



# Оптический пеленгатор для автономной посадки космического зонда на малые тела Солнечной системы

А. А. Лобанов<sup>1</sup>, Г. А. Можаров<sup>2</sup>, А. С. Филонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский технологический университет (РТУ-МИРЭА), Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

Предлагается оригинальная конструкция оптического четырехканального пеленгатора с полярной корреляцией. Пеленгатор, входящий в состав многофункционального бортового комплекса космического летательного аппарата, способен значительно повысить точность наведения при посадке на малые тела Солнечной системы, осуществляемую в автономном режиме. Модель пеленгатора создана в тонких компонентах на основе математического моделирования и законов геометрической оптики.

**Ключевые слова:** оптический пеленгатор, космические летательные аппараты, бортовой комплекс навигации и наведения, рассогласование угловых координат цели, спуск и посадка

Статья получена: 24.06.2022

Статья принята: 05.08.2022

Основная задача пеленгатора – распознавание образов для определения рассогласования угловых координат цели. Оптические устройства могут выполнять ряд преобразований пространственной двумерной информации (изображений) быстрее и эффективнее, чем электронные устройства. Это свойство оптических систем в полной мере может быть использовано при навигации и наведении космических летательных аппаратов. Относительная простота конструкции повышает надежность работы устройства и в целом

# Optical Finder for a Space Probe Autonomous Landing on Small Bodies of the Solar System

A. A. Lobanov<sup>1</sup>, G. A. Mozharov<sup>2</sup>, A. S. Filonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Technological University (MIREA), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

The original design of the multichannel optical finder with polar correlation is proposed. The finder considers as a part of the aboard multifunctional system of the space probe. The direction finder is able to significantly improve the accuracy of guidance when landing on small bodies of the solar system, carried out in an autonomous mode. The direction finder model is created in thin components based on mathematical modeling and the laws of geometric optics.

**Keywords:** optical direction finder, spacecraft, space probe, onboard navigation and guidance system, mismatch of target angular coordinates, descent and landing

Received on: 24.06.2022

Accepted on: 05.08.2022

The optical finder allows significantly improve the accuracy of a space probe landing on small bodies in the solar system. The finder considers as a part of the aboard multifunctional system of the space probe. The main purpose of the finder is to determine the angular coordinates of a landing site. The optical processing of the visual information is an essential feature of this finder. Optical processing has a number of significant advantages, and first is the possibility to transform of two-dimensional (visual) information faster and more efficiently than electronic devices can do it. This property is important for navigation and guidance of a space probe.

Mathematical and computer simulation is used to create the model of the optical finder. Calculations of the main parameters of the proposed optical finder are

всего бортового комплекса навигации и наведения в процессе посадки.

Новизна решения заключается в установке во входном зрачке четырехгранной пирамидальной призмы, которая выполняет функцию оптических клиньев, разделяя лучистый поток на четыре части. Изображение, формируемое каждым из клиньев, передается на соответствующий сектор приемного устройства. Это позволяет при сохранении габаритов создать четыре канала передачи информации в одном устройстве. Расчеты показывают, что предлагаемый оптический корреляционный четырехканальный пеленгатор может быть использован в качестве дифференциальной двухкоординатной корреляционно-экстремальной системы навигации и наведения космического летательного аппарата.

## ВВЕДЕНИЕ

Оптическое наведение для посадки космических летательных аппаратов (КЛА) на малые тела Солнечной системы (МТСС) является актуальной научной задачей [1-3]. Для дальнейшего понимания процессов формирования планет и зарождения жизни специалистам необходимо исследовать состав и строение, а также морфологию малых тел Солнечной системы: комет, астероидов, малых лун планет и т.п. Изучение МТСС возможно лишь с помощью КЛА или спускаемых модулей, работающих на поверхности малых тел. Процедура спуска и посадки на малые тела Солнечной системы – это достаточно трудоемкий и ответственный этап миссии. Это показал анализ завершившихся миссий по исследованию малых тел Солнечной системы: NEAR Shoemaker, Stardust и Deep Impact (NASA), Huygens probe и Philae lander (ESA), Hayabusa (JAXA) [4-14].

Точное наведение на малые тела Солнечной системы затрудняет слабое гравитационное поле таких объектов. В условиях малой силы притяжения невозможно в полной мере использовать инерциальные системы навигации КЛА. Увеличение точности и чувствительности инерциальных систем не может обеспечить существенного увеличения точности наведения и посадки КЛА. Причина в том, что МТСС, как правило, имеют сложную форму, например астероид Эрос и комета 67P Чурюмова-Герасименко. В качестве альтернативного подхода для точной навигации, наведения и посадки КЛА предполагается использовать визуальные методы [14,15].

Реализация корреляционно-экстремальных алгоритмов распознавания образов на борту КЛА

executed. Among these the minimal length of the optical system of the finder is determined.

The next advantage of the optical finder construction is an optical wedge that is installed in the input optical channel. This solution allows to separate the spatial (visual) information transmission in one optical finder while of a small size. The calculations show that the multichannel direction finder can be used as a differential two-coordinate system for guidance and landing the space probe.

## INTRODUCTION

The study of small bodies of the solar system (SBSS) is an actual scientific problem [1-3]. First of all, it is necessary to study the morphology and the geology structure of the SBSS. It could be helpful in further understanding of the processes of the formation of the planets and the origin of life on the Earth.

That kind of study of comets, asteroids, small moons of the planets, etc. is possible only with the space probes or descent modules operating on the surface of the SBSS. An analysis of completed missions to study the SBSS shows that the descent and landing on small bodies of the solar system is rather complicate and responsible stage of the mission (e. g. NEAR Shoemaker, Stardust and Deep Impact (NASA), Huygens probe and Philae lander (ESA), as well as Hayabusa (JAXA)) [4-14].

The problem is the low gravity field of small bodies. It is impossible to fully use the inertial navigation system to guide and land a space probe on the SBSS surface under the low gravity conditions. The increasing of the accuracy and sensitivity of the inertial systems will not increase accuracy of the guidance and landing of a space probe. The known SBSS have a complex shape, for example, the asteroid Eros and comet 67P Churyumov-Gerasimenko. The precise visual guiding a space probe is a reasonable option as a method for the guidance and the landing on the surface of the SBSS. As an alternative approach for precise navigation, guidance and landing of the space probe, visual methods are supposed to be used [14,15]. The problem is that the already used correlation-extreme algorithms of pattern recognition cannot be fully implemented for the onboard navigation systems of a space probe. The space probe guidance and landing is completely autonomous. For example, the landing of Philae's lander on the surface of the comet 67P Churyumov-Gerosimenko was carried out at a distance of 500 million kilometers from the Earth. The signal delay between the lander and the Earth was 28 minutes. There is impossible any manual correction in the real time. The onboard computing equipment



вызывает ряд серьезных проблем. Во-первых, вычислительные ресурсы бортовых комплексов КЛА, как правило, уступают аналогичным устройствам наземных аппаратов, что накладывает ограничения на используемые алгоритмы. Во-вторых, процедура наведения и посадки КЛА выполняется полностью автономно, в то время как «наземные» алгоритмы разделяют вычисления между бортовыми и удаленными вычислительными средствами. Заметим, что, например, посадка спускаемого аппарата Филы на поверхность кометы 67P Чурюмова-Герасименко выполнялась на расстоянии 500 миллионов километров от Земли. Такие условия исключают любую возможность ручной коррекции или распределения вычислений в режиме реального времени.

Анализ научной литературы показывает, что разработки систем визуального наведения КЛА для посадки на малые тела Солнечной системы сосредоточены в основном на создании и оптимизации корреляционно-экстремальных алгоритмов пеленгации путем распознавания характерных точек объекта [16, 17]. Такой способ имеет существенное преимущество. Для его реализации не требуется вносить принципиальных структурных изменений в конструкцию КЛА, а в качестве используемого оборудования выступают существующие бортовые фотокамеры и вычислительный комплекс.

Вместе с тем имеется ряд недостатков. Во-первых, это высокая нагрузка на бортовой вычислительный комплекс, требования к которому существенно возрастают. При этом значительная часть вычислительных ресурсов отводится на процесс распознавания образов, в то время как другие процессы обрабатываются по остаточному принципу. Во-вторых, требуется стабильность во времени мелких форм объекта и взаимного расположения характерных ориентирных точек, которые используются в качестве опорных при пеленгации. Наконец, в-третьих, на точность работы алгоритма существенное влияние оказывает освещенность объекта. Изучение кометы 67P Чурюмова-Герасименко в течение нескольких лет аппаратом Розетта показало, что поверхность малого тела может существенно меняться с течением времени [18-20]. В процессе схода с орбиты искусственного спутника МТСС и посадки КЛА освещенность места посадки может меняться. Приведенные соображения показывают, что точность наведения КЛА может снизиться по сравнению с расчетными параметрами.

Существует особый класс устройств – оптические пеленгационные устройства, которые могут осу-

of a space probe is significantly low than devices of ground vehicles. The publications analysis shows that the development of visual guidance systems for the landing on small bodies of the solar system are focused mainly on the creation and the optimization of the correlation-extreme algorithms of the direction finding by recognizing the control points of the object surface [16,17]. The advantage of this method is a usage of standard space probe's equipment. The onboard cameras and the computer system could be used. However, this approach has a number of shortcomings. The first one is a high load the onboard computer system. The pattern recognition process demands significant computational resources. In this case the onboard computer system of the space probe could be overloaded. The limited resources could be used to compute the other processes. The second shortcoming of this approach is a high sensitivity to light conditions and the stability of the object. The relative location and light conditions of the control reference points on the target surface is very important for the accuracy of the pattern recognition process.

A study of the comet 67P Churyumov-Gerasimenko for several years by Rosetta mission showed that the surface of the small body significantly changes over the time [18-20]. The illumination of the landing site may change during the descent of the space probe. All these changes may decrease the accuracy of the guidance and landing of the space probe comparing to the predicted parameters.

There is a special class of devices – optical direction finders, which can provide correlation in the optical range of the spectrum. Such devices have many advantages. They don't need computing resources. They have high noise immunity. They continue to work in conditions of changing light and perspective of the object. To improve the landing accuracy in autonomous mode, it is proposed to use an optical-correlation direction finder as part of the onboard guidance and landing complex. The operating principle of the direction finder is based on the optical processing of spatial two-dimensional information for the constant determination of the angular coordinates of the landing site by pattern recognition [21-25]. This solution will allow us to perform a precise landing without loading the on-board computing complex.

### **DESCRIPTION OF THE DESIGN AND OPERATION OF THE DIRECTION FINDER**

The main part of the direction finder is an optical system. The optical system is designed to create an image of a remote object in the focal plane of the lens. The finder optical system will form and transmit

ществлять корреляцию в оптическом диапазоне спектра. Такие устройства обладают достаточно большим количеством достоинств, главными из которых являются отсутствие необходимости в вычислительных ресурсах, высокая помехозащищенность, в том числе к изменению освещения и перспективным искажениям. Таким образом, для повышения точности посадки в автономном режиме предлагается использовать оптический корреляционный пеленгатор в составе бортового комплекса наведения и посадки.

Принцип действия пеленгатора основан на оптической обработке пространственной двумерной информации для постоянного определения угловых координат места посадки путем распознавания образов [21–25]. Такое решение позволит выполнять точную посадку, не нагружая бортовую вычислительную систему.

## КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПЕЛЕНГАТОРА

Основной частью пеленгатора является оптическая система, предназначенная для создания в фокальной плоскости объектива изображения бесконечно удаленного предмета и формирования регистрируемого приемником излучения лучистого потока, пропорционального площадной корреляции изображения объекта и пропускания эталона.

Авторами предлагается оригинальная схема пеленгатора. Для уменьшения массогабаритных параметров четыре канала пеленгатора создаются при помощи одной четырехгранной призмы-клина, установленного как первый элемент оптической схемы. Оптическая схема такого пеленгатора (рис. 1) состоит из четырехгранной призмы-клина (1), объектива (2), эталона (3), конденсора (4), приемника излучения (5).

Оправа призмы (1) является апертурной диафрагмой (АД) и входным зрачком объектива. Для создания корреляционной картины каждая грань предлагаемой пирамиды представляет собой оптический клин, который отклоняет проходящие через него лучи на угол  $\delta = \theta \cdot (n-1)$ , где  $\theta$  – малый угол при вершине клина,  $n$  – показатель преломления материала клина. Таким образом, лучистый поток, падающий на пирамиду, разделяется на четыре части. Из-за этого в задней фокальной плоскости объектива образуются четыре идентичных изображения удаленного объекта, смещенные относительно оптической оси на одинаковую величину  $y' = \delta \cdot f'_{об}$ , где  $f'_{об}$  – заднее фокусное расстояние объектива.

В фокальной плоскости объектива (2) установлен эталон – изображение места посадки КЛА на про-

a radiation flux to the radiation receiver proportional to the area correlation of the object image and the transmission of the standard.

The optical scheme of the direction finder is presented in figure 1. The scheme allows to form a two-coordinate direction finding characteristic.

The optical scheme consists of a four optical wedges (better say a four-sided pyramidal prism) (1), a lens (2), an optical transparency standard (3), a condenser (lens Fabry-Perot) (4) and a four-sector radiation receiver (5).

The peak of the four-sided pyramidal prism is centered on the optical axis of the system. The rim of the pyramidal prism is the aperture diaphragm (AD) of the optical system and is the entrance pupil of the lens (2). Each face of the pyramidal prism is an optical wedge that deflects the rays passing through it by an angle  $\delta = \theta \cdot (n-1)$ , where  $\theta$  is a small angle at the top of the wedge,  $n$  – is the refractive index of the wedge material. The wedge divides the radiant flux into the specific channel. As a result, several (e.g. four) identical images of the distant object are formed in the rear focal plane of the lens (2), shifted relative to the optical axis by the same value  $y' = \delta \cdot f'_1$ , where  $f'_1$  – is the rear focal length of the lens. An optical transparency standard (3) is mounted at the focal plane of the lens (2). The optical transparency standard (OTS) is an image of the target object printed on an optical transparency film. The OTS rim is the field diaphragm (FD) of the collective lens (4).

The lens Fabry-Perot is used for saving light energy (4). This lens collects the all rays passed through the entrance pupil and guide them on the

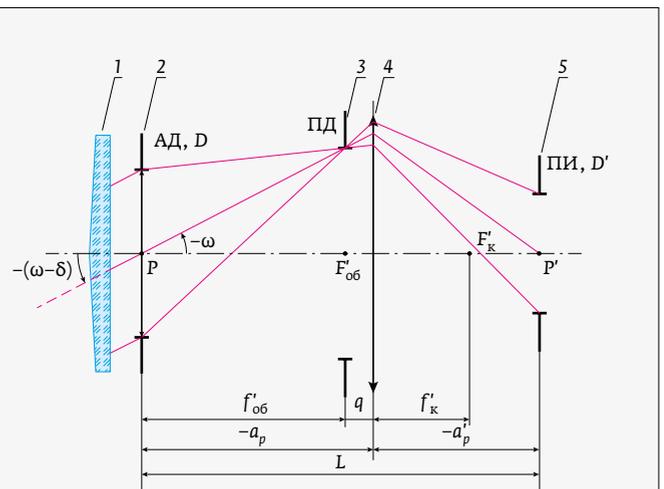


Рис. 1. Оптическая схема пеленгатора

Fig. 1. Optical scheme of the direction finder



зрачной подложке (3). Оправа эталона выполняет функцию полевой диафрагмы (ПД) объектива.

Во избежание потерь световой энергии необходимо собрать на приемнике излучения все лучи, прошедшие через входной зрачок объектива. Для этого за эталоном (3) установлен конденсор (4), который передает выходной зрачок объектива (2) в плоскость чувствительной площадки приемника излучения (5).

Конденсор проектирует выходной зрачок объектива в плоскость чувствительной площадки приемника излучения. В качестве приемника может быть использован, например, четырехсекторный фотодиод. Оптическая схема юстируется так, чтобы изображение каждой грани четырехгранной пирамиды совпадало с соответствующей чувствительной площадкой приемника излучения. Достигается это за счет того, что входной зрачок и фотоприемник находятся во взаимно сопряженных плоскостях конденсора. В такой схеме луч, прошедший через одну из граней призмы-клина (1), попадает только на соответствующий ему сектор фотоприемника. Это позволяет выполнять отдельный корреляционный анализ для каждого из каналов смещенного изображения с единым эталоном. Описываемое решение позволит рассматривать предлагаемый авторами оптический коррелятор как совокупность четырех самостоятельных корреляторов, что в свою очередь уменьшает габариты и размеры пеленгационной системы. При этом разность тока с противоположных секторов фотоприемника будет сигналом углового рассогласования.

Таким образом, выходной зрачок оптической системы пеленгатора совпадает с оправой приемника излучения. Кроме того, конденсор собирает на приемнике излучения прошедший через эталон лучистый поток, который пропорционален площадной корреляции изображения объекта и пропускания эталона.

Лучи, проходящие через одну определенную грань призмы-клина (1), должны попадать только на одну соответствующую этой грани площадку приемника излучения. В этом случае оптическая система пеленгатора будет состоять из четырех независимых каналов. Кроме того, необходимо, чтобы освещенность выходного зрачка пеленгатора по всей его площади была равномерной [26]. Для выполнения этого условия в оптической системе пеленгатора должно отсутствовать виньетирование.

Рассмотрим работу одного из каналов для одной длины волны. Пусть освещенность поверхности

radiation receiver. The collective lens should be installed behind the OTS (3), which transmits the exit pupil of the lens (2) to the plane of the sensitive area of the radiation receiver (5).

The collective lens projects the exit pupil of the lens (2) into the plane of the sensitive area of the radiation receiver (5). A four-sector photodiode is proposed to use a radiation receiver. The optical scheme is adjusted so that the image of each face of the prism deflects rays to the corresponding sensitive area of the radiation receiver. The entrance pupil of the lens (2) and the radiation receiver (5) are mounted in the mutually conjugated planes of the lens Fabry-Perot. In this case, the beam passing through one of the faces of the pyramidal prism (optical wedge) falls only on the corresponding sector of the photodetector. The scheme allows to separate correlation analysis for each channel with one common OTS. In this case, the optical correlator can be considered as a set of four independent correlators arranged in a special way relative to each other. The current difference in electric signal from the opposite sectors of the photodiode could be used as the control signal for the angular misalignment. This solution allows to arrange the analog optical processing compact, lightweight and precise the direction finder.

Let's consider the features of this solution more carefully. The exit pupil of the optical system of the direction finder coincides with the frame of the radiation receiver. The lens Fabry-Perot collects all the radiation flux on the radiation receiver only in the case when the radiation transmitted through the OTS is proportional to the area corresponding to the image of an object and the transmission of the OTS.

A silicon photodiode is proposed to use as a radiation receiver (5). The silicon photodiode consists of four sensitive areas having the shape of a circle sector. The rays passing through the one face of the pyramidal prism (1) should reach only the corresponding area of the radiation receiver. The illumination of the exit pupil of the direction finder should be aligned. The execution this condition allows reduce the sensitivity variation of the radiation receiver (5). It is necessary to exclude the vignetting in the optical system of the direction finder to execute this condition [26].

For more understanding let's consider the operation in the channel for the single wavelength. Suggest that an intensity on the surface of the object is  $E_0$ . Then divide the surface of the object into elementary sites  $dA = dx \cdot dy$  with a constant reflection coefficient  $\rho_0(x, y)$ . Then it is possible to calculate the magnitude of the radiation flux incident on the entrance pupil of the system from an uniformly illuminated elementary

объекта будет  $E_0$ . Разобьем поверхность объекта на элементарные площадки  $dA = dx \cdot dy$  с постоянным коэффициентом отражения  $\rho_0(x, y)$ . Величина потока излучения, приходящего на входной зрачок системы от равномерно освещенной элементарной площадки  $dA$ , лежащей на оптической оси, составит [27]:

$$d\Phi = \tau_{\text{атм}} \cdot E_0 r(x, y) \cos i \cdot \sin^2 \sigma_A dx dy, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{атм}}$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $i$  – угол между нормалью к площадке и главным лучом, идущим из центра площадки  $dA$  через центр входного зрачка пеленгатора;  $\sigma_A$  – апертурный угол в пространстве предметов.

Если принять, что для удаленного объекта  $\sin \sigma_A = \frac{D}{2p}$ , где  $D$  – диаметр входного зрачка объектива, а  $p$  – расстояние от входного зрачка до плоскости предмета, а также учитывая, что в плоскости изображения объектива площадка  $dA$  переходит в элемент  $dA' = dx' dy' = dx dy \beta^2 \cos i$ , где  $\beta$  – линейное увеличение объектива. Можно выполнить преобразования и представить формулу (1) в следующем виде:

$$d\Phi = \tau_2 \iint_{A_3} d\Phi_3 = \frac{1}{16} \tau_0 \left( \frac{D}{f'} \right)^2 E_0 \iint_{A_3} \rho_0 \left( \frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta} \right) \tau_3(x', y') dx' dy', \quad (2)$$

где  $\tau_1$  – коэффициент пропускания клина и объектива,  $\tau_2$  – коэффициент пропускания конденсора,  $\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2$  – коэффициент пропускания оптической системы коррелятора,  $A_3$  – площадь эталона, по которой ведется интегрирование. Формула 2 также учитывает ослабления потока эталона. Если элементарные площадки эталона  $dA'$ , соответствующие элементарным площадкам изображения объекта, имеют коэффициент пропускания  $\tau_3(x', y')$ .

Таким образом, предлагаемое решение позволяет вычислить корреляционный интеграл с точностью до постоянного множителя. Для полного использования лучистого потока, прошедшего через объектив, конденсор должен передавать изображение выходного зрачка объектива в плоскость чувствительной площадки приемника излучения.

Считая, что апертурная диафрагма совпадает с объективом (рис. 1), и используя формулу Гаусса, отнесенную к зрачкам, получим:

$$\frac{1}{a_{p'}} - \frac{1}{a_p} = \frac{1}{f'_c}, \quad (3)$$

где  $f'_c$  – заднее фокусное расстояние конденсора.

area  $dA$ , which lies on the optical axis using next equation [27]:

$$d\Phi = \tau_{\text{atm}} \cdot E_0 r(x, y) \cos i \cdot \sin^2 \sigma_A dx dy, \quad (1)$$

where  $i$  – is an angle between the normal to the site and the main beam coming from the center of the elementary area  $dA$  through the center of the entrance pupil of the direction finder;  $\sigma_A$  is an aperture angle in the space of the objects.

For a remote object, we can assume that  $\sin \sigma_A = \frac{D}{2p}$ , where  $D$  is the diameter of the entrance pupil of the lens;  $p$  is a distance from the entrance pupil to the plane of the object.

In the image plane of the lens  $dA$  platform goes into the element  $dA' = dx' dy' = dx dy \beta^2 \cos i$ , where  $\beta$  is a linear magnification of the lens.

The radiant flux passing through one face of the pyramid and the lens will be:

$$d\Phi = \tau_2 \iint_{A_{\text{OTS}}} d\Phi_3 = \frac{1}{16} \tau_0 \left( \frac{D}{f'} \right)^2 E_0 \iint_{A_{\text{OTS}}} \rho_0 \left( \frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta} \right) \tau_{\text{OTS}}(x', y') dx' dy', \quad (2)$$

where  $\tau_1$  is a transmission coefficient of the wedge and lens,  $\tau_2$  is a transmission coefficient of the lens Fabry-Perot,  $\tau_3$  is a transmission coefficient of the direction finder optical system, the  $A_{\text{OTS}}$  is the area of the whole OTS is used for integration in (4).

The solution allows us to calculate the correlation integral up to a constant factor. The condenser will transmit the image of the exit pupil of the lens to the plane of the sensitive area of the radiation receiver. Under this condition it is possible to use the full radiant flux passing through the lens of the direction finder. If the aperture diaphragm coincides with the lens (figure 1), we can use the Gauss formula related to the pupils and obtain as follows:

$$\frac{1}{a_{p'}} - \frac{1}{a_p} = \frac{1}{f'_c}, \quad (3)$$

where  $f'_c$  is the back focal length of the lens Fabry-Perot.

The diameter of the sensitive area of the radiation receiver  $D_{\text{RR}}$  should be equal to the diameter of the exit pupil of the lens Fabry-Perot, in this case the optical magnification in the pupils should be equal and we can obtain as follows:

$$\beta_p = \frac{D'_{p'}}{D'} = \frac{D_{\text{RR}}}{D_{\text{AD}}} = \frac{a'_{p'}}{a_p}, \quad (4)$$

where  $D_{\text{AD}}$  is the diameter of the aperture diaphragm of the lens.

Диаметр чувствительной площадки приемника излучения ( $D_{\text{пр}}$ ) должен быть равен диаметру выходного зрачка системы «объектив-конденсор», поэтому увеличение в зрачках составит:

$$\beta_p = \frac{D'_{\text{пр}}}{D'} = \frac{D_{\text{пр}}}{D_{\text{Ад}}} = \frac{a'_{\text{пр}}}{a_p}, \quad (4)$$

где  $D_{\text{Ад}}$  – диаметр апертурной диафрагмы.

Решая совместно уравнения (2) и (3), получим:

$$a_p = \frac{1-\beta_p}{\beta_p} f'_k, \quad a'_{\text{пр}} = (1-\beta_p) f'_k. \quad (5)$$

Длина системы, без призмы, составит:

$$L = a'_{\text{пр}} - a_p = \frac{-(1-\beta_p)^2}{\beta_p} f'_k. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при  $\beta_p = -1$  оптическая система имеет минимальную длину, равную  $L_{\text{min}} = 4f'_k$ , при этом диаметр апертурной диафрагмы равен диаметру чувствительной площадки приемника излучения ( $D_{\text{Ад}} = D_{\text{пр}}$ ) и  $a'_{\text{пр}} = -a_p = 2f'_k$ .

Согласно выражению (1) среднее значение лучистого потока, попадающего на одну чувствительную площадку приемника излучения, будет:

$$\Phi_{\text{пр}} = \frac{\pi}{64} \tau_0 E_0 \bar{\rho}_0 \bar{\tau}_3 \left( \frac{D}{f'_{\text{ос}}} \right)^2 D_3^2, \quad (7)$$

где  $\bar{\rho}_0$  – среднее значение коэффициента отражения поверхности объекта,  $\bar{\tau}_3$  – среднее значение коэффициента пропускания эталона,  $D_3$  – диаметр эталона.

Из рис. 1 с учетом (4) и (5) получим:

$$f'_{\text{ос}} = -a_p - q = \frac{\beta_p - 1}{\beta_p} f'_k - q, \quad D = \frac{D_{\text{пр}}}{\beta_p}, \quad (8)$$

где  $q$  – расстояние от эталона до конденсора.

Выполнив ряд рассуждений и преобразований, который опущены в силу необходимости ограничить объем статьи, можно получить, что полевой угол  $\omega$  оптической системы пеленгатора при условии ( $q \ll f'_k$ ) можно вычислить по формуле:

$$\text{tg } \omega = \frac{D_3}{2f'_{\text{ос}}} = \frac{D_3}{-2a_p} = \frac{D_3 \beta_p}{2f'_k (\beta_p - 1)}. \quad (9)$$

Предельным значением относительного отверстия конденсора можно считать  $\frac{D_{\text{э}}}{f'_k} = \frac{1}{1}$ , при этом величина  $\omega_{\text{min}} = 14^\circ$ , а угловое поле системы  $2\omega = 28^\circ$ .

На рис. 2 представлены графики зависимостей относительных значений (по сравнению с минимальными) длины оптической системы  $L(\beta_p) = L/L_{\text{min}}$ , прошедшего потока излучения  $\Phi(\beta_p) = \Phi_{\text{пр}}/\Phi_{\text{пр}}^{(L_{\text{min}})}$  и углового поля зрения

If we solve the equations (2) and (3) together we can obtain the follow expression:

$$a_p = \frac{1-\beta_p}{\beta_p} f'_c, \quad a'_{\text{пр}} = (1-\beta_p) f'_c. \quad (5)$$

The length of the optical system of the direction finder without prism could be calculated, using the follow expression:

$$L = a'_{\text{пр}} - a_p = \frac{-(1-\beta_p)^2}{\beta_p} f'_c. \quad (6)$$

The direction finder optical system has a minimum length under the condition  $\beta_p = -1$  in the equation (6). If optical system length is equal  $L_{\text{min}} = 4f'_c$ . In this case the diameter of the aperture diaphragm is equal to the diameter of the sensitive area of the radiation receiver ( $D_{\text{Ад}} = D_{\text{RR}}$ ) and  $a'_{\text{пр}} = -a_p = 2f'_c$ .

If the direction finder is a minimal length, we can obtain the average value of the radiant flux incident on an elementary area of the radiation receiver:

$$\Phi_{\text{RR}}^{(L_{\text{min}})} = \frac{\pi}{64} \tau_0 E_0 \bar{\rho}_0 \bar{\tau}_{\text{OTS}} D_{\text{OTS}}^2 \left( \frac{D_{\text{RR}}}{f'_{\text{le}}} \right)^2, \quad (7)$$

where  $\bar{\rho}_0$  is the average value of the reflection coefficient of the surface object,  $\bar{\tau}_3$  is the average value of the standard transmittance,  $D_{\text{OTS}}$  is the diameter of the standard.

From Fig. 1, taking into account (4) and (5), we obtain:

$$f'_{\text{le}} = -a_p - q = \frac{\beta_p - 1}{\beta_p} f'_c - q, \quad D = \frac{D_r}{\beta_p}, \quad (8)$$

where  $D_r$  is the diameter of the receiver. After a series of arguments and transformations, which we omit due to the need to limit the volume of the article, it can be obtained that the tangent of the field angle  $\omega$  of the optical system of the direction finder under the condition ( $q \ll f'_c$ ) can be calculated by the formula:

$$\text{tg } \omega = \frac{D_{\text{OTS}}}{2f'_c} = \frac{D_{\text{OTS}}}{-2a_p} = \frac{\beta_p D_{\text{OTS}}}{2f'_c (\beta_p - 1)}. \quad (9)$$

If the ultimate value of the lens Fabry-Perot relative aperture in the optical system is  $\frac{D_{\text{OTS}}}{f'_c} = \frac{1}{1}$ . It's possible to obtain field angle of the system.

Figure 2 shows the dependences of the relative values (relative to the minimum) of the optical system length  $L(\beta_p) = L/L_{\text{min}}$ , the transmitted radiation flux  $\Phi(\beta_p) = \Phi_r/\Phi_r^{(L_{\text{min}})}$ , and the angular field of view  $\omega(\beta_p) = \text{tg } \omega/\text{tg } \omega_{\text{min}}$  per linear pupil magnification  $\beta_p$ , where  $\omega_{\text{min}}$  is the field of view angle of the optical system at the minimum length of the direction

$\omega(\beta_p) = \text{tg} \omega / \text{tg} \omega_{\min}$  от линейного увеличения в зрчках  $\beta_p$ , где  $\omega_{\min}$  – полевой угол оптической системы при минимальной длине пеленгатора ( $\text{tg} \omega \frac{D_{\text{э}}}{2f'_{\text{к, min}}}$ ).

Под линейным увеличением в зрчках понимается отношение диаметра выходного зрчка к диаметру входного зрчка. Анализ этих функций показывает, что для увеличения лучистого потока необходимо уменьшать по абсолютному значению величину  $\beta_p$ , – отношение размера изображения к размеру предмета, при этом будет увеличиваться длина пеленгатора и уменьшаться его угловое поле  $2\omega$ .

Рассмотренная оптическая схема пеленгатора является упрощенной, так как в реальной оптической системе четырехгранная призма, а следовательно, и входной зрчок коррелятора будут расположены на некотором расстоянии от передней главной плоскости объектива. Однако выполненные расчеты, сделанные на основе приближенной математической модели, весьма убедительно показывают, что предлагаемый оптический корреляционный четырехканальный пеленгатор может быть использован в качестве экстремальной системы дифференциального типа, позволяющей сформировать двухкоординатную пеленгационную характеристику.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения точности посадки КЛА на поверхность малых тел Солнечной системы, на взгляд авторов, целесообразно использовать отдельный специальный бортовой комплекс навигации и наведения КЛА. В настоящей статье предложен возможный вариант практической реализации дифференциального корреляционно-экстремального устройства наведения и навигации космического летательного аппарата, входящего в состав такого комплекса. В отличие от ресурсоемких систем с корреляцией в электронном тракте предлагаемое в данной статье устройство с корреляцией в оптическом тракте предъявляет минимальные требования к вычислительным ресурсам, что особенно ценно при реализации бортового комплекса навигации и наведения КЛА. Кроме того, оптический корреляционный пеленгатор способен выполнять вычисления с очень высокой скоростью, при этом непосредственно обрабатывается двумерная пространственная информация без дополнительных преобразований. Устройство обладает высокой надежностью, простотой и относительной компактностью.

В работе предложена оригинальная конструкция пеленгатора, в котором с помощью оригиналь-

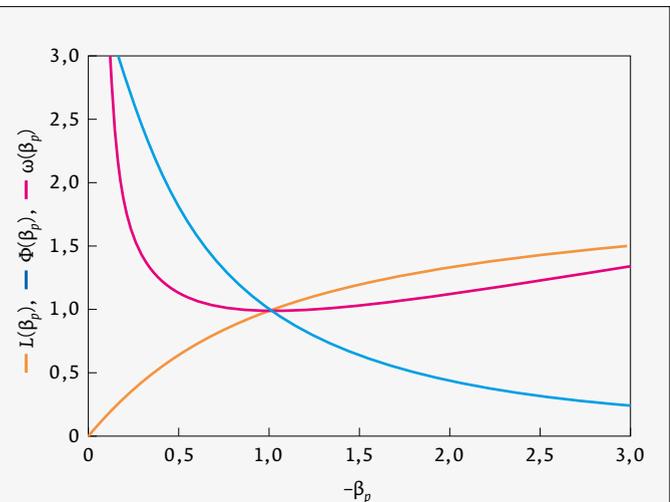
finder ( $\text{tg} \omega \frac{D_{\text{OTS}}}{2f'_{\text{к, min}}}$ ). Linear pupil magnification refers to the ratio of exit pupil diameter to entrance pupil diameter.

The analysis of these functions shows that in order to increase the radiant flux, it is necessary to reduce the absolute value of the value  $\beta_p$ , – the ratio of the image size to the size of the object, while the length of the direction finder will increase, and its angular field  $2\omega$  will decrease.

The considered optical scheme of the direction finder is simplified. However, the calculations presented in the paper show the possibility to form a correlation coordinate-defining characteristic. Thus, the proposed four-channel optical correlation direction finder can be used as a correlation extremal system of a differential type.

## DISCUSSION OF THE RESULTS

The considered model of the optical direction finder is simplified. The real optical system will have the entrance pupil located at some distance from the front main plane of the lens because of the mounted four-sided pyramidal prism. However, the calculations show that the proposed four-channel direction finder can be used as an extreme-



**Рис. 2.** Зависимости относительных значений длины оптической системы, прошедшего потока излучения и углового поля от линейного увеличения в зрчках оптической системы пеленгатора

**Fig. 2.** Dependences of the relative values of the length of the optical system, the past radiation flux and the angular field on the linear increase in the pupils of the optical system of the direction finder



ной призмы-клина создаются четыре независимых канала, что необходимо для создания пеленгационной характеристики и использования данного устройства в качестве системы наведения на точку посадки КЛА. Выполнен расчет теоретических значений параметров устройства. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования опытного образца оптического корреляционного четырехканального пеленгатора.

## REFERENCES

1. **Bhaskaran S., Mastrodomos N., Riedel J. E., Synnott S. P.** Optical Navigation for the STARDUST Wild 2 Encounter. 18<sup>th</sup> *International Symposium on Space Flight Dynamics*, ser. ESA Special Publication. 2004; 548: 455.
2. **Cocaud C., Kubota T.** Autonomous navigation near asteroids based on visual SLAM. *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Symposium on Space Flight Dynamics*. Pasadena. California. 2012.
3. **Kulumani S., Takami K., Lee T.** Geometric control for autonomous landing on asteroid Itokawa using visual localization. *Proceedings of the AAS Astrodynamics Specialist Conference Stevenson*. WA. 2017.
4. **Veverka J. et al.** The landing of the NEAR-Shoemaker spacecraft on asteroid 433 Eros. *Nature*. 2001;413: 390–393.
5. **Nelson R. L. et al.** 433 Eros landing – development of NEAR Shoemaker’s controlled descent sequence. *Proceedings of 15th Annual AIAA / USU Conference on Small Satellites*. 2001; SSC 01–11.
6. **Robert W. F., David W. D., James V. M.** NEAR Shoemaker at Eros: rendezvous, orbital operations, and a soft landing. *Proceedings of AAS Astrodynamics Specialists*.
7. **Antreasian P. G. et al.** Preliminary considerations for NEAR’s low-altitude passes and landing operations at 433 Eros. *Proceedings of AIAA / AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*. 1998; AIAA Paper 98–4397.
8. **Hajime Y. et al.** Touchdown of the Hayabusa spacecraft at the Muses Sea on Itokawa. *Science*. 2006; 312: 1350–1353.
9. **Kubota T. et al.** An autonomous navigation and guidance system for MUSES-C asteroid landing. *Acta Astronautica*. 2003; 52(2–6): 125–131.
10. **Yano H. et al.** Touch-down of the Hayabusa spacecraft at the Muses Sea on Itokawa. *Science*. 2006;312: 1350–1353.
11. **Broschart S. B., Scheeres D. J.** Control of hovering spacecraft near small bodies: application to asteroid 25143 Itokawa. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2005;28(2): 343–354.
12. **Ferri P.** Mission operations for the new Rosetta. *Acta Astronautica*. 2006; 58(2): 105–111.
13. **Ulameca S.** Rosetta Lander–Philae: implications of an alternative mission. *Acta Astronautica*. 2006;(8): 435–441.
14. **Miso T., Hashimoto T., Ninomiya K.** Optical guidance for autonomous landing of spacecraft. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1999; 35(2):459–473. ISSN: 0018–9251. DOI: 10.1109/7.766929.
15. **Cheng Y., Johnson A., Matthies L.** MER-DIMES: a planetary landing application of computer vision. *IEEE Comp. Soc. Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego. USA. 2005.
16. **Johnson A., Ansar A., Matthies L., Trawny N., Mourikis A. I., Roumeliotis S. I.** A General Approach to Terrain Relative Navigation for Planetary Landing. *AIAA Infotech at Aerospace Conference*. Rohnert Park USA. 2007.
17. **Cocaud C., Kubota T.** «SLAM visual landmark 3D mapping system for autonomous navigation and landing on small celestial bodies», 35<sup>th</sup> Annual American Astronomical Society (AAS) – Guidance and Control Conference, Breckenridge, USA, 2012
18. **Before and after: unique changes spotted on Rosetta’s comet** сайт. URL: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Rosetta/Before\\_and\\_after\\_unique\\_changes\\_spotted\\_on\\_Rosetta\\_s\\_comet](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Before_and_after_unique_changes_spotted_on_Rosetta_s_comet).
19. URL: [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/03/Comet\\_changes](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/03/Comet_changes).
20. **Collapsing cliff reveals comet’s interior**. URL: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Rosetta/Collapsing\\_cliff\\_reveals\\_comet\\_s\\_interior](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Collapsing_cliff_reveals_comet_s_interior).
21. **Prenton K.** *Kogerentnye opticheskie vychislitel’nye mashiny*. – М.: Mir. 1974. 399 p. (In Russ.)  
**Пренстон К.** *Когерентные оптические вычислительные машины*. – М.: Мир. 1974. 399 с.
22. **Venikov G. V.** *Opticheskie vychislitel’nye sistemy*. – М.: Znaniye. 1976. 64p. (In Russ.)  
**Веников Г. В.** *Оптические вычислительные системы*. – М.: Знание. 1976. 64 с.
23. **Akaev A. A., Majorov S. A.** *Opticheskie metody obrabotki informacii*. – М.: Vysshaya

correlation system for autonomous guiding and landing a space probe at the small bodies of the solar system. The four-sided pyramidal prism allows to create the two-coordinate differential type direction finder. The analog computing principle is the essential advantage of the optical direction finder. The direction finder doesn’t load the onboard computer system in the spatial data process. The analog processing of the visual information improves the accuracy of the targeting. The optical direction finder allows to separate the navigation from other onboard processes, it helps to decrease the load of the onboard computer.

The possible variant of practical realization of the direction finder for the guidance and landing the space probe is offered. The proposed model of the direction finder has the necessary properties for autonomous guiding the space probe. The proposed model is highly resistant to noise, changing the light conditions and the shape of the SBSS. The guidance in the systems is carried out in the local coordinate system by comparison current view with the standard image.

At the moment the most of the spacecraft navigation systems use the onboard computer. The solution with an electronic correlation principle demands the powerful onboard computer equipment. The direction finder with the optical correlation principle imposes minimal requirements for the onboard computing resources.

The optical correlation-extreme systems for the onboard navigation and guidance system have a number of other advantages. Optical correlation devices are able to perform calculations very fast. Optical correlation-extreme systems process two-dimensional spatial information without additional transformations. The optical navigation and landing system is rather simple comparing to electronic ones. The simplicity of the construction increases the reliability of the system and the whole process of the landing. Compact size and rather small number of the mechanical parts allow to construct the light weight and compact optical direction finder.

## CONCLUSION

We propose the design of the direction finder with four independent channels. This device is using the original wedge prism, which is necessary to create a direction-finding characteristic as a guidance system for the landing point of the space probe. The theoretical values of the device parameters are calculated. The direction finder doesn’t load the onboard computer

24-27.10.2022

# ТЕХНОФОРУМ



МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



[www.technoforum-expo.ru](http://www.technoforum-expo.ru)

«Оборудование  
и технологии  
обработки  
конструкционных  
материалов»

Россия, Москва,  
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



12+

ЭКСПОЦЕНТР



- shkola 1988. 237 p. (In Russ.)  
Акаев А. А., Майоров С. А. *Оптические методы обработки информации*. – М.: Высшая школа 1988. 237 с.
24. Kejsesent D. *Opticheskaya obrabotka informaciiyu*. – М.: Mir. 1980. 237 p. (In Russ.)  
Кейсесент Д. *Оптическая обработка информации*. – М.: Мир. 1980. 237 с.
25. Zverev V. A., Orlov V. F. *Opticheskie analizatory*. – М.: Sovetskoe radio. 1971. 240 p. (In Russ.)  
Зверев В. А., Орлов В. Ф. *Оптические анализаторы*. – М.: Советское радио. 1971. 240 с.
26. Beloglazov I. N., Tarasenko V. P. *Korreljacionno-ekstremal'nye sistemy*. – М.: Sovetskoe radio. 1974. 392 p. (In Russ.)  
Белоглазов И. Н., Тарасенко В. П. *Корреляционно-экстремальные системы*. – М.: Советское радио. 1974. 392 с.
27. Soroko L. M. *Osnovy golografi i kogerentnoj optiki*. – М.: Nauka. 1971. 616 p. (In Russ.)  
Сороко Л. М. *Основы голографии и когерентной оптики*. – М.: Наука. 1971. 616 с.

## АВТОРЫ

- Лобанов А. А., к. т. н., доц., Российский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия.  
ORCID: 0000-0003-2690-5660
- Можаров Г. А., д. т. н., профессор, Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия.
- Филонов А. С., к. т. н., заведующий каф прикладной оптики, Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия.

system in the spatial data process, because the analog computing principle is the essential advantage of the optical direction finder. The optical direction finder allows separating the navigation from other onboard processes, it helps to decrease the load on the onboard computer. So the analog processing of the visual information improves the accuracy of the targeting.

The results obtained can be used to design a prototype of the optical correlation four-channel direction finder.

## AUTHORS

- Lobanov A. A., Cand. of Sciences (Tech), Associate Professor, Russian Technological University (MIREA), Moscow, Russia.  
ORCID: 0000-0003-2690-5660
- Mozharov G. A., Dr. of Sciences (Tech), Professor, Department of Applied Optics, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia.
- Filonov A. S., Cand. of Sciences (Tech), Head of the Department of Applied Optics, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia.

## Международная конференция по передовым лазерным технологиям ALT'22

11–16 сентября 2022 года в Москве в здании Российской академии наук пройдет 29-я Международная конференция по передовым лазерным технологиям ALT'22 (Advanced Laser Technologies).

Следуя многолетним традициям, конференции ALT'22 объединит доклады, посвященные фундаментальным и прикладным аспектам инновационных лазерных технологий, а также их научному и высокотехнологичному промышленному применению. Фундаментальные темы включают взаимодействие лазера с веществом, фотонику, нелинейную оптику, плазмонику, физическую оптику и т. д. Прикладные темы включают лазерную обработку материалов, поверхностную запись и объемную модификацию и функционализацию, мощные лазеры и лазеры с высокой частотой повторения, биомедицинские лазерные приложения, оптические материалы и т. д.

Официальные языки конференции – английский /русский. Конференция пройдет в очном формате (в исключительных случаях возможно онлайн-участие).

Организаторы конференции: Институт общей физики им. А. М. Прохорова

Российской академии наук, Отделение физических наук Российской академии наук, Институт спектроскопии Российской академии наук, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский ядерный уни-

верситет МИФИ, Центр лазерной технологии и материаловедения. Председатель конференции: научный руководитель Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН академик РАН И. А. Щербаков.

<https://altconference.org/alt22>





[www.prombvk.ru](http://www.prombvk.ru)

# РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

## 16-18 ноября 2022

Специализированные выставки

- Машиностроение
- Металлообработка
- Инновационный потенциал Уфы

**ВДНХ** **ЭКСПО** УФА



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ЭНЕРГЕТИКИ  
И ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



АДМИНИСТРАЦИЯ  
ГОРОДСКОГО ОКРУГА г. УФА РБ



БАШКИРСКАЯ  
ВЫСТАВОЧНАЯ  
КОМПАНИЯ



ОРГКОМИТЕТ: +7 (347) 246 41 80, 246 42 37  
[promexpo@bvkexpo.ru](mailto:promexpo@bvkexpo.ru)



Мероприятия проводятся с учетом всех  
требований Роспотребнадзора