

УДК 621.396.2

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛИНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА ДЛЯ АЭРОМОБИЛЬНЫХ АБОНЕНТОВ

А. В. Нестеров<sup>1</sup>, А. А. Лелюх<sup>2,3</sup>, Г. В. Куликов<sup>3</sup>, Н. С. Гавриков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Концерн «Автоматика», 127276, Москва, ул. Ботаническая, д. 25

<sup>2</sup>АО «Московский научно-исследовательский институт радиосвязи»,  
109029, Москва, ул. Нижегородская, д. 32

<sup>3</sup>МИРЭА – Российский технологический университет,  
119454, Москва, просп. Вернадского, д.78

Статья поступила в редакцию 19 января 2019 г.

**Аннотация.** В настоящее время широкополосный доступ к Интернету с использованием спутников высокой пропускной способности (HTS) пользуется все большей популярностью у авиапассажиров. Примерами зарубежных HTS-систем являются Inmarsat Global Xpress, Intelsat EpicNG, Eutelsat KaSat, ViaSat-1, 2. Аэромобильные станции производятся компаниями Aerospace Honeywell JetWave, ViaSat, AeroSat Astronics, Gilat и т. д. Актуальной научной и практической задачей является создание российской аэромобильной станции спутникового широкополосного доступа в Ka-диапазоне, работающей с российскими спутниками и не уступающей зарубежным аналогам по показателям качества, основным из которых, с точки зрения конечного пользователя, является скорость передачи информации в прямой линии связи. В статье рассмотрены и представлены основные особенности систем спутникового широкополосного доступа для аэромобильных абонентов, методы и результаты исследования энергетического потенциала и отношения сигнал/шум, которые определяют достижимую скорость передачи информации в прямой линии связи с использованием стандарта DVB-S2X. Проанализировано влияние различных схем кодирования и модуляции, в частности схемы модуляции-кодирования «256APSK-3/4», обеспечивающей наиболее высокую спектральную эффективность, равную 5,9 бит/символ, и

схемы модуляции-кодирования «32APSK-7/9, обеспечивающей спектральную эффективность 3,84 бит/символ. Результаты расчетов позволяют выбирать рабочие значения спутниковой эквивалентной изотропной излучаемой мощности и коэффициент качества приемника бортовой станции. Аналогичные расчеты могут быть проведены и при других параметрах системы связи, что позволит сформировать облик перспективной отечественной аэромобильной станции Ka-диапазона, работающей с отечественными спутниками высокой пропускной способности в стандарте DVB-S2X, и разработать алгоритмы управления частотно-энергетическим ресурсом спутников.

**Ключевые слова:** спутниковая связь, широкополосный доступ, аэромобильные абоненты, энергетический потенциал радиолинии, отношение сигнал-шум.

**Abstract.** At the present time broadband access to the Internet, using high throughput satellites (HTS), are increasingly popular for air passengers. Examples of foreign HTS-systems are Inmarsat Global Xpress, Intelsat EpicNG, Eutelsat KaSat, ViaSat-1, 2. Airborne stations are manufactured by Aerospace Honeywell JetWave, ViaSat, AeroSat Astronics, Gilat etc. Therefore, urgent scientific and practical task is the creation of Russian airborne station of satellite broadband access in the Ka-band, working with the Russian HTS and not inferior to foreign analogues by its quality indicators, the main of which from the standpoint of the end user is the information rate in a forward link. In the article the main features of the satellite broadband access systems for airborne users are considered, the methods and results of study of the energy potential and the signal-to-noise ratio, which determines the attainable information rate in a forward link using DVB-S2X standard, are presented. The impact of different modulation-coding schemes is analyzed, in particular, the 256APSK-3/4 modulation coding scheme, which provides the highest spectral efficiency of 5.9 bits / symbol, and the 32APSK-7/9 modulation coding scheme, which provides 3.84 bit / symbol spectral efficiency. The results of calculations allow to choose the operating values of the satellite equivalent isotropic radiated power and the quality factor of the airborne station receiver. Similar calculations can be made with other parameters of the communication system, which will allow you to form the look of a promising domestic Ka-band airborne station, working with domestic

high-capacity satellites in the DVB-S2X standard, and develop algorithms for controlling the frequency-energy resource of satellites.

**Keywords:** satellite communications, broadband access, airmobile users, radio link energy potential, signal-to-noise ratio.

## **Введение**

Одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники является развитие информационно-телекоммуникационных систем. В настоящее время всё большим спросом пользуются услуги предоставления авиапассажирам спутникового широкополосного доступа в Интернет.

Примерами зарубежных систем спутниковой связи, реализующими описанные технологии, являются Inmarsat Global Xpress, Intelsat EpicNG, Eutelsat KaSat, ViaSat. Аэромобильные станции для широкополосного спутникового доступа производят зарубежные компании Honeywell Aerospace JetWave, ViaSat, Astronics AeroSat, Gilat и др. При этом пропускная способность одного спутника класса HTS [1,2] составляет десятки-сотни Гбит/с, скорость передачи информации в прямой линии – десятки-сотни Мбит/с для аэромобильного терминала и единицы-десятки Мбит/с – для индивидуального авиапассажира.

Необходимо отметить, что в данных системах полностью отсутствует место отечественного разработчика и, тем более, производителя. Для развития отечественной отрасли связи и обеспечения ее независимости, необходимо создание собственных систем и оборудования, работающего на российские спутниковые группировки.

## **1. Структура гибридной системы связи**

В настоящее время существуют эксплуатируемые и планируемые к запуску отечественные спутники связи, которые можно отнести к классу HTS, например, Экспресс-AM5, Экспресс-AM6, Ямал-601. Поэтому актуальной научной и практической задачей, в частности, с точки зрения политики импортозамещения, является создание отечественной аэромобильной станции

спутникового широкополосного доступа в Ка-диапазоне, работающей с российскими спутниками и не уступающей зарубежным аналогам по своим показателям качества, основным из которых с позиций конечного потребителя является скорость передачи информации в прямой линии.

В настоящее время в России (АО «МНИИРС», Российская корпорация средств связи, телекоммуникационная компания «Мегафон») ведутся работы по созданию гибридной системы связи (рис. 1), основанной на одновременном использовании систем наземной связи в формате 4G-LTE и системы спутниковой связи на базе отечественных космических группировок [3,4].

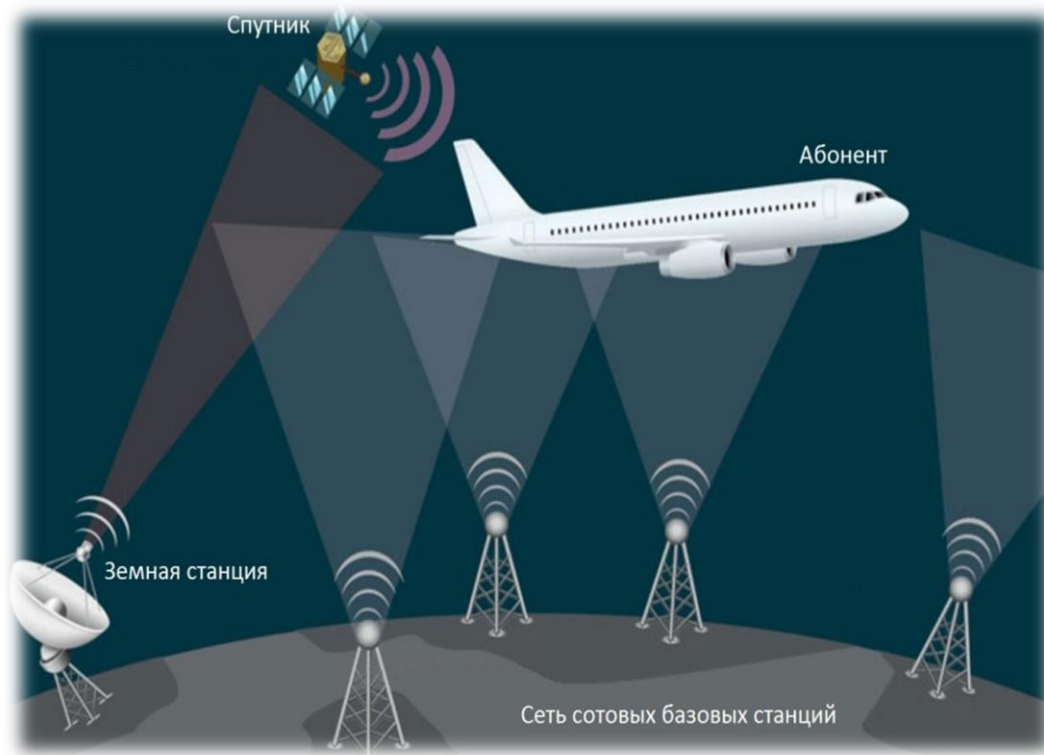


Рис. 1. Структура гибридной системы связи.

В систему входят два крупных сегмента:

- 1) спутниковая радиолиния передачи информации между аэромобильной (самолетной) абонентской станцией и спутником;
- 2) радиолиния передачи информации между аэромобильной (самолетной) абонентской станцией и сетью наземных сотовых базовых станций.

Достижимая скорость передачи информации в системе связи определяется

имеющимся энергетическим потенциалом, а также используемыми схемами модуляции-кодирования. Для современного этапа развития и ближайшей перспективы спутникового широкополосного доступа в интересах аэромобильных абонентов характерна тенденция применения в прямой линии уплотнения каналов, схем модуляции и кодирования, регламентированных стандартом DVB-S2/S2X.

## 2. Оценка энергетического потенциала радиолиний

Энергетический потенциал прямой линии (в Гц) определяется отношением мощности полезного сигнала (в Вт) на входе приемника аэромобильного терминала к односторонней спектральной плотности мощности аддитивных помех (в Вт/Гц) [2,5]:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_F = \left[ \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{IM}^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{CCI}^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{ACI}^{-1} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $\left(\frac{C}{N_0}\right)_U$ ,  $\left(\frac{C}{N_0}\right)_D$ ,  $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{IM}$ ,  $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{CCI}$ ,  $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{ACI}$  – парциальные энергетические потенциалы (в Гц), определяемые соответственно шумами канала «вверх», шумами канала «вниз», интермодуляционными помехами в транспондере, соканальными помехами вследствие повторного использования частотного ресурса и междуканальными помехами. В корректно спроектированной системе основным ограничивающим скорость передачи информации фактором являются шумы канала «вниз», поэтому далее рассмотрим соответствующий энергетический потенциал, который определяется формулой [2]:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_D = \frac{EIRP_D(G/T)_{MS}}{kL_D},$$

где  $EIRP_D$  – парциальная эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) спутникового транспондера в канале «вниз» для рассматриваемой аэромобильной станции,  $(G/T)_{MS}$  – добротность приемной системы аэромобильной станции,  $k$  – постоянная Больцмана,  $L_D$  – потери в канале «вниз».

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости достижимого

энергетического потенциала канала «вниз» (левая ось ординат) от парциальной ЭИИМ для следующих условий:

- орбитальная позиция геостационарного спутника  $49^\circ$  в.д.;
- несущая частота 19,45 ГГц (диапазон Ка);
- поляризация круговая левая;
- добротность приемной системы аэромобильной станции 13 дБ/К.

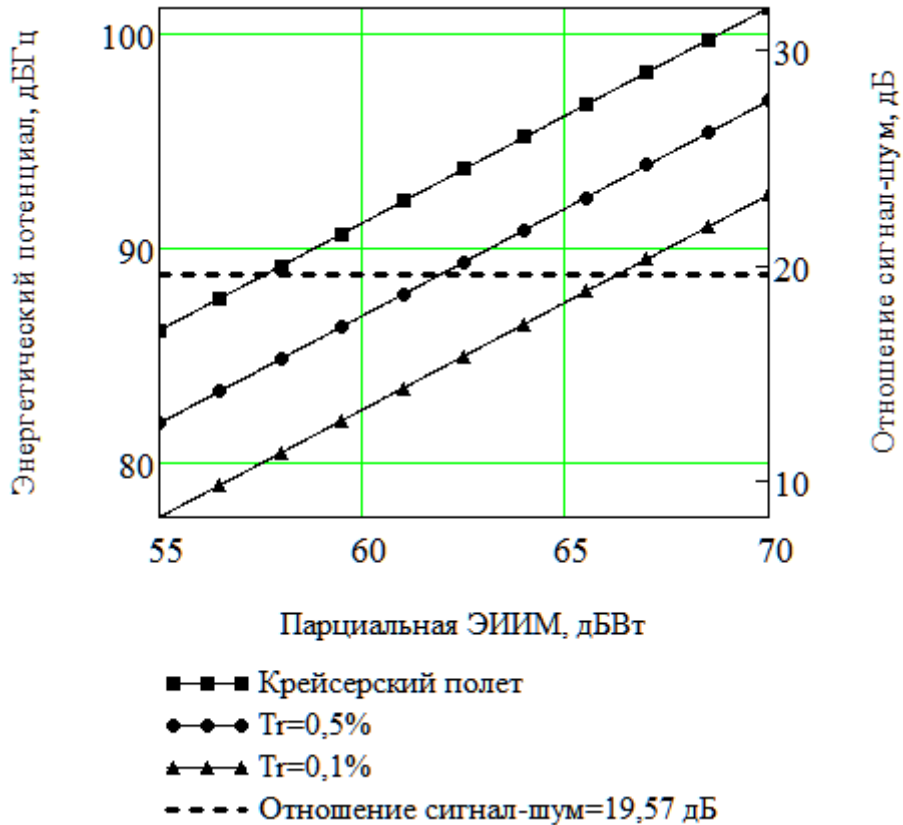


Рис. 2. Энергетический потенциал и символическое отношение сигнал/шум в канале «вниз» в зависимости от парциальной ЭИИМ.

Верхний график соответствует крейсерскому полету самолета. Нижние графики приведены для сравнительной иллюстрации влияния осадков в Ка-диапазоне и соответствуют приему спутникового сигнала на земную станцию, расположенную на территории Сунженского района Республики Ингушетия, где среднегодовая интенсивность дождей одна из наиболее высоких в России; при этом были заданы два значения процента потери надежности по дождю  $T_r$ : 0,5% и 0,1%. При расчете учитывались потери в атмосфере, а также уменьшение добротности приемной системы из-за дождя в соответствии с

методиками, изложенными в рекомендациях ITU-R P.372, P.453, P.531, P.618, P.676, P.678, P.834, P.836, P.837, P.838, P.839, P.840, P.841, P.1511.

Теперь в качестве примера рассмотрим возможность использования данного энергетического потенциала для обеспечения скорости передачи информации  $R_b=50$  Мбит/с в канале «вниз» с использованием технологий стандарта DVB-S2X [6-9]. Выберем из числа возможных в стандарте схему модуляции-кодирования «256APSK-3/4», обеспечивающую наиболее высокую спектральную эффективность, равную 5,9 бит/символ [6]. Тогда для этой схемы требуемое символьное отношение сигнал/шум, соответствующее предусмотренной стандартом вероятности кадровой ошибки  $FER=10^{-5}$ , должно составлять не менее  $E_s/N_0=19,57$  дБ [6]. Фактически достижимое символьное отношение сигнал/шум в канале «вниз» (в разгах) связано с энергетическим потенциалом и информационной скоростью для используемой схемы модуляции-кодирования следующей зависимостью:

$$\left(\frac{E_s}{N_0}\right)_D = \frac{\left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{(3/4)\log_2(256)}}{R_b}.$$

Зависимости символьного отношения сигнал/шум в канале «вниз» от парциальной ЭИИМ соответствуют правой оси ординат на рис. 2. Здесь же пунктирной линией показано требуемое пороговое отношение сигнал/шум. Из рисунка видно, что превышение этого порогового отношения для крейсерского полета самолета обеспечивается при парциальной ЭИИМ более 57,62 дБВт. При этом требуемый энергетический запас и, соответственно, требуемое рабочее значение парциальной ЭИИМ могут быть заданы на последующем этапе детального анализа всех слагаемых в (1). При влиянии дождя требуемые значения ЭИИМ увеличиваются, причем, чем меньше допустимый процент потери надежности по дождю, тем большее рабочее значение ЭИИМ необходимо.

Для повышения энергетической эффективности системы возможно использование других схем модуляции-кодирования, предусмотренных

стандартом DVB-S2X и требующих меньшего порогового отношения сигнал-шум, но в обмен на ухудшение спектральной эффективности [6].

На рис. 3 в качестве еще одного примера показаны энергетический потенциал и символьное отношение сигнал-шум в зависимости от добротности приемной системы при парциальной ЭИИМ 57 дБВт и использовании схемы модуляции-кодирования «32APSK-7/9» (при прочих неизменных условиях).

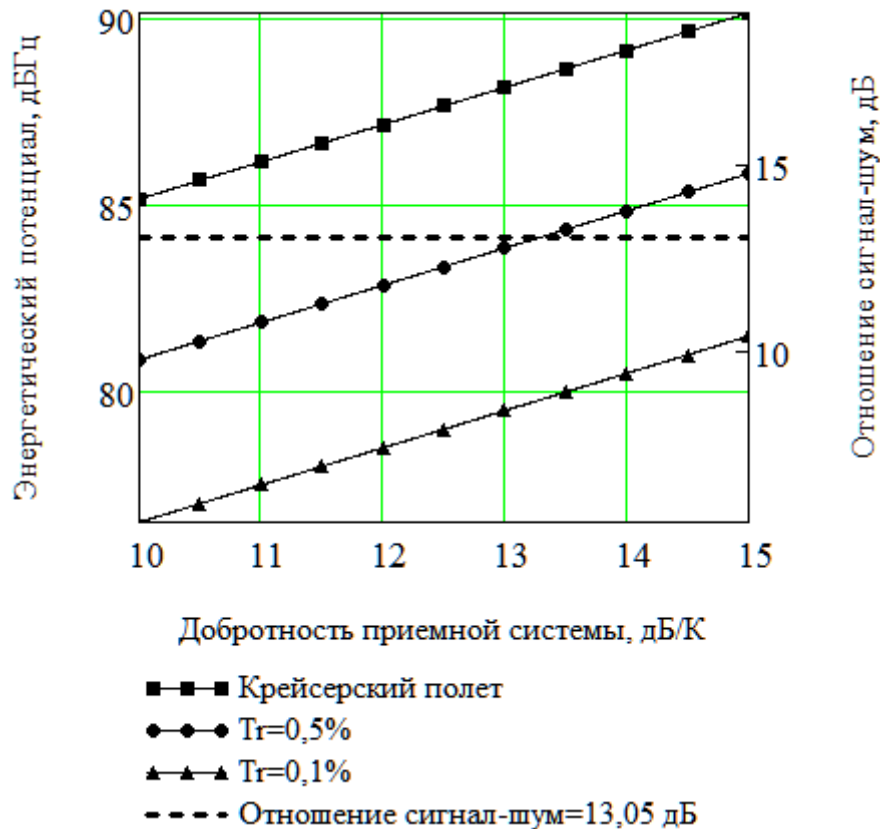


Рис. 3. Энергетический потенциал и символьное отношение сигнал/шум в канале «вниз» в зависимости от добротности приемной системы.

Данная схема обеспечивает спектральную эффективность 3,84 бит/символ и требует символьного отношения сигнал/шум не менее  $E_s/N_0=13,05$  дБ [6].

### 3. О помехоустойчивости приема используемых сигналов

Кроме сигналов M-APSK коммуникационными стандартами DVB-S и DVB-S2/S2X предусмотрено использование и других типов спектрально эффективных сигналов, в частности, многопозиционной фазовой манипуляции (M-PSK) и квадратурной амплитудной манипуляции (M-QAM). Характеристики помехоустойчивости приема таких сигналов на фоне белого



гауссовского шума достаточно хорошо изучены [10]. Однако в реальных радиосистемах передачи информации присутствуют и другие виды помех, как непреднамеренных, так и преднамеренных. Одной из часто встречающихся является гармоническая помеха, например, мешающий узкополосный сигнал соседней радиостанции.

Влияние гармонической помехи на помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов M-PSK, M-QAM и M-APSK было оценено методами статистической радиотехники. Частично результаты приведены в [11,12]. Сравнительные результаты для указанных трех видов сигналов показаны на рис. 4 и 5.

На рис. 4 в качестве примера показаны сравнительные характеристики помехоустойчивости приема сигналов для  $M=16$ . Нижние из пар кривых одинакового стиля соответствуют случаям приема без гармонической помехи, верхние соответствуют случаям прицельной гармонической помехи с интенсивностью  $\mu=0,1$ .

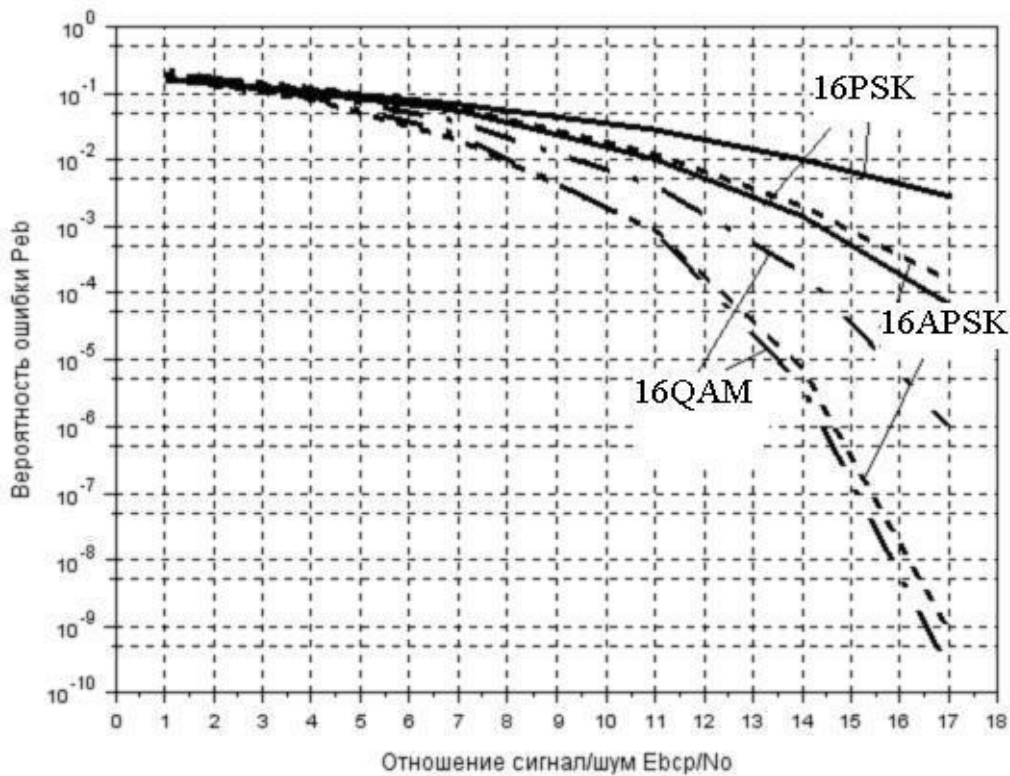


Рис. 4. Сравнение зависимостей вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для многопозиционных сигналов с  $M=16$ .

Анализ показывает, что наименьшей помехоустойчивостью обладает приемник сигналов с многопозиционной M-PSK, а наилучшими характеристиками обладает приемник многопозиционных M-QAM-сигналов. Многопозиционная манипуляция M-APSK занимает промежуточное положение, причем, если без гармонической помехи ее характеристики помехоустойчивости близки к M-QAM, то при наличии помехи качество приема резко падает до уровня M-PSK.

Можно показать, что при интенсивности прицельной гармонической помехи  $\mu=0,1$  для вероятности битовой ошибки  $P_{eb}=10^{-3}$  сигнал 16PSK проигрывает 16QAM около 6 дБ (без помехи – около 3 дБ), а 16APSK – 2,5 дБ (без помехи проигрыша практически нет). При увеличении  $M$  проигрыш растет.

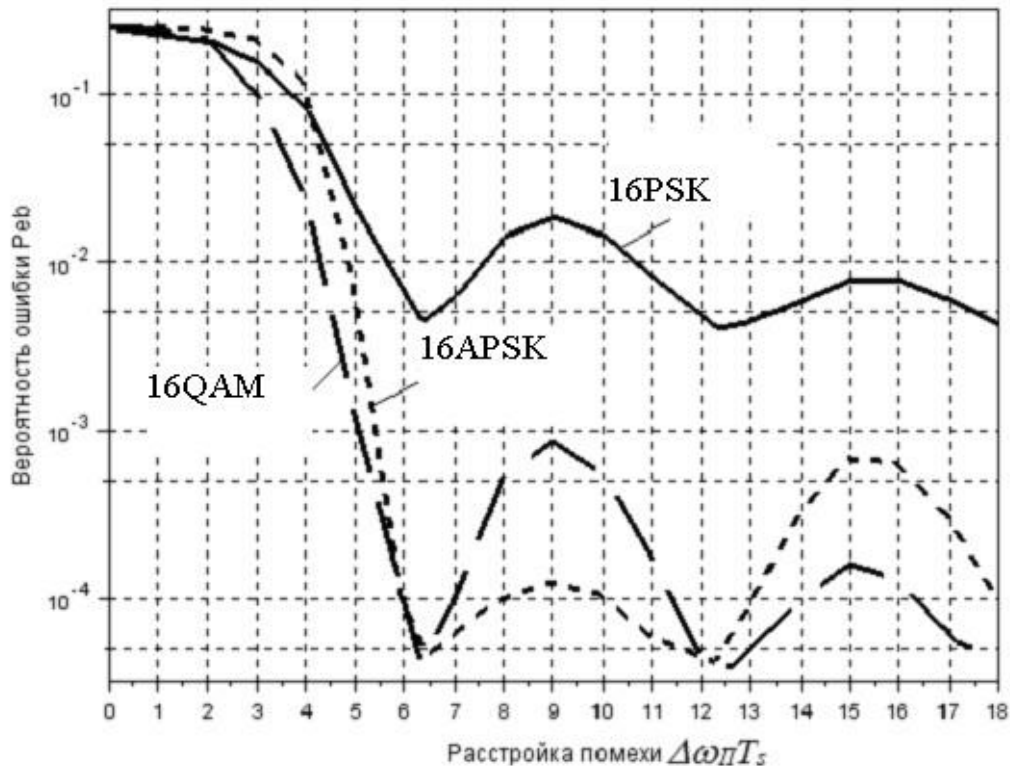


Рис. 5. Сравнение зависимостей вероятности битовой ошибки от расстройки гармонической помехи для многопозиционных сигналов при  $E_b/N_0=13$  дБ,  $\mu=0,5$ .

Сравнительное влияние на помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов расстройки гармонической помехи  $\Delta\omega_{\text{П}} T_s$  ( $T_s$  – длительность канального символа) относительно центральной частоты спектра

полезного сигнала при  $M=16$  (в качестве примера) иллюстрирует рис. 5. По-прежнему наблюдается преимущество многопозиционных сигналов M-QAM. Для них с увеличением расстройки вероятность битовой ошибки падает значительно быстрее. Небольшой проигрыш в среднем имеют сигналы M-APSK и худшие показатели у сигналов M-PSK.

### **Заключение**

Аналогичные расчеты могут быть проведены и при других параметрах системы связи, что позволит сформировать облик перспективной отечественной аэромобильной станции Ka-диапазона, работающей с отечественными спутниками высокой пропускной способности в стандарте DVB-S2X, и разработать алгоритмы управления частотно-энергетическим ресурсом спутников.

### **Литература**

1. Minoli D. Innovations in satellite communications and satellite technology the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2015, 441 p.
2. Swinford R., Grau B. High Throughput Satellites. Delivering future capacity needs. 2015. [Электронный ресурс] URL: [http://www.adlittle.com/downloads/tx\\_adlreports/ADL\\_High\\_Throughput\\_Satellites-Main\\_Report.pdf](http://www.adlittle.com/downloads/tx_adlreports/ADL_High_Throughput_Satellites-Main_Report.pdf) (дата обращения: 15.08.2016).
3. Нестеров А.В., Гавриков Н.С., Лелюх А.А. Структура построения комплексов цифровой связи для летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2018, №7, с. 32-37.
4. Булыгина Ю.В., Нестеров А.В. Разработка комплекса цифровой связи для обеспечения широкополосного доступа к мультимедийным услугам пассажиров на подвижных объектах // Успехи современной радиоэлектроники, 2017, №1, с. 17-22.
5. Ch. McLain, S. Panthi, J. Hetrick. High Throughput Ku-band for Aero Applications. // 30-th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC) 24–27 September 2012, Ottawa, Canada.

6. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2 - S2 Extensions (DVB-S2X). - Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2, March 2015, 183 p.
7. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications Part II: S2-Extensions (DVB-S2X) - (Optional). March 2014. [Электронный ресурс] URL: [https://www.dvb.org/resources/public/standards/a83-2\\_dvb-s2x\\_den302307-2.pdf](https://www.dvb.org/resources/public/standards/a83-2_dvb-s2x_den302307-2.pdf) (дата обращения: 06.11.2018).
8. DVB. [Электронный ресурс] URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x> (дата обращения: 06.11.2018).
9. Koen Willems. DVB-S2X demystified. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/DIALOG/Whitepaper%20DVB\\_S2X.pdf](http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/DIALOG/Whitepaper%20DVB_S2X.pdf) (дата обращения: 06.11.2018).
10. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
11. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/9/text.pdf>. DOI [10.30898/1684-1719.2018.11.9](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9).
12. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А., Нгуен Ван Зунг. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи //Научные технологии, 2018, №11, с. 32-38. DOI: [10.18127/j19998465-201811-06](https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06)

**Для цитирования:**

А. В. Нестеров, А. А. Лелюх, Г. В. Куликов, Н. С. Гавриков. Оценка энергетических характеристик радиолиний перспективных систем спутникового широкополосного доступа для аэромобильных абонентов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/11/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.11