

¹Омский автобронетанковый инженерный институт,
г. Омск

²Омский государственный технический университет,
г. Омск

³Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации,
г. Пермь

РАЗРАБОТКА МНОГОФАКТОРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПАССИВНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛЕЙ ОБРАЗЦА БРОНЕТАНКОВОГО ВООРУЖЕНИЯ

В статье излагается решение задачи оценки точности определения координат объектов системой технического зрения, предназначенной для применения в составе прицельно-наблюдательного комплекса образца бронетанкового вооружения. Раскрыта сущность и основные этапы вычислений разработанной имитационной модели. Особенностью данной модели является возможность вычисления распределения погрешности измерения координат по всему объему измерительного пространства, так и его формы и размеров в зависимости от взаимного положения видеокамер, их внутренних параметров и случайных составляющих, воздействующих на процесс измерений.

Ключевые слова: моделирование, оценка точности, определение координат, система технического зрения.

Развитие компьютерных технологий обработки цифровых изображений в совокупности с удешевлением и, соответственно, массовостью распространения аппаратуры видеонаблюдения привело к тому, что на сегодняшний день системы технического (машинного) зрения (СТЗ) являются одним из самых бурно развивающихся направлений. Современные СТЗ могут решать достаточно широкий спектр задач, связанных с обработкой цифровых видеоизображений для автоматических интеллектуальных вычислительных систем различного назначения. При этом одной из главнейших задач, решаемых СТЗ, является определение в режиме реального времени координат и параметров движения одновременно множества различных объектов наблюдения.

СТЗ определения параметров объектов могут применяться для обеспечения работы правоохранительных органов, например, при распознавании лиц по их трёхмерным моделям, а также на местах пре-

ступлений, занимающих значительные территории (места взрывов, крушений, техногенных аварий и т.д.), когда зафиксировать традиционными средствами местоположение всего множества объектов (следов, обломков и т.д.) невозможно или трудоёмко. Кроме этого, СТЗ могут применяться при трёхмерной реконструкции ландшафта земли, при строительстве и обслуживании крупногабаритных либо протяжённых объектов, картографировании местности и пр. Такие системы имеют исключительное значение в тех случаях, когда в измерительном пространстве находятся объекты, до которых невозможно или очень сложно проводить измерения с помощью лазерных или радиолокационных систем, например, тонкие провода, антенны, находящиеся на большом расстоянии, т.е. объекты с низким коэффициентом отражения, дымовая завеса, люди и т.п.

Актуально применение СТЗ для образцов бронетанкового вооружения (БТВ) в качестве опти-

ко-электронной системы пассивного (скрытно-го) измерения параметров целей в зоне действия средств наблюдения и разведки. Наличие возможности скрытного определения параметров целей качественно снижает эффективность аппаратуры обнаружения лазерного излучения [1–4] и, наоборот, повышает вероятность осуществления первого выстрела по противнику. Кроме этого, наличие возможности одновременного автосопровождения всех обнаруженных целей или важных объектов улучшает степень интеграции в единую систему управления тактическим звеном и повышает качество распознавания целей, а также способствует предварительной подготовке правильного решения для командира в сложившейся фоновой обстановке.

При этом реализация СТЗ определения пространственных параметров целей в составе систем управления огнём (СУО) образцов БТВ предполагает работу в довольно сложных внешних и эксплуатационных условиях, проведение измерений на дистанциях до 2–3 км и при ограничении базы между ОЭС, не превышающей габариты шасси бронеекста. Исходя из чего актуальным является вопрос оценки точности измерений в зависимости от положения цели в измерительном пространстве. Полученные показатели точности позволят сформулировать требования к СТЗ, выявить наиболее оптимальные условия её применения на БТВ, и в целом ещё на этапе проектирования определить рациональность её разработки на используемой сегодня элементной базе.

Проведённый анализ [5, 6] известных моделей оценки точности [7–11] показал, что они не могут в полной мере быть применены для оценки точности определения координат целей при реализации СТЗ на базе прицельно-наблюдательного комплекса образца БТВ ввиду того, что они не позволяют получать показатели точности в условиях произвольно расположенных друг относительно друга и при этом разных по техническим данным камер и не позволяют оценивать форму и размеры измерительного пространства, а также распределение ошибок на его поверхности.

Только в работах [12, 13] авторами «рассмотрено определение измерительного пространства цифровой телевизионной стереоскопической измерительной системы... показано, что полученные соотношения позволяют проводить сравнительный анализ параметров измерительного пространства и точности измерений при реализации системы различными цифровыми видеокамерами с варьируемыми параметрами». Но при этом описание распределения ошибок по измерительному пространству, а также возможности оценки точности при произвольно расположенных камерах и в условиях воздействия случайных возмущений на процесс измерения данная модель не позволяет. Кроме того, ни в одной из известных моделей оценки точности не учитывается влияние дисторсионных искажений.

Для разрешения указанных недостатков были проведены научные исследования, в результате которых была разработана имитационная модель оценки точности определения координат объектов СТЗ.

На современных образцах БТВ в качестве приёмных каналов СТЗ могут служить ОЭС прицелов командира и наводчика (ПК и ПН), а также камеры внешнего видеонаблюдения, расположенные

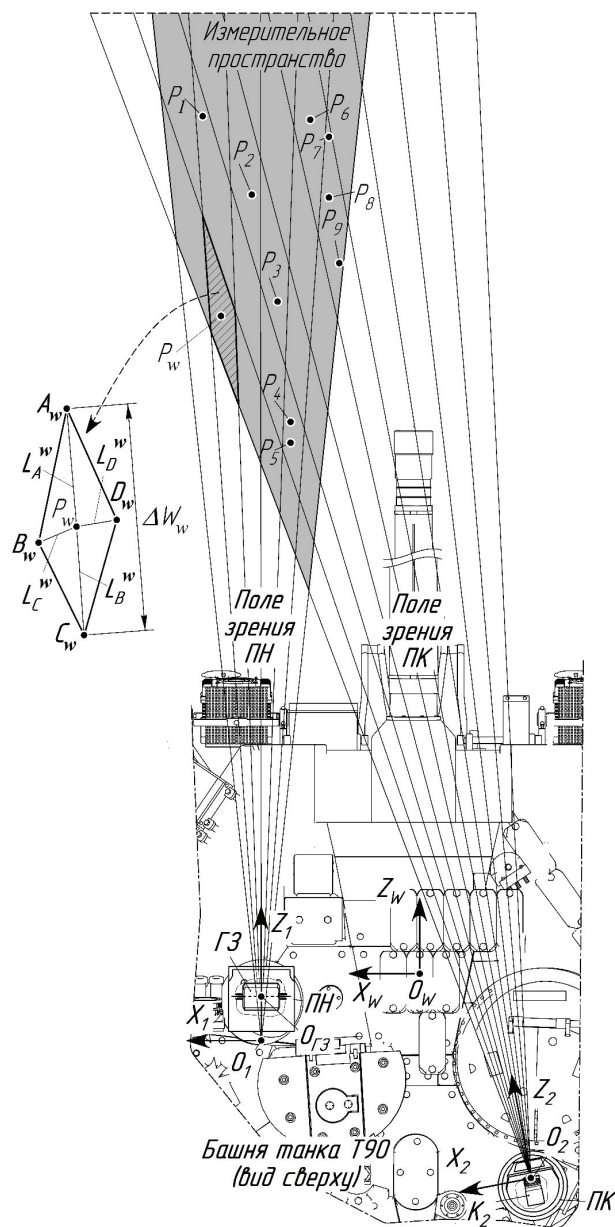


Рис. 1. Схема определения размеров элементарных областей разрешения в измерительном пространстве СТЗ

на внешнем бронекорпусе образца вооружения. Так, при пересечении полей зрения ПК и ПН измерительное пространство, т.е. область в пределах которой возможно определение координат обнаруженных объектов, может быть представлено в виде совокупности элементарных областей разрешения, получаемых в результате пересечения полей зрения отдельных пикселей фотоприёмных устройств (ФПУ) ЭОС прицелов. Если рассматривать задачу в плоскости (рис. 1), то элементарные области разрешения при достаточно малом разрешении ФПУ, небольшой дальности до объекта и широком поле зрения ОЭС представляют собой четырёхугольники ромбовидной формы, как демонстрируется на рис. 1. При увеличении же разрешения ЭОС в условиях, когда дальность до объекта многократно превышает базовое расстояние между прицелами, форма областей разрешения резко сжимается в поперечной проекции, приобретая явно вытянутую форму, как правило находящуюся под углом к системе координат измерительной системы. В данных условиях

для описания размера w -ой элементарной области разрешения принята величина ΔW_w , обозначающая расстояние между наиболее удалёнными друг от друга границами. Например, на рис. 1 величине ΔW_w для точечного объекта P_w будет соответствовать расстояние от границы области разрешения в точке A_w до точки C_w .

Физический смысл понятия «элементарная область разрешения» в данном случае заключается в том, что при нахождении в пределах одной области нескольких объектов СТЗ сможет зарегистрировать на ФПУ и определить координаты только одного объекта. Так, на рис. 1 иллюстрируется, что, если СТЗ предполагает определение координат объектов на основе их изображений с ЭОС K_1 и K_2 прицелов ПН и ПК, и в измерительном пространстве будет одновременно находиться девять объектов $P_1 \dots P_9$, а идентифицированы как отдельные будут только шесть из них. Пять объектов P_4 и P_5 , а также P_7 , P_8 и P_9 на изображениях камер K_1 и K_2 будут регистрироваться только как два объекта.

Принимая за абсолютную погрешность $\Delta\sigma_w$ значение, равное половине последнего цифрового разряда индикатора, в качестве которого в данном случае выступает угловая величина поля зрения пикселя ФПУ, считалось, что

$$\Delta\sigma_w = \pm 0,5\Delta W_w. \quad (1)$$

Величина погрешности $\Delta\sigma_w$ определения координат каждой из точек P_w будет зависеть от их местонахождения в измерительном пространстве СТЗ, взаимных ориентации и положения ЭОС прицелов, а также от внутренних параметров ЭОС, а именно величин фокусных расстояний их объективов и линейных размеров пикселей ФПУ.

В то же время при проведении реальных измерений на положение границ элементарных областей разрешения будут воздействовать не только непосредственно параметры СТЗ, но и случайные погрешности, например, погрешность калибровки [14–17] или погрешность датчиков ориентации ЭОС или головных зеркал (ГЗ) прицелов, погрешность изготовления объектива, в результате которой учитываемое в расчётах вычисление будет отличаться от действительного. Возможны погрешности размещения ФПУ относительно оптической оси объектива, в результате чего ФПУ оказывается смещённым в вертикальной и горизонтальной плоскостях и т.п., в том числе динамические и вибрационные воздействия.

Воздействия данных погрешностей при каждом i -ом измерении, где $i \in 0 \dots I$, I — количество измерений, границы элементарных областей разрешения будут случайным образом отклонены от расчётного значения, как показано на рис. 2, где иллюстрируется пересечение полей зрения (ПЗ) отдельных пикселей ФПУ ЭОС K_1 и K_2 на точечном объекте P_w , а также возможные отклонения положений границ области разрешения.

В этом случае величина погрешности $\Delta\sigma'_w$ определения координат точечного объекта P_w СТЗ с учётом воздействия случайных факторов будет определяться как

$$\Delta\sigma'_w = \pm 0,5 \frac{\sum_{i=0}^{I-1} \Delta W_w^i}{I-1}. \quad (2)$$

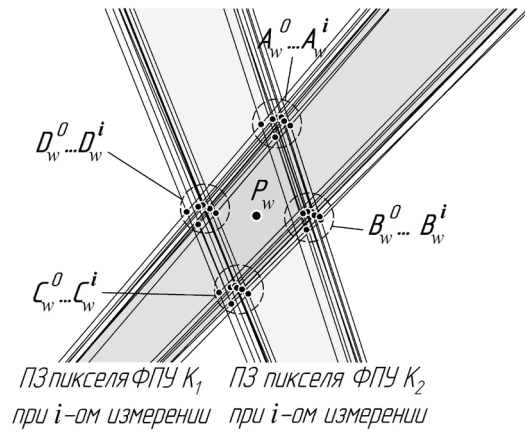


Рис. 2. Иллюстрация воздействия случайных погрешностей на положение границ элементарной области разрешения

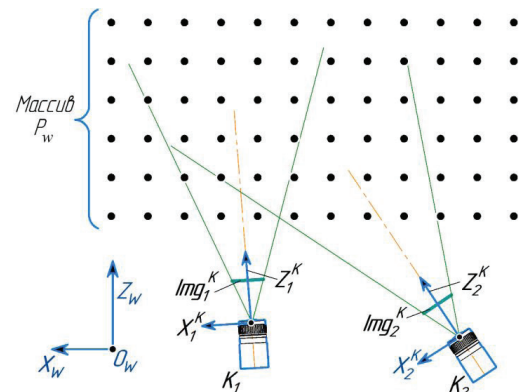


Рис. 3. Генерирование массива точечных объектов и задание положения камер

Сущность разработанной модели состоит в выполнении следующих этапов вычислений:

этап 1 — задание в пространстве координат и ориентации, по крайней мере, пары камер, имитирующих собой ЭОС прицелов, например, ПК и ПН, или приборов (камер) внешнего видеонаблюдения с известными параметрами, которые вместе будут представлять измерительную систему;

этап 2 — задание массива точек с известными координатами в окрестностях измерительной системы;

этап 3 — вычисление для каждой из точек измерительного пространства пиксельных координат их изображений на изображениях камер измерительной системы;

этап 4 — определение из сформированного массива тех точек, которые соответствуют измерительному пространству системы;

этап 5 — задание для координат каждой из точек на изображениях обеих камер границ, определяемых размерами пикселя их ФПУ;

этап 6 — вычисление координат границ областей разрешения для каждой из точек измерительного пространства с учётом воздействия случайных составляющих;

этап 7 — вычисление погрешности определения координат для каждой точки измерительного пространства и графическое представление результатов вычислений.

В частности, на этапе 1 (рис. 3) в качестве внешней системы координат (СК) принята левая СК

$O_w X_w Y_w Z_w$, основание которой неподвижно связано с геометрическим центром вращения погона башни танка, ось $O_w Y_w$ вверх, а оси $O_w X_w$ и $O_w Z_w$ в начальном положении направлены, соответственно, в сторону левого и переднего бронелистов броневых объектов. В этой СК исходя из конструкции прицелов и образца вооружения задаются СК $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ и $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ цифровых камер K_1 и K_2 , имитирующих ОЭС прицелов ПН и ПК.

При этом для задания положения и ориентаций СК камер K_1 и K_2 применялись матрицы положения C_j^w в соответствии с выражением:

$$C_j^w = \left(\begin{array}{c|c} R_j^w & [0 \ 0 \ 0]^T \\ \hline T_j^w & 1 \end{array} \right), \quad (3)$$

где j — индекс камеры в зависимости от принадлежности к соответствующему прицелу; R_j^w — матрица вращения, определяющая ориентацию СК j -ой камеры относительно СК $O_w X_w Y_w Z_w$; T_j^w — вектор переноса, содержащий координаты начала СК j -ой камеры относительно СК $O_w X_w Y_w Z_w$.

Для каждой из камер в зависимости от фокусного расстояния их объективов задаются положения цифровых изображений Img_1^K и Img_2^K .

На этапе 2 осуществлялось генерирование массива P_w трёхмерных координат точечных объектов

$$P_w = \begin{pmatrix} x_1^p & y_1^p & z_1^p & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_w^p & y_w^p & z_w^p & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

На этапе 3 осуществлялось проецирование всех точечных объектов на плоскости изображений Img_1^K и Img_2^K (рис. 4). Для проведения этой операции применялась расширенная проекционная модель видеокамеры [18]. Выбранная модель, в отличие от классически применяемой проекционной модели камеры [19, 20], включает большее количество исходных данных и, соответственно, позволяет более гибко осуществлять процесс моделирования. Её сущность заключается в описании зависимости трёхмерных координат некоторого объекта P , заданных во внешней СК непосредственно с пиксельной СК изображения Img_j^K , т.е. с номерами строк m_j^p и столбцов n_j^p (рис. 5).

Так, для некоторой j -ой камеры данная описывается следующим выражением:

$$P_w (C_j^w)^{-1} (B_j)^{-1} (K_j)^{-1} = P_j^{img}, \quad (5)$$

где $B_j = \begin{pmatrix} z_j^p f_j^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_j^p f_j^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z_j^p f_j^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ — проекционная матрица;

z_j^p — координата объекта относительно оси $O_j^k Z_j^k$ СК камеры; f_j — фокусное расстояние объек-

тива камеры; $K_j = \begin{pmatrix} -p_j^x & & & \\ -ctg\theta_j p_j^y & & & \\ 0,5p_j^x(N_j - 1) & & & \\ O_j^x + ctg\theta_j [0,5p_j^y(M_j - 1) + \Delta O_j^y] & & & \\ - & & & \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & & \\ -p_j^y & 0 & 0 & \\ 0,5p_j^y(M_j - 1) & f_j & 0 & \\ O_j^y & 0 & 1 & \end{pmatrix}$ — матрица внутренних пара-

метров; N_j, M_j — значения горизонтальных и вертикальных разрешений ФПУ; O_j^x, O_j^y — расстояние между геометрическим центром ФПУ и центром

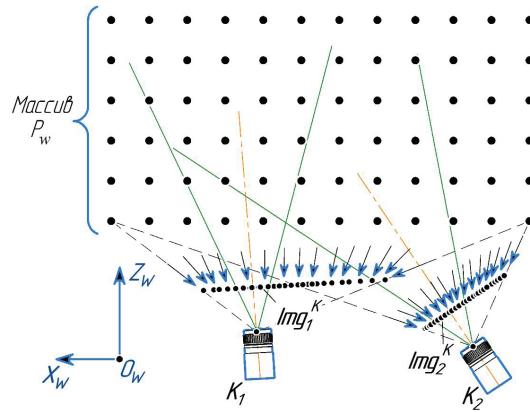


Рис. 4. Проецирование массива точечных объектов на плоскости изображений камер

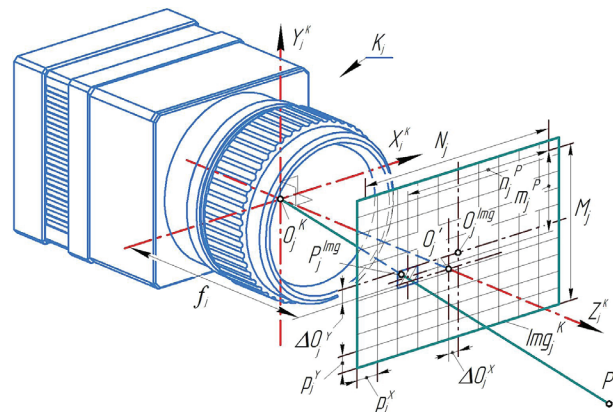


Рис. 5. Система «изображение-камера»

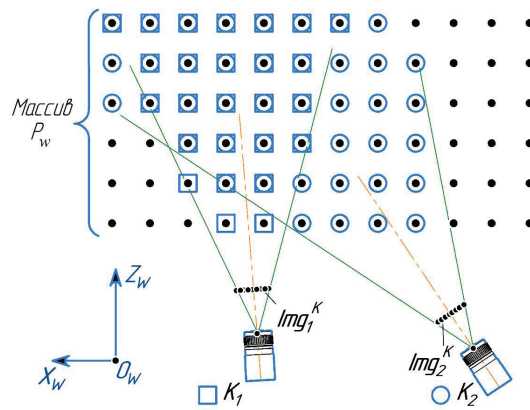


Рис. 6. Определение точечных объектов, находящихся в полях зрения камер

изображения Img_j^K , формируемым в плоскости ФПУ объективом камеры; p_j^x, p_j^y — горизонтальный и вертикальный физические размеры пикселя ФПУ соответствующей камеры; θ_j — величина возможного угла перекоса изображений Img_j^K из-за погрешностей изготовления ФПУ или неточной синхронизации процесса пиксельной выборки в процессе формирования изображения;

$P_j^{img} = \begin{pmatrix} n_1^p & m_1^p & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_w^p & m_w^p & 1 & 1 \end{pmatrix}$ — расширенный вектор

пиксельных координат изображений объектов P_w на цифровом изображении Img_j^K j -ой камеры.

Поочерёдное соотноснение пиксельных координат P_1^{img} и P_2^{img} на выполнение условий попадания объектов в границы изображений Img_1^K и Img_2^K позволяет путём исключения не устраивающих условиям $(N_j - 1) \geq n_w^p \geq 0$ и $(M_j - 1) \geq m_w^p \geq 0$ соответствующих строк получить массивы P_j^{img} и P_{j+1}^{img} , содержащих координаты только тех объектов, которые строго попали в поля зрения камер K_1 и K_2 (рис. 6).

Если же в массивах P_1^{img} и P_2^{img} оставить только те строки, которые одновременно устраивают обозначенным условиям (этап 4), то могут быть найдены массивы P_1^{nimg} и P_2^{nimg} , содержащие исключительно координаты объектов, соответствующих измерительному порядку описываемой СТЗ (рис. 7).

На этапе 5 (рис. 8) для каждой из строк массивов P_1^{nimg} и P_2^{nimg} в цикле записывались четыре отдельных вектора с пиксельными координатами границ пикселя, на который проецируется изображение w -го объекта, а именно:

$$(P_j^{nA})_w = (n_w^p - 0,5 \quad m_w^p + 0,5 \quad 1 \quad 1) = (n_w^A \quad m_w^A \quad 1 \quad 1) \quad (6)$$

$$(P_j^{nB})_w = (n_w^p + 0,5 \quad m_w^p + 0,5 \quad 1 \quad 1) = (n_w^B \quad m_w^B \quad 1 \quad 1) \quad (7)$$

$$(P_j^{nC})_w = (n_w^p + 0,5 \quad m_w^p - 0,5 \quad 1 \quad 1) = (n_w^C \quad m_w^C \quad 1 \quad 1) \quad (8)$$

$$(P_j^{nD})_w = (n_w^p - 0,5 \quad m_w^p - 0,5 \quad 1 \quad 1) = (n_w^D \quad m_w^D \quad 1 \quad 1) \quad (9)$$

Далее, на этапе 6, осуществлялось вычисление метрических координат границ $AB, BB_w, CC_w, BA_w, DC_w, AA_w, DD_w$ и CD_w для каждой w -ой элементарной области разрешения в СК камеры K_1 . Для этого применялся способ определения координат [21], основанный на модели измерительной системы [18], а именно:

$$(P_w^g)_w = (A_g^N)_1 D_1 B_1 C_1^W, \quad (10)$$

где g — индекс вычисляемой точки $AB, BB_w, CC_w, BA_w, DC_w, AA_w, DD_w$ или CD_w ; $(A_g^N)_1 = A_1^g C_1^N = (x_1^g \quad y_1^g \quad z_1^g \quad 1)$ и $(A_g^N)_2 = A_2^g C_2^N = (x_2^g \quad y_2^g \quad z_2^g \quad 1)$ — вектор приведённых к нормальному положению координат изображения g -ой точки соответствен-

но в СК камеры K_1 и K_2 ; $B_1 = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ — проекционная матрица для камеры K_1 ;

$b_1 = \frac{(A_g^N)_2 (C_2^{BM})^{T(4)} - (C_1^{BM})^{T(4)} (A_g^N)_1}{(A_g^N)_1 (A_g^N)_2 - (A_g^N)_2 (A_g^N)_1}$ — проекционный коэффициент для камеры K_1 ;

$D_1 = \begin{pmatrix} d_1^R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_1^R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_1^X & d_1^Y & 0 & 0 \end{pmatrix}$ — матрица дисторсии объектива камеры K_1 ;

$C_1^N = \left(\begin{array}{c|ccc} R_1^N & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)^T$ и $C_2^N = \left(\begin{array}{c|ccc} R_2^N & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)^T$ — матрица взаимной ориентации камер K_1 и K_2 относительно нормального их взаимного положения;

$(P_w^g)_w = \begin{pmatrix} [x_w^g]_w & [y_w^g]_w & [z_w^g]_w & 1 \end{pmatrix}$ — вектор трёхмерных координат g -ой границы области разрешения для w -го объекта во внешней СК $O_w X_w Y_w Z_w$.

На этом же этапе осуществлялось введение случайных составляющих процесса вычисления, заключающееся в генерировании по нормальному закону распределения в указанных границах раз-

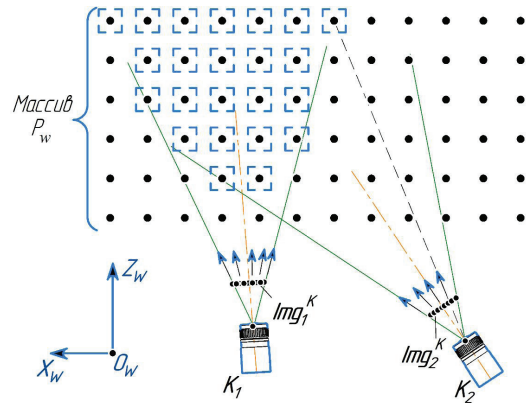


Рис. 7. Определение координат точечных объектов, находящихся в измерительном пространстве СТЗ

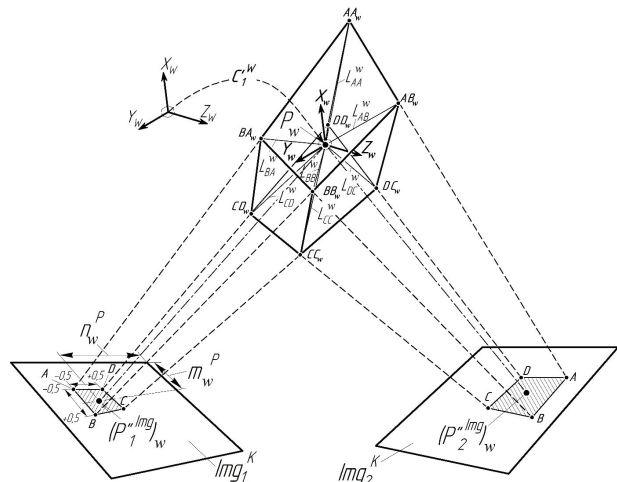


Рис. 8. Определение пространственных координат границ элементарной области разрешения для w -го точечного объекта

броса i случайных величин, и добавление их к соответствующим учитываемым параметрам при проведении i -ой итерации. В частности, учитывались следующие случайные составляющие:

- $\Delta\alpha_j^W, \Delta\beta_j^W, \Delta\varphi_j^W$ — погрешности в горизонтальной, вертикальной и поперечной плоскостях ориентации СК камеры j -ой камеры в СК $O_w X_w Y_w Z_w$;
- $\Delta x_j^W, \Delta y_j^W, \Delta z_j^W$ — погрешности определения положения начала СК камеры K_1 в СК $O_w X_w Y_w Z_w$;
- Δf_j — погрешности величины фокусного расстояния объектива j -ой камеры;
- $\Delta O_j^X, \Delta O_j^Y$ — погрешности в горизонтальной и вертикальной плоскостях величин расстояний между геометрическим центром ФПУ и центром изображения Img_j^K j -ой камеры;
- $\Delta\theta_j$ — случайной составляющей перекоса изображения Img_j^K j -ой камеры;
- $\Delta d_j^R, \Delta d_j^X$ и Δd_j^Y — погрешности определения коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии j -ой камеры.

При этом для вычисления величин ΔW_w^i (этап 7) для каждого w -го участка измерительного пространства проводился перенос начала СК $O_w X_w Y_w Z_w$ в точку P_w (рис. 8), согласно выражению:

$$P_w^g = (P_w^g)_w C_j^W I = \begin{pmatrix} x_w^g & y_w^g & z_w^g \end{pmatrix}, \quad (11)$$

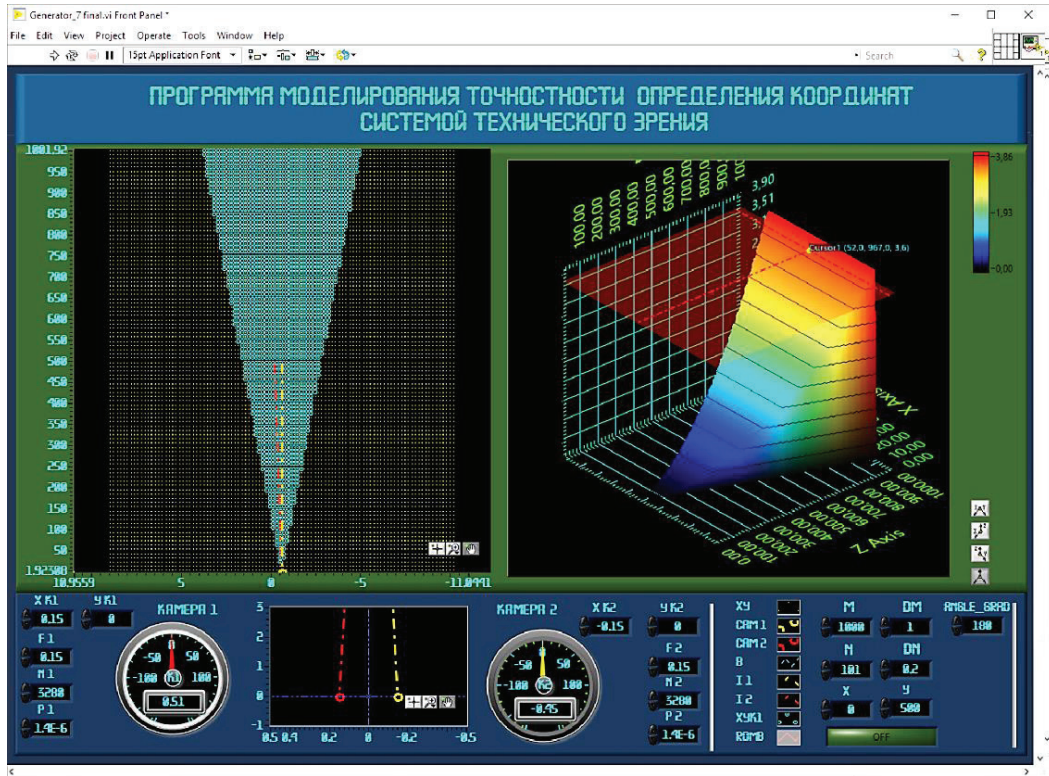


Рис. 9. Лицевая панель программы моделирования

где $C_j^{BM} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_1^w & -y_1^w & -z_1^w & 1 \end{pmatrix}$ — матрица переноса с метрическими координатами СК $O_1X_1Y_1Z_1$ камеры K_1 в СК $O_wX_wY_wZ_w$; $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ — матрица преобразования.

Это дало возможность нахождения длин отрезков L_g^w , связывающих точку P_w с соответствующей g -ой границы области разрешения:

$$|P_g^w| = \sqrt{(x_g^w)^2 + (y_g^w)^2 + (z_g^w)^2} = L_g^w. \quad (12)$$

Сами же величины ΔW_w^i , как было условлено ранее, вычислялись как сумма двух наиболее длинных отрезков L_g^w для каждого из w -ых участков при i -ой итерации цикла вычислений. И уже на основе полученных значений ΔW_w^i на основе выражения (2) вычислялись значения абсолютных погрешностей $\Delta\sigma_w^i$. Привязка найденных значений к соответствующим координатам массива P_w позволила осуществить графическое представление распределения погрешности определения координат по измерительному пространству. При этом графическое представление организовывалось послойно, т.е. в определённом двумерном срезе относительно оси O_wY_w СК $O_wX_wY_wZ_w$.

Разработанная модель была реализована в среде графического программирования LabVIEW [22]. Часть блок-диаграммы и интерфейс программы представлены на рис. 9 и рис. 10.

Проверки адекватности разработанной модели оценки точности определения координат СТЗ, а также справедливости принятых теоретических положений при её создании проводилась на экспериментальной установке (рис. 11), включающей

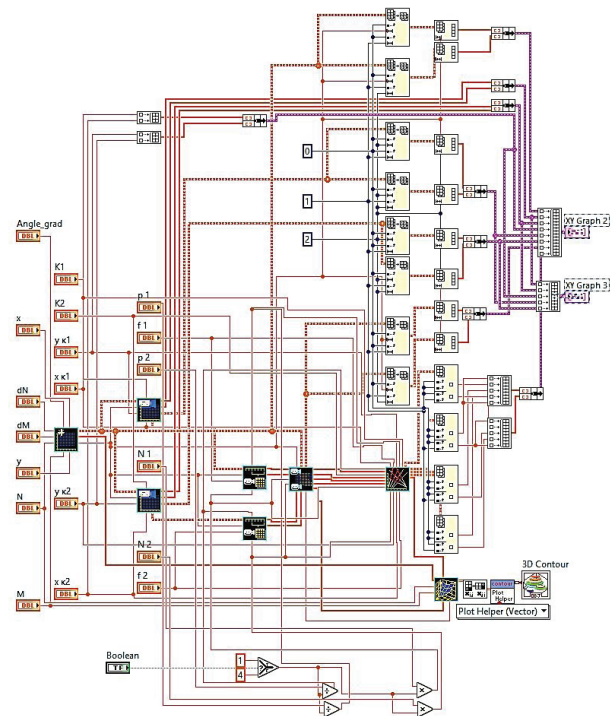


Рис. 10. Блок-диаграмма программы моделирования

лазерный тахеометр Spectra Precision 2, выступающий в роли эталонного средства и обеспечивающего проведение измерений с погрешностями ± 2 мм по дальности и $\pm 5''$ по углу на объект [23]. Захват изображений осуществлялся с применением двух камер с фотоматрицами IMX179 [24] фирмы SONY разрешением 3280×2464 (8 Мр) с размером пикселя 1,4 мкм, а также верификационными объективами с фокусным расстоянием от 5 мм до 150 мм. В результате проведённых исследований при базовом



Рис. 11. Внешний вид экспериментальной установки

расстоянии между камерами 300 мм и компьютерном повышении разрешения изображений определение координат объектов на дистанции 1 км проводилось с погрешностью, не превышающей $\pm 3,5$ м. Без электронного повышения разрешения на указанной дистанции максимальная погрешность измерений составила $\pm 14,3$ м. Это является достаточно большим значением при сравнения с высокоточными средствами измерений, но с учётом прогнозируемой области применения на бронетехнике, где для выполнения огневых задач достаточно применение лазерного дальномера с погрешностью ± 20 м [25], данная величина все равно остаётся более чем приемлемой.

Таким образом, задачу разработки многофакторной имитационной модели оценки точности СТЗ можно считать завершённой. Данная модель позволяет оценивать форму и размеры измерительного пространства СТЗ и распределение ошибок по всей глубине её объёма как с учётом внешних и внутренних технических параметров камер, так и с учётом точности их изготовления и определения показателей взаимного ориентирования. Разработанная модель может служить как для проведения оценки точности существующих, так и при проектировании новых СТЗ одновременного определения координат множества разнесённых в пространстве объектов (в том числе имеющих малые угловые размеры и эффективную поверхность рассеивания) по их цифровым изображениям. Проведение практических испытаний на экспериментальной установке показало адекватность модели и возможность её применения при проектировании СТЗ, построенных на базе ОЭС прицелов, приборов и камер внешнего видеонаблюдения образцов БТВ.

Библиографический список

1. Перунов Ю. М., Фомичев К. И., Юдин Л. М. Радиолокационное подавление информационных каналов систем управления оружием / под ред. Ю. М. Перунова. М.: Радиотехника, 2003. 416 с.
2. Алешин А. Средства обнаружения лазерного излучения // Зарубежное военное обозрение. 1995. № 2. С. 53–57.
3. Ogorkevicz R. M. Detection and Obscuration Counter Anti-Armor Weapons // Development of active protection systems for combat vehicles is slowly gathering momentum // Janer's International Defense Review. 2003. P. 49–53.
4. Гуменюк Г. А., Евдокимов В. И., Ребриков В. Д. Приборы предупреждения о лазерном облучении в системах защиты танков от управляемого оружия // Защита и безопасность. 2002. № 1 (20). С. 26–27.
5. Зубарь А. В., Кайков К. В., Щербо А. Н. Анализ математических моделей точности определения координат объектов по цифровым изображениям // Наука и военная безопасность. 2020. № 1 (20). С. 5–9.
6. Зубарь А. В., Кайков К. В., Ушнурцев С. В. Оценка расхождения оценок точности определения координат по измерительному пространству системы технического зрения // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Техническое зрение и распознавание образов»: сб. тр. конф. Анапа: ВИТ ЭРА, 2019. С. 46–55.
7. Козлов В. Л., Кузьмичев И. Р. Измеритель дальности и размерных параметров объектов на основе цифровой фотокамеры // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2011. № 1. С. 33–38.
8. Зубарь А. В., Пивоваров В. П. Оценка точности определения дальности оптико-электронным стереоскопическим дальномером // Вестник Академии военных наук. Спецвыпуск № 3 (40). 2012. С. 125–129.
9. Зубарь А. В., Майстренко В. А., Кайков К. В. Программно-аппаратная реализация оптико-электронной стереосистемы определения дальности // Омский научный вестник. 2013. № 3 (123). С. 273–277.
10. Самойлов А. М., Гренке В. В., Шакиров И. В. Оценка точности определения координат объекта в рабочей зоне стереодальномера // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310, № 2. С. 112–115.
11. Коротаев В. В., Нгуен Х. В., Ярышев С. Н. Анализ схемы расположения камер в активной стереоскопической системе безопасности автомобиля // Евразийский союз ученых. 2014. № 5-3 (5). С. 84–86.
12. Румянцев К. Е., Кравцов С. В. Анализ измерительного пространства цифровой телевизионной стереоскопической системы. Точечное и интервальное оценивание координат точек трёхмерной сцены // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. Т. 7, № 3. С. 38–48.
13. Румянцев К. Е. Анализ ошибок измерений глубины точек трёхмерной сцены цифровой телевизионной стереоскопической системой // Радиотехника. 2011. № 9. С. 83–93.
14. Faugeras O., Luong T., Mayback S. Camera Self-Calibration: Theory and Experiments // Proc. Second European Conf. Computer Vision. 1992. P. 321–334.
15. Faugeras O., Toscani G. The Calibration Problem for Stereo // IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. 1986. P. 15–20.
16. Ganapathy S. Decomposition of Transformation Matrices for Robor Vision // Pattern Recognition Letters. 1984. Vol. 2. P. 401–412.
17. Gennery D. Stereo-Camera Calibration // Proc. 10th Image Understanding Workshop. 1979. P. 101–108.
18. Зубарь А. В. Оптико-электронная система определения параметров целей. Теоретические основы построения: моногр. Омск: ОАБИИ, 2018. С. 32–50. ISBN 978-5-600-01959-1.
19. Semeniuta O. Analysis of camera calibration with respect to measurement accuracy // Procedia CIRP. 2016. Vol. 41. P. 765–770. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.108.
20. Deng L., Lu G., Shao Yu. [et al.]. A novel camera calibration technique based on differential evolution particle

swarm optimization algorithm // Neurocomputing. 2016. Vol. 174. Part A. P. 456–465. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.03.119.

21. Пат. 2697822 Российская Федерация, МПК G 01 S 11/00. Способ определения координат объектов по их цифровым изображениям / Зубарь А. В., Кайков К. В., Пивоваров В. П. [и др.]. № 2018140814; заявл. 19.11.18; опубл. 22.02.19, Бюл. № 6.

22. А. с. 2019663456 Российская Федерация. Программа моделирования измерительной области определения координат СТЗ / Зубарь А. В., Кайков К. В., Шаргин А. В., Рослов С. В. № 2019662172; заявл. 03.10.19. опубл. 16.10.19, Бюл. № 10.

23. Тахеометр Spectra Precision FOCUS 25 // Геодезия и строительство. URL: <https://gis2000.ru/equipment/spectra-precision-focus-2-5.html> (дата обращения: 17.05.2020).

24. Официальный сайт Alldatasheet.com. URL: <https://www.alldatasheet.com> (дата обращения: 17.05.2020).

25. Изделие 184 (184-1) с ПНМ «Сосна-У». Инструкция по эксплуатации. 184.ИЭ-8. С. 70–74.

ЗУБАРЬ Алексей Владимирович, кандидат технических наук, докторант кафедры «Электрооборудование и автоматика» Омского автобронетанкового инженерного института (ОАБИИ), г. Омск.

SPIN-код: 3175-2192

AuthorID (РИНЦ): 755300

Адрес для переписки: alexey_zubar@mail.ru

КАЙКОВ Кирилл Владимирович, преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика» ОАБИИ, г. Омск.

SPIN-код: 2370-7148

AuthorID (РИНЦ): 1055880

Адрес для переписки: kirkaykov@mail.ru

ХАМИТОВ Рустам Нуриманович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9576-1114

AuthorID (РИНЦ): 548158

Адрес для переписки: apple_27@mail.ru

ВОЛЬФ Илья Григорьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), начальник кафедры «Эксплуатация артиллерийского вооружения» Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации, г. Пермь.

SPIN-код: 3993-2897

AuthorID (РИНЦ): 868089

Адрес для переписки: ilwolf@yandex.ru

Для цитирования

Зубарь А. В., Кайков К. В., Хамитов Р. Н., Вольф И. Г. Разработка многофакторной имитационной модели оценки точности пассивной оптико-электронной системы определения параметров целей образца бронетанкового вооружения // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 66–73. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-66-73.

Статья поступила в редакцию 19.06.2020 г.

© А. В. Зубарь, К. В. Кайков, Р. Н. Хамитов, И. Г. Вольф