



И.В. Гринь, Р.А. Ершов, О.А. Морозов

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМНОЙ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ ПРИ БОЛЬШИХ ОБЪЕМАХ ВЫБОРОК

(Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского)

Одним из наиболее универсальных методов определения местоположения источника радиоизлучения является разностно-дальномерный метод, для применения которого необходимо определить взаимные временные задержки принятых сигналов.

Определение местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом основано на решении системы нелинейных уравнений

$$\begin{cases} \Delta R_{ij} = R_{iM} - R_{jM} = c(\tau_{iM} - \tau_{jM}) = c\Delta\tau_{ij}, \\ R_{iM} = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2 + (z_i - z_M)^2}, \\ R_{jM} = \sqrt{(x_j - x_M)^2 + (y_j - y_M)^2 + (z_j - z_M)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где ΔR_{ij} – разности расстояний между точкой излучения (x_M, y_M, z_M) и несколькими точками (ИСЗ) приема сигнала с соответствующими координатами (x_i, y_i, z_i) , $\Delta\tau_{ij}$ – временные задержки распространения сигналов от источника между i -м и j -м приемниками, c – скорость света.

Для оценки местоположения источника излучения в пространстве (без использования уравнения земной поверхности) требуется система, состоящая минимум из четырех синхронизованных приемников излучения. При этом координаты источника излучения находятся из решения системы нелинейных уравнений как точка пересечения поверхностей положения. Решение данной системы может быть сведено к минимизации функционала суммы квадратов ошибок:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=2}^N (R_1(x, y, z) - R_i(x, y, z) - c\Delta\tau_{1i})^2 \quad (2)$$

Выбор начального приближения при оптимизации не унимодального функционала (2) может быть основан на предположении, что излучающий объект находится в области видимости всех приемников, зафиксировавших сигнал. В этом случае, начальное приближение выбирается на поверхности Земли, в любой точке пересечения областей видимости приемников. Согласно данному предположению, точка внутри пересечения областей видимости спутников с радиус-вектором \vec{R} может задаваться следующим выражением:

$$\begin{cases} \vec{R} = \frac{\vec{r}_c}{|\vec{r}_c|} R_3; \\ \vec{r}_c = \arg \min_{\vec{r}} \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|} R_3 - \vec{r} \right)^2 \right), \end{cases} \quad (3)$$



где \vec{r}_i – радиус векторы спутников, зафиксировавших сигнал, R_3 – радиус Земли.

Данное начальное приближение в подавляющем большинстве случаев оказывается достаточно близко к глобальному оптимуму функционала (2), что позволяет быстро и точно определять координаты излучающего объекта.

Традиционным алгоритмом оценки взаимных временных задержек при учёте смещений в спектрах принятых сигналов, вызванных влиянием эффекта Доплера, является метод вычисления и анализа взаимной функции неопределённости сигналов в опорном и исследуемом каналах:

$$A(\Delta\tau, \Delta f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t) \cdot s_2^*(t + \Delta\tau) \exp(-j2\pi\Delta f t) dt \quad (4)$$

Взаимная временная задержка и доплеровский сдвиг оцениваются на основании обобщенного метода максимального правдоподобия как аргументы функции неопределённости, соответствующие её максимуму:

$$(\Delta\tau^*, \Delta f^*) = \arg \max_{\Delta\tau, \Delta f} A(\Delta\tau, \Delta f) \quad (5)$$

В работах [1,2] предлагается вычислительно эффективный алгоритм вычисления функции неопределённости, основанный на разбиении принятых и оцифрованных сигналов на неперекрывающиеся блоки. Отсчёты функции неопределённости могут быть вычислены по формуле:

$$A(n, m) = \sum_{k=0}^{N_1/d-1} p_{k, k-n} \exp\left(-j \frac{2\pi k d m}{N_1}\right), \quad (6)$$

где N_1 – длина сигнала в опорном канале в отсчётах, d – длина блока разбиения. Значения $p_{k, k-n}$ представляют собой диагональные элементы матрицы \hat{P} , вычисляемой перемножением матриц, составленных из сигналов, как показано на рис. 1.

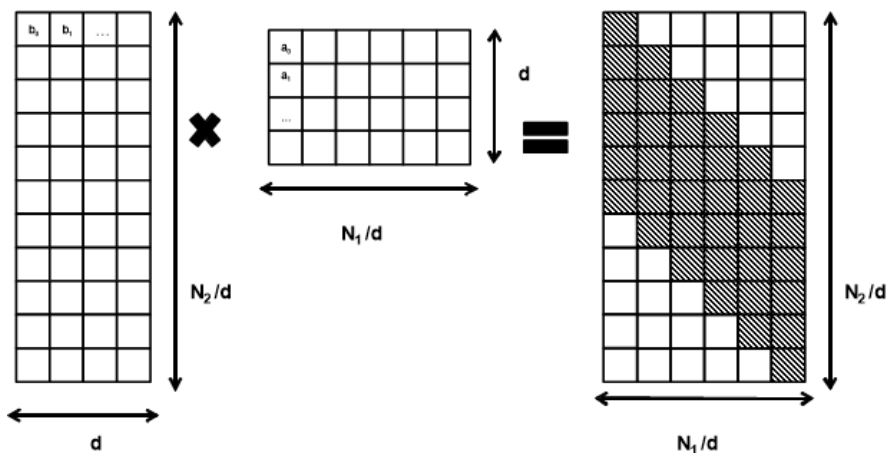


Рис. 1. Перемножение матриц опорного и исследуемого сигналов

Для вычисления функции неопределённости необходимо преобразовать диагонали получившейся матрицы в строки, и затем выполнить преобразование Фурье каждой строки. Все описанные операции могут быть распараллелены и реализованы на графическом процессоре (GPU), что во много раз повышает



вычислительную эффективность и даёт возможность оценивать местоположение источника радиоизлучения в реальном масштабе времени.

Однако если сигнал имеет широкую спектральную полосу и, соответственно, оцифровывается с высокой частотой дискретизации, необходимо записывать и обрабатывать большое число комплексных отсчётов. Соответственно, возрастает число элементов матрицы \hat{P} и число отсчётов функции неопределённости. Так, при частоте дискретизации $f_s = 400$ МГц при оцифровке в течение примерно 10 мс получим $N_1 \approx 2^{22}$. При выборе $d = 2048$ и $N_2 \approx 2^{23}$ для хранения сигналов, матрицы \hat{P} и массива функции неопределённости в глобальной памяти GPU потребуется 192 МБ. Объем памяти возрастает с увеличением частоты дискретизации. Как известно, не все современные GPU обладают таким объемом глобальной памяти, к тому же, операции выделения и копирования больших объёмов памяти очень трудоемкие, что негативно сказывается на производительности.

Для оптимизации работы с памятью необходимо вычислять функцию неопределённости по независимым друг от друга блокам, размер которых соответствует объему памяти данного GPU. Также желательно, чтобы недиагональные элементы матрицы \hat{P} не хранились в памяти и, по возможности, вообще не вычислялись, поскольку полезной информации при определении временной задержки они не несут.

Для реализации модифицированного алгоритма предлагается модифицировать операцию перемножения матриц так, чтобы модифицированная функция не вычисляла недиагональные элементы. Нетрудно заметить, что для вычисления i -го столбца матрицы \hat{P} в диапазоне возможных временных задержек используется подматрица исследуемого сигнала со сдвигом i и i -й столбец матрицы опорного сигнала (рис. 2).

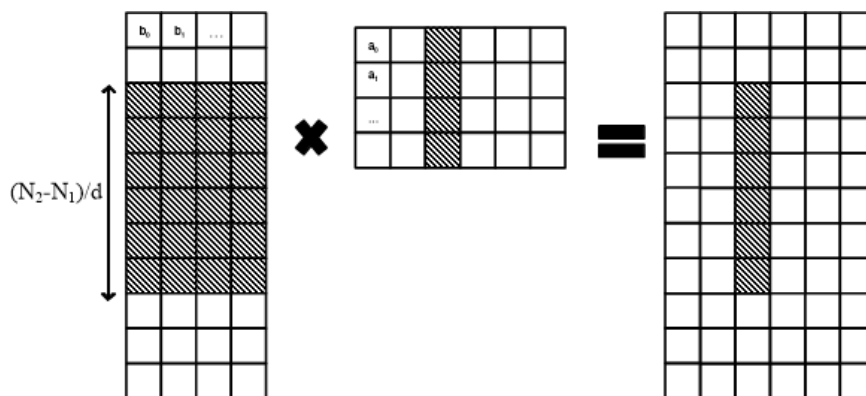


Рис. 2. Вычисление одного столбца матрицы \hat{P}

Математически данная операция выглядит следующим образом:

$$p_{ij} = \sum_{k=0}^{d-1} b_{i+j,k} \cdot a_{ki} = \sum_{k=0}^{d-1} s_1[(i+j)d+k] \cdot s_2^*[kd+j], \quad (7)$$

где p_{ij} - j -й значимый (темный на рис. 2) элемент i -го столбца \hat{P} .



Таким образом, задача сводится к параллельной реализации множества операций вида $\vec{p} = \hat{V} \cdot \vec{a}$. По аналогии с параллельной реализацией матричного перемножения, представленной в [3] и [4], можно реализовать ядро CUDA, каждый блок которого будет вычислять несколько элементов вектора \vec{p} . При этом подматрица \hat{V} и вектор \vec{a} разбиваются на небольшие фрагменты («тайлы»), которые после чтения из глобальной памяти заносятся в разделяемую память (shared memory) GPU.

Разделяемая память обладает значительно меньшей латентностью по сравнению с глобальной, что позволяет сократить время чтения из памяти и, соответственно, повысить производительность. После вычисления в разделяемой памяти блок вектора \vec{a} сохраняется в глобальной памяти. В результате описанной операции получаем матрицу, содержащую только значимые элементы (темные элементы на рис. 1). Функция неопределённости вычисляется путем выполнения преобразования Фурье каждой строки полученной матрицы.

Описанный модифицированный алгоритм позволяет применить блочную обработку для определения временной задержки сигналов большой размерности. Функция неопределённости вычисляется по блокам в определенном диапазоне временных сдвигов, который эффективно помещается в глобальной памяти GPU. В каждом полученном блоке функции неопределённости находится глобальный максимум, его положение записывается в массив, далее вычисляется следующий блок функции неопределённости и т.д. В полученном в результате вычислений массиве находится глобальный максимум, положение которого и соответствует искомой временной задержке и доплеровскому сдвигу.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что ускорение времени работы предложенного модифицированного алгоритма составляет порядка 10^2 по сравнению с последовательным алгоритмом, использующим эффективные многопоточные функции поэлементного перемножения массивов и быстрого преобразования Фурье библиотеки Intel IPP.

Литература

1. Логинов, А.А., Марычев, Д.С., Морозов, О.А., Фидельман, В.Р. Алгоритм вычисления функции неопределённости в задаче одновременной оценки частотно-временных характеристик сигналов. // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. №3 (27) . – 2013. – С. 62-73.
2. Ершов, Р.А., Морозов, О.А., Фидельман, В.Р. Вычислительно-эффективный алгоритм оценка временной задержки широкополосных сигналов. // Известия Самарского научного центра РАН. Т.16, №4(2) – 2014. – с. 384-387
3. Боресков, А.В., Харламов, А.А. Основы работы с технологией CUDA. – М.: ДМК-Пресс. – 2008. – 232 с.
4. CUDA C Best Practices Guide. – NVIDIA Corporation. – 2014. – 73 p.