

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики

Экспериментальное картографирование зоны подавления сигнала
генератором помех

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2233 группы

направления 03.04.03 «Радиофизика»

код и наименование направления

Института физики

наименование факультета, института, колледжа


Бахарева Данилы Дмитриевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

 05.06.26

дата, подпись


Д.А. Колосов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

 05.06.26

дата, подпись

О.Е. Глухова

инициалы, фамилия

Саратов 2026 г.

Введение

Беспроводные сети стандарта Wi-Fi на базе микроконтроллера ESP8266 получили широчайшее распространение в системах интернета вещей (IoT), «умного дома» и промышленной телеметрии благодаря низкой стоимости, энергоэффективности и встроенному радиотракту. Миллионы таких устройств работают в нелицензируемом диапазоне 2.4 ГГц, разделяя эфир с другими беспроводными интерфейсами. Одной из ключевых проблем обеспечения надёжности IoT-сетей является их уязвимость к намеренным электромагнитным помехам. Дешёвые генераторы помех, собранные на той же элементной базе ESP8266, способны полностью парализовать работу локальной Wi-Fi сети в радиусе нескольких метров. Несмотря на высокую практическую значимость проблемы, в открытой литературе наблюдается явный недостаток экспериментальных данных о пространственном распределении показателя потерь пакетов в условиях реального помещения. Практически отсутствуют исследования, в которых геометрия зоны подавления оценивалась бы непосредственно с помощью бюджетных IoT-платформ. Для решения этой проблемы была поставлена цель работы.

Цель работы

Экспериментальное картографирование пространственной структуры зоны подавления Wi-Fi сигнала генератором шумоподобной частотно-модулированной помехи на базе микроконтроллера ESP8266, а также получение количественных характеристик эффективности подавления для различных топологических конфигураций расположения источника полезного сигнала, приёмника и подавителя.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в том, что в работе впервые проведено экспериментальное картографирование зон подавления для частотного канала, мощности передатчика и типа антенн, характерных для массовых IoT-устройств на базе ESP8266, с использованием бюджетной

аппаратной платформы и генератора шумоподобной частотно-модулированной помехи с управляемой девиацией. В отличие от существующих теоретических моделей или дорогостоящих SDR-систем, полученные экспериментальные карты позволяют наглядно визуализировать пространственную структуру подавления и установить количественные пороговые уровни.

Практическая значимость работы заключается в создании воспроизводимой методики экспериментального стенда и получении экспериментальных карт зон подавления, необходимых как для оценки помехозащищённости существующих сетей, так и для обоснованного размещения точек доступа и датчиков с учётом потенциальных источников намеренных помех. Результаты могут быть использованы при проектировании систем радиоподавления и оценке помехоустойчивости беспроводных систем связи.

Аппаратная платформа

Для проведения экспериментального картографирования зоны подавления сигнала была разработана и собрана специализированная аппаратная платформа, построенная на двух идентичных платах ESP8266 (модель NodeMCU) с интегрированными печатными антеннами типа Meander. Первое устройство выполняет функцию передатчика полезного сигнала (TX), генерируя тестовый UDP-трафик с инкрементными номерами пакетов. Второе устройство выступает в роли мобильного приёмника (RX) с дисплеем ST7735S для оперативного контроля статистики (количество принятых пакетов, скорость приёма, RSSI, счётчик повреждённых пакетов). Генератор помех реализован в виде составного устройства: генератор псевдослучайной битовой последовательности (PRBS) на сдвиговом регистре и высокочастотный генератор несущей с частотной модуляцией (FM) и девиацией 15 МГц, что обеспечивает формирование шумоподобной заградительной помехи, перекрывающей полосу стандартного

канала Wi-Fi (20–25 МГц). На рисунке 1 представлен внешний вид передатчика и приёмника, на рисунке 2 — лабораторный стенд генератора помех.

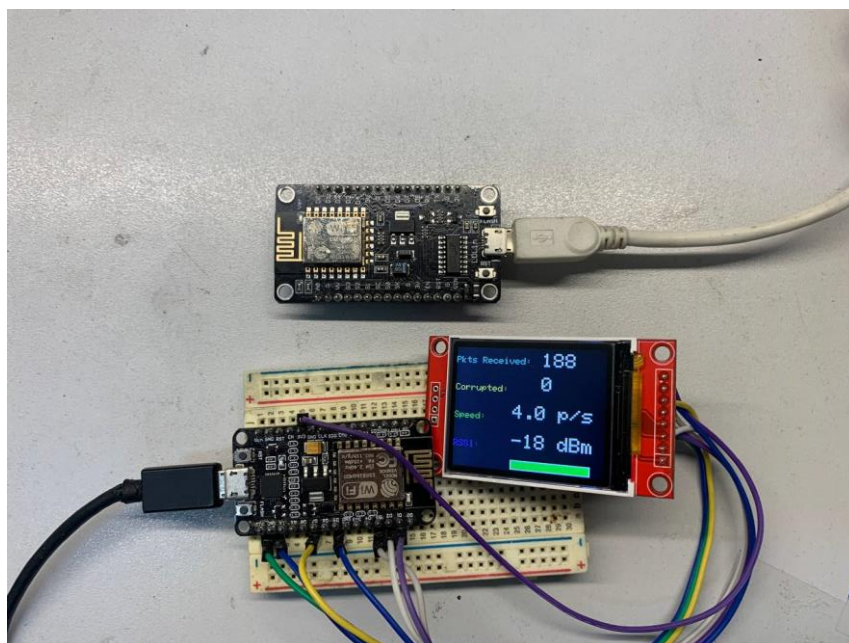


Рисунок 1 – Микроконтроллер ESP8266 на плате NodeMCU в роли передатчика(сверху) и приёмника с дисплеем ST7735S (снизу)

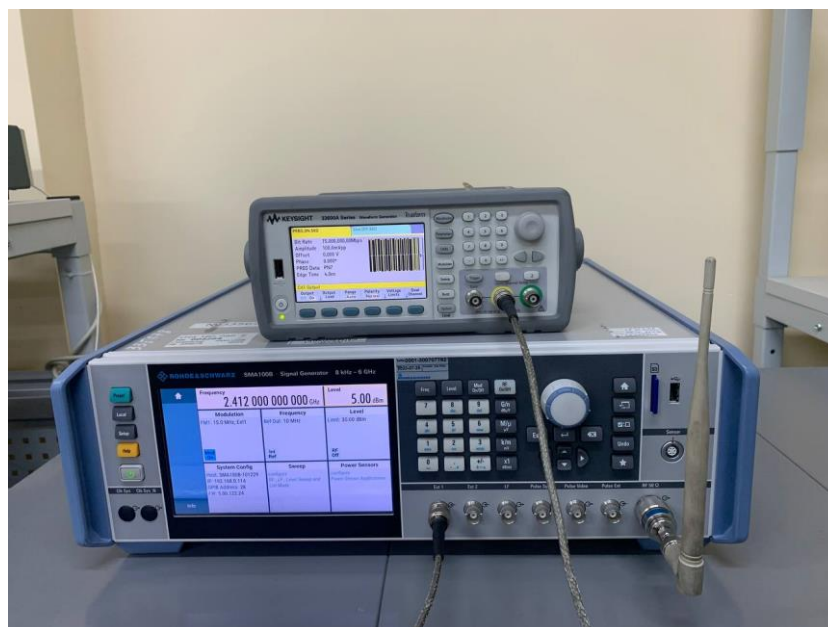


Рисунок 2 – Генератор формы сигнала (сверху) и генератор несущей с FM модуляцией и антенной 2.4 ГГц (снизу)

Методика эксперимента

Рабочая область лабораторного помещения (безэховая камера) была условно разделена на девять дискретных позиций, образующих регулярную матрицу размерностью 3×3 с последовательной нумерацией узлов от 1 до 9. Расстояние между соседними узлами составляло 1.5 метра, общий размер поля — 3.0×3.0 м. Передатчик полезного сигнала жёстко фиксировался в угловой точке 9. Приёмник последовательно размещался во всех девяти точках. Генератор помех размещался в двух принципиально различных позициях: в геометрическом центре (точка 5) и в противоположном углу (точка 1). Такая конфигурация позволила реализовать два топологических сценария: «подавитель в центре, передатчик в углу» и «подавитель и передатчик в противоположных углах». Для каждой конфигурации регистрировались матрицы мощности принимаемого полезного сигнала $PRXPRX$, а также матрицы пороговых уровней мощности помехи $PjamPjam$ в моменты начала падения скорости передачи данных и полного прекращения приёмопередачи. Визуализация результатов выполнялась в виде температурных (тепловых) карт, построенных с использованием библиотек Matplotlib и Seaborn на языке Python.

Экспериментальные исследования и результаты

На первом этапе была получена базовая картина распределения мощности сигнала в отсутствие помехи. Матрица $PRX(no\ jam)PRX(no\ jam)$ показала максимальные значения -40 дБм в точках, примыкающих к передатчику, и ослабление до -70 дБм на удалении. Однако были обнаружены локальные неоднородности (например, в точке (3,2) значение -55 дБм вместо ожидаемых -40 дБм), обусловленные не идеальностью встроенной печатной антенны ESP8266 (сильно изрезанная диаграмма направленности). На рисунке 3 представлена тепловая карта базового распределения мощности.

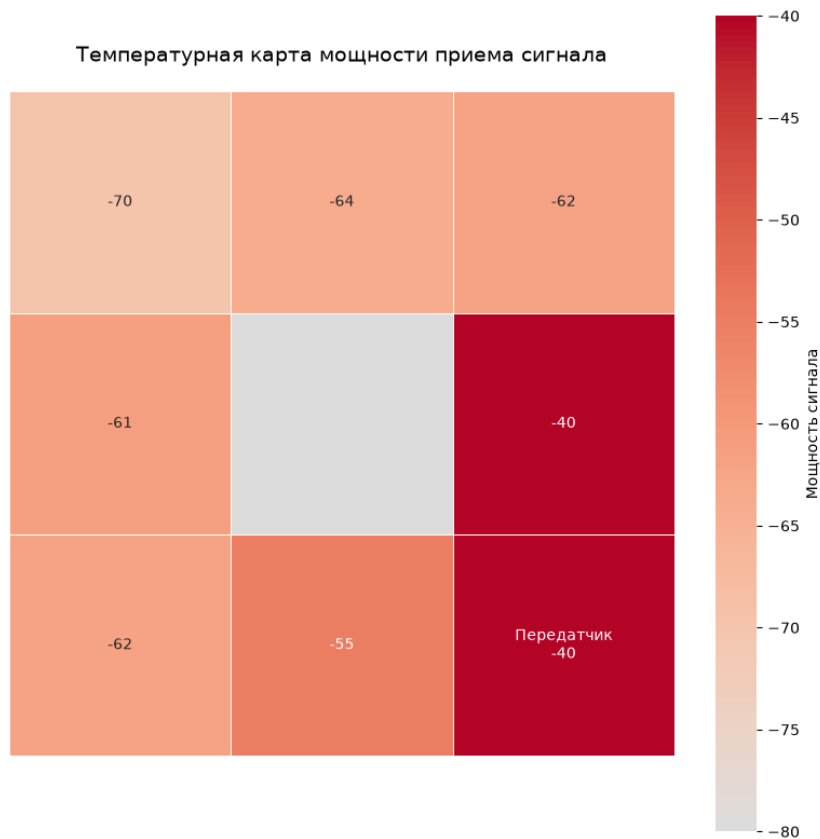


Рисунок 3 – Тепловая карта мощности приёма сигнала без включенного генератора помех (передатчик в точке 9)

При размещении генератора помех в точке 5 (центр) матрица принимаемой мощности приняла вид, позволяющий рассчитать подавление $\Delta R\Delta P$. Наибольшее подавление (до 22 дБ) зафиксировано в точке (2,3), исходно имевшей максимальный уровень сигнала. Пороговые уровни мощности помехи для полного срыва связи составили от 10 дБм на периферии до 19 дБм вблизи передатчика. На рисунке 4 показана тепловая карта мощности сигнала при подавителе в точке 5, на рисунке 5 — мощность помехи, вызывающая полную потерю связи для этой конфигурации.

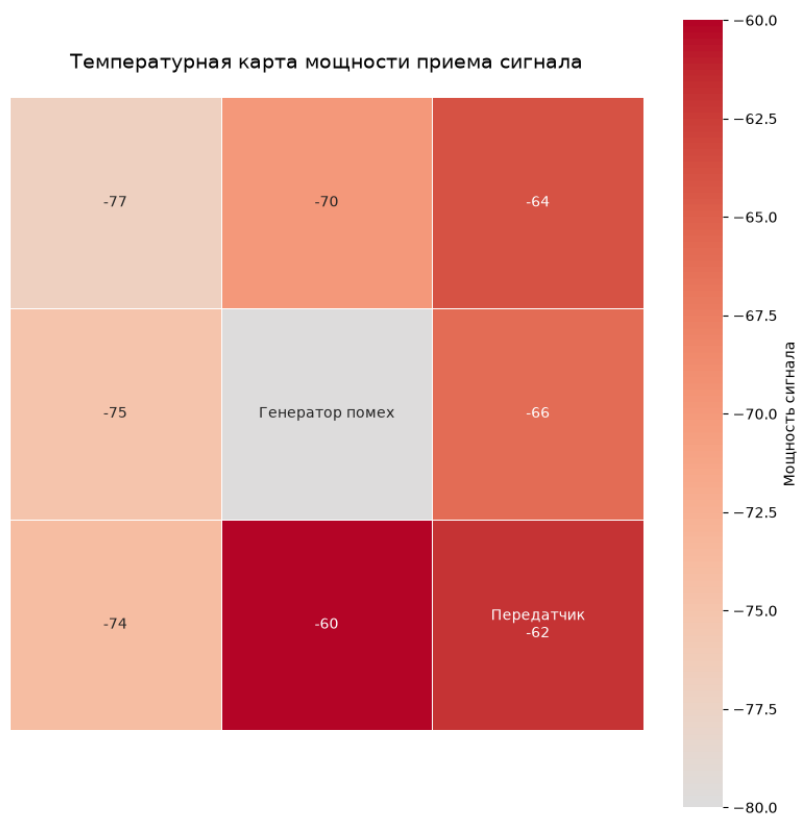


Рисунок 4 – Тепловая карта мощности приёма сигнала с включенным генератором помех в точке 5 (передатчик в точке 9)

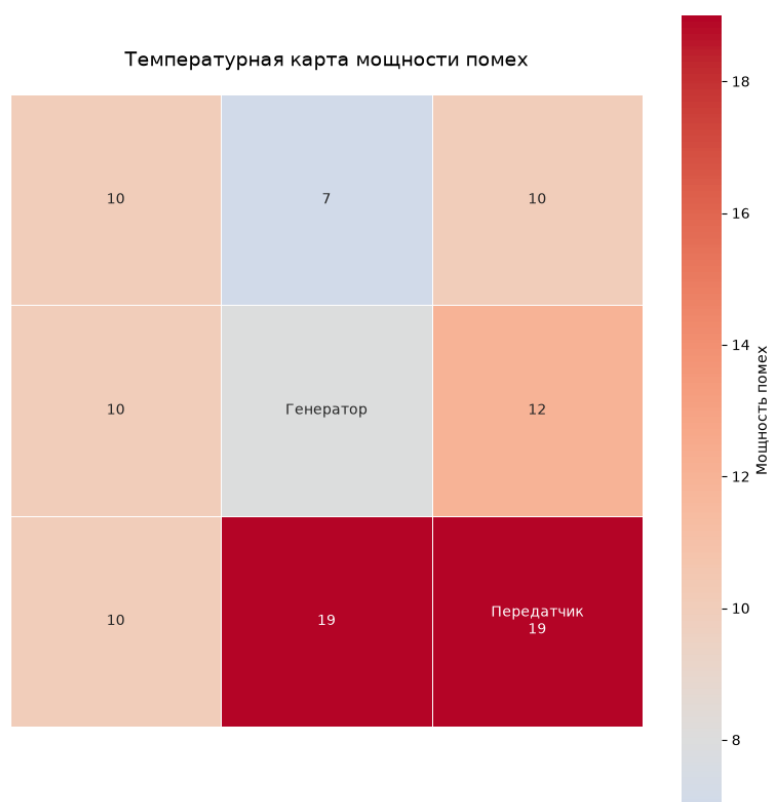


Рисунок 5 – Мощность генератора помех в точке 5, при котором наблюдается полная потеря связи между приёмником и передатчиком

При размещении генератора помех в точке 1 (противоположный угол) сформировалась качественно иная картина: выраженный градиент подавления вдоль диагонали матрицы, максимальное падение $\Delta P=26$ дБ в точке расположения передатчика, а также эффект «тени» подавления. Пороговые уровни мощности помехи в среднем оказались выше (до 19 дБм), а их пространственное распределение — более однородным. На рисунке 6 представлена тепловая карта мощности сигнала при подавителе в точке 1, на рисунке 7 — соответствующая мощность помехи для полного срыва связи.

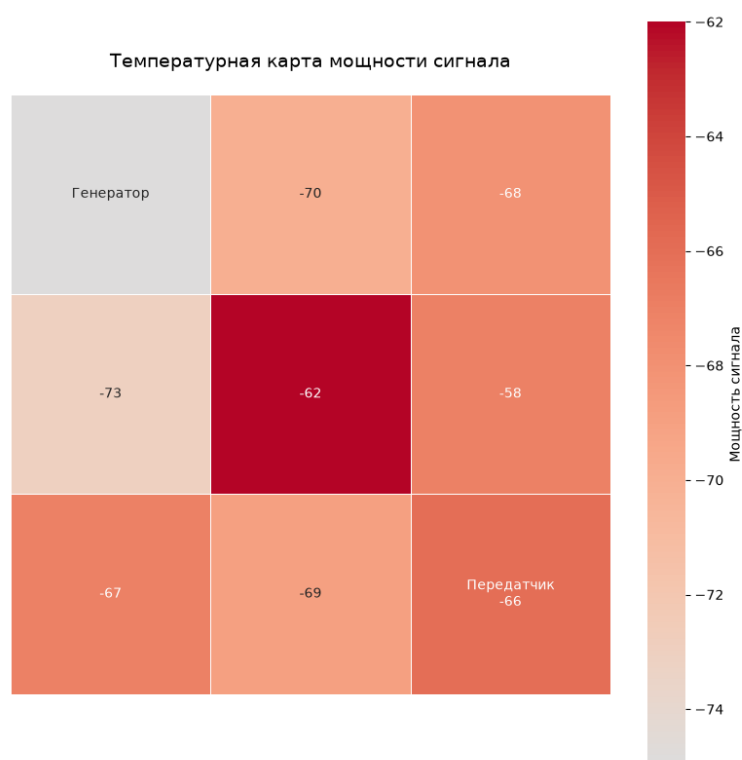


Рисунок 6 – Тепловая карта мощности приёма сигнала с включенным генератором помех в точке 1 (передатчик в точке 9)

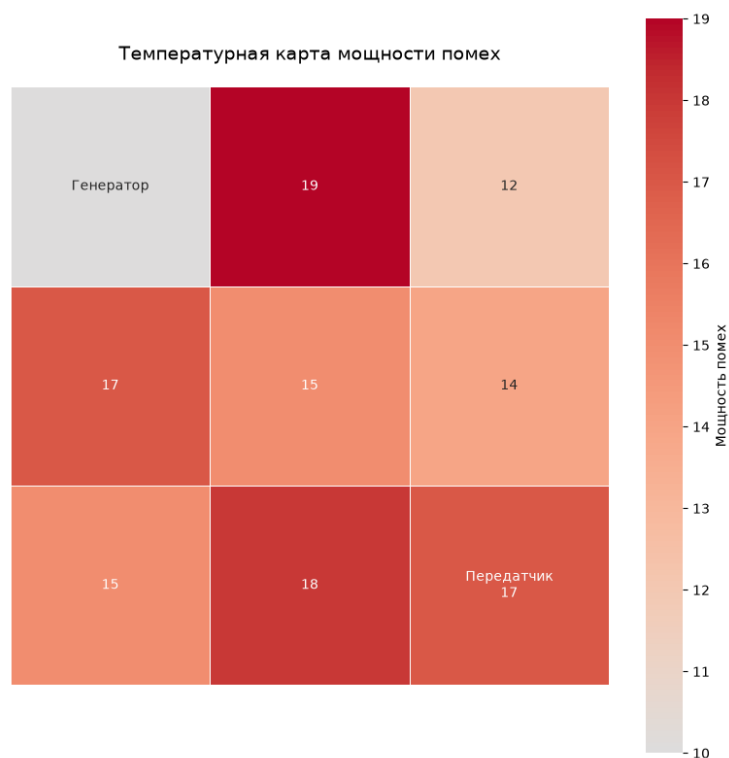


Рисунок 7 – Мощность генератора помех в точке 1, при которой наблюдается полная потеря связи между приёмником и передатчиком

Обобщающий сравнительный анализ показал, что центральное размещение подавителя создаёт более равномерное, но менее глубокое подавление (среднее $\Delta P \approx 5$ дБ), тогда как угловое размещение формирует резко неоднородную картину с локальными минимумами до 26 дБ. Обнаружена нетривиальная особенность: мощность помехи, необходимая для полного подавления связи в точке передатчика, практически одинакова для обеих конфигураций (19 дБм и 17 дБм), что указывает на энергетический инвариант срыва связи, определяемый абсолютным уровнем полезного сигнала в точке приёма.

Заключение

В ходе данной работы был создан экспериментальный стенд для картографирования пространственной зоны подавления сигнала генератором помех в диапазоне 2.4 ГГц, разработана и обоснована методика эксперимента, включающая выбор аппаратной платформы на базе ESP8266, создание специализированных прошивок для передатчика и приёмника с дисплеем, а

также процедуру пространственного сканирования по девятиточечной координатной сетке в условиях безэховой камеры. Реализован генератор шумоподобной заградительной помехи на основе PRBS и FM-модуляции с девиацией 15 МГц.

Проведены две основные серии измерений для топологических сценариев «подавитель в центре» и «подавитель в противоположном углу». Зарегистрированы матрицы пространственного распределения мощности полезного сигнала и матрицы пороговых уровней мощности помехи в моменты начала деградации канала и полного прекращения приёмопередачи. Результаты визуализированы в форме температурных карт.

Полученные результаты показывают, что эффективность подавления в решающей степени определяется не только абсолютной мощностью помехи, но и относительным пространственным расположением элементов системы. Обнаруженный энергетический инвариант срыва связи имеет прямое практическое значение при проектировании систем радиоподавления. Выявлено, что встроенная антенна ESP8266 вносит значительную инструментальную погрешность (вариации 5–10 дБм), что задаёт объективный предел точности картографирования для платформ данного класса.

Определены направления для дальнейших исследований: расширение координатной сетки, варьирование девиации частоты модуляции, исследование частотной избирательности на различных каналах диапазона 2.4 ГГц, а также замена приёмопередающих модулей на устройства с калиброванными антеннами. Выполненная работа заложила методическую основу для дальнейших исследований в области физики радиоподавления и оценки помехоустойчивости беспроводных систем связи.