

Параллельные алгоритмы построения и обработки трехмерных радиологических 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. Мислов^{1,2}

Уральский федеральный университет¹, Институт математики и механики УрО РАН²

В работе рассматривается алгоритм синтеза трехмерных радиологических изображений. Оценена вычислительная сложность алгоритма. Проведено распараллеливание алгоритма для многоядерных процессоров и графических ускорителей. Приводятся результаты численных экспериментов, дающие оценку производительности алгоритма в реальных задачах. Предлагается дальнейший путь повышения качества синтезируемых изображений.

Ключевые слова: Трехмерные изображения, подповерхностная радиолокация, быстрое преобразование Фурье, параллельные вычисления, CUDA, OpenMP, обратные задачи, уравнения Фредгольма, итеративная регуляризация, принцип максимума энтропии.

1. Введение

Количество задач, решаемых с помощью методов подповерхностного зондирования [1], в настоящее время лишь увеличивается. Причинами тому являются как повышение доступности качественных компонентов, так и повышение производительности современных вычислительных систем. С применением параллельных или квазипараллельных систем достигается возможность проведения зондирования и построения изображения в течении единиц или долей секунд, что, при применении современных методов повышения производительности алгоритмов обработки, позволяет расширить круг решаемых задач: это высокопроизводительные системы досмотра, поиск скрытых объектов в строительных конструкциях, машинное зрение, археология и т. д.

Известен успешный опыт разработки и применения трехмерного радиологического подповерхностного локатора [2–5]. На рис. 1 приведены результаты его применения в качестве системы досмотра. Основные принципы его работы заключаются в применении зондирующего сигнала с линейной частотной модуляцией; корреляционно-фильтровой обработке отраженного сигнала, внутренней когерентности системы, радиологическом синтезе трехмерных изображений. Это позволяет получить высокую разрешающую способность по дальности за счет применения сверхширокополосного зондирующего сигнала, высокое угловое разрешение за счет синтеза апертуры при использовании малогабаритных антенн, ММО-линеек или матриц. Разработана модификация алгоритма синтеза изображений подповерхностного пространства, учитывающая преломление.

В настоящее время, в целях практического применения, очень актуальным является решение алгоритмическими, программными и аппаратными средствами проблемы сверхбыстрой обработки радиолокационных сигналов и представления результатов их обработки в реальном времени. У разработчиков сейчас есть возможность выбора аппаратного способа реализации сверхбыстрой обработки сигнала. Один из них, это специализированный вычислитель на сигнальных процессорах и программируемых логических схемах, другой, это использовать аппаратные средства персональных компьютеров, такие как центральные процессоры, математические сопроцессоры, графические процессоры. Возможны комбинации этих двух подходов [6,7].

* Работа выполнена при частичной поддержке в рамках постановления Правительства Российской Федерации № 211 (контракт № 02.А03.21.0006) и при частичной поддержке РФФИ (проект №15-01-00629).

В данной работе проводится оценка производительности параллельных вариантов алгоритма синтеза трехмерного изображения, с использованием ресурсов центрального и графического процессора, а также оценивается разрешающая способность локатора и предлагается способ ее повышения.



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

2. Алгоритм синтеза изображений

Алгоритм синтеза изображений состоит из следующих этапов [3]:

1. Имеется набор K сигналов биений $\{s_k(t)\}$ для различных положений антенн приемопередатчика $\{(x_k, y_k, z_k)\}$.

2. Вычисляем комплексные спектры сигналов биений с помощью преобразования Фурье:

$$S_k(f) = F\{s_k(t)\}.$$

Учитывая, что 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.

3. 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 $O(N \cdot K)$.

4. 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 учетом возможного преломления на границе сред. Вычислительная сложность этапа составляет $O(M \cdot K)$, где $M = X \cdot Y \cdot Z$ – общее количество вокселей синтезируемого изображения, X, Y, Z – разрешение по каждому из измерений изображения.

Таким образом, общая вычислительная сложность алгоритма $O(K(N \log(N) + M))$.

Для достижения требуемых характеристик по разрешению синтезируемых изображений накладываются определенные ограничения на все компоненты формулы.

При использовании систем с последовательным зондированием возможно использование распараллеливания при обработке каждого отдельного сигнала на этапах вычисления БПФ и накопления для одновременного вычисления значений для различных координат объема, что

уменьшает сложность до $O\left(\frac{K}{T}(N \log(N) + M)\right)$.

3. Распараллеливание и результаты численных экспериментов

При выполнении вычислений с многопоточной системой данные от каждого канала могут быть обработаны независимо от остальных, что, при одновременном выполнении T потоков, позволяет уменьшить сложность до того же значения. Но при этом в T раз увеличивается объемная сложность алгоритма, что обусловлено необходимостью хранения различных копий данных для каждого потока.

Также возможны комбинации обоих подходов в зависимости от решаемой задачи. В данном случае был выполнен синтез изображения со следующими параметрами: размер изображения $100 \times 100 \times 300$ в вокселях, длина набора сигналов биений K равнялась 2048, количество дискретов в сигнале взято 2^{16} .

При реализации обоих подходов были получены идентичные результаты. На рис. 2 представлены результаты при выполнении в 4 потока. Можно видеть, что время выполнения растет линейно с увеличением количества сигналов.

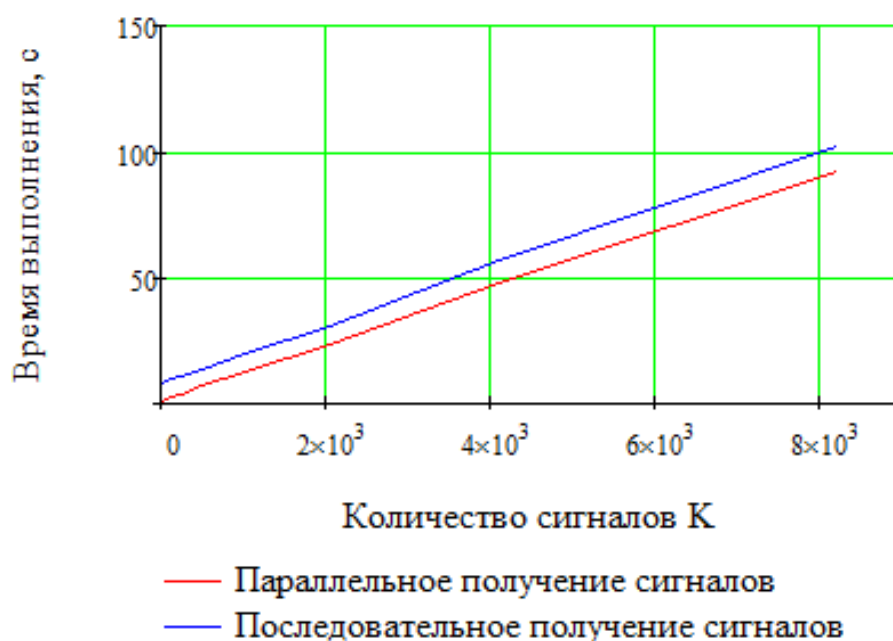


Рис. 2. Время выполнения при различных реализациях алгоритма выполнения в зависимости от количества сигналов

Еще одним путем повышения производительности при реализации является использование различных оптимизаций, зависящих от выбранной архитектуры ЭВМ. Например, современные процессоры Intel поддерживают векторные инструкции, позволяющие существенно повысить производительность при использовании операций с плавающей точкой.

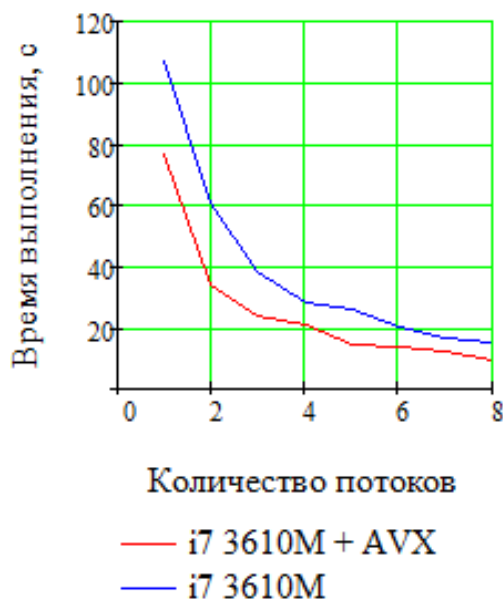


Рис. 3. Время выполнения в зависимости от количества используемых потоков, количество сигналов $K=2048$

Результаты выполнения алгоритма с автоматической оптимизацией под процессоры Intel Core i7, выполненной компилятором Intel C++ compiler 14.0, представлены на рис. 3 в виде зависимости времени выполнения от количества потоков. Распределение на потоки реализовано с использованием OpenMP. Количество сигналов $K=2048$.

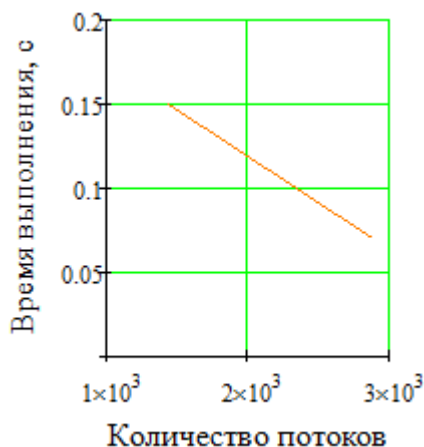


Рис. 4. Время выполнения на видеоускорителе Nvidia GTX 780Ti.

Также алгоритм был реализован для выполнения на GPU с использованием технологии CUDA и проведено исследование эффективности с использованием видеокарты Nvidia GTX 780Ti, имеющей 2880 ядер CUDA и тактовую частоту 875МГц. На рис. 4 видно, что реализованная система позволяет получать изображение с частотой 15 кадров в секунду.

Измерения производительности произведены на ПК с процессором Intel Core i7 3610M с тактовой частотой 2.3ГГц с восемью потоками выполнения, с доступными 16 Гб оперативной памяти. Параметры алгоритма: $M=10^6$, $N=262144$. Указанное время – минимальное среди тысячи замеров при одних условиях. В качестве реализации алгоритма БПФ использованы библиотеки FFTW и cuFFT.

4. Оценка разрешающей способности

Трехмерная аппаратная функция системы (изображение идеального точечного отражателя) характеризует пространственную разрешающую способность локатора. При этом ее диаметры по уровню 0.5 от максимума определяют возможность разрешения рядом расположенных отражателей. Боковые лепестки определяют возможность обнаружения слабых отражателей на фоне мощных.

Цель эксперимента состояла в оценке того, 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.

На рис. 5 показаны результаты сравнения. Изображены поверхности, «натянутые» на разные уровни изображения. Сторона куба на рисунках равна 40 см. Показано, что поперечное и продольное разрешение реальной системы практически максимально при данных параметрах зондирования. Для заданных параметров реальная разрешающая способность в поперечном направлении составила 5,5 см, в продольном – 15 см. Идеальная разрешающая способность в поперечном направлении составит 4,8 см, в продольном – 7 см.

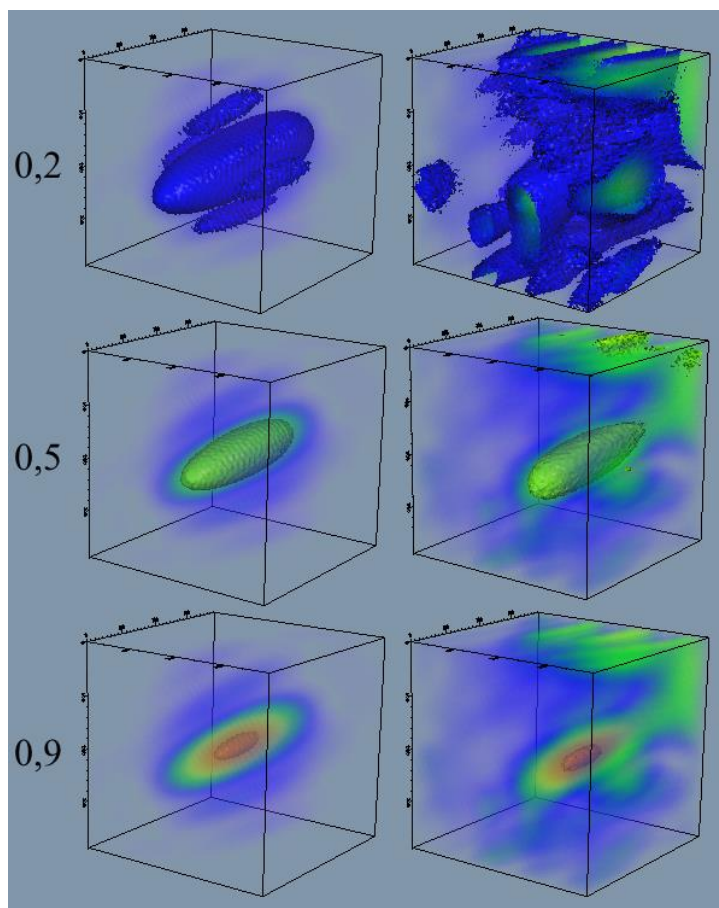


Рис. 5. Вид аппаратной функции идеальной (слева) и реальной (справа) системы по различным уровням.

Уровень боковых лепестков и фоновой засветки существенно больше теоретического значения. Основные причины этого состоят в следующем:

- сигнал прямого прохождения и переотражения в приемо-передающем тракте;

- паразитная амплитудная модуляция сигнала биений и остаточная нелинейность частотной модуляции;
- статическая и динамическая ошибки позиционирования антенн.

5. Повышение разрешающей способности

Дальнейшее повышение качества изображений требует применения вторичной обработки изображений. Для этого предлагается воспользоваться аппаратом решения обратных задач восстановления изображений [8]. Задача будет описываться трехмерным уравнением вида:

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

где $f(x, y, z)$ — функция, описывающая исходное трехмерное изображение, $g(\xi, \eta, \zeta)$ — функция, описывающая полученное изображение, A — некий интегральный оператор преобразования.

Относительно f задача является трехмерным интегральным уравнением Фредгольма первого рода, и поэтому является существенно некорректной задачей. Для ее решения предполагается построить алгоритмы, использующие идеи итерационной регуляризации [9–11] или принцип максимальной энтропии [12, 13].

В рамках первого подхода, исходное уравнение регуляризуется, например, методом Тихонова:

$$A(u) + \alpha(u - u^*) = f_\delta,$$

где u^* — начальное приближение искомой функции (изображения), f_δ — правая часть уравнения (полученное изображение), $\|g(\xi, \eta, \zeta) - f_\delta\| \leq \delta$, α — параметр регуляризации.

Для решения данного уравнения можно использовать регуляризованный метод наискорейшего спуска [14]

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

где $S_\alpha(u^k) = A'(u^k)^* (A(u^k) - f_\delta) + \alpha(u^k - u^*)$, A' — производная Фреше оператора A , u_α^k — приближенное регуляризованное решение (искомое изображение) на k -ой итерации, γ^k — демпфирующие множители.

Поскольку решение обратных задач восстановления трехмерных изображений большого разрешения потребует значительных объемов вычислений, будет актуальным применение мощных вычислителей, например, видеоускорителей или сопроцессоров.

6. Заключение

Проведен анализ вычислительной сложности алгоритма синтеза трехмерных радиологических изображений при последовательной и параллельной реализации. Проведено экспериментальное исследование возможностей повышения производительности алгоритма, использующих распараллеливание вычислений и использование специализированных инструкций процессора. Показана возможность применения видеоускорителей для достижения производительности, достаточной для синтеза изображений в реальном времени.

Литература

1. Гринёв А. Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
2. Добряк В. А., Калмыков Ал. А., Калмыков Ан. А., Куриленко А. С. Георадар с синтезом трехмерных изображений // Труды XI международной научно-технической конференции “Физика и технические приложения волновых процессов”. Екатеринбург, 2012. С. 160–162.
3. 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. P. 1169–1170.
4. 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. P. 1195–1196.
5. 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. P. 1185–1186.
6. Бархатов А. В., Козлов А. С. Быстрое вычисление частотно-временной функции в радиолокационной станции на графических процессорах // Радиолокация и радионавигация. 2015. С. 42–46.
7. Ампилов О. В., Пяткин А. К., Топчиев С. А., Никитин М. В. Устройство цифровой обработки сигналов в когерентной моноимпульсной РЛС. М.: ОАО “Радиофизика”, 2005. 2 с.
8. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М: Радио и связь, 1986. 304 с.
9. Bakushinsky A., Goncharsky A. Ill-Posed Problems: Theory and Applications. London: Kluwer Akad. Publ. 1994. 240 P.
10. Васин В. В., Еремин И. И. Операторы и итерационные процессы фейеровского типа. Теория и приложения. Екатеринбург: УрО РАН. 2005. 200 с.
11. Kaltenbacher B., Neubauer A., Scherzer O. Iterative regularization methods for nonlinear ill-posed problems // Walter de Gruyter. 2008. Vol. 6. 200 P.
12. Ables J. G. Maximum Entropy Spectral Analysis // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 1974. Vol. 15. P. 383–393.
13. Friden B. R. Restoration with maximum likelihood and maximum entropy // JOSA. 1972. Vol. 62, No. 4. P. 511–518.
14. Vasin V. V. Irregular nonlinear operator equations: Tikhonov’s regularization and iterative approximation // J. Inverse & Ill-Posed Problems. 2013. Vol. 21, No. 1. P. 109-123.

Parallel algorithms for synthesizing and processing of 3D radio holographic images

Al. A. Kalmykov¹, V. A. Dobryak¹, An. A. Kalmykov¹, A. S. Kurilenko¹,
E. N. Akimova^{1,2}, A. F. Skurydina^{1,2}, V. E. Misilov^{1,2}

Yeltsin Ural Federal University¹, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences²

This paper is devoted to the algorithm for synthesizing of 3D radio holographic images. Computational complexity of the algorithm is estimated. The algorithm was parallelized for multicore processors and GPUs. The numerical experiments estimating the algorithm performance for real applications were carried out. The further way to improve the quality of synthesized images is proposed.

Keywords: 3D images, subsurface radiolocation, fast Fourier transform, parallel computations, CUDA, OpenMP, inverse problems, Fredholm equations, iterative regularization, principle of maximum entropy.

References

1. Grinyov A. U. Voprosy podpoverhnostnoi radiolocatsii [Questions of subsurface radiolocation]. Moscow: Radiotekhnika, 2005. 416 P.
2. Dobryak V. A., Kalmykov Al. A., Kalmykov An. A., Kurilenko A. S. Georadar s syntezhom trekhmernykh izobrazhenii [Georadar with 3D images synthesis]. Trudy XI mezhdunarodnoi nauchno-technicheskoi konferencii "Physica i technicheskie prilozheniya volnovykh processov" [Proceedings of XI international scientific and technical conference "Physics and technical applications of wave processes"]. Yekaterinburg, 2012. P. 160–162.
3. 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, P. 1169–1170.
4. 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, P. 1195–1196.
5. 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, P. 1185–1186.
6. Barhatov A. V., Kozlov A. S. Bystroe vychislenie chastotno-vremennoi functsii v radiolocatsionnoi stantsii na graphicheskikh processorah. [Fast calculation of time-frequency function in radar using GPUs]. Radiolocatsiya i radionavigatsiya [Radiolocation & Radionavigation]. 2015. P. 42–46.
7. Ampilov O. V., Pyatkin A. K., Topchiev S. A., Nikitin M. V. Ustroistvo tsifrovoi obrabotki signalov v coherentnoi monoimpulsnoi RLS [Digital signal processing in coherent monopulse radar]. Moscow: OAO "Radiophysica", 2005. 2 P.
8. Vasilenko, G. I., Taratorin A. M. Vosstanovlenie izobrazhenii [Image restoration]. Moscow: Radio i svyaz, 1986. 304 P.
9. Bakushinsky A., Goncharsky A. Ill-Posed Problems: Theory and Applications. London: Kluwer Akad. Publ. 1994. 240 P.
10. Vasin V. V., Eremin I. I. Operators and iterative processes of Fejér type: theory and applications. Walter de Gruyter. 2009. Vol. 53. 218 P.

11. Kaltenbacher B., Neubauer A., Scherzer O. Iterative regularization methods for nonlinear ill-posed problems // *Walter de Gruyter*. 2008. Vol. 6. 200 P.
12. Ables J. G. Maximum Entropy Spectral Analysis // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 1974. Vol. 15. P. 383–393.
13. Friden B. R. Restoration with maximum likelihood and maximum entropy // *JOSA*. 1972. Vol. 62, No. 4. P. 511–518.
14. Vasin V. V. Irregular nonlinear operator equations: Tikhonov's regularization and iterative approximation // *J. Inverse & Ill-Posed Problems*. 2013. Vol. 21, No. 1. P. 109-123.