

## **ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

### **Введение**

Радиолокационные системы применяются для измерения координат, скоростей и ускорений различных объектов, а также для бесконтактного зондирования атмосферы, поверхности суши и воды. Для ряда применений, требуется высокий темп выдачи получаемых результатов. Распространенным подходом к реализации систем цифровой обработки радиолокационных сигналов является разбиение последовательности операций на ряд относительно несложных действий, каждое из которых выполняется отдельным сигнальным процессором либо программируемой логической матрицей. Такое решение обеспечивает необходимое быстродействие, однако время разработки такой системы и ее себестоимость весьма значительны.

Несмотря на интенсивное развитие вычислительной техники, производительности центральных процессоров (ЦП) персональных компьютеров до сих пор недостаточно для реализации всех процедур обработки радиолокационных сигналов с приемлемой скоростью. Невозможность создания существенно более производительных процессоров привела к появлению систем параллельной обработки на базе нескольких ЦП (многопроцессорные системы), ЦП с несколькими арифметико-логическими устройствами и ЦП с несколькими ядрами (многоядерные ЦП), а также специализированных сопроцессоров, рассчитанных на быстрое выполнение определенного набора действий.

Применение многопроцессорных вычислительных систем ставит дополнительную задачу при разработке алгоритмического и программного обеспечения обработки радиолокационных сигналов. Для эффективного использования имеющихся вычислительных ресурсов, необходимо разделить процедуру обработки на ряд независимых операций, которые могут проходить одновременно. В данной статье рассматривается реализация ряда методов обработки радиолокационных сигналов на базе систем параллельной обработки. В качестве вычислительных устройств рассмотрены четырехъядерные ЦП современных персональных компьютеров, а также графические процессоры (ГП) фирмы NVIDIA, допускающие проведение математических расчетов со значительной производительностью. Применение распространенных комплектующих позволяет реализовать достаточно низкую стоимость системы обработки, и при этом получить высокую производительность.

### **Постановка задачи**

Принцип действия радиолокационных систем вертикального зондирования атмосферы (РЛС ВЗ) основан на регистрации сигналов, рассеянных неоднородностями коэффициента диэлектрической проницаемости атмосферы [1]. Измерение параметров рассеянных сигналов позволяет оценить динамические параметры атмосферы, в частности направление и скорость ветра. РЛС ВЗ обеспечивают построение профиля скорости ветра по сигналам, рассеянным неоднородностями атмосферы (в частности, неоднородностями диэлектрической проницаемости), образование которых обусловлено неоднородным нагревом подстилающей поверхности [1]. После предварительного накопления рассеянного сигнала осуществляется спектральный анализ, результатом которого является оценка спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала. Если отношение сигнал/шум недостаточное, далее производится некогерентное накопление спектров.

При параметризации происходит оценивание информативных параметров рассеянного сигнала – доплеровского сдвига центральной частоты, а также ширины спектра и мощности рассеянного сигнала. Доплеровский сдвиг частоты обусловлен переносом турбулентности как целого преобладающим ветром, и является искомым параметром. Ширина спектра зависит от интенсивности турбулентных процессов в импульсном объеме.

Методы параметризации принято разделять на параметрические и непараметрические. К параметрическим относятся методы, основанные на априорной информации и форме и параметрах СПМ рассеянного сигнала [1]. В литературе приводятся сведения о том, что форма спектра рассеянного сигнала сходится к функции Гаусса с увеличением времени накопления [3]. На этих предпосылках основан метод наименьших квадратов (МНК) [1,2].

Ранее проведенные исследования [4] позволяют заключить, что методы параметризации на основе метода наименьших квадратов обеспечивают наименьшую величину погрешностей среди применяемых в РЛС ВЗ методов. Кроме того, процедура параметризации по затратам вычислительных ресурсов многократно превосходит остальные процедуры обработки сигналов. В связи с этим, темп выдачи результатов системой может быть повышен за счет оптимизации этой процедуры.

Введем обозначения:  $g$  - модель спектральной плотности мощности (СПМ) рассеянного сигнала,  $y$  - СПМ рассеянного сигнала,  $k$  - число точек в СПМ. Для методов наименьших квадратов процесс параметризации сводится к минимизации невязки, записываемой как:

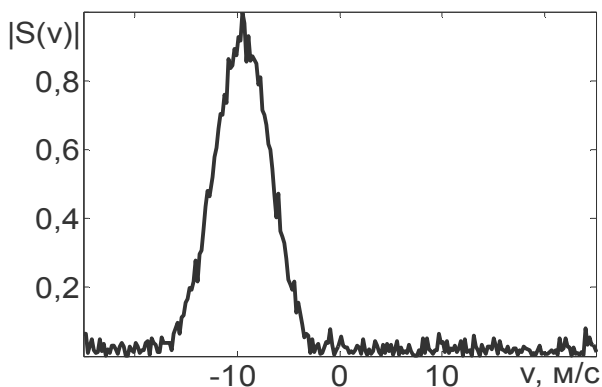
$$e(\psi_1 \dots \psi_N) = \sum_{i=1}^k (y_i - g(i, \psi_1 \dots \psi_N))^2. \quad (1)$$

Поскольку, по результатам натурных экспериментов [3], форма СПМ рассеянного сигнала сходится к гауссовой с ростом времени накопления, то в качестве модели примем функцию Гаусса:

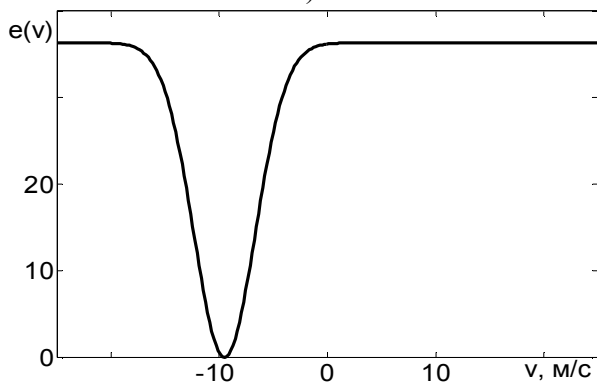
$$g(i, \psi_1, \psi_2) = \exp\left(-\frac{(i - \psi_1)^2}{2\psi_2}\right).$$

В данном случае, физический смысл параметров модели таков:  $\psi_1$  - центр тяжести спектра (оценка доплеровского сдвига частоты рассеянного сигнала  $f_0$ ),  $\psi_2$  - оценка ширины спектра рассеянного сигнала ( $\Delta f$ ).

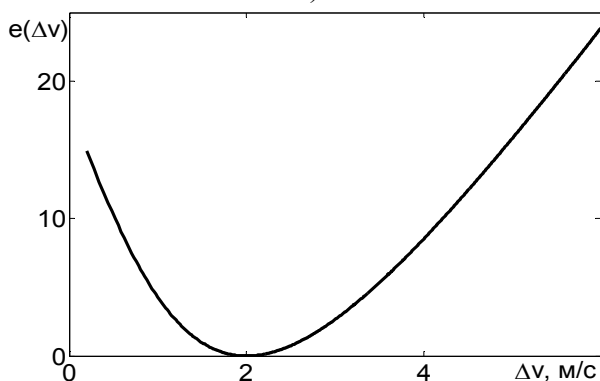
Таким образом, задача параметризации спектров рассеянных сигналов сводится к отысканию минимума целевой функции двух переменных при выполнении ограничений. По принципу действия методы минимизации можно разделить на две категории – прямые (используют только значения целевой функции) и косвенные (используют производные целевой функции) [5]. Косвенные методы обычно сходятся за меньшее число итераций, однако предъявляют требования к целевой функции, в частности, требуют ее дифференцируемости. Кроме того, результат косвенных методов может сходиться к точкам перегиба целевой функции вместо ее глобального минимума, что приведет к промахам в результатах. Это обуславливает целесообразность применения прямых методов. Большинство прямых методов, в частности метод покоординатного спуска [5], используют процедуру отыскания минимума функции одной переменной. При этом минимизация проходит в несколько этапов, во время каждого из которых определяется минимум сечения целевой функции по одной из искоемых переменных. Рассмотрим примеры регистраций спектров рассеянных сигналов, и соответствующих сечений целевых функций параметризации.



a)

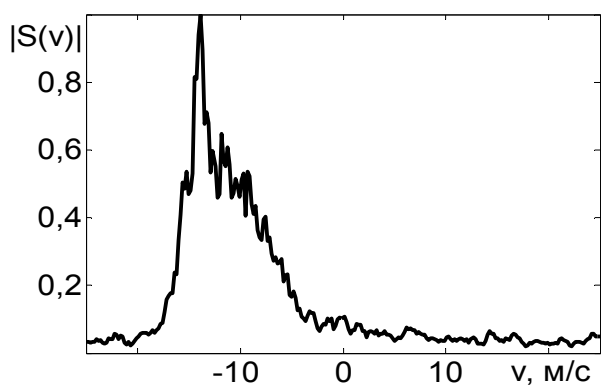


б)

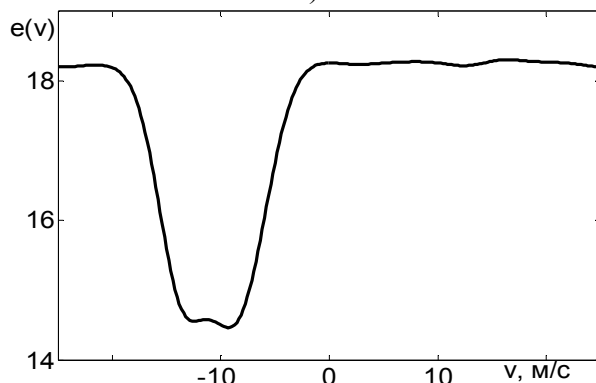


в)

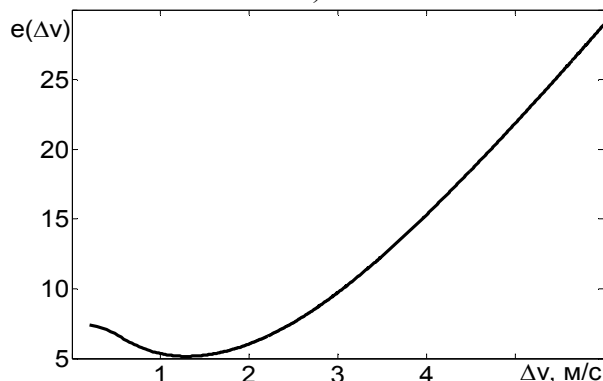
Рисунок 1 – Спектр рассеянного сигнала, полученный при времени осреднения 20 секунд (а), а также сечения целевой функции по  $v_0$  (б) и  $\Delta v$  (в).



a)



б)



в)

Рисунок 2 – Спектр рассеянного сигнала, полученный при времени осреднения 1 секунда (а), а также сечения целевой функции по  $v_0$  (б) и  $\Delta v$  (в).

В случае параметризации данных, полученных при малом интервале осреднения (рисунок 2) получаются целевые функции с локальными минимумами (рисунок 2, б) и с меньшей крутизной (рисунок 2, в). Это способствует появлению промахов при оценивании параметров сигнала методами, использующими сокращенные процедуры минимизации. В условиях сложной формы целевой функции единственным методом её минимизации, обеспечивающим безусловную сходимость к глобальному минимуму, является метод прямого вычисления целевой функции во всех точках сетки. Этот метод редко применяется на практике из-за значительных вычислительных затрат. Вместе с тем, в параллельных вычислительных системах он может быть реализован весьма эффективно, так как вычисления функции в разных точках сетки полностью независимы друг от друга и могут проводиться одновременно. В дальнейшем, в статье рассматриваются два метода параметризации – с полным вычислением целевой функции (обозначен как метод 1), и метод покоординатного спуска (метод 2).

Точностные характеристики методов параметризации получены путем имитационного моделирования. Проводится сопоставление получаемых оценок значений параметров с заданными в модели. Постановку модельного эксперимента иллюстрирует рисунок 3.

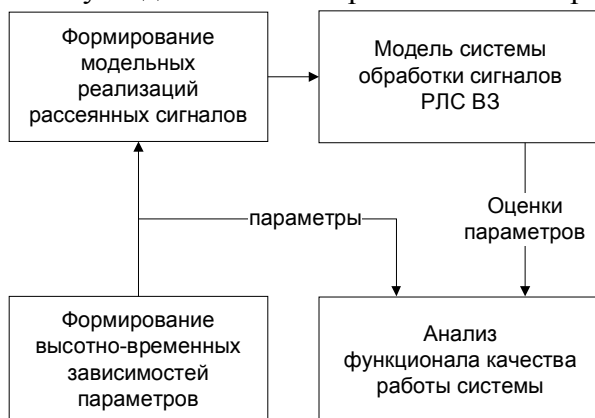


Рисунок 3 – К пояснению постановки модельного эксперимента

В данной статье использована две модель рассеянного сигнала, основанная на методе «блестящих точек». При этом имитируется процесс рассеяния радиоволн неоднородностями атмосферы. Рассеянный сигнал на входе приемного устройства определяется как суперпозиция сигналов, рассеянных отдельными точечными отражателями в составе импульсного объема [6]. Моделирование проводилось для следующих условий: диапазон скоростей ветра  $\pm 25$  м/с, отношение сигнал/шум  $-20 \dots +30$  дБ. Отдельно рассмотрены случаи со временем накопления спектров 20 секунд и 1 секунда.

При анализе точностных характеристик методов параметризации, используются две метрики погрешностей: среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки и среднее по модулю отклонение (СМО) оценки. Обозначим через  $\psi$  истинное значение оцениваемого параметра, через  $\psi'$  - получаемую оценку, а через  $N$  – число измерений. Тогда, среднеквадратическое отклонение оценки

$$\sigma(\psi) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\psi - \psi')^2}. \quad (3)$$

Полученные СКО оценок сопоставим с границей Рао-Крамера для измерения незнергетических параметров [7]:  $\sigma^2(\psi) = -\frac{1}{q^2 F''(\psi_0)}$ , где  $F''(\psi_0)$  - вторая производная автокорреляционной функции по оцениваемому параметру. Отсюда:

$$\sigma_{PK}(\psi) = \sqrt{-\frac{1}{q^2 F''(\psi_0)}}. \quad (4)$$

Средний модуль отклонения:  $M(\psi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\psi - \psi'|$ . Также примем следующие обозначения.

Пусть  $\varepsilon$  - предельно допустимое отклонение оценки параметра  $\psi$ , то есть предполагается, что

$$M(\psi) \leq \varepsilon. \quad (5)$$

Поскольку результат оценивания параметра в присутствии шумов является случайной величиной, то (5) в общем случае выполняется не для всех результатов, а для некоторой их части

$$D(\varepsilon) = \frac{n\{M(\psi) \leq \varepsilon\}}{N}. \quad (6)$$

Величина, обратная (6), показывает вероятность промахов при измерениях, для заданного предельного отклонения оценки:

$$C(\varepsilon) = \frac{100}{D(\varepsilon)}. \quad (7)$$

### Основные положения работы

На рисунках 4-9 приведены результаты моделирования. Графики для ЦП и ГП отдельно не приводятся, поскольку отклонения результатов при реализации одного и того же метода на разных вычислительных устройствах отличаются в пределах погрешности машинного представления данных.

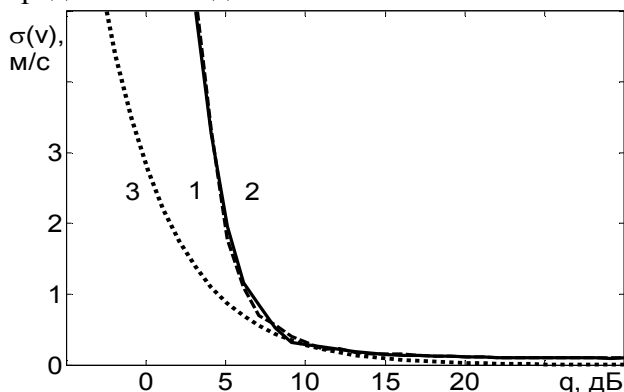


Рисунок 4 – Зависимость СКО оценок скорости ветра от отношения сигнал/шум

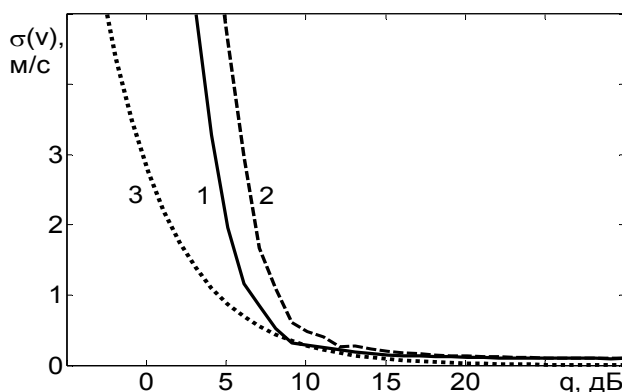


Рисунок 5 - Зависимость СКО оценок скорости ветра от отношения сигнал/шум

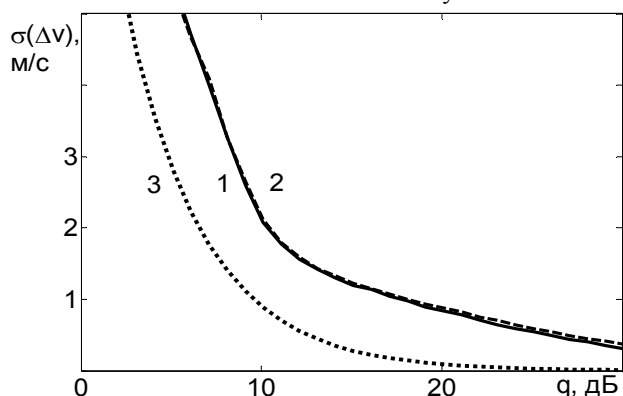


Рисунок 6 - Зависимость СКО оценок ширины спектра сигнала от отношения сигнал/шум

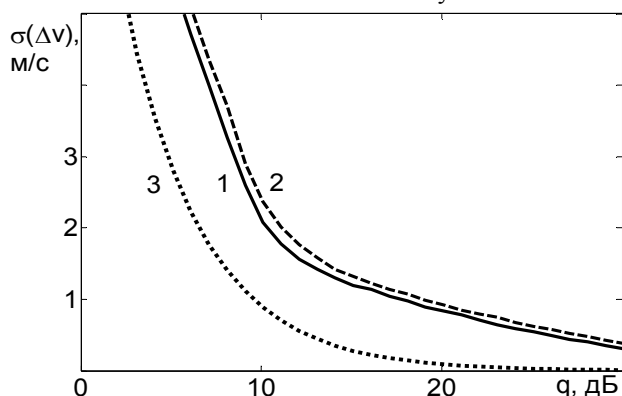


Рисунок 7 - Зависимость СКО оценок ширины спектра сигнала от отношения сигнал/шум

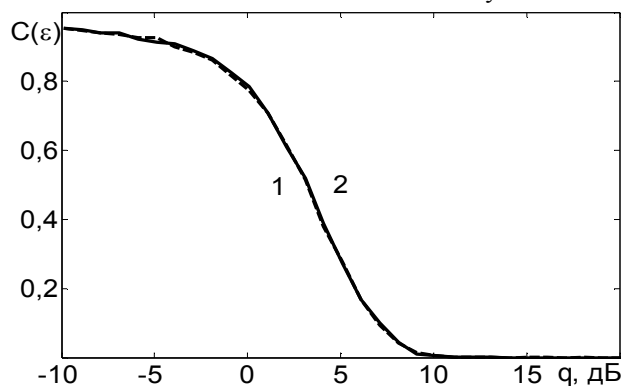


Рисунок 8 - Зависимость вероятности промахов оценивания скорости ветра от отношения сигнал/шум

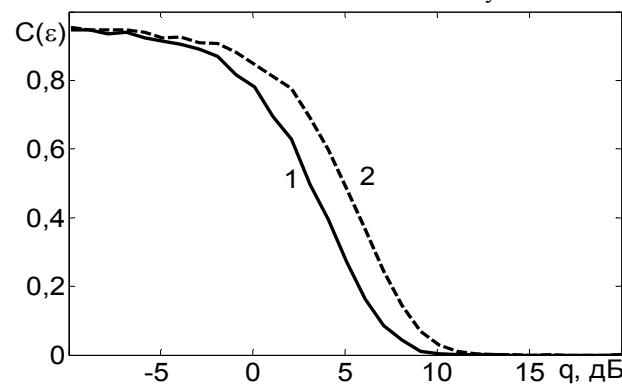


Рисунок 9 - Зависимость вероятности промахов оценивания скорости ветра от отношения сигнал/шум

На рисунках 4,6,8 приведены результаты оценок для времени накопления спектров 20 секунд, а на рисунках 5,7,9 – для времени накопления 1 секунда. Для вероятностных характе-

ристик принято пороговое значение ошибки 1 м/с. Цифрой 1 обозначены результаты параметризации методом прямого вычисления целевой функции, 2 – методом покоординатного спуска, 3 – граница Рао-Крамера.

Для случая времени осреднения 20 секунд, результаты параметризации обоими методами совпадают (рисунки 4, 6, 8). Таким образом, подтверждается безусловная сходимость метода покоординатного спуска к глобальному минимуму целевой функции, при отсутствии локальных минимумов.

Для случая времени осреднения 1 секунда (рисунки 5, 7, 9), результаты методов параметризации различаются. Метод прямого вычисления целевой функции оказывается более точным, в особенности при низких отношениях сигнал-шум. Это обусловлено появлением локальных минимумов целевой функции, и промахами при её минимизации. Вероятность промахов при параметризации тем ниже, чем меньше отклонения формы спектра рассеянного сигнала от функции Гаусса. Таким образом, при параметризации одномодовых спектров, осредненных за десятки секунд и более, метод 2 дает приемлемые результаты. При наличии многомодовых спектров рассеянных сигналов, точность оценивания параметров сигнала методом прямого вычисления целевой функции выше, чем методом покоординатного спуска. Метод прямого вычисления значений целевой функции имеет преимущество перед оптимизированными методами минимизации при зондировании атмосферы с высоким темпом выдачи результатов.

Рассмотрим вопрос аппаратурной реализации методов обработки. В таблице 1 приведены конфигурации тестовых систем. Для графических процессоров (ГП) приведен объем локальной видеопамяти.

Таблица 1

| Процессор   | Число ядер | Тактовая частота, МГц | Пиковая вычислительная мощность, ГФлоп/с | Объем ОЗУ | Пиковая пропускная способность ОЗУ, Гбайт/с | Тип |
|-------------|------------|-----------------------|------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------|-----|
| Intel Q9400 | 4          | 2660                  | 42,56                                    | 4096 Мб   | 12,8                                        | ЦП  |
| G86         | 16         | 900                   | 43,2                                     | 256 Мб    | 12,8                                        | ГП  |
| GT216       | 24         | 1100                  | 79,2                                     | 1024 Мб   | 25,3                                        | ГП  |
| G215        | 96         | 1340                  | 386                                      | 512 Мб    | 54,4                                        | ГП  |
| G94         | 64         | 1625                  | 312                                      | 512 Мб    | 57,6                                        | ГП  |
| G92         | 128        | 1836                  | 705                                      | 512 Мб    | 70,4                                        | ГП  |
| GF110       | 480        | 1464                  | 1405                                     | 1280 Мб   | 152                                         | ГП  |

Архитектура ГП имеет ряд особенностей, которые следует учитывать при разработке программного обеспечения [8]:

1. В составе ГП имеется набор арифметико-логических устройств (АЛУ), каждое из которых может использоваться для вычислений. Каждое из АЛУ имеет отдельную кэш-память небольшого объема, и набор регистров.
2. Видеокарта имеет в своем составе значительный объем быстродействующего ОЗУ (в современных моделях – сотни мегабайт). Эту память можно использовать для хранения исходных данных, результатов расчетов и временных данных.
3. Видеокарта имеет доступ в ОЗУ системы через шину. Пропускная способность шины значительно меньше пропускной способности локальной видеопамяти.

Полностью задействовать вычислительные ресурсы ГП можно следующим образом:

1. Программа должна допускать параллельное выполнение однотипных инструкций над разными данными.
2. Исходные данные должны быть предварительно загружены в видеопамять.
3. Операции ввода-вывода должны происходить одновременно с вычислениями.

Программы, использованные для сравнительного анализа в рамках статьи, написаны на языке C++, и скомпилированы Visual Studio 2008 Express Edition, с использованием ПО NVIDIA CUDA Toolkit для поддержки вычислений на базе видеопроцессоров. Для версий программ, рассчитанных на исполнение на ЦП, использована явная многопоточность, реализованная с помощью OpenMP. При этом на разных ядрах ЦП выполняются операции с разными частями массива данных. При разработке программ для ГП дополнительно приняты меры к минимизации числа операций обмена данными между ОЗУ системы и ОЗУ видеоадаптера, поскольку такие операции проходят через относительно медленную шину соединения. Оценки времени выполнения процедур параметризации при различных размерах выборки приведены в таблице 2. Для РЛС ВЗ атмосферного приграничного слоя, требования к временному и высотному разрешению приводят к предельному времени параметризации порядка 25 миллисекунд [9]. Результаты параметризации методом покоординатного спуска для многопоточных конфигураций не приведены, поскольку тесты показали неэффективность параллельного исполнения этой процедуры.

Таблица 2. Затраты машинного времени на параметризацию

|           |          | Время вычислений, мс                        |        |         |          |                              |       |        |        |
|-----------|----------|---------------------------------------------|--------|---------|----------|------------------------------|-------|--------|--------|
|           |          | Метод прямого вычисления<br>весовой функции |        |         |          | Метод покоординатного спуска |       |        |        |
|           |          | 64                                          | 128    | 256     | 512      | 64                           | 128   | 256    | 512    |
| <b>ЦП</b> | 1 поток  | 4.030                                       | 31.650 | 264.230 | 2240.520 | 0.266                        | 0.847 | 3.119  | 12.203 |
|           | 2 потока | 3.020                                       | 18.520 | 145.650 | 1262.240 | -                            | -     | -      | -      |
|           | 3 потока | 3.190                                       | 14.120 | 108.120 | 927.590  | -                            | -     | -      | -      |
|           | 4 потока | 2.980                                       | 12.440 | 97.390  | 773.400  | -                            | -     | -      | -      |
| <b>ГП</b> | G86      | 1.625                                       | 10.875 | 66.797  | 695.844  | -                            | -     | -      | -      |
|           | G94      | 1.030                                       | 5.763  | 31.584  | 178.087  | -                            | -     | -      | -      |
|           | G92      | 1.641                                       | 5.594  | 23.562  | 113.922  | -                            | -     | -      | -      |
|           | G215     | 0.966                                       | 3.535  | 20.194  | 142.613  | -                            | -     | -      | -      |
|           | GT216    | 0.937                                       | 4.860  | 34.716  | 272.245  | 1.903                        | 5.981 | 20.433 | 79.107 |
|           | GF110    | 0.210                                       | 0.52   | 2.120   | 14.630   | -                            | -     | -      | -      |

На рисунке 10 приведены оценки времени выполнения параметризации на ЦП, а на рисунке 11 – на ГП. В таблице 3 приведены результаты оценки эффективности многопоточного исполнения программы на ЦП.

Таблица 3

| Число ядер ЦП | Относительная<br>производительность |
|---------------|-------------------------------------|
| 1             | 1                                   |
| 2             | 1.81                                |
| 3             | 2.44                                |
| 4             | 2.90                                |

Разделение цикла на несколько потоков повышает скорость обработки, однако с увеличением числа потоков эффективность снижается из-за ограничений полосы пропускания ОЗУ.

Характер зависимости времени выполнения от размера выборки полностью сохраняется. Для различных видеокарт наблюдается некоторое изменение эффективности использования графического процессора. Это связано с недостаточной полосой пропускания видеопамяти.

Для видеокарты на базе GF110 (кривая 6) производительность существенно выше за счет наличия быстрой кеш-памяти на ядре ГП

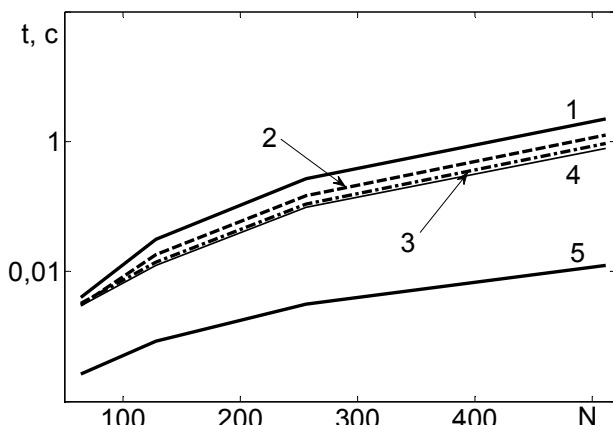


Рисунок 10 – Время выполнения процедуры параметризации на ЦП (1...4 – метод 1, 1...4 потока. 5 – метод 2)

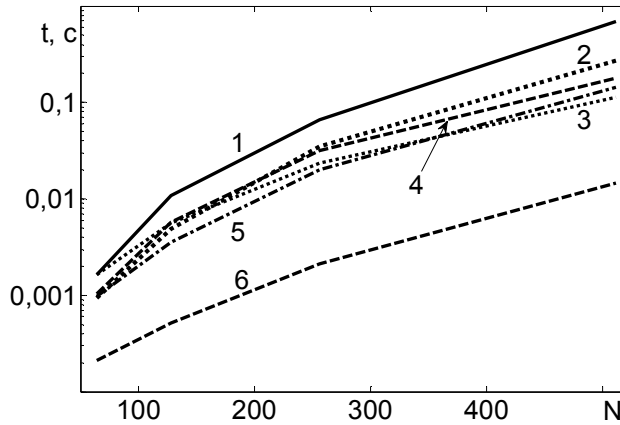


Рисунок 11 – Время выполнения процедуры параметризации на ГП (1 – G86, 2 – GT216, 3 – G92, 4 – G94, 5 – G215, 6 – GF110).

. При малых размерах выборки результаты всех ГП фактически одинаковы. Это обусловлено небольшим временем исполнения самой минимизации, и необходимостью обмена данными с ЦП системы через медленную соединительную шину.

## Выводы

Для спектров рассеянных сигналов, полученных с малым временем накопления, метод прямого вычисления целевой функции обеспечивает меньшую величину погрешностей параметризации по сравнению с методом покоординатного спуска. Реализация этого метода на базе параллельных вычислительных устройств обеспечивает получение требуемого темпа выдачи результатов в РЛС вертикального зондирования атмосферы. Автор хотел бы выразить признательность коллегам за предоставленные результаты тестирования разработанного ПО на графических процессорах G215, G92, G94 и GF110.

## Список литературы:

1. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. 426 с.
2. Strauch R. G. Data analyses techniques: spectral processing // Handbook for middle atmosphere program.- Urbana, Illinois. - 1983.- Vol. 9.- P. 528-531.
3. Довиак Р. Доплеровские локации и метеорологические наблюдения. / Р. Довиак, Д. Зрнич – Л.: Гидрометеиздат, 1988. 503 с.
4. Литвин-Попович А.И. Параметризация спектров рассеянных сигналов в РЛС вертикального зондирования атмосферы / А.И. Литвин-Попович, В.Н. Олейников // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 152. – С. 49-52.
5. Бахвалов Н.С. Численные методы. / Н.С. Бахвалов– М.:Наука, 1975. – 630с.
6. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р. В. Островитянов, Ф. А. Басалов, -М.: Радио и связь 1982. 232 с ил.
7. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с.:ил.
8. Xiaoshu Si, Hong Zheng, "High Performance Remote Sensing Image Processing Using CUDA," ISECS, pp.121-125, Third International Symposium on Electronic Commerce and Security, 2010
9. Отчет с резолюциями и рекомендациями. Комиссия по основным системам всемирной метеорологической ассоциации. // 23 февраля - 3 марта 2005г., тринадцатая сессия. ВМО № 895, ISBN 92-63-40985-4.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.05.2011