

ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ АВТОМОБИЛЯ В ПОЛОСЕ ДВИЖЕНИЯ

Д.В. Хаблов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: dkhablov@mail.ru

Ключевые слова: система состояний, модель контроллера с прогнозированием, рулевой угол, эффект Доплера для радиоволн, угол рыскания, боковое отклонение.

Аннотация: В работе описана система управления автомобилем с целью удержания движения по центральной линии внутри полосы дороги. При этом использована модель контроллера с прогнозированием. В качестве параметров управления применяются поперечное отклонение и рулевой угол, при постоянной продольной скорости. Для повышения быстродействия и точности измерения скорости и угла рыскания рассмотрено применение микроволновых датчиков скоростей колес. Составлена и исследована модель соответствующего контроллера удержания автомобиля в полосе движения.

1. Введение

Удержание автомобиля в полосе движения на дороге по центральной линии является одной из важнейших функций автоматического управления на транспорте. При движении по автострате на большой скорости удержание автомобиля на середине полосы дороги требует от водителя высокого напряжения, что при длительном пути приводит к чрезмерной усталости, что повышает риски дорожных происшествий. Поэтому дополнительное включение автономной системы удержания на полосе является значительным фактором повышения безопасности.

В работе описывается система управления удержанием автомобиля в полосе движения, основанная на модели прогнозируемого управления (МПУ) [1]. Данная модель оптимизирует данные, получаемые при текущем измерении и прогнозируемые на основе составленной физической модели, и формирует управляющие команды для достижения соответствующей целевой функции. В данном случае этой функцией является нулевое поперечное отклонение (девиация) e_1 и нулевой угол рыскания e_2 (см. рис. 1). Система оснащается датчиком, таким как камера, который измеряет боковое отклонение и относительный угол рыскания между осевой линией полосы движения и автомобилем. Датчик также измеряет текущую кривизну полосы движения и ее производную. В зависимости от длины кривой, которую может видеть датчик, кривизна перед автомобилем может быть рассчитана исходя из текущей кривизны и ее производной. Система позволяет автомобилю двигаться по осевой линии полос движения на дороге за счет регулировки угла поворота переднего руля автомобиля. Цель управления при удержании полосы движения – приблизить как боковое отклонение, так и относительный угол рыскания к нулю. Однако если для создания опорной траектории этого достаточно, то для измерения реальной скорости и

угла поворота автомобиля точности и быстродействия бывает недостаточно при высоких скоростях. Поэтому для этих целей в предлагаемой модели управления используются СВЧ доплеровские датчики скорости колес.

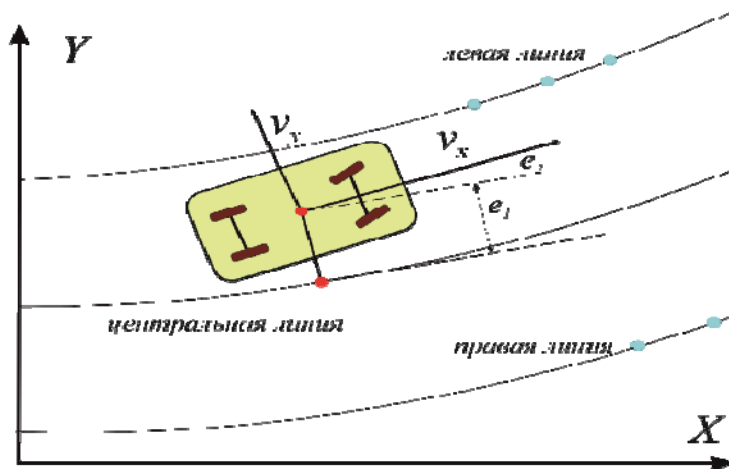


Рис. 1. Движение автомобиля при работе системы удержания движения по полосе.

2. Модель прогнозируемого управления для удержания автомобиля в полосе дороги

2.1. Динамическая модель автомобиля

Рассмотрим модель боковой динамики автомобиля в пространстве состояний [2]

$$(1) \quad \begin{aligned} dx/dt &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

где x – текущее положение системы в глобальных координатах, y – входные управляющие сигналы системы, u – вектор выхода. Кинематическая модель составлена по схеме Аккермана с расчетом рулевого угла δ (см. рис.2). Для рассматриваемой модели управления (1) система состояний имеет следующие параметры.

$$(2) \quad A = \begin{bmatrix} \frac{-(2C_f+2C_r)}{mV_x} & -V_x - \frac{-(2C_f l_f - 2C_r l_r)}{mV_x} \\ \frac{-(2C_f l_f - 2C_r l_r)}{I_z V_x} & \frac{-(2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2)}{I_z V_x} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{m} \\ \frac{2C_f l_f}{I_z} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Здесь:

- I_z – момент инерции транспортного средства при рыскании (Кгм²)
- l_f – продольное расстояние от центра тяжести до передних шин (м)
- l_r – продольное расстояние от центра тяжести до задних шин (м)
- C_f – жесткость передних шин на поворотах (Н/рад)
- C_r – жесткость задних шин на поворотах (Н/рад)
- m – масса автомобиля (кг)
- Переменная состояния x : V_y – боковая скорость, r – скорость изменения угла рыскания e_2 .
- Входная переменная: рулевой руля δ (угол поворота руля).
- Выходные переменные: те же, что и переменные состояния

В рассматриваемой системе управления (1) и (2) используется датчик кривизны $\varphi(t) = 1/R(t)$, где $R(t)$ – мгновенный радиус в прогнозируемой точке траектории (см. рис.2). Таким образом, определяется основное направление дороги и ее производная. В качестве датчика кривизны или блока определения полосы движения используется

камера совместно с навигационной системой или без нее. Это позволяет прогнозировать направление движения на некоторую последовательность шагов вперед. Определяется также время выборки T_s и длительность прогнозирования – T . Например, для $T_s = 0,1$ с и $T = 1$ с, горизонт прогнозирования кривизны составит 10 с. Для выполнения функции удержания автомобиля в полосе движения необходимо получить данные динамики бокового смещения и угла рыскания для управления согласно уравнению:

$$(3) \quad \dot{e}_1 = V_x e_2 + V_y$$

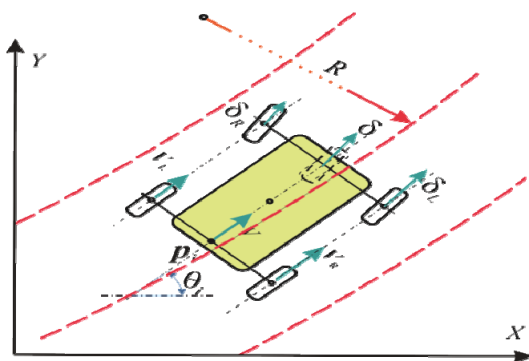


Рис. 2. Кинематическая модель двухколесного мобильного робота.

Работа блока управления сводится к достижению нулевых значений бокового смещения e_1 и угла рыскания e_2 при регулировке всего одного параметра – рулевого угла δ согласно (3). Начальные данные о боковом смещении и относительном угле рыскания поступают от блока определения полосы движения. Для выполнения процедуры удержания на полосе необходимо постоянно вычислять текущее положение автомобиля и его ориентацию в глобальной системе координат $p_i = [x_i \ y_i \ \theta_i]$.

2.2. Кинетическая модель автомобиля

Для описания динамики можно использовать следующую кинетическую модель для четырехколесного автомобиля по схеме Аккермана [3]:

$$(4) \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta)v \\ \sin(\theta)v \\ (\tan(\delta)/L)v \\ 0,5A_T \end{bmatrix}$$

Здесь L – база автомобиля (длина между передней и задней осью), A_T – дроссельная заслонка акселератора, положительная при ускорении и отрицательная при торможении.

Для линейного прогнозирования с целью увеличения скорости вычислений контроллера управления, можно применить аналитические якобианы нелинейного пространства состояний (4):

$$(5) \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v \sin(\theta)\theta + \cos(\theta)v \\ v \cos(\theta)\theta + \sin(\theta)v \\ (v \tan(\delta)/L) + (v(\tan(\delta)^2 + 1)/L)\delta \\ 0,5A_T \end{bmatrix}$$

2.3. Контроллер прогнозируемого управления автомобилем

Источником входной информации для контроллера является датчик обрабатывающий изображение с камеры и моделирующей траекторию движения,

использующий видимый участок дороги. При этом прогнозируется как текущее положение, так и будущее направление движения. В случае потери видимости дорожной разметки могут использоваться сигналы глобальной навигации. Контроллер управляет только одним параметром - рулевым углом δ . Движение продолжается по текущему прогнозируемому участку, затем по следующему, поддерживая нулевые значения бокового отклонения e_1 и угла рыскания e_2 за счет его производной r . Для устойчивой работы необходимо измерение мгновенного вектора скорости. Инерциальные датчики не обладают достаточным быстродействием и чувствительны к изменению параметров модели (2), которые могут меняться. Вектор скорости можно измерить с помощью одометров задних колес. Однако, при движении с большой скоростью, возможно проскальзывание задних и передних колес, что может привести к резкому росту угла рыскания и сбою системы управления.

Наиболее подходящим быстродействующим методом измерения мгновенного вектора скорости является применение СВЧ доплеровских датчиков линейных скоростей задних колес. В них используется непрерывное излучение радиоволн СВЧ диапазона. Приемно-передающая антенна излучает вперед и под углом α к направлению поступательного движения колеса в вертикальной плоскости СВЧ волны с частотой f_0 . Отраженные от поверхности дороги СВЧ волны принимаются этой же антенной. Затем они смешиваются в смесителе с частью излучаемых волн, в результате чего выделяется доплеровский сигнал с частотой f . Эта частота будет пропорциональна линейной скорости колеса v :

$$f = 2v \cos(\alpha) / \lambda_0,$$

где $\lambda_0 = c/f_0$ – длина волны электромагнитных колебаний, c – скорость света. Соответственно скорость колеса можно выразить через доплеровскую частоту:

$$(6) \quad v = \lambda_0 f / 2 \cos(\alpha).$$

Для определения вектора скорости на задних колесах размещаются два СВЧ датчика – на правом и левом колесе. Линейные скорости левого и правого заднего колеса V_L и V_R (см. рис. 2) можно выразить как функции угловой скорости автомобиля $\Omega = \dot{\theta}$:

$$(7) \quad \begin{aligned} V_L &= \Omega(R - W/2) \\ V_R &= \Omega(R + W/2) \end{aligned}$$

Здесь W – расстояние между колесами автомобиля, R – мгновенный радиус поворота.

Из этих двух уравнений можно найти значение мгновенной кривизны траектории автомобиля $\varphi(t)$, его линейную V и Ω угловую скорости:

$$(8) \quad \varphi = 1/R = (V_R - V_L)/VW, \quad V = (V_R + V_L)/2, \quad \Omega = (V_R - V_L)/W.$$

Из соотношения для схемы Аккерман $\tan(\delta) = L/R$, уравнений (6), (7) и (8) можно вычислить рулевой угол по доплеровским частотам датчиков правого f_R и левого f_L колеса:

$$(9) \quad \delta = \arctan((V_R - V_L)L/(V_R + V_L)W) = \arctan((f_R - f_L)L/(f_R + f_L)W).$$

Принцип работы алгоритма управления системой удерживания автомобиля на полосе представлен на рис. 3. Датчик 1 измеряет текущую кривизну, ее производную и рассчитывает прогнозируемый участок в виде путевых точек перед автомобилем. Эти данные поступают на контроллер 2 и на блок вычисления ошибок положения 3. С этого блока сигналы бокового отклонения e_1 и угла рыскания e_2 также поступают на вход контроллера. Контроллер выдает сигнал рулевого управления δ (9) на динамический блок автомобиля 4 (2). Сюда же приходит сигнал измеренной линейной скорости от блока 5. С выхода динамического блока сигналы скоростей правого и левого задних колес поступают на вход блока скорости 5 и блок вычисления ошибок 3 (8). В этом блоке вырабатываются сигналы ошибок, позволяющие контроллеру поддерживать заданные параметры уравнения (3). В данной модели скорость прогнозирования предполагается постоянной.

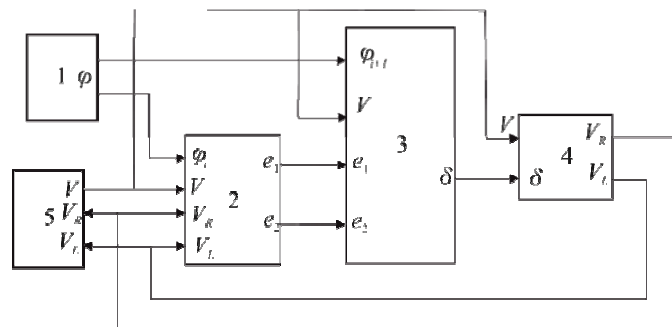


Рис.3. Система управления для удерживания автомобиля на полосе дороги.

4. Заключение

Применение в модели прогнозируемого управления измерение вектора скорости автомобиля с помощью СВЧ датчиков колес значительно повышает качество системы удержания в полосе движения. Во-первых, система использует один управляющий параметр – рулевой угол δ , который с помощью угла рыскания e_2 поддерживает движение по прогнозируемой траектории. Во-вторых, угол δ при постоянной скорости автомобиля и $e_2 \approx 0$ измеряется линейно от разности доплеровских частот СВЧ датчиков (9).

В результате быстроедействие всей системы возрастает, что приводит к сохранению управляемости на более высоких скоростях движения.

Список литературы

1. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A. Process Dynamics and Control / 2nd Edition. Wiley, 2004.
2. Lynch K.M., Frank C. Park. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. 1st ed. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 2017.
3. Sotelo M.Á. Lateral control strategy for autonomous steering of Ackerman-like vehicles // Robotics and Autonomous Systems, 2003. Vol. 45. 223-233.
4. Khablov D.V. Control system for unmanned transport electric vehicles based on microwave Doppler sensors // Measurement Techniques. 2022. Vol. 65, No. 2. P. 142-149.