

Диэлектрическая приемная антенна с оптическим съемом информации на основе резонатора с модами шепчущих галерей

Е. С. Минин,^{*} С. С. Грызулёв,[†] Б. К. Резников,[‡] Н. Ю. Колыбельников, Е. В. Полякова, Т. А. Котов
*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
факультет инфокоммуникационных сетей и систем,
кафедра оптических и квантовых систем связи
Россия, 193232, Санкт-Петербург, Большевиков пр., 22 к. 1
(Поступила в редакцию 16.06.2025; подписана в печать 17.06.2025)*

В статье рассматривается новое направление в области антенн — диэлектрические резонаторные антенны (ДРА) на основе нанопотонных резонаторов шепчущей галереи (WGM), обладающие высокой устойчивостью к электромагнитным помехам (ЭМИ) и исключающими использование металлов в конструкции. Показано, что благодаря сверхвысокой добротности WGM-резонаторов и эффективному перекрытию радиочастотного и оптического полей внутри диэлектрического резонатора, достигается модуляция оптического излучения радиочастотным сигналом без применения металлических электродов. Рассматриваются принципы работы таких антенн, параметры модуляции и схемы реализации, демонстрирующие потенциал создания высокочувствительных, компактных и ЭМИ-устойчивых радиопотонных антенных систем нового поколения.

PACS: 42.79.Sz, 07.50.-e, 07.50.Qx

УДК: 004.7:621.391.81:621.382:681.7.068.

Ключевые слова: диэлектрическая антенна, оптический съём, резонатор с модами шепчущих галерей, приёмная антенна, радиочастотный сигнал, электромагнитное излучение, фотонные устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие радиопотонных и нанопотонных технологий открывает новые перспективы в создании высокоэффективных и помехоустойчивых антенных систем. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка полностью диэлектрических антенн на основе резонаторов с модами шепчущей галереи (WGM). Эти устройства сочетают в себе преимущества оптических резонаторов с высокой добротностью и диэлектрических радиочастотных резонаторов, обеспечивая эффективную модуляцию оптического излучения под воздействием радиочастотного сигнала без применения металлических элементов. В статье рассматриваются физические принципы работы таких антенн, конструктивные особенности, а также ключевые параметры, влияющие на эффективность модуляции и устойчивость к электромагнитным помехам. Особое внимание уделено условиям критической связи в резонаторе и способам достижения оптимальной глубины модуляции.

1. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАДИОСИСТЕМ

Рассмотрим относительно новый вид антенн на основе радиопотоники, появившийся лишь в последнее время, но который из-за уровня своей помехо-ЭМИ-устойчивости и других достоинств, несомненно, бу-

дет интенсивно развиваться. Как известно, в антенной технике существует и интенсивно развивается новое направление — радиоантенны на основе так называемых электромагнитных кристаллов с электромагнитными запрещенными зонами (EBG — electromagnetic band gap, по аналогии с принципом работы фотонных кристаллов), которые входят в более широкий класс так называемых метаматериалов или материалов с высоким поверхностным сопротивлением.

Благодаря целому ряду достоинств такие антенны уже реализованы для работы в широких частотных диапазонах от метрового до сантиметрового включительно, как в виде одиночных антенн, так и виде антенных решеток [1–3]. Однако, полностью устранить металл из конструкции таких антенн и антенных решеток радиочастотного диапазона при сохранении высокой эффективности и приемлемых габаритов пока не удалось.

Как известно, одним из основных элементов нанопотоники, помимо фотонных кристаллов, являются высокоэффективные сферические, дисковые либо кольцевые резонаторы на модах шепчущей галереи (Whispering Gallery Mode, WGM), которые обладают сверхвысоким значением добротности в оптическом диапазоне, достигающие порядка 10^{12} и более [1, 4]. Для достижения столь высоких значений добротности необходимо не только выбирать оптический материал с малыми потерями и высоким показателем преломления $n > 1$, но и осуществлять нанополровку его внешней поверхности с требуемой среднеквадратичной шероховатостью в доли нанометра [1, 5]. На основе таких WGM-резонаторов построено большое количество высокочувствительных нанопотонных модуляторов разных типов, с помощью которых осуществляется модуляция радиочастотным напряжением (полем)

^{*} eminin636@gmail.com

[†] sgryz.sut@gmail.com

[‡] rznkfi@net.sut.ru

оптического излучения, в том числе для приемных антенных устройств радиодиапазона [4].

Однако в их конструкции присутствуют металлические электроды, нанесенные на WGM-резонаторы, что значительно снижает их стойкость к ЭМИ [4]. Совсем недавно появился еще один новый класс антенн на основе WGM-резонаторов, т. е. нанофотоники, который из-за сверхвысокого уровня своей помехо-ЭМИ-устойчивости и других достоинств, несомненно, будет интенсивно развиваться.

Это полностью диэлектрические антенны без какого-либо применения металлов в их конструкции, созданные на основе WGM-резонаторов, так называемые диэлектрические резонаторные антенны (ДРА, DRA) [5–8].

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРНЫХ АНТЕНН

Принцип работы таких ДРА антенн заключается в достижении прямого взаимодействия электромагнитных полей разных частотных диапазонов за счет электрооптических коэффициентов материалов, из которых изготовлены WGM резонаторы.

Высокая эффективность такого взаимодействия достигается применением фокусировки (концентрации) электромагнитного поля радиочастотного диапазона с помощью объемного радиочастотного диэлектрического резонатора на помещенный в максимум сверхвысокочастотного (СВЧ, MW) поля WGM-резонаторе. При этом WGM-резонатор должен быть и определенным образом ориентирован в пространстве в плоскости, необходимой для получения высокой степени связи (перекрывания) между MW-полем и полем оптических шепчущих мод внутри WGM-резонатора (рис. 1).

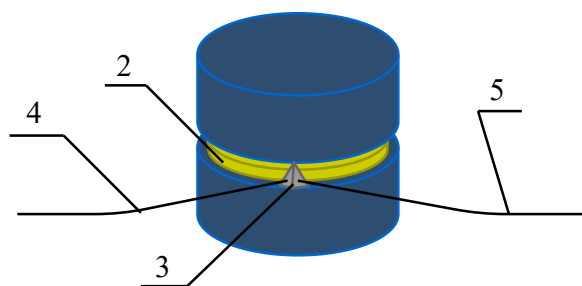


Рис. 1. Диэлектрическая резонаторная антенна с модами шепчущих галерей. На схеме: 2 — WGM-резонатор, 3 — призма для ввода/вывода излучения в WGM-резонатор, 4 — вводное оптическое волокно (ОВ), 5 — выводное оптическое волокно

Благодаря применению диэлектрических радиочастотных резонаторов, выполненных из керамики с высокой ϵ и малыми потерями, степень перекрывания оптических мод (оптического поля ТЕ-поляризации) внешним радиочастотным электромагнитным полем оказывается столь высокой, что отпадает необходимость

в применении металлических электродов, типичных для обычных электрооптических модуляторов.

Уникальные свойства WGM-резонаторов, в том числе, большое время жизни оптических мод (высокие достижимые значения Q) и высокая подповерхностная концентрация мод оптического поля, позволяют осуществлять эффективную радиочастотную модуляцию внешним (сигнальным) MW-полем постоянного оптического излучения, подводимого к ним с помощью ОВ от лазера [5–8]. Такая модуляция, как и в обычных электрооптических модуляторах, осуществляется за счет электрооптического эффекта в материале резонатора WGM (например, выражаемого коэффициентом r_{33} для Z-срезы LiNbO_3). Однако, в отличие от электрооптических модуляторов с интерферометром Маха-Цендера (Mach-Zehnder Interferometer, MZI), здесь применяется эффект самомодуляции за счет интерференции в ОВ прямого и прошедшего через WGM-резонатор оптического сигнала (см. также [8–10]).

Это уменьшает прямые оптические потери примерно на 3 дБ, ввиду отсутствия делителей 1:2, которые обязательны в MZ-интерферометрах и повышает эффективность модуляции. Затем, промодулированный таким образом оптический сигнал, через выходное ОВ поступает на высокочувствительное фотоприемное устройство.

На рис. 2 показана функциональная схема такой ДРА на основе WGM-резонатора.

3. МОДУЛЯЦИЯ И ДЕМОДУЛЯЦИЯ

Когда ТЕ-поляризованное оптическое поле взаимодействует с внешним модулирующим (сигнальным) электрическим полем $E_{MW} = E_m \sin 2\pi f_m t$ амплитудой E_m и частотой f_m , также ориентированное вдоль c -оси для LiNbO_3 , то фазовый сдвиг (набег фазы) в WGM-резонаторе будет:

$$\theta = \frac{2\pi n_e L}{\lambda} + \delta \sin(2\pi f_m t - \phi), \quad (1)$$

где $\phi = \pi f_m n_e L_{\text{eff}}$ и

$$\delta = \frac{\pi E_m L_{\text{eff}}}{2E_\pi L} \text{sinc} \frac{\pi f_m n_e L_{\text{eff}}}{c}, \quad (2)$$

где $L = 2\pi r$ — длина окружности WGM резонатора, n_e — относительный показатель преломления материала WGM резонатора, λ — длина волны оптической несущей, L_{eff} — эффективная длина модуляции WGM-резонатора, где моды MW и оптических полей перекрываются, sinc — кардинальный синус $\frac{\sin x}{x}$, c — скорость света в вакууме.

Полуволновое напряжение E_π определяется как:

$$E_\pi = \frac{\lambda d}{2n_e^3 r_{33} L}, \quad (3)$$

где r_{33} — электрооптический коэффициент для Z-срезы LiNbO_3 , d — толщина микродиска WGM-резонатора.

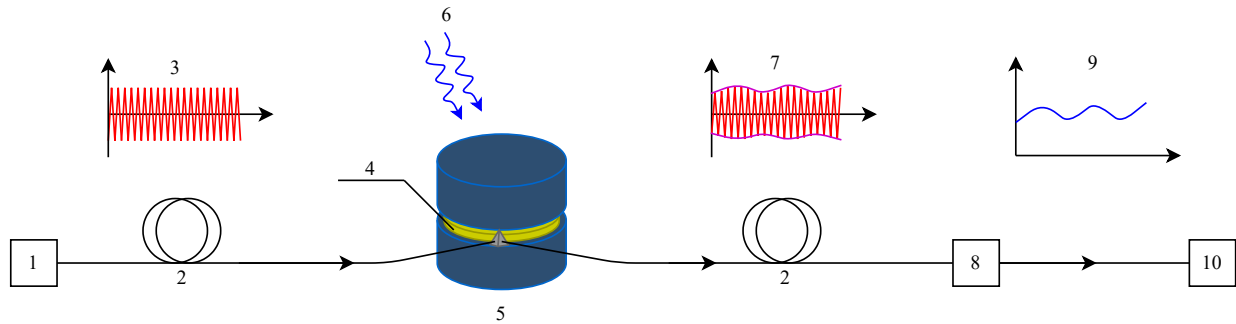


Рис. 2. Функциональная схема регистрации MW-сигнала с диэлектрической резонансной антенной и волоконно-оптической линией связи. На схеме: 1 — лазер, 2 — оптическое волокно, 3 — оптическая несущая, 4 — WGM-резонатор, 5 — диэлектрическая резонансная антенна, 6 — MW-сигнал, 7 — промодулированная оптическая несущая, 8 — фотодетектор, 9 — демодулированный сигнал, 10 — система обработки

Когда частота внешнего MW-поля f_m , практически совпадает с частотой одного из резонансов WGM-резонатора, (находится на скате резонансной кривой)

$$f_{FSR} = \frac{1}{\tau_{WGM}} = \frac{c}{2\pi R n_e}, \quad (4)$$

где τ_{WGM} — время циркуляции оптической моды в нем, R — его радиус, то осуществляется эффективная модуляция по интенсивности мощности оптического сигнала при условии, что с WGM резонатор имеет критическую связь с ОВ, соответствующая 25 % от пика коэффициента передачи ВОЛС (рисунок 3).

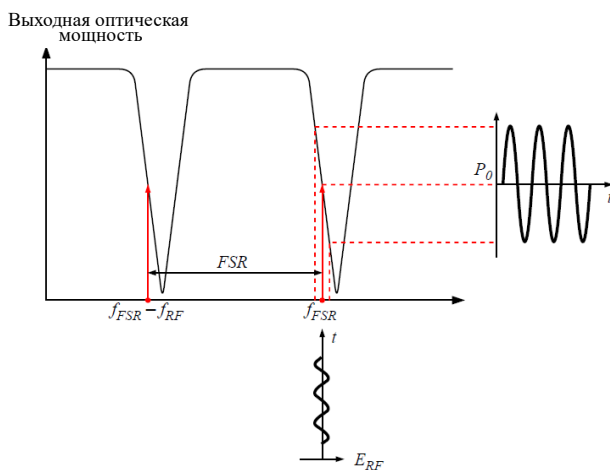


Рис. 3. Принцип модуляции внешним радиочастотным полем оптических мод в WGM-резонаторе

Оптимальная эффективность модуляции осуществляется, когда $L_{eff} = L/2$, при которой глубина модуляции m достигает значения

$$m = \frac{9F\delta}{2\pi\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где F — коэффициент сужения полосы ($\Delta f = f_{FSR}/F$).

При этом отношение сигнал/шум SNR на выходе ДРА определяется как

$$SNR = \frac{(mSP_0)^2}{2\sigma_T^2}, \quad (6)$$

где S — токовая чувствительность фотоприемника, А/Вт P_0 — средняя оптическая мощность, Вт, σ_T — дисперсия шумового тока, которая включает в себя вклад от теплового и дробового шума фотоприемников и лазеров.

Минимальную обнаруживаемую мощность электромагнитного поля в открытом пространстве P_{min} для ДРА можно оценить по формуле

$$P_{min} = \frac{E_{min}^2}{\beta \frac{\epsilon_{mod}}{\epsilon_{DRA}}} \cdot \frac{A_e}{Z_0}, \quad (7)$$

где A_e — поперечное сечение ДРА, Z_0 — импеданс открытого пространства, β — коэффициент концентрации поля, определяемый как отношение интенсивностей электромагнитного поля внутри и вне ДРА, ϵ_{mod} , ϵ_{DRA} — относительные диэлектрические проницаемости материалов WGM-резонатора и ДРА соответственно.

Была достигнута минимальная обнаруживаемая мощность — 83 дБм/Гц, что соответствует минимальной спектральной напряженности электромагнитного MW-поля порядка 4.3×10^{-3} Вт/м·√Гц.

Следует отметить высокую степень линейности выходной характеристики во всем диапазоне измеренной напряженности MW-поля, что говорит о высоком значении динамического диапазона.

Вариант ДРА с MW-резонатором на частоту 6.54 ГГц был изготовлен из керамики BaTiO₃ с высокой относительной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \approx 100$) и имел диаметр 8 мм при высоте цилиндра 7.2 мм. WGM-резонатор в виде диска, помещаемый коаксиально в максимум поля в MW-резонаторе имел радиус 3.2 мм и был изготовлен из Z-среза LiNbO₃.

При собственном относительном шуме гетеролазера $RIN = -134$ дБм/Гц (94 дБм в полосе 10 кГц)

и фотоприемника типа New Focus 1544A (140 дБм/Гц) была получена чувствительность 72 дБ, что соответствует минимальной обнаруживаемой напряженности MW-поля 2.2×10^{-4} В/м·√Гц и чувствительности порядка 110 дБм/Гц (рис. 4).

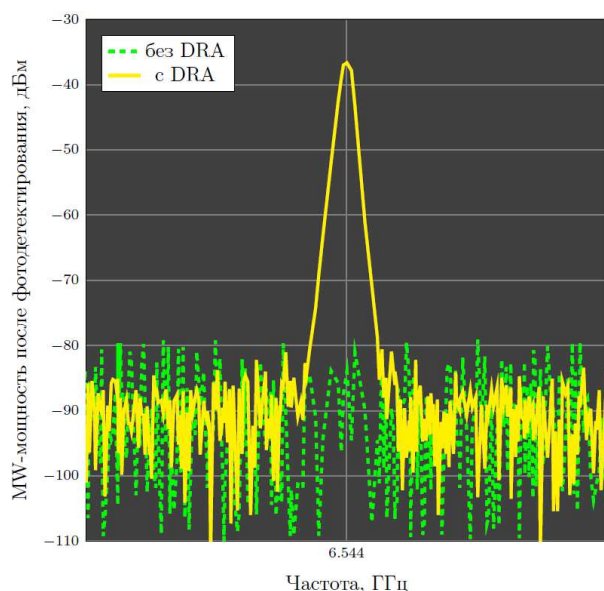


Рис. 4. Радиочастотный сигнал на выходе ДРА после фотодетектирования

Также представляет интерес предельная стойкость ДРА к электромагнитным импульсам [11].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Оценка предельного порога стойкости к ЭМИ для ДРА, основанная на расчете термического нагрева за счет диэлектрических потерь в радиочастотном резонаторе ДРА и оптическом WGM резонаторе, дает значение энергии импульса порядка 10^3 мДж/см² для импульса длительностью 1 мкс, что близко к электрической прочности воздуха и на несколько порядков превышает порог разрушения современных электронных схем.

Таким образом, были реализованы полностью диэлектрические (практически без металла в конструкции) миниатюрные широкополосные приемные антенны, обладающие высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном. Они имеют высокую помехо-ЭМИ-устойчивость за счет гальванической развязки, отсутствия металла и удаленности от антенны (разнесенности) электроники (оптоэлектроники), а также отсутствия относительно близких по частоте паразитных каналов приема.

Малые габариты и масса, высокий динамический диапазон, полное отсутствие металла и разнесение (подключение) их к оптоэлектронной аппаратуре, а затем и к электронной аппаратуре для последующей

цифровой обработки с помощью ОВ, позволяет создавать системы измерения характеристик излучения антенных решеток с минимальными искажениями, в том числе крупноапертурных высокопотенциальных АФАР.

Кратко перечислим основные достоинства антенн на основе WGM-резонаторов:

- Повышение стойкости к высокопотенциальным импульсным помехам и ЭМИ за счет устранения металла из конструкции антенн и уменьшения числа внеполосовых каналов приема.
- Достижение высокой широкополосности.
- Снижение радиолокационной заметности за счет уменьшения ЭПР.
- Возможность значительного снижения металлоемкости антенн вплоть до практически полного исключения металла из некоторых типов излучателей и антенных решеток.
- Реализация распределенности и конформности антенных решеток.

Из недостатков можно отметить некоторое повышение, по сравнению со стандартными, сложности расчетов и изготовления антенн на основе EBG-структур.

Для расчета запрещенных зон EBG-структур также как и фотонных кристаллов, применяется теория малых возмущений и численные методы, причем, в основном используются методы конечных разностей во временной области FDTD.

Однако, несмотря на то, что родоначальником EBG-структур является нанофотоника (т. е. структуры, реализуемые с помощью нанотехнологии), для реализации таких антенн в абсолютном большинстве случаев применений в радиотехнике, вполне достаточно точности и разрешения обычной технологии изготовления микроразмерных MW-печатных плат.

Из недостатков антенн на основе WGM-резонаторов можно отметить пока невозможность работы в передающем режиме и некоторое повышение, по сравнению со стандартными, сложности расчетов и изготовления антенн.

Следует отметить, что опытные образцы антенн нового типа на основе EBG-структур (метаматериалов) и WGM-резонаторов наиболее полно раскрывают свои достоинства при интегрировании с аппаратурой на основе аналоговой нанофотоники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что диэлектрические резонаторные антенны на основе WGM-резонаторов представляют собой перспективный класс радиопотонных устройств, обладающих рядом уникальных преимуществ. Полное отсутствие металлических элементов в конструкции обеспечивает высокую устойчивость

к ЭМИ, что делает такие антенны особенно привлекательными для использования в условиях жесткой электромагнитной обстановки. Высокая добротность WGM-резонаторов и возможность эффективного перекрытия радиочастотного и оптического полей открывают путь к созданию новых типов модуляторов и приём-

ных систем. Дальнейшее развитие этого направления связано с оптимизацией геометрии и материалов резонаторов, а также с улучшением методов согласования и ввода-вывода оптического сигнала, что позволит расширить функциональность и повысить чувствительность подобных антенн.

-
- [1] *Davydov V.V., Reznikov B.K., Dudkin V.I.* // *Energies*. **16**, N 3. 1040 (2023).
- [2] *Петров А.А., Залетов Д.В., Давыдов В.В., Шаповалов Д.В.* // *Радиотехника и электроника*. **66**, № 3. 285 (2021).
- [3] *Davydov R.V., Savelev I.K., Lenets V.A.* et al. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2017. **10531 LNCS**, P. 177-183
- [4] *Ermolaev A.N., Krishpents G.P., Davydov V.V., Vysotskiy M.G.* // *Journal of Physics: Conference Series*. **741**, N 1. 012171 (2016).
- [5] *Moroz, A.V., Davydov, V.V.* // *Journal of Physics Conference Series*. **1368**(2). 022024 (2019).
- [6] *Moroz, A.V., Davydov, V.V.* // *Journal of Physics Conference Series*. **1410**(1). 012212 (2019).
- [7] *Moroz A.V., Davydov V.V., Malanin K.Y.* et al. // *Journal of Physics Conference Series*. **1400**(4). 044009 (2019).
- [8] *Moroz A.V., Davydov V.V., Malanin K.Y., Krasnov A.A.* В сборнике: *Proceedings of the 2019 Antennas Design and Measurement International Conference, ADMInC 2019*. С. 114-116. (2019).
- [9] *Fadeenko V.B., Pchelkin G.A., Beloshapkina O.O., Rud V.Y.* // *Journal of Physics: Conference Series*. vol. **1410**(1). 012238 (2019).
- [10] *Зайцев Д.Ф.* // *Антенны*. Вып. 9. 60 (2007).
- [11] *Hsu R.C.J., Ayazi A., Houshmand B., Jalali B.* // *Proc. 2007 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.* 221 (2007).

Dielectric Receiving Antenna with Optical Signal Readout Based on a Whispering-Gallery Mode Resonator

E. S. Minin^a, S. S. Gryzulev^b, B. K. Reznikov^c, N. Yu. Kolybelnikov, E. V. Polyakova, T. A. Kotov

*Department of Optical and Quantum Communication Systems, Faculty of Infocommunication Networks and Systems,
The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunication
Saint Petersburg 193232, Russia*

E-mail: ^aeminin636@gmail.com, ^bsgryz.sut@gmail.com, ^crnkff@net.sut.ru,

This article explores a novel type of antenna — dielectric resonator antennas (DRAs) based on whispering-gallery-mode (WGM) nanophotonic resonators, which demonstrate exceptionally high resistance to electromagnetic interference (EMI) and are entirely free from metallic components. Due to the ultra-high quality factors of WGM resonators and the effective overlap between radio-frequency and optical fields inside the dielectric resonator, optical signal modulation by an RF field is achieved without the use of metal electrodes. The paper discusses the operating principles, modulation parameters, and implementation schemes of such antennas, highlighting their potential for the development of highly sensitive, compact, and EMI-immune next-generation radio-photon antenna systems.

PACS: 42.79.Sz, 07.50.-e, 07.50.Qx.

Keywords: dielectric antenna, optical readout, whispering-gallery mode resonator, receiving antenna, radio-frequency signal, electromagnetic radiation, photonic devices.

Received 16 June 2025.

Сведения об авторах

- Минин Евгений Сергеевич — студент факультета инфокоммуникационных сетей и систем; тел.: (812) 305-12-56, доб. 2076, e-mail: eminin636@gmail.com.
- Грызюлев Сергей Сергеевич — студент факультета инфокоммуникационных сетей и систем; тел.: (812) 305-12-56, доб. 2076, e-mail: sgryz.sut@gmail.com.
- Резников Богдан Константинович — аспирант, ст. преподаватель; тел.: (812) 305-12-56, доб. 2076, e-mail: gnkff@net.sut.ru.
- Колыбельников Николай Юрьевич — студент факультета инфокоммуникационных сетей и систем; тел.: (812) 305-12-56, доб. 2076, e-mail: ya.nikolai-kolyb@yandex.ru.
- Полякова Елена Валериевна — ст. преподаватель; тел.: (812) 305-12-56, доб. 2076, e-mail: e.v@inbox.ru.
- Котов Тимофей Алексеевич — студент факультета инфокоммуникационных сетей и систем; тел.: (812) 305-12-56, доб. 2076, e-mail: kotoff201211@gmail.com.