

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.2>ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОКАНАЛОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И СВЯЗИ

Обзор

Хашагульгов З.М.^{1,*}¹ ПАО «МТС», Магас, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (zurab2010[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассмотрены особенности и подходы к повышению помехоустойчивости радиоканалов телекоммуникационных систем управления и связи. Отмечено, что до настоящего времени не разработаны методы синтеза больших ансамблей слабо коррелированных дискретных сигналов, что позволяет уделить внимание усовершенствованию теоретических основ синтеза сложных дискретных сигналов с заданными корреляционными, ансамблевыми и структурными свойствами. В процессе исследования установлено, что решение этой проблемы в определенной степени зависит от ансамблевых, структурных и корреляционных свойств используемых сложных сигналов. В статье предложен алгоритм формирования ППРЧ-сигналов, который позволяет синтезировать нелинейные ППРЧ-сигналы, обладающие улучшенными корреляционными и структурными свойствами, что позволяет повысить помехоустойчивость радиосети ТС управления и связи.

Ключевые слова: сигнал, помехоустойчивость, частота, синтез, связь.

NOISE IMMUNITY IMPROVEMENT OF RADIO CHANNELS OF TELECOMMUNICATION CONTROL AND
COMMUNICATION SYSTEMS

Review article

Khashagulgov Z.M.^{1,*}¹ MTS PJSC, Magas, Russian Federation

* Corresponding author (zurab2010[at]mail.ru)

Abstract

The article examines the specifics and approaches to improving the noise immunity of radio channels of telecommunication control and communication systems. It is noted that so far methods of synthesis of large ensembles of weakly correlated discrete signals have not been developed, which allows to pay attention to improving the theoretical basis for the synthesis of complex discrete signals with given correlation, ensemble and structural properties. In the process of research it is found that the solution of this problem depends to some extent on the ensemble, structural and correlation properties of the complex signals used. The work proposes an algorithm for the formation of PRRF signals, which allows to synthesise nonlinear PRRF signals with improved correlation and structural properties, which makes it possible to improve the noise immunity of the control and communication TCS radio network.

Keywords: signal, noise immunity, frequency, synthesis, communication.

Введение

Телекоммуникации представляют собой фундаментальное и в то же время прогрессивное средство для достижения различных целей. Значение телекоммуникаций в современном мире неопределимо: они служат для распространения информации среди поставщиков, потребителей, исследователей, аналитиков, законодателей, регуляторов и т.д. В то же время, учитывая стремительный рост популярности мобильных устройств и технологий интернета вещей, в основе работы которых лежит беспроводная передача данных, особую актуальность приобретают вопросы защищенности информации, которая направляется по радиоканалу и энергетической эффективности устройств для увеличения времени их автономной работы [1].

Чаще всего задачи создания упомянутых систем решаются путем построения традиционных каналов обмена данными, в которых применяются простые сигналы-носители с малой базой, самыми распространенными из которых являются сигналы непосредственно низкочастотного представления дискретных сообщений (CANbus, EIA/TIA-485-A, Ethernet, и др.) и гармонические сигналы, модулированные или манипулированные в соответствии с выходным сообщением (коммутируемые и выделенные линии, радиоканалы и др.) [2], [7]. Однако не всегда такой подход удовлетворяет современным требованиям, в частности, по таким показателям как надежность, простота аппаратной реализации, стабильность характеристик, возможность обмена данными при малых соотношениях сигнал/помеха и т.д. [10].

Решение проблемы обеспечения необходимого качества передачи информации в телекоммуникационных системах управления и связи заключается в использовании сигналов, обладающих необходимыми корреляционными, ансамблевыми и структурными свойствами. Среди известных систем сигналов, которые уже нашли свое применение и вызывают значительный интерес, представляют сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) [8]. Однако ряд вопросов, связанных с построением телекоммуникационных систем связи и управления с ППРЧ-

сигналами, которые обладают улучшенными корреляционными и ансамблевыми характеристиками, требуют дальнейшего изучения, что и обуславливает выбор темы данной статьи.

Вопросам синтеза сложных сигналов, которые обладают необходимыми свойствами, посвящен ряд работ таких авторов как: Зеленецкий В.В., Попов А.В., Наконечный А.Б., Amiri-Doomari, Soodeh; Mirjalily, Ghasem; Abouei, Jamshid.

Исследование помехоустойчивости способа передачи и приема информации на основе широкополосных сигналов с переменной энтропией для дискретных сообщений проводят Дворников С.В., Марков Е.В., Маноши Э.А., Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Stephan, Thompson; Joseph, K. Suresh.

Возможности повышения энергоэффективности и защищенности в системах передачи информации, использующих технологию ортогонального частотного мультиплексирования нашли свое отражение в трудах Кокина Д.С., Пономарева О.Г., Бродского М.С., Звонарева В.В., Han, Z.; Tan, H.; Wang, Y.

В то же время, несмотря на имеющиеся достижения и научные публикации, ряд вопросов в данной предметной плоскости остается открытым. В частности, отдельного внимания заслуживает обоснование единого подхода к оценке помехоустойчивости телекоммуникационных систем связи и разработка рекомендаций по выбору показателей надежности работы радиолинии на предмет возникновения преднамеренных помех. Кроме того, в отдельной проработке нуждаются алгоритмы построения оптимальных и квазиоптимальных систем ППРЧ-сигналов.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении возможностей повышения помехоустойчивости радиоканалов телекоммуникационных систем (ТС) управления и связи с использованием ППРЧ-сигналов.

Основные результаты

В общетеоретическом аспекте помехоустойчивость ТС управления и связи можно охарактеризовать вероятностью битовой ошибки (BER) p_{BER} . Она зависит не только от вероятности p_m ошибки информационного канала, но и от вероятности p_t неудержания тактовой синхронизации в определенной полосе, от вероятности срыва p_c цикловой и p_{cv} сверхциклового синхронизации, а также от вероятности p_z отказа систем передачи [3], [9]. Тогда:

$$p_{BER} = 1 - (1 - p_m)(1 - p_t)(1 - p_c)(1 - p_{cv})(1 - p_z) \quad (1)$$

Поскольку вероятность каждого события p_i срыва правильного решения на порядок меньше, чем единица, то с точностью до двух порядков малости вышеприведенное выражение можно представить в виде:

$$p_{BER} \approx \sum_{i=1}^5 p_i \quad (2)$$

Синтез n -х сигналов во временной области по аperiodической функции автокорреляции реализуется на основе решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} R_1 &= S_1 S_n^* \\ R_2 &= S_1 S_{(n-1)}^* + S_2 S_n^* \\ R_n &= S_1 S_1^* + S_2 S_n^* + \dots + S_n S \end{aligned} \quad (3)$$

где S – дискретное значение фазы элемента сигнала;

* – символ комплексной сопряженности, которая определяет компоненту аperiodической функции автокорреляции сигнала $S_1 S_1^*, S_2, \dots, S_n$.

Синтез дискретных сигналов с заданными авто- и взаимокорреляционными свойствами следует из решения совокупности систем нелинейных неравенств вида:

$$\begin{aligned} R_0^i &= S_1^i S_1^{(i)*} + S_2^i S_2^{(i)*} + \dots + S_n^i S_n^{(i)*} = N \\ R_1 \min^i i &\leq S_1^i S_2^{(i)*} + S_2^i S_3^{(i)*} + \dots + S_n^i S_1^{(i)*} \leq R_1 \max^i i \end{aligned} \quad (4)$$

$$R_{(n-1)} \min^i i \leq S_1^i S_n^{(i)*} + S_2^i S_1^{(i)*} + \dots + S_n^i S_{(n-1)}^{(i)*} \leq R_{(n-1)} \max^i i$$

$$R_0^j \leq S_1^j S_1^{(j)*} + S_2^j S_2^{(j)*} + \dots + S_n^j S_n^{(j)*} \leq R_0 \max^j j$$

$$R_1 \min^j j \leq S_1^j S_2^{(j)*} + S_2^j S_3^{(j)*} + \dots + S_n^j S_1^{(j)*} \leq R_1 \max^j j \quad (5)$$

$$R_{(n-1)} \min^j j \leq S_1^j S_n^{(j)*} + S_2^j S_1^{(j)*} + \dots + S_n^j S_{(n-1)}^{(j)*} \leq R_{(n-1)} \max^j j$$

Обозначенные системы определяют компоненты функций авто- и взаимокорреляции.

$R_k \min^i i$ и $R_k \max^i i$ – минимально и максимально допустимые уровни боковых лепестков функции автокорреляции i -го сигнала при сдвиге на k элементов;

$R_k \min^j j$ и $R_k \max^j j$ – минимально и максимально допустимые уровни боковых лепестков функции взаимной корреляции i -го и j -го сигналов, при сдвиге j -го сигнала относительно i -го на k элементов, полученных в результате решения системы неравенств.

Описанные процедуры синтеза дискретных сигналов позволяют, в отличие от других методов, синтезировать не отдельные сигналы, а ансамбли сигналов, которые имеют необходимые авто- и взаимокорреляционные свойства. Однако для этих методы синтеза сигналов характерен ряд недостатков:

- не все сигналы, синтезированные в результате решения системы неравенств (4), удовлетворяют решению системы (5), что приводит к большим временным затратам синтеза ансамбля сигналов;

- решение систем неравенств (4) и (5) получено лишь для случая $p = 2$;

- не представляется возможным заранее (до окончания решения задачи синтеза сигналов) определить объем ансамбля сигналов.

В свете вышеизложенного, можно констатировать тот факт, что до настоящего времени не разработаны методы синтеза больших ансамблей слабо коррелированных дискретных сигналов. В связи с этим уделим внимание усовершенствованию теоретических основ синтеза сложных дискретных сигналов с заданными корреляционными, ансамблевыми и структурными свойствами.

Как известно, построение оптимальных и квазиоптимальных систем ППРЧ-сигналов базируются на теории полей Галуа. Выбор аппарата полей Галуа обусловлен тем, что элементы поля $GF(p^n)$ принимают все значения от 1 до $p - 1$, причём [4]:

$$a_i \in 1, 2, \dots, p - 1, p^n - 1 \tag{6}$$

где p – размерность поля Галуа $GF(p^n)$; n – степень расширения поля Галуа.

Следовательно, они могут быть использованы как элементы ППРЧ-сигнала. Однако ППРЧ-сигналы, построенные на основе полей Галуа, не обеспечивают устойчивости по критериям восстановления закона формирования сигнала. Для достижения необходимых структурных свойств ППРЧ-сигналов необходимо преобразовать поле Галуа. С этой целью используется метод, основанный на нелинейных переходах состояния поля Галуа и его индексов. Выбор индекса поля, являющегося адресом частотного элемента, осуществляется с использованием линейных и нелинейных рекуррентных последовательностей [5].

С учетом сказанного, правило построения ППРЧ сигналов для динамических радиоканалов может быть записано в виде:

$$i = (0, q - 1) \cdot$$

k – элемент q -ой линейной или псевдослучайной последовательности.

Для ППРЧ-сигналов функции корреляции зависят от числа совпадений элементов сигнала в дискретных точках. Значение уровня функции корреляции m -го и n -го сигналов определяется выражением:

$$R^{mm}(I) = \sum_{i=1}^L Z_i^{mn}(I) \tag{7}$$

$$Z_i(I) = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i^m = a_i^n + 1 \\ 0, & \text{если } I \in \{0, L - 1\} \end{cases} \tag{8}$$

При $n = m$ вычисляют периодическую функцию автокорреляции, а при $n \neq m$ функцию взаимной корреляции, а при n не равно m – периодическую функцию взаимной корреляции. Величина $Z_i(I)=1$ при условии, что:

$$\Theta_i^{[\text{ind}(\theta_2^{i+1})]} = \Theta_i^{[\text{ind}(\theta_2^{i+1}+1)]} \pmod{q} \tag{9}$$

Преобразуем выражение (9) к виду:

$$\Theta_i^{[\text{ind}(\theta_2^{i+1})]} - \Theta_i^{[\text{ind}(\theta_2^{i+1}+1)]} = \Theta \pmod{q} \tag{10}$$

Пусть

$$\Theta_i^{[\text{ind}(\theta_2^{i+1})]} \pmod{q} \geq \Theta_i^{[\text{ind}(\theta_2^{i+1}+1)]} \pmod{q} \tag{11}$$

тогда

$$\Theta_i^{[\text{ind}(\theta_2^{i+1})]} (1 - \Theta_i^{[\text{ind}(\theta_2^{i+1})] - [\text{ind}(\theta_2^{i+1}+1)]}) = 0 \pmod{q}. \tag{12}$$

Выражение (12) равно нулю только в случае выполнения равенства:

$$\text{ind}(\theta_2^{i+1} + 1) = \text{ind}(\theta_2^i + 1) \tag{13}$$

Следовательно, корреляционные свойства нелинейного ППРЧ-сигнала будут определяться числом разрешенных частотных элементов M и числом элементов в сигнале.

На практике, для обеспечения необходимой помехозащищенности, величина отношения L/M не превышает значения 0,25 [6]. В ходе исследований был проведен анализ функций корреляции нелинейных ППРЧ-сигналов при различных значениях L , M и периода задающей последовательности (см. табл. 1).

Таблица 1 - Результаты исследований корреляционных свойств нелинейных ППРЧ сигналов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.2.1>

M = 1 024					
L	8	16	32	64	128
m_r	$0,78 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$	$6,2 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-1}$
D_r	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$
M = 4 096					
L	8	16	32	64	128

m_r	$1,9 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$
D_r	$1,2 \times 10^{-1}$	$3,4 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$	2×10^{-2}	$1,6 \times 10^{-2}$
M = 16 384					
L	8	16	32	64	128
m_r	$4,6 \times 10^{-4}$	$8,3 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-3}$	$6,7 \times 10^{-3}$
D_r	$3,3 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$

Анализ корреляционных свойств нелинейных ППРЧ-сигналов показывает, что применение предлагаемых систем сигналов позволяет повысить помехозащищенность и скрытность радиосети управления. Последнее достигается за счет неопределенности использования частотных элементов.

Алгоритм формирования нелинейных сигналов с ППРЧ должен базироваться на нелинейных переходах ind и элементах поля Галуа. Данный принцип построения ППРЧ-сигналов представлен выражением [6]:

$$r_k = \Theta_1^{i+[ind\Theta_2^j+1]} \pmod{p,q} \quad (14)$$

где r_k – элемент ППРЧ-сигнала; Q_1, Q_2 – первоначальные элементы поля Галуа; p, q – модули преобразования.

Итак, с использованием полученных результатов, автором был разработан алгоритм построения нелинейных ППРЧ-сигналов, который реализует правило (14).

Суть алгоритма формирования ППРЧ-сигнала заключается в следующем.

1. Формирование полей Галуа $GF(p^q)$ и $GF(p^{q_1})$.
2. Генерирование линейной управляющей последовательности (УП).
3. Преобразование поля $GF(p^q)$ по модулю q .
4. Преобразование нелинейной УП в q -ю последовательность.
5. Преобразование поля Галуа $GF(p^{q_1})$.
- 5.1. Для изменения линейной зависимости между индексами и элементами поля делаем сдвиг по правилу:

$$b_j = b_i + 1 \pmod{p_1}.$$
- 5.2. Операция вычисления индексов поля Галуа согласно выражению:

$$d_j = ind b_i \pmod{p_1}$$

5.3. Преобразование массива индексов по модулю q .

6. Осуществление выбора индекса из массива индексов по значению нелинейной управляющей последовательности.

7. Определение значения элемента r_k ППРЧ-сигнала.

8. Объединение элементов ППРЧ-сигнала.

Данный алгоритм позволяет при выборе элементов полей $GF(p^q)$ и $GF(p^{q_1})$ осуществить сдвиг с шагом n . При этом осуществляется формирование ППРЧ-сигнала необходимого периода и необходимое количество таких сигналов.

Заключение

Таким образом, подводя итоги проведенного исследования, можно сделать следующие выводы.

В статье предложен алгоритм формирования ППРЧ-сигналов, который позволяет синтезировать нелинейные ППРЧ-сигналы, обладающие улучшенными корреляционными и структурными свойствами, что позволяет повысить помехоустойчивость радиосети ТС управления и связи.

Опыт эксплуатации систем управления и связи показал, что их качество в значительной степени определяется решением проблемы помехозащищенности и устойчивости систем. Преодоление обозначенных проблем, в свою очередь, зависит от ансамблевых, структурных и корреляционных свойств используемых сложных сигналов.

Новизной проведенного исследования является разработанный автором алгоритм формирования ППРЧ-сигналов, который позволяет синтезировать нелинейные ППРЧ-сигналы, обладающие улучшенными корреляционными и структурными свойствами, что дает возможность повысить помехоустойчивость радиосети ТС управления и связи. В статье приведены результаты синтеза, анализа и оценки свойств нелинейных ППРЧ сигналов. Обосновано достижение лучших свойств и преимущества использования в системе управления и связи нелинейных ППРЧ сигналов. В отличие от уже имеющихся научных публикаций и работ, установлено, что использование нелинейных ППРЧ сигналов позволяет на сигнальном уровне решить проблему помехозащищенности, имитостойчивости и скрытности системы управления и связи. Также обозначено, что важное значение имеет распределение частотных элементов по всем разделенным частотным диапазонам.

Приведенные в статье результаты свидетельствуют, что предлагаемые нелинейные ППРЧ сигналы имеют улучшенные структурные свойства и обеспечивают необходимую базу сигнала.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Иванов И.В. Способы повышения показателей помехоустойчивости радиоканала технических средств охранной сигнализации / И.В. Иванов // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. — 2021. — № 4 (4). — С. 161-166.
2. Stability-based routing, link scheduling and channel assignment in cognitive radio mobile ad-hoc networks // Wireless networks. — 2018. — № 4. — P. 2013-2026.
3. Тяпкин П.С. Повышение помехоустойчивости систем связи в условиях импульсных квазигармонических помех с использованием слепых методов обработки сигналов / П.С. Тяпкин, Н.А. Важенин // Труды МАИ. — 2023. — № 128. — С. 212-214.
4. Ganesan G. Random access networks with separable schemes / G. Ganesan // IET networks. — 2019. — Vol. 8. — № 4. — P. 233-238.
5. Дворников С.В. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех / С.В., Дворников, Е.В. Марков // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2021. — Т. 15. — № 6. — С. 4-9.
6. Николашин Ю.Л. Новое направление создания помехоустойчивых радиолиний декаметрового диапазона волн / Ю.Л. Николашин // Техника средств связи. — 2021. — № 1 (153). — С. 2-27.
7. Budko P.A. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks / P.A. Budko, A.M. Vinogradenko // III International scientific Conference «Communications in computing and information Science» (Convergent'2018). — Moscow, 2018. — Vol. 1140. — P. 200-210.
8. Fedorenko V. V. Mathematical aspects of stable state estimation of the radio equipment in terms of communication channel functioning / V.V. Fedorenko, A.M. Vinogradenko, V.V. Samoylenko et al. // Proceedings of 22nd International conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019). — Moscow, 2019. — Vol. 1141. — P. 547-559.
9. Zelensky E.G. Development of a distributed multi-agent system monitoring and control networks of 0.4-35 kV / E.G. Zelensky, Yu.G. Kononov, V.V. Fedorenko et al. // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, (CTS 2017). — 2017. — Vol. 2. — P. 271-274.
10. Bilitza D.D. International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D.D. Bilitza, V. Altadill, V. Truhlik et al. // Space Weather. — 2017. — Vol. 15. — P. 418-429.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ivanov I.V. Spособы povysheniya pokazatelej pomekhoustojchivosti radiokanala tekhnicheskikh sredstv ohrannojsignalizacii [Methods for increasing the noise immunity of a radio channel of technical security alarm systems] / I.V. Ivanov // Al'manah Permskogo voennogo instituta vojsk nacional'noj gvardii [Almanac of the Perm Military Institute of National Guard Troops]. — 2021. — № 4 (4). — P. 161-166. [in Russian]
2. Stability-based routing, link scheduling and channel assignment in cognitive radio mobile ad-hoc networks // Wireless networks. — 2018. — № 4. — P. 2013-2026.
3. Tyapkin P.S. Povyshenie pomekhoustojchivosti sistem svyazi v usloviyah impul'snyh kvazigarmonicheskikh pomekh s ispol'zovaniem slepyh metodov obrabotki signalov [Increasing the noise immunity of communication systems under conditions of pulsed quasi-harmonic interference using blind signal processing methods] / P.S. Tyapkin, N.A. Vazhenin // Trudy MAI [Proceedings of MAI]. — 2023. — № 128. — P. 212-24. [in Russian]
4. Ganesan G. Random access networks with separable schemes / G. Ganesan // IET networks. — 2019. — Vol. 8. — № 4. — P. 233-238.
5. Dvornikov S.V. Povyshenie pomekhozashchishchennosti peredach dekametrovykh radiokanalov v usloviyah neprednamerennykh pomekh [Increasing the noise immunity of transmissions of decameter radio channels in conditions of unintentional interference] / S.V., Dvornikov, E.V. Markov // T-Comm: Telekommunikacii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]. — 2021. — Vol. 15. — № 6. — P. 4-9. [in Russian]
6. Nikolashin Yu.L. Novoe napravlenie sozdaniya pomekhoustojchivykh radiolinij dekametrovogo diapazona voln [New direction for creating noise-resistant radio links in the decameter wave range] / YU.L. Nikolashin // Tekhnika sredstv svyazi [Communication technology]. — 2021. — № 1 (153). — P. 2-27. [in Russian]
7. Budko P.A. Adaptive System Monitoring of the Technical Condition Technological Objects Based on Wireless Sensor Networks / P.A. Budko, A.M. Vinogradenko // III International scientific Conference «Communications in computing and information Science» (Convergent'2018). — Moscow, 2018. — Vol. 1140. — P. 200-210.
8. Fedorenko V. V. Mathematical aspects of stable state estimation of the radio equipment in terms of communication channel functioning / V.V. Fedorenko, A.M. Vinogradenko, V.V. Samoylenko et al. // Proceedings of 22nd International conference «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (DCCN-2019). — Moscow, 2019. — Vol. 1141. — P. 547-559.
9. Zelensky E.G. Development of a distributed multi-agent system monitoring and control networks of 0.4-35 kV / E.G. Zelensky, Yu.G. Kononov, V.V. Fedorenko et al. // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, (CTS 2017). — 2017. — Vol. 2. — P. 271-274.
10. Bilitza D.D. International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D.D. Bilitza, V. Altadill, V. Truhlik et al. // Space Weather. — 2017. — Vol. 15. — P. 418-429.