



Модель формирования образа сцены в телевизионном модуле мобильного робота, движущегося по пересеченной местности

Т. А. Акименко^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-1204-2657, tantan72@mail.ru

Е. В. Ларкин^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0001-7471-1524

А. В. Богомолов^б, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-7582-1802

А. Н. Привалов^в, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-3311-0751

^аТульский государственный университет, Ленина пр., 92, Тула, 300012, РФ

^бФедеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Вавилова ул., 44, кор. 2, Москва, 119333, РФ

^вТульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, Ленина пр., 125, Тула, 300026, РФ

Введение: эффективность применения мобильных роботов для телевизионного мониторинга оперативной обстановки определяется качеством регистрируемого видеоряда, в связи с чем требуется сформировать математический аппарат, позволяющий прогнозировать качество изображения. **Цель:** разработать модель формирования образа сцены в телевизионном модуле мобильного робота, движущегося по пересеченной местности, адекватно учитывающую особенности механики движения мобильного робота и принципы функционирования его телевизионного модуля. **Результаты:** разработана математическая модель перемещения мобильного робота, осуществляющего телевизионный мониторинг обстановки, по пересеченной местности. Робот рассмотрен как платформа, закрепленная на двух рядах вязкоупругих опор, которые демпфируют колебания платформы при движении робота. Описан механизм возникновения продольных и поперечных колебаний платформы с установленной на ней стойкой с телевизионным модулем. Показано влияние колебаний платформы на изображение сцены, регистрируемой в фокальной плоскости объектива телевизионного модуля. Получена зависимость параметров перемещения изображения от механических параметров мобильного робота, угловых координат установки телевизионного модуля на платформе и автокорреляционной функции, описывающей траекторию робота. Описано динамическое размытие изображения, формируемого в фотоэлектронных преобразователях, в зависимости от скорости перемещения объекта в фокальной плоскости объектива телевизионного модуля и времени накопления заряда в ячейках фотоэлектронного преобразователя. **Практическая значимость:** построенная модель позволяет адекватно прогнозировать свойства изображения, получаемого бортовым телевизионным модулем мобильного робота, что обуславливает необходимость ее применения при проектировании и эксплуатации мобильных роботов телевизионного мониторинга обстановки.

Ключевые слова — мобильный робот, телевизионный модуль, продольные колебания платформы, поперечные колебания платформы, анализ сцен, обработка изображения, размытие изображения.

Для цитирования: Акименко Т. А., Ларкин Е. В., Богомолов А. В., Привалов А. Н. Модель формирования образа сцены в телевизионном модуле мобильного робота, движущегося по пересеченной местности. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 5, с. 16–24. doi:10.31799/1684-8853-2024-5-16-24, EDN: VWRHRF

For citation: Akimenko T. A., Larkin E. V., Bogomolov A. V., Privalov A. N. Model of scene image formation in the television module of a mobile robot moving over rough terrain. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 5, pp. 16–24 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-5-16-24, EDN: VWRHRF

Введение

В настоящее время мобильные роботы (МР) широко используются как средства телевизионного мониторинга оперативной обстановки [1–4]. Эффективность их применения определяется, в том числе, возможностями обеспечения качественного видеоряда при движении по пересеченной местности [5–7]. В наибольшей степени этим требованиям соответствуют МР на гусеничных шасси, состоящих из N вязкоупругих опор, на которых расположена платформа с закрепленным на ней телевизионным модулем (ТВ-модулем) [8, 9].

При движении МР изображение сцены, формируемое объективом ТВ-модуля в плоскости фотоэлектронных преобразователей, перемещается относительно центра преобразователя, поэтому динамика движения пространства этого оптического сигнала суммируется с динамикой фотоэлектронного процесса измерения интенсивности света. Результатом суперпозиции этих процессов является искажение изображения [10–12].

При наблюдении сцены человеком-оператором потери визуальной информации, связанные с искажениями, могут быть компенсированы способностью человека адаптироваться к усло-

виям наблюдения [13]. При автоматическом анализе сцен полезная информация, зашумленная искажениями, теряется гораздо чаще [14, 15]. Поэтому работу МР необходимо организовать так, чтобы минимизировать потери зрительной информации.

Для этого при разработке систем телевизионного мониторинга оперативной обстановки с применением МР необходима модель формирования образа сцены в ТВ-модуле МР, движущегося по пересеченной местности, адекватно учитывающая особенности механики движения МР и принципы работы ТВ-модуля [16]. Методы аналитического описания наблюдения сцены с МР не получили широкого распространения в инженерной практике, что обуславливает актуальность исследований в этой предметной области.

Математическое моделирование колебаний платформы мобильного робота

Динамическое размытие изображения, формируемое ТВ-модулем, вызвано поперечными колебаниями платформы МР, возникающими при движении вязкоупругих опор, на которых она установлена, по неровной подстилающей поверхности, причем каждая опора организована согласно кинематической схеме, представленной на рис. 1 [17–20].

На рисунке $xOyz$ обозначена геодезическая система координат, $x'O'y'z'$ – система координат, связанная с платформой (для простоты центры O и O' систем координат совпадают и помещены в центр масс платформы). Также принято допущение о том, что МР как транспортное средство симметричен относительно продольной вертикальной плоскости, проходящей через центр масс платформы, причем опоры левого (l) и правого (p) бортов расположены симметрично на расстоянии $\pm L_y$ от продольной плоскости, а опо-

ры с каждой стороны с одинаковым номером расположены по координате x' на расстояниях L_{x1}, \dots, L_{xN} . Центр масс платформы находится в плоскости точек крепления опор, а ТВ-модуль размещается в центре масс и может вращаться соответственно системе координат $x'O'y'z'$ на углы ψ' (азимут) и ϑ' (возвышение).

Опоры имеют единственную степень подвижности относительно платформы, а именно ортогональную плоскость узлов крепления. Платформа не имеет продольной и поперечной подвижности относительно опор шасси, поэтому центры колес могут перемещаться только по прямым, перпендикулярным плоскости подвески платформы, а координаты центров колес описываются уравнениями [20, 21]

$$\begin{cases} x'_{ln} = L_{xn} = \text{const}; \\ y'_{ln} = L_y = \text{const}; \\ z'_{ln} = -S_{ln}^0 + \delta_{hln}(t); \end{cases} \begin{cases} x'_{rn} = L_{rn} = \text{const}; \\ y'_{rn} = -L_y = \text{const}; \\ z'_{rn} = -S_{rn}^0 + \delta_{hrn}(t), \end{cases}$$

где S_{ln}^0, S_{rn}^0 – начальные длины опор, измеренные при расположении МР на плоской горизонтальной плоскости; $\delta_{hln}(t), \delta_{hrn}(t)$ – значения шероховатости под n -м левым (правым) колесом, $1 \leq n \leq N$; t – время.

Пространственное положение ТВ-модуля определяется углами касания ϑ и качения γ , поэтому вектор (x'_v, y'_v, z'_v) имеет геодезические координаты:

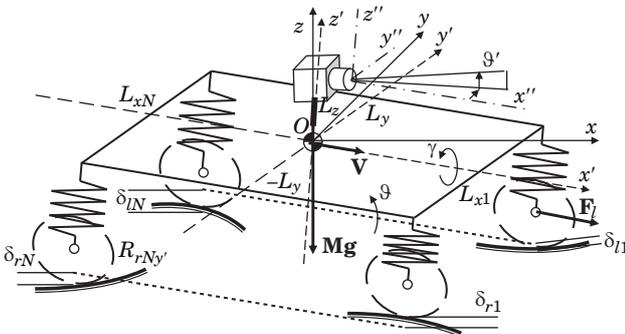
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{A}_\gamma \mathbf{A}_\vartheta \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} x'_v \\ y'_v \\ z'_v \end{pmatrix} = \mathbf{A}_\gamma \mathbf{A}_\vartheta \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{A}_\gamma, \mathbf{A}_\vartheta$ – матрицы поворота на углы ϑ, γ соответственно:

$$\mathbf{A}_\gamma = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}; \mathbf{A}_\vartheta = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & 0 & \sin \vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \vartheta & 0 & \cos \vartheta \end{pmatrix}.$$

Согласно кинематической схеме система дифференциальных уравнений для описания продольных и поперечных колебаний платформы МР имеет следующий вид [22–25]:

$$\begin{aligned} M\ddot{\delta}_z + 2\eta \sum_{n=1}^N (\dot{\delta}_z + \dot{\delta}_\vartheta L_{xn}) + 2c \sum_{n=1}^N (\delta_z + \delta_\vartheta L_{xn}) = \\ = \sum_{n=1}^N [\eta \dot{\delta}_{hl1}(t - \tau_n) + \eta \dot{\delta}_{hr1}(t - \tau_n) + \\ + c\delta_{hl1}(t - \tau_n) + c\delta_{hr1}(t - \tau_n)]; \end{aligned}$$



■ **Рис. 1.** Кинематическая схема мобильного робота
 ■ **Fig. 1.** Kinematic diagram of a mobile robot

$$\begin{aligned}
 J_y \ddot{\delta}_g + 2\eta \sum_{n=1}^N (\dot{\delta}_z + \dot{\delta}_g L_{xn}) L_{xn} + 2c \sum_{n=1}^N (\delta_z + \delta_g L_{xn}) L_{xn} &= \sum_{n=1}^N [\eta \dot{\delta}_{hl1}(t - \tau_n) + \\
 &+ \eta \dot{\delta}_{hr1}(t - \tau_n) + c\delta_{hl1}(t - \tau_n) + c\delta_{hr1}(t - \tau_n)] L_{xn}; \\
 J_x \ddot{\delta}_\gamma + 2\eta N \dot{\delta}_\gamma L_y^2 + 2cN \delta_\gamma L_y^2 &= L_y \sum_{n=1}^N [\eta \dot{\delta}_{hl1}(t - \tau_n) + c\delta_{hl1}(t - \tau_n) - \\
 &- \eta \dot{\delta}_{hr1}(t - \tau_n) - c\delta_{hr1}(t - \tau_n)],
 \end{aligned}$$

где M – масса платформы; J_y, J_x – моменты инерции платформы относительно осей y и x соответственно; $\ddot{\delta} \dots = \frac{d^2 \delta \dots}{dt^2}$; $\dot{\delta} \dots = \frac{d \delta \dots}{dt}$; N – количество рядов опор; $\delta_z, \delta_g, \delta_\gamma$ – отклонение линейных z и угловых ϑ, γ координат от их устойчивых значений; $\eta_{l1} = \eta_{r1} = \dots = \eta_{ln} = \eta_{rn} = \eta_{1N} \dots \eta_{rN} = \eta$ – коэффициент вязкого трения; $c_{l1} = c_{r1} = \dots = c_{ln} = c_{rn} = c_{1N} \dots c_{rN}$ – коэффициенты жесткости; $\tau_n = \frac{L_{xn} - L_{x1}}{V}$ – задержка прохождения некоторой точки траектории n -й парой колес по сравнению с ее прохождением первым рядом колес; V – скорость движения МР.

Преобразование Фурье записанной системы дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

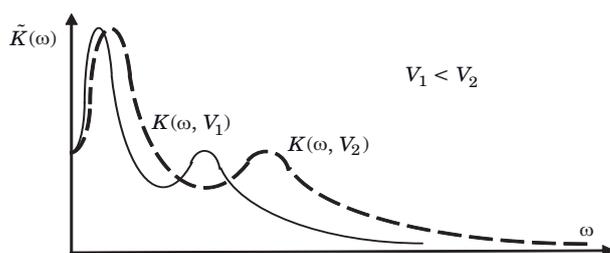
$$\begin{aligned}
 \tilde{\delta}_z(i\omega) \left[M(i\omega)^2 + 2N\eta i\omega + 2c \right] + \tilde{\delta}_g(i\omega) \left(2 \sum_{n=1}^N L_{xn} \right) [\eta i\omega + c] &= \\
 = \sum_{n=1}^N [\tilde{\delta}_{hln}(i\omega) + \tilde{\delta}_{hrn}(i\omega)] [\eta i\omega + c] \exp(-\tau_n i\omega); \\
 \tilde{\delta}_g(i\omega) \left[J_y(i\omega)^2 + 2\eta \sum_{n=1}^N L_{xn}^2 i\omega + 2c \sum_{n=1}^N L_{xn}^2 \right] + \tilde{\delta}_z(s) \left(2\eta \sum_{n=1}^N L_{xn} i\omega + 2c \sum_{n=1}^N L_{xn} \right) &= \\
 = \sum_{n=1}^N L_{xn} [\tilde{\delta}_{hln}(i\omega) + \tilde{\delta}_{hrn}(i\omega)] (\eta i\omega + c) \exp(-\tau_n i\omega); \\
 \tilde{\delta}_\gamma(i\omega) \left[J_x(i\omega)^2 + 2\eta N L_y^2 i\omega + 2c N L_y^2 \right] &= \\
 = L_y \sum_{n=1}^N [\tilde{\delta}_{hln}(i\omega) - \tilde{\delta}_{hrn}(i\omega)] (\eta i\omega + c) \exp(-\tau_n i\omega), \tag{1}
 \end{aligned}$$

где ω – круговая частота; $i = \sqrt{-1}$; $\tilde{\delta} \dots(i\omega) = F[\delta \dots(t)]; F[\delta \dots(t)]$ – прямое преобразование Фурье [26, 27]. Система уравнений (1) может быть решена относительно $\delta_z(s), \delta_g(s), \delta_\gamma(s)$ следующим образом:

$$\tilde{\delta}_z(i\omega) = \frac{\Delta_z(i\omega)}{\Delta(i\omega)}; \tilde{\delta}_g(i\omega) = \frac{\Delta_g(i\omega)}{\Delta(i\omega)}; \tilde{\delta}_\gamma(i\omega) = \frac{\Delta_\gamma(i\omega)}{\Delta(i\omega)},$$

где $\Delta(i\omega)$ – главный определитель системы; $\Delta_z(i\omega), \Delta_g(i\omega), \Delta_\gamma(i\omega)$ – определители $\delta_z(i\omega), \delta_g(i\omega)$ и $\delta_\gamma(i\omega)$ соответственно, которые можно получить заменой первого, второго и третьего столбца на столбец $\Delta(i\omega)$;

$$C = \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N [\delta_{hln}(i\omega) + \delta_{hrn}(i\omega)] (\eta i\omega + c) \exp(-\tau_n i\omega) \\ \sum_{n=1}^N L_{xn} [\delta_{hln}(i\omega) + \delta_{hrn}(i\omega)] (\eta i\omega + c) \exp(-\tau_n i\omega) \\ L_y \sum_{n=1}^N [\delta_{hln}(i\omega) - \delta_{hrn}(i\omega)] (\eta i\omega + c) \exp(-\tau_n i\omega) \end{pmatrix};$$



■ **Рис. 2.** Спектральная плотность продольных колебаний
 ■ **Fig. 2.** Spectral density of longitudinal vibrations

$$\Delta(s) = \begin{vmatrix} M(i\omega)^2 + 2N\eta i\omega + 2c & \left(2 \sum_{n=1}^N L_{xn}\right)(\eta i\omega + c) & 0 \\ 2\eta \sum_{n=1}^N L_{xn} i\omega + 2c \sum_{n=1}^N L_{xn} & J_y(i\omega)^2 + 2\eta \sum_{n=1}^N L_{xn}^2 i\omega + 2c \sum_{n=1}^N L_{xn}^2 & 0 \\ 0 & 0 & J_x(i\omega)^2 + 2\eta N L_y^2 i\omega + 2c N L_y^2 \end{vmatrix}.$$

Возникновение колебаний вызвано продольным и поперечным перемещением МР по пересеченной местности, неровность которой может быть описана автокорреляционной функцией

$$K_{l(r)}(\Xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta_{hl(r)1}(\xi) \delta_{hl(r)1}(\Xi + \xi) d\xi,$$

показывающей связь клиренса под первым левым (правым) колесом с высотой под этим же колесом в точках $\delta_{hl(r)1}(\xi)$, сдвинутых относительно начальной продольной координаты ξ на расстояние Ξ .

Автокорреляционная функция позволяет построить частотный спектр механического сигнала, вызывающего поперечные колебания платформы МР (рис. 2). Спектральная плотность напрямую зависит от скорости V продольного движения МР: увеличение скорости V приводит к увеличению ширины плотности (показано пунктирной линией).

Обратное преобразование Фурье характеризует продольные и поперечные колебания платформы МР с размещенным на ней ТВ-модулем:

$$\delta_z(t) = F^{-1}[\tilde{\delta}_z(i\omega)]; \delta_y(t) = F^{-1}[\tilde{\delta}_y(i\omega)]; \delta_\gamma(t) = F^{-1}[\tilde{\delta}_\gamma(i\omega)],$$

где $F^{-1}[\dots]$ – обратное преобразование Фурье [12, 13]. Скорость изменения $\delta_z(t)$, $\delta_y(t)$ и $\delta_\gamma(t)$ можно определить как

$$\dot{\delta}_z(t) = F^{-1}[i\omega \tilde{\delta}_z(i\omega)]; \dot{\delta}_y(t) = F^{-1}[i\omega \tilde{\delta}_y(i\omega)]; \dot{\delta}_\gamma(t) = F^{-1}[i\omega \tilde{\delta}_\gamma(i\omega)],$$

а для расчета оценки динамического размытия необходимо найти максимальные значения $\dot{\delta}_z(t)$, $\dot{\delta}_y(t)$ и $\dot{\delta}_\gamma(t)$.

Анализ динамического размытия изображения

Пусть МР наблюдает за неподвижным точечным источником света B , имеющим геодезические координаты x_B, y_B, z_B . В системе координат $x''O''y''z''$, центр O'' которой связан с центральным входным зрачком объектива ТВ-модуля, оси x'' и z'' направлены соответственно к источнику и вверх, а ось y'' дополняет систему до правой ортогональной системы координат, источник B имеет координаты

$$\begin{pmatrix} x''_B \\ y''_B \\ z''_B \end{pmatrix} = \mathbf{A}_{g'} \mathbf{A}_{\psi'} \left[\mathbf{A}_\gamma^{-1} \mathbf{A}_g^{-1} \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L_z \end{pmatrix} \right] - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_c \end{pmatrix},$$

где \mathbf{A}_{ϑ} , \mathbf{A}_{ψ} – матрицы поворота ТВ-модуля относительно платформы по углу места ϑ' и углу азимута ψ' соответственно:

$$\mathbf{A}_{\vartheta'} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta' & 0 & -\sin \vartheta' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \vartheta' & 0 & \cos \vartheta' \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{\psi'} = \begin{pmatrix} \cos \psi' & \sin \psi' & 0 \\ -\sin \psi' & \cos \psi' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

L_z – координата расположения ТВ-модуля, связанного с платформой; z_c – координата центра масс.

Дифференцирование по времени уравнения координат источника B дает составляющие скорости точечного источника света относительно ТВ-модуля, вызванные колебаниями платформы относительно опор:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_B'' \\ \dot{y}_B'' \\ \dot{z}_B'' \end{pmatrix} = \frac{d}{dt} \left\{ \mathbf{A}_{\vartheta'} \mathbf{A}_{\psi'} \left[\mathbf{A}_{\gamma}^{-1} \mathbf{A}_{\vartheta}^{-1} \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L_z \end{pmatrix} \right] - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_c \end{pmatrix} \right\}. \quad (2)$$

В соответствии с уравнением (2) переменными, которые следует дифференцировать, являются γ , ϑ , ψ , входящие в \mathbf{A}_{γ} , \mathbf{A}_{ϑ} , \mathbf{A}_{ψ} и z_B . Если расстояние до точечного источника намного больше фокусного расстояния объектива, то скорость движения изображения точечного источника в фокальной плоскости равна

$$(\dot{Y}_B, \dot{Z}_B) = f \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y_B'' \\ x_B'' \end{pmatrix},$$

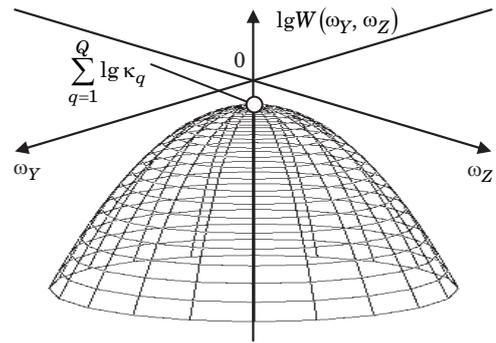
где f – фокусное расстояние линзы.

Известно, что если по пути оптического сигнала ТВ-модуля расположены Q элементов, каждый из которых способствует ухудшению разрешающей способности ТВ-модуля, то его логарифмическую пространственно-частотную характеристику можно определить как (рис. 3)

$$\lg W(\omega_Y, \omega_Z) = \sum_{q=1}^Q \lg \kappa_q - 2\pi^2 (\omega_Y^2 + \omega_Z^2) \sum_{q=1}^Q \sigma_q^2,$$

где ω_Y, ω_Z – пространственные частоты по координатам Y и Z соответственно; κ_q – статический логарифмический коэффициент передачи; σ_q – параметр, определяющий пропускную способность q -го элемента.

В фотоэлектронных преобразователях, построенных на приборах с зарядовой связью (ПЗС), за время накопления происходит объеди-



■ **Рис. 3.** Стандартная логарифмическая пространственно-частотная характеристика ТВ-модуля

■ **Fig. 3.** Standard logarithmic spatial frequency response of a TV module

нение зарядов, образовавшихся под действием света от точечного источника, поэтому помимо учтенных Q на пути оптического сигнала появляется $(Q + 1)$ -й элемент, который фильтрует только сигналы, динамически перемещающиеся в пространстве.

Предположим, что при накоплении заряда в ПЗС-фотоэлектронном преобразователе несколько изменяются как интенсивность точечного источника, так и составляющие \dot{Y}_B, \dot{Z}_B скорости. Это означает, что в момент времени T оптический сигнал преобразуется в электрическую энергию оптического сигнала, равномерно распределенную по координатам Y и Z на расстояниях $\dot{Y}_B T, \dot{Z}_B T$ соответственно. Дисперсии

таких распределений равны $\sigma_{Q+1,Y}^2 = \frac{(\dot{Y}_B T)^2}{12}$ и $\sigma_{Q+1,Z}^2 = \frac{(\dot{Z}_B T)^2}{12}$ [28–30]. Таким образом, полоса пропускания $(Q + 1)$ -го элемента универсально пропорциональна времени накопления заряда и скорости перемещения изображения сцены в фокальной плоскости объектива.

Примеры динамического размытия изображения

Изображения, полученные с МР, движущегося по пересеченной местности, показаны на рис. 4, а–г.

Видно, что продольные и поперечные колебания приводят к ухудшению изображения, в результате чего оно становится размытым при определенных параметрах. Колебания платформы с ТВ-модулем по углу места практически незаметны визуально (см. рис. 4, б), но существенно усложняют алгоритмы анализа сцен, поскольку в этом случае пропадают некоторые особенности сцены, содержащиеся в высоких частотах верти-



■ **Рис. 4.** Изображения сцены, полученные для разных условий наблюдения: *a* – исходное изображение, полученное с неподвижного МР; *б* – изображение при продольных вертикальных колебаниях платформы МР; *в* – поперечные горизонтальные колебания платформы; *г* – совмещение продольных и поперечных колебаний платформы

■ **Fig. 4.** Images of the scene obtained under different observation conditions: *a* – original image obtained from a stationary MR; *б* – image with longitudinal vertical oscillations of the MR platform; *в* – transverse horizontal oscillations of the platform; *г* – combination of longitudinal and transverse oscillations of the platform

кального пространства. Поперечные колебания ТВ-модуля приводят к ухудшению качества по краям изображения (см. рис. 4, в). Это означает, что элементы сцены, содержащиеся в этой области, могут быть пропущены при обработке.

При наличии в кадре движущегося объекта предложенное динамическое описание размытия изображения работает аналогичным образом: ТВ-модуль мобильного робота в совокупности с платформой, расположенной на подвижном основании, считается единым прибором, формирующим цифровой образ сцены безотносительно того, подвижный или неподвижный объект на ней расположен. Поскольку даже в неподвижном ТВ-модуле проекция динамического объекта на плоскость расположения фоточувствительных элементов может перемещаться относительно плоской системы координат, связанной с фоточувствительной матрицей, динамическое размытие изображений присутствует практически всегда. Суммарный эффект искажения изображения определяется суммой векторов скорости

точек проекции, создаваемых собственными движениями ТВ-модуля и объекта в земной системе координат. Вопросы получения численных оценок величин $\tilde{\delta}_z(t)$, $\tilde{\delta}_g(t)$ и $\tilde{\delta}_\gamma(t)$ требуют исследования, а их максимумы могут быть найдены как максимумы производных от обратного преобразования Фурье величин

$$\tilde{\delta}_z(i\omega) = \frac{\Delta_z(i\omega)}{\Delta(i\omega)}; \quad \tilde{\delta}_g(i\omega) = \frac{\Delta_g(i\omega)}{\Delta(i\omega)};$$

$$\tilde{\delta}_\gamma(i\omega) = \frac{\Delta_\gamma(i\omega)}{\Delta(i\omega)}.$$

Размытие изображений, вызываемое рассмотренными выше причинами, затрудняет задачу выделения заданных объектов в потоке формируемых видеоданных. Поэтому при разработке требований к алгоритмическому и программному обеспечению систем искусственного интеллекта, производящих анализ сцен, наблюдаемых

ТВ-модулем, размещенным на подрессоренной платформе МР, следует учитывать как конструктивные особенности робота, так и условия его эксплуатации, а именно характер пересеченной местности и скорость, на которой производится формирование видеосигнала [31].

Заключение

Разработанная модель формирования образа сцены в бортовом ТВ-модуле МР, движущегося по пересеченной местности, имеет существенное значение при проектировании системы наблюдения МР, поскольку она дает возможность про-

гнозировать качество изображения, получаемого ТВ-модулем. Это в свою очередь позволяет создать оптимальные алгоритмы управления МР при планировании его применения в заданных условиях движения и наблюдения.

Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-29-20256 «Методы и алгоритмы синтеза иерархических систем цифрового управления многоконтурными объектами».

Литература

1. Mehmszow U. *Mobile Robotics: A Practical Introduction*. Springer-Verlag, London Ltd, 2003. 273 p.
2. Siciliano B., Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016. 2155 p.
3. Hervas J. R., Reyhanoglu M., Tang H. Automatic landing control of unmanned aerial vehicles on moving platforms. *Industrial Electronics: IEEE 23rd Intern. Symp.*, IEEE, 2014, pp. 69–74.
4. Хрипунов С. П., Чиров Д. С., Благодарящев И. В. Военная робототехника: современные тренды и векторы развития. *Тренды и управление*, 2015, № 4, с. 410–422. doi:10.7256/2307-9118.2015.4.17117
5. Larkin E., Bogomolov A., Privalov A. Data buffering in information-measuring system. *Intern. Ural Conf. on Measurements (UralCon)*, Chelyabinsk, 16–19 October 2017, IEEE, 2017, pp. 118–123. doi:10.1109/URALCON.2017.8120697
6. Ronzhin A., Ngo T., Vu Q., Nguyen V. Theoretical Foundations to Control Technological and Robotic Operations with Physical Manipulations of Agricultural Products. *Ground and Air Robotic Manipulation Systems in Agriculture. Series: Intelligent Systems Reference Library*. Springer, Cham, 2022, vol. 214. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86826-0_5
7. Чиров Д. С., Чертова О. Г., Потапчук Т. Н. Методика обоснования требований к системе технического зрения робототехнического комплекса. *Тр. СПИИРАН*, 2017, т. 2, № 51, с. 152–176. doi:10.15622/sp.51.7
8. Larkin E., Bogomolov A., Gorbachev D., Privalov A. About the approach of the transactions flow to control one in robot control systems. *Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. Series: Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10459, pp. 113–122. doi:10.1007/978-3-319-66471-2_13
9. Larkin E., Bogomolov A., Privalov A., Antonov M. About one approach to robot control system simulation. *Third Intern. Conf. ICR 2018, Series: Lecture Notes in Computer Science*, Leipzig, Germany, 18–22 September 2018, vol. 11097, pp. 159–169. doi:10.1007/978-3-319-99582-3_17
10. Kopeika N. S. *A System Engineering Approach to Imaging*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1998. 704 p. doi:10.1117/3.2265069
11. Nguyen V., Saveliev A., Ronzhin A. Mathematical modeling of control and simultaneous stabilization of 3-dof aerial manipulation system. *Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. Series: Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12336, pp. 253–264. doi:10.1007/978-3-030-60337-3_25
12. Варлашин В. В., Лопота А. В. Оптимизация параметров проецирования системы кругового обзора с использованием реперных меток. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2022, т. 23(2), с. 97–103. doi:10.17587/mau.23.97-103
13. Левин Г. Г., Минаев В. Л., Иванов А. Д., Голополов А. А., Горяинова И. В. Метрологическое обеспечение видеоизмерительных систем. *Измерительная техника*, 2023, № 1, с. 24–30. doi:10.32446/0368-1025it.2023-1-24-30
14. Мяо Ч., Рубцов В. И., Орлов Е. А. Повышение достоверности модели внешней среды с помощью телевизионного изображения. *Научный альманах Центрального Черноземья*, 2022, № 2-8, с. 74–84. EDN: GEXXWC
15. Жданов М. А., Сериков С. А. Аналитический обзор существующих платформ и конструктивных типов мобильных роботов-разведчиков. *Colloquium-Journal*, 2019, № 18-2 (42), с. 35–40. EDN: BGUCWW
16. Janesik J. R. *Scientific Charge-Coupled Devices*. SPIE Press, Bellingham, WA, 2001, 924 p. doi:10.1117/12.7974139
17. Dreizier R. M., Ludde C. S. *Theoretical Mechanics. Theoretical Physics 1*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010. 402 p.
18. Kamaldar M., Mahjoob M., Yazdi M., Vahid-Alizadeh H., Ahmadizadeh Saeed. A control synthesis for reducing lateral oscillations of a spherical robot. *IEEE Intern. Conf. on Mechatronics*, 2011, pp. 546–551. doi:10.1109/ICMECH.2011.5971346

19. Larkin E., Bogomolov A., Antonov M. Modeling of increased rigidity of industrial manipulator. *5th Intern. Conf., ICR 2020*, Saint-Petersburg, Russia, October 7–9, 2020. *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12336 LNAI, pp. 170–178. doi:10.1007/978-3-030-60337-3_17
20. Плотников А. В. Кинестатическая модель захвата объектов сервисными роботами при активном перемещении мобильной платформы. М., ИПМ им. М. В. Келдыша, 2023. 21 с. (Препринт / ИПМ им. М. В. Келдыша; № 14). doi:10.20948/prepr-2023-14. https://keldysh.ru/papers/2023/prep2023_14.pdf (дата обращения: 15.02.2024).
21. Larkin E., Bogomolov A., Privalov A. Discrete model of mobile robot assemble fault-tolerance. *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol. 11659 LNAI, pp. 204–215. doi:10.1007/978-3-030-26118-4_20
22. Janarthanan B., Padmanabhan C., Sujatha C. Longitudinal dynamics of a tracked vehicle: simulation and experiment. *Journal of Terramechanics*, 2012, vol. 49, no. 2, pp. 63–72.
23. Hu H., Li E., Zhao X., Liang Z., Yu W. Modeling and simulation of folding-boom aerial platform vehicle based on the flexible multi-body dynamics. *Intern. Conf. on Intelligent Control and Information Processing*, Dalian, 2010, pp. 798–802.
24. Nunez P., Jones R., Shoop S. High-fidelity ground platform and terrain mechanics modeling for military applications involving vehicle dynamics and mobility analysis. *Army tank automotive research development and Engineering Center Warren MI*, 2004, no. TAR-DEC-14339.
25. Степанов М. Ф., Степанов А. М., Степанова О. М., Петров Д. Ю. Разработка и исследование законов оптимального управления движением образовательного робота на колесной платформе. *Математические методы в технологиях и технике*, 2021, № 8, с. 67–74. doi:10.52348/2712-8873_ММТТ_2021_8_67
26. Schiff J. L. *The Laplace Transform: Theory and Applications*. USA, NY, Springer Verlag, 1991. 233 p.
27. Karnopp D. C., Margolis D. L., Rosenberg R. C. *System Dynamics: Modeling, Simulation and Control of Mechatronic Systems*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2012. 636 p.
28. Kobayashi H., Marl B. L., Turin W. *Probability, Random Processes and Statistical Analysis*. Cambridge University Press, 2012. 812 p.
29. Larkin E. V., Akimenko T. A., Bogomolov A. V. Modeling the reliability of the onboard equipment of a mobile robot. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 390–399. doi:10.18500/1816-9791-2021-21-3-390-399
30. Ronzhin A., Saveliev A., Basov O., Solyonyj S. Conceptual model of cyberphysical environment based on collaborative work of distributed means and mobile robots. *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9812, pp. 32–39. doi:10.1007/978-3-319-43955-6_5
31. Kahar S., Sulaiman R., Prabuwo A. S., Akma N., Ahmad S. A., Abu Hassan M. A. A Review of wireless technology usage for mobile robot controller. *Intern. Proc. of Computer Science and Information Technology IPCSIT*, 2012, vol. 34, pp. 7–12.

UDC 004.932

doi:10.31799/1684-8853-2024-5-16-24

EDN: VWRHRF

Model of scene image formation in the television module of a mobile robot moving over rough terrain

T. A. Akimenko^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-1204-2657, tantan72@mail.ru

E. V. Larkin^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-7471-1524

A. V. Bogomolov^b, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-7582-1802

A. N. Privalov^c, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-3311-0751

^aTula State University, 92, Lenina Av., 300012, Tula, Russian Federation

^bFederal Research Center “Computer Science and Control” of RAS, 44, cor. 2, 119333, Vavilova St., Moscow, Russian Federation

^cTula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, 125, Lenina Av., 300026, Tula, Russian Federation

Introduction: The effectiveness of using mobile robots for television monitoring of the operational situation is determined by the quality of the recorded video, in connection with this, it is necessary to create a mathematical apparatus that makes it possible to predict image quality. **Purpose:** To develop a model for the formation of a scene image in the television module of a mobile robot moving over rough terrain, with this model adequately taking into account the peculiarities of the mechanics of the movement of a mobile robot and the principles of operation of its television module. **Results:** We develop a mathematical model for moving a mobile robot that carries out television monitoring of the situation over rough terrain. The robot is considered as a platform mounted on two rows of viscoelastic supports, which dampen platform vibrations when the robot moves. We describe the mechanism for the occurrence of longitudinal and transverse vibrations of the platform with a stand with a television module installed on it. We show the effect of platform vibrations on the image of a scene recorded in the focal plane of the television module lens. We have obtained the dependence of the image movement parameters on the mechanical parameters of the mobile robot, the angular coordinates of the installation of the television module on the platform and the autocorrelation function describing the robot’s trajectory. We describe the dynamic blurring of the image formed in photoelectronic converters, depending on the speed of the movement of the object in the focal plane of the television module lens and the time of charge accumulation in the cells of the photoelectronic converter. **Practical relevance:** The constructed model allows us to

adequately predict the properties of the image received by the on-board television module of a mobile robot, which necessitates its use in the design and operation of mobile robots for television monitoring of the situation.

Keywords – mobile robot, television module, longitudinal vibrations of the platform, transverse vibrations of the platform, scene analysis, image processing, image blur.

For citation: Akimenko T. A., Larkin E. V., Bogomolov A. V., Privalov A. N. Model of scene image formation in the television module of a mobile robot moving over rough terrain. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 5, pp. 16–24 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-5-16-24, EDN: VWRHRF

Financial support

The research was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-29-20256 “Methods and algorithms for the synthesis of hierarchical digital control systems for multi-circuit objects”.

References

1. Mehmszow U. *Mobile Robotics: A Practical Introduction*. Springer-Verlag, London Ltd, 2003. 273 p.
2. Siciliano B., Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016. 2155 p.
3. Hervas J. R., Reyhanoglu M., Tang H. Automatic landing control of unmanned aerial vehicles on moving platforms. *Industrial Electronics: IEEE 23rd Intern. Symp.*, IEEE, 2014, pp. 69–74.
4. Khripunov S. P., Chirov D. S., Blagodaryashchev I. V. Military robotics: modern trends and development vectors. *Trendy i upravlenie* [Trends and Management], 2015, no. 4, pp. 410–422 (In Russian). doi:10.7256/2307-9118.2015.4.17117
5. Larkin E., Bogomolov A., Privalov A. Data buffering in information-measuring system. *Intern. Ural Conf. on Measurements (UralCon)*, Chelyabinsk, IEEE, 2017, pp. 118–123. doi:10.1109/URALCON.2017.8120697
6. Ronzhin A., Ngo T., Vu Q., Nguyen V. *Theoretical Foundations to Control Technological and Robotic Operations with Physical Manipulations of Agricultural Products*. In: *Ground and Air Robotic Manipulation Systems in Agriculture. Series: Intelligent Systems Reference Library*. Springer, Cham, 2022, vol. 214. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86826-0_5
7. Chirov D. S., Chertova O. G., Potapchuk T. N. Methods of study requirements for the complex robotic vision system. *SPIIRAS Proceedings*, 2017, vol. 2, no. 51, pp. 152–176 (In Russian). doi:10.15622/sp.51.7
8. Larkin E., Bogomolov A., Gorbachev D., Privalov A. About the approach of the transactions flow to control one in robot control systems. *Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. Series: Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10459, pp. 113–122. doi:10.1007/978-3-319-66471-2_13
9. Larkin E., Bogomolov A., Privalov A., Antonov M. About one approach to robot control system simulation. *Third Intern. Conf. ICR 2018, Series: Lecture Notes in Computer Science*, Leipzig, 2018, vol. 11097, pp. 159–169. doi:10.1007/978-3-319-99582-3_17
10. Kopeika N. S. *A System Engineering Approach to Imaging*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1998. 704 p. doi:10.1117/3.2265069
11. Nguyen V., Saveliev A., Ronzhin A. Mathematical modeling of control and simultaneous stabilization of 3-dof aerial manipulation system. *Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. Series: Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12336, pp. 253–264. doi:10.1007/978-3-030-60337-3_25
12. Varlashin V. V., Lopota A. V. Optimization of projection parameters of an all-round viewing system using reference marks. *Mechatronics, Automation, Control*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 97–103 (In Russian) doi:10.17587/mau.23.97-103
13. Levin G. G., Minaev V. L., Ivanov A. D., Goloposov A. A., Goryainova I. V. Metrological support for video measuring systems. *Measuring Technology*, 2023, no. 1, pp. 24–30 (In Russian). doi:10.32446/0368-1025it.2023-1-24-30
14. Miao Ch., Rubtsov V. I., Orlov E. A. Increasing the reliability of the model of the external environment with the help of a television image. *Nauchnyi al'manah Central'nogo Chernozem'ya* [Scientific Almanac of the Central Chernozem Region], 2022, no. 2-8, pp. 74–84 (In Russian). EDN: GEXXWC
15. Zhdanov M. A., Serikov S. A. Analytical overview of existing platforms and design types of mobile robots-scouts. *Colloquium-Journal*, 2019, no. 18-2 (42), pp. 35–40 (In Russian). EDN: BGUCWW
16. Janesik J. R. *Sensitive Charge-Coupled Devices*. SPIE Press, Bellingham, WA, 2001. 924 p. doi:10.1117/12.7974139
17. Dreizier R. M., Ludde C. S. *Theoretical Mechanics. Theoretical Physics 1*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010. 402 p.
18. Kamalidar M., Mahjoob M., Yazdi M., Vahid-Alizadeh H., Ahmadzadeh Saeed. A control synthesis for reducing lateral oscillations of a spherical robot. *IEEE Intern. Conf. on Mechatronics*, 2011, pp. 546–551. doi:10.1109/ICMECH.2011.5971346
19. Larkin E., Bogomolov A., Antonov M. Modeling of increased rigidity of industrial manipulator. *5th Intern. Conf. ICR 2020*, Saint-Petersburg, 2020. *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12336 LNAI, pp. 170–178. doi:10.1007/978-3-030-60337-3_17
20. Plotnikov A. V. *Kinestatische model' zahvata ob'ektov servisyymi robotami pri aktivnom peremeshenii mobil'noi platform* [Kinetostatic model of object capture by service robots, with active movement of the mobile platform]. Preprints of Keldysh IPM RAS, 2023, no. 14. 21 p. (In Russian). doi:10.20948/prepr-2023-14. Available at: https://keldysh.ru/papers/2023/prep2023_14.pdf (accessed 15 February 2024).
21. Larkin E., Bogomolov A., Privalov A. Discrete model of mobile robot assemble fault-tolerance. *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol. 11659 LNAI, pp. 204–215. doi:10.1007/978-3-030-26118-4_20
22. Janarthanan B., Padmanabhan C., Sujatha C. Longitudinal dynamics of a tracked vehicle: Simulation and experiment. *Journal of Terramechanics*, 2012, vol. 49, no. 2, pp. 63–72.
23. Hu H., Li E., Zhao X., Liang Z., Yu W. Modeling and simulation of folding-boom aerial platform vehicle based on the flexible multi-body dynamics. *Intern. Conf. on Intelligent Control and Information Processing*, Dalian, 2010, pp. 798–802.
24. Nunez P., Jones R., Shoop S. High-fidelity ground platform and terrain mechanics modeling for military applications involving vehicle dynamics and mobility analysis. *Army tank automotive research development and Engineering Center Warren MI*, 2004, no. TARDEC-14339.
25. Stepanov M. F., Stepanov A. M., Stepanova O. M., Petrov D. Yu. Development and research of optimal control laws of the movement of the educational robot on the wheel platform. *Mathematical Methods in Technologies and Technics*, 2021, no. 8, pp. 67–74 (In Russian). doi:10.52348/2712-8873_MMTT_2021_8_67
26. Schiff J. L. *The Laplace Transform: Theory and Applications*. USA, NY, Springer Verlag, 1991. 233 p.
27. Karnopp D. C., Margolis D. L., Rosenberg R. C. *System Dynamics: Modeling, Simulation and Control of Mechatronic Systems*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2012. 636 p.
28. Kobayashi H., Marl B. L., Turin W. *Probability, Random Processes and Statistical Analysis*. Cambridge University Press, 2012. 812 p.
29. Larkin E. V., Akimenko T. A., Bogomolov A. V. Modeling the reliability of the onboard equipment of a mobile robot. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 390–399. doi:10.18500/1816-9791-2021-21-3-390-399
30. Ronzhin A., Saveliev A., Basov O., Solyonyj S. Conceptual model of cyberphysical environment based on collaborative work of distributed means and mobile robots. *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9812, pp. 32–39. doi:10.1007/978-3-319-43955-6_5
31. Kahar S., Sulaiman R., Prabuwoño A. S., Akma N., Ahmad S. A., Abu Hassan M. A. A review of wireless technology usage for mobile robot controller. *Intern. Proc. of Computer Science and Information Technology IPCSIT*, 2012, vol. 34, pp. 7–12.