

УДК 621.396

Сравнение корреляционных характеристик частотно-модулированных сигналов

Жиганов С.Н., Жиганова Е.А., Мартынов И.Е.

Широкополосные сигналы широко используются в радиотехнических системах для передачи информации, радиолокационных и радионавигационных измерений. Одной группой таких сигналов являются частотно – модулированные сигналы. В работе на основе полученных двумерных функций неопределенности рассчитаны корреляционные характеристики трех видов широкополосных сигналов: ЛЧМ сигнала, сигнала с V-образным и гиперболическим законами изменения частоты. Проведены исследования влияния базы сигнала и частоты дискретизации на корреляционные характеристики сигналов. Прослежено влияние частоты дискретизации и базы сигнала на максимальный уровень взаимной корреляции пары ортогональных широкополосных сигналов. При помощи шести весовых функций проведено исследование изменения корреляционных характеристик широкополосных сигналов. Моделирование проводилось средствами программы Matlab.

Ключевые слова: широкополосные сигналы, частотно-модулированные сигналы, функция неопределенности.

Введение

Широкополосными (сложными, шумоподобными) сигналами (ШПС) называют такие сигналы, у которых произведения ширины спектра ΔF на длительность T много больше единицы. Это произведение принято называть базой сигнала B :

$$B = \Delta F \cdot T. \quad (1)$$

Повышение базы у сигнала достигается путем дополнительной модуляции (или манипуляции) по частоте или фазе на времени длительности сигнала. В результате, спектр сигнала ΔF (при сохранении его длительности T) существенно расширяется.

Сигналы с большой базой получили широкое применение в радиотехнических системах, так как:

- позволяют в полной мере реализовать преимущества оптимальных методов обработки сигналов;
- обеспечивают высокую помехоустойчивость системы;
- позволяют успешно бороться с многолучевым распространением радиоволн путем разделения лучей;
- допускают одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот;
- обеспечивают электромагнитную совместимость широкополосных с узкополосными системами радиосвязи и радиовещания, системами телевизионного вещания.

Широкополосные сигналы активно применяются в радиолокационных и радионавигационных измерениях и в системах связи для передачи информационных пакетов. В зависимости от области применения сигналов к ним предъявляются разные требования, в частности в радиолокации необходимо, чтобы корреляционная функция сигнала обладала малым уровнем боковых лепестков (УБЛ), в системах связи требуется большой ансамбль ортогональных сигналов.

Одним классом подобных сигналов являются сигналы с внутри импульсной частотной модуляцией. Закон изменения частоты может быть выбран достаточно произвольно, но в настоящее время широко используют сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), с V-образным и гиперболическим законами изменения частоты.

Целью представленной работы является исследование изменения корреляционных свойств частотно-модулированных сигналов на основе анализа функции неопределенности в зависимости от базы сигнала и частоты дискретизации.

ЛЧМ-сигнал

Аналитически ЛЧМ сигнал можно представить в виде [1, 2]:

$$s(t) = A(t) \cdot \cos\left(\omega_0 t + \frac{1}{2} \mu t^2\right), \quad (2)$$

при $-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$,

где $A(t)$ - огибающая сигнала (часто используют прямоугольную или гауссовскую); $\mu = 2\pi \frac{W}{T}$ - скорость нарастания частоты в импульсе; W - девиация частоты; T - длительность импульса.

Средствами программы Matlab был сформирован ЛЧМ сигнал длительностью $T = 1$ мс и девиацией частоты $W = 1$ МГц, база сигнала в этом случае составила $B = 1000$, частота дискретизации сигнала выбиралась в два раза больше, чем девиация частоты, т.е. $F_d = 2$ МГц. На рис. 1 приведена функция неопределенности исследуемого сигнала в координатах время задержки частота-Доплера.

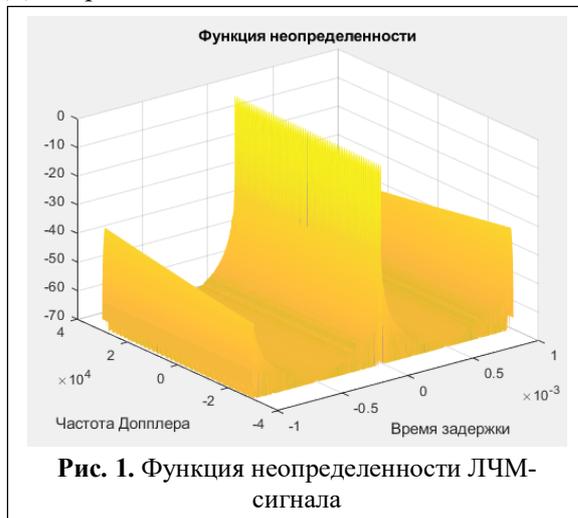


Рис. 1. Функция неопределенности ЛЧМ-сигнала

На рис. 2 приведены срезы тела неопределенности ЛЧМ-сигнала при сдвиге по частоте Доплера равным нулю и при нулевой задержке по времени соответственно.

Функция неопределенности, приведенная на рис. 1 позволяет проследить корреляцию между зондирующим и опорным сигналами при сдвиге одного из них по времени задержке или по частоте Доплера. Срезы тела неопределенности, приведенные на рис. 2 позволяют оценить УБЛ по времени и частоте и рассчитать разрешающую способность по дальности и по скорости, которую может обеспечить использование данного сигнала. Проследим влияние базы сигнала на характеристики корреляционной функции ЛЧМ сигнала. Для изменения базы сигнала, его длительность зафиксировали, а уменьшали значение девиации частоты и пропорционально

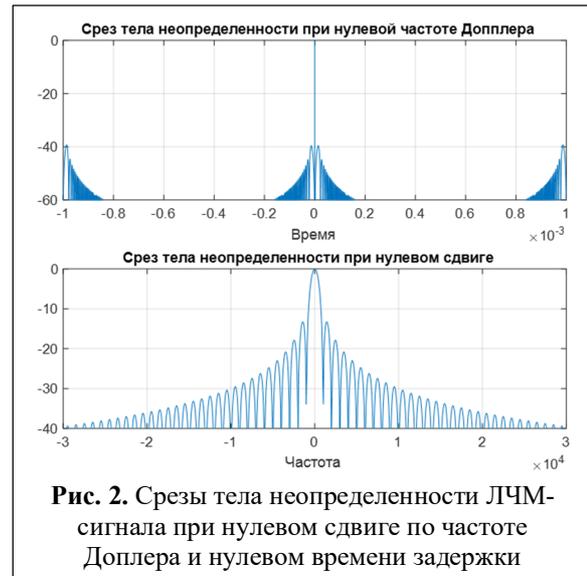


Рис. 2. Срезы тела неопределенности ЛЧМ-сигнала при нулевом сдвиге по частоте Доплера и нулевом времени задержки

частоту дискретизации. В таблице 1 приведены рассчитанные значения характеристик корреляционной функции.

Из таблицы 1 видно, что изменение базы сигнала влияет на разрешающую способность по времени, она уменьшается с 20 мкс при базе 50 до 1 мкс при базе 1000, на величину максимального УБЛ по времени задержки, она уменьшилась с -25,71 дБ до -39,21 дБ и интегральный УБЛ, он также уменьшается при увеличении базы с -15,33 дБ до -21,86 дБ. При этом изменение базы ЛЧМ-сигнала не влияет на разрешение по частоте Доплера и максимальный уровень УБЛ по частоте Доплера.

Рассмотрим влияние частоты дискретизации на характеристики корреляционной функции сигнала. При исследовании длительность сигнала выбиралась равной 1 мс, а база составляла значение 100, а частоту дискретизации изменяли в диапазоне от 2 до 10 значений девиации частоты. В таблице 2 приведены полученные результаты.

Из таблицы 2 видно, что при увеличении частоты дискретизации уменьшается разрешающая способность по времени с 10 мкс до 6 мкс, увеличивается максимальный УБЛ по времени с -28,86 дБ до -13,34 дБ и увеличивается интегральный УБЛ с -16,24 дБ до -19,97 дБ. Остальные параметры корреляционной функции не изменяются.

Таблица 1. Характеристики корреляционной функции ЛЧМ сигнала

База	50	100	200	500	600	800	1000
Разрешение по времени, мкс	20	10	5	2	1,67	1,25	1
Разрешение по частоте, Гц	840	840	840	840	840	840	840
Максимальный УБЛ по частоте Доплера, дБ	-13,28	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27
Максимальный УБЛ по времени задержки, дБ	-25,71	-28,83	-32,02	-36,13	-36,94	-38,22	-39,21
Интегральный уровень УБЛ, дБ	-15,33	-16,84	-18,36	-20,35	-20,74	-21,86	-21,86

Таблица 2. Характеристики корреляционной функции ЛЧМ сигнала при изменении частоты дискретизации

F_d	$2W$	$3W$	$4W$	$5W$	$8W$	$10W$
Разрешение по времени, мкс	10	6,67	5	8	5	6
Разрешение по частоте, Гц	840	840	840	840	840	840
Максимальный УБЛ по частоте Доплера, дБ	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27
Максимальный УБЛ по времени задержки, дБ	-28,86	-20,51	-13,94	-14,84	-13,93	-13,34
Интегральный уровень УБЛ, дБ	-16,24	-16,19	-13,18	-12	-12,98	-12,97

Для ЛЧМ сигнала существует один сигнал, ортогональный ему, у этих сигналов законы изменения частоты должны быть противоположны. Если исходный ЛЧМ-сигнал определяется (2), то ортогональный ему ЛЧМ сигнал определяется выражением

$$s(t) = A(t) \cdot \cos\left(\omega_0 t - \frac{1}{2}\mu t^2\right), \quad (3)$$

$$\text{при } -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2},$$

На рис. 3 приведена функция неопределенности двух ортогональных ЛЧМ-сигналов длительностью 1 мс, базой 1000 и частотой дискретизации 2МГц. Из рис. 3 видно, что максимальные значения функции неопределенности не превышают величину в -29,9 дБ.

В таблице 3 приведены значения максимума взаимной корреляции двух ортогональных сигналов при различных значениях времени задержки и доплеровского сдвига частот в зависимости от базы сигнала и частоты дискретизации.

Из таблицы 3 видно, что увеличение базы сигнала приводит к уменьшению уровня взаимной корреляции между ортогональными сигналами, уровень взаимной корреляции снизился с -16,4 дБ при базе 50 до -29,9 дБ

при базе в 1000. Увеличение частоты дискретизации от минимального значения приводит к существенному уменьшению уровня взаимной корреляции почти на 6 дБ при увеличении частоты дискретизации с $2W$ до $3W$, дальнейшее увеличение частоты дискретизации до $10W$ практически не изменяет уровень взаимной корреляции.

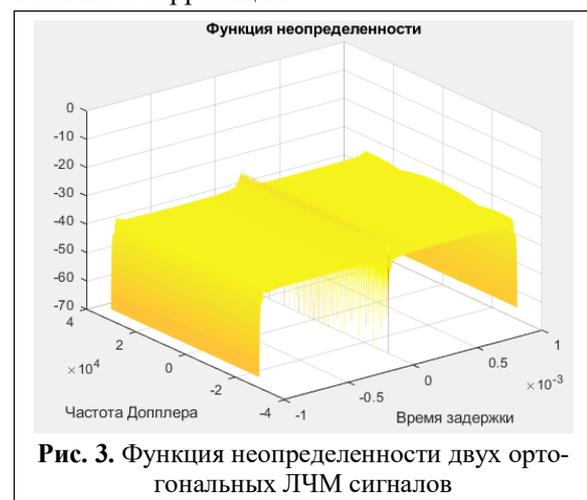


Рис. 3. Функция неопределенности двух ортогональных ЛЧМ сигналов

Таблица 3. Характеристики взаимной корреляции двух ортогональных ЛЧМ сигналов

База	50	100	200	500	600	800	1000
Максимум ВКФ, дБ	-16,4	-19,7	-22,8	-26,9	-26,7	-28,9	-29,9
F_d	$2W$	$3W$	$4W$	$5W$	$6W$	$8W$	$10W$
Максимум ВКФ, дБ	-19,7	-25,4	-25,7	-25,9	-25,9	-26	-26,1

Использование весовых функций при обработке ЛЧМ-сигналов

Как показали результаты предыдущих исследований при сжатии ЛЧМ сигналов одним из отрицательных эффектов является достаточно большой уровень боковых лепестков, составляющий значение более - 13 дБ. Для его уменьшения широко применяются весовые (оконные) функции [3].

Предложено достаточно много оконных функций, применение которых позволяет снизить уровень боковых лепестков по сравнению с тем их уровнем, который они имеют в случае прямоугольного окна (безвесовой обработкой). Однако это дается ценой расширения главного лепестка функции неопре-

деленности, что, естественно, приводит к ухудшению разрешения и уменьшения максимума функции неопределенности. Следовательно, должен выбираться какой-то компромисс между шириной главного лепестка и уровнем подавления боковых лепестков. Наиболее широко используемые весовые функции можно найти в специализированной литературе, в частности, в [3,4].

Были проведены расчеты корреляционных характеристик ЛЧМ сигналов, взвешенных при помощи шести весовых функций в программе Matlab, в таблице 4 приведены корреляционные характеристики, полученные с использованием этих весовых функций.

Таблица 4. Характеристики корреляционной функции взвешенного ЛЧМ-сигнала

Весовая функция	Прямоугольная	Треугольная (треуголярная)	Хеннинга	Хемминга	Блекмана	Наттолла	Кайзера
Уменьшение максимума, дБ	0	-6,03	-6,02	-5,35	-7,54	-8,8	-4,4
Разрешение по времени, мкс	6	8	8	8	10	10	6
Разрешение по частоте, Гц	840	1200	1320	1200	1560	1800	1080
Максимальный УБЛ по частоте Доплера, дБ	-13,27	-26,53	-31,48	-42,68	-58,11	-98,19	-29,98
Максимальный УБЛ по времени задержки, дБ	-13,27	-26,48	-31,92	-42,25	-47,72	-46,64	-29,88
Интегральный уровень УБЛ, дБ	-12,97	-26,22	-30,08	-30,18	-31,9	-32,2	-27,54

Анализ таблицы 4 показывает, что при использовании весовых функций происходит существенное уменьшение боковых лепестков корреляционной функции, как по времени, так и по частоте, кроме этого, расширяется главный лепесток тела неопределенности, особенно по частоте (функции Хемминга, Наттолла и Блекмана).

Из таблицы 4 видно, что использование весовых функций приводит к уменьшению УБЛ по времени, по частоте и интегрального УБЛ. Наиболее существенно уменьшается УБЛ по частоте (функция Наттолла позволяет уменьшить УБЛ до -98,19 дБ, наименее всего уменьшает УБЛ треугольная функция до -26,53 дБ).

УБЛ по времени задержки также уменьшается при использовании весовых функций более чем на 13 дБ, наибольший эффект получается при использовании весовой функции Блекмена и Наттолла (максимальный УБЛ -47,42 дБ и -46,64 дБ соответственно), а наименьшее влияние на УБЛ оказывает треугольная функция (-26,48 дБ).

Уменьшение интегрального УБЛ у всех функций происходит примерно одинаково, до величины около -30 дБ.

Отрицательное влияние весовой обработки приводит к уменьшению максимума корреляционной функции, наиболее сильно уменьшается максимум при использовании весовой функции Блекмана и Наттолла (уменьшение на 7,54 дБ и 8,8 дБ соответственно), а наименьшее влияние на уменьшение максимума корреляционной функции оказывает весовая функция Кайзера на 4,4 дБ.

Происходит ухудшение разрешающей способности по времени и частоте. Наибольшее увеличение разрешающей способности по времени оказывают весовые функции Блекмана и Наттолла (разрешение увеличилось до 10 мкс против 6 мкс у ЛЧМ-сигнала), не изменилось разрешение по времени при использовании весовой функции Кайзера. Наиболее существенное влияние на разрешение по частоте оказывает весовая функция Наттолла (разрешение увеличилось до 1800 Гц против 840 Гц у ЛЧМ-сигнала). Наименьшее влияние оказывает весовая

функция Кайзера, разрешение увеличилось только до 1080 Гц.

Сигнал с V-образным законом изменения частоты

Закон V-образной частотной модуляцией состоит из двух участков: один с отрицательным наклоном модулирующей частоты, другой – с положительным, т.е.

$$\Phi(t) = \begin{cases} \omega_0 t - \pi W(t + 2t^2), & \frac{T}{2} \leq t \leq 0, \\ \omega_0 t - \pi W(t - 2t^2), & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

Тело неопределенности сигнала длительностью 1 мс, девиацией частоты 1 МГц и частота дискретизации сигнала в два раза больше, чем девиация частоты приведено на рис. 4.

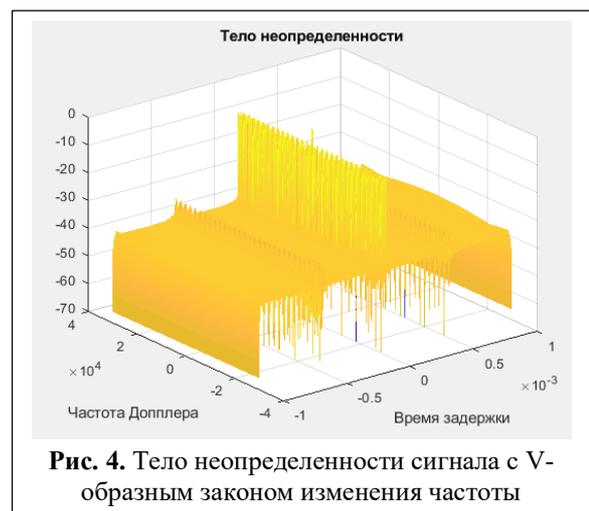


Рис. 4. Тело неопределенности сигнала с V-образным законом изменения частоты

Таблица 5. Характеристики корреляционной функции сигнала с V-образным законом изменения частоты

База	50	100	200	500	600	800	1000
Разрешение по времени, мкс	12	6	3	1,2	1	0,75	0,6
Разрешение по частоте, Гц	840	840	840	840	840	840	840
Максимальный УБЛ по частоте Доплера, дБ	-13,28	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27
Максимальный УБЛ по времени задержки, дБ	-18,98	-21,97	-24,95	-29	-29,8	-31,06	-32
Интегральный уровень УБЛ, дБ	-6,63	-6,64	-6,76	-6,83	-6,82	-6,85	-6,85

В таблицу 5 сведены рассчитанные значения характеристик корреляционной функции

при использовании сигнала с V-образным законом изменения частоты при различных

значениях базы сигнала. Из таблицы 5 видно, что, как и в случае ЛЧМ сигнала, изменение базы не влияет на разрешение по частоте Доплера и величину максимального УБЛ по частоте Доплера и практически не влияет на интегральный УБЛ. Наиболее существенно изменяется разрешение по времени, оно уменьшается с 12 мкс при базе 50 до 0,6 мкс при базе 1000, и максимальный УБЛ по времени задержки уменьшается с -18,98 дБ до -32 дБ. Причем разрешение по времени лучше, чем у ЛЧМ-сигнала с такими же характеристиками (12 мкс при базе 50 против 20 мкс у ЛЧМ-сигнала и 0,6 мкс против 1 мкс при базе в 1000).

Таблица 6. Характеристики корреляционной функции сигнала с V-образным законом изменения частоты при изменении частоты дискретизации

База	$2W$	$3W$	$4W$	$5W$	$8W$	$10W$
Разрешение по времени, мкс	10	6,7	5	8	5	6
Разрешение по частоте, Гц	840	840	840	840	840	840
Максимальный УБЛ по частоте Доплера, дБ	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27
Максимальный УБЛ по времени задержки, дБ	-21,97	-19,39	-13,56	-14,46	-13,55	-13,46
Интегральный уровень УБЛ, дБ	-6,64	-6,6	-6,16	-6,14	-6,15	-6,15

Из таблицы 6 видно, что при увеличении частоты дискретизации сигнала с V-образным законом изменения частоты увеличивается только максимальный УБЛ по времени задержки с -21,97 до -13,46 (примерно также, как и у ЛЧМ-сигнала). Остальные параметры практически не изменяются.

Очевидно, что у ортогонального рассматриваемому сигналу с V-образным законом изменения частоты является сигнал, полная фаза которого определяется выражением

$$\Phi(t) = \begin{cases} \omega_0 t + \pi W(t - 2t^2), & \frac{T}{2} \leq t \leq 0, \\ \omega_0 t + \pi W(t + 2t^2), & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 5 приведена результирующая функция неопределенности двух ортогональных сигналов длительностью 1 мс, базой 1000 и частотой дискретизации 2МГц. Из рис. 5 видно, что функция неопределенности имеет несколько максимальных значений около -11 дБ. Из сравнения рис. 3 и рис. 5

Из сравнения таблиц 1 и 5 видно, что разрешающая способность по времени сигнала с V-образным законом изменения частоты в два раза лучше, чем при использовании ЛЧМ-сигнала, при этом максимальный уровень УБЛ по времени на 7 дБ выше, чем у ЛЧМ сигнала и выше на 13 дБ интегральный уровень УБЛ.

Рассмотрим влияние частоты дискретизации на характеристики корреляционной функции сигнала с V-образным законом изменения частоты. В таблице 6 приведены результаты расчетов изменения корреляционных характеристик при изменении частоты дискретизации.

видно, что взаимная корреляция у сигналов с V-образным законом изменения частоты выше, чем ЛЧМ-сигналов с теми же параметрами.

В таблице 7 приведены значения максимума взаимной корреляции двух ортогональных сигналов в зависимости от базы сигнала и частоты дискретизации. Из таблицы 7 видно, что увеличение базы сигнала приводит к уменьшению уровня взаимной корреляции между ортогональными сигналами, уровень взаимной корреляции снизился с -7,12 дБ при базе 50 до -11,2 дБ при базе в 1000. Увеличение частоты дискретизации практически не влияет на уровень взаимной корреляции, он сохраняется на уровне -9,1 дБ.

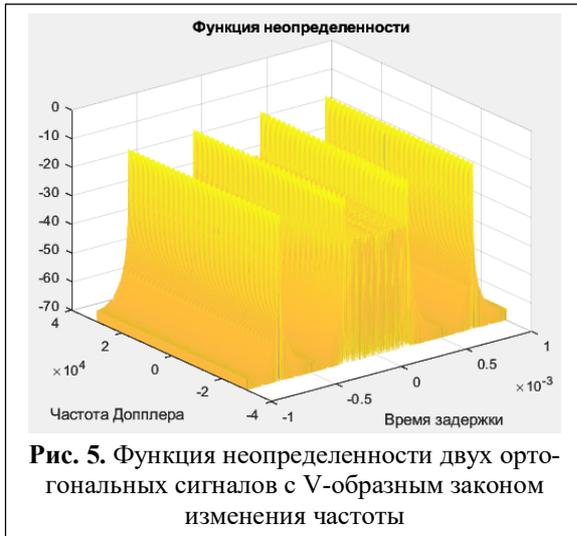


Рис. 5. Функция неопределенности двух ортогональных сигналов с V-образным законом изменения частоты

Была проведена оценка влияния весовых функций на корреляционные характеристики сигналов с V-образным законом изменения

Таблица 7. Характеристики взаимной корреляции двух ортогональных ЛЧМ сигналов

База	50	100	200	500	600	800	1000
Максимум ВКФ, дБ	-7,12	-9,05	-10,2	-10,87	-10,97	-11,1	-11,2
F_d	$2W$	$3W$	$4W$	$5W$	$6W$	$8W$	$10W$
Максимум ВКФ, дБ	-9,05	-9,14	-9,1	-9,08	-9,09	-9,07	-9,05

Таким образом, использование весовых функций на улучшения корреляционных характеристик сигналов с V-образным законом изменения частоты не эффективно.

Сигнал с гиперболическим законом изменения частоты

При данном методе модуляции частота внутри импульса имеет вид гиперболической функции, а закон частотной модуляции является несимметричным относительно середины импульса. Закон изменения частоты сигнала будет иметь вид:

$$\omega_g(t) = -\frac{2\pi W}{2} + 2\pi W \cdot k \cdot \frac{1}{at + b}, \quad (6)$$

где k – нормировочный коэффициент

Неизвестные коэффициенты k , a и b можно найти, используя граничные условия при $t = -T/2$ и $t = +T/2$. Однако число уравнений меньше числа неизвестных, поэтому зададимся свободным коэффициентом b и приравняем его к единице. Тогда после решения линейного уравнения получим: $a =$

частоты. На рис. 6 приведена функция неопределенности сигнала с V-образным законом изменения частоты при использовании треугольной весовой функции. Из сравнения рис. 4 рис. 6 видно, что при использовании весовой функции дальние боковые лепестки становятся существенно меньше и, как и в случае ЛЧМ-сигнала, максимальное значение функции неопределенности уменьшается. Однако, как показали результаты моделирования, существенного уменьшения амплитуды ближайших боковых лепестков при использовании различных весовых функций не происходит.

$-1/T$, $k = 0,75$ для нарастающей со временем частоты; $a = +1/T$, $k = 0,75$ для убывающей со временем частоты.

Для полной фазы колебаний путем интегрирования частоты получаем

$$\Phi(t) = (\omega_0 - \pi \cdot W) \cdot t + 2\pi W \cdot \frac{k}{a} \cdot \ln |at + b|. \quad (7)$$

Тело неопределенности исследуемого сигнала показано на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что тело неопределенности сигнала с гиперболическим законом изменения частоты, как и в случае сигнала с V-образным законом имеет ярко выраженный достаточно узкий главный лепесток. Боковые лепестки тела неопределенности образуют справа и слева от главного лепестка плато уровня около -40 дБ.

В таблице 8 сведены рассчитанные значения характеристик корреляционной функции при использовании сигнала с гиперболическим законом изменения частоты при изменении базы сигнала с 50 до 1000.

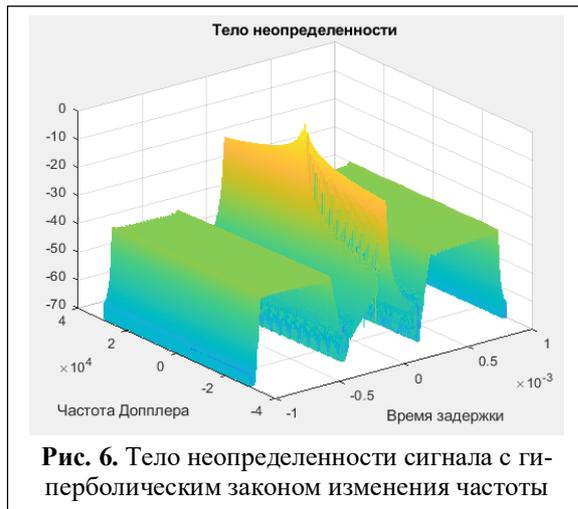


Рис. 6. Тело неопределенности сигнала с гиперболическим законом изменения частоты

Из сравнения данных таблицы 1 и таблицы 8 видно, что изменение корреляционных характеристик у ЛЧМ сигнала и сигнала с гиперболическим законом изменения частоты происходит практически одинаково: точно также изменяется разрешающая способность по времени, несколько медленнее

Таблица 8. Характеристики корреляционной функции сигнала с гиперболическим законом изменения частоты

База	50	100	200	500	600	800	1000
Разрешение по времени, мкс	20	10	5	2	1,67	1,25	1
Разрешение по частоте, Гц	840	840	840	840	840	840	840
Максимальный УБЛ по частоте Доплера, дБ	-13,28	-13,28	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27
Максимальный УБЛ по времени задержки, дБ	-24,24	-27,78	-30,59	-30,52	-30,03	-29,52	-29,25
Интегральный уровень УБЛ, дБ	-10,77	-11,13	-11,4	-11,23	-11,16	-11,14	-11,1

Таблица 9. Характеристики корреляционной функции сигнала с гиперболическим законом изменения частоты при изменении частоты дискретизации

F_d	$2W$	$3W$	$4W$	$5W$	$8W$	$10W$
Разрешение по времени, мкс	10	6,67	5	8	5	6
Разрешение по частоте, Гц	840	840	840	840	840	840
Максимальный УБЛ по частоте Доплера, дБ	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27	-13,27
Максимальный УБЛ по времени задержки, дБ	-27,78	-23,7	-22,53	-17,31	-15,74	-14,06
Интегральный уровень УБЛ, дБ	-11,13	-15,94	-15,58	-12,23	-11,38	-10,32

уменьшается максимальный УБЛ по времени задержки с -24,24 дБ до -29,25 дБ и интегральный УБЛ у сигнала с гиперболическим законом изменения частоты на несколько децибел больше, чем у ЛЧМ сигнала.

Рассмотрим влияние частоты дискретизации на характеристики корреляционной функции сигнала с гиперболическим законом изменения частоты. В таблице 9 приведены полученные результаты.

Из таблицы 9 видно, что при увеличении частоты дискретизации корреляционные характеристики сигнала с гиперболическим законом изменения частоты ведут себя примерно также, как и у ЛЧМ-сигнала.

Были сформированы пара ортогональных сигналов, у которых параметры b и k были одинаковые, а параметр a у одного положительный, у другого отрицательный.

На рисунке 7 приведена результирующая функция неопределенности двух ортогональных сигналов длительностью 1 мс, базой 1000 и частотой дискретизации 2МГц. Из рисунка 1.31 видно, что максимальные значения функции неопределенности не превышают значения -27,17 дБ, что существенно меньше, чем у сигналов с V-образным законом изменения частоты и несколько выше, чем ЛЧМ-сигналов с теми же параметрами.

В таблице 10 приведены значения максимума взаимной корреляции двух ортогональных сигналов в зависимости от базы сигнала и частоты дискретизации.

Из таблицы 10 видно, что только увеличение базы сигнала приводит к уменьшению уровня взаимной корреляции между ортогональными сигналами с -14,6 дБ при базе 50 до -27,2 дБ при базе в 1000. Увеличение частоты дискретизации практически не влияет на максимальное значение взаимной корреляции между сигналами и сохраняется на уровне около -17,7 дБ.

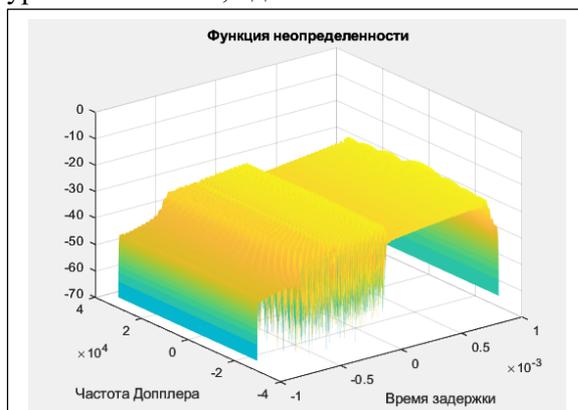


Рис. 7. Функция неопределенности двух ортогональных сигналов с гиперболическим законом изменения частоты

Были проведены исследования влияния весовой функции на корреляционные характеристики сигнала с гиперболическим законом изменения частоты. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

Поступила 15 августа 2025 г.

Broadband signals are widely used in radio engineering systems for information transmission, radar and radio navigation measurements. Frequency-modulated signals are one group of such signals. Based on the obtained two-dimensional uncertainty functions, the correlation characteristics of three types of broadband signals are calculated: the LFM signal, the V-shaped signal, and the hyperbolic frequency laws. The

взвешивание сигнала гиперболической функцией трансформирует тело неопределенности практически так же, как и тело неопределенности ЛЧМ сигнала, при этом уменьшение боковых лепестков и уменьшение максимума функции неопределенности происходит практически так же, как и у ЛЧМ сигнала. Т.е. для уменьшения боковых лепестков при сжатии сигнала с гиперболическим законом изменения частоты можно использовать весовые функции с тем же эффектом, что и при обработке ЛЧМ-сигнала.

Заключение

В работе получены корреляционные характеристики трех видов широкополосных сигналов: ЛЧМ сигнала, сигнала с V-образным и гиперболическим законами изменения частоты. Проведено исследование влияния базы сигнала и частоты дискретизации на корреляционные характеристики сигналов. Прослежено влияние частоты дискретизации и базы сигнала на максимальный уровень взаимной корреляции пары ортогональных широкополосных сигналов. При помощи шести весовых функций проведено исследование изменения корреляционных характеристик широкополосных сигналов.

Литература

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 2000. – 462 с.
3. Марпл-младший С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / М.: Мир, 1990 г. – 265 с.
4. Гадзиковский В.И. Цифровая обработка сигналов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2013. – 766 с.

influence of the signal base and sampling frequency on the correlation characteristics of the signals has been studied. The influence of the sampling frequency and the signal base on the maximum level of mutual correlation of a pair of orthogonal broadband signals is traced. Using six weight functions, a study of changes in the correlation characteristics of broadband signals was conducted. The simulation was carried out using Matlab software.

Keywords: broadband signals, frequency-modulated signals, uncertainty function.

Жиганов Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: s_zh_72@mail.ru.

Жиганова Елена Александровна – кандидат технических наук, доцент Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Мартынов Иван Евгеньевич – магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.