

УДК 681.3

И.Г. Кириллов, А.П. Сахаров, В.В. Лашин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В СИСТЕМАХ ПЕРВИЧНОЙ И ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье обсуждаются способы сокращения временных затрат на реализацию алгоритмов первичной и вторичной обработки радиолокационной информации. Эффективным способом такого сокращения является организация мультипараллельных вычислений, основанных на комплексном применении методов параллельной обработки на уровне операций алгоритмов. Показано, что одновременная параллельная реализация нескольких алгоритмов или однотипных алгоритмов по нескольким независимым исходным данным позволяет существенно повысить эффективность распараллеливания вычислений особенно при большом количестве «длинных» операций, например, деления и извлечения квадратного корня.

Ключевые слова: радиолокационная информация, мультипараллельная обработка, селекция движущихся целей, сглаживание параметров траектории, параллельная временная модель алгоритма.

Введение

Постановка проблемы. Постоянное развитие средств воздушного нападения (СВН), модернизация современных и создание перспективных их образцов всех основных типов, в том числе аэродинамических средств по технологии «Stealth», баллистических и гиперзвуковых ракет, требует совершенствования как средств подсистемы разведки воздушного пространства, так и подсистемы управления с повышенной степенью автоматизации. Среди основных требований к ним следует выделить следующие [1]:

- обнаружение и сопровождение СВН всех основных типов на высотах от 20 м до 50 км на скоростях полета от 100 ... 150 км/час до $M = 5 \dots 13$ в условиях сложной помеховой обстановки, число которых в зоне ответственности может превышать 500...600;
- обеспечение возможности одновременного приема и обработки радиолокационной информации (РЛИ) с темпом ее обновления 1 ... 5 секунд от нескольких сотен источников и передачи команд управления на 250...300 исполнительных элементов и т.д.

Это требует существенного повышения производительности бортовых вычислительных средств мобильных (наземного и воздушного базирования) систем с целью обеспечения требуемой оперативности решения комплекса задач по обнаружению и сопровождению большого числа СВН. Одним из направлений такого повышения является комплексное использование методов параллельной обработки РЛИ, которые с наибольшей эффективностью реализуются в структурах спецпроцессоров.

Анализ литературы. В настоящее время известно множество публикаций, посвященных разработке параллельных структур спецпроцессоров и параллельных программ реализации различных функциональных алгоритмов [2, 3]. Однако в известной

научно-технической литературе недостаточно отражены количественные оценки, иллюстрирующие потенциальные возможности сокращения времени реализации наиболее вычислительно громоздких алгоритмов обработки радиолокационной информации за счет использования параллельных спецпроцессоров.

Цель статьи – анализ эффективности организации мультипараллельных вычислений при обработке радиолокационной информации.

Основная часть

На этапах первичной и вторичной обработки в РЛС различного назначения решается целый комплекс задач по обнаружению полезных сигналов, определению координат воздушных целей, обнаружению траекторий их полета (трасс), экстраполяции и сглаживанию (фильтрации) дискретных параметров трасс, стробированию и селекции отметок сопровождаемых трасс в строге и т.д. Возможности по организации параллельных вычислений заложены в цикличности решаемых задач, независимости исходных и некоторых промежуточных данных в операциях алгоритмов, а также ряда самих алгоритмов между собой. Наиболее трудоемким является синтез параллельных временных моделей конкретных алгоритмов (ПВМА) на уровне операций [3, 4]. Поэтому в статье основное внимание уделяется оценке эффективности распараллеливания алгоритмов обработки РЛИ на основе учета особенностей именно таких моделей.

1. Синтез ПВМА базируется на использовании совмещения независимых операций (глобального параллелизма) и мультипараллельной обработки (одновременной реализации нескольких алгоритмов при их независимости по исходным данным). Исходными данными для синтеза таких моделей являются не только структурные (информационные) связи алгоритма, задаваемые обычно матрицами смежности или

множествами левых и правых инцидентов (сопряженными и внешними множествами), но и сведения об используемых (или предполагаемых к использованию) для реализации аппаратурных компонентах (спецпроцессорах). К числу таких сведений обычно относятся данные о наличии и объеме памяти различных уровней, времени реализации (в тактах) в спецпроцессорах основных арифметических операций, операций записи (чтения) в память и т.д. Известны основные характеристики, например, SP-процессоров компаний Analog Devices, Texas Instruments. Следует заметить, что в ряде даже одноядерных сигнальных процессоров имеется принципиальная возможность одновременного (за один такт) выполнения до 4-х операций (записи, чтения из памяти, сложения и умножения) за счет специальных архитектурных решений. Кроме того спецвычислители могут быть созданы на базе ПЛИС, например, производителей Xilinx, Altera и других [2]. Эффективность распараллеливания алгоритмов обычно оценивается несколькими показателями, определяющими критерий оптимизации, к числу которых относятся [3, 4]:

- коэффициент сокращения временных затрат
- $$\delta T = T/T_{\parallel}, \quad (1)$$

где T и T_{\parallel} – время последовательного и параллельного выполнения алгоритма соответственно («абсолютное» время реализации алгоритма определяется по значению тактовой частоты процессора или длительности такта);

- коэффициент эффективности распараллеливания

$$R = \delta T \cdot Z, \quad (2)$$

где Z – коэффициент «загрузки» (использования) оборудования (спецпроцессоров).

2. При оценке эффективности мультипараллельной обработки остановимся более подробно на практически реализуемых алгоритмах селекции отметок в стробе и сглаживания дискретных параметров трасс СВН. При выборе равномерной прямолинейной модели движения цели будем полагать достаточно малой вероятность попадания более трех отметок в строб. В этих условиях уравнение Калмана [5, 6] для получения сглаженных оценок $\hat{\alpha}_{k+1}^{(1)}$ (дальности до цели на $(k+1)$ -м цикле обзора) и $\hat{\alpha}_{k+1}^{(2)} = \Delta r_{k+1} = \text{const}$ (приращения дальности за $(k+1)$ -й период обзора) вектора состояния $\hat{\alpha}_{k+1} = \left[\hat{\alpha}_{k+1}^{(1)} \quad \hat{\alpha}_{k+1}^{(2)} \right]^T$ при равноточных измерениях по одной координате (дальность) примет вид [6]

$$\hat{\alpha}_{k+1}^{(1)} = \hat{\alpha}_{0(k+1)} + A_{k+1} (\hat{r}_{k+1} - \hat{r}_{0(k+1)}), \quad (3)$$

$$\hat{r}_{0(k+1)} = \hat{\alpha}_{0(k+1)} = \hat{\alpha}_k^{(1)} + \hat{\alpha}_k^{(2)}, \quad A_{k+1} = \frac{2(2k+1)}{(k+1)(k+2)},$$

$$\hat{\alpha}_{k+1}^{(2)} = \alpha_k^{(2)} + D_{k+1} \cdot (\hat{r}_{k+1} - \hat{r}_{0(k+1)}), \quad (4)$$

$$D_{k+1} = 6/((k+1)(k+2)),$$

где A_{k+1} и D_{k+1} – весовые коэффициенты, как правило, фиксируемые, начиная с некоторого цикла обзора, что позволяет «не потерять» цель при ее маневре. В этих условиях (3), (4) соответствуют алгоритму экспоненциального сглаживания.

Решение задачи селекции отметки, принадлежащей трассе, в стробе сводится к отысканию минимума квадрата невязки по соответствующей координате, например, дальности $\Delta \hat{r}_{k+1}(i)^2$

$$\Delta \hat{r}_{k+1}(i)^2 = (\hat{r}_{k+1}(i) - \hat{r}_{0(k+1)})^2, \quad (5)$$

где $i \in 1, m$ – номер отметки в стробе.

Синтезированы ПВМА совместной реализации алгоритмов селекции (5) одной из трех отметок, попавших в строб, и сглаживания (3), (4) дискретных параметров трассы при сопровождении СВН по трем координатам (дальность, азимут и угол места) на аппаратных компонентах, аналогичных одноядерному сигнальному процессору ADSP 21160 компании Analog Devices (время выполнения операций записи / чтения, сложения и умножения – 1 такт, деления – 6 тактов, извлечения квадратного корня – 9 тактов). Показатели эффективности (1) и (2) распараллеливания алгоритма (3)-(5) для одного (пунктирные кривые) и одновременно двух (сплошные кривые) сопровождаемых СВН (мультипараллельная обработка) иллюстрируются на рис. 1, а, б.

Из рис. 1, а, б видно, что за счет использования только метода совмещения независимых операций алгоритма (3)-(5) можно сократить временные затраты на обработку информации по одной трассе для рассматриваемых условий (66 элементарных арифметических операций) примерно в 7 раз (при использовании $N_{\text{ср}} = 8$ процессоров, рис. 1, а). При этом максимизируется интегральный показатель эффективности распараллеливания $R = 5.96$ (рис. 1, б). Видно, что дальнейшее увеличение числа процессоров не приводит к сокращению времени реализации алгоритма.

Переход от параллельно-последовательной обработки (параллельно по каждой трассе отдельно и последовательно по траекториям, пунктирные кривые) к мультипараллельной обработке траекторной информации (одновременно по нескольким трассам, сплошные кривые) позволяет сократить временные затраты от 1.2 раз (при $N_{\text{ср}} = 8$) примерно до 2 раз (при $N_{\text{ср}} = 14$) и увеличить коэффициент эффективности распараллеливания от 1.3 до 3.4 раз уже при сопровождении двух трасс. Полученные значения показателей эффективности распараллеливания алгоритма свидетельствуют о высоких потенциальных возможностях по сокращению временных затрат за счет использования мультипараллельной обработки траекторной информации (вероятность появления множества целей на каждом из отдельно взятых азимутальных направлений достаточно велика).

3. Аналогичные оценки показателей эффективности распараллеливания при организации мульти-

параллельных вычислений получены для «фрагментов» оптимальных алгоритмов междупериодной обработки (МПО) сигналов на фоне гауссовых помех (рис. 1, в, г). На рисунках пунктирные кривые соот-

ветствуют обработке в одном элементе разрешения по дальности, сплошные кривые (иллюстрируют мультипараллельную обработку) – одновременно в двух элементах разрешения.

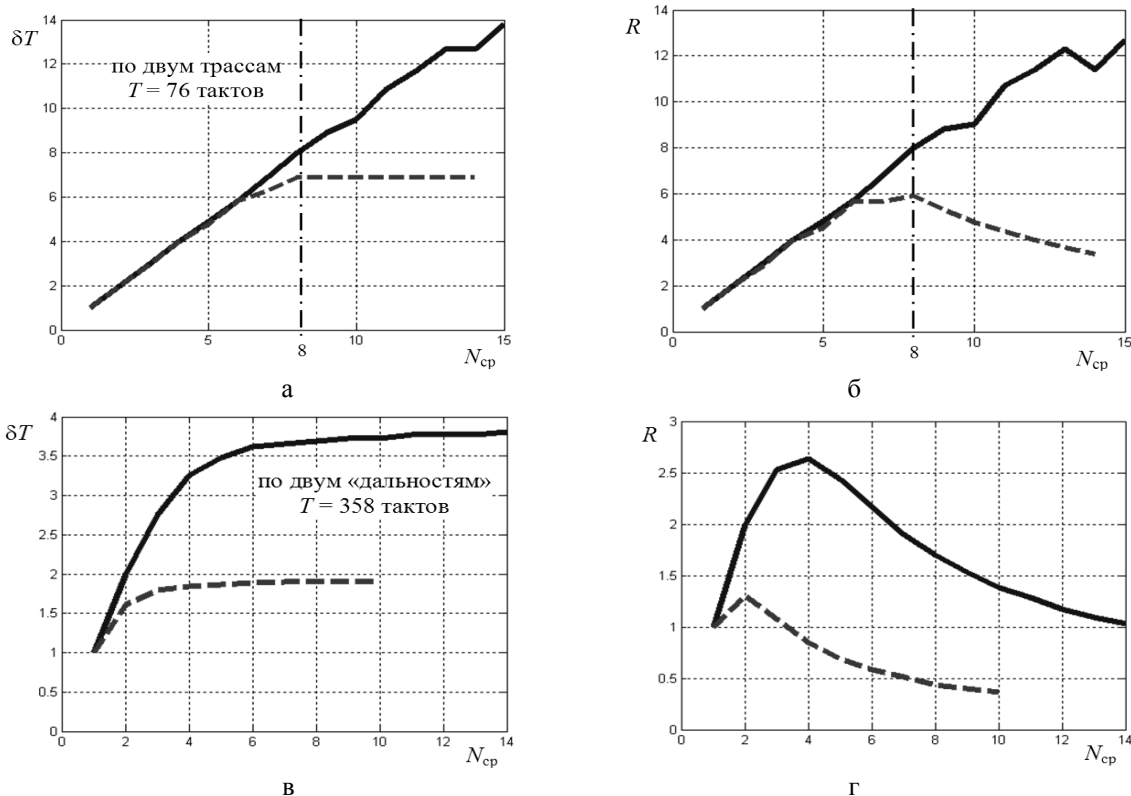


Рис. 1. Зависимости коэффициентов δT (а, в) и R (б, г) эффективности распараллеливания алгоритма (а, б – сопровождения по трем координатам; в, г – определения весового вектора на выходе «обращающего» АРФ) для одной (штриховые кривые) и двух (сплошные кривые) «дальностей» от количества процессоров (процессорных элементов)

Приведенные результаты соответствуют реализации «фрагмента» оптимального алгоритма МПО, решающего задачу отыскания весового вектора на выходе обращающего фильтра [7], в качестве которого использован адаптивный решетчатый фильтр [8], настроенный по единственной обучающей выборке (корню из априори теплицевой корреляционной матрицы междупериодных флюктуаций пассивных помех) с учетом возможных в таких условиях сокращений вычислений, детально обоснованных в [9, 10]. При этом, по сути находится решение системы линейных уравнений с плохо обусловленной матрицей системы. Кривые рис. 1, в, г соответствуют алгоритму для случая $M = 4$ -мерной пачки импульсов от цели при существенной нестационарности пассивных помех в смежных элементах дистанции (алгоритмы обработки достаточно подробно описаны в [7-10]), содержащему 132 элементарные арифметические операции. Анализ пунктирных кривых рис. 1, в, г (решение задачи для одного элемента разрешения по дальности) свидетельствует о «плохой» распараллеливаемости подобного рода алгоритмов первичной обработки, что обусловлено, прежде всего, существенным «весом» итерационных («дол-

гих») операций деления и извлечения квадратного корня (среди всех арифметических операций алгоритма), т.е. не столько их количеством, сколько зависимостью от них множества других операций. Видно, что использование более 2...3 процессорных элементов нецелесообразно из-за незначительного сокращения временных затрат при распараллеливании вычислений и резкого снижения коэффициента R из-за малой «загрузки» оборудования.

В этих условиях организация мультипараллельных (одновременных для нескольких элементов разрешения по дальности) вычислений позволяет существенно повысить эффективность параллельной обработки. Так при одновременном формировании весовых векторов для двух смежных элементов дистанции временные затраты дополнительно сокращаются вдвое. При этом существенно возрастает коэффициент «загрузки» оборудования Z в (2), что приводит к максимизации R уже при $N_{cp} = 4$. Видно, что в этих условиях переход к мультипараллельным вычислениям повышает этот показатель более чем в 3 раза. Исследования показали, что при одновременном формировании весовых векторов для четырех смежных элементов дистанции показатель

ефективності распараллеливания R (2) максимизируется при $N_{cp} = 8$, что является сопоставимым с алгоритмом (3)-(5). На практике возможно распараллеливание вычислений одновременно и для большего числа элементов дистанции, ввиду того, что процесс формирования исходных данных достаточно быстрый (оцифрованные отсчеты по дальности формируются примерно каждые 1...2 мкс).

В заключение заметим, что полученные ПВМА, показатели качества которых приведены на рис. 1, позволяют непосредственно синтезировать структуры высокопроизводительных спецвычислителей.

Выводы

В статье обоснована эффективность параллельной реализации «практических» алгоритмов вторичной обработки РЛИ, что позволяет сократить время обработки в 7 и более раз. Организация мультипараллельных вычислений позволяет дополнительно повысить такую эффективность. Показано, что алгоритмы, содержащие значительное число «длинных» (итерационных) операций, например, деления и извлечения квадратного корня, результаты которых являются исходными для большого числа «простых» операций, существенно хуже распараллеливаются. К числу таких алгоритмов в частности относятся алгоритмы формирования весовых векторов на выходе обрабатываемых фильтров, реализуемые на этапе первичной обработки РЛИ. Способом существенного повышения эффективности параллельной обработки при этом является организация мультипараллельных (одновременных по множеству однотипных независимых исходных данных) вычислений.

Список литературы

1. Ярош С.П. Теоретичні основи побудови та застосування розвідувально-управлінських інформаційних

систем ППО: монографія / С.П. Ярош; ред. І.О. Кириченка. – Х.: ХУПС, 2012. – 512 с.

2. Шпаковский Г.И. Реализация параллельных вычислений: МРІ, OpenMP, кластеры, грид, многоядерные процессоры, графические процессоры, квантовые компьютеры / Г.И. Шпаковский. – Минск: БГУ, 2011. – 176 с.

3. Синтез и анализ параллельных процессов в адаптивных времяпараметризованных вычислительных системах / Г.А. Поляков [и др.]. – Х.: ХНУ, 2012. – 670 с.

4. Кириллов И.Г. Методика оценки потенциальной распараллеливаемости циклических задач / И.Г. Кириллов, Е.Г. Толстолужская // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 5 (54). – С. 44-52.

5. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВиЦ, 2000. – 428 с.

6. Траекторна обробка локаційної інформації / С.А. Войтович, Х.А. Турсунходжаєв / за заг. ред. Х.А. Турсунходжаєва. – Х.: ХУПС, 2008. – 110 с.

7. Леховицкий Д.И. СДЦ в импульсных РЛС: 1. Физический смысл и экстремальные свойства операций оптимальной междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех / Д.И. Леховицкий, В.П. Рябуха, Г.А. Жуга // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: ХНУРЭ, 2011. – Т. 10, № 4. – С. 463-478.

8. Адаптивные решетчатые фильтры. Ч. II. Алгоритмы настройки АРФ / Д.И. Леховицкий, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, В.П. Рябуха, Д.В. Атаманский // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – Т. 10, № 4. – С. 405-418.

9. Кириллов И.Г. Обоснование выбора численных методов решения задач линейной алгебры при обработке радиолокационной информации / И.Г. Кириллов, И.В. Семенов // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2008. – Вип. 1 (5). – С. 50-58.

10. Кириллов И.Г. Минимизация вычислений при решении систем с оценочными корреляционными матрицами неполного эффективного ранга / И.Г. Кириллов, С.И. Бурковский // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2010. – Вип. 2 (83). – С. 92-100.

Поступила в редакцію 16.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МУЛЬТИПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В СИСТЕМАХ ПЕРВИННОЇ І ВТОРИННОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

І.Г. Кириллов, А.П. Сахаров, В.В. Лашин

У статті обговорюються способи скорочення витрат часу на реалізацію алгоритмів первинної і вторинної обробки радіолокаційної інформації. Ефективним способом такого скорочення є організація мультипаралельних обчислень, заснованих на комплексному застосуванні методів паралельної обробки на рівні операцій алгоритмів. Показано, що одночасна паралельна реалізація декількох алгоритмів або однотипних алгоритмів по декількох незалежним вихідним даними дозволяє істотно підвищити ефективність розпаралелювання обчислень особливо при великій кількості «довгих» операцій, наприклад, ділення і визначення квадратного кореня.

Ключові слова: радіолокаційна інформація, мультипаралельна обробка, селекція рухомих цілей, згладжування параметрів траєкторії, паралельна часова модель алгоритму.

ANALYSIS OF MULTI PARALLEL CALCULATION EFFECTIVENESS IN SYSTEMS FOR PRIMARY AND SECONDARY RADAR INFORMATION PROCESSING

I.H. Kirillov, A.P. Sakharov, V.V. Laschin

In the article the ways to reduce the time spent on the implementation of primary and secondary radar information processing algorithms are discussed. An effective way of this reduction is in organizing multi parallel calculations based on the integrated using of parallel processing techniques on the level of algorithms operations. It is shown that the simultaneous parallel implementation of several algorithms or same type algorithms in several independent benchmark data allow to improve significantly the effectiveness of parallel calculations especially if there are lots of "long" operations such as division and square root.

Keywords: radio-location information, multiparallel treatment, selection of moving-targets, smoothing out of parameters of trajectory, parallel temporal model of algorithm.