

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-24-33



Помехоустойчивость бинарных ЛЧМ-сигналов

- ✉ Сергей Сергеевич Дворников^{1,2}, dvornik.92@mail.ru
- ✉ Сергей Владимирович Селиванов³, selivanovi@yandex.ru
- ✉ Сергей Викторович Дворников^{1,2}✉, practicsv@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

²Военная академия связи им. С.М. Буденного, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

³АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», Москва, 121471, Российская Федерация

Аннотация: Рассмотрены результаты исследования помехоустойчивости приема сигналов с линейной частотной модуляцией в телекоммуникационных системах передачи информации. Получены аналитические выражения синтеза бинарных сигналов линейной частотной модуляцией с управляющими параметрами. Исследована зависимость структуры этих сигналов от формирующих параметров. Методом моделирования решена оптимизационная задача поиска максимального значения евклидова расстояния для сигналов линейной частотной модуляции бинарной структуры. Установлены различия в помехоустойчивости приема сигналов линейной частотной модуляции по отношению к бинарным структурам противоположных и ортогональных сигналов. Представлены эпюры временных и спектральных фрагментов сигналов линейной частотной модуляции, поясняющие сущность результатов исследования. Приведены графики сравнительной оценки помехоустойчивости приема бинарных сигналов различной структуры по показателю вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум в канале. Раскрыта сущность корреляционной обработки сигналов с большой базой.

Ключевые слова: сигналы линейной частотной модуляции, помехоустойчивость приема сигналов, минимальное евклидово расстояние, вероятность битовой ошибки

Ссылка для цитирования: Дворников С.С., Селиванов С.В., Дворников С.В. Помехоустойчивость бинарных ЛЧМ-сигналов // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 24–33. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-24-33. EDN:GIWAFM

Noise Immunity of Binary Chirp Signals

- ✉ Sergey Dvornikov^{1,2}, dvornik.92@mail.ru
- ✉ Sergey Selivanov³, selivanovi@yandex.ru
- ✉ Sergey Dvornikov^{1,2}✉, practicsv@yandex.ru

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 190000, Russian Federation

²Military Academy of Communications, St. Petersburg, 194064, Russian Federation

³JSC "Concern for Aerospace Defense "Almaz-Antey", Moscow, 121471, Russian Federation

Abstract: The results of a study of the noise immunity of receiving signals with linear frequency modulation in telecommunication information transmission systems are considered. Analytical expressions for the synthesis of binary signals by linear frequency modulation with control parameters are obtained. The dependence of the structure of linear frequency modulation signals on the shaping parameters has been studied. The optimization problem of finding the maximum value of the Euclidean distance for linear frequency modulation signals of a binary structure has been

solved by modeling. Differences have been established in the noise immunity of receiving linear frequency modulation signals in relation to the binary structures of opposite and orthogonal signals. Diagrams of time and spectral fragments of linear frequency modulation signals are presented, explaining the essence of the research results. Graphs are presented for comparative assessment of the noise immunity of receiving binary signals of various structures in terms of the bit error probability as a function of the signal-to-noise ratio in the channel. The essence of correlation processing of signals with a large base is revealed.

Keywords: linear frequency modulation signals, signal reception noise immunity, minimum Euclidean distance, bit error probability

For citation: Dvornikov-jr S., Selivanov S., Dvornikov S. Noise Immunity of Binary Chirp Signals. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(2):24–33. (In Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-24-33. EDN:GIWAFM

Введение

Высокая загруженность рабочих диапазонов частот, выделенных для работы телекоммуникационных систем, приводит к высокой вероятности возникновения взаимных помех [1–3].

Вместе с тем, традиционные подходы, основанные на использовании узкополосного класса сигналов [4, 5], не всегда обеспечивают требуемую своевременность и достоверность передачи сообщений [6, 7]. Поэтому необходим поиск новых технических направлений разрешения сложившейся ситуации.

Одно из таких решений основано на одновременном использовании нескольких радиоканалов для передачи информационного контента, так называемого режима с программной перестройкой рабочей частоты [8–10]. Такой подход основан на кратковременном использовании одного из выделенных каналов в текущий момент времени, приводящий к частотной избыточности [11, 12].

Частотная избыточность такого решения, основанная на последовательной передаче каждого бита информации на различных частотах, позволяет в результате, например, мажоритарного приема обеспечить высокую достоверность даже в случае непригодности нескольких из используемых каналов [13, 14].

Программная перестройка рабочей частоты относится к технологиям расширения спектра, которые активно применяются, в частности, в системах сотовой и персональной радиосвязи [15–17].

С одной стороны, такой подход достаточно продуктивен, однако он, преимущественно, ориентирован на работу в ОВЧ- и УВЧ-диапазонах. Реализация режима программной перестройки в низкочастотных диапазонах связана с определенными сложностями, обусловленными низкой канальной скоростью передачи [18]. В результате время пребывания на одной частоте приходится существенно увеличивать, что, в свою очередь, приводит к существенному снижению информационной скорости и возникновению взаимных помех с источниками радиоизлучений, работающих на закрепленных частотах [19, 20]. Аналогичный негативный

эффект наблюдается и в диапазоне более высоких номиналов частот, при переходе к так называемому медленному режиму с программной перестройкой, при котором за время пребывания на текущей рабочей частоте передается несколько информационных посылок [21, 22].

В таких условиях рациональным решением является переход к применению широкобазисных шумоподобных сигналов, к которым, в частности, относятся сигналы с линейной-частотной модуляцией (в дальнейшем по тексту ЛЧМ-сигналы) [23, 24], получивших широкое практическое применение в радиолокации.

В статье представлены результаты оценки помехоустойчивости приема ЛЧМ-сигналов бинарной структуры в полосе работы узкополосных излучений.

Аналитическая модель ЛЧМ-сигналов

ЛЧМ-сигналы относят к классу широкобазисных сигналов, у которых величина базы B существенно больше единицы [24–26]:

$$B = \Delta F \times \tau \gg 1. \quad (1)$$

где ΔF – занимаемая ЛЧМ-сигналом полоса частот; τ – длительность ЛЧМ-импульса.

Однако, если занимаемая полоса частот ΔF сопоставима с полосой частот, занимаемой узкополосными излучениями, такими как двоичная фазовая манипуляция (BPSK, аббр. от англ. Binary Phase Shift Key) [27, 28], то в этом случае ЛЧМ-конструкции перестают быть широкополосными сигналами. Однако они могут быть использованы для передачи информации. Поэтому практический интерес представляют результаты оценки помехоустойчивости их приема. Несмотря на название ЛЧМ, к данному классу сигналов, как правило, относят сигналы с любым законом изменения несущей частоты при ее возрастании или убывании [29]. Такая особенность открывает возможность синтеза ЛЧМ-сигналов с многоуровневой структурой, способных на длительности одного символа передавать несколько информационных битов.

В рамках настоящей статьи сформулируем задачу исследования следующим образом: на основе анализа характера изменения параметров, определяющих возможность синтеза бинарных структур ЛЧМ-сигналов, получить аналитическое выражение зависимости вероятности битовой ошибки; провести эксперимент, позволяющий оценить возможность выделения (обнаружения) бинарных структур ЛЧМ-сигнала в полосе приема узкополосных излучений, без снижения их помехоустойчивости.

Обобщенное выражение для многоуровневого ЛЧМ-сигнала с постоянной огибающей имеет следующий вид [25]:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{\tau}} \cos(\omega_c t + \phi_i(t) + \theta), \quad (2)$$

где E_s – энергия ЛЧМ-символа; $\omega_c = 2\pi f_0$; f_0 – частота несущего колебания.

$$0 \leq t \leq \tau, \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

где M – общее количество формируемых информационных символов (в соответствии с целевой установкой, в дальнейшем исследовании будем полагать, что ЛЧМ-сигнальные конструкции имеют только две частотные структуры, т. е. $M = 2$).

В выражении (2) $\phi_i(t)$ – фаза ЛЧМ-сигнала, структура которого как раз и определяет его различия при передаче информационного сигнала «0» и «1».

В свою очередь фаза ЛЧМ-сигнала зависит от параметра d_i , определяющего изменение закона ее возрастания или убывания:

$$\phi_{1,0}(t) = d_{1,0}g(t), \quad (3)$$

где

$$d_{1,0} = \begin{cases} + & \text{если } i = 1 \\ - & \text{если } i = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Каждое текущее значение d_i определяет один из информационных символов «1» или «0».

В свою очередь величина $g(t)$ определяется структурными различиями ЛЧМ-сигналов:

$$g(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \quad t > \tau \\ 2\pi \int_0^t f_d(\tau) d\tau, & 0 \leq t \leq \tau \\ pq = \pi(v - \omega), & t = \tau \end{cases}, \quad (5)$$

где pq – обозначает конечную фазу в момент окончания символа, т. е. в момент $t = \tau$; $f_d(\tau)$ – функция мгновенной частоты, определяемую формулой [23]:

$$f_d(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \quad t > \tau \\ \left(\frac{v}{2\tau}\right) - \left(\frac{\omega}{\tau^2}\right)t, & 0 \leq t \leq \tau \end{cases}. \quad (6)$$

С учетом введенных обозначений, функцию изменения фазы ЛЧМ-сигнала представим в виде:

$$g(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \quad t > \tau \\ d_i \pi \left\{ v \left(\frac{t}{\tau}\right) - \omega \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 \right\}, & 0 \leq t \leq \tau \\ d_i \pi q = d_i \pi (v - \omega), & t = \tau \end{cases}. \quad (7)$$

В (7) значения v и ω представляют собой безразмерные параметры. При том, что величина v характеризует размах отклонения частоты, отнесенный к скорости передачи символов $1/\tau$, а ω представляет собой отношение ширины занимаемой полосы частоты к скорости передачи символов $1/\tau$. Фактически значения $v = (q + \omega)$ и (q, ω) представляют собой набор независимых параметров, определяющих характер модуляции ЛЧМ-сигнала, т. е. закон изменения частоты. В случае построения бинарных информационных систем в качестве физических носителей будут выступать импульсы одинаковой длительности, соответственно с возрастающим и убывающим по линейному закону значением несущей частоты. Для бинарных систем линейное изменение частоты ЛЧМ-сигнала предполагает или положительный (возрастающий), или отрицательный (убывающий) наклон на частотно-временной плоскости, соответствующий одному из информационных символов «0» или «1». В качестве примера на рисунке 1 изображено частотно-временное представление ЛЧМ-сигналов бинарной структуры $s_1(t, f)$ и $s_0(t, f)$, предназначенных для передачи информационного сигнала «0» и «1».

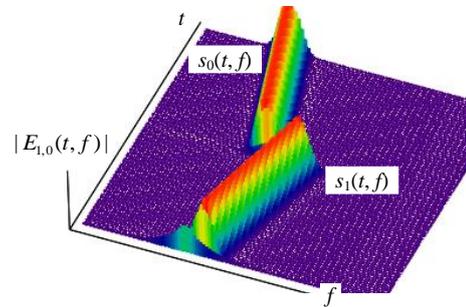


Рис. 1. Частотно-временное представление ЛЧМ-сигнала бинарной структуры

Fig. 1. Time-Frequency Representation of a Chirp Signal of a Binary Structure

С учетом выражений (1–7) результирующее уравнение синтеза ЛЧМ-сигналов для простейшей бинарной системы при произвольных значениях параметров (q, ω) можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} i = +1 \rightarrow s_1(t) &= \sqrt{\frac{2E_s}{\tau}} \times \\ &\times \cos \left[\omega_c t + \pi \left\{ v \left(\frac{t}{\tau}\right) - \omega \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 \right\} \right] \\ i = -1 \rightarrow s_0(t) &= \sqrt{\frac{2E_s}{\tau}} \times \\ &\times \cos \left[\omega_c t - \pi \left\{ v \left(\frac{t}{\tau}\right) - \omega \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 \right\} \right] \end{aligned} \right\} 0 \leq t \leq \tau. \quad (8)$$

В качестве примера, на рисунке 2а представлен импульс с возрастающей ЛЧМ, а на рисунке 2б, соответственно, – с убывающей ЛЧМ.

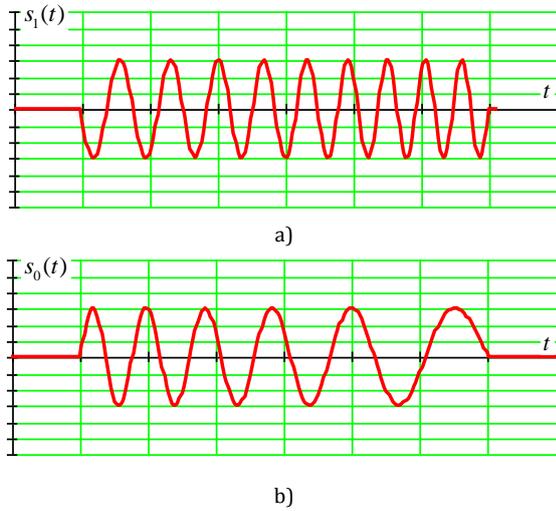


Рис. 2. Импульс ЛЧМ-сигнала с возрастающей (а) и убывающей (б) частотой

Fig. 2. Chirp Signal Pulse with Increasing (a) and Decreasing (b) Frequency

Для линейного закона изменения частоты достаточно получить аналитическое выражение, характеризующее его спектральное представление.

Допустим, что на интервале времени $[-T/2; T/2]$ существует импульс ЛЧМ-сигнала единичной амплитуды, девиация частоты которого изменяется в пределах $[-\Delta F/2; \Delta F]$. Тогда, переходя к формуле Эйлера, представим ЛЧМ-сигнал в следующей аналитической форме:

$$s(t) = \exp \left[j \left(\Delta \Omega t + \frac{\Delta \Omega}{2T} t^2 \right) \right], \quad (9)$$

где $\Delta \Omega = 2\pi \Delta F$ и $-T/2 < t < T/2$; j – знак комплексного сопряжения.

Для получения спектрального представления ЛЧМ-сигнала воспользуемся преобразованием Фурье [17]:

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \int_{-T/2}^{T/2} \exp \left[j \left(\Delta \Omega t + \frac{\Delta \Omega}{2T} t^2 \right) \right] \exp(-j\omega t) dt = \\ &= \int_{-T/2}^{T/2} \exp \left[j \left((\Delta \Omega - \omega)t + \frac{\Delta \Omega}{2T} t^2 \right) \right] dt. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее, используя интеграл Френеля [30]:

$$\begin{aligned} C(X) &= \int_0^X \cos \left(\frac{\pi y^2}{2} \right) dt, \\ S(X) &= \int_0^X \sin \left(\frac{\pi y^2}{2} \right) dt, \end{aligned} \quad (11)$$

Перепишем выражение (10) к виду, удобному для проведения последующих вычислений:

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \sqrt{\frac{\pi T}{\Delta \Omega}} \exp \left[-j(\omega - \Delta \Omega)^2 \times \frac{T}{\Delta \Omega} \right] \times \\ &\times [C(X_1) + jS(X_1) + C(X_2) + jS(X_2)]. \end{aligned} \quad (12)$$

Учитывая, что в соответствии с [31], значения аргументов интеграла Френеля рассчитываются согласно следующей формуле:

$$X_1 = \frac{\frac{\Delta \Omega}{2} + (\omega - \Delta \Omega)}{\sqrt{\frac{\pi \Delta \Omega}{T}}}, \quad X_2 = \frac{\frac{\Delta \Omega}{2} + (\Delta \Omega - \omega)}{\sqrt{\frac{\pi \Delta \Omega}{T}}}, \quad (13)$$

выражение, характеризующее спектр ЛЧМ-сигнала, будет состоять из трех основных компонентов [30]:

$$\begin{aligned} |S(\omega)| &= \sqrt{\frac{\pi T}{\Delta \Omega}} \times \\ &\times \sqrt{[C(X_1) + jS(X_1)]^2 + [C(X_2) + jS(X_2)]^2}, \\ -\Phi_1(\omega) &= (\omega - \Delta \Omega)^2 \frac{T}{2\Delta \Omega}, \\ \Phi_2(\omega) &= \text{arctg} \left[\frac{S(X_1) + S(X_2)}{C(X_1) + C(X_2)} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Так как аргумент $\Phi_2(\omega) \rightarrow 1$ на большей части рассматриваемого частотного диапазона, то величина $\Phi_2 \rightarrow \pi/4$. Следовательно, с учетом масштабирования частотных значений коэффициентом $n = 2(\omega - \omega_0)/\Delta \Omega$, выражения для расчета аргументов интеграла Френеля могут быть переписаны к следующему виду:

$$X_1 = \frac{\sqrt{T \times \Delta F}}{\sqrt{2}} (1 + n), \quad X_2 = \frac{\sqrt{T \times \Delta F}}{\sqrt{2}} (1 - n). \quad (15)$$

По результатам аналитического исследования можно заключить, что спектры ЛЧМ-сигнала определяются только величиной длительности ЛЧМ-импульса T , характеризующего информационный символ, и значением девиации частоты ΔF . При этом оба эти показателя не зависят ни от номинала несущей, т. е. значения центральной частоты, ни от формы функции огибающей модулирующих импульсов. В качестве примера, на рисунке 3 представлены модули спектрального представления сигналов $s_1(t)$ $s_0(t)$, обозначенные как $|S_1(\omega)|$ и $|S_0(\omega)|$, где величина f_0 обозначает центральную частоту спектра (начальное значение изменения частоты ЛЧМ-сигнала). Спектры симметричны относительно частоты $f_0 = \omega_c/2\pi$ только при условии равенства параметров h и ω , т. е. $h = \omega$. Полученные результаты указывают на существенные различия сигналов $s_1(t)$ и $s_0(t)$ как в спектральной, так и во временной областях, необходимые для использования их в качестве носителей бинарной информации.

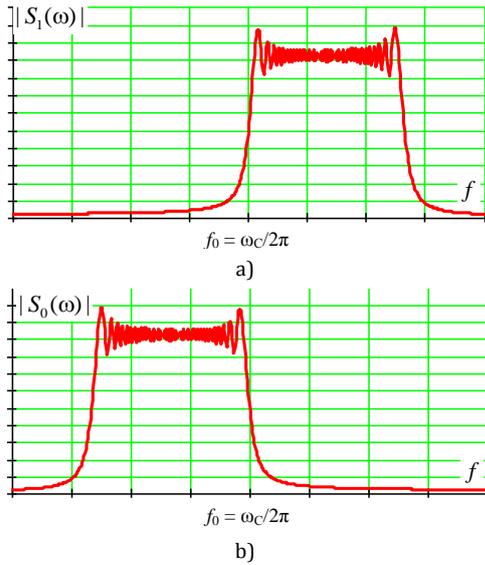


Рис. 3. Спектр ЛЧМ-сигнала с возрастающей (а) и убывающей (б) частотой

Fig. 3. Spectrum of a Chirp Signal with Increasing (a) and Decreasing (b) Frequency

Оценка помехоустойчивости приема ЛЧМ-сигналов

В общем случае, помехоустойчивость приема ЛЧМ-импульсов определяется структурными различиями между сигнальными конструкциями, используемыми для передачи различных битов информационных сообщений.

Для многоразрядных и информационных систем указанные различия будут определяться минимальным евклидовым расстоянием между двумя любыми многоуровневыми модулированными ЛЧМ-сигналами $s_i(t)$ и $s_j(t)$, описываемыми выражением (2). Для бинарных систем евклидово расстояние будет единственным и величину квадрата его значения между сигналами $s_1(t)$ и $s_0(t)$ можно записать следующим выражением:

$$D^2(s_1, s_0) = \int_0^{\tau} [s_1(t) - s_0(t)]^2 dt, \tag{16}$$

которое можно преобразовать к виду:

$$D^2(s_1, s_0) = 2E_s(1 - K(s_1, s_0)). \tag{17}$$

В выражении (17) $K(*)$ – результат корреляции между ЛЧМ-конструкциями $s_1(t)$ и $s_0(t)$, который может быть рассчитан по формуле:

$$K(s_1, s_0) = \frac{1}{E_s} \int_0^{\tau} s_1(t)s_0(t)dt. \tag{18}$$

Выражение (18) представляет собой нормированный корреляционный интеграл (результат корреляции) между сигнальными конструкциями $s_1(t)$ и $s_0(t)$. Поскольку производительность оптимального приемника, принимающего решение при демодуляции по критерию максимального правдоподобия, определяется только евклидовым расстоянием между сигнальными конструкциями, то помехоустойчивость оптимального приема, характеризующаяся вероятностью символьной ошибки, вычисляется согласно выражению:

$$p_e \approx Q \left[\sqrt{\frac{D^2}{2N_0}} \right], \tag{19}$$

где N_0 – спектральная плотность мощности шума; Q – интеграл ошибок, определяемый как:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \tag{20}$$

Нормализация вида d^2 открывает возможность сравнения между собой различные бинарные сигнальные конструкции, в том числе и с ЛЧМ:

$$d^2 = \frac{D^2}{2E_b}, \tag{21}$$

где E_b – энергия, приходящаяся на бит.

Для системы противоположных сигналов, которые используются при модуляции BPSK, параметр d будет равен:

$$d_{\text{BPSK}}^2 = 2. \tag{22}$$

Согласно [17], результат (22) является максимально достижимым для бинарных систем. Поэтому значение коэффициента d^2 можно использовать для оценки выигрыша в помехоустойчивости, при использовании той или иной пары сигнальных конструкций, используемых для передачи информации:

$$G = 10 \lg \left(\frac{d^2}{d_{\text{BPSK}}^2} \right). \tag{23}$$

Таким образом, коэффициент G характеризует энергетический проигрыш в помехоустойчивости любой системы сигналов, используемых для передачи бинарной информации по отношению к модуляции BPSK. Подставляя в (19) значение D^2 из формулы (21), получим выражение оценки вероятности битовой ошибки ЛЧМ-сигнала с учетом энергии (24), приходящейся на символ (для бинарных систем эквивалентна значению энергии, приходящейся на бит), где $h^2 = E_b/N_0$ – отношение мощности энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума (далее ОСШ).

$$p_e \approx Q \left[\sqrt{\frac{D^2}{2N_0}} \right] = Q \left[\sqrt{\frac{2E_b d_{\text{ЛЧМ}}^2}{2N_0}} \right] = Q \left[\sqrt{\frac{2E_b(1 - K(s_1, s_0))}{2N_0}} \right] = Q \left[\sqrt{h^2(1 - K(s_1, s_0))} \right]. \tag{24}$$

Согласно выражению (24), помехоустойчивость приема ЛЧМС-сигналов определяется значением коэффициента их корреляции $K(s_1, s_0)$. В [30] обосновано, что его величина определяется набором независимых параметров (q, ω) , определяющих характер модуляции ЛЧМ-сигнала. При этом расчет $K(s_1, s_0)$ как функции (q, ω) может быть получен аналитически или вычислен в процессе моделирования.

Так, коэффициент взаимной корреляции двух сигналов в рассматриваемой ситуации $s_1(t)$ и $s_0(t)$, представляет собой результат вычислений:

$$K(s_1, s_0) = \frac{M[(s_1(t) - M[s_1(t)])(s_0(t) - M[s_0(t)])]}{\sigma[s_1(t)]\sigma[s_0(t)]}, \quad (25)$$

где $M[*]$ – математическое ожидание; $\sigma[*]$ – среднее квадратическое отклонение.

Подставляя в условие (25) значения ЛЧМ-сигналов из выражения (8), получаем возможность расчета $K(s_1, s_0)$ как функции (q, ω) , учитывая, что значение $v = (q + \omega)$. На рисунке 4 представлены результаты проведенного моделирования.

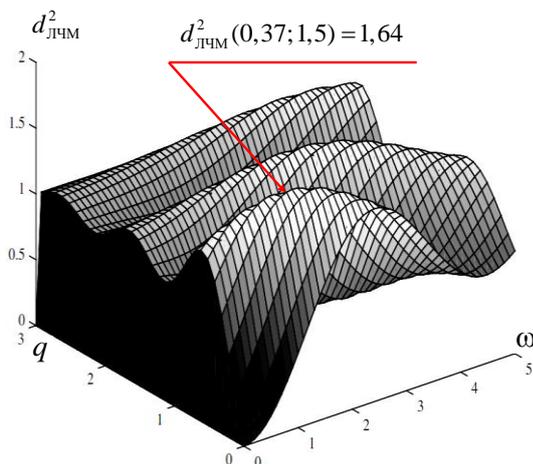


Рис. 4. Распределение минимального евклидова расстояния как функции параметров (q, ω)

Fig. 4. Distribution of Minimum Euclidean Distance as a Function of Parameters (q, ω)

Моделирование проведено в соответствии с выражением (17), при $E_s = 1$. Локализация максимума распределения $d^2_{ЛЧМ}(q, \omega)$ получена путем градиентного поиска.

Искомое значение $d^2_{ЛЧМ}(q, \omega) = 1,64$, полученное по результатам поиска максимума распределения минимального евклидова расстояния как функции параметров (q, ω) (см. рисунок 4), позволяет преобразовать выражение (24) к виду:

$$p_e^{ЛЧМ} \approx Q \left[\sqrt{\frac{1,64E_b}{N_0}} \right] = Q \left[\sqrt{1,64h^2} \right]. \quad (26)$$

Заметим, что для сигналов BPSK значение вероятности битовой ошибки будет определяться следующим выражением:

$$p_e^{BPSK} \approx Q \left[\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right] = Q \left[\sqrt{2h^2} \right], \quad (27)$$

а для сигналов частотной манипуляции (FSK, аббр. от англ. Frequency Shift Key) как:

$$p_e^{FSK} \approx Q \left[\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right] = Q \left[\sqrt{h^2} \right]. \quad (28)$$

Для получения графической зависимости вероятности битовой ошибки как функции ОСШ воспользуемся функцией Гаусса, которая связана с интегралом ошибок следующим соотношением:

$$Q(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2/2) dt = \frac{1}{2} (1 + \text{erf}[x/\sqrt{2}]). \quad (29)$$

На рисунке 5 представлены результаты зависимости вероятности битовой ошибки (для бинарных сигналов она совпадает с символьной ошибкой) от $p_e(h^2)$, для следующих сигнальных конструкций: BPSK, FSK и ЛЧМ.

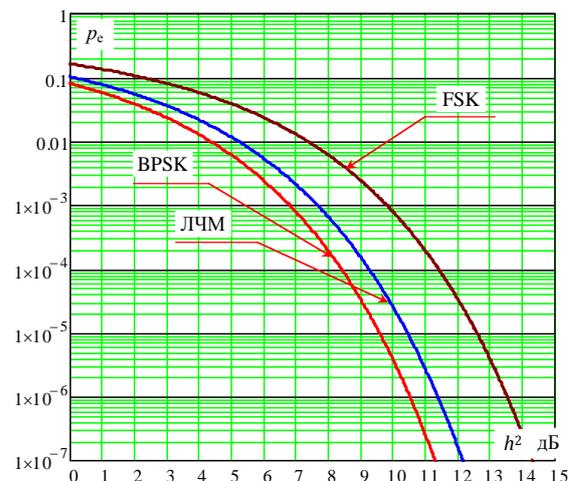


Рис. 5. Вероятность битовой ошибки для бинарных сигналов

Fig. 5. Bit Error Probability for Binary Signals

Результаты оценки вероятности битовой ошибки бинарных сигнальных конструкций ЛЧМ позволяют заключить, что они уступают сигналам BPSK в помехоустойчивости порядка 1 дБ ($p_e = 10^{-7}$), при прочих равных условиях. При этом следует понимать, что поскольку ЛЧМ-конструкции относятся к классу широкополосных шумоподобных сигналов, база которых может быть существенно больше единицы, см. выражение (1), то для них открывается возможность использования так называемого эффекта усиления за счет обработки [24]. Данный эффект основан на повышении помехоустойчивости за счет избыточности занимаемой шумоподоб-

ными сигналами полосы частот. А желаемый результат обеспечивается по результатам корреляционной обработки на приеме.

В качестве примера на рисунке 6 показан диапазон частот в полосе приемного тракта от 4 до 20 кГц. В полосе приема наблюдаются спектры двух узкополосных сигналов $S_{1У}(f)$ и $S_{2У}(f)$, а также спектр ЛЧМ-сигнала $S_{ЛЧМ}(f)$ с базой $B = 6$. Спектр ЛЧМ-сигнала $S_{ЛЧМ}(f)$ дополнительно выделен контуром.

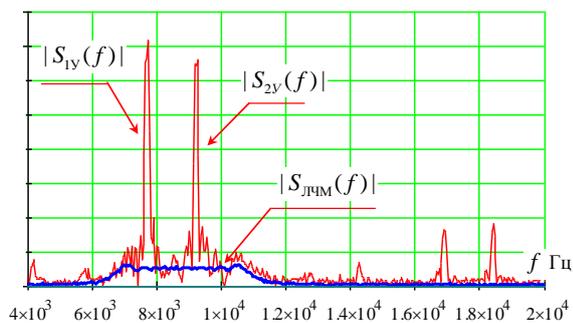


Рис. 6. Спектральное представление ЛЧМ-сигнала и узкополосных сигналов

Fig. 6. Spectral Representation of Chirp Signal and Narrowband Signals

Отметим, что даже при таком значении базы спектр ЛЧМ-сигнала полностью скрыт спектрами узкополосных излучений. Вместе с тем результат автокорреляционной обработки позволяет обнаружить искомый ЛЧМ-сигнал (рисунок 7, где показан временной фрагмент аддитивной суммы входной реализации, включающий узкополосные сигналы $s_{1У}(t)$, $s_{2У}(t)$, и ЛЧМ-сигнал $s_{ЛЧМ}(t)$, а также $R(t)$ – его автокорреляционную функцию).

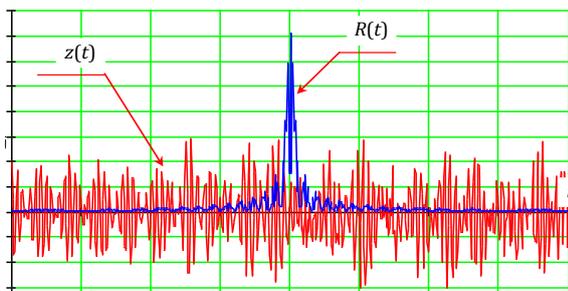


Рис. 7. Входная реализация аддитивной смеси сигналов и автокорреляционная функция ЛЧМ-сигнала

Fig. 7. Input Implementation of an Additive Mixture of Signals and the Autocorrelation Function of a Chirp Signal

Список источников

1. Дорохов С.В., Михайлов В.Э. Методика расчета коэффициента взаимной корреляции между двумя случайными сигналами в условиях помех эфира // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 12. С. 17–23. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-12-17-23. EDN:EDSFRD
2. Солодун К.Д. Мерцающие помехи при индивидуально-взаимной защите авиационной техники // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 10. С. 28–35. DOI:10.18127/j00338486-202310-03. EDN:SFTXIX
3. Дворников С.В., Погорелов А.А., Вознюк М.А., Иванов Р.В. Оценка имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией // Информация и космос. 2016. № 1. С. 32–35. EDN:VPQCFF
4. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И., Бельгибаев Р.Р., Овчинников В.В., Чернядьев А.В. Развитие методов спектрального мониторинга помех КВ-диапазона для определения доступности парциальных ионосферных радиоканалов с учетом особенностей изменчивого спектра // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 64–77. DOI:10.18127/j00338486-202312-08. EDN:XABCVS

Результаты обработки, представленные на рисунках 6 и 7, получены при условии, что отношение суммарной спектральной плотности мощности узкополосных сигналов к спектральной плотности мощности ЛЧМ-сигнала составляет порядка 5,8 дБ. Очевидно, что дальнейшее увеличение базы ЛЧМ-сигнала, т. е. расширение полосы занимаемых частот, приведет к повышению достоверности его приема.

Заключение

Полученные результаты позволяют судить о достижении частной цели исследования, поскольку авторами получено аналитическое выражение, определяющее зависимость вероятности битовой ошибки от ОСШ в канале приема, а представленные результаты проведенного эксперимента однозначно указывают на возможность обнаружения бинарных структур ЛЧМ-сигнала в полосе приема узкополосных излучений, без снижения их помехоустойчивости. В частности, установлено, что даже в узкополосном режиме, когда $B = 1$, помехоустойчивость приема ЛЧМ-сигналов достаточно высока. Она обеспечивает энергетический выигрыш по отношению к ортогональным системам сигналов FSK, лишь уступая в помехоустойчивости порядка 1 дБ системам, использующим сигналы BPSK. При этом возможность повышения значения базы для ЛЧМ-сигналов открывает интересные перспективы для их использования в широкополосных телекоммуникационных системах.

Проведенное исследование позволяет получить аналитические выражения для синтеза ЛЧМ-сигналов в интересах бинарных информационных систем и оценки помехоустойчивости их приема по показателю вероятности битовой ошибки.

Свойство независимости ширины спектра ЛЧМ-сигнала от закона изменения его частоты (полной фазы), позволяет сформировать систему символов для многоразрядного кодирования, обеспечивающего существенное повышение информационной скорости передачи в канале.

Данное направление авторы рассматривают в качестве дальнейшего исследования. Другое направление авторы связывают с использованием методов частотно-временного анализа для повышения достоверности приема [32–35].

5. Попов О.В., Тумашов А.В., Борисов Г.Н., Коровин К.О. Методика расчета радиуса зоны электромагнитной доступности источника поверхностных волн с заданной плотностью спектра изотропно излучаемого сигнала // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 72–79. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-72-79. EDN:MGHEIF
6. Ашимов Н.М., Васин А.С., Бирюков А.Н., Кузьмищев П.Г. Помехоустойчивость и помехозащищенность радиолиний управления, работающих с фазоманипулированными широкополосными сигналами // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26. № 2. С. 36–43. DOI:10.18127/j15604128-202102-04. EDN:OZTIWF
7. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Ведерникова Ю.А., Чернов А.А. Метод синхронизации систем низкоскоростной передачи телеграфных сообщений малого объема на КВ-трассах большой протяженности // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 6–16. DOI:10.18127/j00338486-202312-02. EDN:KKAIFD
8. Хвостунов Ю.С. Предложения по построению аналоговой части SDR радиоприёмных устройств декаметрового диапазона системы радиосвязи с ППРЧ // Техника средств связи. 2022. № 1(157). С. 35–44. EDN:MRGPVL
9. Дворников С.В., Дворников С.С., Жеглов К.Д. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 11. С. 15–20. DOI:10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20. EDN:YLWCFH
10. Захаров В.Л., Витомский Е.В. Методы построения помехозащищенных ппрч-сигналов // Известия Института инженерной физики. 2019. № 4(54). С. 50–54. EDN:XZOGPW
11. Прохоров В.Е. Сравнительный анализ эффективности двух схем захвата сигналов с ППРЧ // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 1. С. 74–84. EDN:FMJPIA
12. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с. EDN:QKNPYL
13. Filippov B.I. The choice of signals for hydroacoustic navigation system of transformation underwater apparatus to docking module // T-Comm. 2021. Vol. 15. Iss. 6. PP. 56–64. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-6-56-64. EDN:DPDQX
14. Болелов Э.А., Козлов А.И., Романенко Н.М. Аффинное проектирование как инструмент разделения сигналов от радиолокационных целей // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 1(49). С. 22–32. DOI:10.24412/2221-2574-2023-1-22-32. EDN:EJBZLN
15. Дворников С.В., Овчинников Г.Р., Балыков А.А. Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. 2019. № 3. С. 6–12. EDN:CGVGJ
16. Зотов К.Н., Жданов Р.Р. О применимости помех в сетях сотовой связи для создания защищённого канала связи // Вестник СибГУТИ. 2020. № 3(51). С. 90–100. EDN:GJEDGS
17. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge University Press, 2005.
18. Дворников С.В., Дворников С.С., Пшеничников А.В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Информационно-управляющие системы. 2019. № 4(101). С. 62–68. DOI:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68. EDN:VUYFYO
19. Pavlov S.V., Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V. Improving the Stability of Satellite Synchronization of Single-Frequency Television Transmitters Under the Influence of Interference // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2022. Vol. 5. Iss. 1. PP. 248–253. DOI:10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840977
20. Дворников С.В., Дворников С.С., Иванов Р.В., Гулидов А.А., Чихонадских А.П. Защита от структурных помех радиоканалов с частотной манипуляцией // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 3. С. 193–198. EDN:YHCWCR
21. Фокин Г.А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 1. Модель двух радиолиний // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 44–63. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63. EDN:DIEAKU
22. Yang K., Wu Zh., Guo X., Wu J., Cao Y., Qu T., et al. Estimation of co-channel interference between cities caused by ducting and turbulence // Chinese Physics B. 2022. Vol. 31. Iss. 2. P. 024102. DOI:10.1088/1674-1056/ac339c
23. Qi L., Shen Zh., Guo Q., Wang Y., Mykola K. Chirp Rates Estimation for Multiple LFM Signals by DPT-SVD // Circuits, Systems, and Signal Processing. 2023. Vol. 42. Iss. 5. PP. 2804–2827. DOI:10.1007/s00034-022-02225-x
24. Laurent N., Colominas M.A., Meignen S. On Local Chirp Rate Estimation in Noisy Multicomponent Signals: With an Application to Mode Reconstruction // IEEE Transactions on Signal Processing. 2022. Vol. 70. PP. 3429–3440. DOI:10.1109/tsp.2022.3186832
25. Dong W.X., Lai Yu.Yu., Hu J. Detecting spatial chirp signals by Luneburg lens based transformation medium // Optics Express. 2022. Vol. 30. Iss. 6. P. 9773. DOI:10.1364/oe.453937. EDN:FDDCCI
26. Чан Х.Н., Подстригаев А.С., Нгуен Ч.Н. Алгоритмы анализа линейно-частотно-модулированных сигналов на основе частотно-временного анализа // XXVIII Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти Б.Я. Осипова «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, Россия, 27–29 сентября 2022). Воронеж: Воронежский государственный университет, 2022. Т. 2. С. 371–378. EDN:XYVWID
27. Дворников С.В., Кузнецов Д.А., Кожевников Д.А., Пшеничников А.В., Манаенко С.С. Теоретическое обоснование синтеза ансамбля биортогональных сигналов с повышенной помехоустойчивостью // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 5. С. 16–20. EDN:UMOIYB
28. Golubicic Z.T., Simic S.M., Zejak A.J., Reljic B.M., Maric S. High speed target tracking radar system based on the use of BPSK signal and digital Doppler shift compensation // Military Technical Courier. 2022. Vol. 70. Iss. 2. PP. 357–371. DOI:10.5937/vojtehg70-36589
29. Geng Ch.Q., Kuan H.Ju., Luo L.W. Inverse-chirp imprint of gravitational wave signals in scalar tensor theory // The European Physical Journal C. 2020. Vol. 80. Iss. 8. PP. 1–6. DOI:10.1140/epjc/s10052-020-8359-y
30. Alsharef M., Hamed A., Rao R.K. Error Rate Performance of Digital Chirp Communication System over Fading Channels // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS, San Francisco, USA, 21–23 October 2015). URL: https://www.researchgate.net/publication/326782880_Error_Rate_Performance_of_Digital_Chirp_Communication_System_over_Fading_Channels (Accessed 01.04.2024)

31. Alsharef M., Rao R.K. Multi-mode multi-level continuous phase chirp modulation: Coherent detection // Proceedings of the 29th Annual IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Vancouver, Canada, 15–18 May 2016). IEEE, 2016. DOI:10.1109/CCECE.2016.7726777
32. Дворников С.В., Кудрявцев А.М. Теоретические основы частотно-временного анализа кратковременных сигналов. СПб.: ВАС, 2010. 240 с. EDN:QMUYKH
33. Шелихова Т.С., Дроздова В.Г. Анализ эффективности использования частотно-временного ресурса для различных CORESET-конфигураций в сетях 5G NR // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17. № 4. С. 97–108. DOI:10.55648/1998-6920-2023-17-4-97-108. EDN:JASPNV
34. Дворников С.В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений энергии нестационарных процессов в частотно-временном пространстве (обзор) // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 47–60. EDN:YUZUOE
35. Гришин В.Г., Гришин О.В., Никульцев В.С., Гулятьева В.В., Зинченко М.И., Урюмцев Д.Ю. Частотно-временной анализ колебаний показателей внешнего дыхания и сердечного ритма человека при физической нагрузке // Биофизика. 2022. Т. 67. № 4. С. 755–762. DOI:10.31857/S0006302922040147. EDN:IUKFYZ

References

1. Dorokhov S.V., Mikhaylov V.E. Method for Calculating Cross-Correlation Coefficient Between Two Random Signals in the Presence of Etheric Interference. *T-Comm*. 2021;15(12):17–23. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-12-17-23. EDN:EDSFRD
2. Solodun K.D. Blinking Jamming in Individual-Mutual Protection of Aircraft. *Radioengineering*. 2023;87(10):28–35. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202310-03. EDN:SFTXIX
3. Dvornikov S.V., Pogorelov A.A., Voznyuk M.A., Ivanov R.V. Assessment of the simulation resistance of control channels with frequency modulation. *Information and space*. 2016;1:32–35. (in Russ.) EDN:VPQCFF
4. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova M.I., Belgibaev R.R., Ovchinnikov V.V., Chernyadyev A.V. Development of Methods for Spectral Monitoring of HF Interferences for Assessing the Availability of Ionospheric Radio Channels, Considering the Features of the Varying Spectrum. *Radioengineering*. 2023;87(12):64–77. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202312-08. EDN:XABCVS
5. Popov O.V., Tumashov A.V., Borisov G.N., Korovin K.O. Method for Calculating the Radius of an Electromagnetic Availability Zone Based on a Surface Wave Source with a Given Spectrum Density of an Isotropically Emitted Signal. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2022;8(3):72–79. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-72-79. EDN:MGHEIF
6. Ashimov N.M., Vasin A.S., Biryukov A.N., Kuzmishchev P.G. Noise Immunity and Interference Security of Control Radio Links Operating with Phase-Shift Keyed Broadband Signals. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2021;26(2):36–43. (in Russ.) DOI:10.18127/j15604128-202102-04. EDN:OZTIWF
7. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Vedernikova Yu.A., Chernov A.A. Synchronization of Radio Engineering Communication Systems and Sounding of Ionospheric High-Frequency Radio Channels. *Radioengineering*. 2023;87(12):6–16. DOI:10.18127/j00338486-202312-02. EDN:KKAIFD
8. Khvostunov Yu.S. Proposals for the Construction of the Analogue Part of the SDR Radio Receivers of the HF Radio Network with FHSS. *Means of Communication Equipment*. 2022;1(157):35–44. (in Russ.) EDN:MRGPVL
9. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Zheglov K.D. Proactive Suitability Control of Radio Channels in IFB Mode. *T-Comm*. 2022;16(11):15–20. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20. EDN:YLWCFH
10. Zakharov V.L., Vitomsky E.V. Methods for Constructing Interference-Protected Frequencyfrequency Interference Signals. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*. 2019;4(54):50–54. (in Russ.) EDN:XZOGPW
11. Prokhorov V.E. Comparative Analysis of Two Schemes Efficiency of Signals Pickup with Frequency-Hopping Spread Spectrum. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*. 2019;1:74–84. (in Russ.) EDN:FMJPIA
12. Makarenko S.I., Ivanov M.S., Popov S.A. *Noise Immunity of Communication Systems with Pseudo-Random Tuning of Operating Frequency*. St. Petersburg: Svoe izdatelstvo Publ.; 2013. 166 p. EDN:QKNPYL
13. Filippov B.I. The choice of signals for hydroacoustic navigation system of transformation underwater apparatus to docking module. *T-Comm*. 2021;15(6):56–64. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-6-56-64. EDN:DPDQQX
14. Bolelov E.A., Kozlov A.I., Romanenko N.M. Affine Design as a Tool for Separating Signals from Radar Targets. *Radiotekhnicheskije i telekommunikacionnye sistemy*. 2023;1(49):22–32. DOI:10.24412/2221-2574-2023-1-22-32. (in Russ.) EDN:EJBZLN
15. Dvornikov S.V., Ovchinnikov G.R., Balykov A.A. Software Simulator of the Ionospheric Radio Channel of the Decameter Range. *Information and space*. 2019;3:6–12. (in Russ.) EDN:CGVGJI
16. Zotov K.N., Zhdanov R.R. On the Applicability of Interference in Cellular Networks to Create A Secure Communication Channel. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2020;3(51):90–100. (in Russ.) EDN:GJEDGS
17. Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press; 2005.
18. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Pshenichnikov A.V. Analysis of Frequency Resource for FHSS Mode. *Information and Control Systems*. 2019;4(101):62–68. (in Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68. EDN:VUYFYO
19. Pavlov S.V., Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V. Improving the Stability of Satellite Synchronization of Single-Frequency Television Transmitters Under the Influence of Interference. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2022;5(1):248–253. DOI:10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840977
20. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Ivanov R.V., Gulidov A.A., Chikhonadskikh A.P. Protection against structural interference of frequency-shift keying radio channels. *Information Technologies*. 2017;23(3):193–198. (in Russ.) EDN:YHCWCR
21. Fokin G.A. Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 1. Model of Two Links. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(4):44–63. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63. EDN:DIEAKU

22. Yang K., Wu Zh., Guo X., Wu J., Cao Y., Qu T., et al. Estimation of co-channel interference between cities caused by ducting and turbulence. *Chinese Physics B*. 2022;31(2):024102. DOI:10.1088/1674-1056/ac339c
23. Qi L., Shen Zh., Guo Q., Wang Y., Mykola K. Chirp Rates Estimation for Multiple LFM Signals by DPT-SVD. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2023;42(5):2804–2827. DOI:10.1007/s00034-022-02225-x
24. Laurent N., Colominas M.A., Meignen S. On Local Chirp Rate Estimation in Noisy Multicomponent Signals: With an Application to Mode Reconstruction. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2022;70:3429–3440. DOI:10.1109/tsp.2022.3186832
25. Dong W.X., Lai Yu.Yu., Hu J. Detecting spatial chirp signals by Luneburg lens based transformation medium. *Optics Express*. 2022;30(6):9773. DOI:10.1364/oe.453937. EDN:FDDCCI
26. Chan H.N., Podstrigaev A.S., Nguyen Ch.N. Algorithms for Analyzing Chirp Signals Based on Time-Frequency Analysis. *Proceedings of the XXVIII International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of B.Ya. Osipova on Radar, Navigation, Communications, 27–29 September 2022, Voronezh, Russia, vol.2*. Voronezh: Voronezh State University Publ.; 2022. p.371–378. (in Russ.) EDN:XYVWID
27. Dvornikov S.V., Kuznetsov D.A., Kozhevnikov D.A., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S. Theoretical Basis of Synthesis Signals Ensemble Biorthogonality with the Enhanced Noise Immunity. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya*. 2015;5:16–20. (in Russ.) EDN:UMOIYB
28. Golubicic Z.T., Simic S.M., Zejak A.J., Reljic B.M., Maric S. High speed target tracking radar system based on the use of BPSK signal and digital Doppler shift compensation. *Military Technical Courier*. 2022;70(2):357–371. DOI:10.5937/vojtehg70-36589
29. Geng Ch.Q., Kuan H.Ju., Luo L.W. Inverse-chirp imprint of gravitational wave signals in scalar tensor theory. *The European Physical Journal C*. 2020;80(8):1–6. DOI:10.1140/epjc/s10052-020-8359-y
30. Alsharif M., Hamed A., Rao R.K. Error Rate Performance of Digital Chirp Communication System over Fading Channels. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS, 21–23 October 2015, San Francisco, USA*. URL: https://www.researchgate.net/publication/326782880_Error_Rate_Performance_of_Digital_Chirp_Communication_System_over_Fading_Channels [Accessed 01.04.2024]
31. Alsharif M., Rao R.K. Multi-mode multi-level continuous phase chirp modulation: Coherent detection. *Proceedings of the 29th Annual IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 15–18 May 2016, Vancouver, Canada*. IEEE; 2016. DOI:10.1109/CCECE.2016.7726777
32. Dvornikov S.V., Kudryavtsev A.M. *Theoretical Foundations of Time-Frequency Analysis of Short-Term Signals*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2010. 240 p. (in Russ.) EDN:QMUYKH
33. Shelikhova T.S., Drozdova T.S. The Analysis of the Usage Efficiency of the Time-Frequency Resources for Different 5G NR Coreset Configuration Settings. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2023;17(4):97–108. DOI:10.55648/1998-6920-2023-17-4-97-108. EDN:JASPNV
34. Dvornikov S.V. Theoretical Foundations of the Synthesis of Bilinear Energy Distributions of Non-Stationary Processes in Frequency-Temporary Space (Review). *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2018;4(1):47–60. (in Russ.) EDN:YUZUOE
35. Grishin V.G., Grishin O.V., Nikultsev V.S., Gulyaeva V.V., Zinchenko M.I., Uryumtsev D.Yu. Time-Frequency Analysis of Variability in External Respiration and Heart Rate in Humans during Exercise. *Biophysics*. 2022;67(4):755–762. DOI:10.31857/S0006302922040147. EDN:IUKFYZ

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 17.03.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 12.02.2024; approved after reviewing 17.03.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Информация об авторах:

ДВОРНИКОВ
Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, научный сотрудник научно-исследовательского отдела Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

 <https://orcid.org/0000-0001-7426-6475>

СЕЛИВАНОВ
Сергей Владимирович

главный специалист по противодействию иностранным техническим разведкам АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей»

 <https://orcid.org/0009-0001-9371-3020>

ДВОРНИКОВ
Сергей Викторович

доктор технических наук, профессор, профессор института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

 <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>