

3. Dozier C.M., Fleetwood D.M., Brown D.B., and Winokur P.S. // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1987, Vol. NS- 34, No. 6, p. 1535-1539.
4. Benedetto J. M. and Boesch H.E., Jr. // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1986, Vol. NS-33, No. 6, p. 1318-1323.
5. McLean F.B. // IEEE Trans. Nuc. Sci. 1988.-V.35.- No.6.- P.1178—1185.
6. Тамм И.Е. Основы теории электричества, -М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966. -624 с.
7. N.S. Saks et al // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1986, Vol. NS-33, No. 6, p. 1185-1190.
8. R.J. Krantz, L.W. Aukerman, T.C. Zietlow // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1987, Vol. NS-34, No. 6, p. 1196-1201.
9. N.S. Saks, C.M. Dozier and D.B. Brown // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1988, Vol.35, No. 6, p. 1168-1177.
10. N.S. Saks and D.B. Brown // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1989, Vol.36, No. 6, p. 1848-1657.
11. M.R. Shaneyfelt et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, Vol.37, No. 6, p. 1632-1640.
12. McLean F.B. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1980, Vol. NS-27, No.6, p. 1651-1656.
13. Fleetwood D.M., Winokur P.S. and Riewe L.C. // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, Vol. 37, No. 6, p. 1806-1817.
14. McWhorter P.J. et.al // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, Vol. 37, No. 6, p.1682-1689.

УДК 541.1:621.357

Д.К.АВДЕЕВА, Ю.И.КРАСИЛЬНИКОВ

ФАЗОВЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОХЛЕОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ СЛУХОВОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Приводится математическое обоснование фазового способа измерения малых сигналов произвольной формы в присутствии случайных шумов, который нашел практическое применение для измерения электрокохлеографических потенциалов слуховой системы человека.

Измерение слуховых вызванных потенциалов, в том числе улитковых (электрокохлеография), получило достаточно широкое применение в клинике при исследованиях на человеке и в эксперименте на животных [1].

Электрокохлеография – это тест, который отмечает, записывает и измеряет усредненные электрические ответы в ответ на очень короткие слуховые раздражения (щелчок, фильтрованный щелчок, гармоническая волна) и является единственным техническим средством, дающим возможность исследовать объективно функцию каждого уха в отдельности с первых дней жизни, имеет значение в дифференциальной диагностике кондуктивной и нейросенсорной тугоухости, в болезни Меньера, ретрокохlearной тугоухости (невриномы слухового нерва, опухолей мозга и т.д.).

Особый интерес представляет неинвазивная регистрация текущих значений амплитуды и фазы микрофонного потенциала улитки органа слуха человека. Фаза микрофонного потенциала характеризует группу свойств улитки, связанную с временным распределением электрического ответа при воздействии синусоидального акустического сигнала и сигналов сложной формы. В результате экспериментов на животных они показали, что при стрептомициновой интоксикации происходит изменение амплитуды и фазы МП улитки, причем фазовые сдвиги свидетельствуют об особом, качественно новом характере нарушения слуха, не отражающемся в изменении амплитуды.

Для неинвазивного измерения слуховых вызванных потенциалов разработан фазовый способ измерения сигналов в присутствии случайных шумов [2]. Способ позволяет измерять сигналы произвольной формы, в том числе и гармонические.

Сущность способа заключается в многократном нелинейном преобразовании сигнала с помехой в реальном масштабе времени. Способ реализуют следующим образом:

формируют постоянные опорные напряжения U_{1-} и U_{2-} , суммируют опорные напряжения U_{2-} с измеряемым сигналом $U_x(t)$ с помехой $n(t)$ и дополнительным шумом $N(t)$, причем сумма шумов $n(t)+N(t)$ представляет широкополосный, равномерный по частоте шум с полосой от 0 до $f_{в.п.}$ – верхняя частота полосового шума, которую выбирают исходя из заданной точности, быстродействия и помехоустойчивости, осуществляют перемножение со сдвигом во времени, равным $T_{И1}/2$, опорного напряжения U_{1-} и суммарного напряжения $U_{2-}+U_x(t)+n(t)+N(t)$ на последовательности прямоугольных импульсов длительностью $T_{И1}/2$, синхронизированных с частотой сигнала, следующих с частотой $f_1=1/T_1$, величина которой не менее $(20-50) f_{в.п.}$, причем импульс с амплитудой U_{1-} опережает импульс с амплитудой $U_{2-}+U_x(t)+n(t)+N(t)$ на величину $T_{И1}/2$, формируют последовательность однополярных ступенчатых импульсов $U_{1\Sigma ступ(t)}$ длительностью $T_{И1}$, состоящих из первого импульса с амплитудой U_{1-} и второго импульса с амплитудой, определяемой суммой $U_{2-}+U_x(t)+n(t)+N(t)$ на данном текущем периоде T_1 , равным $M_1 T_{И1}$, где $M_1=T_1/T_{И1}$, периодические ступенчатые импульсы преобразуют в гармонические путем узкополосной фильтрации с помощью избирательного фильтра на каждом интервале измерения T_1 , частота фильтра $f_{\phi 1}=f_1$, параметры $M_1=T_1/T_{И1}$, $D_1=U_{2-}/U_{1-}$, и добротность фильтра Q_1 выбирают исходя из получения необходимой чувствительности, линейности функции преобразования, точности, быстродействия, помехоустойчивости, текущие значения фазы информативной гармоники $\phi_{1\Sigma ступ(t)}$ на периоде T_1 , пропорциональные $U_x(t)$, следующие с частотой f_1 , преобразуют в длительности прямоугольных импульсов τ_{i1} с частотой f_1 , амплитудой U_{22} формируют последовательность опорных однополярных прямоугольных импульсов длительностью $\tau_1=T_1/2$ с амплитудой U_{12} и частотой f_1 , сдвинутые на время $T_1/2$ по отношению к импульсам с амплитудой U_{22} , синхронизированные с частотой сигнала $U_x(t)$, перемножают последовательности импульсов с частотой f_1 и амплитудами U_{12} и U_{22} на последовательности прямоугольных импульсов с частотой $f_2=1/\{2[(2N_2-1)+2m_2]\cdot T_1/2\}$, где N_2 и m_2 – целые числа, таким образом, что импульс, состоящий из прямоугольных импульсов с амплитудой U_{12} и частотой f_1 , опережает на время $T_{И2}/2=(2N_2-1)T_1/2$ импульс, состоящий из прямоугольных импульсов с амплитудой U_{22} с частотой f_1 , формируют последовательность однополярных ступенчатых импульсов $U_{2\Sigma ступ(t)}$, следующих с частотой f_2 , состоящих из первого импульса, представляющего последовательность однополярных прямоугольных импульсов с амплитудой U_{12} и длительностью $T_{И2}/2=(2N_2-1)\cdot T_1/2$, и второго импульса, представляющего последовательность однополярных прямоугольных импульсов с амплитудой U_{22} , длительностью $T_{И2}/2=(2N_2-1)\cdot T_1/2$, причем длительность каждого импульса τ_{i1} с амплитудой U_{22} пропорциональна фазе на каждом периоде измерения T_1 , параметры $M_2=T_2/T_{И2}=(2N_2-1+m_2)/(2N_2-1)$, $D=U_{22}/U_{12}$, периодические ступенчатые импульсы преобразуют в гармонические путем узкополосной фильтрации с помощью избирательного фильтра на каждом интервале измерения T_2 , частота фильтра $f_{\phi 2}=f_2$, параметры M_2 , D_2 , добротность фильтра Q_2 выбирают исходя из необходимой чувствительности, линейности функции преобразования, точности, быстродействия и помехоустойчивости, причем формирование однополярных ступенчатых импульсов осуществляют многократно с понижением частоты следования импульсов до достижения равенства $T_n=\Delta t g=1/2f_{гр.в.}$, где $f_{гр.в.}$ – верхняя граничная частота в спектре сигнала по теореме В.А.Котельникова. Полученные значения фазы информативной гармоники $\phi_{n\Sigma ступ(t)}$ на периоде T_n , пропорциональные текущему значению измеряемого сигнала $U_x(t)$, вводят в блок памяти, вывод результатов измерения из которого осуществляют под контролем блока управления, регистрируют данные на принтере.

При недостаточном отношении сигнал/шум повторяют измерение необходимое количество раз и результаты измерений когерентно суммируют.

Выражение, связывающее фазу информативной гармоники с измеряемым напряжением $U_x(t)$ и суммой шумов $n(t)+N(t)$, получают на основании преобразования Фурье однополярного ступенчатого импульса $U_{1\Sigma\text{ступ}(t)}$:

$$\varphi_{1\Sigma\text{смын}(t)} = \arctg \left[\frac{U_{1-} - U_{2-} - U_x(t) - n(t) - N(t)}{U_{1-} + U_{2-} + U_x(t) + n(t) + N(t)} \times \text{tg} \omega_1 \frac{T_{H1}}{4} \right]. \quad (1)$$

Обозначим $n(t)+N(t)=n_{\Sigma}(t)$; $\frac{U_{2-}}{U_{1-}} = D_1$; $\frac{U_x(t)}{U_{1-}} = D_x(t)$; $\frac{n_{\Sigma}(t)}{U_{1-}} = D_{\xi}(t)$; $\omega_1 \frac{T_{H1}}{4} = \frac{2\pi}{T_1} \cdot \frac{T_{H1}}{4} = \frac{\pi}{2M_1}$.

Тогда

$$\varphi_{1\Sigma\text{смын}(t)} = \arctg \left[\frac{1 - D_1 - D_x(t) - D_{\xi}(t)}{1 + D_1 + D_x(t) + D_{\xi}(t)} \cdot \text{tg} \frac{\pi}{2M_1} \right]. \quad (2)$$

Значение информативной гармоники $U_1(t)$ равно:

$$U_1(t) = U_{1\text{max}} \cdot \sin \left\{ \omega_1 t + \arctg \left[\frac{1 - D_1 - D_x(t) - D_{\xi}(t)}{1 + D_1 + D_x(t) + D_{\xi}(t)} \cdot \text{tg} \frac{\pi}{2M_1} \right] \right\}, \quad (3)$$

где $\arctg \left[\frac{1 - D_1 - D_x(t) - D_{\xi}(t)}{1 + D_1 + D_x(t) + D_{\xi}(t)} \cdot \text{tg} \frac{\pi}{2M_1} \right] = \varphi_0 + \Delta\varphi_x \pm \Delta\varphi_n(t)$.

Выражение для фазы $\varphi_{2\Sigma\text{ступ}(t)}$, полученное на основании преобразования Фурье однополярного ступенчатого импульса $U_{2\Sigma\text{ступ}(t)}$, для случая $\pm\Delta\tau_1$, имеет вид соответственно

$$\varphi_{2\Sigma\text{смын}(t)} = \arctg \left\{ \frac{\left[1 - D_2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \left\{ 1 \pm \text{ctg} \frac{\pi}{2M_2} \times \text{tg} \left\{ \frac{\pi}{2M_2} \left[\frac{\Delta\tau}{\tau} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\} \right\} \right]}{\left[1 + D_2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \left\{ 1 \mp \text{tg} \frac{\pi}{2M_2} \times \text{tg} \left\{ \frac{\pi}{2M_2} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\} \right\} \right]} \times \text{tg} \frac{\pi}{2M_2} \right\}, \quad (4)$$

где $D_2 = U_{22}/U_{12}$:

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{l} \cos \left\{ \frac{\pi}{2M_2(2N_2 - 1)} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\} \times \cos \left\{ \frac{\pi}{2M_2} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\} \times \\ \cos \left\{ \frac{N_2\pi}{M_2(2N_2 - 1)} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\} \\ \times \frac{\cos \left\{ \frac{\pi}{M_2(2N_2 - 1)} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\}}{\cos \left\{ \frac{\pi}{M_2(2N_2 - 1)} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\}} \end{array} \right\};$$

$$K_2 = 1 \pm \text{ctg} \frac{\pi}{2M_2(2N_2 - 1)} \times \text{tg} \left\{ \frac{\pi}{2M_2(2N_2 - 1)} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\};$$

$$K_3 = \frac{1 \pm \text{ctg} \frac{N_2\pi}{M_2(2N_2 - 1)} \cdot \text{tg} \left\{ \frac{N_2\pi}{M_2(2N_2 - 1)} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\}}{1 \pm \text{ctg} \frac{\pi}{M_2(2N_2 - 1)} \cdot \text{tg} \left\{ \frac{\pi}{M_2(2N_2 - 1)} \left[\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \pm \frac{\Delta\varphi_n(t)}{180} \right] \right\}}.$$

Значение информативной гармоники $U_2(t)$ и $U_3(t)$ равны соответственно:

$$U_2(t) = U_{2\max} \cdot \sin \left\{ \omega_2 t + \left\{ \varphi_{2\Sigma\text{смyn}} = f_2 \left[t, \varphi_{1\Sigma\text{смyn}(t)} \right] \right\} \right\}; \quad (5)$$

$$U_3(t) = U_{3\max} \cdot \sin \left\{ \omega_3 t + \left\{ \varphi_{3\Sigma\text{смyn}} = f_3 \left[t, \varphi_{2\Sigma\text{смyn}} = f_2 \left[t, \varphi_{1\Sigma\text{смyn}(t)} \right] \right] \right\} \right\} \quad (6)$$

Текущее значение информативной гармоники $U_i(t)$ равно:

$$U_i(t) = U_{i\max} \times \sin \left\{ \omega_i t + \left\{ \varphi_{i\Sigma\text{смyn}} = f_i \left\{ t, \varphi_{i-1\Sigma\text{смyn}} = f_{i-1} \left[t, \varphi_{(i-2)\Sigma\text{смyn}} = f_{i-2} \left\{ t, \dots, \varphi_{2\Sigma\text{смyn}} = f_2 \left[t, \varphi_{1\Sigma\text{смyn}(t)} \right] \right\} \right\} \right\} \right\} \quad (7)$$

Значение n -й информативной гармоники с периодом $T_n = \Delta t_g$ равно:

$$U_n(t) = U_{n\max} \times \sin \left\{ \omega_n t + \left\{ \varphi_{n\Sigma\text{смyn}} = f_n \left\{ t, \varphi_{(n-1)\Sigma\text{смyn}} = f_{n-1} \left\{ t, \varphi_{n-2\Sigma\text{смyn}} = f_{n-2} \left\{ t, \dots, \varphi_{2\Sigma\text{смyn}} = f_2 \left[t, \varphi_{1\Sigma\text{смyn}(t)} \right] \right\} \right\} \right\} \right\} \quad (8)$$

Анализ полученных выражений показал, что сигнал $U_x(t)$, когерентный с опорными сигналами, приводит к пропорциональному измерению постоянной фазы информативных гармоник на величину $\Delta\varphi_x$, а полосовая помеха $n_\Sigma(t)$ приводит к динамическим случайным изменениям фазы $\pm\Delta\varphi_{ni}(t)$ относительно постоянного значения и соответственно к частотной модуляции значений информативных гармоник в соответствии с выражениями (3), (5), (6), (4), (8).

Глубина частотной модуляции зависит от параметров $M_1, M_2, \dots, M_n, D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_n$, от величины амплитуды помехи $n_\Sigma(t)$ и ее верхней частоты $f_{в.п.}$.

Выходные фильтры с добротностями $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n$ при каждом нелинейном преобразовании уменьшают энергию помехи за счет устранения боковых спектральных составляющих без увеличения времени благодаря нелинейному преобразованию значений $U(t)$ и $\varphi(t)$ помехи на интервале $T_{иi}/2$, сигнал, когерентный с опорным напряжением, проходит на выход без искажения, так как носителем сигнала являются постоянные фазы информативных гармоник с частотами, являющимися центральными частотами, избирательных усилителей.

Если при нелинейном преобразовании сигнала с помехой не достигается необходимое для измерения отношение сигнал/шум, то возможно обычное когерентное накопление значений фаз.

Высокая чувствительность и избирательность разработанного метода измерений позволили впервые у больных с субъективным шумом неинвазивно зарегистрировать увеличение текущих пиковых значений амплитуды микрофонного потенциала и соответственно увеличение среднеквадратического отклонения, а также неинвазивно оценить моноуральную фазовую чувствительность периферического отдела слуховой системы человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avdeeva D.K., Krasilnikov Yu.I. Results of cochlear microfonics and short latency auditory evoked potentials recording under normal conditions and in various forms of hearing loss // II International Symposium "Modern problems of physiology and pathology of Hearing". – Moscow, October 22-27, 1995.-P.7.
2. Патент РФ №2133474. способ измерения сигналов произвольной формы в присутствии случайных шумов / Авдеева Д.К. //Бюлл. №20, 1999.-С.35-49.