оно оптимизирует процессы перевозки грузов. Во-вторых, снижает затраты на подготовку и содержание водителей. Кроме того, исключает субъективные ошибки, которые могут негативно влиять на экономику и безопасность. Поэтому развитие беспилотных транспортных систем (БПТС) становится актуальной задачей для развитых стран.

Под БПТС понимается полностью автоматизированное транспортное средство, которое работает без участия человека [1-4]. Для успешного внедрения таких систем необходимы высокоточные инфокоммуникационные технологии. Они строятся на основе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Качество работы ГНСС определяется несколькими параметрами: точность позиционирования, доступность спутникового сигнала и их стабильность на протяжении всего маршрута. Обычно эти показатели рассчитываются для стандартных условий. Например, для ГЛОНАСС требования должны выполняться с вероятностью 95%. Однако в реальности навигационные условия могут ухудшаться из-за препятствий на дороге: рельефа местности, леса, зданий и других объектов, которые искажают сигнал.

Сейчас нет научно обоснованных требований к параметрам ГНСС в сложных условиях придорожной полосы. Поэтому важно разработать такие требования и методы их оценки для беспилотных транспортных средств в России. Именно этому посвящена данная работа.

Обоснование критериев оценки навигационного обеспечения БПТС

Рассмотрим навигационные особенности придорожной полосы с точки зрения их влияния на точность определения местоположения БПТС и доступность к радионавигационному полю бортовой системы спутниковой навигации ГНСС.

Понятие доступности включает несколько аспектов: геометрическую и электромагнитную доступность. На практике также выделяют мгновенную и усредненную (интегрированную) доступность, а также эксплуатационную доступность. В условиях «чистого неба», когда нет препятствий для распространения радиоволн от навигационного космического

аппарата (НКА) до АСН, геометрическая и электромагнитная доступность совпадают, если угол места $b \geq 5°$. Однако на придорожной полосе возникают препятствия, которые увеличивают угол места и снижают доступность БПТС к радионавигационному полю ГНСС.

Для упрощения расчетов будем рассматривать геометрическую доступность – пространственное расположение АСН относительно НКА. Угол маски, определяющий количество видимых НКА и, следовательно, доступность, будет ограничиваться верхушками препятствий. Окрестности кромки препятствий, через которые могут проходить радиоволны, учитывать не будем, так как это приемлемо для радиоволн постсантиметрового диапазона частот, которые практически не дифрагируют и имеют большое затухание в тени. При этих ограничениях геометрическая доступность совпадает с электромагнитной доступностью в наихудшем случае.

Очевидно, что доступность бортовой АСН должна быть обеспечена на протяжении всего пути следования БПТС, то есть в заданный промежуток времени. Доступность означает способность ГНСС обеспечивать радионавигационные определения с заданной точностью местоположения БПТС на определенном маршруте и в определенный промежуток времени.

В качестве меры доступности определим вероятность получения потребителями БПТС достоверных навигационных данных с требуемой точностью за определенный временной интервал (сутки, неделя, месяц и т. д.). Расчет доступности будет осуществляться через геометрический фактор, учитывающий прямую видимость между АСН и НКА. На величину доступности будут влиять навигационные особенности придорожной полосы, включая физико-географические условия местности, такие как рельеф и растительность, которые могут «закрывать небо».

Модель влияния местных предметов на «закрытие неба», а, следовательно, на доступность бортовой АСН к радионавигационному полю, создаваемому НКА ГНССС приведена на рисунке 1. Очевидно, что наибольшее влияние на доступность к НКА оказывает ситуация, когда препятствия находятся в придорожной полосе близко к дорожному покрытию с двух сторон (дорожный «колодец»). Эти препятствия при движении БПТС будут меняться в пространстве и времени. В зависимости от того в каком ландшафте находится бортовая АСН угол наблюдения (возвышения, закрытия) НКА и угол маски НКА будут изменяются. Углы закрытия β и маски μ взаимосвязаны: $\mu \leq 180 - 2\beta$.

В случае появления препятствий в надгоризонтной области бассейна ВВП угол закрытия β увеличивается, а угол маски μ, соответственно, уменьшается. При этом доступность бортовой АСН к спутникам будет снижаться (поскольку определяется количеством видимых НКА с борта судна).

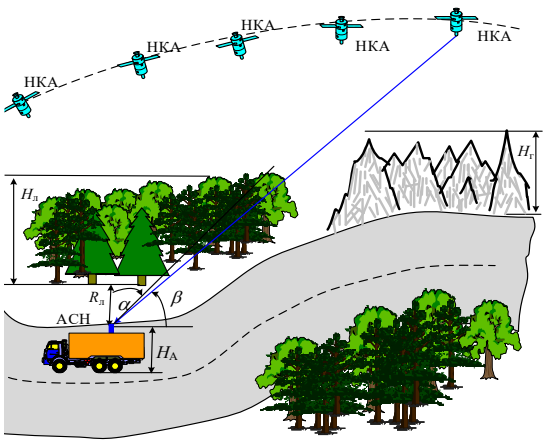


Рис. 1. Модель «закрытия неба» для бортовой АСН в зависимости типа ландшафта придорожной полосы

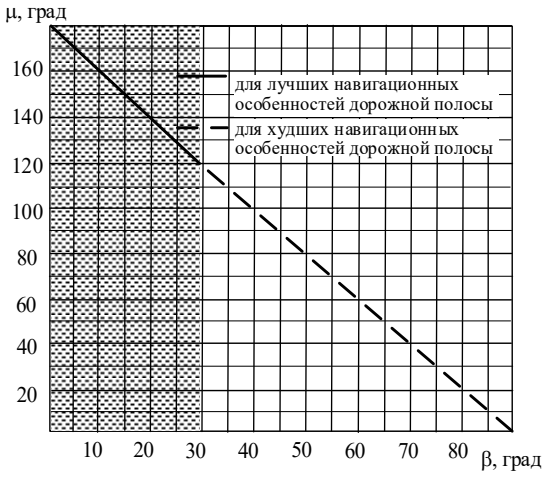


Рис. 2. Зависимость угла закрытия от навигационных особенностей придорожной полосы

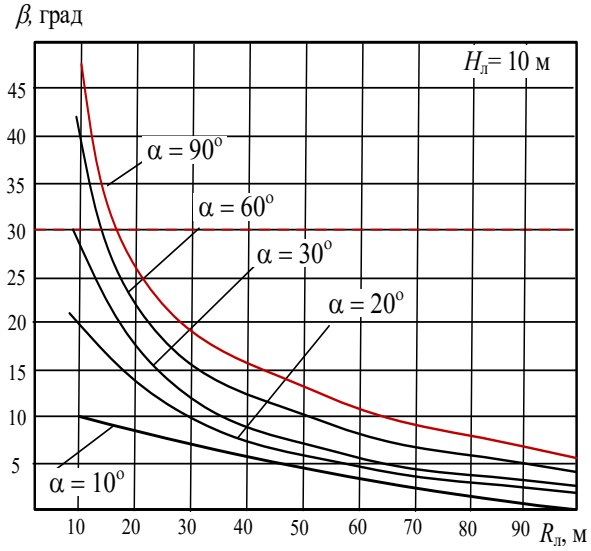
Оценим степень «закрытие неба» при движении БПТС в зависимости от навигационных особенностей придорожной полосы. При расчетах учтем высоту расположения антенны на БПТС $H_А$ и геометрические параметры профиля рельефа местности, местных предметов и строений, расположенных на линии наблюдения НКА. Особенности конкретного рельефа местности, вследствие его многообразия, на этапе проектирования аналитически учесть крайне сложно, поэтому ограничимся значимыми препятствиями, например, в виде придорожных лесов и лесопосадок.

Для расчета угла закрытия НКА при движении БПТС по дорожной полосе воспользуемся следующей трехмерной пространственной моделью [7]

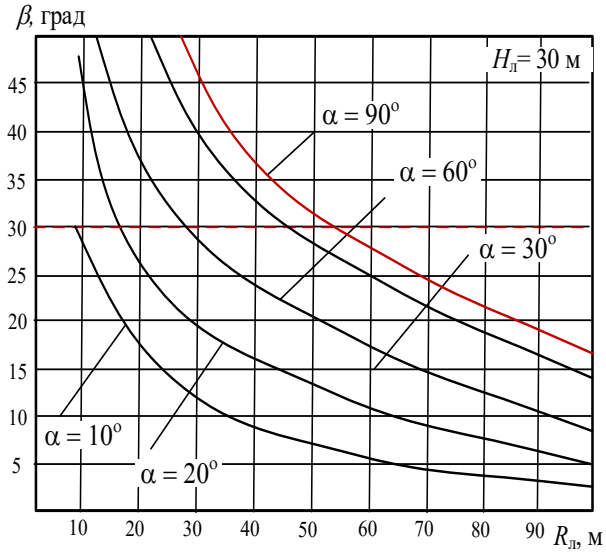
$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{H}{R}\sin\alpha\right), \tag{1}$$

где $H_л$ – высота леса (рельефа местности); $R_л$ – расстояние до препятствия (леса); α – угол, под которым виден лес с борта БПТС.

Зависимость угла маски от угла закрытия β НКА приведена на рисунке 2, а от направления на препятсивия α, прилегающих к дорожному полотну, при заданных геометрических их размерах и расстояниях до БПТС – на рисунке 3. Необходимо заметить, что на рисунке приведен частный, наихудший случай, когда при прочих равных условиях β принимает максимальное значение.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость углов закрытия от дальности до припятствий при различных углах закрытия: а) для высоты деревьев до 10 м; б) для высоты деревьев до 30 м

Расчеты проводятся с помощью цифровых моделей местности. Для каждой точки маршрута БПТС сканируется окружающий рельеф. Определяются параметры топологии и углы препятствий.

Анализ результатов показал, что при наличии высоких придорожных препятствий большая часть спутников будет недоступна для бортовой системы навигации (. Это увеличит коэффициент геометрии и ухудшит точность определения местоположения БПТС. Особенно это заметно при движении в узких дорожных «колодцах» и на узких дорогах.

Определение уровня качества позиционирования БПТС

В общем случае доступность ГНСС представляет собой вероятность того, что в любой точке заданного пространства (дорожного пути) погрешность определения местоположения будет хуже требуемого значения за время наблюдения [7, 10, 11]:

$$P_{д} = \left(\sigma_{пд}(K_{Гij}) < \sigma^{*}_{пд}(K_{Гij})\right), \quad (2)$$

где $\sigma_{пд}(K_{Г\,ij})$, $\sigma^{*}_{пд}(K_{Г\,ij})$ – текущее (требуемое) значение точности определения псевдодальности ГНСС; $K_{Гij}$ – геометрический фактор ГНСС; $i, j \in N$ – количество видимых НКА с определенной точки дорожного пути.

В свою очередь доступность зависит от точности определения местоположения, которая для потребителей ГНСС определяется выражением следующим выражением [7, 10]:

$$\sigma_{мп} = \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_D^2\right]^{1/2} = \left[\operatorname{tr}\left\{\mathbf{G}^{-1}\mathbf{K}\left(\mathbf{G}^{-1}\right)^{\mathrm{T}}\right\}\right]^{1/2} = \left[\operatorname{tr}\left\{\mathbf{K}\cdot\mathbf{\Gamma}\right\}\right]^{1/2}, \quad (3)$$

где $K = \{D\,D^{T}\}$ – корреляционная матрица ошибок определения псевдодальности;

D – вектор ошибок определения псевдодальности до каждого НКА;

$\Gamma = G^{-1}(G^{-1})^{T}$– квадрат обратной матрицы градиентов смещения функций поверхностей положения (навигационных функций);

G – матрица градиентов, которая характеризует изменение навигационных функций с изменением текущих координат НКА;

σ^2_x, σ^2_y, σ^2_z, σ^2_D – дисперсии определения пространственно-временных координат потребителя ГНСС.

Если измерения радионавигационных параметров некоррелированные и одинаковые по точности, то выражение (3) можно упростить к виду:

$$\sigma_{мп} = \sigma_{пд} \cdot K_{Г}, \quad (4)$$

где $\sigma_{пд}$ – СКП определения псевдодальности в АСН;

$K_{Г}$ – коэффициент геометрии (геометрический фактор) ГНСС.

Из формулы (3) и (4), получим

$$K_{Г} = \left[\operatorname{tr}\left\{\mathbf{\Gamma}\right\}\right]^{1/2} = \left[\operatorname{tr}\left\{\mathbf{G}^{-1}\left(\mathbf{G}^{-1}\right)^{\mathrm{T}}\right\}\right]^{1/2} \Big/ \sigma_{пд}. \quad (5)$$

Для оценки доступности бортовой АСН к радионавигационному полю ГНСС иногда удобнее использовать процент времени суточного интервала, в течении которого величина точности определения местоположения $\sigma_{мп}$ БПТС не превышают требуемых значений для любой точки рабочей зоны. В этом случае доступность будет представлять собой усредненную величину по времени и по пространству (интегрированная доступность).

Тогда, сканируя в заданные моменты времени $t = k\Delta t$, $k \in (1, 2, \ldots T)$ по рабочей зоне придорожной полосы, можно вычислять $K_{Г}$ и погрешность определения местоположения бортовой АСН (3). Сравнивая полученное значение погрешности с требуемым, можно прогнозировать выполнение условия $\sigma_{пд} \le \sigma^{*}_{пд}$. Если условие выполняется, то полагается, что $B_{tm} = 1$, в противном случае – $B_{tm} = 0$. Проводя T таких измерений в М точках заданного участка дорожного пути и усреднив их, получим значение показателя доступности

$$p_{д} = \frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M} B_{tm}}{TM} \quad \begin{cases} \text{если } \sigma_{пд} \le \sigma^{*}_{мп},\ B_{tm} = 1; \\ \text{если } \sigma_{пд} > \sigma^{*}_{мп},\ B_{tm} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

Исследования показали, что можно рассчитать показатель доступности через коэффициент геометрии *К*г, учитывая точность определения местоположения в каждой точке рабочей зоны за определенный период времени. Предложенная модель позволяет точно оценить доступность потребителей ГНСС к радионавигационному полю в заданных зонах. Доступность будет зависеть от навигационных особенностей придорожных зон, таких как рельеф, растительность, глубина скатов и другие факторы.

Значение доступности в одной точке зоны периодически повторяется через 12 часов и симметрично относительно экватора. Это важно для безопасности дорожного движения БПТС, так как доступность влияет на точность позиционирования. В России навигационные условия разнообразны, и учет этих особенностей повышает безопасность.

Требования к доступности связаны с точностью позиционирования и зависят от коэффициента геометрии, который определяется реальной местностью. Это включает «закрытие неба» растительностью, возвышенностями, крутыми скатами, строениями и деформацией радионавигационного поля.

Выводы

Исследования показали, что ключевым параметром навигационного обеспечения беспилотных транспортных средств является интегрированный показатель доступности бортовой автоматической системы навигации к радионавигационному полю. Этот показатель объединяет точность определения местоположения с надежностью измерений и устойчивостью АСН к изменениям в радионавигационном поле. Для достижения нужных характеристик необходим комплексный подход, включающий интеграцию различных навигационных полей и объединение устройств, работающих на разных физических принципах.

Библиографический список

1. Шведов П.Е., Темник Я.А., Исламов В.К., Хаметов Р.С. Приборы для автономной системы навигации и ориентирования беспилотных летательных аппаратов // Молодой учёный. – 2018. – № 46 (232). – С. 60-65.

2. Власов В.М., Мактас Б.Я., Богумил В.Н., Конин И.В. Беспроводные технологии на автомобильном транспорте. Глобальная навигация и определение местоположения транспортных средств. Учебное пособие. – Москва: ИНФРА-М, 2024. – 184 с.

3. Клюев В.В. Развитие законодательства в области автономного судоходства в Российской Федерации / В.В. Клюев // Транспортное право и безопасность. – 2023. – № 4(48). – С. 74-89.

4. Титов А.В. Перспективы технологического развития и внедрения безэкипажных судов / А.В. Титов, Л. Баракат // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 3-1 (41). – С. 94-103.

5. ГОСТ 32454-2013 «Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний» от 15 апреля 2014 г. – 355 с.

6. Загретдинов Р.В. Спутниковые системы позиционирования. Конспект лекций. – Казань, 2014. – 148 с.

7. Тихомиров А.В., Михайлов В.Ю., Омельянчук Е.В., [и др.]. Оценка эмпирических моделей распространения радиоволн в лесных массивах сантиметрового и миллиметрового диапазонов / Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9. – С. 112-129.

8. Ватутин С.И. Оценка геометрического фактора для наземного потребителя системы ГЛОНАСС с высокоэллиптическим дополнением / Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Т. 3. Вып. 3. – С. 12-28.

9. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь. 1983. – 416 с.

10. Гончаренко Я.В. Осуществление навигации беспилотных воздушных судов в зоне действия наземных радиотехнических систем / Я.В. Гончаренко // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : Сборник аннотаций конкурсных работ XVI Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов, Москва, 18–22 ноября 2024 года. – Москва: Издательство Перо, 2024. – С. 26. – EDN ZMKRNE.

11. Москаленко М.А., Черняхович С.Е., Пушкарев И.И., Титов А.В. Автономные технологии судоходства, тенденции и перспективы // Marine intelligent technologies. – 2023. – № 1-1 (59).
12. Дмитриев В.И., Каретников В.В. Методы обеспечения безопасности навигации при внедрении беспилотных технологий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9, №6.

ENSURING ACCESS FOR ON-BOARD SATELLITE NAVIGATION EQUIPMENT OF UNMANNED VEHICLES TO THE RADIO NAVIGATION FIELD, TAKING INTO ACCOUNT THE NAVIGATION FEATURES OF THE ROADSIDE AREA

S.S. Verkin, *Candidate of Technical Sciences*
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (Russia, St. Petersburg)

Abstract. *This article examines the navigational characteristics of roadside areas and their impact on the positioning accuracy of unmanned vehicles. A method is proposed for taking these characteristics into account when assessing the availability of a radio navigation field for satellite equipment and the positioning accuracy of unmanned vehicles in the complex physical and geographical conditions of roadside areas. The results of this study may be useful for developing requirements for satellite equipment and the positioning accuracy of unmanned vehicles in the context of traffic management.*

Keywords: *unmanned vehicle; global radio navigation field; accessibility; positioning accuracy; roadside navigation features; accessibility indicator requirements.*