

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391: 621.396: 621.373
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-57-68>
EDN XPSWYV



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Формирование радиовизионных сигналов спектральной сатурацией в режиме переходных искажений интегральных сверхвысокочастотных усилителей для систем распознавания жестов

К.В. Латышев[®], М.С. Костин, К.А. Бойков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: latyshev@mirea.ru

• Поступила: 17.06.2025 • Доработана: 29.09.2025 • Принята к опубликованию: 09.02.2026

Резюме

Цели. Цель работы – исследование механизмов нелинейного формирования широкополосного импульсного спектра в условиях перегрузки в сверхширокополосных (СШП) усилительных цепях для решения задач радиовизионного распознавания жестов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности и помехоустойчивости современных радиовизионных СШП-систем для жестикулярных интерфейсов управления.

Методы. Используются методы статистической радиофизики, частотно-временные методы вейвлет-преобразования радиоизображений, методы теории S-параметрического векторного анализа схем, методы программно-численного моделирования.

Результаты. Представлен метод генерации СШП-сигналов в сверхвысокочастотном диапазоне, основанный на управляемых нелинейных искажениях сигнала. Показано, что при переводе усилителя в режим насыщения формируется сигнал с резкими фронтами, обладающий широким энергетическим спектром. Построен лабораторный стенд киберфизической интерференционной радиосенсорной системы распознавания жестов и исследованы его характеристики. Исследованы свойства полученных импульсов в задачах радиовизионного управления. Экспериментально показана эффективность предложенного метода для задач радиовизионного распознавания жестов.

Выводы. Предложен метод нелинейной сатурации – синтеза спектра радиовизионных сигналов, основанный на явлениях переходных искажений в СШП-усилителях. Показано, что интерференционный режим при расширении исходной полосы частот до 900 МГц способен обеспечить повторяемость фазовых изображений не менее 0.94. Установлено, что в перегруженном по входу режиме усилителя типа SBB5089Z¹ при задающем низкомодовом гармоническом возбуждении на переходной частоте 47 МГц в каскадной схеме усиления на выходе радиовизионной антенны удается получить сигнал с измененным спектром. При этом управляемое

¹ Высоколинейный широкополосный монолитный (monolithic microwave integrated circuit – монолитная микроволновая интегральная схема) усилитель, разработанный компанией Qorvo, США. [High-linearity wideband, monolithic microwave integrated circuit (MMIC) amplifier was developed by Qorvo, USA.]

формирование спектра возбуждения антенны для каждого из усилительных модулей определяется уникальной импульсной характеристикой интегрального СШП-усилителя. Это позволило успешно применить такие усилители при решении задач радиовизионного распознавания жестов. Предложенная методика позволяет использовать стандартные СШП-усилители для создания компактных источников СШП-сигналов без усложнения схемотехники.

Ключевые слова: радиовизионный сигнал, сатурация спектра, переходные искажения, сверхширокополосный усилитель, идентификация жестов, киберфизический стенд

Для цитирования: Латышев К.В., Костин М.С., Бойков К.А. Формирование радиовизионных сигналов спектральной сатурацией в режиме переходных искажений интегральных сверхвысокочастотных усилителей для систем распознавания жестов. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):57–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-57-68>, <https://www.elibrary.ru/XPSWV>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Generation of radiovision signals by spectral saturation in transient distortion mode of integral microwave amplifiers for gesture recognition systems

Kirill V. Latyshev[@], Mihail S. Kostin, Konstantin A. Boikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

• Submitted: 17.06.2025 • Revised: 29.09.2025 • Accepted: 09.02.2026

Abstract

Objectives. The paper aims to investigate the mechanisms of the nonlinear formation of a wideband pulse spectrum under overload conditions in ultra-wideband (UWB) amplifier circuits in resolving problems related to radiovision gesture recognition. The relevance of the study stems from the need to enhance the accuracy and noise immunity of modern radiovision UWB systems for gestural control interfaces.

Methods. The study used statistical radiophysics, time-frequency methods of wavelet transformation of radio images, the theory of S-parametric vector analysis of circuits, and software-numerical modeling.

Results. The method for generating UWB signals in the microwave range based on controlled nonlinear signal distortion is presented. When the amplifier is switched to the saturation mode, a signal with sharp fronts is formed with a wide energy spectrum. A laboratory setup of a cyber-physical system for gesture recognition using radio sensing was developed, and its characteristics were investigated. The properties of the pulses generated in radiovision control systems were also studied. The effectiveness of the proposed approach for the tasks of radiovision gesture recognition was experimentally demonstrated.

Conclusions. A method of nonlinear saturation-synthesis of the spectrum of radiovision signals based on transient distortion phenomena in UWB amplifiers is proposed. It was shown that, when the initial frequency band is expanded up to 900 MHz, the interference mode can provide phase image repeatability of at least 0.94. It was also established that in the input overloaded mode of the SBB5089Z² type amplifier with low-mode harmonic excitation at a transition frequency of 47 MHz in a cascade amplification scheme, a signal with a modified spectrum can be obtained

² High-linearity wideband, monolithic microwave integrated circuit (MMIC) amplifier was developed by Qorvo, USA.

at the output of the radio antenna. In this case, the controlled formation of the antenna excitation spectrum for each amplifier module is determined by means of the unique impulse characteristic of the integrated UWB-amplifier. This allows for the successful application such amplifiers in resolving problems related to radiovision gesture recognition. The methodology proposed allows the use of standard UWB amplifiers to create compact sources of UWB signals without the complication of circuitry.

Keywords: radiovision signal, spectrum saturation, transient distortion, ultra-wideband amplifier, gesture recognition, cyber-physical stand

For citation: Latyshev K.V., Kostin M.S., Boikov K.A. Generation of radiovision signals by spectral saturation in transient distortion mode of integral microwave amplifiers for gesture recognition systems. *Russian Technological Journal*. 2026; 14(2):57–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-57-68>, <https://www.elibrary.ru/XPSWV>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Радиосенсорные системы ближнего киберфизического мониторинга используются для динамической идентификации жестов человека в таких сферах как смарт-медицина, промышленная автоматизация и виртуальная/дополненная реальность. Высокие требования к их надежности и разрешающей способности стимулируют поиск новых методов формирования и обработки радиовизионных сигналов [1, 2], что обуславливает актуальность исследования.

В работе предлагается оригинальный подход к спектральному синтезу таких систем. Вместо традиционных высоковольтных формирователей используется сверхширокополосный (СШП) усилитель, работающий в режиме преднамеренной перегрузки. В этом режиме он действует как нелинейный синтезатор, где для расширения спектра сигнала (спектральной сатурации) целенаправленно используются переходные нелинейные искажения, которые обычно считаются нежелательным эффектом. Новизна исследования заключается именно в этом преднамеренном применении нелинейных эффектов для управляемого расширения спектра.

Механизм сатурации обусловлен работой выходных транзисторов усилителя в режиме насыщения. При этом исходный сигнал преобразуется в импульсную форму, близкую к прямоугольной, с очень резкими фронтами, что и обеспечивает синтез широкополосного спектра, используемого в СШП-системах [3, 4]. Расширение спектра позволит увеличить разрешающую способность радиосенсорной системы, повысить устойчивость к узкополосным помехам и повысить точность временной и пространственной локализации жеста.

Статья представляет теоретические, модельные и экспериментальные исследования этого метода нелинейного спектропреобразования для задачи распознавания жестов радиовизионными методами.

2. МОДЕЛЬ СИНТЕЗА ШИРОКОПОЛОСНОГО СПЕКТРА РАДИОВИЗИОННОГО СИГНАЛА, ОСНОВАННАЯ НА ВОЗНИКНОВЕНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В СШП-УСИЛИТЕЛЕ

Нелинейное формирование спектра радиовизионного сигнала происходит при работе усилительных СШП-каскадов в режиме перегрузки за счет возникновения переходных искажений, аналитически описанных в работе [5] при анализе эквивалентной схемы СШП-каскада с индуктивной коррекцией (рис. 1).

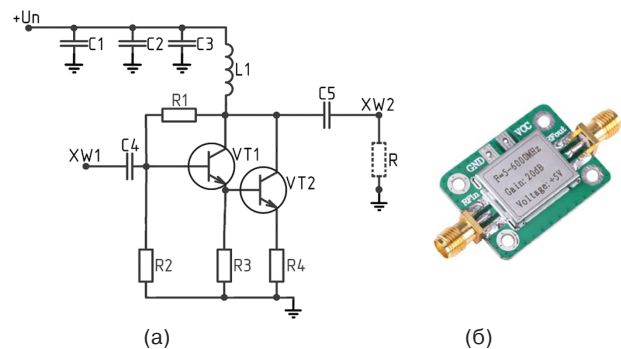


Рис. 1. СШП-усилитель SBB5089Z³ с индуктивной коррекцией:

(а) принципиальная схема, (б) внешний вид. Обозначения элементов схемы соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81⁴

³ Высоколинейный широкополосный монокристаллический (monolithic microwave integrated circuit – монокристаллическая микроволновая интегральная схема) усилитель, разработанный компанией Qorvo, США. [High-linearity wideband, monolithic microwave integrated circuit (MMIC) amplifier was developed by Qorvo, USA.]

⁴ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. *Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах*. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. *Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams*. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

В работе используется монолитный СШП-усилитель типа SBB5089Z на основе InGaP HBT⁵-транзисторов, использующий конфигурацию Дарлингтона со схемой активного смещения.

В момент формирования входного низкомодового сигнала СШП-усилитель работает в режиме преднамеренной перегрузки. В его выходной цепи дроссель L1 с индуктивностью L препятствует быстрому нарастанию тока через нагрузочный резистор R, который является эквивалентом входного сопротивления R последующего каскада. Это приводит к временному накоплению энергии в паразитных емкостях каскада (эквивалентная емкость C) и элементах печатной платы, что замедляет переходные процессы в начальной фазе сигнала. По мере накопления энергии в дросселе L1 эквивалентная емкость C успевает зарядиться до уровня напряжения, превышающего порог открытия составного транзисторного каскада VT1–VT2. В результате происходит резкое переключение транзисторов в режим насыщения, что формирует импульс с крутыми фронтами и широким спектром – необходимое условие для генерации СШП-сигналов.

Коэффициент усиления сигнала в операторной форме можно представить следующим образом [5]:

$$K(p) = S \frac{(pL + R) \frac{1}{pC}}{pL + R + \frac{1}{pC}} = S \frac{pL + R}{1 + pRC + p^2LC},$$

где p – оператор Лапласа, S – крутизна составного транзисторного каскада Дарлингтона.

Пусть коэффициент усиления на низких частотах $K_0 = SR$, постоянная времени эквивалентного контура $\tau_{bas} = RC$, $m = L/CR^2 = (L/R)/CR$ – параметр коррекции. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{K(p)}{K_0} &= \frac{1 + p\tau_{bas}m}{1 + p\tau_{bas} + p^2m\tau_{bas}^2} = \\ &= \frac{1}{\tau_{bas}} \cdot \frac{p + \frac{1}{m\tau_{bas}}}{p^2 + \frac{1}{m\tau_{bas}}p + \frac{1}{m\tau_{bas}^2}}. \end{aligned}$$

Следовательно, сигнал в операторной форме на выходе СШП-каскада с индуктивной коррекцией в перегруженном по входу режиме можно представить как [5]:

$$\frac{U(p)}{K_0} = \frac{1}{\tau_{bas}} \cdot \frac{p + \frac{1}{m\tau_{bas}}}{p \left(p^2 + \frac{1}{m\tau_{bas}}p + \frac{1}{m\tau_{bas}^2} \right)}.$$

Характер переходного процесса определяется корнями характеристического уравнения системы, которые вычисляются по формуле [5]:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2m\tau_{bas}} \pm \frac{1}{2m\tau_{bas}} \sqrt{4m - 1}.$$

При $m > 0.25$, что соответствует в области переходных частот условию формирования переходных осцилляций с выбросом при мгновенном открытии составного каскада VT1–VT2 (рис. 2а), нормированная передаточная функция СШП-усилителя будет иметь вид [5]:

$$\frac{h(t)}{K_0} = 1 - \frac{2m}{\sqrt{4m - 1}} e^{-\frac{t}{2m\tau_{bas}}} \sin \left(\frac{\sqrt{4m - 1}}{2m\tau_{bas}} t + \theta \right),$$

где $\theta = \pi - \arcsin \frac{\sqrt{4m - 1}}{2m}$, t – время.

При этом переходный процесс представляет собой затухающие колебания с выбросом, величина которого зависит от коэффициента коррекции m .

Для $m = 1$ (рис. 2б), что соответствует условию свободных осцилляций на выходе СШП-усилителя, выражение для передаточной функции будет иметь вид [5]:

$$\frac{h(t)}{K_0} = 1 - e^{-\frac{t}{2RC}} \left(\cos \left(\frac{\sqrt{3}t}{2RC} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \left(\frac{\sqrt{3}t}{2RC} \right) \right).$$

Таким образом, в области переходных частот передаточной характеристики СШП-усилителя, который можно представить как модель активного полосового фильтра второго порядка, формируется переходной процесс, соответствующий свободным осцилляциям.

За время ζ при $f_1 > f_2$ система успевает совершить цикл свободных колебаний (рис. 2а), что приводит к формированию на выходе СШП-усилителя затухающего радиоимпульса, который далее усиливается идентичным каскадом. При этом радиоимпульс имеет экспоненциальное затухание и формируется в соответствии с импульсной характеристикой системы, а выбор частоты f_1 низкомодового возбуждения, соответствующей переходной области частот, определяется условиями достижения параметра коррекции $m = 1$. Частота f_2 соответствует линейному усилению сигнала.

Следует заметить, что перегрузка входа СШП-усилителя по определенной частоте может удовлетворять условию самовозбуждения Баркгаузена [6]:

⁵ InGaP (indium gallium phosphide) – индий-галлий-фосфид; HBT (heterojunction bipolar transistor) – гетеропереходный биполярный транзистор. [InGaP is indium gallium phosphide and HBT is a heterojunction bipolar transistor.]

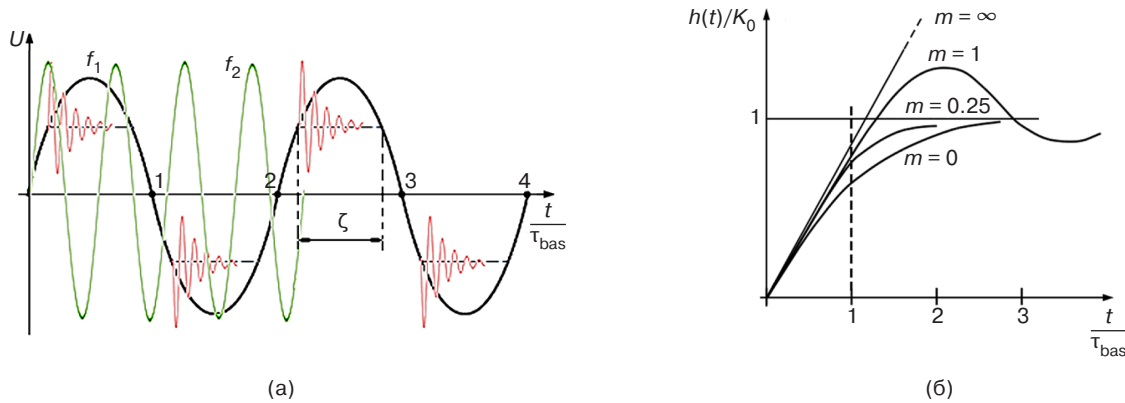


Рис. 2. Переходные искажения на выходе СШП-усилителя: (а) искажения сигнала при перегруженном режиме в области переходных частот (по осям x и y – нормированные величины), (б) передаточная функция СШП-усилителя для различных значений параметра коррекции m

$$|A\beta| \geq 1 \text{ и } \angle A\beta = 2\pi n, n \in \mathbb{Z}, \quad (1)$$

где A – коэффициент усиления, β – коэффициент передачи обратной связи, $\angle A\beta$ – фазовый сдвиг между входом и выходом через петлю обратной связи, \mathbb{Z} – множество целых чисел.

Таким образом, для существования автоколебаний усиление должно компенсировать потери в цепи обратной связи, и полный фазовый сдвиг в цепи обратной связи должен быть кратен 2π [6].

Пусть СШП-усилитель имеет комплексную передаточную функцию f , определяемую как

$$A(f) = \frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_c}}, \quad (2)$$

где A_0 – усиление на низких частотах ($f \ll f_c$), f_c – полюса пропускания усилителя, и комплексную функцию обратной связи:

$$B(f) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{\text{band}}}}, \quad (3)$$

где f_{band} – полоса цепи обратной связи [7].

Тогда петлевое усиление с учетом (2) и (3):

$$T(f) = A(f)B(f) = \frac{A_0}{\left(1 + j \frac{f}{f_c}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{\text{band}}}\right)}. \quad (4)$$

В нелинейных системах, где усилитель работает в режиме ограничения, усиление является функцией амплитуды входного сигнала V :

$$A(V) = \begin{cases} A_{\text{lin}}, V < V_{\text{sat}}, \\ \frac{V_{\text{sat}}}{V}, V \geq V_{\text{sat}}, \end{cases} \quad (5)$$

где A_{lin} – линейное значение коэффициента усиления, V_{sat} – напряжение насыщения усилителя [8, 9].

При $V > V_{\text{sat}}$ усиление падает как $\frac{1}{V}$, и если коэф-

фициент передачи цепи обратной связи зависит от частоты, то, принимая во внимание (1) и (3), получим:

$$|T(f, V)| = |A(f, V)| \cdot B(f) \geq 1. \quad (6)$$

Условие самовозбуждения усилителя по критерию Баркгаузена (6) может выполняться только на определенных частотах, где коэффициент передачи цепи обратной связи $B(f)$ достигает значительных величин. Это возможно при наличии частотного резонанса, обусловленного корректирующими (паразитными) индуктивностями и емкостями схемы. Физический принцип данного явления заключается в следующем: при работе СШП-усилителя в нелинейном режиме ограничения сигнала (насыщения) форма выходного напряжения существенно искажается – из синусоидального сигнала он преобразуется в сигнал, близкий к прямоугольному импульсу, содержащему резкие фронты и спады. Такие временные перепады несут в себе широкий спектр высокочастотных гармоник, что следует из теории преобразования Фурье. Если среди этих гармоник существуют гармоники, совпадающие с резонансными частотами корректирующих (паразитных) LC⁶-цепочек, то соответствующие гармоники усиливаются за счет увеличения коэффициента передачи $B(f)$. В результате система переходит в режим генерации широкополосного сигнала, который во временной области представляет собой затухающий колебательный импульс (близкий по форме к моноциклу Гаусса), а в частотной – имеет широкую полосу энергетического спектра, охватывающего диапазон до сотен мегагерц [8, 10–12].

⁶ Электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивности (L) и конденсатора (C), соединенных вместе. [An electrical circuit consisting of an inductor (L) and a capacitor (C) connected together.]

Рассмотрим процесс возбуждения радиовизионной антенны синтезируемым радиоимпульсом. Известно, что функция электрической компоненты поля $E(t)$ радиовизионного сигнала на выходе СШП-антенны пропорциональна производной функции тока сигнала возбуждения:

$$E(t) \approx \frac{dI_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} h_A(t),$$

где $I_{\text{ВЫХ}}(t)$ – ток радиоимпульса возбуждения, сформированный на выходе каскадов СШП-усилителей с некоторой импульсной характеристикой $h_A(t)$ [13].

Для создания программно-численной модели синтеза спектра радиовизионного сигнала на базе каскадов из СШП-усилителей проведено экспериментальное измерение S -параметров для выборки из трех случайно выбранных СШП-усилителей типа SBB5089Z. Регистрация S -параметров линейки СШП-усилителей проводилась при помощи векторного анализатора цепей R&S ZNLE⁷ в полосе частот 0.01–5 ГГц (табл. 1).

Таблица 1. Радиотехнические характеристики СШП-усилителей

Параметр	SBB5089Z	TQP7M9103 ⁸	WYDZ ⁹
Коэффициент усиления, дБ	20–30	30	60
Полоса пропускания, МГц	50–6000	10–3000	1–2000
Уровень шума, дБ	3.5	4	6–8
Предельная выходная мощность, дБм	23	20	15
Предельная входная мощность, дБм	15	10	5

По результатам векторных измерений на рис. 3 приведены передаточные характеристики S_{21} , которые были сведены в векторные массивы для интерпретации СШП-усилителей при программно-численном моделировании формирователя радиовизионного сигнала в среде *MATLAB Simulink*¹⁰ (рис. 4).

⁷ R&S ZNLE – векторный анализатор цепей производства компании Rohde & Schwarz (Германия). Предназначен для тестирования высокочастотных компонентов, таких как фильтры, усилители, кабели и антенны. [R&S ZNLE is a vector network analyzer manufactured by Rohde & Schwarz, Germany. It is designed for testing high-frequency electronic components such as filters, amplifiers, cables, and antennas.]

⁸ TQP7M9103 – высоколинейный усилитель сигнала, выпускаемый компанией Qorvo (США). [TQP7M9103 is a high-power signal amplifier manufactured by Qorvo, USA.]

⁹ WYDZ – малошумящий усилитель сигнала, выпускаемый компанией TZT (Китай). [WYDZ is a low-noise amplifier manufactured by TZT, China.]

¹⁰ <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Дата обращения 06.02.2025. / Accessed February 06, 2026.

Схема формирователя синтезируемого спектра возбуждения СШП-антенны состоит из следующих функциональных блоков: 1 – генератор низкомодового сигнала, по выбору частоты соответствующий условию $m = 1$; 2 – блок входных параметров радиосистемы, задаваемый специальной библиотекой Simscape (устанавливает основные характеристики сигнала, передаваемого в тракт СШП-усиления); 3 – СШП-усилитель формирования переходных искажений; 4 – усилитель для дальнейшей передачи сигнала (передаточные характеристики S_{21} подгружаются из массивов, полученных в результате векторных измерений); 5 – блок выходных параметров радиосистемы; 6 – осциллограф, регистрирующий сигнал возбуждения СШП-антенны; 7 – блок свойств радиосистемы, определяющий глобальные параметры моделирования, такие как частотный диапазон, шумы, импеданс и т.д.

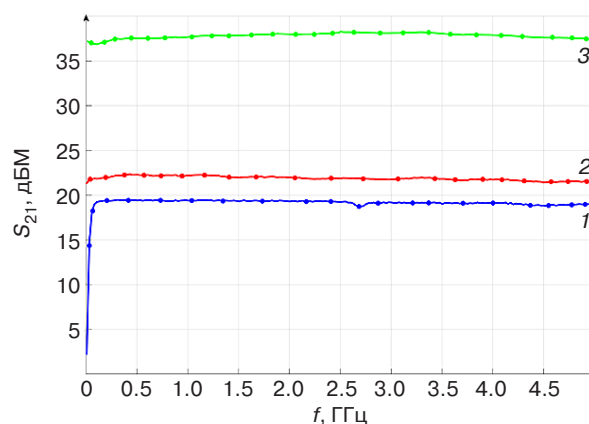


Рис. 3. Передаточные характеристики S_{21} СШП-усилителей: SBB5089Z (1), TQP7M9103 (2), WYDZ (3)

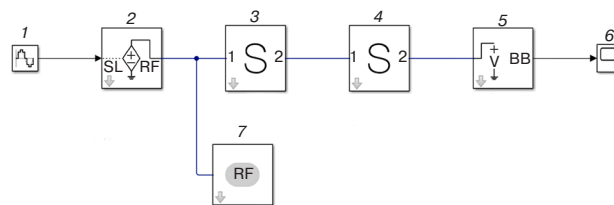


Рис. 4. Модель нелинейного формирователя синтезируемого спектра радиовизионного сигнала возбуждения СШП-антенны.

RF (radio frequency) – радиочастотный; SL (*Simulink*) – принимает сигнал от стандартного блока *Simulink*; BB (baseband) – основная полоса

Усилительный СШП-каскад с индуктивной коррекцией (рис. 1) может быть представлен эквивалентной схемой RLC¹¹-фильтра второго порядка (рис. 5). Динамика переходного процесса в такой

¹¹ Электрическая схема, состоящая из резистора (R), индуктивности (L) и емкости (C). [An electrical circuit consisting of a resistor (R), an inductor (L) and a capacitor (C).]

схеме при подаче ступенчатого воздействия (что эквивалентно резкому открытию транзистора в режиме насыщения) полностью определяется параметром коррекции m . Таким образом, задача состоит в том, чтобы подобрать такие условия работы усилителя, при которых $m = 1$.

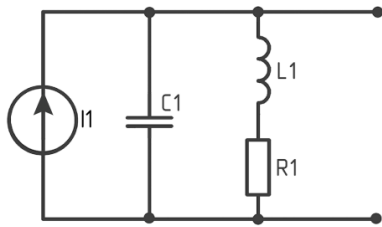


Рис. 5. Эквивалентная схема RLC-фильтра второго порядка

Параметры $R1$, $L1$ и $C1$ в эквивалентной схеме не являются постоянными величинами. Они представляют собой эффективные параметры усилителя, которые зависят от частоты входного сигнала. Следовательно, параметр коррекции m сам является функцией частоты $m(f)$. Задача сводится к нахождению такой частоты возбуждения f_{opt} , при которой выполняется условие $m(f_{opt}) = 1$.

Анализируя S_{21} -параметры (рис. 3) усилителя SBB5089Z, можно выделить диапазон от 40 до 50 МГц, где наблюдается аномалия амплитудно-частотной характеристики, свидетельствующая о сложном взаимодействии внутренних реактивных элементов. Эта область соответствует зоне, где усилитель склонен к колебательным переходным процессам. Путем моделирования в программе *Simulink* (рис. 4) было установлено, что именно при возбуждении на частоте 47 МГц и перегрузке по входу (амплитуда 400 мВ) достигается режим, соответствующий $m = 1$. Моделированный импульсный сигнал функции возбуждения, задаваемый низкомодовым колебанием, будет иметь вид, приведенный на рис. 6.

После прохождения усилительного тракта в результате перегрузки по входу первого СШП-усилителя в переходном режиме на выходе второго усилительного СШП-каскада имеем синтезируемый сигнал с расширенным спектром – нелинейная спектральная насыщенность в полосе до 900 МГц. С учетом импульсной характеристики полосковой целевой СШП-антенны типа Вивальди, используемой в работе, спектр E радиовизионного сигнала на ее выходе представлен на рис. 7.

При проведенном моделировании в среде *MATLAB Simulink* был выполнен анализ преобразования спектра сигнала. Исходный гармонический сигнал с частотой 47 МГц обладал узкополосным

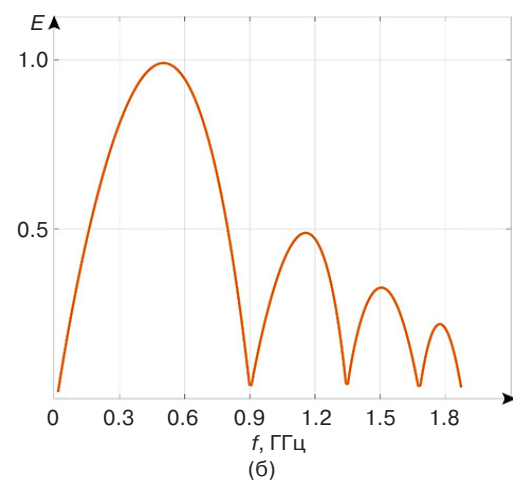
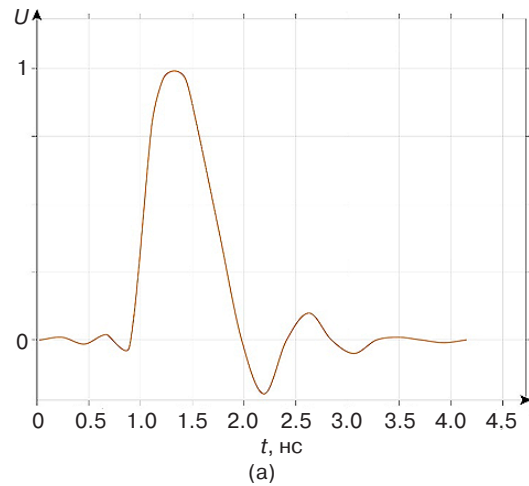


Рис. 6. Синтезируемый низкомодовым колебанием импульсный сигнал возбуждения СШП-антенны при перегруженном динамическом режиме СШП-усилителя SBB5089Z (по вертикальным осям – нормированные значения):
(а) временное представление радиоимпульса U ,
(б) спектр E синтезируемого на переходных искажениях радиоимпульса

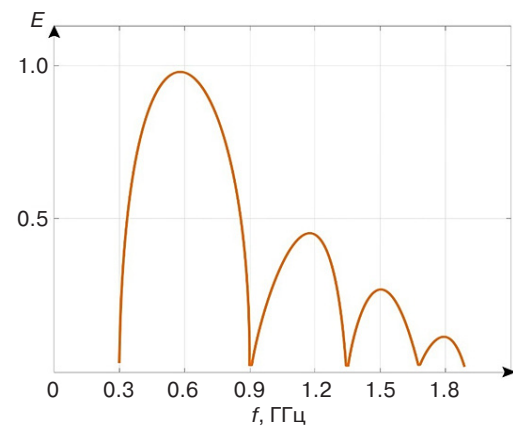


Рис. 7. Спектр радиовизионного сигнала на выходе СШП-антенны Вивальди (по оси E – нормированные значения)

спектром. Эффективная ширина спектра (рассчитанная на уровне -10 дБ от пиковой мощности) исходного сигнала составляла ~ 42.25 МГц. После прохождения предложенной усилительной системы, работающей в режиме преднамеренной перегрузки и управляемых переходных искажений, сигнал претерпел нелинейное спектральное преобразование. На выходе системы был сформирован короткий радиоимпульс с крутыми фронтами, характерный для СШП-сигналов. Анализ выходного сигнала показал, что его эффективная ширина спектра (также на уровне -10 дБ) расширилась до значения ~ 900 МГц, что соответствует коэффициенту расширения спектра более 20.

2. РАСПОЗНАВАНИЕ РАДИОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЖЕСТОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ОТКЛИКОМ НА СИНТЕЗИРОВАННЫЙ РАДИОВИЗИОННЫЙ СИГНАЛ

Экспериментальная часть исследования проведена для проверки эффективности разработанного метода нелинейного формирования спектра радиовизионного сигнала и подтверждения результатов численного моделирования. Такая постановка обусловлена тем, что эффективность систем идентификации в значительной степени определяется характеристиками зондирующего сигнала: ширина спектра и форма импульса напрямую влияют на разрешающую способность, устойчивость к помехам и достоверность выделения признаков. Эксперимент был сосредоточен на идентификации четырех различных жестов рук и оценке точности, стабильности и надежности системы распознавания.

Для проведения экспериментов на основе модели нелинейного формирователя синтезируемого спектра радиовизионного сигнала возбуждения СШП-антенны (рис. 4) создан киберфизический стенд идентификации жестов рук (рис. 8), состоящий из следующих блоков:

- векторный генератор импульсов R&S SMBV100B¹², предназначенный для формирования исходного гармонического сигнала. Используя данные, полученные в первой части статьи, сигнал генерировался на частоте 47 МГц;
- блок формирования СШП-сигнала, состоящий из двух малошумящих СШП-усилителей SBB5089Z,

¹² SMBV100B – высокопроизводительный векторный генератор сигналов компании Rohde & Schwarz (Германия). Предназначен для генерирования сложных, модулированных радиочастотных сигналов для тестирования и измерений. [SMBV100B is a high-performance vector signal generator manufactured by Rohde & Schwarz, Germany. It is designed to generate complex and modulated radio frequency (RF) signals for testing and measuring purposes.]

работающих в преднамеренно перегруженном режиме (рис. 3);

- антенная система, включающая в себя пару приемо-передающих СШП-антенн типа Вивальди Deerpase R101C¹³, которые излучают зондирующий сигнал (рис. 7) и принимают отраженный от объекта (руки) отклик;
- блок усиления принятого сигнала, состоящий из двух СШП-усилителей сигнала;
- система сбора данных, состоящая из цифрового осциллографа R&S RTO2032¹⁴, который использовался для оцифровки и регистрации принятых сигналов;
- блок обработки, которым является персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением для обработки, анализа и визуализации полученных данных.

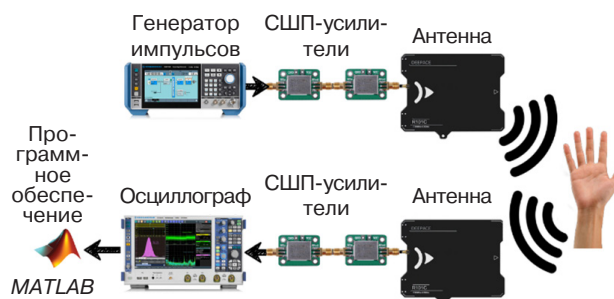


Рис. 8. Киберфизический стенд идентификации жестов рук

Для эксперимента были выбраны такие жесты, как вращение кистью (далее – вращение), отталкивание кистью от груди (далее – отталкивание), пролистывание справа налево (далее – пролистывание) и сжатие кулака (далее – сжатие) (рис. 9). Эти движения охватывают широкий спектр характеристик кинематики жеста, обеспечивая разнообразие направлений и типов движений [14–16]. Они просты, понятны человеку и широко используются в повседневной жизни при управлении цифровыми устройствами [17]. Выбор жестов также продиктован их функциональной значимостью в интерфейсах (табл. 2).

¹³ Deerpase R101C – сверхширокополосная направленная антенна, выпускаемая компанией Deerpase (Китай). Используется для приема/передачи высокочастотных сигналов в широком диапазоне. [Deerpase R101C is an ultra-wideband, directional antenna manufactured by Deerpase, China. It is used for the reception and transmission of high-frequency signals over a wide range of frequencies.]

¹⁴ R&S RTO2032 – цифровой осциллограф, предназначенный для комплексного анализа сигналов в нескольких областях. Выпускается компанией Rohde & Schwarz (Германия). [R&S RTO2032 is a digital oscilloscope designed for analyzing complex signals in a variety of fields. It is manufactured by Rohde & Schwarz, Germany.]

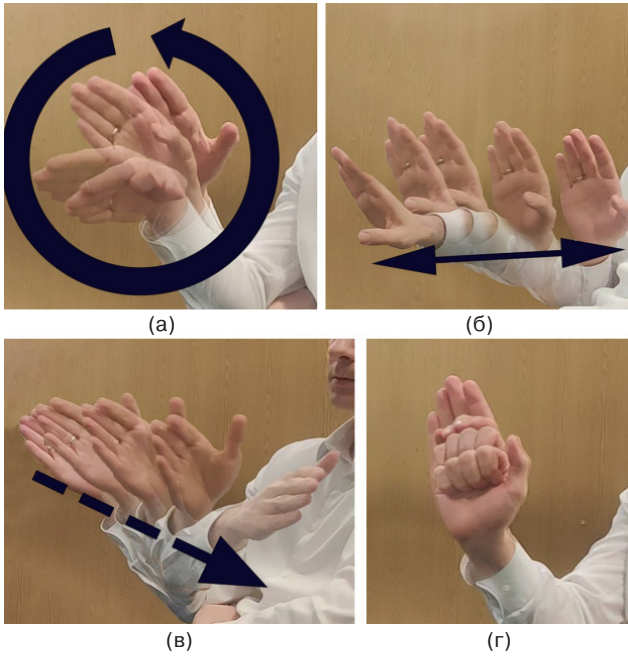


Рис. 9. Жесты, применяемые в эксперименте: (а) вращение, (б) отталкивание, (в) пролистывание, (г) сжатие

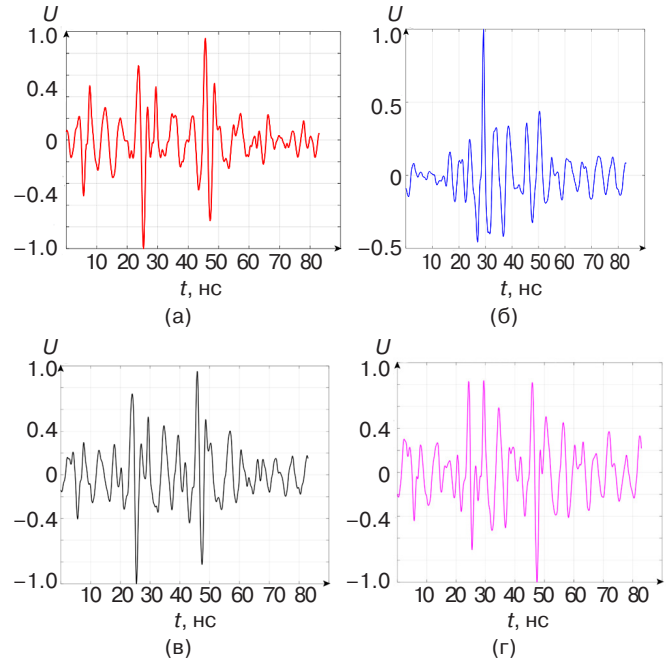


Рис. 10. Представление реперных радио изображений жестов (по вертикальным осям – нормированные значения): (а) вращение, (б) отталкивание, (в) сжатие, (г) пролистывание

Таблица 2. Характеристики жестов

Жест	Характеристика	Тип движения	Амплитуда, см	Время жеста, с	Кинематика	Функция в интерфейсе
Вращение кистью	Непрерывное периодическое	Непрерывное периодическое	<15	0.4	Изменение угла кисти относительно направления сигнала	Управление настройками, прокрутка параметров
Отталкивание	Поступательное	Поступательное	>30	0.8	Движение от центра тела	Отмена/отклонение
Пролистывание	Горизонтальное	Горизонтальное	15–30	0.6	Строго выраженное направление	Навигация по интерфейсу
Сжатие кулака	Статическое	Статическое	<5	0.3	Изменение формы кисти без значительного перемещения	Подтверждение или активация команд

Каждый жест представлялся в виде набора из 10 контрольных кадров (радиовизуальных «снимков»), которые сворачивались в единое итоговое радиоизображение, или реперный радиопортрет, который служил уникальным эталоном для данного жеста (рис. 10). В ходе эксперимента были определены коэффициенты корреляции Пирсона для анализа линейной взаимосвязи между выбранными жестами. Результаты эксперимента показали, что система идентификации обладает высокой точностью в распознавании каждого жеста при их повторении, о чем свидетельствуют значения внутригрупповой корреляции, близкие к 1. Например, вращение кистью имеет коэффициент 0.95, отталкивание – 0.99, сжатие кулака – 0.96, а пролистывание кистью – 0.97 (табл. 3). Это подтверждает стабильность распознавания одного и того же движения.

Таблица 3. Усредненный коэффициент корреляции между реперными радиопортретами и выполненными жестами

Жест	Реперный радио-портрет	Вращение	Отталкивание	Сжатие	Пролистывание
Вращение		0.95	0.30	0.82	0.62
Отталкивание		0.30	0.99	0.48	0.65
Сжатие		0.82	0.48	0.96	0.84
Пролистывание		0.62	0.65	0.84	0.97

Необходимо отметить, что некоторые пары жестов показали высокую корреляцию, например, сжатие кулака и пролистывание – 0.84, что говорит о схожести признаков, используемых системой для их распознавания. В то же время вращение и пролистывание имеют среднюю корреляцию 0.62, что может быть связано с общими компонентами движения кисти. Умеренная связь была отмечена между отталкиванием и пролистыванием – 0.65, что объясняется направленным характером обоих движений.

Низкая корреляция наблюдалась между вращением и отталкиванием – 0.30, а также между отталкиванием и сжатием – 0.48. Эти жесты имеют существенно разные кинематические характеристики, что указывает на их хорошую различимость системой.

На основе результатов можно сделать вывод, что система эффективно распознает выбранные жесты, обеспечивая их высокую точность и стабильность. Это обусловлено высокой воспроизводимостью формы СШП-импульса, полученного при возбуждении усилителя SBB5089Z.

В ходе эксперимента была изучена реакция системы распознавания жестов на некорректные или пропущенные контрольные кадры жеста. Для оценки устойчивости системы к ошибкам последовательно увеличивалось количество искаженных или пропущенных кадров – от одного до девяти. Результаты показали, что разные жесты обладают различной степенью устойчивости к некорректным (пропущенным) кадрам (рис. 11). Например, жест отталкивания проявил наибольшую стабильность, а жест пролистывания – наименьшую. Это говорит о том, что успешное распознавание жеста требует наличия различного количества контрольных кадров.

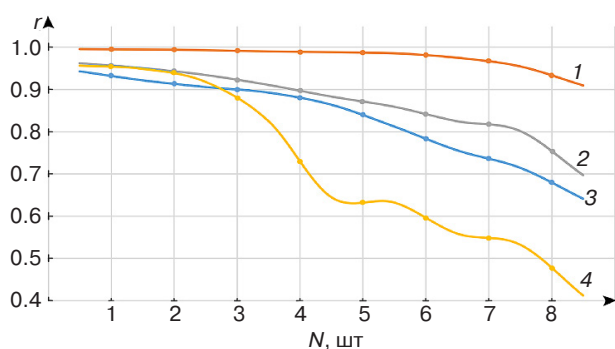


Рис. 11. Влияние количества N неверных кадров жеста на коэффициент корреляции r с реперным радиоизображением: 1 – отталкивание, 2 – сжатие, 3 – вращение, 4 – пролистывание

Эксперимент показал, что система распознавания идентифицирует жесты с коэффициентом корреляции выше 0.95, но ее устойчивость к некорректным (пропущенным) кадрам зависит

от особенностей жеста. Так, отталкивание и сжатие оказались более надежными относительно других жестов, демонстрируя коэффициент корреляции более 0.90 даже при 4 пропущенных кадрах. Эти жесты можно считать подходящими для применения в сложных условиях, где возможен прием неполных или искаженных данных, например, при помехах или снижении качества записи. В то же время пролистывание кистью требует более строгого контроля качества, т.к. этот жест зависит от корректности всего набора снимков.

Полученные результаты подчеркивают необходимость анализа специфики каждого жеста при разработке систем распознавания. Для жестов с высокой чувствительностью к искажениям, таких как пролистывание, может потребоваться дополнительная оптимизация алгоритмов обработки данных или включение механизмов компенсации ошибок. Это позволит повысить надежность системы в реальных условиях эксплуатации, где потеря данных или их частичное искажение неизбежны.

Также был проведен эксперимент по оценке повторяемости идентификации жестов. Каждый жест повторялся 100 раз, и анализировались результаты проведенной идентификации (табл. 4).

Таблица 4. Оценка повторяемости эксперимента

Жест	Количество выполненных жестов	Количество правильно распознанных жестов	Повторяемость
Вращение кистью	100	95	0.95
Отталкивание		98	0.98
Пролистывание		96	0.96
Сжатие		94	0.94

В результате оценки повторяемости определено, что достоверность распознавания всегда была выше 0.94. При такой ее величине эксперимент можно считать надежным и достоверным. Влияние случайных факторов минимально, а результаты можно уверенно применять на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены и проанализированы S -параметры трех радиочастотных СШП-усилителей. В результате у СШП-усилителя SBB5089Z выявлена возможность управляемого искажения сигнала в диапазоне от 40 до 50 МГц для расширения

- выходного спектра. Определено, что на частоте 47 МГц параметр коррекции равен 1.
- Предложен метод нелинейного синтеза спектра радиовизионного сигнала, который позволил обеспечить значение коэффициента расширения спектра более 20.
 - Система идентификации жестов на основе предложенного метода показала высокую эффективность: коэффициент корреляции между распознаваемым и реперным жестом составляет 0.99 для жеста отталкивания, 0.95 – для жеста вращения, 0.96 – для жеста пролистывания и 0.96 – для жеста сжатия.
 - Особое внимание уделено устойчивости системы к воздействию на процесс идентификации жестов, выраженному в появлении ошибочных или пропущенных кадров. В рамках каждого жеста изучалось, как система реагирует на частичную потерю данных. Результаты показали, что

- все жесты возможно распознать с коэффициентом корреляции выше 0.9.
- Повторяемость идентификации жестов составляет не менее 0.94.

Вклад авторов

К.В. Латышев – построение программно-численной модели и лабораторного стенда системы киберфизического мониторинга для радиосенсорной идентификации жестикуляции человека.

М.С. Костин, К.А. Бойков – разработка нелинейного синтезируемого спектра радиовизионного сигнала в условиях перегруженного режима сверхширокополосного усиления.

Authors' contributions

K.V. Latyshev – developing the software-numerical model and laboratory stand of a cyber-physical monitoring system for radio-frequency identification of human gestures.

M.S. Kostin, K.A. Boikov – developing the nonlinear synthesized spectrum of a radiovision signal under overloaded ultra-wideband amplification mode.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Khan I., Kwon Y. Radar-based Hand Gesture Recognition with Feature Fusion using Robust CNN-LSTM and Attention Architecture. *IEEE Access*. 2025;13:69281–69291. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3558293>
- Костин М.С., Бойков К.А. Цифровые технологии сигнального радиовидения и радиомониторинга. *Russian Technological Journal*. 2024;12(4):59–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>
- Wu M. Gesture Recognition Based on Deep Learning: A Review. *EAI Endorsed Transactions on e-Learning*. 2024;10. <https://doi.org/10.4108/eetel.5191>
- Qu C., Zhang Y., Jin L., et al. Exploring hand gesture recognition using micro-Doppler radar data based on vision transformers. *J. Phys.: Conf Ser.* 2023;2504:012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2504/1/012046>
- Sedra A., Smith K., Carusone T., Gaudet V. *Microelectronic Circuits (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)*. 8th ed. Oxford University Press; 2020. P. 58–134, 174–246, 508–696.
- He F., Ribas R., Lahuec C., Jézéquel M. Discussion on the general oscillation startup condition and the Barkhausen criterion. *Analog Integr. Circ. Signal Process.* 2009;59:215–221. <https://doi.org/10.1007/S10470-008-9250-1>
- Razavi B. *RF Microelectronics (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series)*. 2nd ed. Prentice Hall Press; 2011. P. 255–333, 751–831.
- Wang Y., Lang L., Lee C.H., Zhang B., Chong Y. Topologically enhanced harmonic generation in a nonlinear transmission line metamaterial. *Nat. Commun.* 2019;10:Article number:1102. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08966-9>
- Guarcello C., Ahrens F., Avallone G., et al. Nonlinear Behavior of Josephson Traveling Wave Parametric Amplifiers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2024;34(3):1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3367615>
- Hong M., Chang Y.H., Dienes A., Delfyett P., Dijaili S., Patterson F. Femtosecond self- and cross-phase modulation in semiconductor laser amplifiers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 1996;2(3):523–539. <https://doi.org/10.1109/2944.571753>
- Hussain S., Siddiqui H., Saleem A., et al. Therapeutic Exercise Recognition Using a Single UWB Radar with AI-Driven Feature Fusion and ML Techniques in a Real Environment. *Sensors*. 2024;24(17):5533. <https://doi.org/10.3390/s24175533>
- Oppermann I., Hämmäläinen M., Inatti J. *UWB Theory and Applications*. John Wiley & Sons; 2004, 248 p.
- Taylor J.D. (Ed.). *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. CRC Press; 2016, 494 p.
- Бульгин Д.А., Мамонова Т.Е. Распознавание жестов рук в режиме реального времени. *Системы анализа и обработки данных*. 2020;78(1):25–40. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-25-40>
- 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>. Дата обращения 05.02.2026.
- 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://doi.org/10.5772/48587>
- Латышев К.В. Киберфизическое радиожестикуляционное FPV-управление дронами. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком – 2024»): Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2024. С. 441–445. <https://www.elibrary.ru/dukcnp>

REFERENCES

1. Khan I., Kwon Y. Radar-based Hand Gesture Recognition with Feature Fusion using Robust CNN-LSTM and Attention Architecture. *IEEE Access*. 2025;13:69281–69291. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3558293>
2. Kostin M.S., Boikov K.A. Digital technologies for signal radio vision and radio monitoring. *Russian Technological Journal*. 2024;12(4):59–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>
3. Wu M. Gesture Recognition Based on Deep Learning: A Review. *EAI Endorsed Transactions on e-Learning*. 2024;10. <https://doi.org/10.4108/eetel.5191>
4. Qu C., Zhang Y., Jin L., et al. Exploring hand gesture recognition using micro-Doppler radar data based on vision transformers. *J. Phys.: Conf Ser.* 2023;2504:012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2504/1/012046>
5. Sedra A., Smith K., Carusone T., Gaudet V. *Microelectronic Circuits (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)*. 8th ed. Oxford University Press; 2020. P. 58–134, 174–246, 508–696.
6. He F., Ribas R., Lahuec C., Jézéquel M. Discussion on the general oscillation startup condition and the Barkhausen criterion. *Analog Integr. Circ. Signal Process.* 2009;59:215–221. <https://doi.org/10.1007/S10470-008-9250-1>
7. Razavi B. *RF Microelectronics (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series)*. 2nd ed. Prentice Hall Press; 2011. P. 255–333, 751–831.
8. Wang Y., Lang L., Lee C.H., Zhang B., Chong Y. Topologically enhanced harmonic generation in a nonlinear transmission line metamaterial. *Nat. Commun.* 2019;10:Article number:1102. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08966-9>
9. Guarcello C., Ahrens F., Avallone G., et al. Nonlinear Behavior of Josephson Traveling Wave Parametric Amplifiers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2024;34(3):1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3367615>
10. Hong M., Chang Y.H., Dienes A., Delfyett P., Dijaili S., Patterson F. Femtosecond self- and cross-phase modulation in semiconductor laser amplifiers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 1996;2(3):523–539. <https://doi.org/10.1109/2944.571753>
11. Hussain S., Siddiqui H., Saleem A., et al. Therapeutic Exercise Recognition Using a Single UWB Radar with AI-Driven Feature Fusion and ML Techniques in a Real Environment. *Sensors*. 2024;24(17):5533. <https://doi.org/10.3390/s24175533>
12. Oppermann I., Hämäläinen M., Iinatti J. *UWB Theory and Applications*. John Wiley & Sons; 2004, 248 p.
13. Taylor J.D. (Ed.). *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. CRC Press; 2016, 494 p.
14. Bulygin D.A., Mamonova T.E. Recognition of hand gestures in real time. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*. 2020;78(1):25–40 (in Russ.). <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-25-40>
15. 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>. Accessed May 02, 2026.
16. 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://doi.org/10.5772/48587>
17. Latyshev K.V. Cyberphysical radio-gestural FPV control drones. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Information Communication systems (Radioinfocom – 2024): Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2024. P. 441–445 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/dukcnp>

Об авторах

Латышев Кирилл Валерьевич, старший преподаватель, 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: latyshev@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 7415-5362, <https://orcid.org/0009-0007-4393-6887>

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., профессор, 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: boykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, SPIN-код РИНЦ 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>

About the Authors

Kirill V. Latyshev, Senior Lecturer, 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: latyshev@mirea.ru. RSCI SPIN-code 7415-5362, <https://orcid.org/0009-0007-4393-6887>

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.), 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: boykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, RSCI SPIN-code 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>