

УДК 629.705:681.3.06

МУЛЬТИПРОЦЕССОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ³

Плужников А.Д., доктор тех. наук, профессор кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, e-mail: pluzhnikov@nntu.nnov.ru;

Потапов Н.Н., научный сотрудник кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, e-mail: nick_potapov@nntu.nnov.ru.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная обработка, навигация, алгоритм, сигнальный процессор, мультипроцессорные системы.

Введение

Для решения задач навигации летательных аппаратов в настоящее время широко применяются автономные системы определения собственных координат [1]. Наиболее точное определение собственных координат обеспечивается обзорно-сравнительными радионавигационными системами, в частности, теми, которые строятся на основе использования двумерных карт местности. В таких системах часто реализуются алгоритмы корреляционно-экстремальной обработки информации о разнообразных физических полях. Цифровые данные об этих полях, представленные в форме двумерного массива, называют двумерными картами местности. В дальнейшем для определенности рассматривается тот характерный случай, когда каждый элемент двумерного массива представляет собой значение высоты рельефа в некоторой точке с заданной парой ее декартовых координат на местности. Корреляционно-экстремальная обработка должна представлять собой сравнение двух карт. Одна из них является эталонной картой. Она составляется заранее в соответствии с полетным заданием и заносится в память системы. Причем определенному значению времени полета должен соответствовать свой вариант эталонной карты. Другую карту называют текущей или измеренной картой местности. Она создается в процессе полета путем обработки данных, получаемых разнообразными измерительными средствами. Так, для получения данных о высотах рельефа (о подстилающей поверхности) могут использоваться, например, радиолокационные средства. При этом данные о рельефе вычисляются в процессе решения геометрических задач на основе использования результатов радиолокационных измерений – измерений наклонных дальностей до участков подстилающей поверхности.

Рассмотрены корреляционные и разностные алгоритмы корреляционно-экстремальной обработки навигационной информации. Определены требуемое время вычислений и надежность оценки координат. Даны рекомендации по выбору алгоритма для решения задач навигации летательного аппарата с многолучевой радиолокационной системой определения высот рельефа местности. Оценены возможности практической реализации такой системы на базе интегрированного модуля с высокопроизводительными сигнальными процессорами.

Сравнение двух упомянутых карт осуществляется посредством вычисления некоторого показателя их близости. В результате должна быть определена зависимость показателя близости от взаимного смещения карт по двум координатам. Тогда координаты глобального экстремума вычисленной зависимости будут определять отклонение реального положения летательного аппарата от расчетного.

Постановка задачи

В качестве основной решаемой задачи нами ставится задача поиска надежного (в смысле обеспечения достаточно высокой надежности определения координат) и практически реализуемого алгоритма корреляционно-экстремальной обработки навигационной информации, извлекаемой бортовым радиолокатором с многолучевой антенной системой при таком обзоре подстилающей поверхности, который осуществляется за счет движения летательного аппарата. Такая задача распадается на следующие две частные задачи.

1. Поиск надежного алгоритма корреляционно-экстремальной обработки с минимальной вычислительной сложностью.

2. Оценка возможностей использования современных отечественных мультипроцессорных аппаратных средств для решения задач корреляционно-экстремальной обработки навигационных данных.

Решение первой частной задачи позволит минимизировать требования к аппаратным средствам, реализующим обработку навигационных данных, сокращая, в частности, массо-габаритные показатели, что весьма важно для применения в бортовой аппаратуре беспилотных летательных аппаратов. Упомянутую вычислительную сложность обычно характеризуют количеством и характером необходимых арифметических операций, что определяет время вычислений. Поэтому необходимое время вычислений будем использовать в качестве

³ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0061 от 12 февраля 2013 года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).



количественной характеристики вычислительной сложности. Отметим также, что минимизация вычислительной сложности делает разумным использование целочисленной арифметики (с фиксированной запятой).

Современные отечественные мультипроцессорные аппаратные средства, упомянутые при формулировке второй частной задачи, считаем целесообразным конкретизировать так, чтобы проанализировать возможности разрабатываемых с нашим участием интегрированных модулей цифровой обработки, обладающих относительной универсальностью.

Наряду со взаимосвязанностью (согласно постановке основной задачи) двух сформулированных частных задач, на наш взгляд, целесообразно отметить и то, что каждая из них имеет также самостоятельное значение.

Математическое описание алгоритмов корреляционно-экстремальной обработки

При вышеперечисленных условиях алгоритмы корреляционно-экстремальной обработки различаются выбором показателя близости. Ниже осуществляется сравнительная оценка следующих алгоритмов [2, 3]:

- классический корреляционный алгоритм (ККА);
- алгоритм минимума абсолютной разности (МАР);
- алгоритм минимума абсолютной разности с вычтенным средним (МАВ);
- алгоритм минимума квадрата разности с вычтенным средним (МКВ).

Последние три алгоритма объединяют общим названием «разностные алгоритмы».

Для формализации перечисленных алгоритмов обозначим через

$$\mathbf{H}_R = \begin{pmatrix} h_R(0, 0) & h_R(0, 1) & \dots & h_R(0, N_{yR} - 1) \\ h_R(1, 0) & h_R(1, 1) & \dots & h_R(1, N_{yR} - 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_R(n_x, 0) & h_R(n_x, 1) & \dots & h_R(n_x, N_{yR} - 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_R(N_{xR} - 1, 0) & h_R(N_{xR} - 1, 1) & \dots & h_R(N_{xR} - 1, N_{yR} - 1) \end{pmatrix} \quad (1)$$

измеренную карту местности, т.е. двумерный массив высот $h_R(n_x, n_y)$ рельефа, найденный, например, с использованием радиолокационных средств. При этом натуральные числа n_x и n_y являются номерами значений двух координат (например, декартовых координат x и y) на местности и могут быть названы дискретными координатами. Согласно (1) массив \mathbf{H}_R имеет размер $N_{xR} \times N_{yR}$, т.е. $n_x = 0, 1, \dots, N_{xR} - 1$ и $n_y = 0, 1, \dots, N_{yR} - 1$.

Аналогичным массивом

$$\mathbf{H}_0 = \begin{pmatrix} h_0(0, 0) & h_0(0, 1) & \dots & h_0(0, N_{y0} - 1) \\ h_0(1, 0) & h_0(1, 1) & \dots & h_0(1, N_{y0} - 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_0(n_x, 0) & h_0(n_x, 1) & \dots & h_0(n_x, N_{y0} - 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_0(N_{x0} - 1, 0) & h_0(N_{x0} - 1, 1) & \dots & h_0(N_{x0} - 1, N_{y0} - 1) \end{pmatrix} \quad (2)$$

размера $N_{x0} \times N_{y0}$ представим эталонную карту местности.

На практике размеры измеренной карты существенно меньше размеров эталонной карты. При этом взаимное смещение карт в процессе корреляционно-экстремальной обработки осуществляется так, что измеренная карта не выходит за пределы эталонной карты. Кроме того, для определенности и упрощения анализа сделаем следующее допущение: в том случае, когда отсутствует отклонение реального положения летательного аппарата от расчетного, элемент $h_R(0, 0)$ измеренной карты и элемент $h_0(0, 0)$ эталонной карты являются значениями высоты рельефа одной и той же точки реальной местности. Последнее допущение не всегда обеспечивается на практике, однако не способно привести к ошибочным результатам решения задачи сравнительной оценки рассматриваемых алгоритмов.

Определяя показатель близости $C(n_{sx}, n_{sy})$ для случая ККА в соответствии с [4], при сделанных допущениях сможем записать:

$$C(n_{sx}, n_{sy}) = \frac{1}{N_{xR} N_{yR}} \sum_{n_x=0}^{N_{xR}-1} \sum_{n_y=0}^{N_{yR}-1} h_R(n_x, n_y) h_0(n_x + n_{sx}, n_y + n_{sy}), \quad (3)$$

где n_{sx} определяет взаимное смещение измеренной и эталонной карт по координате x , а n_{sy} – по координате y , причем n_{sx} и n_{sy} являются натуральными числами и удовлетворяют неравенствам $0 \leq n_{sx} \leq N_{x0} - N_{xR}$, $0 \leq n_{sy} \leq N_{y0} - N_{yR}$.

Пара значений $n_{sx} = n_{sxe}$ и $n_{sy} = n_{sye}$, соответствующих глобальному максимуму функции $C(n_{sx}, n_{sy})$ дискретных аргументов n_{sx} и n_{sy} , будет определять отклонение реального положения летательного аппарата от расчетного. При этом точку с координатами (n_{sxe}, n_{sye}) часто называют точкой совмещения эталонной и измеренной карт.

Чтобы повысить надежность оценки реального положения требуется уменьшить количество локальных максимумов функции $C(n_{sx}, n_{sy})$ и увеличить главный максимум относительно остальных [5]. Для этого ККА реализуют при определении показателя близости с использованием нормирования правой части формулы (3) и центрирования сомножителей под знаком суммы в указанной формуле [2]:

$$C^2(n_{sx}, n_{sy}) = \left[\sum_{n_x=0}^{N_{xR}-1} \sum_{n_y=0}^{N_{yR}-1} (h_R(n_x, n_y) - M_{HR}) \times (h_0(n_x + n_{sx}, n_y + n_{sy}) - M_{H0}(n_{sx}, n_{sy})) \right]^2 / \left\{ \left[\sum_{n_x=0}^{N_{xR}-1} \sum_{n_y=0}^{N_{yR}-1} (h_R(n_x, n_y) - M_{HR})^2 \right] \times \left[\sum_{n_x=0}^{N_{xR}-1} \sum_{n_y=0}^{N_{yR}-1} (h_0(n_x + n_{sx}, n_y + n_{sy}) - M_{H0}(n_{sx}, n_{sy}))^2 \right] \right\}, \quad (4)$$

где M_{HR} – среднее значение элементов массива (1); $M_{H0}(n_{sx}, n_{sy})$ – среднее значение тех элементов массива

(2), которые используются при вычислениях по формуле (3) при заданных значениях n_{sx} и n_{sy} .

Разностные корреляционные алгоритмы основаны на вычислении разностей элементов эталонной и измеренной карт, а не их произведений, как в формуле (3). Благодаря этому сокращается время вычислений. По быстрдействию разностные алгоритмы эффективнее, поскольку в них отсутствует операция умножения. Для алгоритма МАР показатель близости определяется как частный случай величины

$$C(n_{sx}, n_{sy}) = \sum_{n_x=0}^{N_{xR}-1} \sum_{n_y=0}^{N_{yR}-1} |h_R(n_x, n_y) - h_0(n_x + n_{sx}, n_y + n_{sy})|^p,$$

а именно, как частный случай при $p = 1$. При $p = 2$ реализуется так называемый алгоритм минимума квадрата разности.

Разностные алгоритмы с вычтенным средним предполагают центрирование величин при вычислении их разности:

$$C(n_{sx}, n_{sy}) = \sum_{n_x=0}^{N_{xR}-1} \sum_{n_y=0}^{N_{yR}-1} |h_R(n_x, n_y) - M_{HR} - h_R(n_x + n_{sx}, n_y + n_{sy}) + M_{H0}(n_{sx}, n_{sy})|^p. \quad (5)$$

При $p = 1$ соотношение (5) соответствует алгоритму МАВ, а при $p = 2$ – алгоритму МКВ.

При использовании разностных алгоритмов отклонение реального положения летательного аппарата от расчетного оценивается путем поиска глобального минимума показателя близости. При этом упомянутое центрирование позволяет сократить количество локальных минимумов и уменьшить их глубину [3], благодаря чему повышается надежность оценки.

Сравнение алгоритмов корреляционно-экстремальной обработки

Проведем сравнение алгоритмов в условиях, характерных для того случая, когда измеренная карта является результатом обработки информации, извлекаемой в процессе обзора подстилающей поверхности бортовым радиолокатором с многолучевой антенной системой. Лучи в таких системах, как правило, неподвижны относительно летательного аппарата, а обзор подстилающей поверхности реализуется благодаря движению аппарата. Количество лучей при этом сравнительно невелико (1–5), что ограничивает один из размеров реальной измеренной карты, например, $1 \leq N_{yR} \leq 5$ при таком выборе системы декартовых координат x и y , когда направление отсчета координаты x параллельно направлению движения летательного аппарата.

Для сравнения алгоритмов необходимо определить и сопоставить их характеристики. В качестве сопоставляемых характеристик выберем требуемое время вычислений и надежность оценки координат.

Указанная сравнительная оценка проведена методом математического моделирования. При этом эталонная карта задавалась как массив взаимно независимых случайных величин (элементов массива), имеющих некоторое математическое ожидание m_0 и среднеквадратичное

отклонение σ_0 . Плотность вероятности элементов массива задавалась в двух вариантах: как плотность вероятности равномерно распределенной случайной величины и как плотность вероятности нормального распределения. Измеренная карта моделировалась следующим образом. Из эталонной карты, т.е. из массива размером $N_{x0} \times N_{y0}$ выделялся участок \mathbf{H}_{0R} меньшего размера $N_{xR} \times N_{yR}$, образованный элементами $h_0(n_x, n_y)$ эталонной карты с номерами $n_{sx0} \leq n_x \leq n_{sx0} + N_{xR} - 1$ и $n_{sy0} \leq n_y \leq n_{sy0} + N_{yR} - 1$. Причем величины n_{sx0} и n_{sy0} выбирались случайно (равновероятно) из интервалов $0 \leq n_{sx0} \leq N_{x0} - N_{xR}$ и $0 \leq n_{sy0} \leq N_{y0} - N_{yR}$ соответственно. После этого измеренная карта вычислялась как результат суммирования выделенного участка с дополнительно формируемым массивом \mathbf{H}_a размера $N_{xR} \times N_{yR}$, моделирующим ошибки измерений:

$$\mathbf{H}_R = \mathbf{H}_{0R} + \mathbf{H}_a,$$

где массив \mathbf{H}_a задавался как массив взаимно независимых нормально распределенных случайных величин, имеющих математическое ожидание m_a и среднеквадратичное отклонение σ_a .

Величину m_a можно интерпретировать как систематическую ошибку измерений. В случае радиолокационных измерений она может быть довольно значительной. Действительно, радиолокационные средства в рассматриваемых системах обеспечивают измерение лишь разностей высот определенной точки рельефа и летательного аппарата. В то же время высота летательного аппарата (например, относительно уровня моря) может быть не известна с достаточной точностью. Тогда данные эталонной карты (составленной достаточно точно) и измеренной карты будут отличаться на некоторую константу, которую можно назвать систематической ошибкой измерений.

В процессе статистического эксперимента моделировалось Q_0 реализаций эталонной карты \mathbf{H}_0 . Для каждой из них моделировалось Q_a реализаций массива \mathbf{H}_a со взаимно независимыми парами значений параметров n_{sx0} и n_{sy0} . Если моделирование какого-либо из исследуемых алгоритмов при заданной паре реализаций массивов \mathbf{H}_0 и \mathbf{H}_a приводит к результату $n_{sxe} = n_{sx0}$ и $n_{sye} = n_{sy0}$, то это означает правильное решение задачи корреляционно-экстремальной обработки. Обозначив через Q_p количество таких результатов, полученных за время эксперимента, надежность оценки координат сможем приближенно определять по формуле

$$P = Q_p / (Q_0 Q_a). \quad (6)$$

На рис. 1 – 4 представлены результаты расчета величины (6), проведенного при описанном математическом моделировании и следующих значениях параметров: $N_{x0} \times N_{y0} = 400 \times 80$, $N_{xR} \times N_{yR} = 100 \times 3$, $Q_0 = 20$, $Q_a = 10$, $\sigma_0/m_0 = 0,577$ для равномерного распределения и $\sigma_0/m_0 = 1/3$ для нормального распределения. При этом ККА реализован согласно формуле (4). Рис. 1 и 2 со-

ответствуют равномерному распределению элементов массива H_0 . Рис. 3 и 4 соответствуют нормальному распределению этих элементов. Для рис. 1 и 3 $m_a = 0$, а для рисунков 2 и 4 $m_a/m_0 = 1$.

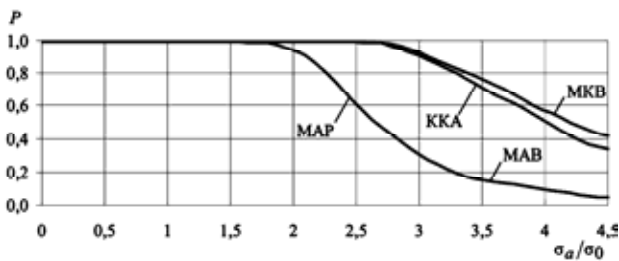


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного решения от дисперсии равномерно распределенной ошибки измерений при $m_a = 0$

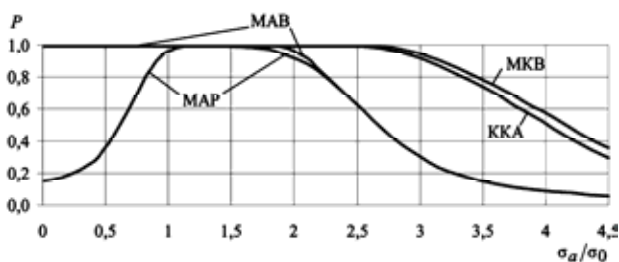


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного решения от дисперсии равномерно распределенной ошибки измерений при $m_a/m_0 = 1$

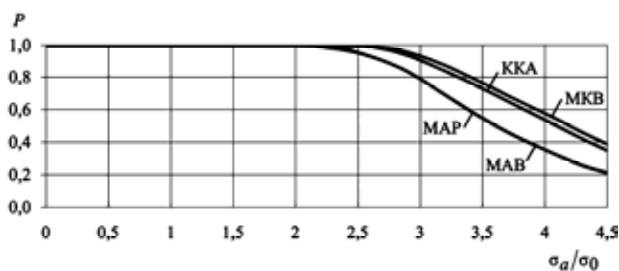


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного решения от дисперсии нормально распределенной ошибки измерений при $m_a = 0$

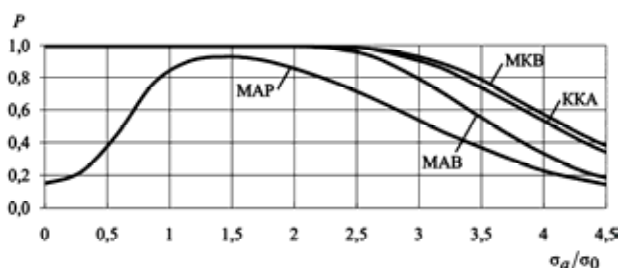


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного решения от дисперсии нормально распределенной ошибки измерений при $m_a/m_0 = 1$

Из анализа численных результатов (рис. 1 – 4) следует, что алгоритм МАР во всех случаях дает наихудшую надежность оценки координат. Это можно объяснить влиянием упоминавшейся систематической ошибки измерений. Использование операций центрирования в процессе вычислений по остальным трем из сравниваемых алгоритмов позволяет скомпенсировать систематическую ошибку и повысить надежность измерений.

Показатели надежности, достигаемые при использовании ККА, не являются самыми высокими. Последнее связано с накоплением ошибок при достаточно сложных вычислениях с использованием целочисленной арифметики (с фиксированной запятой), которой отдается предпочтение с целью понижения требований к аппаратно-программным средствам. Действительно, в случае вычислений с плавающей запятой надежность оценки координат при использовании ККА оказывается примерно на 5% выше и является наилучшей. Алгоритм МКВ, согласно представленным численным результатам при целочисленной арифметике, является предпочтительным с точки зрения обеспечиваемой надежности оценки координат.

Табл. 1 содержит результаты оценки времени вычислений, осуществляемых по различным алгоритмам. Согласно этой таблице за единицу принято время вычислений, осуществляемых в соответствии с формулой (4) для ККА. Заметим, что алгоритмы ККА, МАВ и МКВ включают в себя вычисления значений $M_{H0}(n_{sx}, n_{sy})$. Относительное время этих вычислений составляет 0,279. Причем для заданной (составленной при подготовке полетного задания) эталонной карты и всевозможных комбинаций значений n_{sx}, n_{sy} величина $M_{H0}(n_{sx}, n_{sy})$ может быть рассчитана заранее. Тогда время вычислений, осуществляемых по различным алгоритмам в полете, сократится и будет соответствовать данным правого столбца табл. 1. При этом за единицу принято новое (сокращенное) время вычислений, осуществляемых в соответствии с формулой (4) для ККА.

Таблица 1. Относительное время вычислений

| Алгоритм | Относительное время вычислений | |
|------------------|---|--|
| | с учетом вычисления величины $M_{H0}(n_{sx}, n_{sy})$ | без учета вычисления величины $M_{H0}(n_{sx}, n_{sy})$ |
| ККА, формула (4) | 1 | 1 |
| МАР | 0,499 | 0,638 |
| МАВ | 0,787 | 0,727 |
| МКВ | 0,806 | 0,752 |

Из табл. 1 следует, что ККА имеет наихудшие показатели по времени выполнения вычислений, что объясняется большим количеством операций умножения. Алгоритмы МАВ и МКВ являются предпочтительными и с точки зрения необходимого времени вычислений. Таким образом, из сопоставляемых алгоритмов наилучшим соотношением надежности оценки координат и вычислительной сложности характеризуется алгоритм МКВ.

Реализация корреляционно-экстремальной обработки на базе интегрированного многопроцессорного модуля

В ряде ситуаций реализация рассмотренных алгоритмов корреляционно-экстремальной обработки требует выполнения сравнительно большого количества арифметических операций за ограниченное время. Поэтому анализ возможностей аппаратно-программной реализации таких алгоритмов представляет особый интерес. В частности, целесообразно проанализировать

упомянутые возможности для случая использования интегрированных модулей цифровой обработки [6], разрабатываемых в настоящее время согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 в качестве основы построения мультипроцессорных систем, обладающих относительной универсальностью.

Упомянутый интегрированный модуль разрабатывается для использования на неподвижных и мобильных объектах. Он содержит высокопроизводительные микропроцессоры, способные взаимодействовать с памятью большого объема. В качестве высокопроизводительных микропроцессоров в модуле применяются отечественные аналоги микропроцессора ADSP-TS201 (TigerSHARC), тоже находящиеся в стадии разработки.

Структурная схема системы корреляционно-экстремальной обработки на основе интегрированного модуля приведена на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема системы корреляционно-экстремальной обработки

Система (рис. 5) содержит интегрированный модуль цифровой обработки сигналов и промышленную ЭВМ, к которой через шину PCI Express подключен радиолокационный высотомер. Радиолокационный высотомер представляет собой набор аппаратно-программных средств, обеспечивающих получение данных о высотах рельефа (радиолокационные измерения), их представление в необходимом формате, а также средства реализации обмена данными с промышленной ЭВМ и интегрированным модулем.

Для осуществления связи радиолокационного высотомера с интегрированным модулем целесообразно использовать высокоскоростной коммуникационный порт, наличие которого предусмотрено в разрабатываемом интегрированном модуле.

В интегрированном модуле должно выполняться сравнение эталонной карты и измеренной в соответствии с алгоритмом МКВ, выбираемым согласно результатам проведенного сравнения алгоритмов (см. выше).

Промышленная ЭВМ используется для управления средствами радиолокационного высотомера и интегрированным модулем. Так, ЭВМ передает в интегрированный модуль данные эталонной карты H_0 (как уже упоминалось, они загружаются в ЭВМ при подготовке полетного задания), а также принимает результаты вычислений от интегрированного модуля. Кроме того, промышленная ЭВМ решает задачи анализа и статистической обработки результатов вычислений (с оценкой точности и надежности указанных результатов), а также их протоколирования.

Один из вариантов структурной схемы интегриро-

ванного модуля, а также его связи, соответствующие рис. 5, показаны на рис. 6. В других вариантах количество процессорных кластеров в модуле может быть иным (до 5). При этом количество процессоров (ЦСП) в кластере может принимать значения от 2 до 4.

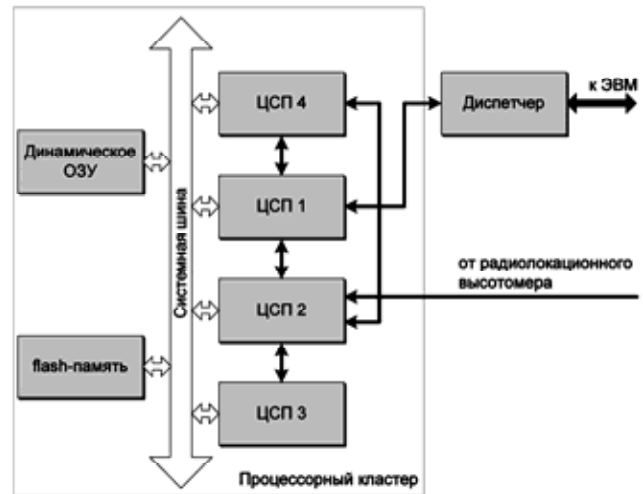


Рис. 6. Структурная схема интегрированного модуля

На рис. 6 интегрированный модуль имеет в своем составе 1 кластер, содержащий 4 высокопроизводительных процессора цифровой обработки сигналов – цифровых сигнальных процессора (ЦСП1 – ЦСП4), микросхему программируемой логики (диспетчер), оперативное запоминающее устройство, а также постоянное запоминающее устройство. Анализ возможных параметров тактовой синхронизации, определяющих быстродействие компонентов интегрированного модуля, а также пропускную способность линий обмена данными между компонентами, приведен в [6]. Диспетчер на рис. 6 является так называемой конечной точкой шины PCI Express и транслирует команды от ЭВМ к процессорам, а также ответы на команды, передаваемые в обратном направлении. Обмен данными между диспетчером и процессором ЦСП1, а также межпроцессорный обмен организуется при использовании высокоскоростных коммуникационных портов. Доступ процессоров к постоянному и оперативному запоминающим устройствам (к flash-памяти и динамическому ОЗУ на рис. 6) осуществляется за счет объединения упомянутых компонентов системной шиной.

Задачи распределяются между процессорами следующим образом. Процессор ЦСП 2 принимает данные от радиолокационного высотомера по коммуникационному порту и формирует из них измеренную карту. Эти данные передаются пакетами, каждый из которых соответствует одному столбцу в матричном представлении измеренной карты H_R . Обработку измеренной карты после ее формирования процессором ЦСП 2 выполняют три из четырех процессоров, а именно ЦСП 2 – 4. Принятые процессором ЦСП 2 пакеты транслируются без изменений процессорам ЦСП 3 и 4. Каждый из трех процессоров выполняет вычисления по алгоритму МАВ для набора возможных гипотез о точке совмещения эталонной и измеренной карты, формируя парциальный (соответствующий процессору) показатель близости. Парциальные показатели близости передаются процессору

ЦСП 1, который составляет объединенный показатель близости эталонной и измеренной карт, а также выполняет поиск экстремума этого показателя для определения точки совмещения карт.

Результаты оценки положения экстремума передаются диспетчеру, откуда могут быть считаны управляющей ЭВМ. Таким образом, управляющая ЭВМ имеет возможность отслеживать текущую оценку местоположения летательного аппарата в реальном времени.

Для памяти, которая содержится в интегрированном модуле и системе в целом, функции распределяются следующим образом. Программное обеспечение процессоров хранится во flash-памяти и загружается во внутреннюю память процессоров при включении питания модуля. При подготовке полетного задания эталонная карта местности после ее записи в память ЭВМ сразу же передается из ЭВМ в динамическое ОЗУ. Для получения значений элементов эталонной карты процессоры ЦСП 2 – 4 обращаются к динамическому ОЗУ по системной шине. Для хранения промежуточных результатов вычислений сигнальные процессоры используют собственные внутренние оперативные запоминающие устройства.

Оценка возможностей интегрированного модуля по решению задач корреляционно-экстремальной обработки

Для оценки возможностей решения задач корреляционно-экстремальной обработки наиболее важными являются такие параметры интегрированного модуля как производительность, объем оперативной памяти и пропускная способность линий передачи данных. Значения упомянутых параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры интегрированного модуля

| Параметр | Значение |
|---|----------|
| Теоретическая пиковая производительность одного процессора (P_t), млн. операций в секунду | 600 |
| Объем динамического ОЗУ (V_{RAM}), МБайт | 256 |
| Скорость обмена данными с внешними устройствами при помощи высокоскоростного коммуникационного порта (R_{text}), Мбит/с | 600 |
| Скорость обмена данными между процессорами (R_{int}), Мбит/с | 1280 |

Определим максимальное количество столбцов и строк матрицы измеренной карты, т.е. такое их количество, при котором возможно выполнение расчета координат летательного аппарата в реальном масштабе времени. Поскольку измеренная карта формируется по столбцам, то количество строк измеренной карты определяется количеством операций для обработки одного элемента и производительностью процессоров. Пусть формирование одного столбца измеренной карты осуществляется за время t_m . Как показывают оценки, обработка одного элемента измеренной карты в соответствии с алгоритмом минимума абсолютной разности с вычтенным средним требует $O_{elm} \approx 16500$ целочисленных операций при условии, что $N_{x0} - N_{xR} = N_{y0} - N_{yR} = \Delta_{0R} = 40$. Максимальное количество N_{yRmax} строк из-

меренной карты определяется как $N_{yRmax} = 3P_t t_m / O_{elm}$. Здесь коэффициент 3 соответствует количеству процессоров в модуле, выполняющих вычисления (см. выше). Потребуем выполнения равенства $t_m = 1$ мс, чего, согласно нашим расчетам, вполне достаточно даже для высокоскоростных летательных аппаратов – объектов навигации. Тогда получим $N_{yRmax} = 109$.

Максимальное количество столбцов измеренной карты можно вычислить, зная количество столбцов соответствующей эталонной карты. В свою очередь максимальный размер эталонной карты определяется доступным объемом динамического ОЗУ. Элементы матрицы эталонной карты H_0 представляются 32-разрядными числами. Следовательно, объем памяти для хранения каждого такого элемента равен $V_{el0} = 4$ байт. Пусть вся информационная емкость динамического ОЗУ (см. табл. 2) использована для хранения эталонной карты. При этом $N_{x0} N_{y0} = V_{RAM} / V_{el0}$. Тогда $(N_{xR} + \Delta_{0R})(N_{yR} + \Delta_{0R}) = V_{RAM} / V_{el0}$, а значит, $N_{xR} = V_{RAM} / [(N_{yR} + \Delta_{0R})V_{el0}] - \Delta_{0R}$. Подставляя в последнее выражение ранее найденное значение $N_{yR} = N_{yRmax}$, найдем максимальное количество столбцов измеренной карты $N_{xRmax} = V_{RAM} / [(N_{yRmax} + \Delta_{0R})V_{el0}] - \Delta_{0R} = 453615$.

Таким образом, рассматриваемый модуль способен выполнять необходимую корреляционно-экстремальную обработку в реальном времени, если размер измеренной карты не превышает 109×453615 . Указанное условие в реальных корреляционно-экстремальных системах навигации выполняется с запасом.

Определим теперь требования к скорости передачи данных через интерфейс связи модуля с радиовысотометром. За время t_m обработки одного столбца измеренной карты передается объем данных, равный $N_{yRmax} V_{elR}$, где $V_{elR} = V_{el0}$ – объем памяти для хранения одного элемента измеренной карты. Тогда средняя скорость передачи данных через интерфейс связи, требуемая для выполнения обработки информации модулем, определяется как $R_{IR} = N_{yRmax} V_{elR} / t_m$, и получается равной $R_{IR} \approx 0,45$ Мбит/с. Найденное значение требуемой скорости передачи данных много меньше скоростей, обеспечиваемых линиями передачи интегрированного модуля (см. табл. 2).

Таким образом, возможности интегрированного модуля перекрывают требования, предъявляемые к вычислительному устройству предлагаемой корреляционно-экстремальной обработки, и обеспечивают запас для модернизации алгоритмов обработки при их усложнении с целью повышения показателей качества (точности и надежности), а также для использования упомянутых возможностей при решении задач формирования данных измеренной карты: обработки отсчетов комплексной огибающей радиолокационных сигналов, определения высот в узлах измеренной карты. Сформулированный результат с одной стороны положительно характеризуют

разработку рассматриваемых модулей как относительно универсальной основы построения мультипроцессорных систем, а с другой стороны показывает, что выбранный алгоритм обработки может быть реализован существенно более простыми аппаратными средствами, что обеспечивает возможность значительного ужесточения массо-габаритных и иных (например, по надежности) требований к аппаратуре, весьма важную для реализации многих типов беспилотных летательных аппаратов.

Заключение

Сопоставление различных алгоритмов корреляционно-экстремальной обработки навигационной информации показывает, что алгоритм минимума абсолютной разности с вычтенным средним обеспечивает необходимую надежность оценки координат летательного аппарата, имея при этом значительные преимущества по сравнению с классическим корреляционным алгоритмом в отношении требуемых аппаратных ресурсов и времени вычислений. Указанные преимущества алгоритма делают возможной его аппаратно-программную реализацию на современной элементной базе. В частности, для реализации алгоритма может быть применена отечественная разработка – один из вариантов интегрированного модуля, выполняемого на базе высокопроизводительных отечественных процессоров.

Предлагаемая структура корреляционно-экстремальной обработки информации позволит решить задачу определения поправок к местоположению летательного аппарата при использовании отечественной элементной базы, а именно, простейшей модификации разрабатываемых универсальных мультипроцессорных систем – одного интегрированного модуля с одним кластером, содержащим четыре отечественных сигнальных процессора.

При этом раздельная оценка разрабатываемых аппаратных средств и предлагаемого алгоритма позволяет сделать два вывода:

- разрабатываемые отечественные мультипроцессорные аппаратные средства обеспечивают решение практически важных задач, в том числе задач корреляционно-экстремальной обработки навигационных данных;

- предлагаемый алгоритм корреляционно-экстремальной обработки навигационной информации не только обеспечивает необходимые точность и надежность определения координат, но и реализуется аппаратными средствами со сравнительно невысокими требованиями к ним, что весьма важно для применения в бортовой аппаратуре беспилотных летательных аппаратов при характерных для них жестких массо-габаритных требованиях и требованиях по надежности аппаратуры.

Литература

1. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радиолокационные и радионавигационные системы: Учеб. пособие для вузов.– М.: Радио и связь, 1994.– 296 с.
2. Андреев Г.А., Потапов А.А. Алгоритмы обработки навигационной пространственно-временной информации (часть 1) // Зарубежная радиоэлектроника.– 1989.– № 3.– с. 3–18.
3. Андреев Г.А., Потапов А.А. Алгоритмы обработки на-

вигационной пространственно-временной информации (часть 2) // Зарубежная радиоэлектроника.– 1989.– № 4.– с. 3–21.

4. Бочкарев А.М. Корреляционно-экстремальные системы навигации // Зарубежная радиоэлектроника.– 1981.– № 9.– с. 28–53

5. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.

6. Кузин А.А., Плужников А.Д. и др. Анализ временных соотношений для сигналов в проектируемых цифровых модулях и оценка работоспособности. // Цифровая обработка сигналов. – 2014.- № 2. – С. 70-77.

MULTIPROCESSOR REALIZATION OF CORRELATIONAL-EXTREMAL SIGNAL PROCESSING

Pluzhnikov A.D., Potapov N.N.,

Correlational and differential algorithms of correlational-extremal processing are discussed. Required calculation time and coordinates estimation reliability are defined. Recommendations concerning choice of algorithm to solve problem of navigation of aircraft with multiray altimeter radar are given. Possibility of hardware realization of such system based on the integrated module which contains high-performance signal processors is estimated.

At present the most accurate standalone solution of aircraft navigation problem is achieved by map-matching radionavigation systems, especially by systems built on the base of two-dimensional topography maps usage. Comparison of prepared reference map to created during flight measured map performed in such systems by calculating so called proximity index. Global extremum of proximity index defines deviation between real aircraft coordinates and expected coordinates.

Algorithms of correlational-extremal processing differ in the choice of proximity index type. Type of proximity index specifies calculation complexity of particular algorithm. For classic correlational algorithm (CCA) proximity index is represented by mutual correlation function of reference and measured maps. For the family of differential algorithms multiplication is replaced by subtraction, allowing to significantly reduce requirements of calculation unit performance. This paper deals with analysis of the following differential algorithms: algorithm of absolute difference minimum (ADM), algorithm of squared difference minimum with average subtracting (SSM), algorithm of absolute difference minimum with average subtracting (ASM).

Measured maps obtained by processing of information extracted during the area relief scanning is commonly used in map-matching navigation systems. Relief scanning performed by onboard multiray radar. Radar rays are stationary relative to aircraft. Relief scanning is realized due to aircraft motion. Different characteristics of algorithms were compared using mathematical modeling and showed ADM algorithm to provide the worst coordinate estimation reliability. Three other algorithms calculations contain operation of centering which allows to compensate systematic error and to increase the reliability of coordinate estimation. CCA provides worst calculation time, which caused by large amount of multiplication operations. SSM algorithm is preferred with respect to higher coordinate estimation reliability and lower calculation time requirement.

Calculation time required to perform calculation according to SSM algorithm allows to realize this algorithm using modern hardware. In particular, recently developed integrated module with high-performance signal processors can be used for algorithm implementation.