

УДК 621.396

О.А. АЛПАТОВА, Ф.Ф. КОЛПАКОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЛИНЕЙНОСТИ МОДЕЛИ АРТЕРИАЛЬНОГО РУСЛА

В рамках задачи моделирования артериального русла предлагается сформулировать критерий, оценивающий линейность сосудистого русла, используя пары сфигмометрических сигналов, снятых с неинвазивно доступных точек входа и выхода участков сосуда. При моделировании применен математический аппарат корреляционного анализа.

сердечно-сосудистая система, линейное моделирование, кровяное давление, корреляционный анализ

Введение

По статистике уровень смертности населения в странах СНГ значительно превышает уровень начала 90-х годов и продолжает оставаться одним из самых высоких в Европе. Особую тревогу вызывает рост числа умерших от сердечно-сосудистых заболеваний, доля которых в структуре преждевременной смертности у мужчин составляет 61%, а у женщин – 70%. При этом 48,9% случаев смерти от болезни системы кровообращения обусловлено ишемической болезнью сердца и 35,4% – цереброваскулярными заболеваниями [1]. Ситуация, связанная с ростом заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС), представляет собой прямую угрозу здоровью населения, а наносимые ею потери приводят к значительному экономическому ущербу. Компьютерные комплексы, диагностирующие состояние сердечно-сосудистой системы, для повышения достоверности выносимого диагноза используют модели сосудистого русла.

1. Моделирование сосудистой системы

Моделирование артериального русла является важным компонентом в диагностировании сердечно-сосудистых патологий. В клинической практике для диагностики состояния сосудов используется ограниченный набор непосредственно наблюдаемых

параметров, таких как кровяное давление (P) и скорость распространения пульсовой волны (СРПВ) [2, 3]. Моделирование сосудистого русла позволяет увеличить количество диагностирующих параметров, тем самым повышая достоверность выносимого диагноза. При его помощи можно производить прогнозирование развития текущего состояния артериального русла и предотвращать наступление кризисных ситуаций.

Моделирование сосудистой системы изначально решалось с позиций линейности [4]. Дальнейшее развитие моделей артериального русла базировалось на уже существующих моделях, тем самым продолжая традиции линейного подхода. Немногочисленные исследователи пытались внести в описание кровеносной системы нелинейность путем экспоненциальных зависимостей комплианса (C) от давления (P) или давления от коэффициентов полиномиальной зависимости [5, 6]. Единого мнения о степени нелинейности сосудов и о том, какой класс моделей (линейный или нелинейный) целесообразно использовать для моделирования артериального русла, не было найдено.

Целью работы является формулировка корреляционного критерия, который с высокой достоверностью позволит оценивать линейность сосудистой системы.

2. Корреляционный анализ

Для оценки линейности артериального русла применялся статистический подход, а именно, корреляционный анализ. Для этого использовались записи пульсовых сигналов кровяного давления, снятые с неинвазивно доступных точек измерения, таких как сонная, лучевая и кистевая артерии. Испытуемыми были молодые мужчины и женщины, не страдающие явными сердечно-сосудистыми патологиями. Измерения были сделаны датчиком давления на базе кварцевого резонатора с модулируемым межэлектродным зазором [7]. Сигналы оцифрованы на 12-разрядном 6-канальном АЦП ADUC 814 с частотой дискретизации 5 кГц по каждому каналу. Обработка зарегистрированных сигналов производилась при помощи математического пакета MATLAB.

Целью корреляционного анализа являлось оценивание коэффициента линейной корреляции Пирсона r_{xy} , выражающего меру линейной связи между исследуемыми величинами, и определение степени его достоверности [8]. Исследуемыми величинами выступали пары выборок сигналов кровяного давления, снятых с входов и выходов соответствующих участков сосудистого русла $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ и $Y = \{y_i\}_{i=1}^n$. Коэффициент линейной корреляции рассчитывался как

$$r_{xy} = \frac{C(x, y)}{\sqrt{\sigma_x^2} \sqrt{\sigma_y^2}}, \quad (1)$$

где выборочные дисперсии σ_x^2 и σ_y^2 рассчитывались по формулам:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2,$$

а выборочная ковариация $C(x, y)$, характеризующая совместное распределение двух выборок в N -мерном евклидовом пространстве, определялась следующим соотношением:

$$C(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

Для оценки достоверности линейного коэффициента корреляции вычислялся коэффициент критической статистики

$$t_{расч} = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}},$$

который при большом количестве элементов выборки стремится к t -распределению Стьюдента, т.е. $t_{расч}$ необходимо сравнить со значением t -критерия (при числе степеней свободы $k = n-2$ и доверительной вероятности α).

3. Многоканальная сфигмометрия

Традиционно в клинической практике используется одноканальная сфигмометрия.

На рис. 1, 2 представлены пары сигналов кровяного давления:

– сонная – лучевая артерия U_S/U_L (коэффициент линейной корреляции Пирсона $r_{xy} = 0,2176$ при $P < 0,0005$);

– лучевая – кистевая артерия U_L/U_K (коэффициент линейной корреляции Пирсона $r_{xy} = 0,3521$ при $P < 0,0005$).

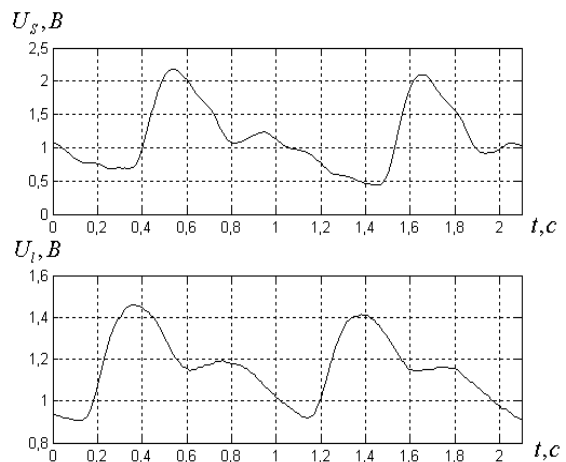


Рис. 1. Сфигмограммы молодого мужчины на участке сонная – лучевая артерии при одноканальной сфигмометрии

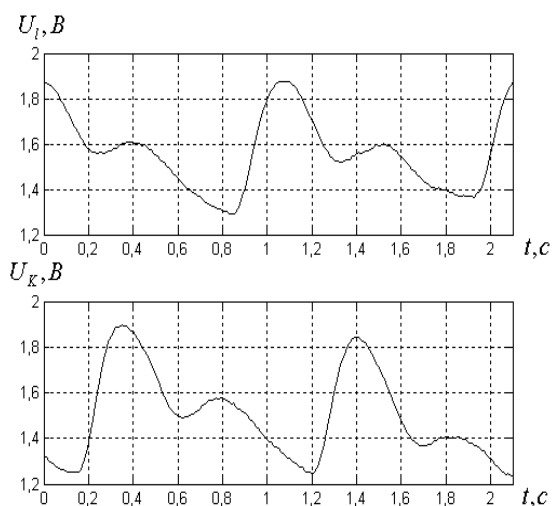


Рис. 2. Сфигмограммы молодого мужчины на участке лучевая – кистевая артерии при одноканальной сфигмометрии

Как видно из сфигмограмм, представленных на рис. 1, 2, при таком представлении сигналов кровяного давления не соблюдаются фазовые сдвиги, вносимые отдельными участками сосудистого русла. Картина прохождения сигналов через участки русла искажается.

Следовательно, оценивая линейный коэффициент корреляции Пирсона, нельзя судить о линейном характере артериальной системы, т.е. показатель не является достоверным.

Более обоснованным и предпочтительным направлением в исследовании артериального сосудистого русла является векторная сфигмометрия, целью которой является одновременная синхронная запись сигналов пульсового кровяного давления в неинвазивно доступных точках. В работе использовался экспериментальный образец многоканального сфигмометра, в котором одновременно были задействованы два канала.

Аналізу подвергались пары сигналов пульсового кровяного давления:

сонная – лучевая артерия U_S/U_l (результаты анализа приведены на рис. 3, 5);

лучевая – кистевая артерия U_l/U_K (результаты анализа приведены на рис. 4, 6).

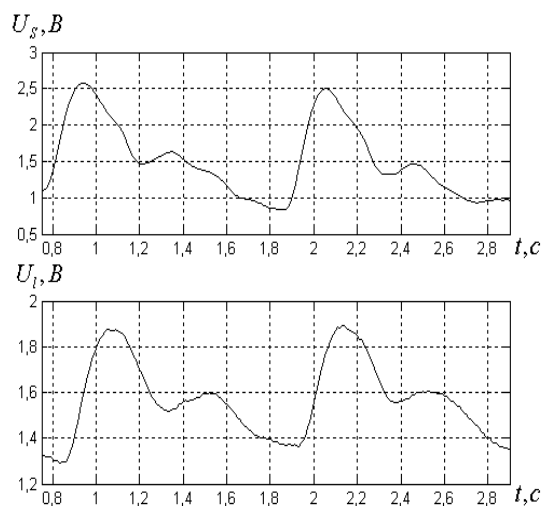


Рис. 3. Сфигмограммы молодого мужчины на участке сонная – лучевая артерии при векторной сфигмометрии

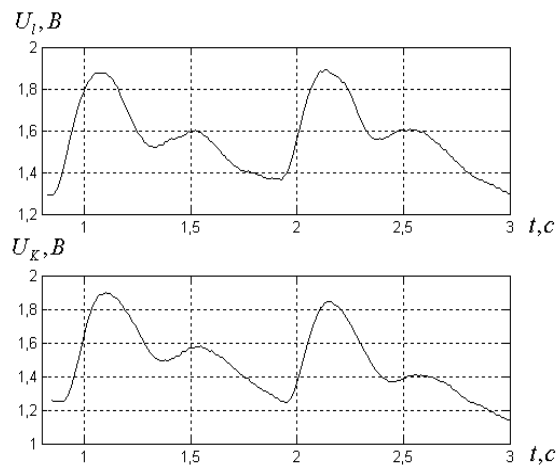


Рис. 4. Сфигмограммы молодого мужчины на участке лучевая – кистевая артерии при векторной сфигмометрии

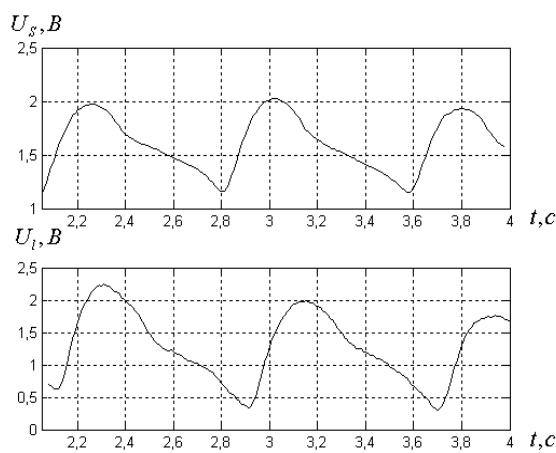


Рис. 5. Сфигмограммы молодой женщины на участке сонная – лучевая артерии при векторной сфигмометрии

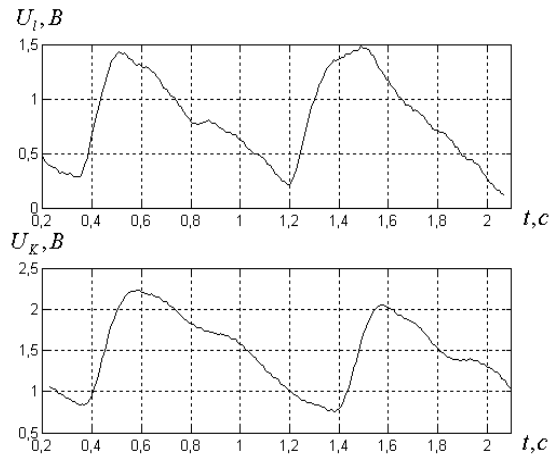


Рис. 6. Сфигмограммы молодой женщины на участке лучевая – кистевая артерии при векторной сфигмометрии

При этом коэффициенты линейной корреляции Пирсона были равны для пар сонная – лучевая артерия и лучевая – кистевая артерия:

– для мужчины $r_{xy} = 0,9206$ ($P < 0,0005$) и $r_{xy} = 0,9436$ ($P < 0,0005$) соответственно;

– для женщины $r_{xy} = 0,8939$ ($P < 0,0005$) и $r_{xy} = 0,7881$ ($P < 0,0005$) соответственно.

Заключение

Используя сигналы, полученные двухканальным сфигмометром, были рассчитаны оценки линейных коэффициентов корреляции Пирсона, которые с высокой достоверностью показали, что связь значима, и что сосудистая система может быть адекватно описана линейными моделями. Эффективность корреляционного критерия подтверждается тем, что основные работы, посвященные моделированию сосудистого русла, придерживаются позиций линейности. Для решения конкретных диагностических задач артериальную систему можно считать чисто линейной, и применять к ней существующий аппарат идентификации линейных систем.

Из проведенного исследования видно, что для адекватного представления и моделирования сосудистой системы важным фактором становится одно-

временная синхронная запись сфигмограмм в разноудаленных точках. При этом соблюдаются все фазовые сдвиги между регистрируемыми сигналами. Этим целям наилучшим образом соответствует векторная сфигмометрия с числом каналов большим или равным двум.

Литература

1. Органов Р.Г. Проблема контроля артериальной гипертонии среди населения // Кардиология. – 1994. – № 3. – С. 80 – 83.
2. Валтнерис А.Д. Сфигмография как метод оценки изменения гемодинамики под влиянием физической нагрузки. – Рига: Зинатне, 1988. – 131 с.
3. Терехова Л.Г. Практические вопросы сфигмографии. – Л.: Медицина, 1968. – 119 с.
4. McDonald D.A., Taylor M.G. The hydrodynamics of the arterial circulation. – New York: Pergamon, 1959. – 248 с.
5. Quick C.M., Berger D.S., Noordergraaf A. Apparent arterial compliance // Am. J. Physiol. – 1998. – V. 274. – P. H1393 – H1403.
6. Fogliardi R., Burattini R., Shroff S.G., Campbell K.B. Fit to diastolic arterial pressure by third-order lumped model yields unreliable estimates of arterial compliance // Med. Eng. Phys. – 1996. – V. 18, № 3. – P. 225 – 233.
7. Колпаков Ф.Ф., Пидченко С.К., Солодовник В.Ф., Хильченко Г.Л. Двухчастотный кварцевый автогенераторный преобразователь давления в период микропроцессорной сфигмографической системы // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – 1997. – № 1. – С. 175.
8. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. – М.: Мир, 1982. – 311 с.

Поступила в редакцию 14.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Лахно, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.