

Цифровая коррекция фазовых и дисперсионных искажений в каналах связи

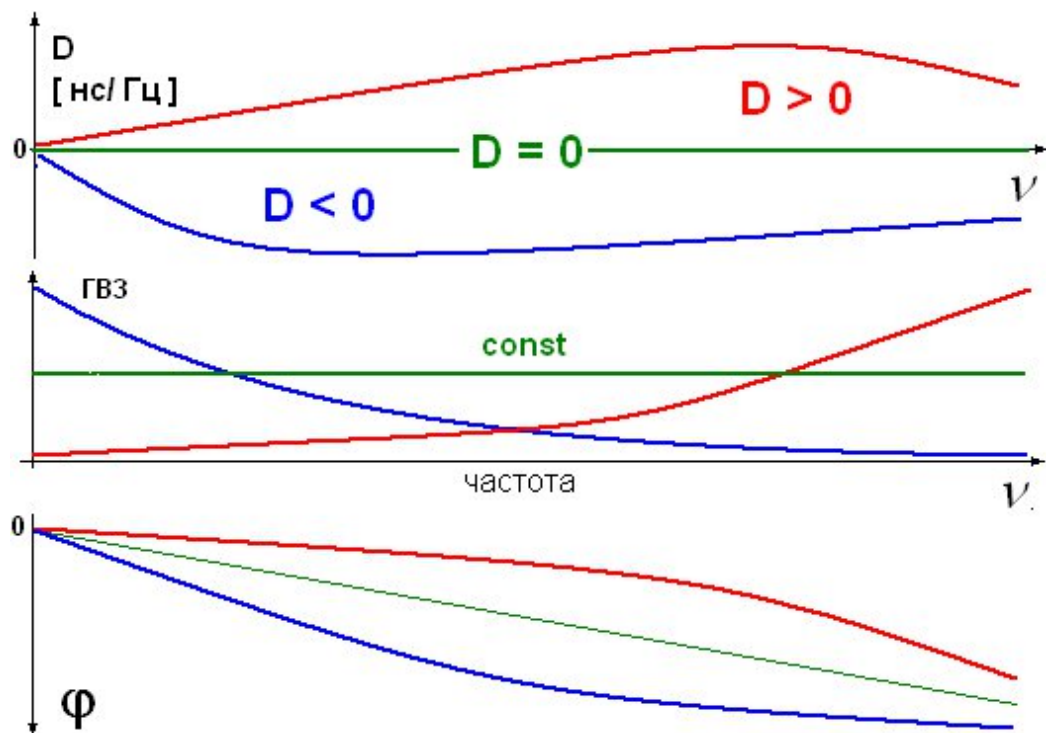
2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

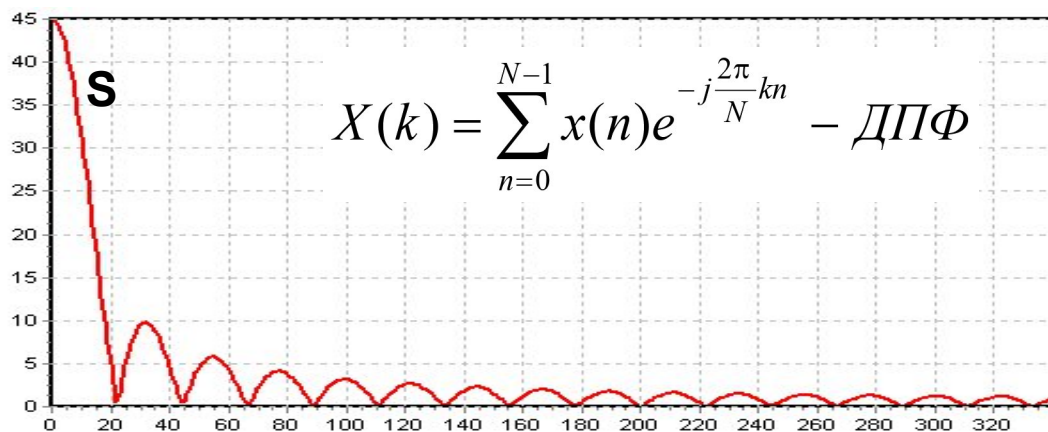
Соискатель:	Морозов Никита Сергеевич
Научный руководитель:	доцент, к.т.н. Бугров В.Н.

- I. Селективная способность - обеспечение совокупности требуемых характеристик в частотной области.
- II. Частотная дисперсия сигнала в линейном цифровом фильтре.
- III. Вычислительная сложность - обеспечение минимального времени расчёта отклика цифрового фильтра при работе в реальном времени.
- IV. Динамический диапазон цифрового фильтра.

Частотная дисперсия сигнала в линейных цифровых фильтрах



$$D(\nu) = \frac{\partial \tau_{gr}}{\partial \omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \tau_{gr}}{\partial \nu}$$



$$H(e^{j\omega T}) = |H(e^{j\omega T})| e^{j\varphi(\omega T)}$$

Целью работы является синтез корректоров и компенсаторов частотной дисперсии широкополосных и узкополосных каналов связи на основе цифровых фазовых фильтров с учётом возможности их реализации на целочисленных цифровых платформах.

Задачи диссертационной работы:

- анализ систематических ошибок аналитического синтеза цифровых фазовых корректоров и компенсаторов частотной дисперсии и разработка дискретных моделей цифровых фазовых БИХ-фильтров с учётом требований к частотной дисперсии сигнала;
- дискретный синтез корректоров фазовых искажений сигнальных видео- и радиотрактов, реализованных на фазовых БИХ-фильтрах методами нелинейного математического программирования с заданной системой прямых и функциональных ограничений;
- дискретный синтез компенсаторов линейно возрастающей и линейно падающей частотной дисперсии в высокоскоростных линиях передачи;
- тестовое модельное и экспериментальное исследование синтезированных квантованных корректоров фазовых искажений широкополосных видео- и узкополосных радиотрактов.



Недостатки вещественного описания и классических методов синтеза

1. Невозможен расчёт частотной дисперсии при аналитической $H(z)$
2. Нельзя реализовать ЧХ произвольной формы
3. Неустраняемая ошибка квантования коэффициентов при реализации
4. Высокие вычислительные затраты в фильтрах с вещественными коэфф.

$$y_n = -\sum_{k=1}^N a_k \cdot y_{n-k} + \sum_{k=0}^N b_k \cdot x_{n-k} \quad a_k, b_k - \text{вещественные коэффициенты}$$

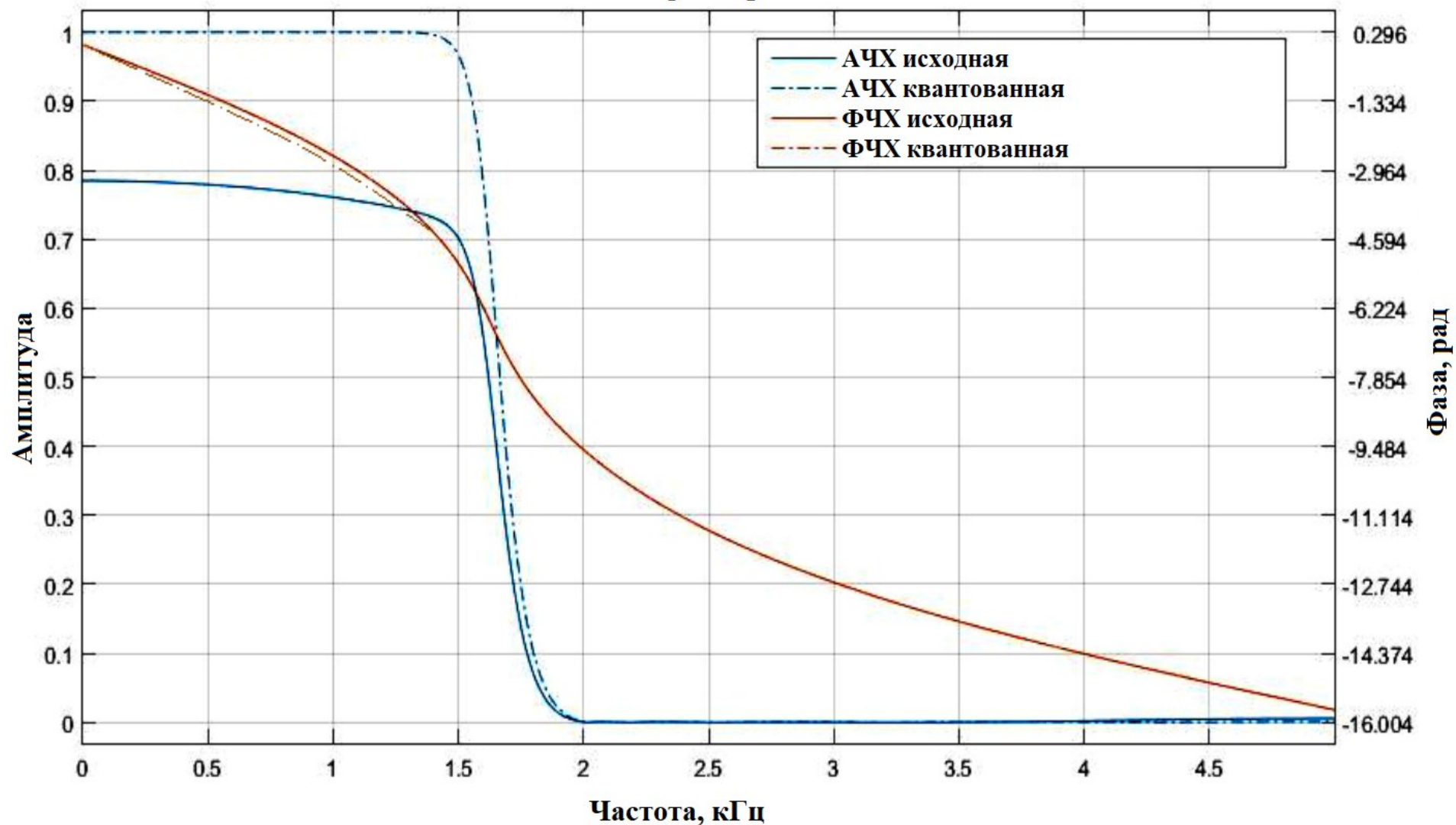
$$-1.0 < a_k < 1.0$$

$$-1.0 < b_k < 1.0$$

$$H(z) = H_0 \prod_{i=1}^m \frac{1 + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}}{1 + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}}$$

Фазовые и дисперсионные искажения БИХ-фильтров, синтезированных по аналоговому прототипу

АЧХ и ФЧХ фильтра Чебышева



$D_{\max} = 5,9 \text{ мкс/Гц}$

Целочисленная дискретизация коэффициентов

А. Арифметика с фиксированной точкой:



$$C = 0,90662334 \text{ -- неквант } L=4 \text{ бита} \quad C_{\text{float}} = C_{\text{int}} / 2^{L-1} = 7 / 2^3 = 0,875$$

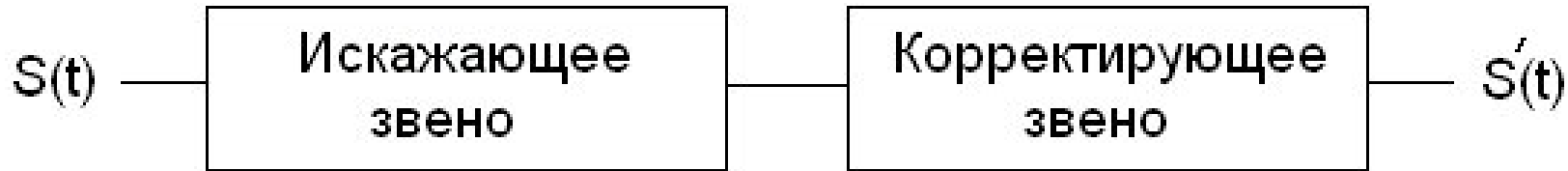
$$C_{\text{int}} = 0,90662334 * 2^3 + 0,5 = 7,753 \approx 7 \quad \varepsilon = 0,90662334 - 0,875 = 0,03162$$

Б. Целочисленная арифметика:

$$\text{int } a_k, b_k \quad -2^{L-1} < a_k, b_k < 2^{L-1}$$



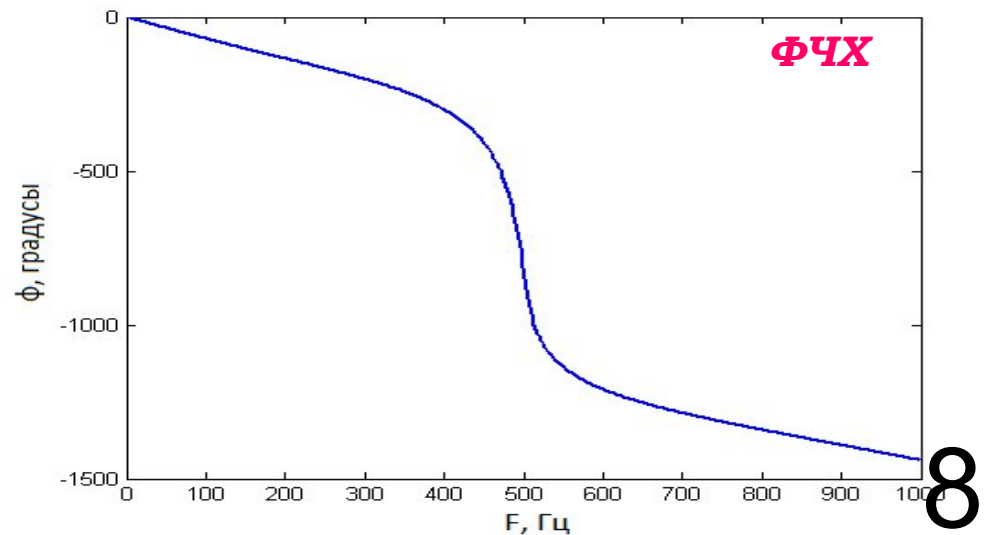
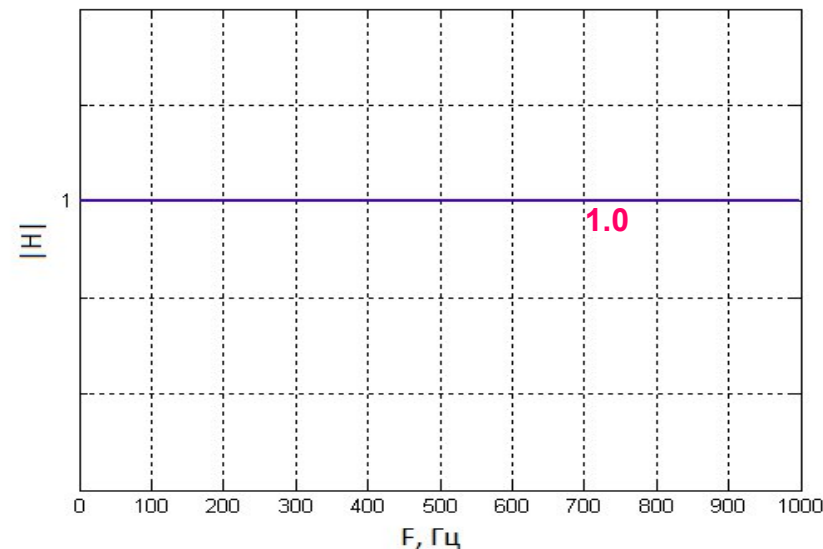
Моделирование рекурсивного фазового корректора



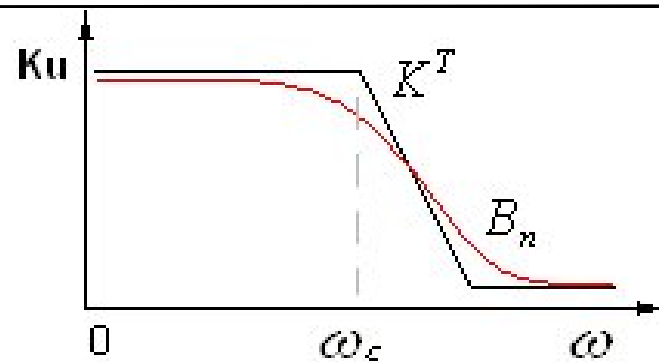
$$(1) \quad K_{(j\omega)}^{\Sigma} = A_{(\omega)}^{\Sigma} e^{j\varphi_{(\omega)}^{\Sigma}} = A_{(\omega)}^H \cdot A_{(\omega)}^K e^{j[\varphi_{(\omega)}^H + \varphi_{(\omega)}^K]}$$

$$(2) \quad \varphi_{(\omega)}^K = \omega\tau - \varphi_{(\omega)}^H$$

$$(3) \quad H(z) = \prod_{i=1}^m \frac{a_{2i} + a_{1i}z^{-1} + a_{0i}z^{-2}}{a_{0i} + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}} \quad a_{0i} = b_{2i} \quad a_{1i} = b_{1i} \quad a_{2i} = b_{0i}$$



Систематические ошибки аналитического синтеза



Аналитическая аппроксимация

$B_n^2(\omega) = 1 / (1 + \omega^{2n})$ - Баттерворт

$T_n(\omega) = \cos(n \cdot \arccos \omega)$ - Чебыш

$$\delta_a = \max_{\omega} |K_{\omega}^T - B_n(\omega)|$$

$K(p) \Rightarrow H(z) \Rightarrow \text{структура}$

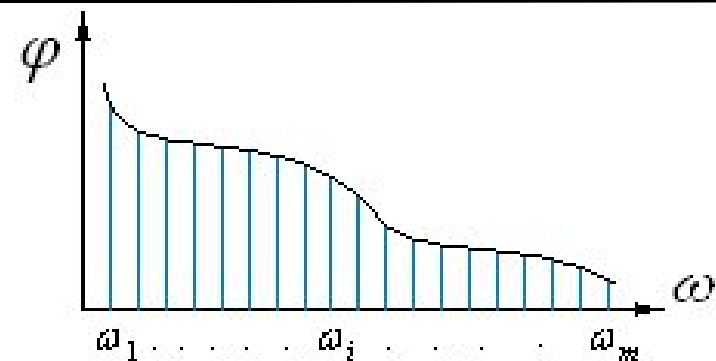
$$H(z) = \prod_{i=1}^m \frac{b_{0i} + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}}{a_{0i} + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}}$$

Практическая реализация

- квантование коэф: $\varepsilon = C - C_{float}$

- квантование MAC: $127 * 10 = 1270$

$$0,8125 * 0,625 = 0,5078125$$



Табулированное представление

$Y_j[y_1(X), y_2(X) \dots y_i(X), \dots y_m(X)]$

- расчёт ЧХ численными методами

$$D(\omega) = \partial^2 \varphi / \partial \omega^2$$

- дискретизация коэфф. при $\varepsilon = 0$

$Y_j[y_1(DX), y_2(DX) \dots y_i(DX), \dots y_k(DX)]$

Задача ЦНП и поисковое её решение

$$\overset{0}{F}(\overset{0}{IX}) = \min F(IX) \quad IX \in I^{sm}$$

$$F(IX) = \beta_1 f_{AK}(IX) + \beta_2 f_{ДХП}(IX)$$

$$f_i(IX) = \max |Y_n(IX) - Y_n^T|$$

Метод синтеза технического решения на дискретной сетке кода Грея

$$\overset{0}{F}(\overset{0}{X}) = \min_{X \in D} F(X) \quad (1)$$

$$D: \left\{ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \right. \quad (2)$$

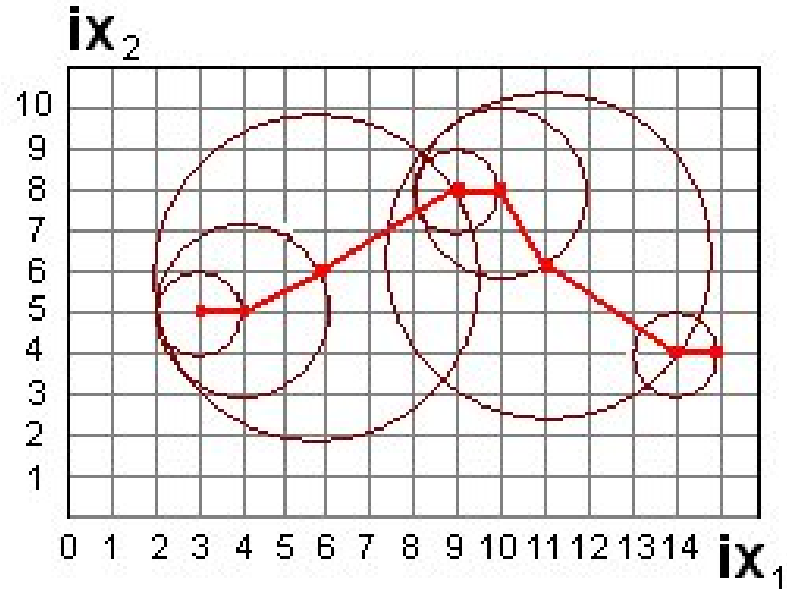
$$\Phi_j(X) > 0 \quad j = \overline{1, k} \quad (3)$$

$$B \leq \Psi_r(X) \leq C \quad r = \overline{1, n} \quad (4)$$

- Высокая надёжность
- Малые потери на поиск
- Работоспособность в пространстве большой размерности (до 1000 переменных)
- Отсутствие априори настраиваемых параметров

1. Постановка задачи синтеза как задачи нелинейного математического программирования с заданной системой прямых и функциональных ограничений.

2. Синтез технического решения численными методами поиска на сетке с дискретностью квантования заданным числом двоичных разрядов.



$$x^{k+1} = x^k + \alpha^k P^k \quad 10$$

Постановка задачи дискретного синтеза ЦФК и ЦКД с целочисленными коэффициентами

$$\overset{0}{F}(\overset{0}{IX}) = \min F(IX) \quad IX \in I^{2^m} \quad (1)$$

$$-2^{Wk-1} < a_{di} < 2^{Wk-1} \quad i=\overline{1, m} \quad (2)$$

$$a_{0i} \in \{2^q\} \quad q = \overline{0, Wk-1} \quad (3)$$

$$|Z_{pi}| < r_{\max} \quad i=\overline{1, m} \quad (4)$$

$$F(IX) = \frac{1}{p} \cdot \sum_{n=1}^p [\varphi_n(IX) - \varphi_n^T]^2 \quad (5)$$

$$F(IX) = \beta_1 f_{ГВЗ}(IX) + \beta_2 f_{ДИС}(IX) \quad (6)$$

$$f_i(IX) = \frac{1}{p} \cdot \sum_{n=1}^p [Y_n(IX) - Y_n^T]^2 \quad (7)$$

$$f_i(IX) = \max |Y_n(IX) - Y_n^T| \quad (8)$$

- Прямые ограничения на целочисленные коэффициенты заданной битовой длины (2)
- Нормирующий power-of-two коэффициент (3)
- Контроль устойчивости по всем полюсам Н(z) (4)
- Синтез ЦФК по требуемой фазовой характеристике (5)
- Синтез ЦКД по совокупности требуемых частотных характеристик (6)
- Частные целевые функции
- Расчёт дисперсионных характеристик численными методами дифференцирования при их дискретном представлении

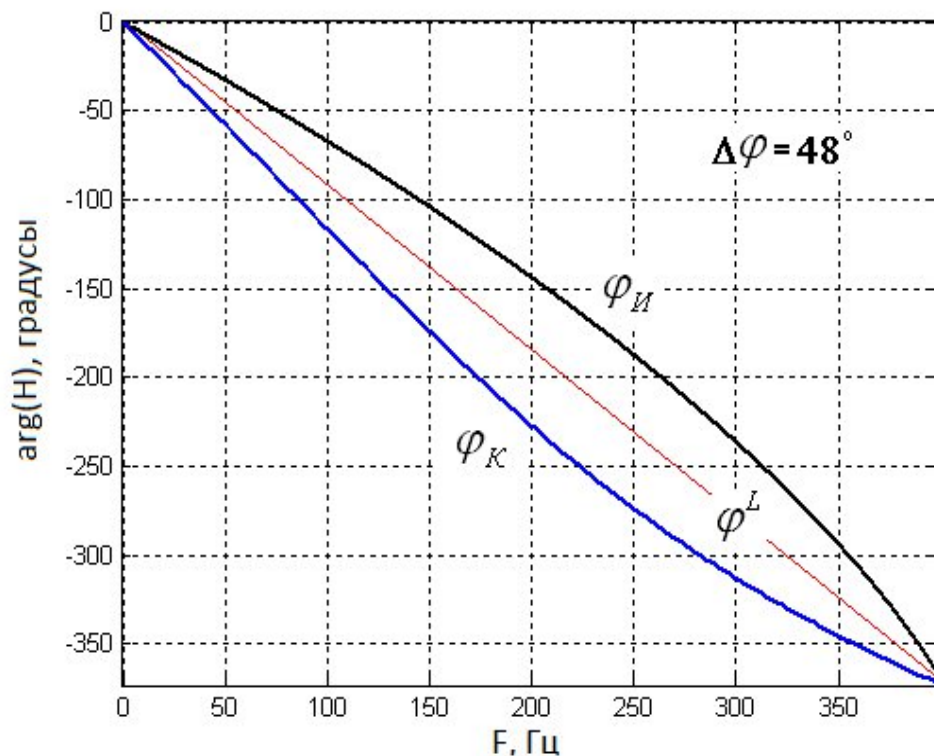
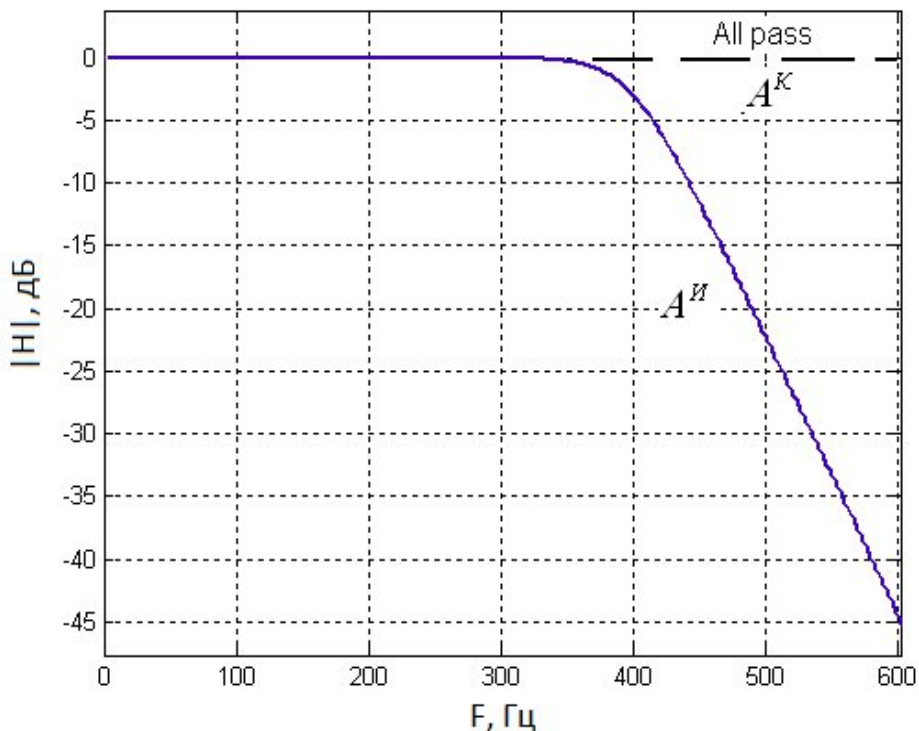
При расчёте отклика рекурсивного ЦФК используется минимальное количество базовых операций, причём все эти операции целочисленные. Общее число тактов ЦПУ, необходимых для вычисления в реальном времени отклика каскадного рекурсивного ЦФК на МК MSP430F1611:

$43 + 92 \cdot m$ тактов, где m – число каскадов ЦФК.

Расчёт времени выполнения цифровой коррекции
на микроконтроллере MSP430F1611

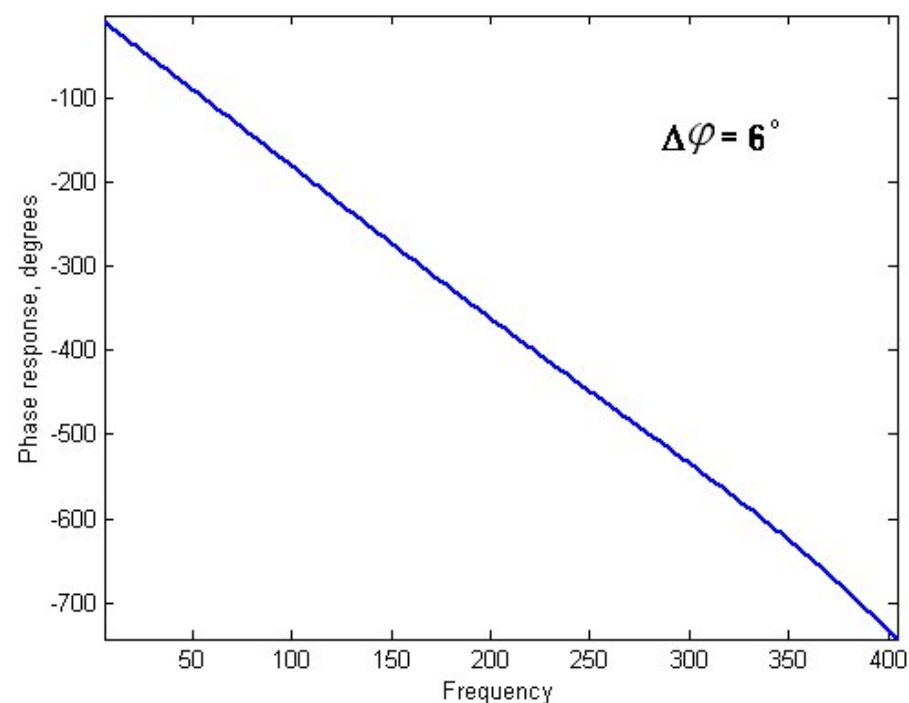
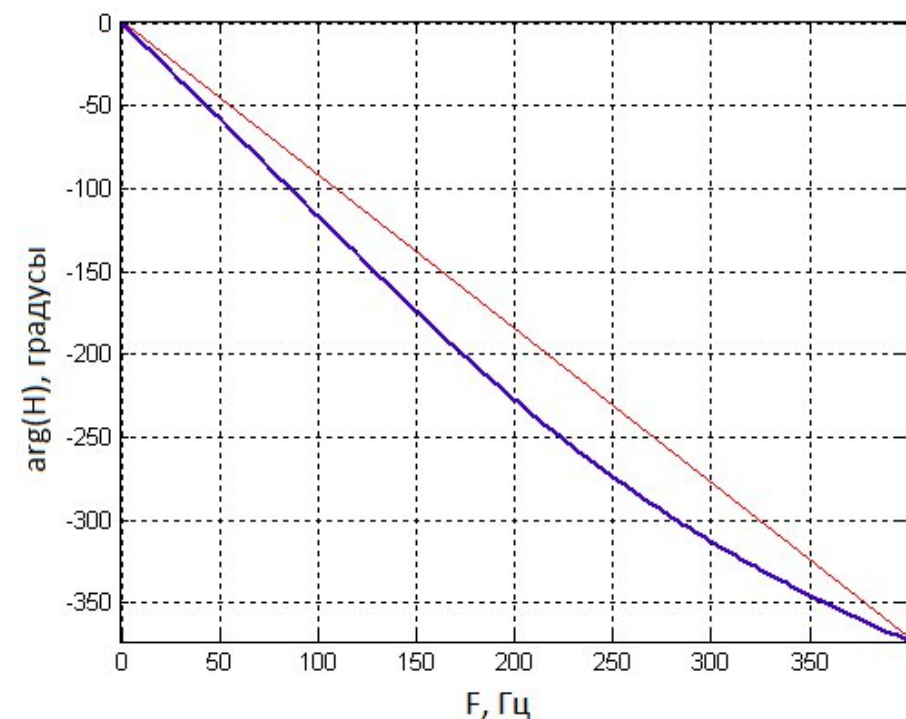
Количество звеньев m	Количество тактов ЦПУ	Время выполн., мс	Максимальная Фд, Гц
1	135	0,016875	59259,2
2	227	0,028375	35242,4
3	319	0,039875	25078,7
4	411	0,051375	19464,2
5	503	0,062875	15904,5
6	595	0,074375	13445,4
7	687	0,085875	11644,8
8	779	0,097375	10268,3

Синтез корректора фазовых искажений видеотракта



- (1) $\overset{\circ}{F}(\overset{\circ}{IX}) = \min F(IX) \quad IX \in I^4$
- (2) $-128 < a_{di} < 128 \quad d=\overline{1,2} \quad i=\overline{1,2}$
- (3) $a_{0i} = 128 \quad i=\overline{1,2}$
- (4) $|Z_{ni}| < 0,95 \quad i=\overline{1,4}$
- (5) $F(IX) = \frac{1}{p} \cdot \sum_{n=1}^p [\varphi_n(IX) - \varphi_n^T]^2$
1. Полоса пропускания 0 - 400 Гц
2. Погрешность реализации требуемой ФЧХ : 5°
3. Контроль устойчивости по полюсам коэффициента передачи с радиусами не выше 0,95
4. Длина слова коэффициентов фильтра $W_k = 8$ бит
5. Порядок фазового фильтра $N = 4$
6. Частота дискретизации $f_s = 2$ кГц

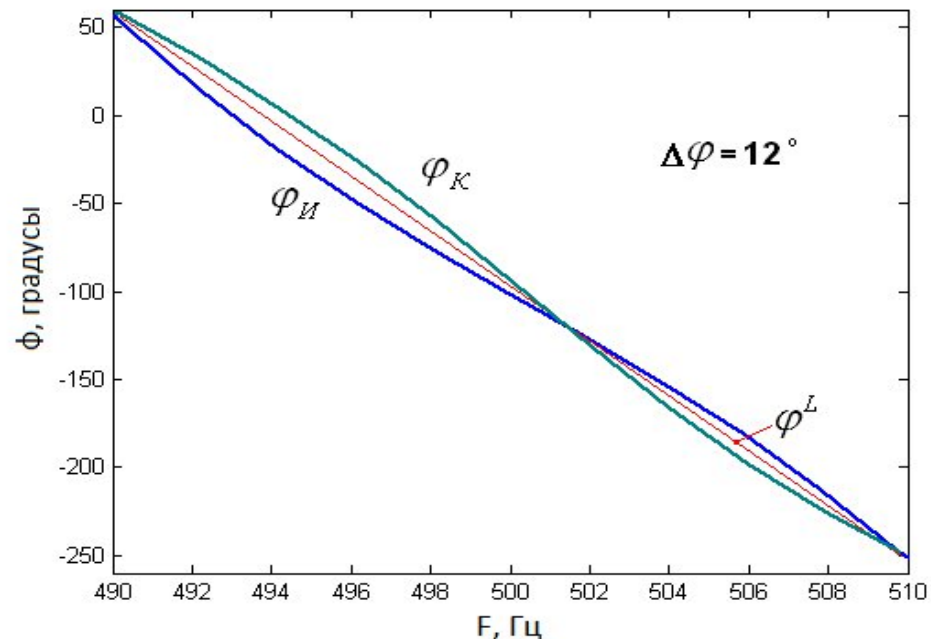
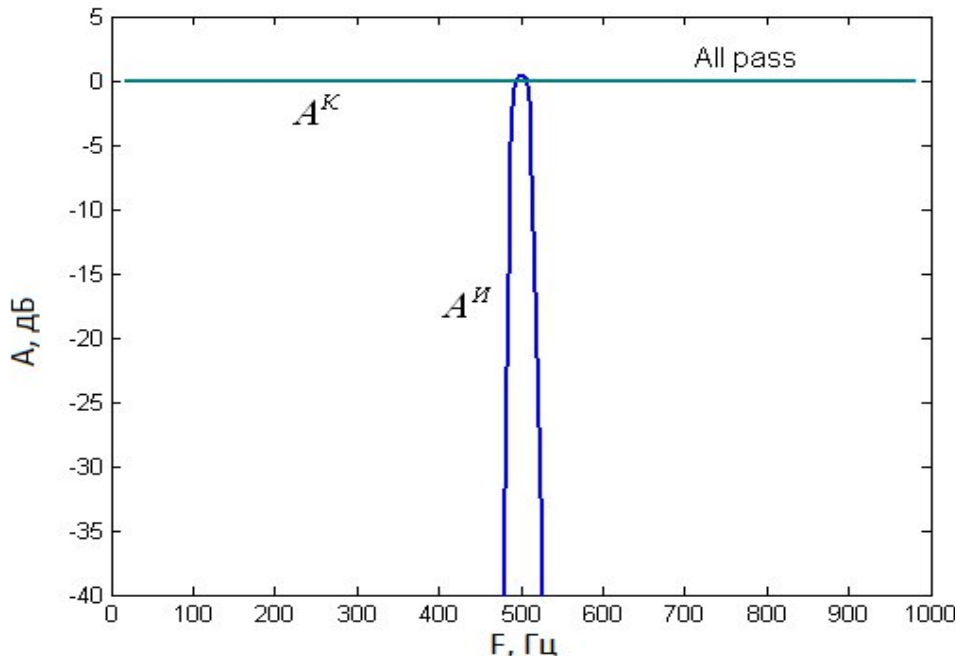
Синтез корректора фазовых искажений видеотракта



Оптимальные 8-битовые коэффициенты ЦКФ

Звено фильтра	Целочисленные коэффициенты			Вещественные коэффициенты передаточной функции		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
1	128	-128	38	0,9921875	-0.9921875	0.2968750
2	128	79	-32	0,9921875	0.6171875	-0.2500000

Синтез корректора фазовых искажений радиотракта



$$(1) \quad \overset{0}{F}(\overset{0}{IX}) = \min F(IX) \quad IX \in I^8$$

$$(2) \quad -128 < a_{di} < 128 \quad d=\overline{1,2} \quad i=\overline{1,4}$$

$$(3) \quad a_{0i} = 128 \quad i = \overline{1,4}$$

$$(4) \quad |Z_{pi}| < 0,95 \quad i=\overline{1,8}$$

$$(5) \quad F(IX) = \frac{1}{p} \cdot \sum_{n=1}^p [\varphi_n(IX) - \varphi_n^T]^2$$

1. Полоса фазовой коррекции: 490 - 510 Гц

2. Погрешность реализации ФЧХ : 5°

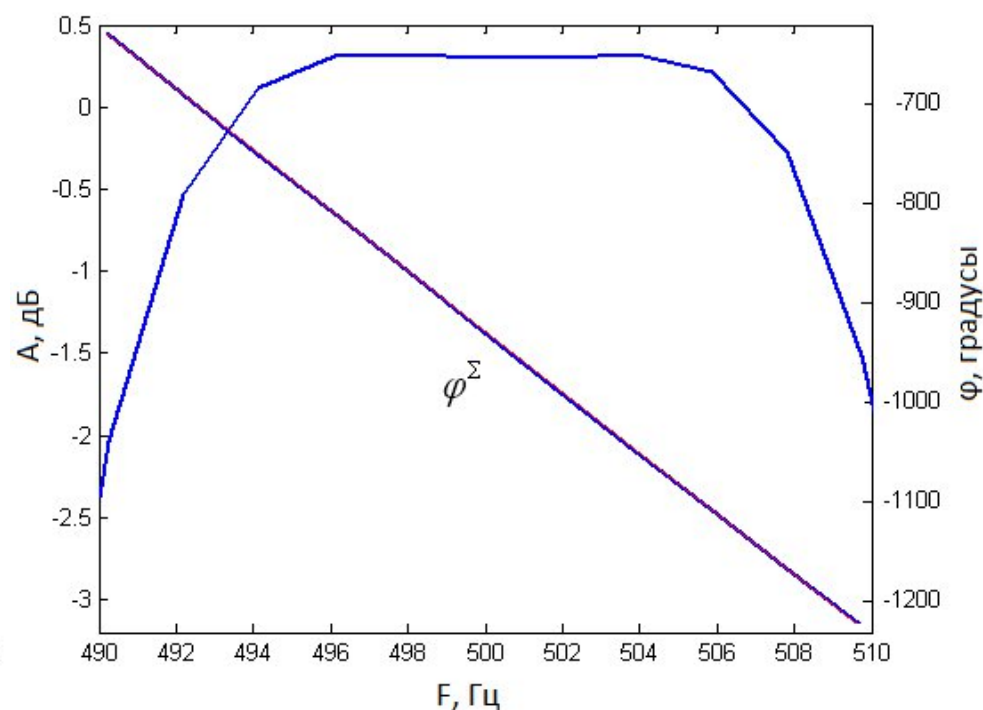
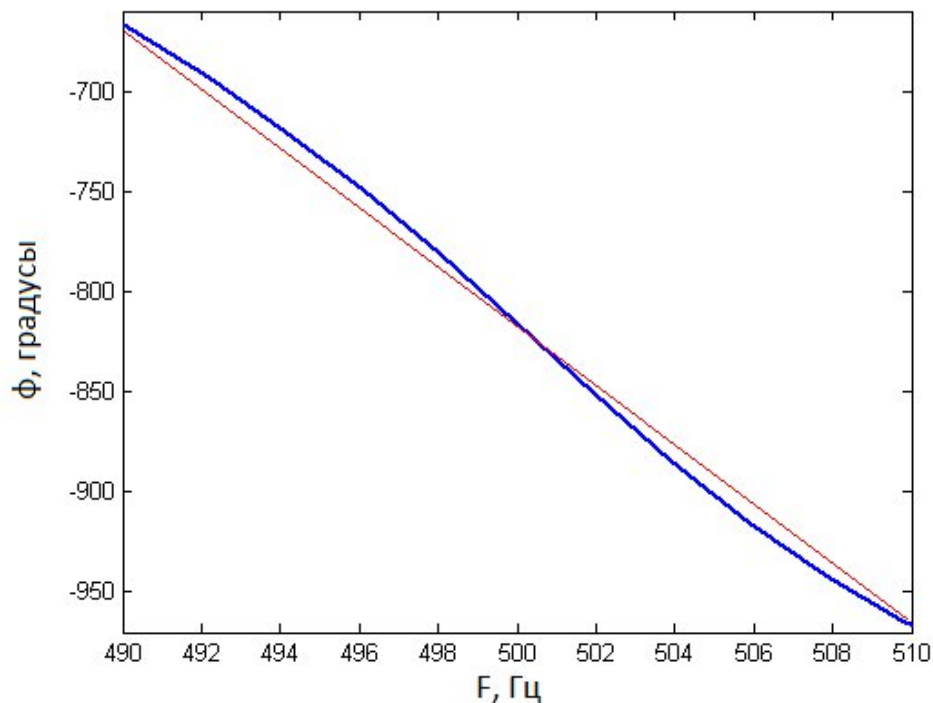
3. Контроль устойчивости по полюсам
коэффициента передачи с радиусами не
выше 0,95

4. Длина слова коэффициентов фазового
фильтра Wк= 8 бит

5. Порядок фазового фильтра N= 8

6. Частота дискретизации fs= 2 кГц

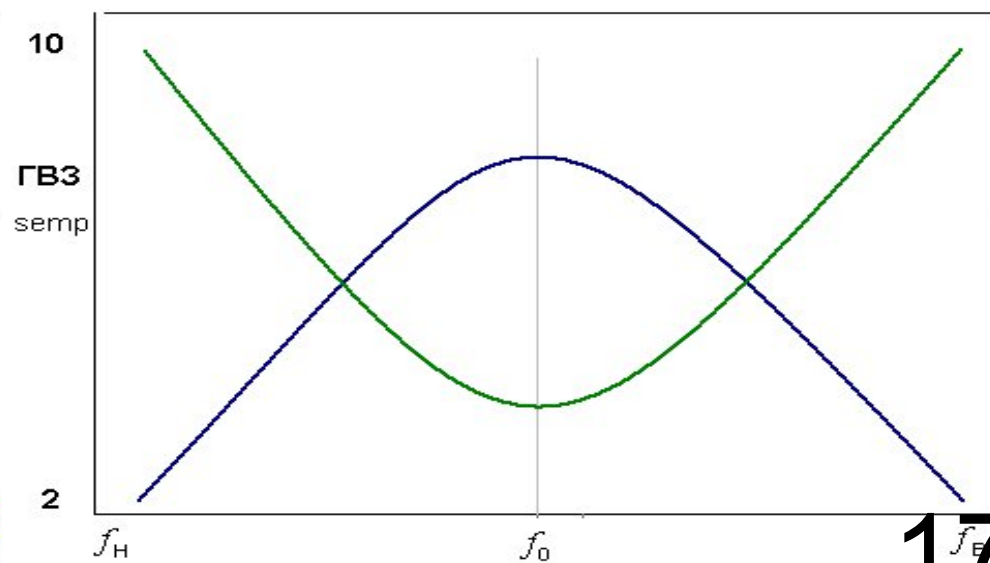
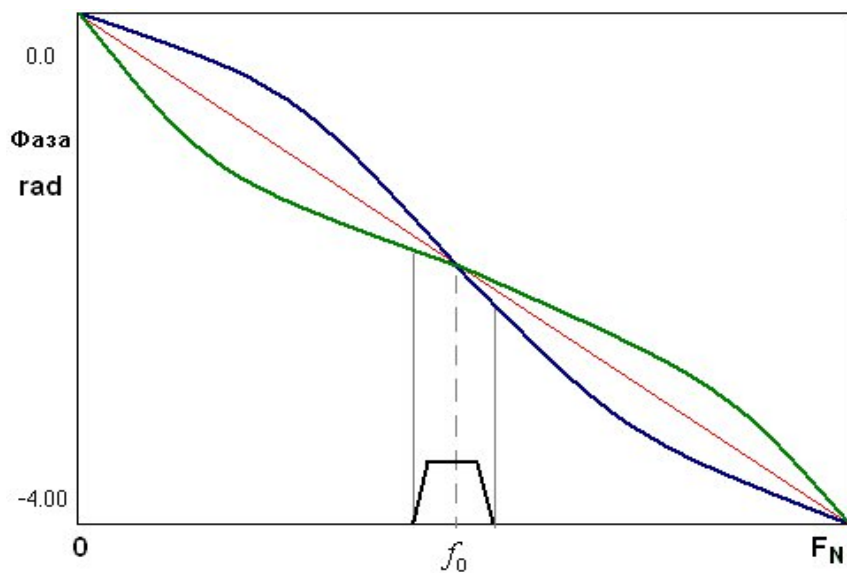
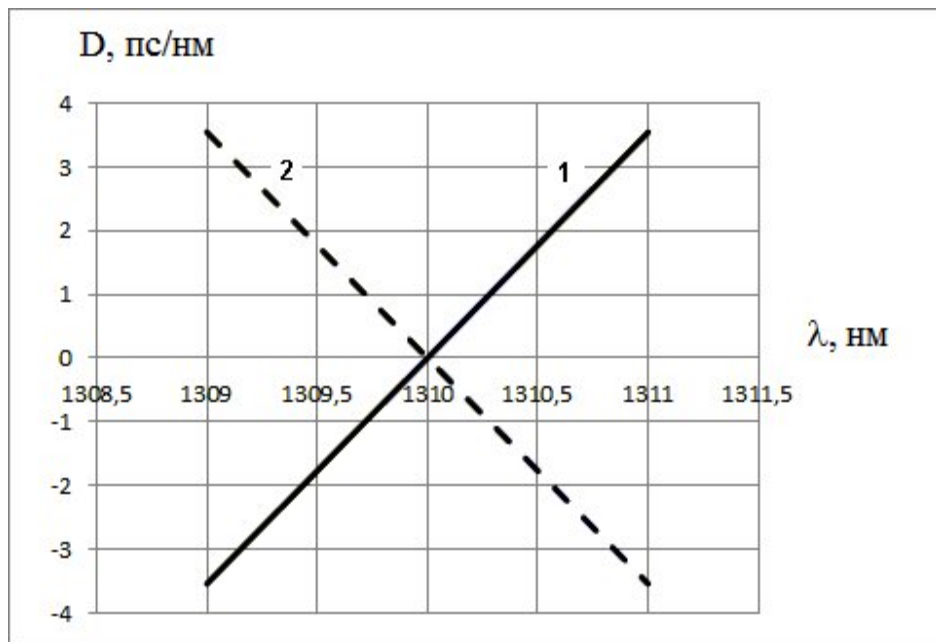
Синтез корректора фазовых искажений радиотракта



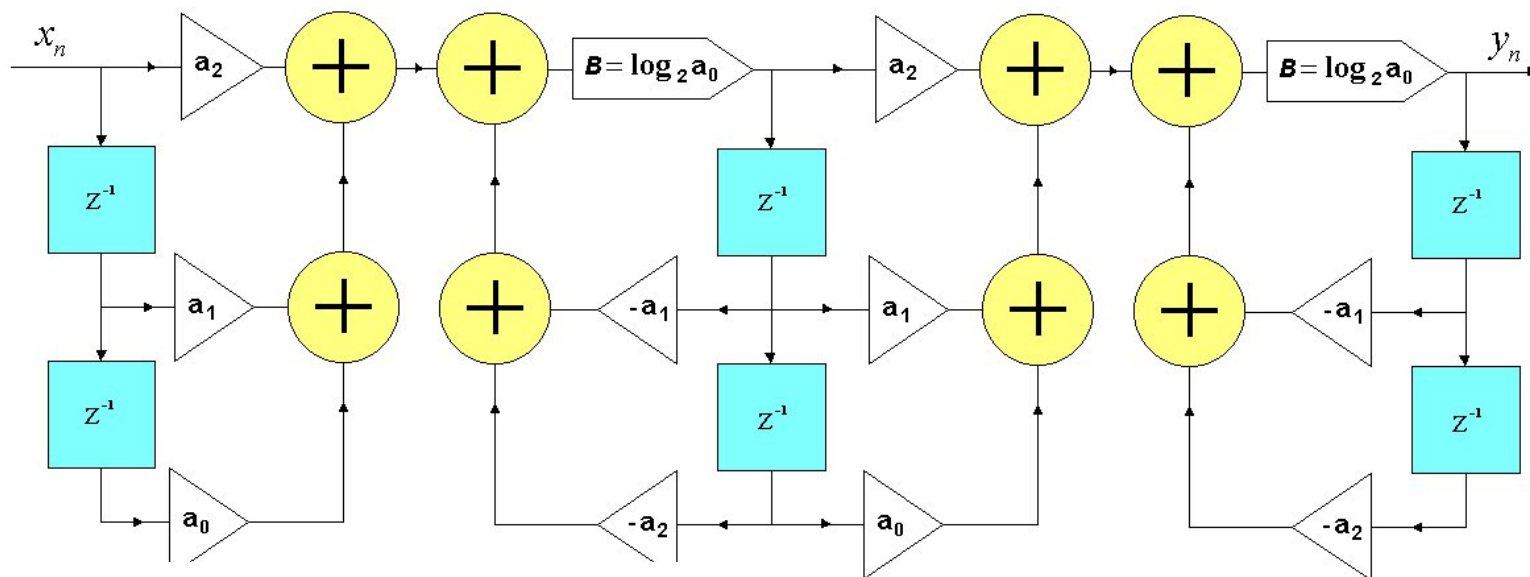
Звено фазового фильтра	Целочисленные коэффициенты			Вещественные коэффициенты передаточной функции		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
1	128	-10	112	0,9921875	-0.0871250	0.8750000
2	128	-13	74	0,9921875	-0.1015625	0.5781250
3	128	-26	-14	0,9921875	-0.2031250	-0.1093750
4	128	1	121	0,9921875	0.0078125	0.9453125

Частотная дисперсии в узкой полосе канала связи

SMF 28 (фирмы CORNING), 50 км



Синтез компенсатора дисперсии на базе фазового (всепропускающего) БИХ-фильтра



$$(1) \quad \overset{0}{F}(\overset{0}{IX}) = \min F(IX) \quad IX \in I^4$$

$$(2) \quad -128 < a_{di} < 128 \quad d=1,2 \quad i=\overline{1,m}$$

$$(3) \quad a_{0i} = 128 \quad i = \overline{1,2}$$

$$(4) \quad |Z_{pi}| < 0,9 \quad i=\overline{1,2}$$

$$(5) \quad F(IX) = \beta_1 f_{ГВЗ}(IX) + \beta_2 f_{ДИС}(IX)$$

1. Центральная частота канала 500 Гц

2. Линейность дисперсионной

характеристики в полосе 450-550 Гц

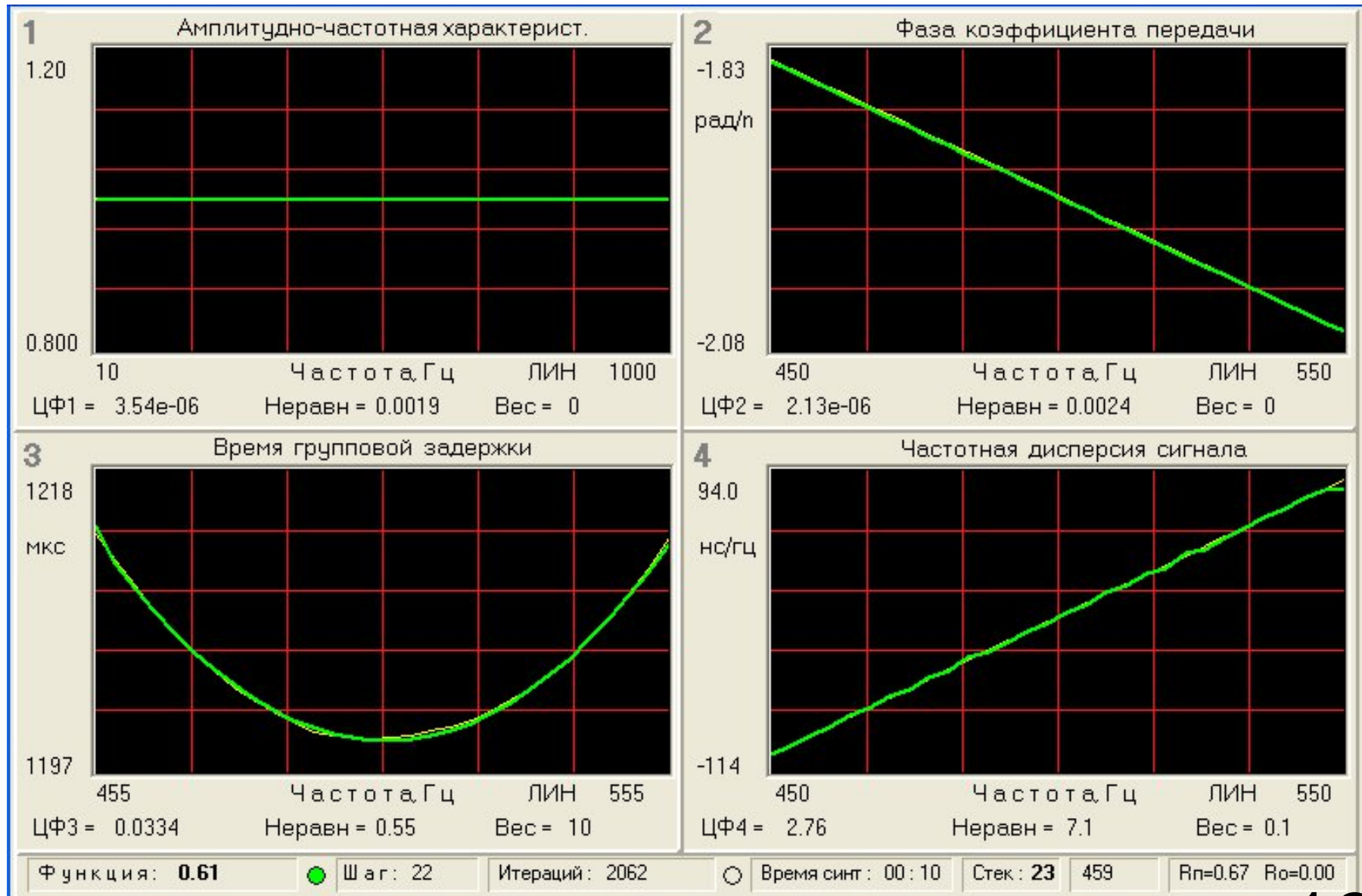
3. Контроль устойчивости по полюсам
коэффициента передачи с
радиусами не выше 0,9

4. Длина слова коэффициентов фильтра
Wk= 8 бит

5. Порядок фазового фильтра N= 4

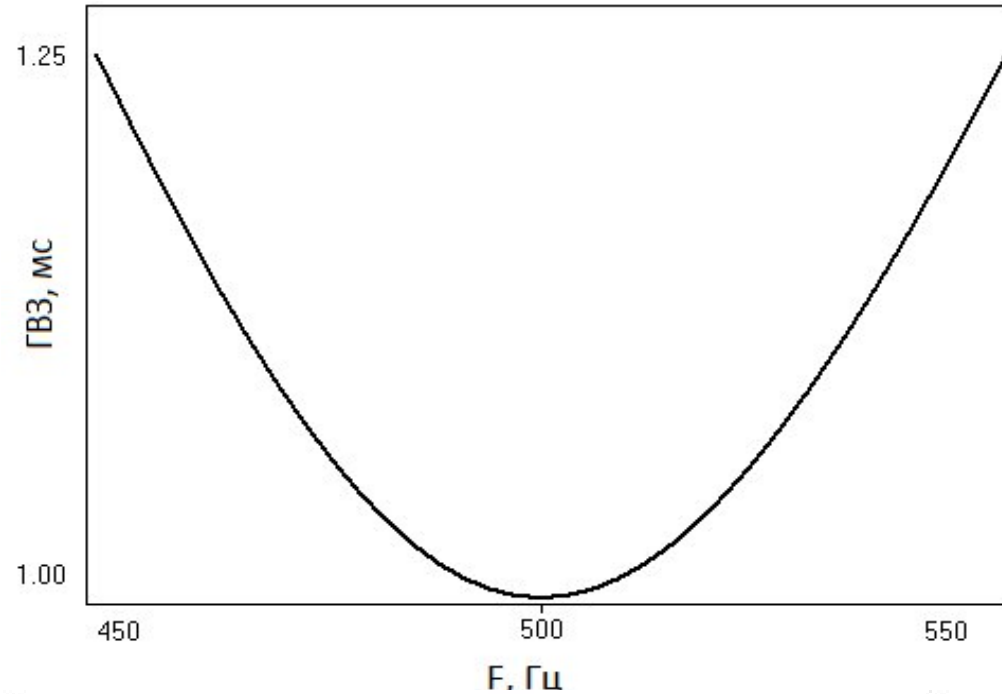
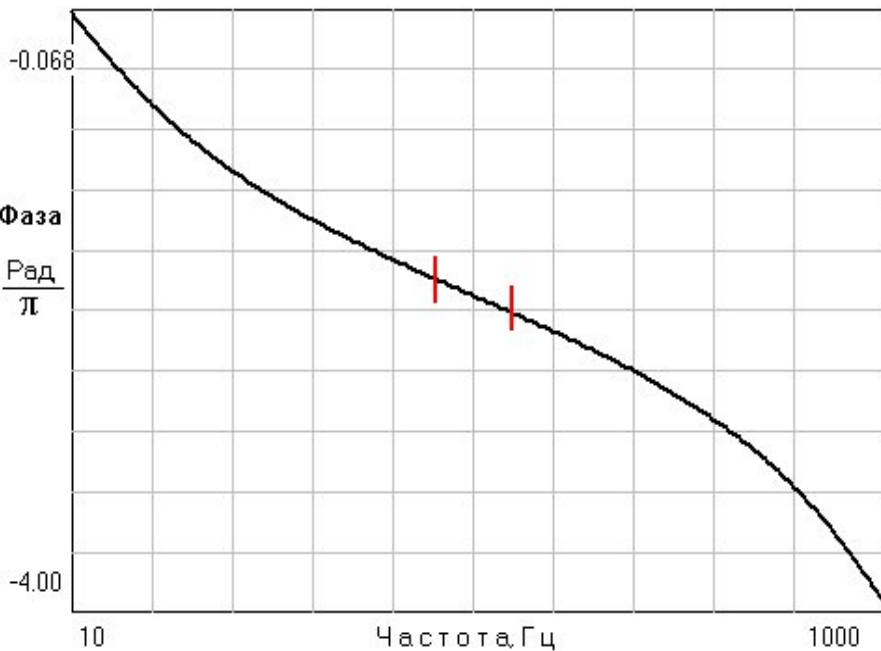
6. Частота дискретизации fs= 2 кГц

Синтез компенсатора с линейно возрастающей дисперсией на базе фазового БИХ-фильтра



$$F(IX) = \beta_1 f_{ГВЗ}(IX) + \beta_2 f_{ДИС}(IX)$$

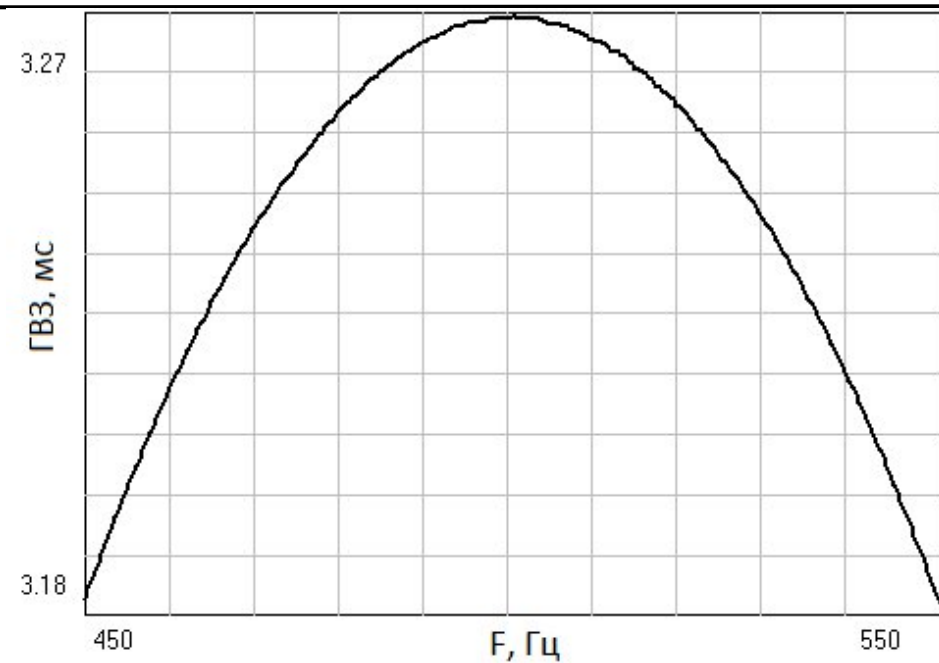
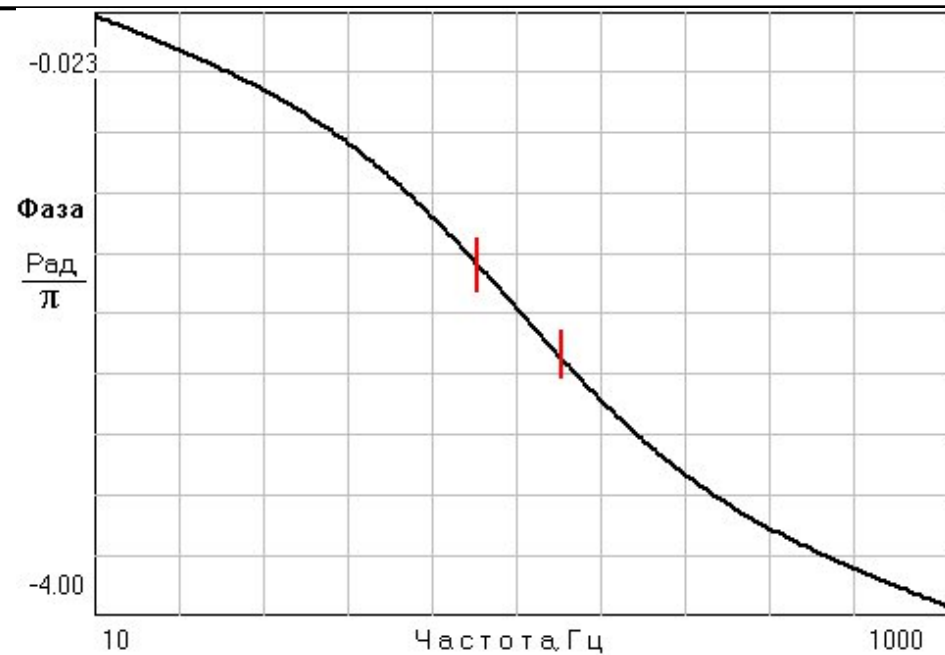
Синтез цифрового компенсатора с линейно возрастающей дисперсией



Звено фильтра	Целочисленные коэффициенты			Вещественные коэффициенты передаточной функции		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
1	128	-32	-29	0,9921875	-0.2500000	-0.2265625
2	128	44	-28	0,9921875	0.3437500	-0.2187500

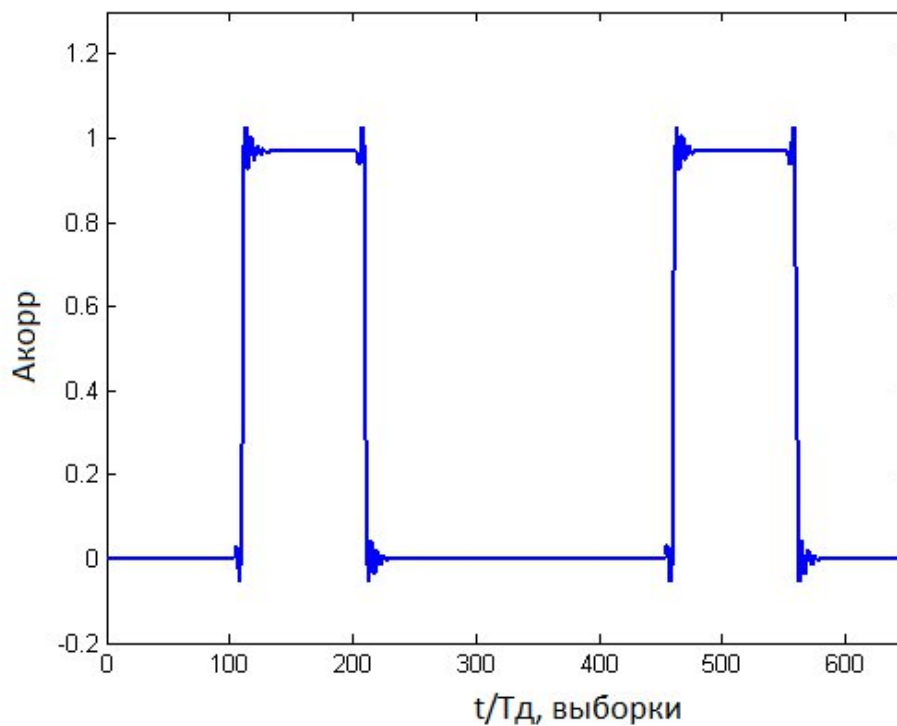
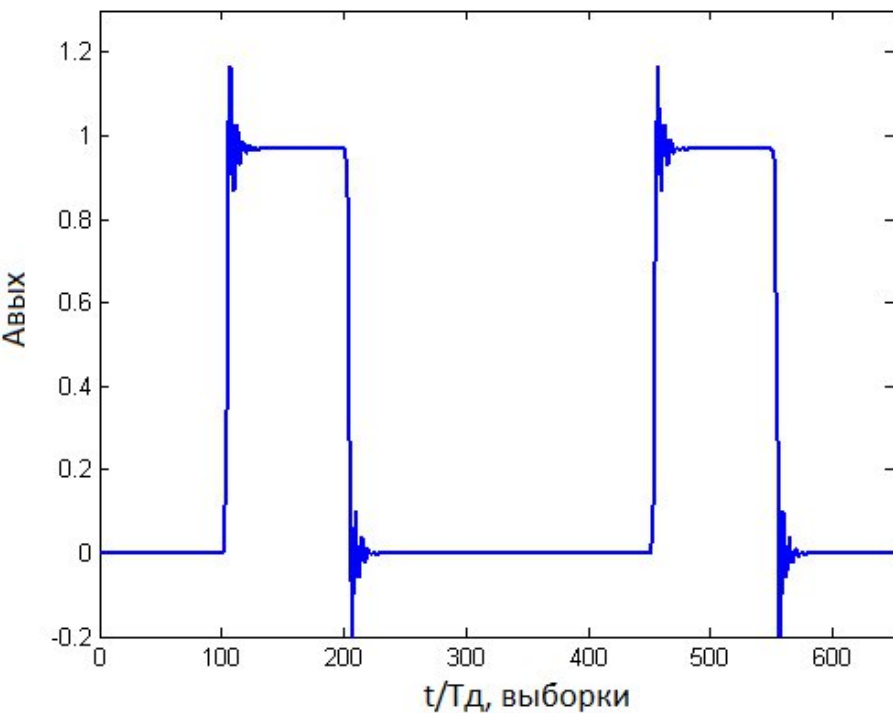
$$C_{float} = C_{int} / 2^{Wk-1}$$

Синтез цифрового компенсатора с линейно падающей дисперсией



Звено фильтра	Целочисленные коэффициенты			Вещественные коэффициенты передаточной функции		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
1	128	30	37	0,9921875	0.2343750	0.2890625
2	128	-30	37	0,9921875	-0.2343750	0.2890625

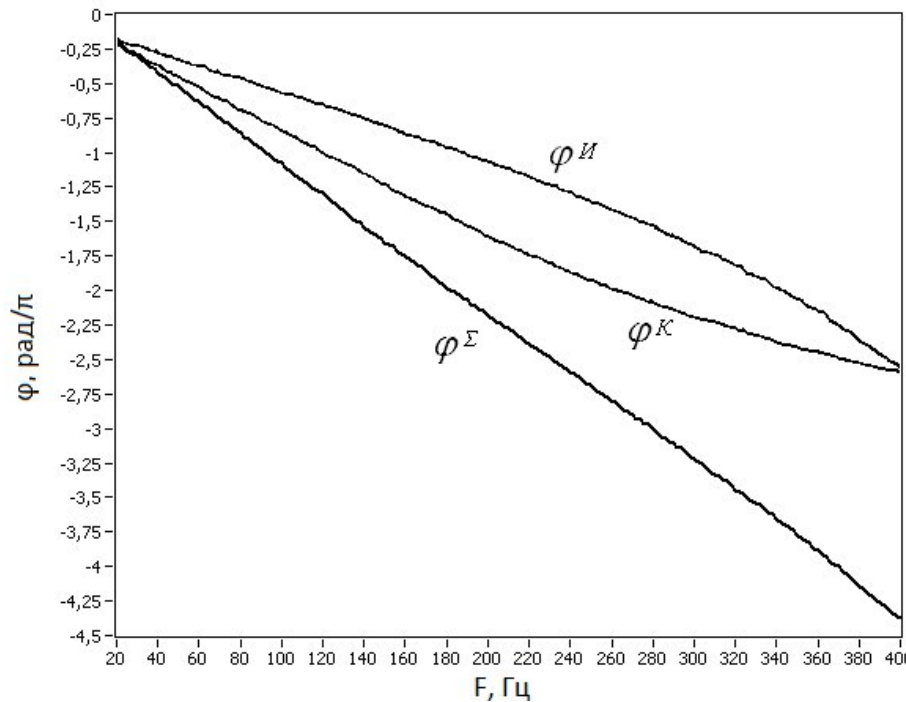
Экспериментальное исследование фазовых корректоров



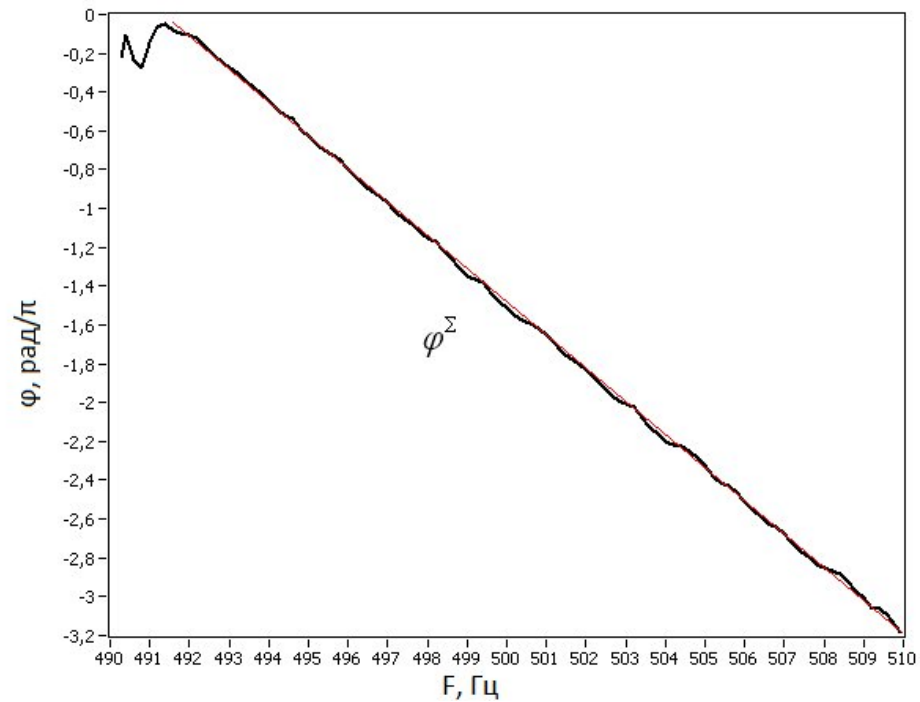
Прохождение последовательности прямоугольных импульсов через исходный (слева) и скорректированный (справа) видеотракт

Экспериментальное исследование фазовых корректоров

нелинейность фазы достигает 12°



нелинейность фазы не превышает 2°



**Измерение ФЧХ скорректированного видео- (слева)
и радио- (справа) трактов**

- на основе всестороннего анализа систематических ошибок аналитических подходов к синтезу цифровых цепей коррекции фазовых искажений получена дискретная модель корректоров и компенсаторов дисперсии на основе цифровых фазовых фильтров, которая, в отличие от известных моделей, позволяет устранить ошибки аппроксимации требуемых характеристик и ошибки квантования параметров при практической реализации устройства;
- предложена методика синтеза рекурсивных фазовых фильтров непосредственно на квантованном целочисленном параметрическом пространстве с использованием поисковых методов нелинейного математического программирования, позволяющих находить технические решения фазовых корректоров и компенсаторов частотной дисперсии с учётом совокупности требований к их частотным характеристикам;
- получены целочисленные решения как для цифровых корректоров фазовых искажений сигнальных широкополосных (видеотрактов) и узкополосных (радиотрактов) трактов, так и для компенсаторов линейно возрастающей и линейно падающей частотной дисперсии в линии связи. Устойчивость и работоспособность, отсутствие ошибок квантования коэффициентов при практической реализации, а также соответствие характеристик полученных фазовых фильтров теоретическим расчетам было подтверждено экспериментально. В отличие от решений, полученных другими методами, они обладают высоким быстродействием и малой вносимой в сигнал задержкой.

Практическая значимость

- предложенный метод синтеза позволяет получить решения с заданной конечной разрядностью коэффициентов, что позволяет избежать дополнительных операций округления или усечения при практической реализации фазового фильтра, а это, в свою очередь, приводит к нулевой ошибке квантования при его аппаратной реализации;
- полученные в результате синтеза цифровые фазовые корректоры позволяют успешно компенсировать фазовые искажения как широкополосного видеотракта, так и узкополосного радиоканала;
- разработанные алгоритмы требуют для их практической реализации небольших вычислительных ресурсов, что позволяет использовать их в системах реального времени;
- разработанные универсальная методика и программа расчёта отклика рекурсивного фазового фильтра, позволяет провести предварительную оценку вычислительных затрат при программной реализации фазовых корректоров и компенсаторов частотной дисперсии.

Результаты диссертационного исследования использовались:

- при оптимизации алгоритма для обработки сигналов с фазовой манипуляцией в рамках СЧ ОКР «ЦОС-ННГУ»;
- в учебном процессе и научно-исследовательской работе на кафедре радиотехники радиофизического факультета ННГУ им.Н.И.Лобачевского.

Список основных публикаций по теме работы

По результатам работы были опубликованы:

5 статей в журналах ВАК:

Бугров, В.Н. Синтез целочисленных цифровых КИХ-фильтров с линейной фазой / В.Н.Бугров Н.С.Морозов // Цифровая обработка сигналов. — 2016. — №1. — С.14-19.

Морозов, Н.С. Синтез фазовых корректоров на основе цифровых фазовых цепей / Н.С.Морозов, В.Н. Бугров // Проектирование и технология электронных средств. — 2020. — №4. — С.15-22.

Фитасов Е.С. Система синхронизации и локального позиционирования на базе беспроводных сетей / Е.С.Фитасов, Д.Н.Ивлев, Н.С.Морозов, Д.В.Савельев // Датчики и системы. — 2017. — № 8-9. — С.20-26.

Бугров, В.Н. Коррекция фазовых искажений в сигнальном тракте гидроакустического датчика / В.Н.Бугров, Е.С.Фитасов, Н.С.Морозов, В.В.Сатаев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. — 2021. — С.57-66.

3 статьи в журналах, входящих в РИНЦ:

Бугров В.Н. Проектирование цифровых фильтров малой разрядности с целочисленными коэффициентами / В.Н.Бугров, Н.С.Морозов // Современная электроника. — 2018. — №3. — С.56-63

Бугров В.Н. Поисковые технологии проектирования целочисленных цифровых фильтров / В.Н.Бугров, Н.С.Морозов // Компоненты и технологии. — 2015. — №1. — С.122-128

Бугров В.Н. Фазовая линейность целочисленных КИХ-фильтров / В.Н.Бугров, Н.С.Морозов // Компоненты и технологии. — 2020. — №10. — С.113-120.

5 публикаций тезисов докладов конференций, входящие в РИНЦ

**патент RU2691528C1 на систему бесконтактной передачи
электроэнергии для дверей транспортного средства**

- 12-я международная конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации» ПТСПИ-2017;
- 21-я международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2017;
- III научно-техническая конференция «Радиолокация. Теория и практика», ННИИРТ, 2017г.;
- Двадцать первая научная конференция по радиофизике, ННГУ, 2017г.
- 18-я международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» ДСПА-2016;
- 20-я международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2016;
- Двадцатая научная конференция по радиофизике, ННГУ, 2016г.;

Дискретная модель корректоров и компенсаторов дисперсии на основе цифровых фазовых фильтров позволяет устранить ошибки аппроксимации и ошибки квантования параметров за счет табулированного представления требуемых характеристик и получения решения с заданной конечной разрядностью коэффициентов при практической реализации корректоров.

Методика синтеза рекурсивных фазовых корректоров и компенсаторов частотной дисперсии на дискретной сетке квантованных параметров с использованием поисковых методов нелинейного математического программирования позволяет находить технические решения с учётом, во-первых, совокупности требований к частотным характеристикам, а во-вторых, с учетом заданных аппаратных ограничений на разрядность коэффициентов.

Алгоритм и программа расчёта отклика рекурсивного фазового фильтра, позволяют провести предварительную оценку вычислительных затрат при программной реализации фазовых корректоров и компенсаторов.

Синтезированные рекурсивные фазовые фильтры устойчивы, их характеристики и быстродействие соответствуют проведенной оценке вычислительных затрат.