

УДК 621.371/372

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ КАРТИНА КОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЫ КОГЕРЕНТНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Глущенко А.А., Глущенко А.Г., Глущенко В.А.

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,
Самара, e-mail: gag646@yandex.ru

Рассмотрено распределение электрического поля, формируемого системой когерентных осцилляторов, расположенных по кольцу, при различном числе осцилляторов. Системы когерентных излучателей широко используются для моделирования антенных решеток различного типа. Основное внимание при этом уделяется линейным и плоским решеткам, имеющим узкую диаграмму направленности и высокую пространственную избирательность, что позволяет повысить чувствительность измерительных систем. Кольцевое расположение когерентных осцилляторов приводит к качественному изменению интерференционной картины, формируемой излучателями. Рассмотрено изменение интерференционной картины в зависимости от числа излучателей (от одного до шестнадцати). Для анализа результата сложения большого числа гармонических волн используется метод векторных диаграмм. Представлены картины распределения интенсивности излучения для различных конфигураций расположения излучателей. Установлено, что при числе излучателей менее восьми наблюдается изрезанная в пространстве картина перераспределения энергии в пространстве. При увеличении числа излучателей – уровень перепада максимумов и минимумов сглаживается, энергия излучения концентрируется в центре кольца, образованного системой излучателей. Степень концентрации энергии растет с увеличением числа излучателей. За пределами кольца излучателей энергия излучения падает. Таким образом, кольцевая система когерентных излучателей позволяет локализовать излучение в области кольца.

Ключевые слова: излучение, осцилляторы, когерентность, кольцевая структура, интерференция

INTERFERENCE PICTURE RING SYSTEM OF COHERENT OSCILLATORS

Gluschenko A.G., Gluschenko A.A., Gluschenko V.A.

Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, e-mail: gag646@yandex.ru

The distribution of the electric field formed by a system of coherent oscillators located along the ring with a different number of oscillators is considered. Systems of coherent radiators are widely used for modeling various types of antenna arrays. In this case, the main attention is paid to linear and flat arrays, which have a narrow radiation pattern and high spatial selectivity, which makes it possible to increase the sensitivity of measuring systems. The ring arrangement of coherent oscillators leads to a qualitative change in the interference pattern formed by the emitters. The change in the interference pattern depending on the number of emitters (from one to sixteen) is considered. To analyze the result of adding a large number of harmonic waves, the method of vector diagrams is used. The distribution patterns of the radiation intensity for various configurations of the location of the emitters are presented. It has been established that when the number of emitters is less than eight, a spatially jagged pattern of energy redistribution in space is observed. With an increase in the number of emitters, the level of difference between maxima and minima is smoothed out and the radiation energy is concentrated in the center of the ring formed by the system of emitters. The degree of energy concentration increases with an increase in the number of emitters. Outside the ring of emitters, the radiation energy drops. Thus, a ring system of coherent emitters makes it possible to localize the radiation in the region of the ring.

Keywords: radiation, oscillators, coherence, ring structure, interference

Модель когерентных излучателей является одной из основных при анализе различных систем излучения. Для двух когерентных источников – это известный опыт Юнга по исследованию интерференции [1]. В антенной технике основное внимание уделяется линейным и плоским структурам систем излучателей, на основе которых создаются высоконаправленные антенные комплексы [2–4]. В теории антенн для анализа характеристик направленности излучения используется метод векторных диаграмм, позволяющий изучить физические свойства, получить аналитическое решение, описанный, в частности, в [5, 6]. Использование других конфигураций [7] позволяет решать другие проблемы

измерительной и телекоммуникационной техники [8–10]. Для обеспечения широкоугольного сканирования используют выпуклые (сферические, цилиндрические, конические) и другие геометрические поверхности, обеспечивающие диапазонную работу антенных решеток [7]. Перспективным направлением является использование пространственных антенных систем. В настоящей работе установлено, что кольцевая конфигурация когерентных излучателей позволяет сконцентрировать энергию системы в центре кольцевой конфигурации. Рассмотрена интерференционная картина для одного, двух, четырех, пяти, шести, восьми и шестнадцати излучателей в однородной, изотропной среде.

Целью работы являлось исследование физических свойств системы когерентных точечных или линейных осцилляторов, находящихся на цилиндрической поверхности соосно с осью цилиндра с целью выявления условий, когда за пределами цилиндра, на котором находятся излучатели, излучение отсутствует и интерференционная картина сглажена.

Материалы и методы исследования

Получение аналитических соотношений для расчета интенсивности излучения системы различного количества когерентных излучателей, расположенных на цилиндрической поверхности. Графическое представление интенсивности излучения и интерференции.

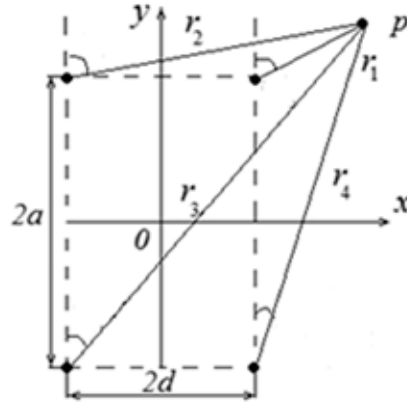


Рис. 1. Расположение источников излучения для системы четырех осцилляторов, расположенных в вершинах прямоугольника

Основные соотношения

В соответствии с принципом суперпозиции суммарное поле в точке P определяется суммой полей всех n источников:

$$E = E_1(t) + E_2(t + \tau_{12}) + E_3(t + \tau_{13}) + \dots + E_n(t + \tau_{1n}), \quad (1)$$

где $\tau_{12}, \tau_{13}, \dots, \tau_{1n}$ – время задержки волн от 2, 3, ..., n -го источников излучения по сравнению со временем прохождения волны от первого источника излучения. Геометрические расстояния от источников до точки наблюдения, определяющие сдвиг фаз складываемых волн (рис. 1), с учетом принятых обозначений (для определенности четырех) равны

$$r_1 = \sqrt{(x-a)^2 + (y-d)^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x+a)^2 + (y-d)^2}, \\ r_3 = \sqrt{(x+a)^2 + (y+d)^2}, \quad r_4 = \sqrt{(x-a)^2 + (y+d)^2}.$$

Тогда

$$E = E_1(t) + E_2(t + \tau_{12}) + E_3(t + \tau_{13}) + E_4(t + \tau_{14}).$$

Рассмотрим сложение волн с однонаправленными колебаниями, описываемых функциями

$$E_i(\mathbf{r}, t) = A_i \cos(\omega_i t - \mathbf{k}_i \mathbf{r}_i + \phi_i) = A_i \cos \Phi_i,$$

где A_i – амплитуды, $\Phi_i = \omega_i t - \mathbf{k}_i \mathbf{r}_i + \phi_i$ – фазы, ω_i – циклические частоты, \mathbf{k}_i – волновые векторы, \mathbf{r}_i – радиус-векторы, соединяющие источники волн и точку наблюдения, определяются конфигурацией структуры системы излучателей, ϕ_i – начальные фазы, $i = 1, 2, \dots, n$ волновое число в свободном пространстве $k_0 = 2\pi / \lambda$, λ – длина волны излучения.

Нахождение результирующего излучения, суммарного для произвольного числа источников излучения сложение используем метод векторных диаграмм, описанный в [3, 4]. Амплитуда результирующего колебания зависит от амплитуд A_i и фаз складываемых колебаний $\Phi_i = \omega_i t - \mathbf{k}_i \mathbf{r}_i + \phi_i$, тогда в общем случае для n излучателей интенсивность и излучения определяется из (1) соотношением

$$A^2(\mathbf{r}, t) = (A_1 \cos \Phi_1 + A_2 \cos \Phi_2 + \dots + A_i \cos \Phi_i + \dots + A_n \cos \Phi_n)^2 + \\ + (A_1 \sin \Phi_1 + A_2 \sin \Phi_2 + \dots + A_i \sin \Phi_i + \dots + A_n \sin \Phi_n)^2 = \\ = \left(\sum_1^n A_i \cos \Phi_i \right)^2 + \left(\sum_1^n A_i \sin \Phi_i \right)^2, \quad (2)$$

которое может быть использовано для достаточно общих структур, различных конфигураций излучателей как в изотропных, так и в анизотропных средах и в структурах неподвижных и подвижных.

Результаты исследования и их обсуждение

В частном случае одиночного излучателя в изотропной, однородной среде из (2) следует, что распределение интенсивности волн будет равномерным по всем направлениям. Рассмотрено изменение интерференционной картины при изменении числа когерентных излучателей (от одного до шестнадцати), расположенных по кругу для частного случая одинаковых нулевых начальных фаз и равных амплитуд отдельных излучателей.

Результаты расчета распределения интенсивности поля, создаваемого системой двух когерентных излучателей с осью симметрии, проходящей через излучатели и совпадающей с осью Oy структуры, в плоскости xOy показано на рис. 2. Эта система когерентных излучателей хорошо известна как опыт Юнга [1]. Основное излучение наблюдается вдоль оси (Oy), на которой расположены осцилляторы. Такое же по ин-

тенсивности, но более узконаправленное излучение наблюдается также в поперечном к оси структуры направлении (Ox).

В случае четырех осцилляторов, симметрично расположенных на окружности радиуса $R=1$ (в вершинах квадрата) (рис. 3), наблюдается симметричная относительно осей Ox и Oy картина распределения интенсивности поля с максимумами по координатным осям во взаимно перпендикулярных направлениях. Дальнейшее увеличение количества излучателей приводит к концентрации излучения внутри кольцевой структуры. Наблюдается дополнительное перераспределение энергии. В частности, возникает дополнительный максимум излучения энергии под углами 45° к координатным осям структуры (рис. 3). В центре системы излучателей возникает локализованный максимум излучения.

Если излучатели расположены вдоль прямой линии, интерференционное распределение интенсивности излучения существенно меняется. Интерференционные максимумы расположены вдоль линии, на которой расположены излучатели. Структура обладает направленными свойствами, которые более ярко выражены при увеличении числа осцилляторов.

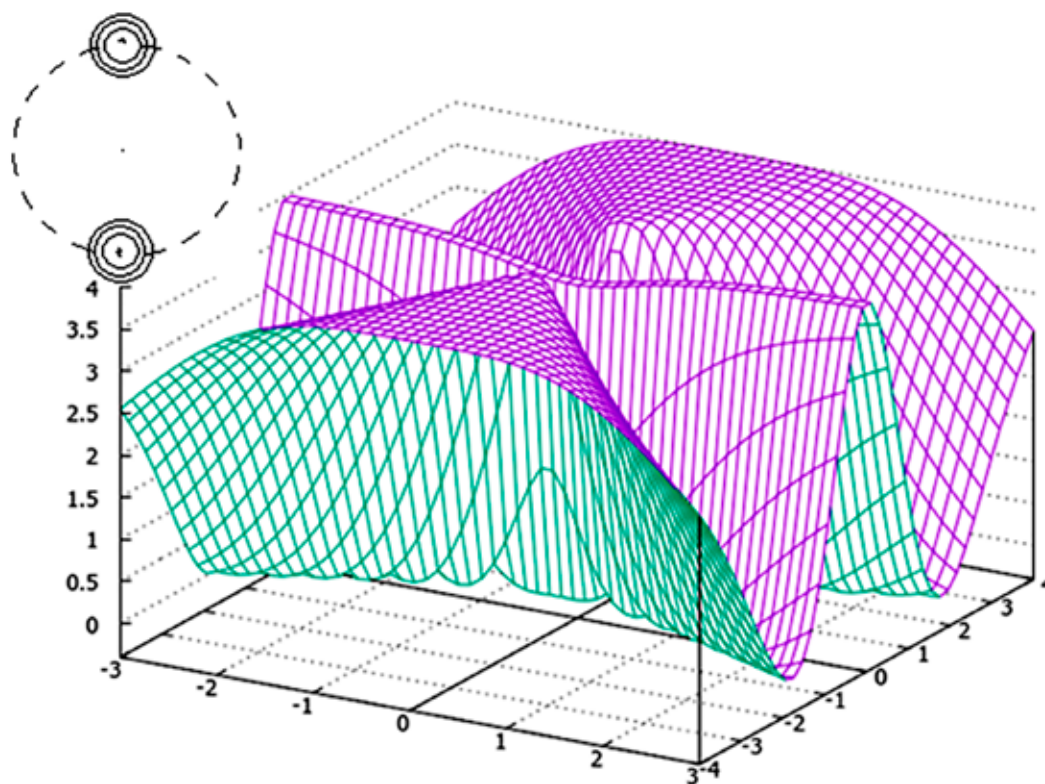


Рис. 2. Распределение интенсивности волн интерференционной картины двух когерентных источников (опыт Юнга) (расстояние между излучателями $d = 1$, $\lambda = 2$)

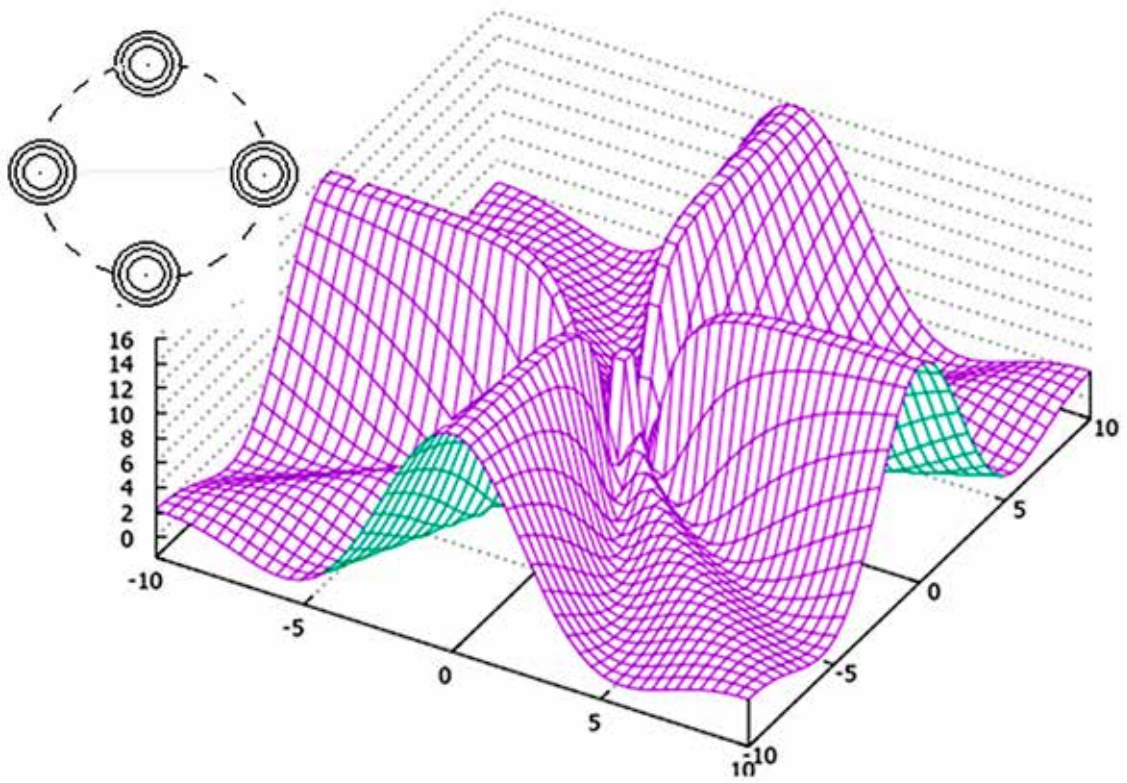


Рис. 3. Распределение интенсивности волн интерференционной картины четырех когерентных источников, расположенных в вершинах квадрата в плоскости xOy

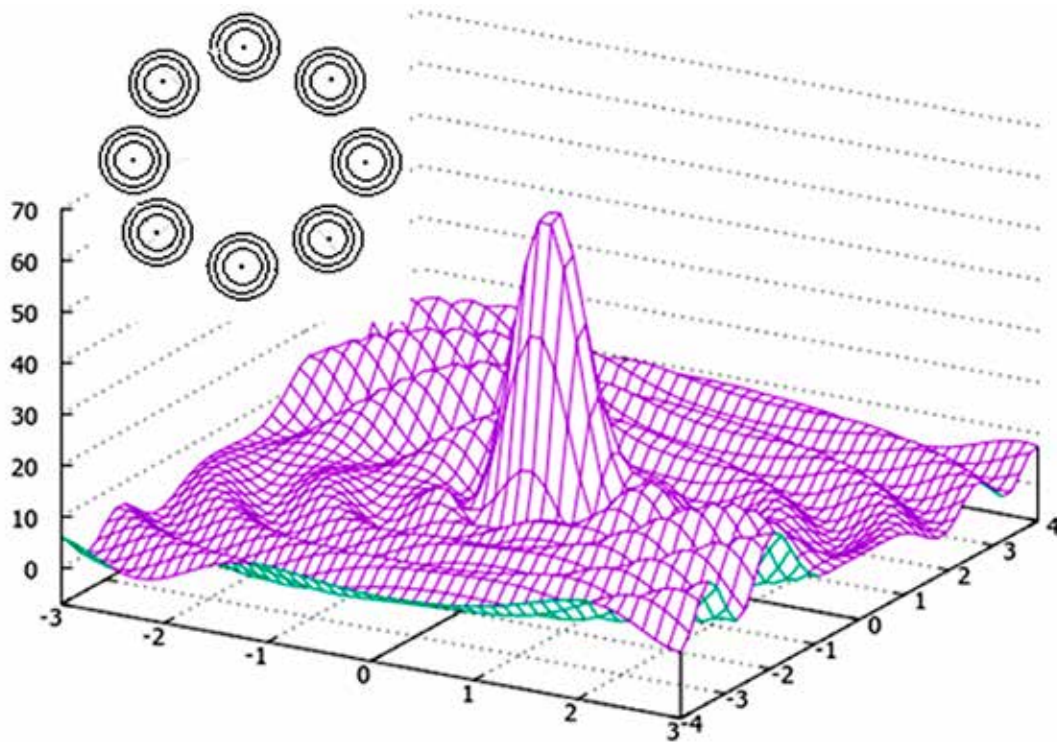


Рис. 4. Распределение интенсивности волн интерференционной картины восьми когерентных источников

Введение пятого осциллятора в центре системы четырех когерентных излучателей дополнительно увеличивает уровень излучения в центре структуры при сохранении характера структуры интерференционной картины четырех излучателей.

В системе шести когерентных излучателей с одинаковыми начальными фазами, равномерно расположенных по кругу, существенно растет уровень излучения в центре структуры при заметном спаде уровня излучения по периферии структуры. Таким образом, уже для шести излучателей наблюдается качественная деформация интерференционной картины: смещение области максимального уровня излучения в центр кольца когерентных излучателей. Концентрация излучения в центре кольца излучателей растет при увеличении числа излучателей.

Интерференционная картина для восьми когерентных излучателей с одинаковыми начальными фазами, расположенными попарно друг от друга на расстоянии $l=1, \lambda=2$, показана на рис. 4. Кольцевая структура излучателей создает систему, практически не излучающую во внешнее пространство, в то время как при линейном расположении излучателей формируется узкая диаграмма

направленности излучения (в направлении оси структуры) во внешнюю среду, что используется при создании антенных решеток различных диапазонов частот.

Распределение интенсивности для шестнадцати излучателей показано на рис. 5. Наблюдается дополнительный рост уровня излучения в центре системы (на несколько порядков выше, чем у прилегающих за пределами кольца областей). Соотношение (2) позволяют рассчитывать диаграммы излучения системы излучателей с любыми начальными фазами в изотропных и анизотропных средах. Наибольшее изменение интерференционной картины наблюдается при изменении числа излучателей от одного до шести.

При изменении числа когерентных излучателей свыше шести наблюдается увеличение концентрации излучения в локальной области в центре кольцевой системы и уменьшение интерференционного характера интенсивности излучения за пределами кольца излучателей. Интерес представляет анализ влияния начальных фаз и движения системы на интерференционную картину системы излучателей и учет влияния временной когерентности на картину интерференции системы.

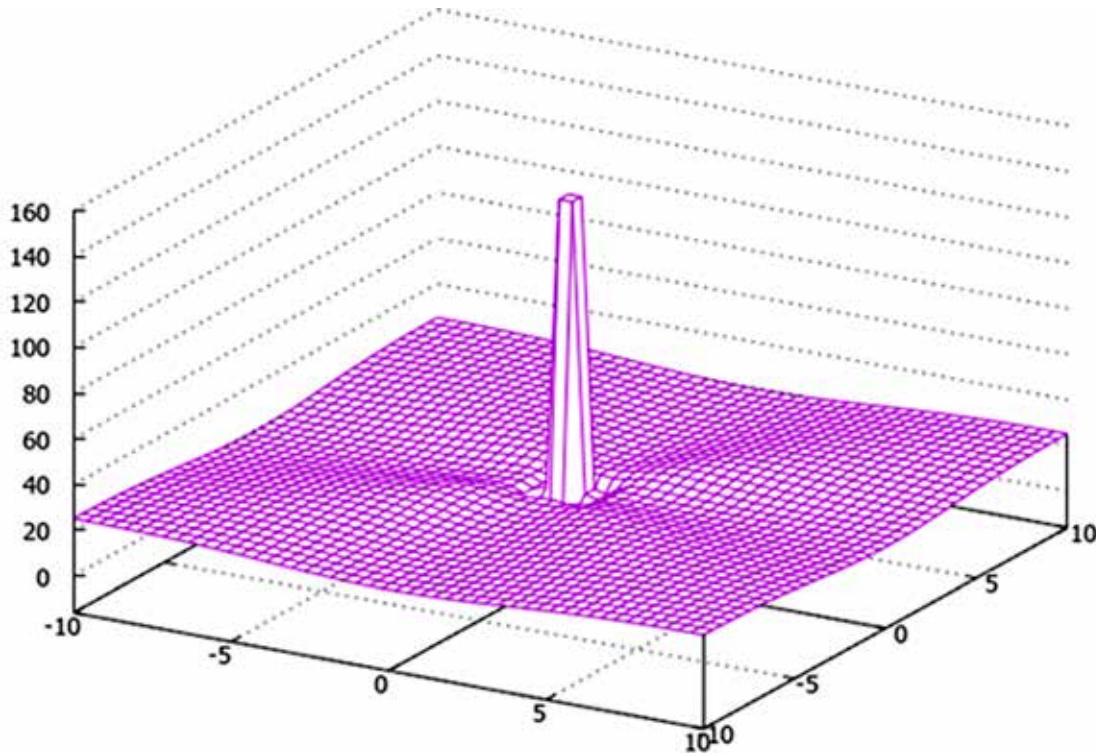


Рис. 5. Распределение интенсивности волн интерференционной картины шестнадцати когерентных источников

При изменении числа когерентных излучателей свыше шести наблюдается увеличение концентрации излучения в локальной области в центре кольцевой системы и уменьшение интерференционного характера интенсивности излучения за пределами кольца излучателей. Интерес представляет анализ влияния начальных фаз и движения системы на интерференционную картину системы излучателей и учет влияния временной когерентности на картину интерференции системы.

Заключение

Рассмотрена зависимость интерференционной картины в зависимости от числа излучателей, расположенных по кругу. Установлено, что при увеличении числа излучателей свыше восьми наблюдается рост концентрация поля в области внутри кольца излучателей. В этом случае система излучателей становится замкнутой: нет излучения за пределами системы излучателей. Вся энергия излучения концентрируется в центре системы излучателей, расположенных по кольцу.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. СПб.: Лань, 2021. 500 с.
2. Дятко А.А., Костромицкий С.М., Шумский П.Н., Давыденко И.Н. Работа радиолокационной угломерной системы в условиях сигнала, создаваемого когерентными источниками излучения из двух точек пространства // Доклады БГУИР. 2019. № 7–8. С. 22–29. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-22-29.
3. Алексейцев С.А., Паршин Ю.Н. Электродинамика проводных двух диапазонных излучателей дипольного вида с концевым типом возбуждения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 31–39. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-3-31-39.
4. Саломатов Ю.П., Панько В.С., Лемберг К.В. Устройства сверхвысоких частот и антенны: учебное пособие. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. 180 с.
5. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П. Методика расчета пространственного распределения интенсивности волнового процесса, формируемого точечными источниками // Вестник науки и образования. 2016. № 11 (23). С. 6–9.
6. Gluschenko A.A., Gluschenko A.G., Gluschenko E.P. Generalization of the Cosines Theorem to Polygons and Its Application to the Analytical Calculation of Multi-Beam Interference of Coherent Radiation of Light with an Arbitrary Phase Distribution // European J. of Physics Education. 2020. Vol. 11, Is. 3. P. 1309–7202.
7. Шишлов А.В., Левитан Б.А., Топчиев С.А., Анпилов В.Р., Денисенко В.В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 7. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.7.6.
8. Казарин П.В., Менсов С.Н., Услугин Н.Ф. Демонстрация процесса формирования диаграммы направленности антенных решеток муаровыми структурами // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. 2020. № 4 (60). С. 155–160.
9. Oromolla M. High Repetition Rate and Coherent Free-Electron Laser Oscillator in the Tender X-ray Range Tailored for Linear Spectroscopy. Appl. Sci. 2021. No. 11 (13). P. 5892. DOI: 10.3390/app11135892.
10. Wang W., Lu P.K., Vinod A.K. Coherent terahertz radiation with 2.8-octave tunability through chip-scale photomixed microresonator optical parametric oscillation // Nat. Commun. 2022. No. 13. P. 5123. DOI: 10.1038/s41467-022-32739-6.