

Научная статья

УДК 621.372

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.3.28>

Синтез компенсаторов частотной дисперсии на основе цифровых фазовых цепей

В. Н. Бугров, Д. В. Савельев, О. Е. Кудряшова[✉], В. В. Сатаев

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Российская Федерация, 603022, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23
olga.kudryashova@rf.unn.ru[✉]

Аннотация. Рассматриваются вопросы решения задачи многофункционального синтеза цифрового фазового БИХ-фильтра с линейной дисперсионной характеристикой, необходимой для компенсации дисперсионных искажений в полосе радиоканала, методами нелинейного математического программирования в целочисленном пространстве восьмибитовых параметров. Приводятся характеристики и оптимальные параметры синтезированного цифрового компенсатора.

Ключевые слова: фазовый фильтр; цифровой компенсатор дисперсии; дискретный синтез; целевая функция

Финансирование: работа выполнена в рамках научного проекта «Интеллектуальные системы контроля воздушного пространства» Передовой инженерной школы ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Введение. Актуальной задачей цифровой обработки сигналов является коррекция дисперсионных искажений в сигнальных трактах различных аналого-цифровых систем. Как известно, данные в каналах связи обычно кодируются последовательностью импульсов, несущих полезную информацию. Влияние частотной дисперсии приводит к искажению или

даже полному перекрытию этих импульсов [1]. Так, хроматической дисперсии волоконного световода SMF 28 (фирмы CORNING) в диапазоне 1309 – 1311 нм соответствует график 1 на рис. 1. Таким образом, для компенсации дисперсии волны в световоде дисперсионная характеристика компенсатора должна соответствовать пунктирной линии 2.

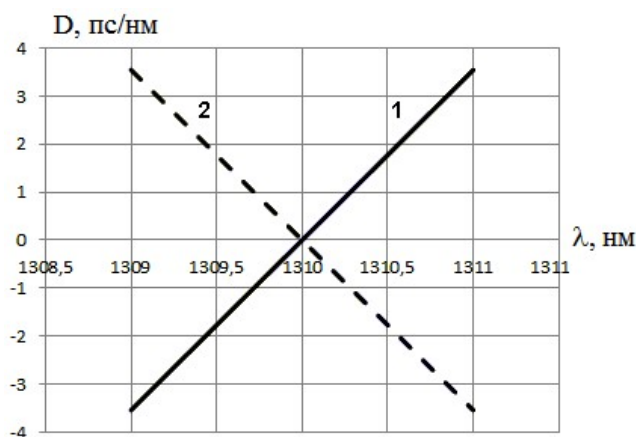


Рис. 1. Дисперсионные характеристики линии передачи и компенсатора дисперсии
Fig. 1. Dispersion characteristics of the transmission link and dispersion compensator

© Бугров В. Н., Савельев Д. В., Кудряшова О. Е., Сатаев В. В., 2022.

Для цитирования: Бугров В. Н., Савельев Д. В., Кудряшова О. Е., Сатаев В. В. Синтез компенсаторов частотной дисперсии на основе цифровых фазовых цепей // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 3 (55). С. 28-36. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.3.28>

В стационарных же структурах отсутствуют волновые процессы и частотная дисперсия обусловлена различным временем обработки спектральных составляющих широкополосного сигнала. Так, сильную частотную дисперсию имеют линейные БИХ-фильтры с постоянными коэффициентами, что даёт возможность использовать такие дискретные системы для компенсации дисперсионных искажений в полосе радиоканала или сигнального тракта. Формально обработку спектральных составляющих в системе определяет, как известно, групповое время запаздывания (ГВЗ), как частотная производная от фазовой характеристики фильтра:

$$\tau_{gr} = -\frac{\partial \varphi}{\partial \omega} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial \nu}, \quad \omega = 2\pi\nu. \quad (1)$$

Тогда коэффициент дисперсии $D_{(\nu)}$ как скорость изменения группового времени запаздывания по частоте определяется следующим образом:

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

Примеры частотных характеристик ГВЗ и дисперсии для заданного закона изменения фазы приведены ниже (рис. 4).

Таким образом, ГВЗ и дисперсия $D_{(\nu)}$ являются удобной количественной мерой изменения модификации фазовой характеристики фильтра. Коэффициент дисперсии позволяет проводить оценку очень малых фазовых девиаций, что и необходимо для проектирования цифрового компенсатора дисперсии (ЦКД) с заданным законом изменения дисперсионной характеристики [2].

Наиболее целесообразно в структуре построения цифрового компенсатора использовать рекурсивные фазовые (все пропускающие) фильтры соответствующего порядка, так как они не вносят амплитудные искажения при коррекции фазовых или дисперсионных искажений сигнального тракта. Очевидно, что при построении ЦКД необходимо наиболее адекватное представление дисперсионной характеристикой компенсатора на стадии

его проектирования. Стандартному классическому расчёту фазового БИХ-фильтра по его аналоговому прототипу [3, 4] свойственны, как известно, систематические ошибки как аналитической аппроксимации характеристик аналогового прототипа компенсатора, так и ошибки квантования постоянных его коэффициентов на этапе реализации ЦКД на выбранной цифровой платформе, что не позволяет использовать аналитические подходы к параметрическому синтезу ЦКД.

Указанные систематические ошибки могут быть устранены при синтезе ЦКД численными методами нелинейного дискретного программирования с заданной системой прямых и функциональных ограничений [5], дающих возможность работать не с аналитическим, а с дискретным табулированным представлением характеристик. Это, в свою очередь, позволяет заменить аналитическую аппроксимацию простой оцифровкой фазовых характеристик ЦКД и осуществлять синтез технического решения поисковыми методами многокритериальной оптимизации.

Ошибки квантования также легко исключить, осуществив дискретизацию и параметрического пространства коэффициентов компенсатора только теми значениями, при которых ошибка квантования равна нулю. При использовании в цифровой платформе вычислений в формате с фиксированной точкой (ФТ) наиболее целесообразно осуществлять дискретизацию параметрического пространства коэффициентов целочисленным кодом данного представления [6]. Это обеспечивает максимальное быстродействие работы ЦКД в реальном времени, а также позволяет эффективно применять технику динамического квантования его коэффициентов при проектировании высокоскоростных мало-разрядных компенсаторов дисперсии в диапазоне рабочих частот. При необходимости целочисленное решение может быть трансформировано в вещественное квантованное решение формата ФТ, используя для этого однозначную связь це-

лочисленных и вещественных квантованных коэффициентов ЦКД:

$$C_{float} = C_{int} / 2^{W_k-1}, \quad (3)$$

где W_k – разрядность коэффициента, C_{int} – целочисленный код коэффициента, а C_{float} – его вещественный код.

Таким образом, **целью** данной публикации является применение дискретного нелинейного программирования для эффективного синтеза целочисленных ЦКД малой разрядности при максимальном выполнении требований к совокупности требуемых характеристик компенсатора, реализованного на цифровой фазовой цепи. Вопросы конкретной реализации синтезированных решений будут подробно рассмотрены в последующей публикации.

Моделирование и постановка задачи синтеза ЦКД. Цифровая фазовая (все-пропускающая) цепь, на основе которой реализуется компенсатор частотной дисперсии, имеет единичный модуль коэффициента передачи на всём частотном интервале Найквиста и сложный закон изменения фазочастотной характеристики, а следовательно, и её производных – ГВЗ и частотной дисперсии. В работах [3, 4] приводится аналитический расчёт комплексной передаточной функции рекурсивного фазового фильтра заданного порядка и показано, что коэффициенты числителя и знаменателя передаточной характеристики фильтра вещественны и зеркальны.

В настоящее время рекурсивные фильтры, в том числе и фазовые, наиболее рационально реализовывать на звеньях второго порядка в каскадной, последовательной форме [7]. С учётом зеркальности коэффициентов передаточная функция рекурсивного ЦКД, состоящего из каскадного соединения m -фазовых звеньев второго порядка ($m=N/2$, где N – общий порядок фильтра), имеет следующий вид [8]

$$H(z) = \prod_{i=1}^m \frac{a_{2i} + a_{1i}z^{-1} + a_{0i}z^{-2}}{a_{0i} + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}}, \quad (4)$$

где все постоянные коэффициенты задаются целочисленным кодом формата ФТ.

При этом разностное уравнение для i -го звена выглядит так:

$$y = (ax + ax + ax - ay - ay) / a, \quad (5)$$

Где x_n , y_n – входная и выходная целочисленные временные последовательности, a_{0i} – нормирующий power-of-two коэффициент

$$a \in \{2\}, \quad q = \overline{0}, \overline{W-1}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Таким образом, при расчёте отклика фазового звена кроме традиционных операций сложения, умножения и задержки на такт присутствует операция сдвига на $B = \log_2 a_0$ бит, с помощью которой реализуется целочисленное деление на power-of-two коэффициент a_0 . При реализации на ПЛИС топология целочисленного звена фазового ЦКД содержит 4 сумматора, 4 линии задержки на такт, 5 умножителей и один сдвиговый регистр (рис. 2).

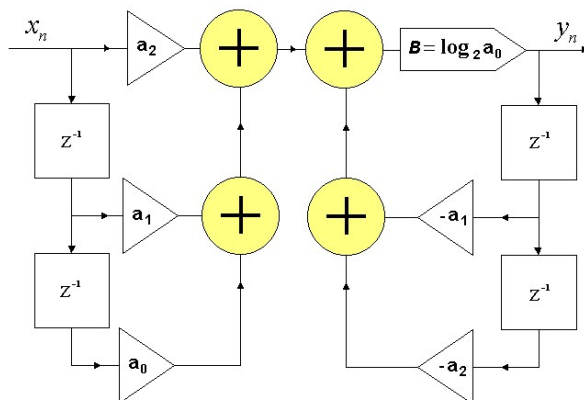


Рис. 2. Структура звена рекурсивного ЦКД

Fig. 2. Structure of a recursive digital dispersion compensator (DDC)

Условие устойчивости рекурсивного фазового звена может быть записано так:

$$|Zp_i| < r_{\max}, \quad (6)$$

где $r_{\max}$ – допустимый максимальный радиус полюсов p_i передаточной функции фильтра в z -плоскости, при котором в системе не возникают предельные циклы.

Задача целочисленного нелинейного программирования (ЦНП) в общем виде может быть записана так:

$$F^o(IX^o) = \min F(IX) \quad IX \in I^{2m}, \quad (7)$$

$$-2^{W_k-1} < a_{di} < 2^{W_k-1} \quad d=\overline{1,2} \quad i=\overline{1,m}, \quad (8)$$

$$a_{0i} \in \{2^q\}, \quad q = \overline{0, W_k-1} \quad i = \overline{1,m}, \quad (9)$$

$$|Zp_j| < r_{\max} \quad j=\overline{1,2m}, \quad (10)$$

где m – число фазовых звеньев, d – индекс коэффициента передаточной функции фазового звена (4), IX – вектор целочисленных коэффициентов, $F(IX)$ – целевая функция.

Экстремальная задача дискретного синтеза (7) записана относительно целочисленного пространства I^{2m} параметров (коэффициентов фазового фильтра) размерностью $2m$, при этом по ограничению зеркальности возможно варьировать только коэффициенты a_{1i} и a_{2i} . Прямые ограничения (8) определяют область проектирования, а ограничения (10) отвечают за устойчивость синтезируемого ЦКД и реализуются в поисковом алгоритме методом штрафных функций [9, 10].

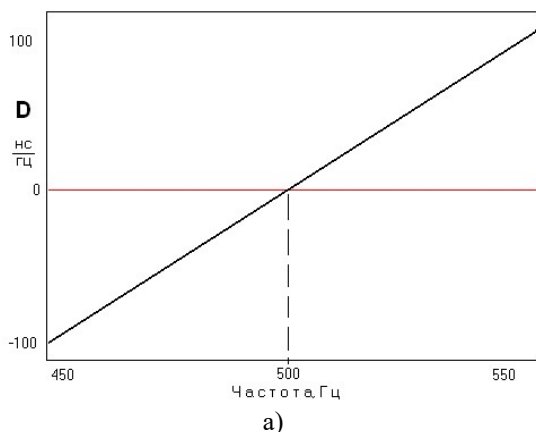
Численное решение задачи синтеза (7) осуществлялось с помощью поискового

алгоритма направленного сканирования на детерминированной сетке квантованных параметров формата ФТ [10] в целочисленной области проектирования (8). Вектор IX^o , минимизирующий скалярную целевую функцию $F(IX)$ на целочисленном множестве (8), является Парето-эффективным решением задачи синтеза ЦКД по требуемому закону изменения дисперсионной характеристики.

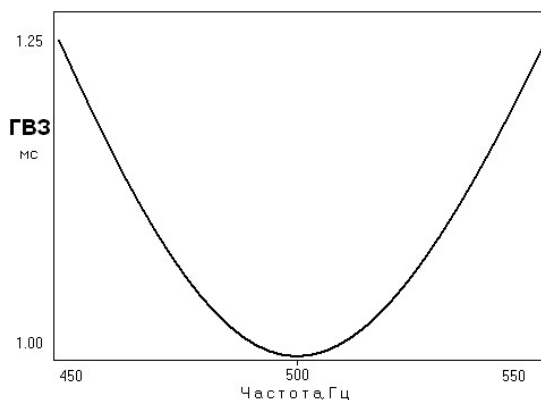
Дискретный синтез цифрового компенсатора. В качестве примера рассмотрим задачу поискового проектирования малоразрядного ЦКД по линейно возрастающему закону изменения его дисперсионной характеристики (рис. 3, а) и необходимому параболическому закону изменения ГВЗ компенсатора (рис. 3, б). При этом поисковый синтез технического решения осуществлялся с учётом требуемого радиуса полюсов передаточной функции компенсатора в z -плоскости.

Спецификационные требования для многофункционального синтеза восьмибитового рекурсивного ЦКД на фазовых звеньях второго порядка определялись так:

1. Центральная частота канала: 500 Гц.
2. Частотная полоса компенсации: 450 – 550 Гц.
3. Разрядность коэффициентов: 8 бит.
4. Порядок фазового фильтра: 4.
5. Допустимый радиус полюсов: 0,9.
6. Частота семплирования: 2 кГц.



а)



б)

Рис. 3. Требуемая дисперсионная характеристика (а) и характеристика ГВЗ (б) компенсатора
Fig. 3. Required dispersion characteristic (a) and group delay characteristic (GD) (b) of the compensator

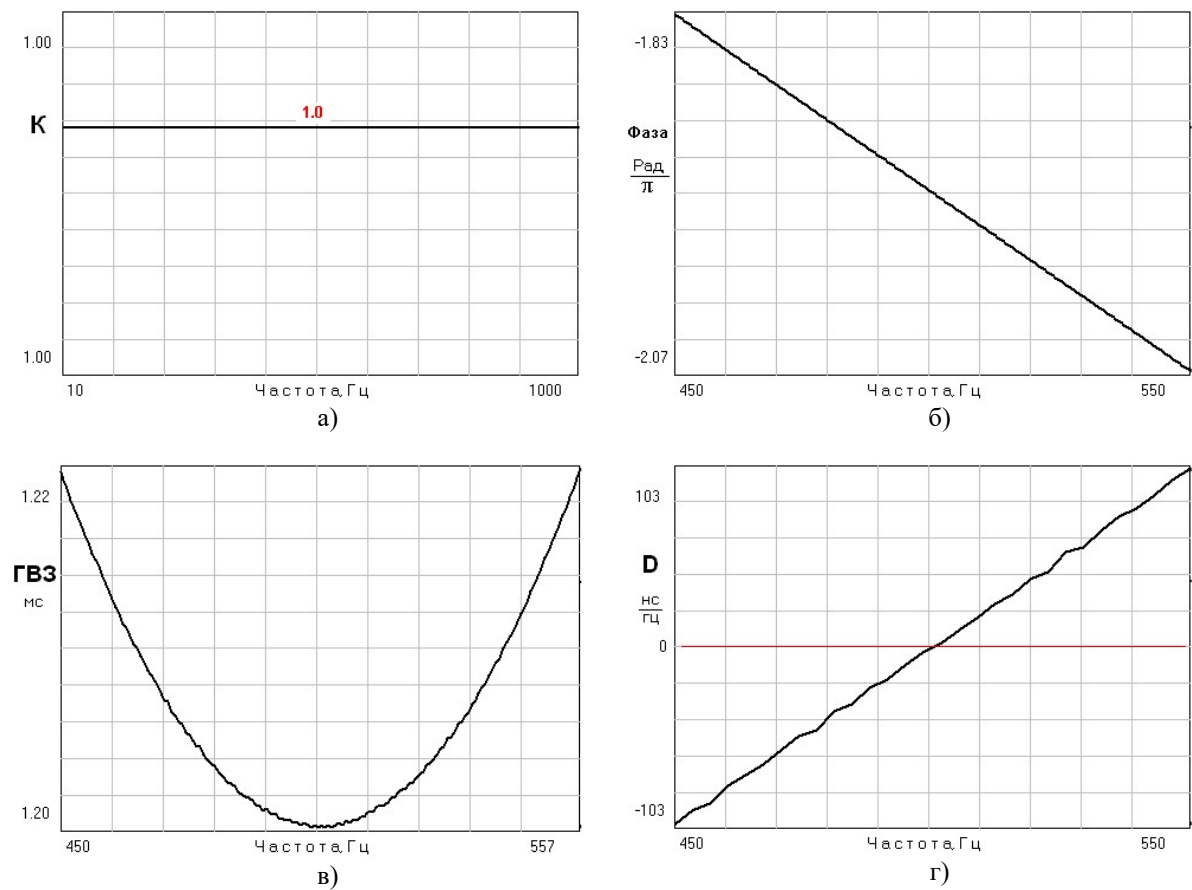


Рис. 4. Характеристики ЦКД: а) АЧХ; б) ФЧХ в полосе пропускания; в) ГВЗ в полосе пропускания; г) частотная дисперсия

Fig. 4. Characteristics of the DDC: a) amplitude-frequency characteristic; b) phase-frequency characteristic in the passband; c) group delay in the passband; d) frequency dispersion

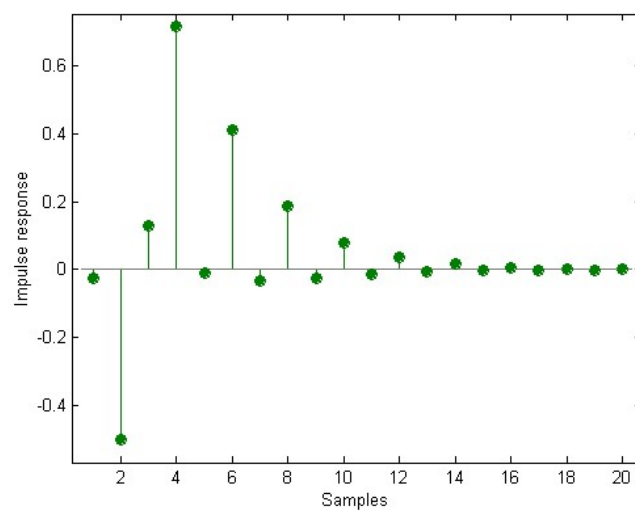


Рис. 5. Импульсная характеристика компенсатора
 Fig. 5. Impulse response of the compensator

При проектировании рекурсивного ЦКД по двум требуемым характеристикам целевая функция определялась в виде взвешенной суммы частных целевых функций $f_{ГВЗ}(IX)$ и $f_{дисп}(IX)$, обеспечивающих выполнение требуемых законов изменения ГВЗ и дисперсии в полосе компенсации:

$$F(IX) = \beta f_{ГВЗ}(IX) + \beta f_{дисп}(IX). \quad (11)$$

При этом обе частные целевые функции формировались по критерию минимума среднеквадратичного отклонения от требуемого закона:

$$f(IX) = \frac{1}{p} \sum [Y_n(IX) - Y_n^T]^2, \quad (12)$$

где $Y_n(IX)$ – текущее значение характеристики компенсатора на n -й дискретной частоте диапазона компенсации, а Y_n^T – требуемое значение характеристики.

Задача целочисленного синтеза восьмибитового ЦКД в форме последовательного соединения двух фазовых БИХ-звеньев записывалась так:

$$F(IX) = \min F(IX) \quad IX \in I, \quad (13)$$

$$-128 < a_i < 128 \quad i = \overline{1, 2}, \quad (14)$$

$$a_i = 128 \quad i = \overline{1, 2}, \quad (15)$$

$$|Zp_j| < 0,9 \quad j = \overline{1, 4}. \quad (16)$$

Время решения задачи (13) на стандартном персональном компьютере не превышало двух минут при полном выполнении прямых и функциональных ограничений. Квантованные оптимальные коэффициенты ЦКД приведены в таблице.

Оптимальные восьмибитовые коэффициенты ЦКД
Optimal eight-bit DDC coefficients

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

Контрольный анализ найденного оптимального решения в пакете MATLAB полностью подтвердил синтезированные характеристики компенсатора (рис. 4). При этом время задержки импульсного отклика компенсатора было минимальным и не превышало четырёх семплов (рис. 5).

Практическая реализация синтезированного ЦКД на микропроцессорном контроллере показала, что при нулевом входе и максимальном радиусе полюсов 0,67 малые предельные циклы в системе отсутствуют.

Заключение. Изложенные в статье материалы подтверждают эффективность проектирования цифровых компенсаторов частотной дисперсии в полосе сигнального тракта или канала связи численными методами нелинейного математического программирования с заданной системой прямых и функциональных ограничений. При этом показано, что применение алгоритма поиска на дискретной сетке квантованных параметров позволяет синтезировать технические решения с нулевой ошибкой реализации на цифровой платформе или кристалле с заданной длиной слова коэффициентов. Применением дискретного поискового синтеза получено малоразрядное решение компенсатора с линейно возрастающей дисперсией в частотной полосе коррекции при минимальной по задержке импульсного отклика инерционности цифрового компенсатора. Современные алгоритмы дискретной минимизации позволяют решать такие проектные задачи надёжно и эффективно при выполнении всех внешних требований и ограничений к работе ЦКД.

Список источников

1. Волоконные решетки показателя преломления и их применение / С. А. Васильев, О. И. Медведков, И. Г. Королев и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103.
2. Бугров В. Н., Малахов В. А., Раевский А. С. Моделирование и синтез компенсаторов дисперсии волоконно-оптических линий связи // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 2-1. С. 49–54.
3. Vaidyanathan P. P. Multirate systems and filters banks. New Jersey: Prentice hall, 1993. 911 p.
4. Phillip A. Regalia, Sanjit K. Mitra, P. P. Vaidyanathan. The Digital All-Pass Filter: A Versatile Signal Processing Building Block // Proceedings of the IEEE. January 1988. Vol. 76, No. 1, Pp. 19-37.
5. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы. М.: Наука, 1990. 488 с.
6. Emmanuel Ifeachor, Barrie Jervis. Digital Signal Processing: A Practical Approach (2nd Edition). Harlow: Pearson Education, 2002. 905 p.
7. Dempster A.G., Macleod M.D. IIR digital filter design using minimum adder multiplier blocks // IEEE Trans.on Circuits and Systems-II. 1998. Vol. 45. No. 6. Pp. 761-763.
8. Коррекция фазовых искажений в сигнальном тракте гидроакустического датчика / В.Н. Бугров, Е.С. Фитасов, Н.С. Морозов и др. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 2 (42). С. 57–66.
9. Zangwill, Willard I. Non-linear programming via penalty functions. Management Science. Jan 1967. Vol. 13. Iss. 5. Pp. 344-358.
10. Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и рациональных решений: в 2 томах / Б. С. Воинов В. Н. Бугров, Б. Б. Воинов и др. // Российская акад. наук, М-во образования и науки РФ. 2-е доп. науч. электронное изд. М.: Наука, 2007. 730 с.

Статья поступила в редакцию 06.08.2022; одобрена после рецензирования 01.09.2022; принята к публикации 12.09.2022

Информация об авторах

БУГРОВ Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники радиофизического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, моделирование аналоговых и цифровых радиоэлектронных систем, разработка компьютерных систем их автоматизированного проектирования, компьютерные экспертные системы. Автор 100 научных публикаций.

САВЕЛЬЕВ Дмитрий Валерьевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры радиотехники радиофизического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, моделирование аналоговых и цифровых радиоэлектронных систем, разработка компьютерных систем их автоматизированного проектирования. Автор 17 научных публикаций.

КУДРЯШОВА Ольга Евгеньевна – преподаватель кафедры радиотехники радиофизического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, цифровой спектральный анализ, радиолокация, моделирование аналоговых и цифровых радиоэлектронных систем. Автор 13 научных публикаций.

САТАЕВ Василий Валентинович – преподаватель кафедры радиотехники радиофизического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, моделирование аналоговых и цифровых радиоэлектронных систем, разработка компьютерных систем их автоматизированного проектирования, компьютерные экспертные системы. Автор 12 научных публикаций.

Вклад авторов:

Бугров В. Н. – научное руководство, концепция исследования, написание текста рукописи.

Савельев Д. В. – сбор и анализ данных.

Кудряшова О. Е. – обзор публикаций, редактирование текста статьи.

Сатаев В. В. – критический обзор, научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.372

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.3.28>**Design of Frequency Dispersion Compensators Based on Digital Phase Circuits****V. N. Bugrov, D. V. Savel'ev, O. E. Kudryashova[✉], V. V. Sataev**

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,

23, Prospekt Gagarina (Gagarin Avenue) BLDG 2, Nizhny Novgorod, 603022, Russian Federation

olga.kudryashova@rf.unn.ru[✉]**Keywords:** the IIR-phase filter; digital dispersion compensator; integer nonlinear programming; multifunctional synthesis; criterion function**ABSTRACT**

Introduction. Digital phase circuits or filters based on them are widely used in digital signal processing to correct for dispersion distortions in signal paths and communication links. Phase digital IIR filters have a unity gain modulus over the entire Nyquist zone and a tricky law of change in the phase-frequency characteristic, and, consequently, its derivatives - group delay and frequency dispersion. The feasibility of implementing the required law of change in the dispersion characteristic allows one to use such a phase filter to correct for dispersion distortions in a narrow-band radio channel. We shall note that when designing digital frequency dispersion compensators, the engineer deals with modest phase deviations when compensating for the frequency dispersion of a signal in a communication channel. This requires the most adequate representation of the phase-frequency characteristic and its derivatives (group delay and frequency dispersion) both at the stage of synthesis of a technical solution and at the stage of its implementation on a specific digital platform. However, the typical classical calculation of the phase IIR filter is characterized by both systematic errors in the analytical approximation of the characteristics of an analog prototype at the stage of synthesis of a technical solution, and quantization errors of the coefficients at the stage of practical implementation of a technical solution on a selected digital platform. These errors can be eliminated when designing a dispersion compensator with the use of a state-of-the-art numerical methods of discrete programming, which allow working not with an analytical, but with a discrete tabulated representation of the characteristics. This allows one to replace the analytical approximation procedure with a simple digitization of the required characteristics. Besides, the error in digitizing the phase characteristics of even a very complicated shape can be minimized by appropriate choice of frequency sampling step. The **aim** of the work was the usage of integer nonlinear programming for the efficient synthesis of integer digital dispersion compensator (DDC) with low number of bits and the maximum fulfillment of the requirements for the set of required characteristics of the compensator implemented on a digital phase circuit. When using calculations with the fixed-point format in the digital filtering algorithm, it is reasonable to discretize the parametric space of coefficients with an integer code. The ideology of integer programming allows to effectively design integer dispersion compensators with the complete fulfillment of the requirements for the set of required characteristics. Moreover, the use of dynamic coefficient quantization technology allows to obtain technical solutions with a minimum bit depth of data representation. **Conclusion.** It was shown that the application of the searching algorithm on a discrete grid of quantized parameters allows one to synthesize technical solutions with a zero implementation error on a digital platform or a crystal with a given coefficient word length. With the use of discrete search synthesis, we obtained a low bit depth compensator solution with a linearly increasing dispersion in the correction band and a minimum digital compensator inertia in terms of the impulse response delay. State-of-the-art discrete minimization algorithms allow to reliably and efficiently solve such design problems while meeting all external requirements and limitations on the operation of the DDC.

Funding: the work was carried out within the framework of the research project "Intelligent airspace control systems" of the Advanced Engineering School at UNN.

REFERENCES

1. Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G. et al. Volokonnye reshetki pokazatelya prelomleniya i ih primenenie [Fiber gratings of the refractive index and their application]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics]. 2005. Vol. 35. No 12. Pp. 1085–1103. (In Russ.).
2. Bugrov V.N., Malakhov V.A., Raevsky A.C. Modelirovanie i sintez kompensatorov dispersii volokonnoopticheskikh linij svyazi [Simulation and synthesis of dispersion compensators for fiber-optic communication lines]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod]. 2012. No 2-1. Pp. 49-54. (In Russ.).
3. Vaidyanathan P. P. Multirate systems and filters banks. New Jersey: Prentice hall, 1993. 911 p.
4. Phillip A. Regalia, Sanjit K. Mitra, P. P. Vaidyanathan. The Digital All-Pass Filter: A Versatile Signal Processing Building Block. *Proceedings of the IEEE*. January 1988. Vol. 76, No. 1, Pp. 19-37.
5. Minu M. *Matematicheskoe programmirovaniye. Teoriya i algoritmy*. [Mathematical programming. Theory and algorithms]. Moscow, Nauka, 1990, 488 p. (In Russ.).
6. Emmanuel Ifeakor, Barrie Jervis. Digital Signal Processing: A Practical Approach (2nd Edition). Harlow: Pearson Education, 2002. 905 p.
7. Dempster A.G., Macleod M.D. IIR digital filter design using minimum adder multiplier blocks. *IEEE Trans.on Circuits and Systems-II*. 1998. Vol. 45. No. 6. Pp. 761-763.
8. Bugrov V.N. Fitasov E.S., Morozov N.S., Sataev V.V. Korrekciya fazovykh iskazhenij v signal'nom trakte gidroakusticheskogo datchika [Correction of phase distortions in the signal path of the hydroacoustic sensor]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy* [Radio engineering and telecommunication systems]. 2021. № 2. Pp. 57 – 66. (In Russ.).
9. Zangwill, Willard I. Non-linear programming via penalty functions. *Management Science*. Jan 1967. Vol. 13. Iss. 5. Pp. 344-358.
10. Voinov B.S., Bugrov V.N., Voinov B.B. Informacionnye tekhnologii i sistemy: poisk optimal'nyh, original'nyh i racional'nyh reshenij: v 2 tomah [Informacionnye tekhnologii i sistemy: poisk optimal'nyh, original'nyh i racional'nyh reshenij]. Moscow: Nauka, 2007. 730 p. (In Russ.).

The article was submitted 06.08.2022; approved after reviewing 01.09.2022; accepted for publication 12.09.2022

For citation: Bugrov V. N., Savel'ev D. V., Kudryashova O. E., Sataev V. V. Design of Frequency Dispersion Compensators Based on Digital Phase Circuits. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 3 (55). Pp.28–36. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.3.28>

Information about the authors

Vladimir N. Bugrov – Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor at the Department of Radio Engineering of Radio Physics Faculty, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Research interests – digital signal processing, modeling of analog and digital radio-electronic systems, development of computer systems for their automated design, computer expert systems. The author of 100 scientific publications.

Dmitry V. Savelyev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer at the Department of Radio Engineering of Radio Physics Faculty, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Research interests – digital signal processing, modeling of analog and digital radio-electronic systems, development of computer systems for computer-aided design. The author of 17 scientific publications.

Olga E. Kudryashova – lecturer at the Department of Radio Engineering of Radio Physics Faculty, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Research interests – digital signal processing, digital spectral analysis, radar, modeling of analog and digital radio-electronic systems. The author of 13 scientific publications.

Vasily V. Sataev – lecturer at Department of Radio Engineering of Radio Physics Faculty, National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Research interests – digital signal processing, modeling of analog and digital radio-electronic systems, development of computer systems for computer-aided design, computer expert systems. The author of 12 scientific publications.

Contribution of authors:

Bugrov V. N. – supervision, concept of research, writing the manuscript.

Savelyev D. V. – data collection and analysis.

Kudryashova O. E. – literature review, editing the article.

Sataev V. V. – critical review, scientific editing.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.