

Параллельные алгоритмы построения и обработки трехмерных радиоголографических изображений

Ал. А. Калмыков¹, В. А. Добряк¹, Ан. А. Калмыков¹, А. С. Куриленко¹,
Е. Н. Акимова^{1,2}, А. Ф. Скурыдина^{1,2}, В. Е. Мисилов^{1,2}

Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина¹, Институт математики
и механики УрО РАН²

Задачи подповерхностного зондирования

Методы подповерхностного зондирования позволяют решать широкий круг задач мониторинга скрытых объектов:

- ▶ обработка сигналов, изображений
- ▶ геофизические обратные задачи
- ▶ диагностика строительных конструкций, коммуникаций
- ▶ обнаружение взрывных устройств

Идея метода в излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различие по диэлектрической проницаемости.

С применением параллельных систем достигается возможность зондирования и построения изображения в течении единиц или долей секунд.

РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ДОСМОТРА

- ▶ предложены принципы построения системы
- ▶ разработан макет аппаратных средств, включающий в себя приемно-передающий тракт, антенную систему и вычислительные средства
- ▶ разработано специальное алгоритмическое и программное обеспечение, обеспечивающее управление, калибровку системы, прием и обработку сигналов, синтез трехмерных изображений
- ▶ проведены экспериментальные исследования.

Трехмерное радиочастотное изображение человека в непрерывном диапазоне 2-4 ГГц

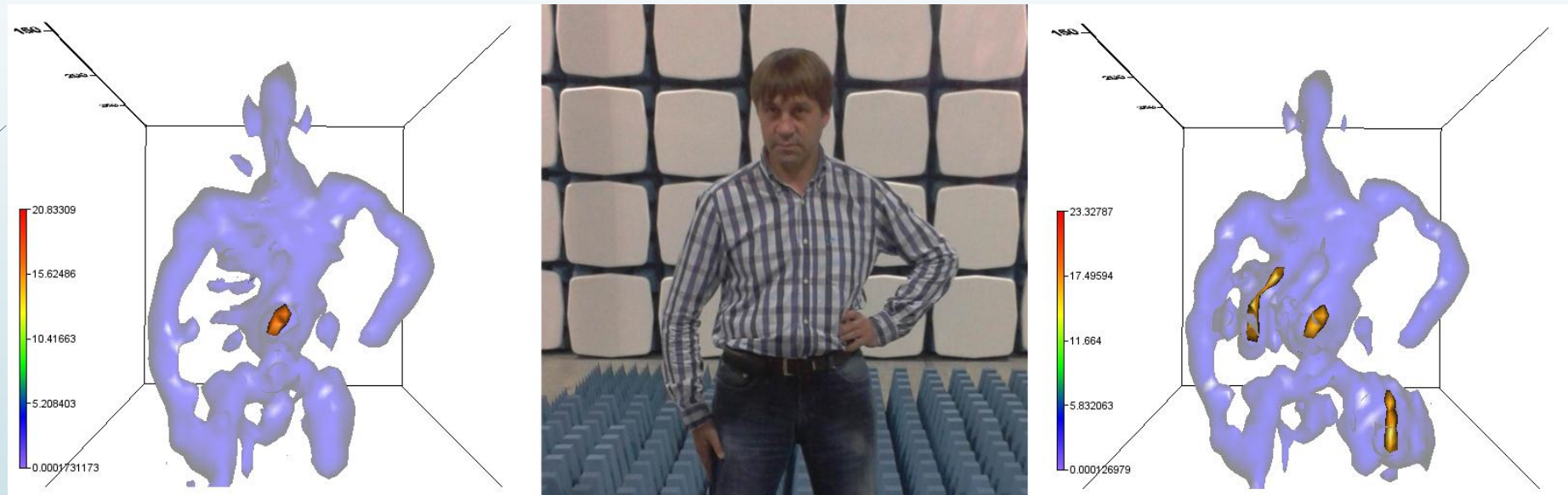


Рис. 1. Фотография (в центре) и трехмерные радиочастотные изображения человека без предметов (слева) и со скрытыми предметами (справа)

Как это может выглядеть



Современные радиолокационные устройства

- ▶ ручные металлодетекторы
- ▶ арочные металлоискатели (в аэропортах)

Недостатки:

- ▶ **необходимо длительное статичное положение человека**
- ▶ экранирующее влияние влажной одежды, пота и покровов тела
- ▶ нет возможности скрыть сам факт досмотра
- ▶ **малая производительность**

Цель работы

- ▶ произвести оценку производительности параллельных вариантов алгоритма синтеза трехмерного изображения, с использованием ресурсов центрального и графического процессора,
- ▶ оценить разрешающую способность локатора и предложить способ её повышения.

Алгоритм синтеза изображений и ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЛОЖНОСТЬ

Исходные данные: набор K сигналов биений $\{s_k(t)\}$ для различных положений антенн приемо-передатчика $\{(x_k, y_k, z_k)\}$.

1. Вычисляем комплексные спектры сигналов биений с помощью преобразования Фурье: $S_k(f) = F\{s_k(t)\}$

Задержка $\tau = f \cdot T_m / \Delta f$, получим набор $\{S_k(\tau)\}$. Здесь T_m - период модуляции, Δf - девиация частоты сигнала. Вычислительная сложность этапа $O(N \cdot \log(N) \cdot K)$,

где N - количество дискретов одного сигнала.

2. Выполняем фазирование для всего набора: $S'_k(\tau) = S_k(\tau) \cdot e^{-j\phi_0(\tau)}$,

где $\phi_0(\tau) = 2\pi(f_0 - \Delta f / 2) \cdot \tau$

Вычислительная сложность этапа $O(N \cdot K)$

3. Для всех координат требуемого объема (x, y, z) выполняется накопление

$$I(x, y, z) = \left| \sum_K S'_k(\tau_k) \right|$$

где τ_k - суммарная задержка отраженного сигнала от точки пространства с координатами (x, y, z) с учётом возможного преломления на границе сред. Вычислительная сложность этапа составляет $O(M \cdot K)$, где $M = X \cdot Y \cdot Z$ - общее количество вокселей ("трехмерных пикселей") синтезируемого изображения, X, Y, Z - разрешение по каждому из измерений изображения.

Таким образом, общая вычислительная сложность алгоритма

$$O(K(N \log(N) + M)).$$

Вычислительные эксперименты

Входные данные:

- ▶ размер изображения **100×100×300** в вокселях,
- ▶ длина набора сигналов биений **K** равнялась **2048**,
- ▶ количество дискретов в сигнале взято **2¹⁶**.

Было проведено сравнение по времени счета программ, использующих инструменты **OpenMP** и векторизацию под процессоры Intel и программ, использующих технологию **CUDA**. Для выполнения БПФ применены библиотеки **FFTW** и **cuFFT** соответственно.

Результаты

Вычисление на многоядерных процессорах

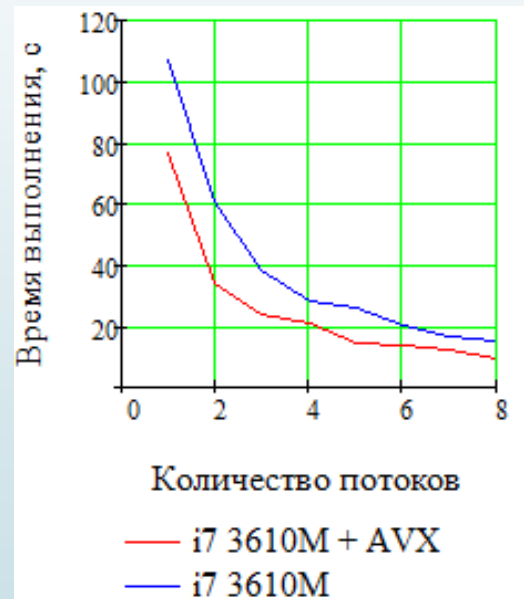


Рис. 2. Время выполнения в зависимости от количества используемых потоков, количество сигналов $K=2048$

Вычисление на графических процессорах

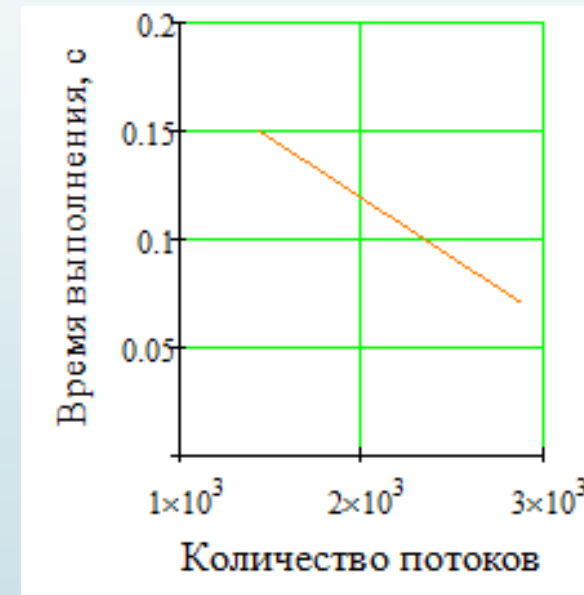


Рис. 3. Время выполнения на видеоускорителе Nvidia GTX 780Ti

Сравнение времени счета программ

Длина набора сигналов биений K	T_1	T_2	T_3
2048	15 сек	10 сек	0.07 сек
752114	74 мин	50 мин	58 сек

T_1 – время счета на 8 ядрах процессора intel Core i7 3610M,

T_2 – время счета на 8 ядрах процессора intel Core i7 3610M
с использованием векторных инструкций

T_3 – время счета на видеокарте Nvidia GTX 780Ti имеющей 2880 ядер CUDA

Оценка разрешающей способности

Трехмерная аппаратная функция системы (изображение идеального точечного отражателя) характеризует пространственную разрешающую способность локатора.

Оценить, насколько далека форма реальной аппаратной функции от идеальной формы. Изображение идеальной аппаратной функции получено с помощью имитационной цифровой модели. Реальная аппаратная функция прибора оценивается с помощью небольшой металлической пластинки.

Параметры зондирования:

- ▶ апертура синтеза 1,3 x 1,2 м, всего 600 точек;
- ▶ девиация частоты ЛЧМ-сигнала 0,85 ГГц;
- ▶ центральная частота 2,163 ГГц.

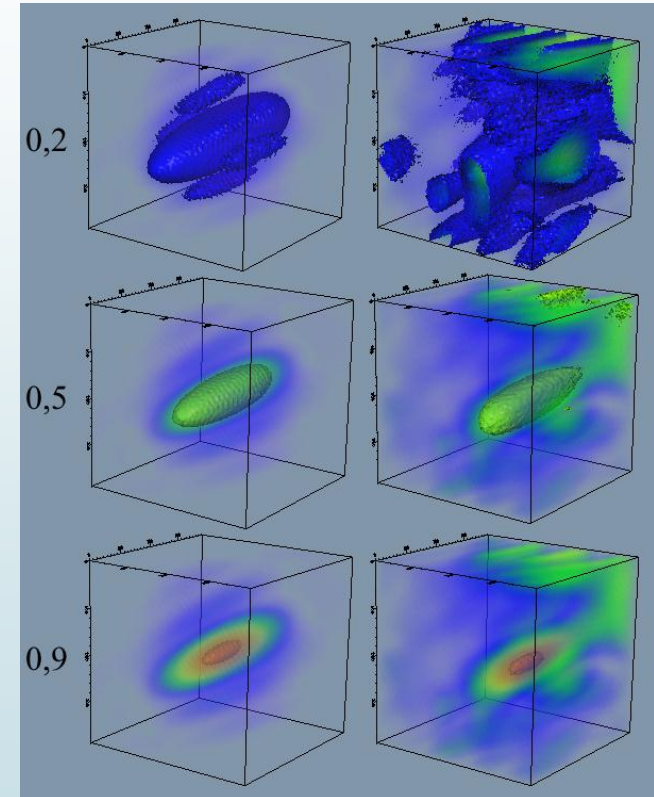


Рис. 4. Вид аппаратной функции идеальной (слева) и реальной (справа) системы по различным уровням

Повышение разрешающей способности

Задача будет описываться трехмерным уравнением вида:

$$g(\xi, \eta, \zeta) = A(f(x, y, z)),$$

где $f(x, y, z)$ - функция исходного трехмерного изображения, $g(\xi, \eta, \zeta)$ - функция полученного изображения, A - некий интегральный оператор преобразования.

Регуляризованный метод наискорейшего спуска:

$$u_{\alpha}^{k+1} = u_{\alpha}^k - \gamma^k \frac{\|S_{\alpha}(u_{\alpha}^k)\|^2}{\|A'(u_{\alpha}^k)S_{\alpha}(u_{\alpha}^k)\|^2 + \alpha \|S_{\alpha}(u_{\alpha}^k)\|^2} S_{\alpha}(u_{\alpha}^k),$$

$$S_{\alpha}(u^k) = A'(u^k)^* (A(u^k) - f_{\delta}) + \alpha (u^k - u^*), \quad A' - \text{производная Фреше оператора } A$$

Заключение

- ▶ проведён анализ вычислительной сложности алгоритма синтеза трёхмерных радиолографических изображений;
- ▶ реализованы параллельные программы;
- ▶ проведено сравнение параллельных алгоритмов, использующих технологии OpenMP, векторных инструкций и CUDA;
- ▶ предложены способы повышения оценки разрешающей способности локатора, основанные на идеях итерационной регуляризации.

Список публикаций

1. Dobryak V. A., Kalmykov Al. A., Kalmykov An. A., Kurilenko A. S. Георадар с синтезом трехмерных изображений. Труды XI международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Екатеринбург, 2012. pp. 160–162
2. Dobryak V. A., Kalmykov Al. A., Kalmykov An. A., Kurilenko A. S. Theory and practice of three-dimensional radio frequency visualization of objects. 2013 23rd Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2013). Sevastopol, 2013, pp. 1169–1170.
3. Dobryak V. A., Kalmykov Al. A., Kalmykov An. A., Kurilenko A. S. Application of MIMO-lines in the problem of three-dimensional radio frequency visualizations of subsurface objects. 2013 23rd Int. Crimean Conf. “Micro-wave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2013). Sevastopol, 2013, pp. 1195–1196.
4. Dobryak V. A., Kalmykov Al. A., Kalmykov An. A., Kurilenko A. S. Additional focusing in the problem of three-dimensional radio frequency visualizations of subsurface objects. 2013 23rd Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2013). Sevastopol, 2013, pp. 1185–1186.
5. Бархатов А.В., Козлов А.С. Быстрое вычисление частотно-временной функции в радиолокационной станции на графических процессорах. Радиолокация и радионавигация, 2015, pp42-46.
6. Ампилов О.В., Пяткин А.К., Топчиев С.А., Никитин М.В. Устройство цифровой обработки сигналов в когерентной моноимпульсной РЛС. М.: ОАО «Радиофизика», 2005.

Спасибо за внимание!