РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2021, том 8, выпуск 1, с. 39–47

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

УДК 629.5.058.76 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.39.47

Повышение эффективности телеметрических радиолиний кластера малоразмерных космических аппаратов

А. И. Азаров, к. т. н., azarofff1985@yandex.ru

Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха, Российская Федерация

Е.В.Бударин, *zhenyoker231@yandex.ru*

НИИ Калининградского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН, г. Калининград, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена исследованию энергетической и частотной эффективности частотно-модулированных сигналов с непрерывной фазой. Полученные по результатам исследования значения показателей эффективности позволили дополнить существующие диаграммы эффективности телеметрических радиолиний новыми значениями. Результаты работы упрощают задачу выбора сигналов для обеспечения информационного обмена по телеметрическим радиолиниям кластера в условиях ограничений, накладываемых на энергетические ресурсы.

Проведен анализ показателей эффективности методов угловой модуляции, используемых в современных телеметрических системах. Учтены особенности кластерного построения орбитальной группировки малоразмерных космических аппаратов. Предложено использование частотно-модулированных сигналов с непрерывной фазой, позволяющих повысить энергетическую эффективность телеметрических радиолиний за счет межсимвольных фазовых связей, присущих данному классу сигналов.

По результатам имитационного моделирования определены значения показателей эффективности для предлагаемых сигналов. Учет межсимвольных фазовых связей осуществлен с помощью алгоритма Витерби. Определены значения индексов модуляции частотно-модулированных сигналов с непрерывной фазой, представляющие практический интерес. Применение предлагаемых сигналов позволяет получить энергетический выигрыш до 3 дБ по сравнению с сигналами, используемыми в настоящее время. Выделены значения индексов модуляции, использование которых нецелесообразно.

Ключевые слова: кластер, малоразмерный космический аппарат, диаграмма эффективности, непрерывная частотная модуляция, показатель расхода энергетических ресурсов, помехоустойчивость

Increasing the Efficiency of the Small Spacecraft Cluster Telemetry Radio Links

A. I. Azarov, Cand. Sci. (Engineering), azaroff[1985@yandex.ru

Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great, Balashikha, Russian Federation

E. V. Budarin, zhenyoker@yandex.ru

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the study of the energy and frequency efficiency of frequency modulated signals with a continuous phase. The values of efficiency indicators obtained from the results of the study made it possible to supplement the existing diagrams of the efficiency of telemetric radio lines with new values. The results of the work simplify the task of selecting signals to ensure information exchange via telemetric radio lines of the cluster under the conditions of restrictions imposed on energy resources.

The analysis of efficiency indicators of angular modulation methods used in modern telemetry systems is carried out. The features of the cluster construction of the orbital constellation of small spacecraft are taken into account. The use of frequency modulated signals with a continuous phase is proposed, which makes it possible to increase the energy efficiency of telemetry radio lines due to intersymbol phase connections inherent in this class of signals.

Based on the results of the simulation, the values of performance indicators for the proposed signals are determined. Intersymbol phase connections were taken into account using the Viterbi algorithm. The values of the modulation indices of frequency modulated signals with continuous phase, which are of practical interest, are determined. The use of the proposed signals makes it possible to obtain an energy gain of up to 3 dB in comparison with the signals used at present. The values of the modulation indices, the use of which is impractical, are highlighted.

Keywords: cluster, small spacecraft, efficiency diagram, continuous frequency modulation, energy consumption indicator, noise immunity

Введение

Современные научные и технологические решения в изготовлении образцов ракетно-космической техники позволяют совершить качественный скачок в создании малоразмерных космических аппаратов (МКА) для решения широкого класса целевых задач. Тенденция к уменьшению размеров КА является общемировой [7,9,18]. На рис. 1 представлены некоторые из используемых МКА. Ведутся работы по созданию космических систем на основе МКА.

Космические системы, представляющие собой высокоорганизованные иерархические системы, состоящие из группы МКА различного целевого назначения, управляемых и выполняющих целевую задачу как единый объект, получили название кластеров МКА. Кластерное построение орбитальной группировки МКА позволяет на практике реализовать ряд новых системных эффектов. К основным из них следует отнести возможность комплексирования информации, получаемой от разнородных бортовых комплексов специальной аппаратуры МКА, многодиапазонность и одновременность наблюдения объекта с нескольких МКА, обеспечение эффекта стереосъемки. Появляется возможность не только сократить время между сеансами связи, но и существенно увеличить их длительность.

Значительный объем информации о состоянии контролируемых систем МКА, бортовой аппаратуры и протекающих в них процессах получается в результате регистрации данных с помощью различных видов бортовых датчиков. Использование радиотелеметрических систем дает возможность вести непрерывный контроль состояния МКА.

Организация информационного обмена по телеметрическим радиолиниям (ТМР) с заданными значениями целевых показателей происходит в условиях ограничений на энергетические и частотные ресурсы, накладываемых мощностью передатчиков и международным регламентом радиосвязи соответственно.

Выбор метода и параметров модуляции проектируемой ТМР определяет расход энергетических и частотных ресурсов телеметрической радиолинии при требуемых значениях целевых показателей. Для решения задачи выбора определенного метода модуляции принято использовать диаграммы эффективности ТМР [4–6]. Особенностью ТМР-кластера является дефицит энергетических ресурсов, вызванный миниатюризацией космических аппаратов. В этой связи становится актуальной задача исследования класса сигналов с межсимвольной фазовой связью (МФС), позволяющих повысить энергетическую эффективность ТМР-кластера МКА и нанесения их показателей на известные диаграммы эффективности.



Рис. 1. *a* — CubeSat (США, масса 1,5 кг), *б* — МКА ТНС-0 (Россия, масса 4,8 кг)

Анализ показателей эффективности методов угловой модуляции, используемых в телеметрических радиолиниях

В современных телеметрических радиолиниях для организации информационного обмена применяют разновидности *PSK* (Phase Shift Keying фазовая манипуляция) или *FSK* (Frequency Shift Keying — частотная манипуляция), относящиеся к классу угловой модуляции. При *PSK* в соответствии с символами передаваемого сообщения изменяется фаза гармонического колебания. Сигнал с *PSK* определяется соотношением

$$s(t) = g(t)\cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi(m-1)}{a}\right),$$

где $2\pi f_{\rm c}=\omega$ — частота несущего электромагнитного колебания;

 $\varphi = \frac{2\pi(m-1)}{a}$ — определяет *a* возможных значений фазы несущего электромагнитного колебания (основание кода) в зависимости от поступающих на модулятор символов *m*.

Сигнал с FSK может быть представлен в виде:

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_c t + 2\pi m \Delta f t), \quad 0 \leqslant t \leqslant T_s,$$

где Δf — разнос частот;

Последовательность многоосновных (a > 2) символов источника сообщений отображается в соответствующих сдвигах частоты несущего колебания. Многоосновный FSK-сигнал записывается в виде:

$$s(t) = \operatorname{Re}\left(\sum_{i=0}^{n-1} g(t - kT_s)e^{j2\pi f_d d_k(t - kT_s)}e^{j2\pi f_0(t - kT_s)}\right)$$
$$0 \leqslant t \leqslant T_s,$$

где $g(t - kT_s)$ — частотный импульс, описывающий закон изменения частоты на длительности символьного интервала T_s ;

 d_k — случайная многоуровневая последовательность символов источника сообщения, принимающая значения из множества $\{2i-a-1; i=\overline{1,a}\}$. При сравнении различных видов угловой модуляции, используемых для информационного обмена, пользуются критериями спектральной и энергетической эффективности ТМР [4–6]. Энергетическая эффективность определяется энергией, которую необходимо затратить на передачу 1 бита информации с заданной достоверностью. Удельный расход энергии на передачу 1 бита информации

$$\beta^2 = \frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s}{N_0 \log_2 a},$$
 (1)

где E_b — энергия, затрачиваемая на передачу 1 бита информации.

Спектральная эффективность определяется полосой частот, необходимой для передачи информации с определенной скоростью. Удельный расход необходимой полосы частот на передачу 1 бита информации в 1 секунду —

$$\alpha_{\rm H} = \frac{\Delta f_{\rm H}}{R},\tag{2}$$

где $\Delta f_{\rm H}$ — необходимая полоса частот;

R — скорость передачи информации.

Так как все символы радиосигналов с прямоугольной огибающей, *PCMa–PSK* и *PCMa-* (Differential Phase Shift Keying — относительная фазовая манипуляция) передают на частоте несущей, то для этих сигналов

$$\alpha_{\rm H} = \frac{1}{\log_2 a}.\tag{3}$$

Частота заполнения ортогональных в усиленном смысле радиосигналов *PCMa–FSK* принимает *a* различных значений, поэтому удельный расход частот для такого сигнала определяется по формуле

$$\alpha_{\rm H} = \frac{a}{\log_2 a}.\tag{4}$$

Удельный расход энергии и удельный расход необходимой полосы частот связаны друг с другом предельным соотношением (5), которое позволяет теоретически обосновать весьма важную для практики возможность взаимообмена энергетических и частотных ресурсов радиолинии при использовании многоосновных методов модуляции и фиксированных вероятности P_6 ошибки на бит и скорости (R = const) передачи информации:

$$\beta^2 = \alpha_{\rm H} \left(2^{\frac{1}{\alpha_{\rm H}}} - 1 \right). \tag{5}$$

Существенной особенностью ТМР-кластера является значительное снижение мощности передатчиков МКА, вызванное отсутствием возможности установить на них мощные системы электропитания. Указанная особенность негативно сказывается на помехоустойчивости ТМР. Помехоустойчивость двоичных цифровых линий связи определяется вероятностью P_6 ошибки на бит:

$$P_{\rm d} = \left[1 - \Phi\left(\sqrt{\beta^2(1 - K_{1,2})}\right)\right]$$

где $K_{1,2}$ — коэффициент корреляции;

 $\Phi(x)$ — табулированная функция Крампа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{\frac{z^2}{2}} dz = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{er} f\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right).$$

Снижение помехоустойчивости приводит к искажению телеметрических данных и невозможности получить объективную информацию о техническом состоянии МКА. В связи с этим остро встает вопрос повышения энергетической эффективности ТМР. Традиционным способом повышения помехоустойчивости представляется использование помехоустойчивого кодирования. Однако указанный способ связан с внесением избыточности в передаваемую последовательность, что влечет повышенный расход частотного ресурса. Кроме того, для организации информационного обмена предписано использовать методы модуляции с эффективным применением полосы частот, позволяющие выполнить требования к занимаемому частотному диапазону и обеспечить требуемый уровень внеполосных излучений *ρ* [7,8].

Исследование частотно-модулированных сигналов с непрерывной фазой. Экспериментальное определение показателей эффективности

В связи с вышесказанным перспективным направлением представляется исследование частотно-модулированных сигналов с непрерывной фазой (ЧМНФ). В международной практике данные сигналы получили обозначение *CPM* (Continuous Phase Modulation — частотная модуляция с непрерывной фазой). *CPM* представляет собой усовершенствованный вид частотной манипуляции и позволяет повысить помехоустойчивость TMP за счет МФС, присущих данному классу сигналов [9–17]. Комплексный анализ энергетических и спектральных характеристик сигналов с *CPM* наиболее полно представлен в [9, 13].

В общем случае сигнал с *СРМ* на выходе модулятора имеет вид:

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(\omega t + \varphi(t:I_n)\right) \quad 0 \leqslant t \leqslant NT,$$

где $\varphi(t:I_n)$ — приращение фазы несущего колебания;

I_n — значение *n*-го символа видеосигнала.

Приращение фазы несущего колебания определяет закон изменения фазы сигнала с *СРМ* на границе символьного интервала:

$$\begin{split} \varphi(t:I_n) &= 2\pi f_{\mathrm{m}}T\sum_{k=-\infty}^{n-1}I_k + 2\pi f_{\mathrm{m}}q(t-nT) = \\ &= \theta_n + 2\pi h I_n q(t-nT), \end{split}$$

где θ_n — начальная фаза *n*-го символа радиосигнала;

q(t) — фазовый импульс (ФИ), определяющий закон приращения фазы на длительности символа радиосигнала;

h — индекс модуляции, определяющий спектральные свойства и энергетическую эффективность сигналов с *CPM*.

Множество различных символов сигналов с *СРМ* отличаются не только значениями частоты, но и значениями начальной фазы, вследствие чего соседние символы обладают МФС, т. к. начальная фаза любого символа зависит от значений нескольких предыдущих информационных символов [10,13, 14, 16, 17]. В этом случае повышение помехоустойчивости достигается за счет использования оптимального алгоритма приема, позволяющего учесть корреляционные связи между символами передаваемого сигнала. В настоящее время широкое практическое применение получил лишь один сигнал с *СРМ* — сигнал *MSK* (Minimum Shift Keying — сигнал с минимальной частотной манипуляцией), представляющий собой *СРМ* с h = 0,5. МФС в данном случае простирается всего на два символьных интервала, что существенно упрощает программную и аппаратную реализацию устройств приема и формирования сигналов с *MSK*. Однако современная элементная база позволяет разрабатывать приемники и передатчики с отличными от h = 0,5 индексами модуляции, использование которых позволит повысить энергетическую эффективность TMP.

В связи с тем, что расчет показателей эффективности для сигналов с *CPM* связан с интегрированием сложных тригонометрических функций значения показателей эффективности, оценка спектральной плотности мощности для данных сигналов была получена по результатам имитационного моделирования.

Посредством пробного пакета MATLAB 2016b была разработана модель телеметрической радиолинии с *СРМ*. В качестве модели канала связи взята модель канала с АБГШ. Декодирование принимаемой последовательности осуществляется по алгоритму Витерби, позволяющему учесть МФС, присущую сигналам с *СРМ* [11, 12].

Достоверность результатов обеспечена совпадением полученных при проведении имитационного моделирования значений показателей эффективности известных радиосигналов с их априорно известными значениями. Так, для сигналов с BPSK (Binary Phase Shift Modulation — двоичная фазовая манипуляция), QPSK (Quaternary Phase Shift Modulation — фазовая манипуляция с основанием кода 4) и сигнала с MSK для обеспечения вероятности ошибки на $P_{\rm 6} = 10^{-3}$ значения показателей $\beta^2 = 6,7$. Равенство показателей эффективности для данных сигналов объясняется тем, что QPSK представляет собой эффективную комбинацию двух сигналов с BPSK, которые передаются на ортогональных компонентах несущего электромагнитного колебания. Оценка спектральной плотности мощности для сигнала с MSK совпадает с результатами, опубликованными в [9-11, 13, 17].

Ввиду того, что кластер МКА представляет собой элемент космического базирования, к радиолиниям передачи телеметрической информации предъявляются требования не только отечественных, но и международных стандартов к уровню внеполосных излучений. Международные стандарты и рекомендации предлагают для оценки радиосигналов по требованиям к внеполосным излучениям использовать спектральные маски, которые представляют собой аппроксимацию спектральной плотности мощности (СПМ) прямыми линиями по точкам, соответствующим заданным уровням СПМ. Спектральные маски стандартов *CCSDS* (*SFCG* 21-2) устанавливают ограничения на допустимые уровни излучения в спектре передаваемого сигнала [8,9,15].

При проведении моделирования для уменьшения уровня внеполосных излучений использовались предмодуляционные фильтры нижних частот (ФНЧ) Гаусса с частотой среза *BTR*, где *BT* произведение полосы фильтра по уровню —3 дБ на длительность информационного символа.

Импульсная характеристика ФНЧ Гаусса определяется в соответствии с (6):

$$h(t) = R\sqrt{\frac{2\pi}{\ln 2}}e^{\frac{-(R\pi t)^2}{\ln 2}}.$$
 (6)

Оценка СПМ для исследуемых сигналов представлена на рис. 2 для *R*: *a*) менее 2 Мбит/с, *б*) более 2 Мбит/с. Как видно, использование ФНЧ Гаусса для сглаживания информационных символов обеспечивает более высокую скорость спада боковых лепестков энергетического спектра и уменьшает уровень внеполосных излучений.

Полученные по результатам моделирования оценки показателей эффективности сигналов с *СРМ* представлены в таблице.

Практический интерес представляет сигналы с индексом модуляции h в диапазоне значений от 0,5 до 0,8, обладающие помехоустойчивостью выше, чем у известных двоичных сигналов с угловой модуляцией. Сигналы с *СРМ* с индексом модуляции h < 0,5 обладают сравнительно низкой помехоустойчивостью (рис. 3), и их использование для организации информационного обмена в ТМР-кластера МКА нецелесообразно.

На рис. 3, а представлены зависимости оценки вероятности P_6 ошибки на бит от используемого индекса h модуляции. Рис. 3, б иллюстрирует влияние использование ФНЧ Гаусса на P_6 для сигналов с *СРМ*, представляющих практический интерес.



Рис. 2. Зависимость нормированной СПМ исследуемых сигналов с *CPM* от f/R (объяснение в тексте) Таблица. Значения показателей эффективности телеметрических радиолиний с угловой модуляцией для $P_6 = 10^{-3}$ и $\rho = -10$ дБ

Вид ресурса	Удельный показатель расхода частотных ресурсов, $\alpha_{\rm H}$				Удельный показатель расхода энергетических ресурсов, β^2 , дБ			
Основание кода, <i>а</i>	PCMa-PSK	$\begin{array}{l} PCMa\text{-}FSK\\ (h=1) \end{array}$	РСМа-СРМ		PCMa-PSK	PCMa-FSK	РСМа-СРМ	
			$lpha_{_{ m H}}$	h		(h = 1)	eta^2	h
2	1	2	0,78	0,5	6,7	9,8	6,7	0,5
			0,93	0,6			6	0,6
			0,97	0,7			5,8	0,7
			1	0,8			6,1	0,8
			1,2	0,9			7	0,9
4	0,5	2	2,77	0,82	6,7	7,27	4,15	0,82
8	0,33	4	5,8	0,88	10,1	6,05	3,15	0,88



Рис. 3. Зависимость P₆ от индекса h модуляции сигналов с CPM (объяснение в тексте)

По результатам имитационного моделирования установлено, что использование двоичных сигналов с *СРМ* с индексом модуляции h = 0,7 позволяет добиться энергетического выигрыша:

– $\Delta\beta^2$ в 0,9 дБ по сравнению с фазовой манипуляцией (*BPSK* и *QPSK*) и сигналом с *MSK*;

– $\Delta\beta^2$ в 3 дБ по сравнению с частотной манипуляцией с разрывом фазы (*FSK*-2);

– $\Delta\beta^2$ в 1,47 дБ по сравнению с *FSK*-4 для поддержания вероятности ошибки на бит на уровне $P_6 = 10^{-3}$ [18].

Использование в ТМР *СРМ*-4 дает выигрыш $\Delta \beta^2 = 2,55 \, \mathrm{дB}$ по сравнению с *BPSK*, *QPSK* и *MSK*. Однако платой за $\Delta \beta^2$ в этом случае становится увеличение расхода частотных ресурсов $\Delta \alpha_{\mathrm{H}}$ на 1,77 по сравнению с *BPSK*. Также установлено, что использование гауссовского фильтра приводит к незначительному увеличению P_6 для соответствующих h (рис. 3, δ).

Построение диаграммы эффективности ТМР, дополненной значениями показателей сигналов с *СРМ*. Практические рекомендации по проектированию ТМР-кластера МКА

Любая ТМР может быть представлена точкой на диаграмме эффективности в координатах β^2 и $\alpha_{\rm H}$ (рис. 4). При этом точки, отображающие реальные радиолинии, лежат выше предела Шеннона. Сравнение реальных телеметрических радиолиний при этом корректно, если оно проводится при фиксированных значениях вероятности P_6 ошибки на бит и допустимого уровня внеполосных излучений ρ .

Полученные по результатам исследования значения позволили дополнить известные диаграммы эффективности ТМР, что облегчает решение задачи выбора сигналов с *СРМ* для их использования в условиях ограничений, накладываемых на энергетические и частотные ресурсы.



Рис. 4. Диаграмма эффективности телеметрических радиолиний кластера МКА

При проектировании ТМР-кластера МКА необходимо учитывать требования отечественных и международных стандартов, регламентирующих выделенную полосу частот и предельно допустимый уровень внеполосных излучений ρ , требования к скорости и помехоустойчивости передачи информации, сложность реализации бортовых передатчиков и наземных приемников.

Для требуемых P_6 и ρ выбирается диаграмма эффективности. Исходя из ограничений на частотные и энергетические ресурсы производится расчет допустимых значений показателей эффективности по (1), (2). На диаграмме эффективности определяется область допустимых значений (ОДЗ). Из известных сигналов, попавших в ОДЗ, предлагается выбрать сигнал, обеспечивающий максимальную энергетическую эффективность (минимальный расход энергетических ресурсов β^2). Для двоичных ТМР предлагается сигнал с *CPM* h = 0,7, обеспечивающий лучшую помехоустойчивость среди СРМ-2, что подтверждается результатами, опубликованными в [1, 9-11, 13]. Для CPM-4 может быть использован сигнал с h == 0,82 [11,13,16]. Для удовлетворения требований к ρ предлагается использовать предмодуляционный ФНЧ Гаусса с BT = 0,3.

Окончательное решение об использовании того или иного основания кода, метода и параметров модуляции принимается исходя из анализа требуемых значений вероятности P_6 ошибки на бит, скорости

передачи информации, а также ограничений, накладываемых на энергетические и частотные ресурсы телеметрической радиолинии.

Заключение

Использование дополненной новыми значениями диаграммы эффективности позволяет оценить различные варианты компромиссов при организации информационного обмена в ТМР-кластера МКА, например увеличение помехоустойчивости за счет расширения полосы или увеличение эффективности использования полосы частот за счет увеличения вероятности P_6 ошибки на бит.

Результаты исследования позволили выделить ряд сигналов, обладающих лучшей помехоустойчивостью, чем у используемых в настоящее время *MSK* и *BPSK*, *QPSK*. Установлено, что наибольшей энергетической эффективностью среди двоичных *CPM* обладает сигнал с h = 0,7, среди *CPM-4* — сигнал с h = 0,82. Также установлено, что сглаживание информационных символов приводит к двойственным результатам. С одной стороны, выполняются требования к уровню внеполосных излучений при скорости передачи информации 2 Мбит/с и более. С другой стороны, наблюдается некоторое снижение помехоустойчивости передачи информации.

Использование сигнала с *СРМ*-4 (h = 0,82) значительно повышает энергетическую эффективность по сравнению с *СРМ*-2 (h = 0,7), однако снижает спектральную эффективность TMP. Кроме того, необходимо учитывать, что увеличение основания кода усложняет аппаратную и программную реализацию устройств приема и формирования сигналов с *СРМ*, поскольку возрастает количество возможных вариантов начальных фаз символов, участвующих в МФС.

Таким образом, использование сигналов с *СРМ* в телеметрических радиолиниях кластера MKA за счет свойственных им МФС позволяет повысить энергетическую эффективность ТМР без использования помехоустойчивого кодирования и добиться экономии энергетических ресурсов до 0,9 дБ и 3 дБ по сравнению с *BPSK*, *QPSK* и *FSK*-2 соответственно.

Список литературы

- 1. Азаров А.И. Программа имитационного моделирования радиоканала с непрерывной частотной модуляцией // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019617763 / Дата государственной регистрации в Реестре программ 20 июня 2019 г.
- 2. Анненков А.М. Модель радиоканала с частотной модуляцией и непрерывной фазой // М.: Журнал радиоэлектроники. 2011. № 7. С. 1–17.
- ГОСТ Р 50016-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к ширине полосы радиочастот и внеполосным излучениям радиопередатчиков. Методы измерений и контроля. М.: Госстандарт России, 1992. 60 с.
- ГОСТ Р 56527-2015 Системы телеметрические бортовые. Методы модуляции с эффективным использованием полосы. М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.
- Емельянов П.Б., Парамонов А.А. Дискретные сигналы с непрерывной фазой. М.: Зарубежная радиотехника, 1990. № 12.
- Котенко О.В. Повышение достоверности передачи информации в радиолиниях коротковолновой радиосвязи на основе применения эффективных сигнально-кодовых конструкций. Дис.... канд. техн. наук: 05.12.04. СПб., 2013. 163 с.
- Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред. В. Ф. Фатеева. М.: Радиотехника, 2010. 317 с.
- 8. *Назаров А.В., Козырев Г.И.* Современная телеметрия в теории и на практике. СПб.: Наука и техника, 2007. 672 с.
- Потюпкин А.Ю., Данилин Н.С., Селиванов А.С. Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетнокосмическое приборостроение и информационные системы, 2017, № 4. С. 45–56.
- 10. *Прокис Дж.* Цифровая связь: монография. М.: Радио и связь, 2000. 282 с.
- 11. *Резвецов Н.Б., Васильев В.В., Аношкин А.В.* Системный анализ измерительных комплексов. М.: PBCH, 1994. 500 с.
- 12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2007. 751 с.

- Aulin T., Sundberg W. Continuous phase modulation. Part I: Full response signaling // IEEE Transactions on Communications, 1981, vol. 29, № 3. P. 196–209.
- Aulin T., Sundberg W. Continuous phase modulation. Part II: Partial response signaling // IEEE Transactions on Communications, 1981, vol. 29, № 3. P. 210-225.
- CCSDS 401.0 B Radio Frequency and Modulation Systems — Part 1: Earth Stations and Spacecrafts. Yellowbook, June 2001.
- 16. *Detwiler* T. Continuous phase modulation for high speed fiber-optic links. A thesis presented to the aca-

demy faculty // Georgia Institute of Technology, 2011. 177 p.

- 17. ITU-T Recommendation G.826 «End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit rate digital paths and connections» 2002.
- Small space technology state of the art / NASA. 2015, Rev. 1. P. 173.
- 19. Xue W., Shang W. A phase trajectories optimization method for CPM signal based on Pan-function model // Eurasia Journal on Advances in Signal Processing, 2016, № 55. P. 1-12.