

УДК 629.7.06(082)

Т.А. Акименко, Е.В. Ларкин, О.А. Лучанский

ОЦЕНКА «СМАЗА» ИЗОБРАЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНОГО КОЛЕСНОГО РОБОТА

Предложена методика оценки параметров «смаза» изображения, формируемого в системе технического зрения мобильного колесного робота. Получены зависимости для пространственно-частотной передаточной функции СТЗ, учитывающие колебания платформы с установленной системой по вертикальной линейной, а также продольной и поперечной угловым координатам.

Введение. Одной из важных сфер применения мобильных колесных роботов (МКР) является сбор информации, осуществляемый в различных областях человеческой деятельности: в области экологического мониторинга, предотвращения чрезвычайных ситуаций, разведки и т.п. [1]. Наибольший объем информации, как правило, содержится в видеосигнале, что предполагает оснащение МКР системами технического зрения (СТЗ). В ряде случаев время пребывания робота в месте сбора информации ограничено, а ценность полученных изображений сцены весьма велика, вследствие чего возникает проблема автоматической видеосъемки в движении. Процесс получения качественных изображений с помощью СТЗ, расположенных на движущемся транспортном средстве, затруднен, что связано как с механическими колебаниями СТЗ во время съемки, так и с конечным временем формирования электронного образа сцены в фотоэлектронном преобразователе, входящем в состав СТЗ. Явление искажения изображений, формируемых с помощью подвижных телекамер, получило название «смаз» и известно еще со времен аэрофотосъемки, проблемы которой во многом схожи с теми, что возникают в МКР [2, 3].

Функциональная и структурная схемы СТЗ МКР. Функциональная схема формирования оптического сигнала приведена на рисунке 1, где обозначено: 1- источник света; 2 - наблюдаемая сцена; 3 - объектив; 4 - фоточувствительный прибор с зарядовой связью (ФПЗС); 5 - дорога; 6 - движители МКР; 7 - подвеска платформы СТЗ.

Сцена 2 освещается источником 1 со световым потоком $\Phi(x, y, z)$. Световой поток $\Phi'(x, y, z)$, отраженный от предметов сцены 2, достигает входного зрачка объектива 3, который фокусирует изображение на входном окне матричного

ФПЗС 4. В процессе наблюдения робот движется по дороге 5, имеющей микрорельеф $h(x)$, представляющий собой отклонение высоты дороги от некоторого среднего уровня, при этом движители 6 создают скорость движения v вдоль координаты x , в результате чего обеспечивается воздействие на подвеску платформы с установленной СТЗ, равное $h(t)$. В результате механического воздействия платформа 7 совершает колебания по вертикальной координате $z_0(t)$, углу места $\vartheta(t)$ и углу крена $\gamma(t)$, что приводит к появлению «смаза» изображения $U(Y, Z)$ в плоскости расположения входных окон фотоэлементов матрицы ФПЗС.

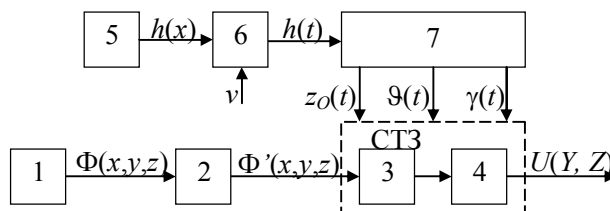


Рисунок 1 – Функциональная схема СТЗ МКР

Структурная схема СТЗ МКР приведена на рисунке 2.

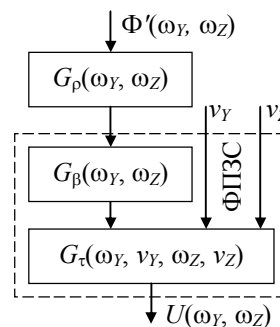


Рисунок 2 – Структурная схема СТЗ МКР

На рисунке 2 показано: $\Phi'(\omega_y, \omega_z)$ - пространственный спектр сигнала изображения, приведенный ко входному окну ФПЗС; $G_p(\omega_y, \omega_z)$ - пространственно-частотная характеристика объектива; $G_\beta(\omega_y, \omega_z)$ и $G_\tau(\omega_y, \nu_y, \omega_z, \nu_z)$ - соответственно статическая и динамическая пространственно-частотные характеристики ФПЗС.

Оценка параметров пространственно-частотных передаточных функций. Вследствие того, что при разработке МКР потери в СТЗ носят оценочный характер, достаточно при анализе ограничиться одной координатой Z . Пространственный импульсный отклик объектива по указанной координате с достаточной точностью может быть описан зависимостью

$$g_p(Z) = \begin{cases} 0 & \text{при } Z < -\frac{\rho}{2}; \\ 1 & \text{при } -\frac{\rho}{2} \leq Z \leq \frac{\rho}{2}; \quad \rho = \frac{\delta_f}{n}, \\ 0 & \text{при } Z > \frac{\rho}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ - диаметр т.н. кружка рассеяния объектива; δ_f - глубина резкости; n - относительное отверстие [4].

Таким образом, пространственная передаточная функция объектива определяется зависимостью

$$G_p(\omega_z) = \frac{\rho}{\sqrt{2\pi}} \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega_z \rho}{2}\right). \quad (2)$$

Импульсный отклик и пространственная передаточная функция фоточувствительного прибора с зарядовой связью имеют вид

$$g_\beta(Z) = \begin{cases} 0 & \text{при } Z < -\frac{\beta}{2}; \\ 1 & \text{при } -\frac{\beta}{2} \leq Z \leq \frac{\beta}{2}; \\ 0 & \text{при } Z > \frac{\beta}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

$$G_\beta(\omega_z) = \frac{\beta}{\sqrt{2\pi}} \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega_z \beta}{2}\right), \quad (4)$$

где β - размер фоточувствительной ячейки ФПЗС по координате Z .

Для определения динамической пространственной передаточной функции ФПЗС предположим, что идеальный мультипликативный дискретизатор с импульсным пространственным откликом, выражаемым δ -функцией Дирака, перемещается относительно изображения по координате Z со скоростью \dot{Z} , которую в пределах времени τ накопления заряда в элементарной фоточувствительной ячейке можно считать постоянной. Тогда за время dt изображение, двига-

ясь со скоростью \dot{Z} , переместится на расстояние $dZ = \dot{Z} dt$.

Всего за время τ дискретизатор сместится на величину $\dot{Z} \tau$, при этом будем считать эту величину центрированной и изменяющейся в пределах

$$-\frac{\dot{Z}\tau}{2} \leq Z \leq \frac{\dot{Z}\tau}{2}. \quad (5)$$

Пусть за время dt в идеальном дискретизаторе накапливается элементарный заряд $dq = B(t)dt$, где $B(t)$ - яркость света на входе в фоточувствительную ячейку. Тогда на всем участке (5) будет накоплен заряд, равный

$$q = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} B(t)dt = \frac{1}{\dot{Z}} \int_{-\dot{Z}\tau/2}^{\dot{Z}\tau/2} B\left(\frac{Z}{\dot{Z}}\right)dZ. \quad (6)$$

Зависимость (6) показывает, что если изображение дискретизируется идеальным дискретизатором, перемещающимся относительно него с постоянной скоростью \dot{Z} , то это эквивалентно операции реальной дискретизации с импульсным откликом

$$g_\tau(Z) = \frac{1}{\dot{Z}} \begin{cases} 0 & \text{при } Z < -\frac{\tau\dot{Z}}{2}; \\ 1 & \text{при } -\frac{\tau\dot{Z}}{2} \leq Z \leq \frac{\tau\dot{Z}}{2}; \\ 0 & \text{при } Z > \frac{\tau\dot{Z}}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

Отметим, что если $\dot{Z} \rightarrow 0$, то $g_\tau(Z) \rightarrow \delta(Z)$ (δ -функция).

Таким образом,

$$G_\tau(\omega_z) = \frac{\tau}{\sqrt{2\pi}} \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega_z \dot{Z} \tau}{2}\right). \quad (8)$$

При собственных колебаниях платформы с установленной СТЗ по координатам $z_o(t)$, $\vartheta(t)$ и $\gamma(t)$ из геометрических соотношений с учетом малости углов места и крена может быть получена зависимость для наихудших условий наблюдения точки ζ

$$\dot{Z} = \frac{f'}{x_\zeta} (\dot{z}_o + \dot{\vartheta} x_\zeta + \dot{\gamma} y_\zeta), \quad (9)$$

где \dot{z}_o , $\dot{\vartheta}$, $\dot{\gamma}$ - скорости изменения соответствующих координат; f' - фокусное расстояние объектива; x_ζ , y_ζ - координаты наблюдаемой точки ζ в земной системе координат.

Рассмотрим трехколесный робот, движущийся по горизонтальной трассе со случайными микронеровностями. Поперечные вертикальные линейные колебания, продольные угловые колебания и поперечные угловые колебания плат-

формы с установленной СТЗ описываются системой уравнений в операторной форме

$$\begin{aligned} z_O(j\omega) &= W_{zA}(j\omega)h_A(j\omega) + \\ &+ W_{zB}(j\omega)h_B(j\omega) + W_{zC}(j\omega)h_C(j\omega); \\ \vartheta(j\omega) &= W_{\vartheta A}(j\omega)h_A(j\omega) + \\ &+ W_{\vartheta B}(j\omega)h_B(j\omega) + W_{\vartheta C}(j\omega)h_C(j\omega); \quad (10) \\ \gamma(j\omega) &= W_{\gamma A}(j\omega)h_A(j\omega) + \\ &+ W_{\gamma B}(j\omega)h_B(j\omega) + W_{\gamma C}(j\omega)h_C(j\omega), \end{aligned}$$

где $W_{rR}(j\omega)$ - передаточная функция от движителя R ($R = \{A, B, C\}$) на координату r ($r = \{z_O, \vartheta, \gamma\}$) платформы; ω - круговая частота; $h_R(j\omega)$ - спектральная плотность сигнала, воздействующего на R -й движитель.

Передаточные функции $W_{rR}(j\omega)$ в (10) определяются путем составления системы дифференциальных уравнений, описывающих МКР и преобразования этих уравнений в операторную форму [5]. На колеса A, B, C подаются случайные сигналы, которые характеризуются спектральными плотностями $H_A(\omega), H_B(\omega), H_C(\omega)$. Поэтому на амплитудных энергетических спектрах $S_z(\omega), S_\vartheta(\omega), S_\gamma(\omega)$, определяемых по зависимостям

$$\begin{aligned} S_z(\omega) &= W_{zA}(j\omega)\overline{W_{zA}(j\omega)}H_A(\omega) + W_{zB}(j\omega) \times \\ &\times \overline{W_{zB}(j\omega)}H_B(\omega) + W_{zC}(j\omega)\overline{W_{zC}(j\omega)}H_C(\omega); \\ S_\vartheta(\omega) &= W_{\vartheta A}(j\omega)\overline{W_{\vartheta A}(j\omega)}H_A(\omega) + W_{\vartheta B}(j\omega) \times \\ &\times \overline{W_{\vartheta B}(j\omega)}H_B(\omega) + W_{\vartheta C}(j\omega)\overline{W_{\vartheta C}(j\omega)}H_C(\omega); \quad (11) \\ S_\gamma(\omega) &= W_{\gamma A}(j\omega)\overline{W_{\gamma A}(j\omega)}H_A(\omega) + W_{\gamma B}(j\omega) \times \\ &\times \overline{W_{\gamma B}(j\omega)}H_B(\omega) + W_{\gamma C}(j\omega)\overline{W_{\gamma C}(j\omega)}H_C(\omega), \end{aligned}$$

где $\overline{(\dots)}$ - комплексно-сопряженная функция; $H_A(\omega), H_B(\omega), H_C(\omega)$ - спектральные плотности случайных функций $h_A(t), h_B(t), h_C(t)$, соответственно, имеется ряд максимумов:

первая группа максимумов определяется наличием комплексно-сопряженных корней в характеристических полиномах передаточных функций $W_{zA}(j\omega), W_{zB}(j\omega), W_{zC}(j\omega), W_{\vartheta A}(j\omega), W_{\vartheta B}(j\omega), W_{\vartheta C}(j\omega), W_{\gamma A}(j\omega), W_{\gamma B}(j\omega), W_{\gamma C}(j\omega)$;

вторая группа максимумов определяется наличием максимумов на спектральных плотностях $H_A(\omega), H_B(\omega), H_C(\omega)$.

Как правило, как среди первой, так и среди второй группы максимумов может быть выделено по одной характерной частоте, на которой максимум данной группы имеет наибольшее значение (основной максимум). В силу затухающего характера амплитудно-частотных характеристик $W_{zA}(j\omega), \dots, W_{\gamma C}(j\omega)$ и спектраль-

ных плотностей $H_A(\omega), H_B(\omega), H_C(\omega)$ остальные максимумы, сдвинутые в область более высоких частот, имеют абсолютное значение, меньшее чем основные максимумы каждой группы.

При изменении скорости движения МКР местоположение и величина основного максимума первой группы на спектральных плотностях сигналов $S_z(\omega), S_\vartheta(\omega), S_\gamma(\omega)$ остаются неизменными. Местоположение основного максимума второй группы при увеличении скорости МКР сдвигается в область более высоких частот, причем величина этого максимума уменьшается. При совпадении частот, соответствующих основным максимумам первой и второй групп, в системе наблюдается явление резонанса на частоте основного максимума первой группы. Наличие резонансной частоты позволяет оценить максимальную скорость колебаний платформы МКР.

Для оценки параметров линейных колебаний центра тяжести предположим, что на МКР подается гармоническое воздействие на частоте резонанса Ω :

$$h(t) = h_{\max} \sin \Omega t, \quad (12)$$

где h_{\max} - амплитуда воздействия.

В наихудшем случае при оценке колебаний трехколесного робота по координате z все три воздействия должны подаваться на колеса A, B, C синфазно. Максимальная скорость изменения линейной координаты на частоте резонанса равна

$$\dot{z}_{O\max} = [|W_{zA}(j\Omega)| + |W_{zB}(j\Omega)| + |W_{zC}(j\Omega)|] \Omega h_{\max}. \quad (13)$$

В наихудшем случае при оценке колебаний МКР по координате ϑ на задние колеса B и C воздействия должны подаваться синфазно, а на заднюю пару колес B, C и переднее колесо A - в противофазе. Максимальная скорость изменения координаты ϑ равна

$$\dot{\vartheta}_{\max} = [|W_{\vartheta A}(j\Omega)| + |W_{\vartheta B}(j\Omega)| + |W_{\vartheta C}(j\Omega)|] \Omega h_{\max}. \quad (14)$$

Для оценки параметров колебаний относительно центра тяжести по углу крена γ сигнал должен подаваться на колеса B и C в противофазе, а колесо A должно катиться по ровной поверхности. Максимальная скорость изменения координаты γ равна

$$\dot{\gamma}_{\max} = [|W_{\gamma B}(j\Omega)| + |W_{\gamma C}(j\Omega)|] \Omega h_{\max}. \quad (15)$$

Отметим, что приведенные оценки дают верхние значения амплитуд колебаний и скоростей изменения координат, что и необходимо для определения максимального «смаза» изображения в СТЗ МКР.

Подстановка выражений (13), (14), (15) в (9) дает следующую величину динамической апертуры СТЗ:

$$\dot{Z}_{\max} = \frac{f' \Omega h_{\max}}{x_{\zeta}} \left\{ \left[|W_{zA}(j\Omega)| + |W_{zB}(j\Omega)| + |W_{zC}(j\Omega)| \right] x_{\zeta} + \left[|W_{\theta A}(j\Omega)| + |W_{\theta B}(j\Omega)| + |W_{\theta C}(j\Omega)| \right] y_{\zeta} \right\} \quad (16)$$

Подстановка (16) в (8) позволяет сформировать пространственно-частотную передаточную функцию СТЗ МКР на подвижном основании. Это, в свою очередь, позволяет сформулировать требования к проектированию системы стабилизации линии визирования робота.

Заключение. Предложенная методика позволяет оценить величину «смаза» изображения, формируемого в СТЗ МКР, если известны параметры дороги, конструкция робота, параметры демпферов подвесок колес и параметры оптико-электронной системы робота.

Библиографический список

1. Бурдаков С.Ф., Стельмаков Р.Э., Мирошкин И.В. Системы управления движением колесных роботов. - СПб: Наука, 2001. - 227 с.
2. Бабаев А.А. Стабилизация оптических приборов. - Л.: Машиностроение, 1984. - 232 с.
3. Пресс Ф.П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. - М.: Радио и связь, 1981. - 136 с.
4. Бегунов Б.Н. Геометрическая оптика. - М.: Изд-во Московского университета, 1966. - 210 с.
5. Лучанский О.А. Демпфирование механических воздействий на транспортируемую аппаратуру // Системы управления электротехническими объектами // Сб. трудов 4-й Всероссийской научно-технической конференции СУЭТО-4. - Тула: ТулГУ, 2007. - С. 30 - 32.