



УДК 621.391.15

## О ВЛИЯНИИ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СПУТНИКОВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ СО СЛОЖНЫМИ СИГНАЛАМИ

### ON THE IMPACT OF DOPPLER FREQUENCY SHIFT ON THE NOISE IMMUNITY OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS WITH COMPLEX SIGNALS

С.П. Белов, С.А. Рачинский, А.С. Белов, Ан.С. Белов, Н.О. Ефимов  
S.P. Belov, S.A. Raczynski, A.S. Belov, An.S. Belov, N.O. Efimov

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85

Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

e-mail: belov@bsu.edu.ru, 677110@bsu.edu.ru, belov\_as@bsu.edu.ru, belov\_a@bsu.edu.ru,  
n.o.efimov@gmail.com

#### Аннотация

Известно, что при организации информационного обмена с подвижными объектами на основе применения узкополосных сигналов эффективность использования выделенных частотного и временного ресурсов канала передачи снижается из-за большой неопределенности частоты, вызванной эффектом Доплера, и изменений времени прихода принимаемых сигналов. В связи с этим в настоящее время одним из перспективных направлений в области разработки методов формирования канальных сигналов для современных спутниковых телекоммуникационных систем с кодовым разделением адресов, обеспечивающих информационный обмен между удаленными абонентами в северных широтах, является использование сложных сигналов, полученных в результате применения специальных кодов и новых методов расширения спектра. Однако целесообразность применения того или иного класса сигналов в указанных системах во многом определяется их устойчивостью к доплеровскому сдвигу частоты. В связи с этим в работе анализируется влияние указанного эффекта на помехоустойчивость спутниковых телекоммуникационных систем со сложными сигналами.

#### Abstract

It is known that the organization of information exchange with mobile objects through the use of narrow-band signals, the efficiency of use of allocated frequency and time resource of the transmission channel is reduced due to the large uncertainty in the frequency caused by the Doppler effect, and changes the time of arrival of the received signals. In this regard, currently one of the promising directions in the development of methods of formation of channel signals for modern satellite communication systems with code division addresses, providing communication between remote subscribers in the Northern latitudes, is the use of complex signals, resulting from the use of special codes and new methods expansion of the spectrum. However, the feasibility of one or another class of signals in these systems is largely determined by their resistance to Doppler frequency shift. In this regard, the work discusses the influence of this effect on noise immunity of telecommunication systems with complex signals.

**Ключевые слова:** спутниковые телекоммуникационные системы, линейно-частотно модулированный сигнал, функция неопределенности, помехоустойчивость, псевдослучайная последовательность.

**Keywords:** satellite telecommunication systems, linear frequency modulated signal, a function of uncertainty, noise, pseudorandom sequence.

---

#### Введение

Одним из наиболее известных классов сложных сигналов, широко используемых сегодня в спутниковых телекоммуникационных системах с кодовым разделением адресов,



являются так называемые ФМ ПСП сигналы, полученные в результате модуляции по фазе высокочастотного гармонического колебания по закону псевдослучайной последовательности (ПСП) [Варакин Л.Е., 1985]. Целесообразность применения этих сигналов в указанных системах обоснована большим объемом ансамбля слабокоррелированных форм, но у них, как известно, отсутствует свойство инвариантности к доплеровскому сдвигу частоты, что приводит к большим частотно-временным затратам на поиск и синхронизацию ФМ ПСП сигналов. Вместе с тем известен класс сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), обладающий свойством инвариантности к доплеровскому сдвигу частоты, а, следовательно, на их основе достаточно просто может быть решена задача построения беспоисковых по частоте спутниковых телекоммуникационных систем. Однако данный класс сигналов имеет малый ансамбль слабокоррелированных форм, что не позволяет применять его в телекоммуникационных системах с кодовым разделением адресов из-за высокого уровня внутрисистемных помех.

В работах [Белов С.П. и др. 2015; Белов С.П., Жиляков Е.Г., Белов А.С., 2008], было показано, что в качестве переносчиков информации в спутниковых телекоммуникационных системах с кодовым разделением адресов значительно эффективнее использовать ЛЧМ ФМ или ПС ЛЧМ сигналы, в которых объединены положительные свойства как ЛЧМ, так и ФМ ПСП сигналов. Однако ни в одной из указанных работ не был исследован очень важный аспект, связанный с количественной оценкой влияния доплеровского сдвига частоты (который при нахождении спутников на высокоэллиптических орбитах достигает 50 кГц) на помехоустойчивость спутниковых телекоммуникационных систем с кодовым разделением адресов этих классов сложных сигналов. В связи с этим в данной работе анализируется влияние указанного эффекта на помехоустойчивость спутниковых телекоммуникационных систем со сложными сигналами.

### Основная часть

Для оценки доплеровского сдвига частоты, как известно [Кук Ч., Бернфельд М. 1971; Тузов Г.И., 1977], широко используется функция неопределённости (ФН), которая в математическом виде может быть представлена следующим образом:

$$\chi_i(\tau, F_\delta) = \frac{1}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} S_i(t) \cdot S_i^*(t-\tau) \cdot \exp(j2\pi F_\delta t) dt \quad (1)$$

где:  $\tau$  – временной сдвиг между сигналами,  $F_\delta$  – доплеровский сдвиг частоты,  $E$  – энергия сигнала,  $S_i(t)$  – огибающая принимаемого  $i$ -ого сигнала,  $S_i^*(t-\tau)$  – комплексно-сопряженная огибающая  $i$ -ого сигнала.

Для ЛЧМ сигналов, огибающая которых, согласно [4], представима выражением:

$$S(t) = S_0 \cdot \exp\left(j\mu \frac{t^2}{2}\right) \quad (2)$$

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

ФН в графическом виде, для различных значений доплеровского сдвига частоты ( $F_\delta$  от 0 до 50 кГц) и величине базы сигнала  $B = \Delta F * T = 1000$ , представлена на рисунке 1.

Для ФМ ПСП сигналов, огибающая которых, согласно [Тузов Г.И., 1977], представима выражением:

$$S(t) = S_0 \cdot \sum_{l=1}^N v_l \cdot \text{rect}\left[\frac{t - (l-1) \cdot \tau_3 - \frac{T}{2} - \frac{\tau_3}{2}}{\tau_3}\right] \quad (3)$$



где  $\tau_0$  – длительность элемента ПСП;  $N$ -количество элементов в ПСП;  $v_l$ -коэффициент, характеризующий состояние ПСП, принимает значения  $+1$  или  $-1$ ,  $rect(x) = 1$ , при  $|x| \leq \frac{1}{2}$ ;  $rect(x) = 0$ , при  $|x| > \frac{1}{2}$  – прямоугольная «срезающая» функция.

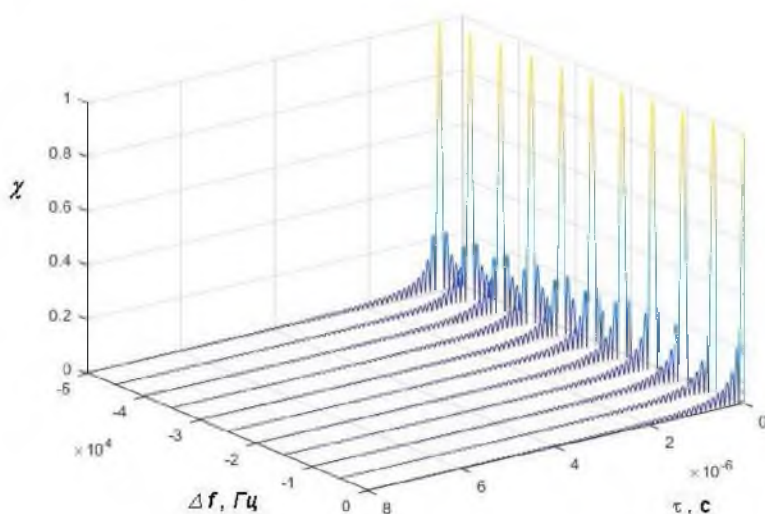


Рис.1. Значения ФН для ЛЧМ сигнала при  $B = 1000$   
 Fig.1. The FU values for the LFM signal at  $B = 1000$

ФН в графическом виде, для различных значений доплеровского сдвига частоты ( $F_\delta$  от 0 до 50 кГц) и величине  $B=1000$ , представлена на рисунке 2.

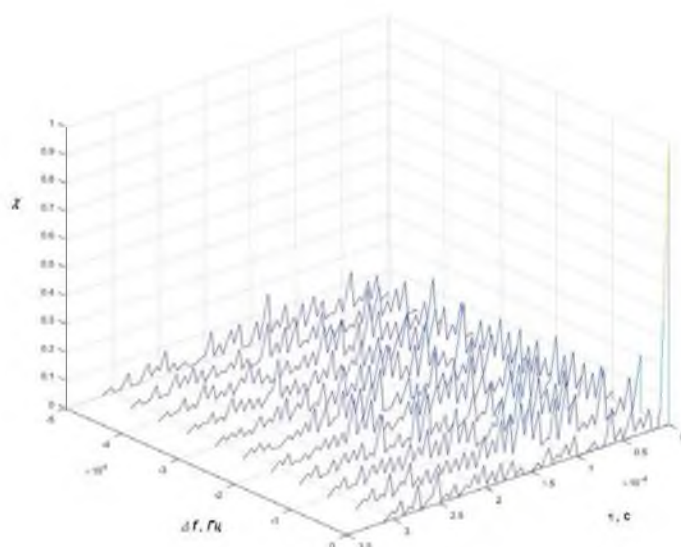


Рис. 2. Значения ФН для ФМ ПСП сигнала при  $B = 1000$ ,  $N=31$   
 Fig. 2. The FU values for the PM PRS signal at  $B = 1000$ ,  $N = 31$

Для ЛЧМ ФМ сигналов, огибающая которых, согласно [Белов С.П., Жилияков Е.Г., Белов А.С. 2008], представима выражением:

$$S(t) = \begin{cases} S_0 \cdot \sum_{l=1}^N v_l \cdot rect \left\{ \frac{t - (l-1) \cdot \tau_0 - \frac{T}{2} - \frac{\tau_0}{2}}{\tau_0} \right\} \cdot \exp \left( j \mu \frac{t^2}{2} \right); & \text{при } |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0; & \text{при других } t \end{cases} \quad (4)$$

ФН в графическом виде для величины базы сигнала  $B=1000$ , различных значений доплеровского сдвига частоты ( $F_\delta$  от 0 до 50 кГц) и числа элементов ПСП 31 и 127, представлены на рисунках 3 и 4.

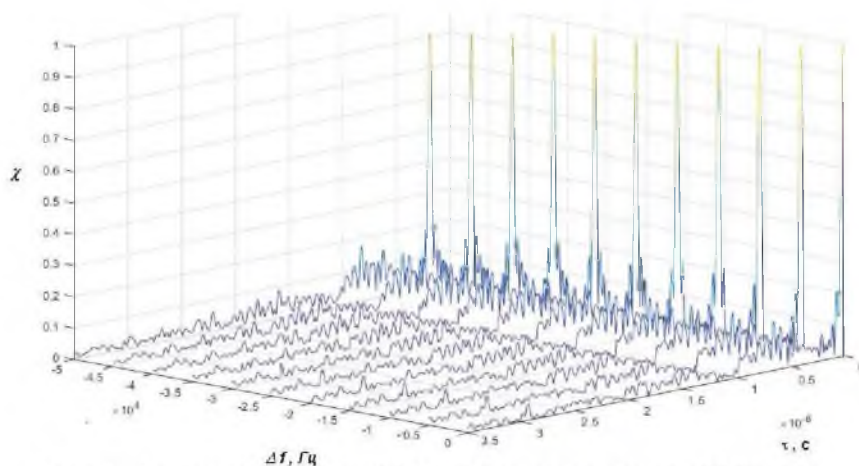


Рис. 3. Значения ФН для ЛЧМ ФМ сигнала при B = 1000, N=31  
 Fig. 3. The FU values for the LFM PM signal at B = 1000, N = 31

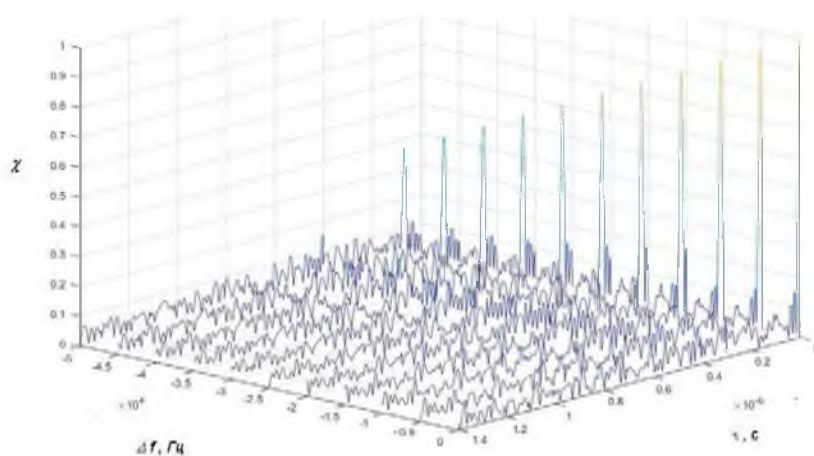


Рис. 4. Значения ФН для ЛЧМ ФМ сигнала при B = 1000, N=127  
 Fig. 4. The FU values for the LFM PM signal at B = 1000, N = 127

Для ПС ЛЧМ сигналов, огибающая которых, согласно [Белов С.П., Жилияков Е.Г. и др. 2015], представима выражением:

$$S(t) = \begin{cases} S_0 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t-l \frac{T}{N}}{T_0} \right\} \cdot \exp \left[ j \cdot \left( \omega_0 \cdot \left( t-l \frac{T}{N} \right) + \frac{\mu \left( t-l \frac{T}{N} \right)^2}{2} \right) \right] + \\ + S_0 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} (1-\nu_{l+1}) \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t-l \frac{T}{N} - \tau_0}{T_0} \right\} \cdot \exp \left[ j \cdot \left( \omega_0 \cdot \left( t-l \frac{T}{N} - \tau_0 \right) + \frac{\mu \left( t-l \frac{T}{N} - \tau_0 \right)^2}{2} \right) \right]; \\ 0, \text{ при } \left[ \frac{N-1}{N} \cdot T + T_0 + (1-\nu_N) \cdot \tau_0 \right] < t < 0 \end{cases} \quad (5)$$

где:  $\nu_{l+1}$  -коэффициент, характеризующий состояние кодируемой последовательности и принимающий значения +1 или 0;  $\omega_0$ -средняя частота ЛЧМ радиоимпульса;  $T_0$ -длительность ЛЧМ радиоимпульса;  $\tau_0$ -величина задержки между началом ЛЧМ радиоимпульса и началом элемента ПСП, соответствующего нулевым значениям коэффициентов  $\nu_{l+1}$ ;



ФН в графическом виде для величины базы сигнала  $V = \Delta F * T_o = 1000$ , различных значений доплеровского сдвига частоты ( $F_d$  от 0 до 50 кГц) и числа элементов ПСП 31 и 127, представлены на рисунках 5 и 6.

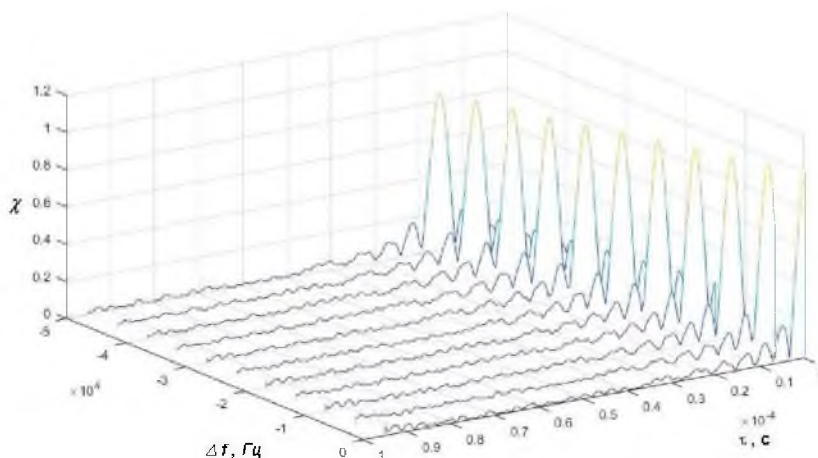


Рис. 5. Значения ФН для ПС ЛЧМ сигнала при  $V = 1000, N = 31$   
 Fig. 5. The FU values for the PR LFM signal at  $V = 1000, N = 31$

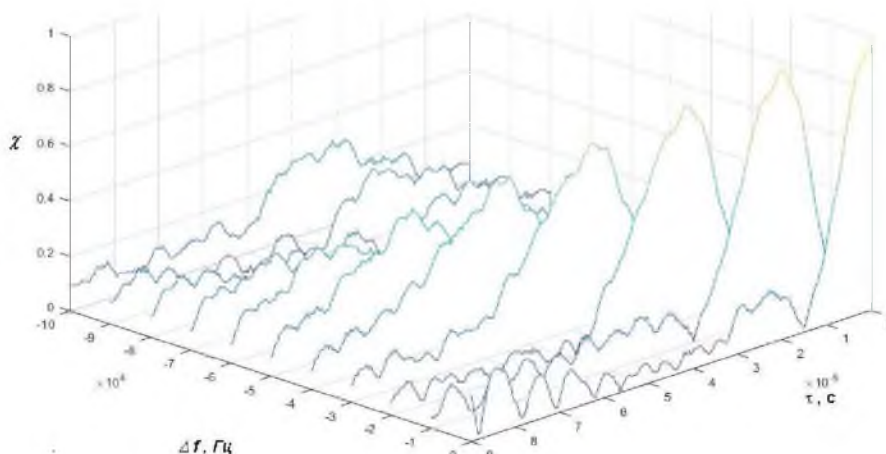


Рис. 6. Значения ФН для ПС ЛЧМ сигнала при  $V = 1000, N = 127$   
 Fig. 6. The FU values for the PR LFM signal at  $V = 1000, N = 127$

При оценке помехоустойчивости спутниковых телекоммуникационных систем с кодовым разделением адресов, при использовании в качестве переносчиков информации рассматриваемых классов сигналов воспользуемся формулой, приведенной в [Зюко, А.Г., Кловский Д.Д. и др., 1980]:

$$P_{ош} = 0,5[1 - \Phi(h)] \tag{6}$$

где  $\Phi(h) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^h e^{-x^2/2} dx$  – интеграл вероятностей,  $h = \sqrt{\frac{E}{N_0}}$ , где  $E$  – энергия сигнала,  $N_0$  – спектральная плотность мощности.

Целесообразность применения формулы (6) обоснована тем, что рассматриваемые классы сигналов, как показывают результаты экспериментальных исследований их функций взаимной неопределенности, являются квазиортогональными, т.е. их значения близки к нулю.

Для нахождения численных значений вероятности ошибки необходимо определить аргумент интеграла вероятности  $h$  при всех значениях доплеровского сдвига частоты. Для этого вначале находим максимальные значения ФН для каждого из рассматриваемых классов сигналов при всех величинах доплеровского сдвига частоты, а затем умножаем найденные значения ФН (размещены в Таблице 1), на выбранные значения отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности (при  $F_d = 0$ ). Выбранные и полученные изложенным



выше способом значения искомого аргумента, в которых учтено влияние доплеровского сдвига частоты на выбранные значения отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности, представлены в Таблице 2.

Таблица 1

Table 1

**Максимальные значения функций неопределённости для ЛЧМ, ПС ЛЧМ, ЛЧМ ФМ, ФМ ПСП сигналов при различных значениях доплеровских сдвигов частоты**  
**The maximum values of the uncertainty functions for LFM, PR LFM, LFM PRS, PM PRS signals for different values of Doppler frequency shifts**

Значения доплеровского сдвига частоты (кГц)	Значение ФН для ЛЧМ сигнала	Значение ФН для ПС ЛЧМ N=31	Значение ФН для ЛЧМ ФМ N=31	Значение ФН для ЛЧМ ФМ N=127	Значение ФН для ФМ ПСП сигнала при N=31
5	0.9995	0.9889	0.9715	0.9374	0.05
10	0.999	0.9651	0.9513	0.8741	0.031
15	0.9985	0.9471	0.9466	0.811	0.061
20	0.998	0.9394	0.9354	0.748	0.0297
25	0.9975	0.9242	0.91	0.685	0.0294
30	0.997	0.9016	0.8962	0.6223	0.027
35	0.9965	0.883	0.8816	0.5596	0.013
40	0.996	0.874	0.8681	0.4971	0.024
45	0.9955	0.8592	0.8413	0.4348	0.004
50	0.995	0.8374	0.8358	0.3692	0.02

Таблица 2

Table 2

**Отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума**  
**Relationship signal energy to noise power spectral density**

Значения $E/N_0$ при $F_D=0$	ПС ЛЧМ, N=31 Значения $E/N_0$ при $F_D=10, 30, 50$ кГц			ЛЧМ ФМ, N=31 Значения $E/N_0$ при $F_D=10, 30, 50$ кГц			ЛЧМ ФМ, N=127 Значения $E/N_0$ при $F_D=10, 30, 50$ кГц		
	10кГц	30кГц	50кГц	10кГц	30кГц	50кГц	10кГц	30кГц	50кГц
	1	0,965	0,901	0,837	0,951	0,896	0,835	0,874	0,622
2	1,930	1,803	1,674	1,902	1,792	1,671	1,748	1,244	0,738
3	2,895	2,704	2,512	2,853	2,688	2,507	2,622	1,866	1,107
4	3,860	3,606	3,349	3,805	3,584	3,343	3,496	2,489	1,476
5	4,825	4,508	4,187	4,756	4,481	4,179	4,370	3,111	1,846
6	5,790	5,409	5,024	5,707	5,377	5,014	5,244	3,733	2,215
7	6,755	6,311	5,861	6,659	6,273	5,850	6,118	4,356	2,584
8	7,720	7,212	6,699	7,610	7,169	6,686	6,992	4,978	2,953
9	8,685	8,114	7,536	8,561	8,065	7,522	7,866	5,600	3,322
10	9,651	9,016	8,374	9,513	8,962	8,358	8,741	6,223	3,692
11	10,616	9,9176	9,211	10,464	9,858	9,193	9,615	6,845	4,061
12	11,581	10,819	10,048	11,415	10,754	10,029	10,489	7,467	4,430
13	12,546	11,720	10,886	12,366	11,650	10,865	11,363	8,089	4,799
14	13,511	12,622	11,723	13,318	12,546	11,701	12,237	8,712	5,168
15	14,476	13,524	12,561	14,269	13,443	12,537	13,111	9,334	5,538
16	15,441	14,425	13,398	15,220	14,339	13,372	13,985	9,956	5,907
17	16,406	15,327	14,235	16,172	15,235	14,208	14,859	10,579	6,276
18	17,371	16,228	15,073	17,123	16,131	15,044	15,733	11,201	6,645
19	18,336	17,130	15,910	18,074	17,027	15,880	16,607	11,823	7,014
20	19,302	18,032	16,748	19,026	17,924	16,716	17,482	12,446	7,384

На основании полученных результатов были составлены Таблицы 3-5 изменения  $R_{\text{ош}}$  для ПС ЛЧМ и ЛЧМ ФМ сигналов.



Таблица 3  
Table 3

**Изменения  $P_{\text{ош}}$  ПС ЛЧМ сигнала, при  $V=1000$ ,  $N=31$**   
**Changes  $P_{\text{er}}$  PR LFM of the signal at  $V=1000$ ,  $N=31$**

$\frac{F_{\text{д}}}{h, \text{дБ}}$	0	10кГц	30кГц	50кГц
5	$1.267 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.683 \cdot 10^{-2}$	$1.903 \cdot 10^{-2}$
10	$7.827 \cdot 10^{-4}$	$9.462 \cdot 10^{-4}$	$1.338 \cdot 10^{-3}$	$1.903 \cdot 10^{-3}$
15	$5.367 \cdot 10^{-5}$	$7.068 \cdot 10^{-5}$	$1.17 \cdot 10^{-4}$	$1.96 \cdot 10^{-4}$
20	$3.872 \cdot 10^{-6}$	$5.55 \cdot 10^{-6}$	$1.077 \cdot 10^{-5}$	$2.121 \cdot 10^{-5}$

Таблица 4  
Table 4

**Изменения  $P_{\text{ош}}$  ЛЧМ ФМ сигнала, при  $V=1000$ ,  $N=31$**   
**Changes  $P_{\text{er}}$  LFM PM of the signal at  $V=1000$ ,  $N=31$**

$\frac{F_{\text{д}}}{h, \text{дБ}}$	0	10кГц	30кГц	50кГц
5	$1.267 \cdot 10^{-2}$	$1.459 \cdot 10^{-2}$	$1.714 \cdot 10^{-2}$	$2.046 \cdot 10^{-2}$
10	$7.827 \cdot 10^{-4}$	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$1.378 \cdot 10^{-3}$	$1.92 \cdot 10^{-3}$
15	$5.367 \cdot 10^{-5}$	$7.921 \cdot 10^{-5}$	$1.23 \cdot 10^{-4}$	$1.995 \cdot 10^{-4}$
20	$3.872 \cdot 10^{-6}$	$6.447 \cdot 10^{-6}$	$1.15 \cdot 10^{-5}$	$2.171 \cdot 10^{-5}$

Таблица 5  
Table 5

**Изменения  $P_{\text{ош}}$  ЛЧМ ФМ сигнала, при  $V=1000$ ,  $N=31$**   
**Changes  $P_{\text{er}}$  LFM PM of the signal at  $V=1000$ ,  $N=31$**

$\frac{F_{\text{д}}}{h, \text{дБ}}$	0	10кГц	30кГц	50кГц
5	$1.267 \cdot 10^{-2}$	$1.828 \cdot 10^{-2}$	$3.887 \cdot 10^{-2}$	$8.712 \cdot 10^{-2}$
10	$7.827 \cdot 10^{-4}$	$1.556 \cdot 10^{-3}$	$6.305 \cdot 10^{-3}$	$2.734 \cdot 10^{-2}$
15	$5.367 \cdot 10^{-5}$	$1.467 \cdot 10^{-4}$	$1.124 \cdot 10^{-3}$	$9.304 \cdot 10^{-3}$
20	$3.872 \cdot 10^{-6}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$	$2.094 \cdot 10^{-4}$	$3.29 \cdot 10^{-3}$

**Заключение**

Из представленных в Таблицах 3-5 данных видно, что изменение доплеровского сдвига частоты, в реальных пределах его изменения (от 0 до 50 кГц), приводит к уменьшению помехоустойчивости спутниковых телекоммуникационных систем со сложными сигналами. Однако по сравнению с ФМ ПСП сигналами, значения  $P_{\text{ош}}$  для ЛЧМ ФМ и ПС ЛЧМ сигналов изменяются незначительно, что позволяет говорить о целесообразности применения этих классов канальных сигналов в спутниковых телекоммуникационных системах с кодовым разделением адресов.

**Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00268**



**Список литературы**  
**References**

1. Варакин Л.Е. 1985. Система связи с шумоподобными сигналами. М., Радио и связь, 384.  
Varakin L.E. 1985. Communication Systems with noise-like signals. M., Radio and communication, 384.
2. Белов С.П., Жиляков Е.Г., Белов А.С., Рачинский С.А., 2015. Об одном способе цикловой синхронизации широкополосных сигналов. Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 19(216): 187-191.  
Belov S.P., Zhilyakov E.G. Belov A.S., Rachinskii S.A., 2015. Method of frame synchronization of wideband signals. Nauchnye vedomosti BelGU. Ekonomika. Informatika. [Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics Information technologies]. 19(216): 187-191. (in Russian).
3. Белов С.П., Жиляков Е.Г., Белов А.С. 2008. Возможность применения одного класса сложных сигналов с ЛЧМ для передачи речевых данных в цифровых мобильных системах связи. Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Электронная вычислительная техника (ЭВТ)». М., 1: 161-171.  
Belov S. P., Zhilyakov E.G., Belov A. S. 2008. Possibility of the use of a class of complex signals with chirp to transmit voice data in digital mobile communication systems. Questions of radio electronics. Ser. "Electronic computing equipment (EWT)". M., 1: 161-171.
4. Тузов Г.И., 1977. Статистическая теория приема сложных сигналов. М., Сов. Радио, 400.  
Tuzov G.I., 1977. Statistical theory of complex signal reception. M., Sov. Radio, 400.
5. Кук Ч., Бернфельд М., 1971. Радиолокационные сигналы. Пер. с английского под ред. Кельзона М. М., Сов. Радио, 568.  
Cook CH., Bernfeld M., 1971. Radar signals. Per. with English under the editorship of M. Kelson. M., Sov. Radio, 568.
6. Зюко, А.Г., Кловский Д.Д. и др. 1980. Теория передачи сигналов. М., Связь, 288.  
Zyuko, AG, Klovskiy, D.D. and oth. 1980. Theory of signal transmission. M., Communication, 288.