

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 621.396.41:621.375.026:621.376.4

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-1-6-16>

## Применение модуляции с малым пик-фактором в системах радиосвязи

В. В. Евстратько, В. В. Сухотин<sup>✉</sup>, Т. А. Зубов,  
А. В. Мишуров, А. И. Коноваленко

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

✉ [vsuhotin@sfu-kras.ru](mailto:vsuhotin@sfu-kras.ru)

### Аннотация

**Введение.** Системы радиосвязи для малых околоземных объектов имеют ряд особенностей, которые обусловлены спецификой их применения. Они должны отвечать ряду противоречивых требований. С одной стороны, они должны обеспечивать высокую скорость передачи данных (до 20 Мбит/с), с другой – обеспечивать функционирование на большие расстояния до 150 км и более, обладая при этом малыми габаритами и энергопотреблением (как правило, не более 5...20 Вт). Основная часть энергии, потребляемой бортовой системой радиосвязи малых околоземных объектов, приходится на усилитель мощности, поэтому в таких системах связи целесообразно использовать модуляцию с наименьшим значением пик-фактора.

**Цель работы.** Исследовать влияние параметров и режимов работы усилителя на основные параметры системы радиосвязи: выходную мощность, коэффициент полезного действия (КПД), внеполосное излучение передатчика и чувствительность приемника для сигналов с разными видами модуляции и разным значением пик-фактора.

**Материалы и методы.** Испытательный стенд состоял из генераторов псевдослучайной последовательности и несущей, передатчиков QPSK, OQPSK и SR-FQPSK, усилителя, приемников QPSK, OQPSK и SR-FQPSK, аттенюаторов, анализатора спектра, измерителя мощности и измерителя ошибок. Измерение параметров проводилось с использованием методов, заложенных в приборах.

**Результаты.** Исследования показали, что при работе усилителя в нелинейном режиме в области компрессии возрастает КПД и выходная мощность. Мощность внеполосного излучения максимальна для сигнала с модуляцией QPSK. Чем ближе к области компрессии работает усилитель и чем больше пик-фактор сигнала, тем ниже чувствительность приемника.

**Заключение.** Применение модуляции с малым пик-фактором (в данном случае SR-FQPSK) позволяет получить максимальную выходную мощность усилителя, максимальный КПД и минимальный уровень внеполосного излучения, что повышает энергетическую эффективность системы радиосвязи, увеличивает дальность связи и позволяет в полной мере использовать частотное разделение каналов.

**Ключевые слова:** пик-фактор, модуляция сигнала, система радиосвязи, QPSK, усилитель мощности, энергопотребление

**Для цитирования:** Применение модуляции с малым пик-фактором в системах радиосвязи / В. В. Евстратько, В. В. Сухотин, Т. А. Зубов, А. В. Мишуров, А. И. Коноваленко // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 1. С. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-6-16

---

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Статья поступила в редакцию 16.10.2024; принята к публикации после рецензирования 17.12.2024; опубликована онлайн 28.02.2025

---



## Application of Low Crest Factor Modulation in Radio Communication Systems

Vladislav V. Evstratko, Vitaly V. Sukhotin✉, Timur A. Zubov,  
Andrey V. Mishurov, Artem I. Konovalenko

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

✉ vsuhotin@sfu-kras.ru

### Abstract

**Introduction.** Radio communication systems for small Earth-orbiting objects possess a number of specific features associated with their application area, thus being expected to meet conflicting requirements. These include, on the one hand, provision of a high data transfer rate (up to 20 Mbps) and, on the other, operation at large distances of up to 150 km or more, while having small dimensions and power consumption (usually no more than 5...20 W). The main share of energy required by onboard radio communication systems of small Earth-orbiting objects is consumed by the power amplifier. Therefore, such communication systems should use modulation with the lowest possible crest factor.

**Aim.** To investigate the effect of the parameters and operating modes of the amplifier on those of the radio communication system, such as its output power, efficiency, out-of-band transmitter radiation, and receiver sensitivity for signals with different types of modulation and different crest factor values.

**Materials and methods.** The laboratory bench consisted of pseudo-random sequence and carrier generators; QPSK, OQPSK, and SR-FQPSK transmitters; amplifier; QPSK, OQPSK, and SR-FQPSK receivers; attenuators; spectrum analyzer; power meter; and error meter. The parameters were measured using the methods embedded in the devices: spectrum analyzer, power meter, and error meter.

**Results.** The conducted experiments showed that operation of the amplifier in a nonlinear mode leads to an increase in the efficiency and output power in the field of compression. The out-of-band power is maximum for a QPSK modulated signal. The closer to the compression region the amplifier works and the larger the crest factor of the signal, the lower the sensitivity of the receiver.

**Conclusion.** The use of a low crest factor modulation (SR-FQPSK in the case of this study) ensures the maximum output power of the amplifier, the maximum efficiency, and the minimum level of out-of-band radiation. This increases the energy efficiency of radio communication systems and extends the communication range, thus allowing a more efficient use of frequency separation channels.

**Keywords:** crest factor, signal modulation, radio system, QPSK, power amplifier, power consumption

**For citation:** Evstratko V. V., Sukhotin V. V., Zubov T. A., Mishurov A. V., Konovalenko A. I. Application of Low Crest Factor Modulation in Radio Communication Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 1, pp. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-6-16

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Source of funding.** The researches was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education of the Siberian Federal University (number FSRZ-2023-0008).

Submitted 16.10.2024; accepted 17.12.2024; published online 28.02.2025

**Введение.** Системы радиосвязи для малых околоземных объектов (МОО) имеют ряд особенностей, которые обусловлены спецификой их применения. Под термином "малые" [1] понимают МОО с массой от 2 до 25 кг, чаще всего оснащенные электрической силовой установкой. Продолжительность полета МОО варьируется от нескольких часов до суток, высота полета, как правило, не превышает 3000 м. Системы радиосвязи для МОО должны отвечать ряду противо-

речивых требований. С одной стороны, они должны обеспечивать высокую скорость передачи данных (до 20 Мбит/с), с другой – обеспечивать функционирование на большие расстояния до 150 км и более, обладая при этом малыми габаритами и энергопотреблением (как правило, не более 5...20 Вт). Основная часть энергии, потребляемой бортовой системой радиосвязи МОО, приходится на усилитель мощности [2, 3], поэтому в таких системах связи целесообразно ис-

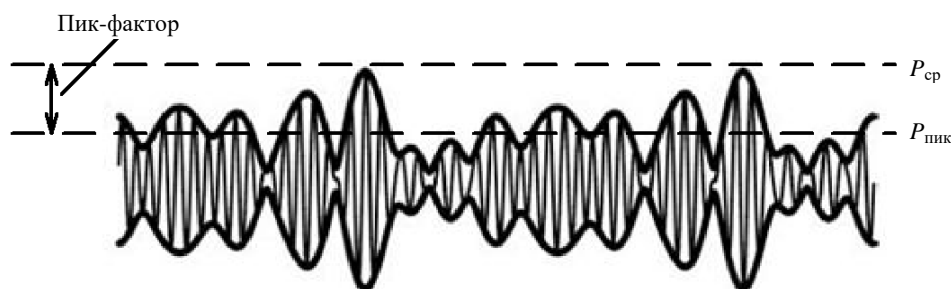


Рис. 1. Пик-фактор модулированного сигнала

Fig. 1. Crest factor of modulated signal

пользовать модуляцию с наименьшим значением пик-фактора [4]. Это позволит получить максимальный коэффициент полезного действия (КПД) усилителя мощности при работе в области компрессии (насыщения) [5–7].

Пик-фактор модуляции (Crest Factor, PAPR) – это величина, характеризующая отношение пикового значения модулированного сигнала к его эффективному значению (рис. 1) [8].

Децибелная точка компрессии ( $P_{1\text{дБ}}$ ) в усилителе мощности – это точка на кривой зависимости выходной мощности от входной, в которой выходной сигнал начинает увеличиваться не пропорционально входному сигналу (рис. 2) [8].

Для применения нескольких МОО в одной местности [9] либо для обеспечения двусторонней дуплексной связи необходимо разделять несколько сигналов от разных МОО. Один из самых распространенных способов разделения нескольких каналов радиосвязи с МОО – частотное разделение (FDMA) [10]. С учетом загруженности большинства частотных диапазонов встает вопрос об эффективном использовании частот-

ного ресурса, т. е. сужении полосы сигнала при сохранении пропускной способности канала. Однако при усилении модулированного сигнала нелинейным усилителем происходит расширение полосы занимаемых сигналом частот [11]. Чем ближе к области компрессии работает усилитель и чем больше пик-фактор сигнала, тем большую полосу частот будет занимать усиленный сигнал. На рис. 3 показаны спектры сигнала с модуляцией QPSK до и после нелинейного усилителя мощности. На спектрах видно, что ширина спектра сигнала на выходе нелинейного усилителя увеличилась с 8 до 20 МГц по уровню –40 дБмВт. Применение фильтра на выходе усилителя, который ограничивает сигнал за пределами полезной полосы, позволило бы частично решить проблему внеполосного излучения, но такой фильтр будет неизбежно ухудшать характеристики системы: появятся потери в выходном сигнале, увеличатся габариты и масса передатчика, станет невозможна оперативная перестройка рабочей частоты передатчика.

В значительной степени нелинейные искажения сигнала влияют на качество приема. Чем

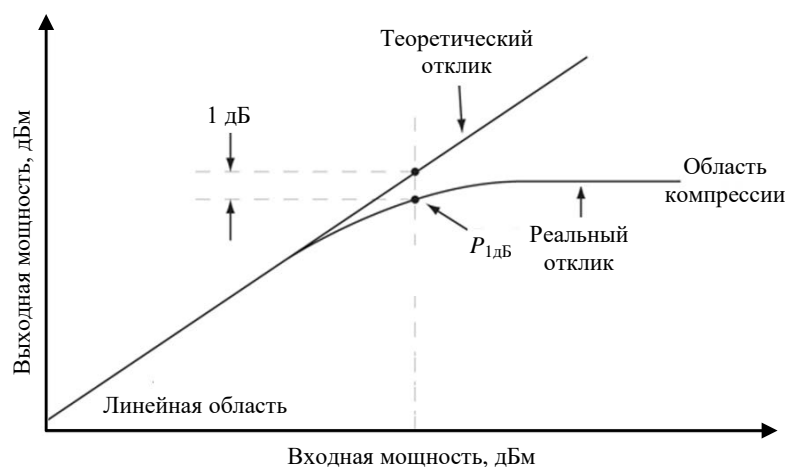


Рис. 2. Точка компрессии усилителя мощности

Fig. 2. Power amplifier compression point

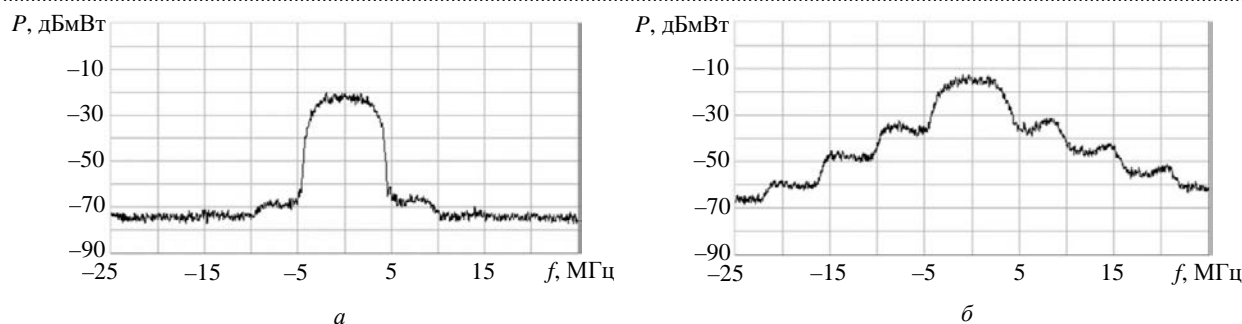


Рис. 3. Спектр сигнала с модуляцией QPSK: *a* – до нелинейного усилителя; *б* – после нелинейного усилителя

Fig. 3. Spectrum of signal with QPSK modulation: *a* – before nonlinear amplifier; *б* – after nonlinear amplifier

ближе к области компрессии работает усилитель и чем больше пик-фактор сигнала, тем хуже будет качество приема сигнала. При искажении сигнала снижается чувствительность приемника, уменьшается бюджет радиолинии. Снижение качества приема обусловлено межсимвольной интерференцией, возникающей в результате искажения модулированного сигнала [12].

В статье рассматривается связь с МОО только в пределах прямой видимости и при работе на направленную антенну, поэтому многолучевое распространение сигнала не учитывается.

**Типы исследуемых сигналов.** В данной статье рассмотрено влияние усилителя, работающего в области компрессии, на основные параметры системы радиосвязи: выходную мощность, КПД, внеполосное излучение передатчика и чувствительность приемника для сигналов с разным пик-фактором. В качестве тестовых использованы сигналы QPSK [13] (четырехпозиционная фазовая манипуляция), OQPSK [13] (четырехпозиционная фазовая манипуляция со сдвигом квадратур), SR-FQPSK [14] (четырехпозиционная фазовая манипуляция со сдвигом квадратур и жестким ограничением сигнала)

Табл. 1. Значения пик-фактора для исследуемых типов модуляции

Tab. 1. Crest factor values for the modulation types under study

Коэффициент скругления	Пик-фактор, дБ	
	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$
QPSK	5	4
OQPSK	3	3
SR-FQPSK	1	0.5

с коэффициентами скругления  $\alpha = 1$  и  $0.5$ . В табл. 1 приведены значения пик-фактора для исследуемых типов модуляции. Наименьшее значение пик-фактора обеспечивает модуляция SR-FQPSK с коэффициентом скругления  $\alpha = 1$ , наибольшее – модуляция QPSK с  $\alpha = 0.5$ . Типы модуляции OQPSK, SR-FQPSK были выбраны с учетом сохранения рабочего отношения сигнал-шум для заданной вероятности ошибки не хуже, чем для модуляции QPSK.

**Описание стенда.** На рис. 4 представлена схема лабораторного стенда. Формирующая сигнал часть схемы состоит из передатчиков сигнала QPSK, OQPSK, SR-FQPSK, генератора несущей. При помощи переключателя S1 производится выбор подаваемого на усилитель сигнала.

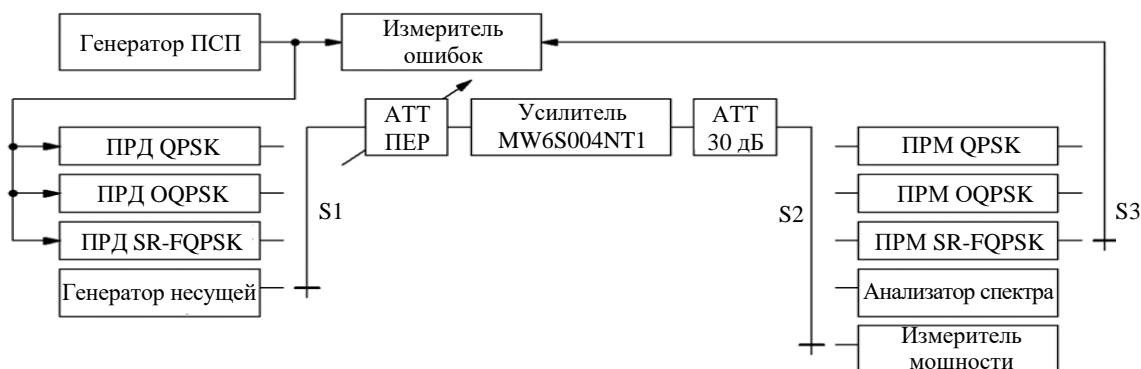


Рис. 4. Схема лабораторного стенда

Fig. 4. Laboratory bench diagram

Табл. 2. Основные характеристики усилителя на транзисторе MW6S004NT1

Tab. 2. Main characteristics of the amplifier on the MW6S004NT1 transistor

Выходная мощность в режиме несущего колебания, дБмВт	39
Точка компрессии $P_{1дБ}$ , дБмВт	36
Коэффициент усиления в линейном режиме, дБ	16
Напряжение питания, В	28
Ток стока в покое, мА	50
КПД, %	32
Диапазон рабочих частот, МГц	1100...1300

Исследуемый усилитель выполнен на полевом транзисторе типа MW6S004NT1 [7]. Основные характеристики усилителя при работе в режиме несущего колебания приведены в табл. 2. Режим работы усилителя задается переменным аттенуатором (АТТ ПЕР). С выхода усилителя при помощи переключателя S2 сигнал можно подать на входы приемников с соответствующим типом модуляции, на анализатор спектра или измеритель мощности. Вероятность битовой ошибки анализируется при помощи генератора данных псевдослучайной последовательности (ПСП) и измерителя битовых ошибок.

**Характеристики усилителя мощности при работе на несущей частоте, КПД усилителя.** На рис. 5 приведена измеренная зависимость КПД усилителя от выходной мощности в режиме несущего колебания и зависимость выходной мощности усилителя от входной.

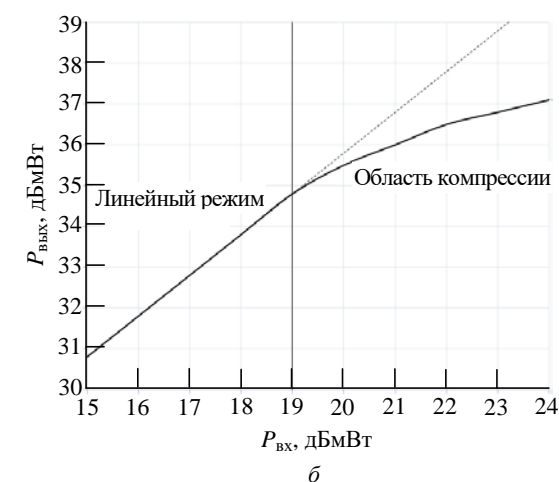
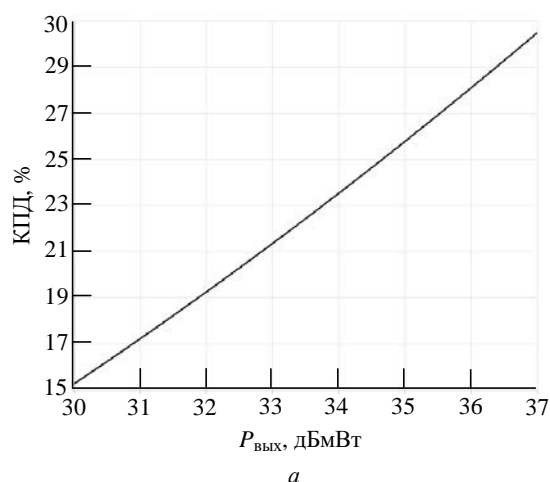


Рис. 5. Зависимость КПД усилителя от выходной мощности в режиме несущего колебания (а); зависимость выходной мощности усилителя от входной (б)

Fig. 5. Dependence of amplifier efficiency on output power in carrier oscillation mode (a); dependence of amplifier output power on input power (b)

Из полученных зависимостей видно, что чем глубже в области компрессии работает усилитель, тем больший КПД он обеспечивает. В линейном режиме работы, ниже выходной мощности 34 дБмВт усилитель обеспечивает КПД не более 24 %. При работе в нелинейном режиме, в области компрессии, КПД усилителя возрастает до 31 %, выходная мощность увеличивается до 37 дБмВт. В соответствии с документацией производителя КПД усилителя может достигать значения 33 %, однако в этом случае транзистор работает с перегрузкой, что снижает надежность и ресурс усилителя [15]. Поэтому для дальнейшей работы с модулированными сигналами в области компрессии будет использована рабочая точка усилителя  $P_{\text{вх}} = 24$  дБмВт,  $P_{\text{вых}} = 37$  дБмВт.

**Спектральные характеристики, внеполосное излучение.** На рис. 6 показаны спектры выходного сигнала усилителя при работе в области компрессии для модуляции сигнала QPSK, OQPSK и SR-FQPSK при коэффициенте скругления  $\alpha = 0.5$  и символьной скорости 6 Мсимв/с.

На рис. 7 показаны те же спектры для тех же видов модуляции сигнала при коэффициенте скругления  $\alpha = 1$  и символьной скорости 6 Мсимв/с.

В табл. 3 приведены значения ширины спектра, измеренной по уровню  $-60$  дБмВт, и значения уровня внеполосного излучения для сигнала на выходе усилителя мощности, работающего в области компрессии.

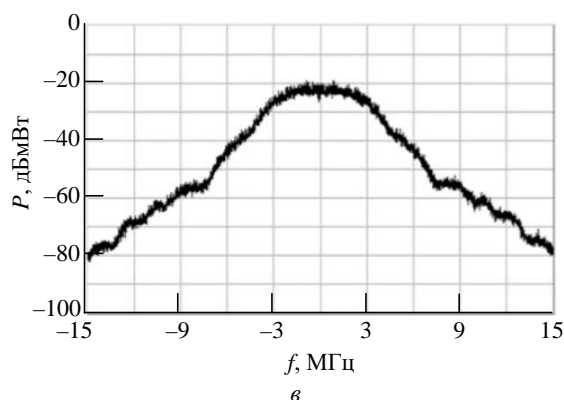
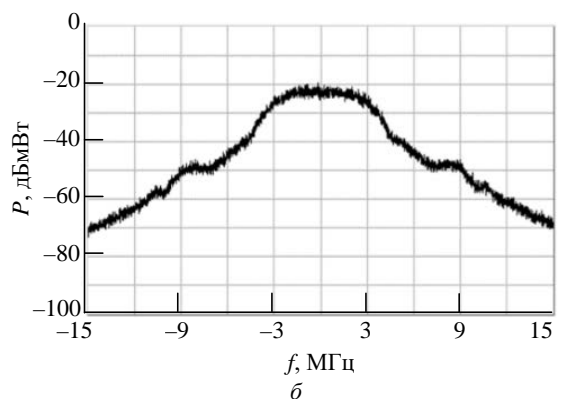
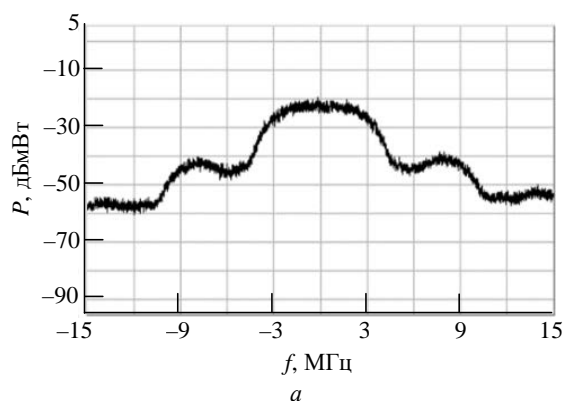


Рис. 6. Спектры выходного сигнала усилителя при работе в области компрессии для модуляции сигнала ( $\alpha = 0.5$ ):  
а – QPSK; б – OQPSK; в – SR-FQPSK

Fig. 6. Spectra of amplifier output signal at operation in compression area for signal modulation ( $\alpha = 0.5$ ):  
а – QPSK; б – OQPSK; в – SR-FQPSK

Табл. 3. Значения ширины спектра и уровня внеполосного излучения

Tab. 3. Spectrum width and out-of-band radiation level values

Модуляция	$\Delta f$ , МГц ( $-60$ дБмВт)		$P_{\text{внп}}$ , дБмВт	
	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$
QPSK	32	36	5	8
OQPSK	22	24	-3	-1
SR-FQPSK	20	23	-7	-9

Спектральные измерения показывают, что при работе усилителя мощности в области компрессии наибольшую полосу частот занимают сигналы с

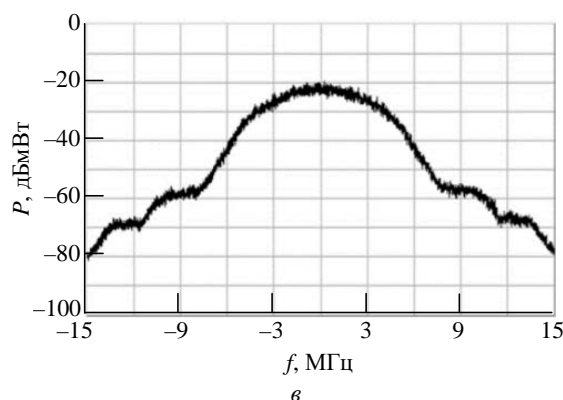
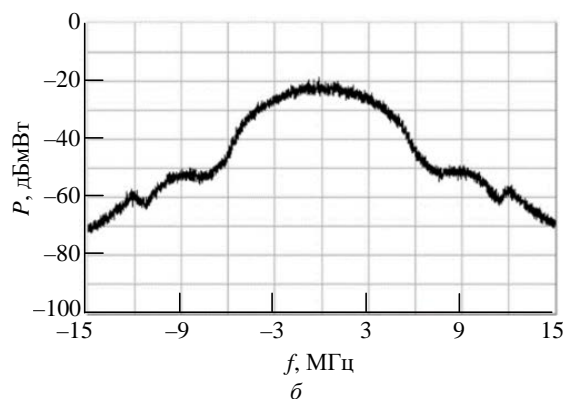
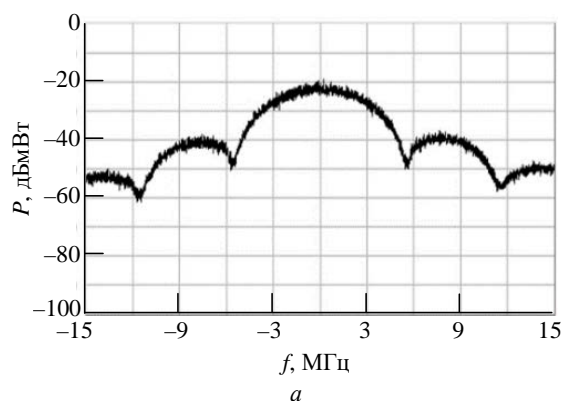


Рис. 7. Спектры выходного сигнала усилителя при работе в области компрессии для модуляции сигнала ( $\alpha = 1$ ):  
а – QPSK; б – OQPSK; в – SR-FQPSK

Fig. 7. Spectra of amplifier output signal at operation in compression area for ( $\alpha = 1$ ): а – QPSK; б – OQPSK; в – SR-FQPSK

большим пик-фактором. Так, полоса частот для сигнала с модуляцией QPSK в 1.46 раз больше, чем для сигнала с OQPSK, и в 1.6 раз больше, чем для SR-FQPSK. Например, при использовании для передачи видео с МОО диапазона 2400...2485 МГц в разрешенный диапазон частот поместится 2 канала с модуляцией QPSK и 4 канала с модуляцией SR-FQPSK. В сравнении с шириной спектра мощность внеполосного излучения является более информативным параметром, будучи интегральной характеристикой в определенной полосе частот (рис. 8).



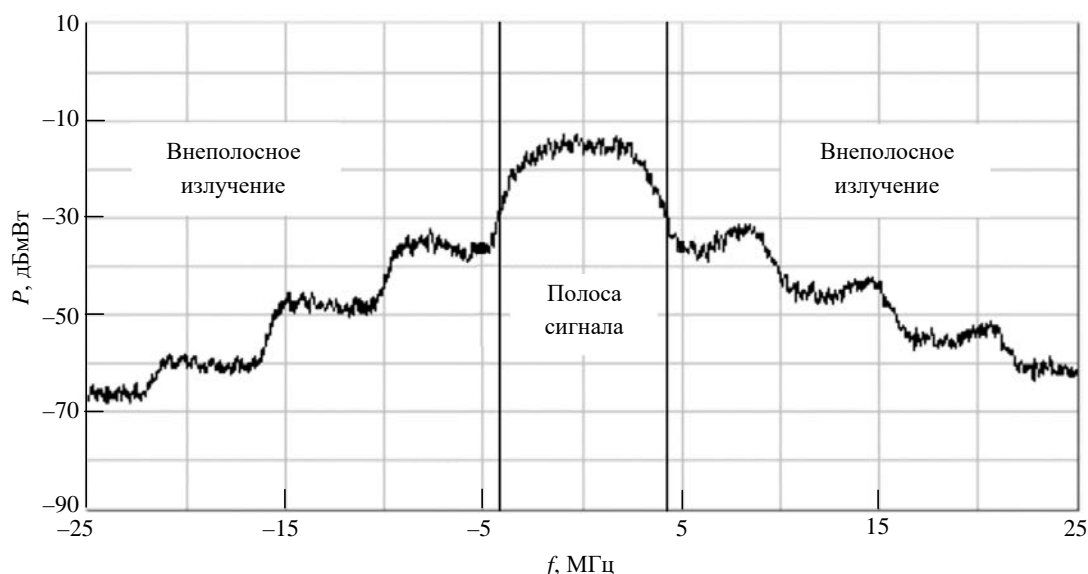


Рис. 8. Измерение мощности внеполосного излучения

Fig. 8. Measurement of out-of-band radiation power

Измерения показывают, что при работе усилителя мощности в области компрессии для сигнала с модуляцией QPSK мощность внеполосного излучения на 8 дБ больше, чем для сигнала с OQPSK, и на 12 дБ больше, чем для SR-FQPSK при  $\alpha = 0.5$ ; на 9 дБ больше, чем для сигнала с OQPSK, и на 17 дБ больше, чем для SR-FQPSK при  $\alpha = 1$ . При частотном разделении каналов, например в системе радиосвязи с МОО, внеполосное излучение соседнего частотного канала будет помехой для рабочего частотного канала. Так, при уменьшении уровня внеполосного излучения в соседнем канале увеличивается рабочее отношение сигнал-помеха в рабочем частотном

канале. Например, уменьшение мощности внеполосного излучения на 12 дБ приведет к соответствующему увеличению отношения сигнал-помеха, что в свою очередь повысит бюджет радиолинии на 12 дБ. Увеличение бюджета радиолинии на 12 дБ обеспечит четырехкратное увеличение дальности действия системы радиосвязи с МОО [16] (в пределах прямой видимости и при работе на направленную антенну можно считать, что сигнал распространяется так же, как и в свободном пространстве. Погрешность затухания сигнала в воздушной среде не учитывается).

На рис. 9 показана зависимость уровня внеполосного излучения от выходной мощности усилителя.

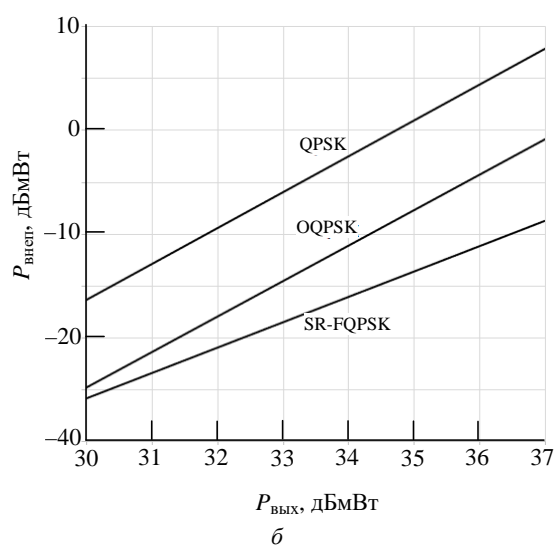
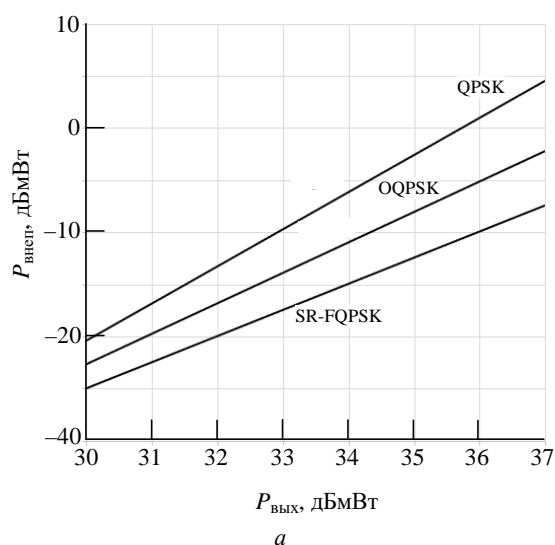


Рис. 9. Зависимость уровня внеполосного излучения от выходной мощности усилителя: а –  $\alpha = 0.5$ ; б –  $\alpha = 1$

Fig. 9. Dependence of out-of-band radiation level on amplifier output power: а –  $\alpha = 0.5$ ; б –  $\alpha = 1$

теля, работающего в области компрессии для модуляции сигнала QPSK, OQPSK, SR-FQPSK с коэффициентами скругления  $\alpha = 0.5$  и 1. Измерение мощности внеполосного излучения производилось в полосе частот 20 МГц, при отстройке 15 МГц от центральной частоты сигнала.

Из графиков видно, что чем больше выходная мощность усилителя, чем глубже он работает в области компрессии, тем больше расстояние между кривыми мощности внеполосного излучения для разных типов сигналов с разным значением пик-фактора. Из этого следует, что при использовании модуляции с малым пик-фактором максимальную эффективность работы усилителя мощности можно получить в условиях максимального насыщения. Также на уровень внеполосного излучения влияет и коэффициент скругления  $\alpha$ . Наиболее выражено влияние  $\alpha$  на сигнал с модуляцией OQPSK, при увеличении  $\alpha$  растет и уровень внеполосного излучения, однако при снижении пик-фактора сигнала (кривые SR-FQPSK на рис. 9) уменьшается и влияние коэффициента скругления  $\alpha$ .

**Чувствительность приемника.** На рис. 10 приведены зависимости чувствительности приемника от выходной мощности усилителя для сигналов с модуляцией QPSK, OQPSK, SR-FQPSK при  $\alpha = 1$ . Под чувствительностью понимается такой уровень сигнала на входе приемника, при котором вероятность битовой ошибки данных равна  $10^{-3}$ .

Из графиков видно, что чем ближе к области компрессии работает усилитель и чем

больше пик-фактор сигнала, тем ниже чувствительность приемника. Снижение чувствительности обусловлено межсимвольной интерференцией, возникающей в результате нелинейных искажений модулированного сигнала. Наибольшие искажения претерпевают сигналы с большим пик-фактором, и, как следствие, для них наблюдается наибольшее снижение чувствительности приемника. При увеличении мощности усилителя на 7 дБ для модуляции QPSK чувствительность приемника снижается на 8 дБ, для модуляции OQPSK – на 4 дБ, для модуляции SR-FQPSK – на 1 дБ. Так, при повышении чувствительности приемника на 7 дБ (при переходе от модуляции QPSK к SR-FQPSK) увеличивается на 7 дБ и бюджет радиолинии.

**Закключение и выводы.** Для эффективного применения радиосвязи с МОО наиболее критичным показателем являются их массогабаритные показатели и энергетическая эффективность. Эти требования распространяются и на применяемые в МОО системы радиосвязи. Как показано в статье, один из наиболее доступных способов повышения энергетической эффективности системы радиосвязи – применение сигналов с малым пик-фактором, например сигналов с модуляцией OQPSK, SR-FQPSK. Так, применение модуляции OQPSK позволяет получить большую на 4 дБ чувствительность приемника в сравнении с модуляцией QPSK и большую на 7 дБ – для случая использования модуляции SR-FQPSK при работе усилителя в точке насыщения (выходная

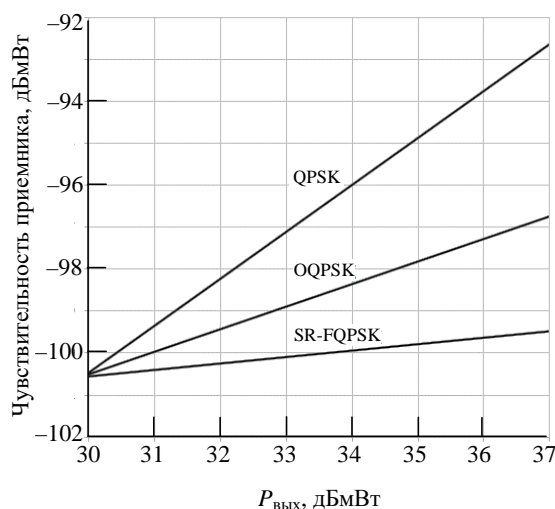


Рис. 10. Зависимости чувствительности приемника от выходной мощности усилителя

Fig. 10. Dependence of receiver sensitivity on amplifier output power



мощность 37 дБмВт для исследуемого усилителя). Также при равных значениях уровня внеполосного излучения (уровень –9 дБмВт для исследуемого усилителя,  $\alpha = 1$ ) применение модуляции OQPSK позволяет получить большую на 2 дБ выходную мощность усилителя и большую на 5 дБ мощность в случае использования модуляции SR-FQPSK. Применение модуляции SR-FQPSK вместо QPSK позволяет снизить уровень внеполосных излучений на 17 дБ (для  $\alpha = 1$ ) и на 12 дБ (для  $\alpha = 0.5$ ) при работе усилителя в точке насыщения. Следует отметить, что реализация та-

кого типа модуляции, как SR-FQPSK, требует значительно больших программно-аппаратных затрат, ПЛИС большей емкости, ЦСП большей производительности [17]. Таким образом, применение модуляции с малым пик-фактором (в данном случае SR-FQPSK) позволяет получить максимальную выходную мощность усилителя, максимальный КПД и минимальный уровень внеполосного излучения, что повышает энергетическую эффективность системы радиосвязи, увеличивает дальность связи и позволяет в полной мере использовать частотное разделение каналов.

### Авторский вклад

**Евстратко Владислав Владимирович** – подготовка и сборка лабораторного стенда; проведение исследований; обсуждение результатов исследований; подготовка материалов статьи.

**Сухотин Виталий Владимирович** – обсуждение результатов исследований; подготовка и верстка материалов статьи.

**Зубов Тимур Александрович** – подготовка и сборка лабораторного стенда; проведение исследований; обсуждение результатов исследований.

**Мишуров Андрей Валериевич** – проведение исследований; обсуждение результатов исследований.

**Коноваленко Артем Игоревич** – подготовка и сборка лабораторного стенда; подготовка материалов статьи.

### Author's contribution

**Vladislav V. Evstratko**, preparation and assembly of the laboratory bench; conducting research; discussion of research results; preparation of article materials.

**Vitaly V. Sukhotin**, discussion of research results; preparation and layout of article materials.

**Timur A. Zubov**, preparation and assembly of the laboratory stand; conducting research; discussion of research findings.

**Andrey V. Mishurov**, research; discussion of research results.

**Artem I. Konovalenko**, preparation and assembly of the laboratory stand; preparation of article materials.

### Список литературы

1. Мельник М. А. Виды БПЛА и их возможности // Главный механик. 2024. Т. 21, № 6 (250). С. 15–24.

2. Grebennicov A., Sokal N. O., Franco M. J. Switchmode RF and Microwave Power Amplifier. Cambridge: Academic Press, 2012. 345 p. doi: 10.1016/C2011-0-04475-7

3. СВЧ усилители мощности с высоким КПД на основе технологии AlGaN/GaN / П. А. Туральчук, В. В. Кириллов, О. Г. Вендик, М. Д. Парнес // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1. С. 182–186.

4. Баженов А. Л. Виды модуляции сигнала со многими поднесущими исходя из помехоустойчивости и пик-фактора // Вестн. Московского энергетического института. 2012. № 3. С. 99–102.

5. Паршин Ю. Н. Повышение энергетической эффективности передачи сигналов в нелинейном радиотракте // Радиотехника. 2018. № 3. С. 48–53.

6. El-Khatib Z., MacEachern L., Mahmoud S. A. Distributed CMOS Bidirectional Amplifiers. Broadbanding and Linearization Techniques. New York: Springer, 2012. 134 p. doi: 10.1007/978-1-4614-0272-5

7. Фам К., Ле В. Ш. Метод улучшения коэффициента полезного действия усилительного модуля // Universe: техн. науки. 2023. № 4–2 (109). С. 60–63.

8. A Crest Factor Reduction Technique for LTE Signals with Target Relaxation in Power Amplifier Linearization / J. R. Cárdenas-Valdez, J. A. Galaviz-Aguilar, C. Vargas-Rosales, E. Inzunza-González, L. Flores-Hernández // Sensors. 2022. Vol. 22, iss. 3. Art. № 1176. doi: 10.3390/s22031176

9. Кочкаров А. А. Современная инженерия малых беспилотных летательных аппаратов и особенности их сетевого взаимодействия // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: тр. 1-й Междунар. конф., Москва, 8–9 февр. 2018 / ИПМ им. М. В. Келдыша. М., 2018. С. 113–121.

10. UAV-Enabled Uplink Non-Orthogonal Multiple Access System: Joint Deployment and Power Control / Lu Jinhui, Wang Yuntian, Liu Tingting, Zhuang Zhihong, Zhou Xiaobo, Shu Feng, Han Zhu // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69, iss. 9. P. 10090–10102. doi: 10.1109/TVT.2020.3005732

11. Kaul S. K. QPSK, OQPSK, CPM Probability of Error for AWGN and Flat Fading Channels. URL: <https://www.winlab.rutgers.edu/~narayan/Course/Wles/s/Lectures05/lect9.pdf> (дата обращения: 08.10.2024)
12. Erkin Cubukcu. Root Raised Cosine (RRC) Filters and Pulse Shaping in Communication Systems. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120008631/download/20120008631.pdf> (дата обращения: 08.10.2024)
13. Сердюков П. Н., Шевцов И. Ф. Выбор методов модуляции в цифровых радиоканалах // Спец. техника. 1998. № 4–5. С. 47–51.
14. An J., Song Z. A New FQPSK with Ideal BER Performance // 7<sup>th</sup> Intern. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Wuhan, China, 23–25 Sept. 2011. IEEE, 2011.

doi: 10.1109/wicom.2011.6040219

15. Freescale Semiconductor, Doc. Num.: MW6S004N. URL: <https://static6.arrow.com/aropdfconversion/d0954a3a08073a5249d9359e48736a1f37fd6442/112956560690900mw6s004n.pdf> (дата обращения: 08.10.2024)
16. Боев Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолонии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестн. Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2012. № 2 (42). С. 86–91.
17. Hill T. J. An Enhanced, Constant Envelope, Interoperable Shaped Offset QPSK (SOQPSK) Waveform for Improved Spectral Efficiency // Intern. Telemetry Conf., San Diego, California, 23–26 Oct. 2000. P. 86–95.

### Информация об авторах

**Евстратько Владислав Владимирович** – старший преподаватель Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета. Автор 29 научных работ. Сфера научных интересов – радиосвязь; системы навигации.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: [evstrafly@list.ru](mailto:evstrafly@list.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3204-6308>

**Сухотин Виталий Владимирович** – кандидат технических наук (2003), доцент (2013), доцент Военно-инженерного института Сибирского федерального университета. Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковые системы радиосвязи; фазометрия; пассивные методы радиолокации.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: [vsuhotin@sfu-kras.ru](mailto:vsuhotin@sfu-kras.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-8166-5893>

**Зубов Тимур Александрович** – старший преподаватель Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета. Автор 13 научных работ. Сфера научных интересов – цифровые системы связи; встраиваемые системы и системы автоматизации.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: [timonische@bk.ru](mailto:timonische@bk.ru)

<https://orcid.org/0009-0009-6944-114X>

**Мишуров Андрей Валериевич** – старший преподаватель Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – системы передачи данных; автоматизированные системы контроля.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: [mav137@yandex.ru](mailto:mav137@yandex.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-1738-113X>

**Коноваленко Артем Игоревич** – ассистент преподавателя Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета. Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – автоматизация изготовления радиоэлектронной аппаратуры.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: [konovalenkoartem03041990@gmail.com](mailto:konovalenkoartem03041990@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0000-9710-2545>

### References

1. Melnik M. A. Types of UAVs and Their Capabilities. Chief Mechanic. 2024, vol. 21, no. 6 (250), pp. 15–24. (In Russ.)
2. Grebennicov A., Sokal N. O., Franco M. J. Switchmode RF and Microwave Power Amplifier. Cambridge, Academic Press, 2012, 345 p. doi: 10.1016/C2011-0-04475-7
3. Turalchuk P. A., Kirillov V. V., Vendik O. G., Parnes M. D. Microwave Power Amplifiers with High Efficiency Based on AlGaIn/GaN. Microwave Electron-

ics and Microelectronics Technology. 2016, vol. 1, pp. 182–186. (In Russ.)

4. Bazhenov A. L. Application of PSK and QAM for OFDM Subcarriers with Analysis of the Peak-factor and the Probability of Bit Error. Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. 2012, no. 3, pp. 99–102. (In Russ.)
5. Parshin Yu. N. A Power Efficiency Increasing of the Signal Transmission in the Nonlinear Radio Path. Radioengineering. 2018, no. 3, pp. 48–53. (In Russ.)
6. El-Khatib Z., MacEachern L., Mahmoud S. A. Dis-

tributed CMOS Bidirectional Amplifiers. Broadbanding and Linearization Techniques. New York, Springer, 2012, 134 p. doi: 10.1007/978-1-4614-0272-5

7. Fam K., Le V. S. Method for Enhancing the Performance of an Amplifier Module. *Universum: technical sciences*. 2023, no. 4–2 (109), pp. 60–63. (In Russ.)

8. Cárdenas-Valdez J. R., Galaviz-Aguilar J. A., Vargas-Rosales C., Inzunza-González E., Flores-Hernández L. A Crest Factor Reduction Technique for LTE Signals with Target Relaxation in Power Amplifier Linearization. *Sensors*. 2022, vol. 22, iss. 3, art. № 1176. doi: 10.3390/s22031176

9. Kochkarov A. A. Modern Engineering of Small Unmanned Aerial Vehicles and the Features of Their Network Interaction. Designing the Future. Problems of Digital Reality: Proc. of the 1<sup>st</sup> Intern. Conf., Moscow, 8–9 Feb. 2018. Moscow, IPM n. a. M. V. Keldysh, 2018, pp. 113–121. (In Russ.)

10. Jinhui Lu, Yuntian Wang, Tingting Liu, Zhihong Zhuang, Xiaobo Zhou, Feng Shu, Zhu Han. UAV-Enabled Uplink Non-Orthogonal Multiple Access System: Joint Deployment and Power Control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020, vol. 69, iss. 9, pp. 10090–10102. doi: 10.1109/TVT.2020.3005732

11. Kaul S. K. QPSK, OQPSK, CPM Probability of Error for AWGN and Flat Fading Channels. Available at:

<https://www.winlab.rutgers.edu/~narayan/Course/Wless/Lectures05/lect9.pdf> (accessed 08.10.2024)

12. Erkin Cubukcu. Root Raised Cosine (RRC) Filters and Pulse Shaping in Communication Systems. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120008631/downloads/20120008631.pdf> (accessed 08.10.2024)

13. Serdyukov P. N., Shevtsov I. F. Choice of Modulation Methods in Digital Radio Channels. *Special Tech.* 1998, no. 4–5, pp. 47–51. (In Russ.)

14. An J., Song Z. A New FQPSK with Ideal BER Performance. 7<sup>th</sup> Intern. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Wuhan, China, 23–25 Sept. 2011. IEEE, 2011. doi: 10.1109/wicom.2011.6040219

15. Freescale Semiconductor. Doc. Num.: MW6S004N. Available at: <https://static6.arrow.com/aropdfconversion/d0954a3a08073a5249d9359e48736a1f37fd6442/112956560690900mw6s004n.pdf> (accessed 08.10.2024)

16. Boev N. M. Analysis of UAV Radio Control and Telemetry Systems. *Bul. of the Siberian State Aerospace University n. a. Academician M. F. Reshetnev*. 2012, no. 2 (42), pp. 86–91. (In Russ.)

17. Hill T. J. An Enhanced, Constant Envelope, Interoperable Shaped Offset QPSK (SOQPSK) Waveform for Improved Spectral Efficiency. *Intern. Telemetering Conf.*, San Diego, California, 23–26 Oct. 2000, pp. 86–95.

### Information about the authors

**Vladislav V. Evstratko**, Senior Lecturer Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University. The author of 29 scientific publications. Area of expertise: radio communications; navigation systems. Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russia  
E-mail: [evstrafly@list.ru](mailto:evstrafly@list.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-3204-6308>

**Vitaly V. Sukhotin**, Cand. Sci. (Eng.) (2003), Associate Professor (2013), Associate Professor of the Military Engineering Institute of the Siberian Federal University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: satellite radio communication systems; phasometry; passive radar techniques. Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russia  
E-mail: [vsukhotin@sfu-kras.ru](mailto:vsukhotin@sfu-kras.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-8166-5893>

**Timur A. Zubov**, Senior Lecturer Institute of Engineering Physics and Radio Electronics of the Siberian Federal University. The author of 13 scientific publications. Area of expertise: digital communication systems; embedded systems and automation systems. Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russia  
E-mail: [timonische@bk.ru](mailto:timonische@bk.ru)  
<https://orcid.org/0009-0009-6944-114X>

**Andrey V. Mishurov**, Senior Lecturer Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: data transmission systems; automated control systems. Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russia  
E-mail: [mav137@yandex.ru](mailto:mav137@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-1738-113X>

**Artem I. Konovalenko**, Teaching assistant of Institute of Engineering Physics and Radio Electronics of the Siberian Federal University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: automation of the manufacture of electronic equipment. Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Pr., Krasnoyarsk 660041, Russia  
E-mail: [konovalenkoartem03041990@gmail.com](mailto:konovalenkoartem03041990@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0000-9710-2545>

---