

УДК 537.874:537.877:621.37

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>

EDN PYJISU



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Цифровые технологии сигнального радиовидения и радиомониторинга

М.С. Костин @,
К.А. Бойков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: kostin_m@mirea.ru

Резюме

Цели. Цель работы – разработка методов и алгоритмов векторного анализа радиоволновой деформации нестационарных полей, образующих сигнальное радиоизображение, определяемое радиофизическими и топологическими признаками малоразмерных объектов; создание программно-аппаратных средств регистрации и нейросетевого распознавания сигнальных радиоизображений, в т.ч. методов синтеза и экстракции сигнальных радиогеномов при помощи цифровых двойников объектов, полученных посредством векторного электродинамического моделирования; анализ сигнальных радиоизображений, наводимых элементами печатной топологии электронных устройств.

Методы. Используются методы статистической радиофизики, частотно-временные методы вейвлет-преобразования финитных во времени сигнальных радиоизображений, численные методы электродинамики при создании цифровых двойников малоразмерных объектов, а также нейросетевые алгоритмы аутентификации, основанные на кумулянтной теории полюсно-генетических и резонансных физически неклонируемых функций (ФНФ), используемых при распознавании сигнальных радиоизображений.

Результаты. Приведены научные результаты фундаментальных исследований электродинамических эффектов векторно-волновой деформации нестационарных полей субнаносекундной конфигурации, представляющие интерес при распознавании и аутентификации сигнальных радиоизображений. Предложены нейросетевые методы кумулянтного формирования радиогеномов сигнальных радиоизображений на базе полюсно-генетических и резонансных функций.

Выводы. Показано, что радиогеном – уникальный аутентификатор радиоизображения – формируется в базе ФНФ, определяемых структурой и набором радиофизических параметров объекта. Выявлены кумулянтные признаки распознавания сигнальных радиоизображений в базе полюсно-генетических и резонансных ФНФ малоразмерных объектов.

Ключевые слова: сигнальное радиовидение, радиогеном, радиоизображение, физически неклонируемая функция, кумулянта, полюсно-генетические функции

• Поступила: 28.01.2024 • Доработана: 21.02.2024 • Принята к опубликованию: 19.05.2024

Для цитирования: Костин М.С., Бойков К.А. Цифровые технологии сигнального радиовидения и радиомониторинга. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):59–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Digital technologies for signal radio vision and radio monitoring

Mihail S. Kostin[@],
Konstantin A. Boikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: kostin_m@mirea.ru

Abstract

Objectives. Radiophysical processes involving the electrodynamic formation of signal radio images diffusely scattered by the signature of small-sized objects or induced by the near field of radio devices are relevant for identifying radiogenomic (cumulant) features of objects in the microwave range in the development of neuroimaging ultra-short pulse (USP) signal radio vision systems, telemonitoring, and near-radio detection. The paper sets out to develop methods and algorithms for vector analysis of radio wave deformation of nonstationary fields forming a signal radio image based on radiophysical and topological characteristics of small-sized objects; to develop software and hardware for registration and neural network recognition of signal radio images, including methods for the synthesis and extraction of signal radiogenomes using digital twins of objects obtained through vector electrodynamic modeling; and to analyze signal radio images induced by elements of printed topology of electronic devices.

Methods. The study is based on statistical radiophysics methods, time-frequency approaches for wavelet transformation of USP radio images, numerical electrodynamic methods for creating digital twins of small-sized objects, as well as neural network authentication algorithms based on the cumulant theory of pole-genetic and resonant physically unclonable functions used in identifying signal radio images.

Results. The results of fundamental research on electrodynamic effects of vector-wave deformation of nonstationary fields of sub-nanosecond configuration are presented as a means of identifying and authenticating signal radio images. Neural network techniques for cumulant formation of radio genomes of signal radio images are proposed on the basis of pole-genetic and resonant functions.

Conclusions. A radiogenome, representing the unique authenticator of a radio image, is shown to be formed on the basis of physically unclonable functions determined by the structure and set of radiophysical parameters of the image. Cumulant features of signal radio images identified on the basis of pole-genetic and physically unclonable resonant functions of small-sized objects are revealed.

Keywords: signal radiovision, radiogenome, radio image, physically unclonable function, cumulant, pole-genetic functions

• Submitted: 28.01.2024 • Revised: 21.02.2024 • Accepted: 19.05.2024

For citation: Kostin M.S., Boikov K.A. Digital technologies for signal radio vision and radio monitoring. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):59–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Сигнальное радиовидение – область радиофизики, изучающая методы формирования, обработки и аутентификации векторных радиоизображений объектов в сверхвысоочастотном (СВЧ) диапазоне, полученных в результате диффузного рассеяния сигнатурой объекта сверхкоротких импульсов (СКИ), либо СКИ, наводимых электронными устройствами при переходных процессах на их компонентах и распределенных реактивностях топологии [1, 2]. Технология сигнального радиовидения основана на электродинамическом эффекте векторно-волновой деформации нестационарных полей субнаносекундной конфигурации, что для задач сверхширокополосного радиомониторинга позволяет получить не только векторное радиоизображение – сигнальный радиопрофиль (СРП), но и информацию о радиофизических параметрах облучаемого объекта, в т.ч. синтезировать спектрально-временной радиогеном или же уникальный аутентификатор в базе физически неклонируемых функций (ФНФ) [1–9]. Действительно, радиометрические аутентификаторы объектов, в т.ч. радиоэлектронных устройств, определяемые параметрическим распределением характеристик реперных элементов и неоднородностей, составляющих их структуру (сигнатуру, топологию, архитектуру и т.д.), скрыты в волновых деформациях (дисперсионной, диссипативной, поляризационной, частотно-временной, фазодинамической) электромагнитного поля рассеянного или индуцируемого в пространство СКИ [10–14]. В целях выявления радиогеномных признаков малоразмерных объектов в СВЧ-диапазоне предложен нейросетевой подход к аутентификации радиоизображений по кумулянтам в базе полносно-генетических и резонансных ФНФ, синтезируемых при помощи технологии цифровых двойников (численных методов электродинамического моделирования) [3, 10].

Ранее опубликованные результаты исследований в области сигнального радиовидения, в т.ч. приведенные в работах [1, 2, 12], позволили установить, что аутентификаторы различных объектов, определяемые реперным базисом ФНФ, скрыты в волновых деформациях поля СКИ. Поскольку волновые профили сигнальных радиоизображений несхожих объектов способны иметь квазиидентичные огибающие,

это накладывает ограничения на их распознавание по огибающим СКИ, что, собственно, определяет научно-практический интерес к практической реализации радиоволновых технологий субнаносекундного разрешения.

1. ФОРМИРОВАНИЕ И АУТЕНТИФИКАЦИЯ СИГНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ, ДИФFUЗНО РАССЕЯННЫХ СИГНАТУРОЙ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Частотно-временная аутентификация сигнальных радиоизображений определяется исходя из априорных данных исследования электродинамических особенностей протекания радиоволновых процессов нестационарных полей, рассеянных на импедансных неоднородностях облучаемого объекта, и состоит в разработке адаптивных алгоритмов анализа СКИ, основанных на сингулярно-статистических методах нахождения реперных фреймов (радиогеномов) во временном профиле сигнального радиоизображения, формирующих наиболее полное представление о структуре объекта в СВЧ-диапазоне (рис. 1) [1, 2, 9].

Для нахождения и распознавания реперных фреймов в сигнальном радиоизображении по заданным импульсным характеристикам (ИХ), синтезированным экспериментально, либо при помощи технологии цифровых двойников, разработаны нейросетевые алгоритмы, основанные на кумулянтной теории полюсно-генетических и резонансных функций [1, 2, 9]. В качестве нейросети распознавания сигнальных радиоизображений выбрана сеть со сверхточной архитектурой ConvNet, состоящая из трех слоев и построенная на базе вычислительного 16-ядерного USB-модуля Intel Neural Compute Stick 2 (Intel Corporation, США), использующая при обучении метод обратного распространения для минимизации вероятности ошибки распознавания сигнатуры малоразмерного объекта.

Анализ частотно-временного распределения диффузно рассеянного СКИ предполагает предварительное вейвлет-преобразование полного радиотклика, в сигнальном радиоизображении которого сосредоточен радиогеном сигнатуры эквивалентной неоднородности малоразмерного объекта, сформированной его мгновенной эффективной площадью рассеяния (ЭПР), влияющей на характер

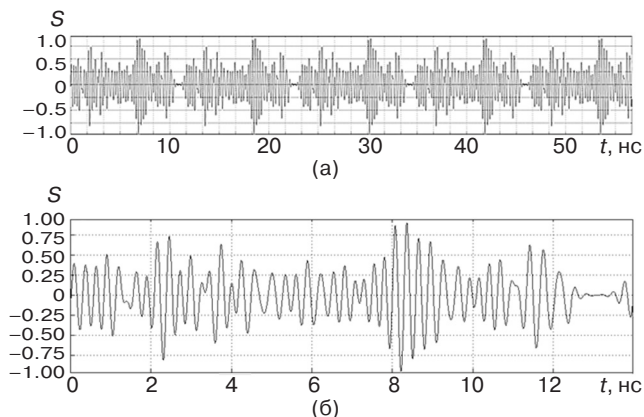


Рис. 1. Приведенное сигнальное радиоизображение малоразмерного объекта типа БПЛА: (а) периодичность СКИ на интервале эквивалентного времени; (б) реперный фрейм сигнального радиоизображения. S – приведенная шкала к максимуму величины мощности СКИ (безразмерная); t – эквивалентное время стробоскопического преобразования

суперпозиции спектральных формант, образованной в результате электродинамического процесса волновых деформаций E, H -компонент нестационарного поля [1–10]. При этом декомпозиция сигнального радиоотклика объекта в согласованном режиме может быть также достигнута при дискретном формировании функции спектральной плотности мощности СКИ во времени [10]. Это представляет уникальную возможность создания библиотеки сигнальных радиогеномов малоразмерных объектов типа «беспилотный летательный аппарат» (БПЛА) по заданным сигнатурам для формирования априорной информации о СКИ-радиоизображениях [1, 2, 10]. Действительно, при диффузном рассеянии СКИ малоразмерным объектом с динамической ЭПР вейвлет-преобразование в установленный момент времени по заданной оконной фрейм-функции позволяет локализовать и даже идентифицировать радиофизический характер проявления волновых деформаций СКИ $s(t)$ при его взаимодействии с сигнатурой. Так, установлено, что функциональный характер изменения СКИ-сигналов $y(t)$ полностью определяется свойствами ИХ $h(t)$ среды распространения и семейством локальных ИХ объекта как

$$y(t) = H[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t-\tau)d\tau,$$

где H – оператор волновой деформации СКИ, определяемый радиофизическими и топологическими свойствами сигнатуры объекта. При этом сингулярно-статистическая оценка воспроизводимости радиоизображений показывает, что формирование интерференционных помех, обусловленных многолучевыми копиями $y(t)$, оказывает существенное

влияние на однозначность распознавания полюсно-генетических функций радиогенома [3]. В то же время вейвлет-кепстральная постобработка вида:

$$C(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{\text{гр}}}^{+\omega_{\text{гр}}} \ln[S(\omega)]^2 e^{j\omega q_t} d\omega,$$

где $S(\omega)$ – амплитудный спектр СКИ $s(t)$; $\pm \omega_{\text{гр}}$ – граничные частоты интегрирования; $\ln[S(\omega)]^2$ – логоспектр; q_t – переменная кепстрального времени, позволяет компенсировать влияние райсовской (интерференционной) помехи, являясь наиболее эффективной при декомпозиции сигнальных радиоизображений по полюсно-генетическим функциям [1, 2].

Рассматривая случай, при котором радиоизображение объекта может быть представлено разницей его собственной ИХ одной и той же сигнатуры, сдвинутой на длительность СКИ, установлено, что радиогеном малоразмерного объекта определяется комплексным базисом собственных резонансных частот ω_m , $m = 1, 2, \dots, N$, а оценка ИХ малоразмерного объекта сводится к нахождению его полюсных функций

$$Q_m(\omega) = \frac{\dot{C}_m^*}{\omega + \dot{q}_m^*} - \frac{\dot{C}_m}{\omega - \dot{q}_m}, \quad \dot{q}_m = \omega_m + j\gamma_m,$$

сосредоточенных в частотно-временном отображении рассеянного СКИ-радиоотклика, полагая, что каждая из базисных функций $Q_m(\omega)$ с комплексной амплитудой \dot{C}_m^* содержит полюсную кумуляту \dot{q}_m с частотой ω_m и коэффициентом диссипации γ_m , задаваемым в качестве априорной информации при построении рекуррентной нейросети распознавания сигнальных радиоизображений.

На рис. 2 приведены векторные радиоизображения базисных сигнатур радиогеном малоразмерных объектов типа БПЛА и соответствующие им полюсные функции при отношении сигнал/шум 12 дБ, в т.ч. позволяющие определить функциональную связь смены сигнатуры объекта во времени с его радиогеномом [1, 2–8, 10].

Кроме того, ФНФ сигнатуры объекта (реперными идентификаторами) могут являться, собственно резонансные частоты (резонансные кумулянты), характеризующие набор реперных элементов и неоднородностей сигнатуры объекта, образующих суперпозицию резонаторов.

Характер распределения ФНФ формируется двумя компонентами: вынужденной, образуемой влиянием поляризации, скорости распределения напряженности поля, направлением и условиями среды распространения СКИ и т.д., и модовой, связанной

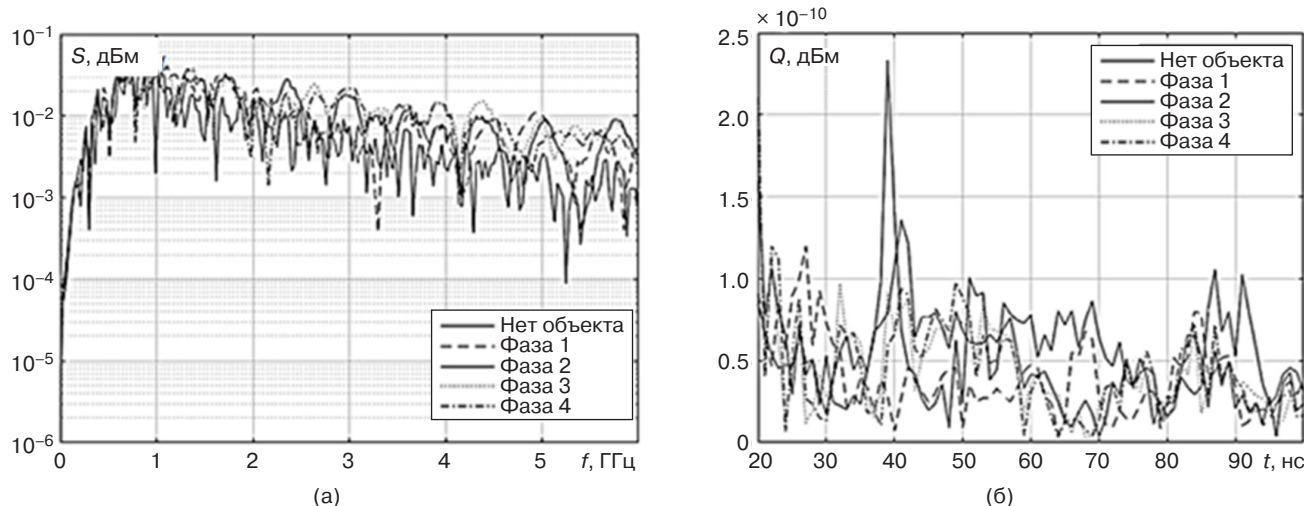


Рис. 2. Векторные радиоизображения БПЛА (а) и соответствующие им полюсные функции (б), полученные в периодические фазы времени 10 нс. f – линейная частота ($\omega = 2\pi f$)

с диффузным рассеянием СКИ на резонансных и селективных структурах сигнатуры объекта. Так, для экстракции модовой составляющей на основе априорной информации о резонансных частотах, полученных, например, при облучении цифрового двойника (электродинамической модели) малоразмерного объекта, к радиоизображению подбирается дискриминационный (антирезонансный) сигнал $d_e(t)$ конечной длительности T_e , чтобы скомпенсировать резонансы в рассеянном СКИ $s(t)$, при котором свертка

$$\chi(t) = d_e s(t) = \int_0^{T_e} d_e(\tau) s(t - \tau) d\tau$$

для $t \geq T_e$ стремится к нулю.

На рис. 3 приведены кепстральные функции $C(q)$ резонансных кумулянт, модовой компоненты – радиогенома сигнального радиоизображения БПЛА [7, 10], векторное радиоизображение полюсных функций которого показано на рис. 2.

Исследования показывают, что при отношении сигнал/шум 12 дБ и дискриминационном перепаде 10 дБ между рассеянным СКИ и реперной ФНФ воспроизводимость распознавания радиоизображений по резонансным откликам достигает 0.95, т.е. сингуляризация радиоизображений малоразмерных объектов в заданном базисе резонансных частот (радиогеномных признаков), используемых в качестве кумулянт нейросети, не требует априорных сведений о полной спектрально-временной функции радиоизображения

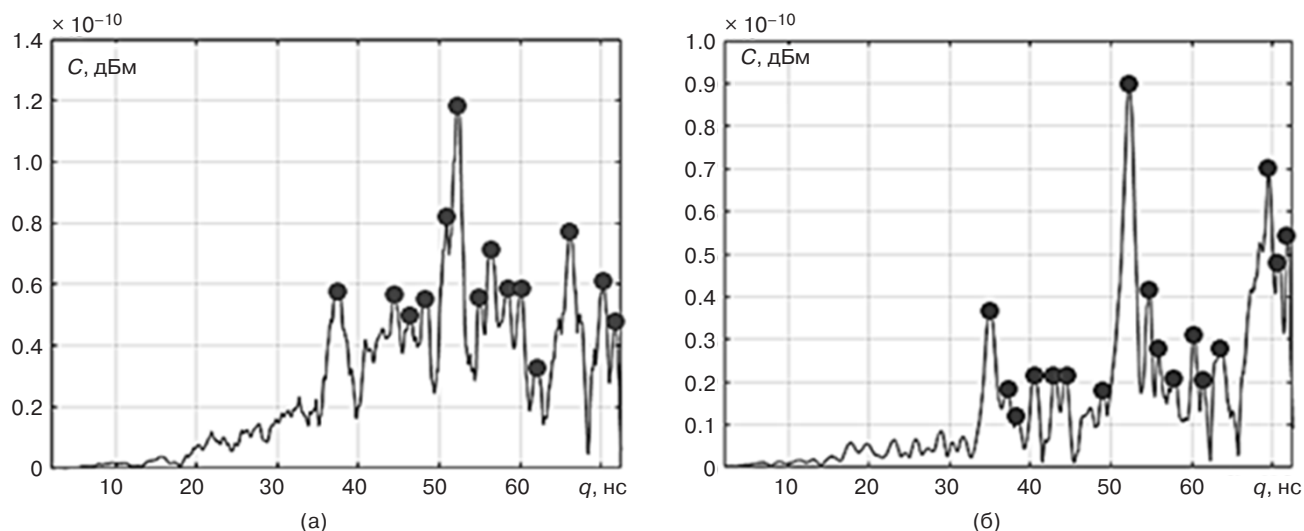


Рис. 3. Кепстральное представление резонансных составляющих сигнального радиоизображения БПЛА для двух ортогональных сигнатур малоразмерного объекта: (а) углометрическое положение при 0° , (б) углометрическое положение при 90°

объекта и позволяет повысить вероятность распознавания радиообразов объектов по реперным идентификаторам [9, 7, 10–12].

2. ФОРМИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ СИГНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ, НАВОДИМЫХ ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕЧАТНОЙ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Протекание сигнальных процессов на реактивных компонентах электронных устройств (ЭУ), как правило, сопровождается перераспределением энергии между емкостными и индуктивными элементами (далее – накопителями), которое для многопараметрической системы определяется стохастически осциллирующими наводимыми в пространство электромагнитными излучениями, образующими СРП или уникальное радиометрическое изображение ЭУ. При этом распределенные параметры электронной схемы – паразитные реактивности в проводящих линиях, в т.ч. элементах межслойной топологии, приводят к искажениям сигналов, связанным с крутизной фронтов сигнала и импедансными переотражениями [11]. Зачастую это ведет к понижению максимальной частоты функционирования цифровых устройств или вызывает снижение выходной мощности силовых выходов микросхем. При этом подводящая линия в топологии печатных модулей ЭУ накапливает электрическую и магнитную энергию, объединяя индуктивности, емкости и омические потери, значения которых зависят от топологии линии и свойств материала. При анализе формирования СРП в модуле ЭУ с излучающей схмотехнической архитектурой (топологией) необходимо проанализировать взаимосвязь между нагрузками потребителей и накопителями энергии. Эти взаимосвязи определяются значениями корней характеристического уравнения, которое составляется для излучающей схмотехнической архитектуры ЭУ.

При излучении во фрагментарной топологии ЭУ происходит перераспределение энергии между реактивными накопителями. Общее решение данного уравнения – свободная составляющая колебаний ($U_{св}$) с комплексно-сопряженными корнями $\dot{p}_{1,2} = -\delta \pm j\omega$. Узел ЭУ обычно состоит из группы компонентов, которые архитектурно формируют электрическую схему. Суммарное рабочее поле узла электронной схемы представляет собой суперпозицию излучений входных и выходных цепей, его составляющих. В моменты времени, соответствующие приходу возмущающего импульса (подача напряжения питания, переключение режимов функционирования, тактирование), эти составляющие излучают свободные затухающие колебания, описываемые выражением:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{сви}(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} e^{-\delta_i(t-t_{0i})} \sin[2\pi f_i(t-t_{0i})],$$

где N – количество составляющих, $U_{сви}$ – приведенное значение свободной составляющей i -го колебания, U_{0i} – приведенная амплитуда первой полуволны i -го колебания, δ_i – коэффициент затухания i -го колебания, t – текущий момент времени, t_{0i} – время излучения i -го колебания, f_i – частота i -го колебания. На рис. 4 показана декомпозиция СРП ЭУ с разложением на формантные составляющие.

Анализируя кривые, показанные на рис. 4б, можно видеть, что сигнальные параметры N -формантных составляющих СРП несут в себе информацию о электронном узле [12–15]. При исследовании значения N можно установить количество источников затухающих колебаний, что позволяет определить, участвуют ли все интересующие элементы узла в излучении. Если излучателей меньше, чем в эталонном СРП (принятом от функционирующего оригинального ЭУ), значит, обнаружена неисправность (либо

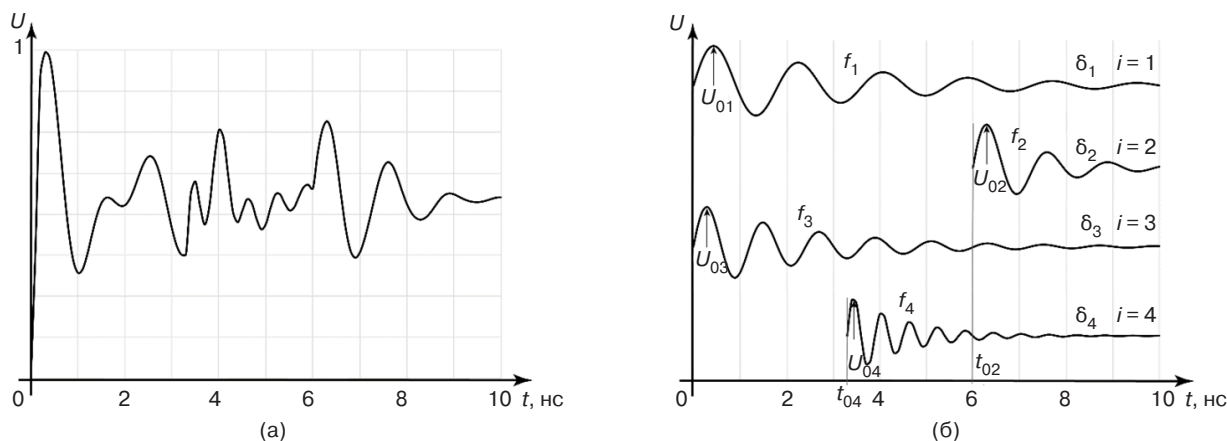


Рис. 4. Временное представление СРП:
(а) суперпозиция излучений, (б) составляющие СРП

неоригинальность) ЭУ, поскольку не все излучатели участвуют в формировании СРП. Превышение числа излучателей над эталонным значением говорит о некорректном измерении либо о появлении помехи при измерении. Амплитуда первой полуволны колебаний U_{0i} (рис. 4б) зависит от мощности излучения компонентов интересующего узла. Мощность данного излучения пропорциональна падению напряжения на излучателе и обратно пропорциональна удвоенному волновому сопротивлению излучателя Z [16]. Волновое сопротивление излучателя не зависит от электрических характеристик исследуемого радиоэлектронного узла, поэтому приведенная амплитуда первой полуволны колебания используется для оценки электрического потенциала на излучателе. Коэффициент затухания колебаний δ , который определяется индуктивностью и омическим сопротивлением, показывает скорость диссипации энергии. Паразитная и сосредоточенная индуктивности не имеют значительной зависимости от изменения внешних факторов, в то время как эквивалентное омическое сопротивление существенно зависит от температуры. Наибольшим изменениям подвержены удельные сопротивления подводящих проводников ρ и токопроводящих областей полупроводниковых приборов $\frac{d\rho}{dT} = \alpha_p \rho$, где α_p – температурный коэффициент удельного сопротивления проводника (для меди $\alpha_p = 4.1 \cdot 10^{-3}$ 1/K). Таким образом, коэффициент затухания, по существу, указывает на разницу температур между излучающим узлом и температурой, при которой проводилось эталонное измерение СРП.

При эквивалентных значениях емкостей порядка десятков пикофард и эквивалентных омических сопротивлениях примерно равных десятым долям 1 Ом частота колебаний f содержит информацию о качестве диэлектриков затвора структур металл–окисел–полупроводник или режимах работы p - n -переходов излучающих радиоэлектронных узлов ЭУ. Следует заметить, что частоты колебаний являются информативными при условии наличия эталонного сигнала с заранее извлеченными параметрами. При этом время начала излучения t_0 отражает скорость передачи возмущающего воздействия и характеризует быстродействие узла. Сравнивая измеренное значение этого параметра с эталонным значением, можно сделать вывод об изменении быстродействия компонентов исследуемого ЭУ.

Физически неклонируемая функция, полученная путем регистрации электрической составляющей электромагнитного излучения электронных компонентов ЭУ, определяет физические параметры изделия с учетом разброса технологических допусков

по параметрам компонента. Реконструкция и анализ этой ФНФ путем кросс-корреляции с эталоном, принятым производителем ЭУ, а также сравнение параметров, полученных при разложении сложной ФНФ, позволяют дистанционно оценить оригинальность радиоэлектронного изделия [17].

Для регистрации СРП в лабораторных исследованиях используются чувствительные сверхширокополосные антенны, осциллографы с функцией памяти (или передачи данных), а также малошумящие предусилители мощности, обеспечивающие полосу пропускания в несколько гигагерц. Детальность исследования СРП и возможность оценки радиометрических характеристик устройства зависят от полосы пропускания и частоты дискретизации. Использование для приема и обработки СРП программно-определяемой радиосистемы за счет своей гибкости открывает новые возможности в области неразрушающего контроля и определения оригинальности ЭУ [18].

Суммарное рабочее поле в цифровых ЭУ излучается в момент подачи питающего напряжения при формировании сигналов управления внутренней и внешней периферией, сменах режима энергопотребления. В случае аналоговых схем СРП излучается лишь в момент подачи питающего напряжения.

При нахождении коэффициента затухания и фазы элементарного излучения используется оконное преобразование Фурье. Этот метод позволяет получить для каждой дискретной величины спектр затухающих колебаний с соответствующим смещением. Для визуализации данных в виде выборок строится трехмерная зависимость приведенного значения энергии сигнала X от частоты f и положения «окна» t (рис. 5).

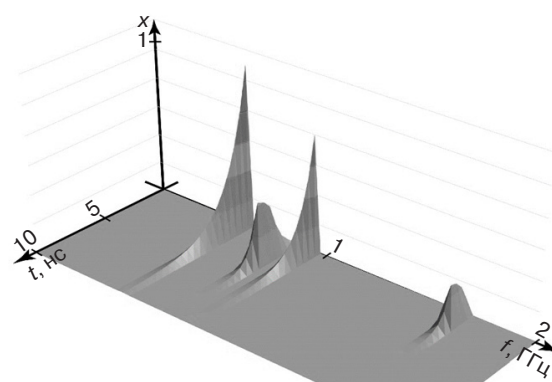
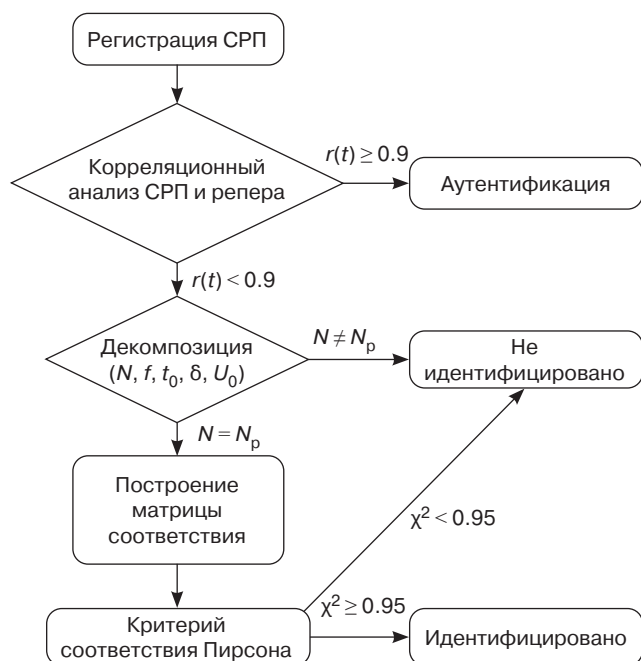


Рис. 5. Трехмерный спектр СРП

Если с увеличением времени значение амплитуды, приведенное к частоте, увеличивается или не изменяется, это указывает на отсутствие излучения при данном отсчете. Снижение амплитуды указывает на индуцирование излучения. Момент перехода от нарастания амплитуды к спаду (максимальная точка) является начальной точкой излучения. Затуханию



Излучатели Параметры	1	2	3	4
f	1	1	1	0
δ	1	0	1	1
t_0	1	1	1	1
U_0	1	1	0	1

Рис. 6. Архитектурная алгоритмистика аутентификации ЭУ по СРП. N_p – число ожидаемых излучателей, $r(t)$ – корреляция между принятым СРП и репером

приведенного значения энергии будет соответствовать закон затухания колебаний с тем же коэффициентами $X_i = X_{0i} e^{-\delta_i t}$, где X_{0i} – амплитудный спектр i -го колебания в начальной точке. Корректное разложение СРП с экстракцией параметров возможно при отношении сигнал/шум более 18 дБ.

Для проведения аутентификации ЭУ строится матрица соответствия (рис. 6), где «1» означает попадание параметра излучателя в доверительный интервал, определяемый по результатам моделирования либо по экспериментальным данным.

Учитывая, что при аутентификации ЭУ ожидается попадание выборки параметров СРП в доверительный интервал (рис. 6), определяемый для каждого излучателя экспериментально, находится коэффициент согласия Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(u_j - e_j)^2}{e_j},$$

где u_j – наблюдаемая частота признака в j -й группе, e_j – теоретическая частота признака в j -й группе. Проведенный анализ на основе экспериментальных данных показал, что для $\chi^2 \geq 0.95$ определяется достоверность аутентификации ЭУ не менее 95% [19, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальный аутентификатор радиоизображения – радиогеном, формируемый в базисе ФНФ, определяемых структурой и набором радиофизических параметров объекта, позволяет получить

информацию о радиофизических параметрах как облучаемого, так и излучающего СРП объекта. Радиометрические аутентификаторы объектов, в т.ч. ЭУ, определяемые параметрическим распределением характеристик реперных элементов и неоднородностей, составляющих их структуру (сигнатуру, топологию, архитектуру и т.д.), скрыты в волновых деформациях (дисперсионной, диссипативной, поляризационной, частотно-временной, фазодинамической) электромагнитного поля рассеянного или индуцируемого в пространство СКИ. Векторно-волновая деформация нестационарных полей субнаносекундной конфигурации позволяет распознавать и аутентифицировать объекты по сигнальным радиоизображениям – радиогеномам на базе синтезированных полюсно-генетических и резонансных ФНФ, используя нейросетевые алгоритмы. Экстракция параметров СРП с использованием плавающего «окна» открывает новые возможности в области идентификации радиофизических параметров ЭУ, в т.ч. при создании новых СВЧ-технологий сигнального радиовидения, телемониторинга и ближнего радиообнаружения. В качестве развития технологии сигнального радиовидения предполагается создание алгоритма распознавания радиоволновых изображений на основе метода векторного анализа, а также адаптация и эмуляция нейросети идентификации сигнальных радиоизображений со сверхточной архитектурой ConvNet на одноплатном модуле, формирование и экстракция базы данных радиогеномов малоразмерных объектов и ЭУ с целью создания прототипа автономного

нейровизионного программно-аппаратного комплекса ближнего радиообнаружения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научная работа выполнена в рамках инициативной НИР «170-ИРИ» по тематике «СВЧ-технологии сигнального радиовидения, телемониторинга и ближнего радиообнаружения». Научно-практические результаты регистрации радиоизображений получены при помощи контрольно-измерительного оборудования компаний Rohde & Schwarz¹ в лаборатории «Радиоволновых процессов и модулей СВЧ» учебно-научного центра «TESLA» кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out within the framework of the 170-IRI initiative research project on the topic “Microwave technologies for signal radio vision,

telemonitoring, and short-range radio detection.” Scientific and practical results of recording radio images were obtained using control and measuring equipment from Rohde & Schwarz in the laboratory of “Radio wave processes and microwave modules” of the TESLA educational and scientific center of the Department of Radio Wave Processes and Technologies of the Institute of Radio Electronics and Informatics of RTU MIREA.

Вклад авторов

М.С. Костин – постановка задачи, проведение эксперимента, анализ полученных результатов, формулировка выводов и написание статьи.

К.А. Бойков – проведение эксперимента, анализ полученных результатов, формулировка выводов и написание статьи.

Authors' contributions

M.S. Kostin – formulation of the problem, conducting the experiment, analyzing the results obtained, formulating conclusions, and writing the text of the article.

K.A. Boikov – conducting the experiment, analyzing the results, formulating conclusions, and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин М.С., Бойков К.А. *Радиоволновые технологии субнаносекундного разрешения*: монография. М.: РТУ МИРЭА; 2021. 142 с. ISBN 978-5-7339-1565-4
2. Костин М.С., Бойков К.А. *Сигнально-архитектурный реинжиниринг и радиосенсорное распознавание электронных средств*: учебник. М.: Вологда: Инфра-Инженерия; 2024. 152 с. ISBN 978-5-9729-1832-4
3. Шадинов С.С. Пространственная сверхширокополосная визуализация зондируемых объектов ближнего радионаблюдения. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.8>. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul20/8/text.pdf>
4. Nerukh A., Benson T. *Non-stationary Electromagnetics*. USA: Jenny Stanford Publishing; 2012. 616 p. <https://doi.org/10.1201/b13058>
5. Allen B., Dohler M., Okon E.E., et al. *Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging*. USA: John Wiley & Sons; 2007. 475 p.
6. Mahafza B.R. *Radar Signal Analysis and Processing Using Matlab*. USA: CRC Press; 2016. 504 p.
7. Carrer L., Yarovoy A.G. Concealed weapon detection using UWB 3-D radar imaging and automatic target recognition. In: *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2014. P. 2786–2790. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902403>
8. Günther L. *Electromagnetic Field Theory for Engineers and Physicists*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. 659 p.
9. Oppermann I., Hämäläinen M., Iinatti J. *UWB: Theory and Applications*. John Wiley & Sons; 2004. 248 p.
10. Taylor J.D. (Ed.). *Advanced Ultrawideband Radar. Signals, Targets, and Advanced Ultrawideband Radar Systems*. Boca Raton, USA: CRC Press; 2016. 494 p.
11. Wang X., Dinh A., Teng D. Radar Sensing Using Ultra Wideband – Design and Implementation. In: Matin M.A. (Ed.). *Ultra Wideband – Current Status and Future Trends*. 2013;11:41–63. <https://dx.doi.org/10.5772/48587>
12. Шадинов С.С., Костин М.С., Коняшкин Г.В., Корчагин А.С., Романовский М.Ю., Гусейн-заде Н.Г. Векторный S-параметрический анализ сигнальных фазодинамических радиоизображений. *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2023;512(1):78–86. <https://doi.org/10.31857/S2686740023050115>
13. Бойков К.А. Определение параметров электронных устройств методом пассивной радиосенсорной технической диагностики. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2021;24(6):63–70. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>
14. Лебедев Е.Ф., Остаев В.Е., Ульянов А.В. Устройства генерирования сверхширокополосных излучений радиочастотного диапазона с генераторами возбуждения полупроводникового типа. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2018;1(24):35–42.

¹ <https://www.rsh-tech.ru/> (in Russ.). Дата обращения 31.01.2024. / Accessed January 31, 2024.

15. Boikov K.A., Shamin A.E. Software Analysis of the Signal Radio Profile during Passive Radio-Sensor Technical Diagnostics. *J. Commun. Technol. Electron.* 2022;67(11):1337–1344. <https://doi.org/10.1134/S1064226922110018>
16. Астахов Н.В., Башкиров А.В., Журилова О.Е., Макаров О.Ю. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье. *Радиотехника.* 2019;83(6–8):109–112.
17. Herder C., Ren L., van Dijk M., Yu M.-D., Devadas S. Trapdoor Computational Fuzzy Extractors and Cryptographically-Secure Physical Unclonable Functions. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing.* 2017;14(1):65–82. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2016.2536609>
18. Лукьянчиков А.В., Лызлов А.В. Система мониторинга радио эфира с использованием технологии SDR. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии.* 2021;3:69–70. URL: <https://elibrary.ru/dxiqdb>
19. Huang R., Cui H. Consistency of chi-squared test with varying number of classes. *J. Syst. Sci. Complex.* 2015;28(2):439–450. <https://doi.org/10.1007/s11424-015-3051-2>
20. Liu Y., Mu Y., Chen K., et al. Daily Activity Feature Selection in Smart Homes Based on Pearson Correlation Coefficient. *Neural Process. Lett.* 2020;51(2):1771–1787. <https://doi.org/10.1007/s11063-019-10185-8>

REFERENCES

1. Kostin M.S., Boikov K.A. *Radiovolnovye tekhnologii subnanosekundnogo razresheniya: monografiya (Radio Wave Technologies of Subnanosecond Resolution: monograph).* Moscow: RTU MIREA; 2021. 142 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7339-1565-4
2. Kostin M.S., Boikov K.A. *Signal'no-arkhitekturnyi reinzhiniring i radiosensornoe raspознаvanie elektronnykh sredstv (Signal-Architectural Reengineering and Radiosensor Recognition of Electronic Devices: textbook).* Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya; 2024. 152 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-1832-4
3. Shadinov S.S. Spatial ultra-wideband visualization of probed near-field surveillance objects. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics.* 2020;7 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.8>. Available from URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul20/8/text.pdf>
4. Nerukh A., Benson T. *Non-stationary Electromagnetics.* USA: Jenny Stanford Publishing; 2012. 616 p. <https://doi.org/10.1201/b13058>
5. Allen B., Dohler M., Okon E.E., et al. *Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging.* USA: John Wiley & Sons; 2007. 475 p.
6. Mahafza B.R. *Radar Signal Analysis and Processing Using Matlab.* USA: CRC Press; 2016. 504 p.
7. Carrer L., Yarovoy A.G. Concealed weapon detection using UWB 3-D radar imaging and automatic target recognition. In: *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).* 2014. P. 2786–2790. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902403>
8. Günther L. *Electromagnetic Field Theory for Engineers and Physicists.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. 659 p.
9. Oppermann I., Hämäläinen M., Iinatti J. *UWB: Theory and Applications.* John Wiley & Sons; 2004. 248 p.
10. Taylor J.D. (Ed.). *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Advanced Ultrawideband Radar Systems.* Boca Raton, USA: CRC Press; 2016. 494 p.
11. Wang X., Dinh A., Teng D. Radar Sensing Using Ultra Wideband – Design and Implementation. In: Matin M.A. (Ed.). *Ultra Wideband – Current Status and Future Trends.* 2013;11:41–63. <https://dx.doi.org/10.5772/48587>
12. Shadinov S.S., Kostin M.S., Konyashkin G.V., et al. Vector S-Parametric Analysis of Signal Phase Dynamic Radio Images. *Dokl. Phys.* 2023;68(9):311–318. <https://doi.org/10.1134/S1028335823090057>
[Original Russian Text: Shadinov S.S., Kostin M.S., Konyashkin G.V., Korchagin A.S., Romanovskii M.Yu., Gusein-zade N.G. Vector S-parametric analysis of signal phase dynamic radio images. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki.* 2023;512(1):78–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686740023050115>]
13. Boikov K.A. Determination of parameters of electronic devices by the method of passive radio-sensor technical diagnostics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2021;24(6):63–70 (in Russ.). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>
14. Lebedev E.F., Ostashev V.E., Ulyanov A.V. Means for generating ultra-wideband radio frequency emissions with semiconductor field generators. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antei = Bulletin of Concern VKO Almaz-Antey.* 2018;1(24):35–42 (in Russ.).
15. Boikov K.A., Shamin A.E. Software Analysis of the Signal Radio Profile during Passive Radio-Sensor Technical Diagnostics. *J. Commun. Technol. Electron.* 2022;67(11):1337–1344. <https://doi.org/10.1134/S1064226922110018>
16. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. Time-frequency analysis of non-stationary signals by wavelet transform and windowed Fourier transform. *Radiotekhnika = Radioengineering.* 2019;83(6–8):109–112 (in Russ.).
17. Herder C., Ren L., van Dijk M., Yu M.-D., Devadas S. Trapdoor Computational Fuzzy Extractors and Cryptographically-Secure Physical Unclonable Functions. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing.* 2017;14(1):65–82. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2016.2536609>
18. Lukyanchikov A.V., Lyzlov A.V. Radio broadcast monitoring system using SDR technology. *SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii = Microwave and Telecommunication Technology.* 2021;3:69–70 (in Russ.). Available from URL: <https://elibrary.ru/dxiqdb>
19. Huang R., Cui H. Consistency of chi-squared test with varying number of classes. *J. Syst. Sci. Complex.* 2015;28(2):439–450. <https://doi.org/10.1007/s11424-015-3051-2>

20. Liu Y., Mu Y., Chen K., et al. Daily Activity Feature Selection in Smart Homes Based on Pearson Correlation Coefficient. *Neural Process. Lett.* 2020;51(2):1771–1787. <https://doi.org/10.1007/s11063-019-10185-8>

Об авторах

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Бойков Константин Анатольевич, д.т.н., доцент, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bojkov_k@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, SPIN-код РИНЦ 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>

About the authors

Mihail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Deputy Director, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Konstantin A. Boikov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bojkov_k@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, RSCI SPIN-code 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>