

Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований
Российская ассоциация нейронинформатики
Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет ВШЭ, Нижний Новгород
Сургутский государственный университет ХМАО-Югры

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2023

**ТРУДЫ
VIII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Пространственные особенности нелинейных процессов в коре головного мозга человека при поличастотной стимуляции

А.Т. Бондарь¹, А.И. Федотчев¹, С.А. Полева², С.Б. Парин²

¹ Институт биофизики клетки РАН, Пушкино, Московская область, a_bond@rambler.ru

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, s453383@mail.ru

Изучение нелинейных процессов в ЭЭГ может помочь в понимании более сложных механизмов мозга, а также причин возникновения неврологических и психологических расстройств, таких как эпилепсия, шизофрения, депрессия и других. Наиболее простым и эффективным способом исследования нелинейности является ритмическая фотостимуляция или SSVEP (Steady-state visual evoked potential) – это метод, используемый в нейрофизиологии для изучения электрической активности мозга в ответ на световые импульсы. Принято считать, что она создает «стабильный ритмический» (или «steady-state») эффект в мозге [1], хотя, как показали наши исследования, реакции на стимуляцию претерпевают во времени существенные изменения [2, 3]. В последние годы интерес к SSVEP усилился в связи с поиском методов прямого взаимодействия между мозгом и компьютером [4, 5]. Особенностью SSVEP является их крайне выраженный нелинейный характер, поскольку в своем спектре они содержат компоненты, не имеющие места в стимулирующем сигнале [2, 3]. Частоты этих компонент кратны частоте стимулирующего сигнала, и поэтому получили название «гармоник». Целью данной работы являлось изучение электрической реакции коры головного мозга на ритмическую поличастотную фотостимуляцию.

В экспериментах приняли участие 12 добровольцев обоих полов в возрасте от 23 до 27 лет. Запись электроэнцефалограммы осуществлялась при помощи электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21-26 «Энцефала-131-03». Частота дискретизации сигнала – 250 Гц. Регистрации ЭЭГ осуществлялись с использованием 19 электродов, локализованных по стандартной схеме «10–20». Использовались следующие отведения: Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2.

Световые синусоидальные сигналы генерировались с помощью фотостимулятора собственной разработки, способного одновременно разделять стимулировать левый и правый глаз стимулами, имеющими разные частоты. В первой серии экспериментов на левый глаз подавался стимул с частотой 6 Гц, а на правый – 9 Гц. Во второй серии – на левый 7 Гц, а на правый – 9 Гц.

Полученные результаты продемонстрировали односторонний характер вызванной электрической активности в коре у всех испытуемых. Он был нелинейным, поскольку в ЭЭГ индуцировались

процессы, не присутствующие в стимулирующих сигналах. Так, в спектрах ЭЭГ присутствовали хорошо выраженные компоненты, как кратные частоте стимула, так и отличные от них (рис. 1 и 2). Последние представляют большой интерес, поскольку позволяют выдвинуть гипотезу о механизмах формирования как их, так и гармонически связанных со стимулом компонент. В первой серии экспериментов таковыми были 3 и 15 Гц, а во второй – 2 и 16 Гц.

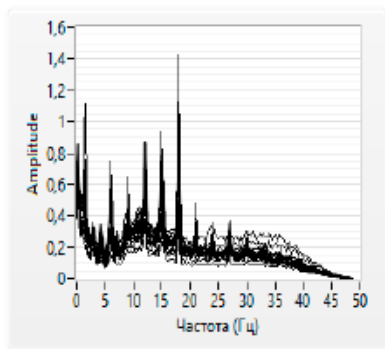


Рис. 1. Спектры ЭЭГ всех отведений при воздействии стимулом 6 Гц на левый глаз, 9 Гц – на правый

Результаты картирования индуцированных компонент спектра подтвердили полученные ранее данные с применением моночастотной стимуляции о независимой их локализации [7]. Для интерпретации нелинейных реакций нервной системы в ответ на внешние гармонические сигналы мы предлагаем *операционную модель* [3]. Эта модель применяется для интерпретации октавного принципа взаимоотношения собственных ритмов мозга между собой. В ее основе лежит *операция амплитудной модуляции* одних ритмов другими, что в формальном виде можно представить как

$$\cos(\omega_1 t) \cdot \cos(\omega_2 t). \quad (1)$$

Основываясь на тригонометрическом тождестве

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = 1/2 [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)], \quad (2)$$

данная операция при бичастотном стимулировании в нелинейной среде должна привести к появлению в спектре частот $\omega_1 - \omega_2$ и $\omega_1 + \omega_2$, что и наблюдается в эксперименте с использованием

в качестве стимулов сигналы с частотой 6 и 9 Гц в первом эксперименте, 7 и 9 – во втором. Так, в эксперименте 1 в спектрах ЭЭГ можно наблюдать разностную частоту 3 Гц и суммарную 15 Гц. Аналогично в эксперименте 2 – 2 Гц и 16 Гц.

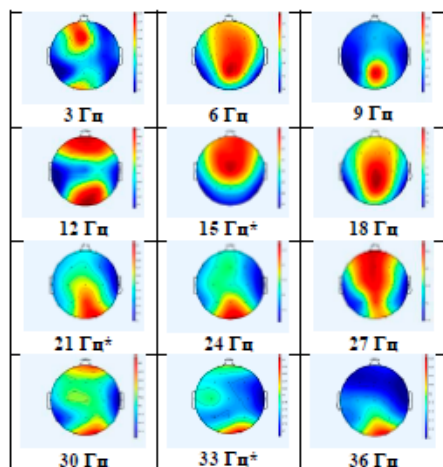


Рис. 2. Пространственное распределение индуцированных процессов при воздействии комбинационным стимулом 6+9 Гц. Звездочками обозначены компоненты спектра, не являющиеся кратными частотам стимулов

Стимулы 6 и 9 Гц кратны 3, следовательно, их можно рассматривать как вторую и третью гармоники 3-герцового стимула, которые в данном случае являются разностной частотой ($\omega_1 - \omega_2$). Эта частота породила свою систему гармоник, в результате в спектре появились компоненты не кратные исходным частотам стимуляции и их сумме (21 и 33 Гц). Всю систему компонент спектра в этом случае можно рассматривать как гармоники 3-герцовой компоненты. Этот факт объясняет «иллюзию отсутствующей или фантомной основной частоты (Missing Fundamental)», наблюдаемую в слуховой системе. Она заключается в том, что если в искусственно созданном сигнале, состоящем из нескольких гармоник, убрать первую гармонику (фундаментальную частоту), то слуховая система восстановит ее, и этот сигнал будет восприниматься, как будто эта частота в нем присутствует [6].

В спектрах наблюдаются также и частоты, кратные применяемым стимулам (гармоники), происхождение которых тоже можно объяснить исходя из тождества (2). Поскольку эти частоты являются независимыми процессами [2], они в рекуррентной среде, т. е. в среде с обратными связями, могут циклически амплитудно модулировать друг друга (мультиплицироваться). В результате этой операции будут образовываться множественные процессы, находящиеся в гармонических, т. е. целочисленных, отношениях друг с другом.

Несмотря на целочисленные соотношения, эти процессы не являются в строгом смысле гармониками, поскольку обладают временной и пространственной независимостью друг от друга. [7]. В дальнейшем мы будем называть их «псевдогармониками».

Аналогичную трактовку можно применить и к результатам с моночастотной стимуляцией [7]. В этом случае $\omega_1 = \omega_2$ и, соответственно, $\omega_1 - \omega_2$ равна 0, а $\omega_1 + \omega_2$ – удвоенной частоте стимуляции. В рекуррентной среде, т. е. в среде с обратными связями, такая операция, организованная циклически, может породить множество псевдогармоник (рис. 3 и 4).

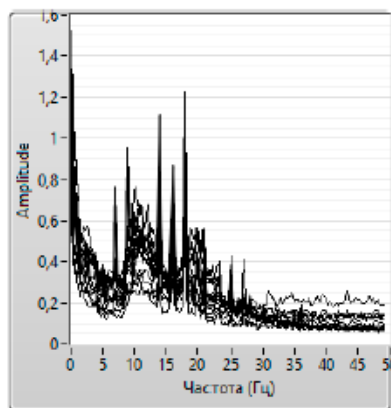


Рис. 3. Спектры ЭЭГ всех отведений при воздействии стимулом 7 Гц на левый глаз, 9 Гц – на правый

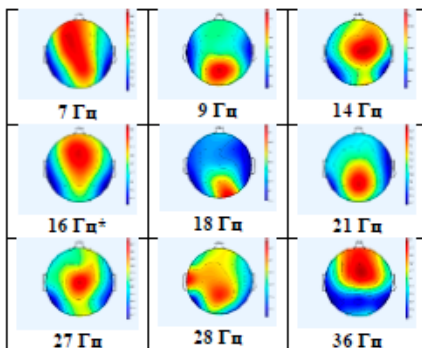


Рис. 4. Пространственное распределение гармоник при воздействии комбинационным стимулом 7+9 Гц. Звездочками обозначены компоненты спектра, не являющиеся кратными частотам стимулов

Этот механизм, возможно, лежит в основе вычислительных операций мозга, необходимых для выполнения различных функций, поскольку в результате нелинейного взаимодействия ритмов (мультипликация) выполнялся ряд арифметических операций: сложение, вычитание, умножение

и возведение в степень. В литературе также отмечается роль мультипликации ритмов в вычислительных процессах мозга [8].

Следует сказать, что не все целочисленно относящиеся друг к другу частоты в спектре являются псевдогармониками, хотя и имеют один и тот же механизм возникновения. Так, судорожные сигналы во время эпилептического статуса [3] имеют в спектре множество целочисленно относящихся друг к другу компонент, которые мы вправе называть гармониками. Патологические процессы могут приводить к нарушению механизма распределения псевдогармоник по разным нейронным сетям, так что циклическая мультипликация осуществляется в одной и той же сети. Это приводит к искажению исходного эндогенного ритма, его обострению и превращению в пиковую. В этом случае мы имеем дело с реальными гармониками в спектре, которые отражают форму сигнала. Чем больше гармоник наблюдается в спектре, тем более острыми являются сигналы.

Можно предположить, что одной из функций пространственного распределения псевдогармоник является защита в рекуррентной циклической среде от возникновения островолновых эпилептических сигналов.

Заключение

При комплексной бичастотной фотостимуляции синусоидальными сигналами в электрической активности коры наблюдается нелинейный ответ. Он заключается в наличии в спектрах ЭЭГ компонент, не имеющих в подаваемых стимулах. Они находятся как в гармонических отношениях со стимулом, так и представляют собой суммы и разности частот стимулов. На основании этих результатов была предложена операционная модель формирования ЭЭГ реакций, в основе которой лежит операция амплитудной модуляции (мультипликации) индуцированных ритмов между собой. Продукты этих мультипликаций локализуются

в различных нейросетях, представляя собой независимые процессы. Операцию мультипликации ритмов можно рассматривать как вычислительный процесс, обеспечивающий реализацию различных функций организма.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-18-20075.

Литература

1. *Regan D.* Some characteristics of average steady-state and transient responses evoked by modulated light. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1966. V. 20. P. 238–248.
2. *Bondar A.T., Shubina L.* The Relationship Between the Rhythmic Components of the Brain Electrical Activity During the Development of Status Epilepticus: An Operational Model of Brain Rhythms Generation // *Brain connectivity.* 2022. V. 12, № 6. P. 571–583.
3. *Bondar A.T., Shubina L.* Nonlinear reactions of limbic structure electrical activity in response to rhythmical photostimulation in guinea pigs // *Brain Research Bulletin.* 2018. V. 43. P. 73–82.
4. *Içcan Z., Nikulin V.V.*, 2018. Steady state visual evoked potential (SSVEP) based braincomputer interface (BCI) performance under different perturbations // *PLoS One* 13 [https://DOI.org/10.1371/journal.pone.0191673](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191673). e0191673.
5. *Zhang Y., Guo D., Xu P., Zhang Y., Yao D.* Robust frequency recognition for SSVEP-based BCI with temporally local multivariate synchronization index // *Cogn. Neurodyn.* 2016. V. 10. P. 505–511.
6. *John Clark, Colin Yallop and Janet Fletcher.* An Introduction to Phonetics and Phonology // Blackwell Publishing. 2007.
7. *Бондарь А.Т., Федотчев А.И., Полесая С.А.* Пространственные особенности нелинейных процессов в коре головного мозга человека. // *Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях: труды VI всероссийской конференции.* 2019. Нижний Новгород, С. 49–50.
8. *Angus Silver R.* Neuronal arithmetic // *Nature reviews, Neuroscience,* V. 11. July 2010. P. 474–489.