

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.341

О направленном излучении сверхкоротких электромагнитных импульсов и фрактальной геометрии пространства-времени

^{1,2}Потапов А.А., ³Менькова Е.Р.

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская Федерация

²Джинанский университет, Совместная китайско-российская лаборатория информационных технологий и фрактальной обработки сигналов, <https://jnu.edu.cn/>
Гуанчжоу 510632, Китай

³Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, <http://www.vniiofi.ru/>
Москва 119361, Российская Федерация

E-mail: potapov@cplire.ru, menkova@vniiofi.ru

Поступила 26.08.2023, рецензирована 01.09.2023, принята 08.09.2023, опубликована 06.12.2023.

Аннотация: Теоретические и экспериментальные исследования распространения сверхкоротких электромагнитных импульсов (СК ЭМИ) необходимы для разработки новых технологий создания современной специальной техники. Рассмотрен аналитический метод расчета полей от бегущих волн тока с учетом отражения от изломов, учитывающий перераспределение токов в проводках за счет потери энергии излучения от изломов. Представлены расчеты V-образной антенны, расчет поля излучения системы рупоров, а также расчет импульсного излучения антенны с рефлектором. Экспериментальные исследования распространения СК ЭМИ, проведенные на базе разработанной С.А. Подосеновым теории, являются основой для создания современных радиотехнических комплексов. Одновременно введены характерные понятия основы фрактальной геометрии пространства-времени детерминированных структур.

Ключевые слова: сверхкороткие импульсы, антенные структуры, фрактал, пространство-время, новые технологии

УДК 530.1+621.396

Благодарности: Авторы выражают свою признательность сотрудникам лаборатории генерирования и измерения параметров электромагнитных импульсов ФГБУ "ВНИИОФИ" К.Ю. Сахарову, А.В. Сухову, О.В. Михееву и В.А. Туркину за участие в подготовке статьи к печати, внимание, обсуждение и поддержку.

Для цитирования: Потапов А.А., Менькова Е.Р. О направленном излучении сверхкоротких электромагнитных импульсов и фрактальной геометрии пространства-времени. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(4):341-354. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.341.

About direct radiation of ultrashort electromagnetic pulses and fractal space-time geometry

Alexander A. Potapov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, <http://www.cplire.ru/>
Moscow 125009, Russian Federation

Jinan University, JNU-IREE RAS Joint Laboratory of Information Technology and Fractal Processing of Signals, <https://jnu.edu.cn/>
Guangzhou 510632, China

E-mail: potapov@cplire.ru

Elena R. Men'kova

All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, <http://www.vniiofi.ru/>

Moscow 119361, Russian Federation

E-mail: menkova@vniiofi.ru

Received August 26, 2023, peer-reviewed September 01, 2023, accepted September 08, 2023, published December 6, 2023.

Abstract: Theoretical and experimental investigations of propagation of ultrashort electromagnetic pulses (US EMP) are needed to develop new technologies of creation of modern special engineering. The analytical method of field calculation of travelling antenna waves taking into account reflection of fracture and redistribution of currents in wires because of losses of radiation energy from fractures is considered. The calculations of V-antenna, the field of radiation of a horn system and the pulse radiation of the antenna with a reflector are presented. Experimental investigations of UWB EMP propagation carried out on the basis of the theory developed by S.A. Podosenov are the base of creation of modern radiotechnical complexes. Simultaneously the main conceptions of space-time fractal geometry of deterministic structures are introduced.

Keywords: ultrashort pulses, antenna structures, fractal, space-time, new technologies

UDC 530.1+621.396

Acknowledgments: The authors are grateful to K.Yu. Sakharov, A.V. Sukhov, O.V. Mikheev, and V.A. Turkin of the laboratory of generation and measurement of parameters of electromagnetic pulses FGBU "VNIIOFI" for a number of usual conversations and helpful comments.

For citation: Alexander A. Potapov, Elena R. Men'kova. About direct radiation of ultrashort electromagnetic pulses and fractal space-time geometry. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(4):341-354e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.341.

*Посвящается светлой памяти
Станислава Александровича Подосенова
(1.09.1937 – 1.03.2022),
внесшего большой вклад в развитие
современной и классической теории излучения
импульсных электромагнитных полей.*

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (342)
 2. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ОТ БЕГУЩИХ ВОЛН ТОКОВ С УЧЕТОМ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ИЗЛОМОВ (344)
 3. РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫХ БАЗИСНЫХ СТРУКТУР (345)
 - 3.1. РАСЧЕТ V-ОБРАЗНОЙ АНТЕННЫ (345)
 - 3.2. РАСЧЕТ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ РУПОРОВ (346)
 - 3.3. РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ С РЕФЛЕКТОРОМ (347)
 4. О ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СТРУКТУР (348)
 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (350)
- ЛИТЕРАТУРА (350)

1. ВВЕДЕНИЕ

Эта работа посвящается светлой памяти к.ф.-м.н. Станислава Александровича Подосенова

(1.09.1937 – 1.03.2022), выпускника физфака МГУ им. М.В. Ломоносова 1963 г. (кафедра статистической физики и квантовой механики, зав. кафедрой академик Н.Н. Боголюбов), специальность физик-теоретик, лауреата премии Правительства РФ 2002 г. в области науки и техники, внесшего большой вклад в развитие современной и классической теории излучения импульсных электромагнитных полей, признанной мировым сообществом. (Отметим, что С.А. Подосенов в 1972 году в Университете дружбы народов, на кафедре теоретической физики, руководимой проф. Я.П. Терлецким, защитил кандидатскую диссертацию по специальности теоретическая и математическая физика на тему "Релятивистская механика деформируемой среды в тетрадной формулировке". Диссертация связана с тематикой научной школы известных профессоров МГУ

Д.Д. Иваненко, В.И. Родичева и академика Л.И. Седова).

Сверхкороткие импульсы (СК) электромагнитного поля имеют широкое практическое применение в радиофизике, радиолокации, метрологии, ядерной физике (для исследования взрывов), антенной технике, медицине и т.п.

В радиолокации СК импульсы электромагнитного поля используются для передачи информации и энергии. Передача информации с помощью СК ЭМИ, осуществляемая в течение короткого интервала времени, позволяет уменьшить мощность средств радиосвязи, их габариты и массу и, как следствие, стоимость. Использование СК ЭМИ для передачи информации уменьшает вредное воздействие электромагнитного поля на окружающую среду. С помощью отраженных СК ЭМИ можно передавать информацию о размерах, расположении и структуре объекта, что позволяет быстро и с достаточной степенью точности определить необходимые характеристики цели [1–5]. При длительности импульса 10^{-10} с может быть достигнуто разрешение в несколько сантиметров.

СК импульсы электромагнитного поля нашли широкое практическое применение в области обеспечения единства измерений – государственных поверочных схемах, государственных специальных эталонах, образцовых и рабочих средствах измерения и эталонных установках [6–9].

С.А. Подосенов начал работать в лаборатории генерирования и измерения параметров электромагнитных импульсов ВНИИОФИ в 1989 г. совместно с проф. А.А. Соколовым. Задача создания теории импульсного излучения из полеобразующих систем была поставлена проф. А.А. Соколовым. При помощи формул, выведенных С.А. Подосеновым, можно вычислить поле излучения, применяя компьютеры, не требующие больших мощностей [10].

В лаборатории генерирования и измерения параметров электромагнитных импульсов ВНИИОФИ успешно проводятся работы по созданию новых измерительных технологий и применению СК ЭМИ для исследования физических процессов в неоднородных средах

[11–47], а также – импульсного взаимодействия полосковых линий в печатных платах [12].

Измерительные технологии успешно применяются в борьбе с электромагнитным терроризмом [17]. Важное значение имеют экспериментальные исследования воздействия СК ЭМИ на систему контроля доступа в помещения [20,39]. Создан измерительный комплекс для исследования электромагнитной обстановки при распространении СК ЭМИ в помещениях здания [41]. Методы и средства мониторинга электромагнитных излучений в сверхкороткоимпульсном диапазоне длительностей [45,46] используются для исследования устойчивости систем видеонаблюдения к воздействию мощных СК ЭМИ [43], в частности – при исследовании функционирования устройств типовой комплексной системы безопасности [44].

Сверхкороткоимпульсные эталонные излучатели используются для метрологического обеспечения телекоммуникационных технологий [22]. Разрабатываются средства измерений для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию СК ЭМИ [26], а также проводятся исследования функционирования персональных компьютеров в условиях воздействия СК ЭМИ [30]. При создании средств обеспечения стойкости информационных систем к воздействию сверхширокополосных электромагнитных излучений (СПП ЭМИ), важное значение имеют исследования функционирования локальных вычислительных сетей в условиях воздействия СК ЭМИ [33]. Исследование распространения СК ЭМИ имеет важное значение при оценке стойкости бортовых вычислительных машин в условиях воздействия СК электромагнитных полей [38].

Наряду с этим в лаборатории генерирования и измерения параметров электромагнитных импульсов ВНИИОФИ успешно проводятся работы по созданию новых методов и средств измерений параметров СК ЭМИ в пикосекундном диапазоне [49]. На базе использования СК ЭМИ во ВНИИОФИ создана измерительная система для экспресс-диагностики электромагнитных параметров радиопоглощающих материалов в диапазоне частот 0.1...4.0 ГГц, имеющая большое практическое значение [49].

СК импульсы электромагнитного поля находят практическое применение в медицине. Использование электромагнитного излучения способствует эффективной терапии при лечении онкологических заболеваний. Исследовано действие сверхширокополосного импульсно-периодического СВЧ-излучения на опухоли мышей *in vivo* [50]. Использование такого излучения в комбинированной противоопухолевой терапии позволило получить торможение скорости роста карциномы легкого Льюис на 70–80% по сравнению с действием одного только химиопрепарата (циклофосфана).

Разработанные миниатюрные приборы, работающие на основе СК ЭМИ, позволяют бесконтактно на расстоянии контролировать пульсации внутренних органов человека, что существенно улучшает диагностику заболеваний.

Такие импульсы могут эффективно применяться для передачи энергии и информации. Это позволяет качественно улучшить технические и экологические характеристики радиоэлектронных приборов и снизить их стоимость. Передача информации при помощи СК ЭМИ энергетически выгодна по сравнению с существующими методами модуляции радиоволн, так как энергия излучается в течение очень коротких временных интервалов.

Цель данной работы – кратко показать созданный С.А. Подосеновым аналитический аппарат, на основе которого можно производить расчеты полей от бегущих волн токов с учетом отражения от изломов, и основы фрактальной геометрии пространства-времени детерминированных структур, созданной совместно с проф. А.А. Потаповым.

2. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ОТ БЕГУЩИХ ВОЛН ТОКОВ С УЧЕТОМ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ИЗЛОМОВ

При создании теории импульсного излучения из полеобразующих систем С.А. Подосенов получил систему интегро-дифференциальных уравнений для плотностей зарядов и токов заряженных металлических тел и проводов, находящихся во внешнем неоднородном и нестационарном электромагнитном поле. Созданный им новый простой метод расчета импульсного излучения из временной области

основан на непосредственном нахождении тензора электромагнитного поля от бегущих волн тока произвольной формы.

Изломы линий являются вторичными источниками излучения анизотропных ТЕМ волн. Потеря энергии за счет излучения должна изменять амплитуду и форму сигнала, проходящего через изломы линии передачи. Метод заданных токов был модифицирован с учетом коэффициентов отражения от изломов. Закругленные провода заменены изломами (Рис. 1).

Коэффициенты отражения и прохождения импульсов тока от изломов линий, зависящие от параметров импульсов и времени их прохождения через изломы, позволяют определить форму отраженных и проходящих импульсов по сравнению с падающими.

Предложенный С.А. Подосеновым простой способ аналитического расчета излучения от бегущих волн тока, распространяющегося по тонким криволинейным проводам, может быть использован для расчета излучения V-образной и линейной антенн и антенны, составленной из прямолинейных отрезков.

Этот новый аналитический метод расчета полей от бегущих волн токов с учетом отражения от изломов учитывает перераспределение токов

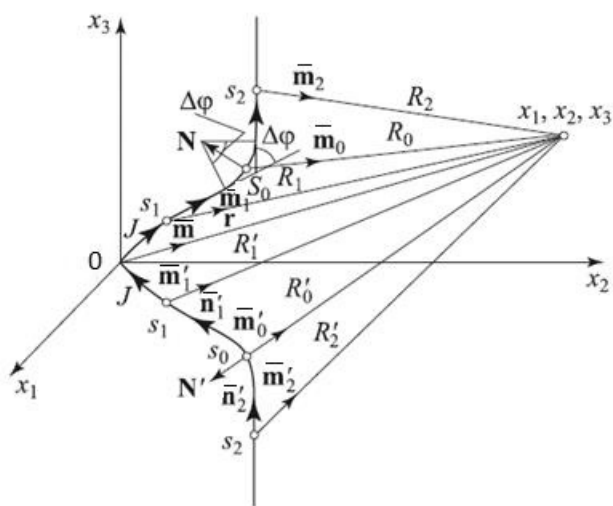


Рис. 1. Геометрия симметричных участков с изломами. \vec{m}_0 – единичный вектор, направленный от излома в точку наблюдения, R_0 – расстояние от излома до точки наблюдения, s_1 и s_2 – расстояния от точки возбуждения антенны вдоль провода до точек 1 и 2, R_1 и R_2 – расстояния от точек 1 и 2 до точки наблюдения.

в проводах за счет потери энергии излучения от изломов. Установлено соотношение между коэффициентом прохождения γ и отражения β и углами изломов и геометрией провода. Поле излучения от углов описывается сферическими ТЕМ волнами с центрами на изломе. Предложенный метод расчета близко совпадает с экспериментом.

Ниже представлены основные формулы для расчета электрических и магнитных полей излучения при известных коэффициентах отражения β и прохождения γ через изломы в векторной форме [1]:

$$\begin{aligned} \vec{E} = & \frac{\eta_0}{4\pi} \left\{ \gamma \cdot \frac{J(t-s_0/c-R_0/c)}{R_0} \left(\frac{\vec{n}_1 - \vec{m}_0}{1 - \vec{m}_0 \cdot \vec{n}_1} - \frac{\vec{n}_2 - \vec{m}_0}{1 - \vec{m}_0 \cdot \vec{n}_2} \right) + \right. \\ & + \beta \cdot \frac{J(t-s_0/c-R_0/c)}{R_0} \left(\frac{\vec{n}_1 - \vec{m}_0}{1 - \vec{m}_0 \cdot \vec{n}_1} + \frac{\vec{n}_1 + \vec{m}_0}{1 + \vec{m}_0 \cdot \vec{n}_1} \right) + \\ & + \gamma \cdot \frac{J(t-s_2/c-R_2/c)}{R_2} \frac{\vec{n}_2 - \vec{m}_2}{1 - \vec{m}_2 \cdot \vec{n}_2} - \frac{J(t-s_1/c-R_1/c)}{R_1} \frac{\vec{n}_1 - \vec{m}_1}{1 - \vec{m}_1 \cdot \vec{n}_1} + \\ & + \gamma \cdot \frac{J(t-s_0/c-R'_0/c)}{R'_0} \left(\frac{\vec{m}'_0 + \vec{n}'_1}{1 + \vec{m}'_0 \cdot \vec{n}'_1} - \frac{\vec{m}'_0 + \vec{n}'_2}{1 + \vec{m}'_0 \cdot \vec{n}'_2} \right) + \\ & + \beta \cdot \frac{J(t-s_0/c-R'_0/c)}{R'_0} \left(\frac{\vec{m}'_0 + \vec{n}'_1}{1 + \vec{m}'_0 \cdot \vec{n}'_1} + \frac{\vec{m}'_0 - \vec{n}'_1}{1 - \vec{m}'_0 \cdot \vec{n}'_1} \right) + \\ & \left. + \gamma \cdot \frac{J(t-s_2/c-R'_2/c)}{R'_2} \frac{\vec{n}'_2 + \vec{m}'_2}{1 + \vec{m}'_2 \cdot \vec{n}'_2} - \frac{J(t-s_1/c-R'_1/c)}{R'_1} \frac{\vec{n}'_1 + \vec{m}'_1}{1 + \vec{m}'_1 \cdot \vec{n}'_1} \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{H} = & \frac{1}{4\pi} \left\{ \gamma \cdot \frac{J(t-s_0/c-R_0/c)}{R_0} \left(\frac{\vec{m}_0 \times \vec{n}_1}{1 - \vec{m}_0 \cdot \vec{n}_1} - \frac{\vec{m}_0 \times \vec{n}_2}{1 - \vec{m}_0 \cdot \vec{n}_2} \right) + \right. \\ & + \beta \cdot \frac{J(t-s_0/c-R_0/c)}{R_0} \left(\frac{\vec{m}_0 \times \vec{n}_1}{1 - \vec{m}_0 \cdot \vec{n}_1} + \frac{\vec{m}_0 \times \vec{n}_1}{1 + \vec{m}_0 \cdot \vec{n}_1} \right) + \\ & + \gamma \cdot \frac{J(t-s_2/c-R_2/c)}{R_2} \frac{\vec{m}_2 \times \vec{n}_2}{1 - \vec{m}_2 \cdot \vec{n}_2} - \frac{J(t-s_1/c-R_1/c)}{R_1} \frac{\vec{m}_1 \times \vec{n}_1}{1 - \vec{m}_1 \cdot \vec{n}_1} + \\ & + \gamma \cdot \frac{J(t-s_0/c-R'_0/c)}{R'_0} \left(\frac{\vec{m}'_0 \times \vec{n}'_1}{1 + \vec{m}'_0 \cdot \vec{n}'_1} - \frac{\vec{m}'_0 \times \vec{n}'_2}{1 + \vec{m}'_0 \cdot \vec{n}'_2} \right) + \\ & + \beta \cdot \frac{J(t-s_0/c-R'_0/c)}{R'_0} \left(\frac{\vec{m}'_0 \times \vec{n}'_1}{1 + \vec{m}'_0 \cdot \vec{n}'_1} + \frac{\vec{m}'_0 \times \vec{n}'_1}{1 - \vec{m}'_0 \cdot \vec{n}'_1} \right) + \\ & \left. + \gamma \cdot \frac{J(t-s_2/c-R'_2/c)}{R'_2} \frac{\vec{m}'_2 \times \vec{n}'_2}{1 + \vec{m}'_2 \cdot \vec{n}'_2} - \frac{J(t-s_1/c-R'_1/c)}{R'_1} \frac{\vec{m}'_1 \times \vec{n}'_1}{1 + \vec{m}'_1 \cdot \vec{n}'_1} \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\eta_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ – волновой импеданс вакуума [51-57].

3. РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫХ БАЗИСНЫХ СТРУКТУР

На основе предложенного С.А. Подосеновым метода рассчитано импульсное излучение базовых для излучения СК ЭМИ полеобразующих систем: V-образной антенны (Рис. 2а) [58], поля излучения системы рупоров (Рис. 2б) [59], а также – импульсное излучение антенны с рефлектором (Рис. 2в) [60].

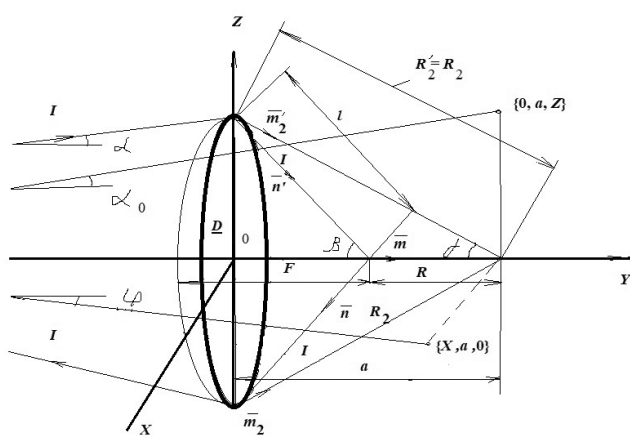
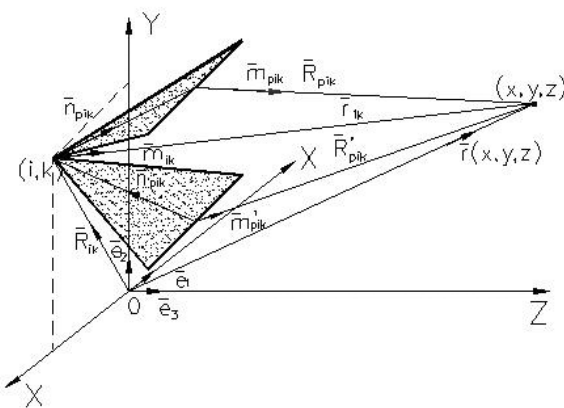
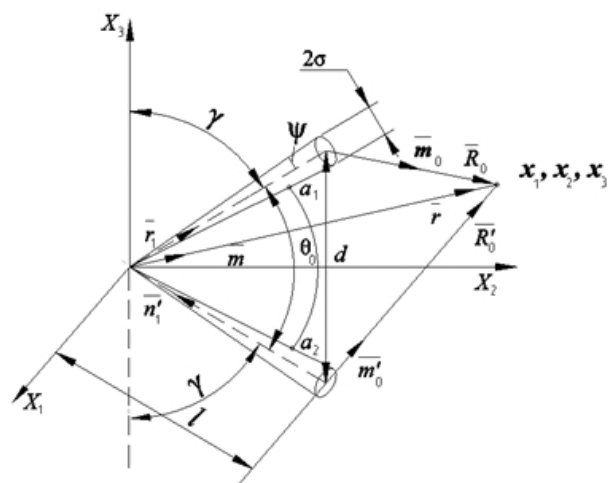


Рис. 2. Расчеты конкретных антенных базисных структур: V-образная антенна (а), излучение системы рупоров (б), отображение V-образной антенны в рефлекторе (в).

3.1. РАСЧЕТ V-ОБРАЗНОЙ АНТЕННЫ

Решение задач, связанных с исследованием нестационарного излучения, необходимо для обеспечения защиты электронной аппаратуры

от нестационарных электромагнитных полей. Необходимо исследовать поля от несинусоидальных волн тока в ближней зоне. V -образная антенна излучает сферическую электромагнитную волну и имеет высокую чувствительность и широкополосность, что позволяет измерять наносекундные ЭМИ.

Рассмотрим излучение V -образной антенны, образованной двумя тонкими конусами, выходящими из одной точки, с углом между осями θ_0 (Рис. 2а).

Исследуем два случая:

а) Антенна бесконечна

V -образная бесконечная антенна излучает ТЕМ-волну. Формулы для расчета полей излучения в векторной форме имеют вид [1,58]:

$$\vec{E} = -\frac{\eta_0}{4\pi} \frac{J(t-r/c)}{r} \left(\frac{\vec{n}-\vec{m}}{1-\vec{m}\cdot\vec{n}} + \frac{\vec{n}'+\vec{m}}{1+\vec{m}\cdot\vec{n}'} \right), \quad (3)$$

$$\vec{H} = -\frac{1}{4\pi} \frac{J(t-r/c)}{r} \left(\frac{\vec{m}\times\vec{n}}{1-\vec{m}\cdot\vec{n}} + \frac{\vec{m}\times\vec{n}'}{1+\vec{m}\cdot\vec{n}'} \right), \quad (4)$$

где \vec{m} и \vec{n} – единичные векторы, t – время, c – скорость света в вакууме, J – значение тока.

б) Антенна конечна

Пусть V -образная антенна конечной длины имеет плечо l . Будем считать, что ток в такой антенне распространяется по линии с изломом на конце на 180° и течет далее к нагрузке. Также будем считать, что антенна согласована с нагрузкой генератора и будем учитывать отражения только один раз.

В векторной форме формулы для расчета полей излучения можно представить следующим образом [1,58]:

$$\begin{aligned} \vec{E} = & -\frac{\eta_0}{4\pi} \left\{ \frac{J(t-r/c)}{r} \left(\frac{\vec{n}_1-\vec{m}}{1-\vec{n}_1\cdot\vec{m}} + \frac{\vec{n}'_1+\vec{m}}{1+\vec{n}'_1\cdot\vec{m}} \right) + \right. \\ & + \frac{J(t-2l/c-r/c)}{r} \left(\frac{\vec{n}_1+\vec{m}}{1+\vec{n}_1\cdot\vec{m}} + \frac{\vec{n}'_1-\vec{m}}{1-\vec{n}'_1\cdot\vec{m}} \right) - \\ & - \frac{J(t-l/c-R_0/c)}{R_0} \left(\frac{\vec{n}_1-\vec{m}_0}{1-\vec{n}_1\cdot\vec{m}_0} + \frac{\vec{n}_1+\vec{m}_0}{1+\vec{n}_1\cdot\vec{m}_0} \right) - \\ & \left. - \frac{J(t-l/c-R'_0/c)}{R'_0} \left(\frac{\vec{n}'_1-\vec{m}'_0}{1-\vec{n}'_1\cdot\vec{m}'_0} + \frac{\vec{n}'_1+\vec{m}'_0}{1+\vec{n}'_1\cdot\vec{m}'_0} \right) \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{H} = & -\frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{J(t-r/c)}{r} \left(\frac{\vec{m}\times\vec{n}_1}{1-\vec{m}\cdot\vec{n}_1} + \frac{\vec{m}\times\vec{n}'_1}{1+\vec{m}\cdot\vec{n}'_1} \right) + \right. \\ & + \frac{J(t-2l/c-r/c)}{r} \left(\frac{\vec{m}\times\vec{n}_1}{1+\vec{m}\cdot\vec{n}_1} + \frac{\vec{m}\times\vec{n}'_1}{1-\vec{m}\cdot\vec{n}'_1} \right) - \\ & - \frac{2J(t-l/c-R_0/c)}{R_0} \left(\frac{\vec{m}_0\times\vec{n}_1}{(1-\vec{n}_1\cdot\vec{m}_0)(1+\vec{n}_1\cdot\vec{m}_0)} \right) - \\ & \left. - \frac{2J(t-l/c-R'_0/c)}{R'_0} \left(\frac{\vec{m}'_0\times\vec{n}'_1}{(1-\vec{n}'_1\cdot\vec{m}'_0)(1+\vec{n}'_1\cdot\vec{m}'_0)} \right) \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

Здесь $2l/c$ – сдвиг фаз сферических волн, равный времени распространения взаимодействия до концов антенны и обратно. Из формул (5) и (6) следует, что излучение содержит сумму четырех сферических волн, первые две из которых выходят из центра со сдвигом фаз на $2l/c$, равным времени распространения взаимодействия до концов антенны и обратно. Две другие волны образуются от концов антенны в момент прихода сигнала из точки возбуждения [55–58].

3.2. РАСЧЕТ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ РУПОРОВ
Зная наведенный на поверхности рупора электрический ток, можно определить поле излучения, создаваемое рупором.

Нахождение во временной области поля излучения рупора сводится к теории излучения проволочных антенн бегущей волны. При этом форма антенн может быть произвольной. На Рис. 2б схематически представлена излучающая система, расчет поля излучения которой базируется на теории, развитой в [59].

Пусть в плоскости YOX заданы координаты точек возбуждения системы рупоров. $R'_{i,k}$ – радиус-вектор, соединяющий начало координат с точкой возбуждения ячейки с номерами $\{i, k\}$. Заменяем каждый рупор на N V -образных антенн и пусть p – номер антенны в ячейке $\{i, k\}$. Электрическое поле излучения от V -образной антенны с номером p , находящейся в рупоре с номерами $\{i, k\}$, в точке наблюдения $\{x, y, z\}$ в момент времени t имеет вид [1,59]:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{p,i,k} = & -\frac{\eta_0}{4\pi} \left\{ \frac{J_p(t-r_{i,k}/c)}{r_{i,k}} \left(\frac{\vec{n}_{p,i,k}-\vec{m}_{i,k}}{1-\vec{m}_{i,k}\cdot\vec{n}_{p,i,k}} + \frac{\vec{n}'_{p,i,k}+\vec{m}_{i,k}}{1+\vec{m}_{i,k}\cdot\vec{n}'_{p,i,k}} \right) - \right. \\ & - \frac{J_p(t-l_p/c-R_{p,i,k}/c)}{R_{p,i,k}} \left(\frac{\vec{n}_{p,i,k}-\vec{m}_{p,i,k}}{1-\vec{m}_{p,i,k}\cdot\vec{n}_{p,i,k}} + f \frac{\vec{n}_{p,i,k}+\vec{m}_{p,i,k}}{1+\vec{m}_{p,i,k}\cdot\vec{n}_{p,i,k}} \right) - \\ & - \frac{J_p(t-l_p/c-R'_{p,i,k}/c)}{R'_{p,i,k}} \left(\frac{\vec{n}'_{p,i,k}+\vec{m}'_{p,i,k}}{1+\vec{m}'_{p,i,k}\cdot\vec{n}'_{p,i,k}} + f \frac{\vec{n}'_{p,i,k}-\vec{m}'_{p,i,k}}{1-\vec{m}'_{p,i,k}\cdot\vec{n}'_{p,i,k}} \right) + \\ & \left. + f \frac{J_p(t-2l_p/c-r_{i,k}/c)}{r_{i,k}} \left(\frac{\vec{n}_{p,i,k}-\vec{m}_{i,k}}{1-\vec{m}'_{i,k}\cdot\vec{n}'_{p,i,k}} + \frac{\vec{n}_{p,i,k}+\vec{m}_{i,k}}{1+\vec{m}_{i,k}\cdot\vec{n}_{p,i,k}} \right) \right\}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $R_{p,i,k}$ и $R'_{p,i,k}$ – расстояния от концов прямого и обратного проводов номера p ячейки $\{i, k\}$ до точки наблюдения, а $\vec{m}_{p,i,k}$ и $\vec{m}'_{p,i,k}$ – соответствующие им единичные векторы, направленные от концов проводов в точку наблюдения.

Пусть ток на концах рупора V -образной антенны полностью поглощается, что эквивалентно обращению в ноль коэффициента отражения f . Отражение тока на концах рупора эквивалентно наличию изломов на концах рупора V -образной антенны на 180° и равенству единице коэффициента отражения f . На практике коэффициент отражения f является функцией времени и его значение находится в диапазоне между нулем и единицей. Окончательная формула для расчета поля излучения от системы рупоров имеет вид

$$\vec{E}(t, x, y, z) = \sum_{k=1}^v \sum_{i=1}^u \sum_{p=1}^N \vec{E}_{p,i,k}(t, x, y, z), \quad (8)$$

где u – число рупоров по горизонтали, а v – число рупоров по вертикали.

Рупорную антенную решетку можно рассматривать как суперпозицию отдельных излучателей, поле которой аддитивно по числу рупоров. Результаты проведенных экспериментов расчета поля системы из 36, 64 и 144 рупоров подтверждают правильность теории [56].

3.3. РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ С РЕФЛЕКТОРОМ

При расчете поля излучения антенны с рефлектором поле излучения от параболического зеркала заменяется полем излучения от отраженной в зеркале V -образной антенны. Метод позволяет определить поле на любом расстоянии от рефлектора.

Так как точка возбуждения V -образной антенны находится в фокусе параболического рефлектора, то изображение точки возбуждения в зеркале будет мнимым и лежать в бесконечно удаленной точке за зеркалом. Концы возбуждающей антенны и ее зеркального изображения будут совпадать друг с другом и лежать на образующей зеркала. Расстояние между концами равно диаметру зеркала (Рис. 2в).

Таким образом, вместо системы V -образная антенна-рефлектор, мы получили две V -образных антенны с разными углами раскрытия θ_0 . Угол

раскрыва антенны, заменяющей рефлектор, будет стремиться к нулю. Суперпозиция полей от этих антенн дает искомое поле.

На Рис. 1 изображены симметричные участки антенны с изломом, образованным пересечением двух прямолинейных участков. Начало прямолинейного участка расположено на расстоянии s_1 , измеряемом вдоль провода, конец – на расстоянии s_2 , а излом – на расстоянии s_0 от точки возбуждения антенны. Опуская простые, но громоздкие преобразования, приведем выражение общего вида для нахождения полного электрического поля для точек, имеющих произвольные координаты $\{x, y, z\}$ [1,60]:

$$E_z = \frac{1}{2f_g \pi} \left\{ \frac{V(t-R/c)}{2R} \cdot \left(\frac{\sin \beta + z/R}{1 + \frac{(y - \cot \beta D/2) \cos \beta + z \sin \beta}{R}} + \frac{\sin \beta - z/R}{1 + \frac{(y - \cot \beta D/2) \cos \beta - z \sin \beta}{R}} \right) - \frac{V(t-l/c-R_2/c)}{2R_2} \cdot \frac{\sin \beta - \frac{z-D/2}{R_2}}{1 + \frac{y \cos \beta + (D/2-z) \sin \beta}{R_2}} - \frac{V(t-l/c-R'_2/c)}{2R'_2} \cdot \frac{\sin \beta + \frac{z+D/2}{R'_2}}{1 + \frac{y \cos \beta + (D/2+z) \sin \beta}{R'_2}} - \frac{4V(t-2F/c-y/c+(D/2c) \cot \beta)}{D} \cdot \frac{1+k^2-p^2}{1+2k^2-2p^2+2k^2 p^2+k^4+p^4} + \frac{V(t-l/c-R_2/c)}{2R_2} \cdot \frac{D/2-z}{R_2-y} + \frac{V(t-l/c-R'_2/c)}{2R'_2} \cdot \frac{D/2+z}{R'_2-y} \right\}. \quad (9)$$

На основе разработанной С.А. Подосеновым теории были проведены экспериментальные исследования распространения СШП импульсных сигналов, которые подтвердили ее правильность. Основные формулы были проверены экспериментально в лаборатории генерирования и измерения параметров электромагнитных импульсов ВНИИОФИ. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с теоретическими значениями [60]. Экспериментальные исследования проводили с использованием несимметричных полосковых линий. Полосковый измерительный преобразователь располагался в неоднородном поле ГТЕМ-ячейки. ГТЕМ-ячейка представляет собой отрезок согласованной конической линии с плоским внутренним и прямоугольным внешним электродами. С ее помощью можно создавать ТЕМ волны с однородным в поперечном сечении полем в области между

электродами. В ГТЕМ-ячейке формируется сферическая ТЕМ волна. Такая ячейка имеет полосу пропускания 5 ГГц по уровню 3 дБ. При исследовании использовали генератор импульсов с фронтом 70 пс и амплитудой 5.3 В. Предложенный С.А. Подосеновым метод может быть использован для расчета импульсного взаимодействия полосковых линий в печатных платах.

Теория взаимодействия линейной двухпроводной передающей линии с внешним электромагнитным полем была подтверждена экспериментально и применена для расчета взаимодействия линий передач с нестационарными неоднородными электромагнитными полями. Было установлено, что двухпроводные (полосковые) линии можно использовать как для измерения локальной напряженности электромагнитных импульсов, так и для измерения пространственных неоднородностей импульсных электромагнитных полей.

4. О ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СТРУКТУР

Интересы С.А. Подосенова не ограничивались теорией излучения импульсных электромагнитных полей. Значительная часть работ С.А. Подосенова была посвящена также исследованиям в области теории относительности – исследованию пространства-времени и классических полей связанных структур. В частности, он совместно с А.А. Потаповым занимался исследованиями фрактальной геометрии пространства-времени детерминированных структур [4,5,53]. Кратко суть данной проблемы состоит в следующем.

Обычно, при описании свойств произвольных деформируемых систем в виде сплошной среды (которые можно представить в общем случае фракталами [2,3]) считается заданным либо поле 4-скоростей (точка зрения Эйлера), либо закон движения сплошной среды, устанавливающий связь между переменными Эйлера и Лагранжа. Пространство-время считается либо плоским – в случае специальной теории относительности (СТО), либо римановым – в случае общей теории относительности

(ОТО). Иными словами, принято считать, что любые внешние негравитационные поля не искривляют пространства-времени фрактальных детерминированных структур, оставляя ее пространственно-временную геометрию плоской. Искривляются, быть может, только "пространственные сечения", геометрия которых в общем случае перестает быть евклидовой. Такая точка зрения является наиболее распространенной в научной литературе по теории относительности и разделяется большинством исследователей.

Несколько в стороне от стандартной трактовки стоят работы В.И. Родичева [61] и А.А. Власова [62]. В [62, с. 326-327], рассматривая теорию роста кристаллических, плазменных и биологических структур с сохранением их подобия, автор пришел к результату, что рост таких структур (фракталов!) возможен в неевклидовом пространстве-времени.

Наш подход базируется на развитии модернизации идей Родичева и Власова и состоит в следующем. Пусть в плоском пространстве-времени Минковского с сигнатурой (+ - - -) покоится сплошная среда. В некоторый момент времени $t = t_0$ включается силовое поле любой природы (кроме гравитационного), и сплошная среда приходит в движение. Каковы будут свойства пространства-времени после включения силового поля? Согласно классической трактовке свойства пространства-времени останутся неизменными.

Наш ответ на этот вопрос будет не столь категоричен и зависит от местонахождения наблюдателя. Если наблюдатель рассматривает движение среды из инерциальной системы отсчета (ИСО), то для него фрактальная геометрия пространства-времени останется неизменной. Для наблюдателя, связанного с движущейся средой, т.е. находящегося в неинерциальной системе отсчета (НСО), свойства фрактального пространства-времени могут в общем случае изменяться. Мы допускаем, что включение силового поля для наблюдателя в НСО может изменить свойства пространства-времени, превратив его в искривленное в пределах мировой трубки.

Итак, для наблюдателя из НСО после включения силового поля сплошная среда будет

двигаться в некотором пространстве-времени, структуру которого мы хотим определить по заданной структуре силового поля, а также по таким характеристикам континуума как тензор скоростей деформаций $\Sigma_{\mu\nu}$, тензор угловой скорости вращения $\Omega_{\mu\nu}$, вектор первой кривизны мировых линий частиц среды F_{μ} .

Переходим к математической постановке задачи. Для движущейся сплошной среды в четырехмерном пространстве-времени с сигнатурой (+ - - -) справедливо разложение

$$\nabla_{\mu} V_{\nu} = \Sigma_{\mu\nu} + \Omega_{\mu\nu} + V_{\mu} F_{\nu}, \quad (10)$$

где V_{μ} – поле 4-скорости, удовлетворяющее условию нормировки

$$g_{\mu\nu} V^{\mu} V^{\nu} = 1, \quad (11)$$

$g_{\mu\nu}$ – метрический тензор в системе отсчета Эйлера,

$$\Sigma_{\mu\nu} = \nabla_{(\mu} V_{\nu)} - V_{(\mu} F_{\nu)}, \quad (12)$$

$$\Omega_{\mu\nu} = \nabla_{[\mu} V_{\nu]} - V_{[\mu} F_{\nu]}, \quad (13)$$

$$F_{\mu} = V^{\nu} \nabla_{\nu} V_{\mu}. \quad (14)$$

Круглые скобки, окружающие индексы, служат знаком симметрирования, а квадратные – знаком альтернирования. Греческие индексы могут принимать значения от нуля до трех, латинские – от единицы до трех.

Разложение (10) можно трактовать с двух точек зрения:

1. Считать, что поле 4-скорости V_{μ} известно, например, в результате интегрирования релятивистского уравнения Эйлера или Навье-Стокса при заданной плоской метрике. В этом случае характеристики континуума $\Sigma_{\mu\nu}$, $\Omega_{\mu\nu}$, F_{μ} могут быть получены по формулам (12-14), а разложение (10) выступает как математическое тождество.

2. Считать заданными функциями $\Sigma_{\mu\nu}$, $\Omega_{\mu\nu}$, F_{μ} . В этом случае разложение (10) превращается в систему дифференциальных уравнений относительно V_{ν} и $g_{\mu\nu}$. Так как число уравнений системы (10) и (11) превосходит число неизвестных функций, то должны выполняться условия интегрируемости. Условием интегрируемости для компонент 4-скоростей будет соотношение

$$\frac{\partial^2 V_{\nu}}{\partial x^{\epsilon} \partial x^{\sigma}} = \frac{\partial^2 V_{\nu}}{\partial x^{\sigma} \partial x^{\epsilon}}. \quad (15)$$

Для нахождения связи между геометрическими и кинематическими характеристиками континуума вычислим в явном виде выражение

$$2\nabla_{[\epsilon} V_{\sigma]} V_{\nu} = 2\partial_{[\epsilon} \partial_{\sigma]} V_{\nu} + \left(\frac{\partial \Gamma_{\epsilon\nu}^{\mu}}{\partial x^{\sigma}} - \frac{\partial \Gamma_{\sigma\nu}^{\mu}}{\partial x^{\epsilon}} + \Gamma_{\sigma\rho}^{\mu} \Gamma_{\epsilon\nu}^{\rho} - \Gamma_{\epsilon\rho}^{\mu} \Gamma_{\sigma\nu}^{\rho} \right) V_{\mu}, \quad (16)$$

где $\Gamma_{\epsilon\nu}^{\mu}$, $\Gamma_{\sigma\nu}^{\mu}$, $\Gamma_{\sigma\rho}^{\mu}$, $\Gamma_{\epsilon\nu}^{\rho}$, $\Gamma_{\epsilon\rho}^{\mu}$, $\Gamma_{\sigma\nu}^{\rho}$ – символы Кристоффеля, которые выражаются через метрические коэффициенты. Из выражения (16) с учетом (10-15) следует уравнение структуры детерминированных фракталов:

$$R_{\epsilon\sigma,\nu}^{\mu} V_{\mu} = 2\nabla_{[\epsilon} \Sigma_{\sigma]\nu} + 2\nabla_{[\epsilon} \Omega_{\sigma]\nu} + 2\nabla_{[\epsilon} (V_{\sigma]} F_{\nu}). \quad (17)$$

Интегрирование системы (10) и (17), где $R_{\epsilon\sigma,\nu}^{\mu}$ – тензор кривизны Римана-Кристоффеля, выражаемый через метрический тензор обычным образом, дает решение задачи о геометрии пространства-времени, в которой реализуется НСО с заданной структурой.

Переход во вращающуюся систему отсчета (в детерминированный фрактал), как доказано в [1,53,63-66], также приводит к псевдоримановой геометрии пространства-времени (доказательства и формулы из-за громозкости здесь не приведены, с ними можно ознакомиться по книгам [1,53,63-66]).

Однако, многообразие фракталов может и не уложиться в рамки римановой геометрии. В [1,63] получено уравнение структуры для пространств метрической связности с отличным от нуля тензором кручения.

Итак, в начале 2000-х годов благодаря нашим работам, впервые возникла новая область проблем, названная авторами как "Фрактальная геометрия пространства-времени детерминированных структур" [1,4,5,53,63-66].

В наших работах [53,67-70] вводится мера Хаусдорфа-Коломбо в отношении отрицательных фрактальных размерностей. Пространство-время моделируется как мультифрактальное подмножество с положительными и отрицательными фрактальными измерениями. Предложена аксиоматическая квантовая теория поля в пространстве-времени с отрицательными фрактальными размерностями. Мы показали, что фрактальная природа квантового пространства-времени с отрицательными размерностями

Хаусдорфа-Коломбо может в какой-то степени разрешить проблему космологической постоянной.

Одними из последних работ С.А. Подосенова были работы по роторному эксперименту Мессбауэра [71,72].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория импульсного излучения из полеобразующих систем, разработанная С.А. Подосеновым, является основой для аналитического расчета излучения от бегущих волн тока.

Представлен новый аналитический метод расчета полей во временной области, позволяющий определять электромагнитные поля от сложных структур, как в ближней, так и в дальней зоне.

Разработанный метод аналитического расчета полей от бегущих волн токов с учетом отражения от изломов, учитывающий перераспределение токов в проводах за счет потери энергии излучения, получил экспериментальное подтверждение.

Представлены простые аналитические соотношения для расчета конструкций антенн конкретных базисных структур. Разработанный математический аппарат может быть использован для расчета полей в имитаторах ЭМИ и расчета V -образной антенны, поля излучения системы рупоров, а также – расчета импульсного излучения антенны с рефлектором. Расчет может быть выполнен с использованием обычных персональных компьютеров и не требует специальных затрат.

Исследование распространения СШП импульсов подтвердило правильность теории. Представленный метод имеет большое практическое значение и может быть использован для расчета импульсного взаимодействия полосовых линий в печатных платах.

Созданная С.А. Подосеновым теория взаимодействия линейной двухпроводной передающей линии с внешним электромагнитным полем подтверждена экспериментально и использована для расчета взаимодействия линий передач с нестационарными неоднородными электромагнитными полями. Двухпроводные

(полосковые) линии можно использовать как для измерения локальной напряженности ЭМИ, так и для измерения пространственных неоднородностей импульсных электромагнитных полей.

Кроме того, в начале 2000-х годов благодаря нашим работам, впервые возникла новая область проблем, названная авторами как "Фрактальная геометрия пространства-времени детерминированных структур" [1,4,5,53,63-66] для задач электродинамики. В наших работах [53,67-70] вводится мера Хаусдорфа-Коломбо в отношении отрицательных фрактальных размерностей. Пространство-время моделируется как мультифрактальное подмножество с положительными и отрицательными фрактальными измерениями. Предложена аксиоматическая квантовая теория поля в пространстве-времени с отрицательными фрактальными размерностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подосенов СА, Потапов АА, Соколов АА. *Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур*. Под ред. А.А. Потапова. М., Радиотехника, 2003, 720 с.
2. Потапов АА. *Фракталы в радиофизике и радиолокации*. М., Логос, 2002, 664 с.
3. Потапов АА. *Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки*. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Университетская книга, 2005, 848 с.
4. Подосенов СА, Потапов АА. О фрактальной геометрии пространства-времени детерминированных структур. Тез. докл. I науч.-техн. конф. "Радиооптические технологии в приборостроении" (Сочи, 9-12.09.2003). М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, с. 62-63.
5. Подосенов СА, Потапов АА. Фрактальная геометрия пространства-времени детерминированных структур. Тр. Междунар. Междисциплинарного симпозиума "Фракталы и прикладная синергетика – ФИПС-03" (Москва, 17-20.11.2003). М., Изд-во МГОУ, 2003, с. 250-253.
6. ГОСТ 8.540-85 ГСИ. *Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений напряженности импульсных электрических и магнитных полей*. М., Стандартинформ, 2019.

7. ГОСТ 8.540-93 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей. М., Издательство стандартов, 1995.
8. Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА. Государственный первичный специальный эталон единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне от 0.1 до 10.0 нс ГЭТ 148-2013. *Измерительная техника*, 2018, (10):9-13.
9. Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА. Государственный первичный специальный эталон единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне от 10 до 100 пс ГЭТ 178-2016. *Измерительная техника*, 2018, (6):3-73.
10. Подосенов СА, Соколов АА. Излучение и измерение импульсных электромагнитных полей. М., Спутник+, 2000, 249 с.
11. Sokolov AA, Sakharov KYu, Kravchenko VF. Possibility of application of UWB short electromagnetic pulses for physical process investigation in inhomogeneous media. *Proc. of the 1-st International Workshop on "Mathematical Modeling of Physical Processes in Inhomogeneous Media"*. Guanajuato, Mexico, 20-22.03.2001, p. 84-86.
12. Сахаров КЮ, Алешко АИ, Соколов АА, Подосенов СА. Полосковый датчик как средство исследования воздействия СПП ЭМИ на печатные платы. *Тез. докл. V Всероссийской научно-технической конференции "Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в РФ"*. Мытищи, 13-16.09.2004. М., 2004.
13. Sakharov KYu, Mikheev OV, Sokolov AA, Turkin VA. Antennas for beaming and receiving short ultrawideband electromagnetic impulses. *Proc. of Int. Conf. in Blanes "Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems"*. Barcelona, Spain 22-29.05.2004, p. 37-39.
14. Podosenov SA, Sakharov KYu, Sokolov AA. Calculation of Energy Evolved in the Loads of Strip Transmission Line in Action of Pulse Electromagnetic Field. *Book of Abstracts, Euroem, Magdeburg*, 2004, p. 27.
15. Podosenov SA, Sakharov KYu, Sokolov AA. Influence of Earth Surface on TEM Horn Array Transient Radiation. *Book of Abstracts, Euroem, Magdeburg*, 2004, p. 27-28.
16. Добротворский МИ, Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА, Алешко АИ. Малогабаритный автономный измеритель максимальных значений напряженности электрического поля сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Тез. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. "Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости технических средств. Измерение ЭМС-2004"*. Н. Новгород, 2004, с. 49-50.
17. Сахаров КЮ. Измерительные технологии в борьбе с электромагнитным терроризмом. *Мир измерений*, 2005(10):12.
18. Сахаров КЮ. Принципы создания первичного эталона сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2005, 3(14):12-16.
19. Сахаров КЮ. Выбор полеобразующей системы эталона сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2005, 3(14):17-26.
20. Акбашев ББ, Алешко АИ, Михеев ОВ, Сахаров КЮ, Семин ВВ, Соколов АА, Туркин ВА. Экспериментальные исследования воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на систему контроля доступа в помещения. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (1):1-6.
21. Сахаров КЮ, Соколов АА, Михеев ОВ, Алешко АИ. Экспериментальные результаты по генерированию эталонных импульсов электромагнитного поля с длительностью фронта в десятки пикосекунд. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (1):7-8.
22. Сахаров КЮ. Новые результаты исследований характеристик сверхкороткоимпульсного эталонного излучателя для метрологического обеспечения телекоммуникационных технологий. *Сб. научных тр. "Проектирование телекоммуникационных и информационных систем"*. Под ред. Л. Н. Кечиева. М., МИЭМ, 2006, с. 15-18.
23. Сахаров КЮ. О выборе метода расчета эталонных полеобразующих систем для высокоточного воспроизведения сверхкоротких эталонных электромагнитных импульсов. *Сб. научных тр. "Проектирование телекоммуникационных и информационных"*

- систем*". Под ред. Л. Н. Кечиева. М., МИЭМ, 2006, с. 60-62.
24. Сахаров КЮ. *Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров*. М., МИЭМ, 2006, 159 с.
 25. Туркин ВА, Сахаров КЮ, Соколов АА, Михеев ОВ, Кузнецов ЕВ. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний технических средств. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (2):10-16.
 26. Михеев ОВ, Туркин ВА, Сахаров КЮ, Соколов АА, Кузнецов ЕВ. Средства измерений для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (2):17-21.
 27. Алешко АИ, Соколов АА, Сахаров КЮ, Туркин ВА, Корнев АН. Датчик напряженности электрического поля сверхкоротких электромагнитных импульсов со сверхвысокой частотой повторения. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (2):22-26.
 28. Добротворский МИ, Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА. Система регистрации сверхкоротких импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (2):27-30.
 29. Денисов МЮ, Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА, Уголев ВА. Малогабаритный автономный измеритель амплитуды сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (2):31-36.
 30. Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА, Корнев АН, Долбня СН, Певнев АВ, Акбашев ББ. Исследование функционирования персональных компьютеров в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (2):44-49.
 31. Подосенов СА, Сахаров КЮ, Соколов АА. Влияние поверхности земли на распространение сверхкоротких импульсов электромагнитного поля. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (2):50-53.
 32. Бородай ПН, Тяпин МС, Мырова ЛО, Сахаров КЮ. Средства обеспечения стойкости информационных систем к воздействию излучений СШП ЭМИ. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (2):59-70.
 33. Сахаров КЮ, Соколов АА, Михеев ОВ, Туркин ВА, Корнев АН, Долбня СН, Певнев АВ. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (3):36-45.
 34. Евтихеев НН, Сахаров КЮ, Соколов АА, Алешко АИ, Засовин ЭА, Черепанов АК. Биконическая антенна как базовая структура для излучения испытательных и эталонных сверхкоротких электромагнитных импульсов в нестационарных задачах ЭМС. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2006, (4):3-9.
 35. Sokolov AA, Sakharov KYu, Mikheev OV, Turkin VA, Aleshko AI. Radiators of ultrashort electromagnetic pulses. *Proc. of the 3-rd Int. Conf. on "Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals UWBUSIS"* (Sevastopol, 18-22.09.2006). Sevastopol, 2006, p. 203-205.
 36. Евтихеев НН, Сахаров КЮ, Соколов АА, Алешко АИ, Засовин ЭА, Черепанов АК. Биконическая антенна как базовая структура для изучения испытательных и эталонных сверхкоротких электромагнитных импульсов в задачах ЭМС. *Тр. 15 Междунар. конференции по радиолокации и радиосвязи*. М., МЭИ, 2007, с. 226-237.
 37. Сахаров КЮ, Евтихеев НН, Соколов АА, Засовин ЭА, Черепанов АК. Антенны для излучения сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Тр. 15 Междунар. конференции по радиолокации и радиосвязи*. М., МЭИ, 2007, с. 487-489.
 38. Михайлов ВА, Сахаров КЮ, Туркин ВА, Михеев ОВ, Симакин СВ, Ларионенко АВ. Оценка стойкости бортовых вычислительных машин в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных полей. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2008, 4(27):12-19.
 39. Акбашев ББ, Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА, Алешко АИ, Катков БГ, Бердышев АВ. Исследование распространения сверхкоротких электромагнитных импульсов в помещениях. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2009, 1(28):41-47.

40. Сахаров К Ю, Тихомиров СВ, Туркин ВА, Михеев ОВ, Сухов АВ, Алешко АИ. Эталонный комплекс сверхкоротких электромагнитных импульсов с длительностью фронта 20 пс. *Измерительная техника*, 2010, (7):57-59.
41. Сахаров КЮ, Янковский БД, Миляев АП, Морев ВА, Туркин ВА, Михеев ОВ. Измерительный комплекс для исследования электромагнитной обстановки при распространении сверхкоротких электромагнитных импульсов в помещениях здания. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2009, 3(30):18-21.
42. Шунин ОА, Белов АС, Добрынин МК, Капшин АВ, Сахаров КЮ, Туркин ВА, Михеев ОВ. Исследование радиопоглощающих материалов с помощью сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2009, 3(30):38-46.
43. Акбашев ББ, Батонов НМ, Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА, Еряшев ДИ, Лафишев МА, Сухов АВ. Устойчивость систем видеонаблюдения к воздействию мощных сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2011, 2(37):24-28.
44. Акбашев ББ, Батонов НМ, Сахаров КЮ, Михеев ОВ, Туркин ВА, Еряшев ДИ, Лафишев МА, Сухов АВ. Экспериментальные исследования функционирования устройств типовой комплексной системы безопасности в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2011, 2(37):30-37.
45. Сахаров КЮ, Туркин ВА, Михеев ОВ, Сухов АВ, Днищенко ВН. Методы и средства мониторинга электромагнитных излучений в сверхкороткоимпульсном диапазоне длительностей. *4-й Междунар. радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2011. Сборник научных тр.: Материалы форума в 3-х томах. Том 1. Конференция "Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии". Ч. 2. Харьков, АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011, с. 237-240.*
46. Сахаров КЮ, Туркин ВА, Михеев ОВ, Сухов АВ, Лафишев МА, Еряшев ДИ. Аппаратура для мониторинга электромагнитных излучений в сверхкороткоимпульсном диапазоне длительностей. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2011, (4):58-61.
47. Сахаров КЮ, Туркин ВА, Михеев ОВ, Сухов АВ. Устройство для измерения параметров электромагнитного импульса со сверхкороткой длительностью фронта. *Патент РФ № 2468375 С1*. Оpubл. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 33 от 27.11.2012.
48. Сухов А.В. Методы и средства измерений параметров сверхкоротких электромагнитных импульсов в пикосекундном диапазоне. *Дис. ... канд. техн. наук*. Москва, ФГУП ВНИИОФИ, 2016.
49. Sakharov KYu, Turkin VA, Mikheev OV. A measuring system for characterization of radar-absorbent materials by ultra-short electromagnetic pulses sounding over the range 0.1 – 4.0 GHz. *Proc. of 14th Conf. on Microwave Techniques COMITE 2015*. Pardubice, Czech Republic, 21-23 April 2015. P. 1-4.
50. Зиновьев СВ, Евдокимов АН, Сахаров КЮ, Туркин ВА, Алешко АИ, Иванов АВ. Определение терапевтической значимости воздействия импульсного широкополосного электромагнитного СВЧ-излучения на моделях экспериментальной онкологии. *Медицинская физика*, 2015, (3):62-67.
51. Подосенов СА, Потапов АА, Менькова ЕР. Новый аналитический метод расчета электромагнитных полей от бегущих волн тока. *Нелинейный мир*, 2007, 5(12):725-739.
52. Potapov AA, Podosenov SA, Foukzon J, and Men'kova ER. New Method for Calculating Pulsed Electromagnetic Fields from Traveling Current Waves in Complex Wire Structures. *Physics of Wave Phenomena*, 2011, 19(2):112-123.
53. Подосенов СА, Потапов АА, Фоукзон Дж, Менькова ЕР. *Неголономные, фрактальные и связанные структуры в релятивистских сплошных средах; электродинамике, квантовой механике и космологии. В 3-х тт.* Под ред. А.А. Потапова. М., ЛЕНАНД, 2016. Т. 1. 432 с.; Т.2. 440 с.; Т.3. 256 с.
54. Сахаров КЮ, Подосенов СА, Туркин ВА, Михеев ОВ, Менькова ЕР, Сухов АВ, Алешко АИ. Использование метода заданных токов для расчета во временной области параметров импульсных электромагнитных полей с длительностью фронта до 10 пс. *Измерительная техника*, 2015, (11):55-58.

55. Podosenov SA, Svekis YGu, Sokolov AA. Transient Radiation of Traveling Waves by Wire Antennas. *IEEE Trans.*, 1995, AP-37(3):367-383.
56. Podosenov SA, Sokolov AA. Linear Two-Wire Transmission Line Coupling to an External Electromagnetic Field, Part I: Theory. *IEEE Trans.*, 1995, AP-37(4):559-566.
57. Podosenov SA, Sakharov KYu, Svekis YaG, and Sokolov AA. Linear Two-Wire Transmission Line Coupling to an External Electromagnetic Field, Part II: Specific cases, experiment. *IEEE Trans.*, 1995, AP-37(4):566-574.
58. Podosenov SA, Sokolov AA, Al'betkov SV. Excitation of a V-Antenna by a Pulse Electromagnetic Field. *IEEE Trans.*, 1996, AP-38(1):31-42.
59. Mikheev OV, Podosenov SA, Sakharov KYu, Sokolov AA, Turkin VA. Approximate Calculation Methods for Radiation of a TEM-Horn Array. *IEEE Trans.*, 2001, AP-43(1):67-74.
60. Mikheev OV, Podosenov SA, Sakharov KYu, Sokolov AA, Svekis IaG, Turkin VA. New Method for Calculating Pulse Radiation from an Antenna with a Reflector. *IEEE Trans.*, 1997, AP-39(1):48-54.
61. Родичев ВИ. *Теория тяготения в ортогональном репере*. М., Наука, 1974, 184 с.
62. Власов АА. *Статистические функции распределения*. М., Наука, 1966, 356 с.
63. Подосенов СА. *Пространство, время и классические поля связанных структур*. М., Компания "Спутник +", 2000, 445 с.
64. Podosenov SA, Foukzon J, and Potapov AA. A Study of the Motion of a Relativistic Continuous Medium. *Gravitation and Cosmology*, 2010, 16(4):307-312.
65. Podosenov SA, Foukzon J, Potapov AA, and Men'kova ER. Electrodynamics in Noninertial Reference Frames. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2016, 4(4):806-843. URL: <http://www.scirp.org/journal/jamp>.
66. Подосенов СА, Потапов АА, Фоукзон Дж, Менькова ЕР. Метрика и уравнения структуры в релятивистских сплошных средах. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2019, 11(2):113-124, doi: 10.17725/rensit.2019.11.113.
67. Foukzon J, Men'kova E, and Potapov A. The Solution Cosmological Constant Problem. *Journal of Modern Physics*, 2019, 10:729-794. DOI: 10.4236/jmp.2019.107053.
68. Foukzon J, Menkova ER, Potapov AA, and Podosenov SA. *Quantum Field Theory in Fractal Space-Time with Negative Hausdorff-Colombeau Dimensions. The Solution Cosmological Constant Problem*, <https://arxiv.org/abs/1004.0451>, 2019, 171 p.
69. Foukzon J, Men'kova ER, Potapov AA. The Solution Cosmological Constant Problem. Quantum Field Theory in Fractal Space-Time with Negative Hausdorff-Colombeau Dimensions and Dark Matter Nature. *Journal of Physics: Conf. Ser.*, 2019, V. 1391. Paper ID 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012058.
70. Foukzon J, Men'kova ER, Potapov AA. Singular general relativity using the Colombeau approach. I. Distributional Schwarzschild geometry from nonsmooth regularization via horizon. *Physics Essays*, 2020, 33(2):180-199. DOI: 10.4006/0836-1398-33.2.180.
71. Podosenov SA, Foukzon J, Men'kova ER. Comment on "The Mössbauer rotor experiment and the general theory of relativity" [Ann. Physics 368 (2016) 258-266]. *Annals of Physics*, 2020, V. 413:168047. DOI: 10.1016/j.aop.2019.168047.
72. Podosenov SA, Foukzon J, Men'kova ER. Erratum to Comment on "The Mössbauer rotor experiment and the general theory of relativity" [Ann. Physics 368 (2016) 258-266]. *Annals of Physics*, 2020, V. 423:168329. DOI: 10.1016/j.aop.2020.168329.

Потапов Александр Алексеевич

д.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru

Менькова Елена Романовна

к.т.н., с.н.с.

ВНИИОФИ Росстандарта

Москва 119361, Россия

E-mail: menkova@vniiofi.ru.