

DOI:

СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУЗОВОГО БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ СВЧ ДОПЛЕРОВСКИХ ДАТЧИКОВ

Хаблов Д.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва

ул. Профсоюзная д.65

dkhablov@mail.ru

Аннотация: Для эффективного управления потоками беспилотных транспортных средств (БТС) на крупных производственных предприятиях и складах, как на открытых пространствах, так и в помещениях, необходима система точного динамического позиционирования. Это нужно для оптимизации маршрутов с целью увеличения скорости перемещений и предотвращения столкновений. В статье рассматривается применение автономной системы навигации, использующей радиолокационные датчики перемещения совместно с одометрическими данными. Описывается разработанный алгоритм адаптивной фильтрации данных на основе фильтра Калмана, позволяющий непрерывно получать информацию о текущем положении БТС с требуемой точностью. В результате появляется возможность оптимизировать траекторию движения всех БТС в динамике с целью увеличения производительности и надежности транспортировки грузов.

Ключевые слова: автономная навигация, эффект Доплера, сверхвысокочастотный датчик перемещения, квадратурный смеситель, фильтр Калмана.

Введение

Развитие современного технологического процесса напрямую связано с производством, где участие человека сведено к минимуму. Это касается самых обычных рутинных действий с постепенным переходом к все более и более сложным операциям. В этом ряду роботизация транспорта с целью автоматического перемещения грузов внутри замкнутого технологического цикла или производства необходимых операций по выращиванию сельскохозяйственной продукции занимает одно из первых мест. Высвобождение человеческого ресурса из непосредственного управления движущейся техникой в локальных областях по определенному количеству маршрутов путем создания беспилотного транспорта, позволяет более эффективно наладить местную логистику. В результате появляется возможность использования персонала для выполнения более продуктивных интеллектуальных функций системного дистанционного управления в масштабах всего производственного процесса.

Для дистанционного управления беспилотным транспортом оператор или управляющая электронная система должны иметь информацию о текущих координатах расположения всех объектов, как неподвижных, так и движущихся, их параметров движения - скорости и ускорения. Это необходимо для оптимального управления процессом перемещений из единого центра для предотвращения столкновений, пробок и заторов путем своевременного изменения маршрутов и параметров движения контролируемых объектов. Для определения текущего местоположения в простейшем случае можно было бы воспользоваться глобальной спутниковой навигационной системой (GNSS), результаты которой в дальнейшем транслируются в оперативный центр. Однако в действительности все оказывается не так просто.

В GNSS определение местоположения достигается путем получения сигналов в приемнике 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 загромождение. Если его не принимать во внимание, то общее среднеквадратичное отклонение GNSS на основе глобальных систем позиционирования 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 беспилотного транспорта такая точность абсолютно неприемлема, здесь необходимо перемещаться по коридорам в замкнутых пространствах, проезжать через двери, огибать станки и другие объекты в цехах или строго двигаться по маршрутам между грядками при обработке полей в сельском хозяйстве. Здесь точность позиционирования должна быть на уровне сантиметров. Кроме этого, сигналы GNSS принимаются не непрерывно, а с задержкой не менее чем через одну секунду, что также невозможно, поскольку грозит неминуемым

столкновением при непредвидимых обстоятельствах. Следует также отметить, что GNSS не работает практически ни в каких производственных помещениях 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 максимальной чувствительности приемника в среднем 148 дБм.

В производственных помещениях используются ряд локальных навигационных систем. Например, система с помощью беспроводных локальных сетей (WLAN), где оценка дальности производится по мощности принимаемого сигнала (RSS) с использованием метода цифрового моделирования поля в пространстве. Система на основе радиочастотных меток (RFID), осуществляемая за счет маркирования объекта и (или) считывающих устройств. Система навигации на беспроводных сенсорных сетях (WSN), точность которых, также как и в предыдущей системе, зависит от количества узлов и, наконец, самая точная и дорогая сверхширокополосная технология позиционирования (UWB), позволяющая измерить расстояние с точностью до 1 метра. Однако все эти системы непригодны для навигации в помещениях и предназначены лишь для грубого определения беспилотного транспорта в какой-либо зоне с последующим управлением по телемониторам, которое требует трудоемкого процесса обучения из-за большого варианта маршрутов и их частого изменения.

Для повышения точности и непрерывности позиционирования на летательных аппаратах и судах дополнительно с GNSS используется инерциальная навигационная система (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. Гироскопы измеряют скорости вращения (угловую скорость), которые датчик совершает вокруг predetermined оси. 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 транспортного средства, 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. Из-за этого INS применяется всегда совместно с глобальными системами для своевременной коррекции показаний и только в авиации и на судах. Именно поэтому эта навигационная система не может применяться для беспилотного транспорта, тем более что для наземного транспорта она выходит неоправданно дорогой.

В отличие от INS существует еще автономная система на основе сверхвысокочастотных (СВЧ) датчиков перемещения, использующая эффект Доплера для радиоволн. Эти датчики позволяют измерять напрямую перемещение, что дает возможность избежать накопительной ошибки, свойственной инерциальным датчикам. При этом они обладают невысокой стоимостью, весом, габаритами и энергопотреблением. В целом это дает возможность предложить СВЧ датчики перемещения для использования в беспилотных системах наземного транспорта.

1 Принцип действия и структура доплеровского СВЧ датчика перемещения.

Обычный СВЧ датчик работает следующим образом. Радиоволновое излучение с постоянной частотой f_0 направляется передающей антенной в сторону движения объекта, отраженные волны принимаются и смешиваются с частью генерирующей волны. В результате выделяется сигнал с доплеровской частотой f_D , которая зависит от радиальной скорости между антенной и объектом v_r по формуле:

$$(1) \quad f_D = 2v_r/\lambda_0,$$

где $\lambda_0 = c/f_0$ – длина волны несущей частоты, c – скорость света. Падающая $A_T(t)$ и отраженная $A_R(t)$ волны будут выглядеть следующим образом:

$$(2) \quad A_T(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_1) \quad \text{и}$$

$$(3) \quad A_R(t) = \cos 2\pi[(f_0 \pm 2v_r/\lambda_0)t + \varphi_2],$$

где φ_1 и φ_2 – фазы падающей и отраженной волн, зависящие от расстояния, отражающих свойств поверхности и фазового шума. Частота принимаемого сигнала равна $f_0 \pm f_D$, а собственно выходной сигнал после фазового детектирования на смесителе сигналов $A_\varphi(t)$ (2) и (3) будет соответствовать выражению:

$$(4) \quad A_\varphi(t) = \cos(\pm 2\pi f_D t + \Delta\varphi),$$

где $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$. Отсюда можно найти скорость объекта и определить перемещение за какое-то время. Таким образом, при облучении движущегося объекта в виде плоской поверхности СВЧ излучением, фаза отраженного сигнала $\varphi(t)$ приобретает модуляцию линейно связанную с перемещением $s(t)$. Поскольку f_D зависит от радиальной скорости согласно (1), то при наклонном падении излучающей волны при некотором угле α , фаза будет зависеть ещё и от косинуса этого угла.

$$(5) \quad \varphi(t) = s(t) \cos(\alpha) 4\pi/\lambda_0.$$

Для навигационной системы с целью уменьшения накопительной ошибки необходимо измерять напрямую перемещение. На Рис.1 представлена структурная схема СВЧ датчика перемещения с квадратурной обработкой принимаемого сигнала.

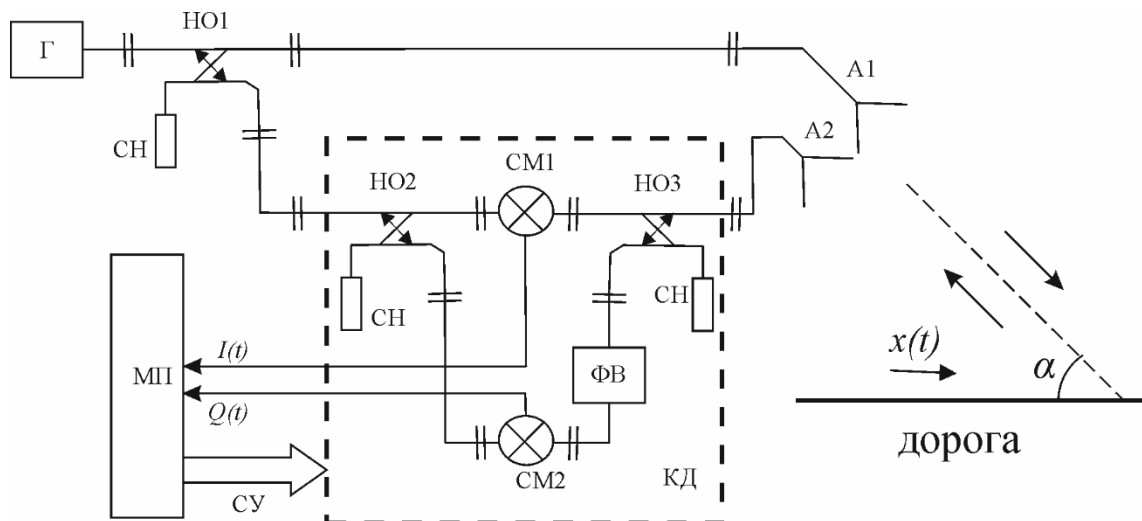


Рис.1 Структурная схема СВЧ датчика перемещения с квадратурным демодулятором.

В состав датчика входит генератор СВЧ – Г с несущей непрерывной частотой $f_0 = 24$ ГГц, направленный ответвитель НО1, с помощью которого образуется измерительный и опорный канал, передающая А1 и приемная А2 антенны, направленный ответвитель НО2 для разделения опорного сигнала на две части для смесителей СМ1 и СМ2, направленный ответвитель НО3 для разделения принимаемого сигнала на две части, одна из которых поступает на вход СМ1 напрямую, а вторая на вход СМ2 через фазовращатель на $\pi/2$ ФВ и микропроцессорный блок МП, входы которого соединены с выходами смесителей. Четвертые выходы НО1-НО3 при этом замкнуты на согласованные нагрузки СН, как показано на Рис.1. Блоки НО2, НО3, СМ1, СМ2 и ФВ совместно с элементами управления входят в состав блока квадратурного демодулятора – КД, управляемого по шине сигналов управления СУ от МК и обозначенного пунктиром на Рис.1.

Работа датчика осуществляется следующим образом. Электромагнитные волны СВЧ с длиной волны $\lambda = c/f_0$ направляются антенной А1 в направлении движения под углом α , отражаются от неё и принимаются приемной антенной А2. Затем принимаемые волны преобразуются в комплексный вид благодаря использованию двухканальной схемы демодуляции, в одном плече которой реализуется добавление фазы в 90° за счет использования линии задержки $\lambda_0/4$. Такая схема позволяет реализовать преобразование сигнала в аналитической форме. В результате, с выходов смесителя на вход МП поступают квадратурные сигналы $I(t)$ и $Q(t)$ с амплитудами A_1 и A_2 в относительных единицах (см. Рис.1):

$$I(t) = A_1 \sin[\varphi(t)]; \quad Q(t) = A_2 \cos[\varphi(t)]$$

где $\varphi(t)$ – мгновенное значение фазы отраженного сигнала, которое, при достижении равенства амплитуд $A_1 = A_2 = A$, можно вычислить по формуле:

$$\varphi(t) = \arctg[I(t)/Q(t)]$$

Поскольку эта фаза связана с перемещением поверхности $x(t)$ и λ_0 выражением (5), получим уравнение для определения перемещения $s(t)$ в метрах:

$$(6) \quad s(t) = \lambda_0 \arctg[I(t)/Q(t)]/4\pi \cos(\alpha).$$

Таким образом, амплитуда отраженного сигнала непосредственно не участвует в определении перемещения, что значительно повышает точность и помехозащищенность измерения. Кроме этого отпадает необходимость предварительной калибровки, что упрощает и ускоряет процесс измерения.

Для того чтобы датчик работал корректно необходимо компенсировать возможные рассогласования в каналах $I(t)$ и $Q(t)$ демодулятора. Условием согласования является непрерывное во времени сохранение равенства модуля принимаемого аналитического сигнала $M(t)$ единице, вычисляемого МП (см. Рис.2в):

$$M(t) = \sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2} \cong 1,$$

что достигается подстройкой амплитуды и фазы в КД по шине СУ от блока МП (см. Рис.1).

Таким образом, СВЧ датчик может измерять напрямую линейное перемещение и, как производную по времени, - скорость транспортного средства (ТС).

2 Автономное позиционирование на основе двух СВЧ датчиков перемещения.

Для того, чтобы измерить маршрут, т.е. определить текущие координаты, необходимо иметь два таких СВЧ датчика с антеннами, направленными под углом α к направлению движения вниз к дороге и под углами β по разные стороны от оси ТС [2]. В результате путь перемещения, со стороны каждого датчика вычисляемый по формуле (6) будет выглядеть следующим образом

$$(7) s(t) = \lambda_0 \arctg[I(t)/Q(t)]/4\pi \cos(\alpha) \cos(\beta).$$

При движении ТС по прямому курсу, сигналы от датчиков будут одинаковы. Это значит, что перемещения относительно мест отражения волн от поверхности, (проекций лучей) будут одинаковыми с обеих сторон. При повороте руля ТС начинает двигаться по кругу с радиусом R_i , где i – номер очередного отсчета с периодом выборки Δt . R_i , линейно зависимый от угла поворота руля, определяется из формулы:

$$(8) R_i = r(f_{D1i} + f_{D2i})/2(f_{D1i} - f_{D2i}),$$

где f_{D1} и f_{D2} – доплеровские частоты первого и второго датчиков.

Проекция перемещений будут двигаться по дугам разной длины. Тогда текущие i -е координаты объекта в направлении севера и юга - x_{ni} и x_{ei} определяются в соответствии с уравнениями [2]:

$$(9) \begin{aligned} x_{ni} &= L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin(2\varphi_1 + \varphi_2) + \dots + L_{i-1} \sin(2\varphi_1 + 2\varphi_2 + \dots + \varphi_{i-1}) \\ x_{ei} &= L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos(2\varphi_1 + \varphi_2) + \dots + L_{i-1} \cos(2\varphi_1 + 2\varphi_2 + \dots + \varphi_{i-1}) \end{aligned}'$$

где $L_i = 2R_i \sin(\varphi_i)$ - хорда окружности перемещения или вектор перемещения ТС из i -ой координаты, угол поворота относительно предыдущей точки - φ_i . Этот вектор можно определить через доплеровские частоты и/или через значения перемещений S_{1i} и S_{2i} по формулам:

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

где S_{1i} и S_{2i} перемещения дуг этих проекций по подстилающей поверхности для первого и второго датчика, которые вычисляются через подсчет числа полупериодов сигнала $s(t)$ (см. формулу 7) - N_1 и N_2 из уравнений:

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

Расстояние между проекциями мест отражения r можно вычислить по формуле:

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

где h – высота расположения обеих антенн 1,2 над поверхностью. Если антенны датчиков расположены по боковым сторонам ТС, то к расстоянию r следует добавить расстояние между датчиками [3].

Погрешность измерения координат в северном и восточном направлении составит:

$$(9) \delta_{ni} = \delta_{ei} = \pm \frac{\lambda_0}{4 \cos(\alpha) \cos(\beta)}.$$

3 Моделирование управления наземного беспилотного транспортного средства.

Для системы динамического позиционирования и управления построим модель собственно грузового колесного ТС. Она будет представлена в виде модели с массой в точке центра тяжести. В двумерной горизонтальной системе координат это будет выглядеть следующим образом:

$$(10) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_e(t) \\ x_n(t) \\ v(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t) \cos(\theta(t)) \\ v(t) \sin(\theta(t)) \\ \left(P \frac{u_r(t)}{v(t)} - A C_d v(t)^2 \right) / m \\ v(t) \operatorname{tg}(u_\psi(t)) / L \end{bmatrix}$$

где x_{ni} и x_{ei} – ориентация в северном и восточном направлении в м, $v(t)$ – скорость в м/с, $\theta(t)$ – угол относительно ориентации на восток. Параметры ТС: A – сечение ТС в м², C_d – коэффициент трения, m – масса ТС, L – длина транспортного средства в м. Входные параметры управления: u_r – акселератор -1 ÷ 1, угол поворота руля - град.

Также как и в случае с INS для позиционирования с помощью СВЧ датчиков удобно применять адаптивный линейный фильтр Калмана (ФК) [4]. ФК является алгоритмом, который оценивает неизвестные переменные на основе линейной модели. Эта линейная модель описывает эволюцию предполагаемых переменных в зависимости от времени в ответ на начальные условия модели, а также известные и неизвестные входные параметры модели. В этом примере оцениваются следующие параметры/переменные:

$$(11) \hat{x}[n] = \begin{bmatrix} \hat{x}_e[n] \\ \hat{x}_n[n] \\ \hat{v}_e[n] \\ \hat{v}_n[n] \end{bmatrix}$$

где $\hat{x}_e[n]$ и $\hat{x}_n[n]$ – оценки скоростей в восточном и западном направлении, n – индекс дискретного времени. Для плоской двумерной системы координат модель для данных имеет вид[⊗]

$$(12) \hat{x}[n+1] = A\hat{x}[n] + Gw[n]$$

$$(13) y[n] = C\hat{x}[n] + v[n]$$

Здесь \hat{x} – вектор оценки состояния, y является измерением, w является шумом процесса и v является шумом измерения. Фильтр Калмана допускает, что w и v нулевые средние независимые случайные переменные с известными отклонениями $E[ww^T] = Q$, $E[vv^T] = R$ и $E[wv^T] = N$. Здесь, A , G , и матрицы C :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T_s \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} T_s/2 & 0 \\ 0 & T_s/2 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

где T_s – период между выборками измерений, обычно - 1 сек.

Система управления беспилотным ТС на основе динамического позиционирования СВЧ датчиками с использованием ФК строится следующим образом. Требуемый маршрут ТС с начальной точкой отсчета поступает в блок управления БУ в виде массива данных (11). На выходе БУ сигналы управления акселератором и углом поворота руля поступают в блок модели ТС – (10). ТС начинает поступательное движение, результаты измерения с оценками ковариации ошибок обрабатываются в блоке ФК. В результате оптимизированные уточненные оценки ориентации поступают по обратной связи в блок управления и сравниваются и желаемыми данными. В случае рассогласования данных сигнал ошибки корректирует управляющие сигналы.

На Рис.2 приведены график моделирования движения ТС в системе координат север-восток. На нем отмечены данные заданного маршрута, измеренные данные координат и оптимизированные данные после компенсации отклонений.

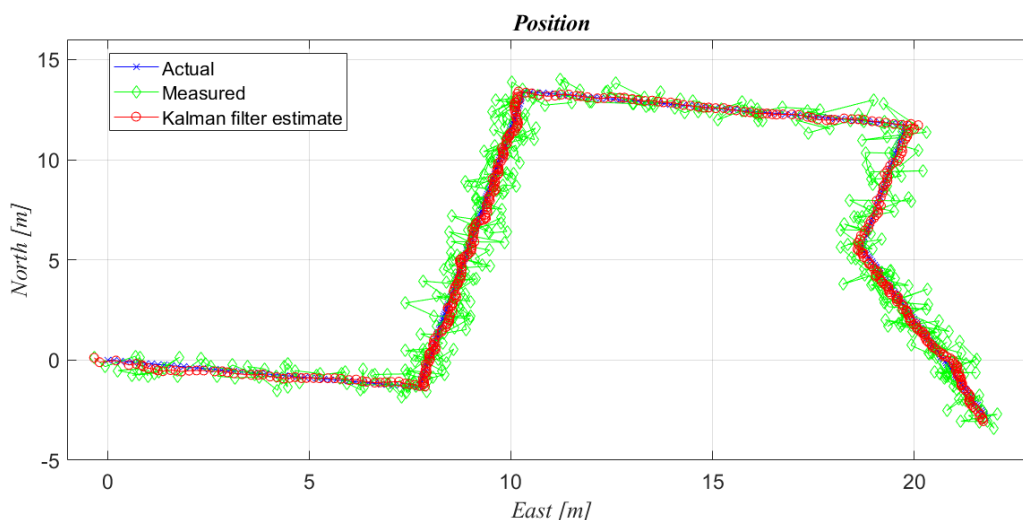


Рис.2 Маршрут перемещения беспилотного транспортного средства под управлением с помощью динамического позиционирования на основе СВЧ датчиков, с применением ФК.

На Рис.3 показана высокая эффективность применения фильтра Кальмана для сглаживания измерений координат при позиционировании.

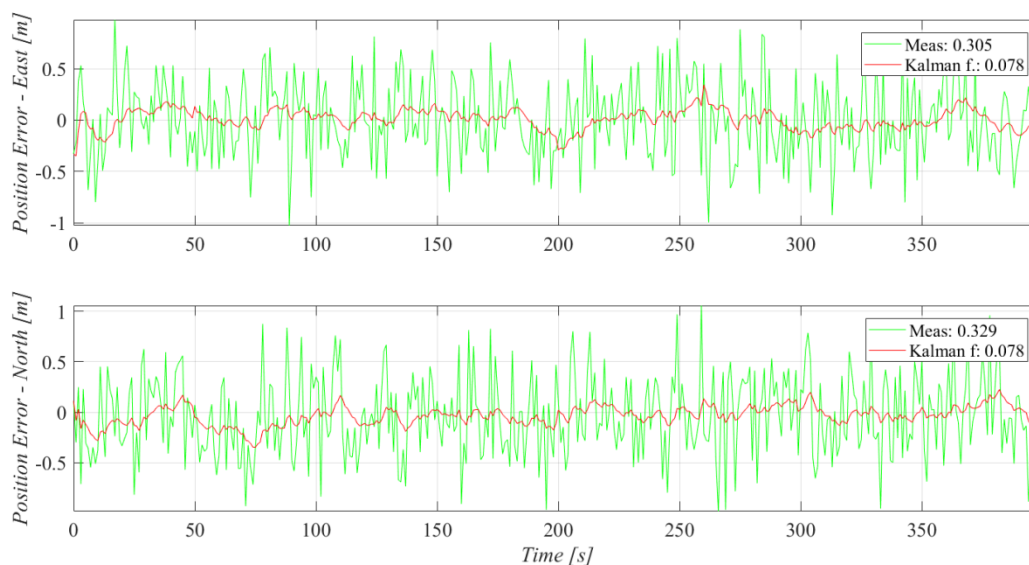


Рис.3 Сглаживание ошибок позиционирования при использовании фильтра Калмана в автономной навигации с использованием СВЧ датчиков.

Заключение

В работе описывается преимущество автономной навигации беспилотного транспорта с помощью доплеровских СВЧ датчиков перемещения. Показана модель управления ТС с помощью динамического позиционирования с применением адаптивного линейного фильтра Калмана. Сам СВЧ датчик непосредственно измеряет перемещение, что дает преимущество перед инерциальными датчиками с косвенными измерениями через двойное интегрирование ускорения. Результаты моделирования системы позиционирования показывает высокую точность порядка половины длины волны несущего СВЧ колебания, что при частоте f_0 – 24 ГГц составляет порядка 7-12 мм. Этого достаточно для беспилотного управления ТС в условиях технологического производства и складов.

Литература

1. Дардари Д., Фаллети Э., Луизе М. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов. ТЕХНОСФЕРА, Москва, 2012.
2. Хаблов Д.В. Continuous terrestrial positioning based on microwave displacement sensors // Measurement Techniques. 2019. Vol. 62, No. 6. С. 554-561.

3. 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.
4. Хаблов Д.В. Application of microwave motion sensors in navigation systems for ground vehicle // ITM Web of Conferences. 2019. Volume 30. 12004. С. 12004 (1-8) URL: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_12004.pdf.