

УДК 621.391 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.56.64

## Экспериментальная отработка комплексов высокоскоростной передачи информации для КА ДЗЗ

**А. Н. Ершов**, *nkpor@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**В. В. Березкин**, *к. т. н., petrov\_sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**С. В. Петров**, *petrov\_sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. В. Петров**, *petrov\_sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Д. А. Почивалин**, *nkpor@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Д. А. Смирнов**, *nkpor@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**С. В. Ковалев**, *nkpor@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье описаны методы испытаний и измерений, которые использовались при отладке бортовых и наземных комплексов радиолиний высокоскоростной передачи информации, предназначенных для работы в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Отмечаются особенности применения высокоскоростных сигнально-кодовых конструкций с видами модуляции высокого порядка и методов кодирования с высокими кодовыми скоростями.

Приводятся структурные схемы наземных комплексов радиолиний Ка- и Х-диапазонов.

Анализируются основные типы погрешностей, возникающих при передаче широкополосных (несколько сотен мегагерц) сигналов.

Показано, что в радиолиниях, в которых выходная вероятность ошибки значительно зависит от качества выполнения составных элементов (определяющих уровень межсимвольных искажений (МСИ), фазового шума и др.) для оценки интегрально-го качества работы системы передачи информации, весьма эффективно использовать параметр Error Vector Magnitude (EVM).

По результатам испытаний сделан вывод, что аппаратура бортового и наземного комплексов, разработанная в АО «Российские космические системы», обеспечивает передачу информации со скоростью до 900 Мбит/с с видом модуляции 8PSK, до 1,2 Гбит/с с видом модуляции 16APSK и до 1,5 Гбит/с с видом модуляции 32APSK в Х- и Ка-диапазонах.

**Ключевые слова:** радиолиния, канал связи, частотно-энергетические ресурсы, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), модуляция с высокой кратностью, корректирующее кодирование, сигнальное созвездие

## Experimental Adjustment of High-Speed Information Transfer Complexes for Earth Remote Sensing Spacecraft

**A. N. Ershov**, *nkpor@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**V. V. Berezkin**, *Cand. Sci. (Engineering)*, *petrov\_sv@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**S. V. Petrov**, *petrov\_sv@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. V. Petrov**, *petrov\_sv@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**D. A. Pochivalin**, *nkpor@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**D. A. Smirnov**, *nkpor@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**S. V. Kovalev**, *nkpor@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The paper describes methods of tests and measurements which were used when debugging onboard and ground complexes of radio links of high-speed information transfer slated for operation in the systems of Earth remote sensing (ERS). Features of application of high-speed signal and code designs with the types of modulation of a high order and coding methods with high code speeds are presented.

Block diagrams of ground complexes of radio links of Ka- and X-bands are given.

The main types of the errors arising by transfer of wideband (several hundreds of MHz) signals are analyzed.

It is shown that in radio links in which the output error probability considerably depends on the quality of performance of the components (determining the level of intersymbol distortions (ISD), phase noise, etc.) to evaluate the integrated operation quality of an information transfer system, it is very effectively to use the Error Vector Magnitude (EVM) parameter.

By results of the tests the conclusion is drawn, that the equipment of onboard and ground complexes developed in Joint Stock Company "Russian Space Systems" provides information transfer with the rate up to 900 Mbit/s with the modulation type 8PSK up to 1.2 Gbit/s with the modulation type 16APSK and up to 1.5 Gbit/s with the modulation type 32APSK in X- and Ka-bands.

**Keywords:** radio link, communication channel, frequency-power resources, Earth remote sensing, high order modulation, correction coding, constellation diagram

В связи с планированием к запуску ряда высокоинформативных спутниковых объектов ДЗЗ, в АО «РКС» разработаны бортовые и наземные аппаратурные комплексы X- и Ka-диапазонов, обеспечивающие формирование, передачу и прием информации по высокоскоростному каналу связи.

Высокоскоростная радиолиния предполагает использование сигнальных конструкций с видами модуляции высокого порядка и методов кодирования с высокими кодовыми скоростями.

Соответственно были спроектированы, разработаны и изготовлены радиокомплексы со следующими основными характеристиками:

- информативность до 1,5 Гбит/с;
- виды модуляции 8PSK, 16APSK и 32APSK;
- символные скорости в канале до 300 МГц;
- виды кодирования: – турбокод произведения (TPC) с кодовой скоростью  $R = 0,8$  и  $0,9$  и LDPC с кодовой скоростью  $7/8$  (в соответствии с рекомендациями CCSDS);

- формирование спектров квадратур модулирующего сигнала обеспечивается SRRC (корень квадратный из приподнятого косинуса) фильтром с коэффициентом скругления (roll of factor) —  $\text{rof} = 0,25-0,35$ .

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема аппаратного радиокомплекса Ka(X)-диапазона.

Функционально аппаратные радиокомплексы X- и Ka-диапазонов состоят из аналогичных технических средств по назначению:

- испытываемые передатчики с транзисторными выходными каскадами и модуляторами QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK (мощности передатчиков 8 Вт и 4 Вт для X- и Ka-диапазонов соответственно);

- малошумящий усилитель (МШУ) с преобразователем входного диапазона частот на промежуточную частоту;

- приемный комплекс (ПРМК) с усилителем промежуточной частоты (УПЧ) и АРУ;

- демодулятор с линейным корректором межсимвольных искажений (МСИ) и оценкой качества демодулированного сигнала (EVM и вероятности ошибки);

- контрольный модулятор КПА сигнала 8PSK, 16APSK и 32APSK с преобразователем частоты имитатора в X- и Ka-диапазоны;

- анализатор спектра;
- векторный анализатор;
- управляющий компьютер;
- коаксиально-волноводный переход (КВП);
- набор аттенюаторов для подбора необходимого отношения  $P_c/P_{ш}$  ( $E_{бит}/N_0$ ).

Отладка комплексов потребовала использования специфических для высокоскоростных радиолиний методов измерений, анализа и интерпретации полученных результатов, необходимых для обеспечения надежного функционирования, а также оптимизации радиолиний перспективных объектов ДЗЗ.

Методика измерений зависит от типов искажений в трактах формирования, передачи и приема модулированных сигналов-переносчиков.

Основные причины появления этих искажений следующие:

- неидеальность трактов формирования сигналов несущих, гетеродинных и символных частот, вызывающих появление фазовых шумов, импульсных и дискретных составляющих помех;

- неидеальность формирования параметров сигнального созвездия модулированного сигнала;

- неидеальность частотных характеристик трактов передачи и приема (АЧХ и неравномерности группового времени задержки (НГВЗ));

- нелинейные искажения в передатчике (АМ–АМ- и АМ–ФМ-переходы);

Все эти типы искажений относятся к так называемой группе мультипликативных помех, степень влияния которых на качество принимаемой информации не зависит от уровня сигнала, поступающего на вход демодулятора.

## Оценка влияния парциальных составляющих источников помех

Эти оценки необходимы для нормировки значений погрешностей на составные части радиолинии при выдаче технических заданий на разработку отдельных устройств, входящих в систему.

Ниже перечислены причины появления искажений в трактах формирования, передачи и приема модулированных сигналов-переносчиков и их влияние на качество передачи информации.



Рис. 1. Структурная схема испытательных комплексов

**Первым типом искажений** являются фазовые шумы, они влияют на выходной результат двояким образом [1]:

а) низкочастотная часть спектра является мешающим фактором для работы следящих систем демодулятора, должна ими отслеживаться и в этом смысле определяет полосу пропускания следящих систем. То же самое касается обеспечения динамики работы в условиях доплеровского сдвига и прочих нестабильностей. То есть по этим причинам полосы следящих систем должны выбираться как можно шире, что является противоречивым требованием в смысле обеспечения работы при большом уровне шумов на выходе приемника. Это особенно касается систем с видами модуляции высокого порядка, поскольку выделители сигналов синхронизации являются сугубо нелинейными устройствами и степень подавления сигнала шумами в них резко возрастает с повышением кратности модуляции;

б) высокочастотная составляющая спектра (та, которая не отслеживается следящими системами) детектируется фазовым детектором и добавляется к шуму приемника. Очевидно, что нормы на уровень фазовых шумов этой части спектра должны быть такими, чтобы интегральная мощность этой составляющей не превышала некоторой доли

аддитивного шума выхода приемника (слабо влияла на величину  $E_{бит}/N_0$ ).

На рис. 2 представлена зависимость спектральной плотности фазовых шумов от частоты для передатчика Ка-диапазона.

Измерение интегральной мощности этих фазовых шумов дают оценки ухудшения величины  $E_{бит}/N_0$  для  $P_{ош} = 10^{-6}$  примерно на 0,2–0,3 дБ.

Оценки реальных уровней фазовых шумов гетеродинов приемного устройства комплекса приводят к аналогичным результатам.

Методику вычисления и оптимизации параметров следящих устройств в этих условиях можно найти, например, в [1].

**Второй тип искажений** — межсимвольные. Численная оценка уровня межсимвольных помех селективирующих устройств возможна при аппроксимации АЧХ и НГВЗ линейными и параболическими зависимостями или моделированием на ЭВМ [1, 2, 5–9].

На рис. 3 и 4 приведены АЧХ и НГВЗ передатчика Ка-диапазона, по приближенным оценкам приводящие к энергетическим потерям 0,15–0,2 дБ.

При нормировании этих параметров следует особое внимание обращать на линейную составляющую характеристик, поскольку такая зависимость



Рис. 2. Фазовые шумы передатчика Ка-диапазона

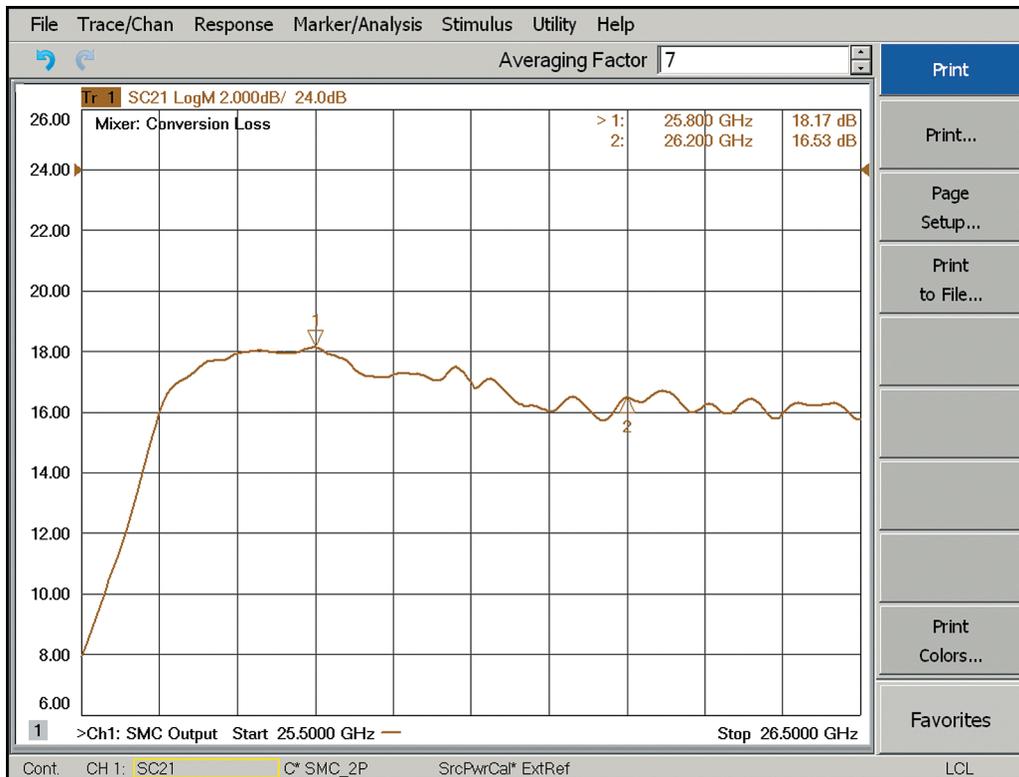


Рис. 3. АЧХ передатчика Ка-диапазона

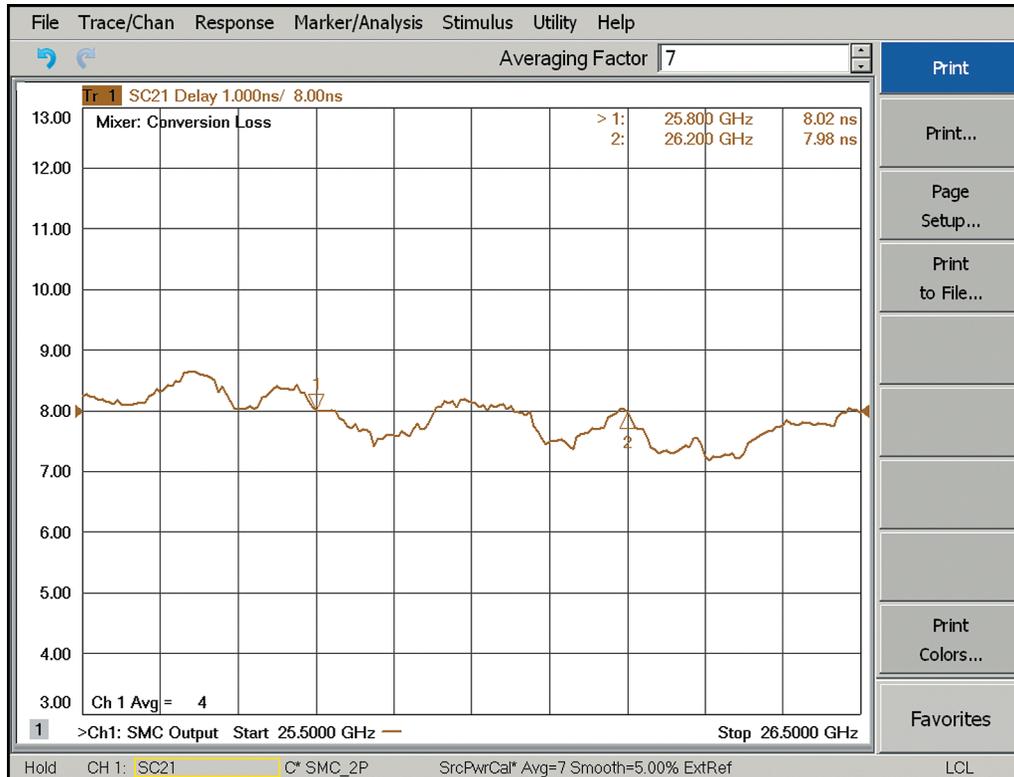


Рис. 4. НГВЗ передатчика Ка-диапазона

нарушает ортогональность образующих векторов, то даже в случае сигналов QPSK происходит взаимный «пролаз» сигналов из одного орта в другой.

Оценка ухудшения отношения  $E_{бит}/N_0$  для  $P_{ош} = 10^{-6}$  из-за реального уровня МСИ составляет примерно 0,3–0,4 дБ.

**К третьему типу искажений** относятся нелинейные искажения в передатчике (АМ–АМ- и АМ–ФМ-переходы).

На рис. 5 и 6 для наглядности приведены сигнальные созвездия сигнала 32APSK, прошедшего тракт передачи в линейном и нелинейном режимах соответственно.

Влияние этого типа искажений также оценивается путем численного моделирования при аппроксимации типов нелинейностей определенными закономерностями [3].

При отладке комплексов этому вопросу уделялось особое внимание, поскольку эти параметры сильно зависят от загрузки мощного каскада передатчика и напрямую влияют на процесс оптимизации сквозных характеристик радиолинии.

Одновременный интегральный учет влияния перечисленных выше искажений на выходной результат (величину вероятности битовой ошибки  $P_{ош}$ )

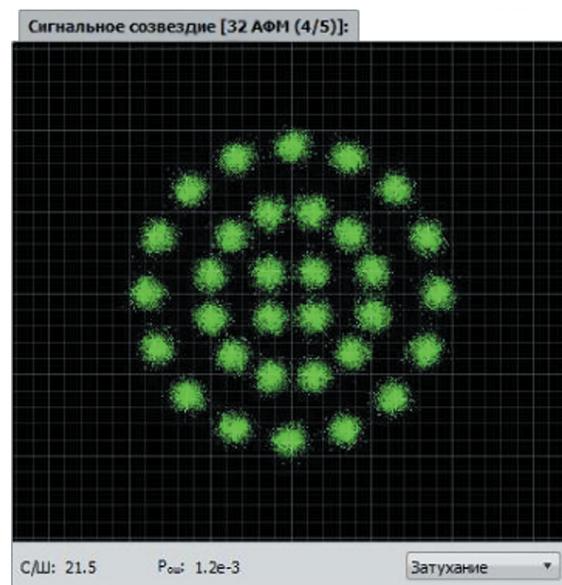


Рис. 5. Сигнальное созвездие, прошедшее линейный тракт

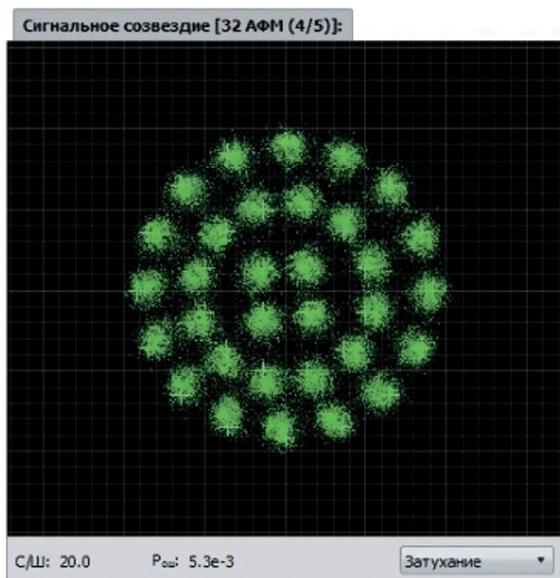


Рис. 6. Сигнальное созвездие, прошедшее нелинейный тракт

в реальных системах аналитическими методами и моделированием весьма затруднен. Поэтому выходной результат для данного случая (величину вероятности битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$ ) в настоящее время принято оценивать в зависимости от нормированного среднеквадратичного отклонения вершины принимаемого вектора от положения вершины идеального (опорного) вектора. Этот параметр в практике техники модуляции и демодуляции принято обозначать как  $EVM$  (Error Vector Magnitude) и измерять с помощью специальных (векторных) анализаторов параметров сигнального созвездия [4].

Сказанное поясняется векторной диаграммой, приведенной на рис. 7, и формулой (1):

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m [R(k) - S(k)]^2}{\sum_{k=1}^m [R(k)]^2}}. \quad (1)$$

Дополнительное влияние на величину  $EVM$  могут оказывать следящие устройства демодулятора при неидеальной их работе.

В рассматриваемом случае используется величина  $(EVM)' = 1/EVM$  [дБ], поскольку с ней удобней оперировать в терминах отношения сигнал/шум (или  $E_{\text{бит}}/N_0$ ). Типовые зависимости вероятности ошибок ( $P_{\text{ош}}$ ) от величины  $E_{\text{бит}}/N_0$

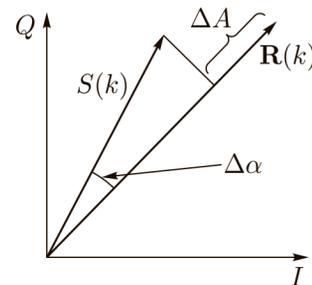


Рис. 7. Погрешность вектора демодулированного сигнала.  $R(k)$  — идеальный (опорный) вектор сигнала,  $\Delta A$  — амплитудная ошибка принимаемого вектора,  $\Delta\alpha$  — угловая ошибка принимаемого вектора

при различных уровнях  $EVM$  представлены в работе [10] на рис. 7. По форме кривых видно, что при некотором уровне  $(EVM)'$  вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$  становится постоянной и дальнейшее улучшение энергетике в радиолинии бесполезно.

Реально полученные на испытательном комплексе зависимости проходят со сдвигом вправо примерно на величину 0,8–1,2 дБ от идеальной кривой.

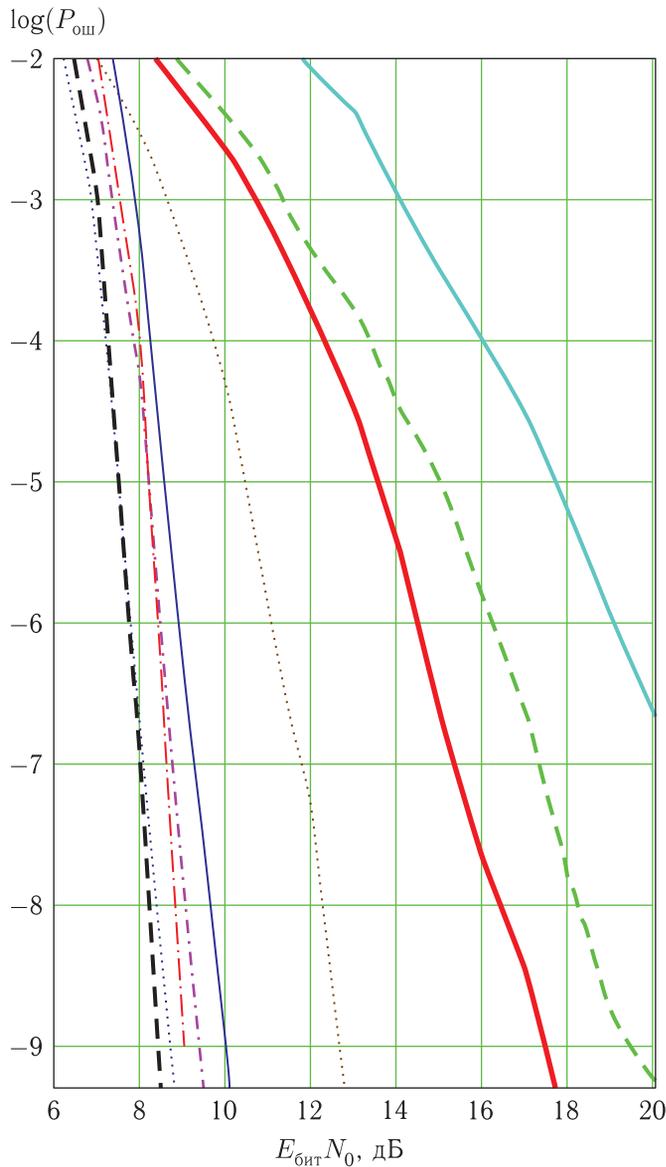
На рис. 8 приведены экспериментально снятые кривые зависимости  $P_{\text{ош}} = f(E_{\text{бит}}/N_0)$  для рассматриваемых в статье видов модуляции и кодирования. По этим кривым можно судить о реальных выигрышах от методов кодирования, используемых на текущий период в комплексе.

Основной целью данной работы была оценка влияния режимов работы, мощных каскадов передатчиков на величину выходной вероятности ошибок.

Как упоминалось выше, эти результаты в дальнейшем могут быть положены в основу для оптимизации сквозных характеристик радиолинии.

На данном этапе в целях изучения возможности работы с максимальной информативностью в условиях ограниченной полосы частот и минимизации маскирующего эффекта, измерения в основном проводились без использования помехоустойчивого кодирования.

Измерения дают величины  $EVM$ , приводящие к значениям  $P_{\text{ош}} \leq 10^{-15}$  для достаточно больших диапазонов выходной мощности передатчиков, вплоть до области насыщения. То есть в этих пределах качество работы радиолинии будет



8PSK, некод.      16APSK, трс      8PSK, ldpc  
 8PSK, трс      32APSK, некод.      16APSK, ldpc  
 16APSK, некод.      QPSK, некод.      32APSK, ldpc

Рис. 8. Зависимости  $P_{ош} = f(E_{бит}/N_0)$ . Реально полученные на испытательном комплексе зависимости проходят со сдвигом вправо примерно на величину 0,8–1,2 дБ от идеальной кривой

определяться параметрами, от которых зависит величина  $E_{бит}/N_0$  ( $P_{пер}$ , коэффициент усиления антенн, суммарная шумовая температура Земли  $T_{ш}\Sigma$  и т. д.).

## Выводы

В радиолиниях, в которых выходная вероятность ошибки значительно зависит от качества выполнения составных элементов (определяющих уровень МСИ, фазового шума и т. д.), для оценки интегрального качества работы системы передачи информации весьма эффективно использовать параметр EVM.

Для сигналов с амплитудными составляющими параметров модуляции (16APSK и более высокого порядка) при использовании передатчиков в режиме максимальной мощности для достижения необходимой эффективности особо актуально наличие в комплексе нелинейных корректоров и/или корректирующего кодирования.

Для видов модуляции QPSK и 8PSK возможно использование передатчиков в большом диапазоне выходных мощностей вплоть до режима максимальной мощности.

По результатам проведенной экспериментальной обработки подтверждено, что аппаратура, разработанная в АО «Российские космические системы», обеспечивает передачу информации со скоростью до 900 Мбит/с с видом модуляции 8PSK и до 1500 Мбит/с с видом модуляции 32APSK в X- и Ka-диапазонах.

Обсуждаемые методы и оборудование могут быть использованы в смежных системах передачи высокоскоростной информации: связи, медийной сфере, вещании, метеонаблюдениях, фундаментальных космических исследованиях и др.

## Список литературы

1. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. М.: Связь, 1979. 592 с.
2. Спутниковая связь и вещание. Справочник / Под общей редакцией Л. Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1979. 521 с.
3. Dunleavy L. Transistor and Amplifier Modeling Methods for Microwave Design // Заглавие с экрана. [http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/transistor\\_amplifier\\_modeling\\_methods\\_for\\_microwave\\_design.pdf](http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/transistor_amplifier_modeling_methods_for_microwave_design.pdf) (дата обращения 29.10.2018).
4. Measurements to Analyze and Troubleshoot Vector-Modulated Signals, Agilent Technologies Innovation

- the HP Way. Заглавие с экрана. [http://www.usb.org/developers/wusb/docs/Agilent\\_EVM\\_Compliance\\_Test\\_Procedure.pdf](http://www.usb.org/developers/wusb/docs/Agilent_EVM_Compliance_Test_Procedure.pdf) (дата обращения 29.10.2018)
5. *Архангельский В. А., Березкин В. В., Готлиб В. М., Хацкелевич Я. Д.* Эффективность сверточного кодирования в идеальном ДФМ-канале с памятью // Радиотехника и электроника, 1982, т. XXVII, № 7. С. 1338–1341.
  6. *Березкин В. В., Хацкелевич Я. Д.* Об эффективности сверточного кодирования в идеальном ДФМ-канале с памятью // Радиотехника, 1984, № 3. С. 34–39.
  7. *Березкин В. В., Егоров А. А., Хацкелевич Я. Д.* Об эффективности сверточного кодирования в идеальном ДФМ-канале с памятью при неидеальной синхронизации // Радиотехника, 1984, № 4. С. 42–47.
  8. *Березкин В. В., Егоров А. А., Хацкелевич Я. Д.* Помехоустойчивость сигналов ФМ-4 с кодированием в нелинейном канале с памятью // Электросвязь, 1989, № 4. С. 17–21.
  9. *Березкин В. В., Хацкелевич Я. Д., Кичаев Л. Н.* Помехоустойчивость сигналов ФМ-4 в канале с ретранслятором // Электросвязь, 1992, № 11. С. 28–31.
  10. *Ершов А. Н., Березкин В. В., Петров С. В., Петров А. В., Почивалин Д. А.* Методы проектирования и аппаратной реализации цифровых фильтров для высокоскоростной радиолинии в системах ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 1. С. 25–31.