УДК 621.391.14:519

М.А. Алексеев

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ ПО СПЕКТРАМ В ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ БАЗИСАХ

Метод контроля параметров объекта управления на основе применения субоптимальных по Карунену-Лоэву перестраиваемых спектральных операторов, приспособленных к эталонам классов сигналов, сопровождающих функционирование объектов управления.

Ключевые слова: объект управления, контроль параметров, спектральное преобразование.

Постановка проблемы

Контроль параметров объектов управления по сигналам, сопутствующим их функционированию, позволяет оценить функциональное состояние объекта управления и обнаружить начало возникновения дефектов с целью принятия мер для предупреждения развития аварийной ситуации. Например, статистика ремонтов турбоагрегатов показала, что своевременное обнаружение дефектов по параметрам вибрации в 3-3,5 раза снижает затраты на капитальный ремонт, не считая потерь, связанных с простоем оборудования [1].

Однако существующие системы контроля параметров сигналов не учитывают индивидуальные особенности объектов управления. Например, для одного и того же турбоагрегата значения абсолютной податливости различных опор отличаются в 3-6 раз [1]. Это означает, что одинаковые по значению вынуждающие силы будут вызывать различные размахи колебаний разных опор. В этих условиях контроль вибрации требует индивидуального подхода при контроле вибрации каждого подшипника турбоагрегата.

Анализ публикаций по теме исследований

Для формирования информативных признаков сигналов при контроле параметров объектов управления часто используются методы, основанные на применении ортогональных преобразований, которые при соответствующем выборе базисной системы

© Алексеев М.А., 2010

 ISSN 1562-9945

обеспечивают адекватность анализируемой информации при высокой степени декорреляции информативных компонент [2].

При решении задачи классификации случайных сигналов по спектральным признакам для случая многих классов используются системы собственных функций соответствующих каждому классу. При этом информативными признаками считаются коэффициенты разложения Карунена-Лоэва в соответствующей системе собственных функций. В качестве критерия классификации при этом используется энтропия коэффициентов разложения [3]. Однако упомянутый критерий не учитывает так называемой естественности разложения. Кроме того, разложение Карунена-Лоэва в общем случае не обладает алгоритмом быстрого преобразования.

Формулировка **цели**

Целью работы является разработка метода контроля параметров объектов управления, на основе использования ортогональных систем базисных функций субоптимальных по Карунену-Лоэву, учитывающих особенности анализируемых сигналов, обладающих возможностью параметрического перестраивания, быстрыми алгоритмами, а также разработка критерия классификации сигналов по спектрам в перестраиваемых базисах, субоптимальных по Карунену-Лоэву, обеспечивающего более эффективную классификацию по сравнению с известными критериями.

Основная часть

В [4] предлагается метод формирования информативных признаков исходных данных с использованием перестраиваемых спектральных операторов, субоптимальных по Карунену-Лоэву в тех задачах, где в качестве априорных сведений известным является эталонный образ класса сигналов, например, в виде математического ожидания случайного процесса.

Пусть сжатию подлежат M дискретных реализаций, каждая из которых принадлежит одному из классов случайного процесса m, $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$ – вектор размером $N, m = \overline{1, M}$. Полагаем, что векторы принадлежат N-мерному евклидову пространству и $\left\|\mathbf{X}^{\mathbf{m}}\right\| = 1$. Полагаем также, что для каждого m известна классифицированная (обучающая) выборка $\left\{\mathbf{X}_{\mathbf{l}}^{\mathbf{m}}\right\}, l=\overline{1,K}$, где K – объем выборки. Тогда несмещенной, состоятельной оценкой является среднее по множеству классифицированной выборки $\mathbf{X}_{\mathbf{эт}}^{\mathbf{m}}=\frac{1}{K}\sum_{l=1}^{K}\mathbf{X}_{\mathbf{l}}^{\mathbf{m}}$.

Перестраиваемый спектральный оператор, субоптимальный по Карунену-Лоэву, приспособлен к эталону класса m в том смысле, что в спектральной области перестраиваемого базиса эталону сопоставляется всего один коэффициент, отличный от нуля. Перестраиваемый базис является оптимальным для эталона в смысле критерия энтропии спектральных признаков. По процедуре построения перестраиваемого базиса $\mathbf{X}_{\mathbf{эт}}$ есть первая строка матрицы спектрального оператора. Обозначим матрицу перестраиваемого спектрального оператора для класса m как $\mathbf{B}^{\mathbf{m}}=\left[\mathbf{B}_{\mathbf{1}}^{\mathbf{m}},\mathbf{B}_{\mathbf{2}}^{\mathbf{m}},...,\mathbf{B}_{\mathbf{N}}^{\mathbf{m}}\right]^{\mathbf{T}}$. Для строк $\mathbf{B}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{m}}$ матрицы $\mathbf{B}^{\mathbf{m}}$ выполняются условия ортонормированности.

Для формирования вектора информативных признаков по вектору исходных данных $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$ предлагается определить дискретные спектры $\left\{\mathbf{Y}^{\mathbf{m}}\right\}, m=\overline{1,M}$:

$$\mathbf{Y}^{\mathbf{m}}=\frac{\mathbf{1}}{N}\mathbf{B}^{\mathbf{m}}\mathbf{X}. \qquad (1)$$

Вектор $\mathbf{Y}^{\mathbf{m}}$ в (1) представляет собой вектор спектральных коэффициентов по перестраиваемой системе ортогональных функций $\mathbf{B}^{\mathbf{m}}$ для класса m. В предложенном методе классификации вектора информативных признаков параллельно формируются m систем информативных признаков по N признаков в каждой системе.

Для каждого вектора $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$, принадлежащего классу m векторов исходных данных, получим $\mathbf{Y}^{\mathbf{m}}$=$\mathbf{B}^{\mathbf{m}}\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$, где $\mathbf{X}^{\mathbf{mT}}=\left[x_1^m,x_2^m,...,x_N^m\right]$; $\mathbf{Y}^{\mathbf{mT}}=\left[y_1^m,y_2^m,...,y_N^m\right]$. Выражение для вычисления $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$ можно представить в следующем виде

$$\mathbf{X}^{\mathbf{m}}=y_1^m\mathbf{B}_{\mathbf{1}}^{\mathbf{m}}+y_2^m\mathbf{B}_{\mathbf{2}}^{\mathbf{m}}+...+\mathbf{B}_{\mathbf{N}}^{\mathbf{m}}y_N^m=\sum_{i=1}^{N}y_i^m\mathbf{B}_i^{\mathbf{m}}. \qquad (2)$$

Для получения минимального числа информативных признаков необходимо, чтобы они адекватно представляли вектор исходных данных $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$. Для оценки оптимальности преобразования используем

 ISSN 1562-9945

среднеквадратичный критерий. Получим оценку $\tilde{\mathbf{X}}^{\mathbf{m}}$ вектора $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$, представив его M членами. Оставшиеся N-M координат y_i^m заменим константами c_i^m. Тогда

$$\tilde{\mathbf{X}}^{\mathbf{m}} = \sum_{i=1}^{M} y_i^m \mathbf{B}_i^{\mathbf{m}} + \sum_{i=1}^{N} c_i^m \mathbf{B}_i^{\mathbf{m}} \quad . \tag{3}$$

Ошибка в представлении вектора $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$ его оценкой $\tilde{\mathbf{X}}^{\mathbf{m}}$ может быть представлена в виде вектора ошибки

$$\Delta\mathbf{X}^{\mathbf{m}} = \mathbf{X}^{\mathbf{m}} - \sum_{i=1}^{M} y_i^m \mathbf{B}_i^{\mathbf{m}} - \sum_{i=1}^{N} c_i^m \mathbf{B}_i^{\mathbf{m}} . \tag{4}$$

После ряда преобразований среднеквадратичная ошибка при представлении вектора $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$ вектором $\tilde{\mathbf{X}}^{\mathbf{m}}$ определится следующим образом

$$\sigma^m = \sum_{i=M+1}^{N} \mathbf{B}_i^{\mathbf{m}^{\mathrm{T}}} \mathbf{K}_{\mathbf{x}}^{\mathbf{m}} \mathbf{B}_i^{\mathbf{m}} \ , \tag{4}$$

где $\mathbf{K}_{\mathbf{x}}^{\mathbf{m}}$ – ковариационная матрица $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$.

Элементы векторов $\mathbf{B}_i^{\mathbf{m}}$ определяют параметры ядер спектрального оператора $\mathbf{B}^{\mathbf{m}}$ [2]. Поскольку у части ядер параметры не зависят от исходного эталона, то можно провести дальнейшую оптимизацию базиса под требование конкретной задачи.

Предложенный подход с использованием перестраиваемых субоптимальных по Карунену-Лоэву базисов позволяет выбрать базис, близкий к естественным составляющим процесса, сопровождающего функционирование объекта управления. Первый коэффициент разложения в перестраиваемом базисе позволяет оценить корреляцию с соответствующим эталоном. Использование информации, содержащейся в остальных коэффициентах разложения, позволяет оценить естественность разложения вектора в соответствующем перестраиваемом базисе. Это позволяет улучшить разделимость классов сигналов в признаковом пространстве, что, как следствие, способствует более достоверному определению параметров объекта.

Известно, что информативность спектрального коэффициента при разложении вектора исходных данных $\mathbf{X}$ в ортогональном базисе можно оценить соответствующим значением дисперсии [2].

Охарактеризуем разложение (1) величиной

$$\Omega_{\mathrm{p}}^{\mathrm{m}}\left(\mathbf{Y}^{\mathbf{m}}\right)=\sum_{i=1}^{p}\left(y_i^m\right)^2\Big/\left(\sigma_i^m\right)^2, \qquad (5)$$

где $(\sigma_i^m)^2$ – дисперсия спектрального коэффициента y_i^m. Величину $\Omega_{\mathrm{p}}^{\mathrm{m}}\left(\mathbf{Y}^{\mathbf{m}}\right)$ назовем естественностью разложения. При определенном выборе размерности p подпространства введенная характеристика обладает экстремальным свойством, позволяющим использовать ее для целей классификации. Если вектор $\mathbf{X}^{\mathbf{s}}$ разлагается в базисе $\mathbf{B}^{\mathbf{m}}$ класса m, то такое разложение будет наиболее точным, наиболее естественным, если s=m и $\mathbf{X}^{\mathbf{s}}\in\left\{\mathbf{X}_i^{\mathbf{m}}\right\}$. Величина $\Omega_{\mathrm{p}}^{\mathrm{m}}\left(\mathbf{Y}^{\mathbf{m}}\right)$ при этом будет максимальной. Данное утверждение справедливо в среднем для всех векторов обучающей выборки. Поэтому величина $\Omega_{\mathrm{p}}^{\mathrm{m}}\left(\mathbf{Y}^{\mathbf{m}}\right)$ может быть использована для построения критерия классификации, учитывающего естественность разложения вектора исходных данных: если $\Omega^{\mathrm{ms}}=\Omega_{\mathrm{p}}^{\mathrm{m}}-\Omega_{\mathrm{p}}^{\mathrm{s}}>0$ для всех $s=\overline{1,M}\left(s\neq m\right)$, то $\mathbf{X}\in\left\{\mathbf{X}^{\mathbf{m}}\right\}$.

Для эффективной классификации с использованием предложенного критерия необходимо, чтобы величина Ω^{ms} была максимальной в среднем по всем векторам обучающей выборки и по всем парам различных классов. Для выбора размерности p_M подпространств рассмотрим выражение для максимизации Ω^{ms}:

$$F\left(p_1,p_2,\ldots,p_M\right)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{M-1}\sum_{\substack{s=1\\(s\neq m)}}^{M}\Omega^{\mathrm{ms}}\to\max_{p_1,\ldots,p_M}. \qquad (6)$$

Оптимальные размерности подпространств p_M можно получить, подставив в **(6)** выражение для Ω^{ms} и решая соответствующие задачи максимизации. Приближенную оценку оптимальных размерностей подпространств p_M для перестраиваемых спектральных операторов можно также получить в результате некоторых упрощений. Для этого предположим, что разложение векторов $\mathbf{X}^{\mathbf{s}}$ во всех перестраиваемых базисах $\mathbf{B}^{\mathbf{s}}$, кроме базиса, построенного для векторов s-го класса, будет иметь равномерное распределение. В этом случае математическое ожидание спектральных составляющих будет стремиться к равномерному. Тогда справедливо следующее соотношение:

$$E[\left(y_i^s\right)^2]=\frac{\left\|\mathbf{Y}^{\mathbf{s}}\right\|}{N}. \qquad (7)$$

 ISSN 1562-9945

Подставим значение математического ожидания в (6). При этом будем считать, что норма вектора исходных данных $\left\|\mathbf{Y}^{s}\right\|=1$. При контроле параметров объектов управления по сигналам, сопутствующим их функционированию нормировка делает нечувствительными критерии классификации к коэффициентам усиления устройств регистрации сигналов:

$$F\left(p_{1,}p_{2,\dots,}p_{M}\right)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{M-1}\sum_{\substack{s=1\\(s\neq m)}}^{M}\left(\sum_{i=1}^{p_s}\frac{(y_i^m)^2}{(\sigma_i^m)^2}-\frac{p_s}{N}\sum_{i=1}^{p_s}\frac{1}{(\sigma_i^m)^2}\right). \qquad (8)$$

Задача максимизации выражения (8) распадается на M задач максимизации функций, зависящих от одного аргумента,

$$F_s\left(p_s\right)=\sum_{i=1}^{p_s}\frac{(y_i^m)^2}{(\sigma_i^m)^2}-\frac{p_s}{N}\sum_{i=1}^{p_s}\frac{1}{(\sigma_i^m)^2}\ . \qquad (9)$$

Значение размерности подпространств, при котором функции (9) достигают своих максимальных значений, можно оценить с учетом условия (7) и предположения, что разложение векторов обучающей выборки, которые принадлежат m-му классу в перестраиваемом базисе $\mathbf{B^m}$, будет естественным и при этом выполняется также условие $\left(y_1^m\right)^2\geq\left(y_2^m\right)^2\geq\ldots\geq\left(y_2^m\right)^2\geq 0$.

Приращение для функций $F_s(p_s)$ с ростом размерности перестает быть положительным, если выполняется следующее условие:

$$\left(y_i^m\right)^2>\frac{1}{N}\geq\left(y_{i+1}^m\right)^2. \qquad (10)$$

Выражения (9) обладают экстремальным свойством, позволяющим использовать их в качестве критериев классификации дискретных сигналов по p_s спектральным коэффициентам разложения в перестраиваемых базисах, субоптимальных по Карунену-Лоэву. Предложенный критерий не учитывают значений N-p_s спектральных коэффициентов. При анализе дискретных сигналов с большой размерностью N и высокой степенью изменчивости потеря информации, содержащейся в спектральных коэффициентах, которые не учтены по дисперсионному критерию, может привести к ошибочному решению. Исходя из вышеизложенного целесообразна разработка комбинированного критерия, учитывающего информацию, содержащуюся в спектральных коэффициентах с малыми значениями дисперсии.

В тех случаях, когда формирование эталона $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}_{\text{эт}}$ невозможно выполнить в пространстве исходных данных, необходима предварительная обработка векторов $\mathbf{X}^{\mathbf{m}}$ с целью получения получение характеристик, инвариантных к сдвигу начала отсчета. В [5] предложен метод модифицированного преобразования Уолша, имеющего быстрый алгоритм, а также обладающего свойством инвариантности к временному сдвигу исходных сигналов, что открывает возможности эффективного применения преобразования для формирования эталона класса сигналов в пространстве спектральных признаков.

Выводы

1. Предложенные подход с использованием перестраиваемых базисов позволяет учесть индивидуальные особенности объекта управления при контроле параметров за счет выбора базиса, близкого к естественным составляющим процесса, сопровождающего функционирование объекта управления.

2. Исследования целесообразно продолжить в направлении развития методов контроля параметров с использованием ортогональных преобразований, обеспечивающих эффективное сжатие процессов, сопровождающих функционирование объектов, а также разработки критериев классификации сигналов по спектрам в перестраиваемых базисах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барков А.В. Долгосрочный прогноз состояния роторных машин по сигналу вибрации [Електронний ресурс] / А.В. Барков, П.П. Якобсон. – Режим доступа: http://www.vibrotek.com/russian/articles/dps/index.htm

2. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации [Текст]: учеб. пособие / А.И. Солодовников, А.М. Спиваковский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. – 272 с.

3. Ватанабе С. Разложение Карунена-Лоэва и факторный анализ: Теория и приложения [Текст] / С. Ватанабе // В кн.: Автоматический анализ сложных изображений. – М., 1969. – С. 245–275.

4. Алексеев М.А. Формирование субоптимальных по Карунену-Лоэву перестраиваемых спектральных операторов для контроля параметров объектов управления [Текст] / М.А. Алексеев // Сб.наук.пр. НГУ. – 2008. – № 31. – С. 205 – 210.

5. Алексеев М.А. О нелинейных преобразованиях со свойствами инвариантности к циклическому сдвигу цифровых сигналов при формировании классификационных признаков [Текст] / М.А. Алексеев // Сб.научн.тр. НГА Украины. – 2001. – № 11, т.2. –С.74–78.

 ISSN 1562-9945