

Айгеноскопия – инструмент открытий и модернизации технологий

В. В. Исакевич, Д. В. Исакевич

ООО «Собственный вектор», г. Владимир

eigenoscope@yandex.ru, daniil.isakevitch@yandex.ru

Л. В. Грунская, Л. Т. Сушкова

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых

grunsk@vlsu.ru, ludm@vlsu.ru

Аннотация. Представлен проект по созданию единой технологии «айгеноскопия». Описаны основные положения айгеноскопии; показаны её отличия от других подходов, использующих представление в базисе собственных векторов ковариационной матрицы. Представлены основные результаты, полученные при практическом использовании айгеноскопии.

Ключевые слова: собственный вектор, ковариационная матрица, собственное значение, ансамбль, типология, сверхчувствительность, сверхизбирательность

I. ВВЕДЕНИЕ

Введение в практику новых анализаторов, которые позволяют решать задачи прежде не решаемые и выявлять ранее неизвестные свойства и явления, изменяет сложившийся научно-технический ландшафт и всегда является новым вызовом и новой проблемой. Таким новым классом анализаторов являются айгеноскопы; с момента появления полезной модели «Анализатор собственных векторов и компонент сигнала» (полезная модель №116242) при помощи айгеноскопии получены впечатляющие результаты в астро- и геофизике, медицинской технике и других научно-технических областях.

Системы обработки результатов наблюдений физических полей (электромагнитных, гидроакустических, сейсмических и т. д.) часто используют способы обработки, основанные на представлениях сигналов в фиксированных базисах. Если же чувствительность и избирательность системы обработки недостаточны для решения стоящих задач, то следует пересмотреть используемые представления. Один из вариантов такого пересмотра – использование нефиксированных базисов представления результатов наблюдений, в том числе, айгеноскопии.

Предпосылки для использования таких представлений общеизвестны: «Представление о синусоиде как о простейшем колебании настолько пропитало наше мышление, что мы бессознательно продолжаем его применять и там, где оно вовсе не является адекватным. ... Одна аппаратура придаёт физическую реальность разложению на синусы, другая аппаратура – разложению по другим функциям» [1]. «Простые гармонические функции – не единственные функции, по которым можно разложить произвольно заданную функцию в ряд» [2]. Используемый в айгеноскопии математический

аппарат (собственные функции) был открыт Д. Гильбертом [3] и применяется как в физике [4], так и при синтезе оптимальных и субоптимальных обнаружителей [5]. Исследования в области численных методов [6] привели к созданию библиотек программ, реализующих вычисление собственных векторов и собственных значений матриц большой размерности [7].

Айгеноскоп осуществляет разложение наблюдений, полученных на конечномерном сенсорном поле, на некоррелированные компоненты, каждая из которых может быть проанализирована отдельно. Раздельный анализ компонент обеспечивает сверхчувствительность и сверхизбирательность айгеноскопа [8]; для анализа компонент применим весь арсенал известных средств обработки (в том числе, искусственного и/или гибридного интеллекта [9, 10]).

Выигрыш айгеноскопии по отношению к стандартным методам обработки сигнала может быть оценён при предварительном анализе первичных данных наблюдений ещё до конструирования айгеноскопа; такая оценка может осуществляться на фактическом экспериментальном материале на ранних этапах конструирования, а также в ходе эксплуатации айгеноскопа (обеспечивая автоматический переход к оптимальному варианту обработки).

Данный доклад представляет проект «Айгеноскопия – инструмент открытий и модернизации технологий», цель которого – закрепить результаты интеллектуальной деятельности, основанные на айгеноскопии, в виде единой технологии, и организовать взаимодействие с организациями, заинтересованными в использовании, доработке и сопровождении этой технологии. В ходе проекта предполагается создание лаборатории, обслуживающей полный цикл (теория, приложения, реализация, продвижение и научная коммуникация) введения в хозяйственный и социальный оборот инноваций, основанных на использовании айгеноскопии.

II. ПРИНЦИПЫ АЙГЕНОСКОПИИ

В основе айгеноскопии лежит использование спектрального представления ковариационной матрицы. Ковариационная матрица – эрмитова неотрицательно определённая матрица, вычисляемая по ансамблю наблюдений. В соответствии со спектральным разложе-

нием эта матрица представляется суммой «слоёв» – матриц единичного ранга, каждая из которых определяется своей собственной парой (собственным вектором и собственным значением). Собственные векторы ковариационной матрицы образуют ортонормированный базис, а собственные значения определяют среднюю энергию компоненты, пропорциональной собственному вектору, в ансамбле наблюдений на выбранном сенсорном поле.

Важное условие эффективности айгеноскопии – надлежащее (в соответствии с решаемой задачей) формирование сенсорного поля и ансамбля наблюдений над этим полем.

Ансамбль состоит из отдельных элементов ансамбля. Существенные свойства ансамбля, обеспечивающие эффективную обработку:

- Однородность элементов – каждый элемент ансамбля может быть представлен как вектор в унитарном пространстве, общем для всех элементов.
- Однородность координат – все координаты всех векторов, представляющих элементы ансамбля, должны иметь одну физическую размерность и одну единицу измерения.
- Отсутствие пропусков – каждая координата каждого элемента ансамбля имеет определённое значение.

Координаты элементов ансамбля могут представлять собой значения физической величины, наблюдаемые на сенсорном поле, либо могут быть получены как функции от наблюдений. Выбранное функциональное преобразование наблюдений должно соответствовать решаемой задаче. В частности:

- Логарифмы наблюдений использованы для выявления аллометрических соотношений (полезная модель №178300).
- Парные произведения наблюдаемых значений применимы для выявления модуляций шумовых сигналов [11].

Формирование сенсорного поля и выборка из него наблюдений для формирования ансамбля часто определяются известными симметриями решаемой задачи и существенно влияют на эффективность получаемого представления. Эффективное представление позволяет гипотетически соотнести определённые подмножества собственных векторов с определёнными причинами, а во многих случаях и обоснованно принять выдвигаемую гипотезу.

Ещё большие возможности открывает использование адаптивных способов формирования сенсорных полей и выборки наблюдений (например, при выявлении слабых параметрических колебаний [12]). Один из критериев качества настройки адаптивной схемы обработки – размерность представления, которую можно оценивать как по вычисленному спектру собственных значений, так и непосредственно по ковариационной матрице [13].

Айгеноскопия предполагает:

- Анализ спектра собственных значений, интерпретируемых как средние энергии компонент.
- Анализ собственных векторов и/или их совокупностей, выделенных по собственным значениям и/или определённым критериям.

- Представление и дальнейший анализ наблюдений над заданным сенсорным полем в базисе собственных векторов ковариационной матрицы предыдущих наблюдений.

В большинстве известных исследований, так и или иначе использующих анализ собственных векторов ковариационной матрицы (анализ главных компонент, метод «Гусеница» [14], разложение Карунена–Лоэва и анализ сингулярного спектра), в качестве информативных рассматриваются лишь компоненты, имеющие относительно большие собственные значения; остальные (недоминирующие) компоненты традиционно рассматриваются как шум. Причины такого рассмотрения:

- Недоминирующие компоненты представляются несущественными при решении задач аппроксимации или прогноза данных.
- Недоминирующие собственные векторы не соответствуют «интуитивным» и простым объяснениям [15, 16].

При анализе недоминирующих собственных векторов следует предполагать, что они (как и доминирующие собственные векторы) могут быть информативны. В пользу данного предположения свидетельствует и тот факт, что возмущение собственного вектора не зависит от соответствующего ему собственного значения, но лишь от его отделённости [4, 7].

В немногих исследованиях, уделяющих основное внимание недоминирующим собственным векторам, в первую очередь рассматривается их локализация – ситуация, в которой большинство координат недоминирующего собственного вектора близки к нулю [15, 16, 17]. Локализация собственных векторов случайных матриц исследуется в ряде математических работ [18, 19].

В айгеноскопии используются критерии, характеризующие локализацию собственного вектора; для интерпретации выявляемых признаков строятся систематизированные описания – типологии. Типологии собственных векторов и их характеристик, а также спектров собственных значений, получаемых при заданных способах построения сенсорных полей и формирования ансамблей, пополняются и используются при решении новых задач.

III. ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первым успешным использованием айгеноскопии (в ходе которого были исследованы и закреплены ее основные принципы) было открытие ранее неизвестного свойства восприимчивости электрического поля в приземном слое атмосферы к гравитационным волнам, излучаемым релятивистским двойными звездными системами (пульсарами). Первоначальные попытки обнаружения отклика с использованием классических анализаторов спектра привели к отрицательному результату, что было (гипотетически) интерпретировано нами как несоответствие свойств анализатора искомому сигналу. Рабочая гипотеза состояла в том, что искомый сигнал не является гармоническим, а – в силу взаимного движения наблюдаемых двойных систем и наблюдателя (находящегося в резонаторе «Земля-ионосфера» и совершающего сложные движения в Солнечной системе,

на которую воздействуют гравитационные волны) – всего лишь спектрально локализован на известных частотах.

В качестве адекватного анализатора был использован анализатор собственных векторов и компонент сигнала (айгеноскоп); в качестве ансамбля использована траскторная матрица с интервалом анализа от нескольких сотен до тысячи часов. Анализу подвергнуты временные ряды многолетних наблюдений на четырёх станциях (длительность до 50 лет с временем дискретизации 1 час). Для каждого собственного вектора ковариационной матрицы вычислен амплитудный спектр, определена полоса спектральной локализации, и вычислена мера спектральной локализации – индекс когерентности – отношение максимума амплитудного спектра к его среднему значению. Построена выборка собственных векторов, в полосу спектральной локализации которых попадают частоты гравитационного излучения известных пульсаров; свойства спектральной локализации в этой выборке тщательно сравнивались с тестовыми выборками собственных векторов, спектрально локализованных на иных частотах. Статистический анализ показал, что аномалии, проявляющиеся в повышении степени спектральной локализации на гравитационных частотах, могут интерпретироваться как возникшие случайно с вероятностью порядка 10^{-9} . Работы, проведённые в данном направлении, опубликованы в серии статей и монографии [20], известны специалистам в области исследования гравитационно-волновых процессов и продолжают авторы с целью развития нового направления – многоканального гравитационно-волнового мониторинга на частотах релятивистских двойных звездных систем.

Другим применением айгеноскопии явилось выявление признаков сильных землетрясений на Камчатке по результатам многоканальных наблюдений концентрации радона и обработки временных рядов наблюдений с использованием многоканального айгеноскопа (полезные модели №№133642, 159604). Эти подходы внедрены в практику работы Камчатского филиала Геофизической службы РАН и могут быть распространены на решение аналогичных задач в других регионах [21].

Третий пример – сжатие, хранение и автоматический анализ регулярно поступающих электрокардиограмм (ЭКГ), позволяющие хранить не менее 100 миллионов записей ЭКГ на 1 Тбайт памяти при времени реакции не более 5–10 секунд с момента получения записи; вероятность пропуска значимых изменений в ЭКГ и вероятность ложной реакции – не выше 0.01 (полезные модели №№128470, 162110, 177224, 177963, 178010, 180637, 180638, 185708, способ №2746844).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во многих ситуациях использование айгеноскопии эквивалентно быстрому повышению эффективности. Это относится в равной мере к инновационной деятельности в медицине, многоканальном мониторинге и дефектоскопии (полезная модель №128724).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горелик Г.С. Л.И. Мандельштам и учение о резонансе. / Академик Л.И. Мандельштам. К столетию со дня рождения. М.: «Наука», 1979. С.139-155.
- [2] Стратт (Рэлей) Дж. В. Теория звука. Т.1. Москва–Ленинград: Государственное издание технико-теоретической литературы, 1940.
- [3] Hilbert D. Foundations of a General Theory of Linear Integral Equations. Gottingen, 1904.
- [4] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 томах. Том III. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Физматлит, 2021. 800 с.
- [5] Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. Пер. с англ. М.: Советское радио, 1961. 1614 с.
- [6] Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры: учебник, 4-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2021. 736 с.
- [7] Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения. Пер. с англ. М.: Мир, 2001. 430 с.
- [8] Исакевич Д.В. О рабочих характеристиках анализатора собственных векторов и компонент сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2022. №3. С. 54-58.
- [9] Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
- [10] Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / Под ред. А.М. Яшина. СПб.: Издательство СПбГУ, 1978. 711 с.
- [11] Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Сушкова Л.Т., Лукьянов В.Е. Анализ собственных векторов матриц моментов четвертого порядка при выявлении амплитудной модуляции гауссовского шума // Нелинейный мир. 2014. Т 12. № 1. С. 29-34.
- [12] Исакевич Д.В. Основы анализа собственных векторов и компонент регулярных колебаний. М.: Издательство Перо, 2015. 140 с.
- [13] Исакевич Д.В. Эффективная оценка размерности представления сигнала в базисе собственных векторов // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 8. С. 71-79.
- [14] Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.
- [15] Cucuringu M., Mahoney M.W. Localization on low-order eigenvectors of data matrices. arXiv: 1109.1355v1. 2011.
- [16] Cucuringu M., Blondel V.D., van Dooren P. Extracting spatial information from networks with low-order eigenvectors. arXiv: 1111.0920. 2011.
- [17] Mavroedis D., Batina L., van Laarhoven T., Marchiori E. PCA, Eigenvector Localization and Clustering for Side-Channel Attacks on Cryptographic Hardware Devices / Proc. of the 2012 European conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases – Volume Part I. 2012.
- [18] Erdos L., Knowles A., Yau H.-T., Jun Yin. Delocalization and Diffusion Profile for Random Band Matrices. arXiv: 1205.5669. 2012.
- [19] Bordenave C., Guionnet A. Localization and Delocalization of Eigenvectors for Heavy-Tailed Random Matrices. arXiv: 1201.1862v2. 2012.
- [20] Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Айгеноскопия многолетних временных рядов электромагнитного поля в приземном слое атмосферы крайне низкочастотного диапазона на частотах двойных звездных систем. М.: Издательство Перо, 2016. 276 с.
- [21] Фирстов П.П., Исакевич В.В., Макаров Е.О., Исакевич Д.В., Грунская Л.В. Применение методики айгеноскопии для поиска предвестников сильных землетрясений в поле почвенного радона (^{222}Rn) на Камчатке (август 2012 – август 2013 гг.) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 3. С. 63-75.