

И. В. Апанасович, д-р физ.-мат. наук, С. В. Пальцев
(Белорусский государственный университет, Минск)

Моделирование и сравнительный анализ эффективности функционирования корреляторов потоков сигналов

Рассмотрены основные методы и средства корреляционного анализа потоков сигналов. Дана схема классификации систем определения корреляционной функции (корреляторов), в основе которой лежит различие в процедурах регистрации и методах обработки сигналов. Созданы имитационные модели интервальных и канальных корреляторов. Проведены вычислительные эксперименты с моделями, в результате которых получены зависимости точности восстановления корреляционной функции от интервала моделирования для различных типов корреляторов.

Розглянуто основні методи та засоби кореляційного аналізу потоків сигналів. Дано схему класифікації систем визначення кореляційної функції (кореляторів), в основі якої лежить відмінність в процедурах реєстрації та методах обробки сигналів. Створено імітаційні моделі інтервальних та канальних кореляторів. Проведено обчислювальні експерименти із моделями, в результаті яких отримано залежності точності відтворення кореляційної функції від інтервалу моделювання для різних типів кореляторів.

Ключевые слова: случайный поток сигналов, корреляционный анализ потоков, корреляторы.

При проведении различных физико-технических экспериментов часто приходится оперировать со случайными потоками событий, которые с помощью различных механизмов преобразования трансформируются в электрические потоки сигналов. Моменты наступления событий (появление электрических импульсов) несут в себе информацию об исследуемых процессах. Для получения этой информации создаются измерительно-вычислительные системы временного анализа случайных потоков. Наибольшее распространение получили системы, предназначенные для нахождения распределения числа событий на заданном интервале анализа и определения интенсивности исследуемого потока [1]. В настоящее время значительное внимание уделяется системам корреляционного анализа (корреляторам), позволяющим определять корреляционную функцию случайного потока событий [2].

Корреляторы являются одним из основных инструментов при проведении экспериментов по исследованию процессов диффузии броуновских объектов, изучению рассеяния света в веществе, при оценивании характеристик источников излучения, при анализе слабых световых потоков, в лазерно-локационном зондировании. По корреляционным функциям можно найти концентрацию частиц и спектр их размеров, подвижность бак-

терий в среде (скорость плавления в растворе), кинетику химических реакций, характеристики диффузии различных объектов в растворах и биологических мембранах.

Существующее многообразие систем и способов обработки информации порождает необходимость формализации описания принципов определения корреляционной функции. Несмотря на широкое распространение корреляторов, их удовлетворительной классификации и сравнительному анализу эффективности работы до сих пор не было уделено должного внимания. Цель статьи — попытка в некоторой степени восполнить этот пробел.

Рассматривая существующие практические схемы корреляционного анализа, будем проводить их классификацию по процедурам регистрации и методам обработки сигналов. Выбор классификации определяется используемым подходом для нахождения корреляционной функции случайного потока. Проведенный анализ показал, что целесообразно выделить две группы корреляторов.

К первой группе относятся приборы, основанные на подсчете числа событий в каналах, — канальные корреляторы. Эту группу, в свою очередь, можно разделить на две: параллельные многоканальные корреляторы, позволяющие получать корреляционную функцию в реальном времени; последовательные корреляторы, в которых вначале происходит регистрация и накопление данных, а затем, после завершения эксперимента, их обработка.

Ко второй группе относятся приборы, основанные на измерении интервалов между событиями, — интервальные корреляторы.

Опишем с единых позиций процессы обработки информации для получения корреляционных функций в различных типах корреляторов.

Пусть ζ_1, \dots, ζ_n — моменты наступления событий случайного потока на интервале наблюдения $\Omega = [T_0, T]$; $\nu(\Omega)$ — число событий в реализации потока на Ω . Для описания потока воспользуемся плотностями $\pi_i(t_1, \dots, t_i; \Omega)$, $i=0, 1, \dots$, вероятностный смысл которых заключается в следующем [1]:

$$\pi_i(t_1, \dots, t_i; \Omega) dt_1 \dots dt_i = P\{\zeta_1 \in [t_1, t_1 + dt_1), \dots, \zeta_i \in [t_i, t_i + dt_i); \nu(\Omega) = i\}. \quad (1)$$

Формальное соотношение между корреляционной функцией потока $f_2(t_1, t_2)$ и системой плотностей $\pi_i(t_1, \dots, t_i; \Omega)$ имеет вид [3]

$$f_2(t_1, t_2) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \int_{\Omega} \pi_{i+2}(t_1, t_2, \tau_1, \dots, \tau_i) d\tau_1 \dots d\tau_i. \quad (2)$$

Из (2) с учетом (1) получим

$$f_2(t_1, t_2) = \lim_{\Delta t_1, \Delta t_2 \rightarrow 0} \frac{\langle v(t_1, t_1 + \Delta t_1) v(t_2, t_2 + \Delta t_2) \rangle}{\Delta t_1 \Delta t_2}, \quad t_1 \neq t_2,$$

$$= \lim_{\Delta t_1 \rightarrow 0} \frac{\langle v(t_1, t_1 + \Delta t_1) \{v(t_1, t_1 + \Delta t_1) - 1\} \rangle}{(\Delta t_1)^2}, \quad t_1 = t_2. \quad (3)$$

На практике часто требуется определить нормированную корреляционную функцию

$$g_2(t_1, t_2) = \frac{f_2(t_1, t_2)}{f_1(t_1) f_1(t_2)}, \quad (4)$$

где $f_1(t)$ — интенсивность потока

$$f_1(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\langle v(t, t + \Delta t) \rangle}{\Delta t}. \quad (5)$$

Обозначим $n^k(t, t + \Delta t)$ число событий, попавших в интервал $(t, t + \Delta t)$ в k -й реализации потока, $k = 1, \dots, M$. Тогда из (3) — (5) следуют выражения для оценки корреляционных функций канальными корреляторами

$$\hat{f}_2(t_1, t_2) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{n^k(t_1, t_1 + \Delta t_1) n^k(t_2, t_2 + \Delta t_2)}{\Delta t_1 \Delta t_2}, \quad t_1 \neq t_2,$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{n^k(t_1, t_1 + \Delta t_1) \{n^k(t_1, t_1 + \Delta t_1) - 1\}}{(\Delta t_1)^2}, \quad t_1 = t_2, \quad (6)$$

$$\hat{g}_2(t_1, t_2) = \frac{\hat{f}_2(t_1, t_2)}{\hat{f}_1(t_1) \hat{f}_1(t_2)}, \quad (7)$$

$$\hat{f}_1(t) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{n^k(t, t + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (8)$$

В подавляющем большинстве случаев системы корреляционного анализа работают со стационарными эргодическими случайными потоками. В такой ситуации искомые оценки можно получить исходя из одной реализации потока событий. Пусть $\Omega = [0, T]$, $\Delta t = T/m$. Тогда по аналогии с (6) — (8) получим

$$\hat{f}_2(i\Delta t) = \frac{1}{m-i} \sum_{j=i}^{m-1} n_j n_{j+i} / (\Delta t)^2, \quad i \neq 0; \quad (9)$$

$$\hat{f}_2(0) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m n_j (n_j - 1) / (\Delta t)^2, \quad (10)$$

$$\hat{g}_2(i\Delta t) = \hat{f}_2(i\Delta t) / \hat{f}_1^2, \quad i = 0, \dots, m-1; \quad (11)$$

$$\hat{f}_1 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m n_j / \Delta t, \quad (12)$$

где $n_k = n((k-1)\Delta t, k\Delta t)$.

Другой класс приборов — интервальные корреляторы — основан на следующем подходе к получению выражения для оценки корреляционной функции. Представим функцию $f_2(\tau)$ в виде

$$f_2(\tau) = f_1 f_{||1}(\tau|0), \quad (13)$$

где $f_{||1}(\tau|0)$ — интенсивность анализируемого потока в точке τ при условии, что в начальный момент времени наступило событие. Как и в предыдущем случае, рассмотрим возможность нахождения оценки $\hat{f}_2(i\Delta t)$ исходя из одной реализации потока. Пусть t_1, \dots, t_k — реализация потока событий на Ω . Тогда

$$f_1 = k/T,$$

$$\hat{f}_{||1}(i\Delta t) = \frac{\frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \sum_{m=j+1}^k A(t_j, t_m, i\Delta t)}{\Delta t}, \quad (14)$$

$$A(t_j, t_m, i\Delta t) = \begin{cases} 1, & i\Delta t \leq t_m - t_j \leq (i+1)\Delta t, \\ 0, & t_m - t_j \notin [i\Delta t, (i+1)\Delta t), \end{cases}$$

$$s = \max\{i | t_j \leq T - i\Delta t\}.$$

Существующие аппаратные корреляторы обладают большим быстродействием, позволяющим вычислять корреляционную функцию в реальном времени. Однако такие корреляторы наряду с высокой эффективностью имеют значительную стоимость и, как правило, характеризуются недостаточной гибкостью в отношении взаимодействия с пользователем. Поэтому в настоящее время интенсивно проводятся разработки корреляторов, основанных на использовании персональных компьютеров. Эти системы работают на более низких частотах, обладают меньшей эффективностью, но требуют для постройки значительно меньше затрат и гораздо легче перестраиваемы. Их эффективность в значительной мере повышается, если используется дополнительное параллельное вычислительное оборудование.

Рассмотрим возможность создания и получения оценки эффективности системы корреляционного анализа на основе обычного персонального компьютера типа IBM PC AT, который является наиболее доступным вычислительным средством.

Необходимо отметить, что существующие полные аналитического анализа эффективности корреляторов [4, 5] приводят к громоздким и

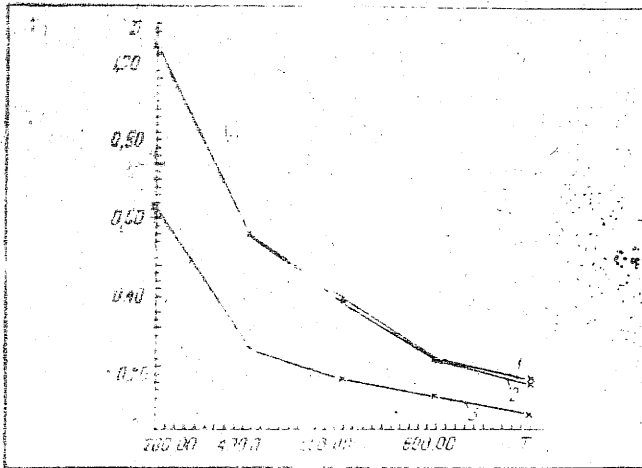


Рис. 1. Зависимость выборочной дисперсии D от интервала моделирования для параллельного канального (1), последовательного (2) и интервального (3) корреляторов.

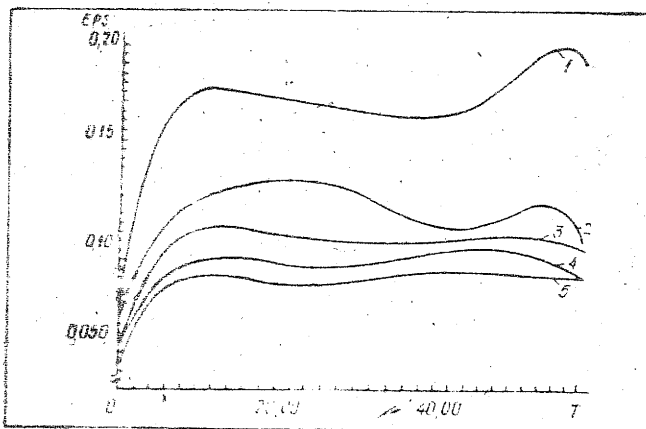


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки от величины задержки для интервального коррелятора при $T=200$ (1), $T=400$ (2), $T=600$ (3), $T=800$ (4), $T=1000$ (5).

сложным результатам, практическое применение которых сопровождается значительными трудностями. Используемое нами имитационное моделирование позволяет без привлечения натуральных экспериментов получать достоверные оценки оптимальных значений параметров как всей анализируемой системы в целом, так и отдельных ее подсистем, реализующих процедуры регистрации, накопления и обработки измерительной информации.

Для сравнительной оценки эффективности различных методов определения корреляционной функции потоков сигналов разработаны реализующие их вычислительные алгоритмы и создан программный комплекс имитационного моделирования корреляторов, который позволяет исследовать интервальные и канальные корреляторы. Программный комплекс состоит из блоков управления, генерации, корреляторов и обработки. Блок управления координирует работу комплекса в целом. В начале работы он настраивает

модель на исследуемую конфигурацию. При настройке указываются тип и параметры входных воздействий и конкретные характеристики корреляторов. Блок генерации служит для моделирования входных воздействий, в качестве которых использовались парнокоррелированный поток и поток Кокса. В блоке корреляторов моделируется процесс регистрации и вычисления корреляционной функции в соответствии с выбранным типом коррелятора. Блок обработки организует накопление и обработку информации, в результате чего строится набор графиков, отражающих точность вычисления корреляционных функций.

При тестировании алгоритмов определения корреляционной функции использовались реализации потока сигналов, полученные с помощью созданных программных генераторов парнокоррелированного потока. Рассмотрен специальный алгоритм и разработан генератор моделирования стационарного потока Кокса с невозрастающей корреляционной функцией. Суть этого алгоритма заключается в случайном прореживании событий исходного стационарного потока Пуассона. Вероятность прореживания является случайным процессом, реализации которого представляют собой кусочно-постоянные функции, принимающие значения из интервала $[0, 1]$.

Существует возможность эксплуатации комплекса в режиме обработки данных реального эксперимента. В этом случае для определения корреляционной функции программа использует информацию из файла накопленных данных, сформированного по результатам эксперимента.

Для анализа корректности и эффективности работы программных моделей систем корреляционного анализа потоков событий проведены вычислительные эксперименты, в результате которых получены зависимости точности восстановления корреляционной функции от интервала моделирования для различных типов корреляторов.

Оценка выполнялась следующим способом. Зафиксировав интервал моделирования T , проводилось M экспериментов (прогонов) по моделированию корреляционной функции на интервале $[0, T]$. Для каждого прогноза определялась поканальная оценка $f_2^j(i\Delta t)$, $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, M$. Затем определялись значения выборочной дисперсии оценки корреляционной функции в каждом канале

$$S(i\Delta t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [f_2^j(i\Delta t)]^2 - \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M f_2^j(i\Delta t) \right]^2$$

и выполнялось ее усреднение по всему интервалу моделирования

$$D = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S(i\Delta t).$$

При исследовании флуктуаций в рассеянном свете часто используется относительная ошибка [6, 7]

$$EPS(i\Delta t) = \left[\frac{S(i\Delta t)}{f_2^2(i\Delta t)} \right]^{1/2}$$

На рис. 1, 2 изображены графики, полученные в результате экспериментов, поставленных по описанной методике, для случая $g(\tau) = 4\exp(-6\tau)$. Время задано в относительных единицах. Как видим, оценка корреляционной функции, полученной с помощью интервального коррелятора, обладает наименьшей дисперсией по сравнению с канальными.

Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы об эффективности работы моделей корреляторов случайных потоков. Интервальный коррелятор оказался наиболее эффективным по всем оцениваемым параметрам. Последовательный канальный коррелятор сопоставим по скорости с интервальным, но точность определения корреляционной функции несколько ниже, чем у интервального. Параллельный канальный коррелятор обладает точностью, сопоставимой с последовательным канальным коррелятором, но время вычисления наибольшее по сравнению с остальными корреляторами. Сравнительно невысокое быстродействие объясняется тем, что его алгоритм реализации наиболее эффективен на параллельных ЭВМ или специальных ЭВМ, обладающих оборудованием, которое позволяет проводить параллельную обработку.

Main methods and means for correlation analysis of the signal flows are considered. A scheme for classification of systems for determination of a correlation function (correlators) underlain by a difference in the registration procedures and methods for signal processing is given. Simulation models of interval and channel correlators are created. Computer experiments with the models are carried out, that have resulted in obtaining dependences of accuracy of the recovery of the correlation function on the simulation interval for different types of correlations.

УДК 62-503.56

Ю. А. Меркурьев, канд. техн. наук, В. Л. Высыпков
(Рижский технический университет, Латвия)

Алгоритм двухэтапной оптимизации имитационных моделей

Дан обзор наиболее часто используемых методов оптимизации имитационных моделей. Рассмотрен двухэтапный алгоритм оптимизации таких моделей, позволяющий снизить трудоемкость процедуры оптимизации.

Дано огляд методів оптимізації імітаційних моделей, що найбільш часто використовуються. Розглянуто двоетап-

© Ю. А. МЕРКУРЬЕВ, В. Л. ВЫСЫПКОВ, 1994.

ISSN 0204-3572. Электрон. моделирование. 1994. Т. 16. № 1.

1. Апанасович В. В., Коляда А. А., Чернявский А. Ф. Статистический анализ случайных потоков в физическом эксперименте.— Минск: Университетское, 1988.— 256 с.
2. Photon correlation techniques in fluid mechanics / ed. Schulz-DuBois E.— Berlin: Springer, 1983.— 399 p.
3. Большаков И. А. Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума.— М.: Сов. радио, 1969.— 464 с.
4. Saleh B., Cardoso M. The effect of channel correlation on the accuracy of photon counting digital autocorrelators // J. Phys. A: Math., Nucl. Gen.— 1973.— 6.— P. 1897—1909.
5. Schatzel K. Noise on photon correlation data: 1. Autocorrelation functions // Quantum Opt.— 1990.— N 2.— P. 287—305.
6. Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов / Под ред. Г. Камминса и Э. Пайка.— М.: Мир, 1978.— 584 с.
7. Murthy N. S., Choudhary D. M. Low-cost microprocessor-based photon correlator // Rev. Sci. Instrum.— 1983.— 54, N 4.— P. 476—479.

Поступила 10.07.92.

АПАНАСОВИЧ Владимир Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры информатики Белорусского государственного университета (Минск), который окончил в 1973 году. Область научных исследований: компьютерное моделирование стохастических систем, анализ потоков событий.



ПАЛЬЦЕВ Сергей Владимирович, аспирант кафедры информатики Белорусского государственного университета, который окончил в 1989 г. Область научных исследований: методы и системы корреляционного анализа случайных потоков, статистическая обработка данных.



ний алгоритм оптимізації таких моделей, який дозволяє знизити трудомісткість процедури оптимізації.

Ключевые слова: оптимизация имитационных моделей, методы оптимизации, двухэтапная оптимизация.

Важной задачей, решаемой с помощью имитационного моделирования, является задача оптимизации сложных объектов [1]. Исследователь оптимизирует параметры имитационной модели и тем самым находит оптимальные значения соответствующих параметров объекта моделирования, при которых поведение этого объекта является наилучшим в заданном смысле. Таким об-