

15. SPDT Non-reflective Switch HMC284MS86/HMC284MS86 Hittite Microwave Corporation, pp. 166-171.
16. Mylov G.V. Pечатnye platy. Vybor bazovykh materialov [Printed circuit boards. Choice of base materials]. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2015, 176 p.
17. Soedinitel'nye radiochastotnye koaksial'nye SK-9. TU6313-006-38970729-11. Tekhnicheskie usloviya [Connecting radio-frequency coaxial SK-9. TU6313-006-38970729-11. Specifications], 40 p.
18. Zikiy A.N., Zlaman P.N., Gorbatenko O.A. Eksperimental'noe issledovanie stupenchatogo attenuatora [Experimental study of a step attenuator], *Mater. I Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Infokommunikatsii i informatsionnaya bezopasnost': sostoyaniya, problemy i puti resheniya». Kursk, 24-26 aprelya 2014* [Proceedings of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference "Infocommunications and Information Security: States, Problems and Solutions". Kursk, April 24-26, 2014].
19. Mikroskhemy 1887BE / 1887BE4Y / Tekhnicheskie usloviya AEYAR.431280.537TU [Micro-circuits 1887BE / 1887BE4Y / Specifications AEYAR.431280.537TU].
20. Mikroskhema 1887VE4U. Tekhnicheskoe opisanie KFDL.431295.039TS [Chip 1887BE4U. Technical description KFDL.431295.039TS].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

**Беляев Денис Владимирович** – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: denisb2002@mail.ru; г. Таганрог, Россия; начальник НТЦ.

**Ремпе Антон Борисович** – e-mail: antonrempe@yandex.ru; инженер.

**Зикий Анатолий Николаевич** – e-mail: zikiy50@mail.ru; к.т.н.; с.н.с.

**Кочубей Алексей Сергеевич** – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; тел.: 89896270939; магистр; инженер-конструктор 2 категории.

**Belyaev Denis Vladimirovich** – Taganrog Research Institute of Communications; e-mail: denisb2002@mail.ru; Taganrog, Russia; head of the STC.

**Rempe Anton Borisovich** – e-mail: antonrempe@yandex.ru; engineer.

**Zikiy Anatoly Nikolaevich** – e-mail: zikiy50@mail.ru; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Kochubey Alexey Sergeevich** – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; phone: +79896270939; master; design engineer of the 2nd category.

УДК 528.811

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-232-240

**Б.М. Азизов, А.Н. Бадалова, Х.Н. Мамедов**

### **ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Рассмотрены основные рабочие параметры, характеризующие опτικο-электронные приборы и исследованы особенности факторов, влияющих на них. Из рассматриваемых показателей были выделены функции чувствительности, разрешающей способности и передачи шумов. Проанализированы теоретические вопросы взаимосвязи между входящими параметрами. Исследования показали, что причиной возникновения ряда погрешностей является переход обрабатывающего оборудования из линейной области в нелинейный. Переход системы в нелинейный режим должен определяться в зависимости как от внутренних и внешних факторов, так и от интервала, в котором определяется функция. В процессе исследовательской работы было выявлено, что в качестве основного внутреннего фактора можно считать изменение температуры и связанных с ней другие параметры системы, а в качестве внешнего фактора – атмосферное влияние, обладающее большой ди-*

наличностью. В статье, с целью оценки формирования и количественного изменения чувствительности разрешающей способности и шумовых сигналов системы, анализированы некоторые вспомогательные функции, оказывающие воздействие на передаточную функцию и определены оптимизирующие значения для различных систем, работающих в разных режимах. В спутниковых системах дистанционного зондирования (ДЗ), из-за различия взаимодействия сигнала в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном областях оптического диапазона с атмосферой, передаточная функция приобретает сложный характер. В результате этого, соотношение сигнал/шум изменяется в широких пределах. Показано что, основным показателем, характеризующим систему в целом, является изменение выходного сигнала во времени. Поэтому, пространственно-временную функцию, характеризующую исследуемый объект в области наблюдения, целесообразно заменить функцией временного выходного сигнала. По результатам исследования, значение внутренних и внешних факторов, действующих на пространственно-временную функцию, позволяют оценить непосредственно временную функцию выходного сигнала.

Чувствительность; разрешающая способность; шум; передаточная функция; электрооптика; источники шума.

**B.M. Azizov, A.N. Badalova, H.N. Mammadov**

#### **EVALUATION OF CHARACTERISTIC PARAMETERS OF OPTO-ELECTRONIC DEVICES USED IN REMOTE SENSING SYSTEMS**

*In the article under consideration, the main operating parameters characterizing optical-electronic devices and the features of the factors influencing them are investigated. From the indicators under consideration, the functions of sensitivity, resolution, and noise transmission were singled out, and theoretical issues of the relationship between the input parameters were analyzed. In the study, the transition to non-linearity intended for the development of equipment carried out according to a linear pattern causes many errors. The transition of the system to a nonlinear mode should be determined depending on both internal and external factors and on the function in which the system performs it. In the course of work, as the main internal factor, it is possible to show the change in temperature and other parameters of the system associated with it, and as an external factor, atmospheric change, which has great dynamism. To assess the formation and quantitative change in the sensitivity of the resolution and noise signals of the system, the article analyzes some auxiliary functions that affect the transfer function and determines the optimal values for different systems operating in different modes. In different satellite systems, due to the difference in the interaction of the signal with the atmosphere obtained in the optical range (ultraviolet, visible, and infrared), the transfer function becomes complex. As a result, the signal-to-noise ratio changes over a wide range. Based on the foregoing, it is shown that the main indicator characterizing the system as a whole is a change in the output signal over time. Therefore, it is expedient to replace the function of space and time, which characterizes the object under study in terms of the observation area, with the function of the temporal output signal. According to the results of the study, for one reason or another, the value of internal and external factors acting on the function in time and space allows us to directly evaluate the temporal function of the output signal.*

*Sensitivity; resolution; noise; transfer function; electro-optics; noise sources.*

**Введение.** Оптико-электронные приборы в последние годы составляют основу многих сканеров, применяемых в дистанционном зондировании. В спутниковых системах ДЗ ведущих стран мира широко используются наиболее усовершенствованные мультиспектральные и гиперспектральные системы. В каждой последующей версии спутниковой системы наблюдается последовательное улучшение оптико-электронного обеспечения сканирующих систем, а также качественных показателей получаемой информации.

Следует отметить, что оптико-электронным устройствам, устанавливаемым в сканерах, присущ ряд проблем, для решения которых требуется особый подход. Примером тому является следующая особенность – несмотря на то, что характери-

стики оптико-электронных устройств современных сканирующих систем, устанавливаемых на спутниках, должны изменяться линейно, однако некоторые устройства этих систем работают в нелинейном режиме [1–3]. Так, в приемниках с ограниченным фоном его следует рассматривать как нелинейную систему, так как низкое значение уровня фона зависит от уровня прямого излучения.

**Цель статьи** – оценка характеристических параметров оптико-электронных устройств, используемых в системах дистанционного зондирования.

В статье рассмотрены вопросы оценки основных характеристических параметров, в том числе чувствительности, разрешающей способности и шумовых параметров сигналов оптико-электронных устройств, используемых в спутниках дистанционного зондирования Земли. Исследованы пути решения теоретических и практических задач влияния нестационарных показателей на значения указанных параметров.

**Задачи исследования.** Ввиду разнообразия источников помех в оптико-электронных системах определённую трудность представляет обоснование необходимости соответствующего выбора источника. Как известно, к источникам шума относят в основном флуктуации фотонного потока непространственных шумов, внутренние шумы приемника, шумы усилителей и других блоков. В рассматриваемых системах одним из затруднённых для учёта источников шума, является происходящее по тем или иным причинам изменение амплитуды сигнала.

Если к перечисленному также добавить и проблемы, связанные с оптическими материалами и зависимостью оптического пропускания атмосферы от ряда факторов, в том числе и нестабильностью спектральных и фазовых характеристик объекта и фона поглощения, а также эмиссионных характеристик атмосферы в различных условиях, то в итоге сложится полное представление о существующей проблеме [4, 5].

Именно поэтому для облегчения решения упомянутых выше проблем, в представленной статье особое внимание уделено теоретическому обоснованию факторов, влияющих как на показатели чувствительности системы, так и на разрешающую способность и образование шума.

**Чувствительность оптических систем.** Значение чувствительности оптической системы, соответствует потоку излучения на входе системы, при котором отношение сигнал-импеданс на выходе из системы равно единице. Использование такого значения чувствительности считается благоприятным, если отношение сигнала к среднеквадратичному значению помехи велико. В ряде случаев, например, при регистрации слабых световых сигналов, среднеквадратичная мощность помехи вовсе не считается универсальным параметром для оценки качества системы. При этом, предпочтение отдается статистическим показателям помехи [6, 7].

В качестве основного показателя, характеризующего оптический передатчик (датчик), в основном используется понятие эквивалентной барьерной температуры. Предполагается, что эквивалентный коэффициент излучения передатчика, создающего тепловой эффект, равен коэффициенту излучения абсолютно черного тела, т.е. единице. В этом случае, исходя из эквивалентной температуры барьера, чувствительность оптической системы можно рассчитать по нижеследующей формуле:

$$W_{e.m.t} = \left( \frac{4\sqrt{K_{fd}}}{\pi K_0 K_e \sqrt{K_{SE} \cdot K_{OV}}} \right) \left( \frac{d}{D_0 \cdot D_S^* \cdot \sqrt{N}} \right) \left( \frac{\sqrt{\Omega_S}}{T_f} \right), \quad (1)$$

где  $K_{fd}$  – постоянная величина, характеризующая отношение эквивалентной барьерной полосы частоты к полосе излучения электронного тракта;

$K_0$  – коэффициент оптического пропускания;

$K_e$  – коэффициент полезного действия (к.п.д.) электронного оборудования;  
 $K_{SE}$  – к.п.д. сканирования;  
 $K_{OV}$  – коэффициент покрытия (площадь, которую приемник не видит при сканировании);  
 $d$  – диаметр оптического приемника;  
 $D_o$  – диаметр оптики общего коллектора;  
 $\Omega$  – угол обзора сканирования;  
 $T_f$  – время, затраченное на получение единичного изображения.

Как видно, формула (1) состоит из трех частей. Каждая часть и входящие в нее параметры имеют характерную особенность. Первая группа параметров  $K_e$ ,  $K_o$ ,  $K_{fd}$ ,  $K_{ov}$  являются параметрами, которые характеризуют к.п.д. системы. Значения  $K_e$  и  $K_o$  определяются непосредственно в процессе конструирования оптической системы. Коэффициент оптического пропускания  $K_o$  для современных оптико-электронных систем (ОЭС) составляет от 60 до 85%.

Величина  $K_e$ , являющаяся к.п.д. используемого оборудования, обычно может составлять от 0,8 до 0,95 в зависимости от спектров основных частот электро-фильтров, их полос излучения и скорости сканирования. Верная оценка указанного коэффициента возможна при правильном определении передаточной функции электрического блока обработки сигналов, оптической системы и приемника. Коэффициент  $K_{fd}$  определяется после выбора передаточной функции формирующего фильтра.

**Разрешающая способность.** Форма передаточной функции считается одним из определяющих факторов при оценке разрешающей способности системы оптического преобразователя. Заданная передаточная функция (STF) в основном учитывает влияние нескольких функций, в том числе оптической передаточной функции (OTF), пространственной (DsTF) и временной функции процесса (DtTF):

$$STF = (OTF)(D_sTF)(D_tTF). \quad (2)$$

Это утверждение верно в случае линейности системы. Когда система нелинейна, расчет разрешения становится довольно сложным. Рассмотрим влияние указанных функций на полученные результаты.

1. Оптическая передаточная функция (OTF – Optical Transfer Function). Оптическая передаточная функция представляет собой двумерное преобразование Фурье и функцию, характеризующую распределение излучения в изображении идеального точечного излучателя. При анализе ОЭС обычно используют два типа OTF:

а) для узкой спектральной полосы систем, с ограниченной круговой апертурой:

$$OTF = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \frac{f_s}{f_{se}} - \frac{f_s}{f_{se}} \left[ 1 - \left( \frac{f_s}{f_{se}} \right)^2 \right] \right\}, 0 \leq \frac{f_s}{f_{se}} \leq 1, \quad (3)$$

где  $f_s$  – пространственная частота;

$f_{se}$  – верхний предел пространственной частоты для рассматриваемой оптической системы.

б) для широкой спектральной полосы с учётом влияния аберрации:

$$OTF = \exp \left( -2\pi^2 \left[ f_x^2 \delta_x^2 + f_y^2 \delta_y^2 \right] \right), \quad (4)$$

где  $f_x$  и  $f_y$  – пространственные частоты;

$\delta_x$  и  $\delta_y$  – соответствующие стандартные отклонения гауссовой аппаратной функции по координатам  $x$  и  $y$ , соответственно.

2. Фазовая передаточная функция (DsTF) для сканирующих приемников прямоугольной формы:

$$D_sTF = W_1 \frac{\sin \pi W_1 f_s}{\pi W_1 f_s}, \quad (5)$$

где  $W_1$  – мощность сигнала на входе приемника;

$f_s$  – пространственная частота.

3. Пространственная передаточная функция приемника (DtTF) определяется следующим выражением:

$$D_tTF = \frac{R_0}{1+2\pi T_D T_f}, \quad (6)$$

где  $R_0$  – чувствительность приемника к постоянному току;

$T_D$  – постоянная времени приемника.

Следует отметить, что значение пространственной частоты ( $f_s$ ) для сканирующих систем варьируется в зависимости от скорости сканирования и рассчитывается следующим образом:

$$f = f_s \cdot V_S, \quad (7)$$

где  $f$  – значение частоты, генерируемой в процессе сканирования;

$V_S$  – скорость сканирования.

Поскольку оценка передаточной функции в ОЭС сложна, обычно термин «разрешение» рассматривается как способность регистрации минимального размера (пикселя) системы. Хотя это довольно грубый подход и не позволяет оценить факторы, влияющие на этот показатель системы, он широко используется при решении практических задач и является простым способом для того, чтобы выразить показатели влияния сложной функции. В целом, следует приложить некоторые усилия для упрощения определения разрешения ОЭС. Это обозначение должно определяться в тесной связи с функцией системы.

В системах визуализации под «разрешением» понимается определение объектов (пикселей) наименьшего размера на изображении, а в системах регистрации под «разрешением» понимается точность измерения положения объекта в пространстве [8–12].

На пространственное разрешение влияют многие параметры, включая размеры приемника, скорость сканирования, пропускную способность электронной трассировки и другие. Особое внимание следует уделить основным влияющим факторам из указанных показателей. Наиболее важными из них являются габариты приемника [13–17]. Влияние этого фактора учитывается непосредственно в проектировании оптических систем. Для выбора соответствующего приемника необходимо учитывать порог возникновения оптической дифракции:

$$\vartheta \geq \frac{2.44\lambda_{max}}{D_0}, \quad (8)$$

где  $\vartheta$  – угловое разрешение приемника, измеряемое в радианах;  $\lambda_{max}$  – максимальное значение длины волны в рабочем спектральном диапазоне приемника, измеряемое в см;  $D_0$  – размер апертуры оптического приемника, измеряемый в см.

Соответственно, при выборе оптико-электронную систему основными факторами являются размер разделительных элементов напрямую связан с повышением точности расчетных передаточных функций и коэффициент отношения сигнал/шум.

**Сигналы помех оптико-электронных систем.** Существует ряд помех, т.е. причин и источников, ухудшающих чувствительность ОЭС. Среди наиболее существенных, являются шумы фоновых источников: тепловых, вибрационных, контактных, генерационно – рекомбинационных, фотонных шумов, а также шумы квантования, которые считаются наиболее проблемными среди перечисленных сигналов помех [18–21]. Указанные шумы различаются с точки зрения их появления и входа в систему ОЭС. Ниже приведены точки входа некоторых характерных помех для ОЭС (рис. 1).

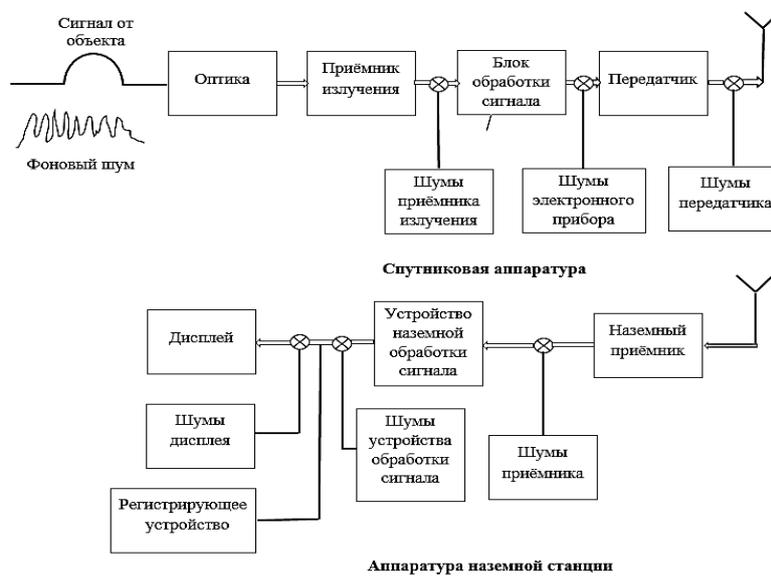


Рис. 1. Блок-схема основных источников помех спутниковых и наземных ОЭС

В упомянутых сигналах помех за счет внешних источников формируются только фоновые помехи. Другие препятствия являются непосредственно внутренними помехами ОЭС. Основными трудностями анализа помех считаются показатели их влияния на системную чувствительность, определение их источников, уровня его воздействия и количественная оценка каждого сигнала.

**Заключение.** Результаты проведенных исследований показывают, что функция, характеризующая фоновое излучение, является нестационарной, вызванная влиянием внешних факторов. Поэтому к применению винеровского спектра следует подходить с некоторой осторожностью. Следует учитывать, что оптический сигнал проходит через те же блоки, что и фоновые шумы, обладающие фотонными барьерами и флуктуирующей характеристикой. Таким образом, значения излучаемой или отраженной энергии в объекте также являются переменной в зависимости от их свойств.

Поскольку шумы в оптико-электронной системе складываются из суммы множественных шумов и создаются разными независимыми физическими источниками, то их статистические характеристики следует учитывать при рассмотрении шумов в целом.

Ввиду того, что основной фактор, характеризующий уменьшение размеров разделительных элементов напрямую связан с повышением точности расчетных передаточных функций и коэффициента отношения сигнал/шум, целесообразно использовать оптико-электронную систему Landsat 8 OLI 2.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуляев Ю.В., Коротков В.А. Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения // Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. – 2013. – № 12. – С. 1-12.
2. Seyrafi Khalil. Electro-Optical Systems Analysis. – Publisher. Electro-Optical Research Co; Publication date. January 1, 1993. – 356 p. – ISBN-10.
3. Гудмен Д.Ж. Статистическая оптика. – М.: Мир, 1988. – 527 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1071 с.

5. *Глаубер Р.* Оптическая когерентность и фотостатистика. – М.: Мир, 1986. – 451 с.
6. *Соболев В.С.* Максимально правдоподобные оценки параметров оптических сигналов с учетом дробных и фоновых шумов // Компьютерная оптика. – 2006. – Т. 30. – С. 90-108.
7. *Лебетро Э.Г.* Системы оптической локации. – СПб.: Изд-во "СРУ-ПМО", 2012. – 129 с.
8. *Березин В.В., Цицулин А.К.* Обнаружение и оценка координат изображений точечных объектов в астронавигации и адаптивной оптике // Вестник ТОГУ. – 2008. – № 1 (8). – С. 11-20.
9. *Zhou J., Li X.* Finite-Time Mode Control Design for Unknown Nonaffine Pure-Feedback Systems // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015, Article ID 653739. – 9 p. – <http://dx.doi.org/10.1155/2015/653739>.
10. *Howard A.M., Nibbelink N., Bernardes S., Fragaszy D.M. & Madden M.M.* Remote sensing and habitat mapping for bearded capuchin monkeys (*Sapajus libidinosus*): landscapes for the use of stone tools // Journal of Applied Remote Sensing. – 2015. – 9 (1), 096020. – DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.096020>.
11. *Aljamali N.M., & Mahsiin F.* Review on Design Engineering Control Devices for Laboratory and Medical Devices with Innovative Technology // Journal of Instrumentation and Innovation Sciences. – 2021. – P. 13-20.
12. *Naghah Mahmood Aljamali, Jihan Razzaq Moslim.* Review on Engineering Designs for Laboratory Chemical Devices and Displays // Journal of Control and Instrumentation Engineering. – 2021. – 7, 2. – P. 38-46.
13. *Шаповалов П.А., Михайлов Ю.В., Фролов А.В., Савватеев Д.О.* Методологические основы и практические аспекты решения задач оптимизации несущих систем бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1 (231). – С. 252-265. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-252-265.
14. Report ITU-R SM.2405-1. Spectrum management principles, challenges and issues related to dynamic access to frequency bands by means of radio systems employing cognitive capabilities. – Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2405-1-2021>.
15. *Matyszkiew R., Kaniewski P., Polak R., Laskowski D.* Selected methods of protecting wireless communications against interferences // 2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). – Budva: IEEE, 2019. – P. 1-5.
16. *Mitola J., Maguire G.Q.* Cognitive radio: making software radios more personal // IEEE Personal Communications. – 1999. – Vol. 6, Issue 4. – P. 13-18.
17. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). – Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf).
18. *Zhozhikashvili A.V.* Category-Theoretic Technology of Creation and Development of Knowledge-Based Intelligent Systems // Information processes. – 2016. – Vol. 16, No. 4. – P. 312-332.
19. *Lawrence A.* Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control. – Springer, 2012. – 278 p.
20. *Noureddin A., Karamat T.B., and Georgy J.* Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration. – Springer, 2013. – P. 297-313.
21. *Бочаров Н.А.* Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно - аппаратной платформе "Эльбрус" // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 8-14. – DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.

## REFERENCES

1. *Gulyaev Yu.V., Korotkov V.A.* Korrektsiya prostranstvennogo spektra, iskazhennogo opticheskoy sistemoy, s pomoshch'yu metoda opornogo izobrazheniya [Correction of the spatial spectrum distorted by the optical system using the reference image method], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2013, No. 12, pp. 1-12.
2. *Seyrafi Khalil.* Electro-Optical Systems Analysis. Publisher. Electro-Optical Research Co; Publication date. January 1, 1993, 356 p. ISBN-10.
3. *Gudmen D.Zh.* Statisticheskaya optika [Statistical optics]. Moscow: Mir, 1988, 527 p.
4. *Gonsales R., Vuds R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1071 p.

5. *Glauber R.* Opticheskaya kogerentnost' i fotostatistika [Optical coherence and photostatistics]. Moscow: Mir, 1986, 451 p.
6. *Sobolev V.S.* Maksimal'no pravdopodobnye otsenki parametrov opticheskikh signalov s uchetom drobnykh i fonovykh shumov [Maximum plausible estimates of optical signal parameters taking into account fractional and background noises], *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2006, Vol. 30, pp. 90-108.
7. *Lebetro E.G.* Sistemy opticheskoy lokatsii [Optical location systems]. St. Petersburg: Izd-vo "SRU-PMO", 2012, 129 p.
8. *Berezin V.V., Tsytulin A.K.* Obnaruzhenie i otsenka koordinat izobrazheniy tochechnykh ob"ektov v astronavigatsii i adaptivnoy optike [Detection and estimation of coordinates of images of point objects in astronavigation and adaptive optics], *Vestnik TOGU* [Bulletin of PNU], 2008, No. 1 (8), pp. 11-20.
9. *Zhou J., Li X.* Finite-Time Mode Control Design for Unknown Nonaffine Pure-Feedback Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, Vol. 2015, Article ID 653739, 9 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/653739>.
10. *Howard A.M., Nibbelink N., Bernardes S., Fragaszy D.M. & Madden M.M.* Remote sensing and habitat mapping for bearded capuchin monkeys (*Sapajus libidinosus*): landscapes for the use of stone tools, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9 (1), 096020. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.096020>.
11. *Aljamali N.M., & Mahsiin F.* Review on Design Engineering Control Devices for Laboratory and Medical Devices with Innovative Technology, *Journal of Instrumentation and Innovation Sciences*, 2021, pp. 13-20.
12. *Naghah Mahmood Aljamali, Jihan Razzaq Moslim.* Review on Engineering Designs for Laboratory Chemical Devices and Displays, *Journal of Control and Instrumentation Engineering*, 2021, 7, 2, pp. 38-46.
13. *Shapovalov P.A., Mikhaylov Yu.V., Frolov A.V., Savvateev D.O.* Metodologicheskie osnovy i prakticheskie aspekty resheniya zadach optimizatsii nesushchikh sistem besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistem [Methodological foundations and practical aspects of solving problems of optimizing the carrier systems of strapdown inertial navigation systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 1 (231), pp. 252-265. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-252-265.
14. Report ITU-R SM.2405-1. Spectrum management principles, challenges and issues related to dynamic access to frequency bands by means of radio systems employing cognitive capabilities. Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2405-1-2021>.
15. *Matyszkiew R., Kaniewski P., Polak R., Laskowski D.* Selected methods of protecting wireless communications against interferences, *2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*. Budva: IEEE, 2019, pp. 1-5.
16. *Mitola J., Maguire G.Q.* Cognitive radio: making software radios more personal, *IEEE Personal Communications*, 1999, Vol. 6, Issue 4, pp. 13-18.
17. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf).
18. *Zhozhikashvili A.V.* Category-Theoretic Technology of Creation and Development of Knowledge-Based Intelligent Systems, *Information processes*, 2016, Vol. 16, No. 4, pp. 312-332.
19. *Lawrence A.* Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control. Springer, 2012. – 278 p.
20. *Noureldin A., Karamat T.B., and Georgy J.* Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration. Springer, 2013, pp. 297-313.
21. *Bocharov N.A.* Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno-apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling algorithms for disaster tolerance of groups of robots on the software and hardware platform "Elbrus"], *Radiopromyshlennost'* [Radio industry], 2019, No. 3, pp. 8-14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

**Азизов Бахтияр Магатил оглу** – Национальная Академия Авиации Азербайджана; e-mail: bakhtiyar48@mail.ru; г. Баку, Азербайджан; тел.: +994506275543; кафедра аэрокосмического мониторинга окружающей среды; д.т.н.; профессор.

**Бадалова Айтадж Назиф кызы** – e-mail: badalova-aytac60@rambler.ru; тел.: +994506234290; кафедра аэрокосмического мониторинга окружающей среды; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Мамедов Хикмет Назим оглу** – e-mail: hikmat.mammadov@mail.ru; тел.: +994554554282; к.т.н.; начальник Аналитического отдела по научно-исследовательским работам.

**Azizov Bakhtiyar Magatil** – Azerbaijan National Aviation Academy; e-mail: bakhtiyar48@mail.ru; Baku, Azerbaijan; phone: +994506275543; the department of aerospace environmental monitoring; dr. of eng. sc.; professor.

**Badalova Aytaj Nazif** – e-mail: badalova-aytac60@rambler.ru; phone: +994506234290; the department of aerospace environmental monitoring; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Mammadov Hikmat Nazim** – e-mail: hikmat.mammadov@mail.ru; phone: +994554554282; cand. of eng. sc.; head of the Analytical Department of Scientific Research.

УДК 621.372.82; 537.862

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-240-251

**Д.Е. Титова**

### **КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ВОЗБУЖДЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ИМПЕДАНСНЫМИ СТЕНКАМИ**

*Решение задач о поведении электромагнитных волн во вращающихся волноводах необходимо для объяснения экспериментов с электромагнитными полями во вращающихся интерферометрах и гироскопах и разработки новых методов измерения частоты вращения. Сложность постановки и решения подобных задач связана с тем, что вращающаяся система отсчета является неинерциальной, а пространство, ей соответствующее, из-за наличия центробежных сил и сил Кориолиса является искривленным. В данной работе выполнены постановка и решение в строгом виде задачи возбуждения сторонними источниками токов и зарядов электромагнитного поля во вращающемся цилиндрическом волноводе и исследовано влияния вращения на основные характеристики волновода. Строгая постановка и решение задач во вращающейся системе отсчета, учитывающие влияние эквивалентного гравитационного поля на электромагнитное поле в присутствии вращения, получены с использованием ковариантных уравнений Максвелла. Решена граничная задача возбуждения электромагнитного поля во вращающемся цилиндрическом волноводе с импедансными стенками при заполнении волновода диэлектриком. На основе полученных решений построены частотные характеристики вращающегося волновода. Показана зависимость параметров возбуждаемого электромагнитного поля от частоты вращения волновода. Расчетами подтвержден эффект расщепления критической частоты волновода при вращении на две новых частоты, равных разности критической частоты волновода в покое и частоты вращения, умноженной на порядок возбужденной моды. Зависимость параметров электромагнитного поля от частоты вращения может использоваться для измерения частоты вращения волновода, а полученное строгое решение – для планирования, проведения и трактовки результатов экспериментов.*

*Волноводы; гироскопы; граничные задачи; граничные условия; измерение частоты вращения; критические частоты; релятивистские эффекты; теория возбуждения волноводов; цилиндрические волноводы; частота вращения.*