

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ЛИНИЙ ДЕКАМЕТРОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ МНОГОКРАТНОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Сметанин С. С.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-3-30-34

Ключевые слова: спектральная плотность мощности, корреляционный интеграл, вероятности битовой ошибки.

Аннотация

Цель работы: состоит в повышении помехозащищенности за счет многократного приема ЛЧМ сигнала путем сравнения спектральной плотности мощности сигнала (сравнение площадей) с помощью изменения (уменьшения) скорости передачи информации.

Результаты исследования: разработана методика повышения помехозащищенности линий декаметрового диапазона на основе многократного приема сигналов линейной частотной модуляции. Методика реализована за счет многократного приема ЛЧМ сигнала путем сравнения спектральной плотности мощности сигнала (сравнение площадей) с помощью изменения (уменьшения) скорости передачи информации. Проведен анализ сигналов ЛЧМ и их сравнение с другими видами сигналов, определены их преимущества. Представлен ЛЧМ сигнал при изменении (уменьшении) скорости передачи информации при воздействии заградительной помехи противника путем сравнения спектральной плотности мощности сигнала (сравнение площадей). Представлены бинарные структуры ЛЧМ сигнала при изменении (уменьшении) скорости передачи. Осуществлен расчет в MathCad требуемой вероятности ошибки (10⁻³) при изменении (уменьшении) скорости передачи сообщения ЛЧМ сигнала.

Научная новизна: впервые разработана методика повышения помехозащищенности линий декаметрового диапазона на основе многократного приема сигналов линейной частотной модуляции путем сравнения спектральной плотности мощности сигнала (сравнение площадей) с помощью изменения (уменьшения) скорости передачи информации.

Сигналы линейно-частотной модуляции (далее по тексту — ЛЧМ сигналы) относятся к классу широкобазисных сигналов, у которых величина базы существенно больше единицы.

В рамках настоящей статьи сформулируем задачу исследования следующим образом: на основе анализа характера изменения параметров, определяющих возможность синтеза бинарных структур ЛЧМ сигналов, разработать методику, позволяющую повысить помехозащищенность за счет многократного приема широкополосных сигналов. Помехозащищенность приема ЛЧМ импульсов определяется структурными различиями между сигнальными конструкциями, используемыми для передачи различных битов информационных сообщений.

Для многоуровневых и информационных систем указанные различия будут определяться минимальным евклидовым расстоянием между двумя любыми многоуровневыми модулированными ЛЧМ сигналами. 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:

$$D^2(s_1, s_0) = \int_0^T [s_1(t) - s_0(t)]^2 dt$$

которое можно преобразовать к виду:

$$D^2(s_1, s_0) = 2E_s (1 - K(s_1, s_0))$$

В выражении (2) K^* — результат корреляции между ЛЧМ-конструкциями $s_1(t)$ и $s_0(t)$, который может быть рассчитан согласно формуле:

$$K(s_1, s_0) = \frac{1}{E_s} \int_0^T s_1(t) s_0(t) dt$$

Выражение (3) 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 сим-

¹Сметанин Сергей Сергеевич, адъюнкт кафедры радиосвязи Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: smit130189@mail.ru

вольной ошибки, вычисляется согласно выражению:

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

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

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

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

$$d^2 = \frac{D^2}{2E_b}$$

где E_b — энергия, приходящаяся на бит.

На рис.1 представлены результаты зависимости вероятности битовой ошибки (для бинарных сигналов она совпадает с символьной ошибкой) P_c от h^2 , для следующих сигнальных конструкций: BPSK, FSK и ЛЧМ [1,2].

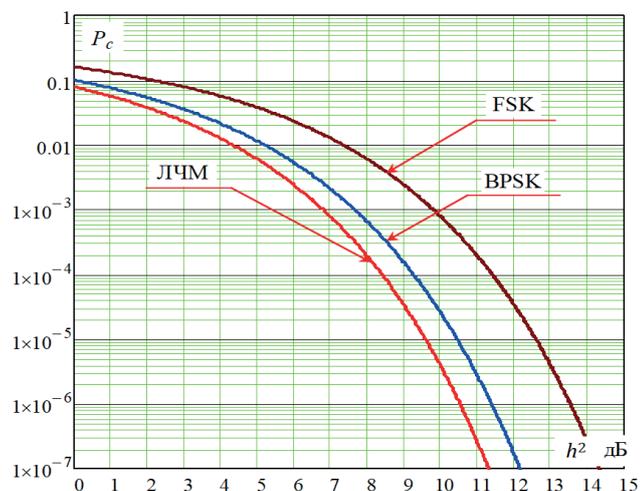


Рис. 1. Вероятность битовой ошибки для бинарных сигналов

Результаты оценки вероятности битовой ошибки бинарных сигнальных конструкций ЛЧМ позволяют заключить, что они выигрывают у сигналов BPSK

в помехоустойчивости порядка 1 дБ, 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, то для них открывается возможность использования, так называемого эффекта

усиления за счет обработки [2,3]. Данный эффект основан на повышении помехозащищенности за счет многократного приема широкополосных сигналов. А желаемый результат обеспечивается по результатам корреляционной обработки на приеме [3,4].

Предположим, что противник использует заградительную помеху, так как, данная помеха является наиболее оптимальной для противника, который не знает измененную структуру нашего ЛЧМ сигнала. Разработаем методику повышения помехозащищенности за счет многократного приема ЛЧМ сигнала путем сравнения спектральной плотности мощности сигнала (сравнение площадей) с помощью изменения (уменьшения) скорости передачи информации. Спектральная плотность мощности (энергетический спектр) — это функция, описывающая распределение мощности сигнала по частотам, а именно мощность, приходящуюся на единичный интервал частоты.

На рис. 2 представлен наш ЛЧМ сигнал мощностью 1 кВт, который занимает площадь cd , соответственно спектральная плотность мощности сигнала равна:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{Scd}$$

Заградительная помеха противника тоже мощностью 1 кВт занимает площадь av , соответственно спектральная плотность мощности помехи равна:

$$\sigma_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}}{Sav}$$

Абсолютно очевидно, что у нас спектральная плотность мощности будет гораздо больше, чем у заградительной помехи противника, т.к. мы 1 кВт излучаем на гораздо меньшей площади (cd), чем производит подавление заградительная помеха (av).

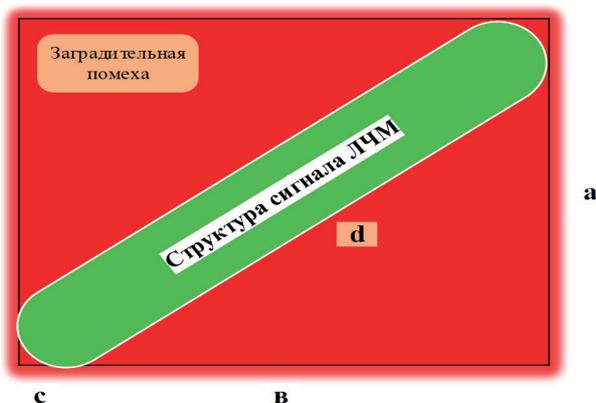


Рис. 2. Структура сигнала ЛЧМ на фоне заградительной помехи (при сравнении площадей)

На рис. 3 представлен ЛЧМ сигнал при изменении (уменьшении) скорости передачи информации при воздействии заградительной помехи.

Сущность методики состоит в том, что изначально выбирается максимально возможная

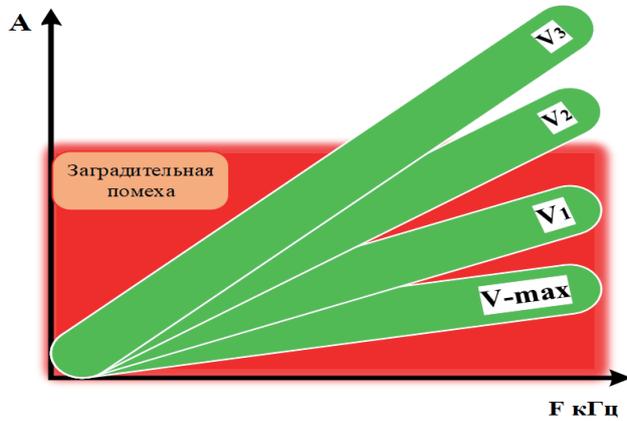


Рис. 3. Сигнал ЛЧМ при изменении скорости передачи на фоне заградительной помехи

скорость передачи — V_{max} и после этого производится ее уменьшение до необходимых значений.

На рис. 3 видно, что при максимальной скорости, противник нас с легкостью подавляет наш сигнал. Следовательно, уменьшаем скорость передачи до значений, при которых, наш сигнал будет вышезаградительной помехи противника. При максимальном значении скорости передачи спектральная плотность мощности будет больше, чем у помехи всего в 2 раза, т. е. соотношение 2:1, это соответствует $P_{ош} = 10^{-1}$, а требуемая вероятность ошибки $P_{ош} = 10^{-3}$ (показатель помехозащищенности — вероятность битовой ошибки в соответствии с оперативно-техническими требованиями равен 10^{-3}), соответственно требование по помехозащищенности не выполняется. При значении скорости передачи V_1 спектральная плотность мощности будет больше, чем у помехи в 3 раза, т. е. соотношение 3:1, это соответствует $P_{ош} = 10^{-2}$. При значении скорости передачи V_2 и V_3 спектральная плотность мощности будет больше, чем у помехи в 4 раза, т. е. соотношение 4:1, это соответствует $P_{ош} = 10^{-3}$ — получили требуемую вероятность ошибки — 100% выполняется требование по помехозащищенности [5].

Для наглядности на рис. 4 представлены бинарные структуры ЛЧМ сигнала при изменении (уменьшении) скорости передачи.

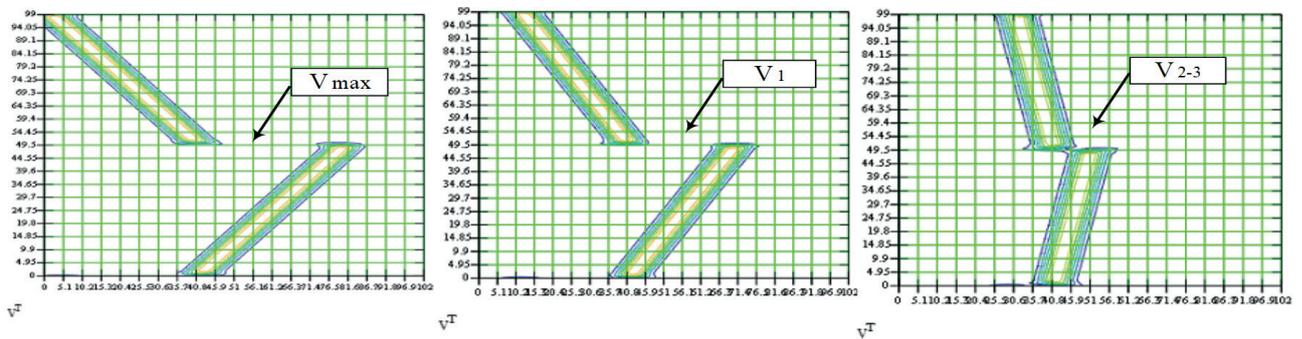


Рис. 4. Бинарное представление структуры ЛЧМ сигнала при изменении скорости передачи

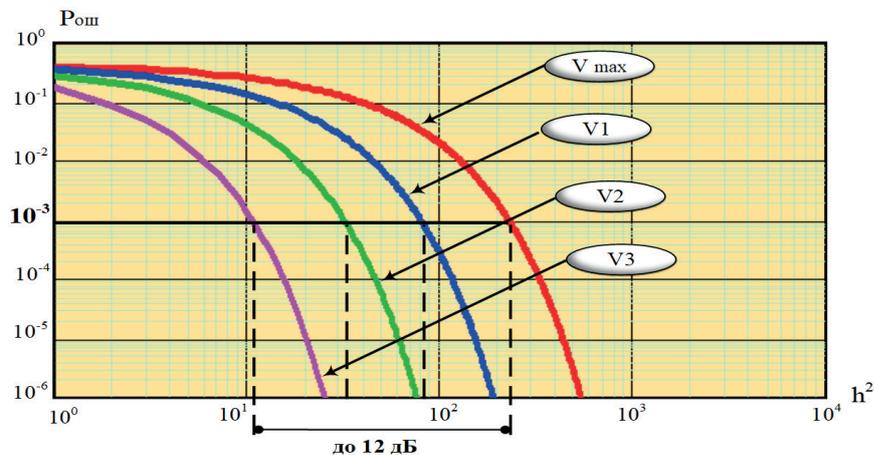


Рис. 5. Графики расчета вероятности ошибки при изменении скорости передачи

На рис. 5 представлен расчет в MathCad-требуемой вероятности ошибки (10-3)

при изменении (уменьшении) скорости передачи сообщения ЛЧМ сигнала. В итоге получаем очевидный энергетический выигрыш при скорости V_3 до 12 дБ, тем самым повышаем помехозащищенность ЛЧМ сигнала на фоне загра-

дительной помехи противника.

Полученные результаты позволяют судить о достижении цели исследования. Разработанная методика позволяет повысить помехозащищенность за счет многократного приема ЛЧМ сигнала путем уменьшения скорости передачи информации.

Статья рекомендована к публикации научным руководителем автора Дворниковым Сергеем Викторовичем, доктором технических наук, профессором, профессором кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: practicsdv@yandex.ru.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Зотов К.Н., Жданов Р.Р. О применимости помех в сетях сотовой связи для создания защищенного канала связи // Вестник СибГУТИ. 2020. № 3(51). С. 90–100.
4. Дворников С.В., Кудрявцев А.М. Теоретические основы частотно-временного анализа кратковременных сигналов. СПб.: ВАС, 2010. 240 с.
5. Захаров В.Л., Витомский Е.В. Методы построения помехозащищенных ППРЧ-сигналов // Известия Института инженерной физики. 2019. № 4(54). С. 50–54.

METHODOLOGY FOR INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF DECAMETER COMMUNICATION LINES BASED ON MULTIPLE RECEPTION OF LINEAR FREQUENCY MODULATION SIGNALS

Smetanin S.S.¹

Keywords: linear frequency modulation signals, noise immunity, decameter communication lines, power spectral density, correlation integral, bit error probabilities.

Abstract: In this article, a technique has been developed to increase the noise immunity of decameter communication lines based on multiple reception of linear frequency modulation signals. The technique is implemented by repeatedly receiving an LFM signal by comparing the spectral density of the signal power (comparing areas) by changing (decreasing) the information transmission rate.

The purpose of the work is to increase noise immunity by repeatedly receiving an LFM signal by comparing the spectral density of the signal power (comparing areas) by changing (decreasing) the information transmission rate.

Research results: The article analyzes the FM signals and compares them with other types of signals, and identifies their advantages. The LFM signal is presented when the information transmission rate changes (decreases) when exposed to enemy barrage interference by comparing the spectral power density of the signal (area comparison). Binary structures of the LFM signal are presented when the transmission rate changes (decreases). The required error probability (10-3) has been calculated in MathCad when the transmission rate of the FM signal is changed (decreased).

¹Sergey S. Smetanin, Adjunct of the Department of Radio Communications, S.M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: smit130189@mail.ru

Scientific novelty: For the first time, a technique has been developed to increase the noise immunity of decimeter communication lines based on multiple reception of linear frequency modulation signals by comparing the spectral power density of the signal (comparing areas) by changing (decreasing) the information transmission rate.

References

1. Chan H.N., Podstrigaev A.S., Nguyen C.N. Algorithms for analyzing linear frequency-modulated signals based on time-frequency analysis // XXVIII International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of B.Ya. Osipov "Radar, navigation, communications" (Voronezh, Russia, September 27-29, 2022). Voronezh: Voronezh State University, 2022. Vol. 2. S. 371-378.
2. Dvornikov S.V., Kuznetsov D.A., Kozhevnikov D.A., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S. Theoretical substantiation of synthesis of an ensemble of biorthogonal signals with increased noise immunity // Questions of radio electronics. Series: Television technology. 2015. № 5. S. 16-20.
3. Zotov K.N., Zhdanov R.R. On the applicability of interference in cellular networks to create a secure communication channel // Bulletin of SibGUTI. 2020.№ 3(51). S. 90-100.
4. Dvornikov S.V., Kudryavtsev A.M. Theoretical foundations of time-frequency analysis of short-term signals. SPb.: VAS, 2010. S. 240.
5. Zakharov V.L., Vitomsky E.V. Methods of constructing interference-protected RF signals // Proceedings of the Institute of Engineering Physics. 2019. № 4(54). S. 50-54.

