



Анализ сигналов вибрации малоразмерных авиадвигателей на основе совместного время-частотного метода¹

Май Синь	кандидат наук, старший инженер, аспирант; Нанкинский университет авиации и астронавтики, Школа энергетики и энерготехники, Нанкин, КНР; email: xinmai_xm@nuaa.edu.cn
Хуэй Цинь	доктор наук, старший инженер, научный сотрудник; Харбинский технологический институт, Научно- исследовательский институт Сучжоу, Сучжоу, КНР; email: qinhuihui_hqq@163.com
Чжифэн Е	доктор наук, профессор, директор; Нанкинский университет авиации и астронавтики, Школа энергетики и энерготехники, Нанкин, КНР; email: yezhifen_yzf@nuaa.edu.cn
Линьян Ван	магистр, старший инженер, научный сотрудник; Авиационная промышленность Китая (AVIC), Научно-исследовательский институт электронных технологий Лейхуа, Уси, КНР; email: wanglingyan_wlly@163.com

Чтобы иметь возможность более глубоко анализировать сигналы вибрации малых двигателей в инженерной практике, команда проекта использовала методы частотно-временного анализа для выполнения конкретной работы. Используя программное обеспечение LABVIEW2022, прикладная программа на основе совместного метода время-частота реализована для изучения сигнала вибрации малого двигателя и определения состояния работы двигателя по соответствующим результатам, чтобы определить, является ли работа двигателя хорошей. Используя метод STFT, метод преобразования Gabor, метод распределения Вигнера, метод CSD, метод адаптивного спектра, метод CWD, метод MIF и метод MIB, соответствующие программы успешно применяются для реализации совместного время-частотного анализа таких сигналов. Вышеупомянутый метод время-частотного анализа позволяет достичь ожидаемого эффекта.

Ключевые слова: малоразмерный авиадвигатель; вибрационный сигнал; Labview2022; совместный время-частотный метод

Цитирование: Синь, Май. Анализ сигналов вибрации малых авиадвигателей на основе совместного время-частотного метода / Май Синь, Хуэй Цинь, Чжифэн Е, Линьян Ван // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №1. – С. 105-117. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-105-117

¹ Статья опубликована в авторской редакции

Введение

С 1990-х годов малые беспилотные летательные аппараты привлекают внимание различных стран. Их быстрое развитие и широкое применение окажут важное влияние на будущие военные операции в условиях информатизации. Являясь новым типом беспилотных разведывательно-атакующих систем, характеризующихся малыми размерами, малым весом, легкой мобильностью и быстрым развертыванием, малые БПЛА могут выполнять различные разведывательные, атакующие и глушащие задачи, и являются одной из важных боевых сил на будущем поле боя. Поэтому все страны активно исследуют, разрабатывают и применяют малые беспилотные летательные аппараты для повышения боевого потенциала и боевой мощи своих вооруженных сил. В будущем малые беспилотные летательные аппараты будут развиваться в направлении миниатюризации, разведки и диверсификации, оказывая все большую поддержку информационной войне и совместным операциям.

Благодаря своим компактным размерам и весу малые беспилотники могут быть более гибкими и адаптированными к различным условиям эксплуатации, включая ограниченные пространства и сложный рельеф. Кроме того, поскольку им не требуются пилоты, малые беспилотники не подвержены риску человеческих жертв, что делает их более безопасными и надёжными при выполнении миссий с повышенным риском. Кроме того, они обычно обладают большим запасом хода, что позволяет им выполнять задания в течение длительного времени, повышая операционную эффективность. Этот вид оборудования широко используется в различных отраслях промышленности.

Двигателю, как важному компоненту этого типа оборудования, уделяется большое внимание [1]. Этот тип двигателя развивается в направлении миниатюризации, высокой мощности и высокой надёжности [2]. Для обеспечения надёжности этого компонента его вибрационные сигналы анализируются с помощью совместного время-частотного метода для реализации функций мониторинга работы и диагностики неисправностей. В данном исследовании для проектирования и создания всей системы анализа используется LabVIEW2022. В данной работе проведено экспериментальное исследование вибрационного сигнала определённого типа малого авиационного двигателя.

1 Функциональный дизайн и принцип работы системы

Разработанная система разделена на два функциональных модуля: первый – метод совместного анализа, второй – модуль анализа мгновенного частотного диапазона. Метод совместного анализа объединяет шесть подфункций: метод анализа кратковременного преобразования Фурье [3], метод анализа преобразования Gabor [4], метод анализа распределения Вегенера [5], метод анализа конусообразного распределения [6], метод адаптивного спектрального анализа [7], метод анализа распределения Чой-Вильямса [8]. Метод мгновенной полосы пропускания содержит две функции: метод мгновенной частоты (MIF) [9] и метод мгновенной полосы пропускания (MIB) [10]. Благодаря комплексному применению вышеперечисленных функциональных модулей реализуется комплексный временно-частотный анализ вибрационных сигналов, функции системы представлены на рисунке 1.

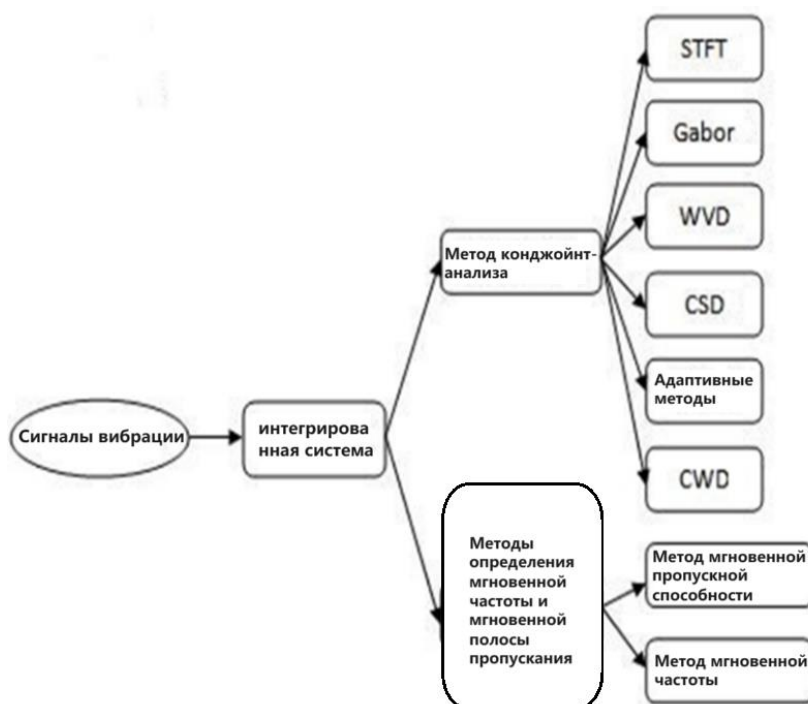


Рисунок 1 – Функциональный дизайн системы

STFT – это инструмент, используемый для анализа негладких сигналов, который разлагает сигнал на серию кратковременных преобразований Фурье, получая таким образом информацию о сигнале как во временной, так и в частотной области. Длина окна STFT может регулироваться в зависимости от необходимости – чем меньше длина окна, тем выше разрешение во временной области и ниже разрешение в частотной области, а чем больше длина окна, тем ниже разрешение во временной области и выше разрешение в частотной области. STFT широко используется в обработке речи, обработке сигналов и других областях. Оконная функция, используемая для скольжения, – это функция короткого времени $r(t)$, и STFT сигнала $z(t)$ может быть выражена как:

$$\text{STFT}_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [z(t')r^*(t' - t)]e^{-2j\pi ft'} dt' \quad (1)$$

выполнить реконструкцию сигнала для нахождения $z(t)$ в соответствии с $\text{STFT}_z(t, f)$:

$$\begin{aligned} p(u) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{STFT}_z(t, f)g(u - t)e^{j2\pi fu} dt df = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi f(t' - u)} df \right] z(t')r^*(t' - t)g(u - t) dt' dt = z(u) \int_{-\infty}^{+\infty} r^*(t)g(t) dt \end{aligned} \quad (2)$$

Когда $\int_{-\infty}^{+\infty} r^*(t)g(t) dt = 1$, чтобы $p(u) = z(u)$, может быть осуществлена полная реконструкция, и преобразованная STFT форма может быть использована в качестве основы для анализа сигнала, а её двумерный график распределения время-частота виден через интерфейс.

Для метода мгновенных полос: следуйте описанию мгновенных частот Вилле:

$$f(t) = \frac{d[\phi(t)]}{2\pi dt} \quad (3)$$

Средняя полоса пропускания сигнала описывается как энергетический спектр сигнала вблизи средней частоты, поскольку нестационарные сигналы изменяются во времени, поэтому средняя полоса пропускания нестационарных сигналов также изменяется во времени. Средняя полоса пропускания, изменяющаяся во времени, называется средней мгновенной полосой пропускания, а спектр, описываемый этой формулой, показан ниже:

$$\Delta w_s = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (w - w_s)^2 SP(t, w) dw}{\int_{-\infty}^{+\infty} SP(t, w) dw}} \quad (4)$$

Функция Gabor, также известная как функция Gabor-Mehler, – это функция, изобретённая Фридрихом Натаном Габором в 1946 году как несепарирующая функция, которая помогает описывать и представлять пространственные частотные признаки в компьютерных изображениях [11]. Функция Gabor – это комплекснозначная функция, используемая для извлечения соответствующих признаков в различных масштабах и направлениях в частотной области. Функция Gabor схожа с биологической ролью человеческого глаза, поэтому она часто используется для распознавания текстур с хорошими результатами. Функция Gabor широко используется для сегментации изображений, подбора шаблонов и распознавания, она выражает пространственные частотные характеристики определённой области (или признака) на изображении, поэтому её можно легко использовать для машинного обучения и распознавания образов [12].

Физик Вигнер предложил распределение Вигнера в 1932 году и применил его в области квантовой механики. Распределение Вигнера – это важное билинейное распределение время-частота, обладающее такими прекрасными свойствами, как высокое разрешение, концентрация энергии и удовлетворительные свойства временно-частотной полосы. Функция распределения Вигнера не является линейным преобразованием, и для многокомпонентных сигналов распределение Вигнера имеет серьезные кросс-терминальные интерференции. После этого Вилле ввел её в область обработки сигналов, превратив в репрезентативный метод анализа временных и частотных характеристик – распределение Вигнера-Вилля, сокращённо WVD [13]. Распределение Вигнера-Вилля (сокращённо WVD) – это типичное квадратичное преобразование, которое определяется как преобразование Фурье мгновенной корреляционной функции сигнала, отражающее мгновенную связь между временем и частотой сигнала. Для однокомпонентного линейного ЧМ-сигнала проекция распределения Вигнера-Вилля на плоскость время-частота представляет собой прямую линию, т.е. линейное изменение частоты со временем. Для многокомпонентного линейного ЧМ-сигнала частотно-временное разрешение его распределения Вигнера-Вилля уменьшается, и его частотно-временная плоскость будет иметь перекрёстные члены.

Основная идея адаптивного алгоритма обработки сигналов заключается в использовании известной взаимосвязи между входным и выходным сигналами для настройки параметров алгоритма с целью минимизации ошибки между входным и выходным сигналами [14]. Эта ошибка называется «сигналом ошибки» и обычно определяется как разность между выходным сигналом и желаемым выходным сигналом. Алгоритм автоматически настраивает коэффициенты фильтра для достижения наилучшего выходного сигнала, непрерывно регулируя свои параметры, чтобы минимизировать сигнал ошибки и сделать выходной сигнал как можно ближе к желаемому выходному сигналу в ходе непрерывной итерации. Метод реализации адаптивного алгоритма обработки сигнала можно в целом разделить на три категории: метод программной реализации, метод аппаратной реализации и сочетание метода аппаратной и программной реализации. Программный метод реализации с использованием

программного обеспечения компьютера общего назначения для запуска адаптивного алгоритма математической модели, написанной из программы, для завершения адаптивной обработки сигнала, преимущество гибкости, удобства и надёжности и может сделать время и время мультиплексирования, недостатком является то, что объём вычислений большой, вычисления занимают время, обработка сигнала в режиме реального времени не очень хорошо, и вычисления потребления высокой стоимости, аппаратных ресурсов отходов очевидно. Аппаратный метод реализации разработан в соответствии с математической моделью адаптивного алгоритма, и весь алгоритм реализован в аппаратных средствах, которые используются для завершения математических операций алгоритма, таких как сумматор, умножитель, входные и выходные порты, в дополнение к периферийным устройствам, таким как системные часы.

Функция распределения в форме конуса – одна из функций в ряду распределения Корнклааса [15]. Конусообразное распределение было предложено в 1991 году Юньсинь Чжао, Лесом Э. Атласом и Робертом Дж. Марксом. Его использование заключается в определении параметра в функции плотности вероятности для настройки формы распределения. Коническая функция распределения имеет ряд применений в обработке сигналов. Она может использоваться для описания статистических свойств сигналов, таких как функция плотности вероятности, функция распределения вероятностей и т. д. С помощью конической функции распределения можно моделировать и анализировать распределение шума и статистические характеристики сигнала, а также проводить дальнейшую обработку сигнала с помощью фильтрации, денуазинга и выделения признаков. Применение конической функции распределения может помочь лучше понять и обработать сигнал, а также повысить точность и надёжность обработки сигнала.

Функция распределения Чоя-Уильямса – одна из функций семейства распределения Корнклааса. Распределение Чой-Вильямса было предложено Хьюнгом-III Чоем и Уильямом Дж. Уильямсом в 1989 году [16]. Это распределение использует экспоненциальную функцию ядра для фильтрации перекрёстных членов. Распределение Чоя-Уильямса может отфильтровать только перекрёстные термины с различными частотными и временными центрами. Оно может быть использовано для характеристики статистических свойств сигнала, таких как функция плотности вероятности, функция распределения вероятностей и т. д. Функция распределения Чоя-Уильямса может быть использована для моделирования и анализа распределения шума и статистических свойств сигнала, а также для дальнейшей обработки сигнала с целью фильтрации, обесцвечивания и выделения признаков.

Мгновенная частота является однозначной функцией времени t , т. е. существует только одна частота, которая однозначно соответствует каждому времени t . Поэтому она может представлять только однокомпонентный сигнал, и мгновенная частота не имеет практического физического смысла для сигналов, состоящих из комбинации нескольких компонентов; однако во многих случаях очень трудно определить, является ли сигнал однокомпонентным или многокомпонентным, поэтому обычно используется узкополосный сигнал в качестве критерия для выбора сигнала, чтобы он соответствовал определению мгновенной частоты [17].

Мгновенная пропускная способность или пропускная способность в реальном времени – это максимальная непрерывная пропускная способность, которую система может генерировать или получать без возврата [18]. Эта пропускная способность обычно используется для характеристики производительности системы связи, сети или другого устройства передачи данных. Важно отметить, что на пропускную способность в реальном времени может влиять множество факторов, включая аппаратные ограничения, качество сигнала, состояние канала и загрузку системы. Поэтому эти факторы необходимо учитывать при проектировании систем и сетей связи для оптимизации использования пропускной способности в реальном

времени. Пропускная способность в реальном времени часто используется для описания требований к системе или приложению обработки сигналов в реальном времени. Для обработки сигналов в реальном времени требуется система, которая может быстро и точно обрабатывать сигналы и реагировать на их изменения. В этом случае мгновенная пропускная способность может помочь определить вычислительные ресурсы и скорость обработки, необходимые системе для обеспечения производительности в реальном времени.

Исходя из вышеизложенного принципа программа разработана в LABVIEW2022, а панель программы показана на рисунке 2. Различные алгоритмы обработки, описанные выше, соответствуют различным модулям обработки.

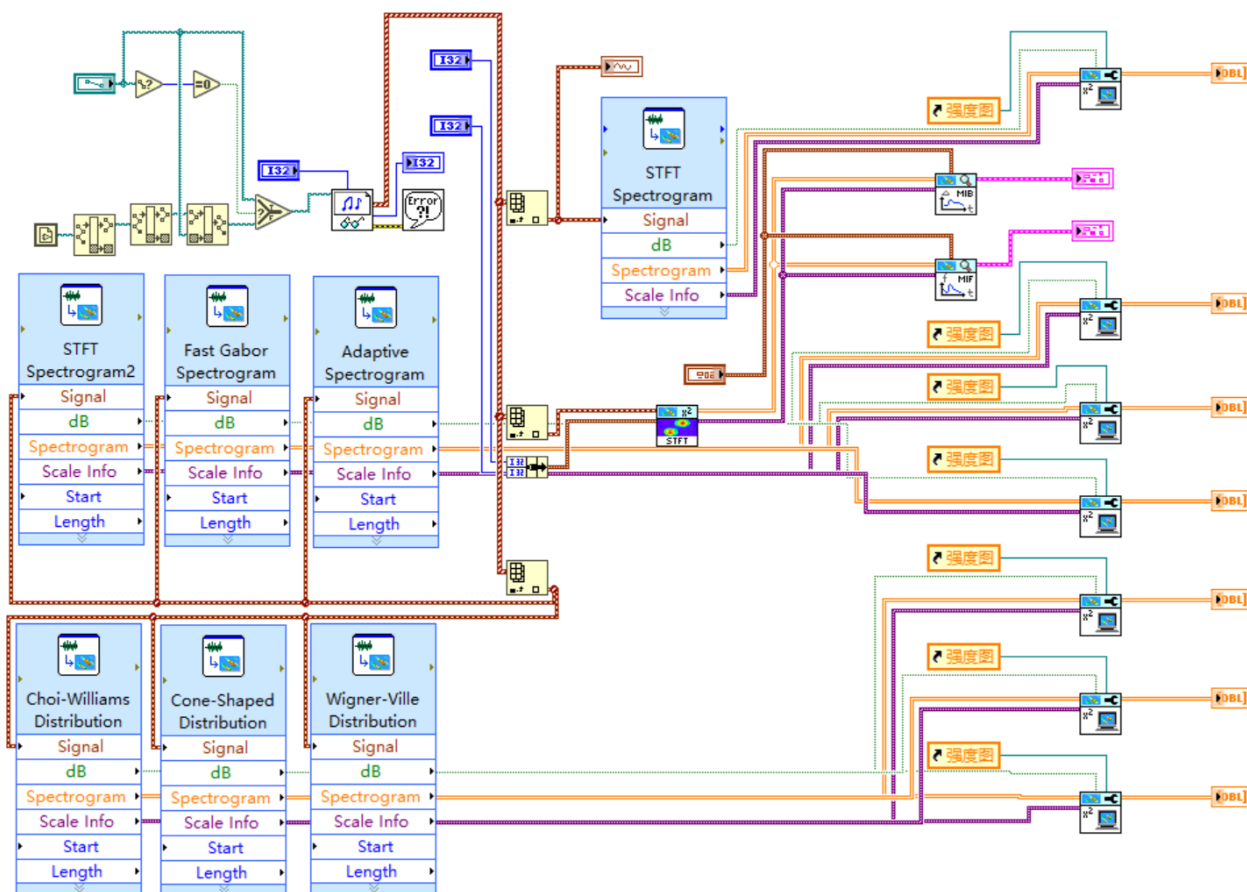


Рисунок 2 – Диаграмма программирования

2 Экспериментальная демонстрация

Путём программирования и проектирования с помощью LabVIEW2022 полученные сигналы вибрации двигателей малой авиации вводятся в систему для проведения экспериментов, а конкретные результаты представлены на рисунках 3 и 4. Рисунок 3 – спектр вибросигнала исправного двигателя, проанализированный совместным время-частотным методом. Рисунок 4 – спектр вибросигнала двигателя, имеющего проблему блокировки работы, проанализированный по п.п. Соответствующие результаты анализа показаны на рисунке, который может служить ориентиром для инженеров и техников при подборе условий эксплуатации оборудования.

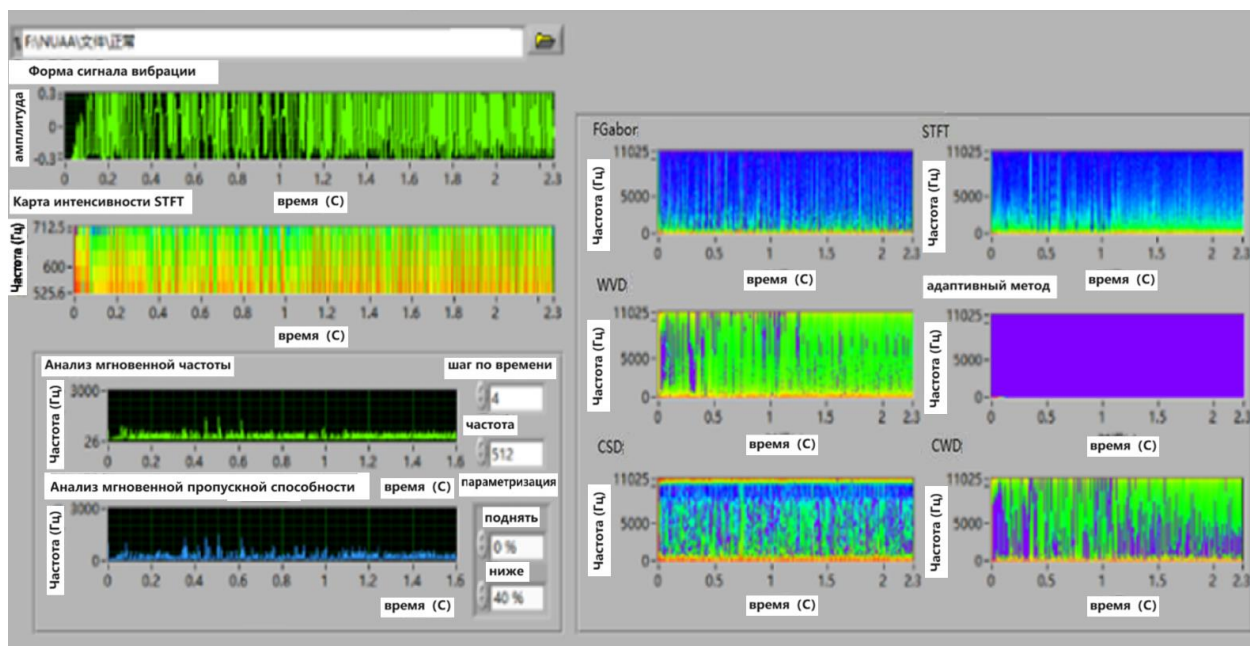


Рисунок 3 – Вибрационная карта двигателя в нормальных условиях эксплуатации

Разница между нормальным и неисправным сигналом после совместного применения метода «время-частота» видна уже при сравнении рисунков 3 и 4 и более подробно описана ниже.

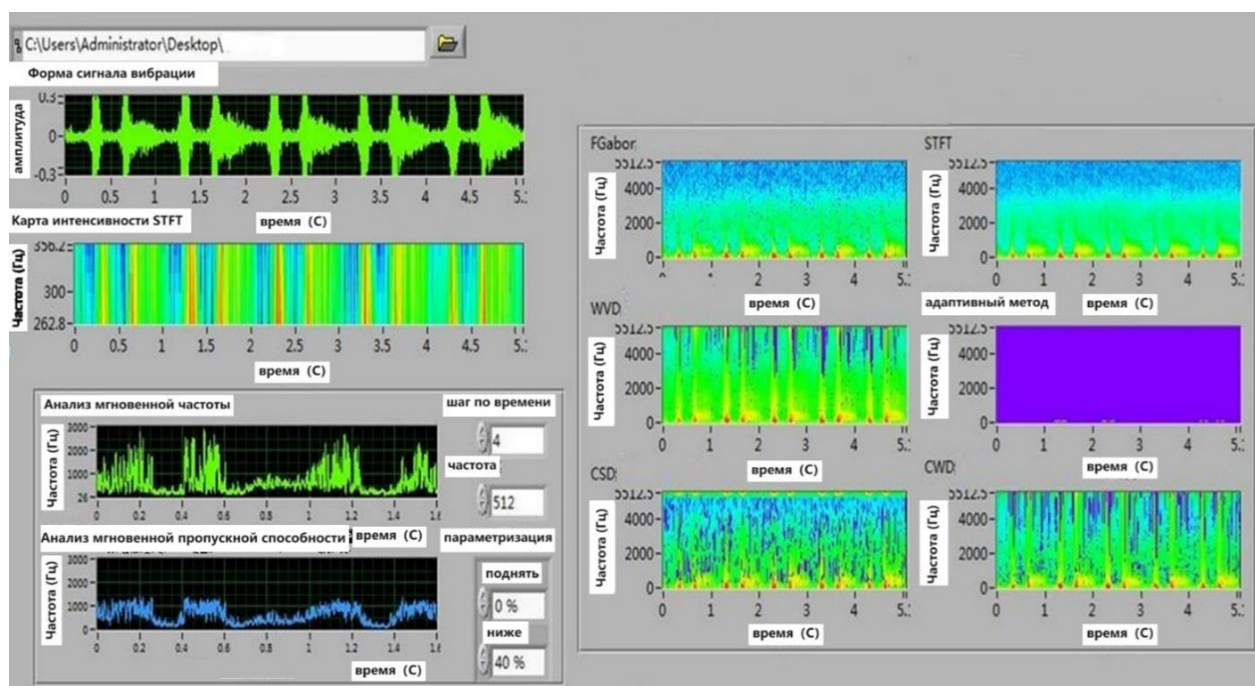


Рисунок 4 – Составление карты вибрационных сигналов двигателя с проблемой демпфирования на ходу

На рисунках 5 и 6 мы можем увидеть спектр сигнала после совместного метода анализа. Сравнивая рисунок 5 с рисунком 6, можно увидеть характерные различия между нормальными и аномальными сигналами, которые могут быть использованы в качестве основы для вспомогательной диагностики. Распределение графиков по часовой стрелке от верхнего левого кадра – это графики, построенные следующими методами: метод Gabor; метод STFT;

адаптивный метод; метод CWD; метод CSD; метод WVD. На рисунках 7 и 8 представлены карты сигналов вибрации микродвигателя после обработки методом мгновенных полос.

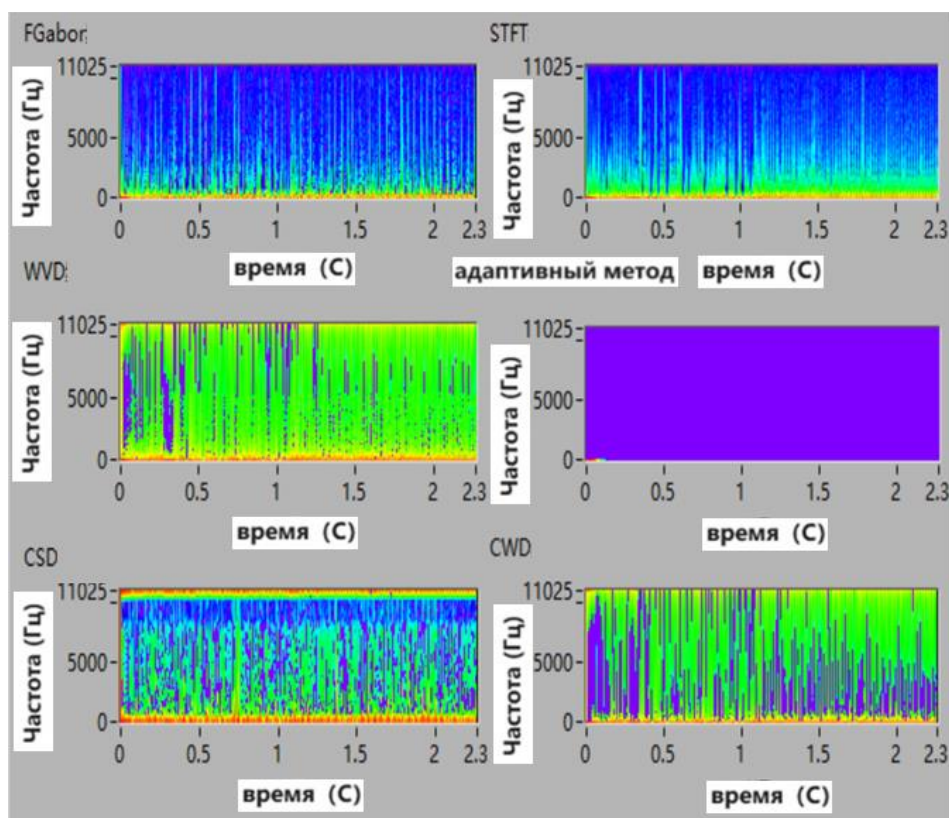


Рисунок 5 – График результатов анализа сигналов нормальной вибрации методом совместного анализа

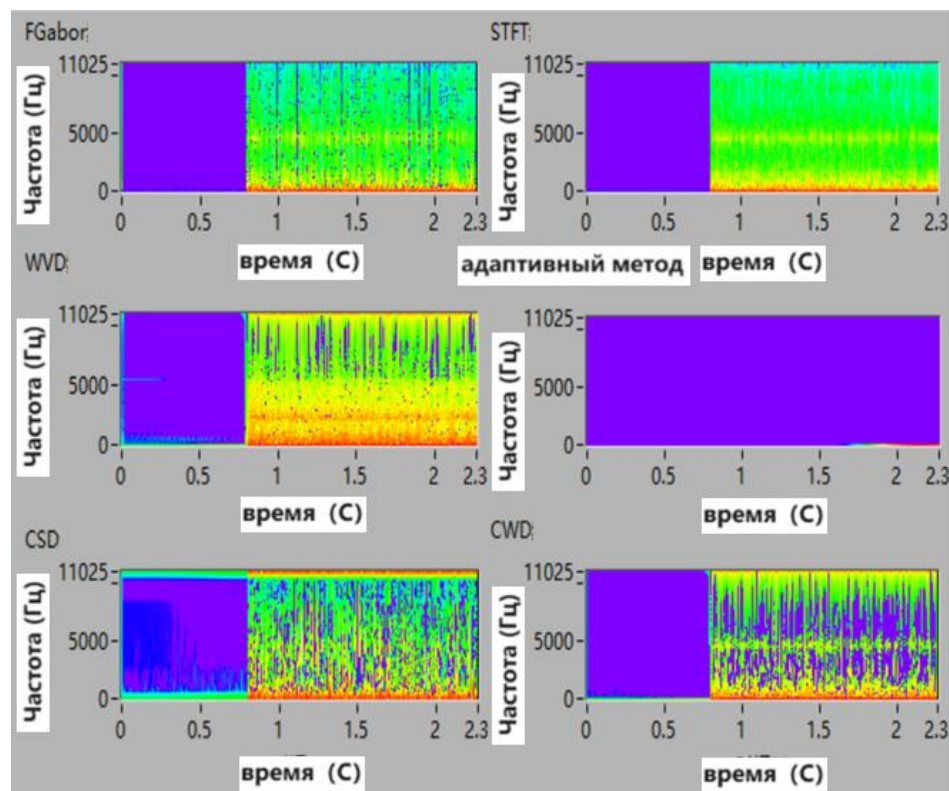


Рисунок 6 – График результатов анализа сигнала неисправности методом совместного анализа

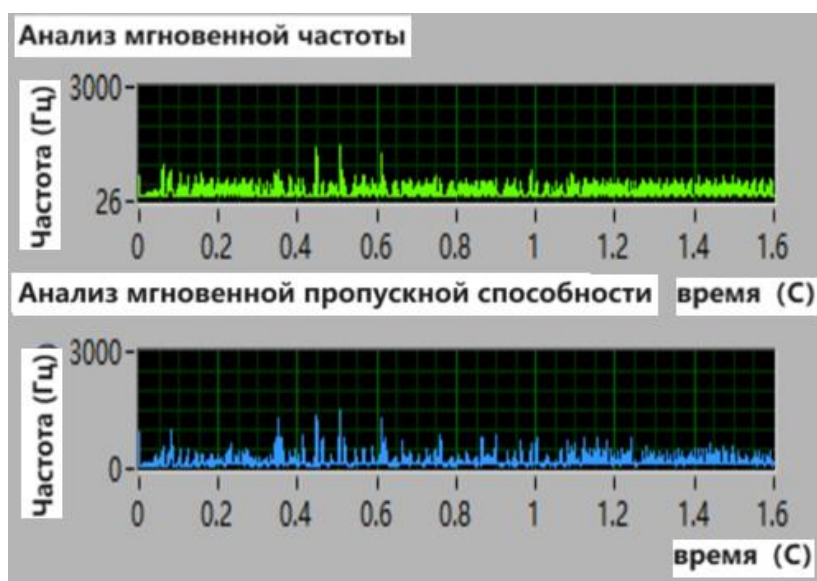


Рисунок 7 – Результаты анализа сигналов нормальной вибрации методами мгновенной частоты и мгновенной полосы пропускания

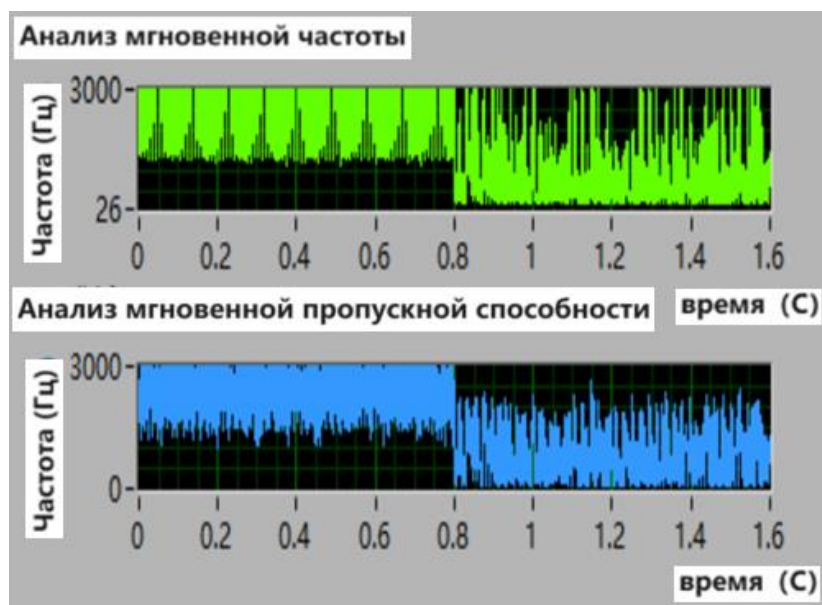


Рисунок 8 – Результаты анализа сигнала неисправности методами мгновенной частоты и мгновенной полосы пропускания

Сравнение двух графиков можно увидеть в нормальном малом двигателе и малом двигателе сигнал после мгновенной полосы метод обработки малого двигателя проблемы сигнала, контраст между двумя особенностями очевиден, так что соответствующие неисправности могут быть оценены, чтобы быть в состоянии достичь желаемой цели.

Инструмент предназначен для помощи инженерам и техническим специалистам в диагностике неисправностей энергосистем, и специалист может определить тип неисправности по результатам, представленным прибором.

Заключение

Как видно из приведённых выше диаграмм, каждая подфункция разработанной системы может быть реализована плавно, а условия работы хороши и просты в реализации.

Регулировка параметров очень гибкая и может удовлетворить различные требования к применению. Использование такой системы может повысить эффективность комплексного анализа вибрационного рабочего состояния двигателей малой авиации и помочь в диагностике неисправностей.

Результаты могут предоставить инженерам и техникам мощные инструменты диагностики вибрационных неисправностей, первоначально необходимо полагаться на навыки долгосрочного опыта работы, накопленного персоналом, через анализ данных способ упростить, повысить точность анализа, уменьшить операции использования ограничений, даже если нет долгосрочного опыта работы оператора, в относительно короткий период времени может быть освоен через инструмент диагностики вибрационных неисправностей навыки.

Благодарности

Мы хотели бы выразить нашу глубокую благодарность за огромную поддержку, оказанную Нанкинским университетом авиации и аэронавтики.

Список использованных источников

1. ZHAO Chendi, QIN Yi, CHEN Xiaoyang. Application research on electronic ignition system of aviation piston engine. *Journal of Civil Aviation*, 2023, 7(05): 120-123.
2. AN Xue, LI Shaobo, ZHANG Yizong et al. A review on the research of fault diagnosis technology of UAV flight control system. *Computer Engineering and Application*, 1-14.
3. Lai Kui, Dai Xiongjie, Pan Songbo et al. Research on fault diagnosis of distribution terminal acquisition module based on STFT and CNN- Attention. *Automation Instrumentation*, 2023, 44(09): 37-41+48.
4. WANG Juanjuan, SONG Sanhua, DU Yunming. Simulation of LBFI recognition considering Gabor wavelet features. *Computer Simulation*, 2023, 40(09): 237-241.
5. Gao Xing. Research on cable fault localization based on wavelet transform and VMD-WVD. *Anhui University of Science and Technology*, 2022.
6. Zhang Pengqi. Numerical simulation of descending film in a vertical circular tube under a conical distributor. *Taiyuan University of Technology*, 2019.
7. Gao Gaoqiang, Zheng Kinde, Pan Haiyang et al. A rolling bearing fault diagnosis method based on adaptive denoising empirical wavelet transform. *Bearing*, 1-8.
8. Zhichao Z. Variance-SNR Based Noise Suppression on Linear Canonical Choi-Williams Distribution of LFM Signals. *Chinese Journal of Electronics*, 2022, 31(05): 804-820.
9. V. A M, G. O M, A. A I, et al. A Simple Radiophotonic Device for Instantaneous Frequency Measurement of Multiple Microwave Signals Based on a Symmetrical Unequal Comb Generator. *Instruments and Experimental Techniques*, 2023, 66(5): 737-744.
10. Zheng L, Jian Z, Xue L, et al. Instantaneous Bandwidth Enhancement for Variable Inclination Continuous Transverse Stub Antenna. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2022, 2022.
11. Daniel G, P C F, Shuai L, et al. Task-specific efficient channel selection and bias management for Gabor function channelized Hotelling observer model for the assessment of x-ray angiography system performance. *Medical physics*, 2021, 48(7): 3638-3653.
12. Zhixing J, Chaoxun G, David Z. Pressure wrist pulse signal analysis by sparse decomposition using improved Gabor function. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2022, 219: 106766-106766.
13. Ünal L, Pakfiliz G A. LPI Radar Signal Detection Based on Autocorrelation Function and Wigner-Ville Distribution. *Review of Computer Engineering Studies*, 2022, 9(4).
14. Hasan R, Ishtiaq A, M. N K, et al. Validation of Parallel Distributed Adaptive Signal Processing (PDASP) Framework through Processing-Inefficient Low-Cost Platforms. *Mathematics*, 2022, 10(23): 4600-4600.
15. Zhao DL, Guo CF, Wu DL et al. Construction of optimal remote sensing feature index set under the combination of CSD and CDD and its application in wetland information extraction. *Journal of Earth Information Science*, 2021, 23(06): 1092-1105.

16. LIU Qi, JING Shuangxi, LEN Junfa et al. Low-frequency fault feature extraction of gearbox based on MODWPT and Choi-Williams distribution. Mechanical Design and Research,2020,36(05).
17. LIU Wen, JIANG Shuxia, WANG Tianpeng et al. Identification of structural instantaneous frequencies by variational modal decomposition and wavelet contour method. Noise and Vibration Control,2023,43(05):167-174+226.
18. Liu Zheng. Study on Instantaneous Bandwidth Expansion of Variable Inclination Continuous Sectional Section Array Antenna. Strategic Support Forces Information Engineering University,2023.

Analysis of vibration signals of micro-size aircraft engines based on joint time-frequency method

Mai Xin | Candidate of Science, Senior Engineer, Postgraduate Student;
School of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, NanJing, 210016, China;
email: xinmai_xm@nuaa.edu.cn

Hui Qin | Ph.D., Senior Engineer, Researcher;
Suzhou Research Institute of Harbin Institute of Technology,
Suzhou, 215000, China;
email: qinhuihui_hqq@163.com

Zhifeng Ye | Ph.D., Professor, Director;
School of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, NanJing, 210016, China;
email: yezhifen_yzf@nuaa.edu.cn

Lingyan Wang | Master's Degree, Senior Engineer, Researcher;
AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi,
214000, China;
email: wanglingyan_wlly@163.com

As the current analysis technology for vibration signals cannot be a comprehensive study of the signal, which leads to the signal analysis not meeting the requirements of practical application, to more in-depth analysis of small engine vibration signals, the project team adopts time-frequency analysis technology to carry out specific work. By using LABVIEW2022 software programming, the application program based on the joint time-frequency method is realized to study the vibration signal of a small engine and determine the running state of the engine according to the corresponding results, to determine whether the engine performance is good. By using the STFT method, Gabor transform method, Wigner distribution method, CSD method, adaptive spectrum method, CWD method, MIF method, and MIB method, the corresponding programs are successfully used to realize the joint time-frequency analysis of such signals. The time-frequency analysis method mentioned above can achieve the expected effect.

Keywords: micro-size aircraft engines ;vibration signal ;labview2022 ;joint time-frequency method

Citation: Xin Mai, Qin Hui, Ye Zhifeng and Wang Lingyan (2025), “Analysis of small aero-engine vibration signals based on joint time-frequency method”, *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 11, no. 1, pp. 105-117. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-105-117. (In Russian; abstract in English)

References

1. ZHAO Chendi, QIN Yi, CHEN Xiaoyang. Application research on electronic ignition system of aviation piston engine. *Journal of Civil Aviation*, 2023, 7(05):120-123.
2. AN Xue, LI Shaobo, ZHANG Yizong et al. A review on the research of fault diagnosis technology of UAV flight control system. *Computer Engineering and Application*, 1-14.
3. Lai Kui, Dai Xiongjie, Pan Songbo et al. Research on fault diagnosis of distribution terminal acquisition module based on STFT and CNN- Attention. *Automation Instrumentation*, 2023, 44(09): 37-41+48.
4. WANG Juanjuan, SONG Sanhua, DU Yunming. Simulation of LBFI recognition considering Gabor wavelet features. *Computer Simulation*, 2023, 40(09):237-241.
5. Gao Xing. Research on cable fault localization based on wavelet transform and VMD-WVD. *Anhui University of Science and Technology*, 2022.

6. Zhang Pengqi. Numerical simulation of descending film in a vertical circular tube under a conical distributor. Taiyuan University of Technology, 2019.
7. Gao Gaoqiang, Zheng Kinde, Pan Haiyang et al. A rolling bearing fault diagnosis method based on adaptive denoising empirical wavelet transform. Bearing, 1-8.
8. Zhichao Z. Variance-SNR Based Noise Suppression on Linear Canonical Choi-Williams Distribution of LFM Signals. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(05): 804-820.
9. V. A M, G. O M, A. A I, et al. A Simple Radiophotonic Device for Instantaneous Frequency Measurement of Multiple Microwave Signals Based on a Symmetrical Unequal Comb Generator. Instruments and Experimental Techniques, 2023, 66(5): 737-744.
10. Zheng L, Jian Z, Xue L, et al. Instantaneous Bandwidth Enhancement for Variable Inclination Continuous Transverse Stub Antenna. International Journal of Antennas and Propagation, 2022, 2022.
11. Daniel G, P C F, Shuai L, et al. Task-specific efficient channel selection and bias management for Gabor function channelized Hotelling observer model for the assessment of x-ray angiography system performance. Medical physics, 2021, 48(7): 3638-3653.
12. Zhixing J, Chaoxun G, David Z. Pressure wrist pulse signal analysis by sparse decomposition using improved Gabor function. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2022, 219: 106766-106766.
13. Ünal L, Pakfiliz G A. LPI Radar Signal Detection Based on Autocorrelation Function and Wigner-Ville Distribution. Review of Computer Engineering Studies, 2022, 9(4).
14. Hasan R, Ishtiaq A, M. N K, et al. Validation of Parallel Distributed Adaptive Signal Processing (PDASP) Framework through Processing-Inefficient Low-Cost Platforms. Mathematics, 2022, 10(23): 4600-4600.
15. Zhao DL, Guo CF, Wu DL et al. Construction of optimal remote sensing feature index set under the combination of CSD and CDD and its application in wetland information extraction. Journal of Earth Information Science, 2021, 23(06): 1092-1105.
16. LIU Qi, JING Shuangxi, LEN Junfa et al. Low-frequency fault feature extraction of gearbox based on MODWPT and Choi-Williams distribution. Mechanical Design and Research, 2020, 36(05).
17. LIU Wen, JIANG Shuxia, WANG Tianpeng et al. Identification of structural instantaneous frequencies by variational modal decomposition and wavelet contour method. Noise and Vibration Control, 2023, 43(05): 167-174+226.
18. Liu Zheng. Study on Instantaneous Bandwidth Expansion of Variable Inclination Continuous Sectional Section Array Antenna. Strategic Support Forces Information Engineering University, 2023.