

УДК 537.312.62

ФУР'Є-АНАЛІЗ МАГНІТНИХ МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

М.М. Будник, В.М. Будник

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАНУ

e-mail: d220@public.icyb.kiev.ua

Вступ. Відомо, що серце людини створює в навколишньому просторі найбільш сильні, порівнюючи з іншими органами (мозок, печінка), магнітні поля. Міокард є тривимірною структурою, збуджені клітини якого характеризуються елементарними струмовими диполями, сума магнітних полів яких породжує магнітокардіограму (МКГ) [1]. Неінвазивний метод МКГ діагностики дозволяє прослідкувати особливості електрофізіологічних процесів (де- та реполяризації) міокарду, і, на цій основі, – оцінити ступінь ураження міокарду кардіологічними патологіями (в першу чергу – ішемічною хворобою серця (ІХС)), оцінити вплив на них медикаментозної терапії та ін. [2]. В цьому аспекті важливим є вдосконалення методів виявлення, аналізу та інтерпретації діагностично корисної інформації, яку несуть МКГ карти.

Існує два основних підходи до аналізу МКГ карт [3]. Перший – це обробка безпосередньо магнітних зображень, при якому обчислення проводяться зі значеннями магнітного поля. Цей підхід більш легкий з математичної точки зору, але магнітні зображення опосередковано описують електрофізіологічні процеси у міокарді. Більш безпосередню та цінну інформацію про характер збудження в міокарді дає розподіл струмів у фронтальній площині, що січе серце на певній глибині. Таке двомірне струмове зображення в МКГ є результатом розв'язку оберненої задачі (ОЗ) магнітостатики [4]. Але практична реалізація алгоритмів розв'язання ОЗ більш важка, бо такі задачі є некоректними і не мають однозначного вирішення.

В результаті, діагностичні висновки на основі аналізу результатів ОЗ (струмових зображень) є менш достовірними та обґрунтованими ніж ті, що зроблені на основі аналізу власне МКГ карт (магнітних зображень). Це підтверджується порівняльним аналізом діагностичної цінності (специфічність, чутливість, прогностичність), числових МКГ показників отриманих на основі обох підходів [3,5]. Тому логічним є розробка методу обробки, що поєднує обидва підходи, тобто який би обробляв магнітні зображення, але результати обробки інтерпретувалися б як певні представлення, що відповідають розв'язкам ОЗ магнітостатики в різних наближеннях, а отже – давали б інформацію про просторову структуру джерел струму.

Постановка задачі. Як такий метод в даній роботі пропонується застосувати двомірне модифіковане перетворення Фур'є (МПФ), запропоноване раніше в [6]. Основна його відмінність полягає в тому, що кожна гармоніка МПФ описується не скалярною (як у традиційного ПФ), а векторною (або комплексною) фазою. На основі компонент векторної фази можна обчислити координати певної гармоніки на площині. З фізичної точки зору кожна гармоніка магнітного зображення генерується струмовим джерелом певного типу, а коефіцієнти розкладу карти по двомірним гармонікам відповідають мультипольному розкладу. При цьому координати гармонік описують “центри мас” локалізованих джерел, що *якісно* відрізняються (монополь $n=1$, диполь $n=2$, квадруполь $n=3$, октуполь $n=4$, гексадекаполь $n=5$).

З діагностичної точки зору важливо, що такі *якісно різні* джерела відображають *якісно різні* електрофізіологічні процеси у серці. Відомо, що нормальному збудженню в основному відповідає дипольна структура джерела, а патологічні процеси, як правило, приводять до різних відхилень в бік недипольності ($n \neq 2$). Тому кількісна оцінка недипольності МКГ карт є важливою з точки зору локалізації та виявлення характеру патологічних джерел у міокарді [7].

Як було показано в [8], гексадекапольні компоненти джерел, в основному мають шумову природу і не несуть корисної інформації, а тому врахування гармонік вище 5-ї при аналізі МКГ карт методом МПФ є недоцільним. Як було показано раніше [6,9], при реєстрації МКГ карти в 36 точках площини на квадратній сітці 6X6 з кроком 4 см (розмір карти 20X20 см), метод МПФ дозволяє обчислити 36 гармонік ($n, m = 0, \dots, 5$). Таким чином, даний метод дозволяє повністю зберегти інформацію, яку містить магнітне зображення.

Раніше [9], метод МПФ було застосовано до аналізу струмових зображень у вигляді карт струмових ліній (густини магнітних зарядів), в кожній точці яких струм направлений по дотичній до вказаної лінії, обчислених згідно методу С. С. Романовича [10]. Було показано, що положення гармоніки 21 (струмовий диполь) відповідає локалізації максимального джерела нормальної активності в міокарді, а додаткові гармоніки 11 (магнітний диполь) та 22 (магнітний квадруполь) – можуть описувати патологічні джерела.

Описаний у [9] спосіб аналізу струмового зображення методом МПФ дає можливість параметризувати це зображення, звівши його опис до набору точкових джерел, що характеризуються трьома числами (амплітуда та дві фази). Ці числа можна використати як діагностичні параметри, що дозволяють виявити ступінь та місце ураження серця тією чи іншою патологією. Проте такий підхід *вимагає* попереднього вирішення ОЗ, тобто в цьому випадку метод МПФ є допоміжним, а не основним методом обробки зображень. Метою даної роботи є відпрацювання розкладу магнітних зображень в спектр за допомогою МПФ, який би дав можливість виявити його точність та потенційні можливості як *основного* методу виявлення інформації, що вміщують МКГ карти.

Тестові магнітні зображення. Перед синтезом магнітних зображень приведемо реальні МКГ карти (Рис.1). Порівняння карт здорового та хворого на ІХС, показує дипольний характер карти для здорового та суттєву недипольність для хворого.

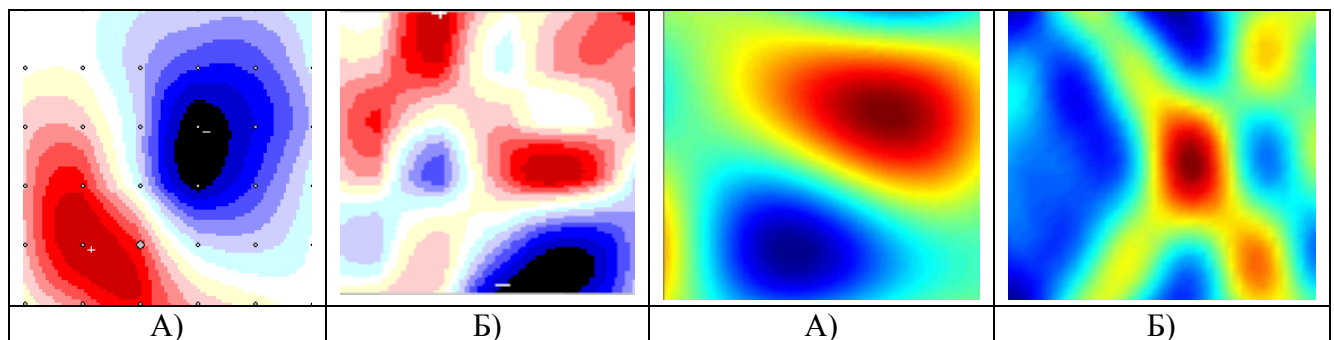


Рис. 1. МКГ карти здорового (а) та хворого на ІХС (б) на вершині хвилі Т.

Рис. 2. Модельні магнітні зображення дипольної (а) та недипольної (б) структури.

Для оцінки можливості МПФ стосовно локалізації та обчислення сили джерел поля необхідно два тестових зображення – дипольне та недипольне (Рис. 2). Дипольне магнітне зображення було синтезоване на основі виразу (1), а недипольне – виразу (2г).

$$P_y = 3\sin(K(2X-20))\cos(K(Y+40)); \quad P_x = 6\cos(K(X-20))\sin(K(2Y+40)); \quad \text{Dipol} = P_y + P_x. \quad (1)$$

$$D_{00} = 1; \quad L_{10} = \sin(K(X-50)); \quad P_{21} = \cos(K(2X-10))\cos(K(Y-20)); \quad (2a)$$

$$P_{32} = \sin(K(3X-10))\cos(K(2Y-20)); \quad P_{42} = \cos(K(4X-10))\cos(K(2Y-20)); \quad (2б)$$

$$P_{53} = \sin(K(5X-10))\cos(K(3Y-20)); \quad M_{11} = \cos(K(X-10))\cos(K(Y-20)); \quad (2в)$$

$$\text{Nondipol} = D_{00} + L_{10} + P_{21} + P_{32} + P_{42} + P_{53} + M_{11}. \quad (2г)$$

Тут $P_x(P_y)$ – проекції диполя на осі $X(Y)$, $K = \pi/2L$ – хвильове число, $L = 100$ мм – половина сторони карти. Недипольна карта є сумою 7-ми компонент, цифри в їх позначеннях означають порядок гармоніки в форматі nm. D_{00} є постійна складова, тобто зображення, що генерується двовимірним джерелом, яке відповідає однорідному розподілу густини

струму (РГС) довільної орієнтації. Смісл інших гармонік з точки зору мультипольного розкладу наведено в підписах під рисунками.

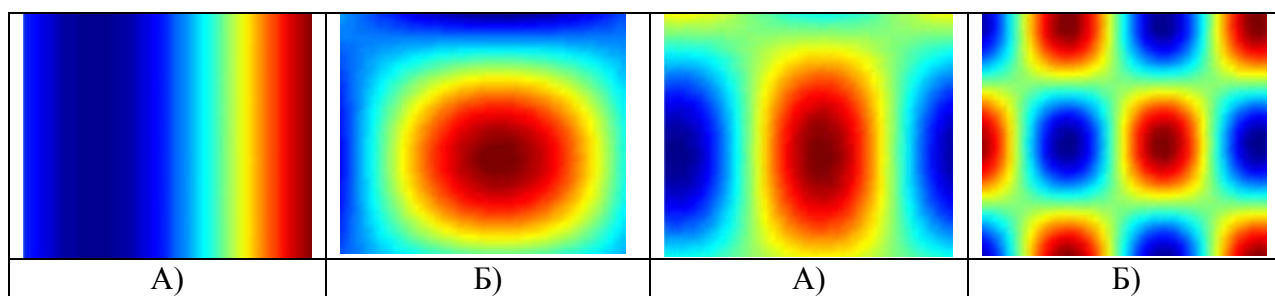


Рис. 3. Зображення, породжені лінійним L10 (а) та вихровим струмами (магнітним диполем) M11 (б).

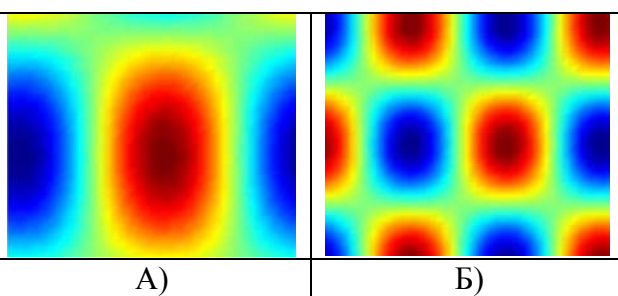


Рис. 4. Зображення, породжені струмовим диполем P21 (а) та квадруполем P32 (б).

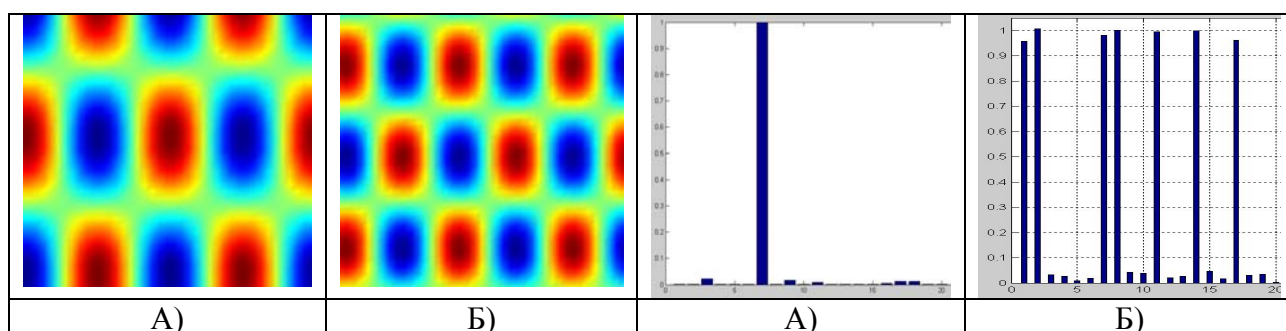


Рис. 5. Зображення, породжені струмовими октуполем P42 (а) та гексадекаполем P53 (б).

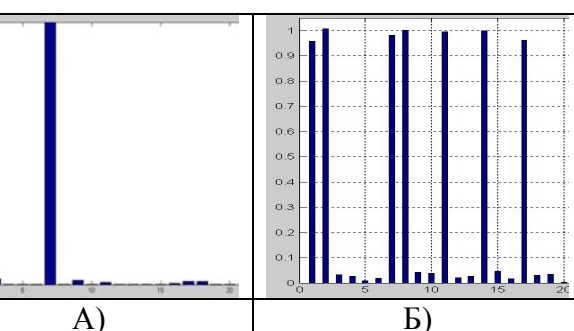


Рис. 6. Мультипольні спектри дипольного (а) та недипольного (б) зображень.

Результати аналізу. Найпростіший одномірний МПФ-спектр має 36 гармонік, упорядкованих спочатку по зростанню n , а потім по зростанню m . Мультипольні спектри, що вміщують 21 гармоніку (джерело), наведено на Рис.6. З Рис. 6 видно, що амплітуди паразитних гармонік, обумовлені явищем розтікання спектру не перевищують 5%. Це значить, що досягнута точність спектрального аналізу в МПФ *не потребує* додаткових заходів по підвищенню контрастування спектру. З іншого боку, підхід, запропонований в [11] не може бути застосований з огляду на малу кількість відліків (6X6).

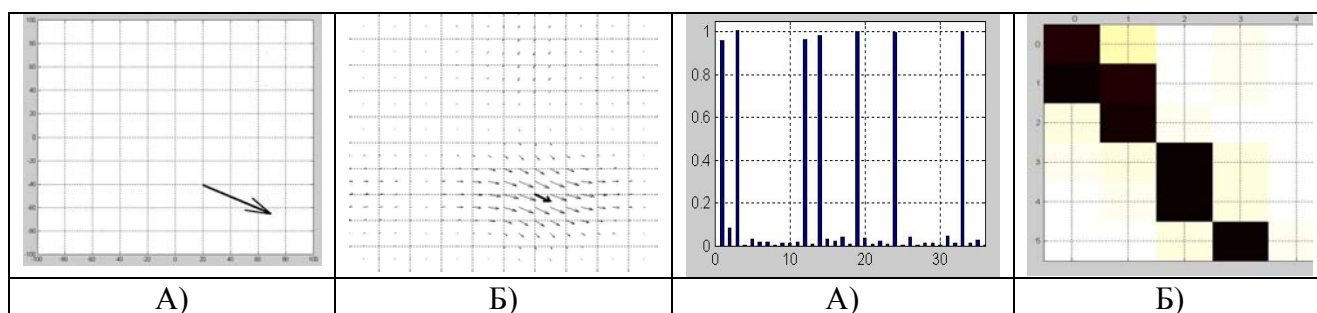


Рис. 7. Дискретний та розмитий спектри дипольного зображення (Рис.2а).

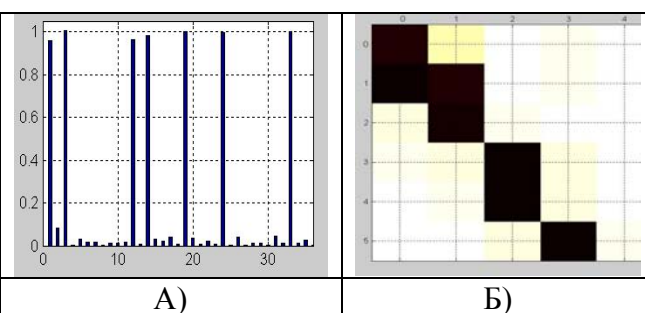


Рис. 8. Одновимірний (а) та двовимірний (б) спектри недипольного зображення.

Для дипольного зображення обчислено амплітудно-фазові спектри, які з точки зору ОЗ відповідають точковому струмовому диполю та РГС у площині. З Рис.7 видно, що орієнтація та кординати диполя, отриманого на основі МПФ, відповідають виразам (1) – він зсунутий вправо на 20 мм і вниз на 40 мм та повернутий під кутом 30° до осі X. Для недипольного зображення наведено амплітудні спектри у частотній області (Рис. 8). Видно, що вони адекватно відображають структуру джерел, задану виразами (2).

Висновки. Обробка модельних магнітних зображень за допомогою МПФ показала, що цей підхід дозволяє з точністю не гірше 5% реконструювати структуру джерел магнітного поля. При цьому існує багато різноманітних представлень джерел як у частотній області (одномірний, мультипольний та двовимірний спектри), так і в області зображення (амплітудно-фазовий дискретний та розмитий спектри). Останні є представленнями, що відповідають розв'язкам ОЗ магнітостатики у *точковому* (набір мультиполів) наближенні та наближенні *розподілу густини струмів* (РГС) у площині (див. Рис. 7 для диполя). Велика кількість представлень корисна з огляду на різноманітність уражень серця. Так, наприклад, певне представлення буде інформативним образом для розпізнавання аритмогенних, то інше – ішемізованих зон.

Аналіз лікарем МПФ спектрів стосовно інтенсивності недипольних компонент та їх порівняння з такими у нормі дозволить йому прийняти рішення стосовно наявності патологічних відхилень при протіканні де- або реполяризації міокарду. Таким чином пропонується метод аналізу може бути використано як компоненту СППР при дослідженні та діагностиці патологій серця [12]. При цьому амплітуди гармонік будуть показниками, що дозволять ППР стосовно сили патологічних джерел (ступеня ураження міокарду), а координати гармонік – дозволять ППР про локалізацію джерела (уражений відділ серця).

1. Холодов Ю.А., Козлов А.М., Горбач А.М. “Магнитные поля биологических объектов”. – М.: Наука, 1987 – 365 с.
2. Реєстрація та обробка магнітокардіограм у пацієнтів з ІХС / В. Козловський, М. Будник, Л. Стаднюк та ін. // Укр. кардіолог. журнал. – 2002. – №5. – С. 76-78.
3. Діагностичні критерії хронічної ІХС серця на основі реєстрації та аналізу магнітокардіограм / Будник М., Войтович І., Козловський В. та ін. // Препринт 2002-5, НАН України. Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова; Київ, 2002. – 49 с.
4. Примин М.А., Гуменюк-Сычевский В.И., Недайвода И.В. Методы и алгоритмы локализации источника магнитного поля. – Киев: Наук. думка, 1992. – 92с.
5. Чернишова Д., Будник М., Застосування дискримінантного аналізу до обробки МКГ інформації / Комп'ютерні засоби, системи та мережі: Зб. Наук. пр. / Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова, відп. ред. Палагін О.В. – Київ, 2004. №3. – с. 57-64.
6. Будник М., Двовимірне перетворення Фур'є з комплексною фазою /Праці 5-ї Міжн. Конф. “Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів” – Київ (Україна), 2000. – с. 253-256.
7. Magnetocardiography: a new diagnostic tool in cardiology/Sci. Issue, Universitat Witten/Herdecke, Essen(Germany), eds. F. Steinberg, I. Chaikovsky, V. Sosnitsky, 1999. - 21p.
8. Поиск зависимости и оценка погрешности / Сб. научн. тр., отв. ред. Пинскер И.Ш. – М: Наука. – 145 с.
9. Будник М., Березовська Т., Коваленко О. Фур'є аналіз двовимірного розподілу струмів у серці / Електроніка і зв'язок. 2002. – №14. – с.142-144.
10. Дослідження наведених магнітних полів біологічних об'єктів / Романович С., Іванова Л., Сосницький В. та ін. // Препринт 1995-5, НАНУ. Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова; Київ, 1995. – 26 с.
11. Файнзильберг Л.С., Методы и инструментальные средства оценки состояния объектов по сигналам с локально сосредоточенными признаками. Дисс. доктора техн. наук. – Киев, 2004. – 403 с.
12. Інформаційна технологія дослідження кардіологічних захворювань на основі методу МКГ/ Риженко Т., Будник М., Васильєв В. та ін. //Праці 2-го Наукового форуму “Інформаційні технології ХХІ століття”, Дніпропетровськ, 2004. – с.155-158.