

УПРАВЛЕНИЕ НАЗЕМНЫМ ТРАНСПОРТОМ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Хаблов Д.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65
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. Использование одной GNSS позволяет достичь точности (1-6 м), вполне достаточной для большинства гражданских приложений (для автомобилей, навигации судов и летательных аппаратов в открытом пространстве). В то же время, 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 от зданий и других естественных объектов, необходима более высокая точность. Использование дополнительных базовых наземных станций и локальных систем навигации в помещениях (WLAN, RFID, WSN, UWB) позволяют повысить точность позиционирования примерно до 1 м, но не более. При этом существенно возрастают затраты на инфраструктуру (размещение сотовой системы датчиков и их обслуживание). Поэтому для увеличения точности позиционирования в наземных ТС также как и в воздушных параллельно применяются автономные инерциальные системы навигации (INS). Координаты вычисляются в результате слияния данных этих двух систем. INS обеспечивает большую точность на коротких дистанциях, а для коррекции, используются данные базовых систем навигации (GNSS и др.). Однако при этом инерциальные системы при наземном использовании имеют существенные недостатки. Во-первых, они выглядят дорогостоящими по сравнению с воздушными, во-вторых показания зависят от массы и сил сцепления ТС с поверхностью и в-третьих, они имеют главный недостаток – накопительный характер ошибок [1]. 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 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 α к направлению движения в вертикальной плоскости и под углами β по разную сторону от его оси в горизонтальной плоскости, электромагнитные волны с частотой f_0 . 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.1):

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

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

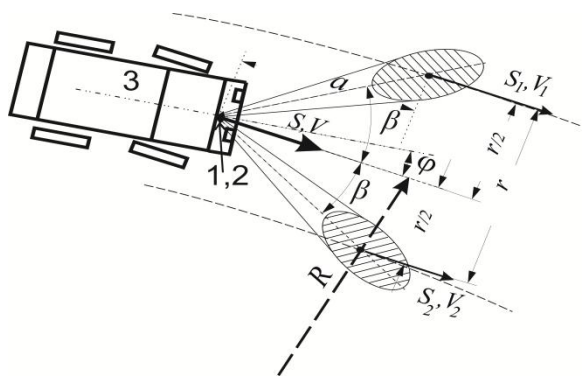


Рис.1 Расположение антенн доплеровских датчиков 1 и 2 на транспортном средстве 3, сверху при его движении

В результате преобразований можно получить выражение для векторной скорости перемещения автомобиля за каждый дискретный момент времени Δt в виде модуля V и угла φ [2]:

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

Таким образом, весь маршрут можно разбить на дискретные отрезки Δt_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 Δt_i происходит по окружности с радиусом R_i , который определяется из формулы:

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

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

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

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

Таким образом, для позиционирования транспортного наземного средства необходимо точно и быстро измерять f_{D1} и f_{D2} (4), все остальные параметры – f_0 , c , r , α и β 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]. 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 [4]. В нем входной отраженный сигнал разделяется на два плеча (I и Q), в одном из которых осуществляется поворот по фазе на 90° (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_s , по прямому – I и квадратурному – Q каналам [5]. Оба метода позволяют устранять влияние искажения спектра доплеровского сигнала из-за работы антенны в ближней зоне.

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. Рис.1). Выражение для массива векторов перемещения $\{L_i, \varphi_i\}$ вместо векторов скоростей $\{V_i, \varphi_i\}$ можно записать в следующем виде:

$$(5) \quad L_i = r \left(\frac{S_{1i} + S_{2i}}{S_{1i} - S_{2i}} \right) \sin \left(\frac{(S_{1i} - S_{2i})90^\circ}{\pi r} \right), \quad \varphi_i = \frac{(S_{1i} - S_{2i})90^\circ}{\pi r},$$

с последующим вычислением маршрута по формуле (4). При этом методическая погрешность измерения пути будет равна половине длины волны несущего СВЧ излучения.

Заключение

В результате настоящей работы были разработаны:

- Автономный способ позиционирования наземного транспорта с помощью СВЧ датчиков.
- 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.
- 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., Фаллети 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.