

УДК 621.391.8

DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-2-349-358

**ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ СПЕКТРА ШИРОКОПОЛОСНЫХ ШУМОПОДОБНЫХ
ЛЧМ ФМ И ПС ЛЧМ СИГНАЛОВ****ESTIMATION OF THE STRUCTURE OF THE SPECTRUM OF BROADBAND
NON-LIKE LFM FM AND PS LFM SIGNALS****С.П. Белов¹, Е.Г. Жилияков², С.А. Рачинский³
S.P. Belov¹, E.G. Zhilyakov², S.A. Rachinsky³**¹Белгородский университет кооперации, экономики и права,
Россия, 308023, Белгород, ул. Садовая, д. 116а²Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85³Белгородский индустриальный колледж,
Россия, 308002, г. Белгород, пр-кт. Б. Хмельницкого, д. 80¹Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St, Belgorod, 308023, Russia²Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia³Belgorod Industrial College, 80 B. Khmel'nitsky Av., Belgorod, 308002, Russia

E-mail: belovssergei@gmail.com, Zhilyakov@bsu.edu.ru, 677110@bsu.edu.ru

Аннотация

В настоящее время одной из важных составляющих обеспечения национальных интересов России в Арктике является совершенствование систем беспроводного доступа на основе применения перспективных методов минимизации затрат частотно-временных ресурсов существующих каналов и в первую очередь каналов спутниковых систем связи как основного средства, позволяющего обеспечить информационное взаимодействие с учетом территориальных особенностей распределения абонентов в данном регионе. Применение для этих целей узкополосных сигналов с высокой спектральной эффективностью, нашедших широкое применение в стационарных системах связи, в арктических широтах нецелесообразно, так как в указанных широтах обеспечение информационного обмена с использованием спутниковых систем связи осуществляется через спутник-ретранслятор, находящийся на высокоэллиптической орбите, что вызывает возникновение эффекта Доплера и, как следствие, рассогласование принимаемых узкополосных сигналов по частоте и задержке. Это приводит к увеличению уровня взаимных помех и дополнительных затрат частотно-временных ресурсов канала связи. В статье проводится анализ детальной оценки частотных свойств сложных широкополосных ЛЧМ ФМ и ПС ЛЧМ сигналов, которые отличаются значительной устойчивостью к доплеровскому рассогласованию по частоте. Результаты проведенных исследований, описанных в работе, показали, что организация информационного обмена с использованием этих сигналов в качестве переносчиков информации обеспечивает не только устойчивость к доплеровскому рассогласованию по частоте, но и эффективное использование выделенных частотных ресурсов канала спутниковой связи.

Abstract

Currently, one of the important components of ensuring the national interests of Russia in the Arctic is the improvement of radio communication systems based on the use of promising methods for minimizing the costs of frequency-time resources of existing channels and, first of all, satellite system channels, as the primary means of ensuring information interaction with territorial features of the distribution of subscribers in the region. The use of narrow-band signals with high spectral efficiency for these purposes, which have found wide application in stationary communication systems, in the Arctic latitudes is impractical, because in these latitudes information exchange using satellite communication systems is provided via a satellite repeater in a highly elliptical orbit, which causes the occurrence of the Doppler effect, and as a result, the mismatch of the received narrowband signals in frequency and delay. This



leads to an increase in the level of mutual interference and the cost of the frequency-time resources of the communication channel. Given this fact, the article analyzes the detailed assessment of the frequency properties of complex broadband LFM FM and PS LFM signals, which are highly resistant to Doppler frequency mismatch. The results of the studies described in the work showed that the organization of information exchange using these signals as carriers of information not only provides resistance to Doppler frequency error, but also efficient use of allocated frequency resources of a satellite communication channel.

Ключевые слова: частотно-временные ресурсы спутниковых каналов связи, частотно-временные характеристики сигналов, эффект Доплера.

Keywords: time-frequency resources of satellite communication channels, time-frequency characteristics of signals, Doppler effect.

Введение

Применение узкополосных сигналов с высокой спектральной эффективностью для передачи информации в стационарных системах связи обусловлено тем, что они занимают более узкую полосу частот, т. е. позволяют эффективно использовать частотно-временные ресурсы существующих каналов связи при обеспечении высокой скорости ее передачи [Волков и др., 2005; Галкин, 2007].

Однако проблема заключается в том, что с увеличением числа пользователей число каналов, выделенных для информационного обмена, должно возрасти. Одним из выходов в данной ситуации для указанных классов сигналов является уменьшение полосы частот передачи, однако бесконечно уменьшать полосу невозможно. Еще одним отрицательным моментом является то, что данные классы сигналов при использовании их в системах спутниковой связи с подвижными объектами, использующих в качестве ретрансляторов спутники, находящиеся на высокоэллиптических орбитах, значительно подвержены влиянию эффекта Доплера. Это приводит к большой неопределенности частоты и изменению времени прихода сигнала, что влечет за собой повышение уровня взаимных помех, из-за этого приходится вводить защитные частотные интервалы, которые влияют на эффективность использования частотно-временных ресурсов, и увеличивать время на процессы поиска и синхронизации указанных сигналов.

Таким образом, повысить эффективность использования выделенных частотно-временных ресурсов может использование широкополосных шумоподобных сигналов [Харкевич, 1952; Варакин, 1970; Кук, Бернфельд, 1971; Бархата и др., 1973; Тузов, 1977; Варакин, 1978; Диксон, 1979; Тузов и др., 1985; Варакин, 1985; Прокис, 2000; Скляр, 2003], которые за счет большего ансамбля слабокоррелированных форм сигналов позволяют организовать многоканальное уплотнение канала связи за счет кодового разделения адресов. Одним из таких классов сигналов являются сложный широкополосный ЛЧМ ФМ сигнал, который, как показано в [Белов и др., 2008; Belov and et., 2017; Белов и др., 2015], гораздо более устойчив к влиянию эффекта Доплера и обладает достаточно большим объемом ансамбля слабокоррелированных форм сигнала. Однако рассмотрение тонкой структуры частотных характеристик этого класса сигналов, являющихся важным аспектом при оценке эффективности использования частотно-временных ресурсов канала связи, в указанных работах не были исследованы, поэтому эта статья посвящена рассмотрению данных вопросов.

Основная часть

В математическом виде ЛЧМ сигналы с внутриимпульсной фазовой манипуляцией (ЛЧМ ФМ), согласно [Кочемасов и др., 1980], имеют вид:

$$S(t) = \begin{cases} S_0 \cdot \sum_{l=1}^N v_l \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t - (l-1) \cdot \tau_3 - \frac{T}{2} - \frac{\tau_3}{2}}{\tau_3} \right\} \cdot \exp \left(j\mu \frac{t^2}{2} \right); & \text{при } |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0; & \text{при других } t \end{cases} \quad (1)$$

где S_0 – амплитуда огибающей сигнала, в дальнейшем постоянная величина, равная 1;
 μ – крутизна модуляционной характеристики ЛЧМ радиоимпульса (скорость изменения частоты), связанная с девиацией частоты ΔF и длительностью сигнала T соотношением $\mu = 2 \cdot \pi \cdot \Delta F / T$;

τ_3 – длительность элемента кодирующей последовательности;

N – количество элементов в кодирующей последовательности;

v_l – коэффициент, характеризующий состояние кодирующей последовательности, принимает значения +1 или -1;

$\text{rect}(x)$ – прямоугольная «срезающая» функция, задаваемая выражением:

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } |x| \leq \frac{1}{2}; \\ 0, & \text{при } |x| > \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Воспользовавшись преобразованием Фурье, вычислим комплексную спектральную функцию $S(w)$ для ЛЧМ ФМ:

$$S(w) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sum_{l=1}^N v_l \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t(l-1)\tau_3 + \frac{T}{2} - \frac{\tau_3}{2}}{\tau_3} \right\} \cdot \exp(j\mu \frac{t^2}{2}) \cdot \exp(-j\omega t) dt \quad (3)$$

Используя методику, изложенную в [Кук, Бернфельд, 1971], после ряда преобразований получим:

$$S(w) = \sqrt{\frac{\pi}{\mu}} \cdot \exp(-j \frac{w^2}{2\mu}) \cdot \sum_{l=1}^N v_l \cdot (C(x_2) - C(x_1) + j(S(x_2) - S(x_1))) \quad (4)$$

где:

$$x_1 = \frac{\mu \cdot (-\frac{T}{2} + (l-1) \cdot \tau_3) - w}{\sqrt{\pi\mu}} \quad x_2 = \frac{\mu \cdot (-\frac{T}{2} + l\tau_3) - w}{\sqrt{\pi\mu}} \quad (5)$$

Интересно заметить, что при замене переменных по формулам: $\mu = \frac{2\pi \cdot \Delta F}{T}$,

$w = \pi \cdot \Delta F \cdot n$, аргументы в интегралах Френеля принимают следующий вид:

$$x_1 = \sqrt{2\Delta FT} \cdot \left(\frac{l-1}{N} - \frac{1+n}{2} \right) \quad x_2 = \sqrt{2\Delta FT} \cdot \left(\frac{l}{N} - \frac{1+n}{2} \right) \quad (6)$$

где n – нормированный частотный параметр.

Как и в [Кук, Бернфельд, 1971], представим комплексный спектр ЛЧМ ФМ сигнала в виде совокупности следующих трех компонент:

– амплитудный спектр:

$$S(w) = \sqrt{\frac{\pi}{\mu}} \cdot \left\{ \left(\sum_{l=1}^N v_l \cdot (C(x_2) - C(x_1)) \right)^2 + \left(\sum_{l=1}^N v_l \cdot (S(x_2) - S(x_1)) \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

– квадратный фазовый член:

$$\Phi_1(w) = \frac{w^2}{2\mu} \quad (8)$$

– остаточный фазовый член:

$$\Phi_2(w) = -\text{arctg} \cdot \left[\frac{\sum_{l=1}^N v_l \cdot (S(x_2) - S(x_1))}{\sum_{l=1}^N v_l \cdot (C(x_2) - C(x_1))} \right] \quad (9)$$

Математическая модель псевдослучайного сигнала с линейной частотной модуляцией (ПС ЛЧМ сигналы) выглядит следующим образом [Белов и др., 2008]:

$$S(t) = \begin{cases} S_0 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t - l \frac{T}{N}}{T_0} \right\} \cdot \exp \left(j \cdot \left(\omega_0 \cdot \left(t - l \frac{T}{N} \right) + \frac{\mu \left(t - l \frac{T}{N} \right)^2}{2} \right) \right) + \\ + S_0 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t - l \frac{T}{N} - \tau_0}{T_0} \right\} \cdot \exp \left(j \cdot \left(\omega_0 \cdot \left(t - l \frac{T}{N} - \tau_0 \right) + \frac{\mu \left(t - l \frac{T}{N} - \tau_0 \right)^2}{2} \right) \right); \\ 0, \text{ при } \left[\frac{N-1}{N} \cdot T + T_0 + (1 - v_N) \cdot \tau_0 \right] < t < 0 \end{cases} \quad (10)$$

где: S_0 – амплитуда огибающей сигнала, в дальнейшем постоянная величина, равная 1;

v_{l+1} – коэффициент, характеризующий состояние кодируемой последовательности и принимающий значения +1 или 0;

ω_0 – средняя частота ЛЧМ радиоимпульса;

T – длительность информационной посылки;

T_0 – длительность ЛЧМ радиоимпульса;

τ_0 – величина задержки между началом ЛЧМ радиоимпульса и началом элемента псевдослучайной последовательности, соответствующего нулевым значениям коэффициентов v_{l+1} ;

μ – крутизна модуляционной характеристики ЛЧМ радиоимпульса (скорость изменения частоты), связанная с его девиацией частоты ΔF и длительностью T_0 соотношением $\mu = 2 \cdot \pi \cdot \Delta F / T_0$.

Так же, как и для ЛЧМ ФМ сигнала, воспользовавшись преобразованием Фурье, вычислим комплексную спектральную функцию $S(w)$ для ПС ЛЧМ сигнала:

$$S(w) = \sqrt{\frac{\pi}{\mu}} \cdot \exp(-j \frac{(w_0 - w)^2}{2\mu}) \cdot (C(x_2) - C(x_1) + j \cdot (S(x_2) - S(x_1))) \cdot (\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \exp(-j \cdot w \cdot l \frac{T}{N}) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \exp(-j \cdot w \cdot l \frac{T}{N} + \tau_0)) \tag{11}$$

где:

$$x_1 = \frac{w_0 - w}{\sqrt{\pi\mu}} \qquad x_2 = \frac{w_0 - w + \Delta w}{\sqrt{\pi\mu}} \tag{12}$$

Как и в [Кочемасов и др., 1980], представим спектр ПС ЛЧМ сигнала в виде следующих трех компонент:

– амплитудный спектр:

$$|S(w)| = \sqrt{\frac{\pi}{\mu}} [\{ (\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \cos(w \cdot l \frac{T}{N}) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \cos(w \cdot (l \frac{T}{N} + \tau_0))) \cdot (C(x_2) - C(x_1)) + (\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \sin(w \cdot l \frac{T}{N}) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \sin(w \cdot (l \frac{T}{N} + \tau_0))) \cdot (S(x_2) - S(x_1)) \}^2 + \{ (\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \cos(w \cdot l \frac{T}{N}) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \cos(w \cdot (l \frac{T}{N} + \tau_0))) \cdot (S(x_2) - S(x_1)) - (\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \sin(w \cdot l \frac{T}{N}) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \sin(w \cdot (l \frac{T}{N} + \tau_0))) \cdot (C(x_2) - C(x_1)) \}^2]^{\frac{1}{2}} \tag{13}$$

– квадратный фазовый член:

$$\Phi(w) = \frac{(w_0 - w)^2}{2\mu} \tag{14}$$

– остаточный фазовый член:

$$\Phi_2(w) = -\arctan g \left[\frac{A \cdot (S(x_2) - S(x_1)) - B \cdot (C(x_2) - C(x_1))}{A \cdot (C(x_2) - C(x_1)) + B \cdot (S(x_2) - S(x_1))} \right] \tag{15}$$

где:

$$A = \sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \cos(w \cdot l \frac{T}{N}) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \cos(w \cdot (l \frac{T}{N} + \tau_0)) \tag{16}$$

$$B = \sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \sin(w \cdot l \frac{T}{N}) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \sin(w \cdot (l \frac{T}{N} + \tau_0))$$

Результаты исследований и их обсуждение

На рисунках 1–3 представлены результаты экспериментальных исследований амплитудного спектра ЛЧМ ФМ сигнала при разных длительностях информационной последовательности (N) и разных базах сигнала. При таких же условиях результаты экспериментов для ПС ЛЧМ сигнала представлены на рисунках 4–6.

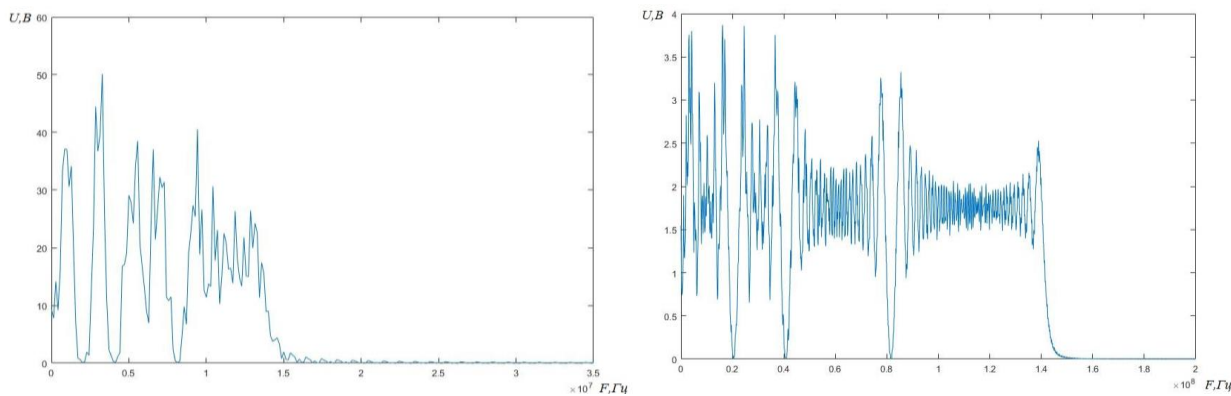


Рис. 1. Амплитудный спектр ЛЧМ ФМ сигнала, $B=100$ и $B=1000$, $N=7$
 Fig. 1. Amplitude spectrum LFM FM signal $B=100$ и $B=1000$, $N=7$

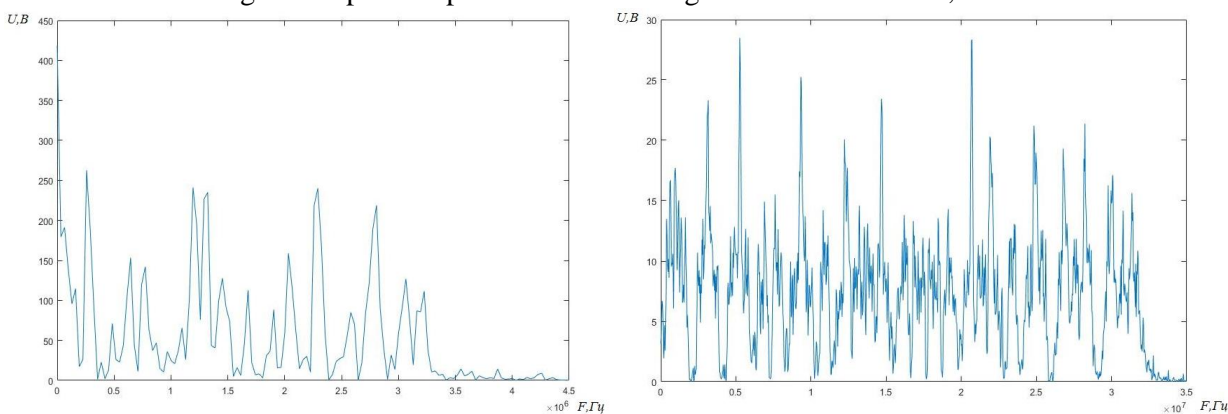


Рис. 2. Амплитудный спектр ЛЧМ ФМ сигнала, $B=100$ и $B=1000$, $N=31$
 Fig. 2. Amplitude spectrum LFM FM signal $B=100$ и $B=1000$, $N=31$

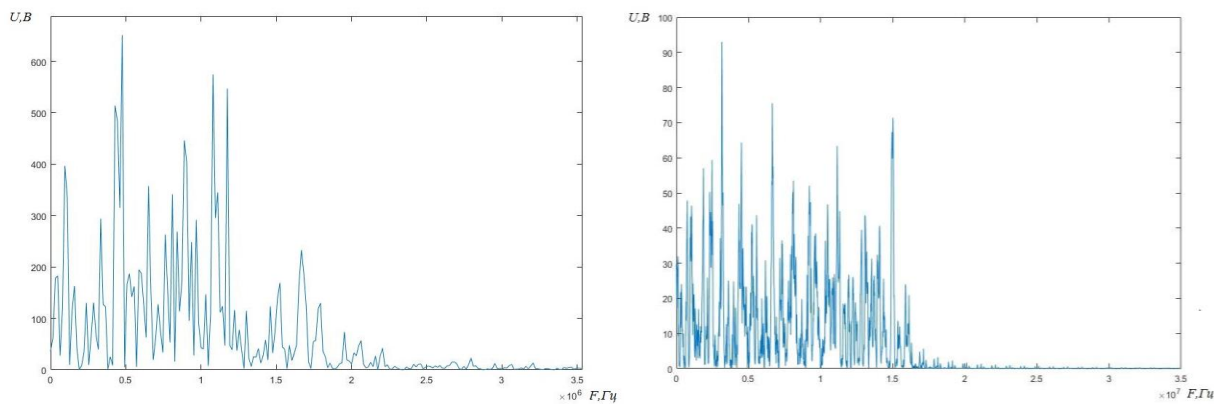


Рис. 3. Амплитудный спектр ЛЧМ ФМ сигнала, $B=100$ и $B=1000$, $N=64$
 Fig. 3. Amplitude spectrum LFM FM signal $B=100$ и $B=1000$, $N=64$

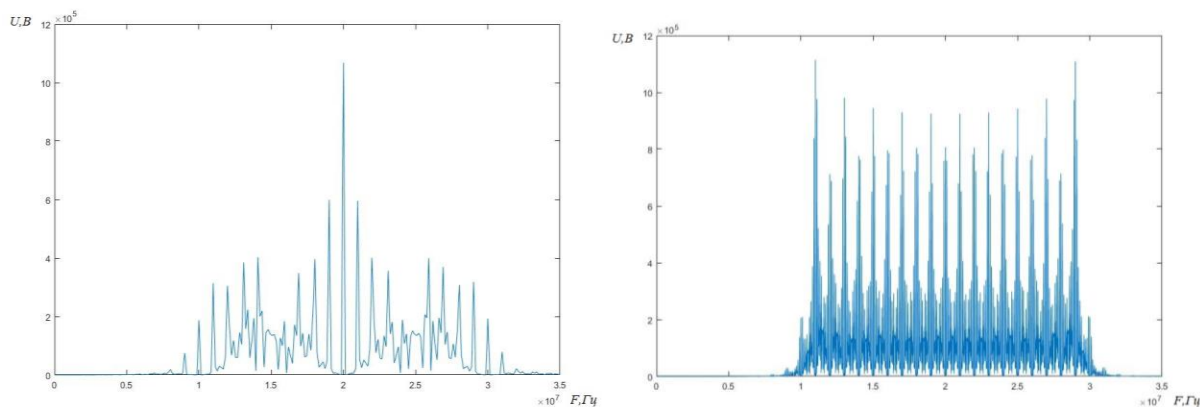


Рис. 4. Амплитудный спектр ПС ЛЧМ сигнала, $B=100$ и $B=1000$, $N=7$
 Fig. 4. Amplitude spectrum PS LFM signal $B=100$ и $B=1000$, $N=7$

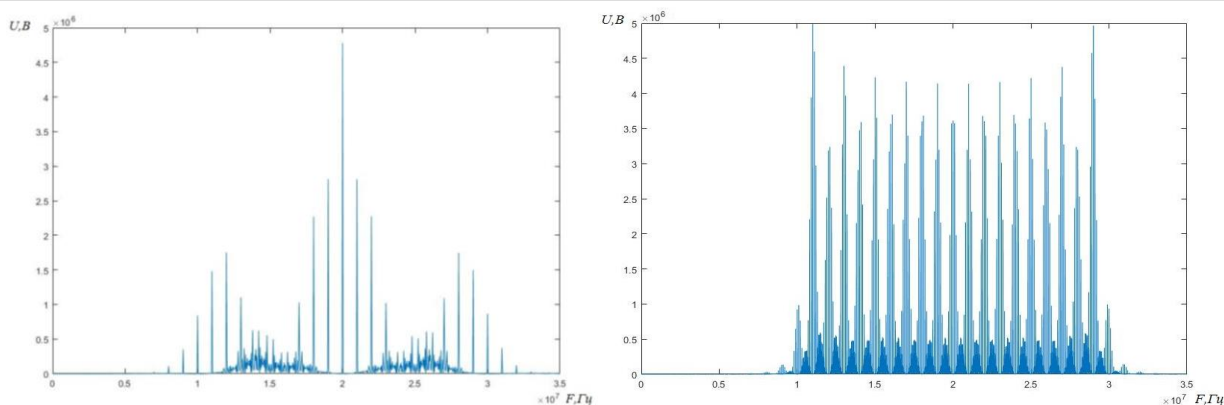


Рис. 5. Амплитудный спектр ПС ЛЧМ сигнала, $B=100$ и $B=1000$, $N=31$
 Fig. 5. Amplitude spectrum PS LFM signal $B=100$ и $B=1000$, $N=31$

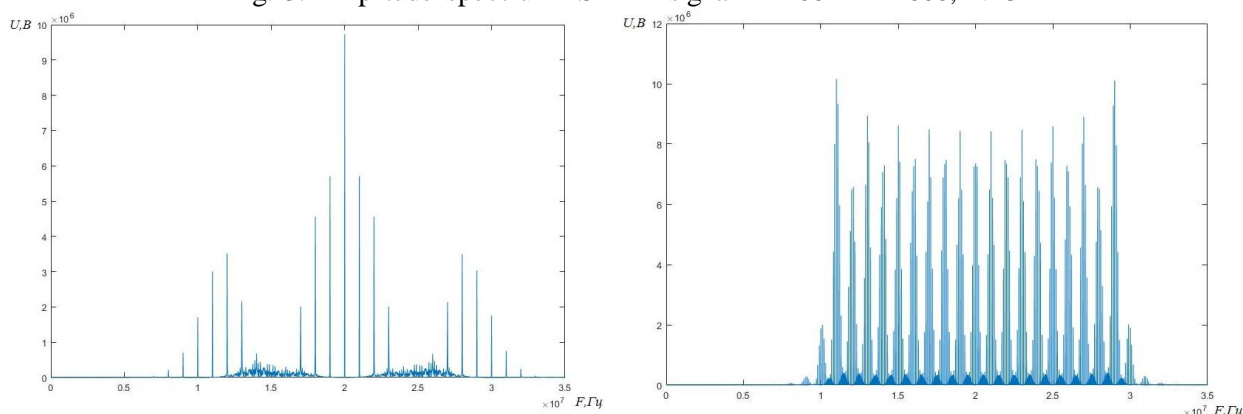


Рис. 6. Амплитудный спектр ПС ЛЧМ сигнала $B=100$ и $B=1000$, $N=64$
 Fig. 6. Amplitude spectrum PS LFM signal $B=100$ и $B=1000$, $N=64$

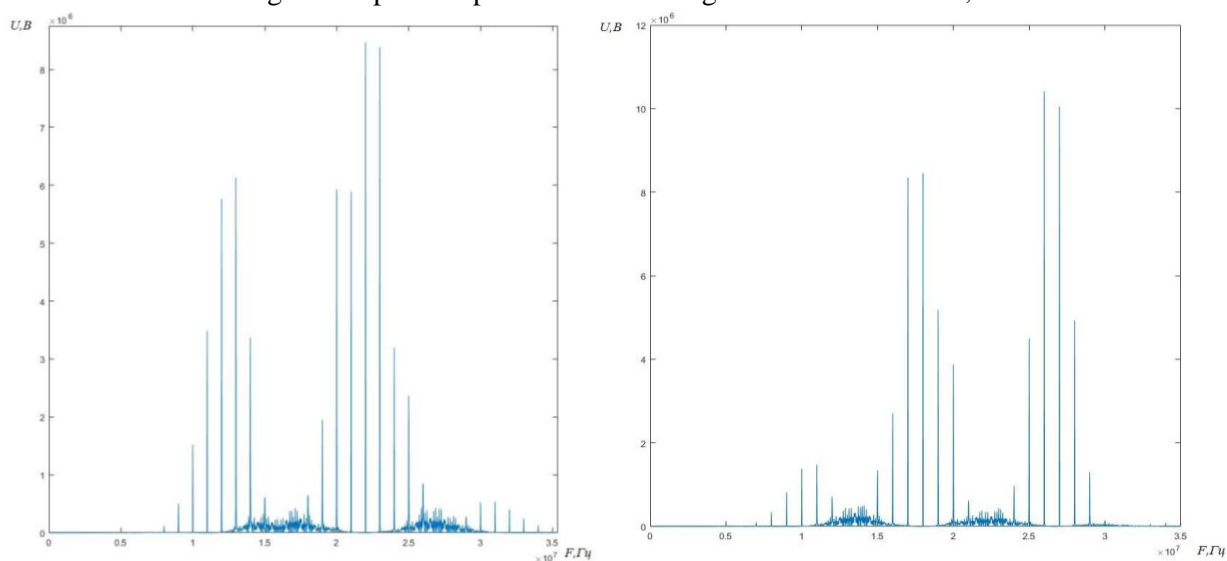


Рис. 7. Амплитудный спектр ПС ЛЧМ сигнала $B=100$, при $\tau_0 < T_s / 10$ и $\tau_0 > T_s / 10$
 Fig. 7. Amplitude spectrum PS LFM signal $B=100$, of the $\tau_0 < T_s / 10$ и $\tau_0 > T_s / 10$

Из представленных на рисунках 1–3 результатов экспериментальных исследований частотных характеристик ЛЧМ ФМ сигналов при различных значениях $B = \Delta F \cdot T$ и количестве элементов кодовой последовательности N видно, что имеются искажения амплитудного спектра сигнала. При увеличении значения $B = \Delta F \cdot T$ наблюдается возрастание занимаемой полосы частот и значительное уменьшение амплитудной составляющей спектра. Интересно заметить, что кроме базы сигнала на ширину спектра также влияет и значение числа N , причем при его увеличении спектр сигнала сужается, а амплитуда возрастает. Также стоит обратить внимание на то, что при малом значении количества коди-



рующих элементов N и большой базе сигнала амплитудный спектр обретает форму, соответствующую набору нескольких спектров ЛЧМ радиоимпульсов (рис. 1), что приводит к нарушению скрытности передаваемой информации, т. к. полученный спектр отображает структуру сигнала. Это объясняется тем, что ЛЧМ ФМ сигнал фактически представляет собой отдельные ЛЧМ радиоимпульсы, отличающиеся друг от друга поворотом фазы и постепенным нарастанием частоты. Однако при значительном увеличении числа элементов, а именно при $N \geq 31$, амплитудный спектр принимает более однородный вид.

На рисунках 3–6 представлены результаты экспериментальных исследований частотных характеристик ПС ЛЧМ сигнала при различных значениях $B = \Delta F \cdot T$, из которых видно, что частотная характеристика сигнала также искажается. В частности, форма амплитудного спектра приобретает изрезанный вид и в ней просматриваются выбросы, возникающие в результате синфазного сложения спектральных составляющих различных ЛЧМ радиоимпульсов. Между главными «выбросами», обусловленными сложением частотных составляющих различных радиоимпульсов со сдвигом фаз, кратных 2π , находятся второстепенные «выбросы», определяемые суммой значений составляющих отдельных ЛЧМ радиоимпульсов с произвольными фазами. Также стоит отметить, что интенсивные частотные составляющие амплитудного спектра результирующего сигнала располагаются в полосе частот, примерно равной полосе частот исходного ЛЧМ радиоимпульса, кроме того, ширина этого спектра, в отличие от ширины спектра ЛЧМ ФМ сигнала, не зависит от соотношения $B = \Delta F \cdot T$, количества элементов кодовой последовательности N и величины задержки τ_0 . Несмотря на то, что значение задержки τ_0 не влияет на ширину спектра, оно влияет на форму частотных характеристик сигнала. В частности, «выбросы» амплитудного спектра перемещаются из одной половины спектра в другую (рис. 7). После ряда проведенных экспериментов было определено, что оптимальным значением задержки между ЛЧМ радиоимпульсами является выполнение следующего соотношения $\tau_0 = T_s / 10$.

Выводы

Таким образом, показано, что применение ЛЧМ ФМ и ПС ЛЧМ сигналов позволяет эффективно использовать выделенные частотно-временные ресурсы каналов систем спутниковой связи.

Использование полученных результатов для вычисления частотных характеристик ЛЧМ ФМ сигнала позволяют, в зависимости от требований, подобрать необходимые параметры базы сигнала и числа кодирующих элементов для минимизации частотно-временных затрат существующих каналов спутниковой связи при использовании в качестве ретрансляторов космических аппаратов, находящихся на высокоэллиптических орбитах. Однако при большой базе сигналов следует придерживаться условия $N \geq 31$, невыполнение этого условия приводит к уменьшению скрытности передаваемой информации ввиду того, что форма спектральных характеристик исследуемых сигналов отражает структуру псевдослучайной последовательности.

Ширина амплитудного спектра ПС ЛЧМ сигнала, в отличие от ЛЧМ ФМ сигнала, не зависит от соотношения $B = \Delta F \cdot T$, количества элементов псевдослучайной последовательности N .

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00289.

Список литературы References

1. Бархата В.А., Горшков В.В., Журавлев В.И. 1973. Системы связи с расширением спектра сигналов. Итоги науки и техники, Связь. М., Сов. Радио, 424.
Barhata V.A., Gorshkov V.V., Zhuravlev V.I. 1973. Communication systems with the expansion of the spectrum of signals. Results of science and technology, Communication. M., Ows. Radio, 424.

2. Белов С.П., Жилияков Е.Г., Белов А.С., Рачинский С.А. 2015. О влиянии доплеровского сдвига частоты на помехоустойчивость спутниковых телекоммуникационных систем со сложными сигналами. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 19(216): 187–190.

Belov S.P., Zhilyakov E.G., Belov A.S., Rachinsky S.A. 2015. On the influence of the Doppler frequency shift on the noise immunity of satellite telecommunication systems with complex signals. Scientific Bulletin of the Belgorod state University. Series: Economy. Informatics. 19(216): 187–190.

3. Белов С.П., Жилияков Е.Г., Сидоренко И.А. 2008. Исследование функции неопределенности псевдослучайных сигналов с линейной частотной модуляцией. Вопросы радиоэлектроники. Серия «РЛТ». М., 4: 100–109.

Belov S.P., Zhilyakov E.G., Sidorenko I.A. 2008. Issledovaniye funktsii neopredelennosti psevdosluchaynykh signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey [Investigation of the uncertainty function of pseudorandom signals with linear frequency modulation]. Voprosy radioelektroniki. Seriya «RLT» [Questions of radio electronics. Series «RLT»]. М., 4: 100–109.

4. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., 2003. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляции несущей псевдослучайной последовательностью. М., Радио и связь, 640.

Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., 2003. Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniyem spektra signalov modulyatsii nesushchey psevdosluchaynoy posledovatel'nost'yu [Interference immunity of radio communication systems with spreading of the signals of pseudorandom sequence carrier modulation]. М., Radio and communication, 640.

5. Варакин Л.Е., 1970. Теория сложных сигналов. М., Сов. Радио, 370.

Varakin L.E., 1970. Teoriya slozhnykh signalov [Theory of complex signals]. М., Ows. Radio, 370.

6. Варакин Л.Е., 1978. Теория систем сигналов. М., Сов. радио, 303.

Varakin L.Ye., 1978. Teoriya sistem signalov [Theory of Signal Systems]. М., Sov. radio, 303.

7. Варакин Л.Е., 1985. Система связи с широкополосными сигналами. М., Радио и связь, 384.

Varakin L.Ye., 1985. Sistema svyazi s shirokopolosnymi signalami [The communication system with broadband signals]. М., Radio and Communication, 384.

8. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинков Ю.С. 2005. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. М., Эко-Трендз, 392.

Volkov L.N., Nemirovsky M.S., Shinkov Yu.S. 2005. Sistemy tsifrovoy radiosvyazi: bazovyye metody i kharakteristiki [Digital radio communication systems: basic methods and characteristics]. М., Eco-Trend, 392.

9. Галкин В.А. 2007. Цифровая мобильная радиосвязь. М., Горячая линия-Телеком, 432.

Galkin V.A. 2007. Tsifrovaya mobil'naya radiosvyaz' [Digital mobile radio]. М., Hotline-Telecom, 432.

10. Диксон Р.К., 1979. Широкополосные системы. Пер. с англ. Под ред. В.И. Журавлева. М., Связь, 304.

Dickson R.K., 1979. Shirokopolosnyye sistemy. Per. s angl. Pod red. V.I. Zhuravleva [Broadband systems. Trans. with English. Ed. V.I. Zhuravleva]. М., Communication, 304.

11. Дятлов А.П., Дятлов П.А. 2009. Анализ помехоустойчивости обнаружителей, связанных ЛЧМ сигналов. Специальная техника, 2: 15–22.

Dyatlov A.P., Dyatlov P.A. 2009. Analiz pomekhoustoychivosti obnaruzhiteley, svyazannykh LCHM signalov [Analysis of the noise immunity of detectors associated chirp signals]. Spetsial'naya tekhnika [Special equipment], 2: 15–22.

12. Зюко А.Г., Коробов Ю.Ф. 1972. Теория передачи сигналов. М., Связь, 282.

Zyuko A.G., Korobov Y.F. 1972. Teoriya peredachi signalov [Theory of signal transmission]. М., Communication, 282.

13. Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконеников В.С. 1983. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. М., Радио и связь, 192.

Kochemasov V.N., Belov L.A., Okonenikov V.S. 1983. Formirovaniye signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey [Formation of signals with linear frequency modulation]. М., Radio and communication, 192.

14. Кочемасов В.Н., Кряжев В.П., Оконечников В.С. 1980. С внутримпульсной фазовой манипуляцией. Радиотехника, 35(2): 57–60.



- Kochemasov V.N., Kryazhev V.P., Okonikov V.S. 1980. S vnutriimpul'snoy fazovoy manipulyatsiyey [With intrapulse phase shift keying]. Radiotekhnika, 35(2): 57–60.
15. Кук Ч., Берифельд М. 1971. Радиолокационные сигналы. Пер. с английского под ред. Кельзона М. М., Сов. Радио, 568.
- Kuk Ch., Berifeld M. 1971. Radiolokatsionnyye signaly. Per. s angliyskogo pod red. Kel'zona M. [Radar signals. Per. from English under the editorship of Kelzon M.] M., Owls. Radio, 568.
16. Прокис Джон. 2000. Цифровая связь. Пер с англ. Под ред. Кловского Д.Д. М., Радио и связь, 800.
- Prokis John. 2000. Tsifrovaya svyaz'. Per s ang. Pod red. Klovsikogo D.D. [Digital communication. Trans. From eng. Ed. D. Klovsiky] M., Radio and communication, 800.
17. Скляр, Бернанд. 2003. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М., Издательский дом «Вильямс», 1104.
- Sklar, Bernard. 2003. Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. M., Publishing House «Williams», 1104.
18. Тузов Г.И., 1977. Статистическая теория приема сложных сигналов. М., Сов. радио, 400.
- Tuzov G.I., 1977. Statisticheskaya teoriya priyema slozhnykh signalov [Statistical theory of reception of complex signals]. Moscow, Sov. radio, 400.
19. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И., Урядников Ю.Ф., Дергачев Ю.А., Сулиманов А.А., 1985. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М., Радио и связь, 264.
- Tuzov G.I., Sivov V.A., Priktkov V.I., Uryryannikov Yu.F., Dergachev Yu.A., Sulimanov A.A., 1985. Pomekhozashchishchennost' radiosistem so slozhnymi signalami [Interference immunity of radio systems with complex signals]. M., Radio and communication, 264.
20. Харкевич, А.А. 1952. Спектр и Анализ. М., ГИТТЛ, 192.
- Kharkevich, A.A. 1952. Spektr i Analiz [Spectrum and Anlyse]. M.: GITTL, 192.
21. Belov S.P., Zhilyakov E.G., Belov A.I.S., Belov An.S., Rachinsky S.A. 2017. About the possibility of one type broadband channel signal application with linear frequency modulation in multichannel systems of satellite communication. J Fundam Appl Sci, 9(1S): 1247–1257.