

# УПРАВЛЕНИЕ НАЗЕМНЫМ ТРАНСПОРТОМ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Хаблов Д.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

dkhablov@mail.ru

*Аннотация:* Эффективное управление наземным транспортом в управляемом и беспилотном режиме невозможно без его точного и непрерывного позиционирования. В работе рассматриваются возможности увеличения этой точности в условиях отсутствия или неуверенного приема сигналов от спутников глобальной системы навигации. При этом применение дополнительной автономной инерциальной системы для решения этой проблемы в данном случае не оправдано по соображениям точности и стоимости. Поэтому предложено решение на основе радиолокационных доплеровских датчиков в качестве альтернативной автономной системы навигации. Рассмотрены методы измерения векторной скорости и алгоритм прямого непрерывного измерения перемещений. Показано, что последний вариант измерения позволяет существенно уменьшить накопительную ошибку в позиционировании транспортных средств.

Ключевые слова: автономная навигация, эффект Доплера, СВЧ датчик перемещения, квадратурный смеситель.

## Введение

Существующие глобальные спутниковые (GNSS), региональные и локальные навигационные системы широко используются для позиционирования воздушных и наземных транспортных средств (ТС), как управляемых, так и беспилотных. Навигационные системы (НС), в т.ч. наземные, необходимы для определения текущего положения различных ТС и других объектов внутри некоторых определенных систем позиционирования. В их задачи входит также слежение и прогнозирование перемещения ТС по выбранной траектории. НС можно разделить на 3 большие группы, которые разделяются по зоне охвата, точности и возможности работы в закрытых помещениях [1].

Первая группа – это глобальные спутниковые навигационные системы (GNSS), где определение местоположения достигается путем получения сигнала с помощью TOA-измерения (время прихода сигнала), минимально от четырех спутников GPS (GLONASS, GALILEO и др.). Вычисление координат производится за счет решения системы из четырех уравнений с четырьмя неизвестными. Обычные источники ошибок, влияющих на точность позиционирования, это ионосферные и тропосферные задержки, ошибки эфемерид, многолучевость, доплеровский сдвиг частот для объектов в движении, шумы приемника и др. Имеет значение также и селективная доступность, т. е. искусственное загроушение. Если его не принимать во внимание, то общее среднеквадратичное отклонение GNSS на основе глобальных СП типа GPS будет примерно соответствовать 6,6м [1]. Использование GNSS позволяет достичь точности вполне достаточной для большинства гражданских приложений (для автомобилей, навигации судов и летательных аппаратов в открытом пространстве). Для требований профессиональных служб, безопасности и жизненно важных приложений, например для проведения судов в гавань или посадки самолета, а также для навигации в закрытых помещениях, где на точность позиционирования воздействует ослабление сигнала при его прохождении через стены и многолучевое распространение, необходима более высокая точность.

Эти задачи решает вторая группа т. н. региональные навигационные системы. Уменьшение ошибки позиционирования в них обеспечивается наличием дополнительной информации о поправках, которые будут применяться при решении уравнений позиционирования. Это может достигаться, например, за счет дополнительной базовой станции, расположенной рядом с терминалом пользователя, подобно дифференциальной GPS (DGPS). Используются для поправок также спутниковые дополнительные системы (SBAS), системы с кинематикой в реальном времени интерференционного типа (RTK), а также вспомогательные GNSS (AGNSS), где терминал пользователя соединен с сотовой сетью, которая передает уточняющие сообщения о позиции и времени конкретного сотового телефона. Это позволяет выйти на субметровую и даже субдециметровую точность. Однако данные системы требуют развертывания специальной наземной сети опорных станций и конкретных протоколов связи, что делает ее довольно затратной. AGNSS в основном использует архитектуру сети существующих систем сотовой связи, что делает ее технологию более перспективной и дешевой, но при этом она проигрывает в точности.

Тем не менее, ни одна из этих систем не работает внутри помещений из-за значительного затухания в стенах (для бетона 10 до 25 дБ/м), что снижает мощность принимаемого сигнала от -130 до -160 дБм (-160 до -190 дБВт) при чувствительности приемника в среднем 148 дБм. Эти задачи решает третья группа НС. Во-первых, это сотовая НС, основанная на технологии TDO, где оценивается разность во времени между приходом сигналов от трех видимых базовых станций [2]. Во-вторых, НС на беспроводных локальных сетях (WLAN), где оценка дальности производится по мощности принимаемого сигнала (RSS) с использованием метода цифрового моделирования поля в пространстве. В-третьих, НС на основе радиочастотных меток (RFID), осуществляемая за счет маркирования объекта и (или) считывающих устройств. В-четвертых, НС на беспроводных сенсорных сетях (WSN), точность которых также, как и в предыдущем случае, зависит от количества узлов и наконец, самая точная и дорогая сверхширокополосная технология позиционирования (UWB), позволяющая измерить расстояние с точностью до 1 метра.

Все рассмотренные НС имеют разную степень точности, надежности, стоимости и зону покрытия. Их объединяет общее для всех наличие подготовленной инфраструктуры позиционирования, будь то спутники, вышки сотовой связи, точки доступа WLAN, сенсоры и т. п. В тоже время задачи практического использования требуют создания навигационных систем в интегрированном виде, работающих в любых условиях, в т.ч. в помещениях без подготовленной инфраструктуры позиционирования. Для этого наиболее оптимально по стоимости является использование гибридной системы со слиянием информации глобальной GNSS и данных инерционной навигационной системы (INS).

Инерциальная навигация является автономной, она не зависит от заранее установленной внешней инфраструктуры и основана на совместной работе двух семейств инерциальных датчиков: акселерометров и гироскопов. Три ортогональных акселерометра, жестко закрепленных на объекте, измеряют ускорение, которое на него действует по predetermined направлениям. Первое интегрирование дает оценку мгновенной скорости, при условии, что начальная скорость была правильно установлена. Второе интегрирование дает расстояние, пройденное объектом в predetermined расстоянии. Гироскопы измеряют скорости вращения (угловую скорость), которое датчик совершает вокруг predetermined оси. В результате угловая ориентация может быть вычислена путем интегрирования измерений угловой скорости при условии, что задана начальная ориентация оси датчика по отношению к опорной оси. Датчики INS подвержены ошибкам из-за дрейфа оценки во времени. Причиной является то, что координаты положения тела и скорость получаются, соответственно после двойного и одинарного интегрирования измерения с погрешностью. При наземном применении, на показания INS будет влиять не только сопротивление воздуха, но и силы трения, связанные с массой ТС, состоянием дорожного покрытия, давления в шинах и т. д. В среднем эти системы обеспечивают точность до 1% от пройденного пути и 5% от угла, при этом в результате накопительного эффекта, ошибки в определении траектории потенциально неограниченны. Цель гибридизации INS с GNSS, – воспользоваться взаимодополняющими характеристиками двух систем, т. е. повышение их эффективности в тех условиях, когда система работать не может (в городе, в лесу, в помещениях и т. д.) или будет работать с низкой точностью.

В настоящее время наблюдается стремление к повсеместному оснащению наземного транспорта средствами точной навигации для осуществления задач управления в т. ч. в беспилотном варианте. Инерциальная система, широко применяемая в летательных аппаратах, при наземном использовании выглядит дорогостоящей и недостаточно точной, в силу перечисленных выше факторов.

Поэтому актуальной является задача поиска альтернативных автономных систем позиционирования, в качестве которой и рассматривается радиолокационная система на основе СВЧ датчиков.

## **1 Радиолокационная навигационная система**

Радиолокационная система навигации строится на основе применяемого в авиации доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС). Данная система обладает преимуществом перед INS, поскольку ее результат учитывает смещение курса летательного аппарата от воздушного потока и не зависит от сопротивления воздуха. В наземном варианте две антенны из одной точки впереди или с двух сторон ТС излучают вперед и под углами  $\alpha$  к направлению движения в вертикальной плоскости и под углами  $\beta$  по разную сторону от его оси в горизонтальной плоскости, электромагнитные волны с частотой  $f_0$  (см. Рис.1). Отраженные от поверхности дороги

электромагнитные волны принимаются этими же антеннами. Затем они смешиваются в смесителе с частью излучаемых волн, в результате чего выделяются два доплеровских сигнала с частотами  $f_{D1}$  и  $f_{D2}$  для левой и правой сторон. Эти частоты пропорциональны скоростям взаимного перемещения  $S_1$  и  $S_2$  между антеннами и центрами следов от диаграмм направленности антенн на поверхности (Рис.2):

$$(1) f_{D1} = 2V_1 \cos(\alpha) \cos(\beta) / \lambda_0 \text{ и } f_{D2} = 2V_2 \cos(\alpha) \cos(\beta) / \lambda_0,$$

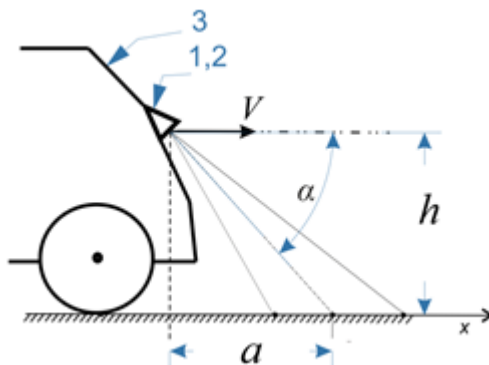


Рис.1 Расположение антенн доплеровских датчиков 1 и 2 на транспортном средстве 3, вид сбоку.

где  $\lambda_0 = c/f_0$  – длина волны электромагнитных колебаний,  $c$  – скорость света.

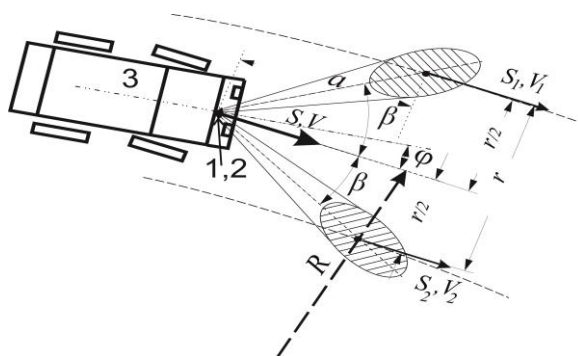


Рис.2 Расположение антенн доплеровских датчиков 1 и 2 на транспортном средстве 3, сверху при его движении

В результате преобразований можно получить выражение для векторной скорости перемещения автомобиля за каждый дискретный момент времени  $\Delta t$  в виде модуля  $V$  и угла  $\varphi$  [2]:

$$(2) \begin{aligned} V &= \lambda_0 (f_{D1} + f_{D2}) / 4 \cos(\alpha) \cos(\beta) \\ \varphi &= \lambda_0 (f_{D1} - f_{D2}) / 4\pi r \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{aligned}$$

Таким образом, весь маршрут можно разбить на дискретные отрезки  $\Delta t_i$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ , где  $N$  – общее число таких отрезков. Для описания характера движения в этом случае можно использовать двумерный массив этих значений  $\{V_i, \varphi_i\}$ . Движение на каждом временном отрезке  $\Delta t_i$  происходит по окружности с радиусом  $R_i$ , который определяется из формулы:

$$(3) R_i = r (f_{D1i} + f_{D2i}) / 2 (f_{D1i} - f_{D2i})$$

Если перейти к прямоугольной системе координат, то маршрут можно записать в виде следующего рекуррентного выражения:

$$(4) \begin{aligned} x_i &= L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin(2\varphi_1 + \varphi_2) + \dots + L_{i-1} \sin(2\varphi_1 + 2\varphi_2 + \dots + \varphi_{i-1}) \\ y_i &= L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos(2\varphi_1 + \varphi_2) + \dots + L_{i-1} \cos(2\varphi_1 + 2\varphi_2 + \dots + \varphi_{i-1}), \end{aligned}$$

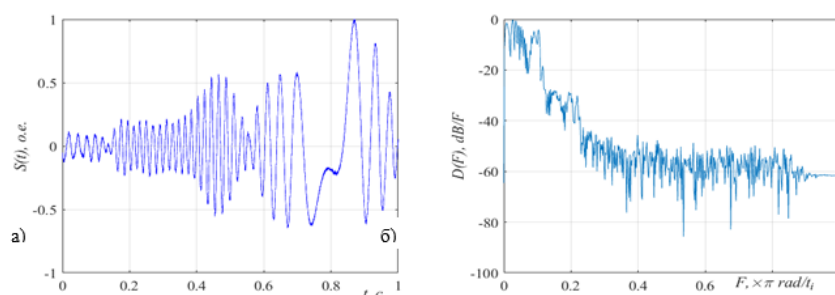
где  $L_i = 2R_i \sin(\varphi_i)$  – длина хорды перемещения автомобиля за отрезок времени  $\Delta t_i$ .

Таким образом, для позиционирования транспортного наземного средства необходимо точно и быстро измерять  $f_{D1}$  и  $f_{D2}$  (1), затем по формулам (2) определяется массив  $\{V_i, \varphi_i\}$ . Далее вычисляется собственно маршрут по формулам (4), где хорды  $L_i$  определяются через радиусы  $R_i$  (3) и углы

поворота  $\varphi$ . Все остальные параметры -  $f_0$ ,  $c$ ,  $r$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  можно считать постоянными, а некоторые могут быть корректируемыми в процессе работы.

## 2 Методы измерения доплеровской частоты в радиолокационной системе позиционирования

Обычно доплеровскую частоту измеряют по максимуму спектральной плотности выделенного доплеровского сигнала. Однако в случае радиолокационной навигации для наземного транспорта существует определенная специфика, усложняющая процесс. Это связано с расположением антенны достаточно близко к отражающей поверхности и направлением излучения под углом. Это приводит к искажениям спектра и смещением собственно доплеровской частоты от положения его максимума [3]. Обычный вид искаженного сигнала приведен на Рис.3. Поэтому был разработан метод с использованием симметричной пилообразной частотной модуляции (СПЧМ) [4]. В нем вычисляется функция взаимной корреляции между спектрами доплеровских сигналов на растущем и падающем участке СПЧМ, а доплеровская частота, собственно, определяется по частотному сдвигу ее максимума. Еще один метод использует непрерывное излучение постоянной частоты, но с использованием в приемном тракте квадратичного смесителя. В нем входной отраженный сигнал разделяется на два плеча ( $I$  и  $Q$ ), в одном из которых осуществляется поворот по фазе на  $90^\circ$  ( $Q$  – канал) в линии задержки на  $\lambda_0/4$ . Таким образом, фактически воспроизводится аналитический сигнал преобразования Гильберта. В дальнейшем мгновенная доплеровская частота  $f_D$  и, соответствующая ей скорость движения –  $V(t)$  определяются по временному сдвигу между выходными доплеровскими сигналами  $t_3$ , по прямому –  $I$  и квадратурному –  $Q$  каналам [5]. Оба метода позволяют устранять влияние искажения спектра доплеровского сигнала из-за работы антенны в ближней зоне.



а) рис.3 а) реальный доплеровский сигнал  $S(t)$ , б) ...исанный за время  $T = 1$  сек. в о.е.; б) его периодограмма спектральной плотности  $D(F)$  в нормализованном виде при выборке  $t_i$ .

Доплеровские частоты и связанный с ними вектор скорости необходимо определять не в усреднённом виде, а практически непрерывно. Это требуется для уменьшения накопительной погрешности, которая проявляется в процессе интегрирования скорости по времени при вычислении итогового перемещения или пройденного по маршруту пути. Этот путь определяется по формуле:

$$S = \int_0^T V(t) dt = \frac{c}{2f_0 \cos(\alpha) \cos(\beta)} \int_0^T f_D(t) dt = \frac{\lambda_0}{2 \cos(\alpha) \cos(\beta)} \int_0^T f_D(t) dt$$

Из этой формулы видно, что наибольшая точность получается при измерении мгновенной доплеровской частоты и, следовательно, мгновенной скорости.

## 3 Прямое измерение перемещения доплеровским датчиком с квадратурным смесителем

Автономная инерционная система INS определяет перемещение после двойного интегрирования по времени показаний акселерометров по трем осям и интегрирования датчиков скорости вращения, что приводит к накоплению ошибки в промежутках между коррекциями. Если для применения в летательных аппаратах эта особенность не имеет существенного значения из-за доступности корректирующих сигналов от спутников системы GNSS, то в случае наземных ТС может приводить к существенным ошибкам в позиционировании. Для снижения эффекта влияния накопления ошибки, в радиолокационной системе реализован переход к прямому измерению перемещения без необходимости интегрирования скорости по времени на основе  $I$ - $Q$  смесителя. В этом методе выделяется последовательность импульсов в моменты пересечения  $I(t)$  и  $Q(t)$  сигналов

и ведется непрерывный их подсчет. В результате вычисляются пути взаимного перемещения  $S_{1i}$  и  $S_{2i}$  между антеннами и центрами следов от диаграмм направленности антенн на поверхности (см. заштрихованные области на Рис.2). Эти пути будут соответствовать дугам с радиусами  $R + r/2$  и  $R - r/2$ , где  $r$  – расстояние между ними. Тогда за некоторый дискретный  $i$ -ый одинаковый период времени  $T = \Delta t$ , перемещения по дугам этих проекций по подстилающей поверхности  $S_{1i}$  и  $S_{2i}$  (см. Рис.4), будут определяться выражениями:

$$\begin{cases} S_{1i} = \pi(R_i + r/2)\omega_i / 180^\circ \\ S_{2i} = \pi(R_i - r/2)\omega_i / 180^\circ \end{cases},$$

где  $R_i$  и  $\omega_i$  – текущий радиус и угол поворота оси транспортного средства, которые определяются из решения этой системы уравнений:

$$(5) R_i = r(S_{1i} + S_{2i}) / 2(S_{1i} - S_{2i}), \quad \omega_i = (S_{1i} - S_{2i})180^\circ / \pi r$$

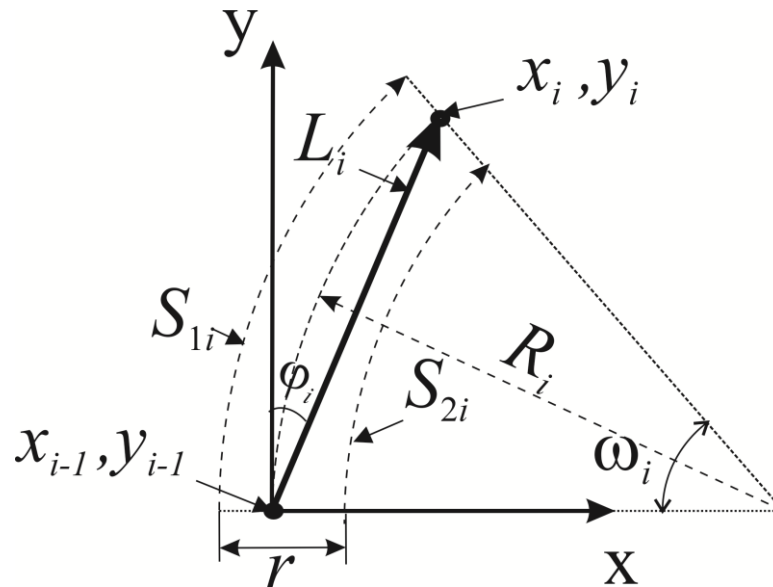


Рис.4 Определение вектора перемещения  $L_i$  при движении транспортного средства.

Поскольку, длина хорды  $L_i = 2R_i \sin(\omega_i / 2)$ , а  $\varphi_i = \omega_i / 2$  (Рис.4), то с учетом (5), получим выражение сразу для массива векторов перемещения  $\{L_i, \varphi_i\}$  вместо векторов скоростей  $\{V_i, \varphi_i\}$  (2):

$$(6) L_i = r \left( \frac{S_{1i} + S_{2i}}{S_{1i} - S_{2i}} \right) \sin \left( \frac{(S_{1i} - S_{2i})90^\circ}{\pi} \right), \quad \varphi_i = \frac{(S_{1i} - S_{2i})90^\circ}{\pi}$$

Расстояние  $r$  можно вычислить из формул решения прямоугольных треугольников (см. Рис.1 и Рис.2):

$$r = 2a \operatorname{tg}(\beta) = 2h \operatorname{ctg}(\alpha) \operatorname{tg}(\beta)$$

где  $a$  – расстояние между проекцией датчика на поверхность и центром следа диаграммы направленности его антенны на поверхность в вертикальной плоскости,  $h$  – высота расположения антенн 1,2 над поверхностью. Если антенны датчиков расположены по боковым сторонам ТС, то к расстоянию  $r$  следует добавить расстояние между датчиками [5]. После этого сразу напрямую можно использовать выражение для перманентного рекуррентного вычисления массива  $\{x_i, y_i\}$  по формулам (4).

Перемещения  $S_{1i}$  и  $S_{2i}$  надо измерять без использования процедур вычисления спектра, поскольку это требует накопления данных. Задача состоит фактически в подсчете числа периодов доплеровского сигнала за постоянный временной отрезок квантования  $\Delta t_i$ . Из формул (2), с учетом того, что перемещения по дугам лучше измерять в полупериодах этого сигнала  $N_1$  и  $N_2$ , следует:

$$(7) S_{1i} = \frac{\lambda_0 N_1}{4 \cos(\alpha) \cos(\beta)} \quad \text{и} \quad S_{2i} = \frac{\lambda_0 N_2}{4 \cos(\alpha) \cos(\beta)}$$

Сделать это точно за счет подсчета числа пересечений сигнала через ноль за это время затруднительно из-за сложного спектрального состава. Однако, если воспользоваться уже отработанной выше схемой с квадратурными смесителями, можно устойчиво фиксировать число полупериодов каждого перемещения с погрешностью до половины периода доплеровского сигнала, что соответствует расстоянию:

$$\delta S = \pm \frac{\lambda_0}{4 \cos(\alpha) \cos(\beta)}$$

На Рис.5 показаны сигналы с выходов  $I(t)$  и  $Q(t)$  квадратурного смесителя одного из радиолокационных датчиков и импульсный сигнал совпадения на выходе компаратора после подачи на его входы этих сигналов.

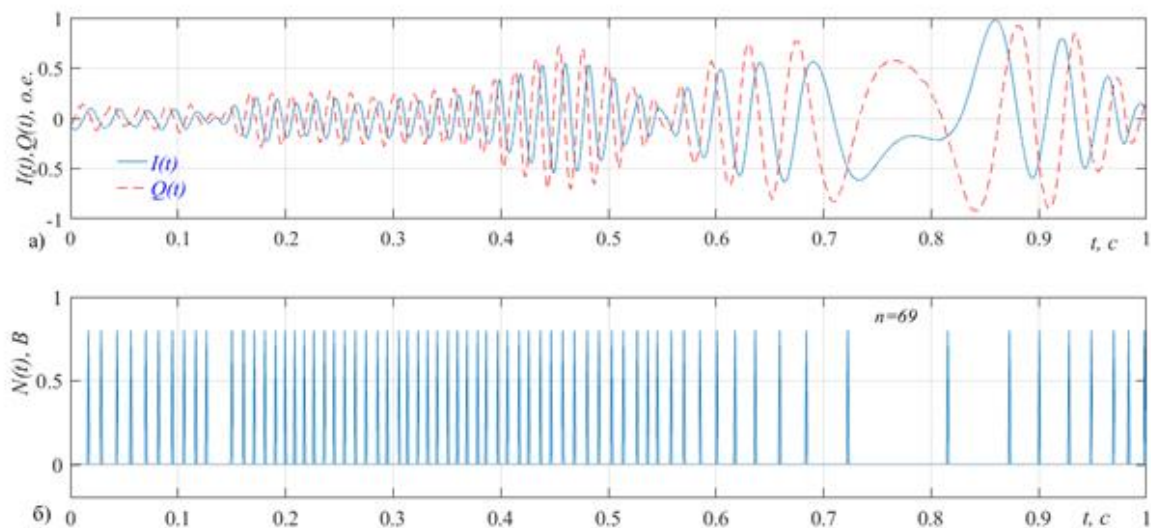


Рис.5 Временные диаграммы сигналов на выходах квадратурного смесителя  $I(t)$  и  $Q(t)$  – а), а также импульсы на выходе компаратора  $N(t)$  – б).

В данном примере за одну секунду количество полупериодов  $n$  равно 69. При длине волны  $\lambda_0=12,5$  мм ( $f_0 = 24$  ГГц),  $\alpha = \beta = 45^\circ$ , путь  $S$  по формулам (6) (7) будет равен 0,431 м. Следует отметить, что в этом случае точность измерения пути не меняется при резких и частых изменениях скорости перемещения объекта. Во всех других способах позиционирования это вносит существенную погрешность.

## Заключение

Если сравнивать две автономные системы навигации радиолокационную и инерциальную, можно отметить, что обе системы имеют свои преимущества и недостатки. Если первая имеет достаточно высокую точность в прямоугольной системе координат, но не отслеживает рельеф местности по высоте, то вторая позволяет измерять перемещения в трехмерном пространстве, но имеет накопительный характер ошибок, практически не имеющий ограничений. При работе в зоне уверенного приема сигналов спутниковой навигации, обе системы нуждаются в периодической коррекции координат для устранения накопившихся ошибок и текущего уточнения технических параметров датчиков (например,  $r$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  для радиолокационной системы, механические параметры гироскопов для инерционной системы). При долгом отсутствии корректирующих сигналов пользование показаниями только инерциальной системой приводит к существенным ошибкам.

Радиолокационная система навигации на локальном уровне может обеспечить большую точность. Ее показания могут корректироваться за счет одометров при линейном перемещении и показаний инерционной системы на коротких отрезках времени, в том числе и по высоте.

В результате настоящей работы были разработаны:

1. Автономный способ позиционирования наземного транспорта с помощью СВЧ датчиков.
2. Способ обработки доплеровского сигнала для ближней зоны антенны СВЧ датчика при ее направлении под углом к поверхности с помощью СПЧМ и при использовании квадратурного смесителя в приемном тракте.

3. Прямое измерение перемещения наземного транспорта на основе  $I-Q$  смесителя.

Результаты могут быть использованы в позиционировании управляемых и беспилотных наземных транспортных средств в условиях отсутствия или нестабильного приема сигналов GNSS, например, в производственных помещениях или в условиях плотной городской застройке, как альтернатива инерциальной навигационной системе.

### Литература

1. Дардари Д., Фаллетти Э., Луизе М. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов. ТЕХНОСФЕРА, Москва, 2012.
2. Хаблов Д.В. Обработка сигнала СВЧ датчиков для наземной автономной навигации / Материалы 28-ой Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2018, Севастополь). Севастополь: КНТЦ им. Попова, 2018. Т. 6. С. 1421-1428.
3. Xu Ch., Daniel L., Hoare E., Sizov V., Cherniakov M. Comparison of Speed over Ground Estimation Using Acoustic and Radar Doppler Sensors. Proceedings of the 11th European Radar Conference. Rome, Italy, 2014, pp. 189-192
4. Хаблов Д.В. Correlation Method for Signal Processing of Microwave Doppler Sensors. Measurement Techniques. 2017. Vol.60, No.5, С. 505 -509.
5. Хаблов Д.В. Autonomous navigation system of ground transport based on Doppler sensors for measuring vector velocity. // Measurement Techniques. 2018. Vol. 61, No. 4. С. 384-389.