

# Применение MAD-фильтра с имитацией режима холдовера для повышения стабильности GPSDO на основе кварцевого генератора

С.В. Ивченко

АО «Морион»

**Аннотация:** в работе исследовано влияние выбросов в фазовых измерениях GPS-приёмника на работу системы GPSDO. Предложен MAD-фильтр, имитирующий переход устройства в режим холдовера при обнаружении аномалий, с замещением выбросов на среднее значение по нормальным точкам. Такой подход опирается на высокую кратковременную стабильность кварцевого генератора, что позволяет не использовать сомнительные GPS-данные в течение коротких интервалов. По результатам моделирования получена количественная оценка улучшения девиации Аллана как для GPS-приёмника, так и для всей GPSDO-системы в целом.

**Ключевые слова:** GPSDO, MAD-фильтр, GPS PPS, кварцевый генератор, девиация Аллана

## 1. Введение

В последнее время проявляется повышенный интерес к созданию высокостабильных генераторов частоты на основе GPS (GPSDO), используемых в системах синхронизации, телекоммуникациях и навигации. В таких устройствах сигналы GPS PPS служат внешним референсом для коррекции долговременного дрейфа кварцевого генератора. Однако фазовые измерения GPS-приёмника содержат редкие, но значительные выбросы, вызванные многолучевостью, сбоями приёма и атмосферными эффектами [1 – 2]. При попадании таких аномалий в цепь обратной связи ФАПЧ управляющий сигнал искажается, что приводит к росту ошибки слежения и ухудшению девиации Аллана – ключевой метрологической характеристики GPSDO.

В реальном устройстве при обнаружении аномалии целесообразно переходить в режим холдовера (holdover) [3], полагаясь на кратковременную стабильность самого кварцевого генератора. Известно, что на коротких интервалах стабильность кварца сопоставима с атомными стандартами, что делает такой подход физически обоснованным. Тем не менее, алгоритмическая реализация холдовера при выбросах GPS-данных и её влияние на долговременную стабильность GPSDO до сих пор недостаточно исследована. В частности, отсутствуют количественные оценки улучшения девиации Аллана при использовании робастных методов фильтрации, имитирующих холдовер.

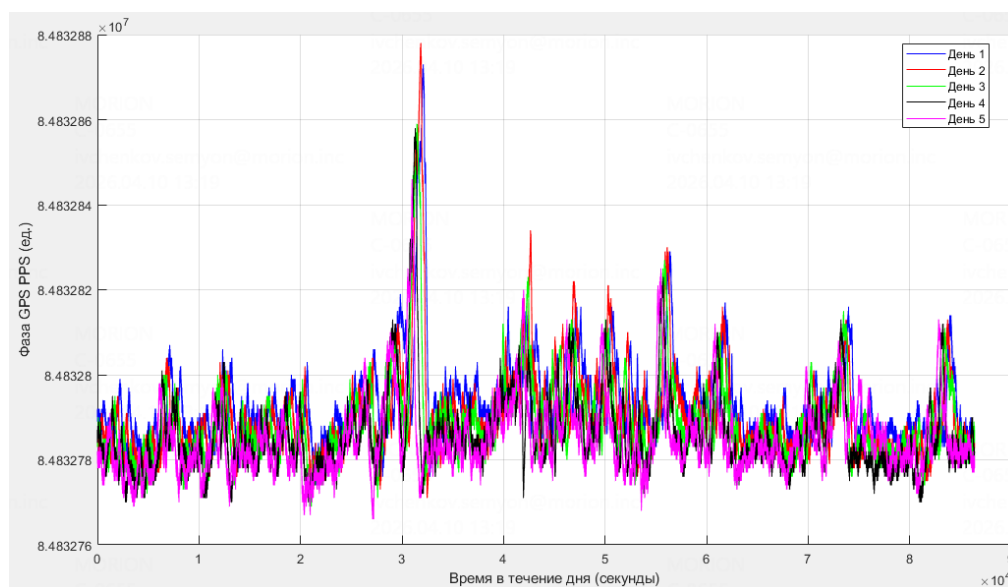
В настоящей работе предложен MAD-фильтр (Median Absolute Deviation) [4 – 5] для предобработки фазы GPS PPS, в котором выбросы заменяются на среднее значение по нормальным точкам, что моделирует поведение системы в режиме холдовера. Проведено сравнение двух сценариев: базового (чистые данные GPS) и с полноценным MAD-фильтром. Получены количественные оценки улучшения девиации Аллана как для GPS-приёмника, так и для GPSDO-системы в целом.

## 2. Описание модели и эксперимента

GPSDO (GPS Disciplined Oscillator) представляет собой систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), в которой ведомый кварцевый генератор подстраивается под ведущий высокостабильный сигнал GPS PPS (импульс в секунду).

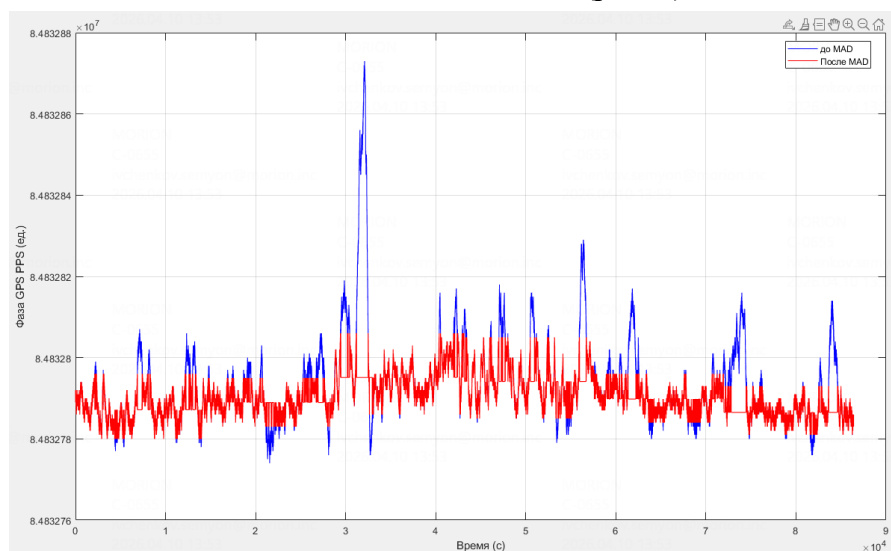
Долговременный дрейф кварца (уход частоты) компенсируется по GPS-референсу, а кратковременная стабильность определяется собственными шумами кварцевого генератора.

В ходе анализа 5-суточных измерений фазы GPS PPS (рис. 1) обнаружены характерные выбросы, повторяющиеся изо дня в день. Их природа связана с многолучевостью, взаимным расположением спутников и суточными вариациями ионосферы. На рис. 1 показано наложение графиков фазы за пять дней: видны единичные аномалии, амплитуда которых до 4 раз превышает средний разброс значений, что подтверждает систематический характер выбросов.



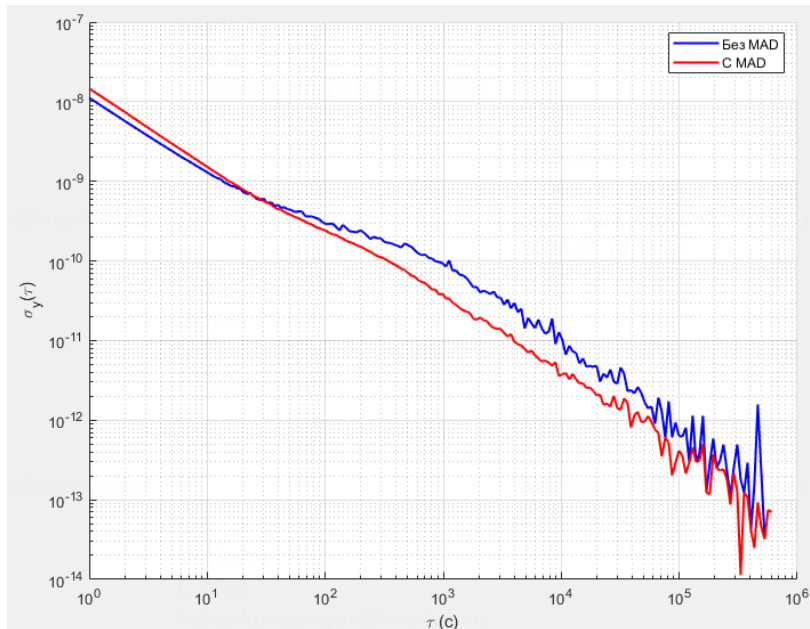
**Рисунок 1.** Наложение графиков фазы GPS PPS за пять последовательных дней.

Для исключения влияния аномальных выбросов в моделировании используется MAD-фильтр. В реальном устройстве предполагается, что в заданном временном окне вычисляются медианное значение и порог; если фаза GPS PPS превышает этот порог, система переходит в режим холдвера. Благодаря высокой кратковременной стабильности кварцевого генератора, в моделировании значения, превышающие порог фильтра, заменяются на медианное значение в окне (рис. 2).



**Рисунок 2.** Реализация MAD-фильтра для GPS PPS.

Эффективность MAD-фильтра оценивалась по девиации Аллана относительной частоты GPS PPS (рис. 3). Фильтр уменьшает влияние выбросов, что приводит к снижению девиации Аллана на интервалах 100–10000 с в 1,5–2 раза по сравнению с нефильтрованным сигналом. Таким образом, предложенный метод повышает долговременную стабильность GPS-сигнала, не ухудшая его кратковременных характеристик.



**Рисунок 3.** Влияние MAD-фильтра на девиацию Аллана GPS PPS

Поскольку GPS PPS служит опорным сигналом для ФАПЧ, повышение его долговременной стабильности непосредственно улучшает качество подстройки кварцевого генератора. Таким образом, предложенный метод положительно сказывается на характеристиках всей системы в целом.

### 3. Заключение

Проведённые исследования подтвердили, что регулярные выбросы в сигнале GPS PPS негативно влияют на метрологические характеристики GPSDO. Предлагаемый подход на основе MAD-фильтра обеспечивает робастную предобработку фазы: при превышении адаптивного порога система не использует недостоверные данные, а полагается на кратковременную стабильность кварца. Количественная оценка показала, что девиация Аллана очищенного сигнала на средних временах усреднения оказывается в 1,5–2 раза ниже, чем у исходного. Таким образом, метод эффективен для повышения качества синхронизации в условиях реальных помех, что подтверждается снижением девиации Аллана как опорного GPS-сигнала, так и выходной частоты GPSDO. Дальнейшие работы могут быть направлены на оптимизацию параметров фильтра и его интеграцию в аппаратные GPSDO.

#### Список литературы

1. Clynch J. R. Error Sources and Their Mitigation for PPS Shipborne System // Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1998). – 1998.
2. Siddiqui M. A. GPS Error and Biases // Remote sensing, GIS and GPS. – Режим доступа: <https://ebooks.inflibnet.ac.in/geop10/chapter/gps-error-and-biases/> (дата обращения: 10.04.2026).

3. Browne J. Disciplined Oscillators Keep Time in Small Satellites // *Microwaves & RF*. – 2020. – 27 Jan. – Режим доступа: <https://www.mwrf.com/markets/defense/article/21121461/bliley-technologies-disciplined-oscillators-keep-time-in-small-satellites> (дата обращения: 10.04.2026).
4. Klos A., Bogusz J., Figurski M., Kosek W. On the Handling of Outliers in the GNSS Time Series by Means of the Noise and Probability Analysis // *IAG 150 Years*. – Springer, 2016.
5. Bezmenov I. V. Effective Algorithms for Detection Outliers and Cycle Slip Repair in GNSS Data Measurements. – IntechOpen, 2020.