

20. Sokolov. V.I. Tsentrifugirovanie [Centrifugation]. Moscow: Khimiya, 1976, 408 p.
21. Panfilova E.V., Grishaev N.A. Otrabotka i issledovanie protsessa polucheniya fotonno-kristallicheskih plenok metodom tsentrifugirovaniya [Development and study of the process of photonic-crystal film depositing by centrifugation], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, No. 4 (112).
22. Klunnikova Yu.V., Bondarchuk D.A. Formirovanie spaya steklovidnogo dielektrika i sapfira dlya elementov mikroelektroniki [Junction formation of glassy dielectric and sapphire for microelectronic elements], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, pp. 67-73.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Малюков Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: spmalyukov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; д.т.н.; профессор; член-корреспондент РАЕН.

Мишнев Виктор Дмитриевич – e-mail: mishnev@sfedu.ru; тел.: +79189529271; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; аспирант.

Malyukov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: spmalyukov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of radio engineering electronics and nanoelectronics; dr. of eng. sc.; professor.

Mishnev Victor Dmitrievich – e-mail: mishnev@sfedu.ru; phone: +79189529271; the department of radio engineering electronics and nanoelectronics; postgraduate student.

УДК. 621.396.66+06

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-119-128

**И.А. Алферова, Д.Д. Габриэлян, Б.Х. Кульбикаян, О.А. Сафарьян,
Л.Н. Стажарова**

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОГО ШУМА В КАНАЛЕ СВЯЗИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БИТОВОЙ ОШИБКИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ КАМ СИГНАЛОВ

Целью статьи является анализ совместного влияния амплитудного белого гауссовского шума (АБГШ), присутствующего в канале связи, и частотного шума (ЧШ), возникающего вследствие флуктуации частоты сигнала в канале связи, на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов. Решаемые задачи исследования: 1. Разработка математической модели обработки КАМ-сигнала с учетом совместного воздействия АБГШ и ЧШ в канале связи. 2. Численное исследование совместного влияния АБГШ и ЧШ на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ сигналов. Предложена математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между отношением сигнал/шум в канале и средним квадратическим отклонением частоты сигнала, с одной стороны, и вероятностью битовой ошибки при демодуляции КАМ-сигнала, с другой. Приведена визуализация эффектов, связанных с наличием АБГШ и ЧШ в канале на сигнальное созвездие принимаемого КАМ-сигнала. Выявлены основные закономерности, связанные с совместным воздействием АБГШ и ЧШ в канале связи, к которым относятся: - появление ЧШ в канале связи приводит к снижению уровня сигнала в канале при корреляционной обработке принимаемого сигнала и соответствующему снижению ОСШ; - снижение ОСШ вызывает дополнительно к размытию сигнального созвездия в азимутальном направлении, связанному с появлением интегральной флуктуации фазы из-за флуктуации частоты в течение импульса, увеличение размытия сигнального созвездия в радиальном направлении. На основе полученных результатов сделан вывод о необходимости более полного учета отклонений параметров сигналов в канале, обусловленных как наличием АБГШ, так и ЧШ.

Амплитудный белый гауссовский шум; флуктуация частоты сигнала; частотный шум; вероятность битовой ошибки.

I.A. Alferova, D.D Gabrielyan, B.H. Kulbikayan, O.A. Safaryan, L.N. Stazharova
INFLUENCE OF FREQUENCY NOISE IN A COMMUNICATION CHANNEL
ON THE PROBABILITY OF A BIT ERROR DURING TRANSMISSION
OF SIGNALS

The purpose of the article is to analyze the combined effect of amplitude white Gaussian noise (AWGN) present in the communication channel and frequency noise (FN) resulting from fluctuations in the frequency of the signal in the communication channel on the probability of bit error when processing QAM signals. Research tasks to be solved: 1. Development of a mathematical model for processing the QAM signal, taking into account the combined effects of AWGN and FN in the communication channel. 2. Numerical study of the combined effect of AWGN and FN on the probability of bit error when processing QAM signals. A mathematical model is proposed that establishes the relationship between the signal-to-noise ratio in the channel and the mean square deviation of the signal frequency, on the one hand, and the probability of bit error during QAM signal demodulation, on the other. The visualization of the effects associated with the presence of AWGN and FN in the channel on the signal constellation of the received QAM signal is given. The main patterns associated with joint action AWGN and FN in the communication channel are: - the appearance of FN in the communication channel leads to a decrease in the signal level in the channel during the correlation processing of the received signal and a corresponding decrease in SNR; - In addition to the blurring of the signal constellation in the azimuthal direction, associated with the appearance of an integral phase fluctuation due to frequency fluctuations during the pulse, an increase in the blurring of the signal constellation in the radial direction causes a decrease in the SNR. Based on the results obtained, it is concluded that it is necessary to take into account more fully the deviations of the signal parameters in the channel due to both the presence of AWGN and FN.

Amplitude white Gaussian noise; signal frequency fluctuation; frequency noise; bit error probability.

Введение. Необходимость обеспечения передачи все большего объема данных в системах связи определяет использование сложных сигналов, позволяющих реализовать данное требование при ограничении на используемую полосу частот. Одним из классов таких сигналов являются сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ). Теория и практика применения таких сигналов рассмотрена в большом числе работ, например, [1–20]. В указанном перечне работ можно выделить публикации, связанные как с применением таких сигналов в области радиосвязи [6–11], так и области радионавигации [12–19].

В частности, рассмотрены вопросы вероятности битовой ошибки при воздействии аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) от отношения сигнал/шум (ОСШ) при различных значениях основания кода КАМ-сигнала. В работах [5–8] анализируется совместное влияние АБГШ и фазового шума (ФШ) на вероятность битовой ошибки при передаче КАМ-сигналов. Однако ФШ при более подробном анализе следует рассматривать как проявление флуктуаций частоты несущей сигнала в канале связи. Описание флуктуаций частоты может рассматриваться как наличие частотного шума (ЧШ).

Необходимо отметить, что анализ ЧШ дает более полное представление о влиянии флуктуаций частоты, несущей на вероятность битовой ошибки при передаче КАМ-сигналов. Это связано с тем, что появление ФШ представляет собой только одно из проявлений флуктуации несущей частоты сигнала. Вторым фактором, влияющим на вероятность битовой ошибки при передаче КАМ-сигналов, является уменьшение уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки, совместное с АБГШ влияние которого было отмечено выше. Однако выполненный в [5–8] анализ учитывает только первый фактор, связанный с влиянием частотного шума на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов. Физическая интерпретация указанного вывода является достаточно простой. В

силу случайного изменения частоты в течение импульса интегральное отклонение фазы сигнала, может быть близко к нулю. Это в соответствии с результатами работы [9] не приводит к увеличению вероятности битовой ошибки. Однако, несмотря на сохранение значения фазы сигнала за длительность импульса, при корреляционной обработке будет наблюдаться уменьшение уровня выходного сигнала. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость перехода при рассмотрении процессов демодуляции КАМ-сигналов от рассмотрения ФШ к рассмотрению ЧШ.

Математическая модель обработки КАМ-сигнала с учетом совместного воздействия АБГШ и ЧШ в канале связи. Обработка КАМ-сигналов в современных устройствах демодуляции проводится путем выделения синфазной и квадратурной составляющих на основе корреляционной обработки принимаемого сигнала с опорными сигналами, фазы которых сдвинуты на $\pi/2$. Будем считать, что флуктуация частоты сигнала $\Delta\omega(t)$, подчиняющаяся нормальному закону распределения с дисперсией σ_ω^2 , обуславливает два фактора, определяющих увеличение вероятности битовой ошибки при демодуляции КАМ-сигналов:

- ◆ искажение сигнального созвездия, связанного с появлением фазового джиттера на выходе устройства корреляционной обработки;
- ◆ уменьшение уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки.

Представим, как предложено в [8] получаемые синфазную и квадратурные составляющие принимаемого сигнала на выходе устройства корреляционной обработки в виде

$$\begin{aligned} v_I &= v_I^{(0)} \cdot \cos \Delta\varphi - v_Q^{(0)} \cdot \sin \Delta\varphi + \zeta_I, \\ v_Q &= v_Q^{(0)} \cdot \cos \Delta\varphi + v_I^{(0)} \cdot \sin \Delta\varphi + \zeta_Q, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta\varphi = \int_0^T \Delta\omega(\tau) d\tau$ – фазовый джиттер, обусловленный флуктуациями частоты сигнала; ζ_I и ζ_Q – аддитивный белый гауссовский шум в синфазном и квадратурном каналах соответственно.

Наличие фазового джиттера приводит, как следует из соотношения (1), к повороту сигнального созвездия на угол $\Delta\varphi$. Это позволяет рассматривать влияние первого фактора, связанного с флуктуацией частоты, в рамках работы [8].

Вторым фактором, как отмечено выше, является уменьшение уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки, что эквивалентно снижению отношения сигнал/шум (ОСШ) в канале связи. Зависимость уменьшения уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} v_I^{(0)} &= V_I^{(0)} \cdot \int_0^T \cos \Delta\omega(\tau) d\tau, \\ v_Q^{(0)} &= V_Q^{(0)} \cdot \int_0^T \cos \Delta\omega(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (2)$$

где $V_I^{(0)}$ и $V_Q^{(0)}$ – соответственно уровни синфазной и квадратурной составляющих сигнала в отсутствии флуктуации частоты; T – длительность импульса для передачи одного информационного символа.

С учетом приведенных в [8] соотношений выражения для вероятности битовой ошибки, учитывающие влияние обоих факторов, связанных с флуктуацией частоты, могут быть записаны в виде

$$P_{M-KAM} = J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2), \quad (3)$$

где γ – отношение мощности несущей сигнала к мощности шума в канале связи.

Выражение для функции $J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2)$ имеет вид

$$J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\omega^2}} \times \int_0^{T+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(A \cdot D(\tau) \cdot \cos \Delta\varphi + B \cdot D(\tau) \cdot \sin \Delta\varphi + C \cdot D(\tau)) \exp\left[-\frac{(\Delta\omega)^2}{2\sigma_\omega^2}\right] d(\Delta\omega) d\tau, \quad (4)$$

где $F(x)$ – интеграл вероятности [9]

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-t^2/2) dt. \quad (5)$$

Обоснование входящих в представление функции $J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2)$ коэффициентов A , B , C и D рассмотрено в работе [8].

В ряде случаев можно считать, что в течение длительности импульса значение $\Delta\omega(t)$ является постоянным. Это позволяет преобразовать выражение (4) к виду

$$J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2) = \frac{T}{\sqrt{2\pi\sigma_\omega^2}} \times \int_{-\infty}^{+\infty} F(A \cdot D(\tau) \cdot \cos \Delta\varphi + B \cdot D(\tau) \cdot \sin \Delta\varphi + C \cdot D(\tau)) \exp\left[-\frac{(\Delta\omega)^2}{2\sigma_\omega^2}\right] d(\Delta\omega), \quad (6)$$

Полученное представление (6) дает возможность выделить влияние обоих факторов, связанных с ЧШ, на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов.

Использование явных выражений для функций $J(A, B, C, D, \sigma_\omega^2)$ в случаях КАМ-сигналов с различным основанием M определяет следующие вероятности битовых ошибок:

- для $M = 2$

$$P_{2-KAM} = J(1, 0, 0, \sqrt{2}\gamma \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2), \quad (7)$$

- для $M = 4$

$$P_{4-KAM} = 0,5 \left[J(1, -1, 0, \gamma \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2) + J(1, 1, 0, \gamma \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2) \right], \quad (8)$$

- для $M = 16$

$$P_{16-KAM} = \frac{1}{16} \sum_m \left\{ J\left(1, m, 0, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(3, m, 0, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(1, -m, 2, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(-1, m, 2, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(3, m, -2, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) + J\left(3, m, 2, \sqrt{\frac{\gamma}{5}} \cdot \cos(\Delta\omega(\tau)), \sigma_\omega^2\right) \right\}, \quad (9)$$

где индекс m принимает значения $-3, -1, 1, 3$.

Приведенные соотношения определяют математическую модель обработки КАМ-сигнала с учетом воздействия АБГШ и ЧШ в канале связи и позволяют, с одной стороны, определить совместное влияние АБГШ и ЧШ, а с другой стороны, определить вклад каждого из факторов, связанных с ЧШ, на вероятность битовой ошибки при демодуляции КАМ-сигнала.

Исследование совместного влияния АБГШ и ЧШ на вероятность битовой ошибки при обработке КАМ-сигналов. С использованием соотношений (6)-(8) проведено численное исследование вероятности битовой ошибки в зависимости от ОСШ и дисперсии частоты в канале связи при использовании КАМ сигналов. При проведении исследований длительность импульса принималась равной $T = 10^{-6}$ с, частота несущей $\omega = 2\pi \cdot 10^{10}$ рад/с.

Результаты исследований соответственно приведены на рис. 1-3. В частности, на рис. 1 приведены графики, характеризующие зависимости вероятности битовой ошибки для 2-КАМ-сигнала:

- ◆ от величины среднеквадратического отклонения (СКО) частоты при различных значениях ОСШ;
- ◆ от ОСШ при различных значениях СКО частоты.

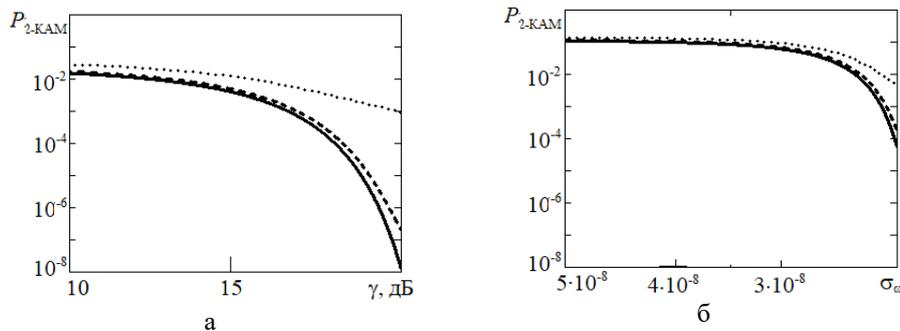


Рис. 1. Вероятность битовой ошибки для сигнала 2-КАМ: а – в зависимости от ОСШ при постоянном значении СКО частоты $\sigma_{\omega} = 10^{-10}$ (сплошная линия), $\sigma_{\omega} = 10^{-8}$ (штриховая линия), $\sigma_{\omega} = 5 \cdot 10^{-8}$ (точечная линия); б – в зависимости от СКО частоты при постоянном значении ОСШ $\gamma = 20$ дБ (сплошная линия), $\gamma = 15$ дБ (штриховая линия), $\gamma = 10$ дБ (точечная линия)

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Появление ЧШ в канале связи может рассматриваться как эквивалентное снижение ОСШ. Сравнение сплошной и точечной кривых показывает, что в отсутствие ЧШ ($\sigma_{\omega} = 10^{-10}$) для значений $\gamma = 30$ дБ значение P_{2-KAM} составляет 10^{-8} , в то время как при наличии ЧШ ($\sigma_{\omega} = 5 \cdot 10^{-8}$) значение P_{2-KAM} повышается до 10^{-3} . Указанное значение P_{2-KAM} соответствует $\gamma = 23$ дБ.

2. Влияние ЧШ на P_{2-KAM} , как следует из рис. 1,а проявляется наиболее сильно при больших значениях γ . Так при малых значениях ОСШ значения вероятности P_{2-KAM} , соответствующие различным значениям σ_{ω} , незначительно отличаются между собой. Однако по мере увеличения ОСШ и соответствующем уменьшении P_{2-KAM} влияние ЧШ возрастает.

3. Как следует из графиков, приведенных на рис. 1,б, при увеличении σ_ω значение P_{2-KAM} стремится к одному значению независимо от ОСШ (левая часть графиков на рис. 1,б). Различие влияния ЧШ на вероятность P_{2-KAM} проявляется только при малых значениях σ_ω (правая часть графика на рис. 1,б).

На рис. 2 приведены аналогичные зависимости для 4-KAM сигналов.

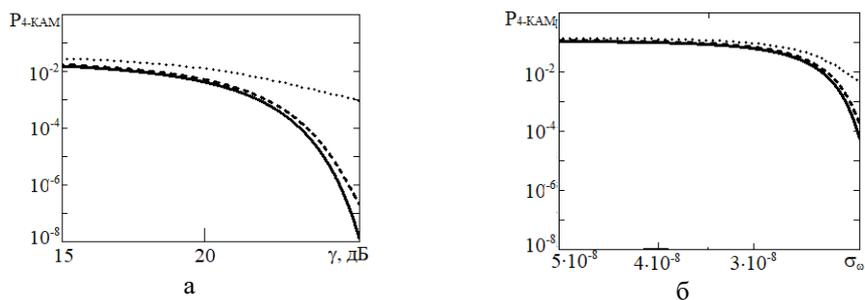


Рис. 2. Вероятность битовой ошибки для сигнала 4-KAM: а – в зависимости от ОСШ при постоянном значении СКО частоты $\sigma_\omega = 10^{-10}$ (сплошная линия), $\sigma_\omega = 10^{-8}$ (штриховая линия), $\sigma_\omega = 5 \cdot 10^{-8}$ (точечная линия); б – в зависимости от СКО частоты при постоянном значении ОСШ $\gamma = 20$ дБ (сплошная линия), $\gamma = 15$ дБ (штриховая линия), $\gamma = 10$ дБ (точечная линия)

Анализ приведенных на рис. 2 результатов подтверждает сделанные выше выводы.

На рис. 3 приведена визуализация эффектов, демонстрирующих изменение созвездия принимаемого 16-KAM сигнала с учетом влияния АБГШ и флуктуации частоты несущей.

Для наглядности при проведении исследований значения СКО, соответствующие АБГШ и ЧШ, принимались равными 0,01, что соответствует ОСШ $\gamma = 20$ дБ.

Приведенные результаты трансформирования сигнальных созвездий допускают простую физическую интерпретацию. В частности, АБГШ приводит к размытию сигнального созвездия в радиальном направлении (рис. 3,б). В свою очередь, появление ЧШ приводит к размытию сигнального созвездия в азимутальном направлении (рис. 3,в).

При совместном воздействии АБГШ и ЧШ в канале связи размытие фазового созвездия происходит уже в обоих направлениях, как показано на рис. 3,г. Кроме того, как следует из приведенных зависимостей, наличие ЧШ приводит к дополнительному размытию сигнального созвездия. Последнее обусловлено как снижением ОСШ в канале связи и соответственно увеличением размытия сигнального созвездия в радиальном направлении, так и увеличением размытия в азимутальном направлении из-за интегральной флуктуации фазы, связанной с флуктуацией частоты в течение импульса.

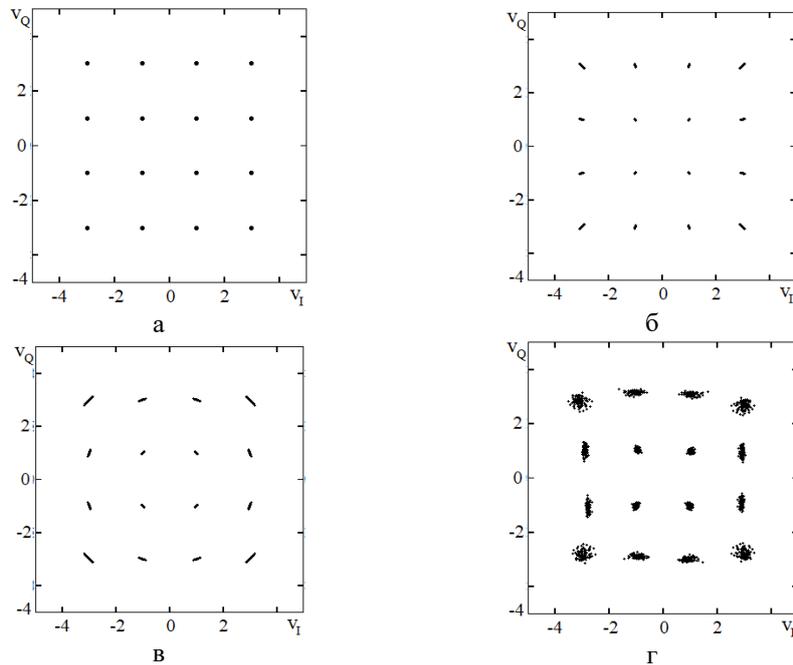


Рис. 3. Сигнальные созвездия 16-QAM сигналов: а – передаваемого сигнала; б – принимаемого сигнала при доминирующем воздействии АБГШ; в – принимаемого сигнала при доминирующем воздействии ЧШ; г – принимаемого сигнала при равных значениях СКО АБГШ и ЧШ

Выводы. Результаты выполненных исследований показывают, что ЧШ в канале связи обуславливает появление двух факторов, влияющих на вероятность битовой ошибки при передаче КАМ-сигналов:

- ◆ появление ЧШ в канале связи приводит к снижению уровня сигнала в канале при корреляционной обработке принимаемого сигнала и соответствующему снижению ОСШ;
- ◆ снижение ОСШ вызывает дополнительно к размытию сигнального созвездия в азимутальном направлении, связанному с появлением интегральной флуктуации фазы из-за флуктуации частоты в течение импульса, увеличение размытия сигнального созвездия в радиальном направлении.

Таким образом, можно отметить, вопросы уменьшения помех в канале связи и повышение стабильности частоты сигнала являются одинаково важными при передаче КАМ сигналов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дятлов А.П., Дятлов П.А., Кульбикаян Б.Х. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами. – М.: Радио и связь, 2004. – 226 с.
2. Дятлов А.П., Кульбикаян Б.Х. Радиомониторинг излучений спутниковых радионавигационных систем: монография. – М.: Радио и связь, 2006. – 270 с.
3. Дятлов А.П., Кульбикаян Б.Х. Корреляционная обработка широкополосных сигналов в автоматизированных комплексах радиомониторинга. – М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 332 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – Изд. дом «Вильямс», 2007. – 1104 с.

5. Габриэлян Д.Д., Кульбикаян Б.Х., Сафарьян О.А. Разработка численно-аналитического метода оценивания параметров случайных процессов // Вестник РГУПС. – 2019. – № 3 (75). – С. 151-157.
6. Hanzo L. Quadrature Amplitude Modulation: Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems. – Wiley-IEEE Press, 2004.
7. Bakulin M.G., Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B., Mironov Yu.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. Modulation for cellular 5G/IMT-2020 and 6G networks // T-Comm. – 2022. – Vol. 16, 3. – P. 11-17.
8. Wang Y.C., Milstein L.B. Rejection of multiple narrow-band interference in both BPSK and QPSK DS spread-spectrum systems // IEEE Trans. Commun. – 1988. – 36. – P. 195-204.
9. Krishnamurthy V., Logothetis A. Adaptive nonlinear filters for narrow-band interference suppression in spread-spectrum CDMA systems // IEEE Trans. Commun. – 1999. – 47. – P. 742-753.
10. Soderstrand M.A., Johnson L.G., Phillips S.R. New technique for attenuation of narrow-band interference with applications in control and communications systems // In Proceedings of the 2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 29 October–1 November 2006. – P. 1027-1031.
11. Borio D., Cano E. Optimal global navigation satellite system pulse blanking in the presence of signal quantization // IET Signal Process. – 2013. – 7. – P. 400-410.
12. Gamba M.T., Falletti E. Performance analysis of FLL schemes to track swept jammers in an adaptive notch filter // In Proceedings of the 2018 9th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands, 5–7 December 2018. – P. 1-8.
13. Gamba M.T., Falletti E. Performance comparison of FLL adaptive notch filters to counter GNSS jamming // In Proceedings of the 2019 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Nuremberg, Germany, 4–6 June 2019. – P. 1-6.
14. Kamath V., Lai Y.-C., Zhu L., Urval S. Empirical mode decomposition and blind source separation methods for anti-jamming with GPS signals // In Proceedings of the 2006 IEEE/ION Position Location, and Navigation Symposium, Coronado, CA, USA, 25–27 April 2006. – P. 335-341.
15. Fante R.L., Vaccaro J.J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2000. – 36. – P. 549-564.
16. Myrick W.L., Goldstein J.S., Zoltowski M.D. Low complexity anti-jam space-time processing for GPS // In Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221), Salt Lake City, UT, USA, 7–11 May 2001. – P. 2233-2236.
17. Musumeci L., Dosis F. Use of the wavelet transform for interference detection and mitigation in global navigation satellite systems // Int. J. Navig. Obs. – 2014. – P. 1-14.
18. Musumeci L., Dosis F. Performance assessment of wavelet based techniques in mitigating narrow-band interference // In Proceedings of the 2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Turin, Italy, 25–27 June 2013. – P. 1-6.
19. Daniele B., Pau C. Complex signum non-linearity for robust GNSS interference mitigation // IET Radar Sonar Navig. – 2018. – 12. – P. 900-909.
20. Prasad R., van Nee R. OFDM Wireless Multimedia Communications. – L: Artech House, 2000. – 275 p.
21. Прокис Дж. Цифровая связь: пер с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
22. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-КАМ системах передачи данных // Вест. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 2. – С. 81-87.

REFERENCES

1. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Kul'bikayan B.Kh. Radioelektronnaya bor'ba so sputnikovymi radionavigatsionnymi sistemami [Electronic warfare with satellite radio navigation systems]. Moscow: Radio i svyaz', 2004, 226 p.
2. Dyatlov A.P., Kul'bikayan B.Kh. Radiomonitoring izlucheniyy sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem: monografiya [Radio monitoring of emissions from satellite radio navigation systems: monograph]. Moscow: Radio i svyaz', 2006, 270 p.

3. Dyatlov A.P., Kul'bikayan B.Kh. Korrelyatsionnaya obrabotka shirokopolosnykh signalov v avtomatizirovannykh kompleksakh radiomonitoringa [Correlation processing of broadband signals in automated radio monitoring complexes]. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom, 2013, 332 p.
4. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. Izd. dom «Vil'yams», 2007, 1104 p.
5. Gabriel'yan D.D., Kul'bikayan B.Kh., Safar'yan O.A. Razrabotka chislenno-analiticheskogo metoda otsenivaniya parametrov sluchaynykh protsessov [Development of a numerical-analytical method for estimating the parameters of random processes], *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS], 2019, No. 3 (75), pp. 151-157.
6. Hanzo L. Quadrature Amplitude Modulation: Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems. Wiley-IEEE Press, 2004.
7. Bakulin M.G., Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B., Mironov Yu.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. Modulation for cellular 5G/IMT-2020 and 6G networks, *T-Comm.*, 2022, Vol. 16, 3, pp. 11-17.
8. Wang Y.C., Milstein L.B. Rejection of multiple narrow-band interference in both BPSK and QPSK DS spread-spectrum systems, *IEEE Trans. Commun.*, 1988, 36, pp. 195-204.
9. Krishnamurthy V., Logothetis A. Adaptive nonlinear filters for narrow-band interference suppression in spread-spectrum CDMA systems, *IEEE Trans. Commun.*, 1999, 47, pp. 742-753.
10. Soderstrand M.A., Johnson L.G., Phillips S.R. New technique for attenuation of narrow-band interference with applications in control and communications systems, *In Proceedings of the 2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 29 October–1 November 2006*, pp. 1027-1031.
11. Borio D., Cano E. Optimal global navigation satellite system pulse blanking in the presence of signal quantization, *IET Signal Process.*, 2013, 7, pp. 400-410.
12. Gamba M.T., Falletti E. Performance analysis of FLL schemes to track swept jammers in an adaptive notch filter, *In Proceedings of the 2018 9th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands, 5–7 December 2018*, pp. 1-8.
13. Gamba M.T., Falletti E. Performance comparison of FLL adaptive notch filters to counter GNSS jamming, *In Proceedings of the 2019 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Nuremberg, Germany, 4–6 June 2019*, pp. 1-6.
14. Kamath V., Lai Y.-C., Zhu L., Urval S. Empirical mode decomposition and blind source separation methods for antijamming with GPS signals, *In Proceedings of the 2006 IEEE/ION Position Location, And Navigation Symposium, Coronado, CA, USA, 25–27 April 2006*, pp. 335-341.
15. Fante R.L., Vaccaro J.J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2000, 36, pp. 549-564.
16. Myrick W.L., Goldstein J.S., Zoltowski M.D. Low complexity anti-jam space-time processing for GPS, *In Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221), Salt Lake City, UT, USA, 7–11 May 2001*, pp. 2233-2236.
17. Musumeci L., Dosis F. Use of the wavelet transform for interference detection and mitigation in global navigation satellite systems, *Int. J. Navig. Obs.*, 2014, pp. 1-14.
18. Musumeci L., Dosis F. Performance assessment of wavelet based techniques in mitigating narrow-band interference, *In Proceedings of the 2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Turin, Italy, 25–27 June 2013*, pp. 1-6.
19. Daniele B., Pau C. Complex signum non-linearity for robust GNSS interference mitigation, *IET Radar Sonar Navig.*, 2018, 12, pp. 900-909.
20. Prasad R., van Nee R. OFDM Wireless Multime-dia Communications. L: Artech House, 2000, 275 p.
21. Prokis Dzh. Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]: transl. from engl., ed. by D.D. Klovsogo. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p.
22. Artemenko A.A., Mal'tsev A.A., Rubtsov A.E. Vliyanie netochnosti otsenivaniya fazy nesushchey na veroyatnost' bitovykh oshibok v M-KAM sistemakh peredachi dannykh [Effect of Carrier Phase Estimation Inaccuracy on Bit Error Probability in M-QAM Data Communication Systems], *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky], 2007, No. 2, pp. 81-87.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.М. Бородянский.

Алферова Ирина Александровна – Донской государственный технический университет; e-mail: ia.alferova.donstu@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра кибербезопасности информационных систем; ст. преподаватель.

Сафарьян Ольга Александровна – e-mail: safari_2006@mail.ru; кафедра кибербезопасности информационных систем; к.т.н.; доцент.

Габриэлян Дмитрий Давидович – Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи; e-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиоэлектроники; д.т.н.; профессор.

Кульбикаян Баграт Хачересович – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: bagrat@rgups.ru; Ростов-на-Дону, Россия; кафедра связи на железнодорожном транспорте; к.ф.-м.н.; доцент.

Стажарова Любовь Николаевна – e-mail: sln.67@mail.ru; кафедра автоматике и телемеханики на железнодорожном транспорте; к.ф.-м.н.; доцент.

Alferova Irina Alexandrovna – Don State Technical University; e-mail: ia.alferova.donstu@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of cybersecurity of information systems; senior lecturer.

Safaryan Olga Alexandrovna – e-mail: safari_2006@mail.ru; the department of cybersecurity of information systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Gabrielyan Dmitry Davidovich – Rostov Scientific Institute of Radio Communication; e-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio electronics; dr. of eng. sc.; professor.

Kulbikayan Bagrat Hacheresoviche – Rostov State Transport University; e-mail: bagrat@rgups.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of communication on railway transport; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Stazharova Lyubov Nikolaevna – e-mail: sln.67@mail.ru; the department of communication on railway transport; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 621.382.3

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-128-137

П.Г. Грицаенко**ИНЖЕКЦИОННО-ПОЛЕВАЯ СТРУКТУРА, ВЫПОЛНЕННАЯ ДВОЙНОЙ ДИФфуЗИЕЙ ПРИМЕСЕЙ**

В 80-е годы прошлого столетия в качестве элементной базы широко применялась интегральная инжекционная логика (И²Л). Несколько позднее в развитие И²Л для построения СБИС появилась инжекционно-полевая логика (ИПЛ). Оба элементных базиса близки по степени интеграции на кристалле. Увеличения степени интеграции в СБИС можно достигнуть с использованием самосовмещения областей, при котором введение примесей разного типа осуществляется с использованием одной границы маскирующего материала. В данной работе этот принцип используется для создания вертикального канала ключевого полевого транзистора ИПЛ-логики. В эпитаксиальной пленке р-типа, нанесенной на подложку n⁺-типа, последовательно создаются сначала область n-типа с глубиной большей толщины эпитаксиальной пленки, а затем в то же окно выполняется диффузия примеси с созданием области р-типа. Промежуток между этими областями n-типа является каналом формируемого полевого транзистора. Далее создается мелкая область n⁺-типа, перекрывающая канал, которая является областью стока ключевого полевого транзистора с вертикальным каналом, диффузионная область р-типа является затвором, а однородно легированная область эпитаксиальной пленки выполняет функцию инжектора. Разветвление по выходу в данной