

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКРЫТНОСТИ СИГНАЛОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ МАНИПУЛЯЦИЯМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Фам Тхи Хонг Ньунг, студентка гр.461403

Михайловский Д.А., студент гр.461403

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Фильченкова Т.М. – старший преподаватель каф. ЗИ

**Аннотация.** Исследуется метод распознавания сигналов ASK, FSK и BPSK в условиях экстремально низкого отношения сигнал/шум ( $SNR < -15$  дБ). Предложена модель на основе анализа пик-фактора (PAPR) как ключевого параметра для выявления энергетических различий между модуляциями. Установлено, что статистическое усреднение PAPR позволяет эффективно классифицировать сигналы даже при доминирующем влиянии шумов.

**Ключевые слова.** Цифровая модуляция, скрытность передачи, ASK, FSK, BPSK, спектральная плотность мощности, PAPR, распознавание сигналов.

В современных условиях развития инфокоммуникационных технологий вопросы обеспечения информационной безопасности выходят на первый план. Одним из ключевых аспектов защиты информации является скрытность передачи данных – способность сигнала оставаться незамеченным средствами радиоэлектронной разведки. Даже при использовании современных методов модуляции сигнал может быть обнаружен на основе анализа его энергетических и спектральных характеристик. Исследование скрытности сигналов с различными видами манипуляции является актуальной научно-технической задачей [1].

Практическая значимость данной проблематики обусловлена широким спектром прикладных задач. В области радиоэлектронной борьбы системы обнаружения сигналов применяются для выявления несанкционированных каналов связи, подавления вражеских систем управления и защиты собственных коммуникаций. В гражданской сфере аналогичные методы используются операторами связи для мониторинга радиочастотного спектра и выявления нелегальных передатчиков. В системах критической инфраструктуры – на объектах энергетики, транспорта и государственного управления – обеспечение скрытности каналов передачи данных является обязательным требованием к защищённым коммуникациям [2]. Кроме того, развитие технологий интернета вещей и беспилотных систем порождает новые требования к малозаметной передаче телеметрии и командных сигналов в условиях радиоэлектронного противодействия.

В работе рассматриваются три основных типа цифровой модуляции: амплитудная (ASK), частотная (FSK) и фазовая (BPSK). Для оценки скрытности сигнала необходимо проанализировать распределение его мощности по частоте. Чем равномернее распределена мощность и чем менее выражены дискретные составляющие в спектре, тем сложнее обнаружить сигнал на фоне шумов.

Теоретический анализ спектральной плотности мощности на основе теоремы Винера–Хинчина показал (1 – ASK, 2 – PSK, 3 – FSK):

$$G_s^{ASK}(f) = \frac{A^2 T}{16} \times [\text{sinc}^2(\pi(f - f_c) T)] + \frac{A^2}{16} \delta(f - f_c), \quad (1)$$

$$G_s^{PSK}(f) = \frac{A^2 T}{4} \times [\text{sinc}^2(\pi(f - f_c) T)], \quad (2)$$

$$G_s^{FSK}(f) = \frac{A^2 T}{16} \times [\text{sinc}^2(\pi(f - f_1) T) + \text{sinc}^2(\pi(f - f_2) T)] + \frac{A^2}{16} [\delta(f - f_1) + \delta(f - f_2)], \quad (3)$$

где  $f_c$  – несущая частота,  $T$  – длительность одного бита,  $A$  – амплитуда [3].

Спектр ASK содержит дискретную составляющую на несущей частоте, что обуславливает его низкую скрытность [4]. BPSK характеризуется подавленной несущей – отсутствие дискретных пиков обеспечивает лучшую маскировку. FSK имеет два пика на частотах логических уровней, что также демаскирует сигнал.

Практическое моделирование в среде MATLAB подтвердило теоретические выводы. На рисунке 1 представлены спектры сигналов ASK, BPSK и FSK.

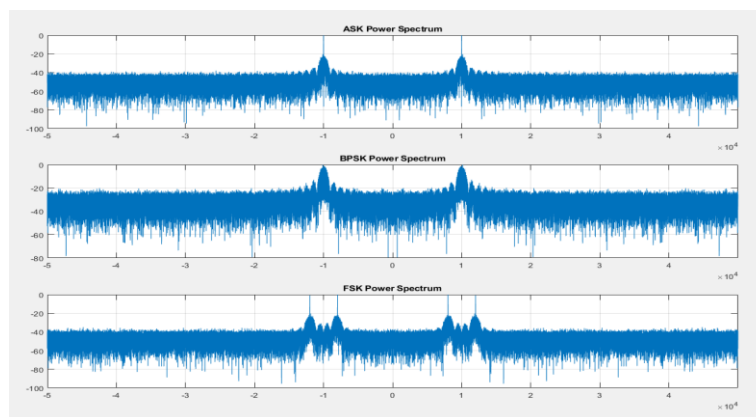


Рисунок 1 – Спектры сигналов ASK, BPSK и FSK

Сравнительный анализ спектральных характеристик представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение спектров различных видов манипуляции

| № | Характеристика               | ASK              | BPSK            | BFSK                         |
|---|------------------------------|------------------|-----------------|------------------------------|
| 1 | Наличие несущей              | Есть (яркий пик) | Нет (подавлена) | Есть (два пика)              |
| 2 | Ширина спектра               | Узкая ( $2/T$ )  | Узкая ( $2/T$ ) | Широкая ( $\Delta f + 2/T$ ) |
| 3 | Скрытность                   | Низкая           | Высокая         | Средняя / Низкая             |
| 4 | Энергетическая эффективность | Низкая           | Высокая         | Средняя                      |

Для распознавания сигналов в условиях экстремально низкого отношения сигнал/шум ( $SNR = -20$  дБ) предложена модель на основе анализа пик-фактора (PAPR – Peak-to-Average Power Ratio). PAPR вычисляется как отношение мгновенной пиковой мощности к средней мощности в скользящих временных окнах [5]:

$$PAPR_{dB} = 10 \log\left(\frac{\max |s(t)|^2}{E[|s(t)|^2]}\right). \quad (5)$$

Для преодоления доминирующего влияния белого шума применяется статистическое усреднение значений PAPR по нескольким символьным интервалам. Экспериментальные результаты показали четкое разделение типов модуляции: ASK: PAPR  $\approx 14.00$  дБ; FSK: PAPR  $\approx 12.93$  дБ; BPSK: PAPR  $\approx 12.27$  дБ.

На основе этих различий устанавливаются адаптивные решающие пороги для классификации сигналов. Данный подход позволяет проводить точную идентификацию без необходимости сложной временной и фазовой синхронизации, что особенно важно в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило, что анализ PAPR является надежным инструментом для обнаружения сигналов в сильно зашумленной среде. Наивысшую скрытность продемонстрировал сигнал BPSK благодаря стабильной амплитуде и низкому пик-фактору. Полученные результаты имеют практическую значимость для систем радиоразведки и обнаружения нелегальных каналов связи. Предложенный метод классификации на основе адаптивных решающих порогов по значениям PAPR отличается низкой вычислительной сложностью и не требует предварительной синхронизации по времени и фазе, что делает его пригодным для реализации на встраиваемых платформах с ограниченными ресурсами – в частности, на программно-определяемых радиосистемах и специализированных ПЛИС. Это открывает перспективы для его интеграции в портативные комплексы радиомониторинга и автономные системы обнаружения.

#### Список использованных источников:

1. Digital Modulation Techniques [Электронный ресурс]: <https://www.geeksforgEEKS.org/electronics-engineering/digital-modulation-techniques/>. – Дата доступа: 27.02.2026
2. Signal Encoding Techniques [Электронный ресурс]: <https://www.ccs.neu.edu/home/rraj/Courses/6710/S10/Notes/SignalsPropagation.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2026.
3. Differences between analog and digital modulation methods [Электронный ресурс]: [https://en.intwww.de/index.php?title=Modulation\\_Methods/Linear\\_Digital\\_Modulation&direction=prev&oldid=46327](https://en.intwww.de/index.php?title=Modulation_Methods/Linear_Digital_Modulation&direction=prev&oldid=46327). – Дата доступа: 27.02.2026.
4. Digital Modulation [Электронный ресурс]: <https://www.rose-hulman.edu/class/ee/Ferguson/curtiss/Chapter%207%20Digital%20Modulation.pdf>. – Дата доступа: 01.03.2026.
5. Technical identification of digital signals [Электронный ресурс]: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1600-2-201508-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1600-2-201508-S!!PDF-E.pdf). – Дата доступа: 01.03.2026.