

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ШУМОВ, РАЗРЫВОВ В СИГНАЛЕ, ЭФФЕКТОВ КВАНТОВАНИЯ И НЕЛИНЕЙНОСТИ

Цуриков В.С., Воронов А.С.

Алтайский государственный технический университет, 656038, г. Барнаул, Россия

Аннотация. Разработана и исследована компьютерная модель цифрового спектрального анализатора с учетом факторов, снижающих точность измерений. Произведен сравнительный анализ устойчивости алгоритмов определения спектра сигналов при наличии шумов, разрывов в сигнале, эффектов квантования и нелинейности.

Введение

При разработке радиоэлектронных систем различного назначения одним из основных инструментов является спектральный анализ. Как правило, целью спектрального анализа является определение полной динамической характеристики исследуемой системы. Главным образом имеется ввиду амплитудно-фазовый спектр или комплексный коэффициент передачи (ККП) [3, 6]. Для измерения ККП на сегодняшний день наибольшее распространение получили цифровые анализаторы спектра, основанные на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) [1-3]. Однако на практике результаты, возвращаемые такими приборами, не всегда корректны. Это обусловлено несовершенством реальных аппаратных блоков и наличием множества факторов, снижающих точность определения спектра. Следовательно, исследование влияния таких факторов на существующие приборы является актуальной задачей. Также актуальна разработка новых приборов, позволяющих при тех же условиях производить более точные измерения. Одним из наиболее популярных инструментов, применяемых для разработки новых приборов и анализа работы существующих, является компьютерное моделирование [4, 5]. Развитие вычислительной техники сделало возможным создание максимально полных моделей, показывающих отличную сходимость результатов с реальными приборами. Целью данной работы является реализация модели цифрового спектрального анализатора, анализ факторов практической эксплуатации, и разработка модели прибора, нечувствительного к влиянию соответствующих факторов.

Разработка компьютерной модели цифрового спектрального анализатора

Обобщенная функциональная схема цифрового спектрального анализатора, представлена на рисунке 1. На рисунке отражены следующие характеристики: $S_{\text{вых1}}(\omega)$ – спектр сигнала на выходе ЦАП1; $S_{\text{ex1}}(\omega)$, $S_{\text{ex2}}(\omega)$ – спектры сигналов на входе АЦП1 и АЦП2; $\Phi_{\text{вых1}}(\omega)$ – комплексный коэффициент передачи фильтра на выходе ЦАП1; $\Phi_{\text{ex1}}(\omega)$, $\Phi_{\text{ex2}}(\omega)$ – комплексный коэффициент передачи фильтров на входе АЦП1 и АЦП2; $G(\omega)$ – комплексный коэффициент передачи исследуемой системы. Такая схема удобна при использовании АЦП с фильтром на входе и ЦАП с фильтром на выходе. Два идентичных канала позволяют избежать дополнительных вычислений за счет компенсации характеристик АЦП, ЦАП и соответствующих фильтров.

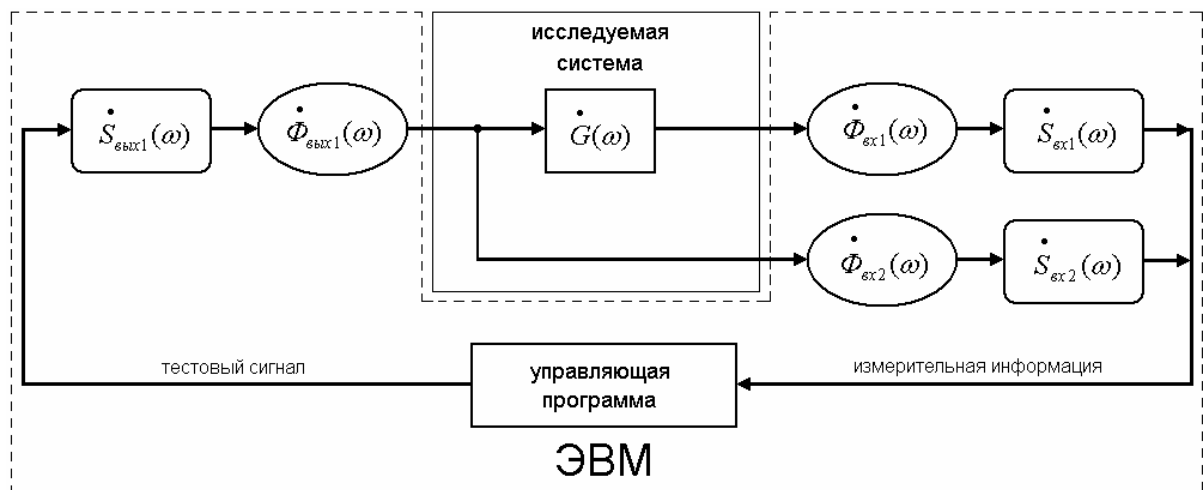


Рисунок 1 – Функциональная схема цифрового спектрального анализатора

Согласно рисунку 1 вычисление ККП исследуемой системы выглядит следующим образом:

$$G(\omega) = \frac{S_{\text{ex1}}(\omega)}{S_{\text{ex2}}(\omega)} \quad (1)$$

Формула (1) является базовой формулой для вычисления $G(\omega)$. Для определения спектральных характеристик сигналов традиционно применяется дискретное преобразование Фурье. Этот способ в теории позволяет получить как амплитудный, так и фазовый спектры сигнала. Однако при практическом использовании ДПФ гарантированно удастся получить только амплитудный спектр. Фазовая составляющая спектра при некоторых условиях теряется. Но информация о фазо-частотной характеристике (ФЧХ) исследуемой системы не менее важна.

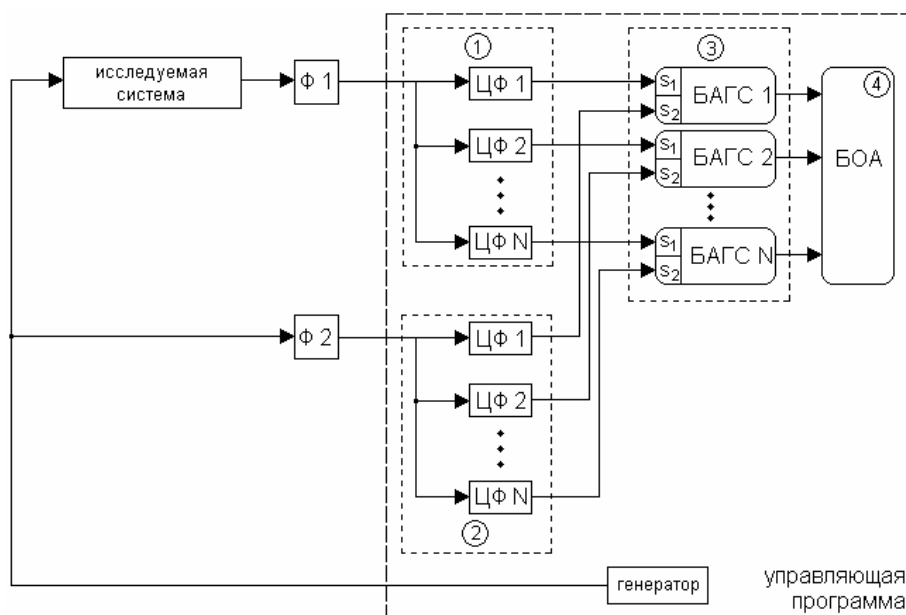


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма определения ККП с использованием набора дискретных резонаторов второго порядка

В качестве альтернативы преобразованию Фурье предложено использовать набор дискретных резонаторов второго порядка [3, 7]. Этот алгоритм устраняет, во-первых, один из недостатков преобразования Фурье – жесткую сетку частот. Частоты, которые могут быть проанализированы этим алгоритмом, ограничены только частотой дискретизации, что является важным свойством в случае, когда требуется получить подробные спектральные характеристики в узкой полосе частот. Во-вторых, на базе набора ДРВП реализован алгоритм нахождения ФЧХ исследуемых систем, отличающийся от известных минимальными вычислительными затратами и повышенной помехозащищенностью [8]. Структурная схема разработанного алгоритма вычисления ККП с использованием формулы (1) приведена на рисунке 2.

На рисунке 2 показаны: $\Phi 1$ и $\Phi 2$ – идентичный входные фильтры АЦП; блоки 1 и 2 – идентичные наборы цифровых фильтров (ДРВП) настроенных каждый на определенную частоту; 3 – набор блоков анализа гармонических составляющих (БАГС); 4 – блок окончательного анализа (БОА).

В каждом из набора (БАГС) вычисляется амплитудная и фазовая составляющие для частоты, выделяемой связанным с ним ЦФ. Функциональная схема БАГС приведена на рисунке 3. В блоке (БОА) по формуле (2) вычисляется искомый ККП.

$$G(\omega) = A(\omega) \cdot \cos \varphi'(\omega) + jA(\omega) \cdot \sin \varphi'(\omega), \quad (2)$$

где $\varphi'(\omega) = \text{unwrap}(\varphi(\omega))$

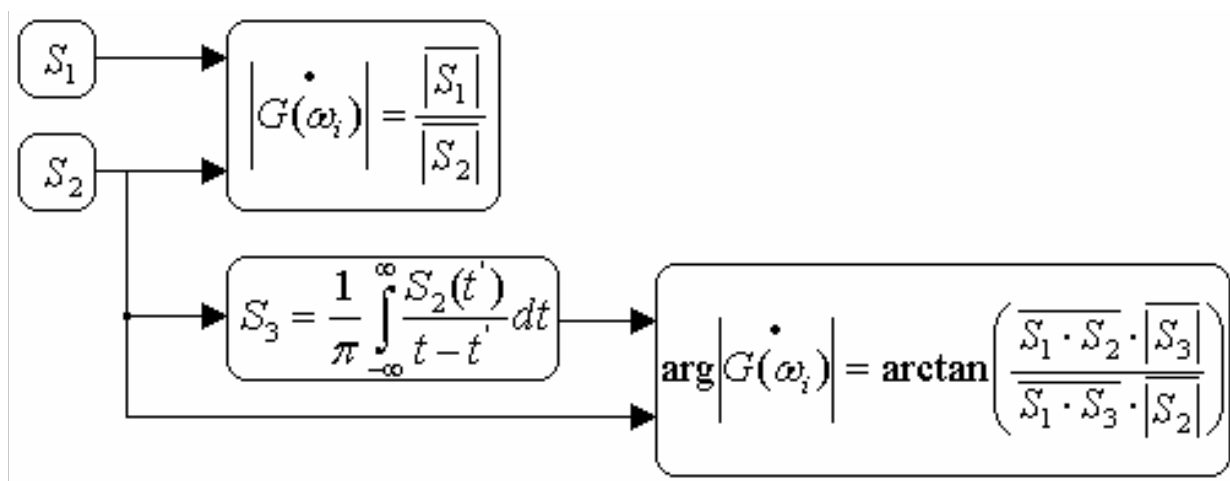


Рисунок 3 – Функциональная схема блока анализа гармонических составляющих

Была разработана компьютерная модель спектрального анализатора, реализующая описанный алгоритм определения ККП и классический алгоритм ДПФ. В разработанной компьютерной модели учтены такие влияющие факторы, как: шумы, эффекты квантования и нелинейности, разрывы в сигнале. Задачей моделирования является выяснить применимость и эффективность разработанных алгоритмов в сравнении с дискретным преобразованием Фурье.

Структура модели спектрального анализатора представлена на рисунке 4.

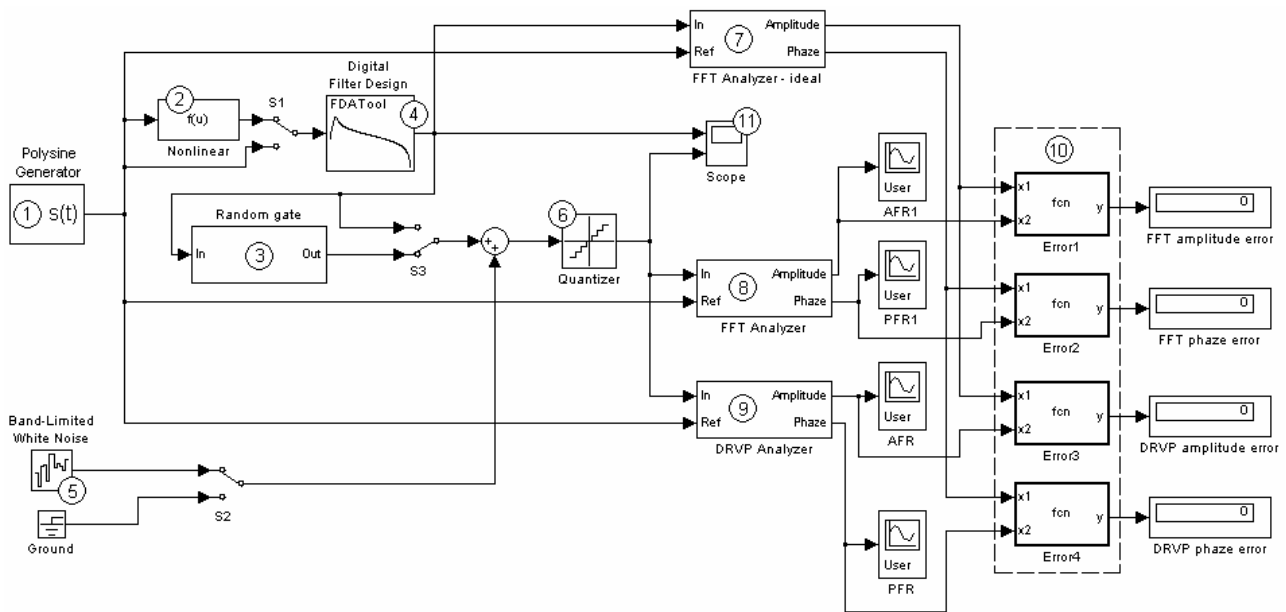


Рисунок 4 – Структурная схема модели спектрального анализатора

Модель состоит из следующих блоков:

1. Блок генерации полигармонического сигнала: $S(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$;
2. Блок нелинейности. $y(x) = \operatorname{tg}\left(\frac{\operatorname{tg}(x/10) \cdot 7}{10} \cdot 50\right)$, (вид зависимости приведен на рисунке 5);
3. Блок имитации разрывов в сигнале (рисунок 6).
4. Резонансный фильтр имитирующий исследуемую систему.
5. Блок генерации гауссова шума.
6. Блок имитации эффекта квантования.
7. Блок формирования искоемых АЧХ, ФЧХ (идентичен блоку (8)).
8. Блок Фурье анализа (рисунок 7).
9. Блок анализа с применением набора ДРВП (рисунок 8).
10. Блок сравнения полученных результатов с искомыми: $y(x_1, x_2) = \sqrt{\frac{\sum (x_1 - x_2)^2}{N}}$.
11. Осциллограф.

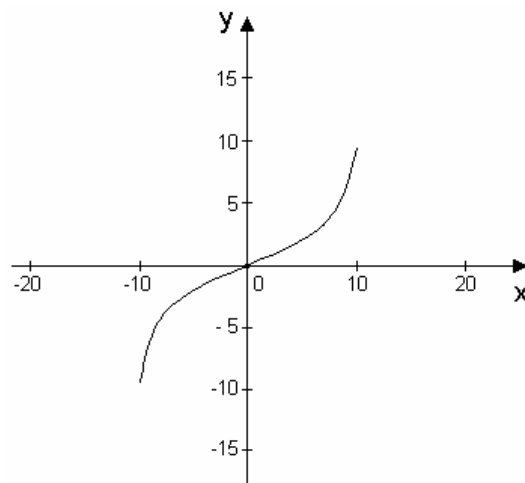


Рисунок 5 – вид функции нелинейности

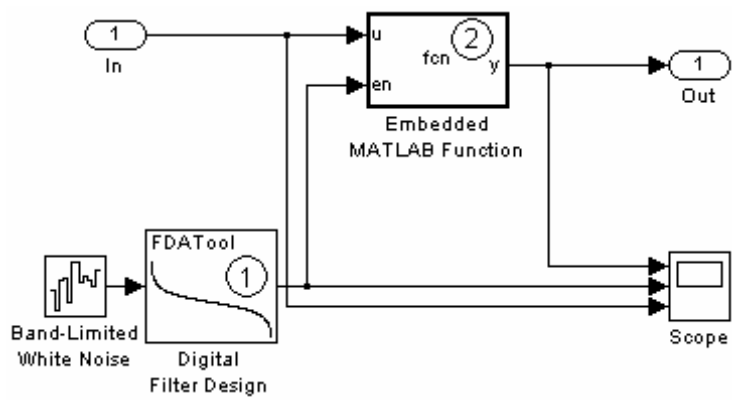


Рисунок 6 – Структурная схема эмулятора разрывов сигнала

Принцип работы блока 3 заключается в следующем: случайный шумовой сигнал пропускается через низкочастотный фильтр – 1. Полученный случайный низкочастотный управляющий сигнал поступает на функциональный блок – 2, представляющий собой управляемое реле. При превышении амплитудой управляющего сигнала установленного порога срабатывания реле (порога - 0), функциональный блок – 2 открывается и «пропускает» сигнал дальше. Как только амплитуда управляющего сигнала опускается ниже порога срабатывания, реле закрывается. Логика работы блока может быть записана в виде формулы:

$$y' = \begin{cases} y & en > 0 \\ 0 & en < 0 \end{cases}$$

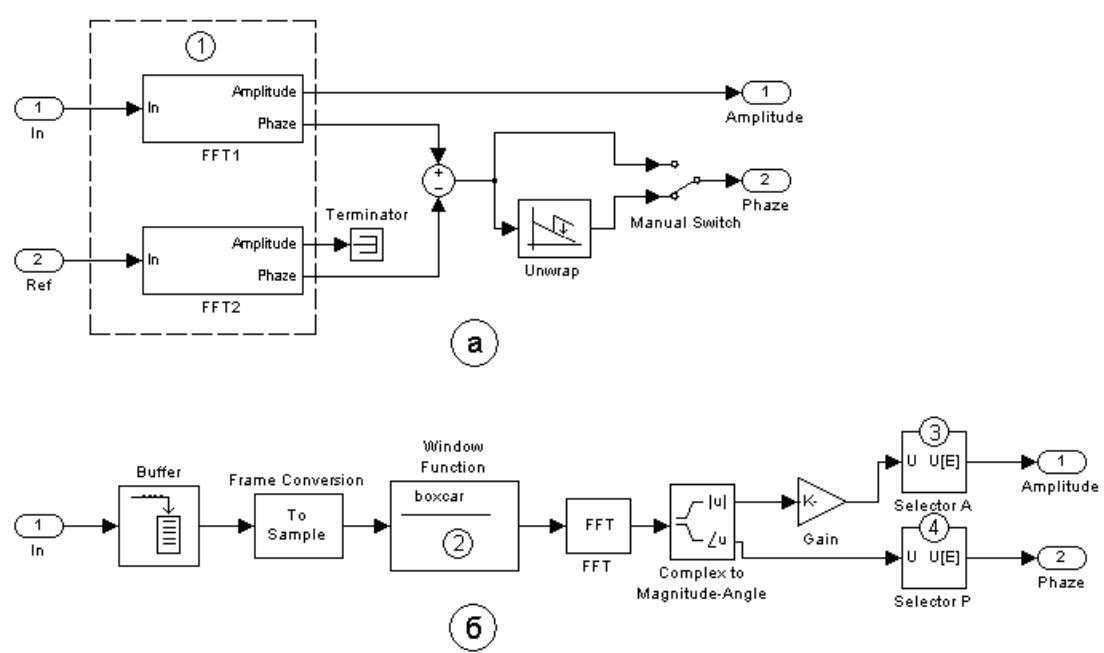


Рисунок 7 – Структурная схема формирователя ККП с использованием ДПФ: а – формирователь ККП; б - структурная схема реализации преобразования Фурье

На рисунке 7, а изображена структурная схема формирователя ККП, в котором посредством ДПФ формируются амплитудный и фазовый спектры сигнала. Так как генератором задаются единичные амплитуды, то находить отношение амплитуд полученного и опорного сигналов не требуется, поскольку дополнительное деление на 1 нецелесообразно. Блок Un-

wrap выравнивает фазовую функцию, устраняя неоднозначность фазы, при необходимости данные могут быть пущены в обход этого блока.

На рисунке 7, б приведена структурная схема блока преобразования Фурье (блок – 1 формирователя ККП (рисунок 7, а)). В структурную схему блока преобразования Фурье дополнительно был введен блок оконной функции – 2, но применение различных модификаций окон в ходе моделирования лишь ухудшило качество восстановления сигнала. Амплитудный и фазовый селекторы 3 и 4 выполняют выборку необходимых частот из общего массива.

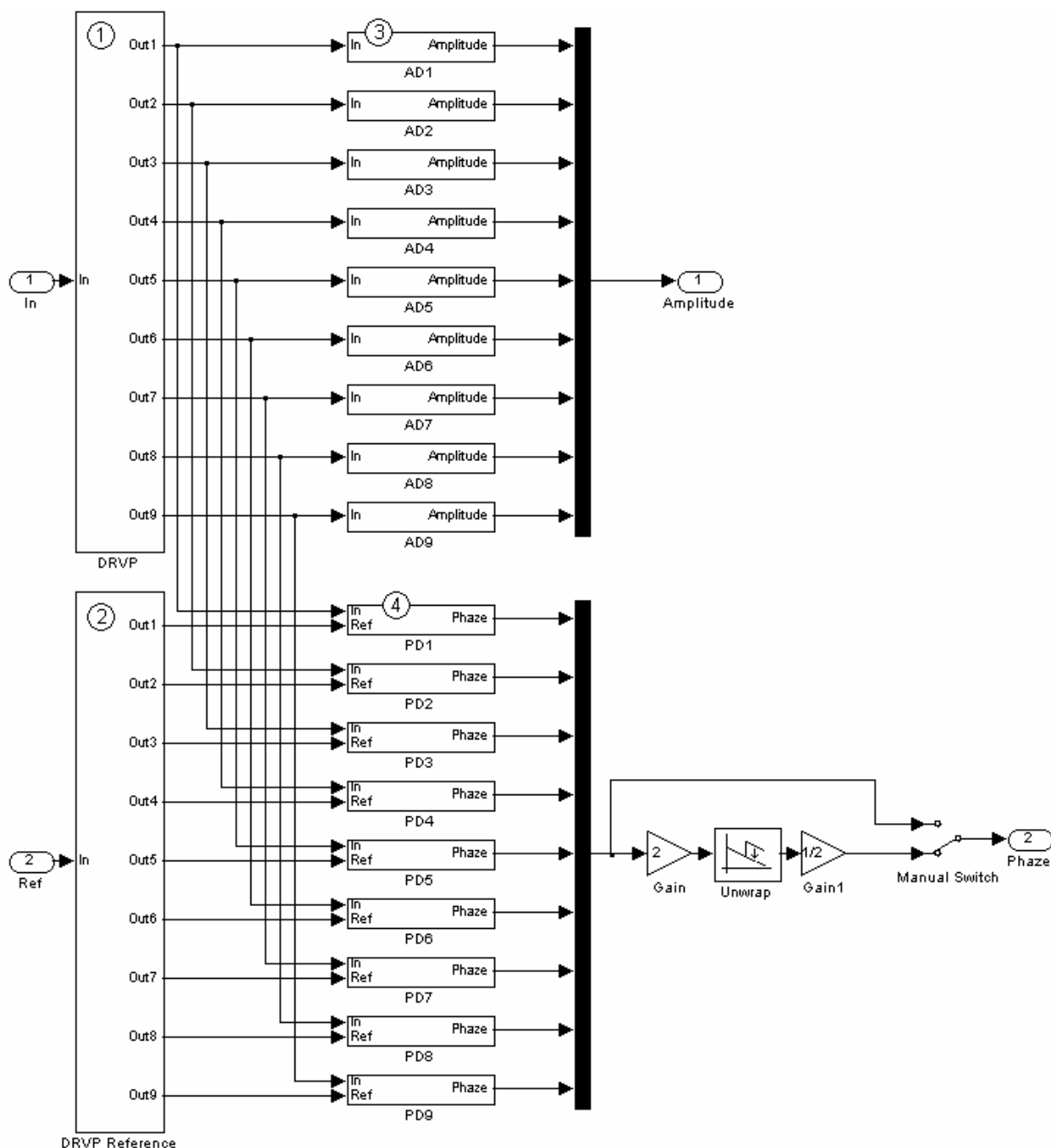


Рисунок 8 – Структурная схема ДРВП анализатора

ДРВП анализатор состоит из двух идентичных наборов ДРВП 1 и 2, структура которых изображена на рисунке 9. А также наборов амплитудных – 3 и фазовых – 4 детекторов.

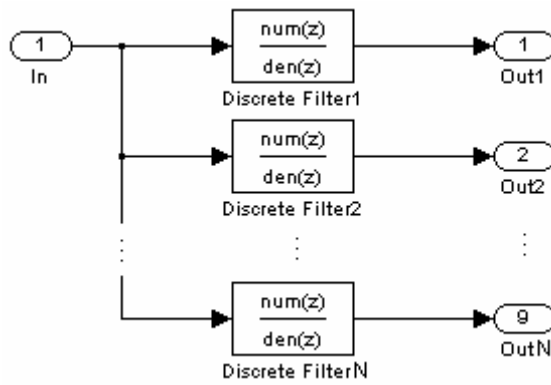
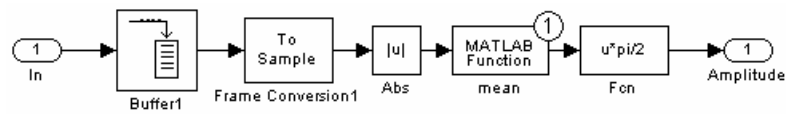
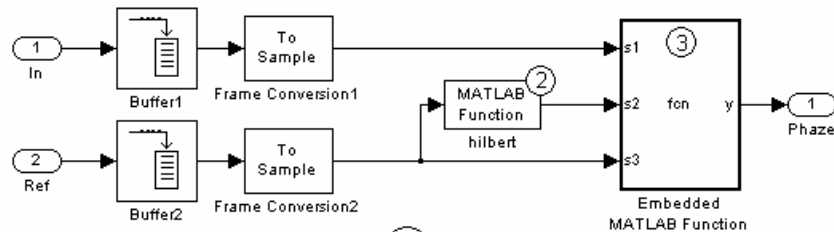


Рисунок 9 – Структурная схема набора ДРВП



а



б

Рисунок 10 – Структурная схема формирователя ККП с использованием набора ДРВП: *а* – структурная схема амплитудного детектора; *б* – структурная схема фазового детектора

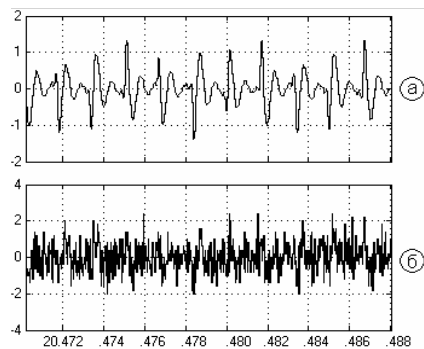


Рисунок 11 – Осциллограммы сигналов: *а* – без воздействия влияющих факторов; *б* – с учетом влияющих факторов

На рисунке 10, *а* приведена структурная схема амплитудного детектора (блок – 3 рисунка 8). На рисунке 10, *б* изображена структурная схема фазового детектора (блок – 4 рисунка 8), реализующего разработанный алгоритм восстановления ФЧХ на основе двух смещенных по фазе опорных сигналов [8]. Блок – 2 реализует преобразование Гильберта необходимое для смещения второго опорного сигнала на $\pi/2$, в соответствии со структурой алгоритма [8]. Блок – 3 реализует формулу:

$$\arg \left| G(\omega_i) \right| = \arctan \left(\frac{S_1 \cdot S_2 \cdot |S_3|}{S_1 \cdot S_3 \cdot |S_2|} \right)$$

На рисунке 11 приведены осциллограммы сигнала: *а* – без воздействия влияющих факторов, *б* – с учетом влияющих факторов.

В результате моделирования (при отключенном блоке имитации разрывов сигнала) получены АЧХ и ФЧХ с выходов ДРВП и Фурье анализаторов, приведенные на рисунке 12.

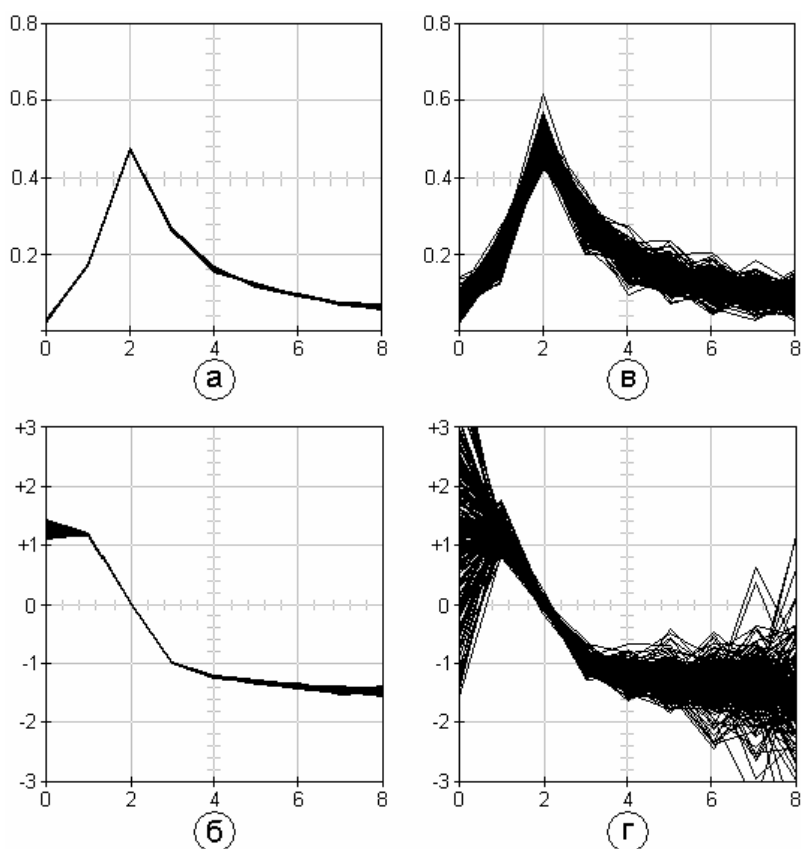


Рисунок 12 – Серии графиков с выходов ДРВП и Фурье анализаторов при отключенном блоке имитации разрывов сигнала: *а* – АЧХ с выхода ДРВП анализатора; *б* – ФЧХ с выхода ДРВП анализатора; *в* – АЧХ с выхода Фурье анализатора; *г* – ФЧХ с выхода Фурье анализатора

Из рисунка видно, что оба алгоритма способны корректно восстановить АЧХ сигнала даже при низком соотношении сигнал/шум. Следует отметить, что в случае применения ДПФ, необходимы также дополнительные операции многократного усреднения результатов, в то время как разброс показаний с применением ДРВП минимален. Из результатов восстановления ФЧХ видно, что с применением набора ДРВП и разработанного алгоритма восстановления ФЧХ удалось корректно определить фазовую составляющую сигнала, в то время как применение ДПФ позволило корректно восстановить фазу сигнала только в области максимальной амплитуды. Очевидно, что при ослаблении сигнала даже многократное усреднение данных не позволит правильно определить фазовую составляющую.

Обычно при построении моделей измерительных систем или систем контроля принимают условие непрерывности исследуемой величины. На практике же это условие часто не выполняется. Разрывы в сигналах происходят в силу особенностей измерительных систем либо несовершенства реальных аппаратных блоков. Этот факт неизбежно сказывается на качестве работы алгоритмов в таких системах, а, следовательно, и на качестве самих систем.

Для исследования работы предложенных алгоритмов вычисления ККП при наличии разрывов в сигнале в модель введен соответствующий блок – 3 (рисунок 4). Осциллограммы его функционирования приведены на рисунке 13.

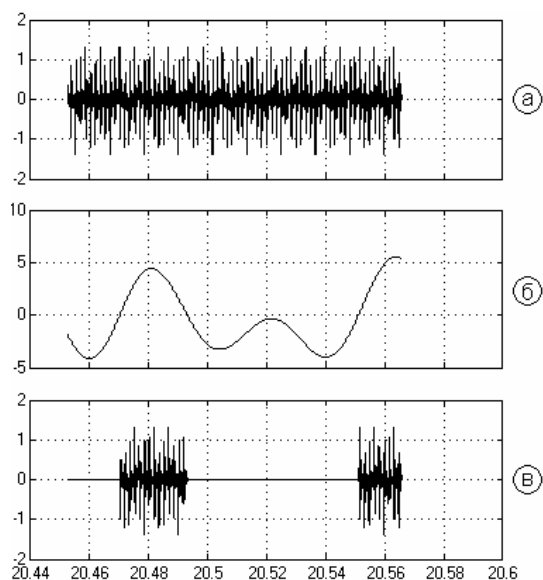


Рисунок 13 – Осциллограммы работы блока имитации разрывов сигнала: *a* – исходный сигнал; *б* – низкочастотный управляющий случайный сигнал; *в* – сигнал со случайными разрывами

На рисунке 14 приведены АЧХ и ФЧХ с выходов ДРВП и Фурье анализаторов при включенном блоке имитации разрывов сигнала.

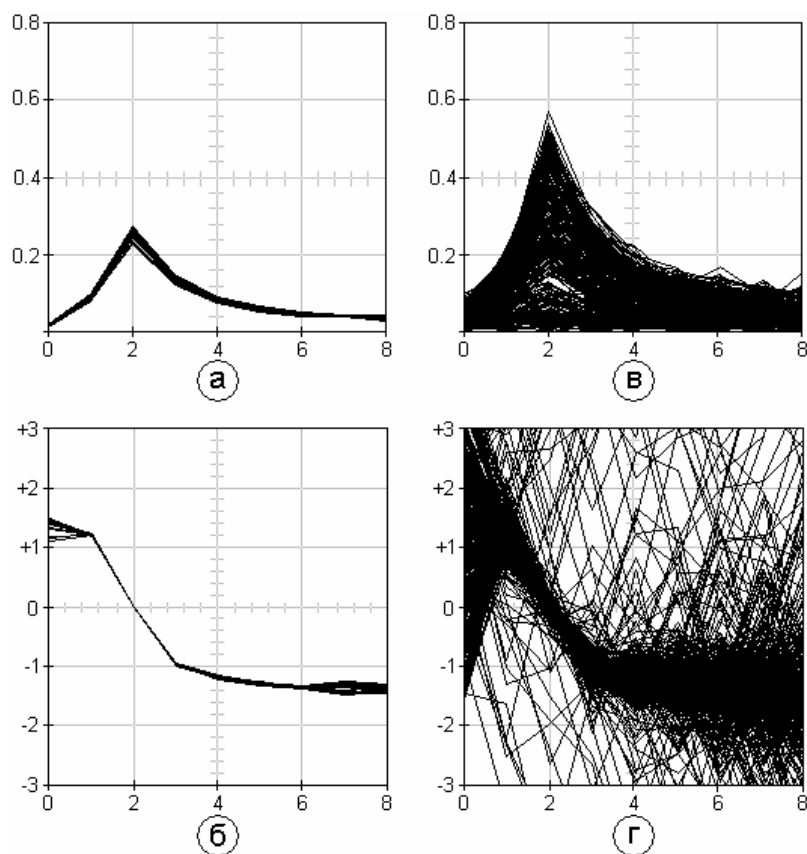


Рисунок 14 – Серии графиков с выходов ДРВП и Фурье анализаторов при включенном блоке имитации разрывов сигнала: *a* – АЧХ с выхода ДРВП анализатора; *б* – ФЧХ с выхода ДРВП анализатора; *в* – АЧХ с выхода Фурье анализатора; *г* – ФЧХ с выхода Фурье анализатора

Из рисунка видно, что с задачей определения АЧХ сигнала вновь справились оба алгоритма. Как и в предыдущем случае, результат, полученный при помощи ДПФ, требует дополнительного усреднения. С задачей восстановления ФЧХ справился только алгоритм с применением набора ДРВП. Усреднение результатов ДПФ в данном случае не имеет смысла.

Заключение

Из проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Алгоритмы с использованием ДПФ и набора ДРВП способны корректно восстановить АЧХ сигнала даже при низком соотношении сигнал/шум. Для минимизации ошибок алгоритма, основанного на ДПФ, необходимы дополнительные операции многократного усреднения результатов, в то время как ошибки алгоритма, основанного на ДРВП, минимальны. В случае непрерывного тест-сигнала применение набора ДРВП позволяет корректно определить фазовую составляющую сигнала, в то время как применение ДПФ оправданно только в области максимальной амплитуды. При наличии разрывов в сигнале ДПФ не позволяет восстановить ФЧХ, в то время как набор ДРВП восстанавливает фазовую составляющую сигнала без искажений. Алгоритмы определения спектра на основе набора ДРВП оптимальны для цифровой реализации с точки зрения вычислительных затрат и, следовательно, могут быть рекомендованы для практического использования.

Список литературы:

1. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов: справочник / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. – М.: Радио и связь, 1985.
2. Ефимов А.В. Математический анализ (специальные разделы) Ч. 2 / А.В. Ефимов, Ю.Г. Золотарев, В.М. Терпигорева. – М.: Высшая школа, 1980.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006.
4. Дьяконов В.П. Компьютерная математика: Теория и практика. – М.: Нолидж, 2001.
5. Дьяконов В.П. Simulink 4: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002.
6. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М.: Техносфера, 2006.
7. Цуриков В.С. Алгоритмы определения комплексного коэффициента передачи в системах автоматизированного контроля качества пьезоэлементов / В.С. Цуриков, А.С. Воронов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2007. – №7. – С.106–109.
8. Цуриков В.С. Анализ процесса измерения фазо-частотной характеристики / В.С. Цуриков, А.С. Воронов // Измерение, контроль, информатизация-2007: материалы VIII международной научной конференции «ИКИ-2007». – Барнаул, 2007. – С. 23-30.