

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ В КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Д.В. Моисеев, О.Д. Чужикова-Проскурнина, Н.Е. Сапожников¹

ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет"

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: dmitriy.moiseev@mail.ru, tagj@ya.ru

¹ ФГКВОУ ВО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова» РФ, г. Севастополь, ул. Дыбенко, д. 1а.

E-mail: sapogne@mail.ru

В работе рассматривается принципиальная возможность применения вероятностной формы представления информации для создания корреляционно-экстремальных систем обладающих малым аппаратным объемом.

Ключевые слова: вероятностная форма представления информации, корреляционно-экстремальные системы, коэффициент корреляции, аппаратный объем.

Введение. Стремительное развитие информационных технологий позволило существенно расширить использование методов мониторинга с помощью автономных мобильных носителей. Системы дистанционного мониторинга, размещённые на борту космических аппаратов, позволяют проводить глобальный экологический и климатический мониторинг, исследования природных ресурсов, оценку последствий природных и техногенных катастроф и т.д. [1]. Аппаратура мониторинга, установленная на низколетящих и подвижных наземных носителях, позволяет решать аналогичные задачи в региональных и локальных масштабах [2]. Наличие на борту носителя аппаратуры наблюдения, а также систем, обеспечивающих оптимальные условия получения видеинформации, позволяет ввести в контур управления систему обработки и анализа изображения для получения дополнительной информации, необходимой для навигации и наведения носителя на район наблюдения [3].

В работе рассматриваются принципы построения и структура корреляционно-экстремальной системы (КЭС), предназначеннной для использования в контуре управления подвижных носителей средств дистанционного мониторинга.

Используемые алгоритмы требуют вычисления в реальном масштабе времени взаимокорреляционных моментов, что предполагает выполнение в борт-

вом процессоре множества групповых операций умножения и сложения.

Одним из возможных путей решения указанной задачи является представление дискретного сигнала в вероятностной форме, что, кроме уменьшения аппаратного объема и повышения скорости обработки, позволит добиться повышения надёжности функционирования бортовой системы управления и криптостойкости обрабатываемой дискретной информации [4 – 9].

Постановка задачи. В существующих КЭС основными математическими операциями являются:

- вычисление взаимного корреляционного момента реализации одного из физических полей с эталонными функциями в памяти;

- определение эталонной функции, для которой вычисленное значение корреляционного момента является максимальным.

Первая из вышеуказанных задач решается путём вычисления бортовой специализированной системой обработки информации оценки корреляционного момента, который в общем случае, для дискретных случайных величин ξ и η с возможными значениями x_i и z_j определяется в соответствии с выражением:

$$K_{\xi\eta} = \sum_i \sum_j (x_i - M[\xi])(z_j - M[\eta]) p_{ij},$$

где p_{ij} – вероятность того, что (ξ, η) примут значения (x_i, z_j) .

Корреляционный момент характеризует рассеивание случайных величин ξ и η и их взаимозависимость. Оценка коэффициента корреляции, количественно характеризующая величину корреляционного момента:

$$\overline{\rho_{\xi\eta}} = K_{\xi\eta} / (\sigma_x \sigma_z),$$

где σ_x и σ_z – среднеквадратические отклонения величин ξ и η , вычисляются с помощью выражения

$$K_{\xi\eta} = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} x_i z_i - \frac{1}{(N-\tau)^2} \sum_{i=1}^{N-\tau} x_i \sum_{j=1}^{N-\tau} z_j, \\ \sqrt{D[x_i] D[z_j]},$$

где N – объём выборок эталонной и фактической реализациями, а D – дисперсии

$$D[x_i] = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} x_i^2 - \frac{1}{(N-\tau)^2} \left(\sum_{i=1}^{N-\tau} x_i \right)^2$$

и

$$D[z_i] = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} z_i^2 - \frac{1}{(N-\tau)^2} \left(\sum_{i=1}^{N-\tau} z_i \right)^2.$$

При вычислениях предварительно целесообразно определить суммы:

$$\sum_i x_i, \sum_i x_{i+1}, \sum_i x_i x_{i+\tau}, \sum_i x_i^2, \sum_i x_{i+\tau}^2.$$

С учётом вышеприведённого, выражение для экспериментального определения оценки коэффициента корреляции примет вид

$$r_{\xi\eta}^* = \frac{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})(z_k - \bar{z})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^N (z_k - \bar{z})^2}} =$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^N x_k z_k - N \bar{x} \bar{z}}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^N x_k^2 - N \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{k=1}^N z_k^2 - N \bar{z}^2 \right)}},$$

при котором требуются минимальные затраты памяти на обработку результатов. Получаемый при этом выборочный коэффициент корреляции $|r_{\xi\eta}^*| \leq 1$. При сделанных предположениях $|r_{\xi\eta}| = 0$ свидетельствует о взаимной независимости случайных переменных ξ и η . При $|r_{\xi\eta}| = 1$ случайные переменные ξ и η линейно зависят друг от друга, причем если $r_{\xi\eta} > 0$, то говорят о положительной корреляции, то есть большие значения одной случайной величины соответствуют большим значениям другой. Случай $0 < r_{\xi\eta} < 1$ соответствует либо наличию линейной корреляции с рассеянием, либо наличию нелинейной корреляции.

Указанное вычисление коэффициента корреляции выполняется L раз, где L – количество эталонных функций.

Следующий этап – определение, какой из них соответствует максимальное значение $r_{\xi\eta}$.

Решение поставленной задачи. При однолинейном однополярном вероятностном преобразовании входного измеряемого сигнала $X_1(t)$ и представленной в аналогичном виде эталонной функции $X_2(t)$ для вычисления взаимокорреляционной функции $K(t_{X_1}; t_{X_2})$ необходимо предварительно преобразовать исходные сигналы в вероятностные отображения, то есть получить вероятностное отображение второго порядка [6 – 9]

$$Y^{(1)}(t) = \{y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_i^{(1)}, \dots, y_N^{(1)}\};$$

$$Y^{(2)}(t) = \{y_1^{(2)}, y_2^{(2)}, \dots, y_i^{(2)}, \dots, y_N^{(2)}\}.$$

В этом случае:

$$P\{[r_i^{(1)} \leq x_i^{(1)}] [r_{i+q}^{(2)} \leq x_{i+q}^{(2)}]\} = \\ = x_i^{(1)} x_{i+q}^{(2)}$$

и

$$M[x_i^{(1)} \cdot x_{i+q}^{(2)}] \equiv \frac{1}{N-q} \sum_{i=1}^{N-q} y_i^{(1)} \cdot y_{i+q}^{(2)},$$

откуда получено выражение для оценки взаимокорреляционной функции

$$[K(t_{X_1}; t_{X_2})] = \frac{1}{(N-q)K} \sum_{i=1}^{N-q} \sum_{j=1}^K y_j^{(1)} \times \\ \times y_{(i+q)j}^{(2)} - \frac{1}{N \cdot K} \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K y_j^{(1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K y_j^{(2)} \right]$$

В соответствии с последним выражением вероятностные корреляционные измерители можно условно разделить на три типа. К первому из них относятся *знаковые вероятностные коррелометры*, в которых вероятностное преобразование входных сигналов путём однократного сравнения значений x_i и x_{i+q} со значениями вспомогательных случайных равномерно распределённых сигналов r_i и r_{i+q} осуществляется перед задержкой одного из входных сигналов относительно другого.

Такие вероятностные процессоры могут с достаточной точностью измерять взаимокорреляционные функции случайных сигналов, которые характеризуются высокой степенью стационарности для сравнительно больших длин реализаций с объёмом выборки $N \geq 10^3$ [7]. Это ограничение связано с тем, что вклад погрешности вероятностного преобразования в полную погрешность измерения корреляционной функции при однократном сравнении значения измеряемого сигнала с вспомогательным случайнм шумом становится сопоставим с погрешностью, обусловленной конечным объёмом выборки измеряемого сигнала $X(t)$ при $N \geq 10^3$. Основное преимущество таких процессоров перед цифровыми коррелометрами, построенными по классическому методу задержки и перемноже-

ния, заключается в том, что при минимальных затратах оборудования они позволяют в реальном масштабе времени измерять корреляционные функции случайных процессов, верхняя граничная частота спектра которых равняется

$$F_B = \frac{f_B}{2 \div 10},$$

где f_B – тактовая частота работы процессора, а число, стоящее в знаменателе, зависит от требуемой степени дискретизации измеряемых сигналов.

Структурно-функциональная схема знакового вероятностного коррелометра приведена на рис. 1. Исследуемые сигналы $X_1(t)$ и $X_2(t)$ подаются на первые входы аналоговых схем сравнения, входящих в состав преобразователей «аналог-вероятность». На вторые входы схем сравнения поступают вспомогательные, случайные, равномерно распределенные в интервале изменения по амплитуде измеряемых сигналов, сигналы в виде случайных напряжений $R_1(t)$ и $R_2(t)$ с выхода общего датчика равномерно распределённых случайных сигналов (ДРРСС).

Схемы сравнения реализуют алгоритм вероятностного преобразования. В i -е моменты времени с частотой $f_B/4$ на выходах аналоговых схем сравнения формируются вероятностные отображения входных сигналов в виде y_i . Деление частоты задающего тактового генератора на 4 устраняет корреляцию между значениями вспомогательных сигналов r_i и r_{i+4} , так как для уменьшения погрешности квантования по уровню до допустимой величины разрядность чисел вспомогательных сигналов должна быть не менее четырех. Импульсы с этим же периодом повторения используются для продвижения вероятностных отображений сигнала $X_1(t)$ по регистру сдвига, играющему роль динамического запоминающего устройства (ДЗУ).

В регистре осуществляется задержка вероятностных отображений одного входного сигнала относительно другого на время $4q/f_B$. В начале работы в первый разряд ДЗУ искусственно заносится

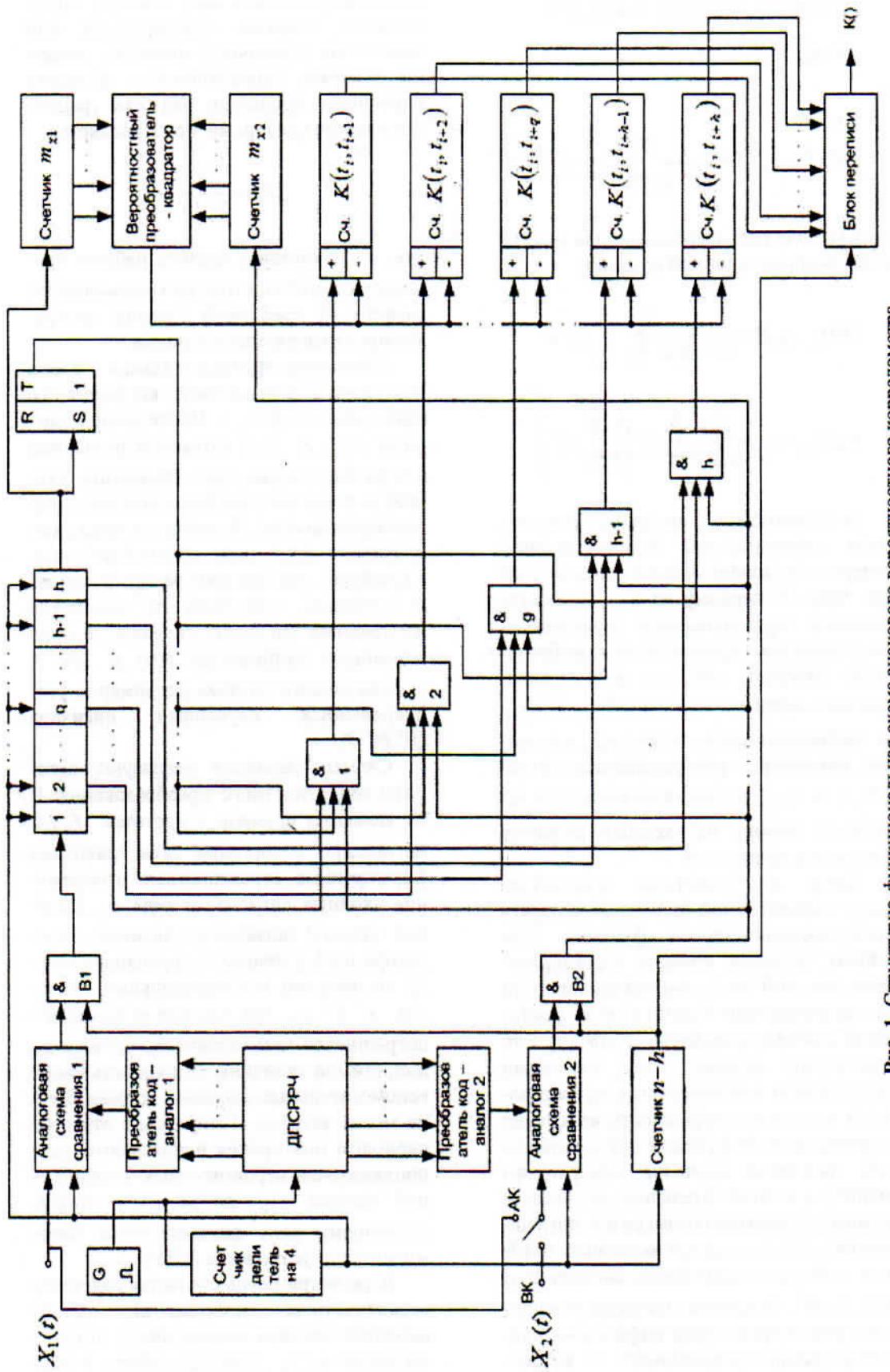


Рис. 1. Структурно-функциональная схема знакового вероятностного коррелометра

"1". При его полном заполнении через время $4h/f_B$ она поступает в h -й разряд ДЗУ, триггер T1 перебрасывается и подает разрешающий потенциал на управляющие входы конъюнкторов 1... h , ко вторым входам которых через вентиль B-2 подключен выход второй аналоговой схемы сравнения, а к первым – выходы разрядов ДЗУ.

Таким образом, i -е значение вероятностного отображения $Y_2(t)$ на конъюнкторе I перемножается с i -м значением вероятностного отображения $Y_1(t)$; на 2-м конъюнкторе с $i-1$ значением $Y_1(t)$ и т.д., и, наконец, на h -м конъюнкторе – с $i-h$ значением $Y_1(t)$.

Задержка между перемножаемыми значениями определяется как отношение номера разряда ДЗУ к частоте поступления импульсов сдвига. Импульсный выход схем совпадения позволяет использовать для суммирования их выходных потоков накопительные счетчики m_{x_1} и

m_{x_2} и реверсивные счетчики $K(t_i t_{i+1}) \dots K(t_i t_{i+h})$. При переполнении счетчика $N-q$ вентили B-1 и B-2 закрываются и информация об ординатах измеряемой корреляционной функции считывается через блок переписи.

Наиболее объемными в аппаратурном отношении в рассмотренной схеме являются счетчики блока интеграторов, поэтому для случая, когда малость аппаратурного объема является решающим фактором, вместо счетчиков может быть использована динамическая память SDRAM.

$$N_{1,2} = q + \frac{t_P^2 \sqrt{m_{x_1}^2 m_{x_2}^2 (1 - m_{x_1} m_{x_2})^2 + 4 D_{x_1} D_{x_2} [2 m_{x_1} m_{x_2} (1 - m_{x_1} m_{x_2}) + D_{x_1} D_{x_2}]}}{\Delta_{K_B}^2}.$$

При удовлетворительных требованиях к точности для случайных сигналов, не обладающих ярко выраженным эксцессом или асимметрией, значение объема выборки не должно быть менее $N \geq 10^3$, что предъявляет повышенные

анализ затрат оборудования в пересчете на количество элементарных логических элементов для схемы на рис. 1. сравнительно с цифровым коррелометром, реализующим метод умножения, даёт выражение для μ_{3BK} :

$$\mu_{3BK} = \frac{360 + 284h}{573 + 100h},$$

где h – количество ординат измеряемой авто либо взаимокорреляционной функции.

Так, при $h=32$ $\mu_{3BK}=3$. С ростом h выигрыш в затратах оборудования еще более возрастает.

Точность измерения взаимокорреляционных характеристик знаковым вероятностным процессором определяется через абсолютную погрешность измерения взаимокорреляционных моментов по формуле

$$\Delta_{K_B} = t_P \sqrt{\frac{m_{x_1} m_{x_2} (1 - m_{x_1} m_{x_2})}{N - q}} + \frac{1,4 U_P \sigma_x^2}{\sqrt{N - (q + 1)}},$$

откуда следует, что основной вклад в величину погрешности вносит погрешность, определяемая объёмом выборки измеряемых сигналов. Для его определения последнее выражение представляется в виде:

требования к степени стационарности измеряемых сигналов [8].

Заключение. Применение вероятностной формы представления данных позволило разработать специализированный вероятностный вычислитель на базе корреляционных экстремальных

систем, способный производить измерения в реальном масштабе времени, обеспечивающий высокое быстродействие, низкое энергопотребление, точность, компактность, имеющий относительно низкую стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования земли [Текст]. М.: «АиБ», 1995. 296 с.
2. Казанцев В.М., Белов В.М., Орлов В.Н. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды [Текст] / под ред. В.Н. Рождествина. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
3. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения [Текст]. Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. 360 с.
4. Сапожников Н.Е., Моисеев Д.В. Выполнение арифметических операций сложения и умножения над вероятностно представленными параллельными данными // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов [Текст]: сб. ст. Барнаул: Изд-во Алт. Ун-та, 2015. С. 46–54.
5. Моисеев Д.В., Сапожников Н.Е., Столлярчук Ю.Ю. Оценка точности и быстродействия при вероятностной форме представления информации // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. Севастополь: СНУЯЕтаП, 2011. Вип. 3 (39). С. 134–140.
6. Моисеев Д.В., Сапожников Н.Е., Скрябина Е.В. Комбинированные процессоры для мониторинговых систем АЭС // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля: наук. журн. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2012. Вип. 8. С. 279–285.
7. Моисеев Д.В., Сапожников Н.Е., Шокин А.Г. Вероятностные вычислительные модели // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. Севастополь: СНУЯЕтаП, 2013. Вип. 1 (45). С. 210–215.
8. Моисеев Д.В., Сапожников Н.Е. Теория и структура генерации псевдослучайных вероятностных отображений измеряемых сигналов // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. Севастополь: СНУЯЕтаП, 2014. Вип. 2 (50). С. 221–228.
9. Моисеев Д.В., Сапожников Н.Е. Бейнер П.С. Оценка точности и быстродействия при вероятностной форме представления информации // Вісник НТУ «ХПІ». Харьков: НТУ «ХПІ», 2013, № 38 (1011). С. 34–39.

APPLICATION OF THE PROBABILISTIC FORM TO PRESENT DATA IN CORRELATION-EXTREME SYSTEMS

D.V. Moiseev, O.D. Chuzhikova-Proskurnina, N.E. Sapozhnikov¹

Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University»
Russian Federation, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

¹Federal State Military Educational Institution of Higher Education "Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named PS Nakhimova", Russian Federation, Sevastopol

In this paper the fundamental possibility of applying probabilistic representation forms of pre-information to create a correlation-extreme systems have a small amount of hardware.

Keywords: Probabilistic presentation of information, correlation-extreme systems, the correlation coefficient, the amount of hardware.