



УДК 519.237
ГРНТИ 78.25.13

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ СО СКАНИРОВАНИЕМ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

*А.В. ШАМАРИН, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
С.В. УТЁМОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
В.А. ШАМАРИН
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Предложен способ определения траектории движения системы со сканированием подстилающей поверхности лазерным лучом по рассеянному атмосферой излучению системой матричных фотоприемников с одного малоразмерного объекта. Методами пространственно-временной обработки изображений и аналитической геометрии решена задача оценки точности пеленгации таких лазерных систем.

Ключевые слова: способ пеленгации; лазерное сканирование.

A METHOD OF DIRECTION FINDING SYSTEM WITH THE SCANNING OF THE UNDERLYING SURFACE WITH A LASER BEAM

*A.V. SHAMARIN, Candidate of technical Sciences
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
S.V. UTYOMOV, Candidate of technical Sciences
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
V.A. SHAMARIN
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

A method of direction finding systems with the underlying surface scanning laser beam scattered by the atmosphere radiation system matrix of photodetectors with a small-size object. The methods of the space-time image processing and analytic geometry solved the problem of estimating the accuracy of the DF laser systems.

Keywords: direction-finding method, laser scanning.

В ряде ведущих зарубежных стран в рамках комплексной программы НАТО «FCS – боевые системы будущего» большое внимание уделяется разработке систем, использующих последние достижения в создании лазерной техники. Широкое внедрение лазерных систем в армиях зарубежных стран требует разработки специальных мер, направленных на борьбу с ними. Одной из основных проблем, от решения которой во многом зависит успех этой борьбы, является разработка способов и средств обнаружения и пеленгации лазерных систем разведки, прицеливания и наведения высокоточного оружия.

Практикуемый в настоящее время подход к разведке лазерных систем предусматривает использование в качестве информации об их функционировании как прямого, так и рассеянного атмосферой лазерного излучения [1-4].



На сегодняшний день основное внимание уделялось созданию средств обнаружения и пеленгации лазерных систем по прямому излучению с помощью совокупности одноэлементных или матричных фотоприёмников, объединённых в одно фотоприёмное устройство (ФПУ) – датчик лазерного облучения (ДЛО). Проведённый в [5] анализ состояния и перспектив развития ДЛО с использованием разработанной автоматизированной базы данных оптико-электронных средств [6] позволил сделать следующие выводы.

В настоящее время абсолютное большинство ДЛО (порядка 80%) позволяют обнаруживать только импульсное излучение лазерных средств, работающих в ближнем ИК диапазоне (на длинах волн 0,69 и 1,06 мкм).

Основным информативным признаком существующих и разрабатываемых ДЛО является короткая (до 100 нс) длительность импульсов. Регистрация же непрерывного и квазинепрерывного лазерного излучения, тем более на длине волны 10,6 мкм, существующими ДЛО невозможна. Кроме того, пороговая чувствительность современных ДЛО, составляющая величину порядка $10^{-2} \dots 10^{-7}$ Вт/см², не позволяет регистрировать импульсные маломощные лазерные сигналы. И, наконец, использование ДЛО такого класса в ряде случаев может оказаться неэффективным по технико-экономическим соображениям: недостаточной точности пеленгации лазерной системы, составляющей для разных типов датчиков 2...3,75 градуса [5], а также необходимости применения большого количества ДЛО (сотен штук) для пеленгации лазерных излучений в широком секторе обзора [5].

Более широкие возможности обнаружения и пеленгации лазерных систем появляются при применении многопозиционных (триангуляционных) методов пассивной оптической локации рассеянного атмосферой лазерного излучения с последующей пространственно-временной обработкой сигналов [7-9]. Одним из таких способов, обеспечивающих пеленгацию источника лазерного излучения с использованием этих методов, является способ [7, 9], основанный на применении матричных ФПУ, объединённых в единую систему и расположенных таким образом, что сформированные изображения рассеянного атмосферой лазерного луча в разнесённых в пространстве нескольких (не менее трёх) матричных ФПУ после пространственно-временной обработки позволяют определить пространственное положение лазерного луча.

Однако для обеспечения пеленгации лазерного луча триангуляционным методом с высокой точностью (менее одного градуса) необходимо размещать матричные ФПУ на большом удалении друг от друга (в сотни и тысячи метров) [7, 9], что невозможно реализовать в ряде часто встречающихся на практике случаев определения положения лазерного луча в пространстве с одного малоразмерного объекта. Пеленгация систем со сканированием подстилающей поверхности лазерным лучом является невозможной с использованием известных методов определения положения рассеянного атмосферой лазерного луча.

Целью статьи является разработка способа пеленгации систем со сканированием подстилающей поверхности лазерным лучом по рассеянному атмосферой излучению системой матричных фотоприёмников с одного малоразмерного объекта.

Сущность предлагаемого способа пеленгации [10] заключается в обнаружении рассеянного в атмосфере лазерного излучения элементами системы из четырёх матричных фотоприёмников, определении линейки элементов, в которых обнаружены сигналы, и решении задачи восстановления угловых координат лазерной системы. При этом матричные ФПУ устанавливаются таким образом, что они представляют собой боковые грани прямоугольного параллелепипеда. Угловые координаты лазерной системы определяют по линии пересечения двух плоскостей, каждая из которых проходит через линейки элементов в двух матричных фотоприёмниках, расположенных на противоположных боковых гранях прямоугольного параллелепипеда.



Предлагаемый способ может быть реализован с помощью устройства, структурная схема которого показана на рисунке 1 [10].

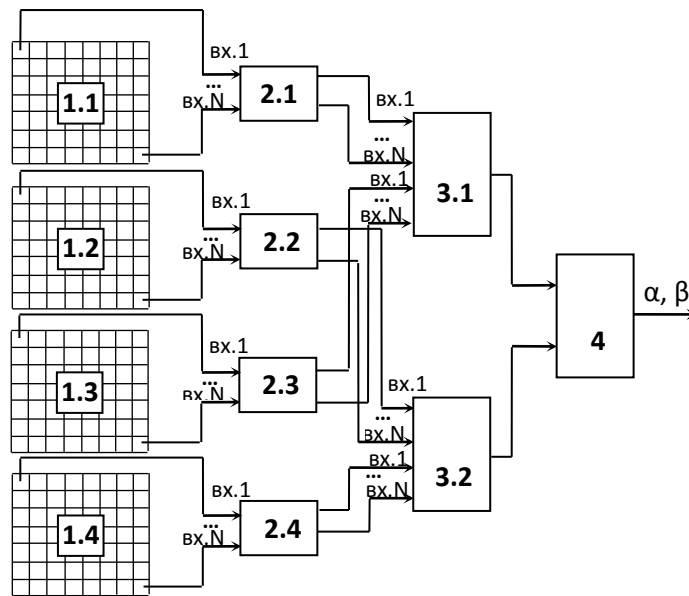


Рисунок 1 – Устройство пеленгации лазерной системы

На рис. 1 обозначено: 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4 – четыре матричных фотоприёмника для обнаружения рассеянного в атмосфере излучения оптической системы сканирования земной поверхности, установленные таким образом, что они представляют собой боковые грани прямоугольного параллелепипеда, стороны основания которого равны между собой; 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4 – четыре многоканальных блока определения линейки элементов (проекция изображения оси луча сканирующей оптической системы), соответствующей максимальному числу элементов, в которых зарегистрированы (обнаружены) сигналы; 3.1 и 3.2 – два многоканальных блока определения плоскостей, каждая из которых проходит через линейки элементов в двух матричных фотоприёмниках, плоскости которых образуют в пространстве боковые грани параллелепипеда, расположенные друг напротив друга; 4 – блок определения линии пересечения плоскостей, проходящих через проекции луча в каждой паре матричных фотоприёмников, расположенных друг напротив друга.

Для реализации этого способа обнаружения и пеленгации лазерной системы по рассеянному атмосферой излучению необходимо решить задачи, связанные с разработкой следующих алгоритмов:

- алгоритма обнаружения рассеянного атмосферой лазерного излучения элементами каждого из четырёх матричных ФПУ;
- алгоритма оценки координат элементов в строке матричного фотоприёмника с максимальными значениями интенсивности изображения лазерного луча;
- алгоритма оценки положения изображения лазерного луча в плоскости одного матричного приёмника по максимальному числу элементов, в которых зарегистрированы (обнаружены) сигналы;
- алгоритма оценки пространственного положения лазерного луча путем пространственно-временной обработки его изображения в плоскостях приёма нескольких матричных ФПУ на основе построения плоскостей, проходящих через проекции изображений оси лазерного луча пеленгуемой лазерной системы в каждой паре матричных фотоприёмников, и нахождении линии пересечения этих плоскостей в пространстве;



- алгоритма расчёта скорости движения системы со сканированием подстилающей поверхности лазерным лучом по траектории движения, с учетом знания временных отсчетов формирования кадров изображений фотоприёмников, идущих в расчет пространственного положения лазерной системы и длины участка траектории от одного отсчета к следующему.

Подробное описание этих алгоритмов приведено в [11, 12].

Оценим точность пеленгации системы со сканированием подстилающей поверхности лазерным лучом по рассеянному атмосферой излучению системой матричных фотоприемников с одного малоразмерного объекта.

Оценку пространственного положения лазерного луча рассмотрим для случая применения четырёх матричных фотоприёмных устройств, являющихся боковыми гранями прямоугольного параллелепипеда, который лежит в центре поля зрения сканирующей лазерной системы, находящейся на высоте H и расстоянии d от центра защищаемого объекта (рисунок 2).

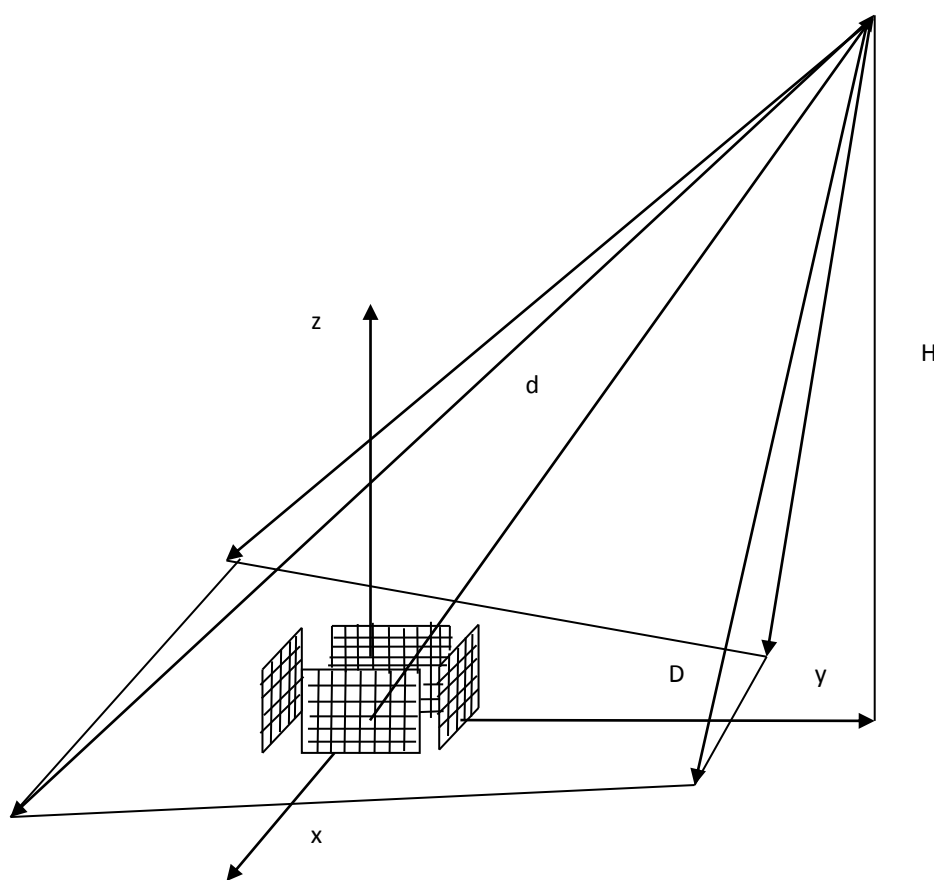


Рисунок 2 – Взаимное расположение системы матричных ФПУ и сканирующей лазерной системы

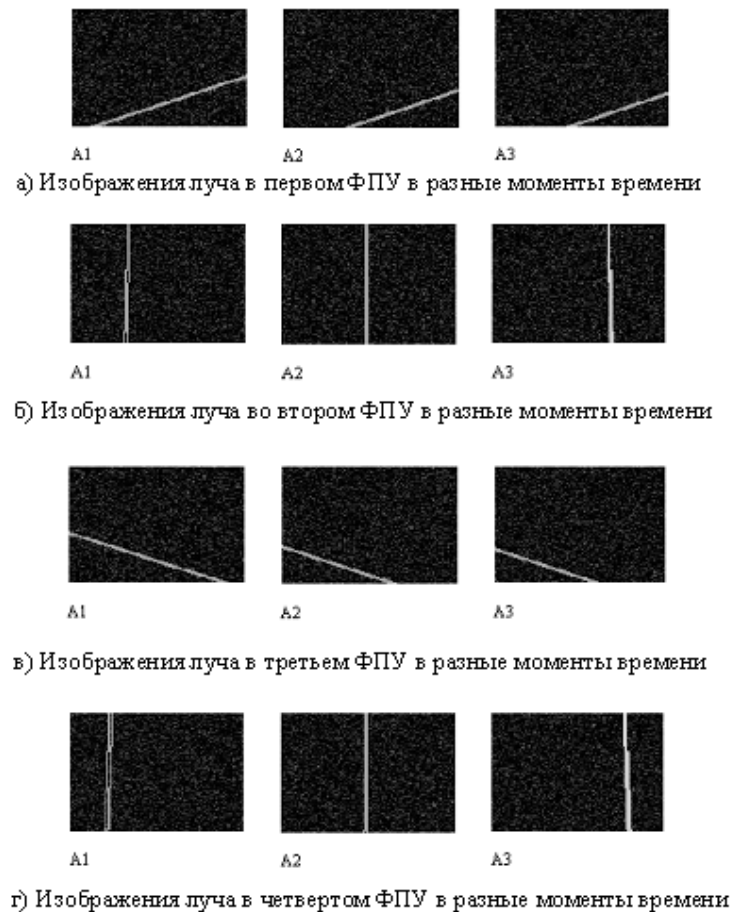


Рисунок 3 – Динамика изменения положения проекции изображения лазерного луча разными ФПУ в разные моменты времени

С защищаемым объектом связана система координат $OXYZ$, а с каждым из четырёх фотоприёмных устройств (i -м ФПУ) – система координат $O_iX_iY_iZ_i$, начало которой совпадает с центром i -го ФПУ, а плоскость $O_iX_iZ_i$ совпадает с плоскостью i -го фотоприёмного устройства.

При сканировании происходит последовательное обнаружение рассеянного атмосферой излучения элементами матричных приёмников и формирование изображения луча в каждом из них. На рис. 3 показана динамика изменения положения проекции изображения лазерного луча как во времени (в каждом из четырёх ФПУ для трёх моментов времени сканирования луча), так и в пространстве (в одном цикле сканирования, но для разных ФПУ, плоскости которых образуют в пространстве боковые грани прямоугольного параллелепипеда).

Каждая ось получаемого изображения будет представлять собой проекцию луча на плоскость $O_iX_iY_i$ одного (i -го) ФПУ, уравнение которой в системе координат $O_iX_iY_i$ в канонической форме может быть записано в виде:

$$\begin{cases} A_i^* X_i + D_i^* = 0; \\ y_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $X_i = \{x_i, y_i, z_i\}^T$ – вектор-столбец координат в системе координат $O_iX_iY_iZ_i$; $A_i^* = \{a_i^*, 0, c_i^*\}$ – вектор-строка коэффициентов; $D_i^* = \{d_i^*\}$ – свободный член.



Уравнения (1) и (2) задают проекцию оси луча лазерного излучения на плоскость $O_i X_i Z_i$ одного (i -го) ФПУ как линию пересечения двух плоскостей:

- плоскости, проходящей через проекцию луча и перпендикулярную плоскости $O_i X_i Z_i$ (уравнение $A_i^* X_i + D_i^* = 0$);
- плоскости $O_i X_i Z_i$ ($Y_i=0$).

Имея уравнения проекций лучей и, соответственно, проходящих через них плоскостей, перпендикулярных плоскостям $O_i X_i Z_i$, можно восстановить положение в пространстве каждого луча в системе координат $OXYZ$. Для этого необходимо совместно решить уравнения, описывающие плоскости, проходящие через проекции луча в каждой паре ФПУ (в i -ом и j -ом ФПУ):

$$\begin{cases} A_i^* X_i + D_i^* = 0; \\ A_j^* X_j + D_j^* = 0, \end{cases} \quad (3)$$

Для решения уравнений (3) необходимо привести их к общей системе координат ($OXYZ$) с помощью преобразования

$$X_i = L_i^{-1}(X - X_{0i}),$$

где $X = \{x, y, z\}^T$ – вектор-столбец координат в системе $OXYZ$;
 $X_{0i} = \{x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}\}^T$ – вектор-столбец координат точки O_i (начало координат системы $O_i X_i Y_i Z_i$) в системе $OXYZ$; L^{-1} матрица, обратная матрице преобразования L при переходе от системы координат $OXYZ$ к системе координат $O_i X_i Y_i Z_i$ (при повороте на углы φ_i (по азимуту) и θ_i (по углу места)).

Матрица преобразования L определяется следующим образом [12]:

$$L_i = \begin{vmatrix} \cos \varphi_i & \sin \varphi_i \cos \theta_i & \sin \varphi_i \sin \theta_i \\ L \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \cos \theta_i & \cos \varphi_i \sin \theta_i \\ 0 & -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{vmatrix},$$

Элементы вектора-столбца X_{0i} определяются выражениями

$$x_{0i} = -r_i \sin \varphi_i; y_{0i} = -r_i \cos \varphi_i; z_{0i} = h_i;$$

Применяя преобразование, получим выражения для левых частей уравнения (3)

$$A_i^* X_i + D_i^* = A_i^* L_i^{-1}(X - X_{0i}) + D_i^* = A_i^* L_i^{-1} X + (D_i^* - A_i^* L_i^{-1} X_{0i}) = P_i X + Q_i, \quad (4)$$

$$\text{где } P_i = A_i^* L_i^{-1}; \quad Q_i = D_i^* - A_i^* L_i^{-1} X_{0i}.$$

Тогда уравнения (3), определяющие положение оси луча лазерного излучения в пространстве по результатам обнаружения рассеянного атмосферой излучения и формирования изображения i -м и j -м ФПУ, с учётом (4) приобретут вид

$$\begin{cases} P_i X + Q_i = 0; \\ P_j X + Q_j = 0. \end{cases} \quad (5)$$



В [12] было показано, что изображения лазерного луча подсвета, формируемые матричными ФПУ, находятся с некоторыми погрешностями. Поэтому прямые, определяемые уравнениями (5) и характеризующие положение оси лазерного излучения в пространстве для различных пар ФПУ, могут в общем случае не совпадать друг с другом. В связи с этим необходимо провести усреднение прямых, получаемых различными парами ФПУ и характеризующих направление на источник лазерного излучения.

Координаты точки пересечения прямой, заданной уравнениями (5), с плоскостью $z = H$ определяются в результате совместного решения уравнений

$$\begin{cases} P_i X + Q_i = 0; \\ P_j X + Q_j = 0; \\ z = H. \end{cases}$$

Таким образом, исходя из изображений луча лазерного излучения, получаемых различными матричными ФПУ (рисунок 3) и записываемых в виде уравнений проекций оси луча на плоскости ФПУ, с помощью полученных выражений может быть определено направление на систему со сканированием подстилающей поверхности лазерным лучом.

Результаты расчёта среднеквадратических ошибок определения положения лазерной системы в пространстве матричными ФПУ по азимуту и углу места приведены на рисунках 4 и 5.

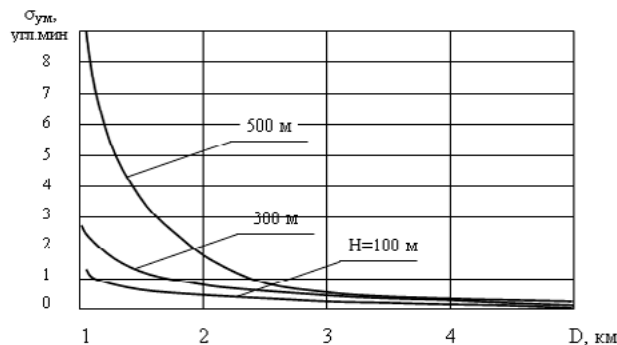


Рисунок 4 – Среднеквадратические ошибки определения положения лазерной системы в пространстве матричными ФПУ по азимуту

Из рисунка 4 и рисунка 5 видно, что при скользящих углах сканирования подстилающей поверхности в районе защищаемого объекта лазерным излучением может быть обеспечено высокоточное (со среднеквадратической ошибкой, не превышающей несколько угловых минут) определение направления на лазерное средство.

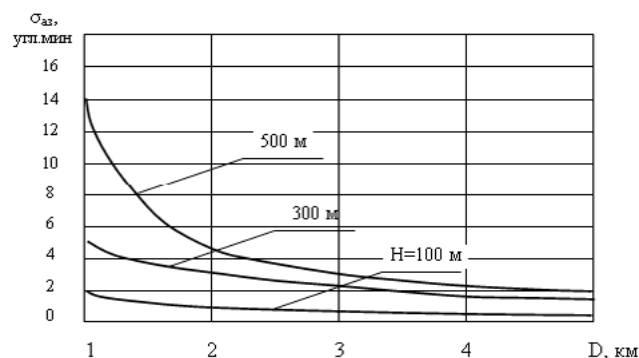


Рис. 5. Среднеквадратические ошибки определения положения лазерной системы в пространстве матричными ФПУ по углу места

Вывод. Предложен способ, позволяющий определять направление на систему со сканированием подстилающей поверхности лазерным лучом с одного малоразмерного мобильного объекта системой матричных фотоприёмников.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов В.И., Гуменюк Г.А., Андрищенко М.С. Неконтактная защита боевой техники / под ред. В.Я. Соколова. СПб.: Реноме, 2009.
2. Капичин И.И. Оптико-электронные углоизмерительные системы. – Киев: Техника, 1986.
3. Аникст Д.А. и др. Высокоточные угловые измерения / под ред. Ю.Г. Якушенкова, – М.: Машиностроение, 1987.
4. Алёшин А. Средства обнаружения лазерного излучения // Зарубежное военное обозрение. – 1995. – № 2. – С.53-57.
5. Утемов С.В., Смагина Т.Ю. Зарубежные приёмные системы предупреждения о лазерном облучении объекта. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – № 11. – С. 91-98.
6. Утемов С.В., Смагина Т.Ю. Построение структуры автоматизированной базы данных оптико-электронных средств. // Труды VIII Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». – Т. 2. – Воронеж, 2008. – С. 330-335.
7. Козирацкий Ю.Л., Козирацкий А.Ю., Шамарин А.В. и др. Определение положения лазерного луча в пространстве по рассеянной составляющей // Радиотехника (журнал в журнале «Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн»). – 2005. – №14. – С.14-18.
8. Козирацкий А.Ю., Козирацкий Ю.Л., Кулешов Е.П., Кусакин А.В., Федукевич З.Б. Определение направлений на одновременно действующие источники оптического излучения по рассеянному в атмосфере зондирующему излучению. // Радиотехника (журнал в журнале «Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн»). – 2007. – № 5. – С. 44-46.
9. Голубев С.В., Дунец В.П., Козирацкий Ю.Л., Шамарин А.В. и др. Способ определения направления на источник оптического излучения по рассеянной в атмосфере составляющей и устройство его реализации. // Патент РФ № 2285275 с приоритетом от 09.03.2005 г.
10. Утемов С.В., Рудый С.Д. Способ определения направления на источник оптического излучения по рассеянной в атмосфере составляющей. // Патент РФ № 2578203 с приоритетом от 21.10.2014 г.
11. Утемов С.В., Шамарин А.В., Потапов В.В. Анализ качества обнаружения рассеянного атмосферой лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм элементом матричного приёмника. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2006. – Т. 2. – №1. – С. 79-82.
12. Утемов С.В., Шамарин А.В., Потапов В.В. Алгоритм пеленгации лазерных систем по рассеянному атмосферой излучению системой матричных фотоприёмников. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2007. – Т. 3. – № 4. – С. 152-158.

REFERENCES

1. Evdokimov V.I., Gumenyuk G.A., Andryushchenko M.S. Non-contact protection of military equipment / Ed. V.Ya. Sokolov. St. Petersburg: Renome, 2009.
2. Kapichin I.I. Optoelectronic angle-measuring systems. - Kiev: Tekhnika, 1986.
3. Anikst D.A. and others. Precision angular measurements, ed. Yakushenkov M.: Mechanical Engineering, 1987.



4. Aleshin A. Means of detection of laser radiation / Foreign military Review 1995.-№ 2- P.53-57.
5. Utemov S.V., Smagina T.Yu. Foreign reception systems warning of laser irradiation of the object. Bulletin of Voronezh State Technical University-2009.-№11-P.91-98.
6. Utemov S.V., Smagina T.Yu. Building a structure automatic database of opto-electronic means. Proceedings of the VIII International scientific and methodical conference "Informatics: problems of methodology, technology".-Т. 2-Voronezh,2008.
7. Koziratskiy Yu.L., Koziratskiy A.Yu., Shamarin A.V., etc. The definition of the situation laser beam in space along the scattered component of Radio Engineering (log in the journal "Information con in the spectrum of the electromagnetic waves"-2005.-No14 P.14-18.
8. Koziratskiy A.Yu., Koziratskiy Yu.L., Kuleshov V.P., Kusakin A.V., Fedukovich Z.B. Definition of direction at the same time operating sources of optical radiation from the probing radiation scattered in the atmosphere. Radio engineering magazine in the journal @Information Conflict in the Spectrum of Electromagnetic radiation from the probing radiation scattered in the atmosphere. Radio engineering magazine in the journal "Information con in the spectrum of the electromagnetic waves"-2007.-No5 P.44-46.
9. Golubev S.V., Dunets V.P., Koziratskiy Yu.L., Shamarin A.V., etc/ The method of determining direction to the source of optical radiation from the component scattered in the atmosphere and the devise its implementation. //Patent of the Russian Federation 62285275 with priority from 09.03.2005.
10. Utemov S.V., Rudyi S.D. Method for determining the direction of the source of optical radiation from the scattered atmosphere component. //Patent of the Russian Federation 2578203 with priority from 21.10.2014.
11. Sremov S.V., Shamarin A.V., Potapov V.V. Analysis of the quality of atmospheric diffusion detection laser radiation at a wavelength of 10.6 μm element of the matrix receiver. The Voronezh Bulletin State Technical University 2006 T.2. No1 P.79-82.
12. The causes of Marinas A.V., Potapov V.V. Algorithm changes of laser systems in the atmosphere scattered by radiation by a matrix system. The Voronezh Bulletin State Technical University 2007 T.3. No4 P.152-158.

© Шамарин А.В., Утёмов С.Н., Шамарин В.А., 2017

Шамарин Александр Вячеславович, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), 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, vaiu@mil.ru

Утёмов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), 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, vaiu@mil.ru

Шамарин Вячеслав Александрович, курсант, 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, vaiu@mil.ru