

## К ВОПРОСУ О СПОСОБАХ РАЗЛИЧЕНИЯ ВИДА МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА\*

К. С. Калашников, П. А. Марчук, А. Н. Фаульгабер

*Воронежский государственный университет,  
Национальный исследовательский университет "МЭИ"*

Поступила в редакцию 08.05.2019 г.

**Аннотация.** Приведён обзор существующих подходов к задаче различения вида модуляции сигнала. Выполнен сравнительный анализ различных алгоритмов определения принадлежности сигнала к классам амплитудной, фазовой, частотной модуляции. Кратко описаны различия в способах определения вида модуляции в цифровых и аналоговых системах передачи информации. Со ссылкой на источники перечислены алгоритмы различения вида модуляции, основанные на теории статистических решений: байесовские, максимально правдоподобные, квазиправдоподобные. Описан подход к задаче классификации модулированных сигналов методами распознавания образов, в том числе с применением искусственных нейронных сетей.

**Ключевые слова:** модуляция сигнала, амплитудная, частотная, фазовая модуляция, аналоговые и цифровые виды модуляции, алгоритм различения, байесовский, максимально правдоподобный, квазиправдоподобный алгоритм, различение образов, кумулянты, искусственные нейронные сети.

## TO THE PROBLEM OF THE METHODS FOR DISCRIMINATING THE SIGNAL MODULATION FORMAT

K. S. Kalashnikov, P. A. Marchuk, A. N. Faulgaber

**Abstract.** The paper provides an overview of current approaches to solve the problem of discriminating the signal modulation format. The comparative analysis is carried out of various algorithms for determining the signal belonging to the amplitude, phase, and frequency modulation classes. The differences are briefly described in the ways of discriminating the modulation format in digital and analog communication systems. With reference to the common studies, the algorithms are specified for discriminating the modulation format based on the statistical-decision theory, such as Bayesian, maximum likelihood, quasi-likelihood ones. The approach is described to the classification of the modulated signals by methods of pattern recognition including the application of artificial neural networks.

**Keywords:** signal modulation, amplitude, frequency, phase modulation, analog and digital modulation formats, discrimination algorithm, Bayesian, maximum likelihood, quasi-likelihood algorithm, pattern recognition, artificial neural networks.

### ВВЕДЕНИЕ

Для многих приложений современной радиофизики и электроники актуальна задача различения вида модуляции сигнала. Одной из возможных целей определения вида модуляции может быть последующее детектирование и извлечение из сигнала полезной информации. Такие задачи встречаются в области радиомониторинга, радиоперехвата, радиоразведки, в

\* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-71-10057).

© Калашников К. С., Марчук П. А., Фаульгабер А. Н., 2019

системах когнитивного радио и многих других приложениях. Действительно, активно развивающиеся в последние годы системы когнитивного радио обладают возможностью динамического выбора вида модуляции радиосигнала для формируемого канала связи. Приёмные устройства таких систем должны иметь возможность быстрого распознавания (различения, идентификации) используемого вида модуляции.

Другой областью применения автоматического различения вида модуляции являются системы связи и вещания с адаптивным кодированием и модуляцией (АКМ). Для интерактивных приложений точка-точка, таких как интернет-навигация, цифровое телевидение, система АКМ оптимизируют параметры передачи для каждого пользователя в зависимости от состояния канала связи. В условиях низких шумов передатчик может использовать модуляцию с более высокой скоростью передачи данных (например, 32APSK) и переключиться к модуляции с пониженной скоростью (8PSK) при ухудшении условий связи. Выбранные параметры пересылаются получателю с помощью дополнительного сигнала. Однако, используя автоматическое различение вида модуляции, можно избежать передачи избыточных данных.

Ещё одной областью применения различения вида модуляции является радиоэлектронная борьба. Зная вид модуляции сигнала, можно с одной стороны более эффективно осуществить радиоподавление, с другой — перехват управления или подмену сигнала для дезориентации противника.

В данной работе представлен обзор алгоритмов и способов различения вида модуляции.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МОДЕЛИ СИГНАЛА

Один из первых алгоритмов различения вида модуляции использовал банк демодуляторов, каждый из которых был разработан для своего вида модуляции. Оператор, рассматривающий выходы демодуляторов принимает решение относительно вида модуляции. Такой подход требует наличия длинной реализации сигнала и квалифицированного оператора.

К настоящему времени сформировались несколько основных подходов к задаче автоматического различения вида модуляции: на основе статистической теории принятия решений, на основе теории распознавания образов, в том числе с помощью искусственных нейронных сетей. Выбор используемого подхода зависит от исходных данных, известных классификатору, уровня шума, а также от типа наблюдаемых данных.

Алгоритмы различения вида модуляции должны принимать решение на основе анализа наблюдаемой реализации

$$r(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $n(t)$  — реализация шума, статистические свойства которого могут быть известны или неизвестны. В подавляющем большинстве работ шум  $n(t)$  предполагается гауссовским белым с односторонней спектральной плотностью  $N_0$ . Модулированный сигнал записывают в одной из следующих форм [1], [4]

$$\begin{aligned} s(t) &= s_c(t) \cos(\omega_c t - \theta_c) - s_s(t) \sin(\omega_c t - \theta_c) = \\ &= A(t) \cos(\omega_c t + \theta(t) - \theta_c) = \\ &= \operatorname{Re} \{ \tilde{s}(t) \exp[j(\omega_c t - \theta_c)] \}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\tilde{s}(t)$  — комплексная огибающая,  $s_c(t)$ ,  $s_s(t)$ ,  $A(t)$ ,  $\theta(t)$  — синфазная (косинусная) и квадратурная (синусная) составляющие, амплитуда и фаза соответственно,  $\omega_c$ ,  $\theta_c$  — частота и начальная фаза гармонической несущей. Если функции  $s_c(t)$ ,  $s_s(t)$ ,  $A(t)$ ,  $\theta(t)$  непрерывны и принимают значения из непрерывных отрезков, то модуляцию называют аналоговой. Если функции  $s_c(t)$ ,  $s_s(t)$ ,  $A(t)$ ,  $\theta(t)$  принимают дискретный набор значений, то имеем дело с цифровыми видами модуляции. Как правило, при цифровой модуляции функции  $s_c(t)$ ,  $s_s(t)$ ,

$A(t)$ ,  $\theta(t)$  могут менять значения в дискретные моменты времени. Интервал между этими моментами связан с длительностью канального символа  $T_s$ .

В ряде работ [10], [19] в качестве наблюдаемых данных используются отсчёты комплексной огибающей. В идеальном случае после предварительной обработки отсчёты комплексной огибающей принятого модулированного сигнала, наблюдаемые на фоне отсчётов аддитивного гауссовского шума, можно записать в виде

$$x(n) = d(n) + z(n), \quad n = 1, 2, \dotsc, N. \quad (3)$$

Здесь  $x(n)$  — отсчёты комплексной огибающей,  $d(n)$  — последовательность независимых одинаково распределённых комплексных величин, принадлежащих одному из созвездий,  $z(n)$  — отсчёты независимых одинаково распределённых гауссовских комплексных случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями  $\sigma_z^2$ . Следует заметить, что использование модели наблюдаемых данных (3) допустимо, если точно известна частота несущей  $\omega_c$  и её начальная фаза  $\theta_c$ , а также длительность канального символа  $T_s$ .

## 2. РАЗЛИЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Различение вида модуляции на основе теории статистических решений представляет собой задачу выбора одной из множества гипотез, которая обычно решается с помощью байесовского метода или метода максимального правдоподобия. Основная идея заключается в том, что вероятностные распределения наблюдаемых данных при разных видах модуляции предоставляют всю информацию для различения. Байесовский классификатор минимизирует средний риск, однако его трудно реализовать из-за высокой вычислительной сложности. Кроме того, построение байесовского алгоритма различения требует априорного знания матрицы потерь, вероятностей гипотез и распределений неизвестных параметров сигнала, что зачастую делает невозможным применение байесовского критерия. Поэтому весьма часто используется критерий максимального правдоподобия для синтеза алгоритма различения.

В работе [3] синтезирован алгоритм различения ВРК/QPSK на основе аппроксимации функционала отношения правдоподобия фазо-модулированных цифровых сигналов в белом гауссовском шуме. Полученный алгоритм назван квазиправдоподобным (qLLR) и сравнивается с более традиционными методами: квадратичным и фазовым различителями. Аналитически показано, что производительность квазиправдоподобного алгоритма значительно лучше чем у эмпирически разработанных квадратичного и фазового алгоритмов.

Максимально правдоподобный алгоритм различения количества уровней в сигнале PSK, наблюдаемом на фоне аддитивного гауссовского белого шума, исследован в [4]. Эффективность классификации изучается теоретически и, как установлено, обеспечивает лучшую производительность, чем любой из других методов, известных в литературе на момент публикации.

В работе [5] метод максимального правдоподобия используется для классификации цифровых квадратурных модуляций. Показано, что в идеальной ситуации отсчёты квадратурных составляющих сигнала являются достаточной статистикой для различения модуляции. Получена общая формула вероятности ошибки различения. Показано, что асимптотически алгоритм максимального правдоподобия способен классифицировать любой конечный набор различных созвездий с нулевой частотой ошибок, когда число доступных отсчётов данных стремится к бесконечности. Получены и проанализированы оптимальные и неоптимальные правила принятия решений для обнаружения квадратурных цифровых модуляций с постоянной огибающей в широкополосном шуме [7].

Как правило, амплитуда сигнала неизвестна на приёмной стороне. В работе [13], [8] синтезированы байесовский алгоритм различения BPSK и QPSK сигналов с неизвестной амплиту-

дой. Предполагалось, что неизвестная амплитуда распределена по закону Релея. Выполнено моделирование алгоритма различения и получены статистические характеристики эффективности его функционирования.

В [9] рассматривается задача асинхронной классификации сигналов с частотной манипуляцией (MFSK) на фоне аддитивного белого гауссовского шума. Использовано два подхода. Первый основан на классической теории отношения правдоподобия, которая обеспечивает оптимальную, но чувствительную к неизвестным частотным смещениям эффективность. Второй вполне исключает структуру фиксированной частоты и использует измерения корреляции высокого порядка (HOS). Оценены проигрыши чувствительности вследствие неизвестного времени прибытия сигнала или смещения во времени канального символа. Качество различения улучшается при использовании усреднения по длительности канального символа.

Авторы статьи [10] обсуждают алгоритмы классификации модулированных сигналов, как проблему проверки множественных гипотез. В частности, рассматривается канал с гауссовским белым шумом и случайной начальной фазой и рассматриваются возможные решения задачи проверки гипотез. Предполагается, что доступна наблюдению реализация комплексной огибающей. Представлены два новых алгоритма и выполнено сравнение их производительности с существующими классификаторами для различных пар модуляции. Результаты моделирования показывают, что синтезированные алгоритмы могут значительно повысить эффективность функционирования для классификации плотных, непостоянных огибающих созвездий.

Если мощность сигнала, и мощность шума априори неизвестны, то выполнить различение вида модуляции затруднительно. Для оценки мощности сигнала или шума требуется, чтобы тип модуляции был известен. Чтобы решить эту проблему, в работе [11] предложен алгоритм совместной оценки мощности и классификация модуляции (JPEMC). Ключевой идеей алгоритма является использование отношений между вторым и высшим моментами принимаемого сигнала, мощности сигнала и шума. Результаты моделирования демонстрируют эффективность алгоритма JPEMC.

### 3. РАЗЛИЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Сигналы, модулированные различными способами, обладают рядом свойств (признаков), специфичных для каждого вида модуляции. Выделение этих свойств в виде конкретных численных величин позволяет построить алгоритм различения вида модуляции, возможно с многоступенчатым принятием решения.

В работе [12] предложен алгоритм различения модуляции 4PSK и 16QAM на основе распознавания образов. Образ формируется как оптимизированное сочетание из моментов четвертого и второго порядка для того, чтобы максимизировать вероятность правильной классификации.

В ряде работ для различения вида модуляции используются выборочные значения статистик высоких порядков (HOS), а также выборочные значения кумулянтов, вычисленные на основе отсчётов комплексной огибающей  $x_k$ .

Классификатор статистики высокого порядка, разработанный в [6], использует в качестве определяющих свойств нормированные кумулянты четвёртого порядка. Алгоритм использует иерархический способ классификации различных форматов цифровой модуляции. Это особенно эффективно для выделения подклассов фазовой манипуляции (PSK), амплитудно-импульсной модуляции (PAM) и квадратурной амплитудной манипуляции (QAM).

Для комплекснозначных отсчётов стационарного случайного процесса  $x_k$  смешанные моменты порядка  $k$  определяется как

$$M_{nm} = \langle x_k^{n-m} (x_k^*)^m \rangle.$$

Таким образом, момент второго порядка может быть записан в виде

$$M_{20} = \langle x_k^2 \rangle \quad M_{21} = \langle x_k x_k^* \rangle = \langle |x_k|^2 \rangle.$$

Можно определить множество различных стационарных кумулянтов четвёртого порядка [6]

$$\begin{aligned} C_{40} &= f(x_k, x_k, x_k, x_k), \\ C_{41} &= f(x_k, x_k, x_k, x_k^*), \\ C_{42} &= f(x_k, x_k, x_k^*, x_k^*), \end{aligned}$$

где

$$f(a, b, c, d) = \langle abcd \rangle - \langle ab \rangle \langle cd \rangle - \langle ac \rangle \langle bd \rangle - \langle ad \rangle \langle bc \rangle.$$

Величина  $C_{42}$  используется, чтобы решить, является ли созвездие действительным (BPSK или PAM), круговым (PSK) или прямоугольным (QAM). Затем, если неизвестное вращение фазы можно считать небольшим, то  $|C_{40}|$  может использоваться для классификации в каждом подклассе. Если неизвестное вращение фазы нельзя игнорировать, то вместо  $|C_{40}|$  следует использовать  $C_{40}$ . Подробнее об использовании кумулянтов для различения вида модуляции можно прочитать в [6].

В качестве образа для различения вида модуляции может использоваться результат вейвлет-преобразования [21].

В последние десятилетия для распознавания образов часто применяются искусственные нейронные сети. Образом модулированного сигнала могут служить временные отсчёты самого сигнала или его огибающей, спектрограммы, вейвлет-образы, выборочные значения статистических характеристик (моментов высоких порядков, кумулянтов и др.). Наиболее простыми являются различители вида модуляции на основе многослойного персептрона и на базе самоорганизующихся карт Кохонена [19], [20], [21].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведён обзор существующих подходов к задаче различения вида модуляции сигнала. Основное внимание уделено двум подходам: на основе теории статистических решений и на основе распознавания образов. В качестве образов различаемых сигналов могут использоваться различные структурные признаки, кумулянты, спектрограммы, вейвлет-образы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azzouz, E. E. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals / E. E. Azzouz, A. K. Nandi. — Kluwer Academic, 1996.
2. Azzouz, E. E. Procedure for automatic recognition of analogue and digital modulations / E. E. Azzouz, A. K. Nandi // IEE Proc. Commun., 143, October 1996.
3. Kim, K. Digital modulation classification: The BPSK versus QPSK case / K. Kim, A. Polydoros // In Proc. IEEE MILCOM. — 1988. — V. 2. — P. 431–436.
4. Sapiano, P. C. Maximum likelihood PSK classifier / P. C. Sapiano, J. D. Martin // In Proc. IEEE MILCOM. — 1996. — V. 3. — P. 1010–1014.
5. Wei, W. Maximum likelihood classification for digital amplitude-phase modulation / W. Wei, J. M. Mendel // IEEE Trans. Commun. — 2000. — V. 48. — P. 189–193.
6. Swami, A. Hierarchical digital modulation classification using cumulants / A. Swami, B. Sadler // IEEE Trans. Commun. — 2000. — V. 48(3). — P. 416–429.
7. Polydoros, A. On the detection and classification of quadrature digital modulation in broadband noise / A. Polydoros, K. Kim // IEEE Trans. Commun. — 1990. — V. 38. — P. 1199–1211.

8. Hong, L. Classification of BPSK and QPSK signals with unknown signal level using the Bayes technique / L. Hong, K. C. Ho // In Proc. IEEE ISCAS. — 2003. — V. 4. — P. 1–4.
9. Beidasand, B. F. Asynchronous classification of MFSK signals using the higher order correlation domain / B. F. Beidasand, C. L. Weber // IEEE Journal on Sel. Areas in Commun. — 1998. — V. 46. — P. 480–493.
10. Panagiotou, P. Likelihood ratio tests for modulation classification / P. Panagiotou, A. Anastasopoulos, A. Polydoros // In Proc. IEEE MILCOM. — 2000. — V. 2.
11. Dai, W. Joint power and modulation classification using second- and higher statistics / W. Dai, Y. Wang, J. Wang // In Proc. WCNC. — 2002. — V. 1. — P. 155–158.
12. Le Martret, C. Modulation classification by means of different order statistical moments / C. Le Martret, D. M. Boiteau // In Proc. IEEE MILCOM. — 1997. — V. 3. — P. 1387–1391.
13. Hong, L. BPSK and QPSK modulation classification with unknown signal level / L. Hong, K. C. Ho In Proc. IEEE MILCOM. — 2000. — V. 2. — P. 976–980.
14. Hsue, S. Z. Automatic modulation classification using zero crossing / S. Z. Hsue, S. S. Soliman // IEE Radar and Signal Processing. — 1990. — V. 137. — P. 459–464.
15. Yang, Y. An asymptotic optimal algorithm for modulation classification / Y. Yang, C. H. Liu // IEEE Comm. Letters. — 1998. — V. 2. — P. 117–119.
16. Spooner, C. M. On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification / C. M. Spooner // In Proc. ASILOMAR. — 2001. — V. 2. — P. 890–897.
17. Automatic Modulation Classification Based Multiple Cumulants and Quasi-Newton Method for MIMO System / Y. Nie et. al. // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). — 2017. — P. 1–5.
18. Modulation recognition in fading channels using higher order cyclic cumulants / L. Eric, W. Zhiqiang, C. Vasu, S. Wei // 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. — 2007.
19. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах / С. С. Аджемов, Н. В. Кленов, М. В. Терешонок, Д. С. Чиров // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2015. — № 6. — С. 19–27.
20. Алгоритм распознавания вида цифровой модуляции сигнала по форме фазового созвездия с использованием самоорганизующихся карт Кохонена / С. С. Аджемов и др. // Т-Comm–Телекоммуникации и транспорт. — 2011. — С. 4–11.
21. Аджемов, С. С. Распознавание видов цифровой модуляции сигналов в системах когнитивного радио / С. С. Аджемов, Д. С. Чиров, М. В. Терешонок. — М. : Издательство МТУСИ, 2018. — 220 с.

## REFERENCES

1. Azzouz E.E., Nandi A. K. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. Kluwer Academic, 1996.
2. Azzouz E.E., Nandi A.K. Procedure for automatic recognition of analogue and digital modulations. IEE Proc. Commun, 143, October 1996.
3. Kim K. Polydoros A. Digital modulation classification: The BPSK versus QPSK case. In Proc. IEEE MILCOM, volume 2, pages 431–436, October 1988.
4. Sapiano P.C., Martin J.D. Maximum likelihood PSK classifier. In Proc. IEEE MILCOM, volume 3, pages 1010–1014, October 1996.
5. Wei W., Mendel J.M. Maximum likelihood classification for digital amplitude-phase modulation. IEEE Trans. Commun., 48:189–193, February 2000.
6. Swami A., Sadler B. Hierarchical digital modulation classification using cumulants. IEEE Trans. Commun., 48(3):416–429, March 2000.
7. Polydoros A., Kim K. On the detection and classification of quadrature digital modulation in broad-band noise. IEEE Trans. Commun., 38:1199–1211, August 1990.

8. Hong L., Ho K.C. Classification of BPSK and QPSK signals with unknown signal level using the Bayes technique. In Proc. IEEE ISCAS, volume 4, pages 1–4, May 2003.
9. Beidasand B.F., Weber C.L. Asynchronous classification of MFSK signals using the higher order correlation domain. IEEE Journal on Sel. Areas in Commun, 46:480–493, April 1998.
10. Panagiotou P., Anastasopoulos A, Polydoros A. Likelihood ratio tests for modulation classification. In Proc. IEEE MILCOM, volume 2, October 2000.
11. Dai W., Wang Y., Wang J. Joint power and modulation classification using second- and higher statistics. In Proc. WCNC, volume 1, pages 155–158, March 2002.
12. Le Martret C., Boiteau D.M.. Modulation classification by means of different order statistical moments. In Proc. IEEE MILCOM, volume 3, pages 1387–1391, November 1997.
13. Hong L., Ho K.C. BPSK and QPSK modulation classification with unknown signal level. In Proc. IEEE MILCOM, volume 2, pages 976–980, October 2000.
14. Hsue S.Z., Soliman S.S. Automatic modulation classification using zero crossing. IEE Radar and Signal Processing, 137:459–464, December 1990.
15. Yang Y., Liu C.H. An asymptotic optimal algorithm for modulation classification. IEEE Comm. Letters, 2:117–119, May 1998.
16. Spooner C.M. On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification. In Proc. ASILOMAR, volume 2, pages 890–897, November 2001.
17. Nie Y., Shen X., Huang S., Zhang Y., Feng Z. Automatic Modulation Classification Based Multiple Cumulants and Quasi-Newton Method for MIMO System. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017, pp. 1–5.
18. Eric L., Zhiqiang W., Vasu C., Wei S. Modulation recognition in fading channels using higher order cyclic cumulants. 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007.
19. Adzhemov C.C., Clenov N.V., Tereshonok M.V., Chirov D.S. Methods of recognition of types of digital modulation of signals in cognitive radio systems. [Adzhemov C.C., Clenov N.V., Tereshonok M.V., Chirov D.S. Metody raspoznavaniia vidov tcfirovoi' moduliatsii signalov v kognitivny'kh radiosistemakh]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya – Moscow University Physics Bulletin*, 2015, no. 6, pp. 19–27.
20. Adzhemov, S.S., Stogov A.A., Tereshonok M.V., Chirov D.S., Ivankovich M.V. Algorithm for recognition of digital modulation of the signal in the form of a phase constellation using self-organizing Kohonen maps. [Adzhemov S.S., Stogov A.A., Tereshonok M.V., Chirov D.S., Ivankovich M.V. Algoritm raspoznavaniia vida tcfirovoi moduliatsii signala po forme fazovogo sozvezdiia s ispol'zovaniem samoorganizuiushchikhsia kart Kohonena]. *T-Comm–Telekommunikacii i transport – T-Comm–Telecommunications and transport*, 2011, p. 4–11.
21. Adzhemov S.S., Chirov D.S., Tereshonok M.V. Recognition of types of digital signal modulation in cognitive radio systems. [Adzhemov S.S., Chirov D.S., Tereshonok M.V. Raspoznavanie vidov tcfirovoi' moduliatsii signalov v sistemakh kognitivnogo radio]. Moscow: MTUSI, 2018, 220 p.

*Калашников Константин Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры радиофизики Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация*  
E-mail: kalashks@gmail.com  
Тел.: +7(473)220–89–16

*Kalashnikov Konstantin Sergeevich, Candidate of technical sciences, Senior Scientist at the Department of Radio Physics of the Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation*  
E-mail: kalashks@gmail.com  
Tel.: +7(473)220–89–16

*Марчук Пётр Александрович, магистрант кафедры радиофизики Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация*

*E-mail: rain47\_vrn@mail.ru*

*Тел.: +7(473)220-89-16*

*Marchuk Petr Aleksandrovich, Magistant of the Department of radiophysic of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation*

*E-mail: rain47\_vrn@mail.ru*

*Tel.: +7(473)220-89-16*

*Фаульгабер Александр Николаевич, аспирант кафедры электроники и наноэлектроники Национального исследовательского университета "МЭИ", г. Москва, Российская Федерация*

*E-mail: lytalalexandr@mail.ru*

*Тел.: +7(495)362-71-68*

*Faulgaber Alexander Nicolaevich, postgraduate student of the Department of Electronics and Nanoelectronics of the National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation*

*E-mail: lytalalexandr@mail.ru*

*Tel.: +7(495)362-71-68*