

УДК 616.1 –072(035)

ВЕРИФІКАЦІЯ МЕХАНІЗМУ ОБРАХУНКУ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАРІАБЕЛЬНОСТІ СЕРЦЕВОГО РИТМУ В ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ЕТАЛОНУ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ.

Є.А.Паламарчук, К.П.Воробйов

evgen.pal@gmail.com

Вінницький державний аграрний університет,
Відділення гіпербаричної оксигенації, м.Луганськ

Пропонується математично точний метод верифікації механізму спектральних перетворень HRV-діагностичних систем за допомогою програмного еталону гармонічних сигналів.

ВВЕДЕННЯ

Оцінка варіабельності серцевого ритму (ВСР) відноситься до нових діагностичним технологій, яка почала активно виходити за межі наукових лабораторій. Цей метод діагностики стає одним із найважливіших клінічних тестів в оцінці, як вегетативного статусу організму, так і інтегральних характеристик функціонального стану.

Будь якому досліднику хочеться мати перевірений і точний інструмент. В клінічній практиці, при діагностиці різних станів необхідна повторюваність результатів функціональних досліджень і їх чітка метрологічна характеристика.

При аналізі ВСР існує багато невирішених проблем. Одна із них, найбільш важлива, – це стандартизація математичного апарату обчислення спектральних характеристик кардіоінтервалограм. З цього приводу розробники відповідного російського стандарту пишуть: «Порівнювальність записів і результатів аналізу ВСР означає можливість співставлення даних, що одержуються в різних клініках і установах за допомогою різних типів апаратури та різних програмних засобів» [1].

Прозорість математичного апарату оцінки спектру ВСР дозволить дослідникам говорити однією мовою, а лікарям - користуватись стандартними діагностичними методиками. Але, на жаль, математичний апарат спектрального аналізу ВСР в будь-якому програмно-діагностичному комплексі є закритою від лікаря частиною, яку перевірити, на жаль, практично неможливо. Тим не менш, нам представляється за необхідне мати загальнодоступний еталон, за допомогою якого можна було б протестувати навіть лікарю будь-яке програмне забезпечення.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Представимо роботу механізму спектральних перетворень при аналізі ВРС. Розглянемо спектральні перетворення КІГ на прикладі з використання швидкого перетворювання Фур'є (ШПФ) [3,4]. Після обробки

кардіоінтервалограми утворюється спектр, представлений набором гармонік, кожна з яких характеризується частотою та амплітудою [2]. Для випадку HRV частота вимірюється в герцах, а амплітуда в мілісекундах. Значення скадових спектру дискретні, тобто вони характеризують не всі притаманні сигналу частоти, а тільки вибіркові (це визначається дискретністю представлення безперервного сигналу - КІГ).

У відповідності із міжнародним стандартом прийнята угода про розділення всього вимірюваного діапазону на чотири зони: ультранизькі частоти (ULF - $<0,003$ Гц) (в подальшому цю зону ми опустимо), дуже низькі частоти (VLF - $0,003-0,04$ Гц), низькі частоти (LF - $0,04-0,15$ Гц) і високі частоти (HF - $0,15-0,4$ Гц).

Спочатку визначимось із поняттям **часового нормування**. Запитання полягає в тому, скільки точок (або скільки RR-інтервалів) має бути у вхідному масиві КІГ? Цікавим є те, що **не має значення кількість точок дискретизації КІГ, а важливо, який вони утворюють загальний час обстеження**. В сумі він має складати біля **333** секунд. І ось чому.

Нижня границя спектру VLF складає **0.003 Hz**. Розрахуємо час зняття ритмограми, який буде відповідати цій частоті. Для цього поділимо **1sec/0.003 Hz = 333 sec**. Відмітимо також, що при спектральному перетворюванні **0.003 Hz** ще буде відповідати і різниці частот між сусідніми точками спектру, тобто **визначати частотний інтервал**.

Визначимо фізичну сторону **першого елемента спектра**. Це - **постійна складова** (нульова частота). Вона несе в собі інформацію про середню частоту серцевих скорочень (ЧСС) за обстежуваний період. В розрахунках спектральної потужності її враховувати не треба.

Розрахуємо мінімальну розмірність спектрального масиву. В загальному випадку вона залежить від кількості серцевих скорочень за 333 сек, а також алгоритму, що був застосований при спектральному перетворенні. Наприклад, якщо вважати, що ЧСС не буде перевищувати 90 скор.\хв., одержимо, що за 333 секунди відбудеться біля $333/60*90 \approx 500$ серцевих скорочень. Таким чином, розмірність вхідного масиву з RR-інтервалами має бути не менше за 500 точок.

Припустимо, що буде використовуватись алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Його особливістю є не тільки малий час перетворення, але й те, що розмірність спектрального масиву має бути кратною до ступеня двійки. Таким чином, найближча розмірність в даному випадку складає 512 точок. Окрім того, при ШПФ формується симетричний спектр, що має дві дзеркально розташованих відносно нульової частоти спектральних частини. Це означає, що розмірність частотного масиву повинна бути в два рази більшою за обрану. Тобто в нашому випадку - не менше **1024 точки**. Невиконання цієї умови призведе до катастрофічного спотворення результатів перетворення через порушення вимог теореми Котельникова.

Враховуючи, що частотний інтервал склав 0.003 Hz, можна легко визначити, де в спектральному масиві будуть знаходитись частотні області VLF, LF і HF. Так, для VLF-частини спектру (0.003-0.04 Hz) їм будуть відповідати точки **від 2** (Нехай елементи нумеруються з 1. Тому 1-ій точці буде відповідати нульова частота) **до 13-ої** спектрального масиву, для LF-частини спектру (0.04-0.15 Hz) - від **14 до 50** точки, а HF-частини (0.15-0.4 Hz) - **від 15 до 133** точки.

Маючи розрахований спектр і границі частотних зон (VLF, LF, HF), легко одержати спектральні потужності, підрахувавши суму квадратів амплітуд спектральних складових в кожній частотній області.

Другою проблемою є амплітудне нормування обраного спектрального перетворення. Різні алгоритми обчислення спектрів можуть давати різні передаточні коефіцієнти (не слід їх плутати із співвідношенням спектральних складових). Тобто відповідно до кожного конкретного алгоритму потрібен свій масштабний коефіцієнт, який би забезпечував відповідність розрахованої потужності спектру з її реальним значенням.

МЕТОД ТЕСТУВАННЯ

Отже, ми підійшли до того, що потрібен якийсь повірочний засіб-еталон, за допомогою якого можна було би верифікувати алгоритм спектрального перетворення. Задача розв'язується досить просто, якщо врахувати, що *спектральні перетворення - це лінійні перетворення, де справедливий принцип суперпозиції. Тобто будь-який сигнал може бути представлений певним набором гармонік (спектральних складових) або, навпаки, ці гармоніки однозначно можуть бути перетворені у вхідний сигнал.*

З цього витікає, що в якості повірочного засобу можна використовувати звичайні **гармонічні коливання** із заданою частотою та амплітудою (або їх суміш). Оцифрувавши гармоніку із заданою амплітудою і частотою, наприклад 0.01 Hz, ми одержимо в спектрі спектральну складову з частотою 0.01 Hz і потужністю, що буде відповідати амплітуді вхідного сигналу. Всі останні гармоніки спектру будуть дорівнювати нулю. Середньоквадратична потужність (P) синусоїдального сигналу (гармоніки) пов'язана з її амплітудою (A) як $P=A^2/2$.

Якщо ж будуть оцифровані дві гармоніки, то в спектральній області з'являться **дві незалежні** одна від однієї складові. Кожна із них буде мати потужність, що визначатиметься середньоквадратичною потужністю свого гармонічного сигналу.

Із наведеного слідує, що ми **маємо право оперувати сумою будь-якого числа гармонік**, де кожна із них визначає свою спектральну складову. (Реальна КІГ і є набір гармонік із своїми амплітудами і фазовими співвідношеннями). Таким чином, використовуючи всього три гармоніки, що розташовані в частотних областях VLF, LF і HF, ми можемо моделювати будь-які види частотних співвідношень для перевірки адекватності обраного матапарату частотного перетворення.

Для застосування данного методу верифікації програм на практиці необхідно виконання двох умов: а). Мати спеціальну програму-еталон, що генерує файли з еталонними сигналами (КІГ) і б). Верифікуєма програма повинна мати засоби імпорту кардіоінтервалограм.

РЕАЛІЗАЦІЯ

Пропонується програма-імітатор, що дозволяє сформувати оцифровану суміш з трьох будь-яких частот в діапазоні (VLF..HF) з довільними потужностями і вивести її в текстовий файл **export.rg**. Структура файлу відповідає російському стандарту формату запису ритмограм, де в кожному рядку записується по одному RR-інтервалу в ASCII-форматі. Такий файл легко

імпортувати в будь-яку верифіковану програму. Зовнішній її вигляд наведений на рис.1.

Власне програма-імітатор, а також текст програми (Turbo Pascal) із прикладом обробки КІГ методом ШПФ із обрахунком всіх HRV-характеристик наведені на http://www.pallar.com.ua/dldmed_u.htm.



Рис.1

ДОСЛІДЖЕННЯ

Наведемо приклад порівняльного дослідження діагностичних програм **CARDIO-10DX** виробництва фірми PALLAR Ltd. (м.Вінниця) і **ORTO Science (v 4.9.61)** фірми “Живые системы” м.Іжевськ. (Це одні з небагатьох програм, що **мають можливість імпорту кардіосигналів**). Виконаємо за допомогою цих програм обробку ряду спектральних моделей від генератора КІГ і наведемо приклад оцінки похибок математичних перетворень.

На першому етапі перевіримо правильність визначення програмами частот та їх амплітуд окремих гармонік в різних частотних зонах. Для цього послідовно згенеруємо та обробимо файл із гармонічним сигналом потужністю $P=1000$ мс² та частотою $f=0.003$ Hz. На рис. 2 і на рис. 3 наведені результати їх обробки програмою CARDIO-10DX та ORTO відповідно.

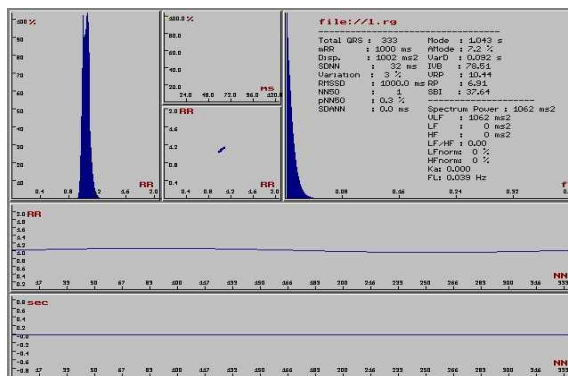


Рис.2

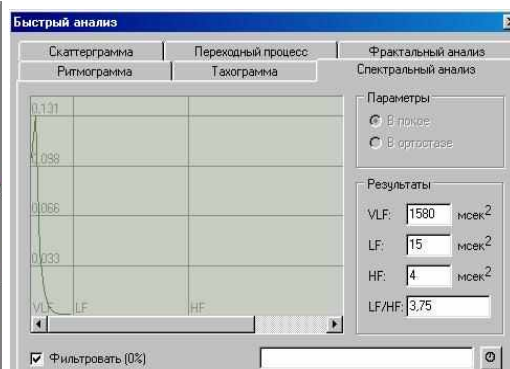


Рис.3

Виконаємо теж саме для спектральної зони LF ($P=1000$ мс² та $f=0.04$ Hz.)

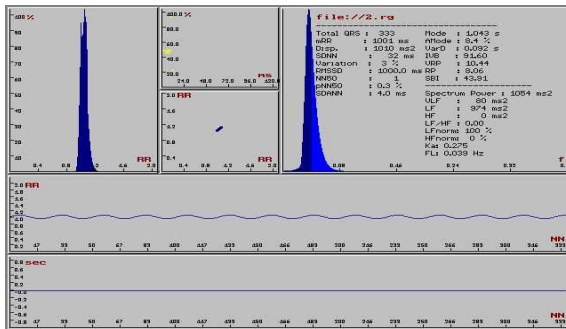


Рис.4 і для спектральної зони HF (P=1000 мс², f= 0.3 Hz).

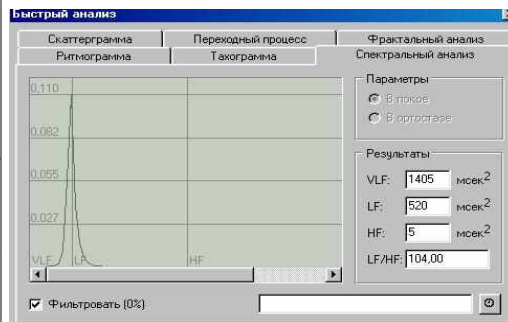


Рис.5

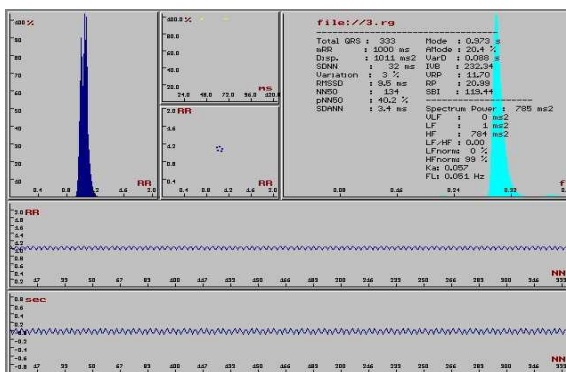


Рис.6

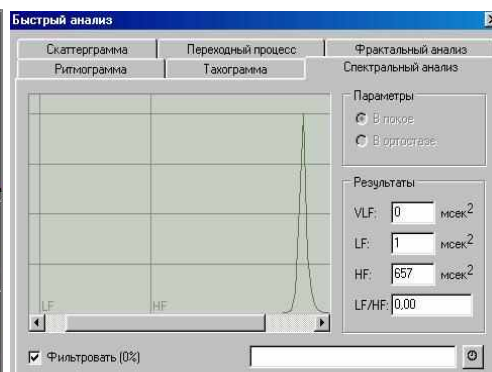


Рис.7

Тепер оцінимо нелінійність спектральних перетворень програм. Для цього обробимо за їх допомогою адитивну суміш з трьох гармонік з частотами 0.003 Hz, 0.04 та 0.3 Hz з однаковими потужностями P=2000 мс².

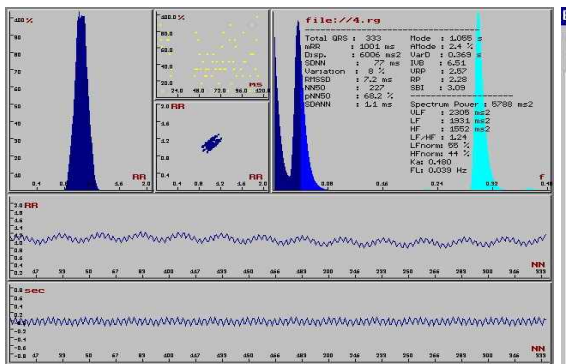


Рис. 8 CARDIO-10DX.

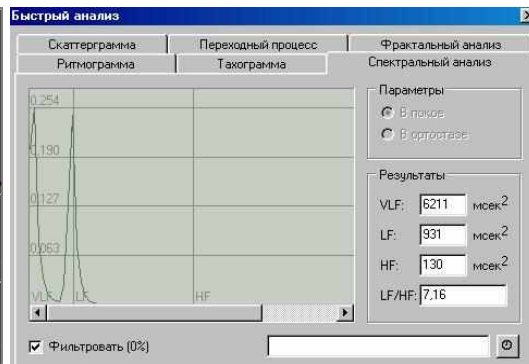


Рис.9 ORTO.

На рис.8 вигляд огинаюча спектру **відповідає тестовому сигналу**. В той же час на рис.9 спектр **спотворений** (в HF-зоні відсутня гармоніка 0.3 Hz).

На підставі проведених досліджень, складемо порівняльну таблицю спектральних перетворень (табл.1)

Табл.1

Імітатор		CARDIO-10DX			ORTO Science		
f(Hz)	P (ms ²)	f (Hz)	P (ms ²)	%	f (Hz)	P(ms ²)	%

Тестування однією гармонікою							
0.003	1000	0.01	1062	6.2%	?	1580	58.00%
0.04	1000	0.1	974	-2.6%	?	520*	-52 %
0.3	1000	0.2	784	-21.6%	?	657	-34.3%
Тестування сумішшю трьох гармонік							
0.003	2000	0.01	2305	+15.3%	?	6211	+210%
0.04	2000	0.1	1931	-3.4%	?	931	-53.5%
0.3	2000	0.2	1552	-22.4%	?	130	-1438%

* в VLF-зоні спостерігається додаткова складова потужністю 1405 мс² (?)

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Візуальна оцінка імпорту сигналу імітатора в CARDIO-10DX і ORTO Science (за формою ритмограм і кількості на ній хвиль) дозволяє вважати його правильним.
2. **CARDIO-10DX** має нахилену донизу в бік верхніх частот частотну характеристику перетворення від **+6.2%** до **-21.6 %** для частот від **0.003 Hz** до **0.3 Hz**. Це пов'язано із зростаючими в бік верхніх частот похибками перетворення через недостатню дискретність представлення сигналу.
3. **Визначити правильність визначення частот в програмі ORTO Science неможливо** через відсутність будь-яких цифрових показників цього типу.
4. Похибка визначення потужності в ORTO Science змінюється від **+58%** на частоті **0.003 Hz** до **-34.3%** на частоті **0.3 Hz**. При цьому на частоті **0.04 Hz** виникає неіснуюча гармоніка VLF з потужністю **1405 мс²**. Власне ж LF-похибка перетворення складає **-52%**.
5. Перетворення мультичастотної суміші програмою **CARDIO-10DX** в основному зберігає ті ж самі похибки, що й в одночастотному варіанті, що **свідчить про лінійність процесів спектрального перетворення**. Що ж стосується **ORTO Science**, то її **реакція неадекватна тестовому сигналу** і помилки перетворення становлять від **+210%** до **-1438%**.

Адекватність виконаних досліджень програм CARDIO-10DX і ORTO Science підтверджується і обробкою **реальних КІГ**. Ось результати обрахунку КІГ з **відносно рівномірним спектром** (Пацієнт Кирпиченко, 24 роки, ВГБО, Луганськ, дихальна аритмія, інтенсивна спектральна активність).

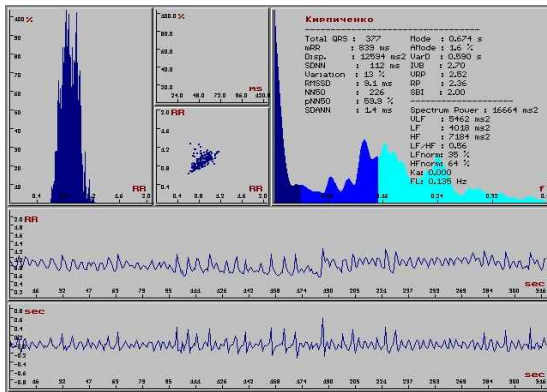


Рис.10

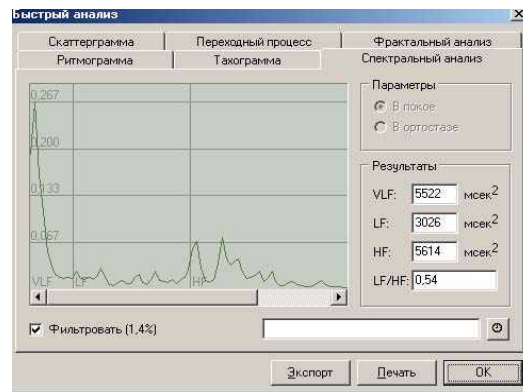


Рис.11

Як слідує з рис.10 та рис.11 ми одержуємо **співставимі результати як по формі огинаючої спектрів**, так і за **числовими величинами**.

Але КІГ з **бігемінією** дає абсолютно протилежні результати проботи CARDIO-10DX і ORTO Science. (Пацієнт Гирченко, 62 роки, бігемінія, ригідний ритм, Фастівська вузлова лікарня).

Для **бігемінії** характерні два водії ритму, що в спектральній області мають давати **дві спектральних складові** з оточуючими них боковими частотами. На рис.12 в спектрі чітко спостерігаються дві потужних спектральних складових **0.022 Hz і 0.27 Hz**, що корелюються з інтервалами R-R на гістограмі (вікно зліва). В той же час на рис.13 спостерігається лише потужна HF-складова (**3906 ms²**). Звернемо увагу і на одержані цифрові величини. Для **ригідного ритму** характерна **низка загальна спектральна потужність**. CARDIO-10DX обрахувала її як **440 мс²**, в той же час як ORTO надає величину **4230 мс²**.

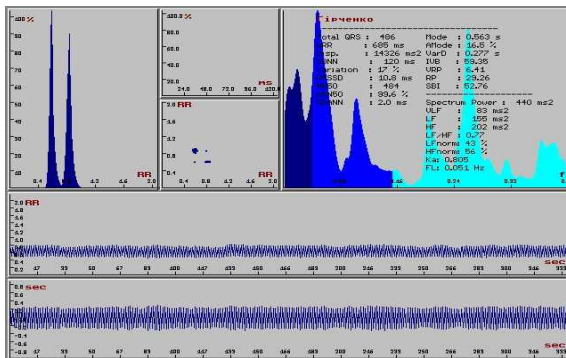


Рис. 12



Рис.13

ВИСНОВКИ

1. Застосування імітатора спектрів дозволяє одержати прозору і математично точну методику верифікації HRV-програмного забезпечення.
2. Розроблена методика не потребує використання верифікованих баз біосигналів.
3. Представляється необхідним вимагання від виробників діагностичних систем наявності режимів імпорту/експорту як для цілей міжпрограмного обміну, так і для верифікації застосованих засобів обробки сигналів.

Література

1. Р.М. Баевский и др. // Методические рекомендации по анализу variability сердечного ритма при использовании разных электрокардиографических систем (анализ “коротких” записей), согласно решению Комиссии по клинико-диагностическим приборам и аппаратам Комитета по новой медицинской технике МЗ РФ (протокол № 4 от 11 апреля 2000 г.), с.20
2. Баскаков С. И. // Радиотехнические цепи и сигналы, - М.: Высшая школа, 1988.
3. Блейхут Р. // Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. - М.: Мир 1989.
4. Голд Б., Рэйдер Ч. // Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./ Под ред. А. М. Трахтмана. -М.: Советское радио, 1973.