

P13-2018-47

Н. С. Азарян, Ю. А. Будагов, В. Верниковский,
М. В. Ляблин, А. А. Плужников, О. Смыковский,
Б. Ди Джироламо*, Ж.-Кр. Гайде*, Д. Мергелькуль*

**МИНИМИЗАЦИЯ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ШУМОВ
24-БИТНЫХ АЦП ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО
ЛАЗЕРНОГО ИНКЛИНОМЕТРА**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

* ЦЕРН, Женева

Азарян Н. С. и др.

P13-2018-47

Минимизация долговременных шумов 24-битных АЦП
для прецизионного лазерного инклинометра

Исследованы суточные шумы 24-битных АЦП DT9824 и DT9828 в условиях лабораторной комнаты и в температурно-стабильной и радиозолированной лаборатории и зависимость шумов от продолжительности единичного измерения. Значительно, до 240 раз, улучшено относительное разрешение АЦП в температурно-стабильных и радиозолированных условиях. Измерены величины относительного разрешения АЦП за сутки: $3 \cdot 10^{-7}$ для DT9824 при времени одного измерения 0,79 с и $2 \cdot 10^{-7}$ для DT9828 при времени одного измерения 0,10 с. Предложена методика учета температурных вариаций шума АЦП путем вычитания показаний одного из каналов АЦП из остальных. По результатам применения этой методики среднеквадратичные отклонения величины относительного разрешения АЦП улучшились для DT9824 в 13 раз и DT9828 в 6 раз.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2018

Azaryan N. et al.

P13-2018-47

The Minimization of the Long Term Noises of the 24-Bit ADC
for the Precision Laser Inclinator

The daylong noises of the 24-bit ADC DT9824 and DT9828 in the laboratory room conditions and in the thermo-stabilized and radio isolated laboratory and the noises dependence on the single measurement duration have been researched. The ADC resolution in the temperature stabilized and radio isolated conditions was improved significantly, by a factor of 240. The ADC's relative resolutions have been measured for a daylong period: $3 \cdot 10^{-7}$ for DT9824 with 0.79 s for one measurement and $2 \cdot 10^{-7}$ for DT9828 with one measurement duration of 0.10 s. The innovative methods for accounting of the ADC noise temperature variations were proposed and developed based on subtracting of one ADC channel data from remaining ones. This method application resulted in the improvement of the RMS values of an ADC relative resolution: by a factor of 13 for DT9824 and by a factor of 6 for DT9828.

The investigation has been performed at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2018

ВВЕДЕНИЕ

В ОИЯИ и ЦЕРН в течение ряда лет создана и развивается методика прецизионного лазерного инклинометра (ПЛИ). ПЛИ, по сути, является угловым сейсмографом, который сделал возможным наблюдение угловых колебаний поверхности Земли — удаленные землетрясения, «микросейсмический пик», сейсмические явления индустриальной природы [1–3].

Использование сети ПЛИ позволит визуализировать изменения ландшафта в результате действия поверхностных сейсмических волн и поможет стабилизировать современные ускорители — коллайдеры от угловых микросейсмов. Это, в конечном итоге, приведет к увеличению их светимости.

Частотный диапазон ПЛИ составляет [10^{-6} Гц; 4 Гц]. Одна из центральных проблем в практике использования ПЛИ — стабилизация его параметров в области низких частот [10^{-6} Гц; 10^{-4} Гц]. В измерительной цепочке ПЛИ конечным регистрирующим элементом является 24-битный АЦП DT9824. Для получения высокой чувствительности ПЛИ в области низких частот, прежде всего, необходимо стабилизировать параметры АЦП и разработать методику минимизации его собственных шумов.

В практике высокоточных измерений электрических сигналов от температурных и тензометрических датчиков с использованием АЦП в диапазоне низких частот точность измерения ограничивается нестабильностью шумов. Она, как правило, вызывается изменением внешней температуры и радионаводками [4–6]. Регистрация, учет и минимизация шумов регистрирующего АЦП в области низких частот является актуальной задачей.

В работе исследуются методы снижения долговременных шумов двух различных типов 24-битных АЦП: DT9824 и DT9828.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВ 24-БИТНОГО АЦП DT9824

В современных 24-битных АЦП величины шумов $\sim 10^{-6}$ В. Диапазон изменения входного сигнала достигает ± 10 В. Таким образом, АЦП позволяют измерять сигналы с относительным разрешением 10^{-7} , позволяющим проводить прецизионные измерения в современном физическом эксперименте.

Как правило, величина шумов измеряется за относительно короткое время (не более 1 ч). Но при регистрации сигналов за большее время обнаруживается изменение величины шума АЦП. Это изменение имеет характер переменного долговременного дрейфа. Причина подобного явления определяется как изменением внешней температуры, так и другими физическими факторами: повышенным высокочастотным радиофоном, солнечной активностью и др.

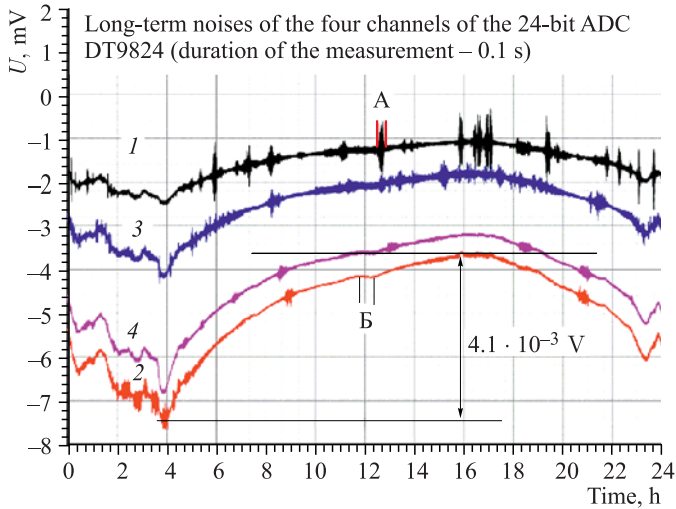


Рис. 1. Долговременные шумы четырех каналов 24-битного АЦП DT9824

На рис. 1 показаны измеренные суточные шумы четырех каналов 24-битного АЦП DT9824 с временем измерения 0,1 с. Измерения проводились в условиях лабораторной комнаты с вариацией температуры день/ночь, достигающей нескольких градусов.

Как видно из рис. 1, наблюдается как долговременное изменение шумов с DT9824, так и кратковременное (за 10–15 мин) (промежуток А) увеличение шумов.

Величина среднеквадратичного отклонения минимальных шумов за период 20 мин (промежуток Б) составила $5 \cdot 10^{-6}$ В. Кратковременное усиление шумов (промежуток А) увеличивает среднеквадратичное отклонение минимальных шумов до $165 \cdot 10^{-6}$ В. Вариации амплитуды шумов достигают за сутки $4,1 \cdot 10^{-3}$ В. Суточные величины среднеквадратичных отклонений сигналов в каналах АЦП составили: 1-й канал — $0,4 \cdot 10^{-3}$ В, 2-й канал — $1,1 \cdot 10^{-3}$ В, 3-й канал — $0,6 \cdot 10^{-3}$ В, 4-й канал — $0,9 \cdot 10^{-3}$ В.

Как видно, применение АЦП в области низких частот [10^{-5} Гц; 10^{-4} Гц] ограничено шумами $\sim 10^{-3}$ В, что позволяет проводить измерения с максимальной относительной погрешностью $\sim 0,5 \cdot 10^{-4}$.

Для уменьшения погрешности измерения мы разработали метод «реперного канала». Суть метода состоит в использовании данных о вариации шумов АЦП одного из каналов для уменьшения их влияния в оставшихся. Таким образом, из четырех каналов АЦП рабочими остаются три, а один используется в качестве реперного.

Из рис. 1 видно, что шумы в каналах 1–4 имеют «согласованный» дрейф. Каждому каналу АЦП сопоставляется «масштабный коэффициент» отно-

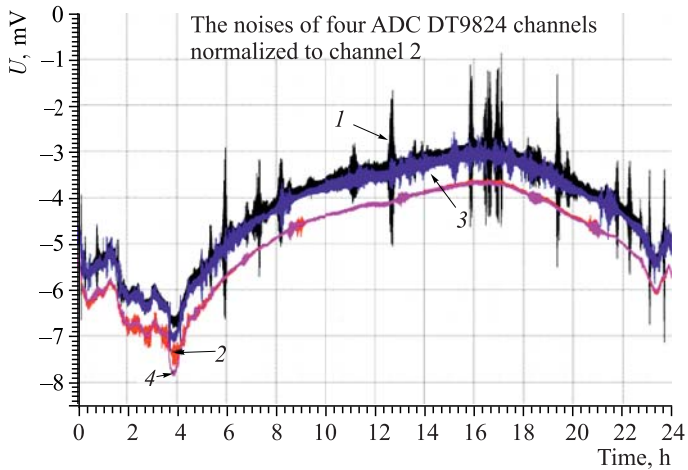


Рис. 2. Нормированные относительно канала 2 шумы четырех каналов АЦП DT9824

сительно канала 2 с максимальной амплитудой шума. Экспериментально были определены масштабные коэффициенты 1-го, 3-го и 4-го каналов относительно второго. Для этого вычислялись среднеквадратичные отклонения σ_i изменения шумов каналов 1–4 в области низких частот [10^{-5} Гц; 10^{-4} Гц]. Затем относительно канала 2 определялись масштабные коэффициенты $K_i = \frac{\sigma_2}{\sigma_i}$. Для данных на рис. 1 они составили: $K_1 = 2,71$, $K_2 = 1$, $K_3 = 1,70$, $K_4 = 1,15$. Умножив значения шумов на масштабные коэффициенты, получаем данные с примерно одинаковой вариацией шума во всех четырех каналах (рис.2).

На рис.3 показаны шумы 1-го, 3-го и 4-го каналов после вычитания из них данных 2-го канала.

Суточные величины среднеквадратичного отклонения скомпенсированных каналов существенно уменьшены и составили: 1-й канал — $1,4 \cdot 10^{-4}$ В; 3-й канал — $8 \cdot 10^{-5}$ В; 4-й канал — $7 \cdot 10^{-5}$ В.

На рис. 4 показан полученный при помощи фурье-анализа спектральный состав шумов первого канала до и после процедуры вычитания шумов второго канала.

Как видно из рис. 4, достигнуто существенное — в 20 раз — уменьшение долговременных шумов АЦП.

Одна из причин дрейфа шумов АЦП — это изменение внешней температуры. Поэтому были исследованы шумы АЦП в температурно-стабильной лаборатории с суточной температурной нестабильностью лучше $0,01^\circ\text{C}$ [7]. В ней также имеется изоляция от внешнего электромагнитного поля высокой частоты (радиофон).

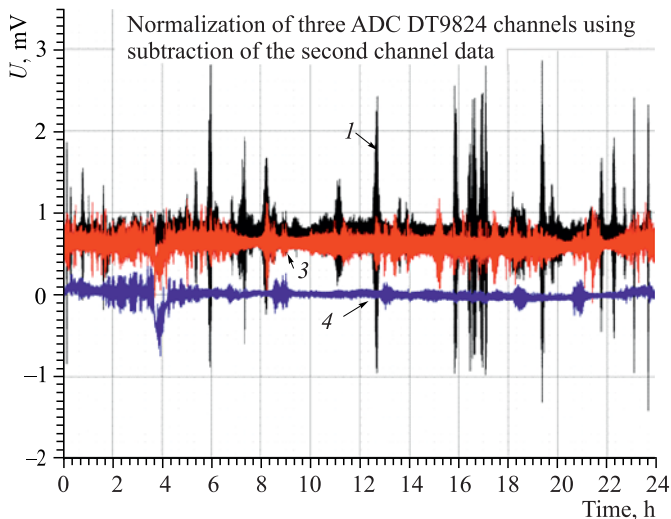


Рис. 3. Компенсация шумов 1-го, 3-го и 4-го каналов с использованием сигналов канала 2 DT9824

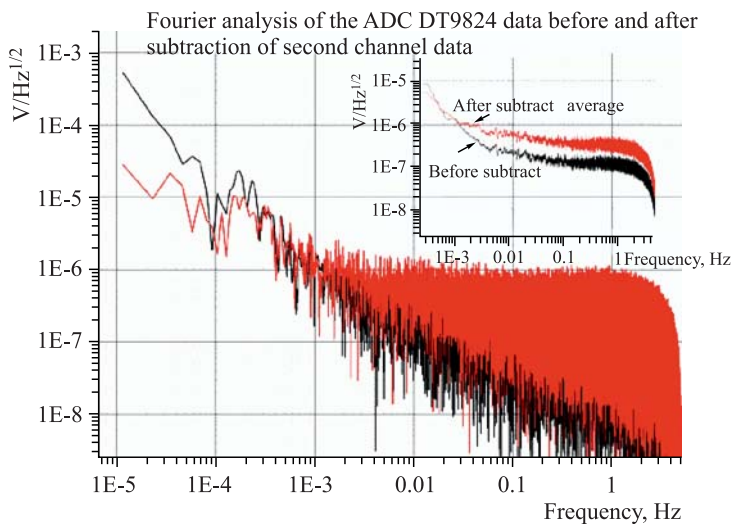


Рис. 4. Спектральный состав шумов АЦП DT9824 до и после компенсации долговременных шумов

На рис. 5 показаны шумы АЦП в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории.

Как видно из рис. 5, наблюдаются периодические всплески шумов от расположенного в температурно-стабильной лаборатории работающего конди-

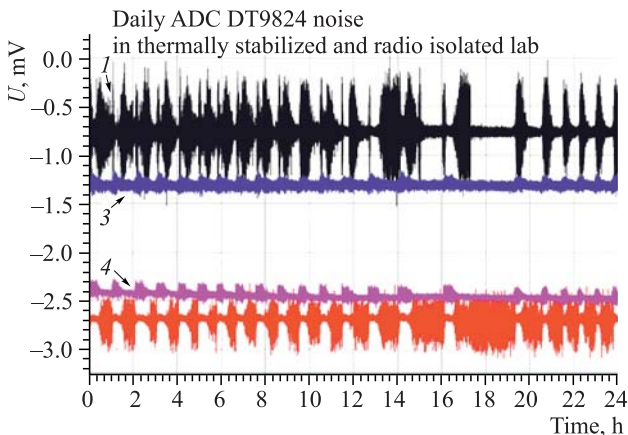


Рис. 5. Долговременные шумы АЦП DT9824 в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории

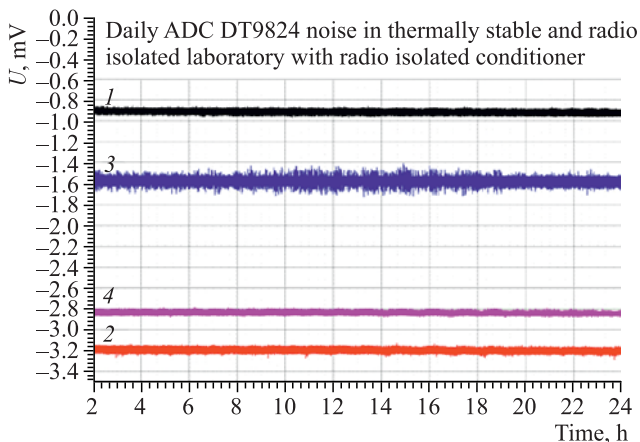


Рис. 6. Измеренные долговременные шумы АЦП DT9824 в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории с радиоизоляцией от кондиционера

опера. Для изоляции от воздействия работы кондиционера был использован металлический бокс.

Таким образом, природа подобных шумов — радиофон окружающей среды.

На рис. 6 показаны измеренные суточные шумы АЦП DT9824 в температурно-стабильных и радиоизолированных от работы кондиционера условиях.

Как видно из рис. 6, предположение о влиянии радиофона от внешних устройств на работу АЦП полностью подтвердилось. Суточные величины

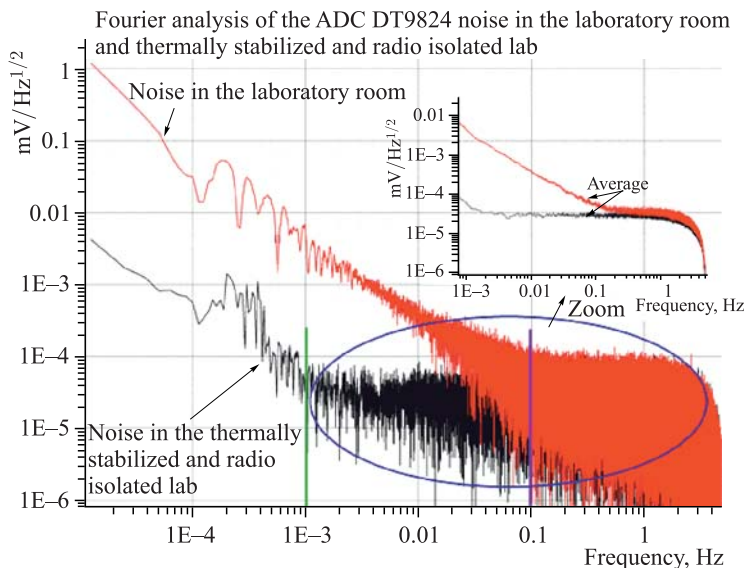


Рис. 7. Спектральная плотность шумов АЦП DT9824 в условиях лабораторной комнаты и в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории

среднеквадратичных отклонений величины шумов в каналах составили: 1-й канал — $1,2 \cdot 10^{-5}$ В, 2-й канал — $1,3 \cdot 10^{-5}$ В, 3-й канал — $1,9 \cdot 10^{-5}$ В, 4-й канал — $1 \cdot 10^{-5}$ В.

Определим частотный диапазон, в котором достигается предельное разрешение АЦП DT9824 в различных условиях его работы. Для этого проведем фурье-анализ данных канала 4, представленных на рис. 1 и 6.

Как видно из рис. 7, предельное разрешение АЦП на уровне $6 \cdot 10^{-8}$ В/Гц^{1/2} достигается в лабораторной комнате, начиная с частоты 0,1 Гц и в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории с частоты 0,001 Гц. Использование температурно-стабильных и радиоизолированных условий уменьшило шумы АЦП в области частот $1,25 \cdot 10^{-5}$ Гц в 240 раз и позволило достичь разрешения $4 \cdot 10^{-6}$ В/Гц^{1/2}.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВ 24-БИТНОГО АЦП DT9828

Этот тип 8-канального 24-битного АЦП представляет собой единичный АЦП с системой переключения измерительных каналов. После измерения напряжения в первом канале происходит переключение на второй и измерение напряжения в этом канале и т.д. Вполне очевидно, существует временная задержка между измерением первого и последующих каналов. Поэтому, как

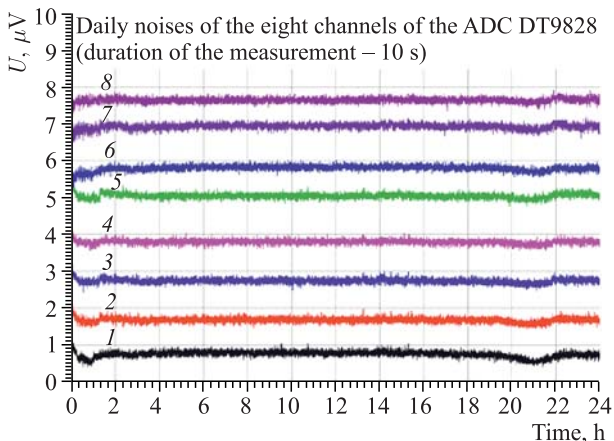


Рис. 8. Суточные шумы восьми каналов 24-битного АЦП DT9828

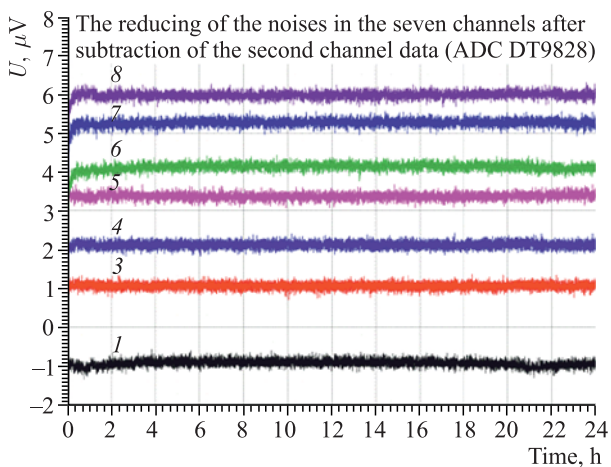


Рис. 9. Уменьшение долговременных шумов каналов 1, 3–8 после вычитания шумов второго канала для DT9828

правило, этот АЦП используется для медленно изменяющихся сигналов, где синхронизация в измерениях каналов не так существенна. Максимальная частота измерения для одного канала DT9828 равна 600 Гц с максимальной допустимой амплитудой входного сигнала 0,31 В. Для применения этого типа АЦП в ПЛИ необходимо минимизировать ошибку из-за неодновременности измерения.

На рис. 8 представлены шумы 8 каналов АЦП DT9828 в лабораторной комнате. Поскольку в DT9828 используется один амплитудно-цифровой

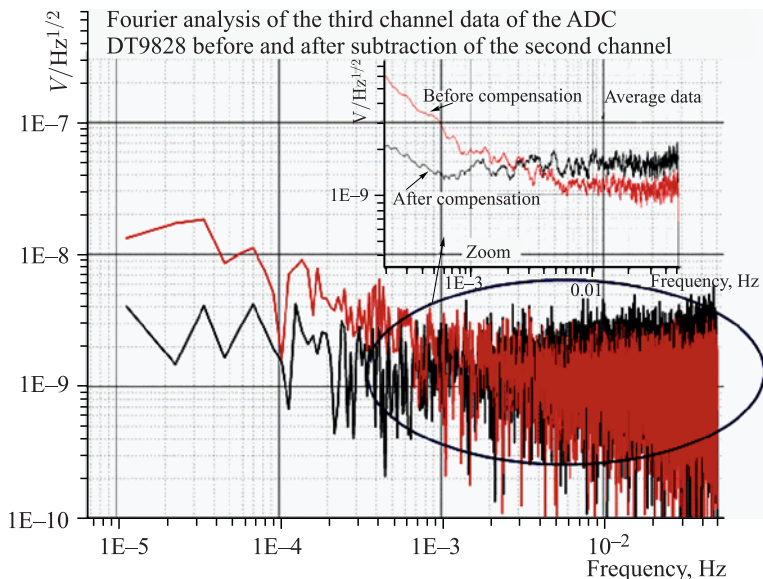


Рис. 10. Спектральная плотность шумов третьего канала АЦП DT9828 до и после вычитания долговременных шумов второго канала

преобразователь, то средние величины измеряемых шумов в каналах примерно совпадают. Для наглядности (рис. 8) графики шумов в индивидуальных каналах разнесены на расстояние 10^{-6} В. Продолжительность одного измерения 10 с.

Как видно из рис. 8, наблюдаются небольшие согласованные по времени изменения величины шумов в АЦП. Используя методику, описанную выше, вычтем значение второго канала из всех остальных для уменьшения долговременных шумов в оставшихся каналах. Результат показан на рис. 9.

Для определения величины снижения долговременных шумов и частотного диапазона предельного разрешения АЦП проведем фурье-анализ для канала 3 до и после компенсации (рис. 10).

Как видно из рис. 10, спектральная плотность долговременных шумов третьего канала после вычитания шумов второго канала уменьшилась в 6 раз и достигла уровня $4 \cdot 10^{-9}$ В/Гц $^{1/2}$ во всем диапазоне регистрируемых частот [10^{-5} Гц; 0,1 Гц].

Также для DT9828 были измерены суточные шумы в температурно-стабильных и радиоизолированных условиях на частоте 0,1 Гц (рис. 11).

Как видно из измерений, для этого типа АЦП величина шумов не изменяется во времени. Суточные величины среднеквадратичного отклонения распределения шумов U составили: 1-й канал — $6,2 \cdot 10^{-8}$ В, 2-й канал —

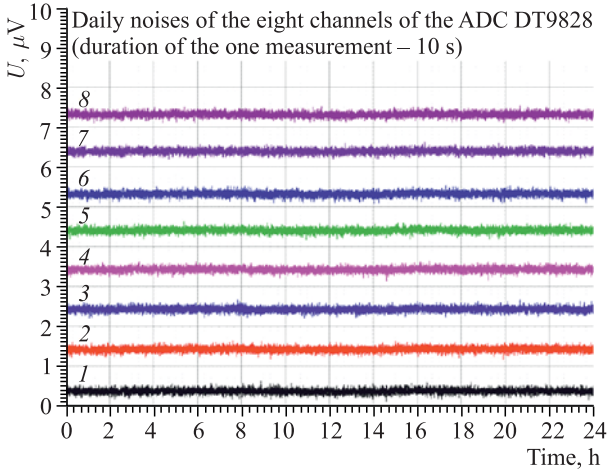


Рис. 11. Долговременные шумы АЦП DT9828 в температурно-стабильной и радиоизолированной от работы кондиционера лаборатории

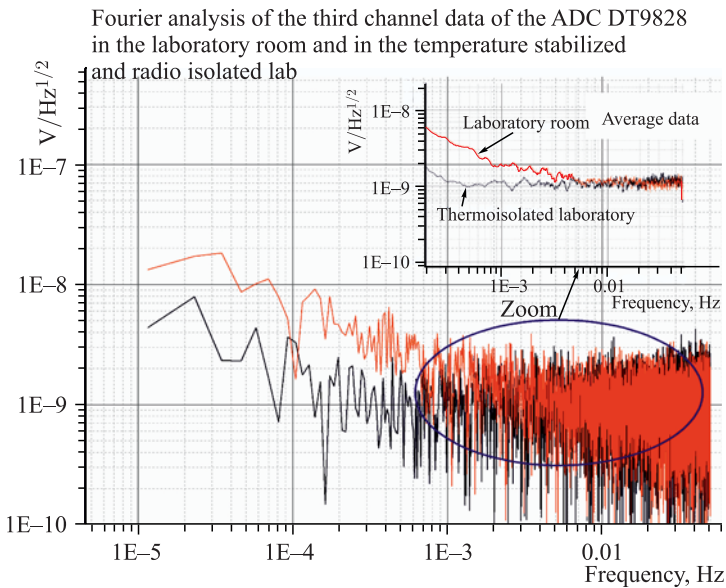


Рис. 12. Спектральная плотность шумов АЦП DT9828 канала 3 в условиях лабораторной комнаты и в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории

$6,1 \cdot 10^{-8}$ В, 3-й канал — $6,1 \cdot 10^{-8}$ В, 4-й канал — $6 \cdot 10^{-8}$ В, 5-й канал — $6,1 \cdot 10^{-8}$ В, 6-й канал — $6,23 \cdot 10^{-8}$ В, 7-й канал — $6,2 \cdot 10^{-8}$ В, 8-й канал — $6,2 \cdot 10^{-8}$ В.

На рис. 12 показаны результаты фурье-анализа данных измерения в лабораторной комнате и в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории.

Как видно из рис. 12, низкочастотные компоненты шумов в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории уменьшены в 3 раза.

Сравнение рис. 4, 10 и 12 показало: уровни высокочастотных шумов [10^{-2} Гц; 0,8 Гц] после вычитания данных второго канала и после регистрации в температурно-стабильных условиях отличаются примерно в 1,5 раза. Увеличение шумов при использовании методики «реперного канала» возникает при вычитании одного белого шума из другого. Как известно [8], в этом случае среднеквадратичное отклонение разности шумов увеличивается в $\sqrt{2}$. Это показывает целесообразность использования температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории для стабилизации параметров 24-битных АЦП.

ЗАВИСИМОСТЬ ШУМОВ ОТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОДНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ 24-БИТНЫХ АЦП DT9824 И DT9828

При продолжительности одного измерения до 10^{-3} с (частота измерения до 10^3 Гц) определим величину уменьшения шумов в условиях температурной стабильности и радиоизоляции.

На рис. 13, 14 показано изменение шумов со временем при различной продолжительности одного измерения для DT9824 и DT9828 в условиях лабораторной комнаты.

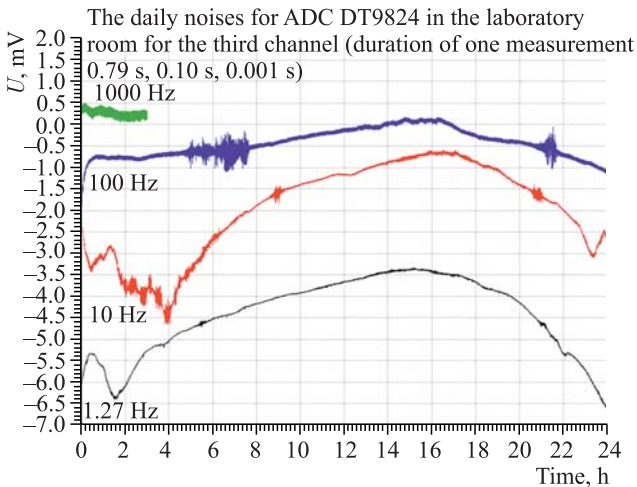


Рис. 13. Суточные шумы DT9824 в лабораторной комнате при различной продолжительности единичного измерения

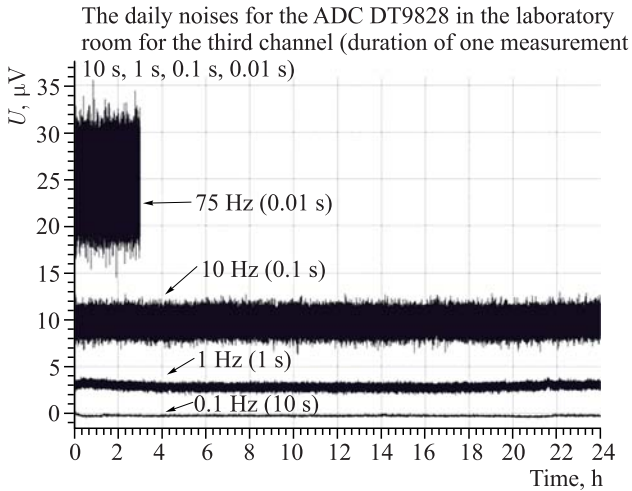


Рис. 14. Суточные шумы DT9828 при различной продолжительности единичного измерения в лабораторной комнате

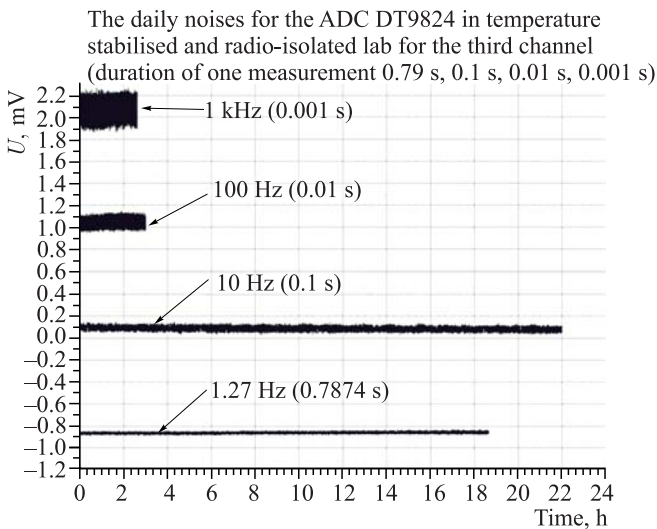


Рис. 15. Суточные шумы DT9824 в температурно-стабильной и радиозащищенной лаборатории при различной продолжительности единичного измерения

Как видно из рис. 13, 14, с уменьшением продолжительности единичного измерения увеличиваются амплитуды регистрируемых шумов.

На рис.15, 16 показаны аналогичные данные в условиях температурно-стабильной и радиозащищенной лаборатории.

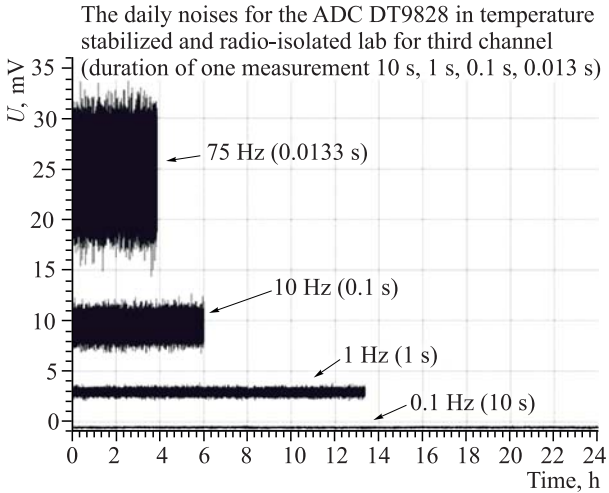


Рис. 16. Суточные шумы DT9828 в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории при различной продолжительности единичного измерения

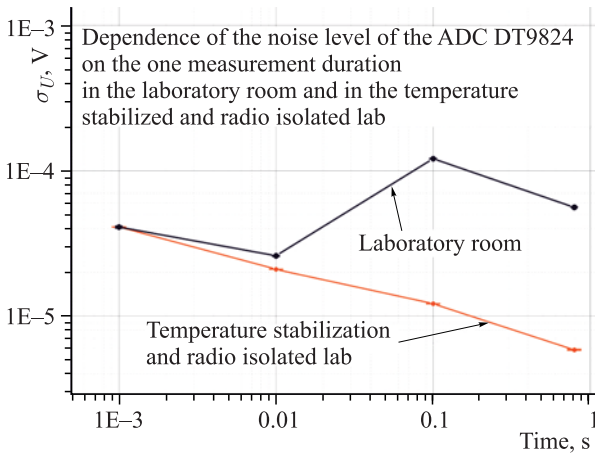


Рис. 17. Среднеквадратичные отклонения σ_U величин суточных шумов АЦП DT9824 в лабораторной комнате и в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории в зависимости от продолжительности единичного измерения

Для количественной характеристики уменьшения шумов определим среднеквадратичные отклонения в данных лабораторной комнаты и температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории.

На рис. 17 и 18 показаны среднеквадратичные отклонения величин шумов АЦП DT9824 и АЦП DT9828 в условиях лабораторной комнаты и в

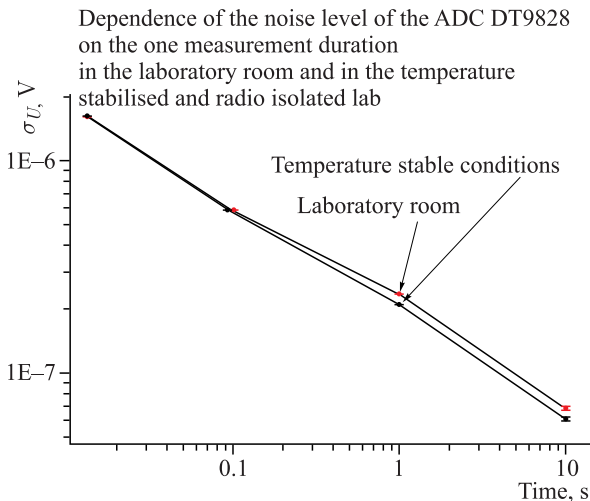


Рис. 18. Среднеквадратичные отклонения σ_U величин суточных шумов АЦП DT9828 в лабораторной комнате и в температурно-стабильной и радиоизолированной лаборатории в зависимости от продолжительности единичного измерения

температурно-стабильной радиоизолированной лаборатории в зависимости от продолжительности единичного измерения.

Как видно из рис. 17, 18, уменьшается различие шумов в лабораторной комнате и в температурно-стабильной, радиоизолированной лаборатории с уменьшением продолжительности одного измерения. Для АЦП DT9824 использование условий этой лаборатории уменьшило шумы для частоты измерения практически до 10^3 Гц. Для АЦП DT9828 это справедливо до частоты 10 Гц.

ДИСКУССИЯ

Предельная величина разрешения $\Delta U_{\text{ш}}$ 24-битного АЦП определяется флуктуациями выходного сигнала $\Delta U_{\text{ш}} = \frac{\Delta U}{2^{24}}$, где ΔU — максимальная величина входного регистрируемого сигнала, и интерпретируется нами как шум. Для АЦП DT9824 $\Delta U = 20$ В, соответственно, $\Delta U_{\text{ш}1} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ В. Для АЦП DT9828 $\Delta U = 0,31$ В и, соответственно, $\Delta U_{\text{ш}2} = 2 \cdot 10^{-8}$ В. В измерениях с АЦП важно определить частотный диапазон, в котором достигается предельно возможная точность измерения. Для этого определим величины среднеквадратичных отклонений σ_{U_i} суточных данных для шести ($i = 1-6$) частотных диапазонов [10^{-5} Гц; 10^{-4} Гц], [10^{-5} Гц; 10^{-3} Гц], [10^{-5} Гц; 10^{-2} Гц], [10^{-5} Гц; 10^{-1} Гц], [10^{-5} Гц; 1 Гц], [10^{-5} Гц; 10 Гц] для обоих

АЦП. Для обоих АЦП мы использовали массив экспериментальных данных с продолжительностью единичного измерения 0,1 с (измерения происходили в температурно-стабильных и радиоизолированных условиях). При помощи фурье-фильтра из массива данных суточных измерений определялись искомые величины σ_{U_i} в вышеуказанных частотных диапазонах. Для удобства анализа введем величину $K_i = \frac{\sigma_{U_i}}{\Delta U_{ш}}$, которая представляет собой отношение среднеквадратичного отклонения шумов АЦП в частотных диапазонах к его предельному разрешению.

В табл. 1 показана величина K_i в шести частотных диапазонах.

Таблица 1

Частотный диапазон	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10 \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 1 \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-1} \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-2} \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-3} \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-4} \text{ Гц}]$
K_i	8,5	5,2	3,8	3,7	3,6	3,0

Как видно из табл. 1, уменьшается превышение предельных шумов АЦП в низкочастотных диапазонах. Таким образом, этот тип АЦП полезно использовать для одновременного наблюдения сигналов как в высокочастотной, так и в низкочастотной областях с относительным разрешением $3 \cdot 10^{-7}$. Напомним, временная синхронизация каналов этого типа АЦП не хуже 1 мкс. К недостаткам использования этого типа АЦП можно отнести необходимость предусиления сигналов, что является достаточно сложной задачей особенно в области низких частот.

Аналогичная зависимость для АЦП DT9828 показана в табл. 2.

Таблица 2

Частотный диапазон	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10 \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 1 \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-1} \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-2} \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-3} \text{ Гц}]$	$[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-4} \text{ Гц}]$
K_i	29,5	9,4	2,9	1,0	0,5	0,4

Как видно из табл. 2, коэффициент K растет в области высоких частот до $K = 29,5$. Но вместе с тем, начиная с частотного диапазона $[10^{-5} \text{ Гц}; 10^{-2} \text{ Гц}]$, достигается предельное разрешение АЦП.

Таким образом, этот тип АЦП DT9828 полезен при регистрации медленных сигналов: его применение в области высоких частот ограничено неодновременностью регистрации выходных сигналов.

Из-за малого максимального входного напряжения ($\pm 0,156 \text{ В}$) этот тип АЦП не требует предварительного усиления и может работать напрямую с источником сигнала в прецизионном лазерном инклинометре. Для ПЛИ это сигнал с фотоприемника, работающего в фотovoltaжном режиме. Максимальный

сигнал с фотоприемника ограничивается нелинейной зависимостью отклика фотоприемника от интенсивности лазерного луча. Он составляет величину 0,1 В. Таким образом, использование АЦП DT9828 позволит регистрировать сигналы в области высоких частот [0,1 Гц; 10 Гц] с относительным разрешением $[2 \cdot 10^{-7}; 1 \cdot 10^{-6}]$. Для области низких частот $[10^{-5} \text{ Гц}; 0,1 \text{ Гц}]$ относительное разрешение составит $[2 \cdot 10^{-7}; 6 \cdot 10^{-8}]$.

Определим предельный наклон земной поверхности, который может быть зарегистрирован ПЛИ в условиях шума АЦП DT9828. При калибровочном коэффициенте вакуумированного ПЛИ 200 мкрад/В микросейсмические сигналы в области высоких частот [0,1 Гц; 10 Гц] могут быть зарегистрированы с разрешением $[1,2 \cdot 10^{-11} \text{ рад}; 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ рад}]$. Для области низких частот $[10^{-5} \text{ Гц}; 0,1 \text{ Гц}]$ получим соответственно $[4 \cdot 10^{-12} \text{ рад}; 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ рад}]$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное исследование шумов двух типов АЦП DT9824 и DT9828 в условиях лабораторного помещения выявило сильную зависимость шумов от внешней температуры и присутствие кратковременных (до 1 ч) высокочастотных шумов. Амплитуда суточных изменений шума DT9824 составила 4,1 мВ и 0,4 мкВ для DT9828.

Определен источник кратковременных высокочастотных шумов — это радиофон от работы кондиционеров, вакуумных насосов и т. д.

Разработана и применена методика уменьшения температурных шумов. В результате получено уменьшение долговременных шумов в 20 раз для DT9824 и в 4 раза для DT9828.

С целью уменьшения долговременных шумов исследования с 24-бит АЦП производились в температурно-стабильных и радиозащищенных условиях. В 240 раз уменьшены шумы для DT9824 и в 6 раз для DT9828.

Исследована зависимость шумов АЦП в условиях лабораторной комнаты и в температурно-стабильной и радиозащищенной лаборатории от продолжительности единичного измерения. Показана необходимость использования таких условий для АЦП DT9824 вплоть до измеряемых частот 10^3 Гц , для АЦП DT9828 — до 10 Гц.

Определено относительное разрешение АЦП DT9824 в шести частотных диапазонах от 10^{-5} Гц до 10 Гц в температурно-стабильных и радиозащищенных условиях. Экспериментальные шумы АЦП DT9824 были в среднем в 6 раз выше предельных расчетных для всех частотных диапазонов. Для АЦП DT9828, начиная с частоты 10^{-2} Гц и ниже, достигнута предельная величина разрешения АЦП.

Определена точность измерения углового наклона поверхности Земли при применении двух типов АЦП в ПЛИ.

Для АЦП DT9824 микросейсмические сигналы в области высоких частот [10^{-1} Гц; 10 Гц] могут быть зарегистрированы с разрешением [$8 \cdot 10^{-10}$ рад; $4 \cdot 10^{-9}$ рад]. Для области низких частот [10^{-5} Гц; 0,1 Гц] — с разрешением [$4 \cdot 10^{-10}$ рад; $8 \cdot 10^{-10}$ рад].

Для АЦП DT9828 разрешение в области высоких частот [0,1 Гц; 10 Гц] составило [$1,2 \cdot 10^{-11}$ рад; $1,2 \cdot 10^{-10}$ рад] и для области низких частот [10^{-5} Гц; 0,1 Гц] — [$4 \cdot 10^{-12}$ рад; $1,2 \cdot 10^{-11}$ рад].

Поскольку для АЦП DT9824 требуется усиление сигналов ПЛИ с коэффициентом усиления 100, предпочтительно использовать DT9828.

Полученные результаты исследования позволяют более чем на порядок повысить чувствительность прецизионного лазерного инклинометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Budagov J., Lyablin M.* Patent RF# 25010488. A Device for Measuring the Angle of Inclination. 30.05.2012.
2. *Batusov V., Budagov J., Lyablin M.* A Laser Sensor of a Seismic Slope of the Earth Surface // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, Iss. 1. P. 43–48.
3. *Budagov J., Lyablin M., Shirkov G.* The Search for and Registration of Superweak Angular Ground Motions. JINR Comm. E18-2013-107. 2013, Dubna.
4. *Keränen P.* High Precision Time-to-Digital Converters for Applications Requiring a Wide Measurement Range // Acta Universitatis Ouluensis. C Technica. 2016. V. 565.
5. Data Acquisition Handbook. A Reference for DAQ and Analog & Digital Signal Conditioning. Measurement Computing Corporation. 3rd ed. 2012.
6. *Keränen P., Kostamovaara J.* Noise and Nonlinearity Limitations of Time-to-Voltage Based Time-to-Digital Converters // Proc. IEEE Nordic-Mediterranean Workshop on Time-to-Digital Converters (NoMe TDC). 2013. Perugia, Italy. P. 1–6.
7. *Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Shirkov G., Mainaud Durand H.* Air Temperature Stabilization in the Thermally Isolated Optical Laboratory // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11(3). P. 294–298.
8. *Papoulis A.* Probability, Random Variables and Stochastic Processes. V. 11, Iss. 3. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1984. 576 p.

Получено 24 августа 2018 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 05.10.2018.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,14. Тираж 215 экз. Заказ № 59500.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/