

УДК 621.391

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-85-93

Оценка влияния скорости изменения частоты сигнала с линейной частотной модуляцией на энергетическую скрытность и помехоустойчивость

Л. А. Сенаторов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Е. М. Зайцева, кандидат педагогических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Рассматриваются вопросы помехоустойчивости и энергетической скрытности линейных частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов. Целью статьи является изучение скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала и его влияния на параметры сигнала, такие как огибающая и спектр, степень его энергетической скрытности и помехозащищенность. Проведено исследование влияния скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на амплитудный спектр передаваемого сигнала. Исследование показало, что увеличение скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала приводит к увеличению угла наклона управляющего пилообразного напряжения. При этом ширина амплитудного спектра изменяется прямо пропорционально изменению полосы частот. На основании результатов выдвинуто предположение о положительном влиянии увеличения наклона управляющего сигнала на помехоустойчивость и энергетическую скрытность. Исследовано влияние скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на степень энергетической скрытности с использованием авторского метода получения оценки по энергии передаваемого символа. Результаты моделирования показали, что скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала не приводит к изменению энергии и не влияет на степень энергетической скрытности. Проведено исследование влияния скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на помехоустойчивость передаваемого сигнала. Предложено исследовать реальный высокочастотный ЛЧМ-сигнал при помощи метода взвешивания на наборе согласованных фильтров. Метод позволил исследовать помехоустойчивость ЛЧМ-сигналов с различными параметрами и сравнить полученные данные с помехоустойчивостью GMSK-сигнала спутниковой системы связи «Гонец-М». Найдены некоторые закономерности, позволяющие оценить влияние скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на его помехоустойчивость. Сравнение GMSK-и ЛЧМ-сигналов позволило убедиться в эффекте внедрения ЛЧМ-сигналов в системы спутниковой связи.

В результате исследования сделаны выводы о влиянии выбора скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на помехоустойчивость и энергетическую скрытность.

Ключевые слова: помехоустойчивость, ЛЧМ-сигнал, Matlab, энергетическая скрытность, скорость изменения частоты сигнала.

Введение

Радиопередающие устройства применяются во многих сферах человеческой деятельности. В зависимости от специфики области устройства могут столкнуться с различными непреднамеренными и направленными помехами. Возможность нарушения связи в результате действий третьих лиц определяет востребованность исследований вопросов обеспечения помехоустойчивости и скрытности сигналов.

Обе этих проблемы могут быть эффективно решены применением ЛЧМ-сигналов. ЛЧМ-сигналы известны давно, успешно применяются в различных радиопередающих устройствах, но их активное исследование в России и за рубежом продолжается [1–13].

Несмотря на это, до сих пор малоисследован вопрос влияния скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на его характеристики.

Целью настоящей статьи является изучение влияния скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на степень энергетической скрытности и помехоустойчивости ЛЧМ-сигнала.

В связи с этим были решены следующие задачи.

1. Исследовано влияние скорости изменения частоты на огибающую и спектр ЛЧМ-сигнала.
2. Дана количественная оценка степени энергетической скрытности ЛЧМ-сигнала при различных показателях скорости изменения частоты.
3. Изучено влияние скорости изменения частоты на степень помехоустойчивости сигнала.

Влияние скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на его огибающую и спектр

Радиоимпульс с линейной частотной модуляцией относится к сложным сигналам, так как его параметры изменяются в течение периода повторения по определенному закону таким образом, что база сигнала намного больше единицы [14], то есть имеет место соотношение

$$B = T_c \Delta f \gg 1, \quad (1)$$

где T_c – длительность сигнала; Δf – ширина спектра сигнала.

ЛЧМ-сигналом называется сигнал, представляемый на всей длительности импульса [15] согласно формуле

$$U_{\text{лчм}}(t) = U_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\mu t^2}{2}\right), \quad (2)$$

где U_m – амплитуда сигнала; ω_0 – несущая частота; μ – скорость изменения частоты.

Скорость изменения частоты является параметром с размерностью с^{-2} , характеризующей скорость изменения частоты во времени [16]. За время, равное длительности импульса, девиация частоты составит

$$\Delta\mu = \mu \tau_n, \quad (3)$$

где τ_n – длительность импульса.

ЛЧМ-сигнал может быть получен перемножением гармонического сигнала на управляющее напряжение, линейно изменяющее его час-

тоту. Отсюда следует, что чем выше скорость изменения частоты, тем круче линейное изменение частоты сигнала, что влияет на форму и свойства ЛЧМ-сигнала [17].

На практике скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала может быть изменена за счет ширины полосы передачи, а также коэффициента расширения спектра [18]. Важно также учитывать, что эти изменения неизбежно приведут к изменению длительности импульса, так как длительность импульса связана с полосой передачи и коэффициентом расширения спектра соотношением

$$\tau = \frac{2^{SF}}{\Delta f}, \quad (4)$$

где SF – коэффициент расширения спектра сигнала.

Оценим влияние скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на амплитудный спектр. Для этого сравним между собой три ЛЧМ-сигнала с различными параметрами. В качестве опорного выберем сигнал, изменяющийся в полосе частот 0...260 МГц. Сравнение будет проводиться с сигналом, изменяющимся в пределах 0...300 и 0...150 МГц. Прочие параметры сигналов не отличаются. Коэффициент μ для этих сигналов будет равен 0,928, 0,8 и 0,46 соответственно.

Графики скорости изменения частоты рассматриваемых сигналов приведены на рисунке 1.

Амплитудные спектры сигналов изображены на рисунке 2.

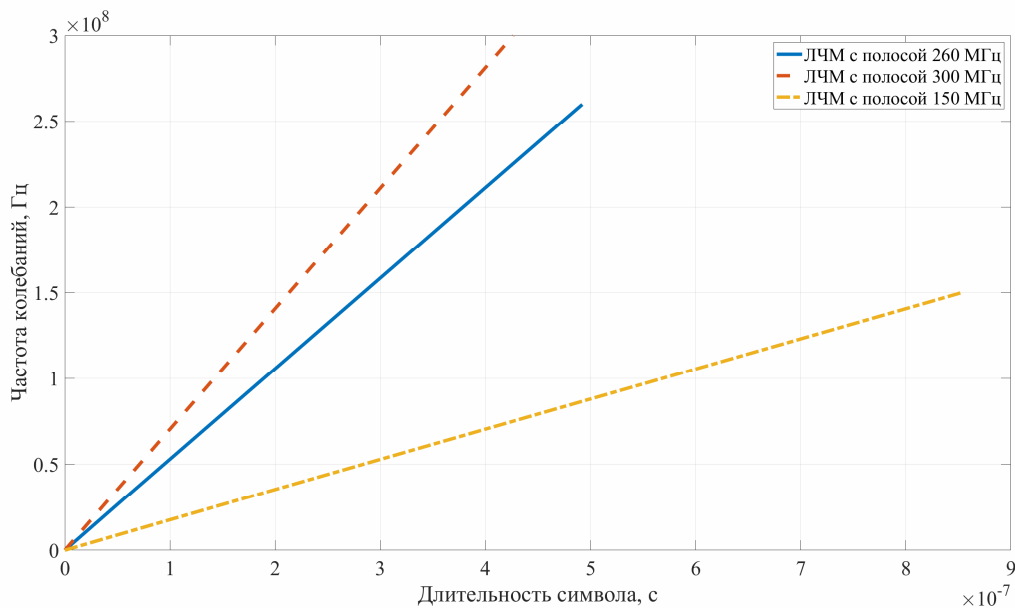


Рис. 1. Скорость изменения частоты рассматриваемых ЛЧМ-сигналов

Fig. 1. Frequency change rate of chirp signals

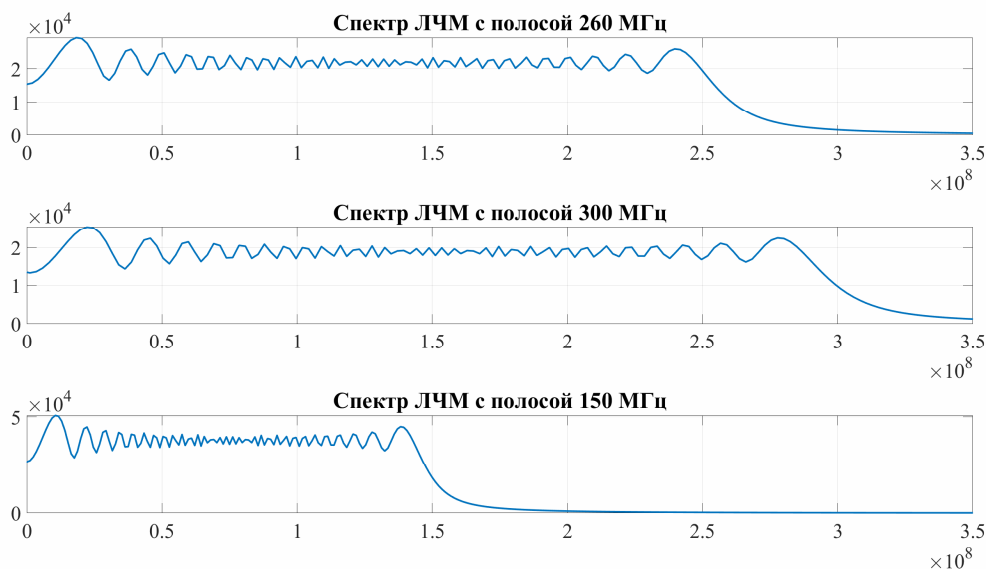


Рис. 2. Амплитудные спектры рассматриваемых ЛЧМ-сигналов

Fig. 2. Amplitude spectrums of chirp signals

Из графиков на рисунке 1 видно, что изменение полосы частот ЛЧМ-сигнала без изменений коэффициента расширения спектра приводит к изменению длительности символа и изменению крутизны управляющего пилообразного напряжения. Так, на рисунке длина периода опорного сигнала составляет 49 мкс, тогда как период сигнала с полосой 300 МГц составляет 42,6 мкс, а с полосой 150 МГц – 85,3 мкс.

Конечно, изменения отразились и на амплитудных спектрах. Так, увеличение полосы с 260 до 300 МГц привело к увеличению ширины спектра с 0,2417 до 0,2777 ГГц. В свою очередь, уменьшение полосы частот до 150 МГц привело к уменьшению ширины спектра до 0,1383 ГГц. Легко заметить, что ширина спектра изменяется прямо пропорционально изменению полосы частот.

Результаты позволяют сделать предположение, что увеличение скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала может оказать положительное влияние на энергетическую скрытность и помехоустойчивость передаваемого сигнала за счет расширения спектра сигнала.

Необходимо исследовать эти свойства более подробно.

Исследование влияния скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на степень энергетической скрытности

Известны различные способы получения оценки энергетической скрытности сигналов, но в данном исследовании будем использовать собственный метод оценки по энергии передаваемого символа.

В качестве основного показателя энергетической скрытности используется вероятность обнаружения излучаемого сигнала при условии, что противник не знает точной структуры и параметров сигнала, которая может быть вычислена по формулам

$$P_0 = 0,5 - \int_0^{\Delta i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx; \tag{5}$$

$$\Delta i = \bar{\Pi} - q^2 \sqrt{W_p T_p}, \tag{6}$$

где $\bar{\Pi}$ – порог срабатывания; q – отношение сигнал/помеха на входе обнаружителя; W_p – полоса радиочастот сигнала; T_p – время работы на передачу.

Отношение сигнала к помехе может быть представлено согласно формуле

$$q_{вх}^2 = 2E_s / N_0, \tag{7}$$

где E_s – энергия сигнала в расчете на 1 бит; N – спектральная плотность шума.

Для сообщения конечной длины энергия символа может быть найдена по формуле

$$E_b = \frac{\int_0^{T_p} s^2(t) dt}{K}, \tag{8}$$

где $s(t)$ – ЛЧМ-сигнал; K – число информационных бит (может быть найдено как произведение скорости передачи на время работы).

Сигнал $s(t)$ и его параметры были подробно рассмотрены в предыдущем разделе в формулах (2)–(4).

Проведем математическое моделирование энергетической скрытности ЛЧМ-сигнала с исходными параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Table 1. Initial modeling data

Показатель	Параметр
Амплитуда, В	1
Начальная частота, МГц	0
Конечная частота, МГц	260
Коэффициент расширения спектра	7
Спектральная плотность шума, дБ	8
Пороговое напряжение, В	4
Время работы на передачу, с	1

Начальная и конечная частота, а также амплитуда ЛЧМ-сигнала соответствуют параметрам спутникового сигнала, применяемого в системе «Гонец-М».

Коэффициент расширения спектра выбран согласно выражению (4). Скорость передачи сигнала должна составлять 9,6 кбит/с, поэтому коэффициент расширения спектра должен быть равен 7.

Сигнал передается по каналу, в котором действует шум со спектральной плотностью 8 дБ. Пороговое напряжение систем наблюдения РЭБ противника выбрано 4 В.

Установлено, что выбор времени работы на передачу влияет на степень энергетической скрытности сигнала, поэтому при моделировании выбираем небольшое время работы, равное 1 секунде.

Оценим влияние скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на степень энергетической скрытности. Для этого будем изменять верхнюю граничную частоту и коэффициент расширения спектра.

Результаты измерений представлены в таблице 2.

Данные, полученные в результате моделирования, свидетельствуют о том, что выбор скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала не оказывает влияния на степень энергетической скрытности ЛЧМ-сигнала. Во время каждого из экспериментов вероятность обнаружения сигнала не изменялась, что можно объяснить тем, что вносимые изменения не влияли на энергию передаваемых символов. Этот эффект может быть связан с изменениями в фазовом спектре ЛЧМ-сигналов, что должно быть подробнее изучено

в дальнейшем. Графики фазовых спектров сигналов приведены на рисунке 3.

Таблица 2. Влияние скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на вероятность его обнаружения

Table 2. Influence of the rate of change of the frequency of the chirp signal on the probability of its detection

№	Параметры сигнала		Вероятность обнаружения сигнала
	Верхняя граничная частота, МГц	Коэффициент расширения спектра	
1	260	7	$3,167 \cdot 10^{-5}$
2	300	7	$3,167 \cdot 10^{-5}$
3	350	7	$3,167 \cdot 10^{-5}$
4	260	10	$3,167 \cdot 10^{-5}$
5	260	14	$3,167 \cdot 10^{-5}$
6	260	20	$3,167 \cdot 10^{-5}$

Исследование влияния скорости изменения ЛЧМ-сигнала на помехоустойчивость

Описание способа получения оценки помехоустойчивости

Исследование помехоустойчивости ЛЧМ-сигнала можно проводить путем взвешивания зашумленного сигнала на наборе согласованных фильтров [19, 20].

Модель будет использовать два ЛЧМ-сигнала с одинаковыми параметрами, причем один из них будет возрастающим (соответствует передаче символа 1)), а другой – нисходящим (соответствует передаче символа 0). На эти сигналы накладывается аддитивный белый гауссов шум (АБГШ) с заданным отношением сигнал/шум (ОСШ), после чего проверяется отклик двух фильтров, настроенных на прием 1 и 0. В качестве согласованных фильтров выбрана автокорреляционная функция (АКФ) – при правильном приеме зашумленного сигнала фильтр, настроенный на прием этого сигнала, должен выдавать больший отклик, чем фильтр, настроенный на прием противоположного сигнала, так как его корреляционная функция не будет иметь явного пика. Если при проведении эксперимента регистрируется отличный результат, то считаем, что эксперимент неудачный. Для получения более точного результата, каждый эксперимент над сигналами будет повторяться 10000 раз.

Вероятность неправильного приема ЛЧМ-сигнала будет считаться как отношение количества неудачных экспериментов к общему числу экспериментов. Вероятность неправильного приема считается отдельно для каждого из сигналов; в качестве результата принимается среднее значение.

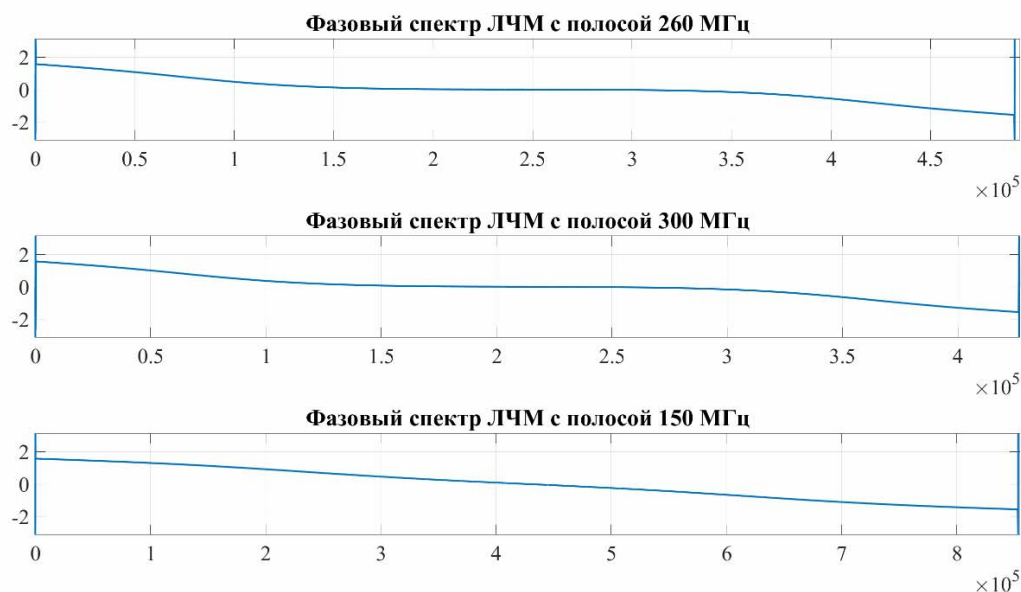


Рис. 3. Фазовые спектры рассматриваемых ЛЧМ-сигналов

Fig.3. Phase spectrums of chirp signals

Изучение влияния скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на его помехоустойчивость

Рассмотрим возможность замены сигнала GMSK спутниковой системы связи «Гонец-М» на ЛЧМ-сигнал с целью повышения помехоустойчивости.

Система «Гонец-М» работает с сигналами GMSK, передающимися со скоростью 9,6 кбит/с в полосе 25 кГц. Согласно формуле (4) для ЛЧМ-сигнала с такими параметрами коэффициент расширения спектра SF должен быть равен примерно 1,38. Коэффициент расширения спектра должен быть равен целому числу, поэтому

примем его равным 1. В таком случае скорость передачи составит 12,5 кбит/с, что должно примерно соответствовать технической скорости передатчика системы «Гонец-М», так как техническая скорость всегда берется с некоторым запасом.

Для исследования влияния скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала на помехоустойчивость необходимо оценить помехоустойчивость исходного сигнала с набором ЛЧМ-сигналов, передающихся с той же скоростью, но с большим наклоном.

Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Вероятность битовой ошибки при различных параметрах ЛЧМ-сигнала

Table 3. BER rate for different parameters of the chirp signal

№ опыта	1		2		3		4		5	
	BW , кГц	SF	BW , кГц	SF	BW , кГц	SF	BW , кГц	SF	BW , кГц	SF
SNR, дБ	25	1	50	2	100	3	200	4	400	5
-6	0,00005		0,003		0,0021		0,0017		0,0011	
-10	0,0099		0,0389		0,0343		0,033		0,0284	
-15	0,0932		0,1592		0,1544		0,1459		0,1391	
-18	0,1782		0,239		0,237		0,2305		0,2258	
-20	0,2293		0,2883		0,284		0,2832		0,2751	

Результаты моделирования показали, что одновременное увеличение полосы частот и коэффициента расширения спектра с сохранением скорости передачи приводит к небольшому выигрышу в помехоустойчивости. Чем выше частота и соответствующий коэффициент расширения спектра, тем лучше помехоустойчивость сигнала. Каждый последующий эксперимент

приводит к улучшению помехоустойчивости в среднем на 38 %.

Рассмотрим ту же задачу, но с возможностью изменения скорости передачи. Из таблицы 3 следует, что при увеличении полосы передачи в 2 раза для сохранения прежней скорости передачи требуется увеличить значение коэффициента расширения спектра на 1. Необходимо

оценить помехоустойчивость при моделировании некоторых промежуточных значений поло-

сы частот и коэффициента расширения спектра. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Вероятность битовой ошибки при различных параметрах ЛЧМ-сигнала и скорости передачи
Table 4. BER rate for different parameters of the chirp signal and transmission rate

№ опыта	1		2		3		4		5	
	BW , кГц	SF	BW , кГц	SF	BW , кГц	SF	BW , кГц	SF	BW , кГц	SF
	30	1	75	2	150	3	300	4	500	5
-6	0,00035		0,0118		0,009		0,008		0,0029	
-10	0,0148		0,0764		0,0694		0,0613		0,0403	
-15	0,1138		0,2081		0,2008		0,1894		0,1634	
-18	0,193		0,2814		0,2794		0,271		0,2505	
-20	0,2441		0,3241		0,317		0,3117		0,2918	

Данные, полученные в результате моделирования, свидетельствуют о том, что увеличение полосы частот при сохранении коэффициента расширения спектра приводит к ухудшению помехоустойчивости ЛЧМ-сигнала.

Таблицы 3 и 4 демонстрируют важную особенность, а именно: в исследованных случаях самая высокая помехоустойчивость наблюдается при передаче ЛЧМ-сигнала с полосой 25 кГц и коэффициентом расширения спектра 1. При этом с увеличением полосы передачи и коэффициента расширения спектра вероятность ошибки снижается, постепенно приближаясь к изначальным значениям. Сигнал ЛЧМ, передающийся в полосе порядка 1,6 МГц с коэффициентом расширения спектра 7, обладает такой же поме-

хоустойчивостью, как и исходный ЛЧМ-сигнал, передающийся в полосе 25 кГц с коэффициентом расширения спектра 1. Это наблюдение позволяет предположить, что замена сигнала GMSK на ЛЧМ обеспечит существенное преимущество при использовании ЛЧМ-сигнала с более высокой частотой и большими значениями коэффициента расширения спектра.

Необходимо изучить этот вопрос более детально.

Сигнал GMSK в системе «Гонец-М» в результате модуляции переносится на несущую 230...280 МГц. Этому будет соответствовать ЛЧМ-сигнал с коэффициентом расширения 14.

Вероятность битовой ошибки при приеме таких сигналов представлена в таблице 5.

Таблица 5. Вероятность битовой ошибки при передаче высокочастотных ЛЧМ-сигналов
Table 5. BER rate of high frequency chirp signal transmission

№ опыта	1		2		3	
	BW , МГц	SF	BW , МГц	SF	BW , МГц	SF
	230	14	255	14	280	14
-21	0,0006		0,0005		0,0001	
-22	0,04		0,0317		0,03	
-23	0,0965		0,092		0,087	
-24	0,1495		0,133		0,127	
-25	0,192		0,161		0,155	

Моделирование показало, что дальнейший рост полосы частот и коэффициента расширения спектра приводит к значительному улучшению помехоустойчивости сигнала. Так, высокочастотный ЛЧМ-сигнал способен передаваться без ошибок при ОСШ до -20 дБ, тогда как более низкочастотный – в полосе не более -5 дБ. Теоретический ЛЧМ-сигнал можно наращивать сколько угодно много, но реальная система при этом будет усложняться и становиться дороже, поэтому результаты требуют дополнительной практической проверки, а также определения оптимальных параметров ЛЧМ-сигнала.

Для принятия окончательного решения о целесообразности применения ЛЧМ-сигнала в спутниковом канале необходимо сравнить его с параметрами сигнала GMSK. Сигнал GMSK в системе «Гонец-М» помимо скорости передачи 9,6 кбит/с характеризуется коэффициентом сглаживания 0,5, начальный сдвиг фазы может составлять 0 или π градусов.

Результаты моделирования помехоустойчивости сигнала GMSK представлены в таблице 6.

При сравнении сигнала GMSK с сигналами ЛЧМ, передающимися в полосе частот 25...400 кГц с малыми коэффициентами расши-

рения спектра, наблюдается, что ЛЧМ-сигнал обеспечивает лучшее качество помехоустойчивости. ЛЧМ-сигнал обеспечивает безошибочную передачу при ОСШ до -6 дБ, тогда как сигнал GMSK – только до 2 дБ. Порог в 10 % ошибок для сигнала ЛЧМ достигается при ОСШ -15 дБ, для GMSK – при -8 дБ.

Таблица 6. Вероятность битовой ошибки для сигнала GMSK

Table 6. BER of GMSK signal

Начальная фаза, град	0	π
SNR, дБ	BER	
2	0	0
1	0,000007	0,000005
0	0,000065	0,000061
-5	0,02438	0,02426
-6	0,04426	0,04422
-7	0,07119	0,07165
-8	0,1047	0,10552

Полученные в результате исследования данные позволяют утверждать, что сигнал ЛЧМ является перспективной заменой сигналу GMSK в спутниковых системах связи.

Выводы

Увеличение скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала за счет изменения полосы передачи и коэффициента расширения спектра вызывает расширение полосы амплитудного спектра передаваемого сигнала, что приводит к улучшению помехоустойчивости сигнала.

Установлено, что энергетическая скрытность ЛЧМ-сигнала не зависит от выбора скорости изменения частоты сигнала, так как эти изменения не приводят к изменению энергии, передаваемой информационным битом.

В результате исследования помехоустойчивости ЛЧМ-сигналов выявлены некоторые закономерности, позволяющие утверждать, что повышение помехоустойчивости возможно только в случае одновременного увеличения полосы передачи и коэффициента расширения спектра, в противном случае изменения негативно отразятся на помехоустойчивости.

Чтобы выполнить эти условия, при изменении параметров сигнала необходимо увеличить полосу передачи в 2 раза, а коэффициент расширения спектра увеличить на 1. Такие изменения приводят к уменьшению вероятности ошибочной передачи сигнала в среднем на 38 %. В случае несоблюдения таких соотношений вероятность битовой ошибки становится выше, помехоустойчивость падает в среднем на 8 %.

Увеличение ширины полосы передачи и коэффициента расширения спектра может привести к значительному повышению помехоустойчивости за счет увеличения полосы безошибочной передачи. Так, при передаче сигнала с полосой 280 МГц и коэффициентом расширения спектра 14 вероятность ошибки при ОСШ -21 дБ составляет 0,0001, что близко к погрешности. То есть безошибочная передача возможна при ОСШ до -21 дБ включительно. Для сигнала ЛЧМ с полосой 500 кГц и коэффициентом расширения 5 безошибочная передача возможна только при ОСШ до -5 дБ включительно.

При исследовании помехоустойчивости проведено сравнение сигналов ЛЧМ и GMSK. Установлено, что сигнал ЛЧМ обеспечивает более высокое качество передачи в спутниковом канале связи и является перспективным решением при модернизации существующих систем.

Полученные в результате моделирования данные требуют уточнения для поиска оптимальных параметров ЛЧМ-сигнала, а также более детального изучения свойств высокочастотных ЛЧМ-сигналов.

Предложенные в статье положения имеют значение для использования в практике разработки радиотехнических систем специального назначения. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы в качестве теоретического материала для студентов технических направлений, обучающихся по специальностям «Радиотехника» и «Проектирование радиоэлектронных устройств», или при выполнении ОКР и НИОКР.

Библиографические ссылки

1. Тихонов С. С., Кудрявцев А. М., Дворников С. В. Энергетическая скрытность сигналов ППРЧ, сформированных в базисах функций сплайн-характеров // Информатика и космос. 2017. № 2. С. 35–41.
2. Ostovari P. and Wu J. (2017) Fault-Tolerant and Secure Data Transmission Using Random Linear Network Coding: 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Vancouver, BC, Canada, 2017, 1-9. DOI: 10.1109/ICCCN.2017.8038417
3. Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г. Оценка потенциальной помехоустойчивости приема цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 21–35.
4. Zhuang Louise Dahl, Jeremy Zebker, Howard Jakovljevic Marko (2023) Rapid beamforming of ultra-

sound chirp signals in frequency domain using the chirp scaling algorithm. *J. of the Acoustical Society of America*, 153, A242-A242, 10.1121/10.0018774

5. Евстафьев Г. А., Селянская Е. А. Метод обеспечения структурной скрытности сигнала // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. Т. 12, № 4. С. 39–45. EDN WMFFKQ.

6. Зайцев А. В., Разин А. А. Исследование сигнала в виде пачки когерентных импульсов с нерегулярной структурой // Вестник концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2022. № 3. С. 41–47. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-3-41-47>

7. Long Teng Li, Yang Zhang, Weifeng Liu, Quanhua Chen, Xin Liang Tian, Weiming Yang Xiaopeng (2022) Chirp Signal Processing. 10.1007/978-981-19-7561-5_3

8. Zhao Zhencong Rao, Ying Wang Yanghua (2023) The W transform with a chirp-modulated window: *Geophysics*, 88, 1-8, 10.1190/geo2022-0083.1

9. Firmansyah Iman, Yamaguchi Yoshiki (2020) FPGA-based implementation of a chirp signal generator using an OpenCL design: *Microprocessors and Microsystems*, 77, 103199. 10.1016/j.micpro.2020.103199

10. Falkenberg Andreas (2022) Efficient Implementation of a Digital Chirp Generator, 10.23919/MIKON54314.2022.9924956

11. Афанасьев Д. С. Цифровая обработка ЛЧМ-сигнала // Известия СПбГЭТУ – ЛЭТИ. 2022. Т. 15, № 4. С. 44–48.

12. Elgamel Sherif (2022) Overlapped Chirp Signals' Parameters Estimation in Radar ESM Station. *Advances in Military Technology*, 2022, 17, 439-455. 10.3849/aimt.01754

13. Jie Li Shi, Mengyue Wu, Yong Fang, Zhiwei Wang, Jiajin Mu, Huan Hu, Weisheng Yi Lilin (2023) Spectral broadening scheme for suppressing SBS effects based on time-domain optimized chirp-like signals. *Optics Express*, 2023, 31, 10.1364/OE.483307

14. Qi Liangang Shen, Zhenheng Guo, Qiang Wang, Yani Kaliuzhnyi Mykola (2022) Chirp Rates Estimation for Multiple LFM Signals by DPT-SVD. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 2022, 42, 10.1007/s00034-022-02225-x

15. Arkhipenkov D. (2022) Algorithm for Recognizing the Type of Modulation and Measuring Parameters of Radar Signals with Chirp. *Doklady BGUIR*, 2022, 20, 22-29, 10.35596/1729-7648-2022-20-6-22-29

16. Ponomarchuk Sergey, Grozov Victor, Ilyin N., Kurkin V.I., Oinats Alexey, Penzin Maskim, Podlesnyi A., Tsedrik M. (2022) Backscatter Ionospheric Sounding by a Continuous Chirp Signal. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2022, 64, 1-14, 10.1007/s11141-022-10162-7

17. Dhar Subhra (2021) Quantile Process with Applications: Chirp Signal Model, 10.36227/techrxiv.17075720.v1

18. Wang Junyuan He, Huihui Wang, Zhijian Du, Wenhua Duan, Nengquan Zhang Ziyang (2020) Application of Optimized Adaptive Chirp Mode Decomposition Method in Chirp Signal. *Applied Sciences*, 2020, 10, 3695, 10.3390/app10113695

19. Nandi Swagata Grover, Rhythm Kundu Debasis (2022) Estimation of parameters of two-dimensional

random amplitude chirp signal in additive noise. *Multi-dimensional Systems and Signal Processing*, 2022, 33, 10.1007/s11045-022-00831-1

20. Cirak Bekir (2023) Modelling and Simulation of Photovoltaic Systems Using MATLAB Simulink. *WSEAS TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 2023, 18, 49-56, 10.37394/232016.2023.18.6

References

1. Tikhonov S.S., Kudryavtsev A.M., Dvornikov S.V. [Energy concealment of the signals of FHSS formed in the bases of spline-characters functions]. *Informatcia i cosmos*, 2017, no. 2, pp. 35-41 (in Russ.).

2. Ostovari P. and Wu J. (2017) Fault-Tolerant and Secure Data Transmission Using Random Linear Network Coding: 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Vancouver, BC, Canada, 2017, 1-9. DOI: 10.1109/ICCCN.2017.8038417

3. Dovbnja V.G., Koptev D.S., Babanin I.G. [Evaluation of the potential noise immunity of digital signals reception used in modern and future systems of radio relay and satellite communications]. *Izvestija Jugozapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravljenje, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoje priborostroenie*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 21-35 (in Russ.).

4. Zhuang Louise Dahl, Jeremy Zebker, Howard Jakovljevic Marko (2023) Rapid beamforming of ultrasound chirp signals in frequency domain using the chirp scaling algorithm. *J. of the Acoustical Society of America*, 153, A242-A242, 10.1121/10.0018774

5. Yevstafev G.A., Selyanskaya E.A. [Signal Structural Stealth Method]. *Sistemy sinhronizacii, formirovanija i obrabotki signalov*, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 39-45 (in Russ.).

6. Zaytsev A.V., Razin A.A. [Investigation of signal in the form of a coherent pulse train with irregular pulse structure]. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz - Antey"*, 2022, no. 3, pp. 41-47 (in Russ.). <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-3-41-47>

7. Long Teng Li, Yang Zhang, Weifeng Liu, Quanhua Chen, Xin Liang Tian, Weiming Yang Xiaopeng (2022) Chirp Signal Processing. 10.1007/978-981-19-7561-5_3

8. Zhao Zhencong Rao, Ying Wang Yanghua (2023) The W transform with a chirp-modulated window: *Geophysics*, 88, 1-8, 10.1190/geo2022-0083.1

9. Firmansyah Iman, Yamaguchi Yoshiki (2020) FPGA-based implementation of a chirp signal generator using an OpenCL design: *Microprocessors and Microsystems*, 77, 103199. 10.1016/j.micpro.2020.103199

10. Falkenberg Andreas (2022) Efficient Implementation of a Digital Chirp Generator, 10.23919/MIKON54314.2022.9924956

11. Afanas'ev D.S. [Digital Chirp Processing]. *Izvestija SPBGJeTU-LJeTI*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 44-48 (in Russ.).

12. Elgamel Sherif (2022) Overlapped Chirp Signals' Parameters Estimation in Radar ESM Station. *Advances*

in Military Technology, 2022, 17, 439-455. 10.3849/aimt.01754

13. Jie Li Shi, Mengyue Wu, Yong Fang, Zhiwei Wang, Jiajin Mu, Huan Hu, Weisheng Yi Lilin (2023) Spectral broadening scheme for suppressing SBS effects based on time-domain optimized chirp-like signals. Optics Express, 2023, 31, 10.1364/OE.483307

14. Qi Liangang Shen, Zhenheng Guo, Qiang Wang, Yani Kaliuzhnyi Mykola (2022) Chirp Rates Estimation for Multiple LFM Signals by DPT-SVD. Circuits, Systems and Signal Processing, 2022, 42, 10.1007/s00034-022-02225-x

15. Arkhipenkov D. (2022) Algorithm for Recognizing the Type of Modulation and Measuring Parameters of Radar Signals with Chirp. Doklady BGUIR, 2022, 20, 22-29, 10.35596/1729-7648-2022-20-6-22-29

16. Ponomarchuk Sergey, Grozov Victor, Ilyin N., Kurkin V.I., Oinats Alexey, Penzin Maskim, Podlesnyi A., Tsedrik M. (2022) Backscatter Ionospheric Sounding by a Continuous Chirp Signal. Radiophysics and Quan-

tum Electronics, 2022, 64, 1-14, 10.1007/s11141-022-10162-7

17. Dhar Subhra (2021) Quantile Process with Applications: Chirp Signal Model, 10.36227/techrxiv.17075720.v1

18. Wang Junyuan He, Huihui Wang, Zhijian Du, Wenhua Duan, Nengquan Zhang Ziyang (2020) Application of Optimized Adaptive Chirp Mode Decomposition Method in Chirp Signal. Applied Sciences, 2020, 10, 3695, 10.3390/app10113695

19. Nandi Swagata Grover, Rhythm Kundu Debasis (2022) Estimation of parameters of two-dimensional random amplitude chirp signal in additive noise. Multi-dimensional Systems and Signal Processing, 2022, 33, 10.1007/s11045-022-00831-1

20. Cirak Bekir (2023) Modelling and Simulation of Photovoltaic Systems Using MATLAB Simulink. WSEAS TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2023, 18, 49-56, 10.37394/232016.2023.18.6

Impact Assessment of the Chirp Signal Frequency Change Rate on the Energy Secrecy and Noise Immunity

L.A. Senatorov, Postgraduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

E.M. Zaytseva, PhD in Education, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The article deals with the issues of noise immunity and energy secrecy of chirp signals. The purpose of the article is to study the rate of chirp signal frequency change and its influence on signal parameters, such as the envelope and spectrum of the signal, the degree of its energy secrecy and noise immunity.

A study was made of the chirp signal frequency change rate influence on the amplitude spectrum of the transmitted signal. The study showed that an increase in the chirp signal frequency change rate leads to an increase in the slope control of the sawtooth voltage. In this case, the width of the amplitude spectrum changes in direct proportion to the change in the frequency band. Based on the results, the assumption was made about the positive effect of increasing the slope of the control signal on noise immunity and energy secrecy.

The effect of the chirp signal frequency change rate on the degree of energy secrecy is studied by means of the author's method to estimate the energy of the transmitted symbol. The simulation results showed that the rate of change in the frequency of the chirp signal does not lead to a change in energy and does not affect the degree of energy secrecy.

A study was made of the chirp signal frequency change rate influence on the noise immunity of the transmitted signal. It was proposed to investigate a real high-frequency chirp signal using the weighting method on a set of matched filters. The method made it possible to investigate the noise immunity of chirp signals with different parameters and compare the obtained data with the noise immunity of the GMSK signal of the Gonets-M satellite communication system. As a result, some regularities were found that allow us to evaluate the effect of the rate of change in the frequency of the chirp signal on its noise immunity. Comparison of GMSK and chirp signals made it possible to verify the effect of introducing chirp signals into satellite communication systems.

As a result of the study, conclusions were drawn about the influence of the choice of chirp signal frequency change rate on noise immunity and energy secrecy.

Keywords: noise immunity, chirp signal, Matlab, energy secrecy, signal frequency change rate.

Получено 18.04.2023

Образец цитирования

Сенаторов Л. А., Хворенков В. В., Зайцева Е. М. Оценка влияния скорости изменения частоты сигнала с линейной частотной модуляцией на энергетическую скрытность и помехоустойчивость // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 2. С. 85–93. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-85-93.

For Citation

Senatorov L.A., Khvorenkov V.V., Zaytseva E.M. [Impact Assessment of the Chirp Signal Frequency Change Rate on the Energy Secrecy and Noise Immunity]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 85-93 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-85-93.