

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2012 г. В. А. Солдатенков*, доктор техн. наук; Ю. К. Грузевич***, канд. техн. наук;
В. М. Ачильдиев*, канд. техн. наук; А. Д. Левкович*; Э. С. Литвак***

* Научно-производственное объединение “Геофизика-НВ”, Москва

** Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: levzver@gmail.com

Статья посвящена разработке малогабаритного оптико-электронного прибора для регистрации изображений удаленных объектов с определением их географических координат. Приведена оптическая схема прибора с алгоритмом его работы. Описан принцип действия и методика расчета коллимирующего оптического устройства, обеспечивающего регистрацию географических координат, дату и время съемки объекта на его фото- или видеоизображениях.

Ключевые слова: географические координаты, оптический модуль, лазерный дальномер, цифровая фотокамера, широта, долгота.

Коды OCIS: 230.0250, 230.1150

Поступила в редакцию 12.03.2012

Введение

Решение задачи документирования фактов несанкционированного пребывания объектов в территориальных акваториях России имеет первостепенную важность в сфере охраны национальных биологических ресурсов. Оно потребовало создания принципиально нового класса компактных оптико-электронных приборов, обеспечивающих регистрацию в ручном режиме с вертолетов не только удаленных объектов, но и определение их географических координат с отображением координатной информации, а также даты и времени съемки на фото- и видеоизображениях [1]. Этой особенностью работы прибора объясняется необходимость включения в его состав малогабаритных инерциальных, электронных и оптико-электронных модулей, позволяющих определить географические координаты удаленных объектов, а затем спроецировать их на полученные изображения [2].

Трехмерная модель создаваемого малогабаритного оптико-электронного прибора на базе цифровой фотокамеры приведена на рис. 1.

В создаваемом приборе географические координаты удаленного объекта определяются

по известным географическим координатам наблюдателя, а также дальностям и угловым координатам объекта, измеренными лазерным дальномером и датчиками углов из трех различных точек. Обработку информации и вычисление географических координат объекта осуществляет модуль обработки информации.

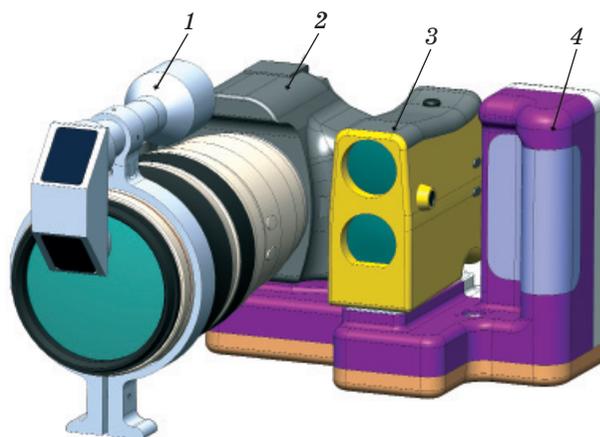


Рис. 1. Модель оптико-электронного прибора наблюдения. 1 – коллимирующий оптический модуль, 2 – цифровая фотокамера, 3 – лазерный дальномер, 4 – модуль обработки.

В состав модуля входят приемник сигналов спутниковой навигации Глонасс/GPS, программируемая логическая интегральная микросхема, на базе которой разработана система на кристалле, в которую включены *soft*-процессор MicroBlaze, видеоконтроллер, а также необходимая периферия и межкомпонентные интерфейсы.

Оптическая схема оптико-электронного прибора

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к документированию изображений несанкционированных пребываний объектов, необходимо обеспечить оптическое проецирование координатной информации, а также даты и времени съемки на изображения удаленных объектов, так как при регистрации фактов нарушения административных и государственных границ недопустим цифровой синтез изображений объектов с его географическими координатами и другой символической информацией. Поэтому в процессе регистрации объекта, до срабатывания затвора камеры, необходимо определить его географические координаты, сформировать информацию, рассчитанную модулем ее обработки, и с матричного экрана микродисплея оптическим коллимирующим модулем спроецировать ее на плоскость изображения объектива цифровой фотокамеры – на матрицу фото- или видеокамеры.

Для формирования алфавитно-цифровой информации, занимающей 40 символов на двух строках при размере символа не менее 8×16 пикселей, целесообразно использовать микродисплей типа “TekGear RS170 OEM”.

Компоновка коллимирующего оптического модуля в составе оптико-электронного прибора на базе цифровой фотокамеры приведена на рис. 1.

Объектив коллимирующего модуля рассчитывается исходя из условия, при котором горизонтальный размер изображения матричного экрана микродисплея в плоскости регистрации изображения соответствует горизонтальному размеру фоточувствительной матрицы цифровой камеры. Расчет увеличения и фокусного расстояния объектива коллимирующего модуля осуществляется применительно к объективу фотокамеры с наибольшим значением фокусного расстояния ($f' = 400$ мм). При уменьшении фокусного расстояния также

уменьшится размер изображения координатной информации в кадре.

Для рассматриваемого варианта оптико-электронного прибора на базе цифровой фотокамеры с фоточувствительной матрицей горизонтально $22,3$ мм и микродисплея типа “TekGear RS170 OEM” с размером длинной стороны матричного экрана $4,8$ мм определены следующие параметры оптической системы модуля:

- увеличение системы “объектив фотокамеры – объектив коллимирующего модуля” – $4,64^{\times}$;
- фокусное расстояние объектива коллимирующего модуля – 86 мм;
- оптическая длина оптической системы коллимирующего модуля – 190 мм.

На рис. 2 приведена оптическая схема объектива коллимирующего модуля, первый компонент которого является ахроматическим двухлинзовым объективом, а второй компонент – линза-мениск, увеличивающая апертурный угол объектива. При такой композиции объектива коллимирующего модуля можно обеспечить постоянные аберрации в пределах линейного поля объектива.

Теория выборки в оптико-электронных системах позволяет обосновать требования к пространственно-частотным характеристикам объектива коллимирующего модуля, который используется для проецирования матричного экрана микродисплея на фоточувствительную матрицу цифровой камеры. Для восстановления изображения частоты выборки ($\nu_x^{вб}, \nu_y^{вб}$) должны в два раза превышать соответствующие максимальные пространственные частоты

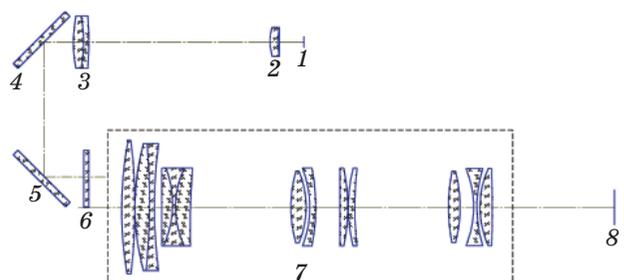


Рис. 2. Оптическая схема оптико-электронного прибора. 1 – экран микродисплея, 2 – линза-мениск, 3 – двухлинзовый объектив, 4, 5 – зеркала, 6 – защитное стекло, 7 – объектив фотокамеры, 8 – фоточувствительная матрица.

(v_{xm}, v_{ym}), присутствующие в пространственно-частотном спектре изображения. При этом следует сделать одно важное замечание. В оптических системах пространственно-частотный спектр изображения в плоскости освещенности на фоточувствительной матрице фотокамеры всегда финитный (т. е. ограничен величинами v_x^{\max} и v_y^{\max}), так как оптическая передаточная функция имеет ограниченную полосу пропускания пространственных частот.

Если, например, зрачок оптической системы квадратный с размерами $2\xi'_{зр} = 2\eta'_{зр}$, то $v_x^{\max} = v_y^{\max} = v_y^N = v_x^N = v_y^{\max} = 2\xi'_{зр}/(\lambda_{ср}p')$, где p' – задний отрезок оптической системы, $\lambda_{ср}$ – средняя длина волны в спектре излучения светодиода подсветки [3].

Для идентификации координатной и служебной информации необходимо, чтобы у оптической системы коллиматор – объектив фотокамеры коэффициент передачи контраста превышал уровень 0,4 на пространственной частоте, определяемой из условия

$$v_k = N/2b,$$

где N – количество элементов горизонтальной стороны микродисплея, b – горизонтальный размер активной области его экрана.

Для микродисплея, используемого в разрабатываемом приборе, $N = 320$ шт., $b = 4,8$ мм, пространственная частота $v_x = 33,3$ мм⁻¹.

Спектральный диапазон ахроматизации объектива определяется спектром излучения светодиодной подсветки матричного экрана микродисплея.

По программе расчета оптических систем “ZEMAX” определены конструктивные параметры компонентов объектива коллимирующего модуля. При проведении данных расчетов объектива модуля, фокусное расстояние которого составляет 86 мм, в качестве критерия оптимизации использовалась минимизация среднего квадратического отклонения волнового фронта в узлах гауссовой квадратуры, имеющей 3 кольца и 6 лучей.

Экспериментальные исследования разработанного коллиматора с различными стандартными фотографическими объективами (SONY 75–300 mm $f/4.5-5.6$, Canon EF 100–400 mm $f/4.5-5.6$ L IS USM) показали, что система отвечает основным требованиям, предъявляемым к пространственно-частотным характеристикам оптических систем для проецирования символической информации с матричных микродисплеев.

Алгоритм работы оптико-электронного прибора

Для создания малогабаритного оптико-электронного прибора регистрации изображений удаленных объектов с высокоточным определением его географических координат необходимо обеспечить измерение дальности и угловых координат объектов с помощью малогабаритных дальномеров и датчиков углов азимута и места. Отсутствие высокоточных малогабаритных датчиков углов азимута, обеспечивающих измерение азимута с точностью менее 30', потребовало разработать алгоритм расчета географических координат удаленных объектов по результатам высокоточных измерений из различных точек наблюдения дальностей и углов места до объекта. На рис. 3 приведена схема, поясняющая разработанный алгоритм.

В соответствии с разработанным алгоритмом вычисление географических координат удаленного объекта осуществляется после выполнения трех и более измерений расстояния до объекта. После облета объекта и проведения последнего измерения вычисляются географические координаты объекта, значения которых вместе с информацией о времени регистрации формируются на экране микродисплея и проецируются в плоскость изображения объектива цифровой фотокамеры.

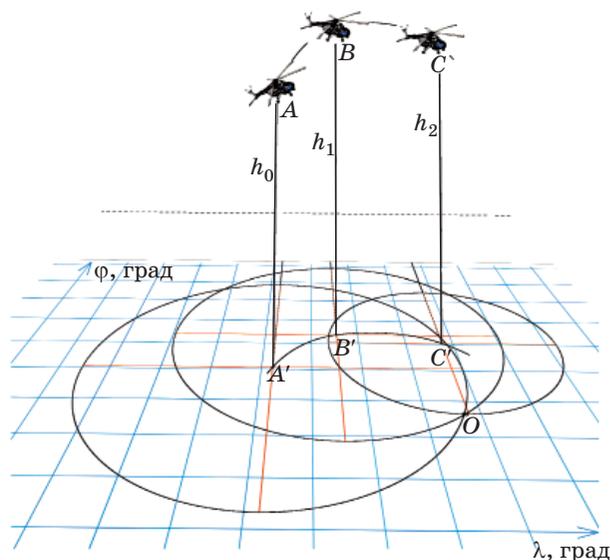


Рис. 3. Иллюстративная схема, поясняющая алгоритм расчета географических координат удаленных объектов.

В результате, кадр с проецированной на изображение объекта координатной и другой служебной информацией получен в тот момент времени, когда объект находится именно в том месте, где его зарегистрировали, определили последнее значение дальности до него и вычислили его географические координаты. При этом объект наблюдения в процессе определения его географических координат может перемещаться в пространстве.

При каждом измерении дальности до объекта при новом положении оператора становятся известны параметры окружности, центром которой является положение оператора, а радиус равен проекции наклонной дальности (рис. 3), которая вычисляется как произведение наклонной дальности на косинус угла места. В создаваемом приборе угол места определяется на основе измерения линейного ускорения, действующего по оси, перпендикулярной оптической оси прибора. Угол места γ определяется по формуле $\gamma = \arcsin(a/g)$, где a – ускорение, действующее по оси, перпендикулярной оптической оси прибора, g – ускорение свободного падения. Точность измерения угла датчиком на основе микроэлектромеханических структур составляет $0,25^\circ$. Конструктивно данный датчик угла входит в состав лазерного дальномера. По измеренным дальностям определяются координаты точек пересечения окружностей. При получении более двух точек пересечения необходимо установить условие однозначности определения группы точек пересечения окружностей. С этой целью необходимо найти угол между прямыми, соеди-

няющими 3 точки, не лежащие на одной прямой, а затем полученное значение сравнить с его пороговым значением. Экспериментально определенное пороговое значение равно 10° . Кроме этого, установлено, что расстояние между точками пересечения не должно быть менее 200 м. Если оба условия выполняются, то координаты удаленного объекта определяются как среднее значение группы точек пересечения, в которой расположен объект. На данном этапе вычисляются координаты удаленного объекта в декартовой системе координат.

Для вычисления географических координат объекта необходимо предварительно определить декартовы координаты точек пересечения трех окружностей. В соответствии с разработанным алгоритмом в результате трех измерений дальности получается шесть точек пересечения трех окружностей, которые можно разделить на две группы. Из двух групп точек выбирается такая группа, в которой расстояния между точками пересечений минимальны.

Вычисление координат точек пересечения окружностей целесообразно проводить в декартовой системе координат. В качестве начала координат данной системы выберем точку A с географическими координатами $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$ (рис. 3). Оси декартовой системы координат направлены следующим образом: ось Y направлена на восток, а X – на север. Декартовы координаты других точек, которые учитываются при измерении дальности до объекта, с географическими координатами $(\varphi_i, \lambda_i, h_i)$ вычисляются по формулам

$$x_i = \begin{cases} \sqrt{2[(R_3 + h_0)\cos(\varphi_0)]^2[1 - \cos(\delta\lambda)]}, & \text{если } \delta\lambda \geq 0 \\ -\sqrt{2[(R_3 + h_0)\cos(\varphi_0)]^2[1 - \cos(\delta\lambda)]}, & \text{если } \delta\lambda < 0 \end{cases},$$

$$y_i = \begin{cases} \sqrt{2(R_3 + h_0)^2[1 - \cos(\delta\varphi)]}, & \text{если } \delta\varphi \geq 0 \\ -\sqrt{2(R_3 + h_0)^2[1 - \cos(\delta\varphi)]}, & \text{если } \delta\varphi < 0 \end{cases},$$

где $\delta\varphi = \varphi_i - \varphi_0$, $\delta\lambda = \lambda_i - \lambda_0$ – приращения географических координат, R_3 – радиус Земли.

Таким образом, если определены декартовы координаты центров окружностей $O_1(x_1, y_1)$ и $O_2(x_2, y_2)$, а также их радиусы r_1 и r_2 , то координаты точек их пересечения можно вычислить следующим образом (рис. 4) [4]: вычислить расстояние между центрами окружностей

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

найти длину отрезка O_1H

$$O_1H = (r_1^2 + l^2 - r_2^2)/2l,$$

найти длину отрезка HP

$$HP = \sqrt{r_1^2 - O_1H^2},$$

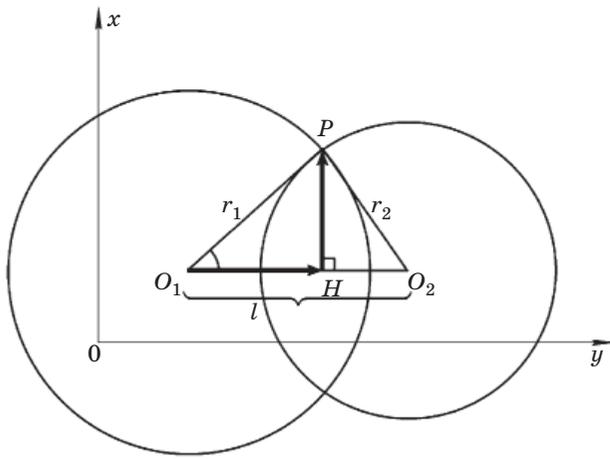


Рис. 4. Схема, поясняющая определение декартовых координат точек пересечения двух окружностей.

определить направление отсчета Θ

$$\Theta = \begin{cases} 1, & \text{если } (x_2 - x_1) \geq 0 \\ -1, & \text{если } (x_2 - x_1) < 0 \end{cases}$$

рассчитать координаты проекции точек пересечения окружностей на отрезок O_1O_2

$$\begin{aligned} x_i &= x_1 + O_1H \cos(\alpha)\Theta, \\ y_i &= y_1 + O_1H \sin(\alpha)\Theta, \end{aligned}$$

где

$$\alpha = \begin{cases} \arctg[(y_1 - y_2)/(x_1 - x_2)], & \text{если } x_1 - x_2 \neq 0 \\ \pi/2, & \text{если } x_1 - x_2 = 0 \end{cases}$$

Вычислить координаты точек пересечения окружностей (x^1, y^1) и (x^2, y^2) по следующим формулам:

если $x_1 - x_2 = 0$, то координаты точек пересечения окружностей вычисляются как

$$\begin{aligned} x^1 &= x_i - HP, & x^2 &= x_i + HP, \\ y^1 &= y_i + O_1H, & y^2 &= y_i - O_1H, \end{aligned}$$

если $y_1 - y_2 = 0$, то координаты точек пересечения окружностей вычисляются как

$$x^1 = x_i, \quad x^2 = x_i, \quad y^1 = y_i + HP, \quad y^2 = y_i - HP,$$

если $x_1 - x_2 \neq 0$ и $y_1 - y_2 \neq 0$, то координаты точек пересечения окружностей вычисляются как

$$\begin{aligned} x^1 &= x_i + \cos(\beta)HP, & x^2 &= x_i - \cos(\beta)HP, \\ y^1 &= y_i + \sin(\beta)HP, & y^2 &= y_i - \sin(\beta)HP, \end{aligned}$$

где верхним индексом (1, 2, ...) обозначен номер группы точек, $\beta = \arctg[-(x_1 - x_2)/(y_1 - y_2)]$.

При наличии трех и более измерений необходимо найти точки пересечения окружностей и определить группу точек, к которой принадлежит объект. С этой целью надо вычислить расстояние между точками пересечения, принадлежащими разным группам. Объект принадлежит к той группе точек, в которой расстояние между точками минимально.

Преобразование декартовых координат в географические осуществляется следующим образом. Сначала определяется магнитный азимут Ψ по известным декартовым координатам x и y

$$\Psi = \begin{cases} \arctg(x/y), & \text{если } x \geq 0 \text{ и } y > 0 \\ \pi/2 + \arctg(y/x), & \text{если } x > 0 \text{ и } y \leq 0 \\ \pi + \arctg(x/y), & \text{если } x < 0 \text{ и } y < 0 \\ 3\pi/2 + \arctg(y/x) & \text{если } x < 0 \text{ и } y > 0 \end{cases}$$

где x и y – декартовы координаты объекта. Затем вычисляются приращения широты и долготы

$$d\varphi = 180 \arccos \left\{ 1 - [l \cos \Psi (R_3 + h_0)]^2 / 2 \right\} / \pi,$$

$$d\lambda = 180 \arccos \left\{ 1 - (l \cos \Psi / [(R_3 + h_0) \cos \varphi_0])^2 / 2 \right\} / \pi.$$

В заключение искомые широта (φ) и долгота (λ) удаленного объекта (в зависимости от знака приращений $d\varphi$ и $d\lambda$) вычисляются как

$$\begin{aligned} \varphi &= \begin{cases} \varphi_0 + d\varphi & \text{при } \pi \geq \Psi \geq 0 \text{ или } (3\pi/2 \geq \Psi > 2\pi) \\ \varphi_0 - d\varphi & \text{при } 2\pi \geq \Psi > 3\pi/2 \end{cases}, \\ \lambda &= \begin{cases} \lambda_0 + d\lambda & \text{при } \pi \geq \lambda \geq 0 \\ \lambda_0 - d\lambda & \text{при } \pi > \lambda \geq 2\pi \end{cases}. \end{aligned}$$

Во время определения лазерным дальнометром расстояния до удаленных объектов уровень отраженного лазерного излучения может быть достаточно низким и для обеспечения заданной точности измерения в лазерном дальнометре имеется режим накопления, в соответствии с которым в течение 10 с осуществляется накопление многократно отраженного от объекта сигнала. После статистической обработки принятого сигнала лазерный дальнометр вычисляет расстояние до объекта. Затем результаты измерений дальности поступают в модуль обработки информации. В этом пакете данных также содержится значение проекции наклонной дальности. По результатам измерений в модуле с использованием разработанного алгоритма рассчитываются декартовы координаты удаленного объекта, которые затем преобразовываются в его географические ко-

ординаты. Информация о координатах, а также о дате и времени съемки формируется на матричном экране микродисплея. После этого активируется затвор фотокамеры и осуществляется съемка удаленного объекта с одновременной регистрацией информации с микродисплея. Во время срабатывания затвора оператор должен обеспечивать наложение перекрестия лазерного дальномера на объекте.

В общем случае погрешность определения координат зависит от целого ряда независимых составляющих. Проведенный анализ показал, что в качестве основных составляющих погрешности измерения можно выделить следующие погрешности:

– погрешность определения координат наблюдателя Δ_n . При неподвижном положении наблюдателя данная погрешность определяется точностью определения координат приемника Глонавс/GPS. Для приемника МПН-М7, используемого в разрабатываемом приборе, погрешность составляет 5 м;

– погрешность определения расстояния лазерным дальномером Δ_d . Для лазерного дальномера ЛТИ *TruPulse 200B*, используемого в разрабатываемом приборе, максимальная погрешность составляет 1 м;

– погрешность, обусловленная непараллельностью оптических осей объектива фотокамеры и дальномера, Δ_{α} . В разрабатываемом приборе юстировкой обеспечивается непараллельность осей объективов 15'. При максимальной дальности до объекта в 1 км погрешность составляет 4,4 м;

– погрешность целеуказания объекта Δ_o . Данная погрешность обусловлена тремором рук оператора. Экспериментально установлено, что данная погрешность не превышает 10 м.

При оценке погрешности определения географических координат объекта составляющи-

ми погрешности, обусловленными угловыми колебаниями вертолета и расходимостью лазерного зондирующего излучения дальномера (в сравнении с угловыми параметрами тремора рук оператора), можно пренебречь.

Суммарная погрешность Δ_{Σ} определения координат объекта вычисляется как среднеквадратическая сумма перечисленных выше погрешностей (из-за некоррелированности составляющих погрешностей)

$$\begin{aligned}\Delta_{\Sigma} &= \sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_d^2 + \Delta_{\alpha}^2 + \Delta_o^2} = \\ &= \sqrt{5^2 + 1^2 + 4,4^2 + 10^2} = 12,1 \text{ м.}\end{aligned}$$

Суммарная погрешность определения координат удаленного объекта (Δ_{Σ} около 10 м) практически на порядок меньше требуемого техническим заданием значения точности определения географических координат удаленного объекта.

Заключение

Объединив на одной платформе цифровую фотокамеру, лазерный дальномер с интегрированным в его состав инерциальным модулем, а также специально созданный модуль обработки информации, разработан малогабаритный оптико-электронный прибор, позволяющий получать в ручном режиме высококачественные фото- или видеоизображения удаленных объектов с индикацией в кадре на их изображениях географических координат объектов, даты и времени съемки, а также другой необходимой информации.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного контракта от 13.09.2011 № 16.523.12.3006.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Левкович А.Д., Поздняков В.В. Системы позиционирования для оптико-электронных систем наблюдения и ориентации // Вестник Московского государственного университета леса. 2009. Т. 69. № 6. С. 52–57.
2. Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Левкович А.Д., Лисов М.А., Зорин П.Ф. Оптико-электронный прибор для определения географических координат удаленного объекта с комплексированной микромеханической бесплатформенной навигационной системой // Сб. тр. XVII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2010. С. 269–276.
3. Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем. М.: Машиностроение, 1990. 431 с.
4. Андреева Е.В., Егоров Ю.Е. Вычислительная геометрия на плоскости // Информатика. 2002. № 40. С. 28–31.