

---

---

# Методы и устройства повышения качества передачи информации

---

---

УДК 621.396

## Исследование спектров ФКМ сигналов при цифровом синтезе

Грошков И.Д., Федосеева Е.В.

В статье проводится анализ искажений спектра при формировании сигналов с фазокодовой манипуляцией методом цифровой квадратурной модуляции. Приводится структурная схема формирователя, и графики спектров сигналов в различных сечениях схемы. Выявлены характерные искажения, вносимые в спектр сигнала. Определены рекомендуемые параметры формирователя для минимизации искажений.

**Ключевые слова:** фазокодовая манипуляция (ФКМ), цифровой квадратурный модулятор, искажения сигналов, цифровой синтез.

### Введение

Во многих современных радиотехнических системах применяются сложные сигналы. Сложные сигналы, характеризуются тем, что произведение их длительности на ширину спектра (база сигнала) значительно больше единицы.

Использование сложных сигналов по сравнению с простыми имеет ряд преимуществ. В частности, в радиолокации использование сложных сигналов позволяет достигнуть высокого энергетического потенциала РЛС, при ограниченной мощности излучения и обеспечить повышенную помехозащищенность [1, 2].

Среди большого многообразия сложных сигналов в устройствах формирования и сжатия широко применяются фазокодо манипулированные (ФКМ) сигналы. Использование ФКМ сигналов позволяет получить автокорреляционную функцию с низким уровнем боковых лепестков относительно главного пика и, в ряде случаев, упростить схему формирования [3 - 5].

Развитие цифровой техники предоставляет широкие возможности для генерации сигнала с ФКМ, что целесообразно использовать при разработке радиотехнических средств [5, 6].

В данной работе исследованы особенности формирования ФКМ сигналов при использовании принципа цифровой квадратурной модуляции.

### Построение модели

#### и анализ искажений сигнала

Структурная схема цифрового квадратурного модулятора приведена на рис. 1.

Несущий и модулирующий сигналы представлены в виде цифровых квадратурных отсчетов с знаком и имеют число разрядов  $k$ .

Отсчеты несущего сигнала хранятся в ПЗУ 1 и содержат синфазное  $Re\_CF(f)$  и квадратурное  $Im\_CF(f)$  значения и определяются формулой 1 и 2 соответственно.

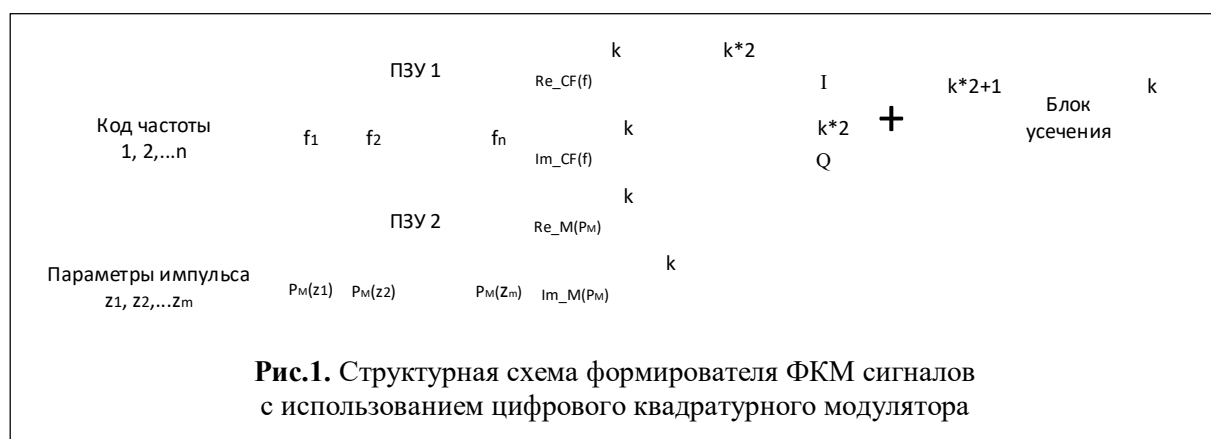
$$Re\_CF(i) = [\cos(2 \cdot \pi \cdot (1/fd) \cdot i \cdot f) \cdot 2^{k-1}], \quad (1)$$

$$Im\_CF(i) = [\sin(2 \cdot \pi \cdot (1/fd) \cdot i \cdot f) \cdot 2^{k-1}], \quad (2)$$

где  $f$  – частота несущего сигнала;  $fd$  – частота дискретизации;  $i$  – номер отсчета; [...] – целая часть числа.

Модулирующий сигнал также представлен комплексным числом с синфазной  $Re\_M(Pm)$  и квадратурной  $Im\_M(Pm)$  составляющими расположенными в ПЗУ 2. Форма модулирующего сигнала определяется параметрами модуляции  $Pm$ , такими как, время фронта и спада импульса, длительность смены фазы внутри импульса, количество переключений фазы и т.д.

Отсчеты сигнала  $S(i)$  на выходе модулятора получают путем комплексного умножения несущего с модулирующего сигналов в соответствии с формулой 3 [7].



**Рис.1.** Структурная схема формирователя ФКМ сигналов с использованием цифрового квадратурного модулятора

$$S(i) = (\text{Re\_CF}(i) \times \text{Re\_M}(i)) + (\text{Im\_CF}(i) \times \text{Im\_M}(i)). \quad (3)$$

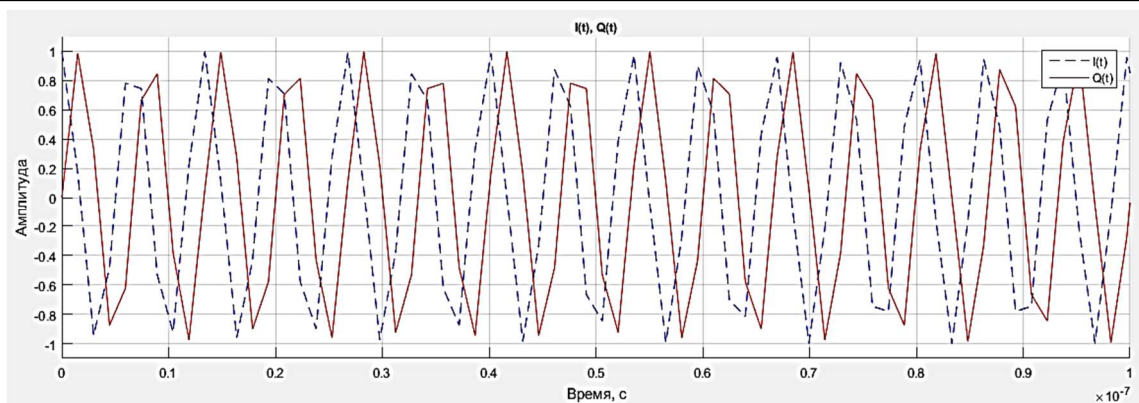
После выполнения комплексного умножения и суммирования синфазной и квадратурной составляющих разрядность полученного отсчета увеличивается до  $2 \cdot k + 1$ . Для того чтобы получить на выходе модулятора отсчеты с разрядностью  $k$  сигнал должен быть усечен в соответствии с формулой 4, что приводит к искажениям при формировании.

$$S'(i) = [S(i) \times (2^k) / (2^{(2 \cdot k + 1)})] \quad (4)$$

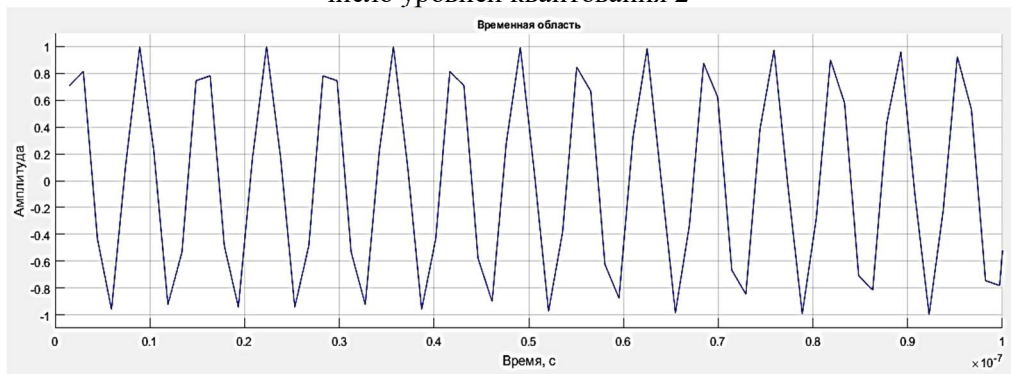
С целью оценки влияния искажений, вызванных цифровым представлением сигнала с конечной разрядностью  $k$ , была построена модель формирователя ФКМ-сигналов.

Для проведения моделирования была составлена программа с использованием языка программирования С. Графическое отображение рассчитанных моделей сигналов осуществляется посредством среды Matlab.

На рис. 2 – 13 приведен ряд формируемых устройством сигналов, при частоте



**Рис.2.** Сигнал, на выходе умножителей (нормированный к единице), число уровней квантования  $2^{2 \cdot k}$



**Рис.3.** Сигнал, на выходе сумматора (нормированный к единице), число уровней квантования  $2^{2 \cdot k + 1}$

дискретизации  $f_d = 670$  МГц и различном

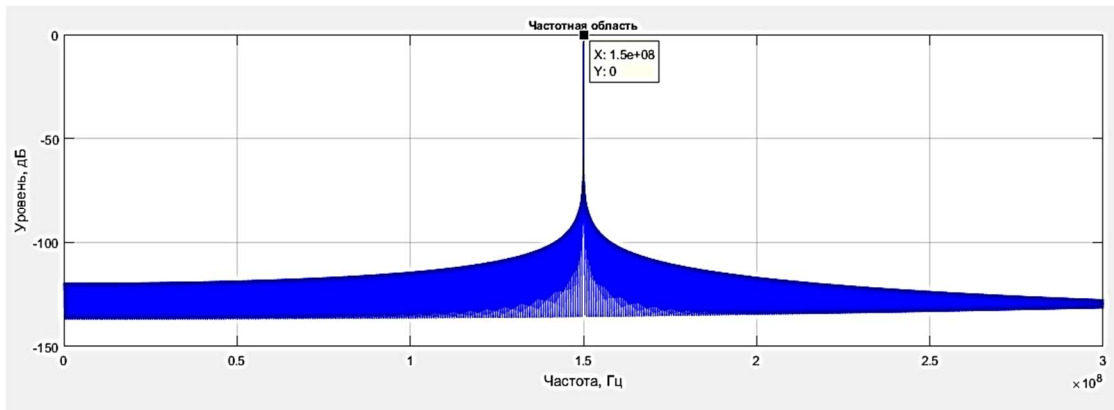


Рис.4. Спектр не квантованного по уровню сигнала, на выходе устройства

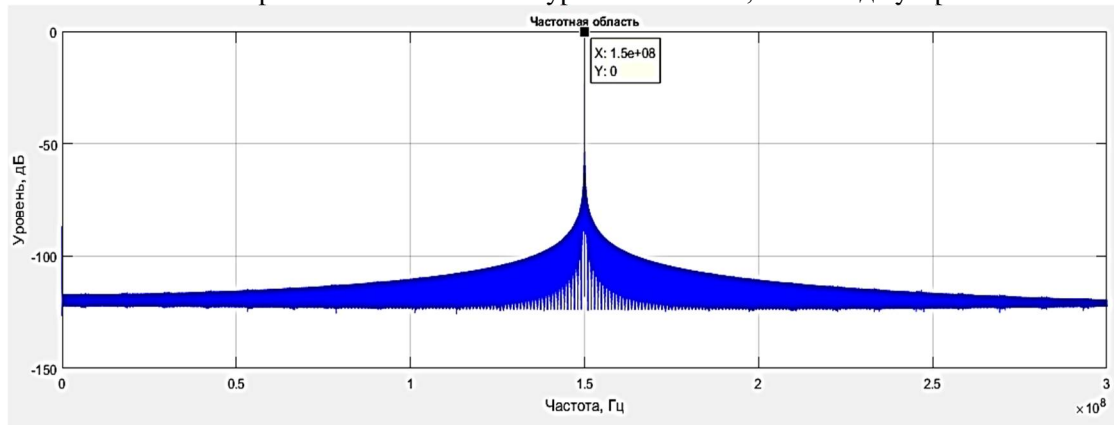


Рис.5. Спектр сигнала, на выходе устройства, при:  $k = 16$

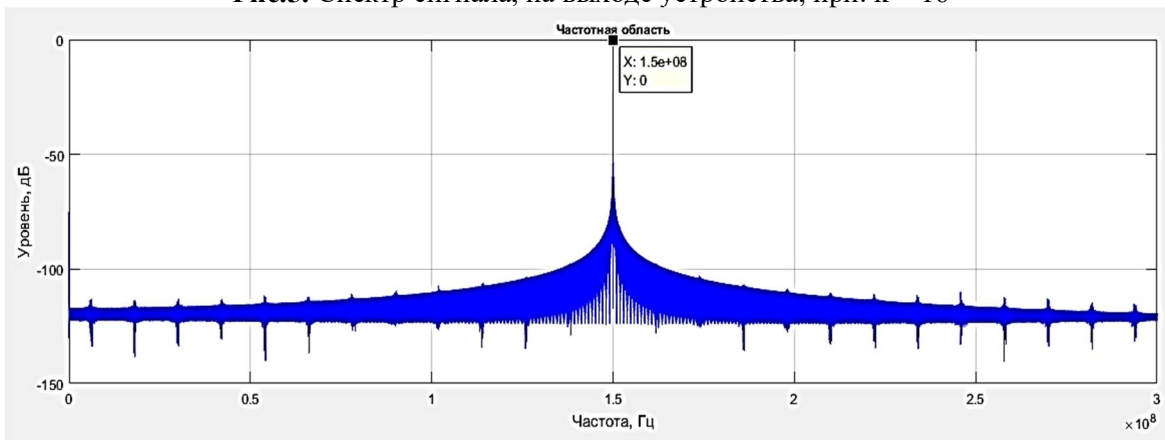


Рис.6. Спектр сигнала, на выходе устройства, при:  $k = 14$

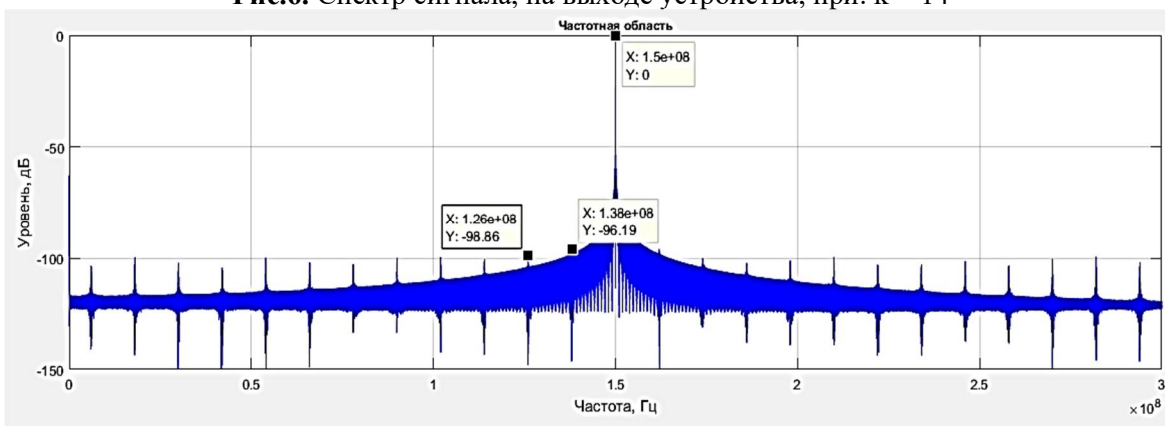
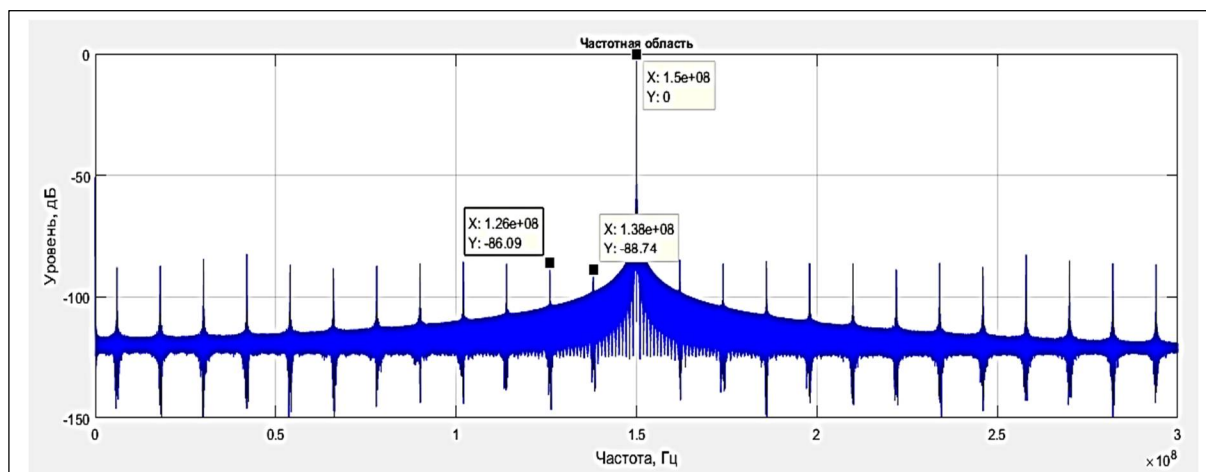
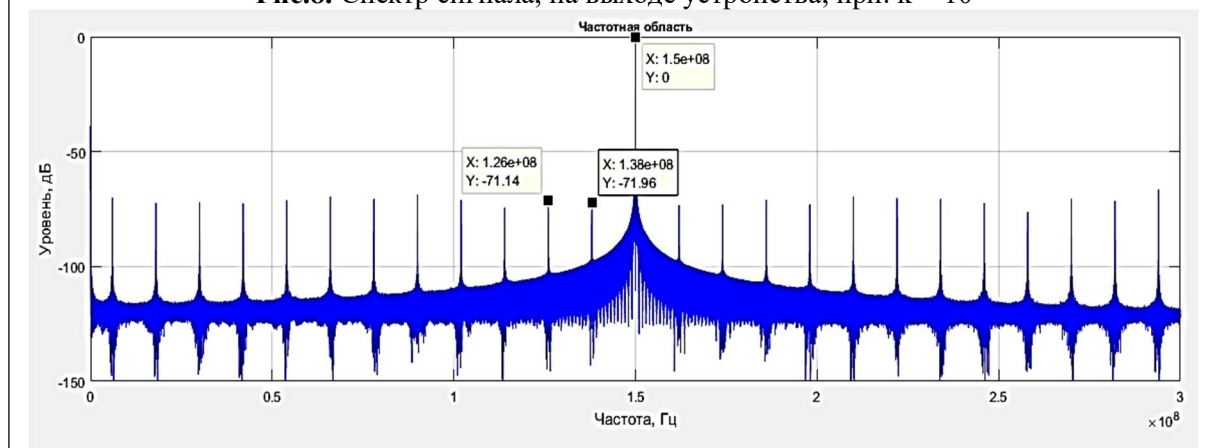


Рис.7. Спектр сигнала, на выходе устройства, при:  $k = 12$

числе уровней квантования  $k$ .

Рис.8. Спектр сигнала, на выходе устройства, при:  $k = 10$ Рис.9. Спектр сигнала, на выходе устройства, при:  $k = 8$ 

Проанализировав приведенный на рис. 4 – 9 выходной сигнал можно заключить, что уменьшение числа разрядов приводит к появлению в спектре паразитных составляющих.

Модулирующий импульс без переключений фазы при отсутствии квантования по уровню (б) и при значении разрядности  $k = 8$  (в) приведен на рис. 10.

Как видно из графиков спектральных характеристик, представленных на рис. 10, снижение разрядности модулирующего сигнала без наличия внутриимпульсной ФКМ так же приводит к искажениям в спектре при отстройках выше 50 МГц.

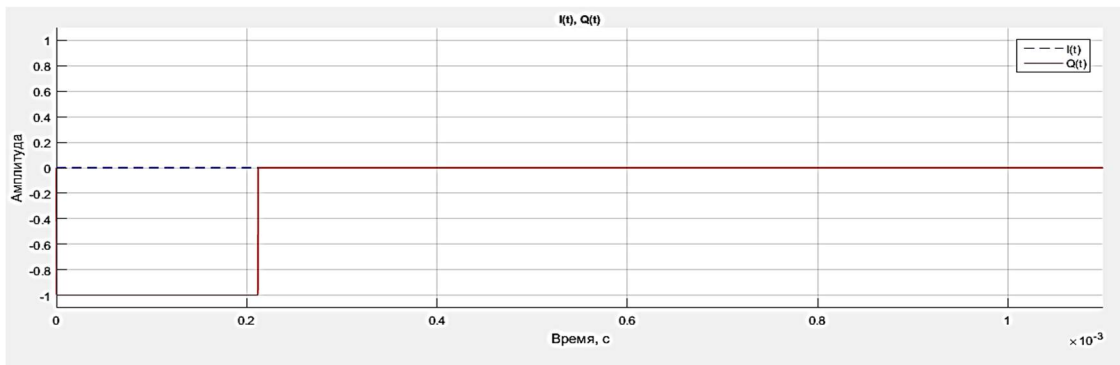
Во временной области модулирующие сигналы с различным числом уровней квантования  $k$  отличается не значительно (рис. 11). Поэтому форма модулирующего сигнала во временной области на рис. 10, 12, 13 представлена для одного значения  $k=8$ .

При формировании модулирующего сигнала (рис. 12, 13) в спектре сигнала

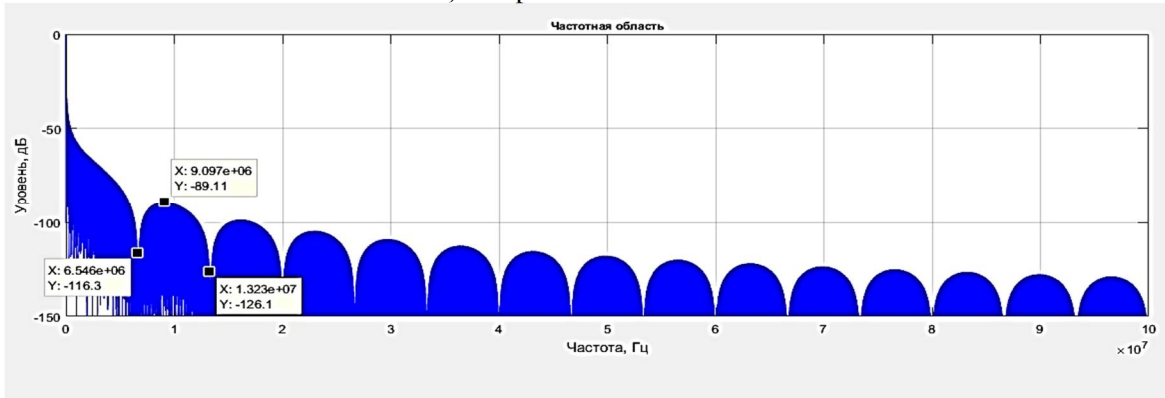
появляются дискретные составляющие, частота которых определяется максимальной частоте переключений фазы внутри импульса. Искажения, связанные с уменьшением уровня квантования значительно искажают спектр модулирующего сигнала, при отстройках выше 40 МГц.

При сравнении спектров модулирующих сигналов на рис. 14 видно, что спектр сигнала с переходом фазы по закону синус более сконцентрирован в области основного лепестка. Но при этом снижение количества уровней квантования приводит к более значительным искажениям в спектре сигнала по сравнению с линейным законом перехода фазы.

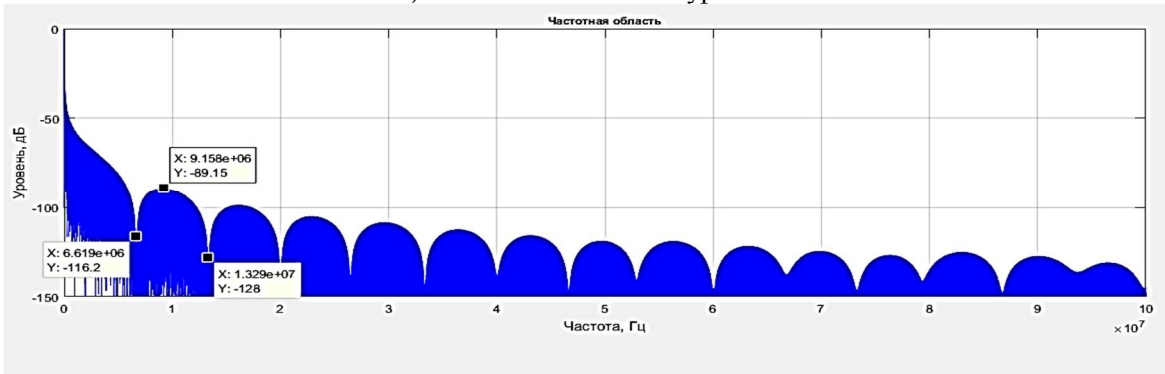
Сигнал на выходе сумматора устройства формирования отсчетов радиоимпульса с ФКМ при  $k = 16$  и  $k = 8$  приведены на рис. 15 и 16 соответственно.



а) во временной области



б) не квантованный по уровню



в) число уровней квантования  $2^8$

Рис.10. Модулирующий сигнал. Импульс без ФКМ

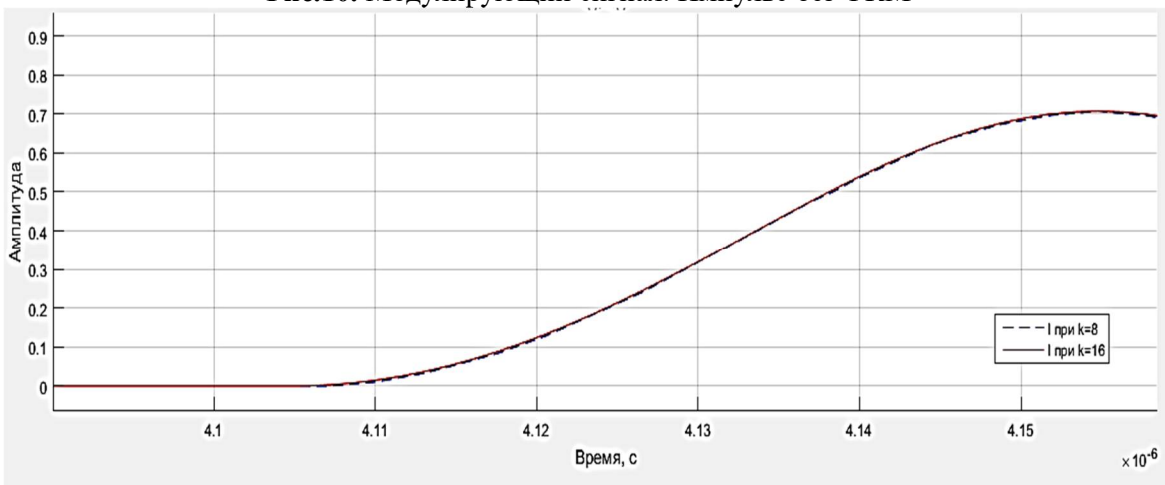
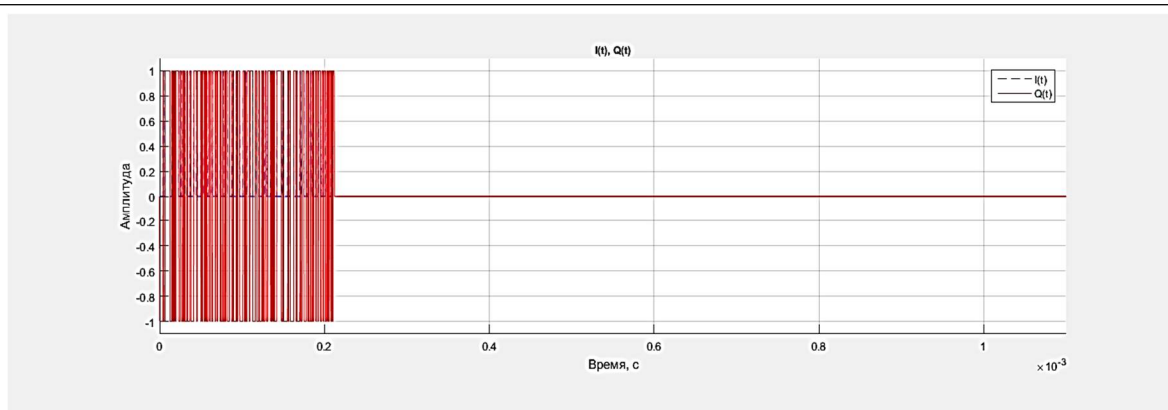
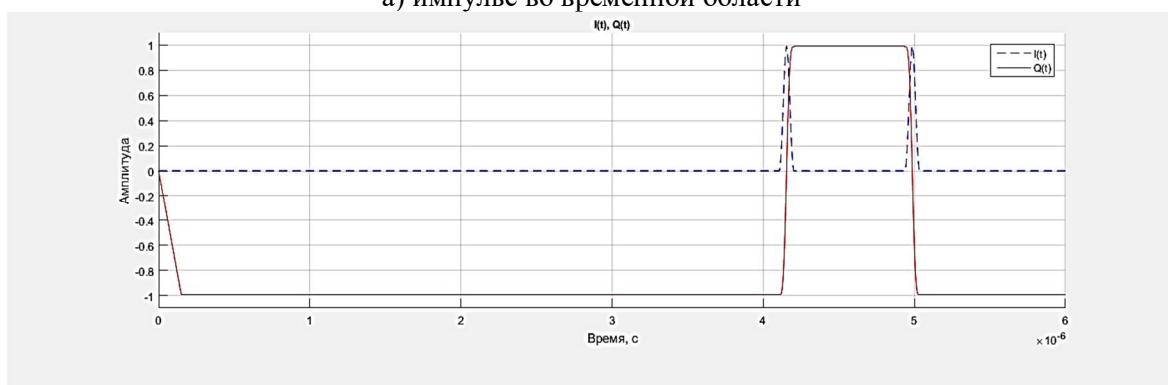


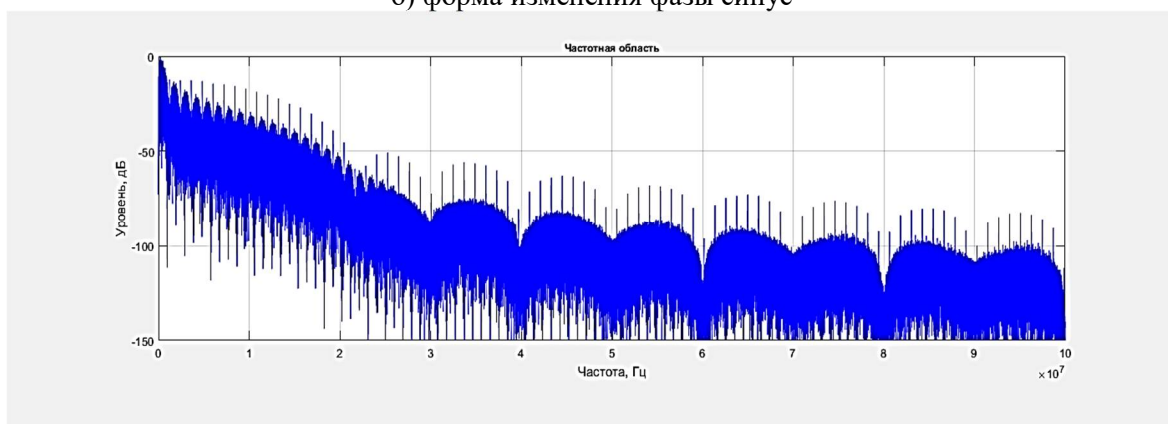
Рис.11. Модулирующий сигнал, момент переключения фазы



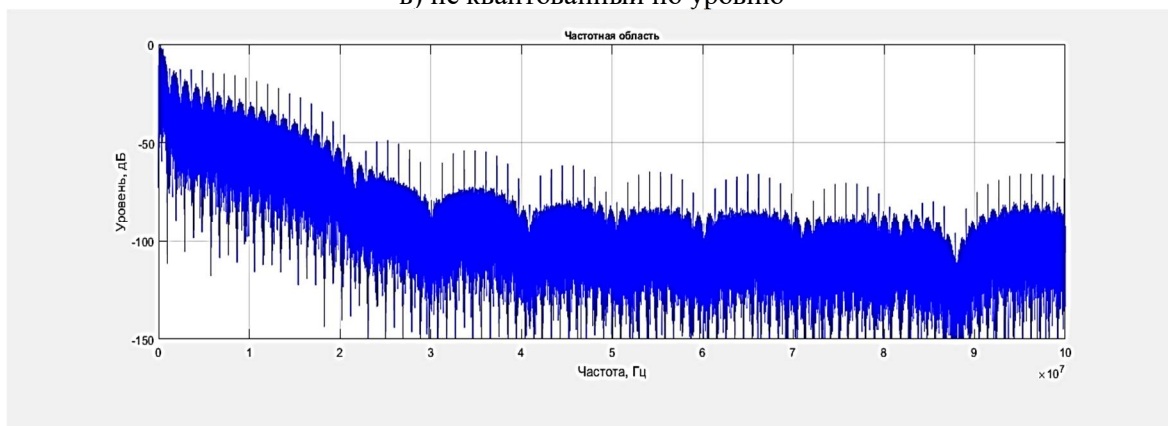
а) импульс во временной области



б) форма изменения фазы синус

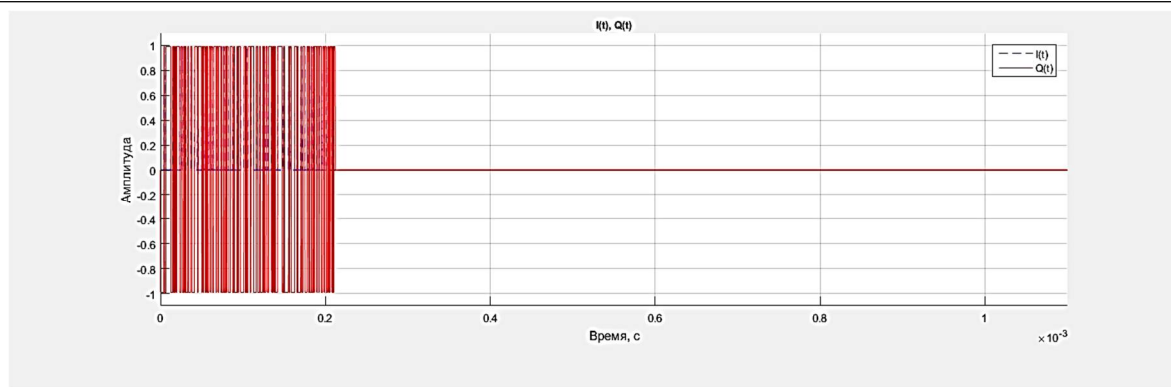


в) не квантованный по уровню

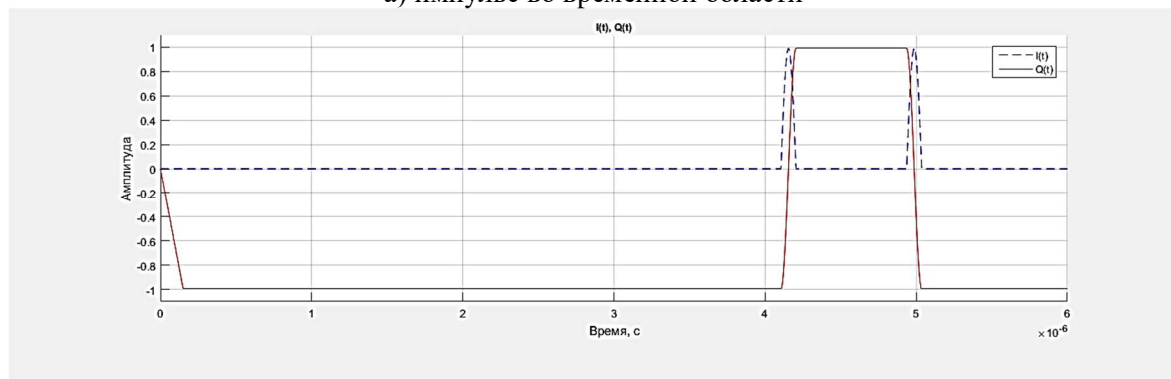


г) число уровней квантования  $2^8$

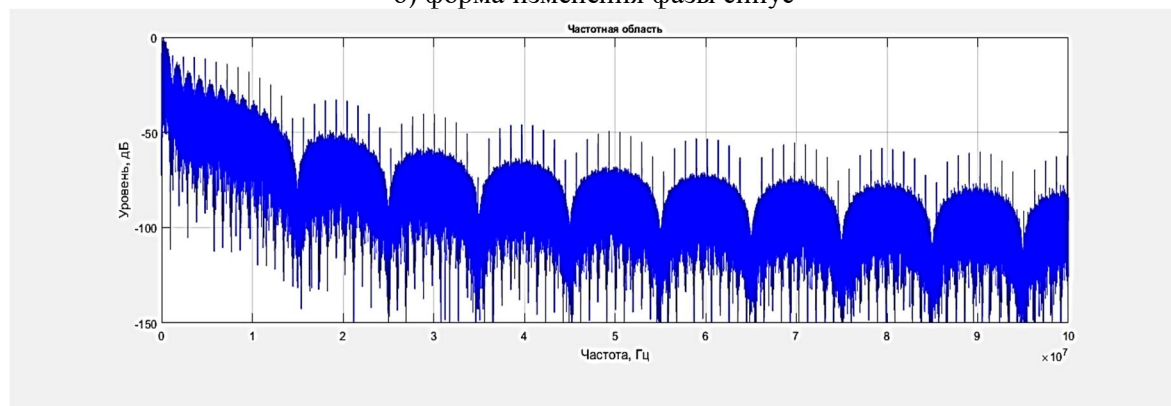
Рис.12. Модулирующий сигнал с внутриимпульсной ФКМ, форма фазового перехода синус



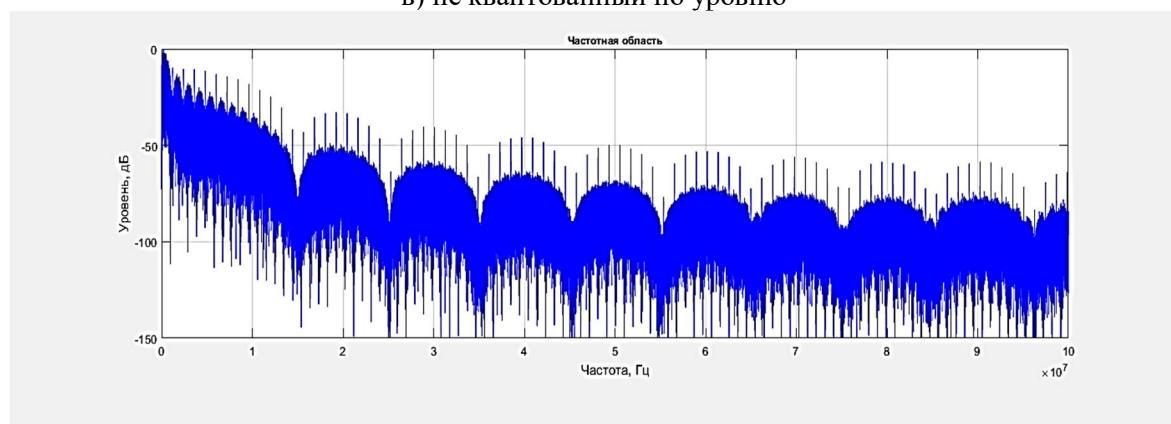
а) импульс во временной области



б) форма изменения фазы синус



в) не квантованный по уровню

г) число уровней квантования  $2^8$ **Рис.13.** Модулирующий сигнал с внутриимпульсной ФКМ, форма фазового перехода линейная



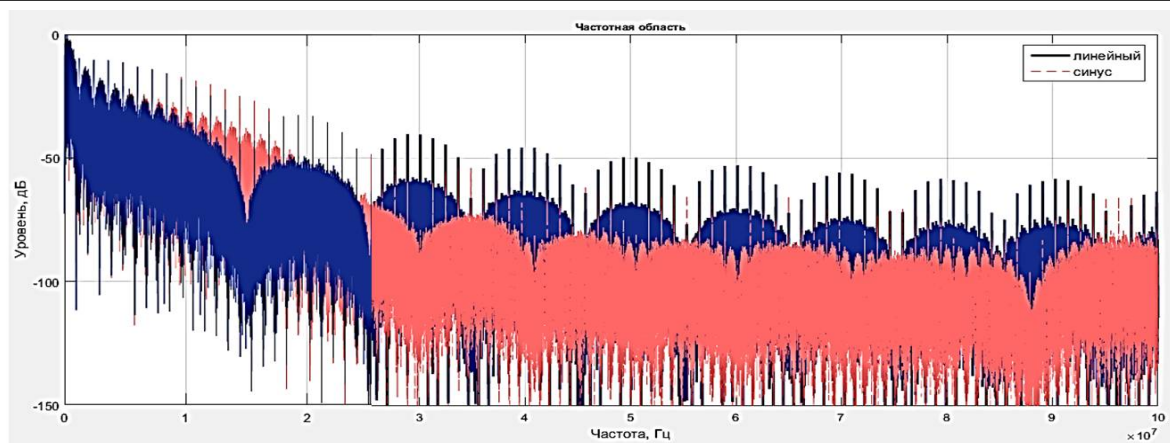


Рис.14. Спектры модулирующих сигнал с внутриимпульсной ФКМ при  $k=8$

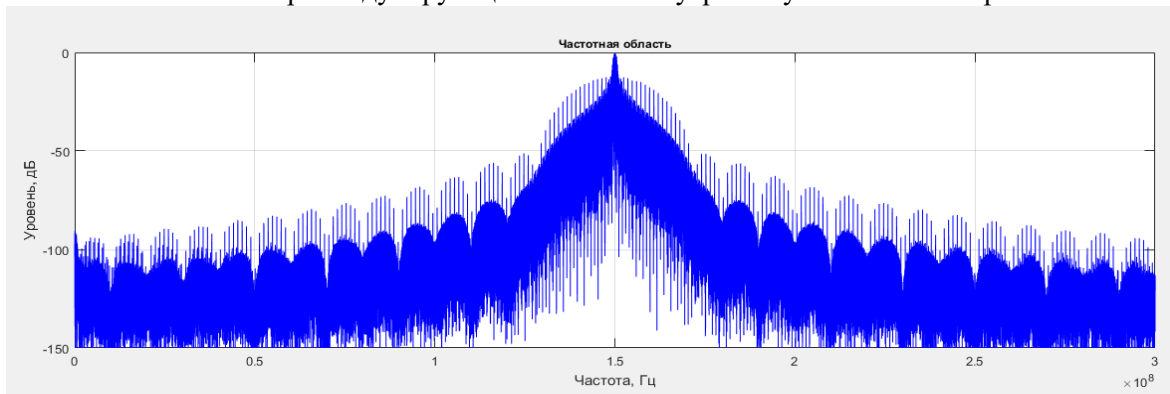


Рис. 15. Спектр сигнала на выходе сумматора цифрового квадратурного модулятора при  $k=16$

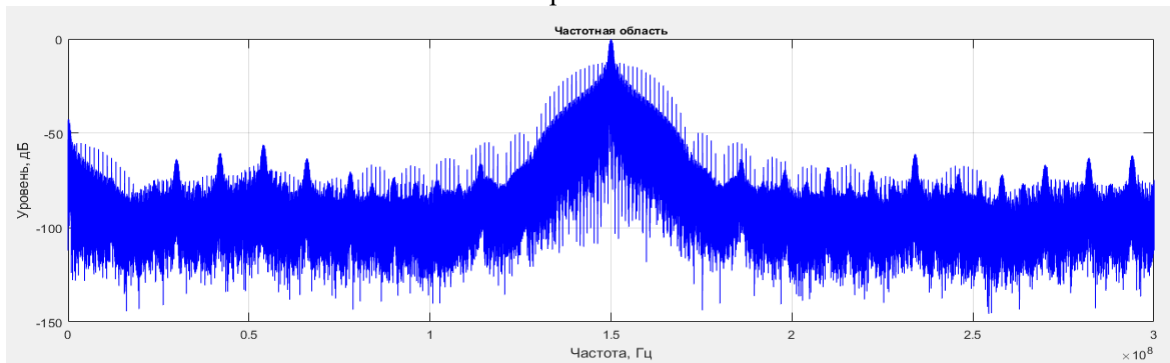


Рис. 16. Спектр сигнала на выходе сумматора цифрового квадратурного модулятора при  $k=8$

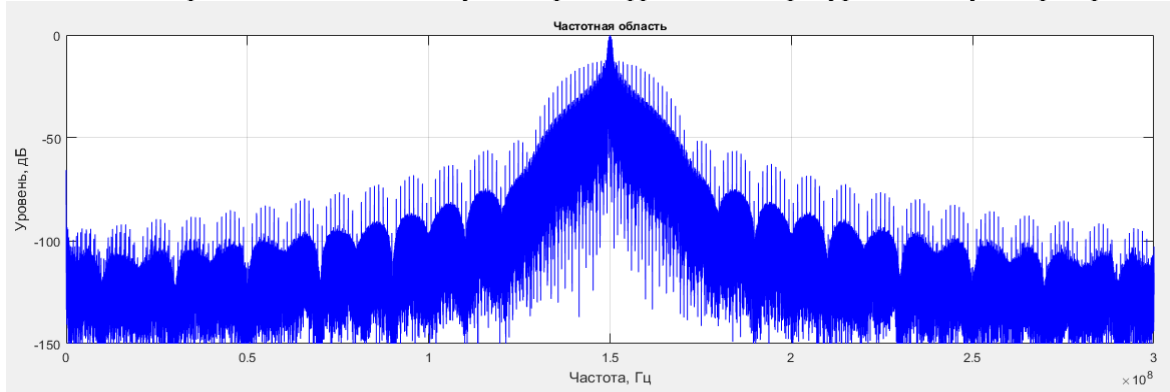
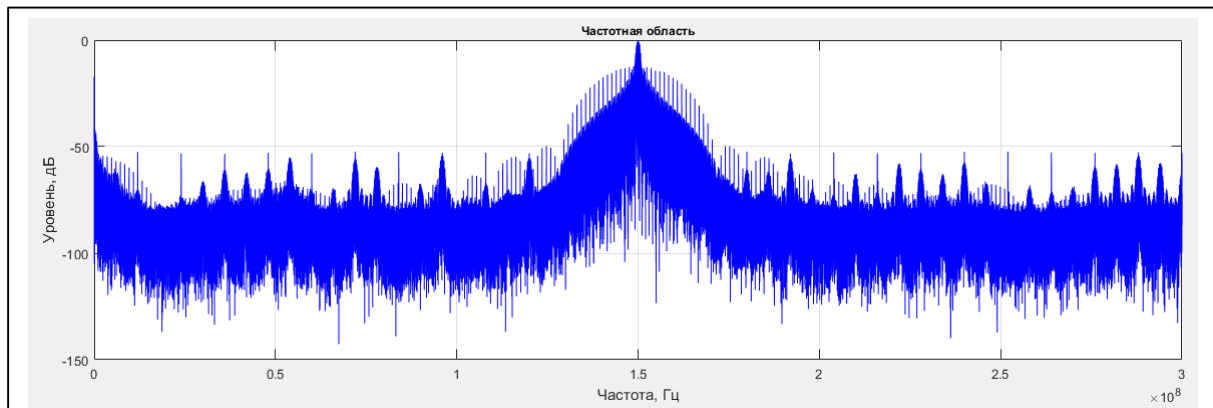


Рис.17. Спектр сигнала на выходе цифрового квадратурного модулятора при  $k=16$ , после блока усечения



**Рис.18.** Спектр сигнала на выходе цифрового квадратурного модулятора при  $k=8$ , после блока усечения

На последнем этапе проводится нормировка сигнала с выхода сумматора к разрядности ЦАП, которая принимается равной  $k$ . Выходной сигнал устройства формирования отсчетов радиоимпульса с ФКМ после нормировки (после блока усечения) при  $k = 16$  и  $k = 8$  приведены на рис. 17 и 18 соответственно.

### Заключение

В результате анализа полученных характеристик можно сделать вывод, что для формирования цифровым квадратурным модулятором ФКМ радиоимпульса требуется сетка представления чисел не менее 12 разрядов. При дальнейшем снижении разрядности в спектр сигнала вносятся значительные искажения.

Спектр сигнала с переходом фазы по закону синус более подвержен искажениям при снижении параметра  $k$ , по сравнению с линейным законом перехода фазы.

В дальнейшей работе планируется создание программного комплекса который позволит провести более детальное моделирование при построении схем формирователей на основе принципа цифрового квадратурного синтеза.

**Поступила 10 сентября 2018 г.**

This paper presents the distortion analysis of signals with phase-code manipulation using digital quadrature synthesis. There is a block diagram of the shaper, and graphs of the spectra of signals with characteristic distortions. Defined recommended shaper parameters to minimize distortion.

**Key words:** phase-code manipulation (PCM), digital quadrature modulator, signal distortion, digital synthesis.

### Литература

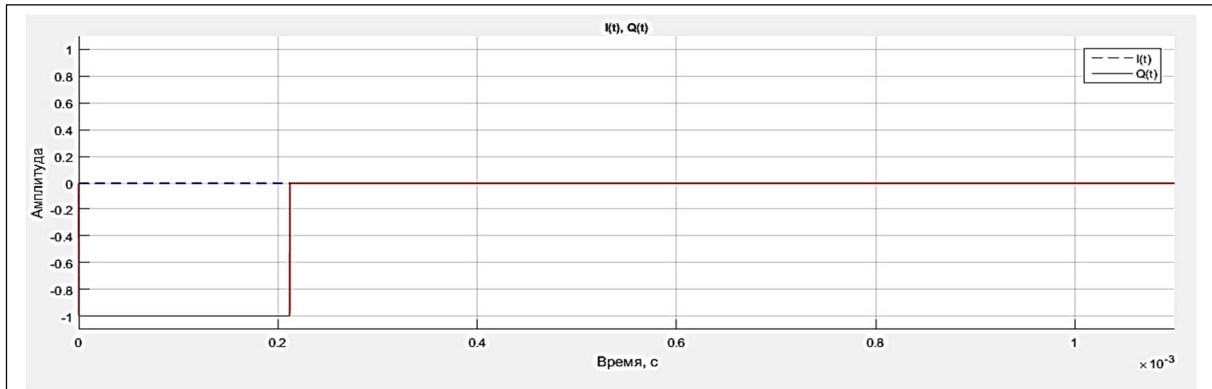
1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов – М.: Радиотехника – 2004. – 320 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1988.– 448 с.
3. Карташев В.Г. Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 109 с.
4. Кривченков Д.Н. Использование зондирующих сигналов с фазовой кодовой манипуляцией в соответствии с дополнительными последовательностями // Межвузовский сборник научных трудов: Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах. Выпуск 6, 2012, С.52-59.
5. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. – 376 с.
6. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. –М.: Радио и связь, 1985.-384 с.
7. Надольский, А. Н. Спектральный и корреляционный анализ сигналов: метод. пособие к лаб. работам по дисц. «Теоретические основы радиотехники», «Радиотехнические цепи и сигналы» для студ. спец. «Радиотехника», «Радиоинформатика», «Радиоэлектронные системы» и «Радиоэлектронная защита информации» всех форм обуч. / А. Н. Надольский. - Минск : БГУИР, 2009. – 48 с.

*Грошков Игорь Дмитриевич* – магистрант Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

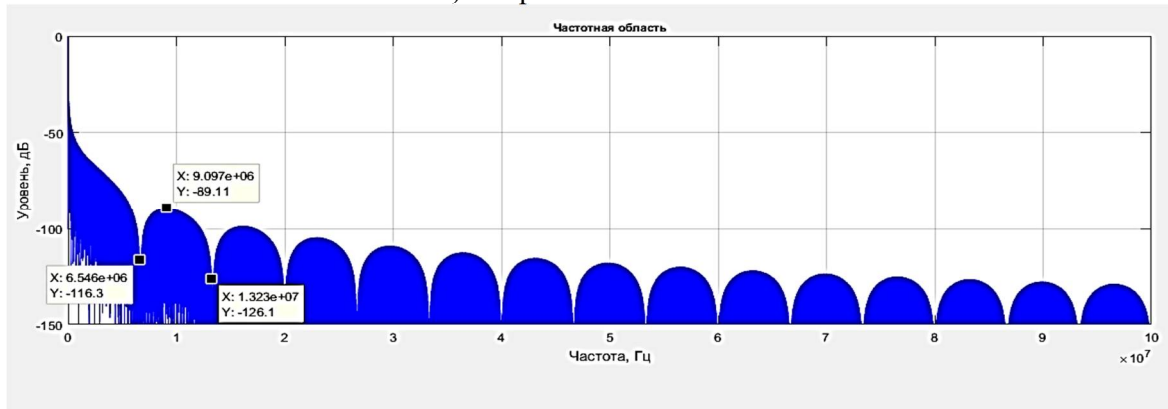
*Федосеева Елена Валерьевна* – доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

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

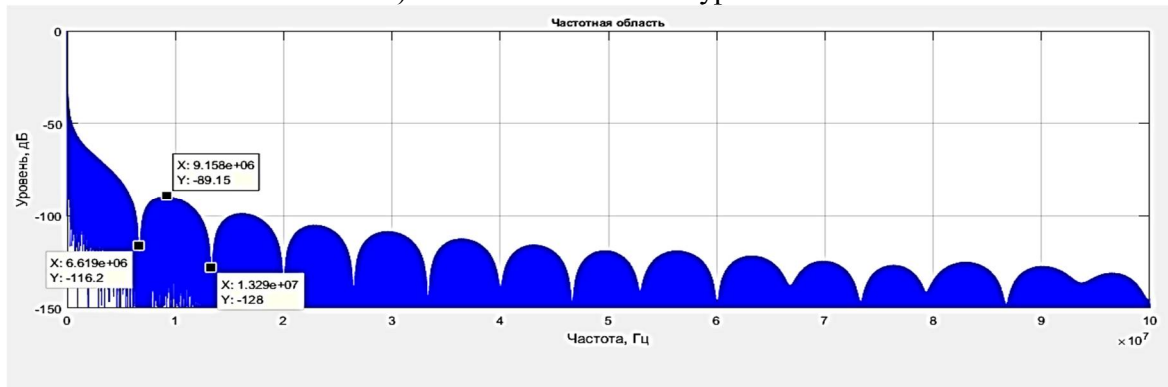




а) во временной области



б) не квантованный по уровню



в) число уровней квантования  $2^8$

Рис.10. Модулирующий сигнал. Импульс без ФКМ

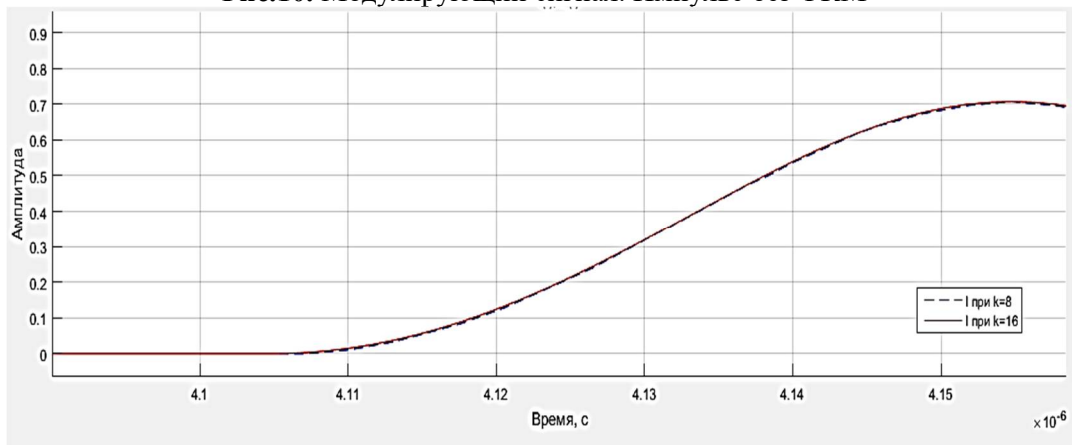
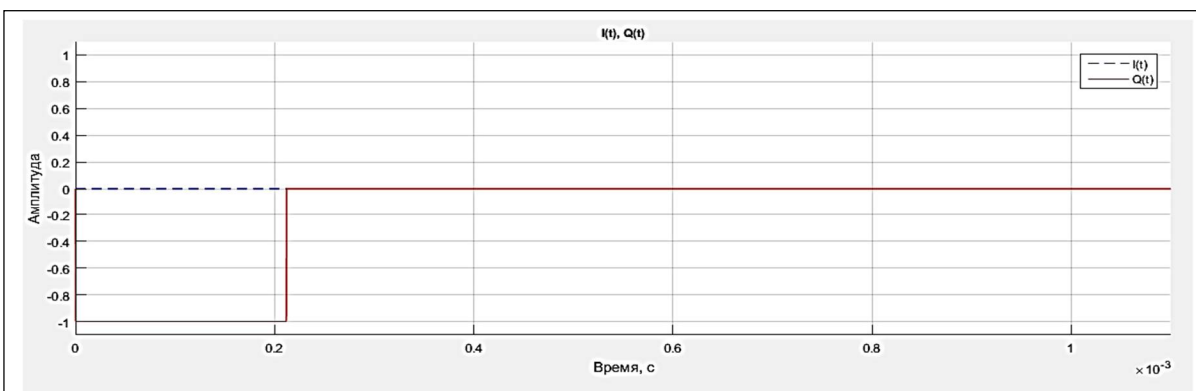
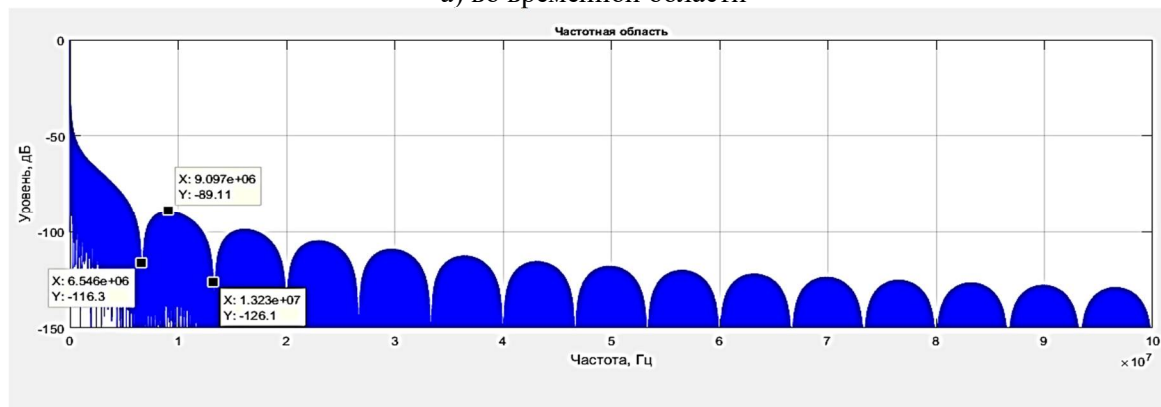


Рис. 11. Модулирующий сигнал, момент переключения фазы

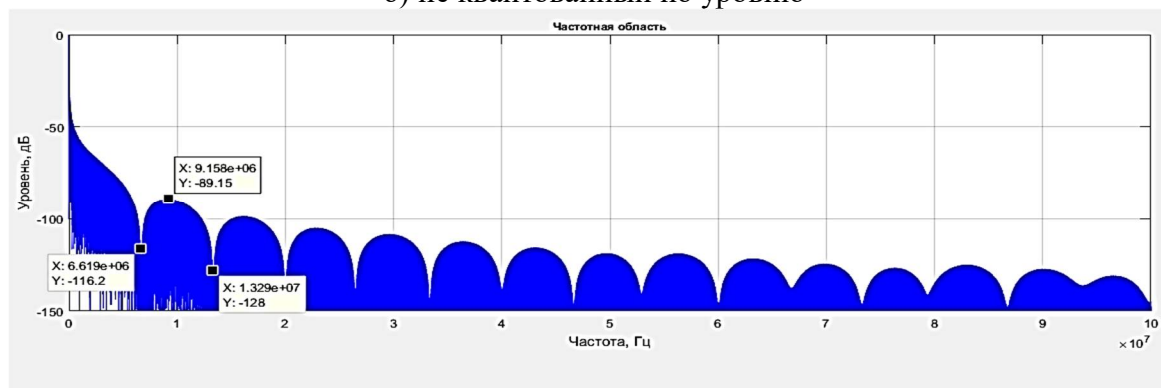
На последнем этапе проводится норми-



а) во временной области



б) не квантованный по уровню



в) число уровней квантования  $2^8$

Рис.10. Модулирующий сигнал. Импульс без ФКМ

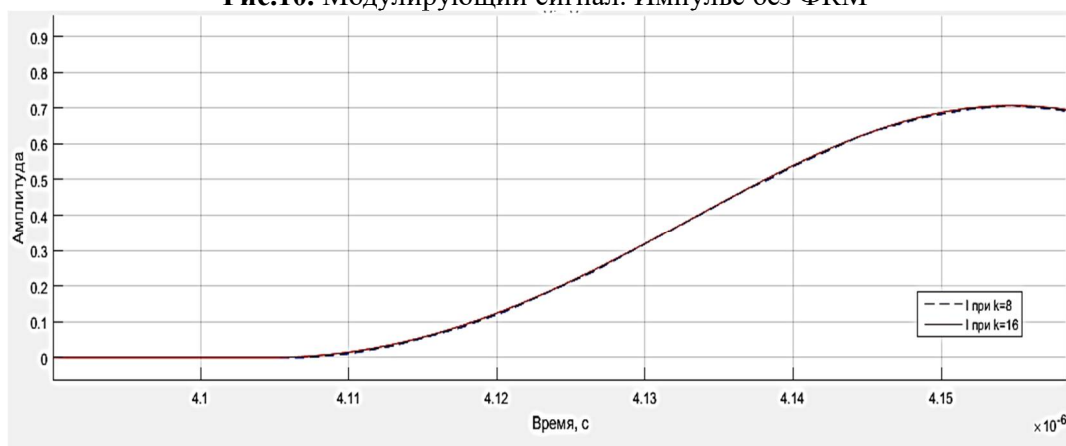


Рис. 11. Модулирующий сигнал, момент переключения фазы

ровка сигнала с выхода сумматора к разряд-

ности ЦАП, которая принимается равной  $k$ . Выходной сигнал устройства формирования отсчетов радиоимпульса с ФКМ после нормировки (после блока усечения) при  $k = 16$  и  $k = 8$  приведены на рис. 17 и 18 соответственно.

### Заключение

В результате анализа полученных характеристик можно сделать вывод, что для формирования цифровым квадратурным модулятором ФКМ радиоимпульса требуется сетка представления чисел не менее 12 разрядов. При дальнейшем снижении разрядности в спектр сигнала вносятся значительные искажения.

Спектр сигнала с переходом фазы по закону синус более подвержен искажениям при снижении параметра  $k$ , по сравнению с линейным законом перехода фазы.

В дальнейшей работе планируется создание программного комплекса который позволит провести более детальное моделирование при построении схем формирователей на основе принципа цифрового квадратурного синтеза.

Поступила 10 сентября 2018 г.

This paper presents the distortion analysis of signals with phase-code manipulation using digital quadrature synthesis. There is a block diagram of the shaper, and graphs of the spectra of signals with characteristic distortions. Defined recommended shaper parameters to minimize distortion.

*Key words:* image processing, recognition, multiscale analysis, nanostructures.

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

*E-mail:* s\_zh\_72@mail.ru.

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

*Михеев Кирилл Валерьевич* – кандидат технических наук, инженер первой категории акционерного общества «Муромский завод радиоизмерительных приборов».

*E-mail:* kiri-mikheev@yandex.ru.

*Адрес:* 602267, г. Муром, Карачаровское шоссе, д. 2.

### Литература

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов – М.: Радиотехника – 2004. – 320 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1988.– 448 с.
3. Карташев В.Г. Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 109 с.
4. Кривченков Д.Н. Использование зондирующих сигналов с фазовой кодовой манипуляцией в соответствии с дополнительными последовательностями // Межвузовский сборник научных трудов: Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах. Выпуск 6, 2012, С.52-59.
5. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. – 376 с.
6. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. –М.: Радио и связь, 1985.-384 с.
7. Надольский, А. Н. Спектральный и корреляционный анализ сигналов: метод. пособие к лаб. работам по дисц. «Теоретические основы радиотехники», «Радиотехнические цепи и сигналы» для студ. спец. «Радиотехника», «Радиоинформатика», «Радиоэлектронные системы» и «Радиоэлектронная защита информации» всех форм обуч. / А. Н. Надольский. - Минск : БГУИР, 2009. – 48 с.