Капаціла Роман Ігорович, аспірант

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль

# **МЕТОДИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ СЕРЦЕВОГО РИТМУ**

Найчастіше спектральний аналіз потужності варіабельності серцевого ритму (ВСР) аналізується за допомогою швидкого перетворення Фур’є та авторегресійних моделей за допомогою комерційних пристроїв або некомерційного програмного забезпечення. У більшості випадків обидва методи дають порівняльні результати, але цього достатньо аби помітити їх відмінності.

Алгоритм швидкого перетворення Фур'є відносно простий і має низьку обчислювальну вартість. Однак спектральний аналіз на основі швидкого перетворення Фур'є піддається проблемі нерівної відстані між RR-інтервалами та вимогам стаціонарних сегментів даних. Крім того, довжина сегментів даних впливає на основне коливання та частотну роздільну здатність аналізу швидкого перетворення Фур’є. Таким чином, аналіз ВСР на основі швидкого перетворення Фур’є потребує штучної інтерполяції, щоб задовольнити потребу на однаковій відстані, проте інтерполяція призведе до зміщень. Як правило, воно працює на стабільному сегменті ЕКГ довжиною у 5 хвилин, це обмеження на довжину іноді обмежує його застосування (наприклад, у динамічних процесах).

Метод авторегресії також є популярним інструментом для спектрального аналізу ВСР, він не потребує інтерполяції, а довжина даних, необхідних для аналізу, менша, ніж для швидкого перетворення Фур’є. Однак одним із недоліків авторегресійного методу є його складність, вибір моделей і порядок моделей різний у різних дослідженнях, і цей параметр суттєво впливає на результати. Крім того, кілька досліджень показали, що авторегресійний метод не міг виявити параметри частотної області та генерував нульові значення у значної частини пацієнтів з діабетом або гіпертензією.

Існує кілька авторегресійних моделей обробки сигналів ЕКГ. Зазвичай використовуються Алгоритм Берга, підхід найменших квадратів і метод Юла-Вокера. Кожен метод має свої переваги та недоліки. Як метод Юла-Вокера, так і алгоритм Бурга страждають від проблем розщеплення спектральних ліній і зміщення в позиціонуванні спектральних піків. Однак алгоритм Берга має кращу роздільну здатність і вищу спектральну точність для коротких записів даних, ніж метод Юла-Уокера, і в алгоритмі Берга немає вікон, що спотворює спектр у методі Юла-Уокера. Підхід найменших квадратів має покращення в питаннях розщеплення спектральних ліній і зміщення в позиціонуванні спектральних піків, але є менш стабільним, ніж алгоритм Берга. Як правило, вони отримують подібні результати в більшості ситуацій, але алгоритм Берга є більш стабільним підходом і є кращим серед трьох методів.

Якщо порядок моделі занадто високий, модель більш сприйнятлива до перешкод у вигляді шуму та може мати обрізані піки. Якщо порядок моделі занадто низький, спектральні піки значно згладжуються, їх положення можуть бути змінені, а деякі піки можуть бути пропущені; більш того, аналіз може навіть отримати нульові результати. Існує багато методів для вказівок щодо вибору найбільш підходящого порядку, таких як інформаційні критерії Акаіке, остаточна помилка передбачення Акаіке, остаточна помилка передбачення, мінімальна довжина опису Ріссанена тощо. Інформаційні критерії Акаіке є найбільш широко використовуваним методом.

Тригонометричний регресивний спектральний аналіз (TRS) — це нещодавно розроблений і вдосконалений аналітичний і статистичний метод, який описує ритми RR-інтервалів за допомогою функцій тригонометричної регресії. На відміну від швидкого перетворення Фур’є, TRS не потребує інтерполяції нееквідистантних серцевих скорочень і забезпечує чистий фізіологічний спектр за допомогою тригонометричної регресії. TRS шукає одну частоту за раз; отже, довжина сегмента даних може становити лише 20–30 с. Ця особливість робить TRS придатним для опису динамічних процесів. TRS працює в рамках змінного підходу. Кожен спектр аналізу (TRS) виконується лише в межах сегмента локальних даних (20–30 с); аналізи локальних сегментів даних повторюються в послідовних сегментах, зміщених на один, два або більше ударів у всьому глобальному сегменті даних (множинний аналіз TRS, так званий MTRS). Оскільки традиційно використовуваний глобальний сегмент даних становить 1–2 хвилини, цей підхід  називають короткостроковим MTRS.

Загалом TRS є хорошою технікою для спектрального аналізу в дослідженні вегетативних функцій порівняно зі швидким перетворенням Фур’є та методом авторегресії. Особливості вище зазначених методів наведено у Таблиці 1.

Періодограма Ломба є ще одним варіантом спектрального аналізу ВСР без необхідності інтерполяції на RRI. Періограма Ломба визначає спектр потужності на будь-якій заданій частоті шляхом підгонки синусоїди за допомогою методу найменших квадратів. Він перевершив швидке перетворення Фур'є. Окрім того, періодограма Ломба є ще одним варіантом спектрального аналізу ВСР без необхідності інтерполяції на RRI. Періограма Ломба визначає спектр потужності на будь-якій заданій частоті шляхом підгонки синусоїди за допомогою методу найменших квадратів. У кількох дослідженнях вона перевершила швидке перетворення Фур’є та метод авторегресії. Однак невипадкові компоненти ВСР та 1/f шум у спектрах негативно впливають на ефективність періодограми Ломба. Процедура згладжування періодограми Ломба може покращити її можливості в спектральному аналізі. Загалом, періодограма Ломба є відносно рідко використовуваним методом спектрального аналізу.

Крім того, слід зазначити, що широко використовувані спектральні аналізи ВСР використовують статистику другого порядку, яка підходить для розподілу Гауса та лінійних систем. Однак серцево-судинна система людини не є лінійною системою і може не відповідати розподілу Гауса. Теоретично для вирішення цієї проблеми був розроблений біспектральний аналіз. Хоча дослідження з використанням біспектрального аналізу для оцінки ВСР все ще рідкісні, це багатообіцяючий інструмент аналізу ВСР.

Таблиця 1. Перелік основних методів спектрального аналізу.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Метод | Вимоги для застосування | Переваги | Недоліки | Інтервал, що зазвичай використовується при короткотерміно-вому спектральному аналізі |
| Швидке перетво-рення Фур’є | * Потрібно дані стаціонарної ЕКГ * Задовільна довжина даних * Рівно-віддалені RRI | * Простота алгоритму * Висока швидкість обробки * Хороша відтво-рюваність * Широко доступне у комерційних пристроях та дослідницьких програмних комплексах | * Вимагає інтерполяції * Не підходить для нестаціонар-них даних * Повинен використо-вувати дані адекватної довжини (зазвичай 5хв) * Спек-тральні компо-ненти залежать від довжини даних | 2-5хв, рекомендовано 5хв |

Продовження таблиці 1.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Авто-регресивні моделі | * дані стаціонарної ЕКГ | * Більш згладжені спектральні компоненти * Простіша пост-обробка спектру * Нижчі вимоги до довжини даних у порівнянні із швидким перетво-ренням Фур’є * Широко доступний у комерційних пристроях та дослідницьких програмних комплексах | * Не підходить для нестаціонар-них даних * Склад-ність у виборі моделей, що призводить до неоднорід-ності у наукових працях які, як наслідок, важко порівнювати | 200-512 RRI |
| MTRS | * Лише загальні вимоги до вимірювання ВСР, такі як відсутність ектопічних екстрасистолій або аритмій | * Може працювати на відносно коротких проміжках часу (20-30сек) * Може бути використаним у нестаціонар-них умовах * Не потре-бують інтер-поляції та фіксують реальні фізіологічні коливання | * Відносно мало поширений | 1-5хв, найчастіше використовується 1.5-2хв |

Література:

1. Camm AJ, Malik M, Bigger JT, Breithardt G, Cerutti S, Cohen RJ, et al. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J.* (1996) 17:354–81.
2. Ziemssen T, Reimann M, Gasch J, Rudiger H. Trigonometric regressive spectral analysis: an innovative tool for evaluating the autonomic nervous system. *J Neural Trans.* (2013) 120(Suppl. 1):S27–33.
3. Chemla D, Young J, Badilini F, Maison-Blanche P, Affres H, Lecarpentier Y, et al. Comparison of fast Fourier transform and autoregressive spectral analysis for the study of heart rate variability in diabetic patients. *Int J Cardiol.* (2005) 104:307–13.
4. Silva GJ, Ushizima MR, Lessa PS, Cardoso L, Drager LF, Atala MM, et al. Critical analysis of autoregressive and fast Fourier transform markers of cardiovascular variability in rats and humans. *Braz J Med Biol Res.* (2009) 42:386–96.
5. Marple L. A new autoregressive spectrum analysis algorithm. *IEEE Transac Acoust Speech Signal Process.* (1980) 28:441–54.
6. Vuksanovic B, Alhamdi M. AR-based method for ECG classification and patient recognition. *Int J Biometr Bioinform.* (2013) 7:74.
7. Kay SM, Marple SL. Spectrum analysis—a modern perspective. *Proc IEEE.* (1981) 69:1380–419.
8. De Hoon M, Van der Hagen T, Schoonewelle H, Van Dam H. Why Yule-Walker should not be used for autoregressive modelling. *Ann Nucl Energy.* (1996) 23:1219–28.
9. Dantas EM, Sant'Anna ML, Andreao RV, Goncalves CP, Morra EA, Baldo MP, et al. Spectral analysis of heart rate variability with the autoregressive method: what model order to choose? *Comput Biol Med.* (2012) 42:164–70.
10. Moody GB editor. Spectral analysis of heart rate without resampling. In: Proceedings of Computers in Cardiology Conference, London: IEEE (1993).
11. Laguna P, Moody GB, Mark RG. Power spectral density of unevenly sampled data by least-square analysis: performance and application to heart rate signals. IEEE Trans Biomed Eng. (1998) 45:698–715.