



УДК 623.62
ГРНТИ 78.25.41.15.07

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ, ОСНОВАННЫЙ НА АНАЛИЗЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ В ПЛОСКОСТИ ПРИЁМА

*А.Ю. КОЗИРАЦКИЙ, доктор технических наук, профессор
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*
*А.И. ГРЕВЦЕВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*
*В.В. КАПИТАНОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*
*М.М. ФРОЛОВ
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье рассмотрен способ однопозиционного определения направления на источник лазерного излучения по анализу интерференционной картины в плоскости приема с использованием лазерного гетеродинного приемника. Приведены оценка точностных характеристик способа и структурная схема устройства его реализующего.

Ключевые слова: матричный фотоприемник; интерференционная картина; источник лазерного излучения; определение направления.

LASER LOCATION STATION ANGULAR COORDINATES DETERMINATION METHOD BASED ON THE ANALYSIS OF THE INTERFERENCE PICTURE IN THE RECEPTION PLANE

*A.YU. KOZIRATSKIJ, Doctor of technical sciences, Professor
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*
*A.I. GREVTSEV, Candidate of technical sciences
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*
*V.V. KAPITANOV, Candidate of technical sciences
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*
*M.M. FROLOV
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

The article describes a method of single-position determination of the direction to the source of laser radiation by analyzing the interference pattern in the receiving plane using a laser heterodyne receiver. The method accuracy characteristics estimation and the structural diagram of its implementer are given.

Keywords: photodetector array; interference pattern; laser radiation source; direction determination.

Введение. В ходе решения совокупности задач, связанных с работой лазерных локационных станций (ЛЛС), определяющей является задача повышения точности определения направления на источник первичного или вторичного лазерного излучения (ИЛИ). Для ее решения используются приемники лазерного излучения, построенные по



схеме оптического гетеродина [1,2], которым присущ антенный эффект, что позволяет проводить однопозиционное определение направления на ИЛИ. Исследования, проведенные авторами в [3], показали, что использование указанного эффекта обеспечивает получение угловых координат источника с точностью до 10–20 угловых минут.

Актуальность. С увеличением дальности точность ориентирования существенно влияет на качество функционирования ЛИС и указанные выше значения уже не соответствуют требуемым. Поэтому задача повышения точности определения направления на ИЛИ является весьма актуальной. Решить ее возможно, используя еще один эффект, присущий приемникам указанного типа. Он заключен в образовании интерференционной картины в плоскости фотоприемника в результате взаимодействия падающего и опорного оптических потоков, анализ которой обеспечит получение более точных оценок угловых координат. Исходя из вышесказанного, **целью статьи** является разработка способа однопозиционного определения направления на источник лазерного излучения с учетом эффектов, присущих приемникам лазерного излучения гетеродина типа.

В интересах достижения поставленной цели предлагается способ, основанный на использовании в качестве приемника лазерного излучения матричного фотоприемника (МФП), что позволит получать и проводить анализ интерференционной картины, формирующейся в плоскости приемника с применением методов цифровой обработки изображений, а предварительное определение угловых координат проводить с использованием антенного эффекта [1, 2].

На рисунке 1 представлена геометрия решаемой задачи. На поверхности МФП размерностью 40×100 элементов со стороной элемента 20×20 мкм сформирована интерференционная картина, длина волны излучения $10,6$ мкм, для идеального случая отсутствия флуктуаций фазы поля в предположении плоских фазовых фронтов падающего и опорного полей. Одна из сторон приемника, ограниченная осью Ox , соответствует направлению на север.

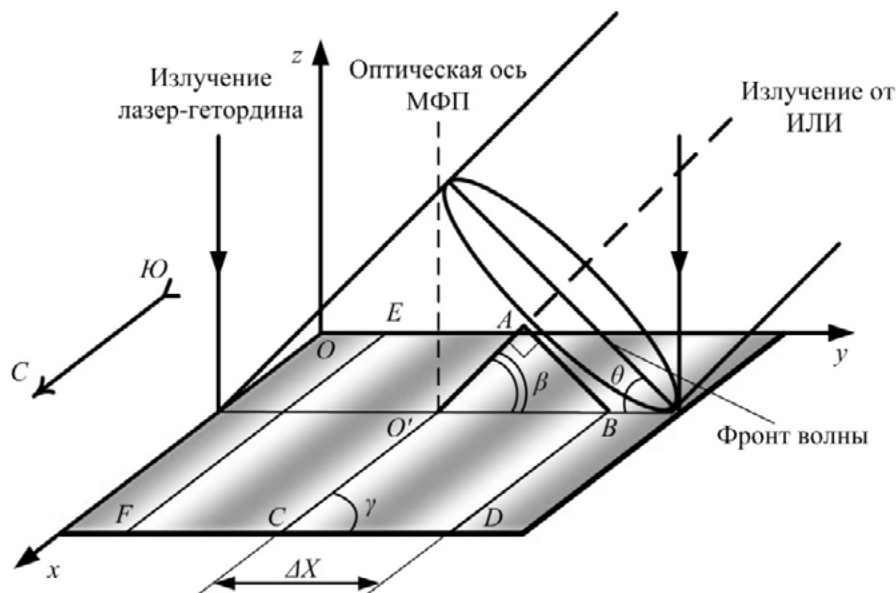


Рисунок 1 – Геометрия задачи

Линии равных интенсивностей максимумов интерференционной картины, обозначенные на рисунке 1 как EF , $O'C$, BD образуют на поверхности МФП геометрические фигуры в виде параллелограммов.



Алгоритм определения азимута и угла места на источник лазерного излучения включает в себя процедуру оконтуривания цифрового изображения полос интерференционной картины и определения острых углов полученных параллелограммов, координаты вершин которых известны. Затем вычисляется ΔX , как расстояние между сторонами параллелограммов.

Угол между плоскостью фазовыми фронтами падающего излучения от ИЛИ и опорного колебания от местного гетеродина равен θ и определяется следующим выражением [2, 3].

Анализ известной литературы [4, 5] показал, что угол падения оптического излучения определяется следующим образом:

$$\theta = \arcsin(\lambda / \Delta X), \quad (1)$$

где λ – длина волны падающего излучения, ΔX – расстояние между соседними максимумами интерференционной картины.

Из сформированного треугольника $AO'B$, используя формулу 1, находим угол места на ИЛИ:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \theta = \frac{\pi}{2} - \arcsin(\lambda / \Delta X), \quad (2)$$

Значение угла азимута α ИЛИ не зависит от длины волны и определяется исходя из углового положения чередующихся полос интерференционной картины относительно одной из сторон матричного фотоприемника. Для рассматриваемой задачи выражение для определения азимута ИЛИ имеет следующий вид:

$$\alpha = \gamma + 3\frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

где γ – угол между линиями максимумов интерференционной картины и выбранной стороны МФП.

На рисунке 2 представлена зависимость ширины интерференционной полосы от угла между фазовыми фронтами падающего излучения от ИЛИ и опорного колебания при различных значениях длин волн.

Анализ рисунка 2 показывает что, при увеличении угла между фазовыми фронтами опорного и сигнального излучений, ширина между максимумами интерференционных полос уменьшается и в диапазонах углов 0,5–2 угловых минут для значения длин волны 0,6; 1,06; 5 мкм составляет соответственно 0,2–0,8; 1,2–3; 4,8–12 мкм.

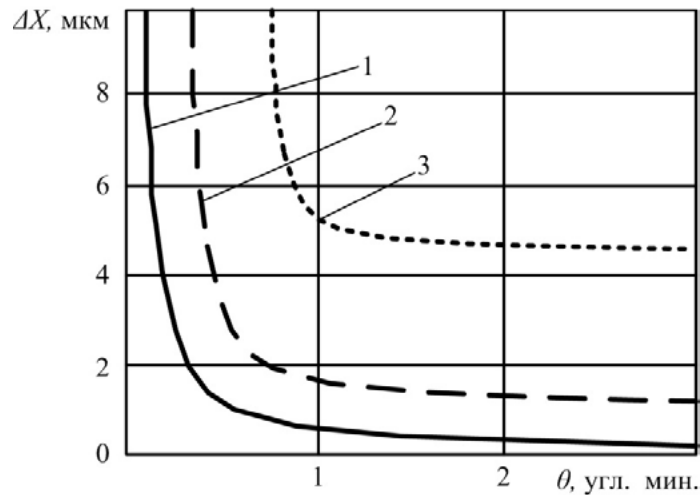


Рисунок 2 – Зависимость ширины интерференционных полос от угла между фазовыми фронтами опорного и сигнального колебаний при различных значениях длин волн: 1 – 0,6 мкм; 2 – 1,06 мкм; 3 – 5 мкм

Структурная схема устройства, реализующая предлагаемый способ, имеет вид, представленный на рисунке 3. Отличительными особенностями предложенного устройства, относительно [1, 3] являются наличие матричного фотоприемника и блок цифровой обработки изображения.

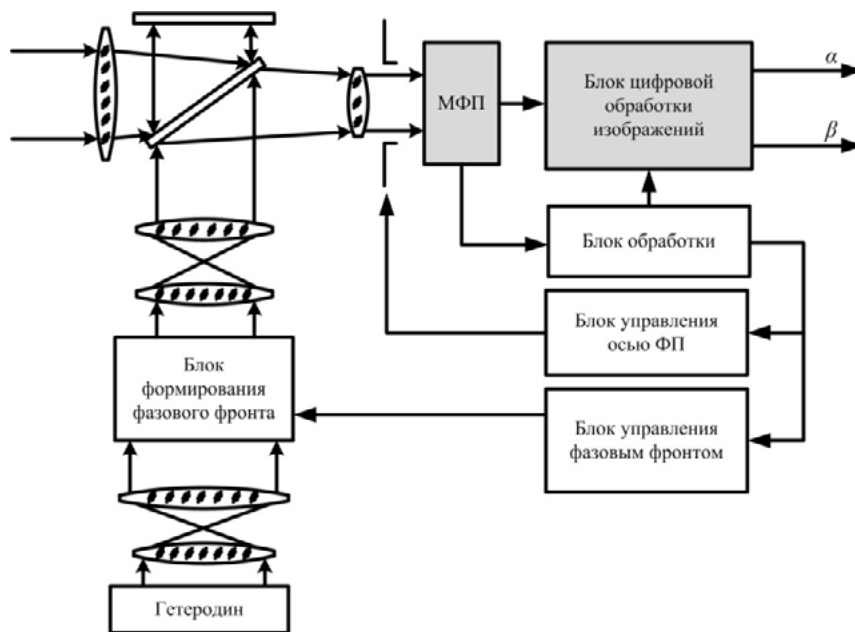


Рисунок 3 – Структурная схема устройства, реализующая предлагаемый способ

Алгоритм определения направления на источник лазерного излучения представляет собой двухэтапные действия. На первом (предварительном) этапе на матричный фотоприемник, работающий в режиме суммирования сигналов со всех чувствительных элементов, поступают две волны: сигнальная и опорная волна от местного гетеродина. Фазовый фронт опорной волны сформирован блоком управления фазовым фронтом сигнала гетеродина с учетом требуемых параметров, определяемых блоком формирования параметров фазового фронта сигнала гетеродина. Сектор просмотра устанавливается на этапе предварительного ориентирования электромеханическим способом с



помощью вращающейся платформы, а сканирование внутри сектора осуществляется за счет изменения положения фазового фронта сигнала гетеродина. Момент достижения сигналом максимального значения определяется блоком обработки сигнала на выходе фотоприемника, как момент считывания угловых значений пространственного положения волнового вектора гетеродинной волны относительно оптической оси приемного канала. Их значения, с точностью до значений 10–20 угловых минут, пересчитываются в предварительные значения угловых координат источника лазерного излучения. Происходит фиксация углового положения фазового фронта сигнала гетеродина и выдается команда запуска на блок цифровой обработки изображений.

На втором этапе сигнал с каждого чувствительного элемента матричного фотоприемника одновременно поступает в блок цифровой обработки изображения, где на основе анализа интерференционной картины происходит уточнение угловых координат положения источника оптического излучения. Результатом обработки являются более точные угловые координаты пространственного положения ИЛИ.

Оценим точностные характеристики способа в условиях влияния возмущающих воздействий на принимаемое оптическое излучение. Как показано в [6], в точке приема они проявляются в случайном изменении интенсивности излучения и искажениях фазового фронта падающей волны. При этом на качество интерференционной картины наиболее весомое влияние оказывают именно фазовые искажения. Предполагая, что флуктуации фазового фронта волны подчинены нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, что как показано в [4] является допустимым, то оценку точности проведем учитывая только фазовые искажения. Дрожание мест установки источника и приемника лазерного излучения не рассматривались в силу их большой инерционности. Для проведения оценки точности в среде MathCAD разработана имитационная модель, позволяющая получать интерференционные картины при различных углах рассогласования фазового фронта сигнальной волны и волны гетеродина.

Структура модели определения угловых координат ИЛИ приемником, реализующим двухэтапное определение направления на ИЛИ с использованием гетеродинного приемника, позволяющая учесть влияние флуктуации фазового фронта разведываемого оптического излучения на точность оценки угловых координат ИЛИ, имеет вид, представленный на рисунке 4 [5, 6].

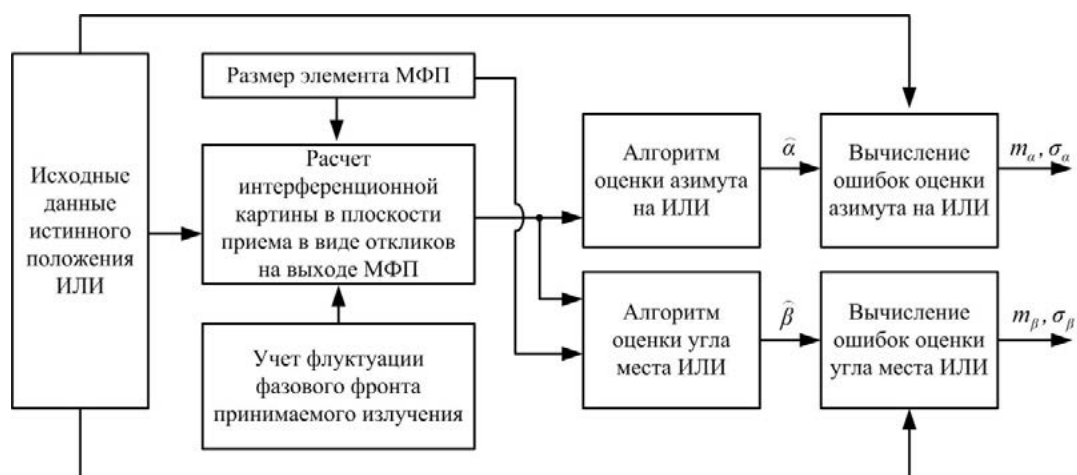


Рисунок 4 – Структура модели определения угловых координат ИЛИ

Исходные данные для расчетов: длина волны лазерного излучения $\lambda = 10,6$ мкм, разрешение МФП 40×100 элементов, размер элемента 20×20 мкм, истинное значение угла падения фазового фронта на плоскость МФП $\beta = 1$ град, азимута $\alpha = 0$ град.



Разработанная модель позволила получить, представленные на рисунке 5 зависимости математического ожидания m_β и среднеквадратического отклонения (СКО) угла падения σ_β от СКО флуктуации фазы фронта падающей волны σ_c . Расчет m_β и σ_β проводился по 1000 реализациям для каждого значения σ_c .

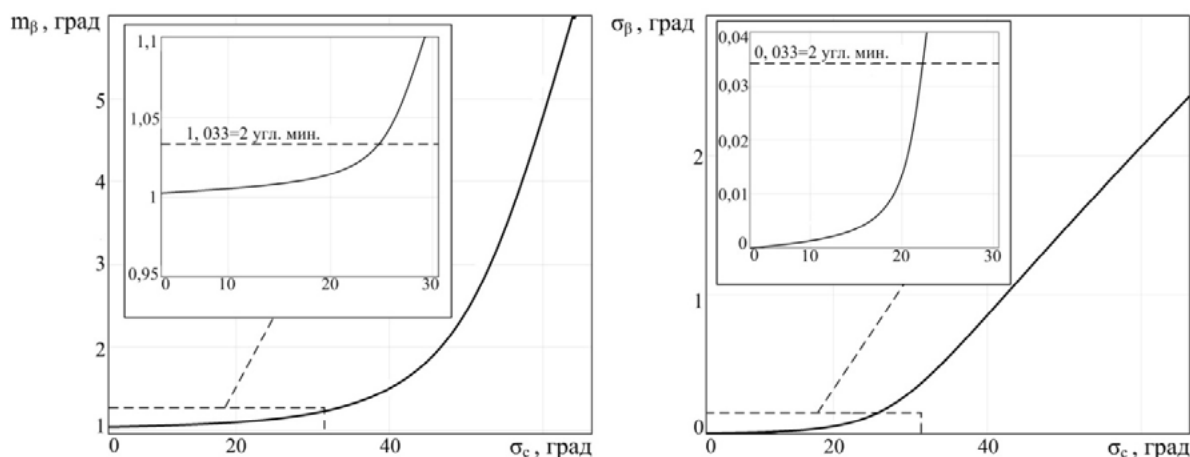


Рисунок 5 – Зависимости математического ожидания и СКО угла места от СКО флуктуации фазы фронта принимаемого излучения

Анализ зависимостей показывает, что предложенный способ обеспечивает получение угловых координат ИЛИ, совпадающих с истинными с точностью до двух угловых минут при условии, что СКО флуктуации фазы поля не превышает значения $\sigma_c = 23$ град. В интервале флуктуации фазы σ_c от 23–38 град точность оценки угловых координат составляет до 20 угловых минут, что соизмеримо с показателями существующего способа с использованием гетеродинного приемника. Дальнейшее увеличение уровня флуктуаций приводит к существенному увеличению уровня ошибки измерения.

Выводы. Таким образом, в статье рассмотрен разработанный способ однопозиционного определения направления на источник лазерного излучения по анализу интерференционной картины, образующейся на поверхности МФП и с использованием методов имитационного моделирования проведено исследование точности определения угловых координат источника в условиях наличия искажений фазового фронта принимаемого излучения. Показано, что получение угловых координат ИЛИ, значения которых совпадают с истинными, обеспечивается только в условиях малых значений флуктуации фазового фронта принимаемого излучения. Учитывая, что значения СКО флуктуации фазы поля для слабовозмущенной атмосферы не превышают указанного значения, то это говорит о высокой точности предложенного способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2630522 Российская Федерация, МПК G01S 17/06, G01B 9/02. Способ однопозиционного определения угловых координат на источник лазерного излучения / Фролов М.М. [и др.]; заявитель и патентообладатель ВУНЦ ВВС «ВВА» № 2016119417/12; заявл. 19.05.16; опубл. 11.09.17, Бюл. № 26.
2. Фролов, М.М. Способ однопозиционного определения направления на источник лазерного излучения гетеродинным фотоприемником / М.М. Фролов, А.Ю. Козирацкий, А.И. Гревцев, А.А. Козирацкий // Радиотехника. – 2016. – № 8. – С. 59-62.



3. Основы импульсной лазерной локации: Учеб. пособие для вузов / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов и др.; под ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.
4. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов. Монография / Под ред. Ю.Л. Козирацкого. – М.: Радиотехника, 2015. – 456 с.
5. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
6. Вудс Р. Цифровая обработка изображений/ Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
7. Климков Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. – М.: Сов. радио, 1978. – 264 с.

REFERENCES

1. Pat. 2630522 Rossijskaya Federatsiya, MPK G01S 17/06, G01B 9/02. Sposob odnopozi-tsionnogo opredeleniya uglovykh koordinat na istochnik lazernogo izlucheniya / Frolov M.M. [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' VUNTS VVS «VVA» №2016119417/12; zayavl. 19.05.16; opubl. 11.09.17, Byul. № 26.
2. Frolov, M.M. Sposob odnopozi-tsionnogo opredeleniya napravleniya na istochnik lazernogo izlucheniya geterodinnym fotopriemnikom / M.M. Frolov, A.YU. Koziratskij, A.I. Grevtsev, A.A. Koziratskij // Radiotekhnika. – 2016. – № 8. – S. 59-62.
3. Osnovy impul'snoj lazernoj lokatsii: Ucheb. posobie dlya vuzov / V.I. Kozintsev, M.L. Belov, V.M. Orlov i dr.; pod red. V.N. Rozhdestvina. – М.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2006. – 512 s.
4. Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-ehlektronnykh sredstv, otsenka parametrov ikh signalov. Monografiya / Pod red. YU.L. Koziratskogo. – М.: Radiotekhnika, 2015. – 456 s.
5. M. Born, EH. Vol'f. Osnovy optiki. – М.: Nauka, 1973. – 720 s.
6. Vuds R. TSifrovaya obrabotka izobrazhenij/ R. Gonsales, R. Vuds. – М.: Tekhnosfera, 2005. – 1072 s.
7. Klimkov YU.M. Osnovy rascheta optiko-ehlektronnykh priborov s lazerami. – М.: Sov. radio, 1978. – 264 s.

© Козирацкий А.Ю., Гревцев А.И., Капитанов В.В., Фролов М.М., 2018

Козирацкий Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, начальник кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, sashfish@bk.ru

Гревцев Александр Иванович, кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, grevets1@rambler.ru

Капитанов Владимир Валерьевич, преподаватель кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, kvv256@rambler.ru

Фролов Михаил Михайлович, преподаватель кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, mikhail_@bk.ru