



УДК 621.39; 514.742; 519.61

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ АЛФАВИТОВ НА БАЗЕ ВЗАИМНО ОРТОГОНАЛЬНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

А.Ю. Гришенцев^a, А.Г. Коробейников^{b,a}, А.И. Елсуков^{a,c}^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^b Санкт-Петербургский филиал учреждения «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук», Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация^c АО Концерн "НПО «Аврора»", Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

Адрес для переписки: AGrishentsev@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.10.18, принята к печати 08.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-134-143

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г., Елсуков А.И. Исследование некоторых свойств алфавитов на базе взаимно ортогональных широкополосных сигналов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 134–143. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-134-143

Аннотация

Проанализированы некоторые свойства алфавитов, построенных на базе сигнальных широкополосных символов. Объект исследования: алфавиты сигнальных широкополосных символов и отдельные сигнальные широкополосные символы. Предмет исследования: методы синтеза и анализа широкополосных радиосигналов. Сформулирован метод синтеза ортогональных алфавитов на базе сигнальных широкополосных символов. Выполнен анализ некоторых статистических характеристик широкополосных символов и сообщений. Показано, что характер распределения амплитудных значений, взаимно ортогональных сигналов и сообщений на их основе имеет вид распределения Гаусса. Определен параметр, влияющий на корреляционные свойства алфавитов сигнальных широкополосных символов. Исследования показали, что характеристики корреляционной функции зависят от относительной полосы частот, занимаемой сигнальными широкополосными символами. Произведено сравнение с теоретической моделью вероятности ошибки в канале с аддитивным белым гауссовым шумом при использовании сигнальных широкополосных символов. Результаты моделирования совпадают с теоретическими и не превосходят теоретической границы вероятности ошибки. Оценена скорость передачи информации с помощью алфавитов, построенных на базе ортогональных сигнальных широкополосных символов. Оценка скорости показывает значительный потенциал информационного уплотнения, особенно при увеличении относительной полосы частот, занимаемой сигнальными широкополосными символами.

Ключевые слова

широкополосная радиосвязь, сверхширокополосная радиосвязь, анализ, проектирование, ортогональные сигналы, радиостеганография, защищенные системы связи

RESEARCH OF SOME PROPERTIES OF ALPHABETS BASED ON MUTUALLY ORTHOGONAL BROADBAND SIGNALS

A.Yu. Grishentsev^a, A.G. Korobeynikov^{b,a}, A.I. Elsukov^{a,c}^aITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^bPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences St. Petersburg Filial, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation^cJSC Concern Aurora, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

Corresponding author: AGrishentsev@yandex.ru

Article info

Received 18.10.18, accepted 08.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-134-143

Article in Russian

For citation: Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G., Elsukov A.I. Research of some properties of alphabets based on mutually orthogonal broadband signals. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 134–143 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-134-143

Abstract

The paper presents preliminary studies and analysis of some properties of alphabets built on the basis of the broadband signal symbols. We study the broadband signal alphabets characters and separate broadband signal symbols. The subject of research

includes research methods of synthesis and analysis for broadband radio signals. The synthesis method is formulated for orthogonal alphabets on the basis of signal broadband symbols. The analysis of some statistical characteristics of broadband symbols and messages is performed. It is shown that the distribution of amplitude values of mutually orthogonal signals and messages on their basis has the form of Gauss distribution. The parameter is determined that affects the correlation properties of alphabets of broadband signal symbols. The studies have shown that the characteristics of the correlation function depend on the relative frequency band occupied by the signal broadband symbols. We made estimation and comparison with the theoretical model of the error probability in the channel with additive white Gaussian noise while the use of signal broadband symbols. The simulation results agree with the theoretical expectations and do not exceed the theoretical limit of the error probability. The rate estimation of the information transfer by alphabets built on the basis of orthogonal signal broadband characters is performed. The rate estimation shows significant potential and opportunities of the information seal, especially, with the increase in the relative frequency band occupied by the broadband signal symbols.

Keywords

broadband radio communication, ultra-wideband radio communication, analysis, design, orthogonal signals, radio steganography, secure data transmission

Введение

Актуальной научной задачей современных исследований является разработка методов и средств устойчивого приема радиосообщений в условиях зашумления радиоэфира [1, 2].

Предпосылками к исследованиям настоящей статьи явилась разработка методов синтеза сигнальных широкополосных символов (СШС) [3] и алфавитов СШС [4]. В работах [3, 4] проведен предварительный анализ свойств СШС и образованных из них алфавитов. Отличительная особенность СШС заключается в их шумоподобном характере, являющаяся следствием генерации СШС в частотной области на базе последовательностей случайных чисел.

Метод синтеза отдельных символов основан на заполнении заранее определенной части спектра $X[\omega_R]$ случайными числами из генеральной совокупности с равномерным распределением, остальная часть спектра задается равной нулю $X[\omega_0]=0$, полученные части спектра объединяются в общий полный спектр $X[\omega]=X[\omega_0]\cup X[\omega_R]$ отдельного СШС, затем производится преобразование Фурье $F^{-1}\{X[\omega]\}$ полученного спектра, в результате которого синтезируется ненормированный СШС $\hat{x}[t]$. При этом $\omega_R \in [-W_u; -W_l] \cup [W_l; W_u]$ и $\omega_0 \notin [-W_u; -W_l] \cup [W_l; W_u]$, где $[-W_u; -W_l]$ и $[W_l; W_u]$ – отрицательная и положительная составляющие спектра Фурье; W_l и W_u – нижняя и верхняя границы спектра соответственно.

Предлагаемый в работе [1] метод синтеза отдельных СШС возможно представить как:

$$\left. \begin{matrix} X[\omega_R] = rand() \\ X[\omega_0] = 0 \end{matrix} \right\} \cup X[\omega] = X[\omega_0] \cup X[\omega_R] \cup F^{-1}\{X[\omega]\} = \hat{x}[t].$$

Нормирование $\hat{x}[t]$ возможно выполнить с помощью деления на длину вектора сигнала:

$$x[t] = \frac{1}{\sqrt{\int_{-t_s/2}^{t_s/2} \hat{x}[t]^2 dt}} \hat{x}[t],$$

где t_s – длительность СШС. СШС в дискретном виде будем обозначать $x[n]$.

Метод синтеза множеств ортогональных СШС, предлагаемый в работе [4], является развитием метода синтеза отдельных СШС. Метод основан на генерации псевдослучайных N -мерных векторов их ортогонализации методом Грама–Шмидта и последующей трансформации полученных ортонормированных векторов, по заранее определенным правилам, в соответствующие частотные спектры, являющиеся образами искомым ортонормированных широкополосных сигналов в частотном пространстве. В результате обратного преобразования Фурье и нормирования отдельных сигналов происходит окончательный синтез. Полученные алфавиты ортогональных СШС обладают высокими корреляционными свойствами и могут быть применены в системах связи [3, 4], в которых необходимо устойчивое распознавание сигнальных сообщений при весьма малых значениях отношения сигнала к шуму, что актуально, например, для систем спутниковой связи, систем связи, использующих методы радиостеганографии и др.

В работе [4] показано, что при условии квадратурного разделения СШС максимальная мощность алфавита A , т.е. максимальное число взаимно ортогональных СШС, не превышает числа отсчетов N дискретной формы СШС $x[n]$, уменьшенного на единицу, т.е. $\max(|A|) = N - 1$. Удвоить мощность алфавита A возможно за счет использования противоположных сигналов.

Синтез сигнальных символов в частотной области позволяет: эффективно контролировать спектр сигнала и выполнять перенос рабочей частоты канала связи, т.е. реализовывать системы с перестройкой частоты, в том числе псевдослучайной перестройкой, применяемой для организации защищенных каналов связи [5]. Хорошие корреляционные качества [3, 4] полученных сигнальных символов предоставляют возможность проектирования и применения СШС в системах: множественного доступа с параллельным использованием общего ресурса частота–время FT , системы МИМО (Multiple Input Multiple Output); реализующих стеганографические каналы связи за счет сокрытия полезного сигнала в шуме радиозэфира; системы с ограниченной мощностью передающих устройств и др. [6]. Достаточно быстрая процедура синтеза позволяет оперативно синтезировать алфавиты, что создает предпосылки для применения СШС в защищенных системах связи, в том числе для повышения электромагнитной совместимости и качества интероперабельности и функциональной надежности [7, 8].

Таким образом, актуальной является задача исследования свойств отдельных СШС и ортогональных алфавитов, построенных на базе множества СШС. Сигналы, синтезируемые предлагаемым в работах [3, 4] методом, имеют достаточно широкий потенциал применения в различных системах связи, в различных частотных диапазонах, таким образом, имеется вариабельность возможных каналов связи и условий распространения сигналов, в связи с этим в настоящей статье авторы анализируют общие статистические свойства СШС и образованных ими сигнальных сообщений [9–11].

Некоторые статистические характеристики широкополосных символов и сообщений

Ширина главного лепестка автокорреляционной функции (АКФ) $(x_p \bullet x_q)[n]$ СШС определяется самой высокочастотной гармонической составляющей в спектре СШС (рис. 1, p и q – номер СШС, n – номер отсчета). Здесь и далее (\bullet) – оператор вычисления функции корреляции, $x_p[n], x_q[n] \in A$. Амплитуды АКФ в области боковых лепестков имеют равномерно изменяющиеся относительно небольшие значения. При этом символы из общего алфавита СШС $A = \{x_1[n], x_2[n], \dots, x_K[n]\}$ мощностью $K = |A|$ попарно ортогональны и не коррелированы, подобные свойства характерны для функций корреляции случайного шума (отсюда название сигналов – шумоподобные). Межсимвольная интерференция (МСИ) возникает в результате многолучевого распространения и (или) в случае совместного использования общего ресурса частота–время, например, при организации МИМО каналов связи [12, 13]. При моделировании МСИ, учитывая шумоподобные свойства СШС, возможно рассматривать СШС как аддитивный гауссов шум, поэтому особое значение имеет определение статистических параметров СШС и сообщений $s[n] = \sum \circ x_i[n]$ при $x_i[n] \in A$, составленных из СШС путем их последовательной склейки (конкатенации), здесь (\circ) – символ конкатенации.

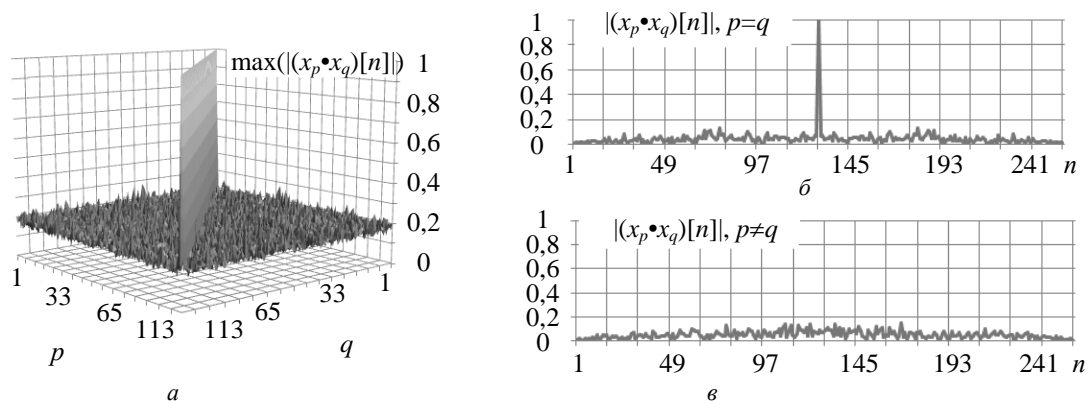


Рис. 1. а – матрица максимумов модулей корреляционных функций сигнальных широкополосных символов; б – модуль произвольно выбранной автокорреляционной функции; в – модуль произвольно выбранной взаимно корреляционной функции

Первичный синтез спектра СШС производится на базе выборки из генеральной совокупности с равномерным законом распределения и нулевым средним значением. Среди прочих преобразований на результат распределения значений СШС (рис. 2) влияет процедура ортогонализации Грама–Шмидта, заключающаяся в последовательном ортонормировании всех векторов. Поэтому требуется проверка гипотезы о законе распределения СШС и составленных из них сообщений.

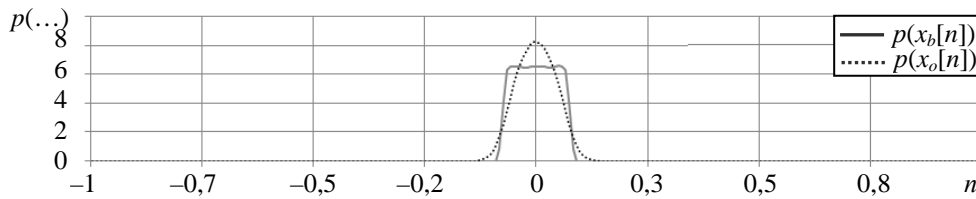


Рис. 2. Плотность распределения склейки векторов с равномерным распределением $p(x_b[n])$ и плотность распределения склейки тех же векторов после выполнения над ними процедуры ортогонализации методом Грама–Шмидта $p(x_o[n])$

Визуальная оценка показывает, что характер плотности распределения отдельных СШС и сообщений $s[n]$ близок к нормальному (рис. 3, а).

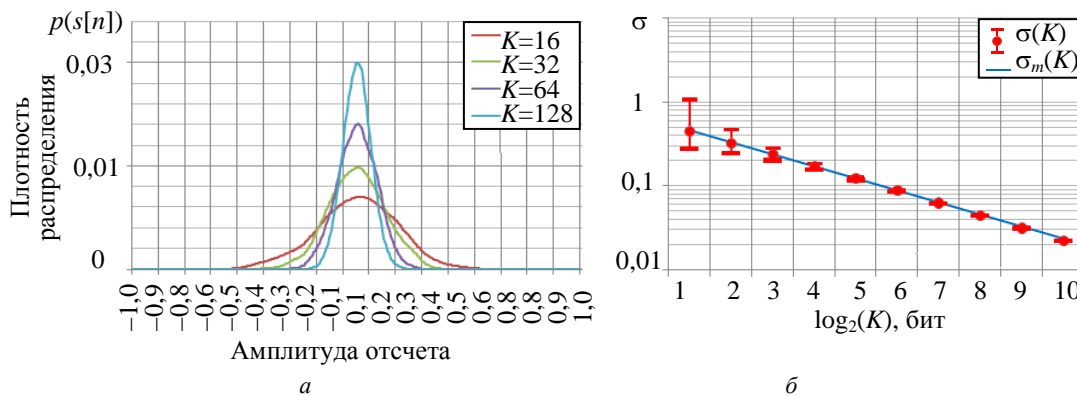


Рис. 3. а – плотность распределения сообщений СШС; б – зависимость стандартного отклонения $\sigma(K)$ и аппроксимационной модели $\sigma_m(K)$ от числа битов, выраженного через мощность алфавита как $\log_2(K)$

Для проверки статистической гипотезы о нормальном законе распределения отдельных СШС и образованных ими алфавитов применялись статистические тесты Ярки–Бера¹ [14], Лиллиефорса [15] и Колмогорова–Смирнова [16]. Тест Ярки–Бера позволяет выявить сходство или отличие распределения по третьему (асимметрия) и четвертому (эксцесс) моментам. Тест Колмогорова–Смирнова позволяет выполнить сравнение распределения с заданным по максимуму поэлементной разности выборки с известным распределением и выборки, проверяемой тестом (см. таблицу, I – среднее значение для отдельных СШС из алфавита, II – для склейки СШС). В качестве закона распределения для сравнения было принято нормальное распределение в соответствии с выражением (1). Тест Лиллиефорса является модифицированной версией теста Колмогорова–Смирнова с менее жесткими критериями принятия решения о проверке гипотезы H_0 принадлежности выборки генеральной совокупности с нормальным законом распределения. Для каждой строки таблицы расчет производился трижды, в таблицу заносились средние значения. На основании результатов теста, при критическом уровне значимости $\alpha = 0,05$, принимается гипотеза H_0 о принадлежности выборки генеральной совокупности с нормальным законом распределения.

Применение статистических тестов для проверки гипотезы H_0 показывает устойчивые тенденции. Тест Ярки–Бера для склейки СШС практически во всех случаях подтвердил принадлежность распределения алфавитов СШС к нормальному распределению. Для отдельных СШС тест Ярки–Бера подтвердил гипотезу H_0 примерно в 95 % случаев. Следует отметить, что при относительно малом числе отсчетов отдельных СШС нельзя гарантировать устойчивость статистического теста асимптотического метода Ярки–Бера. Применение теста Лиллиефорса для склейки СШС во всех случаях подтвердил гипотезу H_0 , для отдельных СШС подтвердил гипотезу H_0 примерно в 95 % случаев. Применение теста Колмогорова–Смирнова ориентировано на относительно небольшие выборки, так как параметр, сравниваемый с критерием принятия решения, зависит от \sqrt{N} [16]. Для отдельных СШС тест Колмогорова–Смирнова практически во всех случаях подтвердил гипотезу H_0 , для склейки СШС устойчиво подтверждается гипотеза H_0 при $N \leq 129$ и отрицается при $N \geq 257$.

¹ Тест Ярки–Бера // URL: <http://matlab.exponenta.ru/statist/book2/19/jbtest.php>

Таблица. Проверка статистической гипотезы

K	N	Тест					
		Ярки-Бера		Лиллиефорса		Колмогорова-Смирнова	
		I	II	I	II	I	II
32	33	0,06	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
64	65	0,05	0,33	0,05	0,00	0,00	0,00
128	129	0,06	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
256	257	0,04	0,00	0,06	0,00	0,00	1,00
512	513	0,05	0,00	0,05	0,00	0,00	1,00
1024	1025	0,05	0,00	0,05	0,00	0,02	1,00

Учитывая результаты визуализации распределения (рис. 3, а) и результаты статистических тестов, примем гипотезу H_0 о нормальном распределении значений отдельных СШС и алфавитов СШС.

Результаты расчета $\sigma(K)$ и аппроксимационная модель $\sigma_m(K)$ зависимости величины стандартного отклонения σ от $\log_2(K)$ – числа битов на один СШС приведены на рис. 3, б. Полученная кривая описывается уравнением вида $\sigma_m(K) = 0,643e^{-0,33 \log_2(K)}$. Учитывая нулевое значение математического ожидания, возможно записать выражение для оценки плотности распределения отдельных СШС и составленных из них сообщений в зависимости от мощности алфавита K :

$$p(K, y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma_m(K)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2(\sigma_m(K))^2}}, \quad (1)$$

где y – множество возможных значений отдельных отсчетов СШС.

Синтез каждого СШС в частотном пространстве определяет выраженную локализацию спектра отдельно взятого СШС, при составлении сообщений $s[n] = \sum \circ x_i[n]$ для $x_i[n] \in A$ из СШС с помощью их последовательной склейки происходит расширение спектра за счет фазовых и амплитудных различий отдельных символов. В качестве примера (рис. 4) приведен спектр склеенных 128 СШС с полосой частот в отсчетах [16;32] или в единицах нормированной частоты [0,124; 0,248] Гц и числом отсчетов на каждый символ 129.

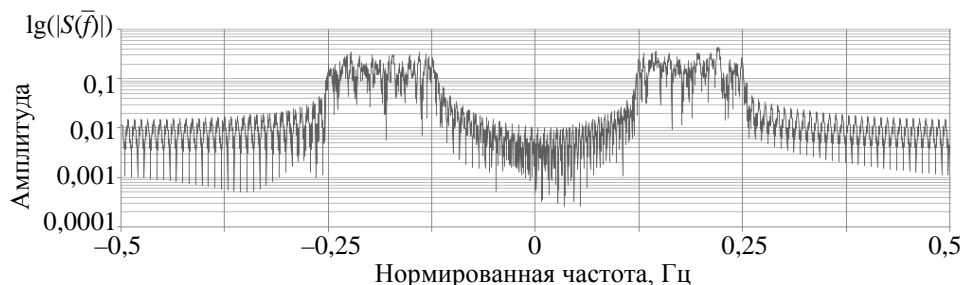


Рис. 4. Двусторонний спектр сигнала $|S(\bar{f})|$ в логарифмическом масштабе от нормированной частоты \bar{f}

В некоторых стандартах, например IEEE 802.11a и 802.11g, для снижения МСИ между отдельными символами вставляют «защитные интервалы» [17], что приводит к снижению скорости передачи данных и некоторому дополнительному расширению спектра в низкочастотную область за счет появления характерной формы видеосигнала огибающей [18]. Защитный интервал также может выполнять функцию циклического префикса в применяемой системе кодирования [19].

Параметры, определяющие корреляционные свойства алфавитов сигнальных широкополосных символов

При синтезе алфавитов СШС учитываются: N – число отсчетов; N_l и N_u – нижняя и верхняя пороговая частота спектра СШС соответственно. Исследования показали, что максимумы функций взаимной корреляции (ВКФ) $s_{\max} = \max(|(x_p \cdot x_q)[n]|)$ при $p \neq q$ и отношение пика автокорреляционной функции (АКФ) к максимуму боковых лепестков зависят от полосы частот

$$F = N_u - N_l + 1 \tag{2}$$

и не зависят от N , N_l и N_u . В результате статистического моделирования при $N = 2048$, $N_l = 1$ и $N_u = 1 - 256$ (изменении полосы частот F от 1 до 256) получены данные (рис. 5, а), по которым построена степенная линия тренда, описываемая уравнением вида $s_{\max}(F) \approx 1,152 F^{-0,32}$.

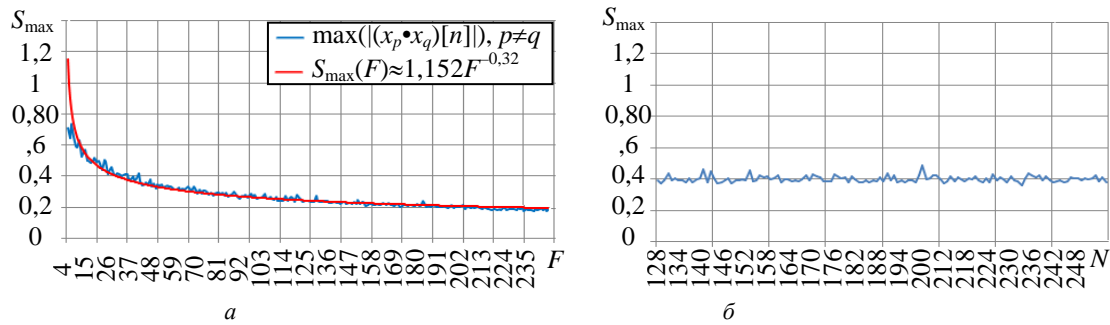


Рис. 5. Зависимость максимумов функций взаимной корреляции:
а – от полосы частот F ; б – от числа отсчетов N

На рис. 5, б построена зависимость $s_{\max}(N)$ при постоянной полосе частот $F = 32$ и изменении N от 128 до 255 отсчетов, заметные флуктуации графика связаны с самой природой СШС, полученных на базе генерации случайных чисел, но у линии $s_{\max}(N)$, отсутствует тренд, подобные данные были получены и для других параметров (N_l , N_u). При необходимости по колебаниям $s_{\max}(N)$ возможно оценить флуктуацию максимумов ВКФ для оценки вероятности ложного распознавания СШС.

Оценка вероятности ошибки в канале с аддитивным белым гауссовым шумом

Пусть имеется алфавит СШС $A = \{x_1[n], x_2[n], \dots, x_K[n]\}$, где $K = |A|$ – мощность алфавита A , тогда сигнал $s_k[n]$ ($k = 1 \dots K$), искаженный аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ), можно выразить как $s_k[n] = x_k[n] + \eta[n]$, где $\eta[n]$ – дискретная форма АБГШ. Будем различать два вида ошибок, характеризующихся вероятностью ошибочного распознавания:

P_{BERS} – вероятность символьной ошибки на бит информации (БОС): выполняется условие $\max(d(s_k \cdot x_q)) > \max(d(s_k \cdot x_k))$ при $k \neq q$, $d(s_k \cdot x_k)$ – межсимвольная дистанция, вычисляемая с помощью евклидовой метрики [18];

P_{BERP} – вероятность фазовой ошибки на бит информации (БОФ): выполняется условие $r_k[N] \neq \max(|(s_k \cdot x_k)[n]|)$, N – число отсчетов $s_k[n]$ и $x_k[n]$, а $l \in (2N - 1)$ – число отсчетов $r_k[l]$, ожидаемый максимум функции корреляции $r_k[l] = (s_k \cdot x_k)[n]$ должен быть расположен в отсчете функции корреляции N .

Результаты численного моделирования вероятности БОС и БОФ полученных алфавитов СШС при воздействии АБГШ в случае использования для распознавания символов на принимающей стороне, критерия максимального правдоподобия [20] и различных отношениях сигнала к шуму (Signal-to-Noise Ratio, SNR) приведены на рис. 6, 7.

В качестве SNR использован традиционно устоявшейся для цифровой связи [20, 21] параметр: нормированное отношение сигнала к шуму на бит в децибелах $20 \lg(\sqrt{2E_b/N_0})$, где $\sqrt{2E_b/N_0} = \sqrt{2E_s T_b / (E_n / F_{\text{СШС}})}$, где E_s – энергия СШС, $T_b = T_{\text{СШС}} / \log(K)$ – время, необходимое для передачи одного бита информации, $T_{\text{СШС}}$ – длительность СШС, E_n – энергия шума, $F_{\text{СШС}}$ – односторонняя ширина спектра СШС, E_b – энергия, необходимая для передачи одного бита информации, N_0 – односторонняя спектральная плотность АБГШ [22].

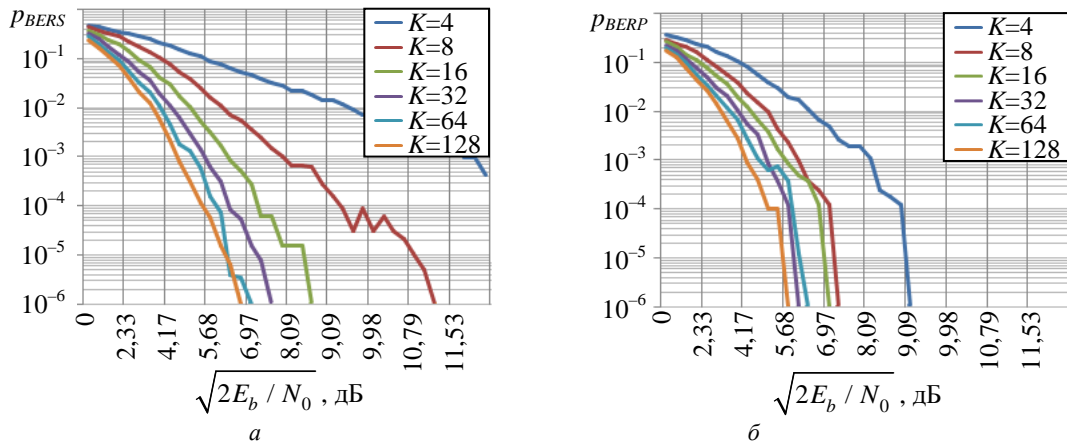


Рис. 6. а – вероятность символьной ошибки на бит информации p_{BERS} ;
 б – вероятность фазовой ошибки на бит информации p_{BERP}

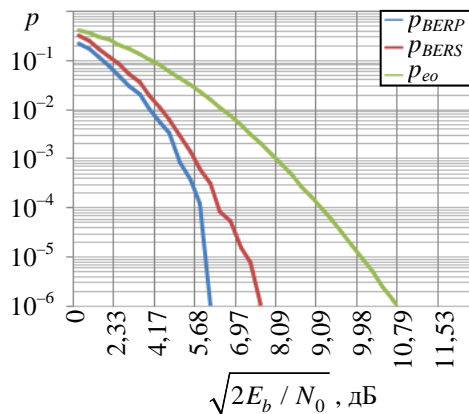


Рис. 7. Сравнение вероятностей ошибки p_{BERS} и p_{BERP} с моделированием вероятностей p_{eo} аддитивной границы ошибки когерентного приема при кодировании ортогональными символами, $K = 32$ по модели [20, 21]

Результаты моделирования при использовании СШС в условиях воздействия АБГШ показывают, что вероятность ошибки не превышает теоретического порога (рис. 7), полученного в результате моделирования на базе известного выражения оценки вероятности когерентного приема при ортогональном кодировании [19]. Эксперименты показывают, что вероятность для БОФ несколько ниже, чем для БОС. Полученные результаты хорошо согласуются с теорией [20, 21, 23] и демонстрируют возможность эффективного применения СШС в условиях зашумленного канала связи, в том числе для организации стеганографической (скрытой в шумах радиоэфира) широкополосной связи.

Применение в системах с многолучевым распространением

Для эффективного применения технологии RAKE [24–26] необходимо либо непрерывно вычислять корреляции для всего потока принимаемого сигнала, что для высокочастотного радиоканала цифровой системы связи затруднительно в связи с необходимостью большого числа вычислений в режиме реального времени, либо вычислять время задержки распространения сигнала в отдельных лучах, и далее – корреляцию с учетом задержки сигнала [20, 27]. Для применения технологии RAKE и определения времени задержки отдельных лучей сигнал должен иметь узкий пик АКФ, т.е. позволять выполнять временное сжатие за счет формы функции корреляции, при этом значения ВКФ и боковых лепестков АКФ должны иметь низкий уровень относительно основного пика АКФ, таким образом, СШС удовлетворяют требованиям применения в RAKE-системах. Определив время задержки сигнала в различных лучах распространения, по максимальному значению времени задержки возможно вычислить длительность защитного интервала от МСИ [28].

Оценка скорости передачи информации

Оценим скорость передачи сообщений с помощью алфавитов, синтезированных на основе СШС. На рис. 8 приведен порядок расположения определяющих элементов спектра СШС: $F_{min} = \frac{1}{T_{СШС}}$ – минимальная частота (Гц) в спектре, определяет шаг приращения частоты в спектре СШС, является величиной, обратной длительности СШС $T_{СШС}$; F_l и F_u – границы диапазона возможно ненулевых значений частоты, т.е. границы спектра СШС, соответствуют круговым частотам $W_l = 2\pi F_l$ и $W_u = 2\pi F_u$, и дискретным значениям спектра $N_l = \frac{F_l}{F_{min}}$ и $N_u = \frac{F_u}{F_{min}}$. Ширину полосы, занимаемой СШС (1), возможно оценить как: $F_{СШС} = F_u - F_l$.

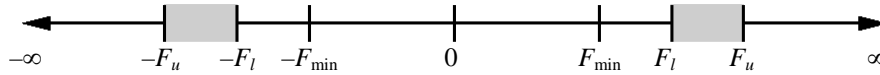


Рис. 8. Расположение элементов двустороннего спектра сигнальных широкополосных символов

Оценить потенциальную скорость передачи информации с помощью алфавита на базе СШС и использованием противоположных символов возможно как $V_R(F_{СШС}, F_{min}) = F_{min} \log_2 \left(\frac{2F_{СШС}}{F_{min}} \right)$. Предельная скорость передачи информации, в соответствии с границей Котельникова–Шенона [29], определяется отношением: $V_{max}(F_{СШС}, SNR) = 2F_{СШС} \log_2(SNR + 1)$. Полагая $\log_2(SNR + 1) = 1$, запишем выражение для оценки относительной скорости $V_{отн} = \frac{V_R}{V_{max}} = \frac{F_{min}}{2F_{СШС}} \log_2 \left(\frac{2F_{СШС}}{F_{min}} \right)$. Учитывая, что выражение $\frac{F_{СШС}}{F_{min}}$ – есть относительная ширина одностороннего спектра СШС, что эквивалентно ширине спектра в отсчетах (2), возможно записать: $V_{отн} = \frac{1}{2F} \log_2(2F)$ (рис. 9).

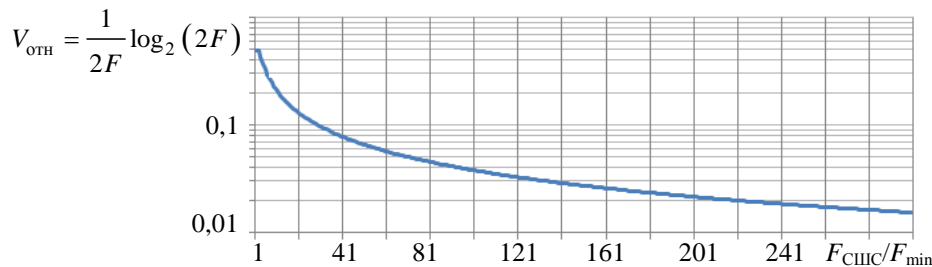


Рис. 9. Относительная скорость передачи информации при помощи ортогональных сигнальных широкополосных символов

Невысокая скорость может определить область применения ортогональных СШС при ширине относительной полосы частот до 23–30 отн. ед., возможно применение в открытых каналах связи, в том числе с использованием технологии ММО. При большой полосе частот целесообразно применение для организации защищенных, за счет скрытых в шумах эфира, каналов связи [30, 31]. Спектр СШС имеет характерный шумоподобный вид, временная форма сигнала также сходна с шумом. По этой причине распознавание сигнала, скрытого в шумах эфира, возможно только корреляционными методами. При этом полоса, занимаемая сигналом, может иметь достаточную протяженность, возможно одновременное применение технологии псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Для некоррелированного белого шума в радиоэфире в цифровых системах связи возможность распознавания сигнала во многом определяется числом отсчетов дискретизации, т.е. способностью приемных устройств к передискретизации.

Заключение

В работе предварительно исследованы некоторые характеристики и особенности ортогональных сигнальных широкополосных символов. В частности, рассмотрены спектральные характеристики, вероятность ошибок в канале с аддитивным белым гауссовым шумом, а также исследованы параметры, определяющие свойства корреляционной функции, и характеристики информационной скорости

сообщений, построенных на базе ортогональных сигнальных широкополосных символов. Смоделирована плотность распределения амплитуд сигнальных широкополосных символов и сообщений, построенных на их основе.

Результаты исследований показывают, что имеется существенный потенциал применения подобного класса сигналов для организации помехоустойчивых и защищенных каналов связи в системах ортогонального кодирования.

Литература

References

1. Сикарев А.А., Сикарев И.А., Гаранин А.В. Помехоустойчивость некогерентного приема при комплексном воздействии помех на каналы связи и мониторинга автоматизированных информационных систем речного водного транспорта на внутренних водных путях российской федерации // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 129–135.
2. Бывшев М.Е., Извеков А.Ю., Кабаков И.В., Назаров О.В., Незванов А.Ю., Пестов И.А., Савватеев Ю.И. и др. Оптимальный приём сигналов на фоне помех и шумов. М.: Радиотехника, 2011. 424 с.
3. Гришенцев А.Ю. Способ синтеза и применение шумоподобных широкополосных сигналов в задачах организации защищенных каналов связи // Радиотехника. 2017. № 9. С. 91–101.
4. Гришенцев А.Ю. Метод синтеза алфавитов ортогональных сигнальных широкополосных сообщений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1074–1083. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1074-1083
5. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. 2-е изд. М.: РадиоСофт, 2008. 512 с.
6. Сикарев А.А. О методе исследования влияния помех в каналах передачи дискретной информации // Радиотехника. 1968. № 8. С. 83.
7. Батоврин В.К., Гуляев Ю.В., Олейников А.Я. Обеспечение интероперабельности – основная тенденция в развитии открытых систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 5. С. 7–15.
8. Гуляев Ю.В., Журавлев Е.Е., Олейников А.Я. Методология стандартизации для обеспечения интероперабельности информационных систем широкого класса. Аналитический обзор // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 3. С. 12.
9. Ярлыков М.С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах. М.: Радиотехника, 2017. 416 с.
10. Книга Е.В., Жаринов И.О. Принципы построения комбинированной топологии сети для перспективных бортовых вычислительных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (88). С. 92–98.
11. Герасимов И.В., Кузьмин С.А. Архитектурный кризис специализированных интегральных схем по технологии «Система на кристалле» (снк). Смена базовой концепции // Известия международной академии наук высшей школы. 2012. С. 116.
12. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации. М.: Техносфера, 2011. 904 с.
13. Arslan H., Chen Z.N., Di Benedetto M.G. Ultra Wideband Wireless Communication. John Wiley & Sons, 2006. 520 p. doi: 10.1002/0470042397
14. Jarque C.M., Bera A.K. A test for normality of observations and regression residuals // International Statistical Review. 1987. V. 55. N 2. P. 163–172. doi: 10.2307/1403192
15. Lilliefors H. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown // Journal of the American Statistical Association. 1967. V. 62. N 318. P. 399–402. doi: 10.2307/2283970
16. Колмогоров А.Н. Избранные труды. Т. 2. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 2005. 581 с.
17. Sikarev A.A., Sikarev I.A., Garanin A.V. Interference margin of incoherent reception under the complex noises influence to monitoring and communication channels of automated information systems on the inland waterways the Russian Federation. *Information Security Problems. Computer Systems*, 2018, no. 1, pp. 129–135. (in Russian)
18. Byyshev M.E., Izvekov A.Yu., Kabakov I.V., Nazarov O.V., Nezvanov A.Yu., Pestov I.A., Savvateev Yu.I. et al. *Optimum Receiving of Signals against Noise*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2011, 424 p. (in Russian)
19. Grishentsev A.Yu. On the method of synthesis and application of broadband noise-like signals in the task organization of protected communication channels. *Radioengineering*, 2017, no. 9, pp. 91–101. (in Russian)
20. Grishentsev A.Yu. Synthesis method for alphabets of orthogonal signaling broadband communications. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1074–1083 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1074-1083
21. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E. *Noise Protection of Radio Systems with Spreading of Signals using Pseudo-Random Frequency Tuning*. 2nd ed. Moscow, RadioSoft Publ., 2008, 512 p. (in Russian)
22. Sikarev A.A. On method of research of noise influence in the transmission channels of discrete information. *Radiotekhnika*, 1968, no. 8, p. 83. (in Russian)
23. Batovrin V.K., Gulyaev Yu.V., Oleinikov A.Ya. Ensuring interoperability - a major trend in the open systems development. *Computer Science and Control*, 2009, no. 5, pp. 7–15. (in Russian)
24. Gulyaev Yu.V., Zhuravlev E.E., Oleinikov A.Ya. Standardization methodology for ensuring interoperability of wide class information systems. Analytical review. *Journal of Radioelectronics*, 2012, no. 3, p. 12. (in Russian)
25. Yarlykov M.S. *Meander (BOC - Modulated) Pseudorandom Signals and their Varieties in Satellite Radionavigation Systems*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017, 416 p. (in Russian)
26. Книга Е.В., Жаринив И.О. Design principles of a combined network topology for advances on-board computing system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6, pp. 92–98. (in Russian)
27. Gerasimov I.V., Kuz'min S.A. Architectural crisis of specialized integrated circuits using the “System on a chip” technology. Change of basis concept. *Izvestiya Mezhdunarodnoi Akademii Nauk Vysshei Shkoly*, 2012, p. 116. (in Russian)
28. Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, 674 p.
29. Arslan H., Chen Z.N., Di Benedetto M.G. *Ultra Wideband Wireless Communication*. John Wiley & Sons, 2006, 520 p. doi: 10.1002/0470042397
30. Jarque C.M., Bera A.K. A test for normality of observations and regression residuals. *International Statistical Review*, 1987, vol. 55, no. 2, pp. 163–172. doi: 10.2307/1403192
31. Lilliefors H. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 1967, vol. 62, no. 318, pp. 399–402. doi: 10.2307/2283970
32. Kolmogorov A.N. *Selected Works. V. 2. Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Nauka Publ., 2005, 581 p. (in Russian)
33. Ferrante G.C., Di Benedetto M.G. Spectral efficiency of random time-hopping CDMA. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2015, vol. 61, no. 12, pp. 6643–6662. doi: 10.1109/TIT.2015.2490218
34. Baskakov S.I. *Radio Circuits and Signals*. Moscow, Lenand, 2016, 528 p. (in Russian)

17. Ferrante G.C., Di Benedetto M.G. Spectral efficiency of random time-hopping CDMA // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2015. V. 61. N 12. P. 6643–6662. doi: 10.1109/TIT.2015.2490218
18. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Ленанд, 2016. 528 с.
19. Морелос-Сарагоза Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2006. 320 с.
20. Ipatov V.P. Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications. Wiley, 2004. 396 p.
21. Proakis J. Digital Communications. 2nd ed. Boston: Mcgraw-Hill, 1989. 800 p.
22. Price R., Green P. A communication technique for multipath channels // *Proceedings of the IRE*. 1958. V. 46. N 3. P. 555–570. doi: 10.1109/jrproc.1958.286870
23. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Prentice Hall, 2003. 1032 p.
24. Caso G., De Nardis L., Le M.T.P., Maschietti F., Fiorina J., Di Benedetto M.G. Performance evaluation of non-prefiltering vs. time reversal prefiltering in distributed and uncoordinated ir-uw b ad-hoc networks // *Mobile Networks and Applications*. 2017. V. 22. N 5. P. 796–805. doi: 10.1007/S11036-017-0829-6
25. IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. Channel Models for Fixed Wireless Applications. 2003.
26. Jeruchim M., Balaban P. Shanmugan K.S. Simulation of Communication Systems. 2nd ed. Springer, 2002. 908 p. doi: 10.1007/B117713
27. Гришенцев А.Ю., Елсуков А.И. Адаптивная синхронизация в системах скрытой широкополосной связи // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 4. С. 640–650. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-640-650
28. Freeman R.L. Radio System Design for Telecommunications. 3rd ed. Wiley-Interscience, 2007. 880 p.
29. Клюев Н.И. Информационные основы передачи сообщений. М.: Советское радио, 1966. 360 с.
30. Tranter W.H., Shanmugan K.S., Rappaport T.S., Kosbar K.L. Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications. New Jersey, USA, Prentice Hall, 2004. 800 p.
31. Foerster J., Green E., Somayazulu S., Leeper D. Ultra-wideband technology for short- or medium-range wireless communications // *INTEL Technology Journal Q2*. 2001. P. 1–11.
19. Morelos-Zaragoza R.H. *The Art of Error Correcting Coding*. 2nd ed. Wiley, 2006, 269 p.
20. Ipatov V.P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*. Wiley, 2004, 396 p.
21. Proakis J. *Digital Communications*. 2nd ed. Boston, Mcgraw-Hill, 1989, 800 p.
22. Price R., Green P. A communication technique for multipath channels. *Proceedings of the IRE*, 1958, vol. 46, no. 3, pp. 555–570. doi: 10.1109/jrproc.1958.286870
23. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Prentice Hall, 2003, 1032 p.
24. Caso G., De Nardis L., Le M.T.P., Maschietti F., Fiorina J., Di Benedetto M.G. Performance evaluation of non-prefiltering vs. time reversal prefiltering in distributed and uncoordinated ir-uw b ad-hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 796–805. doi: 10.1007/S11036-017-0829-6
25. *IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*. Channel Models for Fixed Wireless Applications. 2003.
26. Jeruchim M., Balaban P. Shanmugan K.S. *Simulation of Communication Systems*. 2nd ed. Springer, 2002, 908 p. doi: 10.1007/B117713
27. Grishentsev A.Yu., Elsuikov A.I. Adaptive synchronization in hidden broadband systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 640–650 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-640-650
28. Freeman R.L. *Radio System Design for Telecommunications*. 3rd ed. Wiley-Interscience, 2007, 880 p.
29. Klyuev N.I. *Informational Basics of Message Transferring*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1966, 360 p. (in Russian)
30. Tranter W.H., Shanmugan K.S., Rappaport T.S., Kosbar K.L. *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 2004, 800 p.
31. Foerster J., Green E., Somayazulu S., Leeper D. Ultra-wideband technology for short- or medium-range wireless communications. *INTEL Technology Journal Q2*, 2001, pp. 1–11.

Авторы

Гришенцев Алексей Юрьевич – доктор технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56321138400, ORCID ID: 0000-0003-1373-0670, AGrishentsev@yandex.ru

Коробейников Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, зам. директора по науке, Санкт-Петербургский филиал учреждения «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук», Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56128063300, ORCID ID: 0000-0002-9968-0207, Korobeynikov_A_G@mail.ru

Елсуков Артем Игоревич – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, АО «Концерн «НПО «Аврора», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-4360-9399, artemdeimon@gmail.com

Authors

Alexey Yu. Grishentsev – D.Sc., Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56321138400, ORCID ID: 0000-0003-1373-0670, AGrishentsev@yandex.ru

Anatoly G. Korobeynikov – D.Sc., Professor, Deputy director for science, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences St. Petersburg Filial, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56128063300, ORCID ID: 0000-0002-9968-0207, Korobeynikov_A_G@mail.ru

Artem I. Elsuikov – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; engineer, JSC Concern Aurora, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-4360-9399, artemdeimon@gmail.com