**Managing Gyro Noise with the Dynamic Harmonic Notch Filters**

Как обсуждалось в разделе "Подавление вибрации", эффективное управление вибрацией в установках автопилота **ArduPilot** является чрезвычайно важным для обеспечения предсказуемого управления воздушным судном. Обычно установки используют механическое подавление вибрации для автопилота, внутреннее или внешнее, чтобы уменьшить воздействие вибрации. Однако механическое подавление может пойти только до определенного предела, и для удаления дополнительного шума необходимо использовать программное фильтрование.

Для автопилота вибрационный шум выглядит как любое другое внешнее воздействие (например, ветер, турбулентность, люфт в управляющей связи и т. д.), с которым автопилот должен компенсировать для управления воздушным судном. Это мешает оптимальной настройке петель управления угловым положением и снижает производительность.

ArduPilot предоставляет два механизма фильтрации для шума. Фильтры нижних частот на сигналах акселерометра, управляемые параметром INS\_ACCEL\_FILTER, и сигналах гироскопа, управляемые параметром INS\_GYRO\_FILTER, а также фильтры гармонических узких полос на сигналах гироскопа.

Как обсуждалось в разделе "Измерение вибрации", существуют два основных класса шумов/вибраций: те, которые генерируются в пределах полосы пропускания гироскопов/акселерометра, и шумы выше этих частот, которые могут вызывать "наклоны". Алиасные шумы должны быть устранены у источника с помощью улучшенного крепления или жесткости рамы, но вышеупомянутые фильтры могут справиться с остальными.

Для мультикоптеров и квадропланов практически все вибрации исходят от вращающейся частоты мотора. Для вертолетов и самолетов вибрации связаны с скоростью вращения основного ротора/винта.

ArduPilot поддерживает два фильтра узких полос, частота которых может быть связана с вращающейся частотой мотора для моторов или скоростью ротора для вертолетов, и создает узловые точки на основной частоте и ее гармониках.

Хотя фильтры нижних частот могут эффективно снизить влияние этого шума, установка низких частот создает много фазовой задержки и, следовательно, снижает степень агрессивной настройки перед возникновением осцилляций, что приводит к менее качественной настройке.

Для контроллеров скорости на основе гироскопа это снижает их способность реагировать на быстрые возмущения. Если нижний фильтр гироскопа можно установить выше, фазовая задержка уменьшается, и настройка может быть более агрессивной. Но это позволяет больше шума и вибраций, что фактически уменьшает этот выигрыш. Включение одного или обоих фильтров гармонических узких полос позволяет нацеливать шум, генерируемый моторами, что позволяет установить более высокую частоту следующего нижнего фильтра и, следовательно, более плотную настройку.

Гармонический узкий фильтр включается в общем смысле путем установки INS\_HNTCH\_ENABLE = 1 для первой узкой полосы и INS\_HNTC2\_ENABLE = 1 для второй. После перезагрузки появятся все соответствующие параметры.

Предоставляются различные методы динамической настройки частоты центра узкой полосы(полос) для отслеживания скорости мотора при различных условиях тяги, т. е. динамическая фильтрация гармонической узкой полосы.

## Notch Filter Control Types

Ключом к работе динамического узкого фильтра является управление его центральной частотой. Существует пять методов, которые можно использовать для этого:

1. **INS\_HNTCH\_MODE = 0**. Отключено динамическое управление частотой узкой полосы. Центральная частота фиксирована и статична. Часто используется в традиционных вертолетах с внешними регуляторами скорости ротора, встроенными в ЭСК или отдельными для моторов с внутренним сгоранием.

2. **INS\_HNTCH\_MODE = 1**. (По умолчанию) Основано на положении дросселя, где частота при холостом ходу определяется анализом журналов, а затем изменение положения дросселя выше этого используется для отслеживания увеличения частоты шума. Обратите внимание, что ссылка на дроссель применяется только к моторам VTOL в квадропланах, а не к передним моторам, и не будет эффективной в режимах полета только на фиксированном крыле. См. детали настройки на основе дросселя для дальнейших инструкций по настройке.

3. **INS\_HNTCH\_MODE = 2** (RPM Sensor 1) или 5 (RPM Sensor2). Основано на датчике оборотов, где внешний датчик оборотов используется для определения частоты мотора и, следовательно, основной частоты вибрации для узкой полосы. Часто используется в традиционных вертолетах (см. вертолеты), использующих функцию Губернатора оборотов головки ArduPilot. См. инструкции по настройке датчика оборотов для дальнейших инструкций по настройке.

4. **INS\_HNTCH\_MODE = 3**. Основано на телеметрии ESC, где ЭСК предоставляет информацию о частоте вращения мотора, которая используется для установки центральной частоты. Это также может быть использовано для переднего мотора в полете на фиксированный крыле, если ЭСК(и) переднего мотора сообщают о частоте вращения. Для этого требуется правильная настройка ваших ЭСК для поддержки телеметрии BLHeli через последовательный порт. См. инструкции по настройке телеметрии ЭСК для дальнейших инструкций по настройке. Если INS\_HNTCH\_OPTS или INS\_HNTC2\_OPTS, если включен второй набор узких полос, имеет установленный второй бит, то будет создан набор узких полос для каждого мотора, отслеживающий его телеметрию оборотов, в противном случае, средняя частота всех моторов будет установлена как центральная частота.

5. **INS\_HNTCH\_MODE = 4**. Если ваш автопилот поддерживает это (т. е. имеет более 2 МБ флэш-памяти, см. ограничения прошивки на аппаратном обеспечении автопилота), FFT во время полета, где во время полета выполняется работа FFT для определения основной частоты шума и регулировка центральной частоты узкой полосы для соответствия. Это, вероятно, лучший режим, если автопилот способен выполнять эту функцию. Этот режим также работает на самолетах только с фиксированным крылом. См. инструкции по настройке FFT во время полета для дальнейших инструкций по настройке.

Все вышеупомянутые параметры повторяются, независимо друг от друга, для второй узкой полосы и предваряются INS\_HNTC2\_ вместо INS\_HNTCH\_. Ниже приведено объяснение настройки первого набора узких полос.

Примечание:

только один фильтр может быть режимом 4 (FFT).

## Determining Notch Filter Center Frequency

Прежде чем фактически настраивать динамический узкий фильтр, сначала необходимо определить частоты, которые требуется отфильтровать. Это крайне важно, если используется настройка динамического узкого фильтра на основе положения дросселя. Хотя для других методов это не требуется заранее, все же целесообразно использовать это знание в качестве точки сравнения для анализа эффективности фильтра после его активации.

После того как частота шума определена, узкие фильтры могут быть дополнительно настроены. Исторически для этого использовалось измерение вибрации с помощью партии IMU (также для медленных ЦП, таких как автопилоты на основе F4), записывая короткие порции сырых данных IMU для спектрального анализа.

С версии прошивки 4.5 и позднее был разработан более эффективный метод с использованием непрерывных сырых данных IMU, если автопилот основан на H7, и с использованием нового веб-инструмента. Этот метод теперь является предпочтительным.

## Number of Harmonics Filtered

Установите параметр INS\_HNTCH\_HMNCS для активации нескольких гармонических фильтров, центрированных на до 16-кратной базовой частоте (кратные центральной частоте) узких полос. Для отслеживания через ESC INS\_HNTCH\_MODE каждый мотор получит набор этих полос. Если октокоптер настраивает три гармоники, то это приводит к 8 x 3 = 24 узким полосам. Включение тройных полос приведет к 72 фильтрам! Это, безусловно, вызовет избыточную загрузку ЦП и проблемы с производительностью. Другие режимы предоставляют только один набор гармонических полос.

Всегда включайте только количество гармонических узких полос, которое действительно требуется, и будьте особенно внимательны к тому, что активируется, если используется режим отслеживания через ESC (INS\_HNTCH\_MODE = 3). Включение слишком большого количества приведет к исчерпанию циклов ЦП, что приведет к непредсказуемым результатам. Три гармоники обычно безопасны.

## FFT Dynamic Harmonic Notch Frequency Tracking

Режим отслеживания FFT устанавливает базовую частоту на самый высокий пик шума. Обычно, когда затем включаются несколько гармонических узких фильтров, центральная частота каждой гармоники блокируется на базовую частоту первого фильтра как целое кратное, определяемое INS\_HNTCH\_HMNCS. Установка бита 1 параметра INS\_HNTCH\_OPTS или INS\_HNTC2\_OPTS позволит каждому гармоническому фильтру отслеживать самые большие пики шума независимо.

Примечание:

установка бита 1 параметров узких полос также изменит значение по умолчанию параметра INS\_HNTCH\_HMNCS на 1 вместо его обычного значения 3. Это сделано для совместимости с предыдущими версиями прошивки. После установки бита 1 параметра INS\_HNTCH\_HMNCS вы можете вернуть значение INS\_HNTCH\_HMNCS обратно на 3 или на любое другое значение по вашему усмотрению.

## Checking Notch Filter Effectiveness

После настройки узких фильтров их эффективность можно проверить, снова измерив частотный спектр выхода фильтров (которые являются новыми входами для датчиков IMU). Для этого снова обратитесь к странице "Измерение вибрации с помощью партии IMU Sampler" или "Регистрация сырых данных IMU для анализа FFT".

## Multi Notch

Используемые программные узкие фильтры имеют очень "острые" характеристики, относительно узкие, но хорошо подавляются в их центре. На более крупных коптерах профиль шума от моторов довольно "грязный", охватывая более широкий диапазон частот, чем может охватить один узкий фильтр. Чтобы решить эту ситуацию, можно настроить гармонические узкие полосы как несколько полос, обеспечивающих более широкое распределение значительного подавления. Конфигурация контролируется параметром INS\_HNTCH\_OPTS. Это параметр с маской битов, и одновременно возможны несколько вариантов, но одновременное использование бита 0, 1 и бита 4 следует избегать. Используйте только один из них в данной конфигурации.

Бит параметра **INS\_HNTCH\_OPTS** Действие

0 Двойные перекрывающиеся узкие полосы

1 Множественный источник: если используется режим FFT, трем большим источникам шума будет назначен узкий фильтр. Если режим телеметрии ESC, то каждому мотору будет назначен узкий фильтр на его оборотах в минуту (RPM).

2 Обновляет фильтры на частоте цикла. Это требует много ресурсов ЦП, но позволяет быстрее отслеживать изменения шума. Действительно только при обновлении источника частоты на частоте цикла, например, при использовании двунаправленной телеметрии DShot.

3 Включает узкие полосы на каждом IMU, а не только на основном. Это требует много ресурсов ЦП, но позволяет лучше принимать решения о переключении полос в шумных ситуациях и для отладки. Не рекомендуется для плат F4.

4 Тройные перекрывающиеся узкие полосы

Примечание

Опция двойного узкого фильтра больше не рекомендуется, так как была добавлена тройная опция узких фильтров. В случае двойного узкого фильтра максимальное подавление находится по обе стороны от центральной частоты, поэтому на более маленьких воздушных судах с очень выраженным пиком их использование обычно неэффективно.

Примечание

Каждый узкий фильтр требует определенных ресурсов ЦП, поэтому при настройке нескольких узких фильтров на вашем воздушном судне может появиться много фильтров. Например, настройка тройных одиночных (без гармоник) узких фильтров, используя телеметрию ESC, приведет к 3 узким фильтрам на каждый мотор или 12 общим узким фильтрам. Например, для ЦП на основе F4 это должно быть приемлемо, но включение второй группы тройных узких фильтров с помощью INS\_HNTC2\_ENABLE или нескольких гармонических узких фильтров может вызвать проблемы.