

УДК 681.5

ПРИМЕНЕНИЕ КВАДРАТИЧНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ РЕГУЛЯТОРОВ ВЕЩЕСТВЕННЫМ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.В. Воронин, Т.А. Щелканова

Томский политехнический университет

E-mail: Zene4ka@sibmail.com

Показана возможность использования метода квадратичного программирования для расширения возможностей вещественного интерполяционного метода синтеза регуляторов динамических объектов применительно к неминимально-фазовым объектам.

Ключевые слова:

Система автоматического управления, регулятор, неминимально-фазовый объект, вещественный интерполяционный метод, численная характеристика, квадратичное программирование.

Key words:

Control system, regulator, nonminimally-phase object, real interpolation method, numerical characteristic, quadratic programming.

Введение

Вещественный интерполяционный метод (ВИМ) синтеза регуляторов [1] относится к группе операторных методов, отличаясь от классических подходов видом прямого интегрального преобразования. Метод использует вещественное преобразование, заключающееся в переходе от оригинала $f(t)$ к функции-изображению $F(\delta)$, имеющему вещественную переменную δ .

Формула для получения вещественного изображения $F(\delta)$ следует непосредственно из формулы преобразования Лапласа при замене комплексной переменной s на вещественную переменную δ

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-\delta t} dt, \quad \delta \in [0, \infty).$$

На функцию $f(t)$ накладываются естественные ограничения: функция должна быть непрерывной, равной нулю для всех значений t , меньших, либо равных нулю, и должна быть абсолютно интегрируема:

$$\int_0^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty.$$

Особенностью ВИМ является то, что изображение функции $f(t)$ может быть получено как в аналитической форме, простой заменой в соответствующей формуле Лапласа комплексной переменной s на вещественную переменную δ , так и в виде графика $F(\delta)$ и набора отсчетов $F(\delta_i)$, называемого численной характеристикой. Предполагается, что численная характеристика несет полную информацию об исходной модели, и потому возможен однозначный переход к непрерывной форме $F(\delta)$. Операции в области изображений могут выполняться как с аналитическими зависимостями, так и с численными характеристиками. Достоинство такого подхода, по мнению авторов, состоит в том, что данный переход может быть выполнен численным способом с опорой на сравнительно простые машинные средства проектирования систем автоматического регулирования (САР).

Еще одним важным достоинством является возможность и простота получения приближенных решений различных задач, одной из которых является задача синтеза регуляторов.

Методика синтеза регулятора на основе ВИМ

При синтезе регулятора на основе ВИМ в [2] предлагается использовать хорошо известный компенсационный подход [3], в соответствии с которым необходимо предварительно сформировать желаемую передаточную функцию разомкнутой системы $W_{\text{ж}}(s)$. Тогда выражение для синтезируемого регулятора примет вид

$$W_{\text{рег}}(s) = W_{\text{ж}}(s) / W_0(s), \quad (1)$$

где $W_0(s)$ — передаточная функция объекта. Предполагается, что расчет $W_{\text{рег}}(s)$ по выражению (1) может выполняться с использованием как аналитических выражений $W_{\text{ж}}(s)$, $W_0(s)$, так и численных характеристик $W_{\text{ж}}(\delta)$, $W_0(\delta)$ в зависимости от формы задания желаемой замкнутой системы. Если $W_{\text{ж}}(s)$ и $W_0(s)$ заданы аналитически, то далее необходимо определиться с желаемым видом передаточной функции регулятора, а затем осуществить замену комплексной переменной s на вещественную δ . Для этого нужно выбрать узлы интерполирования δ_i таким образом, чтобы они лежали в области существенных изменений ЧХ [2]. В результате будут получены соотношения

$$W_{\text{рег}}(\delta_i) = W_{\text{ж}}(\delta_i) / W_0(\delta_i), \quad i = 1, n.$$

Число узлов интерполирования n выбирается так, чтобы можно было сформировать и решить квадратную систему алгебраических уравнений относительно искомых параметров регулятора [1, 2]. В целом все этапы синтеза регуляторов с использованием ВИМ просты, но получаемое решение является приближенным.

Существенным недостатком ВИМ, и в целом вещественного интегрального преобразования, представляется отсутствие достаточно жесткой связи между качеством и устойчивостью системы и ее численной характеристикой. Для преобразований Ла-

пласа или Фурье такая связь существует и активно используется при анализе и синтезе систем автоматического регулирования в виде, например, алгебраических и частотных критериев устойчивости.

Основной идеей ВИМ является предположение, что малым изменениям параметров системы соответствуют малые изменения их численных характеристик. Следовательно, если выбрать желаемую САР, обладающую требуемыми временными характеристиками $h(t)$ или $w(t)$, получить ее численную характеристику, например, подстановкой в $W_{\text{ж}}(s)$ вещественной переменной δ вместо комплексной переменной s , затем определить численную характеристику регулятора, обеспечивающую численной характеристике замкнутой системы близость к численной характеристике желаемой системы и, наконец, восстановить передаточную функцию регулятора по его численной характеристике, то полученная система будет близка к желаемой. Очевидно, что во всей этой процедуре особую роль играет метод приближения численной характеристики регулятора к желаемой, в котором можно выделить, по крайней мере, два фактора, влияющих на качество получаемого результата — малое число узлов интерполирования и отсутствие каких-либо ограничений на коэффициенты $W_{\text{pec}}(s)$.

Сделанное в [2] предположение о том, что для большинства технических объектов достаточным является регулятор не выше 2-го порядка, выглядит достаточно реалистичным, однако предполагает, что расчет коэффициентов регулятора производится максимум по 5 точкам численной характеристики, выбор которых весьма слабо формализован. Представляется полезным использовать значительно большее число точек, ориентируясь не на точное решение системы алгебраических уравнений, а на аппроксимирующее приближение. Усложнение процедуры расчета с вычислительной точки зрения не играет при современных средствах проектирования особой роли. Это, естественно, не отменяет предложенных в [2] методов выбора наиболее информативных областей численной характеристики.

Отсутствие ограничений на коэффициенты $W_{\text{pec}}(s)$ часто приводит к получению неустойчивых или негрубых замкнутых систем. При этом некоторые важные ограничения в рамках принятого 2-го порядка регулятора могут быть сформулированы достаточно просто. Известно, что максимальная грубость системы достигается обычно при использовании минимально-фазовых регуляторов. Это также исключает возможность сокращения положительных нулей и полюсов регулятора и объекта, что является обязательным условием работоспособности полученной замкнутой системы. Для синтеза минимально-фазового регулятора 2-го порядка достаточно наложить условия положительности всех его коэффициентов.

Для введения дополнительных ограничений предлагается рассматривать задачу приближения численной характеристики регулятора к желаемой численной характеристике как задачу нелинейно-

го, в частности квадратичного, программирования, которая имеет хорошо разработанную алгоритмическую и программную поддержку, в частности в среде Matlab.

Постановка и решение задачи синтеза регулятора на основе ВИМ как задачи квадратичного программирования

Задача квадратичного программирования в рамках программы QUADPROG раздела Optimization Toolbox Matlab ставится как задача расчета вектора значений переменных при условиях

$$\frac{1}{2} x^T H x + f^T x \rightarrow \inf,$$

$$A x \leq b,$$

$$A_{\text{eg}} \cdot x = b_{\text{eg}},$$

$$lb \leq x \leq ub,$$

где H и h — весовая матрица и весовой вектор, соответственно; A — матрица ограничений-неравенств; A_{eg} — матрица ограничений равенств; lb и ub — векторы ограничений x сверху и снизу [4].

Пусть желаемая численная характеристика задана в виде n отсчетов p_i в узлах δ_i интерполирования. Регулятор рассчитывается в виде

$$W_{\text{pec}}(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}. \quad (2)$$

Введем вектор $x^T = (b_2, b_1, b_0, a_2, a_1)$. Задача синтеза регулятора может быть сформулирована как задача квадратичного программирования следующим образом. Требуется минимизировать функционал $f(x) = e^T \cdot H e$ при условиях

$$b_2 \delta_1^2 + b_1 \delta_1 + b_0 - p_1 \delta_1^2 a_2 - p_1 \delta_1 a_1 + e_1 = p_1,$$

...

$$b_2 \delta_n^2 + b_1 \delta_n + b_0 - p_n \delta_n^2 a_2 - p_n \delta_n a_1 + e_n = p_n,$$

$$b_2 \geq 0,$$

$$b_1 \geq 0,$$

$$b_0 \geq 0,$$

$$a_2 \geq 0,$$

$$a_1 \geq 0.$$

Вектор e представляет собой невязки приближенного решения системы линейных уравнений в узлах интерполирования. Если $H=I$, то наложенные условия представляют собой поиск наилучшего квадратичного приближения при дополнительных условиях положительности всех коэффициентов регулятора. Выбор матрицы H иного вида позволяет изменить вес невязок в тех или иных узлах интерполирования.

Применим предложенный подход для устойчивой системы. Примем $W_0(s) = \frac{15}{s^2 + s + 15}$. Передаточную функцию желаемой замкнутой системы

определим по заданным показателям качества в виде

$$W_{зам}(s) = \frac{5}{s^2 + 4s + 8}. \quad (3)$$

Регулятор будем синтезировать в виде (2).

Следуя методике ВИМ [1], получим передаточную функцию желаемой разомкнутой системы. Она равна

$$W_{раз}(s) = \frac{5}{s^2 + 4s + 3}.$$

Далее определим коэффициент b_0 , исходя из желаемого коэффициента передачи в статическом

режиме. Имеем $b_0 = \frac{5}{3} \cdot \frac{15}{15} = 1,66$.

Интервал размещения узлов интерполирования возьмем равным интервалу существенных изменений численной характеристики замкнутой системы. В качестве такового обычно используется интервал 90 % изменения численной характеристики относительно ее значения при $\delta=0$. Исходя из изложенного запишем

$$\frac{5}{\delta^2 + 4\delta + 8} = 0,1 \cdot \frac{5}{8}.$$

Легко определить, что численная характеристика существенно меняется (до 10 % от начального состояния) на интервале от 0 до 7. Отсюда максимальное значение параметра δ примем равным 7.

На данном интервале возьмем 8 точек. При этом первая точка, $\delta=0$, уже занята и в расчетах использоваться не будет.

Общий вектор неизвестных переменных имеет 11 составляющих $x=(b_1, b_2, a_1, a_2, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7)$, из которых первые четыре — коэффициенты регулятора, остальные — невязки алгебраических уравнений в узлах интерполирования.

Ограничения на решение задачи квадратичного программирования имеют вид

$$b_2\delta_1^2 + b_1\delta_1 - p_1\delta_1^2a_2 - p_1\delta_1a_1 + e_1 = p_1 - b_0,$$

...

$$b_2\delta_7^2 + b_1\delta_7 - p_7\delta_7^2a_2 - p_7\delta_7a_1 + e_7 = p_7 - b_0,$$

$$b_2 \geq 0,$$

$$b_1 \geq 0,$$

$$a_2 \geq 0,$$

$$a_1 \geq 0.$$

Критерием минимизации является функция

$$F = \sum_{i=1}^7 e_i^2.$$

Расчеты дали практически точное совпадение численных характеристик желаемой и синтезируемой систем (рис. 1) при следующих параметрах регулятора

$$W_{рег}(s) = \frac{0,11s^2 + 0,11s + 1,67}{0,33s^2 + 1,33s + 1}.$$

Система получилась устойчивой, и качество процессов полностью соответствует желаемому. На рис. 2 показаны графики переходных процессов при одновременном моделировании желаемой и синтезированной систем.

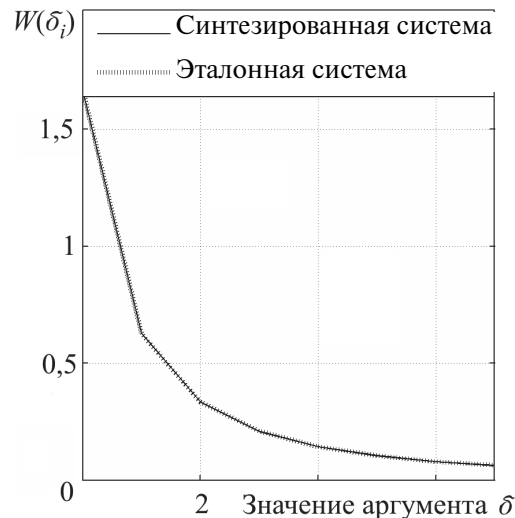


Рис. 1. Численные характеристики синтезированной и эталонной систем

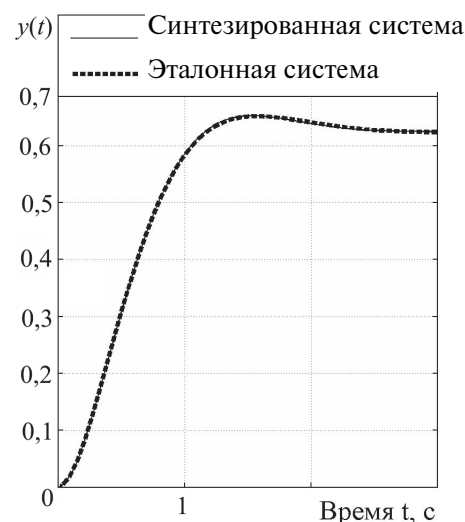


Рис. 2. Зависимости значений выходных сигналов $y(t)$ от времени t в синтезированной и эталонной системах

Компенсационный характер полученного регулятора хорошо виден по распределению нулей и полюсов замкнутой системы на рис. 3. Нули регулятора компенсируют полюсы объекта. Полюсы регулятора формируют желаемую динамику замкнутой системы.

Вместе с тем, анализ показал, что если ограничиться минимально-фазовыми объектами, то особого выигрыша от приближенных вычислений и ограничений на знаки коэффициентов регулятора нет. По крайней мере, для объекта 2-го порядка. Однако ситуация принципиально меняется при переходе к неминимально-фазовым объектам, в частности, к объектам с правыми нулями.

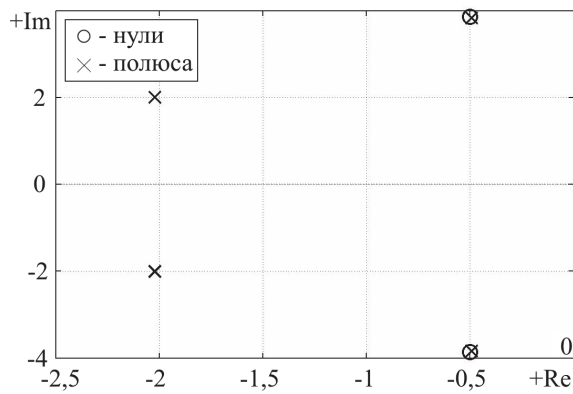


Рис. 3. Нули и полюсы замкнутой САР

Рассмотрим неминимально-фазовый объект вида

$$W_0(s) = \frac{-s+15}{s^2+s+15},$$

имеющий один правый нуль. Будем считать, что передаточная функция желаемой замкнутой системы и структура регулятора заданы выражениями (3) и (2).

Как и ранее, определим коэффициент b_0 , исходя из желаемого коэффициента передачи в статическом режиме. Имеем $b_0 = \frac{5}{3} \cdot \frac{-15}{15} = -1,66$.

Передаточная функция регулятора получается в

$$\text{виде } W_{\text{рег}}(s) = \frac{0,086s^2 + 1,67}{0,01s^2 + 1,4s + 1}.$$

В результате расчета параметров регулятора с использованием программы QUADPROG при единичных весах ошибок по всем узлам интерполирования получены численные характеристики, приведенные на рис. 4. На рис. 5 показаны графики переходных процессов при одновременном моделировании желаемой и синтезированной систем.

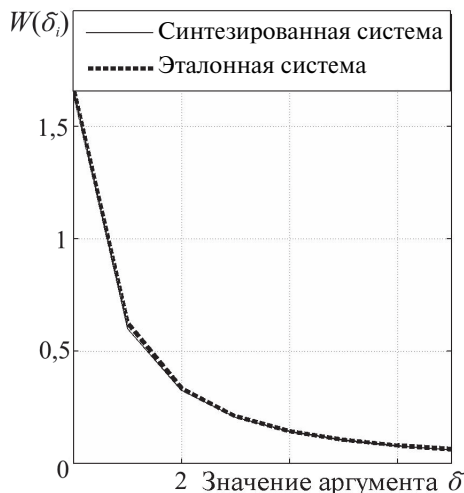
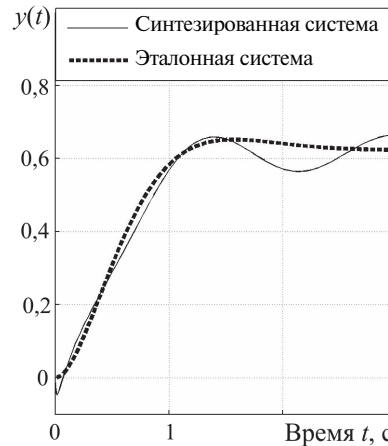


Рис. 4. Численные характеристики синтезированной и эталонной систем


 Рис. 5. Зависимости значений выходных сигналов $y(t)$ от времени t в синтезированной и эталонной системах

Расчеты по методике [2] без ограничений на знаки коэффициентов регулятора привели к выражению

$$W_{\text{рег}}(s) = \frac{0,041s^2 + 0,038s + 1,67}{-0,081s^2 + 1,43s + 1}.$$

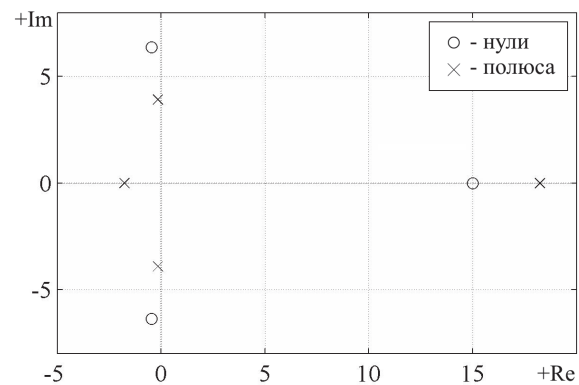


Рис. 6. Нули и полюсы замкнутой САР (o – нули; x – полюса)

В результате замкнутая система неустойчивая. Неустойчивость связана с тем, что в регуляторе формируются правые полюсы, стремящиеся скомпенсировать правые нули объекта (рис. 6).

Выводы

1. Исследована возможность использования квадратичного программирования для решения задачи синтеза регуляторов по вещественному интерполяционному методу.
2. Показано, что полученные результаты позволяют рекомендовать метод квадратичного программирования и реализующие его программные средства в среде Matlab для расширения возможностей вещественного интерполяционного метода синтеза регуляторов на линейные объекты управления с правыми нулями.
3. Метод позволяет повысить качество приближения численных характеристик за счет увеличения числа узлов интерполирования и упрощения процедуры варьирования весовых коэффициентов для ошибок приближения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орурк И.А. Новые методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем. — М.: Наука, 1965. — 206 с.
2. Алексеев А.С., Антропов А.А., Гончаров В.И., Замятин С.В., Рудницкий В.А. Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — 217 с.
3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
4. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7: программирование, численные методы. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 752 с.

Поступила 14.09.2012 г.

УДК 004.932

РАСПОЗНАВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ТЕКСТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Фан Нгок Хоанг, Буй Тхи Тху Чанг, В.Г. Спицын

Томский политехнический университет
E-mail: hoangpn285@gmail.com

Предложен новый способ распознавания печатных текстов, основанный на совместном применении вейвлет-преобразования Хаара и метода главных компонент. Разработан алгоритм и создано программное обеспечение для распознавания печатных текстов. Приведен пример работы и представлены результаты тестирования программы. Показано, что использование предложенного оригинального алгоритма дает возможность эффективного распознавания печатных текстов.

Ключевые слова:

Распознавание печатных текстов, метод главных компонент, вейвлет-преобразование.

Key words:

Text recognition, principal component analysis, wavelet transform.

Введение

Распознавание образов является одной из самых изученных задач в таких областях, как цифровая обработка изображений, компьютерное зрение, биометрия, создание интеллектуальных систем безопасности и контроля доступа и т. п. Тем не менее, в области распознавания образов продолжают представлять большой научный и практический интерес такие задачи как распознавание лиц, жестов, текстов, отпечатков пальцев, печатных и рукописных текстов. Метод главных компонент и вейвлет-преобразование являются способами для получения характеристик изображения. В задаче распознавания образов они успешно применяются в процессе сравнения компонент, характеризующих неизвестное изображение, с компонентами, соответствующими известным изображениям. В работах [1, 2] предложен алгоритм, основанный на методе Виолы—Джонса, вейвлет-преобразовании и методе главных компонент для распознавания множества лиц на видеопоследовательности в режиме реального времени. Авторы также предложили алгоритм, основанный на алгоритме CAMShift, методе Виолы—Джонса, вейвлет-преобразовании и методе главных компонент для распознавания жестов на видеопоследовательности в режиме реального времени.

Целью данной работы является создание нового алгоритма, основанного на комбинации вейвлет-преобразования Хаара и метода главных компонент для распознавания печатных текстов с высокой скоростью обработки.

Вейвлет-преобразование

Главной задачей в каждом виде обработки изображений является нахождение эффективного представления, позволяющего отобразить его в компактной форме. В современной теории и практике сигналов, в частности при спектральном анализе, используются сигналы специального вида — вейвлеты. В работах [3, 4] представлены разложение изображения и извлечение его признаков для классификации изображений самолетов на основе применения вейвлет-преобразования Хаара и многослойной нейронной сети. В работе [5] используются вейвлет-преобразования Хаара и Добеши для извлечения признаков изображения отпечатка пальца. Эти признаки являются входами многослойной нейронной сети для классификации отпечатков пальцев по типам папиллярных узоров. В данной работе используется вейвлет-преобразование Хаара для извлечения признаков изображения букв, цифр и знаков в печатном тексте. Пример извлечения признаков изображения буквы «а» представлен на рис. 1.

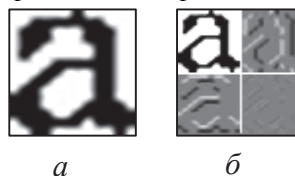


Рис. 1. Извлечение признаков изображения буквы «а»: а) исходное изображение; б) полученные признаки на основе применения вейвлет-преобразования Хаара