

УДК 681.5:330.43:535

В.С. Деева

Метод покрытия кластерного пространства наблюдения

Представлены результаты решения задачи оптимальной топологии покрытия кластерного пространства наблюдения физического эксперимента путём произвольного размещения чувствительных элементов градиентной следящей системы и сопоставительного анализа оценки эффективности градиентного принципа определения координат состояний стохастической траектории случайных смещений объекта наблюдения – локального явления или физического процесса.

Ключевые слова: пространство, топология, кластер, метод наблюдения, градиентная система.

При решении астрономических и астрофизических задач наблюдения внеземных источников излучения, а также многих подобных им задач физического эксперимента, связанного с исследованием свойств сред и объектов при радиационном корпускулярном или волнового характера воздействия на среды в разных участках обширного диапазона спектра распределения электромагнитных волн, находят широкое применение системы контроля и диагностики состояния объектов и наблюдаемого пространства. Пространство с присутствующими в нем объектами наблюдения является математическим подобием понятия кластерного пространства.

Астрономические и астрофизические системы контроля и диагностики состояния астрономического (земного и внеземного) пространства наблюдения – это средства, которые можно классифицировать как системы пассивного типа, то есть никоим образом не влияющие на изменение свойств наблюдаемого объекта и среды пространства его наблюдения. При этом излучение (поток энергии радиации) от объекта и пространства наблюдения может иметь место на любом участке спектрального диапазона длин волн электромагнитного излучения. В зависимости от типа наблюдаемого объекта (искусственной или естественной природы) излучение может быть когерентным или некогерентным, не модулированным или модулированным по тому или иному закону, в том числе по закономерности хаотического изменения состояния стохастических свойств среды пространства наблюдения, сквозь толщу которого распространяется собственное или отражённое излучение радиации.

При наблюдении искусственной природы объекта – например, при адаптации астрономических систем так называемой «опорной звезды» – опорного источника излучения, создаваемого импульсом электромагнитного излучения мощного, не обязательно лазерного, средства, системы пространственно-временного контроля и диагностики параметров состояния пространства и объектов могут быть выполнены в виде средств активного типа с возможностью реализации функций управления воздействием на объект контроля и среду пространства его наблюдения. При этом системы не только могут, но и должны быть автоматическими, с разными вариантами выполнения: адаптивными или неадаптивными; по схемному исполнению – аналоговыми или цифровыми; аппаратными или программно-аппаратными – по реализации алгоритма их работы и т.п.

Автоматические следящие системы, независимо от диапазона спектра излучения объекта наблюдения, предназначены для автоматического выявления, без участия оператора-человека, присутствия или отсутствия искомых объектов, последующей идентификации обнаруженных объектов, диагностики и сопровождения траекторий изменения их состояния в пространстве наблюдения, например, измерения траекторий координат при изменении их положения, вариации их размерности, мощности излучаемой энергии радиации с целью последующего управления этими параметрами в заданном направлении (в случае необходимости). Например в случае приведения объектов в требуемую точку наблюдаемого пространства или управления параметрами волнового фронта мощного электромагнитного излучения для создания в данной области очага пробоя как источника опорного для исследования свойств среды источника излучения.

На качество работы автоматического средства на начальном этапе работы, связанной с просмотром пространства наблюдения и обнаружения в нём искомого объекта, большое влияние оказывают особенности методов и алгоритмов просмотра пространства, обработки, выделяемого чувств-

вительным элементом сигнала от объекта наблюдения и динамика траектории изменения параметров сигнала и самого объекта, т.е. соразмерность быстродействия системы и используемого метода просмотра и наблюдения пространства с изменением динамики поведения объекта в этом пространстве. Поэтому представляется актуальным решение задач по определению наилучшего и, по возможности, оптимального алгоритма или закономерности покрытия пространства наблюдения физического эксперимента.

Постановка исследования. Развитие и внедрение в практику физического эксперимента методов и техники аппаратного и компьютерного анализа при измерениях в реальном времени пространственных, временных и статистических характеристик наблюдаемых пространственно-временных полей и сигналов обуславливают необходимость разработки новых и совершенствования существующих методов и методик постановки эксперимента, проведения измерений, исследования путей повышения точности и других метрологических особенностей разрабатываемых принципов, а также оценки эффективности усовершенствования существующих методов и методик измерений с целью снижения общей погрешности оценки параметров физических явлений на стадии натурного эксперимента.

Решение проблемы метрологического и методического обеспечения измерения вероятностных характеристик случайных полей и многомерных сигналов настоятельно требует расширения возможностей существующих методов и разработки новых методов, основанных на рациональном подходе, обеспечивающем более высокое быстродействие с минимизацией плотности размещения числа элементов и датчиков контроля, сохранением разрешающей способности и размеров геометрии и формы пространства наблюдения эксперимента [1].

Проблемы пространственного наблюдения, контроля состояния и измерения параметров процессов и явлений в физическом эксперименте, таком как пробой электрический или оптический, измерение динамики плазменных явлений, в общем случае, гораздо сложнее физического наблюдения временного тренда случайного процесса изменения одного какого-то параметра того же явления. При этом сложность возникающих проблем для адекватной оценки и идентификации сущности исследуемого явления обусловлена тем, что сбор и обработку информации необходимо вести как о случайном многомерном объекте в пространстве наблюдения с учётом вариаций многих характеристик для исследуемого явления параметров.

Сущность оптимальной топологии покрытия пространства наблюдения. Как правило, для качественной оценки и идентификации недостаточно точечных сведений, получаемых из одной области пространства; для многопараметрического и многомерного контроля физического явления элементы контроля (иногда и отдельные датчики) должны устанавливаться в нескольких или в каждой точке или области пространства контроля, представляющего интерес для исследования. Это рождает топологическую проблему рационального или оптимального размещения элементов контроля для адекватного описания в общем случае многомерного (в частном случае, тоже не простом, – двумерного) случайного поля наблюдения явления.

В настоящей работе кратко представлен метод оптимальной топологии покрытия пространства наблюдения путем произвольного принципа размещения элементов двумерного датчика для диагностики состояния многомерного случайного поля физического явления, в частности для метрологии пространственно-временных параметров развития и аннигиляции оптического пробоя и плазменного очага.

При решении топологической проблемы выбора структуры и принципа размещения элементов контроля пространства наблюдения чрезвычайно важно оптимальность размещения точек контроля пространства увязать с особенностями исследуемого физического явления, располагая области контроля таким образом, чтобы охватить весь вероятный диапазон изменения параметров и пространства, занимаемого явлением, в частности, плазменным образованием – плазмодом, но вместе с тем не увеличивать размерность (число элементов датчика) элементов покрытия пространства наблюдения, информация от которых будет избыточна.

Весьма немаловажно при решении проблем топологии размещения соблюдать требования установления соответствия l_k – пространственного разнесения точек контроля и k_{\max} – наибольшей пространственной частоты изменения наблюдаемого случайного поля (в зарубежной литературе называемого числом Найквиста или его аналогии – частотой дискретизации, определяемой теоремой Котельникова в радиотехнике и информатике):

$$k_{\max} = (2l_k)^{-1} = l_{\min}^{-1},$$

где l_{\min} – минимальная разрешающая способность в пространстве изменения формы случайного поля. Обычно $l_{\min} \leq l_{\min s}$. Это означает, что пространственный разнос должен быть меньше или равен наименьшему из возможных изменений формы или геометрии наблюдаемого объекта или изменениям физического явления в пространстве физического эксперимента, например наименьшему размеру отклонений (искажений) формы волнового фронта поля электромагнитного излучения от идеальной формы (сферической, плоской). Изменения волнового фронта, меньшие l_{\min} , не смогут быть правильно измерены и идентифицированы датчиком волнового фронта пространственного поля волны электромагнитного излучения.

Таким образом, величина k_{\max} отражает пороговую величину наименьших случайных отклонений от идеальной формы наблюдаемого волнового фронта поля электромагнитного излучения, которые, в принципе, могут быть измерены при наблюдении случайных искажений пространственно изотропного поля структурой датчика с топологией межцентрового разноса элементов датчика на расстояние l_{\min} . На практике, в соответствии с теоремой Котельникова, условие соблюдения тождества заменяют на условие, определяемое неравенством

$$k_{\max} \leq (2l_k)^{-1} = 2l_{\min}^{-1}.$$

Итак, рассмотрим задачу: как и по какому принципу структурирования топологии наблюдаемого пространства и топологии размещения элементов датчика диагностики произвести размещение элементов многоэлементного датчика – точек контроля пространства наблюдения физического процесса или измерения вариаций волнового фронта электромагнитного поля для адекватного описания и восстановления структуры поля по измеренным параметрам волнового фронта, наблюдаемого двумерным датчиком, изотропного случайного электромагнитного поля излучений.

Примем за l характерный размер наименьших эффективных искажений формы волнового фронта поля электромагнитного излучения, исследуемого с помощью системы регистрации вариаций поля, состоящей из 2^N квадратных элементов размером l^2 . Иерархию принципа и топологии пространственной структуры размещения элементов датчика – средства регистрации, диагностики, контроля и управления физическим экспериментом – выберем из класса произвольных иерархий. В основу структуры датчика, а значит и системы контроля, положим дифференциальный принцип измерения. Тогда и рассматриваемую топологию структурного размещения элементов диагностики можно будет назвать дифференциальной топологией системы регистрации физического эксперимента.

Из класса произвольных иерархий примем степенной принцип парного размещения дифференциальных элементов двумерного датчика. Суть его следующая. Сначала в центральной области наблюдаемого пространства размещается с разнесением на расстояние, равное Δl друг от друга (где Δ – некоторый произвольно выбранный коэффициент пропорциональности), первая пара элементов дифференциального датчика. Пара элементов произвольно ориентирована в произвольном направлении в плоскости контроля. Все последующие дифференциальные пары элементов, также произвольно ориентированные, размещаются на расстояниях, кратном $\Delta^i l$ друг от друга, до заполнения всей геометрии границ поля наблюдения. Эффективный размер двумерного поля наблюдаемого датчиком (и системой регистрации) пространства развития физического явления составит $\Delta^N l$.

Параметр Δ при этом будет определять степень плотности упаковки пространства наблюдения, то есть отражать плотность упаковки пространства наблюдения физического явления как плотноупакованной структуры пространства наблюдения физического эксперимента.

Установление на основе какого-либо критерия эффективности или целевой функции максимально возможного значения параметра Δ позволит датчику и в целом системе регистрации и контроля обеспечить с выбранным числом элементов максимальное разрешение степени искажений при измерениях и оценках состояния волнового фронта электромагнитного излучения.

Если при анализе и синтезе топологии размещения элементов контроля принять [1–4] за основу фрактальный подход Мандельброта, то такой принцип иерархической топологии (мы назвали её дифференциально-степенной) размещения элементов контроля на двумерном поле плоскости на-

блюдения и регистрации произвольного стохастического процесса или явления в пространстве наблюдения можно отождествить с топологией фрактального множества размерности

$$d_0 = \frac{\lg 2}{\lg \Delta}.$$

Тогда закономерность изменения дисперсии σ^2 (квадрата среднеквадратического отклонения σ) как мощности стохастических флуктуаций наблюдаемого и измеряемого процесса искажений волнового фронта электромагнитного излучения можно представить в виде степенной функции

$$\sigma^2 = (\Delta^n l / l)^\alpha = \Delta^{n\alpha},$$

где $\Delta^n l$ – расстояние разноса пар дифференциальных элементов датчика для n -й ступени степенной топологии размещения элементов.

Условие эффективной работоспособности дифференциально-степенного метода построения топологии размещения элементов датчика контроля пространства физического эксперимента может быть представлено в виде

$$\frac{k_p}{N+1} > (\Delta^{\alpha-1} / 2)^n.$$

Здесь $k_p > 1$ – произвольно выбранный для оптимизации коэффициент; $n = 1, \dots, N + 1$.

Анализ показывает, что приведённое выше неравенство будет выполняться для всей числовой последовательности n при

$$\Delta = 2^{-(\alpha-1)}.$$

Оценка сравнительной эффективности градиентного метода. На основе привлечения основ теорий случайных процессов и оптимальных статистических решений автором были проведены численный анализ и вычислительные процедуры аналитического сравнения значений погрешности определения координат состояния наблюдаемого объекта при сохранении постоянства («замороженности» условий сравнения) времени наблюдения как метрологической меры оценки эффективности различных способов и методов покрытия. Последующий сопоставительный анализ полученных таким образом результатов показал, что при оценке параметров состояния кластерного пространства наибольшим быстродействием покрытия пространства наблюдения с одновременной реализацией процедуры измерения координат и оценки параметров состояния искомого объекта, обнаруживаемого по определённым признакам отличия, обладает градиентный метод наблюдения.

Сравнение принципов формирования градиентного сигнала

Метод оценки градиента	Полного дифференциала	Векторно-фазовый	Последовательного временного сравнения	
			Попарного	Последовательного
Тип алгоритма	Мгновенного покрытия	Перебора квадрантов	Попарного	Последовательного
Погрешность оценки, отн. ед.	1	~ 1,562	~ 1,136	~ 3,448

Из результата сравнения эффективности (по точности – величине погрешности определения координат состояния параметров наблюдаемого кластера) использования различных методов для получения градиентной оценки координат состояния объекта в пространстве наблюдения видно, что весьма заметную роль в обеспечении наивысшего значения показателя эффективности применяемых методов и принципов покрытия пространства с одновременной идентификацией искомого объекта и достижения наибольшей точности оценки параметров состояния искомого (сосредоточенного энергетического кластера) объекта в пространстве наблюдения играют выбор алгоритма (порядок проведения процедуры анализа отдельных элементов или их симбиоза) покрытия и порядок перебора, а также способа выделения градиента состояния – рассогласования состояний на анализируемых смежных тактовых (временных или пространственных) интервалах оценки координат состояния и динамики параметров пространства и объекта в нём.

Отличительной особенностью начального этапа функционирования градиентной следящей системы – анализа состояния многомерного пространства наблюдения, особенно на этапах обнаружения, опознавания и идентификации искомого класса объектов, является необходимость обеспечения

возможности осуществления процедуры последовательного анализа (процедуры Вальда) областей пространства, «подозрительных» с точки зрения наличия или отсутствия объекта (кластера) искомого класса с признаками, присущими этому классу объектов (кластеров). Необходимость обеспечения проведения такой процедуры особенно важно в условиях воздействия достаточно высокого уровня помех и шума на наблюдаемое пространство и при малом статистическом расстоянии различия между отдельными классами искомого кластера (объектов) и близости уровней их ранжирования. Тогда процедура анализа и оценки класса кластера по методике Вальда (или Вальда–Вольфовица) помогает при идентификации близких классов распознаваемых кластеров (объектов) существенно уменьшить расстояние между уровнями ранжирования смежных классов в диапазоне кластерного стратифицированного разбиения.

Кроме того, в повышении помехоустойчивости градиентных следящих систем, особенно при их применении в астрономической, астрофизической, лазерном иницировании термоядерных реакций, то есть в областях экспериментальной физики, которым присущ весьма высокий уровень помех, процедура Вальда практически незаменима. Это обусловлено тем, что этим методом можно сохранить координаты состояния процесса или пространства наблюдения на время, превышающее время действия помехи, с учётом динамики изменения траектории процесса или объекта в виде экстраполяции координат на время действия помехи или на время исчезновения сигнала в шумах и в помехе – эффект «пропадания» сигнала от наблюдаемого объекта.

Заключение. Таким образом, результаты решения задачи оптимизации топологии размещения элементов градиентной следящей системы и сопоставительного анализа эффективности градиентного принципа определения координат состояний стохастической траектории случайных смещений приводят к следующим выводам.

Методу оптимальной топологии покрытия пространства наблюдения физического эксперимента, основанному на использовании принципа произвольного размещения чувствительных элементов многоэлементной системы диагностики состояния многомерного случайного поля физического явления, в частности, для метрологии пространственно-временных параметров развития и аннигиляции оптического пробоя и плазменного очага, свойственна аналитически определяемая, двои́чно кратная закономерность изменения значений оптимальной фрактальной размерности структуры пространственной топологии размещения элементов, а именно: $\Delta = 2^{-(\alpha-1)}$.

Сопоставительный анализ, проведённый в настоящей работе, показал, что при оценке параметров состояния кластерного пространства наблюдения физического эксперимента наибольшим быстрым действием покрытия пространства наблюдения с одновременной реализацией процедуры измерения координат и оценки параметров состояния искомого, обнаруженного по определённым признакам отличия физического экспериментального явления – объекта в наблюдаемом пространстве, обладает градиентный метод наблюдения.

В условиях воздействия высокого уровня помех и шума на наблюдаемое пространство физического эксперимента и при малой величине статистического расстояния различия между отдельными классами искомого кластера (объектов) и близости уровней их ранжирования процедура анализа и оценки класса кластера по методике Вальда (или Вальда–Вольфовица) помогает при идентификации близких классов распознаваемых кластеров (объектов) существенно уменьшить расстояние между уровнями ранжирования смежных классов в диапазоне кластерного стратифицированного разбиения и повысить помехоустойчивость градиентных следящих систем при метрологии траекторий случайных изменений координат состояния объекта, явления или выбранных для идентификации параметров протекания физических явлений и процессов в области экспериментальной физики.

Литература

1. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. – New-York, 1982. – 465 p.
2. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: РХД, 2001. – 528 с.
3. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
4. Оптические телескопы будущего / под ред. Ф. Пачини, В. Рихтера, Р. Вильсона; пер. с англ. под ред. П.В. Щеглова. – М.: Мир, 1981. – 432 с.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 487 с.

6. Медынский М.М. Численные методы нелинейной оптимизации: алгоритмы и программы / М.М. Медынский, Е.А. Антоний. – М.: МАИ, 2003. – 192 с.
7. Тисленко В.И. Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособие. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 153 с.
8. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2005. – 604 с.
9. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирна. – М.: Радио и связь, 1989. – 439 с.
10. Деева В.С. Метод покрытия пространства контроля физического эксперимента // Современные техника и технологии (СТТ–2011): тр. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Томск: НИ ТПУ, 2011. – С. 220–221.

Деева Вера Степановна

Аспирантка Энергетического института
Национального исследовательского Томского политехнического университета.
Тел.: +7-953-912-30-62
Эл. почта: veradee@mail.ru

Deeva V.S.

A cluster of space surveillance covering method

We present the results of solving the problem of optimal topology of the space surveillance coverage of cluster physics experiment by arbitrary placement of elements of the gradient tracking system and comparative analysis evaluating the effectiveness of the gradient of the principle of determining the coordinates of the stochastic trajectories states of observed object random displacements as a local phenomenon or a physical process.

Keywords: space, topology, cluster, covering method, gradient system.
