
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК621.397+623.4.052.5+528.063.1
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-189-196

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДУЛЯ УПРЕЖДЕНИЯ ОПАСНОСТИ В СИСТЕМЕ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

М. Б. ЛЕОНОВ, В. Н. НАЗАРОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: muxeu87@yandex.ru*

Рассматривается математическая модель модуля упреждения опасности системы видеонаблюдения, представляющего собой визир, механизм наведения и устройства целеуказания. Выполнено преобразование координат из локальной системы в абсолютную. Представлены результаты, свидетельствующие об успешном функционировании модуля в выбранных системах координат. Выполнен расчет по согласованию точности наведения и преобразования координат с угловым полем зрения объектива системы видеонаблюдения.

Ключевые слова: *система видеонаблюдения, модуль упреждения опасности, целеуказатель, абсолютная система координат, локальная система координат, преобразование координат, прицел, визир, объектив, угловое поле зрения*

Существующие системы видеонаблюдения, предназначенные для решения различных задач — от охраны территории до проведения разведывательных операций и обеспечения безопасности людей, находят в настоящее время широкое применение. Для усовершенствования таких систем необходимо создание универсальных приборов, работающих в различных спектральных диапазонах и пригодных для использования в разное время суток и в сложных погодных условиях. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность удаленного управления такими приборами за счет использования новых технологий, современной элементной базы и конструктивных решений.

На основе анализа зарубежных разработок [1, 2] была создана представленная в работе [3] концептуальная модель системы видеонаблюдения (рис. 1) с модулем упреждения опасности, состоящим из визира (прицела) автоматизированного снайперского комплекса (АСК), механизма наведения и устройств целеуказания. Оператор системы видеонаблюдения, согласно концептуальной модели, находится в укрытии, вне прямой видимости цели (мишени M), и управляет системой дистанционно с помощью специального оборудования. На экране планшетного компьютера, соединенного с АСК с известными абсолютными координатами (широта B_1 , долгота L_1 , высота H_1), отображается информация, наблюдаемая в поле зрения объектива системы видеонаблюдения. Определение координат мишени осуществляется с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и/или трехкоординатного оптико-электронного целеуказателя (ЦУ) [4]. Местоположение АСК, БПЛА и целеуказателя определяется через ГЛОНАСС-спутник. С помощью целеуказателя в локальной системе координат определяются координаты мишени (наклонная дальность $D_{ЦУ}$, угол места $\epsilon_{ЦУ}$, азимут $A_{ЦУ}$), которые необходимо

перевести в абсолютную систему координат (B_M, L_M, H_M) . Далее оператор вводит эти координаты в терминал, где вычисляются координаты цели относительно АСК $(D_M, \varepsilon_M, A_M)$.

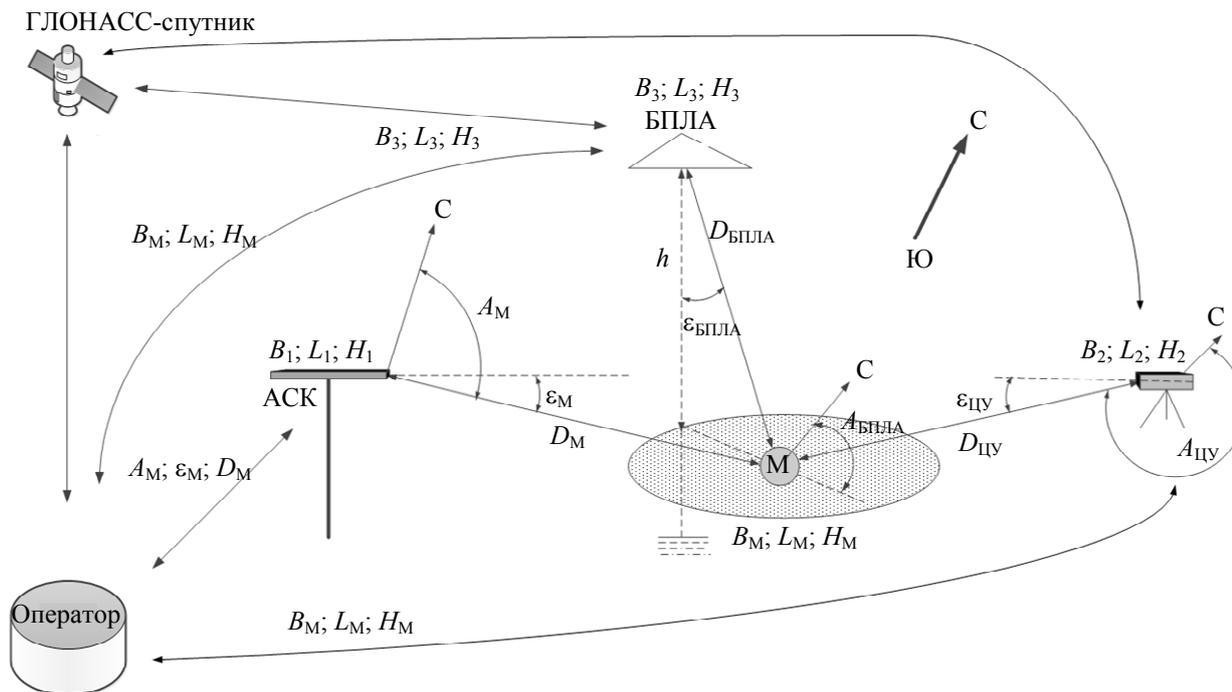


Рис. 1

Проверка успешного функционирования концептуальной модели системы видеонаблюдения связана с необходимостью создания математической модели модуля упреждения опасности и ее исследования с учетом погрешностей устройств определения координат мишени, устройств ввода углов прицеливания и преобразований координат.

Первым этапом создания математической модели является решение задачи преобразования локальных координат цели в абсолютные, и наоборот. Структурная схема необходимых преобразований координат представлена на рис. 2. Решение задачи выполнено на основе ГОСТ Р 51794-2008, согласно которому абсолютные координаты могут быть представлены как в прямоугольной пространственной системе координат (ППСК), так и в геодезической системе координат (ГСК). Преобразование координат из ГСК в ППСК осуществляется по формулам

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L; \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L; \\ Z &= [(1 - e^2)N + H] \sin B, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

здесь X, Y, Z — прямоугольные пространственные координаты точки, м; B, L — геодезические широта и долгота точки, рад; H — геодезическая высота точки, м; N — радиус кривизны первого вертикала (эллипс, образованный сечением эллипсоида плоскостью первого вертикала), определяемый по формуле

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (2)$$

где $a = 6\,378\,245$ м — большая полуось земного эллипсоида; $e = 0,081\,813$ м — эксцентриситет земного эллипсоида (ГОСТ Р 51794-2008).

Теоретическое определение координат в ППСК (так называемая система геодезических параметров „Параметры Земли“) основывается на следующих положениях: начало системы координат расположено в центре масс Земли; ось Z направлена на Северный полюс; ось X

лежит в плоскости Гринвичского меридиана; ось Y дополняет систему до правой системы координат.

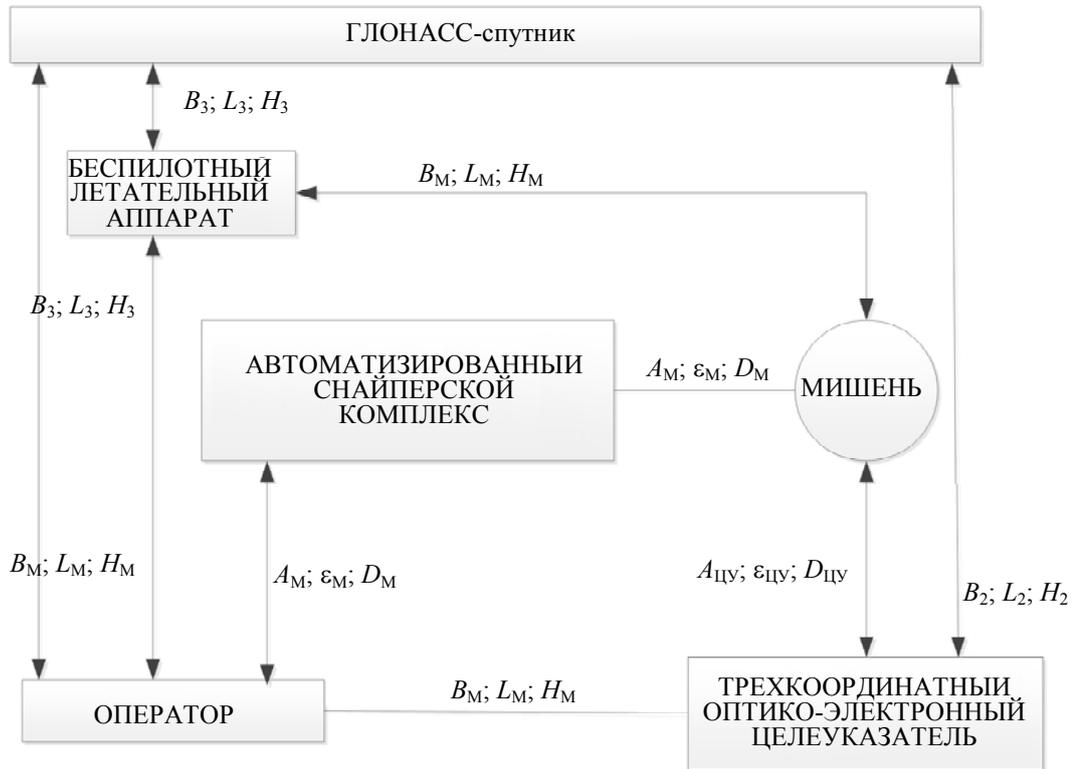


Рис. 2

Пусть даны координаты двух точек в ППСК $(X_i, Y_i, Z_i$ и $X_j, Y_j, Z_j)$, полученные путем пересчета из ГСК $(B_i, L_i, H_i$ и $B_j, L_j, H_j)$ по формуле (1). Для определения координат точки j относительно точки i необходимо получить приращение координат по формуле [4]

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{ij} \\ \Delta y_{ij} \\ \Delta z_{ij} \end{bmatrix} = \Phi(i) \begin{bmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\Phi(i)$ — матрица поворота:

$$\Phi(i) = \begin{pmatrix} -\sin L_i & \cos L_i & 0 \\ -\sin B_i \cos L_i & -\sin B_i \sin L_i & \cos B_i \\ \cos B_i \cos L_i & \cos B_i \sin L_i & \sin B_i \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Зная приращение координат, можно определить наклонную дальность D , угол места ε и азимут A точки j относительно точки i [5]:

$$\left. \begin{aligned} D &= \sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2 + \Delta z_{ij}^2}; \\ \varepsilon &= \arcsin\left(\frac{\Delta y_{ij}}{D}\right); \\ A &= \arctg\left(\frac{\Delta z_{ij}}{\Delta x_{ij}}\right) + \pi \cdot \text{rect}(\Delta x_{ij}) \cdot \text{sgn}(\Delta z_{ij}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, x < 0; \\ 0, x \geq 0, \end{cases}$ $\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1, x < 0; \\ 1, x \geq 0. \end{cases}$

Обратное преобразование координат производится путем пересчета локальных координат (D, ε, A) в приращение прямоугольных пространственных координат:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{ij} &= D \cos \varepsilon \cos A; \\ \Delta y_{ij} &= D \sin \varepsilon, \\ \Delta z_{ij} &= D \cos \varepsilon \sin A. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Зная приращения координат точек i и j , при известных координатах точки i , можно перейти к прямоугольным пространственным координатам точки j с использованием транспонированной матрицы поворота $\Phi(i)$ [6]:

$$\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \Phi(i)^T \begin{bmatrix} \Delta x_{ij} \\ \Delta y_{ij} \\ \Delta z_{ij} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Определив координаты точки j в ППСК, можно преобразовать эти координаты в ГСК. В общем случае вычисление широты и долготы осуществляется по формулам [6]

$$\left. \begin{aligned} B &= \arcsin \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right), \\ L &= \arcsin \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для более точного вычисления широты, долготы и высоты используются различные алгоритмы, как итерационные, так и неитерационные [6]. Предпочтительным является итерационный алгоритм (по ГОСТ Р 51794-2008), схема которого представлена на рис. 3.

Второй этап создания математической модели модуля упреждения опасности — применение зависимостей (1)—(8) для определения погрешностей преобразования координат. Для этого был проведен расчет в программе MathCAD, где исходные данные — координаты мишени (B_M, L_M, H_M) , АСК (B_1, L_1, H_1) и наблюдателя (разведчика) с целеуказателем (B_2, L_2, H_2) в ГСК:

$$\begin{pmatrix} B_M \\ L_M \\ H_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,0465 \text{ рад} \\ 0,5289 \text{ рад} \\ 11,1 \text{ м} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} B_1 \\ L_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,0463 \text{ рад} \\ 0,5288 \text{ рад} \\ 11,0 \text{ м} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} B_2 \\ L_2 \\ H_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,0466 \text{ рад} \\ 0,5291 \text{ рад} \\ 11,3 \text{ м} \end{pmatrix}.$$

В соответствии с формулами (1)—(5) было выполнено моделирование процесса измерения координат мишени с помощью целеуказателя:

$$\begin{pmatrix} D_{ЦУ} \\ \varepsilon_{ЦУ} \\ A_{ЦУ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 904 \text{ м} \\ -0,784 \text{ рад} \\ -3,141 \text{ рад} \end{pmatrix}.$$

Затем по формулам (6)—(8) и итерационному алгоритму (см. рис. 3) получены координаты мишени в ГСК (B'_M, L'_M, H'_M) . Для реализации итерационного алгоритма в программе MathCAD и повышения точности цикл вычислений следует продолжать, пока допуск, задаваемый вспомогательными переменными s_1 и s_2 , не приведет к их равенству.

Измеренные координаты мишени преобразуются в локальные (относительно АСК) по формулам (1)—(5):

$$\begin{pmatrix} D_M \\ \varepsilon_M \\ A_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1316 \text{ м} \\ 1,325 \text{ рад} \\ 0,0007 \text{ рад} \end{pmatrix}.$$

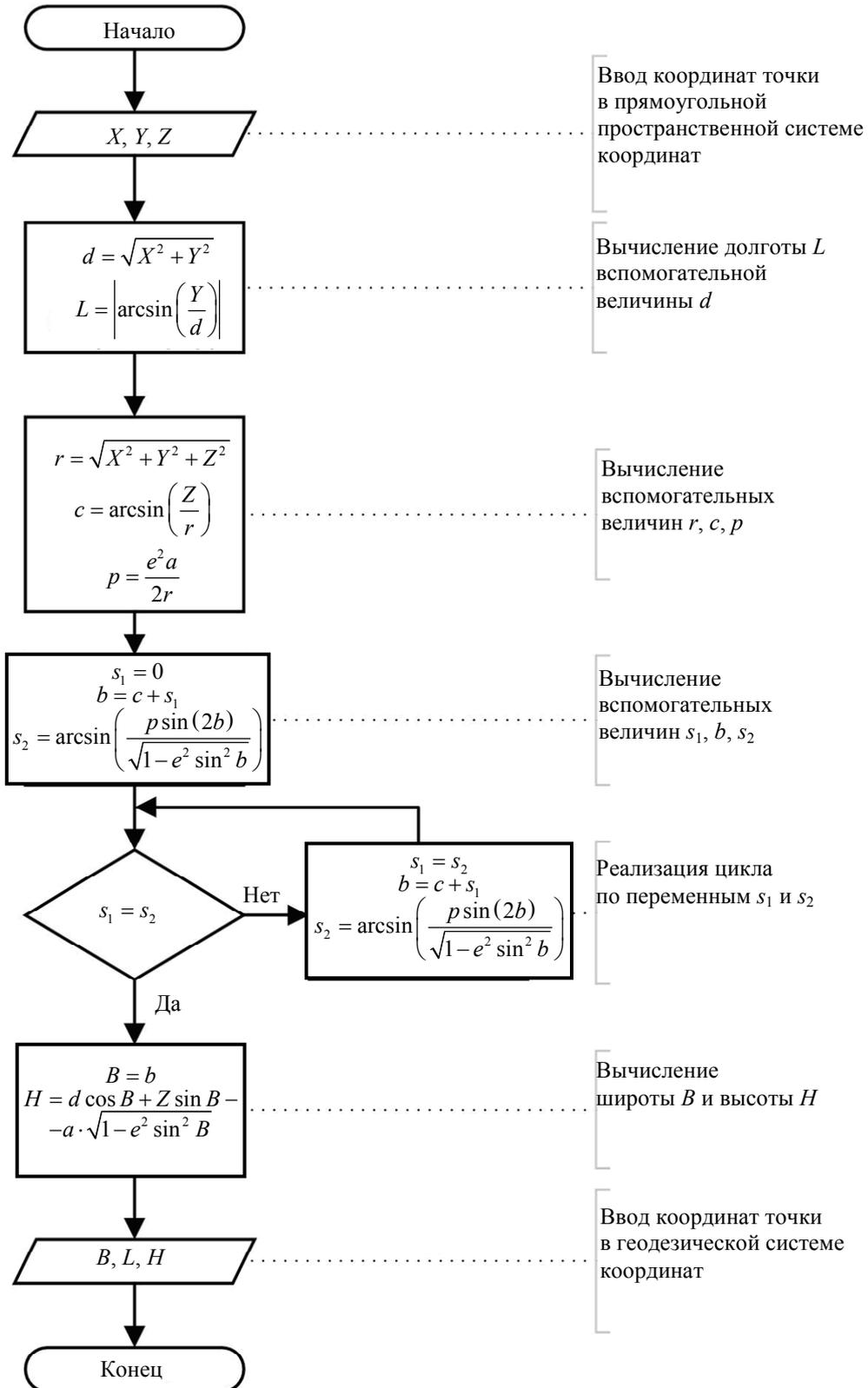


Рис. 3

Для проверки процесса преобразования координат выполнено их обратное преобразование по формулам (6)—(8) и итерационному алгоритму. В результате получена погрешность определения координат в ППСК и ГСК:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \Delta B_M \\ \Delta L_M \\ \Delta H_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м} \end{pmatrix}.$$

Как видно, обратное преобразование в ППСК выполняется без погрешностей, а погрешность определения геодезической высоты (ΔH_M) связана только с итерационным алгоритмом, так как погрешности определения координат целей не учитывались. В реальных системах координаты мишеней определяются с погрешностями, поэтому мишени могут не попасть в поле зрения объектива системы видеонаблюдения. Таким образом, возникает задача определения минимального угла поля зрения объектива исследуемой системы, для чего необходимо знать значения погрешностей измерительных приборов.

В навигационных приборах гражданского назначения на основе ГЛОНАСС погрешность определения координат составляет 4,3 м, а в случае алгоритмической коррекции (система дифференциальной коррекции и мониторинга) — 0,93 м [7].

При использовании трехкоординатного оптико-электронного целеуказателя [4] были получены следующие погрешности: погрешность измерения наклонной дальности $\Delta D = 2$ м (на базе 1 км); погрешность измерения угла места $\Delta \varepsilon = 6'$; погрешность измерения азимута $\Delta A = 30'$. Погрешность наведения АСК определяется по известной методике инженерного расчета визиров (прицелов), согласно которой вероятность поражения мишени ухудшается не более чем на 10 %.

Введем указанные значения погрешностей в разработанную математическую модель. Погрешность определения местоположения целеуказателя примем равной 4,3 м, так как у оператора может не быть возможности многократных измерений его координат и, следовательно, возможности использовать алгоритмическую коррекцию для уменьшения погрешности. Вследствие того, что АСК установлен стационарно, возможно многократно измерить его координаты и выполнить их алгоритмическую коррекцию. Погрешность определения местоположения АСК составляет 0,93 м. В результате получены следующие погрешности определения координат мишени в прямоугольной пространственной и геодезической системах:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5,5 \text{ м} \\ 1,6 \text{ м} \\ -4,4 \text{ м} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \Delta B_M \\ \Delta L_M \\ \Delta H_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ рад} \\ 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ рад} \\ -5,8 \text{ м} \end{pmatrix}.$$

Анализ полученных данных показывает, что доминирующей является погрешность определения геодезической высоты, полученная вследствие введенных в математическую модель значений погрешностей и методической погрешности итерационного алгоритма.

По полученной доминирующей погрешности рассчитаем минимальный угол поля зрения объектива: $2\omega_{\min} = \arctg(\Delta H_M/D_M) = \arctg(5,8/1316) = 15'$. Полученное значение вполне допустимо для реализации системы видеонаблюдения с любыми объективами, но для успешного решения задач обнаружения, распознавания и идентификации целесообразно использовать длиннофокусные объективы.

Аналогичная математическая модель может быть создана и для варианта с использованием БПЛА вместо целеуказателя. В этом случае необходимо знать погрешности конкретного оборудования, установленного на борту БПЛА [8, 9].

По результатам решения задачи преобразования координат модуля упреждения опасности в системе видеонаблюдения можно сделать вывод о возможности успешного функциони-

рования модуля в выбранных системах координат, а также о целесообразности дальнейшей его разработки. Перспективным направлением исследований является разработка механизма наведения на мишень и прицел-системы видеонаблюдения с каналами, работающими в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boyd B., Lopher J.* Precision guided firearms: disruptive small arms technology // Proc. SPIE. Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics, VII. 2013. Vol. 8736.
2. Persistent Close Air Support (PCAS) // DARPA [Электронный ресурс]: <[http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/Persistent_Close_Air_Support_\(PCAS\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/Persistent_Close_Air_Support_(PCAS).aspx)>.
3. *Леонов М. Б., Назаров В. Н.* Концептуальная модель охранной системы видеонаблюдения с модулем предупреждения опасности // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 5. С. 380—384.
4. *Леонов М. Б., Разумовский И. Т.* Концептуальная модель трехкоординатного оптико-электронного целеуказателя // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 11. С. 73—77.
5. *Логвин А. И., Соломенцев В. В.* Спутниковые системы навигации и управления воздушным движением: Учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2005.
6. *Сератина Б. Б.* Геодезические основы карт: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. С. 133.
7. *Дворкин В. В., Карутин С. Н., Куришин В. В.* Методика мониторинга глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС с помощью СДКМ // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 32—37.
8. *Волков М.* Новые возможности беспилотной разведки // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]: <http://uav.ru/articles/sar_for_uav.pdf>.
9. *Ростопчин В. В., Дмитриев М. Л.* Применение цифровых оптических систем для беспилотных летательных аппаратов // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]: <http://uav.ru/articles/opteq_uav.pdf>.

Сведения об авторах

- Михаил Борисович Леонов** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: muxeu87@yandex.ru
- Виктор Николаевич Назаров** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: naz_1946@mail.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной фотоники и видеоинформатики

Поступила в редакцию
19.11.15 г.

Ссылка для цитирования: *Леонов М. Б., Назаров В. Н.* Математическая модель модуля предупреждения опасности в системе видеонаблюдения // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 189—196.

MATHEMATICAL MODEL OF THREAT PREVENTION UNIT IN VIDEO SURVEILLANCE SYSTEM

M. B. Leonov, V. N. Nazarov

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: muxeu87@yandex.ru*

A mathematical model is presented for threat prevention unit in video surveillance system consisting of visor, guiding mechanism, and targeting device. Conversion of coordinates in a relative system into absolute system coordinates is carried out. Results of simulation demonstrate effective functioning of the unit in the selected coordinate systems. Calculations are performed to correlate the pointing error and coordinate transformation inaccuracy with angular field of view of the surveillance system lens.

Keywords: surveillance system, threat prevention unit, pointer, absolute coordinate system, geodetic coordinate system, system of rectangular coordinates, relative coordinate system, coordinate transformation, sight, visor, objective lens, angular field of view

Data on authors

- Mikhail B. Leonov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Computer Photonics and Digital Video Processing; E-mail: muxeu87@yandex.ru
- Viktor N. Nazarov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Computer Photonics and Digital Video Processing; E-mail: naz_1946@mail.ru

For citation: *Leonov M. B., Nazarov V. N.* Mathematical model of threat prevention unit in video surveillance system // *Izv. vuzov. Priborostroenie.* 2016. Vol. 59, N 3. P. 189—196 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-189-196