

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



Нужнов Михаил Сергеевич

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЦИКЛОСТАЦИОНАРНОСТИ
НЕПРЕДНАМЕРЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ**

2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая радиотехника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: **Кузнецов Юрий Владимирович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Пашицев Владимир Петрович**,
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры информационной безопасности автоматизированных систем ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Ключарёв Петр Георгиевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность» ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана»

Ведущая организация: ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево

Защита диссертации состоится 28 декабря 2021 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться на сайте МАИ по ссылке https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=161000 и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.01, к.т.н.



А.А. Горбунова

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Основными источниками непреднамеренных электромагнитных излучений (ЭМИ) средств вычислительной техники (СВТ) являются интегральные схемы и линии передачи между ними. Сигналы, сопровождающие работу СВТ, могут создавать помехи расположенным поблизости электронным устройствам, а также элементам одного и того же устройства и снижать надежность работы устройства. Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и целостности сигналов на этапе разработки устройств необходимы точные методы и инструменты автоматизированного проектирования, учитывающие взаимное влияние устройств и компонентов друг на друга.

При разработке высокопроизводительных СВТ значительное внимание уделяется вопросам, связанным с увеличением полосы пропускания и скорости передачи данных в интерфейсах, уменьшением амплитуды сигналов и повышением плотности интеграции элементов. Электромагнитные помехи, излучаемые в диапазоне частот вплоть до десятков гигагерц, обусловлены высокой скоростью передачи данных в современных цифровых устройствах, достигающей десятков гигабит в секунду. Для минимизации объема и веса разрабатываемых устройств, а также стоимости их производства, использование средств экранирования для защиты от излучаемых электромагнитных помех должно быть ограничено. Кроме того, экраны могут приводить к искажению формы передаваемых сигналов. Таким образом, измерение ЭМИ вблизи или внутри устройства является задачей важной для обеспечения ЭМС при разработке и испытании современных СВТ.

Средства автоматизированного проектирования для схем и печатных плат позволяют оценивать целостность сигнала при моделировании с помощью метода Монте-Карло. В настоящее время оценка ЭМС радиоэлектронных устройств производится преимущественно в частотной области.

Последние достижения в технологиях контрольно-измерительного оборудования позволили определять характеристики ЭМИ во временной области и открыли

новые возможности для улучшения алгоритмов и стратегий моделирования в процессе разработки устройств. Сканирование ЭМИ в ближней зоне во временной области позволяет определять корреляционные характеристики поля для стационарных стохастических электромагнитных полей. Из теоремы единственности и принципа эквивалентности известно, что знание компонент тангенциального поля на виртуальной поверхности, охватывающей все источники электромагнитного поля, позволяет рассчитывать электромагнитное поле вне этой поверхности без подробного знания об источниках внутри поверхности. Эта концепция, полезная для моделирования детерминированных электромагнитных полей, также может быть расширена для определения плотности вероятности электромагнитных полей, вызванных стохастическими стационарными излучениями с гауссовским распределением вероятностей. В этом случае электромагнитное поле может быть охарактеризовано авто- и взаимокорреляционными функциями. С другой стороны, излучения цифровых устройств не являются стационарными, а для более полного описания их случайных полей могут использоваться циклостационарные характеристики.

Основные понятия о сигналах со скрытой периодичностью были представлены в шестидесятых годах двадцатого века. Дальнейшее развитие этого направления привело к формированию в последних десятилетиях XX века теории циклостационарных случайных процессов (СП). Целью этой теории является обоснованное расширение применимости моделей и методов, принятых для стационарных в широком смысле случайных процессов, к нестационарным процессам с периодически изменяющимися вероятностными характеристиками.

Набор методов анализа циклостационарных процессов, разработанных до настоящего времени, в основном сосредоточен на решении задач в области систем связи и механики вращающихся механизмов и не охватывает вопросы, связанные с ЭМС.

Непреднамеренные ЭМИ, создаваемые СВТ, в большинстве случаев при оценке ЭМС рассматриваются как шумоподобные процессы. В рамках данной работы

были расширены, разработаны и испытаны методы анализа пространственных характеристик ЭМИ, с использованием модели циклостационарного СП. Такая модель позволила уточнить классическое описание, использующее стационарные СП или детерминированные сигналы. Уточнённая модель позволяет отличать сигналы с выраженной циклостационарностью от стационарных. Это открывает принципиально новые возможности анализа, такие как различение ЭМИ с совпадающими спектральными плотностями мощности (СПМ), а также позволяет повысить вероятность обнаружения ЭМИ по сравнению с классическими методами, использующими, например, СПМ.

Циклостационарный анализ ЭМИ может быть полезен для решения нескольких задач, возникающих при разработке и испытании СВТ:

- 1) обнаружение источников ЭМИ, вызывающих нарушение ЭМС;
- 2) выявление потенциальных источников утечки информации за счет непреднамеренных излучений СВТ;
- 3) диагностика режима работы исследуемого устройства.

Сканирование ближнего поля имеет очень высокий потенциал для получения максимально полной информации о характеристиках стохастических электромагнитных помех, излучаемых устройством. Для качественного описания стохастических ЭМИ устройств в ближней зоне требуются высокочувствительные миниатюрные пробники ближнего поля с высоким пространственным разрешением. Помимо обеспечения качественной межканальной синхронизации временных измерений, важной проблемой являются временные затраты на обработку большого объема данных. В связи с этим требуются эффективные методы сокращения размерности входных данных без потери информативности. Кроме того, растёт потребность в разработке алгоритмов, которые могут использоваться в реальных условиях с большим количеством источников детерминированных, стационарных и циклостационарных излучений с различными или близкими тактовыми частотами.

Такие требования к современным системам разработки и обеспечения ЭМС определяют **актуальность работы**.

Область исследования соответствует паспорту специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» в связи со следующими особенностями работы:

1) рассматривается область науки и техники, использующая электромагнитные волны для приема информации;

2) научные исследования посвящены теоретическим вопросам радиотехники, а также технологической разработке устройств и систем специального назначения и методов их использования в народном хозяйстве;

3) исследования, проведенные в ходе работы и разработанная теория новых методов обнаружения источников ЭМИ служат обеспечению надежности и испытанию радиотехнических устройств;

4) значение решений научных и технических задач работы состоит в разработке подходов к развитию технологии производства СВТ и высокоэффективных радиоэлектронных средств в части обнаружения источников ЭМИ, вызывающих нарушение ЭМС;

5) работа посвящена исследованию новых процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств, а именно – сравнению классического стационарного и нового циклостационарного подхода к описанию ЭМИ. (Паспорт специальности, п.1);

6) в работе рассматривается прохождение электромагнитных волн излучения СВТ через окружающую среду, а также регистрация этих волн с помощью измерений в ближней зоне с целью обнаружения источника излучения. (Паспорт специальности, п.2).

Целью работы является анализ и усовершенствование методов обнаружения излучений при измерениях в ближней зоне СВТ за счёт использования и дополнения модели циклостационарных СП.

В диссертационной работе в качестве **объекта** исследования рассматриваются циклоstationарные сигналы непреднамеренных электромагнитных излучений средств вычислительной техники.

Предметом исследования являются методы цифровой обработки сигналов, позволяющие проводить обнаружение и различение непреднамеренных циклоstationарных излучений СВТ.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1) исследование ЭМИ СВТ на примере цифрового видеointерфейса: Измерения в ближней и дальней зоне, моделирование сигнала в линии и электродинамическое моделирование кабеля цифрового видеointерфейса DVI (Digital Visual Interface);

2) исследование влияния джиттера сигналов СВТ на их характеристики;

3) разработка методов обнаружения и идентификации источников непреднамеренных ЭМИ СВТ с использованием их циклоstationарных свойств, сравнение разработанного метода с традиционными методами обнаружения и идентификации источников непреднамеренного излучения;

4) экспериментальное исследование разработанных методов и анализ результатов обработки.

Научная новизна. В рамках исследования получены следующие новые результаты:

1) параметрическая модель влияния джиттера на сигнал с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ-сигнал), позволившая выявить зависимость вероятности обнаружения АИМ-сигнала от длительности импульса и величины джиттера;

2) модифицированная характеристика степени циклоstationарности, позволяющая обнаруживать источники ЭМИ информационных сигналов на фоне излучения тактирующих сигналов;

3) методика обнаружения ЭМИ с разными тактовыми частотами по результатам измерения излучений в ближней зоне. Показано, что прирост чувствительности

обнаружения при переходе от стационарного к циклостационарному обнаружению определяется степенью циклостационарности (СЦС), и приводит к снижению вероятности ошибки обнаружения более чем в 8 раз.

Практическая значимость. Практическая значимость результатов работы состоит в том, что разработанные методы исследования побочных ЭМИ и методы их обработки могут быть применены для контроля ЭМС и защищённости СВТ. Применение таких систем позволит повысить достоверность и информативность исследования ЭМИ и обеспечит возможность проведения измерений в нормальных лабораторных условиях без использования специальных помещений. Также разработанный алгоритм обнаружения источников в составе СВТ может эффективно применяться на стадии разработки и создания образцов защищённой техники для поиска источников информативного излучения без использования специального тестового режима работы СВТ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовался аппарат теории вероятностей, математического анализа, временной анализ детерминированных сигналов, статистический и вероятностный анализ случайных процессов во временной области, математическое и статистическое моделирование.

Достоверность полученных результатов обусловлена корректностью исходных положений и преобразований, использованием апробированного адекватного математического и статистического аппарата, компьютерных программ и логической обоснованностью выводов, а также экспериментальной верификацией разработанных моделей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Предложенная методика предварительной обработки данных, измеренных в ближнем поле СВТ, позволила применить к ним известный метод оценки СЦС для обнаружения информационных сигналов на фоне шумов, помех и синхронных тактовых сигналов.

2) Показано, что прирост качества обнаружения при использовании циклостационарного подхода определяется СЦС и достигает 8 кратного снижения вероятности ошибки в условиях, рассмотренных в статистическом моделировании, приведённом в работе.

3) Выявлена зависимость степени циклостационарности от джиттера и скважности импульсов АИМ-сигнала, позволившая определять границы применимости циклостационарного обнаружения.

4) Представленные в работе результаты моделирования и экспериментальных исследований показали, что сигнал измеренный в ближнем поле СВТ обладает существенно большей степенью циклостационарности чем порождающий его сигнал в проводнике печатной платы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

1) Международной научной конференции European Microwave Conference in Central Europe в 2019 году в Праге;

2) Международной научной конференции Baltic URSI Symposium в 2020 году в Варшаве;

3) Международной конференции "Авиация и Космонавтика" в Москве в 2017, 2019 и 2020 годах;

4) Международной молодёжной научной конференции "Гагаринские чтения" в Москве в 2017 году;

5) XII Всероссийском межотраслевом молодёжном конкурсе научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий "Молодёжь и будущее авиации и космонавтики" в Москве в 2018 году.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ: 3 публикации в изданиях из перечня ВАК, 2 публикации в изданиях индексированных в Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 109 машинописных страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Иллюстративный материал представлен в виде 44 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 49 наименований.

Во **введении** сформулирована цель работы; актуальность работы обоснована кратким анализом современных методов оценки ЭМС. Здесь так же отмечена научная новизна и практическая значимость работы.

В **главе 1** приведён краткий обзор литературе по теме работы, описываются преимущества измерений ЭМИ в ближней зоне СВТ, перечисляются различные подходы к таким измерениям и их особенности:

- Использование одного, двух или множества пробников, объединённых в матрицу;
- Измерения во временной и в частотной области;
- Различные способы построения сетки сканирования.

Приведено исследование ЭМИ СВТ на примере цифрового видеоинтерфейса показывающее, что измерения в ближней зоне излучения позволяют предсказывать пространственно-частотные характеристики излучения сложных кабельных соединений в дальней зоне.

В **главе 2** приводится анализ сигналов СВТ, их описание как сигналов непрерывных во времени и как логических сигналов. На примере сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) показано, как стационарность логического информационного сигнала приводит к циклостационарности сигнала несущего эту информацию.

Рассмотрен сигнал СВТ, использующийся для передачи видео-информации: Digital Visual Interface (DVI) и его основные характеристики, оказывающие влияние на формируемое им ЭМИ.

Рассмотрен вопрос формирования ЭМИ СВТ и опасности такого излучения, приведено краткое сравнение различных подходов к измерениям таких излучений.

Поскольку передаваемая по цифровому интерфейсу информация неизвестна, её описание как детерминированной последовательности обобщается до описания случайного процесса (СП). Приводятся два подхода к описанию СП. Согласно классическому подходу, СП $X(t)$ определяется вероятностным пространством, т.е. тройкой $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$, где

- \mathbb{P} – вероятностная мера, ставящая в соответствие каждому элементу \mathfrak{A} вероятность наступления соответствующего события;
- \mathfrak{A} – сигма-алгебра подмножеств Ω , т.е. пространство событий;
- Ω – пространство элементарных исходов.

При использовании же частотного подхода случайный процесс описывается характеристиками, полученными усреднением по времени. В таком случае вероятность события определяется соответствующей долей времени:

$$\hat{P}(x(t) < x) = \langle I(x - x(t)) \rangle$$

где $\langle \cdot \rangle$ – оператор усреднения по времени (в литературе используется также оператор извлечения компоненты $\hat{E}^0\{\cdot\}$):

$$\langle F(x(t)) \rangle \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F(x(t - \tau)) d\tau$$

Рассматриваются определения и характеристики стационарных и циклостационарных СП в рамках классического (вероятностного) подхода, в частности одномерная и двумерная АКФ:

$$R_{X(t)}(t, \tau) = E\{X(t)X(t - \tau)\}$$

$$R_{X(t)}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R_{X(t)}(t, \tau) d\tau$$

В качестве циклостационарного случайного процесса имеющего важное значение для работы СВТ рассматривается джиттер, т.е. фазовое дрожание цифрового сигнала данных. Рассматривается модель описания джиттера с помощью двух дельта-функций Дирака, анализируется зависимость вероятности битовой ошибки (BER)

от параметров модели и обосновывается выбор линейризирующей функции, которая позволяет предсказывать ширину раскрыва глазковой диаграммы при сверхмалых значениях BER. Предлагается использовать Q-параметр следующего вида:

$$Q(BER(t)) \triangleq \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{4}{\rho_T} BER(t) \right) \approx \frac{t - \mu}{\sigma}$$

На рисунке 1 приводятся результаты статистического моделирования и экспериментального исследования, подтверждающие адекватность модели двух дельта-функций:

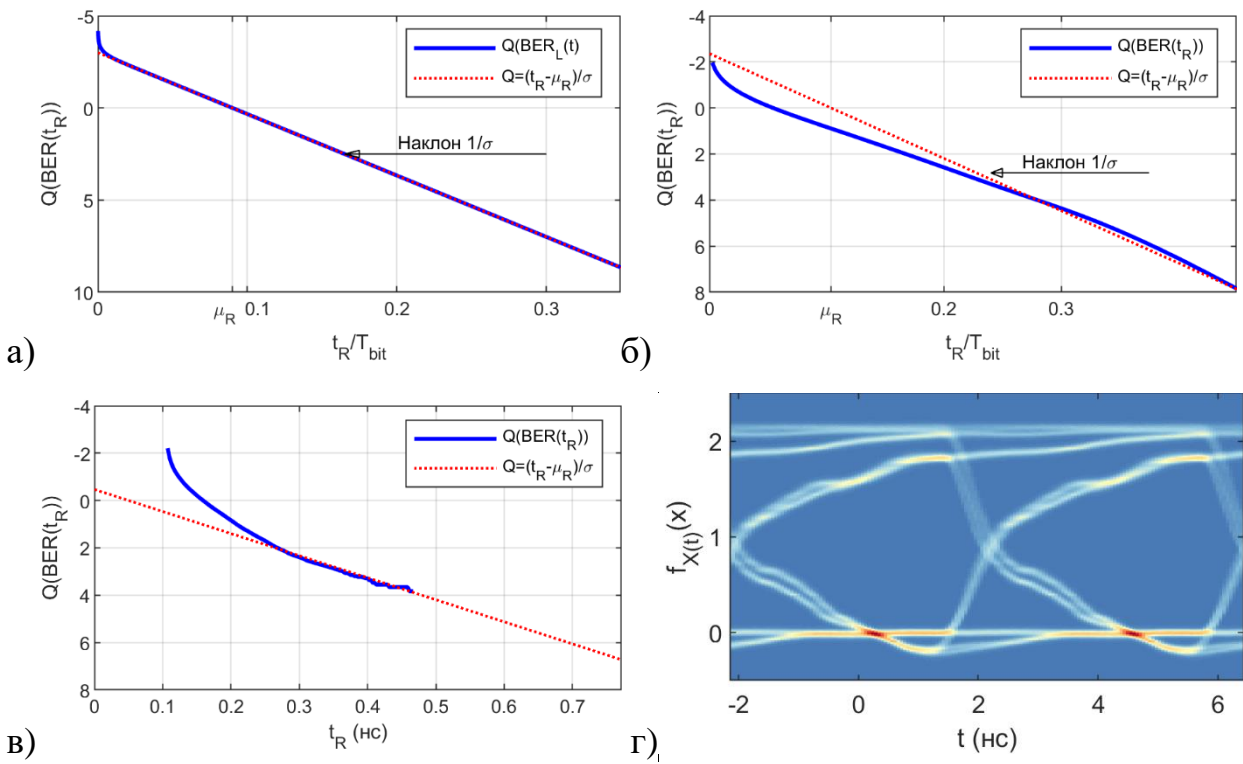


Рисунок 1 – а) Теоретическая зависимость Q-параметра от положения точки t_R на интервале времени; б) Зависимость Q-параметра от t_R полученная при статистическом моделировании; в) Зависимость Q-параметра от t_R полученная экспериментально; г) глазковая диаграмма сигнала, измеренного экспериментально

На рисунке 1 а) приводится теоретический график для рассматриваемой модели джиттера, подтверждающий линейных характер зависимости Q-параметра от ширины раскрыва глазковой диаграммы. На рисунке 1 б) приводится график полученный статистическим моделированием, при котором джиттер имеет сложный закон распределения, вызванный межсимвольной интерференцией и аддитивным

гауссовским шумом. Данный график подтверждает адекватность модели для цифровых интерфейсов СВТ, т.к. она описывает BER с приемлемой точностью.

На рисунках 1 в) и 1 г) приводятся результаты экспериментальных исследований джиттера цифрового сигнала СВТ и соответствующая ему глазковая диаграмма. Линейный характер зависимости BER от ширины раскрыва глазковой диаграммы позволяет грубо оценивать BER при сверхмалых значениях за меньшее время, чем при прямом измерении.

На рисунке 2 показано влияние джиттера на циклостационарную характеристику – двумерную АКФ.

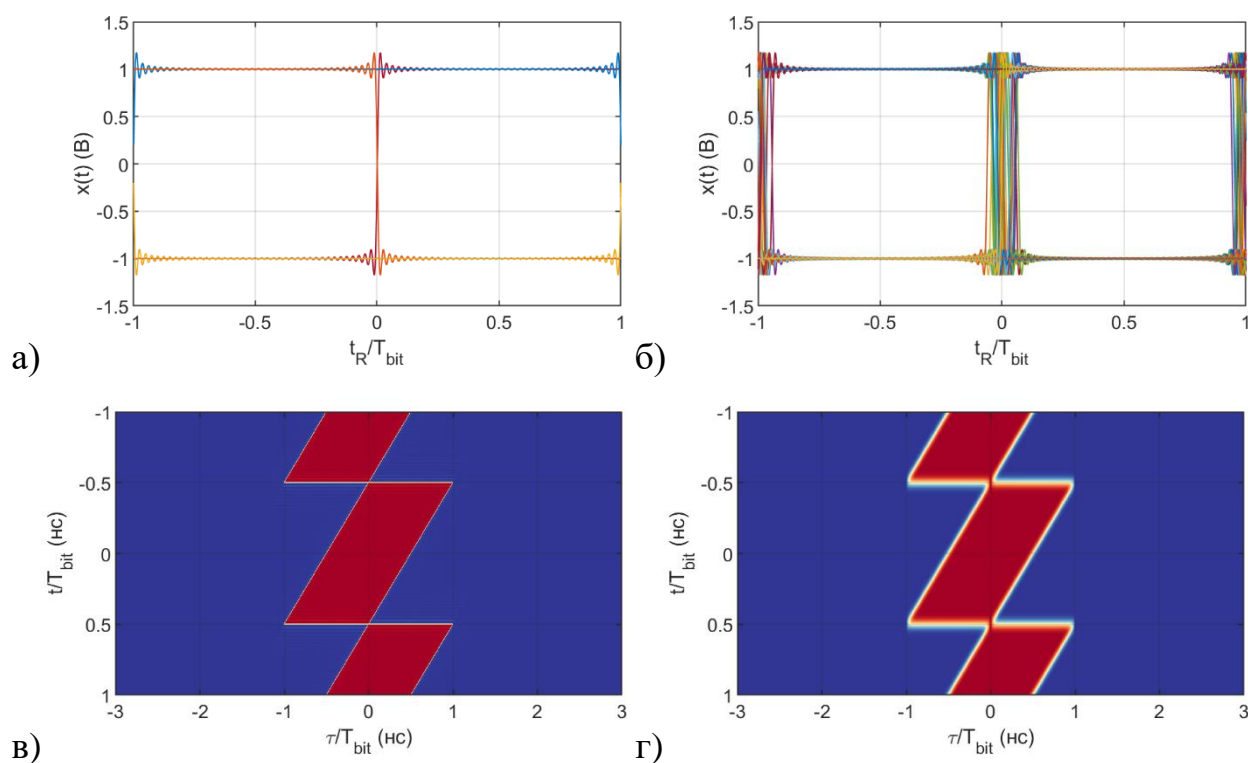


Рисунок 2 – Ансамбль реализаций: а) без случайного джиттера, б) со случайным джиттером. Двумерная автокорреляционная функция: в) модели сигнала без джиттера, г) модели сигнала с джиттером

Увеличение джиттера приводит к размытию двумерной АКФ по оси времени t . Количественная оценка влияния джиттера на циклостационарные свойства сигнала даётся через степень циклостационарности, СЦС:

$$СЦС_X \triangleq \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \langle |R_X(t, \tau) - R_X(\tau)|^2 \rangle d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} |R_X(\tau)|^2 d\tau},$$

$$\text{СЦС}_x = \begin{cases} \frac{(U-1)^2}{2D^3} + \frac{(D-1)^4}{4D^3U^2} - \frac{(D-1)^3(U-1)}{D^3U} & \text{при } D+U \geq 1 \text{ и } U < D \\ \frac{(U-1)^3}{D^2U^2} + \frac{(U-1)^4}{4D^3U^2} - \frac{(4D-6)(U-1)^2}{4DU^2} & \text{при } D+U \geq 1 \text{ и } U \geq D \\ -\frac{4U^2 - 4U + D}{4U^2} & \text{при } D+U < 1 \text{ и } U \geq D \\ \frac{-4D^3 + 6D^2 - 4DU + U^2}{4D^3} & \text{при } D+U < 1 \text{ и } U < D \end{cases}$$

где $U \in [0,1]$ – коэффициент джиттера, показывающий на какую долю битового интервала может приходиться начало импульса, а $D \in [0,1]$ – коэффициент заполнения АИМ-сигнала. Данная зависимость представлена на рисунке 3:

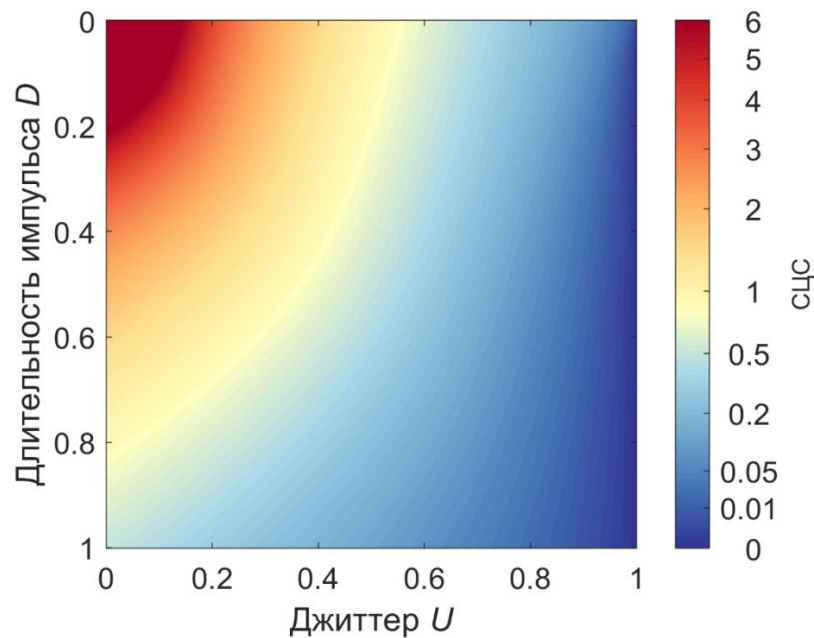


Рисунок 3 – Зависимость СЦС от джиттера U и длительности импульса D

Исследование СЦС является ключевой частью работы. В работе рассмотрены важные свойства данной характеристики:

1) СЦС численно характеризует циклоstationарность процесса в широком смысле. Так, например, при нулевой СЦС циклоstationарный процесс теряет выраженность циклоstationарных свойств и становится stationарным СП;

2) СЦС СП инвариантна к произвольному масштабированию по времени, по амплитуде и к произвольной задержке;

3) для применения к СП, имеющим периодическое математическое ожидание, определение СЦС требует модификации. В работе предлагается использовать характеристику $\text{СЦС}_{H_{X(t)}} \triangleq \text{СЦС}_{X(t) - E\{X(t)\}}$;

4) числитель СЦС представляет собой мощность периодических компонент двумерной АКФ. Важным следствием этого факта является иммунность числителя СЦС к аддитивному стационарному шуму и перспективность использования в задачах обнаружения.

Для практического применения в работе выводятся формулы оценки СЦС, с учётом ограничения времени наблюдения и дискретности наблюдаемого сигнала во времени.

Физический смысл СЦС в работе раскрыт при анализе задачи обнаружения слабого сигнала X в аддитивном гауссовском шуме: СЦС численно равна приросту качества обнаружения при переходе от стационарного обнаружения к циклостационарному, если качество обнаружения описывается отношением сигнал-шум на выходе детектора:

$$\frac{\text{ОСШД}_{\text{циклостац.обнаруж.}}}{\text{ОСШД}_{\text{стац.обнаруж.}}} = 1 + \text{СЦС}$$

Получаемое повышение качества обнаружения эквивалентно приросту при увеличении времени наблюдения в $(1 + \text{СЦС})$ раз или SNR в $\sqrt{1 + \text{СЦС}}$.

В главе 3, посвящённой моделированию, данное свойство СЦС было подтверждено статистическим моделированием, результаты которого приведены на рисунке 4. Сплошными линиями показаны теоретические кривые вероятности обнаружения АИМ-сигнала, пунктирными – экспериментальные. Синим цветом показаны вероятности ошибки стационарного обнаружителя, красным – циклостационарного. Кривая циклостационарного обнаружения сдвинута влево по оси SNR на $5 \log_{10}(1 + \text{СЦС})$, что соответствует вышеупомянутому падению требуемого SNR в $\sqrt{1 + \text{СЦС}}$ раз.

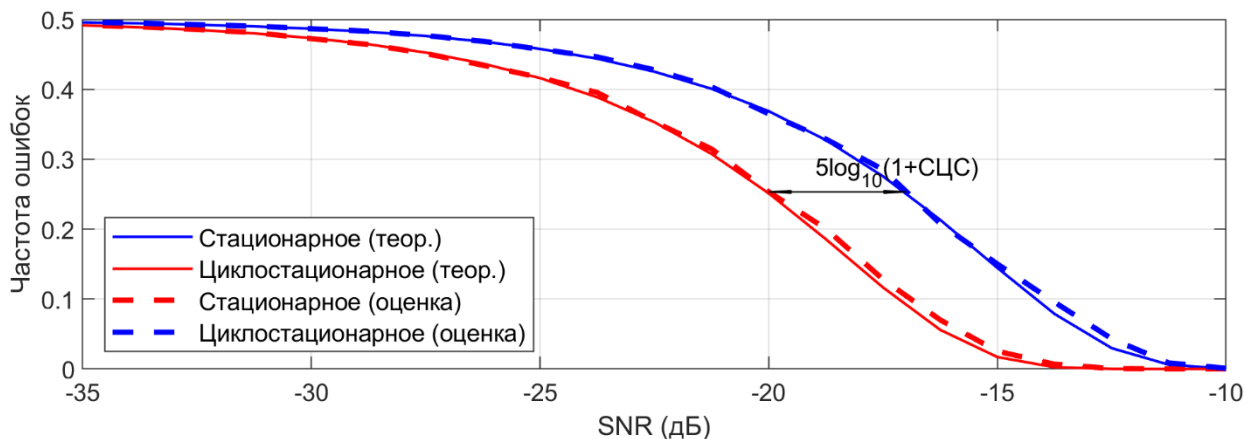


Рисунок 4 – Вероятность ошибки при обнаружении АИМ сигнала

Свойства СЦС, приведённые в работе, показали перспективность характеристики для непосредственного применения в качестве статистики используемой при обнаружении ЭМИ СВТ. Статистическое моделирование, подтверждающее данный тезис, описывало задачу обнаружения в условиях измерения ЭМИ в ближнем поле СВТ при помощи пробника ближнего поля. На рисунке 5 приведены двумерные АКФ модели сигнала в проводнике СВТ (а) и модели сигнала в пробнике ближнего поля (б).

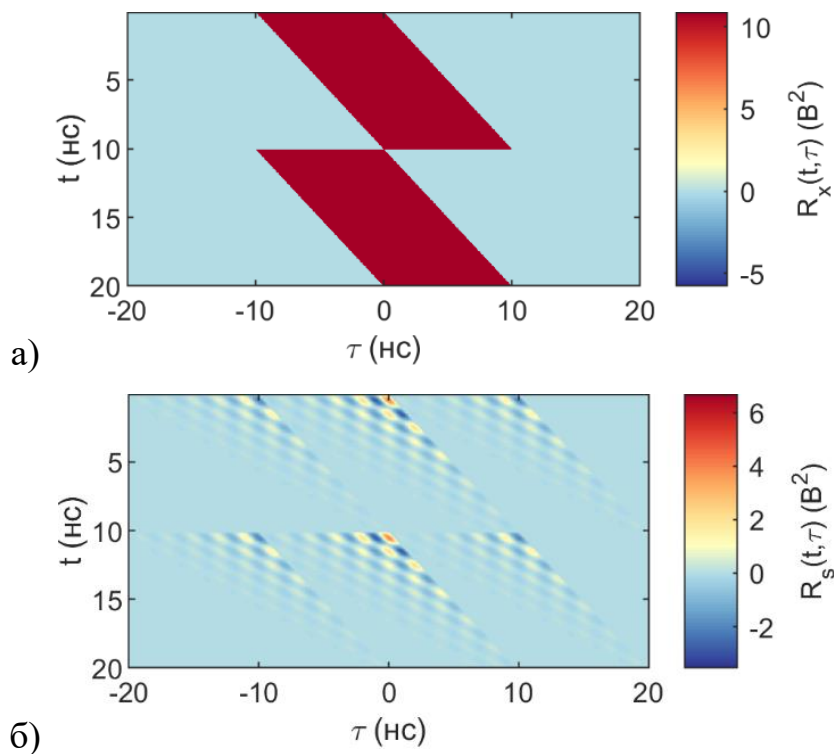


Рисунок 5 – Двумерные АКФ модели сигналов: а) в проводнике – $R_X(t, \tau)$; б) на выходе эквивалентной линейной системы – $R_S(t, \tau)$

Степень циклоstationарности сигнала в пробнике достигла значения 6,23, что говорит о перспективности циклоstationарного подхода к обнаружению такого сигнала. Моделирование показало, что при заданных параметрах использование СЦС вместо классического энергетического детектора снижает вероятность ошибки с 40% до 4,6%.

Глава 4 посвящена экспериментальным исследованиям.

Экспериментальное исследование применения характеристики СЦС_{II} показало возможность обнаружения информационных сигналов на фоне шумов, помех и периодических сигналов. Результаты эксперимента приведены на рисунке 6.

Фотография макетной платы с отмеченной на ней областью сканирования показана на рисунке 6 (а, б). Пространственное распределение суммарной мощности излучения в плоскости сканирования в ближнем поле показано на рисунке 6 (в). Основными источниками излучения являлись тактовый и информационный сигналы. На рисунке 6 (б) цифрами 1 и 2 обозначены печатные проводники, по которым передавались тактовый и информационный сигналы соответственно. На рисунке 6 (в) видна область голубого цвета, в которой регистрируется излучение информационного сигнала, а излучение тактового генератора регистрируется в нижнем левом углу области сканирования.

Следующим шагом анализа была очистка измеренных сигналов от компоненты с периодом T_0 , соответствующим частоте тактирования исследуемого макета. Для этого из измеренных выборок вычитались их периодические функции среднего значения $\mu_X(t)$. Пространственное распределение мощности сигнала без среднего значения представлено на рисунке 6 (г). На рисунке видно, что область излучения тактового сигнала полностью пропала, а основная часть отображаемого излучения формируется информационным сигналом.

На рисунке 6 (д, е) представлены графики пространственного распределения СЦС и СЦС_{II} соответственно. Из рисунков видно, что использование СЦС_{II} позво-

ЛИЛО подавить как стационарные шумы, так и излучение периодического тактового сигнала.

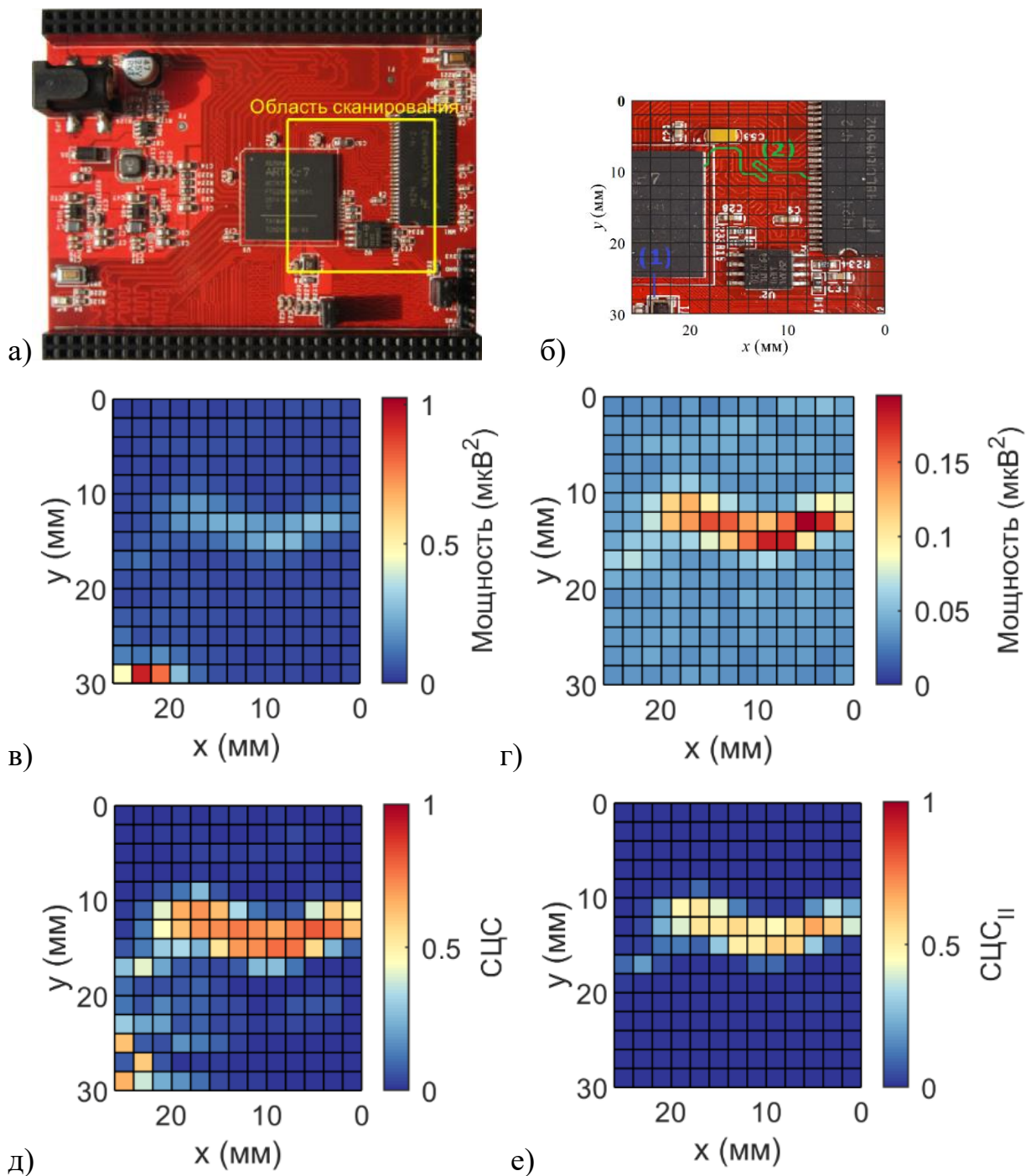


Рисунок 6 – Исследуемое устройство: а) исследуемая отладочная плата ПЛИС; б) область сканирования; в) пространственное распределение мощности излучения; г) пространственное распределение мощности излучения очищенного от периодической компоненты; д) распределение СЦС; е) распределение СЦС_{II}

Целью следующего эксперимента, описанного в работе, было отдельное обнаружение источников ЭМИ с разными тактовыми частотами. Для этого эксперимента макет СВТ был переконфигурирован в режим передачи случайных данных с двумя различными тактовыми частотами. На рисунке 7 приводится область сканирования и задействованные дорожки печатной платы.

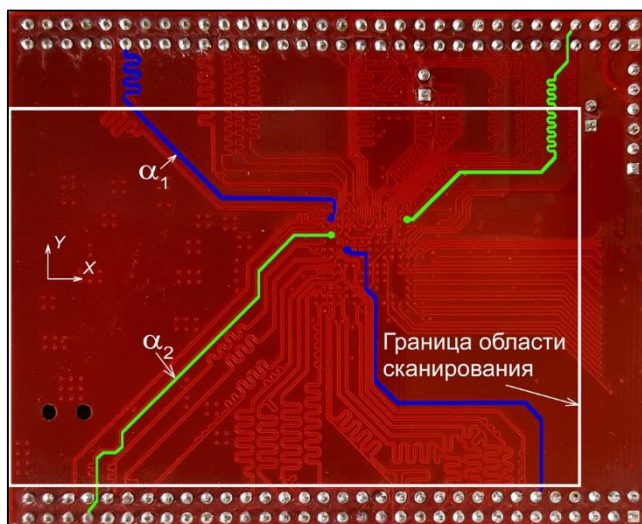


Рисунок 7 – Область сканирования макетной платы

По выделенным зелёным и синим цветами дорожкам передавались сигналы с тактовыми периодами $T_1=10$ нс и $T_2=7,7$ нс соответственно.

Для каждой точки сканирования с координатами x и y были получены несинхронные пары выборок сигнала длительностью $N_s = 5 \cdot 10^6$ отсчётов, которые представляют собой отсчёты компонент вектора напряженности магнитного поля $H_x(t_n = nT_s, x, y)$ и $H_y(t_n = nT_s, x, y)$.

Далее для каждой выборки были получены оценки одномерных и двумерных АКФ. Значение одномерной АКФ в нуле даёт диаграмму пространственного распределения средней мощности электромагнитных излучений в ближнем поле исследуемого устройства, представленную на рисунке 8.

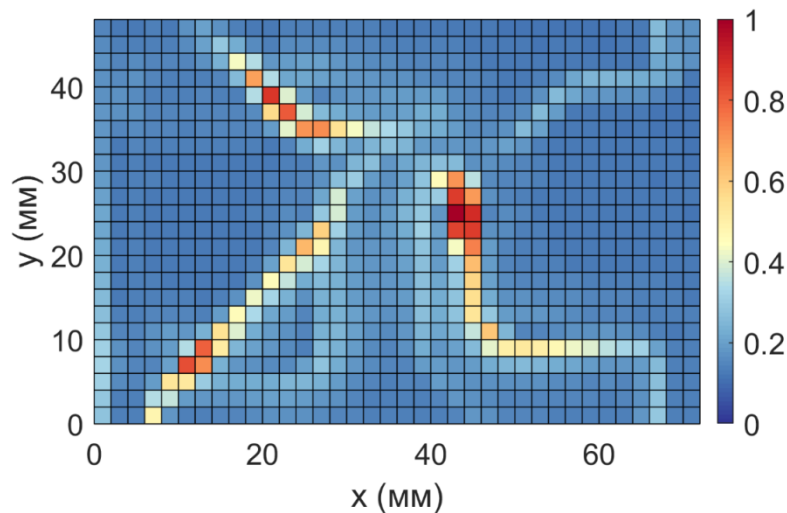


Рисунок 8 – Диаграмма пространственного распределения средней мощности ЭМИ исследуемого устройства

На этой диаграмме можно увидеть точки на поверхности печатной платы, соответствующие наибольшей средней мощности ЭМИ, вызванных случайными битовыми последовательностями с разной скоростью передачи данных. Положение пробника (44, 26) мм соответствует измеренной последовательности с максимальной средней мощностью, изображенной коричневым цветом. Другое положение пробника (12, 8) мм соответствует максимальной мощности излучения сигнала с другой скоростью передачи данных.

Двумерные АКФ измеренных сигналов для двух положений и поляризаций сканирующего пробника, в которых наблюдались наиболее мощные излучения сигналов с разными периодами, представлены на рисунке 9. На каждой диаграмме виден свой период циклостационарности (T_1 и T_2). Ярко выраженная периодичность данных функций позволяет предположить значительную долю циклостационарной компоненты в энергетике сигнала в данных точках.

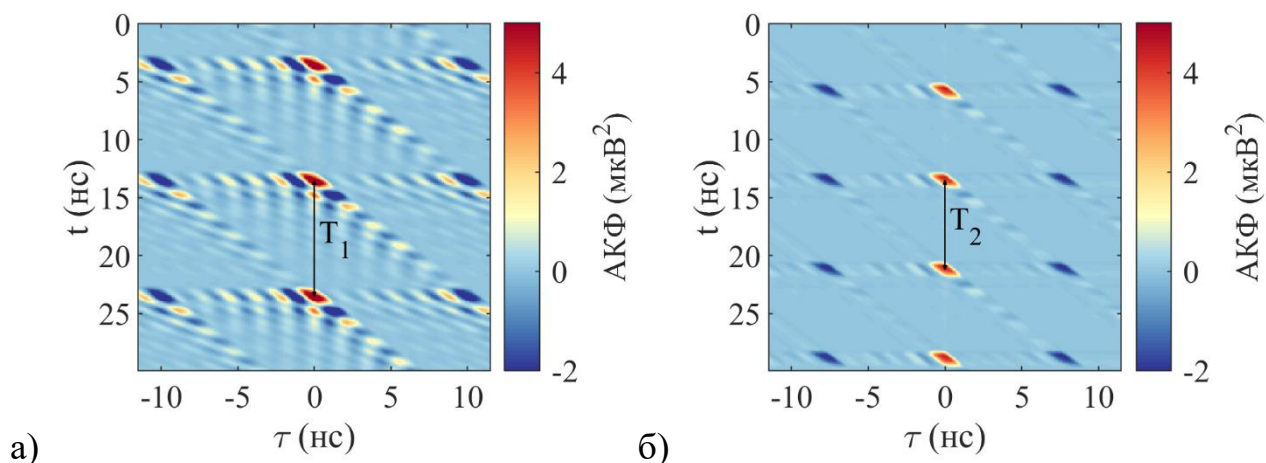


Рисунок 9 – Двумерные АКФ измеренных сигналов для точек:
 а) (44, 26) мм и б) (12, 8) мм, соответствующие дорожкам, по которым протекали
 сигналы с периодами $T_1=10$ нс и $T_2=7,7$ нс

Количественная оценка циклостационарности ЭМИ в каждой точке сканирования проведена с помощью СЦС и представлена на рисунке 10.

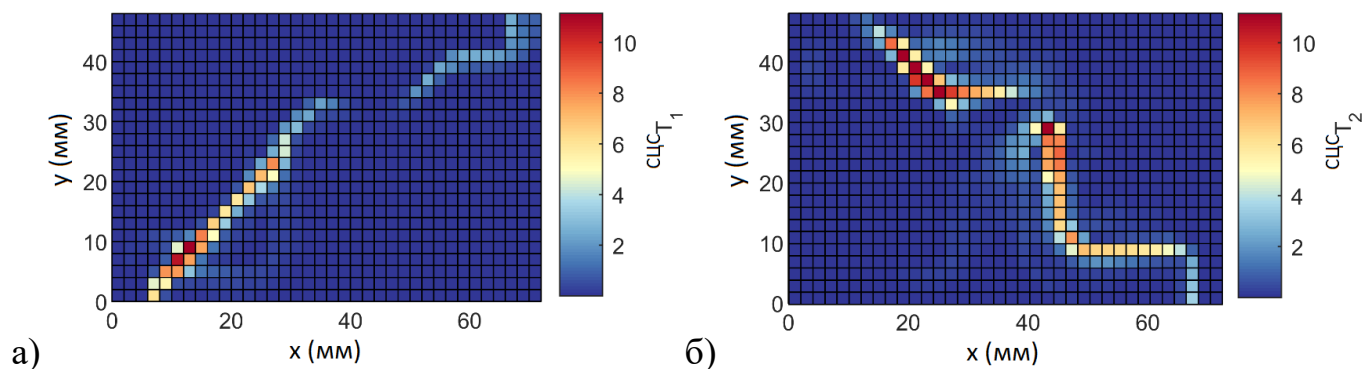


Рисунок 10 – Диаграмма распределения СЦС: а) $\widehat{СЦС}_{T_1,x,y,Hx} + \widehat{СЦС}_{T_1,x,y,Hу}$,
 б) $\widehat{СЦС}_{T_2,x,y,Hx} + \widehat{СЦС}_{T_2,x,y,Hу}$

Сопоставление полученных диаграмм со схемой области сканирования подтверждает успешное разделение источников с различными тактовыми частотами.

Заключение.

Диссертационная работа посвящена исследованию методов обнаружения непреднамеренных излучений СВТ. Проведенный обзор по материалам отечественных и зарубежных источников показал, что выбранное направление исследований является востребованным, актуальным и перспективным.

Предложенный подход к обнаружению ЭМИ основывается на измерении излучения во временной области в ближнем поле. Для обоснования такого подхода в работе представлена модель ЭМИ излучений DVI, учитывающая форму сигналов видеоинтерфейса и электродинамическую модель кабеля. Исследования DVI кабеля показали, что измерения в ближней зоне излучения позволяют предсказывать пространственно-частотные характеристики сложных кабельных соединений в дальней зоне.

Развивая известный подход к обнаружению СП, строящийся на согласованной фильтрации оценки двумерной АКФ, в работе предлагается алгоритм обнаружения, основанный на оценке степени циклостационарности по АКФ. Приводятся и демонстрируются на примере АИМ-сигнала свойства СЦС, важные для применения её в задаче обнаружения. В частности, проводится анализ таких характеристик обнаружения как ROC-кривая и отношение сигнал-шум на выходе детектора (ОСШД) и их связь с СЦС.

Теоретический анализ, как и статистическое моделирование, показал связь между СЦС и условиями наблюдения: Прирост качества при циклостационарном обнаружении эквивалентен повышению SNR в $\sqrt{1 + \text{СЦС}}$ раз или увеличению времени наблюдения в $(1 + \text{СЦС})$ раз.

Статистическое моделирование показало, что использование предлагаемого алгоритма приводит к снижению вероятности ошибок обнаружения на порядок.

Экспериментальные исследования показали, что применение предложенного алгоритма позволяет обнаруживать ЭМИ информационных сигналов в присутствии детерминированных периодических сигналов и стационарного шума. Существенной особенностью предложенного алгоритма является инвариантность СЦС к временному сдвигу анализируемого СП, что позволяет исключить требование к синхронизации между измерениями в каждой точке сканирования.

Предложенный подход к обнаружению циклостационарных источников ЭМИ СВТ может использоваться для дальнейших теоретических исследований и экспериментальных работ в целях обеспечения ЭМС и информационной безопасности.

Основные результаты работы изложены в следующих **публикациях**:

Статьи в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Денисов А.А., Нужнов М.С., Коновалюк М.А., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Статистическая модель джиттера сигналов цифровых интерфейсов, Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, том 74 № 2, с. 108-114, 2018.

2. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Горбунова А.А., Коновалюк М.А., Нужнов М.С., Электромагнитные излучения цифрового видеointерфейса, Технологии электромагнитной совместимости, № 4(59), с. 32-42, 2016.

3. Оценка степени циклостационарности непреднамеренных излучений средств вычислительной техники / М. С. Нужнов, Ю. В. Кузнецов, А. Б. Баев, М. А. Коновалюк // Электросвязь. – 2020. – № 11. – С. 62-71. – DOI 10.34832/ELSV.2020.12.11.007.

Тезисы докладов на зарубежных конференциях, индексируемые в иностранных библиографических и реферативных базах данных (SCOPUS, Web Of Science):

1. Characterization of the emissions in the near-field of PCB using degree of cyclostationarity / M. Nuzhnov, A. Gorbunova, M. Konovalyuk [et al.] // Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe, EuMCE 2019, Prague, 13–15 мая 2019 года. – Prague, 2019. – P. 129-132.

2. M. Nuzhnov, A. Baev, M. Konovalyuk, A. Gorbunova, Y. Kuznetsov and W. Sidina, "Detection of Cyclostationary Electromagnetic Emissions Using Degree of Cyclostationarity," 2020 Baltic URSI Symposium (URSI), 2020, pp. 138-141, doi: 10.23919/URSI48707.2020.9253755.

Тезисы докладов на отечественных конференциях:

1. Нужнов, М. С. Измерение и анализ пространственно-частотного распределение побочных электромагнитных излучений печатной платы в ближней зоне / М. С. Нужнов // Гагаринские чтения 2017 : Тезисы докладов, Москва, 05–19 апреля 2017 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. – С. 640-641.

2. Нужнов, М. С. Анализ циклостационарных характеристик электромагнитных излучений печатной платы в ближнем поле / М. С. Нужнов // Авиация и космонавтика - 2017 : тезисы, Москва, 20–24 ноября 2017 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Типография «Люксор», 2017. – С. 235-236.

3. Обнаружение излучения цифрового интерфейса СВТ с использованием двумерной автокорреляционной функции / М. С. Нужнов, Ю. В. Кузнецов, А. Б. Баев, М. А. Коновалюк // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : Тезисы 19-ой Международной конференции, Москва, 23–27 ноября 2020 года. – Москва,: Издательство "Перо", 2020. – С. 353-354.

4. Использование степени циклостационарности для разделения источников ЭМИ СВТ в ближнем поле / М. С. Нужнов, Ю. В. Кузнецов, А. Б. Баев, М. А. Коновалюк // 18-я Международная конференция "Авиация и космонавтика - 2019" : Тезисы, Москва, 18–22 ноября 2019 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 125.

5. Нужнов, М. С. Параметрический и корреляционный анализ сигналов цифровых интерфейсов / М. С. Нужнов, А. А. Денисов // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : 10-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов: аннотации конкурсных работ : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. – С. 162-163.