

Шумовые характеристики программно-аппаратного комплекса на базе «системы на кристалле» для озонометра

В. Л. Тряпицын, С. К. Круглов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
val20063@mail.ru, kruglovsk@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются шумовые характеристики системы управления и обработки спектральных сигналов в озонометре. Управление параметрами озонометра в соответствии с режимами наблюдения реализовано программно и обеспечивает повышение точности измерений спектрального комплекса.

Ключевые слова: шумовые характеристики; ПЗС-фотоприемник; акусто-оптический спектроанализатор; мониторинг атмосферы; многоканальная система сбора данных

I. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа представляет собой описание результатов исследования шумовых характеристик системы сбора данных (ССД) для многоканальных акустооптических спектроанализаторов (АОС) [6]. В статье представлены описание видов шумов, методы их оценки, а также результаты исследования количественных характеристик шумовых составляющих для данной ССД. ССД разрабатывалась для задачи регистрации широкополосных спектральных измерений с использованием акустооптического спектрометра и с учетом особенностей его применения в наземном комплексе для измерения концентрации озона и была выполнена на основе микросхемы ПЛИС фирмы INTEL с использованием микроконтроллерной подсистемы Nios. Система передает накопленные данные спектральных наблюдений на удаленный персональный компьютер (ПК). Многоканальная ССД обеспечивает синхронную демодуляцию полезного сигнала и его накопление для всех N спектральных каналов АОС одновременно с управлением фоточувствительным прибором с зарядовой связью (ФПЗС) и передачей накопленных сигналов в ПК.

Основная цель при измерениях сигналов ФПЗС – получить наиболее чистый и качественный сигнал с большим отношением сигнал/шум (SNR). Для достижения максимального SNR на выходе необходимо многократно суммировать отсчеты сигнала в цифровом интеграторе [5], благодаря чему шум уменьшается в \sqrt{N} раз, где N-число накоплений. В нашей системе мы применили накопление и благодаря большой разрядности данных (32 разряда) можно накапливать сигнал до 1000 циклов и более.

Для того, чтобы достичь высокой точности времени накопления в ФПЗС, равенства времен накопления в четном и нечетном полупериодах частоты модуляции, а также учесть переходные процессы при переключении сигналов с антенны и эквивалента был предложен и реализован новый режим работы ССД, который предусматривал исключение временных интервалов переходного процесса и накопление сигнала только в установившемся режиме. Данную задержку времени для начала считывания заряда из ФПЗС можно оценить, рассмотрев механическую модель вращающегося обтюлятора, использующегося в АОС. Он перекрывает поток принимаемого радиосигнала с антенны при помощи закрытых секторов, расположенных на его поверхности [6].

Мощность радиосигнала на входе приемника будет пропорциональна площади сегмента открытой части ее рупора при вращении обтюлятора, на рисунке она образована хордой АВ и дугой окружности. При вращении обтюлятора хорда будет двигаться по направлению скорости V, увеличивая площадь сегмента.

$$S_{\text{сегм}} = \frac{R_{\text{рун}}^2}{2} (\alpha - \sin(\alpha)) \quad (1)$$

Нам нужно получить зависимость мощности радиосигнала на входе приемника от времени при вращении обтюлятора. Выразим центральный угол α дуги АВ через высоту h треугольника АОВ и площадь сегмента через h:

$$\alpha(h) = \arccos\left(\frac{h}{R_{\text{рун}}}\right)$$

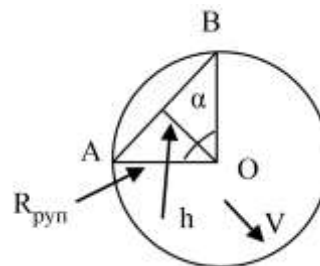


Рис. 1. Изображение среза рупора антенны для нахождения площади потока мощности радиосигнала

$$S_{\text{сегм}} = \frac{R_{\text{пун}}^2}{2} \left(\arccos \left(\frac{h}{R_{\text{пун}}} \right) - \sin \left(\arccos \left(\frac{h}{R_{\text{пун}}} \right) \right) \right) \quad (2)$$

Найдем линейную скорость точки, движущейся по линии высоты h:

$V = \omega \left(\frac{R_{\text{обм}}}{2} \right)$, где ω – угловая скорость вращения обтюлятора

Принимая $V = \frac{h}{t_0}$, где t_0 – время, за которое будет открыта половина площади рупора антенны, выразим h через время t_0 : $h = \omega \frac{R_{\text{обм}} t_0}{2}$

Выразим мощность радиосигнала $P(t)$ через произведение потока мощности радиосигнала через единицу поверхности P_0 , образованной окружностью рупора антенны и площадь поверхности, и подставим вместо h его зависимость от времени t.

Для момента времени в интервале открытия первой половины площади рупора:

$$P_1(t) = P_0 * \frac{R_{\text{пун}}^2}{2} \left(\arccos \left(\frac{\omega \frac{R_{\text{обм}} t}{2}}{R_{\text{пун}}} \right) - \sin \left(\arccos \left(\frac{\omega \frac{R_{\text{обм}} t}{2}}{R_{\text{пун}}} \right) \right) \right) \quad (3)$$

Для момента времени в интервале открытия второй половины площади рупора первая половина будет уже полностью открыта, поэтому мощность будет пропорциональна сумме половины площади окружности рупора и увеличивающейся площади сегмента от середины окружности к ее краю:

$$P_2(t) = \pi * R_{\text{пун}}^2 - P_0 * \frac{R_{\text{пун}}^2}{2} * \left(\arccos \left(\frac{R_{\text{пун}} - \omega \frac{R_{\text{обм}} t}{2}}{R_{\text{пун}}} \right) - \sin \left(\arccos \left(\frac{R_{\text{пун}} - \omega \frac{R_{\text{обм}} t}{2}}{R_{\text{пун}}} \right) \right) \right) \quad (4)$$

Суммарная мощность будет равна $P(t) = P_1(t)$ при $t < t_0$ и $P(t) = P_2(t)$ при $t_0 < t < 2 * t_0$

Для того, чтобы определить реакцию входной цепи на воздействие сигнала при переходном процессе вращения

обтюлятора, представим входной сигнал в виде суммы ступенчатых воздействий и представим выходной сигнал формулой интеграла Дюамеля:

$$f_2(t) = f_1(0) * g(t) + \int_0^t f_1'(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad (5)$$

$g(t)$ – это переходная функция системы, которая является откликом системы на ступенчатый единичный входной сигнал. Так как интенсивность светового потока на входе фотоприемника благодаря системе АОС пропорциональна мощности радиосигнала, то будем рассматривать отклик фотоприемника ПЗС на световой сигнал. Переходная характеристика фотоприемника соответствует характеристике интегрирующей цепи [8], стр. 320. Ее переходная характеристика:

$$g(t) = V * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \text{ где } \tau \text{ – время нарастания.}$$

Возьмем в качестве входного сигнала случайный шумовой сигнал, смоделированный функцией Mathcad runif(), со средней амплитудой, равной реальному измеренному шумовому сигналу, регистрируемому системой АОС. В качестве $f_1(t)$ возьмем смоделированный нами сигнал, умноженный на передаточную функцию системы $P(t)$. Выполним моделирование в программе Mathcad. Начало характеристики соответствует открытию рупора обтюратом, средняя часть характеристики – полностью открытый рупор, конечная часть – закрытие рупора. Соответственно амплитуда сигнала сначала возрастает, потом держится на одном уровне, потом падает. Дальше будет показано, что оптимальный промежуток считывания ФПЗС – это ровный максимальный участок характеристики. Были вычислены значения математического ожидания, дисперсии и SNR, как отношение математического ожидания к квадратному корню из дисперсии [9], в программе Mathcad для последовательности значений смоделированного сигнала в течение времени открытия рупора антенны.

II. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Были проведены вычисления SNR для последовательностей смоделированного сигнала с шагом смещения от начала открытия антенны по 8% от длительности переходного процесса (задержка фронта сигнала ROG относительно сигнала F_m). Всего таких шагов было сделано 15. Был построен график изменения SNR для этих точек (рис. 2). На рисунке он построен прерывистой линией. По нему видно, что значение SNR с увеличением задержки растет, что подтверждает правильность метода исключения переходного интервала из процесса измерения. Была проведена экспериментальная проверка правильности данного метода. Для этого были проведены 15 серий измерений с разной задержкой фронта сигнала ROG относительно начала открытия рупора антенны. Шаг задержки также увеличивался на 8% от длительности переходного процесса открытия рупора антенны. Было проведено вычисление значения SNR для каждой серии измерений.

Характеристика приведена на том же рис. 2 сплошной линией. Можно видеть, что она совпадает с расчетной, максимальное отклонение от расчетной характеристики составляет 16%. В данном случае для обтюлятора радиусом 0,5 м и частотой $F_m=30$ Гц значение оптимальной задержки равно 6 мс, и она соответствует моменту полного открытия рупора антенны. Дальнейшее увеличение задержки не улучшает SNR, а при увеличении задержки вплоть до начала закрывания рупора следующим затеняющим сектором приводит к ухудшению SNR.

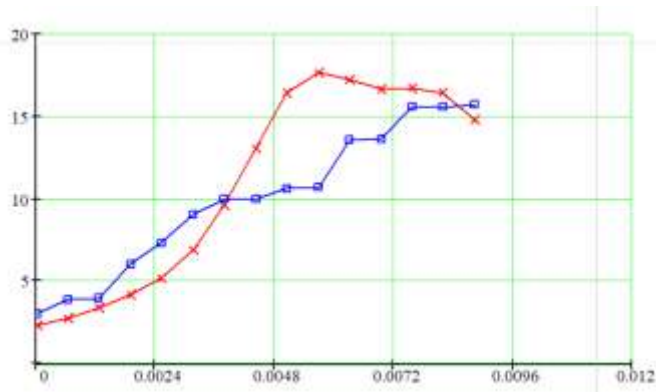


Рис. 2. Графики зависимости SNR сигнала ПЗС от значения задержки начала измерений, смоделированный в программе Mathcad и полученный экспериментально

Для того, чтобы не накапливать сигнал во время второго переходного интервала закрытия рупора, мы применяем сброс накопленного заряда из накопительного регистра фотоприемника при помощи генерации сигнала SHUT[6]. Использование такого режима позволяет увеличить SNR [5]. Параметр задержки сигнала SHUT передается в ССД от компьютера, из программы «Монитор».

Для оценки вклада шума, создаваемого за счет переходного процесса, в общий шум, создаваемый системой АОС, произведем сравнение коэффициента шума переходного процесса и коэффициента шума, вычисленного для данной ПЗС ILX703, сделанной авторами работы [5]. Коэффициент шума переходного процесса будем вычислять как отношения найденных нами значений SNR к $SNR_{вх}$ на входе системы АОС. Последовательность коэффициентов шума для последовательности значений вышеприведенной характеристики SNR на рис. 2: $g_{SNR} = \{0,38; 0,51; 0,65; 0,82; 0,90; 0,94; 0,95; 0,96; 0,98; 0,99; 0,99; 0,99\}$.

Коэффициент шума, вычисленный по формуле (12) из работы [5]:

$$g^2(i_s) = 1 + \frac{e_0 B_f}{i_s} + \frac{e_0 B_f i_d^2}{i_s^2} + \frac{e_0^2 B_f \sigma_{out}^2}{i_s^2 \tau}, \text{ был вычислен для}$$

стандартных условий и равен 1,32. Он больше максимального коэффициента шума, переходного процесса, найденного математическим моделированием на 30%. Таким образом, мы видим значительный вклад шумов переходного процесса в общий шум системы АОС, что говорит о полезности примененного метода задержки.

Для того чтобы оценить стабильность работы системы было проведено измерение дисперсии Аллана. На рис. 3 представлен график зависимости спектроскопической дисперсии Аллана выходного сигнала АОС в относительных единицах от времени накопления сигнала T_0 при постоянном времени кадра в логарифмическом масштабе по оси времени. График позволяет определить вклад различных составляющих погрешностей и шума в общий шум системы. Из него можно выделить различные источники ошибок в данных, если проанализировать коэффициенты угла наклона графика на различных участках. Каждому типу шума соответствует определенный участок на графике (т.е. участок с определенным углом наклона). Также он позволяет определить максимальное время накопления сигнала, при превышении которого появляется отклонение от линейного закона.

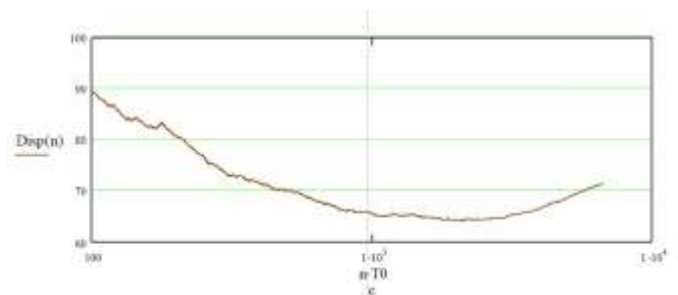


Рис. 3. График дисперсии Аллана

Видно как в процессе накопления уменьшается дисперсия сигнала АОС, а потом увеличивается. По графику можно определить максимальное время накопления сигнала, при превышении которого появляется отклонение от линейного закона. Это время для измерительной системы характеризует интервал ее стабильности, и оно равно примерно 2000 секунд.

Была построена зависимость SNR от числа накоплений. На рис. 4 видно, что с повышением числа накоплений оно повышается, что подтверждает верность данной теоретической зависимости. Значение SNR для каждой выборки данных вычислялось как отношение математического ожидания к квадратному корню из дисперсии. Вычисления и построения выполнялись в программе Matlab.

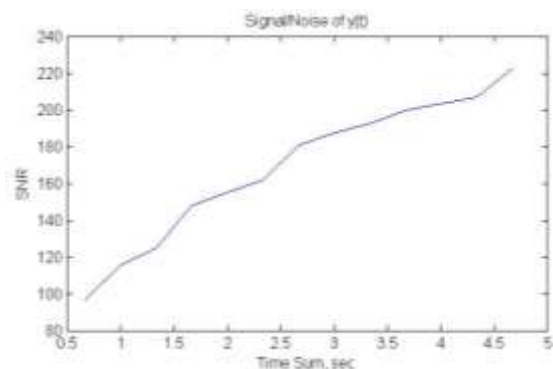


Рис. 4. Характеристика зависимости SNR от времени накопления

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были исследованы шумовые характеристики системы сбора данных для озонметра. Было проведено сравнение выборок сигналов с различным временем накопления заряда, которое показало увеличение сигнал/шум SNR при большем времени накопления.

Были проведены измерения для получения графика изменения дисперсии Аллана, который показал оптимальное время накопления заряда для данной системы.

Была рассмотрена модель системы формирования временных интервалов излучения сигнала радиометра в процессе вращения обтюлятора и был произведен расчет формирования входного сигнала АЦП при данном переходном процессе. Было произведено сравнение коэффициента шума переходного процесса и коэффициента шума, вычисленного для используемой ПЗС PLX703, которое показало примерное соответствие экспериментальным данным. Таким было образом показано теоретически, что задержка фронта сигнала ROG относительно сигнала F_m дает лучший результат по сравнению со считыванием накопленного заряда с ФПЗС без задержки. Были проведены измерения характеристик системы в режимах с ограничением времени накопления заряда, с задержкой сигнала F_m , которые показали лучшие результаты отношения SNR по сравнению с обычным режимом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Есепкина Н.А., Круглов С.К., Розанов С.Б., Саенко И.И. и др. Характеристики акустооптического спектрометра для

дистанционного зондирования атмосферы на миллиметровых радиоволнах // Письма в ЖТФ, 2002, т.28, вып.10. С. 35-40.

- [2] Иванов С.И., Круглов С.К., Митрофанов А.В. Цифровая система сбора и обработки данных с дистанционным управлением для радиометрического режима работы радиотелескопа // Вычислительные, измерительные и управляющие системы: Сборник научных трудов / Под ред. Ю.Б. Сениченкова. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2006. С. 54-59.
- [3] Есепкина Н.А., Иванов С.И., Круглов С.К. Цифровые спецпроцессоры для акустооптических спектрометров для радиоастрономии // Тезисы докладов конференции «Радиотелескопы РТ-2002». Пущино. 2002. С.43.
- [4] Rozanov S.B. et al., «Transportable millimeter-wave spectrometer for monitoring of the atmospheric ozone» 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkiv, 2013, pp. 483-485.
- [5] Молодяков С.А., Иванов С.И., Оптоэлектронный процессор для многоканального радиометра // Обработка информации и управление, № 2, 2009. С. 10-16.
- [6] Тряпицын В.Л., Круглов С.К., Саенко И.И. Управление параметрами демодуляции в оптоэлектронном спектрометре комплекса атмосферного мониторинга // Тезисы докладов 13-ой международной конференции «ТЕЛЕВИДЕНИЕ: ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 29-30 июня 2016 г., С.222-224.
- [7] Correlated double sampling in charge-coupled device. 1987
- [8] Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.
- [9] Персичкин А.А., Шпилевой А.А. Измерение отношения сигнал/шум смеси гармонического сигнала и узкополосного шума // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки, 2012. С. 126-130.
- [10] Антипенский Р. Разработка моделей случайных сигналов, Компоненты и технологии, №11, 2007.
- [11] Молодяков С.А. Проектирование специализированных цифровых видеокамер. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 286 с.