

УДК 620.179.15; 681.3.072

А. І. Закидальський, В. І. Косинський

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Енергетичний спектральний фактор при алгоритмічних методах реконструкції зображення в комп'ютерній томографії

Розглянуто питання, пов'язані з впливом енергетичного спектрального фактора на якість реконструйованого томографічного зображення. Вивчено особливості прояву поліхроматичних спотворень і алгоритмічні методи їх корекції.

Ключові слова: обчислювальна томографія, реконструкція зображення, спектральні артефакти, поліхроматична корекція.

Задача комп'ютерної томографії полягає у визначенні внутрішньої структури об'єкта дослідження і зображення його у вигляді тонкого шару на площині, або об'ємного зображення у просторі.

Математичне відображення функції у множину її лінійних інтегралів є перетворенням Радону. Чисельне визначення функції розподілення фізичного параметра за лінійними інтегралами складає зворотне перетворення. Математичною задачею обчислювальної томографії є реалізація прямого і зворотного перетворень Радону.

В якості проєкційних даних використовуються вимірювальні інтенсивності проникаючого випромінювання з різних напрямків навколо об'єкта. Початковий потік має інтенсивність I_0 . Внаслідок взаємодії проникаючого випромінювання з речовиною спостерігається зменшення його інтенсивності. Параметром, який описує цю взаємодію, є коефіцієнт лінійного поглинання μ . Будь-яка точка об'єкта дослідження характеризується коефіцієнтом $\mu(x, y, E_0)$, величина якого залежить від енергії фотонів E_0 . Властивості середовища μ та інтенсивність рентгенівського випромінювання на вході I_0 і виході I з об'єкта дослідження пов'язані співвідношенням:

$$I(v, E_0) = I_0(E_0) \cdot \exp\left(-\int_U \mu(v, E_0) dv\right),$$

(1)

де v — координата шляху променя в об'єкті на вибраному напрямку U з кутом θ .

© А. І. Закидальський, В. І. Косинський

Цей криволінійний інтеграл є відображенням функції структури об'єкта дослідження $\mu(x, y)$ в функцію $\text{Pr}(v, \theta)$, яку отримують шляхом інтегрування у напрямку, що співпадає з декартовою віссю координат U , яку повернуто відносно осі Y на кут θ і яка знаходиться на відстані v . Величина Pr є променевою проекцією функції $\mu(x, y)$ у напрямку U :

$$\text{Pr}(v, E_0) = \ln [I_0(E_0) / I(v, E_0)]. \quad (2)$$

Для того, щоб за проекціями $\text{Pr}(v, \theta)$ отримати функції $\mu(x, y)$, необхідно застосувати зворотне перетворення. Таким чином, реконструкція зображення зводиться до обрахування в кожній точці його подвійного інтеграла:

$$\mu(x, y) = -\frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cos(\varphi - \arctg(y/x)) \cdot v \cdot \frac{\partial \text{Pr}(v, \varphi)}{\partial v} dv d\varphi. \quad (3)$$

Серед факторів, які впливають на якість томографічного зображення, важливе місце займає енергетичний спектральний характер проникаючого випромінювання. Математичний апарат обчислювальної томографії розроблено у припущенні, що проекції вимірюються на монохроматичній енергії E_0 . Проте реальні джерела рентгенівського випромінювання генерують фотони протяжного енергетичного спектра $S(E)$:

$$S_0(E) = I_0(E) / \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} I_0(E) dE, \quad (4)$$

де $I_0, I_{0д}, E, E_{\min}, E_{\max}$ — відповідно інтенсивності випромінювання перед об'єктом і на виході детектора, текуча, мінімальна та максимальна енергії спектра. Величини проекції у декартових координатах дорівнює:

$$\text{Pr}(\varphi, v, E) = -\ln \left(\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} S(E) \exp \left(- \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x, y, E) \delta(x \cos \varphi + y \sin \varphi - v) dx dy \right) dE \right). \quad (5)$$

Проекція $\text{Pr}(E)$ є поліхроматичною, тому, що вона вимірюється для енергій у діапазоні від E_{\min} до E_{\max} . Процедура реконструкції розроблена для монохроматичної проекції $\text{Pr}(E_0)$, проте реально використовуються поліхроматичні проекції $\text{Pr}(E)$. Це привело до формування томографічних зображень із спектральними спотвореннями і артефактами, які можуть значно впливати на якість томограми, тобто на точність оцінки результату.

З метою зменшення ступеню прояву поліхроматичних артефактів були запропоновані різні методи корегування, які умовно можуть бути розподілені на дві

групи. Це методи обробки проєкційних даних до реконструкції зображення та методи корегування проєкційних даних у процесі реконструкції.

Перші відрізняються простотою реалізації та майже не збільшують час реконструкції. Монохроматична проєкція має лінійну залежність від товщини шару речовини. Поліхроматична є суттєво нелінійною. Перехід від однієї проєкції до другої є поліхроматичною корекцією.

Методи другої групи дозволяють отримати більш високоякісне зображення, але вимагають значних витрат часу. Це обумовлено тим, що процедура поліхроматичної реконструкції містить декілька послідовних ітераційних циклів. Кожен з них складається з реконструкції, алгоритмічного проєціювання, корегування та нової реконструкції.

Ефективність процедур поліхроматичного корегування в значній мірі залежить від можливості реалізації заміни ітераційної обробки томографічного зображення на обробку поліхроматичних проєкційних даних. Цю можливість дає метод, який ґрунтується на контурній моделі структури об'єкта. Зображення контурів зон щільності формується на прямокутній матриці. Вона реалізується у пам'яті комп'ютера. Якщо відомі контури зон різної щільності, то для них можуть бути застосовані різні параметри обчислення нелінійного корегування.

Для формування зовнішнього контуру запропоновано метод дотичних променів. Для частини проєкції, яка перевищує деяке змінне значення порогу, мають бути застосовані інші параметри корегування, ніж параметри корегування для проєкції, яка не перевищує поріг. З рис. 1 видно, що визначивши шляхом порівняння з порогом дотичні об'єкта 1 промені 2, 3, 4, можна знайти зовнішній контур зони щільності.

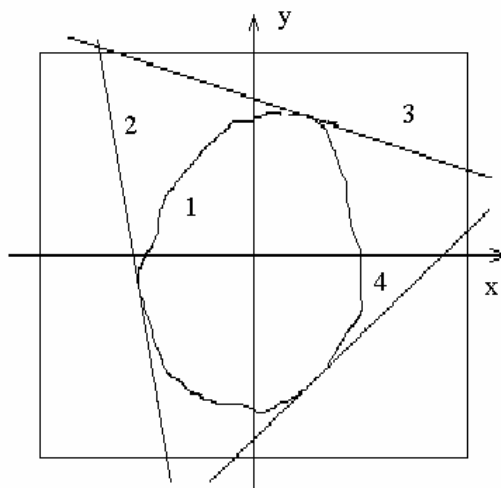


Рис. 1. Схема формування контуру сканування

Контур формується під час сканування, і тому немає потреби в ітераційних процесах попередньої реконструкції. Для виробів, які складаються з трьох або більше різних компонент, при визначенні внутрішніх контурів доречно застосовувати метод неповної реконструкції та метод визначення внутрішніх зон щільності на основі процедури локальної томографії.

Перший метод засновано на скороченні розміру матриці реконструкції в 2^{2n} разів, що зумовлює пропорційне скорочення терміну реконструкції. Таким чином, реконструюються тільки кожна четверта, восьма і т.п. клітинка. Другий метод використовує властивість процедури локальної томографії з реконструкції за методом зворотного проєціювання з фільтрацією подвійним диференціюванням. Він дозволяє отримати повну реконструкцію однієї точки без внесків всіх інших точок для деякої функції Λ , яка має ті ж самі межі, що й коефіцієнт поглинання μ . Тобто, якщо розробити алгоритми пошуку межі, то з'явиться можливість реконструювати тільки контури зон щільностей, що також значно скоротить час формування параметрів поліхроматичного корегування. Для її визначення запропоновано метод діагонального пошуку. Він ґрунтується на тому, що напрямком пошуку межі можна виконувати за осями симетрії матриці, починаючи реконструкцію від її краю, або за напрямком осей x , y , або за діагоналями матриці. В будь-якому випадку число клітинок, які реконструюються, однакове. В комп'ютерній томографії, як правило, при реконструкції застосовуються не всі елементи квадратної матриці, а тільки ті, які обмежені вписаним в цю матрицю колом. За таких умов перевагу у напрямку пошуку може бути віддано діагональному методу, тому що у цьому випадку кількість клітинок для пошуку за діагоналлю у $\sqrt{2}$ менше.

Для оцінки точності характеристик процесів отримання томографічного зображення використовуються різні параметри, які характеризують якість відновлення в томографічному зображенні внутрішньої структури об'єкта. В основному виконується порівняння з деяким спрощеним томографічним зображенням реального об'єкта. Це зумовлено тим, що, з однієї сторони, процес томографічної реконструкції характеризується кількома різними математичними процедурами і, відповідними до них обмеженнями, та, з іншого боку, різним підходом до поняття відповідності відображення внутрішньої структури об'єкта в його томографічне зображення. Ступінь відмінності між реальним і ідеалізованим томографічними зображеннями, що були реконструйовані, виявляється за допомогою двох основних груп критеріїв. До перших можна віднести числові критерії, до других графічні. Серед графічних критеріїв відмінності томографічних зображень найчастіше зустрічаються графічні зображення профілів.

Процес дослідження ефекту поліхроматичності при томографічній реконструкції складається з декількох етапів: утворення та дослідження фантома об'єкта контролю, формування моно- та поліхроматичних проєкційних даних, утворення ядра і фільтрації проєкційних даних згорткою, реконструкції томографічного зображення, поліхроматичного корегування [1].

Для того, щоб усунути неідеальності процесів реконструкції, які не пов'язані з ефектом поліхроматичності, застосовується процедура порівняння зображень з томографічним зображенням, яке реконструйовано за монохроматичними проєкційними даними. Ступінь відмінності дозволяє відокремити спотворення, які є причиною неідеальності процесу реконструкції, від поліхроматичних артефактів. Це забезпечує виконання окремого їх аналізу.

Монохроматичний спектр зображено на рис. 2. Для поліхроматичної реконструкції застосовується спектр дійсного джерела випромінювання (рис. 3), що наведено у [2].

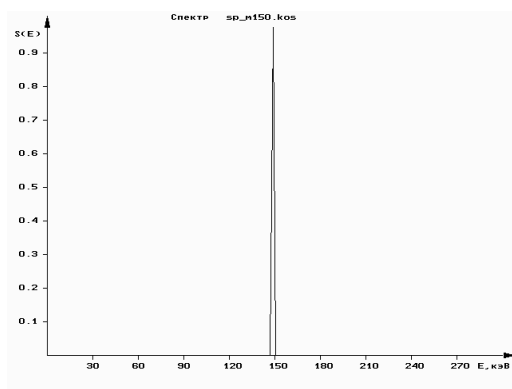


Рис. 2. Монохроматичний спектр

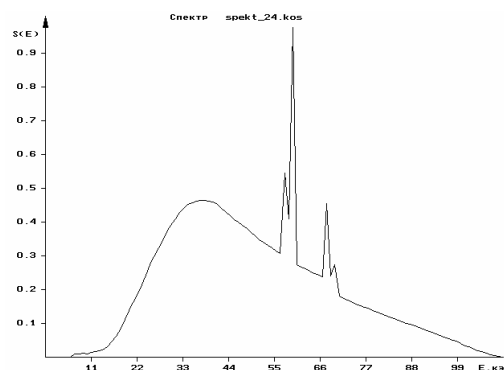


Рис. 3. Поліхроматичний спектр

Набір не фільтрованих проєкційних даних розраховується згідно форми і геометричних розмірів перерізу фантома у відповідності з типами матеріалів і спектром джерела випромінювання. Проєкційні дані фільтруються згорткою з ядром Хемінга і параметром $\alpha = 0,84$.

Наявність протяжного енергетичного спектра у промені проєціювання приводить до значних відхилень томографічного зображення від монохроматичного випадку як у абсолютних значеннях одиниць поглинання, які еквівалентні щільності, так і у відносних значеннях цих величин, які еквівалентні спотворенню структури елементів об'єкта і його форми у цілому. Очевидно, що прояв помітного затягування фронтів приводить у томографічному зображенні до появи артефактів уявного ущільнення. При цьому можуть частково або повністю маскуватися реальні елементи структури об'єкта з невеликими варіаціями щільностей або з різними, проте близькими хімічними речовинами. Помітні артефакти формуються і на верхівці максимальної щільності. Це, у свою чергу, може приводити до спотворення зображення форми (меж виявлення) навіть всього об'єкта в цілому, а не тільки деяких його часток.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що поява поліхроматичних артефактів у томографічному зображенні поперечного перерізу об'єкта приводить до небажаного маскування дрібних елементів внутрішньої структури, «виникнення» неіснуючих елементів структури, «зміни» хімічного складу і спотворенню форми об'єкта на макрорівні.

Усуненню небажаних наслідків прояву поліхроматичних артефактів сприяє реалізація процедур корегування, які враховують спектральний енергетичний характер променя проєціювання. Результат відпрацювання цих процедур зображено на рис. 4.

У залежності від необхідного ступеня наближення до монохроматичної реконструкції можна застосувати відповідні процедури корегування та реконструкції, які забезпечують оптимальне наближення або в області малих щільностей, або в області великих щільностей, або в області меж зміни щільностей. При цьому істо-

тний вплив на процедуру поліхроматичної реконструкції здійснює модель об'єкта томографування, тобто його промислове або медичне застосування.

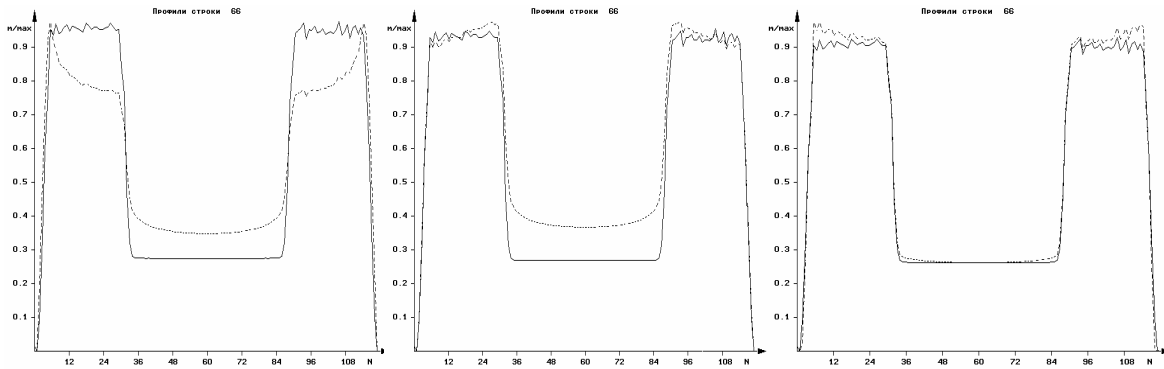


Рис. 4. Профілі реконструкції моно-, полі- та корегованих проєкцій.

Висновок

Процедура реконструкції розроблена для монохроматичних проєкцій, проте реально використовуються поліхроматичні проєкції. Це приводить до формування томографічних зображень із спектральними спотвореннями і артефактами, які можуть значно впливати на якість томограм, тобто на точність діагнозу в медицині та вірогідність визначення внутрішньої структури виробів в промисловості. Для зниження цього негативного впливу доцільно застосовувати алгоритмічні методи корекції спектральних спотворень.

1. Терновой К.С., Синьков М.В., Закидальский А.И. и др.: Под общ. ред. Тернового К.С., Синькова М.В. Введение в современную томографию. — К.: Наук. думка, 1983.

2. Васильев В.Н., Лебедев Л.А. Спектры излучения рентгеновских установок: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

Надійшла до редакції 21.10.2004