

УДК 004.77:621.391.82

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ НА СКОРОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ Wi-Fi

*Страчинский А.Т., Зененко М.А., студенты*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент*

**Аннотация.** Рассмотрены физические принципы работы технологии Wi-Fi и технологии активного подавления (глушения) Wi-Fi. Проанализированы достоинства и недостатки различных методов и приборов глушения. Теоретически исследовано влияние активного подавления на пропускную способность Wi-Fi. Выявлен критический порог, при котором эффективность передачи падает ниже необходимого для практического применения.

**Ключевые слова.** Wi-Fi, активное подавление, помеховое воздействие, беспроводной канал связи, отношение сигнал/шум, пропускная способность канала, устойчивость соединения, теорема Шеннона—Хартли.

### **Введение**

Беспроводные сети стандарта Wi-Fi в настоящее время занимают важное место в телекоммуникационной инфраструктуре, обеспечивая передачу данных в корпоративных, промышленных и бытовых системах. Широкое распространение данной технологии обусловлено удобством развертывания, высокой гибкостью и возможностью оперативной организации обмена информацией между большим количеством устройств. Одновременно с этим расширение области применения Wi-Fi сопровождается ростом требований к надежности и устойчивости беспроводного соединения в условиях внешних электромагнитных воздействий. Чувствительность физического уровня таких сетей к помехам обуславливает актуальность исследования факторов, способных ухудшать качество передачи данных.

Одной из наиболее существенных угроз для беспроводных каналов связи является активное подавление (jamming) [1]. Данный тип воздействия направлен на искусственное ухудшение отношения сигнал/шум в канале связи, что может приводить к отказу в обслуживании без компрометации криптографических средств защиты или физического проникновения в защищенную зону. В условиях широкого распространения беспроводных технологий задача оценки влияния активного подавления на скорость и устойчивость Wi-Fi имеет как теоретическое, так и прикладное значение.

Исследование механизмов активного подавления и способов противодействия ему в реальных условиях, как правило, требует проведения серии дорогостоящих экспериментов с использованием специального оборудования и контролируемой среды. Это затрудняет массовую проверку гипотез и ограничивает возможности оперативного анализа устойчивости сети при различных параметрах внешнего воздействия. В связи с этим особый интерес представляют аналитические методы, основанные на теории информации, позволяющие формализовать задачу и определить теоретические пределы производительности канала связи без развертывания физических стендов для генерации помех [2].

### **1. Теоретические основы функционирования Wi-Fi**

Технология Wi-Fi представляет собой способ беспроводной передачи данных, основанный на распространении электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне. Обмен информацией между устройствами осуществляется через радиоканал, качество которого определяется как параметрами передающего и принимающего оборудования, так и условиями распространения сигнала в окружающей среде. Для устойчивой работы сети необходимо, чтобы принимаемый полезный сигнал обладал достаточной мощностью и мог быть надежно выделен на фоне внешних и внутренних шумов.

К числу основных параметров беспроводного канала относятся ширина полосы пропускания, мощность полезного сигнала и уровень шума или помех. Указанные характеристики непосредственно влияют на потенциальную пропускную способность канала связи и, следовательно, на максимально достижимую скорость передачи данных. При фиксированной полосе пропускания качество связи в значительной степени определяется тем, насколько мощность полезного сигнала превышает мощность шумовой составляющей. Чем выше данное соотношение, тем устойчивее прием и тем выше вероятность корректной передачи информации без ошибок и повторных отправок.

Одним из ключевых параметров, характеризующих работу Wi-Fi, является отношение сигнал/шум. Этот показатель позволяет количественно оценить, насколько приемник способен выделить полезный сигнал на фоне посторонних воздействий. При высоком отношении сигнал/шум канал сохраняет работоспособность, обеспечивает приемлемую скорость передачи и устойчивое соединение. Снижение данного показателя приводит к ухудшению качества приема, росту вероятности ошибок, увеличению числа повторных передач пакетов и снижению общей устойчивости сети [3].

Поскольку Wi-Fi функционирует как радиоканал, его эффективность напрямую зависит от условий распространения электромагнитного сигнала и уровня помех в среде передачи. Следовательно, при исследовании скорости и устойчивости беспроводной сети необходимо учитывать не только характеристики самой системы, но и внешние воздействия, способные изменить параметры сигнала и шума. В этом контексте активное подавление следует рассматривать как значимый фактор, влияющий на работу канала связи.

## 2. Активное подавление Wi-Fi и его влияние на канал связи

Под активным подавлением понимается преднамеренное создание внешнего электромагнитного воздействия, ухудшающего условия приема полезного сигнала в беспроводном канале. Для сетей стандарта Wi-Fi такое воздействие сводится к увеличению мощности помехи в рабочем диапазоне частот, вследствие чего снижается отношение сигнал/шум. Поскольку именно данный параметр определяет качество радиоканала, его искусственное уменьшение непосредственно влияет на скорость передачи данных и устойчивость соединения.

С физической точки зрения активное подавление проявляется в уменьшении различимости полезного сигнала на фоне шумовой составляющей. Приемник утрачивает возможность надежно выделять и корректно декодировать передаваемую информацию. По мере увеличения мощности помехи возрастает вероятность ошибок, увеличивается число повторных передач, снижается эффективная скорость обмена данными и ухудшается общая устойчивость работы сети. Таким образом, активное подавление воздействует не на программный уровень беспроводной системы, а непосредственно на ее физическую основу - процесс распространения и приема электромагнитного сигнала.

Существуют различные методы и средства подавления Wi-Fi, различающиеся по спектральным и временным характеристикам создаваемой помехи. Однако в рамках данного исследования их целесообразно рассматривать не по конструктивным особенностям устройств, а по итоговому эффекту: все они приводят к росту эквивалентной мощности шума в канале. Такой подход позволяет перейти от анализа частных технических реализаций к универсальной модели, в которой определяющим фактором является величина помехи. Это создает основу для дальнейшей количественной оценки влияния активного подавления на пропускную способность канала средствами теории информации.

## 3. Теоретическая модель оценки пропускной способности Wi-Fi в условиях помех

Для количественной оценки влияния активного подавления на работу беспроводной сети целесообразно использовать аналитический подход, позволяющий описать изменение характеристик канала через его основные физические параметры. Такой подход особенно важен в случаях, когда проведение серии натурных экспериментов затруднено из-за необходимости применения специального оборудования и контролируемых условий. В рамках теоретического анализа внешнюю помеху можно рассматривать как изменение шумовой составляющей канала, что позволяет связать устойчивость сети с фундаментальными закономерностями теории связи.

Одной из базовых зависимостей, позволяющих оценить предельную пропускную способность канала при наличии шума, является теорема Шеннона-Хартли [2]. В соответствии с ней пропускная способность канала определяется выражением

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

где  $C$  - пропускная способность канала связи,  $W$  - ширина полосы пропускания,  $S$  - средняя мощность полезного сигнала,  $N$  - средняя мощность шума или внешней помехи.

При фиксированной ширине полосы пропускания величина  $W$  остается постоянной, поэтому основным фактором, определяющим изменение пропускной способности, является отношение  $S/N$ . При неизменной мощности полезного сигнала и росте мощности помехи значение этого отношения уменьшается, что приводит к снижению пропускной способности канала. Данный процесс носит нелинейный характер: на начальном этапе деградация может быть сравнительно умеренной, однако при дальнейшем увеличении  $N$  пропускная способность убывает существенно быстрее.

На рисунке 1 изображена графическая зависимость относительной пропускной способности от мощности помехи, где параметр  $N$ , характеризующий уровень внешнего помехового воздействия, изменяется в диапазоне от -100 до -30 дБм, тогда как значение  $S$  принимается постоянным и равным -50 дБм.

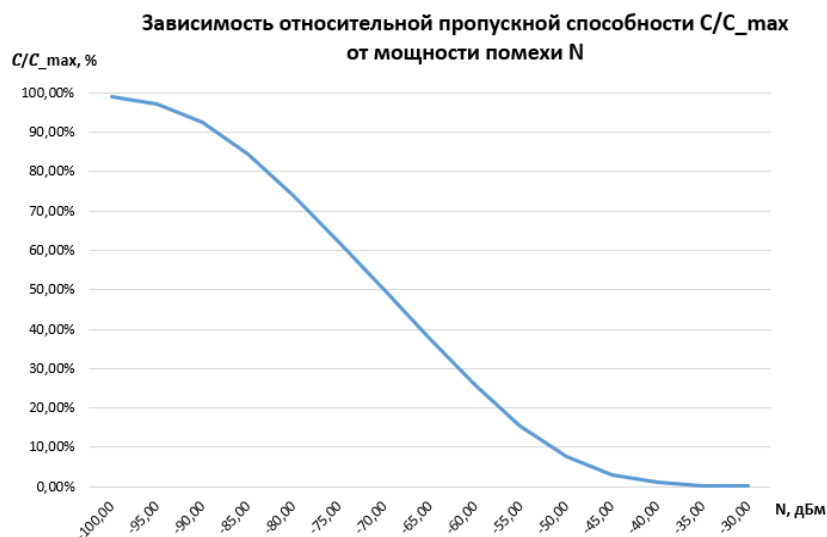


Рисунок 1 – Зависимость относительной пропускной способности от мощности помехи

Использование данной модели позволяет перейти от качественного описания влияния активного подавления к количественному анализу. Если в предыдущих разделах рассматривались физические основы работы Wi-Fi и общий механизм воздействия помехи на радиоканал, то в данном случае появляется возможность исследовать, каким образом рост мощности внешнего сигнала влияет на пропускную способность сети. Это создает основу для последующего анализа зависимости относительной пропускной способности от мощности помехи и для определения области, в которой работа канала становится существенно затрудненной.

#### 4. Анализ результатов исследования

На основе рассмотренной теоретической модели можно проследить, как изменяется состояние канала Wi-Fi при увеличении мощности внешней помехи. При малых значениях мощности помехи полезный сигнал продолжает преобладать над шумовой составляющей, поэтому пропускная способность канала снижается незначительно. В данном режиме сеть сохраняет работоспособность, а ухудшение характеристик проявляется главным образом в умеренном снижении скорости передачи данных.

Как видно из рисунка 1, с ростом мощности помехи относительная пропускная способность канала постепенно уменьшается. На начальном участке кривой снижение происходит сравнительно плавно, поскольку отношение сигнал/шум остается достаточно высоким для устойчивого приема информации. Однако при дальнейшем увеличении мощности внешнего воздействия уменьшение пропускной способности становится более выраженным, что свидетельствует о существенном ухудшении условий передачи данных.

Особый интерес представляет область, в которой мощность помехи становится сравнимой с мощностью полезного сигнала. В этой области кривая демонстрирует резкое снижение относительной пропускной способности, что указывает на переход канала в режим неустойчивой работы. При таком соотношении сигнала и шума приемник уже не способен надежно выделять полезную информацию на фоне внешнего воздействия, вследствие чего возрастают вероятность ошибок, число повторных передач и общее время обмена данными.

Таким образом, графическая зависимость позволяет выделить критическую область функционирования канала, соответствующую условию  $N = S$ . Вблизи данного соотношения эффективность передачи данных становится недостаточной для нормальной эксплуатации сети. Следовательно, устойчивость Wi-Fi определяется не только наличием полезного сигнала, но и его энергетическим запасом относительно помехового фона.

Представленный график не только иллюстрирует характер деградации канала при активном подавлении, но и позволяет наглядно оценить пределы работоспособности беспроводной сети. По мере роста мощности помехи канал последовательно переходит от режима устойчивой передачи к режиму значительного ухудшения качества связи, что подтверждает применимость аналитической модели для оценки влияния внешнего электромагнитного воздействия на скорость и устойчивость Wi-Fi.

#### Заключение

В работе рассмотрены физические основы функционирования Wi-Fi и особенности активного подавления как внешнего электромагнитного воздействия на беспроводной канал связи. Показано, что качество передачи данных в таких системах в значительной степени определяется отношением мощности полезного сигнала к мощности шума. Изменение данного соотношения лежит в основе ухудшения скорости и устойчивости работы сети при воздействии внешних помех.

Для количественной оценки влияния активного подавления использована теоретическая модель, основанная на теореме Шеннона-Хартли. Такой подход позволил описать зависимость пропускной способности канала от мощности внешней помехи и перейти от общего качественного представления о подавлении к анализу изменения параметров сети в зависимости от уровня помехового воздействия. Использование относительной пропускной способности обеспечило наглядное исследование характера деградации канала при усилении внешнего шума.

Проведенный анализ показал, что рост мощности помехи приводит к нелинейному снижению пропускной способности Wi-Fi. На начальном этапе влияние внешнего воздействия может быть умеренным, однако по мере уменьшения отношения сигнал/шум ухудшение характеристик канала становится значительно более выраженным. Наиболее существенные изменения наблюдаются в области, где мощность помехи становится сопоставимой с мощностью полезного сигнала. В этих условиях передача данных теряет устойчивость, а эффективность функционирования сети существенно снижается.

Полученные результаты позволяют рассматривать активное подавление как фактор, непосредственно влияющий на практическую работоспособность беспроводной сети. Теоретическое описание зависимости пропускной способности от мощности помехи дает возможность предварительно оценивать устойчивость Wi-Fi к внешним электромагнитным воздействиям и использовать результаты такого анализа при дальнейшем исследовании уязвимости беспроводных систем.

**Список использованных источников**

1. Pirayesh, H. *Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey* / H. Pirayesh, H. Zeng // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2022. – Vol. 24, No. 2. – P. 767–809.
2. Shannon, C. E. *A Mathematical Theory of Communication* / C. E. Shannon // *The Bell System Technical Journal*. – 1948. – Vol. 27, No. 3. – P. 379–423.
3. Муравьев, В. В. *Сверхвысокочастотные технологии в системах телекоммуникаций: учеб.-метод. пособие: в 3 ч. Ч. 2. Устройства СВЧ-систем телекоммуникаций (усилители, смесители, генераторы)* / В. В. Муравьев, С. А. Корневский, В. Н. Мищенко. – Минск: БГУИР, 2007. – 71 с.

UDC 004.77:621.391.82

## STUDY OF THE IMPACT OF ACTIVE JAMMING ON Wi-Fi RATE AND STABILITY

*Strachinsky A.T., Zenenko M.A., students*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Minsk, Republic of Belarus*

*Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor*

**Annotation.** The physical principles of Wi-Fi technology and active Wi-Fi jamming are examined. The advantages and disadvantages of various jamming methods and devices are analyzed. The impact of active jamming on Wi-Fi throughput is theoretically examined. The critical threshold at which transmission efficiency drops below the level required for practical use is identified.

**Keywords.** Wi-Fi, active jamming, wireless communication channel, signal-to-noise ratio, channel capacity, connection stability, Shannon-Hartley theorem.