

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 681.7:004

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-416-422

For citation: Gritskevich Y. V., Zviagintcheva P. A., Makarova D. G., Egorenko M. P., Zolotarev V. V. Simulation computer model for virtual research of optoelectronic measuring systems. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 416–422. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-416-422

Для цитирования: Грицкевич Е. В., Звягинцева П. А., Макарова Д. Г., Егоренко М. П., Золотарев В. В. Имитационная компьютерная модель для виртуальных исследований измерительных оптико-электронных систем // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 416–422. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-416-422

SIMULATION COMPUTER MODEL FOR VIRTUAL RESEARCH OF OPTOELECTRONIC MEASURING SYSTEMS

Y. V. Gritskevich¹, P. A. Zvyagintseva¹, D. G. Makarova¹, M. P. Egorenko¹, V. V. Zolotarev²

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies

10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskiy rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: polinasgugit@mail.ru

The paper considers a simulation computer model of an optoelectronic system for measuring the point objects coordinates. The model allows optimal coordination of the system links parameters in order to minimize the measurement error. The method of multiple statistical tests which allows accumulating the results of single computational experiments for each specific measurement event with a unique random distribution of links parameters and characteristics, and then carrying out statistical processing of the accumulated results is the main method of computer simulation. As a result of multiple analyses, multi-parameter functional dependencies that provide optimal coordination of parameters controlled by the designer or operator according to the criterion of the resulting measurement error minimizing are realized. The article presents the results of evaluating modeling parameters that reduce the measurement error. It is relevant to apply this method when using the same measuring system in different operating conditions, for different measured objects and when performing various functional tasks since it allows adapting the system for a specific application. The model presented in the article can be concretized for the purpose of evaluating and multi-parameter optimization of particular object parameters, as well as for developing a virtual measuring stand on the basis of the model and its modifications.

Keywords: coordinate measurement, point object, computer simulation, measurement error, optimal parameter matching.

ИМИТАЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Е. В. Грицкевич¹, П. А. Звягинцева¹, Д. Г. Макарова¹, М. П. Егоренко¹, В. В. Золотарев²

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий
Российская Федерация, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10

Рассматривается имитационная компьютерная модель оптико-электронной системы измерения координат точечных объектов, позволяющая проводить оптимальное согласование параметров звеньев системы с целью минимизации погрешности измерений. Основным методом имитационного компьютерного моделирования является метод многократных статистических испытаний, позволяющий накапливать результаты однократных вычислительных экспериментов для каждого конкретного акта измерения при уникальном случайном распределении параметров и характеристик звеньев, а затем проводить статистическую обработку накопленных результатов. В результате многократного анализа реализуются многопараметрические функциональные зависимости, обеспечивающие оптимальное согласование контролируемых проектировщиком или оператором параметров по критерию минимизации результирующей погрешности измерений. В статье приведены результаты оценки параметров моделирования, уменьшающих погрешность измерений. Актуальным является применение данного метода при использовании одной и той же измерительной системы в разных условиях эксплуатации, для различных измеряемых объектов и при выполнении различных функциональных задач, поскольку позволяет адаптировать систему для конкретного применения. Приведенная в статье модель может быть конкретизирована с целью оценки и многопараметрической оптимизации параметров конкретного объекта, а также для разработки на основе модели и ее модификаций виртуального измерительного стенда.

Ключевые слова: измерение координат, точечный объект, имитационное компьютерное моделирование, погрешность измерения, оптимальное согласование параметров.

Введение. Задача дистанционного определения пространственного положения различных стационарных и динамических объектов эффективно решается с использованием оптико-электронных измерительных систем. В настоящее время в качестве основного детектирующего элемента, в плоскости которого строится изображение измеряемого объекта, является фотоприемная матрица (ФПМ) [1]. Координаторы на основе ФПМ используются при астрономических и геодезических измерениях, в приборах наведения и прицеливания [2; 3], системах идентификации личности по биометрическим параметрам [4]. В последнем случае речь идет о регистрации координат некоторых кардинальных точек, соотношение расстояний между которыми является одним из компонентов вектора идентификации.

За базовый измеряемый элемент целесообразно принять изображение точечного объекта. Именно погрешность измерения координат этого элемента определяет функциональное качество прибора. Очевидно, что в случае идеальной оптической системы, изображением точки будет являться точка. Тогда погрешность измерения определяется геометрическими размерами отдельного чувствительного элемента матрицы (пикселя) [5]. Снижение погрешности возможно за счет того, что реальный объектив создает изображение точки в виде пятна рассеяния.

При формировании такого пятна энергия изображения уже не концентрируется на одном чувствительном элементе матрицы, а распределяется по поверхностям нескольких детекторов, что создает зарядовый рельеф в области накопления сигнальных зарядов ФПМ. Получив точные числовые значения сигналов для смежных элементов, на которые проецируется пятно рассеяния, и обработав эти значения с помощью интерполяционного алгоритма, учитывающего дисбаланс распределения сигналов по элементарным детекторам, можно рассчитать координаты центра пятна по вертикали и горизонтали ФПМ относительно заданного центра координат в плоскости ФПМ.

Если пятно рассеяния является круглым, что характерно для его нахождения в центральной (параксиальной) зоне поля зрения, то нет необходимости проводить интерполяционную обработку по всем элементам матрицы, попавшим в зону энергетического воздействия оптического сигнала. Достаточно определить экстремальный пиксель с максимальным сигналом и построить интерполирующие функции только по вертикальному и горизонтальному наборам детекторов, симметричных относительно экстремального элемента (по столбцу и строке, соответственно).

Если ФПМ является идеальной, то есть в ней отсутствуют шумы и темновые токи, то погрешности расчета горизонтальной или вертикальной координаты будут уменьшаться при увеличении количества элементов выборки до некоторого значения, обеспечивающего репрезентативность результата. Дальнейшее увеличение числа обрабатываемых пикселей уже не будет влиять на погрешность. Сама же погрешность в этом случае будет определяться вычислительной погрешностью компьютера.

Для реальных ФПМ характерно наличие как темновых токов, так и шумов. Это приводит к деформации идеального зарядового рельефа и увеличению погрешности измерения координат [6], причем увеличение количества обрабатываемых пикселей может увеличить погрешность измерения, поскольку в обработку будут включены элементы, в которых сигнальные заряды уже отсутствуют, а шумовые компоненты продолжают участвовать в процессе вычисления. На результирующую погрешность оказывают влияние и другие факторы, такие как нестабильность исходного оптического сигнала, турбулентность атмосферы, вибрации и т. п. Можно сказать, что погрешность измерения определяется флуктуациями сигнала, распределенными по оптико-электронному тракту и имеющими различное физическое происхождение [7].

Постановка задачи. В настоящее время уменьшение погрешности измерений достигается в основном за счет улучшения качественных показателей аппаратной части приборов и усовершенствования алгоритмов обработки выходных сигналов ФПМ [8]. Компьютерное моделирование применяется, как правило, для предварительной отработки тех или иных проектных решений на стадии научно-исследовательских работ [9].

Наличие компьютерной модели, позволяющей осуществлять оптимальное согласование звеньев координатора по критерию минимизации погрешности измерений, является актуальной задачей, решение которой обеспечит адаптацию проектируемого или эксплуатируемого измерительного прибора к реальным условиям его применения с целью повышения точности измерений.

Как было отмечено выше, основными факторами увеличения погрешностей измерений являются флуктуационные (шумовые) процессы, распределенные по оптико-электронному тракту. Наличие случайных составляющих в полезном сигнале требует реализации основного алгоритма моделирования в формате многократных статистических испытаний. В этом случае параметры и характеристики звеньев прибора первоначально задаются в виде номинальных значений, имеющих суть математического ожидания для каждого компонента, участвующего в вычислительном процессе. Также для этих компонентов определяется вероятностный закон, описывающий поведение случайной величины, и необходимые для моделирования параметры случайного процесса, например, среднеквадратическое отклонение (СКО).

При однократном компьютерном эксперименте в плоскости ФПМ генерируется случайная точка (ее координаты). Затем, в соответствии с законом распределения энергии в пятне рассеяния, строится соответствующая пространственная функция с вершиной, координаты которой соответствуют координатам сгенерированной точки. С помощью операции свертки между растром матрицы и функцией распределения энергии рассчитывается распределение сигнальных зарядов матрицы, которые затем преобразуются, с учетом вероятностного характера физических процессов, в случайную дискретную функцию сигналов, накапливаемых пикселями ФПМ. По этой дискретной функции методом интерполяции рассчитывается приблизительное значение центра пятна рассеяния. Разница между

положением истинной случайной точки и рассчитанного центра пятна запоминается в качестве однократной случайной погрешности.

Проведение серии многократных статистических испытаний при каждом новом случайном положении сгенерированной точки и уникальном распределении случайных параметров матрицы позволяет в итоге получить СКО для всей совокупности статистических экспериментов. Каждая новая серия статистических экспериментов предполагает целенаправленное детерминированное изменение одного из контролируемых параметров координатора в реальном диапазоне допустимых значений. Таким образом, реализуется функция зависимости погрешности измерения координат δ_i от изменяемого параметра p_i , то есть $\delta_i = f(p_i)$. Минимальное значение этой целевой функции и будет являться оптимальным значением параметра, обеспечивающим наименьшую погрешность измерения при прочих равных условиях.

Очевидно, что проведение подобного анализа в многопараметрическом пространстве позволит получить оптимально согласованный набор контролируемых параметров, отвечающий критерию минимизации погрешности измерений. Необходимо отметить, что решение поставленной задачи не предполагает разработки новых приборов или методов измерения координат, а также не затрагивает вопросы совершенствования алгоритмов определения положения вершины функции распределения энергии в пятне рассеяния. Основной целью исследования является разработка компьютерно-ориентированных средств и методов оптимального согласования контролируемых проектировщиком или оператором параметров и характеристик звеньев оптико-электронного тракта измерительного прибора, которое бы обеспечивало минимизацию погрешности измерения при наличии уже заданного (проектируемого или физически реализованного) координатора. То есть речь идет о создании виртуального испытательного стенда для оптимального выбора параметров и режимов работы планируемого к практическому использованию реального прибора с учетом реальных условий его работы в соответствии с заданным функциональным назначением.

Как уже было отмечено выше, пятно рассеяния, формируемое в параксиальной области, является круглым. Инвариантность такого пятна относительно выбранной системы координат позволяет задать функцию распределения освещенности в пятне $E(x, y)$ только для одной координаты. Пусть такой координатой является x . Сама функция предполагается гауссовой:

$$E(x) = \frac{\Phi_0}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2 \cdot \pi \cdot r^2}}, \quad (1)$$

где Φ_0 – мощность падающего излучения; x_0 – реальная случайная координата точки, сгенерированной в плоскости ФПМ; r – радиус пятна рассеяния на уровне 0,606 от максимального уровня освещенности.

При однократной генерации флуктуаций учитываются только шумы ФПМ, которые задаются в долях от полезного сигнала для мультипликативной шумовой составляющей и аналогично в долях от темнового сигнала для аддитивной шумовой составляющей.

Свертка матричного раstra и функции распределения освещенности в изображении точки приводит к преобразованию непрерывного входного оптического сигнала $E(x)$ в ступенчатую дискретную функцию $S(i)$, где S – электрический сигнал, а i – номер элемента раstra матрицы по строке. Каждый элемент вектора $S(i)$ содержит в себе детерминированный для конкретной случайной реализации точки сигнал, определяемый интегральной освещенностью i -го элемента раstra, и шумовую случайную составляющую, генерируемую внутри i -го элемента в соответствии с заданным СКО. Для определения координаты центра $x_{ц}$ пятна рассеяния использовался простейший интерполяционный алгоритм расчета энергетического центра, являющийся модификацией известного из курса теоретической механики метода определения центра масс системы материальных точек:

$$x_y = \frac{\sum_{i=1}^m S(i) \cdot x_y(i)}{\sum_{i=1}^m S(i)}, \quad (2)$$

где $S(i)$ – сигнал в i -том элементе строки; $x_y(i)$ – координата центра i -того элемента; m – количество элементов выборки, участвующих в обработке.

Расчет окончательной погрешности проводится по совокупности всех случайных реализаций для конкретной серии многократных статистических испытаний.

Обсуждение результатов моделирования. Очевидно, что если размер пятна рассеяния меньше размеров пикселя, то погрешность измерения координаты центра пятна будет определяться размерами пикселя. Увеличение диаметра пятна рассеяния приведет к уменьшению погрешности за счет включения в процесс обработки смежных пикселей. Слишком большое «расширение» пятна снизит энергетический уровень оптического сигнала за счет распределения энергии по большей площади. Следовательно, должен существовать некоторый оптимальный радиус пятна, который обеспечит минимальную погрешность измерений. Проверке этой гипотезы были посвящены работы [10; 11]. При заданных параметрах раstra и значений шумовых компонент был проведен виртуальный эксперимент, в котором радиус пятна рассеяния менялся с определенным шагом от значения размера пикселя до размера в несколько сотен пикселей. При каждом новом значении радиуса проводились многократные статистические испытания и рассчитывалась текущая погрешность. На рис. 1 показан результирующий оптимизационный график, из которого видно, что действительно существует радиус пятна рассеяния, обеспечивающий минимизацию погрешности измерения.

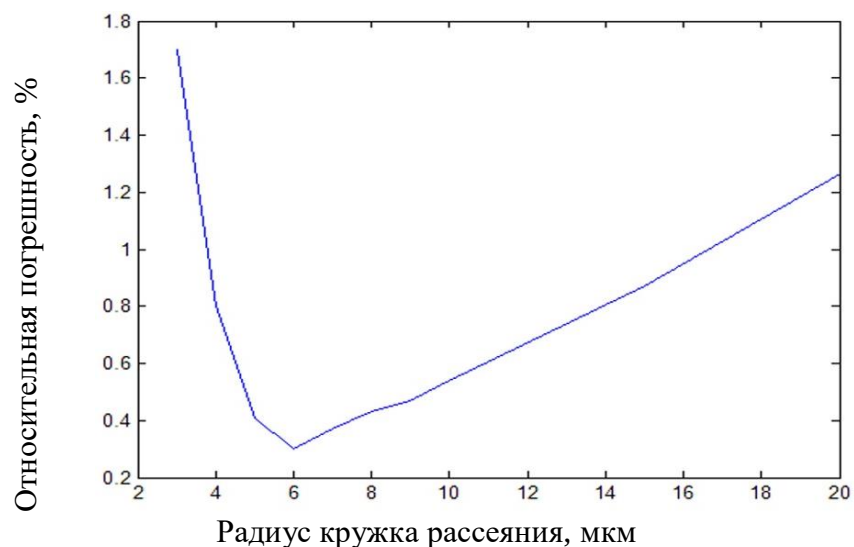


Рис. 1. Зависимость оптимальной погрешности измерения координаты от радиуса пятна рассеяния
Fig. 1. Dependence of the optimal coordinate measurement error on the scattering spot radius

Также определялось оптимальное количество элементов выборки, обеспечивающее минимизацию погрешности [12]. Число пикселей, участвующих в интерполяционном процессе дискретно увеличивалось от 1 (пиксель с максимальным сигналом) до n (общее количество пикселей в строке). Приращение пикселей производилось симметрично в обе стороны от экстремального пикселя. Каждый шаг сопровождался расчетом погрешности методом многократных статистических испытаний. При малом количестве элементов выборки погрешность имела большую величину. Затем, по мере увеличения участвующих в обработке пикселей, погрешность снижалась. Но с определенного значения обрабатываемых пикселей она опять начинала возрастать. Это связано с тем, что на периферии пятна полезный сигнал становился меньше шумовых сигналов, которые начинали вносить весомый

вклад в конечную погрешность, причем тем больший, чем больше «шумовых» пикселей, не содержащих сигнальных составляющих, добавлялось в процесс обработки. На рис. 2 приведен ступенчатый график, иллюстрирующий результаты описанного вычислительного эксперимента.

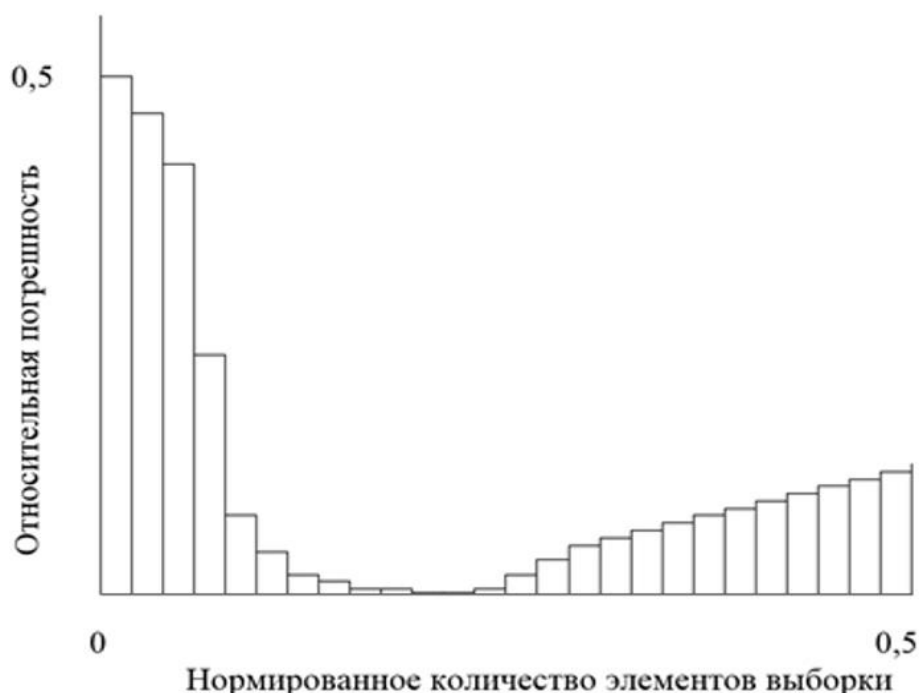


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерения координаты от количества элементов выборки

Fig. 2. The dependence of the relative error of coordinate measurement on the number of sample elements

Для данного графика по горизонтали откладывалось нормализованное относительно общего количества пикселей в строке число пикселей выборки, а по вертикали – погрешность измерения.

Графики, приведенные на рис. 1 и 2, носят иллюстративный (показательный) характер, а параметры матриц в вычислительных экспериментах подобраны таким образом, чтобы повысить наглядность представляемых результатов. В этой связи нет необходимости приводить параметры оптико-электронных трактов измерительных систем, для которых эти графики были получены.

Представляет интерес внешний вид экранных интерфейсов, на которых представлены результаты однократных статистических испытаний. Данные изображения приведены на рис. 3 и 4.

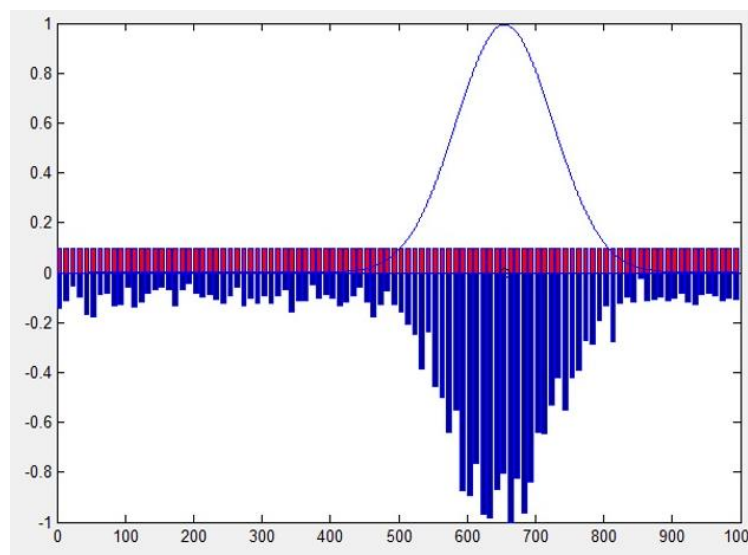


Рис. 3. Распределение зарядовых пакетов по пикселям строки матрицы при малом радиусе пятна рассеяния

Fig. 3. Distribution of charge packets over the pixels of the matrix row at a small radius of the scattering spot

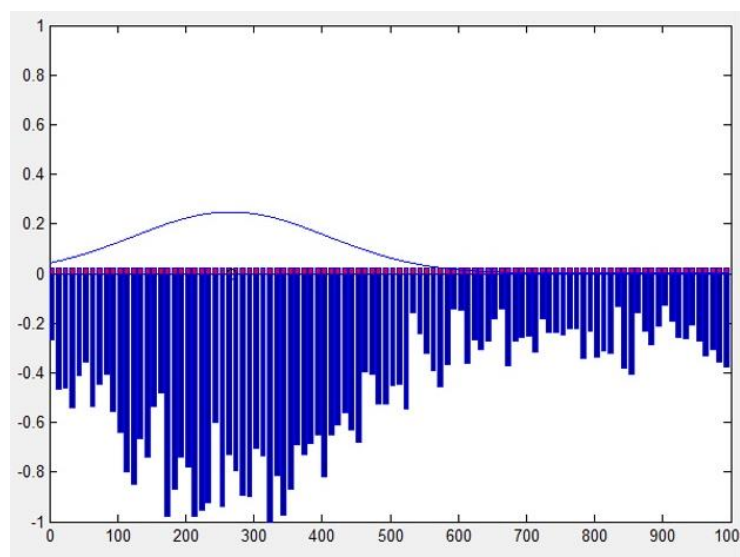


Рис. 4. Распределение зарядовых пакетов по пикселям строки матрицы при большом радиусе пятна рассеяния

Fig. 4. Distribution of charge packets over the pixels of the matrix row at a large radius of the scattering spot

В верхней части рис. 3 и 4 отображается гауссова функция распределения освещенности в пятне рассеяния. Нижняя часть соответствует дискретному распределению зарядов (сигнальных и шумовых), накопленных под воздействием оптического излучения. Очевидно, что на рис. 3 за счет меньшего размера пятна рассеяния зарядовый рельеф имеет более четкий характер. А увеличение радиуса пятна на рис. 4 приводит к «расплыванию» зарядового рельефа. В обоих случаях количество энергии пятен остается постоянным, но увеличение радиуса на рис. 4 уменьшает долю энергии, приходящейся на 1 пиксель. Поэтому зарядовый рельеф, изображенный на рис. 4, претерпевает заметные деформации, что, конечно, приводит к значительному возрастанию погрешности измерения центра пятна рассеяния.

При анализе динамичного объекта [13], например, с целью определения как траектории его движения, так и параметров, характеризующих перемещение объекта (скорость, ускорение), производится последовательная серия измерений координат его текущего положения через равные промежутки времени, определяемые периодом накопления сигнала. Очевидно, что уменьшение времени накопления привело бы к более точным измерениям, но при этом сигнальный заряд не будет успевать накапливаться до величины, необходимой для точной фиксации расчётной координаты. В то же время увеличение времени накопления приведет к размытию изображения [14; 15]. Возникает задача определения такого оптимального времени накопления, которое бы обеспечивало наименьшую погрешность измерения текущей координаты. Подобная задача также могла бы быть решена с помощью предлагаемой модели.

Заключение. Описанная модель имеет обобщенный характер и лишь демонстрирует некоторые возможности, предоставляемые ею с точки зрения оптимального согласования отдельных параметров и режимов работы оптико-электронных измерительных систем. Развитие модели происходит, во-первых, по пути конкретизации применительно к реальным проектируемым или эксплуатируемым приборам, а во-вторых, в направлении развития многопараметрической оптимизации координаторов за счет объединения в один моделирующий процесс параметров и характеристик различных звеньев системы.

Все это создает предпосылки для создания виртуального стенда, обеспечивающего разработку и настройку измерительных систем, наиболее эффективно выполняющих планируемые для них задачи.

Библиографические ссылки

1. Малинин В. В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. Новосибирск : Наука, 2005. 256 с.
2. Оценка погрешности измерения горизонтальных углов при геодезическом сопровождении высотного строительства / Ч. Н. Желтко, М. А. Пастухов, Д. А. Гура, Г. Г. Шевченко // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия. Научные чтения памяти профессора В. Б. Федосенко : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре гос. тех. ун-т, 2015. С. 389–394.
3. Белоконов В. М., Итигин А. М.-Ш., Шлишевский В. Б. Теоретические ошибки определения полярных координат светящихся объектов с помощью двухканальной оптико-электронной системы с матричными фотоприемниками // Оптический журнал. 2003. № 7. С. 91–92.
4. Jain A. K., Flynn P., Ross A. A. Handbook of biometrics // Springer, 2008. 565 p.
5. Оценка положения и скорости перемещения центра изображения светового пятна по распределению заряда в матричной ПЗС-структуре / В. И. Букреев, М. Н. Дмитриева, И. Р. Иванкин, Ю. М. Эвентаве // Техника средств связи. Сер. «Техника телевидения». 1990. № 2. С. 71–77.
6. Гусаров В. Ф. Влияние характеристик матричных фотоприемников на точность оптико-электронной системы с оптической равносигнальной зоной // Сб. тр. V Всеросс. конгресса молодых ученых. 2016. Т. 1. С. 124–128.
7. Концепция построения оптико-электронной системы автоматического определения координат цели по световой вспышке / В. М. Белоконов, А. М.-Ш. Итигин, Н. В. Прудников, В. Б. Шлишевский // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. № 3. С. 64–66.
8. Кучков Д. В., Коняхин И. А., Усик А. А. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Оптический журнал. 2009. Т. 76, №1. С. 43–45.

9. Фисенко М. Г., Ежова К. В., Молев Ф. В. Моделирование зарегистрированного многоэлементными оптическими приемниками изображения // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 4. С. 73–74.
10. Грицкевич Е. В. Минимизация погрешности измерений оптико-электронного координатного датчика // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 18–20.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610964 Российская Федерация. ISCOL / Е. В. Грицкевич, П. А. Звягинцева ; дата рег. 26.01.2011.
12. Gritskevich E., Zvyagintseva P., Sidorov L. Virtual Testing of Electro-optical Systems for Measuring Angles by Using Computer Simulation Model // Proceedings of the 18th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017. Erlagol, Altai Republic 29 June – 3 July, 2017. P. 353–356. doi:10.1109/EDM.2017.7981772.
13. Методы определения параметров движения точечного источника оптического излучения [Электронный ресурс] / Д. А. Безуглов, В. И. Юхнов, И. В. Решетникова, М. А. Беличенко // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12712> (дата обращения: 11.2.2019).
14. Пашков В. С. Влияние «смаза» изображения на точность оценки его координат // Механика, управление и информатика. 2009. № 1. С. 225–230.
15. Алгоритм компенсации линейного смаза изображения движущегося объекта / А. В. Богословский, И. В. Жигулина, Е. А. Богословский и др. // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6, № 4. С. 768–772.

References

1. Malinin V. V. *Modelirovanie i optimizatsiya optiko-elektronnykh priborov s fotopriemnymi matritsami* [Modeling and optimization of optoelectronic devices with photodetector arrays]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 256 p.
2. Zheltko Ch. N., Pastukhov M. A., Gura D. A., Shevchenko G. G. [Evaluation of the error in measuring horizontal angles during the geodetic support of high-rise construction]. *Regional'nye aspekty razvitiya nauki i obrazovaniya v oblasti arkhitektury, stroitel'stva, zemleustroystva i kadastr v nachale III tysyacheletiya. Nauchnye chteniya pamyati professora V. B. Fedosenko* [Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastre at the beginning of the III Millennium. Scientific readings in memory of Professor V. B. Fedosenko]. Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'skiy-na-Amure gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet Publ., 2015, P. 389–394 (In Russ.).
3. Belokonev V. M., Itigin A. M.-Sh., Shlishevskiy V. B. [Theoretical errors in determining the polar coordinates of luminous objects using a two-channel optoelectronic system with matrix photodetectors]. *Opticheskiiy zhurnal*. 2003, No. 7, P. 91–92 (In Russ.).
4. Jain A. K., Flynn P., Ross A. A. Handbook of biometrics. *Springer*. 2008, 565 p.
5. Bukreev V. I., Dmitrieva M. N., Ivankin I. R., Eventave Yu. M. [Estimation of the position and velocity of the image center of the light spot by the charge distribution in the matrix CCD-structure]. *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. Tekhnika televideniya*. 1990, No. 2, P. 71–77 (In Russ.).
6. Gusarov V. F. [Influence of characteristics of matrix photodetectors on the accuracy of optoelectronic system with optical equal-signal zone]. *Sb. trudov V Vserossiyskogo kongressa molodykh uchenykh* [All-Russian Congress of young scientists]. 2016, Vol. 1, P. 124–128 (In Russ.).
7. Belokonev V. M., Itigin A. M.-Sh., Prudnikov N. V., Shlishevskiy V. B. [The concept of building an optoelectronic system for automatic determination of target coordinates by a light flash]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2003, No. 3, P. 64–66 (In Russ.).
8. Kuchkov D. V., Konyakhin I. A., Usik A. A. [Iterative algorithm for determining the coordinates of point emitters images]. *Opticheskiiy zhurnal*. 2009, Vol. 76, No. 1, P. 43–45 (In Russ.).

9. Fisenko M. G., Ezhova K. V., Molev F. V. [Simulation of the image registered by multi-element optical receivers]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2012, Vol. 55, No. 4, P. 73–74 (In Russ.).
10. Gritskevich E. V. [Minimization of the measurement error of opto-electronic coordinate sensor]. *Datchiki i sistemy*. 2012, No. 4, P. 18–20 (In Russ.).
11. Gritskevich E. V., Zvyagintseva P. A. ISCOL [ISCOL]. Patent RF, No. 2011610964, 2011.
12. Gritskevich E., Zvyagintseva P., Sidorov L. Virtual Testing of Electro-optical Systems for Measuring Angles by Using Computer Simulation Model. *Proceedings of the 18th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017*. Erlagol, Altai Republic 29 June – 3 July, 2017. P. 353–356. Doi:10.1109/EDM.2017.7981772.
13. Bezuglov D. A., Yukhnov V. I., Reshetnikova I. V., Belichenko M. A. [Methods for determining the motion parameters of a point source of optical radiation]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014, No. 2 (In Russ.). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12712> (accessed 11.2.2019).
14. Pashkov V. S. [The effect of blurring images on the accuracy of estimates of its coordinates]. *Mekhanika, upravlenie i informatika*. 2009, No. 1, P. 225–230 (In Russ.).
15. Bogoslovskiy A. V., Zhigulina I. V., Bogoslovskiy E. A. et al. [Algorithm of compensation of linear shift of the image of the moving object]. *DSPA: Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov*. 2016, Vol. 6, No. 4, P. 768–772.

Грицкевич Е. В., Звягинцева П. А., Макарова Д. Г., Егоренко М. П.,
Золотарев В. В., 2019

Грицкевич Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. E-mail: kaf.ib@ssga.ru.

Звягинцева Полина Александровна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. E-mail: polinasgugit@mail.ru.

Макарова Диана Георгиевна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. E-mail: kaf.ib@ssga.ru.

Егоренко Марина Петровна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. E-mail: e_m_p@mail.ru.

Золотарев Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева. E-mail: amida.2@yandex.ru.

Gritskevich Yevgeny Vladimirovich – Cand. Sc., Associate Professor; Siberian State University of Geosystems and Technologies. E-mail: kaf.ib@ssga.ru.

Zviagintcheva Polina Aleksandrovna – Senior Lecturer Department of Information Security; Siberian State University of Geosystems and Technologies. E-mail: polinasgugit@mail.ru.

Makarova Diana Georgievna – Senior Lecturer Department of Information Security; Siberian State University of Geosystems and Technologies. E-mail: kaf.ib@ssga.ru.

Egorenko Marina Petrovna – Senior Lecturer Department of Photonics and Device Engineering; Siberian State University of Geosystems and Technologies. E-mail: e_m_p@mail.ru.

Zolotarev Vyacheslav Vladimirovich – Cand. Sc., Associate Professor, Head of Department of Information Technologies Security; Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies. E-mail: amida.2@yandex.ru.