

МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШУМА КВАНТОВАНИЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Е.Р. АДАМОВСКИЙ, В.К. ЖЕЛЕЗНЯК, К.Я. РАХАНОВ

*Учреждение образования «Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой»,
г. Новополоцк, Республика Беларусь*

Введение

Передача цифровых речевых сигналов (РС) является частью системы комплексной защиты информации [1] и относится к технической защите средств коммуникации [2], которые включают преобразование цифрового РС в аналоговую форму с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) с последующей его передачей. На этапе аналого-цифрового преобразования (АЦП) осуществляются дискретизация и квантование сигнала, излучаются физические поля рассеяния – магнитные и электрические, которые являются информационными параметрами передаваемого сигнала и каналом утечки информации (КУИ). Важной задачей является обеспечение помехозащищенности при передаче широкополосных высококачественных РС в каналах связи. Это обуславливает АЦП, являющееся источником шума квантования (ШК), который рассматривается в качестве нового КУИ в шумах высокого уровня. В [3, 4] оценку защищенности КУИ предлагается выполнять с помощью периодической последовательности импульсов треугольной формы, которая не вносит методических погрешностей, обусловленных нелинейностью ШК. Наиболее эффективные методы оптимального приема детерминированного сигнала – на основе корреляционного приема. Цель исследований – количественная оценка информационных показателей ШК АЦП аналогового РС.

1. Методика оценки информационных показателей

Блок-схема автоматизированной оценки КУИ АЦП приведена на рисунке 1 и включает систему приема-передачи, КУИ, программно-аппаратный комплекс (ПАК). Количественная оценка информационных показателей ШК должна выполняться с помощью автоматизированной системы, так как излучаемые поля имеют малую мощность в шумах высокого уровня, что требует дополнительной обработки и накопления. Система приема-передачи сигнала включает генератор измерительного сигнала (ИС) и ЦАП, который передает ИС в линию связи и на АЦП приемника. В момент преобразования сигнала из аналоговой формы АЦП излучает физические поля, характеризующие КУИ. ПАК включает измерительную антенну и персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ) со специальным программным обеспечением (ПО).

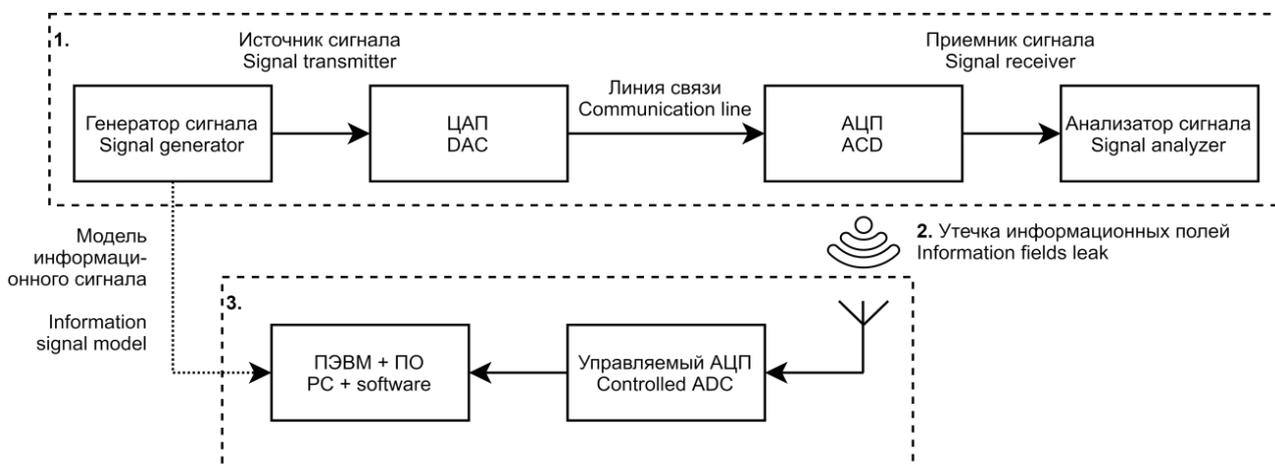


Рисунок 1. – Блок-схема автоматизированной оценки КУИ АЦП

Излучаемые физические поля фиксирует измерительная антенна, а затем передает их через управляемый АЦП для выделения и обработки информационных параметров ИС и ШК с помощью специального ПО на ПЭВМ. В качестве обработки используется синхронное накопление, позволяющее улучшить отношение сигнал/шум (ОСШ).

Алгоритм включает следующие этапы:

1. Формируется модельный (идеальный) ИС в цифровом виде, параметры которого согласованы с генератором сигнала (штриховая линия связи на рисунке 1).
2. Захватывается сигнал с помощью измерительной антенны в точке наблюдения. При передаче сигнала по каналу связи значения фазы и амплитуды сигнала неизвестны, а сам сигнал подвергается искажениям и влиянию шумов.
3. Определяется время задержки ИС путем расчета взаимной корреляции смеси сигнала и шума с модельным сигналом.
4. Рассчитывается ШК путем вычисления разницы принятой смеси сигнала и шума и восстановленной цифровой копией сигнала с учетом фазы.
5. Применяются спектральное накопление и полосовая фильтрация сигналов.
6. Выполняется обнаружение информационных параметров КУИ.
7. Рассчитанные показатели протоколируются и выводятся на экран.
8. Процедура обнаружения информационных параметров повторяется 30 раз, а результаты усредняются; мощность шума увеличивается, измерения повторяются.

Этапы 5 и 6 можно представить в виде спектрального обнаружителя информационных параметров (рис. 2), в котором для более эффективного накопления выполняется преобразование сигнала в частотную область с помощью операции быстрого преобразования Фурье (БПФ) и его разделение на действительную и мнимую части с независимым накоплением и последующим вычислением общего модуля спектральной составляющей. Требуемое количество накоплений до обнаружения сигнала и обнаруженная частота сигнала учитываются в определении исходного уровня информационного параметра.

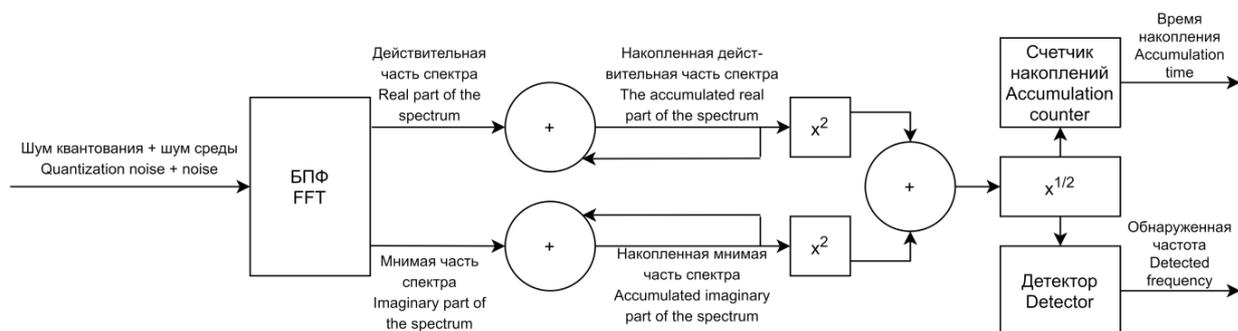


Рисунок 2. – Блок-схема спектрального обнаружителя информационных параметров

В полученном сигнале выполняется поиск максимального элемента, который в спектре шума квантования без аддитивной помехи соответствовал бы его главной гармонике на частоте дискретизации сигнала. Если обнаруженный максимум соответствует частоте дискретизации АЦП, делается вывод о том, что шум квантования накопился и может быть обнаружен над шумами. Постоянная составляющая в виде гармоники на нулевой частоте не учитывается при определении максимума. Записывается количество накоплений, которое потребовалось для выделения гармоники шума квантования при текущем уровне шума среды.

2. Результаты исследований и их обсуждение

Для подтверждения работоспособности предложенного способа обработки и выделения информационных параметров ИС и ШК проведен имитационный натурный эксперимент, в котором вместо измерительной антенны использовался соединительный кабель, подключенный от выхода ЦАП источника сигнала к аналоговому входу управляемого измерительного АЦП (рис. 3).

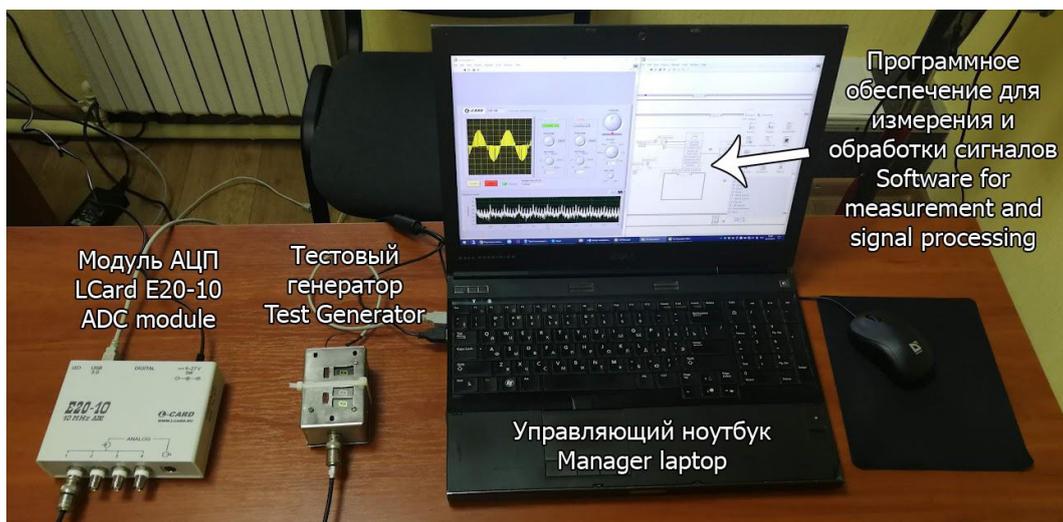


Рисунок 3. – Программно-аппаратный комплекс для обработки и выделения информационных параметров сигнала

Макет включает аппаратную часть и специальное ПО, которое реализует предложенную модель оценки информационных параметров в программной среде LabVIEW. Аппаратная часть включала следующие элементы: ноутбук; управляемый модуль АЦП/ЦАП LCard E20-10; генератор ИС, встроенный ЦАП в ПЭВМ; кабель соединительный АЦП-ЭВМ: аналоговый разъем мини-джек (0,5 м); кабель управления АЦП/ЦАП USB 2.0 тип А-В, длина 1,5 м; источник питания – сетевой адаптер ~ 220 В.

Измерения проводились при изменении количества уровней дискретизации сигнала от 8 ($L = 3$ бита) до 1024 ($L = 10$ бит). Изменение количества уровней дискретизации (разрядности АЦП L) выполнялось программным способом. Предельные значения частоты и уровня сигнала устанавливали с помощью параметрической зависимости между влияющими факторами и контролируемыми параметрами как функция многих переменных при 30 повторениях измерения. В таблице 1 приведены результаты обнаружения частоты и уровня ШК.

Таблица 1. – Результаты обнаружения частоты и уровня шума квантования

Разрядность АЦП, L	Ожидаемая частота, Гц	Обнаруженная частота, Гц	Относительная амплитуда ШК
3	1600	1600	0,6000
4	3200	3200	0,1500
5	6400	6400	0,0400
6	12 800	12 800	0,0180
7	25 600	25 600	0,0050
8	51 200	51 200	0,0010
9	102 400	–	0,0005
10	204 800	–	0,0001

Приведенные в таблице 1 данные показывают, что обнаружение частоты и уровня шума квантования устойчиво выполняется до $L = 8$ бит. При $L = 9$ бит по спектру сигнала возможно судить о наличии ШК, но устойчивого выделения частоты и уровня сигнала не происходит. Для дискретизации при $L = 10$ бит сигнал визуально не наблюдается.

На рисунке 4 представлены графики зависимостей среднего количества накоплений для выделения основной гармонике ШК из фонового шума от количества уровней дискретизации сигнала, сформированного устройством с разрядностью L . За приемлемое (по критерию

времени) количество накоплений возможно оценить лишь некоторые диапазоны ОСШ, при которых гармоники ШК выделяются в пределах 10 итераций.

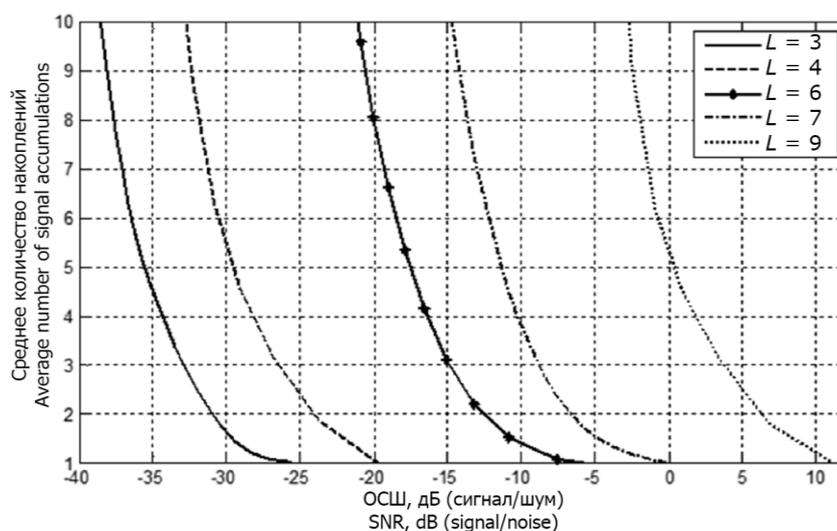


Рисунок 4. – Зависимость количества накоплений для выделения основной гармоники ШК

Анализ рисунка 5 показывает, что при увеличении L, которое снижает уровень гармоник ШК и повышает их частоту, резко возрастает требуемое для выделения количество накоплений сигнала при аналогичном уровне фонового шума. Добавление 1 разряда эквивалентно увеличению числа уровней квантования в два раза и вызывает смещение графика на 7–8 дБ в сторону увеличения ОСШ. Например, при ОСШ минус 20 дБ сигнал с L = 5 может быть накоплен за 8 раз, а сигнал с L = 4 – за один раз.

На рисунке 5 представлены графики зависимостей времени накопления ШК от ширины полосы фильтра. Ограничение полосы фильтра осуществлялось фильтром с заданной полосой вокруг ожидаемого отсчета смеси.

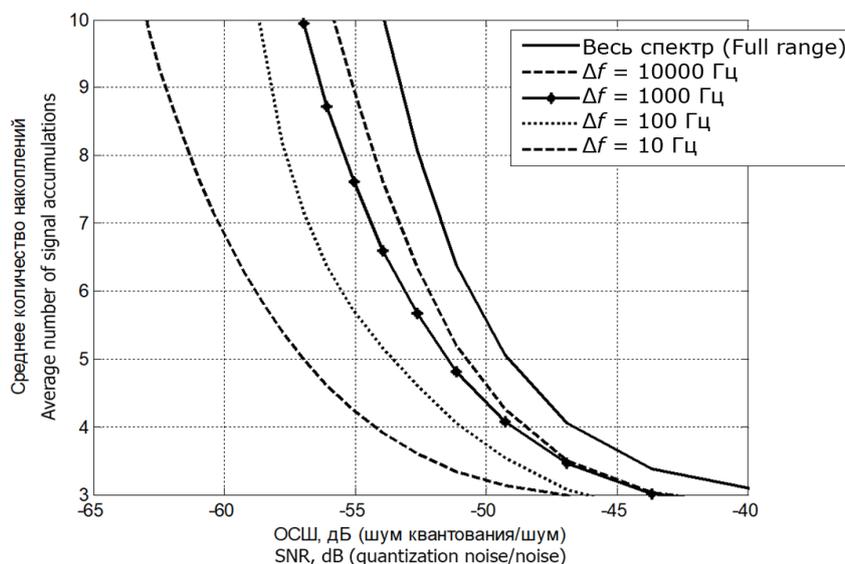


Рисунок 5. – Зависимость времени накопления ШК от ширины полосы фильтра

Из рисунка 5 следует, что сужение полосы в 10 раз позволяет уменьшить время накопления на 10–20 %. Это можно заключить из сравнения графиков, например, при ОСШ минус 55 дБ. Следовательно, сужение полосы накопленной смеси позволяет уменьшить время выделения ШК, что может быть применено на практике перехватчиком сигнала для более быстрого поиска информационных составляющих в шумах при наличии у него сведений

о технических характеристиках целевой системы. Это может позволить ему анализировать лишь ограниченную область частотного спектра.

Заключение

Разработан макет локальной измерительной схемы, с помощью которого проведен имитационный натурный эксперимент оценки информационных показателей ШК АЦП аналогового РС. В качестве информационных показателей КУИ использовались частота дискретизации сигнала и амплитуда ШК.

С помощью макета локальной измерительной схемы выполнен натурный эксперимент, включающий определение параметров информационных составляющих ШК в КУИ путем накопления и анализа сигнала. В результате проведения натурального эксперимента подтверждены гипотезы оценки информационных параметров ШК, получены численные значения информационных параметров.

В результате эксперимента получены зависимости времени накопления от ОСШ ШК/фоновый шум и времени накопления от разрядности АЦП (уровня ШК), которые описывают предельные чувствительности и погрешности детектора информационных параметров, зависимости от контролируемых параметров и влияющих факторов. Уточнение предельных значений оценки информационных параметров необходимо исследовать при подключении измерительных антенн.

Литература

1. Раханов, К.Я. Обеспечение конфиденциальности информации в сети Интернет / К.Я. Раханов, Н.А. Раханов. Новополюцк: Полоц. гос. ун-т, 2021. – 192 с.
2. Железняк, В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам / В.К. Железняк. СПб.: Санкт-Петербург. госуд. ун-т аэрокосмич. приборостр., 2006. – 188 с.
3. Анализ ошибки равномерного квантования периодической импульсной последовательностью треугольной формы в спектральной области / В. К. Железняк [и др.] // Проблемы инфокоммуникаций. 2022. – Т. 15, № 1. – С. 39–45.
4. Математическая модель каналов утечки речевых сигналов при дискретно-квантованном представлении / В. К. Железняк [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. – Т. 18, № 4. – С. 89–95.