

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.396

*Д. Ю. Поленов*СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОРТОВЫХ
РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ*D. Yu. Polenov*COMPARATIVE EVALUATION OF ADVANCED METHODS
OF EFFICIENCY BOARD TELEMETRIC SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследований является эффективность бортовых радиотелеметрических систем контроля ракет-носителей. Предметом исследований являются методы повышения эффективности бортовых радиотелеметрических систем. Целью исследований является проведение сравнительной оценки предлагаемых перспективных методов повышения эффективности бортовых радиотелеметрических систем с существующими. **Результаты.** Для оценки предлагаемых методов введено понятие эффективности бортовых радиотелеметрических систем, под которым понимается повышение точности принятой на Земле телеметрической информации (ТМИ) и сокращение расхода как частотных, так и энергетических ресурсов радиолинии. В статье проведено сравнение характеристик существующих телеметрических систем с системами, создаваемыми на основе применения рассматриваемых методов. В результате чего показана целесообразность и эффективность применения вторых для организации систем радиосвязи Борт–Земля. **Выводы.** Предлагаемые в статье методы позволяют: повысить достоверность принятой ТМИ и снизить значение отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума за счет использования многопозиционного кодирования; сузить ширину полосы Найквиста за счет применения квадратурной амплитудной манипуляции.

A b s t r a c t. Background. The object of research is the efficiency of onboard telemetry launch vehicle control systems. The subject of research are methods of improving the efficiency of on-board telemetry system (BRTS). The purpose of research is to conduct a comparative assessment of proposed advanced methods of increasing the efficiency of onboard telemetry systems with existing ones. **Results.** To evaluate the proposed methods introduce the concept of efficiency BRTS, which is understood to increase the accuracy adopted in the world of telemetry information (TMI) and reducing consumption of both frequency and power the radio resources. The article compared the characteristics of the existing telemetry systems with system created on the basis of application of these methods. As a result, it shows the feasibility of the second radio communication systems for the organization Launch-Earth. **Conclusions.** The proposed Article methods allow: to increase the accuracy of the adopted TMI and reduce the value

of the bit energy-to noise power spectral density through the use of multi-point encoding; to narrow the width of the Nyquist bandwidth through the use of quadrature amplitude modulation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиосвязь, телеметрическая информация, бортовая радио-телеметрическая система, манипуляция несущей частоты.

Key words: radio, telemetric information, board radio telemetry system, carrier frequency shift keying.

Постоянное повышение требований к информационно-телеметрическому обеспечению (ИТО) перспективных ракет-носителей (РН) в части объема передаваемой с борта РН и точности принимаемой телеметрической информации (ТМИ) подталкивает разработчиков бортовых радиотелеметрических систем (БРТС) к поиску:

- а) путей совершенствования существующих БРТС;
- б) новых методов повышения эффективности ИТО запусков РН в части передачи ТМИ с борта РН.

Проведенные исследования позволили предложить ряд возможных методов решения задачи повышения эффективности БРТС [1]. К наиболее перспективным методам совершенствования ИТО РН по показателям «ожидаемый результат внедрения» и «оперативность внедрения» целесообразно отнести следующие [2]:

- 1) применение квадратурной амплитудной манипуляции несущей частоты;
- 2) применение многопозиционного кодирования;
- 3) применение обоих методов одновременно.

Оценим эффективность указанных выше методов. В нашем случае под эффективностью БРТС РН будем понимать повышение точности принятой на Земле ТМИ и сокращение расхода как частотных, так и энергетических ресурсов радиолинии.

Для проведения такой оценки сравним значения основных характеристик создаваемой на основе указанных выше методов ТС с аналогичными характеристиками существующих ТС, созданных на основе применения в качестве БРТС широко распространенных БРТС «Скут-40» (применяется, например, на РН «Протон-М») и «Орбита IV» (применяется на РН семейства «Ангара» и других изделиях).

Для подтверждения целесообразности применения многопозиционной квадратурной амплитудной манипуляции (КАМн) проведем сравнительный анализ ее применения с фазовой манипуляцией (ФМн), применяемой в БРТС «Орбита IV», и частотной манипуляции (ЧМн). Анализ будет осуществляться в сравнении приведенных манипуляций по показателям зависимости значения битовой ошибки (P_b) от отношения энергии бита к спектральной плотности

мощности шума $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$, а также значению евклидова расстояния ($d_{\text{ФМн}}$ и $d_{\text{КАМн}}$) между соседними точками созвездия передаваемого сигнала.

Отметим, что вероятность битовой ошибки для ФМн с основанием кода M определяется выражением [3, с. 470]:

$$P(e) = \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erf}(z), \quad (1)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ – функция ошибки,

$$z = \sin \frac{\pi}{M} \left(\sqrt{\log_2 M} \right) \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right). \quad (2)$$

Вероятность битовой ошибки для М-ЧМн определяется выражением [4, с. 257]:

$$P(e) \leq (M-1)Q\left(\sqrt{\frac{E_b \log_2 M}{N_o}}\right), \quad (3)$$

где $Q(x)$ – гауссов интеграл ошибок.

Выражение для вероятности ошибки для L -уровневой КАМ имеет вид [3, с. 473]:

$$P(e) = \frac{1}{\log_2 L} \left(\frac{L-1}{L} \right) \operatorname{erfc}(z), \quad (4)$$

где $\operatorname{erfc}(z)$ – дополнительная функция ошибок,

$$z = \frac{\sqrt{\log_2 L}}{L-1} \sqrt{\frac{E_b}{N_o}}. \quad (5)$$

На основе выражений (1)–(5) построим соответствующие графики (рис. 1–3) указанных зависимостей.

На рис. 1 представлены графические зависимости $\frac{E_b}{N_o}$ от позиционности кода для M -ФМн.

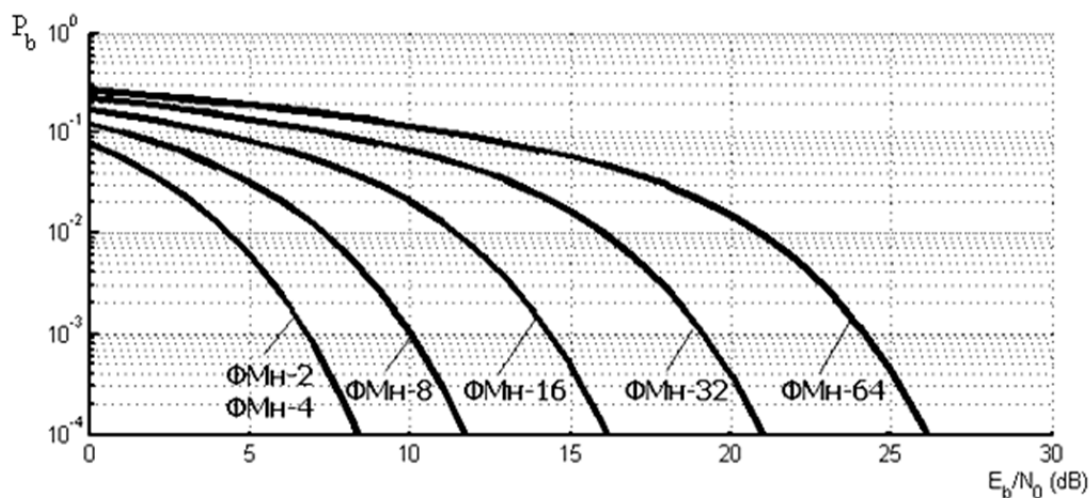


Рис. 1. Графики зависимости P_b от $\frac{E_b}{N_o}$ для M -ФМн

На рис. 2 представлены графические зависимости $\frac{E_b}{N_o}$ от позиционности кода для M -ЧМн.

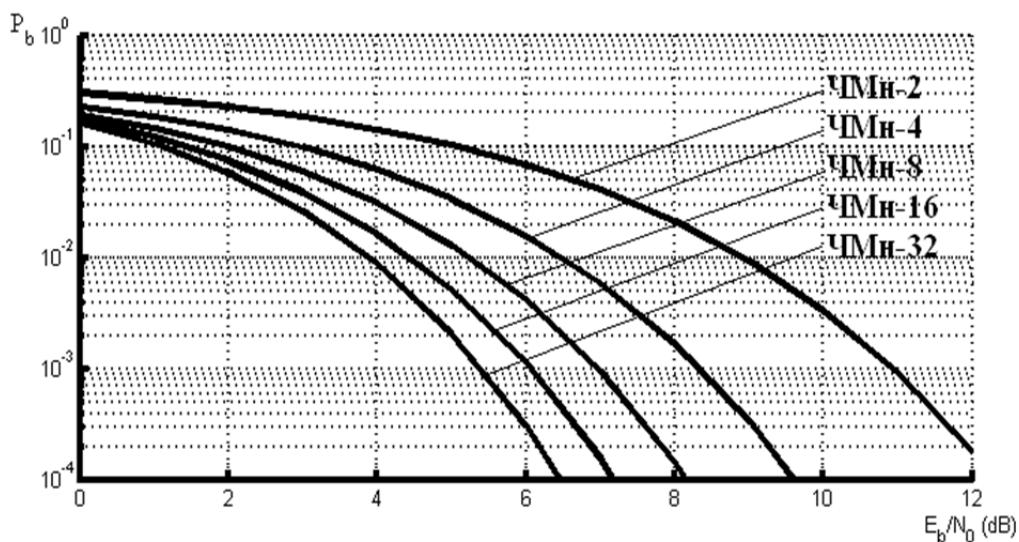


Рис. 2. Графики зависимости P_b от $\frac{E_b}{N_o}$ для M -ЧМн

На рис. 3 представлены графические зависимости P_b от $\frac{E_b}{N_0}$ для КАМн при различной позиционности кода.

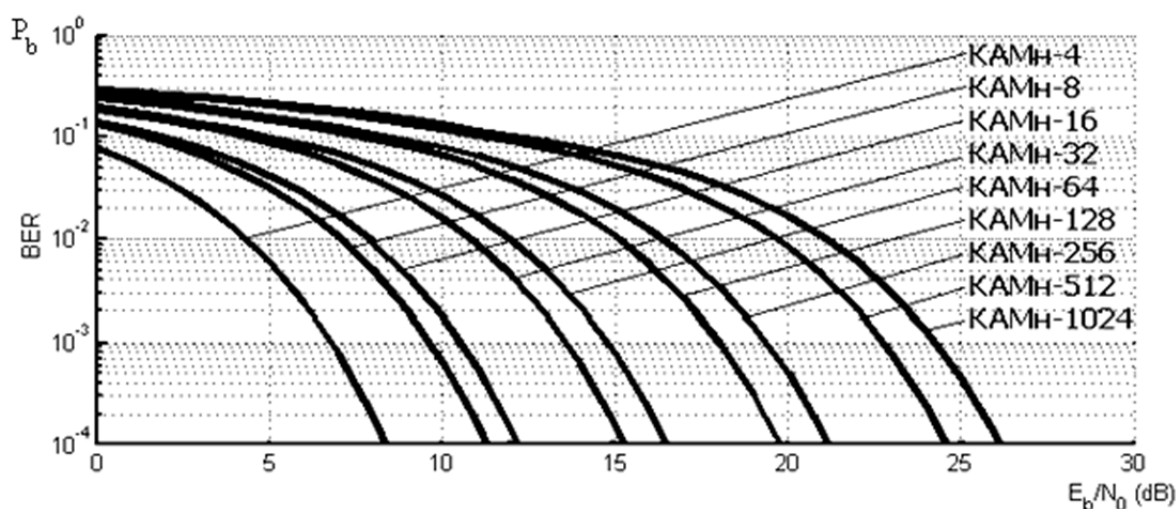


Рис. 3. Графики зависимости P_b от $\frac{E_b}{N_0}$ для М-КАМн

Анализ графиков рис. 1–3 показывает, что при увеличении позиционности кода при ЧМн заметна тенденция к снижению требуемого значения отношения $\frac{E_b}{N_0}$ для поддержания требуемого (как правило, для систем радиосвязи (СРС) Борт–Земля $P_b = 10^{-4}$) уровня вероятности P_b . Это обусловлено тем, что при увеличении основания кода пропорционально увеличивается расход полосы частот радиополосы. В свою очередь повышение позиционности при ФМн и КАМн требует повышения отношения $\frac{E_b}{N_0}$ в СРС при неизменном расходе полосы частот радиополосы (рис. 4).

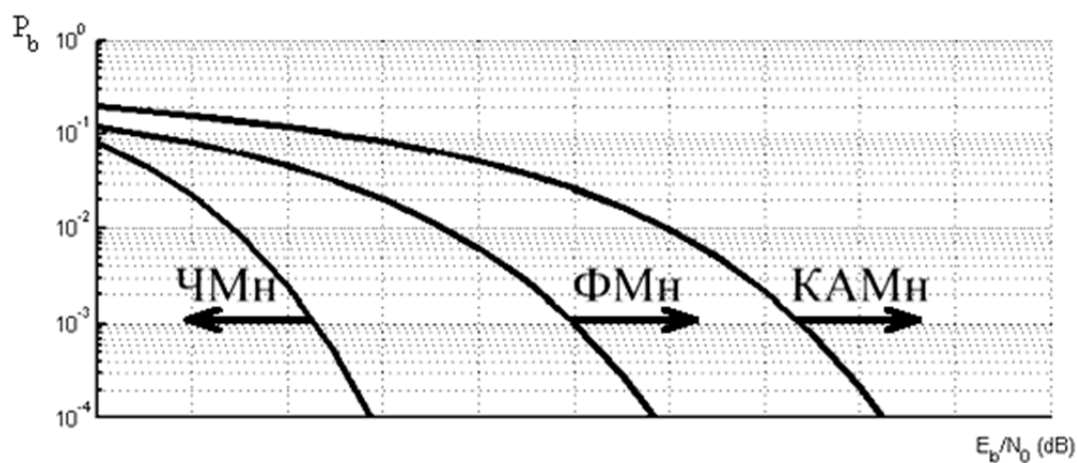


Рис. 4. Направления изменения значения $\frac{E_b}{N_0}$ для различных видов манипуляций при росте позиционности кода

В табл. 1 приведены соответствующие значения зависимости вероятности $P_b=10^{-4}$ от отношения $\frac{E_b}{N_o}$, а также значения минимальной ширины полосы Найквиста для разного вида манипуляций несущей.

Таблица 1

Значения отношения $\frac{E_b}{N_o}$ и ширины полосы Найквиста для различных видов манипуляций и значениях позиционности кода

Позиционность кода (M)	Вид манипуляции несущей					
	ЧМн		ФМн		КАМн	
	$\frac{E_b}{N_o}$, дБ	B , кГц	$\frac{E_b}{N_o}$, дБ	B , кГц	$\frac{E_b}{N_o}$, дБ	B , кГц
2	12,2	2480	8,4	640	—	—
4	9,5	2480	8,4	320	8,3	320
8	8,2	2480	11,7	160	11,3	160
16	7,2	2480	16,1	80	12,2	80
32	6,5	2480	21	40	15,3	40
64	—	—	26,1	20	16,5	20
128	—	—	—	—	19,7	10
256	—	—	—	—	21	5
512	—	—	—	—	24,5	2,5
1024	—	—	—	—	26	1,25

П р и м е ч а н и е. В качестве примера используются значения $f_b=640$ кбит/с и $\Delta f=600$ кГц, соответствующие БРТС «Скут-40».

Значение ширины полосы частот Найквиста для ФМн и КАМн определяется выражением [3, с. 415]:

$$B = \frac{f_b}{\log_2 M}, \quad (6)$$

где f_b – скорость передачи, бит/с.

Значение ширины полосы частот Найквиста для ЧМн определяется выражением [3, с. 419]:

$$B = 2(\Delta f + f_b), \quad (7)$$

где Δf – отклонение (девиация) частоты.

Анализ значений табл. 1 показывает, что в случае использования M -ЧМн при повышении позиционности кода ($M \uparrow$) снижается необходимое для точного приема ТМИ значение отношения сигнал/шум $\left(\frac{E_b}{N_o} \downarrow\right)$. Однако в случае дальнейшего ($M \geq 16$) повышения позиционности кода при использовании M -ЧМн резко увеличивается ширина полосы частот (B). Тем самым существенно повышается вероятность искажения сигнала на «особых участках» полета РН, что является недопустимым [5]. Необходимо отметить и большие требуемые значения

$\frac{E_b}{N_o}$ и B для передачи ТМИ на уровнях позиционности кода $M \leq 4$ для ЧМн в сравнении с ФМн и КАМн. Что касается сравнения M -ФМн с M -КАМн, то по значению ширины полосы они всегда равнозначны. Что касается значений $\frac{E_b}{N_o}$, то до значения позиционности кода

$M = 8$ оба вида манипуляций сопоставимы по значениям $\frac{E_b}{N_o}$, несмотря на незначительный

выигрыш M -КАМн. Дальнейшее же повышение позиционности ($M=16, 32, \dots, 1024$) показывает существенную разницу в минимально необходимых для точного приема ТМИ значениях $\frac{E_b}{N_o}$ у КАМн. Вышесказанное позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение M -ЧМн при малых значениях позиционности кода ($M=2 \dots 4$) проигрывает M -ФМн и M -КАМн как по требуемому для точного приема ТМИ значению $\frac{E_b}{N_o}$ в $\sim 1,45$ и $\sim 1,1$ раза соответственно, так и по ширине полосы B в 3,875 и 7,75 раза соответственно.

2. Применение M -ЧМн при дальнейшем повышении позиционности кода ($M \geq 8$) снижает требуемый уровень $\frac{E_b}{N_o}$, однако при этом резко увеличивается полоса B , что существенно повышает вероятность искажения сигнала на «особых участках» полета РН, что является недопустимым.

3. Сравнение применения M -ФМн и M -КАМн по характеристикам $\frac{E_b}{N_o}$ и B при малых значениях позиционности кода ($M \leq 8$) существенной разницы между указанными видами манипуляции не выявило.

4. Повышение позиционности ($M=16, 1024$) показывает существенную разницу в минимально необходимых для точного приема ТМИ значениях $\frac{E_b}{N_o}$ у M -КАМн в сравнении с M -ФМн.

Для проведения дальнейшей оценки эффективности указанных методов сравним СРС на основе предела Шеннона. Как известно, пределом Шеннона является зависимость, представленная выражением [6, с. 122]:

$$\beta^2 = f(\alpha_f), \quad (8)$$

где β^2 – показатель удельного расхода энергии E_b , затрачиваемой на передачу одного символа цифрового сообщения (одного бита); α_f – удельный расход необходимой полосы частот на передачу одного бита цифрового сообщения.

Выражение для β^2 равно [6, с. 123]:

$$\beta^2 = \alpha_f \left(2^{\frac{1}{\alpha_f}} - 1 \right), \quad (9)$$

где

$$\alpha_f = \frac{1}{\log_2 \left(1 + \frac{R_1 E_b}{\Delta f_{\text{пр}} N_o} \right)}, \quad (10)$$

где $R_1 = \frac{\log_2 M}{\tau_c}$ – скорость передачи ТМИ; M – основание кода; τ_c – длительность многоосновного символа; E_b – энергия бита; N_o – односторонняя спектральная плотность мощности шума на входе приемника; $\Delta f_{\text{пр}}$ – полоса пропускания канала связи.

На основе полученных значений табл. 1 вычислим с учетом выражений (8)–(10) соответствующие значения α_f и β^2 для рассматриваемых методов манипуляции несущей. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения α_f и β^2 для М-ЧМн, М-ФМн и М-КАМн

Позиционность кода (M)	ЧМн		ФМн		КАМн	
	α_f	β^2	α_f	β^2	α_f	β^2
2	0,574	1,346	0,335	2,318	—	—
4	0,648	1,240	0,335	2,318	0,335	2,318
8	0,711	1,174	0,251	3,715	0,259	3,497
16	0,761	1,131	0,186	7,567	0,242	4,011
32	0,811	1,095	0,143	18,017	0,195	6,612
64	—	—	0,115	46,967	0,181	8,102
128	—	—	—	—	0,152	14,227
256	—	—	—	—	0,143	18,017
512	—	—	—	—	0,123	34,608
1024	—	—	—	—	0,116	46,074

Анализ значений, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. Подтверждается вывод, полученный при анализе табл. 1 в части применения М-ЧМн, а именно – при повышении позиционности кода растет удельный расход полосы частот и снижается удельный расход энергии.
2. Для методов манипуляций М-ФМн и М-КАМн при позиционности кода 4 и 8 значения β^2 сопоставимы в случае применения обоих видов манипуляций.
3. Для методов манипуляций М-ФМн и М-КАМн на следующих уровнях позиционности кода $M = 16, 32, 64$ заметно прогрессивное снижение скорости увеличения показателя β^2 для М-КАМн при близких значениях показателя α_f .

Необходимо также отметить и повышение достоверности передаваемой информации в случае использования многопозиционного кодирования передаваемой ТМИ М-позиционным кодом [7]. В этом случае нивелируется действие на передаваемую цифровую последовательность ТМИ импульсной помехи, которая приводит к искажению принимаемой информации.

Сказанное подтверждает вывод о перспективности повышения позиционности кода для передачи ТМИ с борта РН в условиях ракетного радиоканала.

Перейдем к следующему этапу сравнения – сравним М-ФМн и М-КАМн по значению евклидова расстояния d между соседними точками сигнального созвездия. Стоит отметить, что чем больше евклидово расстояние между соседними точками сигнального созвездия, тем ниже вероятность неправильного определения значения передаваемого символа.

Для вычисления евклидова расстояния между соседними точками ФМн и КАМн построим модель системы радиосвязи в программе Matlab, изображение которой приведено на рис. 5. Данная модель содержит основные части – генератор символов, модулятор/демодулятор, канал связи, анализатор количества переданных и принятых символов, а также блок для отображения построенного сигнального созвездия [8, 9].

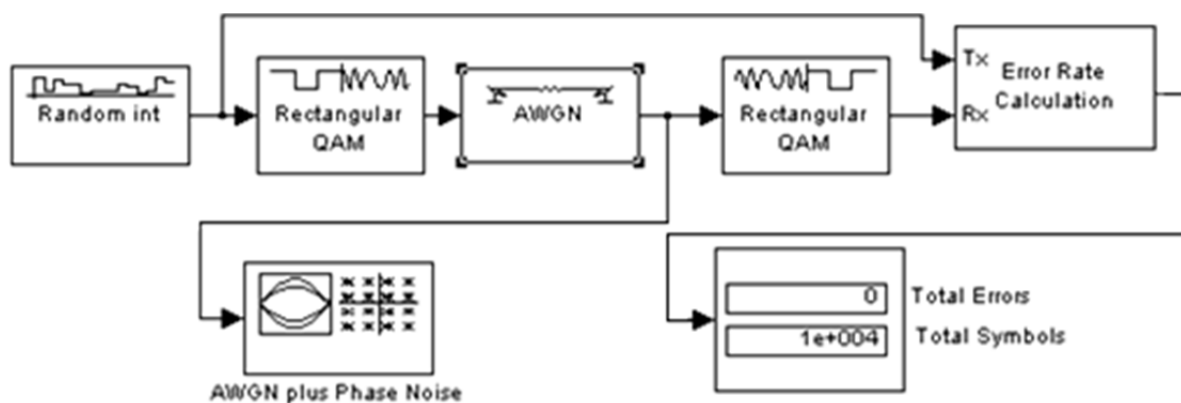


Рис. 5. Модель системы радиосвязи

Исходные данные для указанной системы радиосвязи:

- уровень шума: 30 дБ;
- количество переданных символов: 10 000;
- позиционность кода: 16.

Результатом моделирования характеристик построенной модели СРС являются созвездия точек для 16-КАМн и 16-ФМн, которые показаны на рис. 6.

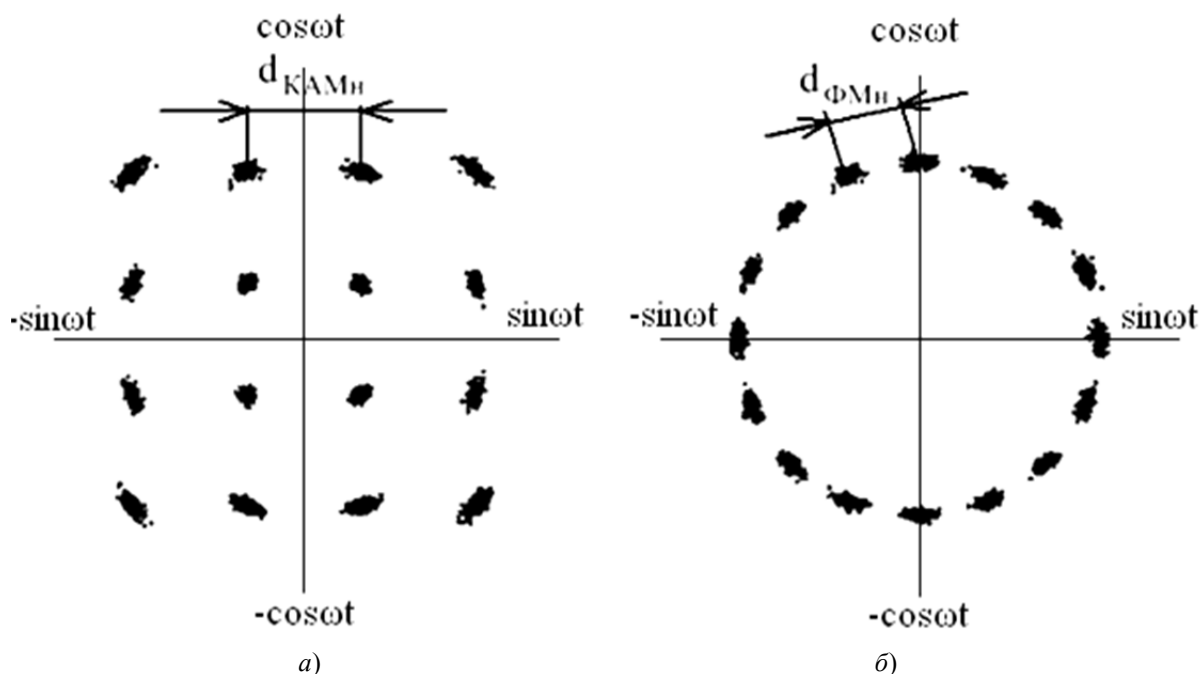


Рис. 6. Сигнальное созвездие:
а – 16-КАМн; б – 16-ФМн

Вычислим значения $d_{\text{КАМн}}$ и $d_{\text{ФМн}}$ для M -КАМн и M -ФМн. Ниже приведены выражения для соответствующих вычислений [10]:

$$d_{\text{КАМн}} = \frac{\sqrt{2}}{L-1}, \quad (16)$$

$$d_{\text{ФМн}} = \sqrt{2 - 2 \cos \frac{2\pi}{M}}. \quad (17)$$

В табл. 3 приведены соответствующие значения $d_{\text{КАМн}}$ и $d_{\text{ФМн}}$.

Таблица 3

Евклидово расстояние между точками сигнального созвездия M -КАМн и M -ФМн

Позиционность (M)	КАМн	ФМн	Отношение $\frac{d_{\text{КАМн}}}{d_{\text{ФМн}}}$
4	~1,41	~1,41	1
8	~1,41	~0,76	~1,85
16	~0,47	~0,39	~1,2
32	~0,28	~0,2	~1,4
64	~0,2	~0,1	~2
128	~0,13	~0,05	~2,6
256	~0,094	~0,024	~3,9
512	~0,061	~0,012	~5
1024	~0,045	~0,006	~7,5

В целом анализ данных, представленных в табл. 3, свидетельствует о большей устойчивости *М*-КАМн к помехам по сравнению с *М*-ФМн. Кроме этого, стоит отметить зависимость в повышении помехоустойчивости сигнала во время роста позиционности кода при сравнении КАМн и ФМн.

На рис. 7 приведено графическое изображение тенденции увеличения разности между значениями евклидова расстояния для КАМн и ФМн при повышении позиционности кода.

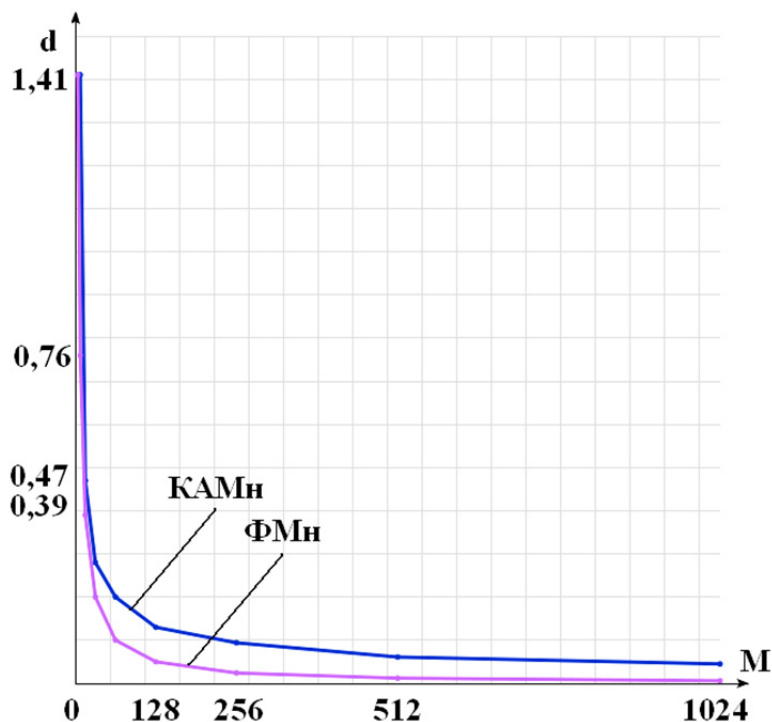


Рис. 7. Значения $d_{\text{КАМн}}$ и $d_{\text{ФМн}}$ при различной позиционности кода

Следовательно, применение КАМн в СРС Борт–Земля и увеличение позиционности кода позволит повысить помехоустойчивость создаваемых СРС Борт–Земля и сократить требуемые энергетические и частотные ресурсы.

Заключение

Проведена сравнительная оценка применения методов повышения эффективности БРТС:

- внедрение квадратурной амплитудной манипуляции несущей частоты;
- применение многопозиционного кодирования;
- применение обоих методов одновременно.

Проведенная оценка позволяет сделать следующие выводы:

1. Возможно повышение помехоустойчивости передаваемого телеметрического сигнала к импульсным помехам за счет увеличения позиционности кода в БРТС.

2. Метод манипуляции несущей *М*-КАМн в сравнении с *М*-ФМн обеспечивает более высокую достоверность приема ТМИ из-за большего значения евклидова расстояния между соседними точками сигнального созвездия.

3. В БРТС возможно сузить ширину полосы Найквиста при изменении вида манипуляции с ЧМн (БРТС «Скут-40») на КАМн или ФМн. Данная особенность приемлема при создании космических радиополос. Однако в этом случае необходимо будет увеличивать отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума.

4. В БРТС возможно снизить значения отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума в обмен на повышение значения ширины полосы Найквиста. Данная особенность приемлема при создании СРС с ракетным радиоканалом.

Приведенные выводы свидетельствуют о целесообразности применения рассматриваемых методов в БРТС для организации СРС Борт–Земля.

Библиографический список

1. Поленов, Д. Ю. Направления повышения эффективности существующих телеметрических систем ракет-носителей тяжелого класса / Д. Ю. Поленов, А. П. Мороз // *Авиация и космонавтика* : 15-я Междунар. конф. Москва, 14–18 ноября 2016 г. – М. : Люксор, 2016. – С. 129–130.
2. Мороз, А. П. Обоснование перспективных направлений повышения эффективности передачи телеметрической информации с ракет-носителей / А. П. Мороз, Д. Ю. Поленов // *Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники* : сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – Т. 1. – С. 486.
3. Томаси, У. Электронные системы связи / У. Томаси. – М. : Техносфера, 2007. – 1360 с.
4. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. / Бернард Скляр. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
5. Поленов, Д. Ю. Особенности ракетного радиоканала. Теоретические и прикладные аспекты современной науки / Д. Ю. Поленов // *Теоретические и прикладные аспекты современной науки* : сб. науч. тр. по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф. (31 марта 2015 г.). – Белгород, 2015. – Ч. 2. – С. 104–109.
6. Современная телеметрия в теории и на практике : учеб. курс / А. В. Назаров, Г. И. Козырев, И. В. Шитов, В. П. Обрученков, А. В. Дрелин, В. Б. Кравкин, С. Г. Кудряков, А. И. Петров, С. М. Соколов, В. Л. Якимов, А. И. Лоскутов. – СПб. : Наука и Техника, 2007. – 672 с.
7. Поленов, Д. Ю. Метод передачи ТМИ с изделий РКТ с использованием многопозиционного кодирования / Д. Ю. Поленов // *Гагаринские чтения – 2016* : сб. тезисов докладов XLII Междунар. молодеж. науч. конф. – М. : Моск. авиационный ин-т (национальный исследовательский университет), 2016. – Т. 1. – 534 с.
8. Поленов, Д. Ю. Определение основных средств построения и моделирования систем радиосвязи с использованием Matlab / Д. Ю. Поленов // *Вестник Ижевского государственного университета*. – 2016. – № 2 (70). – С. 74–77.
9. Носов, В. И. Моделирование систем связи в среде Matlab : учеб. пособие / В. И. Носов. – Новосибирск : Сибирский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2007. – 177 с.
10. URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/2289/589/lecture/12640?page=4> (дата обращения: 10.11.2016).

Поленов Дмитрий Юрьевич

аспирант, начальник группы,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, Московская обл., г. Королев,
ул. Пионерская, 2)
E-mail: polenoff.mitya@yandex.ru

Polenov Dmitriy Yur'evich

postgraduate student, chief of the group,
Scientific-Production Association
Measuring Equipment
(2 Pionerskaya street, Korolev,
Moscow region, Russia)

УДК 621.396

Поленов, Д. Ю.

Сравнительная оценка перспективных методов повышения эффективности бортовых радиотелеметрических систем / Д. Ю. Поленов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2017. – № 2 (20). – С. 60–69.