

Настройка системы управления в Simulink - это легко!

Паскаль Гахинет и Аркадий Туревский, MathWorks

Как инженеры систем управления мы знаем, что настройка системы управления может быть довольно сложной, если полагаться только на опыт и делать все руками. Это особенно верно для систем управления со множественными обратными связями или настраиваемыми компонентами, как например каскадные ПИД регуляторы, управляющие структуры с прямым и обратным действием, контуры управления MIMO систем со значительными перекрестными связями.

Традиционно инженеры настраивают только один элемент или один контур управления за раз. Помимо того, что такой подход является итерационным и затратным по времени, данный метод также требует значительного опыта. Поэтому для новых инженеров это трудно осваиваемый подход и в целом не гарантирует оптимальность конечного решения.

Используя в качестве примера систему управления полетом вертолета, в данной статье описывается систематичный и автоматизированный метод настройки всех параметров системы управления одновременно с учетом стандартных требований к производительности и надежности системы.

Система управления полетом вертолета: архитектура и требования

На рисунке 1 показана система управления полетом вертолета, смоделированная в Simulink. Динамика вертолета моделируются в блоке "Helicopter". Система управления полетом формирует команды δ_s , δ_c и δT в градусах для продольного, бокового управления циклическим шагом винта и хвостового рулевого винта соответственно. Управление основывается на измерениях θ (угол тангажа), ϕ (угол крена), p , q и r (изменение крена, тангажа и рыскания). Контроллер состоит из двух контуров обратной связи. Внутренний контур (статический выход блока обратной связи, светло-голубой блок на рисунке 1) обеспечивает повышение устойчивости и развязку. Внешний контур (оранжевые блоки PI на рис.1) обеспечивает требуемое качество отслеживания уставки.

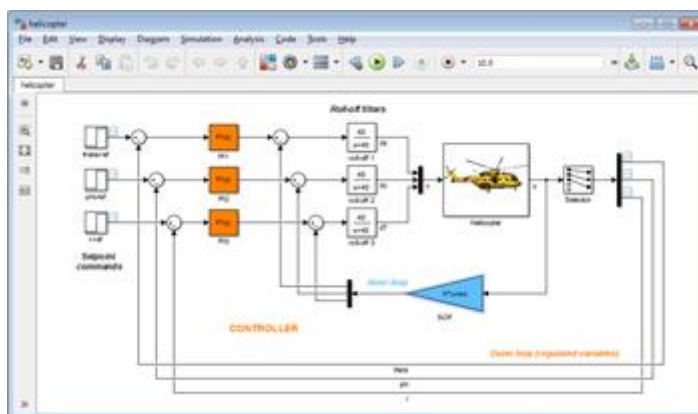


Рисунок 1. Система управления полетом вертолета, состоящая из внутреннего (синий) и внешнего (оранжевый) контура управления.

Требования к системе управления следующие:

- Отслеживать заданные изменения установки по θ , ϕ и r с нулевой установившейся ошибкой, временем регулирования не более двух секунд, минимальным перерегулированием и минимальной перекрестной связью.
- Обеспечивать по всем переменным надежные запасы по амплитуде и по фазе.
- Ограничить полосу пропускания замкнутой системы для защиты от высокочастотной составляющей динамики ротора и шумов измерений.

Система управления полетом использует фильтр нижних частот (ФНЧ) с отсечкой в 40 рад/с, чтобы частично обеспечить соблюдение третьего пункта требований.

Задачи настройки системы управления

Система управления имеет 21 настраиваемых параметров: 6 коэффициентов для трех ПИ регуляторов во внешнем контуре и 15 значений матрицы усиления размерностью 3 на 5 во внутреннем контуре. Все коэффициенты ПИ регуляторов имеют единичные начальные значения и нулевую матрицу усиления во внутреннем контуре. После запуска модели с этими значениями мы можем наблюдать неустойчивое поведение ненастроенной системы (рисунок 2).

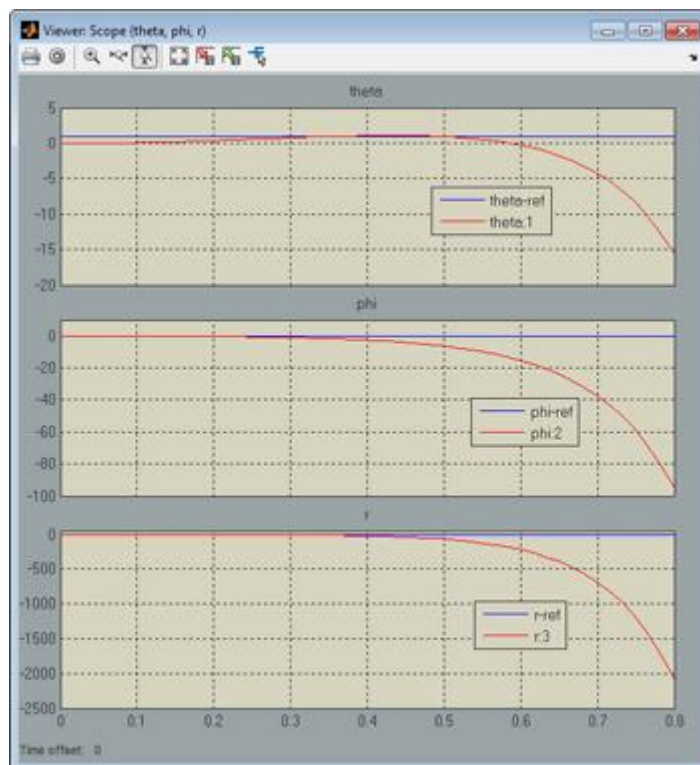


Рисунок 2. Результаты моделирования показывают неустойчивое поведение системы с начальными не настроенными значениями параметров системы

Необходимо настроить все параметры регулятора (21 значений) для обеспечения устойчивости системы и удовлетворения всех требований. Мы используем команду `sys tune` из Robust Control Toolbox, что бы совместно настроить внутренние и внешние контуры управления.

Технология для автоматизированной настройки системы управления

Команда `sys tune` настраивает (производит "тюнинг") систему управления в Simulink таким образом, чтобы удовлетворить смешанные требования во временной и частотной областях одновременно. Рабочий процесс состоит из четырех основных этапов:

1. Указываем для настройки блоки модели в Simulink.
2. Определяем требования.
3. Настраиваем параметры системы управления.
4. Обновляем блоки Simulink с настроенными значениями и проверяем результат настройки при моделировании.

Определение блоков для настройки

Используя интерфейс команды `slTunable` в Simulink Control Design™, мы указываем название модели Simulink и имена блоков для настройки. `slTunable` автоматически линеаризует модель Simulink и настраивает задачи для `sys tune`.

```
ST0 = slTunable('helicopter',{'PI1','PI2','PI3','SOF'});
```

Определение требований

Robust Control Toolbox предоставляет полный набор целей настройки, в том числе по следующим критериям: слежение за уставкой, подавление возмущений, формирование передаточной функции по частотной характеристике (loop shaping), заданные запасы по фазе и амплитуде, а также размещение полюсов замкнутой системы. Для нашего примера мы используем следующие требования:

- Отслеживать изменения уставки с заданным временем отклика не более двух секунд и установившейся ошибкой менее 1%.

```
TrackReq = TuningGoal.Tracking({'theta-ref','phi-ref','r-ref'},{'theta','phi','r'},2,1e-2);
```

- Обеспечить робастность при вариациях сигналов до 5 дБ по амплитуде и до 40 градусов по фазе на входах и выходах объекта (независимо друг от друга или одновременно во всех каналах).

```
MarginReq1 = TuningGoal.Margins('u',5,40);  
MarginReq2 = TuningGoal.Margins('y',5,40);
```

- Ограничить собственную частоту полюсов замкнутой системы полюсов до 20 рад/с.

```
PoleReq = TuningGoal.Poles(); PoleReq.MaxFrequency = 20;
```

Настройка параметров системы управления

Теперь мы готовы использовать функцию `sys tune` для совместной настройки всех (21) параметров регулятора. `sys tune` возвращает настроенную версию `ST1` модели системы управления `ST0`.

```
AllReqs = [TrackReq,MarginReq1,MarginReq2,PoleReq];  
[ST1,fSoft,~,Info] = sys tune(ST0,AllReqs);
```

Лежащий в основе процесс оптимизации занимает порядка трех секунд. На рисунке 3 графики показывают, что контроллер настроен почти в соответствии по всем четырем требованиям.

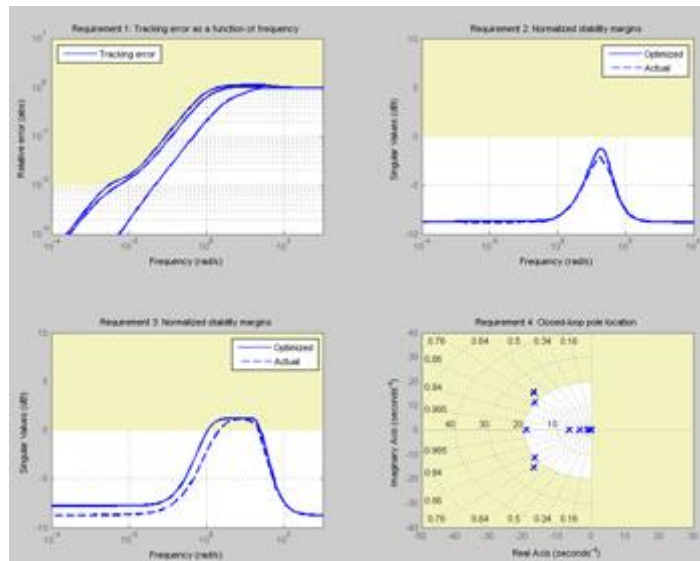


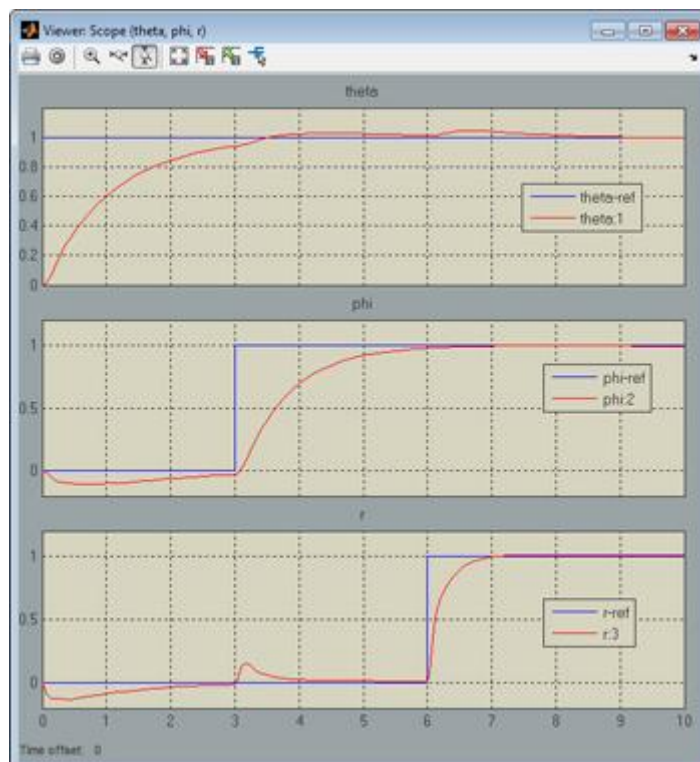
Рисунок 3. Синтез контроллера сверяется на соответствие поставленным требованиям

Обновление и проверка модели

Мы обновляем параметры блоков модели Simulink с полученными в результате настройки значениями.

```
writeBlockValue(ST1)
```

Запуск моделирования с новыми значениями параметров подтверждает, что контроллер обеспечивает устойчивый отклик системы с хорошим отслеживанием уставки и эффективной развязкой (рисунок 4).



Возможности настройки

`systemtune` позволят настраивать большинство блоков, которые используются для создания системы управления в Simulink. К ним относятся усилитель (Gain), ПИД-регулятор, передаточная функция, модель в пространстве состояний, модель полюсов-нулей, дискретный фильтр и системные блоки LTI. Любая архитектура регулятора, созданная с помощью этих блоков, может быть настроена.

Подстраивая требования настройки, мы можем быстро изучить компромиссы между производительностью и надежностью (робастностью). Мы также можем исследовать преимущества и недостатки различных архитектур управления, сложность управления. Например, путем установки коэффициентов "SOF" в ноль и перенастройкой контуров с регуляторами PI при помощи `systemtune` можно проверить, является ли необходимым внутренний контур обратной связи. Сравнение результатов с исходной двухконтурной архитектурой показывает, что внутренний контур имеет важное стабилизирующее воздействие и должен быть сохранен.

Мы также можем использовать `systemtune` к системам управления для настройки по нескольким моделям объектов управления, представляющих различные условия эксплуатации, номинальные и критичные режимы управления или естественную изменчивость в параметрах системы. Например, система управления полетом может быть настроена для удовлетворения минимальных требований по реакции и устойчивости не только для нормально функционирующего летательного аппарата, но и для набора сценариев, представляющих [различные сбои привода и датчиков](#).

В то время как `systemtune` предназначен для настройки линейных контроллеров в линейной области, он также может быть использован для настройки коэффициентов семейств регуляторов для нелинейных систем. Например, [для системы управления полетом, значения параметров которой должны быть поставлены в соответствие со значениями угла атаки и скорости самолета](#). `systemtune` может настроить все поверхности коэффициентов регулятора сразу и при этом произвести гладкие и явные формулы для отображения зависимости коэффициента регулятора от входных переменных (так называемое табличное управление).

Наконец, для инженеров, знакомых с методами проектирования LQG и H-бесконечность, `systemtune` расширяет эти методы в двух важных направлениях. Вы можете выполнить синтез системы управления на базе LQG или H-бесконечности с заданным порядком и фиксированной структурой, а также оптимизировать параметры системы управления с использованием комплекса смешанных целей для методов LQG (H-2) и H-бесконечность.

`systemtune` использует разработанные и внедренные методы негладкой оптимизации для настройки параметров контроллера [1,2]. В отличие от "грубых" методов оптимизации, которые полагаются на обширное моделирование модели Simulink, `systemtune` формулирует и решает проблему настройки в частотной области. В результате `systemtune` обеспечивает высокое качество настройки для большинства систем за считанные секунды. Кроме того, как показывает пример системы управления полетом вертолета, `systemtune` не требует хорошего начального приближения в решении. Настройка может быть запущена из произвольных, даже неустойчивых значений настраиваемых параметров.

Ссылки

[1] P. Apkarian and D. Noll, "Nonsmooth H-infinity Synthesis," IEEE Transactions on Automatic Control, 51, pp. 71-86, 2006.

[2] P. Apkarian and D. Noll, "Nonsmooth Optimization for Multiband Frequency-Domain Control Design," Automatica, 43, pp. 724-731, 2007.

Инструменты и решения

- [Simulink](#)
- [Robust Control Toolbox](#)
- [Simulink Control Design](#)

Для дальнейшего изучения

- [Видео: Автоматическая настройка для многомерной фиксированной структуры регулятора Simulink](#)
- [Вебинар: Настройка систем управления в Simulink](#)
- [Вебинар: автоматическая настройка семейств регулятора](#)
- [Многоконтурное управление вертолетом](#)
- [Отказоустойчивый контроль пассажирского самолета](#)
- [Настройка семейств коэффициентов регуляторов для трехконтурного автопилота](#)