

УДК 621.376.9 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.36.41

Гиперфазовая модуляция в спутниковых системах связи

Е. Н. Вильдерман, аспирант, *vilderman.en@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Выполнено исследование системы связи с гиперфазовой модуляцией, основанной на поверхностно-сферическом ансамбле сигналов из 18 сигнальных точек. Система связи, исследуемая в работе, состоит из передающего устройства с гиперфазовым модулятором, канала с аддитивным белым гауссовским шумом и приемного устройства с гиперфазовым демодулятором.

Разработана имитационная модель системы связи в пакете программ MATLAB Simulink. С помощью имитационной модели подтверждена возможность использования сигнала с гиперфазовой модуляцией в системах связи. Получены вероятности символической ошибки при различных отношениях сигнал/шум в гауссовском канале связи. Проведен сравнительный анализ характеристик сигнала с гиперфазовой модуляцией в сравнении с классическими типами модуляций.

Дана оценка перспектив применения сигналов с гиперфазовой модуляцией в системах передачи данных, в том числе спутникового базирования.

Ключевые слова: система связи, гиперфазовая модуляция, поверхностно-сферический ансамбль, многомерные сигналы, вероятность битовой ошибки

Hyperphase Modulation in Satellite Communication Systems

E. N. Vilderman, postgraduate student, *vilderman.en@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper is a research of a communication system with hyperphase modulation based on a surface-spherical ensemble of signals that contains 18 signal points. The communication system studied in this paper consists of a transmitter with hyperphase modulator, a channel with additive white Gaussian noise, and a receiver with a hyperphase demodulator.

A simulation model of the communication system has been developed in the MATLAB Simulink software package. With the help of the simulation model, it is confirmed, that the application of the signal with hyperphase modulation for communication systems is possible. The probabilities of symbolic and bit errors are obtained for various signal-to-noise ratios in a Gaussian communication channel. A comparative analysis of the characteristics of the signal with hyperphase modulation is carried out in comparison with the classical types of modulations.

The prospects of the use of signals with hyperphase modulation in data transmission systems, including satellite-based, are estimated in this paper.

Keywords: communication system, hyperphase modulation, surface-spherical ensemble of signals, multidimensional signals, symbol error rate

Современные темпы развития информационных и телекоммуникационных сетей диктуют все более жесткие требования к системам связи. Основной акцент делается на увеличении скорости передачи информации и повышении энергетической эффективности систем в ограниченной полосе радиочастот при условии выполнения предъявляемых требований к надежности распознавания переданного сообщения и электромагнитной совместимости беспроводных средств связи [1–3]. В настоящее время проводится большое количество исследований, направленных на достижение требуемых характеристик систем связи. Наиболее актуальным данный вопрос представляется в применении к системам связи спутникового базирования. Разрабатываются новые сигнально-кодовые конструкции, которые могут обеспечить повышенную помехоустойчивость связных систем и более полное использование возможностей, ограниченных предельными соотношениями Найквиста. Одно из таких решений — новый вид модуляции, который назван гиперфазовой модуляцией (ГПФМ) [1]. Такая конструкция характеризуется ортогональным поверхностно-сферическим сигнальным созвездием, позиции которого расположены друг от друга на максимально возможном евклидовом расстоянии. В [1] показано, что применение таких сигнальных конструкций в системах связи с каналом с аддитивным белым гауссовским шумом позволяет добиться высоких значений удельной скорости передачи информации при низкой вероятности ошибки распознавания сообщения в условиях ограниченной полосы радиочастот. К текущему моменту вопрос построения систем связи с гиперфазовой модуляцией (ГПФМ) недостаточно освещен в литературе [1, 4, 5], а технические решения по реализации устройств формирования и приема таких сигналов требуют дополнительных исследований и проработки.

Цель данной работы — провести исследование системы связи с гиперфазовой модуляцией, получить вероятности символьной ошибки при различных отношениях сигнал/шум в канале с аддитивным белым гауссовским шумом. На основе полученных данных провести сравнительный анализ характеристик системы связи с гиперфазовой модуляцией в сравнении с системами с классическими типами модуляции.

Ранее в работе [6] проводилось исследование возможности формирования сигнала с гиперфазовой модуляцией, обладающего минимальным количеством сигнальных позиций. На рис. 1 представлен трехмерный поверхностно-сферический ансамбль, рассматриваемый в [6]. В продолжение намеченного направления исследований система связи, исследуемая в данной работе, построена на основе ранее рассмотренного сигнального ансамбля из восемнадцати сигнальных позиций.

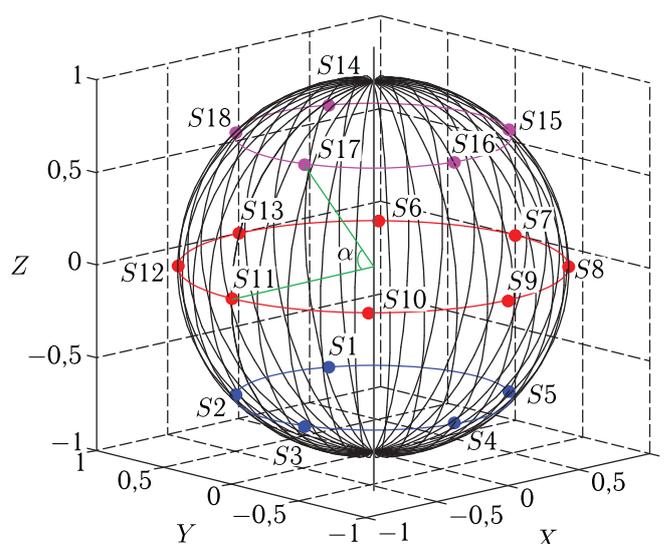


Рис. 1. Сигнальное созвездие поверхностно-сферического ансамбля сигналов с углом места $\alpha = \pi/4$

Разработанная для оценки характеристик системы связи в пакете программ MATLAB Simulink имитационная модель представлена на рис. 2. В ее состав входят формирователь входной псевдослучайной последовательности, модулятор ГПФМ сигнала, канал с аддитивным белым гауссовским шумом, демодулятор ГПФМ сигнала и блок расчета вероятности символьной ошибки.

Модулятор гиперфазового сигнала состоит из блока формирования индексов модуляции, опорных генераторов ортогональных поднесущих (ОГ1–ОГ3), перемножителей (ПМ1–ПМ3) и сумматора (СУМ1).

Демодулятор ГПФМ состоит из трех перемножителей (ПМ4–ПМ6), трех интегрирующих корреляторов (ИНТ1–ИНТ3) и преобразователя индексов модуляции. Разработанная имитационная модель связной системы позволяет рассчитывать вероятность символьной ошибки при различных

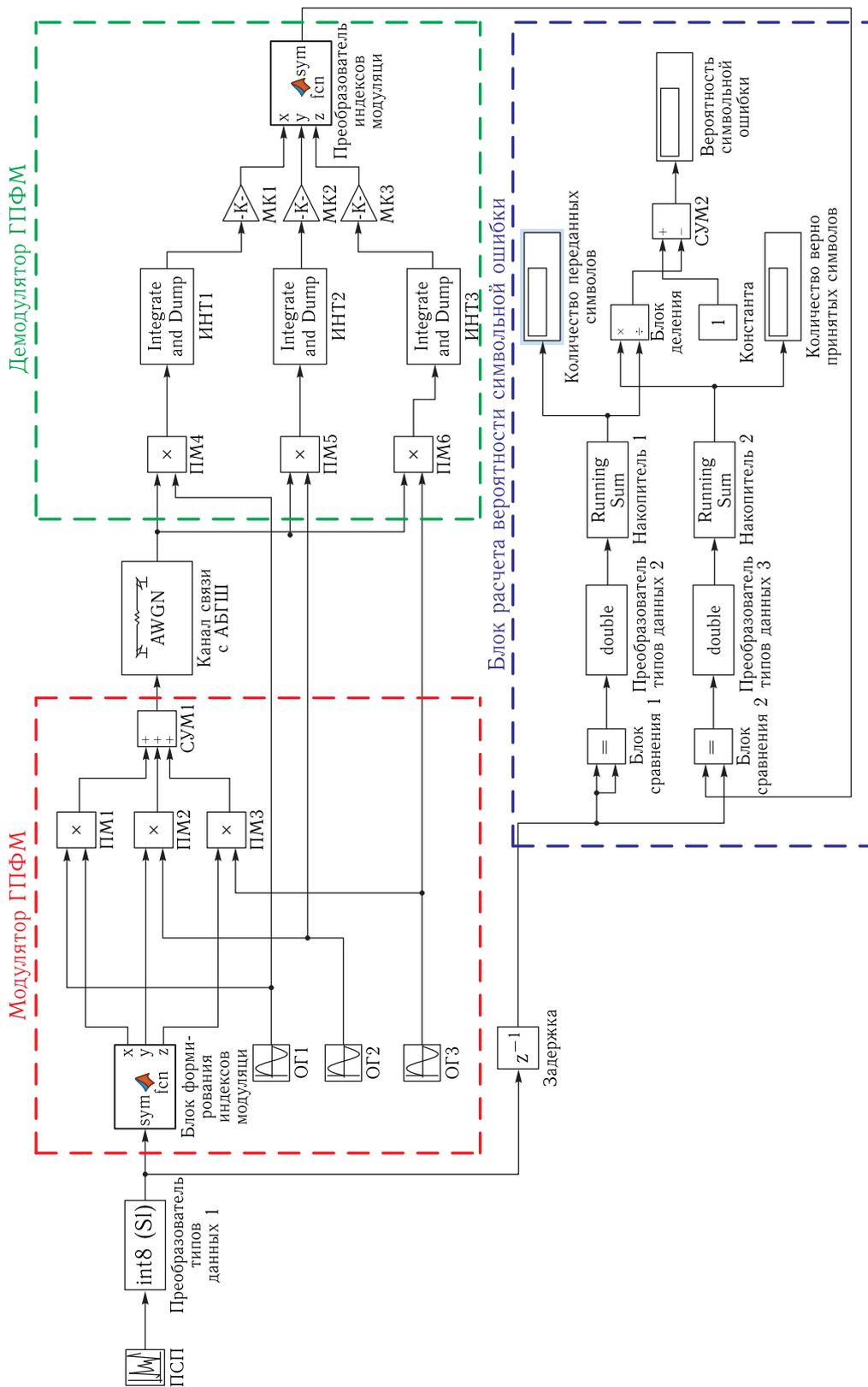


Рис. 2. Имитационная модель системы связи с гиперфазовой модуляцией

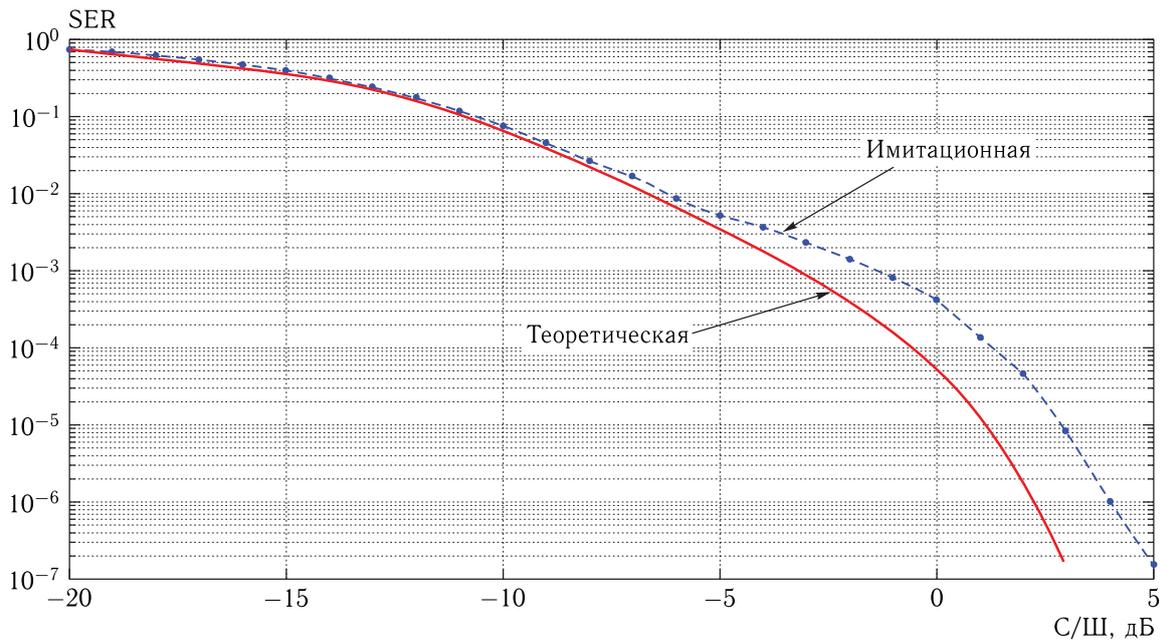


Рис. 3. Зависимость вероятности символьной ошибки сигнала ГПФМ из восемнадцати сигнальных позиций от отношения сигнал/шум

отношениях сигнал/шум в канале связи, а также проводить анализ других характеристик ГПФМ-сигнала.

Полученная в рамках данной работы с помощью имитационной модели зависимость вероятности символьной ошибки сигнала ГПФМ от отношения сигнал/шум представлена на рис. 3.

На рис. 3 видно, что результаты имитационного моделирования стремятся к теоретическому пределу для области $C/N < -5$ дБ. Имеющееся количественное расхождение объясняется погрешностями имитационной модели.

На рис. 4 представлен сравнительный анализ вероятности символьной ошибки сигнала ГПФМ-18 и сигнала ФМ4.

Рассмотрение графиков на рис. 4 показывает, что ГПФМ-сигнал из 18 позиций обладает меньшей вероятностью символьной ошибки, чем сигнал ФМ4 при фиксированном отношении сигнал/шум, начиная от значения -12 дБ. Например, значение вероятности символьной ошибки, равное 10^{-2} , достигается сигналом ГПФМ при отношении сигнал/шум на 9 дБ меньше, чем у сигнала ФМ4. Данное обстоятельство позволяет говорить о высоком потенциале применения ГПФМ-сигнала в системах связи. При предъявлении фиксирован-

ных требований к связной системе по вероятности ошибочного приема сообщений использование ГПФМ-сигнала вместо ФМ4 позволяет значительно снизить требуемую энергетику радиолинии, что может привести к существенному упрощению радиопередающего устройства. Особенно актуально данное обстоятельство для спутниковых систем, так как к ним предъявляются одни из наиболее жестких требований по потребляемой мощности и массогабаритным показателям.

На рис. 5 представлены спектральные плотности мощности сигнала ГПФМ из 18 позиций и сигнала ФМ4 с равными занимаемыми частотными полосами Pf .

Форма спектральной плотности мощности ГПФМ сигнала обусловлена его внутренней структурой. На рис. 5 отчетливо видны локальные максимумы СПМ в пределах основного лепестка ГПФМ-сигнала. Графики на рис. 5 показывают, что ГПФМ-сигнал превосходит сигнал ФМ4 по передаваемой мощности в границах занимаемой полосы частот, что позволяет говорить о его большей энергетической эффективности по сравнению с сигналом ФМ4. В сравнении с сигналом ФМ4 сигнал ГПФМ обладает немного большей скоростью спада боковых лепестков, однако являющейся недоста-

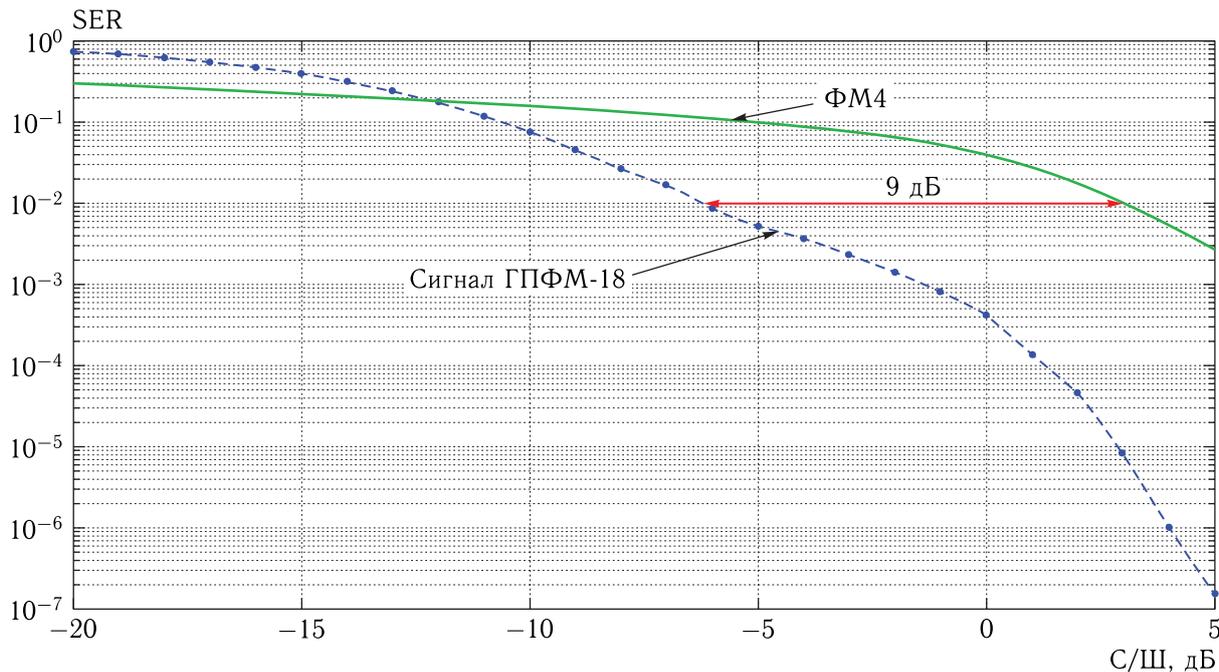


Рис. 4. Сравнительный анализ вероятности символьной ошибки сигнала ГПФМ из 18 позиций и сигнала FM4

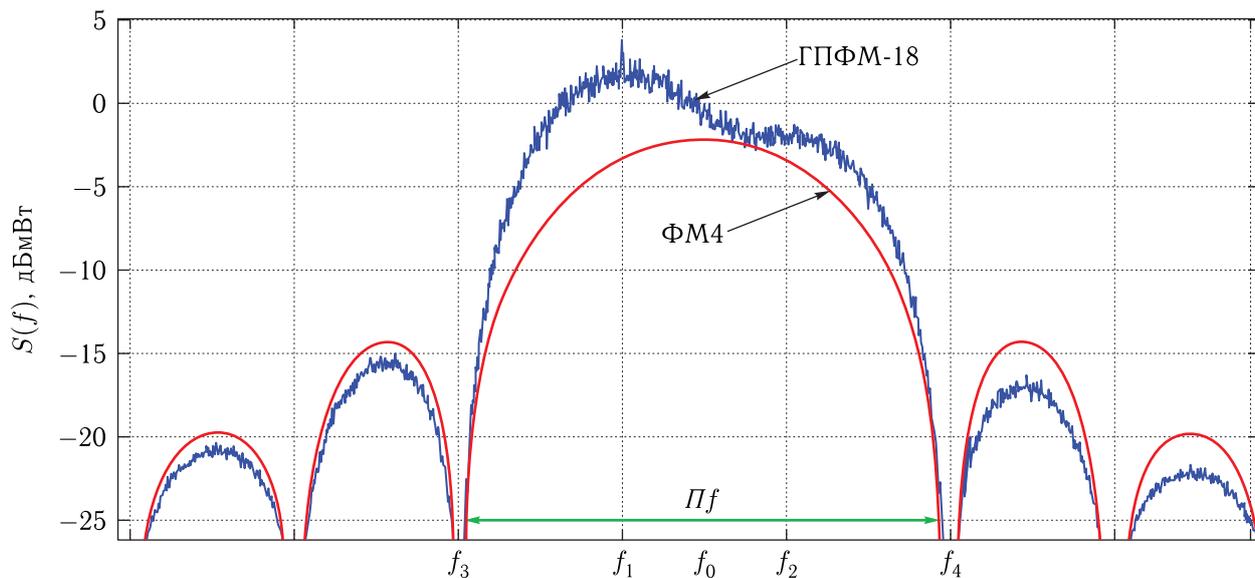


Рис. 5. Спектры сигналов FM4 и сигнала ГПФМ из 18 позиций

точной в условиях современных требований к электромагнитной совместимости. Это обстоятельство не позволяет использовать его в современных связных системах без принятия дополнительных мер. В качестве этих мер для ГПФМ-сигнала так же, как и для классических видов сигналов, могут применяться фильтры Найквиста в устройстве форми-

рования или частотная фильтрация на выходе радиопередающего устройства.

Спектральная плотность мощности ГПФМ-сигнала обладает сложной формой в пределах основного лепестка. Для обеспечения низких значений вероятности неправильного распознавания сообщения на приеме в системе связи с гиперфазовой

модуляцией необходимо, чтобы при прохождении ГПФМ-сигнала через усилительный тракт искажения формы были минимальны. Таким образом, применение ГПФМ-сигнала в системе связи возможно при малых значениях неравномерности амплитудно-частотной характеристики радиопередающего устройства. Это обстоятельство несколько усложняет техническую реализацию радиопередающего устройства, однако на современном уровне развития усилительной техники не будет непреодолимым. Также результаты более раннего исследования [6] показывают, что ГПФМ-сигнал обладает существенным по величине пик-фактором, который приводит к значительному недоиспользованию мощности выходных усилителей.

Полученные в настоящей работе результаты относятся к гипотетическому линейному каналу, количественная оценка пик-фактора ГПФМ-сигнала не проводилась. Дальнейшее исследование данного вопроса будет проведено при помощи усложненной имитационной модели, учитывающей реальные характеристики радиопередающего устройства. По результатам исследования будут сформированы рекомендации по снижению пик-фактора ГПФМ-сигналов.

Результаты исследования указывают на перспективность применения ГПФМ-сигналов в системах связи. Для обеспечения возможности экспериментального подтверждения приведенных в работе результатов необходимо провести проработку технических решений по реализации устройств формирования, усиления мощности, обработки и демодуляции гиперфазового сигнала.

Таким образом, исследована система связи с сигналом с гиперфазовой модуляцией из 18 сигнальных позиций. На основе разработанной имитационной модели получены вероятности символьной ошибки на приеме в системе связи с каналом

с аддитивным белым гауссовским шумом. Проведен сравнительный анализ сигнала ГПФМ с сигналом ФМ4, по результатам которого продемонстрировано, что сигнал ГПФМ обладает меньшей вероятностью символьной ошибки при фиксированном отношении сигнал/шум начиная от значения -12 дБ. Получена спектральная плотность мощности сигнала ГПФМ и выявлены ее характерные особенности. Выявлены направления дальнейших исследований возможности технической реализации системы связи с гиперфазовым сигналом.

Список литературы

1. *Быховский М. А.* Гиперфазовая модуляция — оптимальный метод передачи сообщений в гауссовских каналах связи. М.: Техносфера, 2018. 309 с.
2. *Caldwell J., Tummala M.* Hyper Phase Shift Keying (HPSK) Modulation // 2007 Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 4–7 November 2007 / IEEE Xplore: 11 April 2008. P. 1000–1004.
3. *Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б.* Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия, Телеком, 2018. 279 с.
4. *Caldwell J., Robertson C.* M-ary Hyper phase-shift keying over non-linear satellite channels // 2009 IEEE Military Communications Conference, 18–21 October 2009, IEEE Xplore: 15 January 2010. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5291402/authors#authors> (Дата обращения 04.08.2020)
5. *Forney G. D., Gallager R. G., Lang G. R.* Multidimensional constellations-Part I: Introduction, figures of merit, and generalized cross constellations // IEEE J. Select. Areas Commun., 1989, vol. 7, № 8. P. 941–958.
6. *Вильдерман Е. Н., Белов Л. А.* Формирование сигналов с гиперфазовой модуляцией для систем связи // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов, 2019, № 6. С. 10–15.