МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

УДК 681.327.12

ШВИДКИЙ FDK АЛГОРИТМ ДЛЯ ТРИВИМІРНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ В РЕНТГЕНІВСЬКІЙ ТОМОГРАФІЇ

О.В. Кабанова, С. А. Чеховський
ІФНТУНГ, 76019 м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

Первый практический алгоритм для трехмерной реконструкции из проекций конусного луча представили Филдкамп, Девис и Кресс в 1984 году (FDK-реконструкция). В статье представлена основная идея оптимизации данного алгоритма, в результате которой етап обратного проецирования будет исполняться по $O(N^3 lnN)$-операции вместо $O(N^4)$-операции, необходимой для традиционного обратного проецирования. Операция обратного проецирования предшествует операции перепаковки данных, в результате чего проекционные данные становятся как при параллельной схеме сканирования. Реализация алгоритма происходит с помощью составления таблицы и требует $O(N^3)$ введений значений в память, в результате чего качество изображения будет того же порядка, что и при традиционной FDK – реконструкции.

The first practical algorithm for 3D-reconstruction from cone-beam projections is due to Feldkamp, Davis, and Kress (1984). We present a modified version of this algorithm, which performs the backprojection in $O(N^3 lnN)$ steps instead of the $O(N^4)$ steps required for traditional backprojection. Backprojection is preceeded by a rebinning step to oblique parallel beams. A table look-up implementation requires $O(N^3)$ entries memory and seems to give an image quality comparable to Feldkamp reconstruction.

За період експлуатації газових і нафтових родовищ характеристики бурового обладнання і продуктивних пластів змінюються так, як і характеристики родовищ загалом, але на жаль не в кращий бік. Ці зміни контролюються технологічними і геологічними службами, які згідно з регламентом, встановлюють оптимальний режим експлуатації свердловин.

Для розв'язання актуальних на сьогоднішній день завдань в нафтогазовій галузі необхідне удосконалення техніки і технології буріння, що ставить підвищені вимоги до використання бурового інструменту, а також вимірювання витрати багатофазного потоку продукції з свердловини та знання концентрації компонентів нафтогазової продукції, що видобувається на даній свердловині. Крім цього, при монтажі магістральних трубопроводів необхідний контроль якості зварних з'єднань.

Визначення і контроль перелічених параметрів дає змогу досягти ефективної розробки родовищ:

- забезпечення ефективної і надійної роботи свердловин за рахунок оптимального управління;
- своєчасне виявлення і ліквідація відхилень від заданого режиму;
- попередження аварійних ситуацій з метою технічної і екологічної безпеки.

Але реалізація цих цілей можлива лише за наявності достатнього інформаційного забезпечення, яке можна отримати, зокрема, при використанні неруйнівного контролю зварних з'єднань. Такий контроль найчастіше проводять магнітографічним або радіографічним методами. Але внаслідок конструктивного обмеження форми зварного шва магістрального трубопроводу даний контроль визначеними методами проводити неможливо [1]. При радіографії криволінійних зварних швів врізок малого і великого діаметра використання схеми фронтального просвічування призводить до нерізкості зображення і відносного збільшення розмірів дефектів на плівці. Для контролю бурових установок існує так само багато методів, але аварійність на даний час не зменшилася. Науково-технічне завдання контролю багатофазного потоку свердловини не має поки що ні теоретичного, ні технічного вирішення. Контроль режимів роботи газоконденсатних і нафтових свердловин здійснюється з використанням громіздких, металоємних замірних сепараційних установок, контроль газових свердловин – за результатами спеціальних газодинамічних досліджень, які потребують виконання великого обсягу робіт і супроводжуються втратами продукції і викидами газу в атмосферу.

Загалом традиційні методи та засоби контролю і управління режимами експлуатації свердловин за оперативністю і достовірністю результатів не відповідають сучасним потребам галузі. Так, ситуація породжує прийняття суб'єктивних, далеко неоптимальних управлінських рішень, що нерідко призводить до передчасного обводнення, руйнування привибійної зони, абразивного зношування обладнання та порушення технічної і екологічної безпеки розробки родовищ.

Вибір методу неруйнівного контролю (НК) для розв'язання задач дефектоскопії, товщинометрії, структуроскопії і технічної діагностики залежить від параметрів контрольованого об'єкта та умов його обстеження. Жоден з методів НК не є універсальним, оскільки не забезпечує наявності повної інформації про об'єкт контролю, і, отже, не може задовольнити в повному обсязі вимоги практики. Як базовий засіб вимірювання при контролі об'єктів необхідно використовувати апаратно-програмні комплекси зі збору й обробки вимірюваної інформації на базі персональних комп'ютерів, що дають високу точність і оперативність вимірювань, надають широкі можливості при обробці і збереженні результатів, багатофункціональність, високу мобільність, відносно низьку вартість (порівняно з загальною вартістю замінних приладів). Широкого використання комп'ютерної томографії для розв'язку розглянутих задач поки що немає через відсутність до сьогоднішнього дня необхідного технічного забезпечення. Але швидкі темпи розвитку у даному напрямку дають змогу здійснити апаратну реалізацію універсального приладу для контролю якості.

На сьогоднішній день комп'ютерна томографія є найбільш значним досягненням інформаційних ідей інтроскопії у вивченні внутрішньої структури досліджуваних об'єктів, бо при її застосуванні забезпечується висока точність вимірювання геометричних параметрів, а чутливість є на порядок вищою, ніж при інших методах контролю.

Переваги методу рентгенівської комп'ютерної томографії при контролі об'ємної структури сучасних промислових матеріалів, багатошарових конструкцій є настільки значними, що істотно розширюють сформовані уявлення про потенційну ефективність застосування іонізуючих випромінювань і неруйнівного контролю загалом, оскільки є можливість відновлювати внутрішню структуру товстих, неоднорідних промислових виробів складної форми без взаємного накладення тіней різних елементів, з чутливістю до локальних порушень суцільності, включень, наявності відхилення густини матеріалу і малим відхиленням геометричної структури у десятки разів більшою, ніж у традиційних методах контролю.

У технічній діагностиці суть методу рентгенівської реконструктивної томографії зводиться до відновлення просторового розподілу лінійного коефіцієнта послаблення рентгенівського випромінювання за об'ємом контрольованого об'єкта в результаті обчислювальної обробки тіньових проекцій, отриманих при рентгенівському просвічуванні об'єкта в різних напрямах. Є можливість детально контролювати геометричну структуру і характер об'ємного розподілу щільності й елементного складу матеріалів без руйнування самого виробу.

В комп'ютерній томографії процедура відновлення зображення обов'язково повинна відповідати схемі сканування. Іноді сканування всього перерізу є необов'язковим або небажаним, коли нас цікавить певна ділянка об'єкта; іноді можлива протилежна ситуація – необхідно отримати об'ємну структуру об'єкта, що дозволяє, наприклад, не тільки якісно оцінити його, але й дати кількісну оцінку дефектів (глибина залягання і розмір тріщин, інорідних включень тощо). Для отримання тривимірного зображення в томографії можна послідовно сканувати перерізу за січенням (двовимірна реконструкція). Але в деяких випадках, коли важлива швидкість контролю або контролюється рухомий, або змінний в часі об'єкт, таке зведення до послідовності двовимірних задач стає неможливим. В такому випадку необхідно розв'язати саме тривимірну задачу томографії, коли лінійні інтеграли по всіх ділянках об'єкта обчислюються одночасно. Як ефективне джерело проекційних даних для тривимірної реконструкції застосовується конусна схема сканування – тривимірний аналог віялової схеми. Джерело рухається по колу, випромінюючи пучок променів у формі конуса, які після взаємодії з об'єктом реєструються площадкою детекторів. Хоча проекції, отримані при використанні конусного пучка променів, мають переваги перед віяловим пучком, в сучасних машинах для двовимірної реконструкції плоских об'єктів все одно часто використовуються так звані багатоперерізні алгоритми реконструкції. Відомо [2], що такі алгоритми реконструкції є неоптимальними. Будучи адаптацією й апроксимацією алгоритмів для реконструкції двовимірного зображення, вони не дають досить якісного зображення навіть при розширенні вибірки проекційних даних. Будь-яке збільшення конусного кута пучка випромінювання і зменшення кута проектування не призведе до їх оптимізації [3]. Отже, основою успішного розвитку томографії є розробка нових ефективних алгоритмів реконструкції зображення, а не технічне вдосконалення самого томографа. Хоча проблема реконструкції зображення вирішена Радоном ще у 1917, даний напрямок стійко розвивається і значний темп розвитку рентгенівської томографії обумовлений досягненнями в розробці саме алгоритмів реконструкції. Нові тривимірні циклічні алгоритми реконструкції для конусного променя, які підвищують швидкодію і якість контролю, використовують тривимірне зворотне перетворення.

Перший практичний алгоритм для тривимірної реконструкції для проекційних даних від конусного пучка променів належить Філдкампу, Девісу і Кресу – FDK-алгоритм [2]. Нами пропонується оптимізована модифікація даного алгоритму, в якому зворотне проектування виконується за $O\left(N^3 \ln N\right)$-операцією замість $O\left(N^4\right)$-операції, які притаманні традиційному зворотному проектуванню. Реалізація алгоритму вимагає $O\left(N^3\right)$ - введень значень у пам'ять, і за попередніми підрахунками отримується зображення з якістю одного порядку як і у традиційному FDK-методі.

Розглянемо джерело, що обертається з кутом β в xy-площині по колу радіусом R. Детектор розміщений по циліндричній поверхні довільного радіуса з центром за межами траєкторії джерела. Промені, що реєструються одним рядком детектора, формують віяло променя. Будь-який промінь віяла характеризується кутом між ним і центральним променем віяла, так званим віяловим кутом γ і кутом між ним та середньою площиною, так званим конусним кутом, k. Координата рядка q детектора визначається як $q = R \cdot tgk$. Детектор, обмежений по висоті величиною $\pm q_{max}$ і значенням віялового кута $\pm\gamma_{max}$, реєструє виміряне проекційне значення $p(\beta,\gamma,q)$.

Набір проекційних даних, отриманих від конусної схеми сканування при коловій траєкторії джерела $p(\beta,\gamma,q)$, не може бути перетворений (перепакований) до даних від паралельної схеми сканування $p^P(\theta,t,q)$. Однак таке перетворення можливо застосувати до проекційних даних, зареєстрованих окремо кожним рядком детектора (двовимірна паралельна перепаковка проекційних значень). Так звані перепаковані паралельні проекційні дані [2] отримуються з

$$p^P(\theta,t,q) = p(\beta,\gamma,q), \tag{1}$$

де

$$\beta = \theta - \gamma\,, \qquad \gamma = arcsin\frac{t}{R}\,,$$

а індекс рядка q фіксується. Промені, з яких отримуються проекційні дані $p^P(\theta,t,q)$, є паралельними до осі z, як зображено на рис. 1. Крім того, циліндрична поверхня детекторів може бути представлена як віртуальний детектор з горизонтальними рядками з координатами q, так само як і в реальному детекторі.

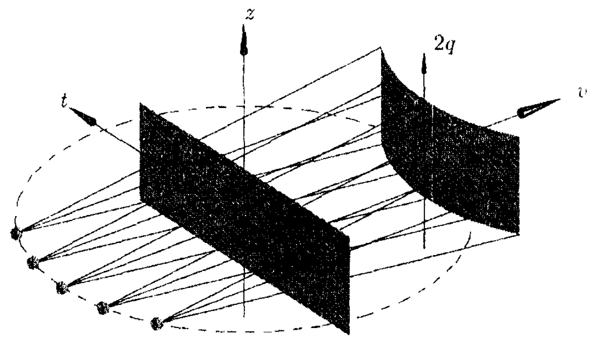

Рисунок 1 - Схема отримання проекційних даних після перепаковки

Промені, що фіксуються одним рядком детектора, перетинають віртуальний площинний детектор, розташований на z-осі по сегментах еліптичних кривих $z_q(t) = q\sqrt{1-(t/R)^2}$. Форма циліндричного віртуального детектора обирається такою, щоб всі промені, що реєструються однаковим рядком, перетинали детектор в однакових по осі z значеннях.

Перепаковані дані, отримані з (1), нормуються і фільтруються згідно з

$$\tilde{p}^P(\theta,t,q) = \frac{R}{\sqrt{R^2+q^2}}\, p^P(\theta,t,q) * g^P(t), \tag{3}$$

де $g^P(t)$ - фільтр (як правило, так званий ramp-фільтр), розроблений для даних від паралельної схеми сканування. Щоб отримати значення шуканої функції, перепаковані, пронормовані і профільтровані проекційні дані треба піддати зворотному проектуванню. Спрощена формула зворотного проектування може бути записана [2]

$$f(x,y,z) = \int_{\theta=0}^{2\pi} \tilde{p}^P(\theta, t(x,y,\theta), q(x,y,z,\theta))d\theta \approx$$
$$\approx \frac{2\pi}{N_\theta}\sum_{i=0}^{N_\theta - 1}\tilde{p}[n, k(x,y,\theta), m(x,y,z,\theta)], \tag{4}$$

де координата детектора, на який проектується воксель (x, y, z), визначається

$$t(x,y,\theta) = y\cos\theta - x\sin\theta\,,$$

$$q(x,y,z,\theta) = \frac{zR}{\sqrt{R^2 - t(x,y,0)^2} + x\cos\theta + y\sin\theta}\,. \tag{5}$$

Для реконструкції точки зображення (x,y,z) необхідно виконати зворотне проектування над проекційними даними від всіх променів, що перетнули даний воксель. Реконструкція двовимірного перерізу об'єкта або тривимірних об'єктів має дві суперечливі цілі: швидкість і точність. У клінічній практиці, з одного боку, часто бажано отримати реконструкцію за декілька секунд, а з другого, - відновлене зображення має бути з високою роздільною здатністю, щоб уникнути неправильного тлумачення результатів контролю або діагностики. Нами пропонується новий підхід, який дасть можливість даний алгоритм застосовувати для тривимірної реконструкції з прискоренням і збереженням якості зображення.

У проекційному просторі зворотне проектування може розглядатися як процес сумування значень вздовж синусоїдної кривої. Ідея швидкого зворотного проектування полягає в тому, щоб суму (4) розбити на проміжні суми, які можуть використовуватися для обчислення інших точок у наступних кроках. За стратегією "прискорення" алгоритму таке сумування вздовж синусоїди апроксимовується сумою коротких кривих (сегментів синусоїди), які обчислюються з попередньо обчислених коротших кривих і так далі. В [4] вперше застосовано термін "зв'язки" для таких кривих. Довжина зв'язку визначається як різниця θ-координат між проекційними значеннями його кінцевих точок. Усі зв'язки мають свої кінцеві точки на сітці перепакованого тривимірного проекційного простору.

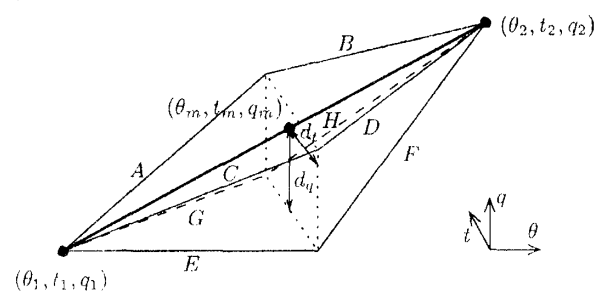

Рисунок 2 - Головний крок алгоритму. Значення зв'язку обчислюється з восьми значень зв'язків удвічі коротших. Для спрощення, зв'язки наведені як прямі лінії, в дійсності вони є вигнутими

Суть алгоритму – це обчислення значення будь-якого зв'язку як суми восьми зв'язків з удвічі коротшою довжиною. Але для визначення потрібних коротших зв'язків необхідно обчислити середню точку (θ_m, t_m, q_m) шуканого зв'язку. $(\theta_1, t_1, q_1; \theta_2, t_2, q_2)$ - це зв'язок, між точками (θ_1, t_1, q_1) і (θ_2, t_2, q_2), який необхідно обчислити, а $I[n_1, k_1, m_1; n_2, k_2, m_2]$ - його відповідне значення, ідентичне $\int_{\theta_{n_1}}^{\theta_{n_2}} \widetilde{p}(\theta, t, q) d\theta$. Перші дві координати середньої точки знаходяться аналогічно, як і у двовимірному випадку, а саме:

$$\theta_m = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \text{ і } t_m = \frac{t_1 + t_2}{2\cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right)}. \tag{6}$$

Дві кінцеві точки зв'язку у проекційному просторі відповідають двом променям у просторі зображення. На відміну від двовимірної реконструкції ці два промені майже ніколи не перетинаються у тривимірному просторі. Отже, відповідність між зв'язками і точками зображення є неоднозначною, що ускладнює обчислення третьої координати q_c середньої точки. Дану неоднозначність ми пропонуємо розв'язати за допомогою такої методики.

Спочатку обчислимо z_m як

$$z_m = \frac{z_1 + z_1}{2}, \tag{7}$$

де

$$z_1 = q_1 \frac{\sqrt{R^2 - t_1^2} + \upsilon_1}{R} \text{ і } z_2 = q_2 \frac{\sqrt{R^2 - t_2^2} + \upsilon_2}{R}. \tag{8}$$

Остаточно можна записати

$$q_m = \frac{z_m R}{\sqrt{R^2 - t_m^2} + x\cos\theta_m + y\sin\theta_m}. \tag{9}$$

На рис. 2 зображено обчислення нового значення зв'язку при двовимірній інтерполяції

$$\varpi_t \varpi_q (A + B) + \varpi'_t \varpi_q (C + D) + \\ + \varpi'_t \varpi'_q (E + F) + \varpi\varpi'(G + H)_q. \tag{10}$$

Вагові коефіцієнти інтерполяційної функції можуть, наприклад, бути білінійними, отже:

$$\varpi_t = \frac{d_t}{\Delta t}, \quad \varpi'_t = 1 - \varpi_t, \\ \varpi_q = \frac{d_q}{\Delta q}, \quad \varpi'_q = 1 - \varpi_q, \tag{11}$$

де Δt і Δq відстань дискретизації по детектору після перепаковки і d_t, і d_q, визначаються, як на рис. 2.

Оскільки промені з кінцевими точками π-зв'язку не перетинаються навіть, коли проектуються на середню площину, ми не можемо створити будь-який зв'язок, довший за $\frac{\pi}{2}$. Значення вокселя визначається як сума чотирьох інтерпольованих $\frac{\pi}{2}$-зв'язків.

Для застосування алгоритму необхідно здійснити деякі попередні обчислення. Спочатку для вокселів, які будуть відновлюватися, потрібно визначити, які $\frac{\pi}{2}$-зв'язки є необхідними для обчислення їх значень. Індекси цих зв'язків зводяться в таблицю. В наступному кроці визначаються і зводяться в таблицю $\frac{\pi}{4}$-зв'язки, які є необхідними для виконання головного кроку (10) на основі вже зведених у таблицю $\frac{\pi}{2}$-зв'язків. Такі операції мають бути виконані для всіх зв'язків, закінчуючи табуляцією необхідних 2-зв'язків, поступово визначаючи необхідні зв'язки, рухаючись від більш довгих до менших зв'язків. Переважно в цей самий час, вагові коефіцієнти інтерполяційної функції, отримані з рівняння (11), також заносяться в таблицю. Необхідно звернути увагу на те, що всі значення таблиці залежать тільки від схеми сканування, а не від реконструйованого об'єкта і їх достатньо попередньо обчислити один раз і назавжди.

Обчислення значення зв'язку спрощується до мінімуму, як тільки виготовлені таблиці. Дане обчислення і визначає сам алгоритм, який здійснюється за так званий "час виконання". Починаючи з найкоротших зв'язків і рухаючись до більших, даний час не включає час обчислення середньої точки або вагових коефіцієнтів інтерполяційної функції, а тільки обчислення основної інтерполяції (10).

Дерево визначається як сукупність зв'язків однакової довжини, які починаються з одній точці. Зв'язки дерева простягаються в обох t- і q-напрямах. Для визначення точної форми дерева необхідно брати до уваги дискретність значень реконструкції, але на початку можливо знехтувати даним фактом. На рис. 3 наведена схема, завдяки якій геометрчно можливо отримати загальну форму ідеального $\frac{\pi}{2}$-дерева з коренем у точці (θ_1, t_1, q_1). Точки зображення, реконструкція яких вимагає значень зв'язків цього дерева, знаходяться всередині об'єкта вздовж променя (θ_1, t_1, q_1). Після повороту системи на кут $\frac{\pi}{2}$ ці точки зображення відхиляються від променя і проектуються на детектор по кривій (рис.3)

$$q_2(t_2) = q_1 \frac{\sqrt{R^2 - t_1^2} + t_2}{\sqrt{R^2 - t_2^2} + t_1}, \qquad (12)$$

$$-\sqrt{t_{max}^2 - t_1^2} \le t_2 \le \sqrt{t_{max}^2 - t_1^2}.$$

Це стосується частини променя, що проходить через циліндричну область поля зору (FOV), яка позначена пунктирним колом.

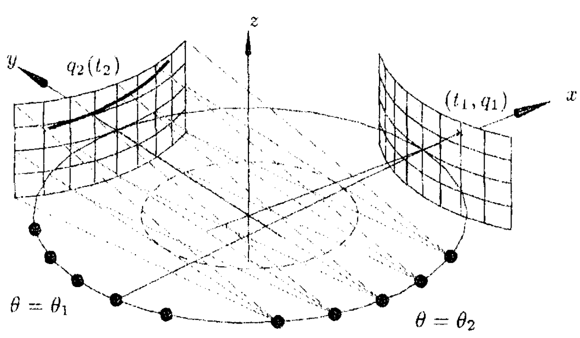

Рисунок 3 - Відхилення кінцевих точок $\pi/2$-дерева з коренем в (θ_1, t_1, q_1)

Зв'язки, що починаються в (θ_1, t_1, q_1) з набором кінцевих точок $q_2(t_2)$, формують ідеальне дерево. І оскільки існує тільки одне значення q_2 для кожного значення t_2 з виразу (12), дерева мають форму віяла, а не конуса. Ідеальна форма більш коротших дерев може бути отримана аналогічним чином шляхом зміни різниці проекційних кутів, більших за $\frac{\pi}{2}$, до величини бажаної довжини дерева.

Для визначення обчислюваної складності необхідно дослідити дерево, що створюється в подальшому. При реконструкції дискретних значень промінь (θ_1, t_1, q_1) з рис. 3 перетинає вокселі по 2x2 товстих трубах навколо зображеного променя. При проектуванні на детектор товщина труби масштабується коефіцієнтом апроксимації $R/(R+t_1)$, який визначається відстанню до детектора і коефіцієнтом апроксимації $1/\cos k$, що визначається конусним кутом. Отже, результуюча товщина проекції, що реєструється рядками детектора, є

$$\frac{2R\Delta z}{\Delta q(R+t_1)\cos k} \underset{\approx}{<} 5 \qquad (13)$$

для стандартних значень параметрів ($\Delta z = \Delta q$, $k_{max} = 10°$, $t_{max} = R/2$).

Кожний i-крок процесу "попереднього обчислення" ділить на 2 товщину довгого дерева d_{i-1}, але збільшує запас точності, необхідної для інтерполяції в головному кроці, і таким чином отримується приблизна товщина короткого дерева

$$d_i = \lfloor d_{i-1}/2 \rfloor + 2. \qquad (14)$$

Отже, товщина зводиться до області 3 або 4 рядків детектора незалежно від заданої роздільної здатності.

2-дерев є удвічі більше ніж 1-дерев, оскільки удвічі більше є θ-позицій, з яких вони починаються. Припустимо, що 1-дерево складається з c-зв'язків. Загальна кількість зв'язків, створених від другого кроку до $\lg N_\theta - 2$ кроку, є

$$\sum_{i=2}^{\lg N_\theta - 1} \underbrace{N_t N_\theta N_q 2^{1-i}}_{\text{кількість дерев}} \cdot \underbrace{c2^{i-1}}_{\text{кількість зв'язків у дереві}} =$$

$$= cN_t N_\theta N_q (\lg N_\theta - 3) \in O(N^3 \log N). \qquad (15)$$

де N_θ, N_t, N_q - кількість кутів проектування, стовпчиків і рядків детектора відповідно.

Кількість зв'язків, що створюється у кожному кроці, наведена в таблиці 1. Це дає можливість оцінити кількість операцій для однієї точки, необхідних для обчислення всіх її зв'язків. Результати подані в таблиці 2 в порівнянні з традиційним FDK - методом. Кількість поданих операцій для порівняння не включає індексацію або геометричні обчислення, оскільки це подавало б розроблений алгоритм більш ефективним при використанні таблиці попередніх обчислень.

Для реалізації алгоритму необхідні дві основні області пам'яті: перша область для обчислених значень зв'язку, друга – для таблиці конструкції зв'язку, в якій містяться коефіцієнти інтерполяції і адреси значень зв'язку. В ролі першої області може виступати операційна на-

Таблиця 1 - Необхідна кількість зв'язків при $N = N_x = N_y = 2N_z = N_q = N_\theta / 2 = 128$

Розмір зв'язку	Кількість унікальних зв'язків	Кількість однакових зв'язків	Загальна кількість, 10^6
Вокселі	8025088	1	0,8
64	3052781	4	12
32	2477849	8	20
16	1462633	16	23
8	845834	32	27
4	544317	64	35
2	380836	128	49
Всього	**9589338**		**167**

Таблиця 2 - Необхідна кількість операцій для точки при реконструкції методом швидкого і традиційного зворотного проектування при параметрах $N = N_x = N_y = 2N_z = N_q = N_\theta / 2$

N	64	128	256	512	1024
Традиційне зворотне проектування	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 19^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{12}$
Швидке зворотне проектування	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 19^9$	$2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{12}$

м'ять (ОЗП), а для іншої – постійна пам'ять (ПЗП).

Значення зв'язків, що створюються в кожному $lg\, N_\theta$ кроці алгоритму, необхідні тільки як вхідні дані для наступного кроку і можуть бути відкинуті. Отже, оперативна пам'ять, що зберігає ці значення, може бути розбита на дві частини: одна достатньо велика для збереження значень, обчислених в попередньому кроці, і інша, досить велика, для поточних обчислень. Після того як один крок виконаний, вміст першої частини стає непотрібним і може використовуватися для наступного кроку. Таблиця 1 ілюструє, що кількість зв'язків зменшується з кожним наступним кроком. Отже, необхідний об'єм пам'яті визначається кількістю 2-зв'язків, яка завжди рівна $O(N^3)$.

Форма ідеального дерева є незалежною від θ-координати свого кореня. Беручи до уваги ефекти дискретизації, дана властивість не завжди буде справедлива; кілька зв'язків у межах дерева може відрізнятися від зв'язків інших дерев вздовж θ -осі. Незважаючи на такі маленькі відмінності, можливо створити таблиці конструкції зв'язку θ-незалежними, що зменшить загальну кількість значень в ній до

$$\sum_{i=2}^{lg N_\theta - 2} \underbrace{N_t N_q}_{\text{кількість дерев}} \cdot \underbrace{c2^{i-1}}_{\text{кількість зв'язків у дереві}} = \qquad (16)$$

$$2cN_t N_q \left(2^{\lg N_\theta - 3} - 1\right) \in O\left(N^3\right)$$

Інша перевага створення θ-незалежної таблиці – це можливість припущення, що всі дерева починаються в точці з координатою $\theta_1 = 0$, що спрощує геометричні обчислення (6) - (9).

Отже, апроксимація синусоїдної кривої, вздовж якої здійснюється сумування короткими сегментами, призводить до значного прискорення алгоритму. Прискорення здійснюється завдяки тому, що одні й ті ж зв'язки (наперед обчисленні) неодноразово використовуються для обчислення значень функції зображення у різних точках. Головне завдання полягає у визначенні коротших зв'язків, за допомогою яких буде обчислений удвічі довший зв'язок. Для цього обчислюється середня точка шуканого зв'язку. Оскільки промені кінцевих точок π-зв'язку не перетинатимуться навіть при проектуванні їх на середню площину, то потреба будувати зв'язки, більші за $\pi/2$, відпадає. Основний крок алгоритму (10) вимагає 4-ох множень і 7-ми додавань, якщо всі чотири вагові коефіцієнти інтерполяції протабульовані. В результаті значення будь-якого вокселя обчислюється як сума чотирьох інтерпольованих $\pi/2$ -зв'язків.

Як видно з рис. 4, швидкий FDK- алгоритм показує тим кращі результати, чим більша роздільна здатність реконструйованого об'єкта або чим більший масив проекційних даних. Як правило, на практиці в сучасних томографах реконструюють зображення розміром 512x512 і більше. Для відновлення тривимірного об'єкта розміром 512x512x256 традиційним FDK- алгоритмом необхідно $5 \cdot 10^{11}$ операцій.

Швидкий FDK-алгоритм може відновити зображення розміром 512x512x256 за два з половиною рази менше операцій при збереженні якості зображення або за таку кількість операцій відновлює зображення з роздільною

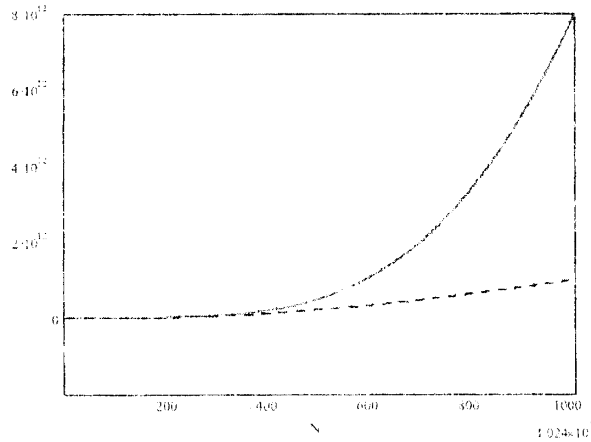

Рисунок 4 - Залежність кількості операцій для традиційного (суцільна лінія) і швидкого зворотного проектування (штрихова лінія) від роздільної здатності (N) зображення (масиву проекційних значень)

здатністю 739x739x369 (рис.4), яка є майже у півтора рази вищою. Отже, при практичному застосуванні швидкого FDK - алгоритму не потрібно робити вибір між якістю реконструкції і швидкістю обробки даних.

Швидкий FDK- алгоритм є першим алгоритмом швидкого зворотного проектування для конусного променя. Аналіз сукупностей зазначених обставин і накопичений досвід впровадження алгоритмів, що виявив серед іншого такі особливості, як необхідність досягнення високої роздільної здатності при реконструкції внутрішньої структури промислових виробів при відносно малій комплексності алгоритму і об'єму оперативної пам'яті здатності виконання окремих простих етапів обробки в потоці (конвейєрно) дає підстави віддати перевагу саме цьому алгоритму. Даний алгоритм легко модифікується з використанням різних методів інтерполяції, що дає змогу одночасно з реконструкцією розв'язувати задачі корегування систематичних похибок, оптимізації відновлюваного зображення стосовно візуальної оцінки і особливостей просторової структури об'єкта контролю.

Література

1. Берник З.А. Проблеми нерйнівного контролю зварних з'єднань магістральних трубопроводів // Методи та прилади контролю якості №4, 1999, С. 20-22.

2. Besson, G. CT reconstruction from Fan-Parallel Data. In IEEE Medical Imaging, Toronto, Canada, 1998, Nov, 8-14.

3. Feldkamp, L. A., L. Davis, and J. Kress. Practical Cone-beam Algorithm. J.Opt.Soc.Am. 1984, 1, 612-619.

УДК 621.376.239:53.086.6

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ З КОРЕЛЯЦІЙНИМ ПРИЙМАННЯМ СИГНАЛІВ

І.В.Маслов, Л.М.Заміховський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 4-80-00 ,

e-mail: rozvidka@ifdtung.if.ua

Рассматривается структурный метод устранения модуляционных искажений входных сигналов синхронных детекторов, суть которого состоит в измерении эффективного значения низкочастотной составляющей их выходного напряжения. Он позволяет устранить погрешность устройства от глубины и индекса паразитной модуляции сигналов и повысить быстродействие по сравнению с известным методом фильтрации выходного напряжения.

The structural method of elimination modulation transformations of input signals of synchronous detectors which essence consists in measurement of effective value of low-frequency part of the output voltage is examined in the article. It allows to liquidate an error of the device from depth or an index of parasitic modulation of signals and to increase the speed in comparison with a known method of a filtration of the output voltage.

Характерною особливістю територіально розподілених виробничих комплексів нафтогазової галузі є велика імовірність впливу завад в комунікаційних мережах передачі інформації. У зв'язку з тим, що передача даних в розосереджених системах контролю параметрів об'єктів завжди діє в умовах недостатньої апріорної інформації про властивості завад в каналах, апаратурні засоби таких систем повинні підлаштовуватись до конкретних умов функціювання, тобто бути адаптивними. У більшості випадків основою реалізації квазіоптимальних адаптивних алгоритмів лінійної обробки сигналів з довільними завадами в системах централізованого контролю параметрів є кореляційний метод безпосереднього перетворення, при якому результат вимірювання отримують внаслідок перемноження сигналів з подальшим усередненням їх добутку. Однак загальним недоліком цього методу є порівняно низька точність, особливо при дослідженні низькочастотних процесів. Тому вдосконалення принципів кореляційної фільтра-