

УДК 621.373.826

А.А. Боев, С.Н. Кузнецов, Б.И. Огнев, С.Ю. Поляков

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА ПУЧКА ДЛЯ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Решается задача выделения центра пятна лазерного излучения для наведения оборудования беспроводной оптической связи и автоматического контроля оси диаграммы направленности. Предложен новый алгоритм определения центра пучка, и определены критерии оценки качества его работы. Проведен сравнительный анализ предложенного алгоритма и ряда известных алгоритмов. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает большую точность работы датчика оси диаграммы направленности в условиях сильных оптических помех, характерных для систем оптической связи.

**Ключевые слова:** атмосферные оптические линии связи, датчик оси диаграммы направленности (ДОДН).

**Введение.** Решение задачи по определению центра пятна лазерного излучения на поверхности позиционно-чувствительного приемника является центральным моментом во многих практических применениях, таких как системы триангуляционных измерений, лазерные сканеры (2D и 3D), лазерные опорные системы, системы распознавания образов и другие [1, 2]. Для этого применяются разнообразные алгоритмы определения положения центра пятна [3-5]. Указанные системы работают в достаточно «тепличных» условиях: при постоянных уровнях освещенности, малом уровне помех и динамическом диапазоне по дальности. Существенно другая ситуация с точки зрения уровня шума складывается при использовании позиционно-чувствительного приемника в качестве датчика оси диаграммы

направленности (ДОДН) в открытых оптических линиях связи или, например, в водной среде для подводных систем передачи информации [6]. Основное его назначение – это выработка целеуказаний для работы системы наведения приемопередатчика на удаленного абонента.

**Цель работы** – выбор эффективного алгоритма выделения центра пучка для систем беспроводной оптической связи, обеспечивающего высокую точность определения положения маяка и устойчивость работы в условиях наличия шума и паразитной засветки.

**Особенности использования ДОДН в открытых оптических линиях связи.** Обобщенная и несколько упрощенная схема использования координатного датчика в открытых линиях связи приведена на рисунке 1.

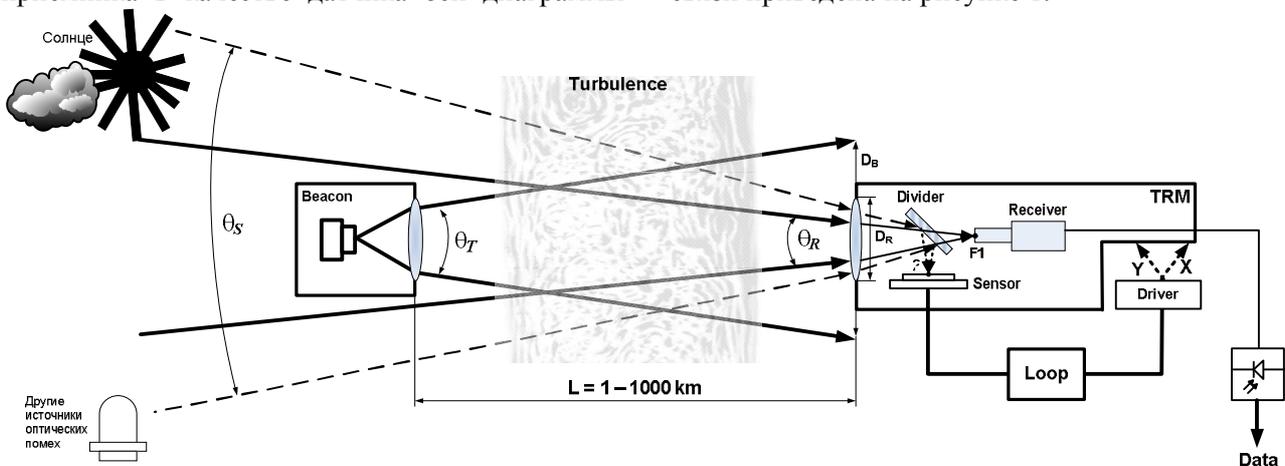


Рисунок 1 – Схема использования координатного датчика в открытых оптических линиях связи

В ее состав входит удаленный передатчик – маяк (Beacon), который с помощью оптической системы формирует пучок лазерного излучения

с угловой расходимостью  $\theta_T$ . На расстоянии  $L$  от маяка расположена система приемопередающего модуля (TRM). Оптическая систе-

ма TRM задает угловое поле зрения приемника и концентрирует излучение маяка в точку F1, где расположен фотоприемник информационного канала. Часть принятого оптического сигнала с помощью делительного элемента (Divider) попадает в сопряженную с фотоприемником точку F2, где размещается позиционно-чувствительный датчик (Sensor). Угловое поле датчика  $\theta_S$  обычно значительно превышает угловое поле зрения  $\theta_R$  информационного приемника.

Открытые оптические линии связи работают в широком диапазоне условий эксплуатации. Дальность связи  $L$  может изменяться от сотен метров до сотен километров. Даже из чисто геометрических оценок это дает изменение мощности на приеме более 60 дБ. Кроме того, при распространении света в атмосфере на него воздействуют все неоднородности канала: турбулентность среды, рассеивающие агенты, гидрометеоры и т.п. Под влиянием атмосферы в плоскости приема пучок сильно искажается. Эти искажения проявляются в изменениях угла его падения на TRM, деформации формы пучка, «пляске» изображения в фокальной плоскости, а также в сильном замирании сигнала. Кроме того, как показано на рисунке 1, в поле зрения канала наведения могут попадать мощные источники фона как естественного (солнце) так и промышленного происхождения (вспышки, блики). Предварительные оценки возможности использования различных типов координатно-чувствительных приемников как датчиков маяка в таких условиях показали, что всей совокупности требований отвечает только матричный фотоприемник. Использование секторных фотодиодов, хотя и дает потенциально более высокую точность и скорость работы, ограничивается главным образом низкой селективностью к фоновым помехам и малым динамическим диапазоном по входной мощности.

Таким образом, для устойчивой работы системы наведения необходим алгоритм, обеспечивающий наименьшую ошибку определения центра пучка при наличии фоновой помехи, уровень которой соизмерим с уровнем сигнала.

Исходя из условий работы ДОДН, была разработана модель для определения эффективности использования различных алгоритмов определения центра пятна. Модель состоит из двух частей: блока описания входных воздействий, включая полезный сигнал, и набора алгоритмов по решению целевой задачи.

**Модель входного воздействия.** Модель анализируемых входных сигналов представляет собой суперпозицию трех компонентов. Полезный сигнал был представлен двумя функциями нор-

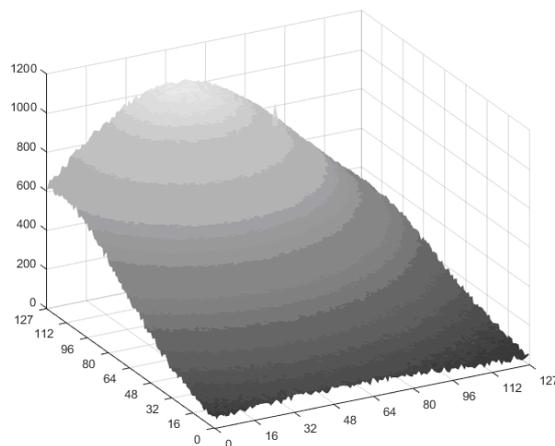
мального распределения с одинаковой шириной СКО  $\sigma=1$  пиксель и со сдвигом между центрами на 2 пикселя с амплитудой от 20 до 4000 отсчетов. Этим моделировалось размытие и замирание пучка в процессе его распространения.

Случайная составляющая помехи описывалась белым шумом, амплитуда которого задавалась в относительных единицах в интервале от 0,1 до 0,98 от амплитуды полезного сигнала, что соответствует изменению отношения сигнал-шум в пределах от 10 до 0,1 дБ.

Фоновая засветка задавалась широкой функцией Гаусса с полушириной СКО  $\sigma=50$  пикселям и амплитудой от 0 до 10000 отсчетов. Положение центра фоновой засветки могло находиться в любой точке датчика.

Приведенная модель сигналов довольно адекватно описывает распределение яркостей на поверхности фотоприемной площадки координатного датчика в реальных условиях эксплуатации при использовании объектива с фокусным расстоянием порядка 200 мм.

На рисунке 2 представлено распределение интенсивности сигнала  $I$  на координатном датчике, где  $n_x$  и  $n_y$  – номер пикселя на матрице по  $X$  и  $Y$  координате соответственно.

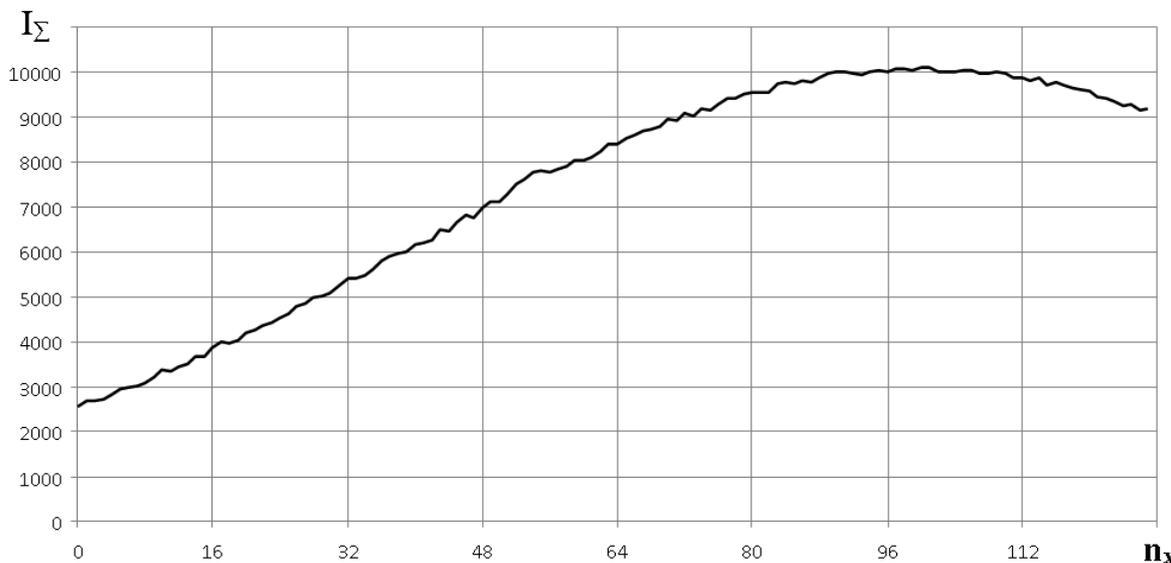


**Рисунок 2 – Распределение интенсивности сигнала на координатном датчике**

В качестве координатного датчика в модели использовалась матрица фотоэлементов размером  $a \times a = 128 \times 128$  пикселей с разрешением по амплитуде в 10 бит. Для проведения анализа эффективности алгоритмов вначале формировались первичные одномерные векторы значений. Они получались путем суммирования откликов в строках на вертикальную ось  $Y$  и соответственно суммированием всех элементов в столбцах на горизонтальную ось  $X$ . Это позволило резко снизить количество обрабатываемого массива цифр до двух векторов длиной  $a$ , каждый из элементов которого имеет увеличенную в  $a$  раз размерность, так как каждое значение представляет со-

бой интегральную сумму всех откликов по строке или столбцу. С другой стороны, появляется возможность работать с двумя отдельными одномерными массивами, вычисления по которым

можно проводить независимо. Характерный вид такого одномерного распределения показан на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Пример распределения входных значений одномерного вектора для условий: амплитуда сигнала 20 отсчетов при центре на 52,3 пикселе, амплитуда фона 1000 отсчетов с центром на 100 пикселе, уровень шума 0,7 (сигнал-шум=1,6 дБ)**

**Известные алгоритмы определения положения маяка.**

**1 Алгоритм BR4.** В работе [3] были рассмотрены свойства пяти различных алгоритмов определения центра отклика с субпиксельным разрешением. Показано, что наилучшие результаты в присутствии шума демонстрирует метод BR4. Принцип его работы заключается в поиске значения координаты центра пятна и величины его отклонения от положения пикселя, соответствующего максимуму сигнала. По своей сути этот алгоритм основан на поиске нулевого значения первой производной в дискретном массиве входных значений. Расчёт может осуществляться по нескольким точкам путем использования оператора линейной фильтрации (линейного фильтра 4-го порядка).

Данный метод отличается минимальным количеством действий с исходным вектором значений, что обеспечивает высокую производительность его вычислительной реализации. Это может быть важным в приложениях реального времени.

**2 Алгоритм третьей производной (D3).** В недавно опубликованных работах [4, 5] представлены схожие методы определения центра пятна, основанные на развитии дифференциального подхода. В частности, алгоритм из [5] предполагает поиск максимума производной второго порядка с нахождением ее центра путем квадратичной интерполяции по трём точкам.

Вначале вектор входных значений подвергается

двум последовательным операциям вычисления производной по двум соседним точкам. Так как при такой операции происходит смещение массива к концу или началу на 0,5 пикселя, дифференцирование проводится в разных направлениях. Минимум второй производной соответствует максимуму исходной функции. Блок поиска находит в массиве значений второй производной координаты минимума, а также двух соседних с ним точек, после чего передаёт их на блок интерполяции в качестве узловых точек. Блок квадратичной интерполяции строит уравнение параболы, определяя ее коэффициенты путем решения системы уравнений из условия прохождения параболы через узловые точки. Координаты центра пятна находятся из условия равенства нулю производной полученной параболы.

Результаты работы данного алгоритма отличаются от предыдущего тем, что он не подвержен влиянию градиентной засветки, так как вторая производная сводит его к нулю. Основным недостатком данного метода является большая погрешность, вносимая случайным шумом.

**3 Интегральный поиск (ИП).** Данный алгоритм с небольшими вариациями используется в оборудовании атмосферных оптических линий связи Artolink [7]. Для поиска центра пятна используется интегрирование интенсивности пикселей по всему вектору входных значений. Схема вычислений состоит из двух частей. К первой части относятся формирование и наложение маски (амплитудная фильтрация) на исходный век-

тор значений, вторая часть алгоритма осуществляет непосредственно поиск центра пучка. Из проинтегрированного вектора берется последнее, самое большое значение и делится на 2. Определяется наиболее близкий к центру пиксель, после чего посредством прямолинейной интерполяции по соседним точкам находится уточненный центр пучка с субпиксельным разрешением.

Главным недостатком данного метода является невозможность работы при уровне сигнала, меньшем, чем уровень помехи, в том числе в присутствии градиентной засветки большой интенсивности.

**Предлагаемый дифференциально-интегральный алгоритм нахождения абонента – ДИАНА.** Этот алгоритм спроектирован специально для работы в условиях высокого уровня помех. Схему вычислений данного алгоритма можно функционально разделить на две части. Первая часть осуществляет поиск цели (пятна) в смеси сигнал-шум, вторая – определяет центр пятна. Положение цели определяется минимумом второй производной, использование которой исключает влияние градиентной засветки на работу алгоритма.

$$f'(i) = a \cdot (f(i+3) - f(i-3)) + b \cdot (f(i+2) - f(i-2)) + c \cdot (f(i+1) - f(i-1)), \quad (1)$$

где:

$f$  – значение сигнала;

$i$  – номер пикселя;

$a, b, c$  – коэффициенты, задаваемые в соответствии с ожидаемой шириной отклика полезного сигнала на матрице.

Простая производная, определяемая для каждого пикселя как разница интенсивностей, соответствующих ему и последующему пикселю, сильно подвержена влиянию шумов. Для решения этой проблемы в данном алгоритме используются сглаженные оценки частных производ-

ных, которые получаются как оценки метода наименьших квадратов [8]. После нахождения цели как координаты минимального отсчета в массиве значений второй производной рассчитывается маска. Результатом этой операции является «вырезание» из исходного вектора области, соответствующей пятну. Тем самым в несколько раз уменьшается вычислительная мощность, требуемая для работы блока интегрирования. Далее полученные отсчеты поступают на интегратор, восстанавливающий сглаженный и маскированный исходный сигнал. Центр пятна определяется по узловым точкам с использованием линейной интерполяции.

**Результаты анализа алгоритмов.** Сравнение эффективности работы алгоритмов проводилось по двум критериям: точности определения цели и устойчивости работы в условиях наличия шума и паразитной засветки.

Собственная погрешность работы алгоритмов оценивалась как отклонение рассчитанного значения центра пучка от истинного (заданного) положения центра пучка в условиях отсутствия вредных воздействий и представления сигнала идеальной функцией Гаусса с СКО от 1 до 3 пикселей. На рисунке 4 приведены результаты расчета погрешности по вычислению центра пучка с полушириной  $\sigma=1$  при изменении его положения в пределах одного пикселя. Видно, что все алгоритмы обеспечивают примерно одинаковую собственную погрешность определения центра пучка, лежащую в пределах 8 % от размера пикселя. Надо отметить, что увеличение ширины полезного сигнала пагубным образом сказывается только на алгоритме D3, увеличивая погрешность вычисления центра до 50 % пикселя уже при  $\sigma=3$ . При этом другие методы демонстрируют незначительное ухудшение точности своей работы.

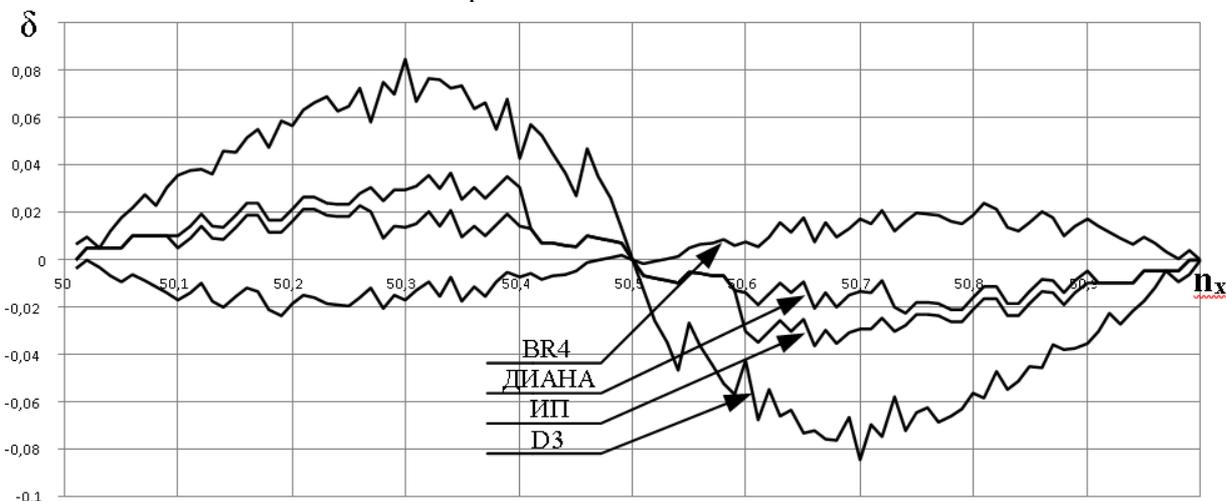


Рисунок 4 – Собственная погрешность алгоритмов определения положения маяка

Как уже указывалось, основная цель включения в состав оборудования ДОДН в комплекте с системой позиционирования состоит в том, чтобы максимизировать попадание принятого излучения на площадку фотоприемника. Поэтому для корректной оценки работы алгоритмов в качестве критерия применялась функция ввода излучения в основной приемник. В качестве параметра эффективности использовался коэффициент ошибки целеуказания (TER – target error ratio). Он означает вероятность ошибочного определения цели, приводящего к 50 % и большему снижению уровня принимаемой мощности в условиях воздейст-

вия случайных помех. Для его определения были проведены серии вычислительных экспериментов, заключающихся в воздействии на ДОДН входного сигнала с различными параметрами. В каждой реализации серии случайным образом менялись амплитуда полезного сигнала в интервале от 20 до 4000 отсчетов, уровень фона в пределах от 100 до 10000 отсчетов и взаимное положение сигнала и фона. Одновременно накладывалось случайное шумовое воздействие с заданным отношением сигнал-шум. Результаты расчетов приведены на рисунке 5.

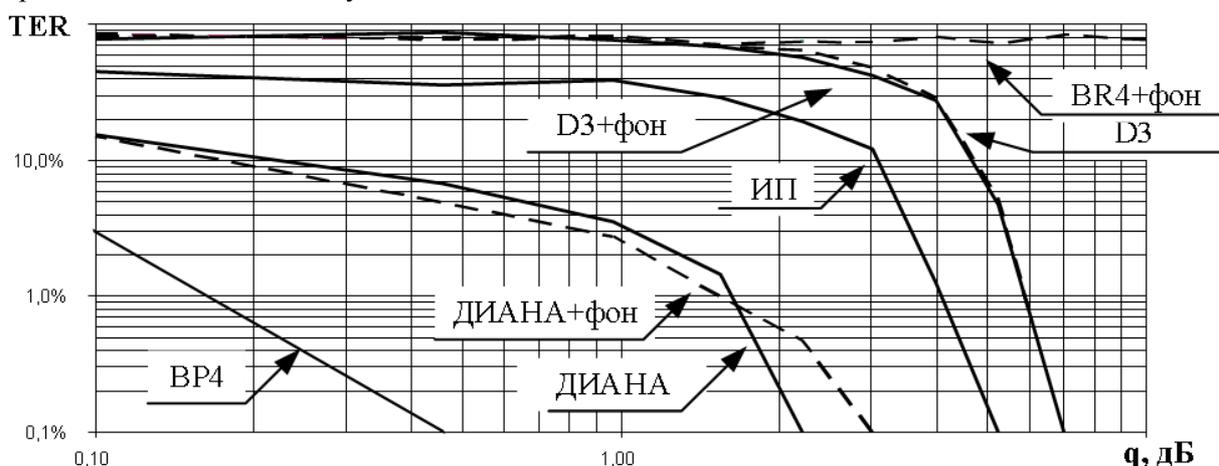


Рисунок 5 – Зависимость TER от соотношения сигнал-шум для различных алгоритмов определения положения маяка

Как видно из рисунка 5, наилучшие результаты по устойчивости работы в сложной помеховой обстановке демонстрирует алгоритм ДИАНА. Это связано с тем, что он был спроектирован с учетом всех преимуществ дифференциальных и интегральных методов и позволяет исключить их основные недостатки.

**Заключение.** С учётом особенностей использования ДОДН в системах наведения оборудования беспроводной оптической связи предложен новый алгоритм определения центра пучка и определены критерии оценки качества его работы. Проведен сравнительный анализ предложенного алгоритма и ряда известных алгоритмов. Показано, что предложенный алгоритм ДИАНА обеспечивает большую точность работы ДОДН в условиях сильных оптических помех, характерных для систем оптической связи.

#### Библиографический список

1. Blais F. Review of 20 years of range sensor development. – Journal of Electronic Imaging, 2004. – Vol. 13(1) – P. 231-243.
2. Демкин В., Демкин А., Шадрин М., Будагов Ю.

Лазерные опорные системы. Фотоника. 2012. № 3(33). – 38-44 с.

3. Fisher R.B., Naidu D.K. A comparison of algorithms for subpixel peak detection. - in Image Technology, Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision, 1996. – P. 385-404.

4. Matiukas V., Miniotas D. Detection of laser beam's center-line in 2D images. – Elektronika ir Elektrotechnika, 2009. № 7(95). – P. 67–70.

5. Molder A., Martens O., Saar T., Land R. Laser Line Detection with Sub-Pixel Accuracy. - Elektronika ir Elektrotechnika, 2014. Vol. 20, № 5. – P. 132-135.

6. Кириллов С.Н., Балюк С.А., Кузнецов С.Н., Есенин А.С. Разработка модели распространения оптического сигнала в водной среде для подводных систем передачи информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 40. С. 3-24.

7. www.artolink.com.

8. Елесина С.И., Костяшкин Л.Н., Логинов А.А., Никифоров М.Б. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах: монография. Под ред. Костяшкина Л.Н., Никифорова М.Б. – М.: Радиотехника, 2015. 208 с.