

точности вычисления координат ЛА при увеличении избыточности связано, в первую очередь, с вероятностью появления более "удобных" конфигураций подгрупп маяков, которые и должны выбираться для решения навигационной задачи.

Несмотря на универсальность такого алгоритма вычисления вектора навигационных определений, как итерационный метод наименьших квадратов (МНК), в подавляющем большинстве случаев с учетом параметра допуска удавалось выбрать какой-либо аналитический алгоритм решения навигационной задачи, уступающий МНК по точности не более, чем на 5-10% при существенно (в несколько раз) более низкой трудоемкости реализации.

Использование набора различных алгоритмов и возможность независимого определения каждой координаты ЛА приводят к существенному (до 1,2-1,3 раза) повышению точности определения местоположения объекта.

**Заключение.** Предложенная методика решения навигационной задачи, основанная на возможностях независимого вычисления каждой из координат ЛА, выборе оптимальных подгрупп радиомаяков и алгоритмов для каждой из областей коррекции позволила получить по результатам моделирования точностные характеристики, соответствующие требованиям определения координат для современных беспилотных маневренных ЛА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карташкин А.С.* Авиационные радиосистемы. – М.: ИП РадиоСофт, 2007.
2. *Лысенко Л.Н.* Навигация и наведение баллистических ракет: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007.
3. *Пешехонов В.Г.* Навигационные системы // Вестник РАН, № 1, 1997.
4. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М.Н.Красильщикова и Г.Г. Серебрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
5. Межгосударственная радионавигационная программа государств-участников сотрудничества независимых государств на 2001-2005 годы (Концепция развития радионавигационных систем). – М., 2001.
6. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шибшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; Под ред. В.С. Шибшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993.

УДК 654.19:621.391.83

**А.С. Мкртумов**

#### **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗМЫВАЮЩЕЙ НАСАДКИ (DITHER) ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВИДЕОПАРАМЕТРОВ В МЕТОДЕ УТФ**

Точность измерений ряда видеопараметров зависит от погрешности квантования, которая может быть существенной при широко применяемой в трактах формирования и передачи программ разрядности  $Q = 8$  [1]. Коэффициент нелинейных искажений, определяемый отношением амплитуд ступеней сигнала яркости, занимающих согласно [2] число уровней  $220 \times 0,2 = 44$ , может быть измерен со ошибкой:  $\delta = (1 - 43/45) = 4,4\%$ .

Способом радикального сокращения погрешности является применение размывающей насадки (РН, "dither"), рекомендуемой [1] в виде гармонического сигнала с амплитудой  $20 \div 30$  мВ, суммируемого с тест-сигналом. При измерении РН отфильтровывается или усредняется, и статистическое усреднение массива данных приводит к математическому ожиданию, близкому к истинному значению сигнала без ошибки квантования. В ряде работ [3, 4] изучено действие РН различных видов (пилообразного и гармонического сигналов, шума с равномерным и нормальным распределением).

Для измерений параметров видеотрактов в последнее время разработан метод универсальных тестовых файлов (УТФ [5, 6]), исходный тест-сигнал которого имеет форму видеофайла с разрядностью, присущей испытываемому тракту. Рассмотрим возможность применения РН в методе УТФ с помощью имитационного статистического моделирования тракта с разрядностью  $Q = 8$ , в ходе которого воспроизводится алгоритм функционирования системы и имитируются явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания. Схема алгоритма моделирования процесса следующая (рис. 1):

Блок 1 – тест-файл с постоянным уровнем сигнала  $u_0 = \text{const}$ , суммированным с сигналом РН.

Блок 2 – модель аналогового тракта с параметрами  $2^R \gg 2^Q$ , где  $R$  и  $Q$  – разрядность файлов в блоках 2 и 1 соответственно ( $Q = 8$ ). Операции, проводимые в блоке 2 – повышение разрядности файла  $Q$  до  $R$ , спектральная фильтрация и т.д.; в частности – сдвиг сигнала на постоянную величину  $\Delta$ , подлежащую определению в конечном файле.

Блок 3 – процесс записи сигнала в файл исходной разрядности  $Q$ .

Блок 4 – измерение параметров сигнала;

Блок 5 – анализ результатов.

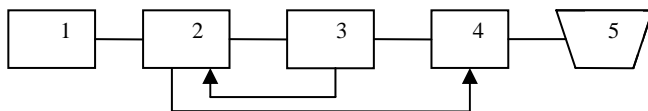


Рис. 1. Модель имитации процесса с РН

Инструментом моделирования служит известная программа обработки звуковых сигналов Sound Forge, обладающая широким набором операций преобразования сигналов. Вначале проведем верификацию модели, имитируя действие РН в классическом варианте с ее формированием и наложением на сигнал в аналоговом пространстве. Задав дискретизацию  $f_d = 48$  кГц и  $Q = 16$ , сформируем в блоке 2 алгоритма файл с сигналом, эквивалентным видеосигналу с РН частотой около 4 МГц и размахом 27 мВ на пьедестале 50%-го уровня яркости видеосигнала  $Y$ , что в единицах уровня Sound Forge соответствует нулю.

В той же разрядности сформируем сигнал с участками уровнем 170 и 85 16-разрядных единиц, соответствующими  $2/3$  и  $1/3$  от значения  $q$  - перепада соседних уровней в 8-битном файле, имеющего в 16-битном файле уровень 256 ед. На рис. 2 уровень 1-й ступени показан в строке "Average Value" на табло статистики программы, вызов которой соответствует работе блока 4. Длительность участков по числу пикселей равна ТВ строке.

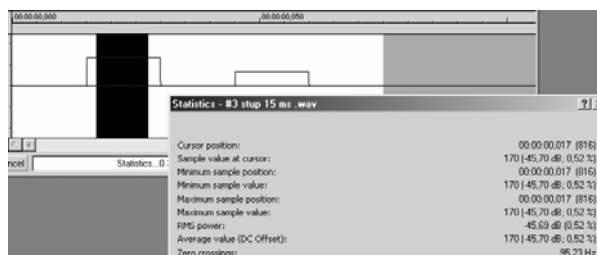


Рис. 2. Имитация искомой разности уровней

Пороги 8-битного квантования в программе равны  $q' = (n + 1/2)q$ , т.е. при возврате к разрядности 8 бит, участки с уровнем  $2/3$  и  $1/3$  от значения  $q$  занимают уровни  $q$  и  $0$  соответственно, что и составляет ошибку квантования, в данном случае -  $1/3 q$ .

Суммируем данный сигнал с сигналом РН (16 бит) и перейдем в блок 3 алгоритма конвертации разрядности файла в 8 и затем в блок 4 вызовом статистики уровней соответствующих участков.

Результат преобразования, стадии до и после которого показаны на рис.3, показывает сохранение статистических отличий участков с измененным уровнем.

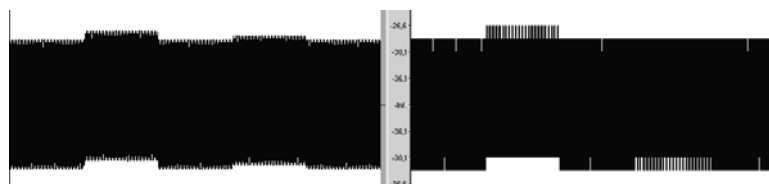


Рис. 3. Снижение разрядности файла с 16-битной РН с 16 (слева) до 8 (справа)

Вернем файлу разрядность 16 для измерения уровней в тех же единицах 16-битной разрядности (здесь  $q = 256$ ). Статистика уровней 5 участков сигнала, показанных на рис. 4 в данных файлах приведена в таблице.

Таблица

Средние уровни участков исходного (16 бит) и конечного (8 бит) файлов

№ участка	1	2	3	4	5
Исходный уровень сигнала, ед.	0	170	0	85	0
Файл 16 бит с РН	0	170	1	85	-1
Файл 8 бит	3	174	0	79	-1
Ошибка, $q$	$\approx 0,012q$	$\approx 0,016q$	0	$\approx 0,02q$	$0,08q$

Данные таблицы показывают ошибку квантования смещенных уровней  $1,6\%$   $q$  и  $2\%$   $q$ , т.е. в пределах статистической погрешности, в то время, как в отсутствие РН она составила бы  $33\%$   $q$ . Это подтверждает адекватность принятой модели.

Смоделируем теперь применение РН в методе УТФ. Для этого РН с теми же параметрами сформируем в файле с разрядностью 8 бит, преобразуем его в 16-битный и повторим те же операции – суммирование со ступенчатым сигналом, преобразование в 8-битный файл и вызов статистики.

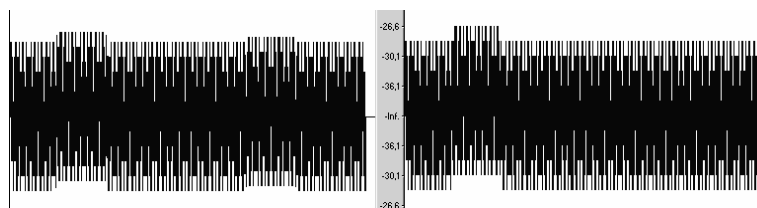


Рис. 4. Снижение разрядности файла с 8-битной РН с 16 (слева) до 8 (справа)

Результат, показанный на рисунке (см. рис. 4) и измеренный вызовом статистики, состоит в том, что средние уровни участков  $(2/3)q$  и  $(1/3)q$  приобретают значения  $q$  и  $0$  соответственно, т.е. так же, как в отсутствие РН. Эффект в точности повторится при увеличении РН, например, на 12 дБ.

Причина данного эффекта заключается в вырожденном характере структуры РН, сформированной в тест-файле с низкой исходной разрядностью. В итоге, в отличие от обычных схем формирования и наложения РН в аналоговом пространстве, где множество ее значений образует непрерывный ряд, здесь оно является вырожденным до множества целочисленных величин. Средний уровень сигнала при оцифровке 8 бит равен

$$\bar{u} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{int}(a_i) ,$$

где  $m$  – число усредняемых пикселей;

$\text{int}(a_i)$  – целочисленное в единицах  $q$  значение амплитуды в  $i$ -м пикселе.

Суммирование с 8-битной РН изменяет значение  $a_i$  на величину  $n_i$ , где  $n$  – целое число. Тогда

$$\bar{u}' = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{int}(a_i + n_i) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\text{int}(a_i) + n_i] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{int}(a_i) + \bar{n} = \bar{u} + \bar{n} ;$$

где  $\bar{n}$  – статистическая характеристика только самой РН. Форма зависимости  $\bar{u}$  от измеряемого сигнала, как видно из данной формулы, при этом не меняется.

При выходе сигнала в аналоговый тракт это вырождение будет сниматься под действием ряда факторов:

- 1) неидеальность передаточных характеристик тракта;
- 2) несинхронность дискретизации ЦАП (блока 1 модели) и АЦП (блок 3), в том числе, вызванная задержкой в фильтре ЦАП.

Количественная оценка действия этих факторов в произвольном тракте не представляется возможной без накопления большого объема статистики в различных трактах. Таким образом, применение РН в методе УТФ для снижения ошибки квантования представляется нецелесообразным.

При этом в аналоговом тракте роль РН играют присутствующие в нем шумы и помехи. Оценим их влияние с помощью той же имитационной модели. Для этого сформируем в блоке 2 16-битный сигнал из 8 пилообразных участков с амплитудой, несколько большей  $\pm 3q$ , и суммируем его с аддитивным шумом с нормальным распределением, сформированным специальным компьютерным генератором [7]. Каждый следующий участок пилообразного сигнала будем суммировать с шу-

мом возрастающего уровня в порядке: 1-й участок – ( $-\infty$  дБ), 2–8 участки – от (-65) дБ до (-50) дБ с равномерным шагом 2,5 дБ (рис. 5).

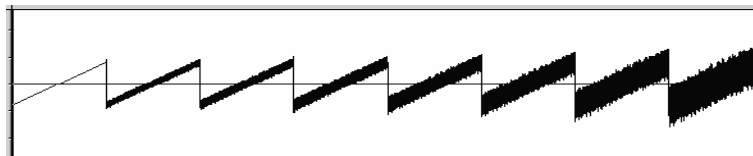


Рис. 5. Тест-сигнал для оценки влияния шума на ошибку квантования

Проведем в блоке 3 операцию с преобразованием разрядности этого сигнала в 8 бит (рис.6), затем в блоке 2 вернем ему разрядность 16 для адекватного проведения последующих операций. Вид сигнала при последней операции не меняется.

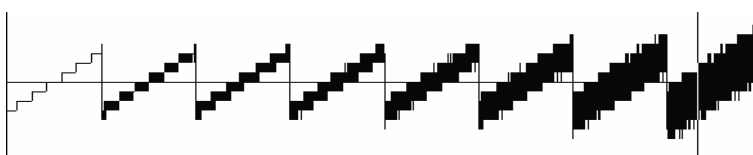


Рис. 6. Тест-сигнал после снижения разрядности файла до 8

В масштабе рис. 6 видится повторение резких перепадов уровня, причем с амплитудой, не зависящей от уровня шума. В действительности это не так. Развернув во времени фрагмент «резкого перепада» в правой части сигнала на рис. 6, где поставлен курсор, можно видеть в этом районе плавное нарастание статистического среднего от уровня сигнала (рис. 7), причем, ширина зоны перехода растет с возрастанием шума.

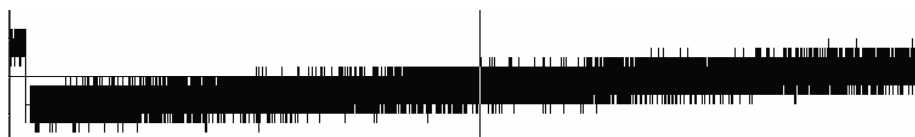


Рис. 7. Сигнал (см. рис. 6) в районе курсора с увеличенным разрешением во времени

Для определения зависимости амплитуды циклической ошибки от уровня шума вычтем данный сигнал (рис.6) из исходной «пилы» и отфильтруем в сигнале для устранения шума частоты выше 30 Гц (частота сигнала ошибки  $\approx 1$  Гц). Результат, показанный на рис. 8, количественно отображен на графике рис. 9 в долях от  $q$ .

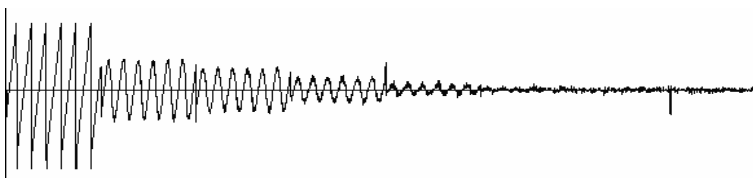


Рис. 8. Ошибка квантования при различных уровнях шума (сигнал (см. рис. 6) после вычета пилообразной составляющей и отфильтровки шума)

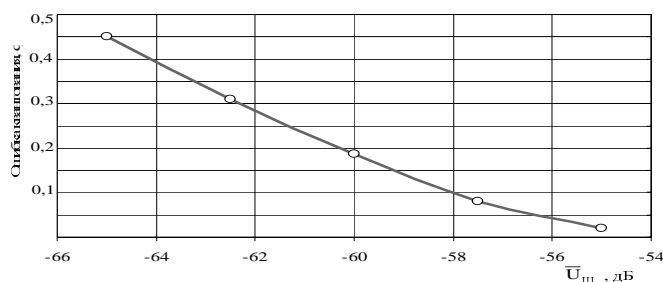


Рис. 9. Зависимость амплитуды ошибки квантования от уровня шума

Как показывает практика, отношение сигнал/шум в аналоговых видеотрактах в основном не превышает 50 дБ. Таким образом, устранение влияния ошибки квантования на результаты измерений НИ и других параметров, определяемых значениями постоянных уровней сигнала, эффективно устраняется аддитивной флуктуационной помехой, присутствующей в измеряемом тракте.

В методе УТФ РН может найти применение в измерении шума согласно [1]. Спектр гармонического сигнала РН, сформированного в 8-битном файле, представлен на рис. 10,а; для сравнения на рис. 10,б показан спектр этого же сигнала, сформированного в 16-битном файле.

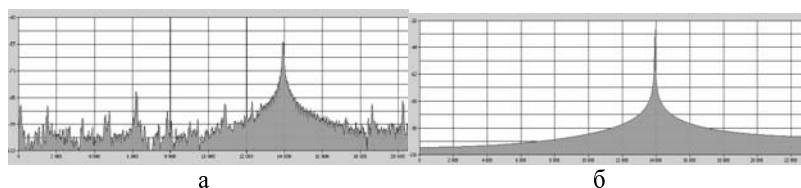


Рис. 10. Спектр гармонического сигнала: а) в 8-битном файле; б) в 16-битном файле

Побочные спектральные составляющие соответствуют шуму квантования. Проведем в блоке 2 преобразование разрядности файла в 16 бит, затем применим заградительный фильтр, удаляющий спектральную компоненту основной частоты и ФНЧ, рекомендованный для измерения шума. Тогда вызов статистики программы показывает значение отношения сигнал/шум 57,9 дБ, близкое к теоретическому пределу. Данный метод может требовать более простого алгоритма вычислений измерительной программы по сравнению с пилообразным сигналом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Recommendation ITU-R BT.1204. "Measuring method for digital video equipment with analogue input/output".
2. Recommendation ITU-R BT.601-5. Studio Encoding Parameters of Digital Television for Standard 4:3 and Wide-Screen 16:9 Aspect Ratios.
3. Carbone. P.: Quantitative Criteria for the Design of Dither-Based Quantizing System. IEEE Trans. on Instr. and Meas.. vol.46. No.3. June 1997, pp. 656 – 659.
4. Gray R., Stockham R., Dithered Quantizers. IEEE Trans. Inf. Theory 39 (3) (1993), 805-812.
5. Мкртумов А.С. Общие принципы системной оптимизации технологии контроля качества телерадиопродукции // Программные продукты и системы, 2008, №2. – С. 83-85.
6. Мкртумов А.С. Дистанционная диагностика телевизионных трактов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008, №5. – С. 43-47.
7. [http://socrates.berkeley.edu/~phylabs/bsc/Supplementary/Noise\\_Generator.html](http://socrates.berkeley.edu/~phylabs/bsc/Supplementary/Noise_Generator.html).