

МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХСЛАБОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЭМП НА ФОНЕ ВЫСОКОАМПЛИТУДНОГО ШУМА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МЕТОДОМ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТОМЕТРИИ

Синельникова И.А., Лавров Л.М.,

Федеральное государственное унитарное предприятие
 Российский Федеральный Ядерный Центр
 Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
 (ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ) г. Саров

Введение. При проведении измерений слабых и сверхслабых магнитных полей (МП) биологических объектов с использованием метода сверхпроводящей магнитометрии, основанного на использовании сверхпроводящего интерференционного датчика (СКВИД), возникает проблема выделения информационной составляющей сигнала. СКВИД является самым чувствительным прибором для измерения магнитной компоненты электромагнитного поля. Эта высокая его чувствительность одновременно является и его достоинством, и его недостатком, поскольку измеренный сигнал наряду с информационной составляющей всегда в той или иной степени содержит фоновые составляющие ЭМП промышленного происхождения, геомагнитного поля (ГМП) и шумов измерительного комплекса. Причём, если уровень собственных шумов СКВИД-градиометра на всей полосе пропускания не превышает 10^{-13} Тл [1], то две другие составляющие по уровню намного перекрывают сигналы от биообъектов. Отметим, что биомагнитные сигналы очень слабы, на порядок или даже несколько порядков ниже ГМП [2]. С помощью технических приемов и аппаратных средств (экранирование, устройства подавления или компенсации внешних сигналов и т.п.) не всегда удается обеспечить требуемое отношение сигнал/шум. Так же не всегда возможно выделение сигнала с помощью электронных схем фильтрации аналоговых сигналов без потери информации, особенно когда не известны параметры информационной составляющей спектра аналогового сигнала. В этом случае применение каких-либо активных элементов в цепи регистрации может привести либо к существенным искажениям результатов измерения, либо к их полной потере. При проведении биомагнитных исследований целесообразно регистрировать сигнал на всей полосе пропускания СКВИД. А затем, в зависимости от предполагаемых параметров исследуемого сигнала проводить его анализ, используя известные методы цифровой обработки сигнала (ЦОС).

Математическая модель биообъекта для обнаружения полезного сигнала, полученного при измерении МП на фоне помех Для выделения полезной составляющей из измеренного зашумленного сигнала приняли упрощенную математическую модель биообъекта, изображенную на рисунке 1.

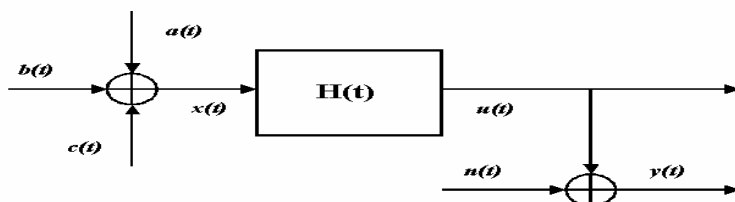


Рис. 1 - Линейная система с выходным сигналом $y(t)$, содержащим некоорелированный шум $n(t)$

Исследуемый биологический объект здесь является линейной системой, соответствующей простой классической линейной модели с некоорелированным шумом на выходе [3]. На систему действует входной сигнал $x(t)=a(t)+b(t)+c(t)$, состоящий из ГМП $a(t)$, узкополосных фоновых помех техногенного происхождения $b(t)$ и собственных шумов измерительной аппаратуры $c(t)$. Линейная система имеет частотную характеристику $H(f)$. На выходе системы получаем сигнал $y(t)$ как сумму двух составляющих: $u(t)$, обусловленной входным сигналом $x(t)$, а так же $n(t)$, некоорелированной с входным сигналом $x(t)$. Функция $n(t)$ и является в данном случае искомым собственным сигналом исследуемого объекта.

Для уменьшения уровня шума применили накопление сигнала, ДПФ корреляционных функций и метод осреднения Барлетта по непересекающимся отрезкам одного и того же сигнала. При накоплении сигнала путем сложения его n раз отношение сигнал/шум по энергии q_1 возрастет в n раз, а по амплитуде в \sqrt{n} раз. Накопление и осреднение позволяет сгладить некоорелированную составляющую белого шума, а затем удалить ее. При накоплении сигнала путем сложения его n раз отношение сигнал/шум по энергии q_1 возрастет в n раз, а по амплитуде в \sqrt{n} раз. При накоплении когерентного сигнала с помощью автокорреляции в предположении, что шум некоорелирован, отношение сигнал/шум возрастает в m раз

$$m = q_1/q = f_1 T, \quad (1)$$

где f_1 – основная гармоника сигнала;
 T – длительность корреляции.

Функция обычной когерентности

$$\gamma^2 = \frac{|S_{xy}|^2}{S_x S_y}, \quad (2)$$

связывающая стационарные фон $x(t)$ и сигнал с фоном $y(t)$, позволяет получить отношение информационной составляющей сигнала к фону.

Для собственного сигнала, не связанного с составляющей фона, для линейной системы с шумом на выходе можно записать

$$S_n(f) = (1-\gamma^2) S_y(f). \quad (3)$$

Для установления связи автокорреляционной функции и спектральной плотности мощности существует соотношение Винера-Хинчина [4,5].

2. Модельный эксперимент Суть модельного эксперимента состояла в том, чтобы определить частоту низкоамплитудного периодического сигнала, заданного на фоне высокоамплитудных помех. Причем частота заранее не была известна исследователю, ответственному за создание методики обнаружения сигнала. Отношение сигнал/шум по амплитуде составляло: 1/10, 1/30 и 1/100.

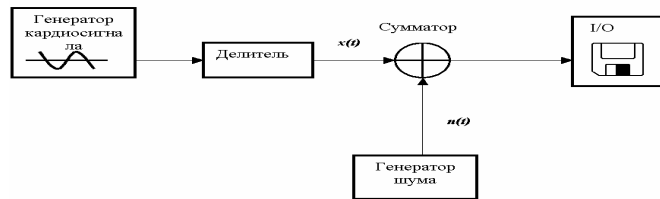


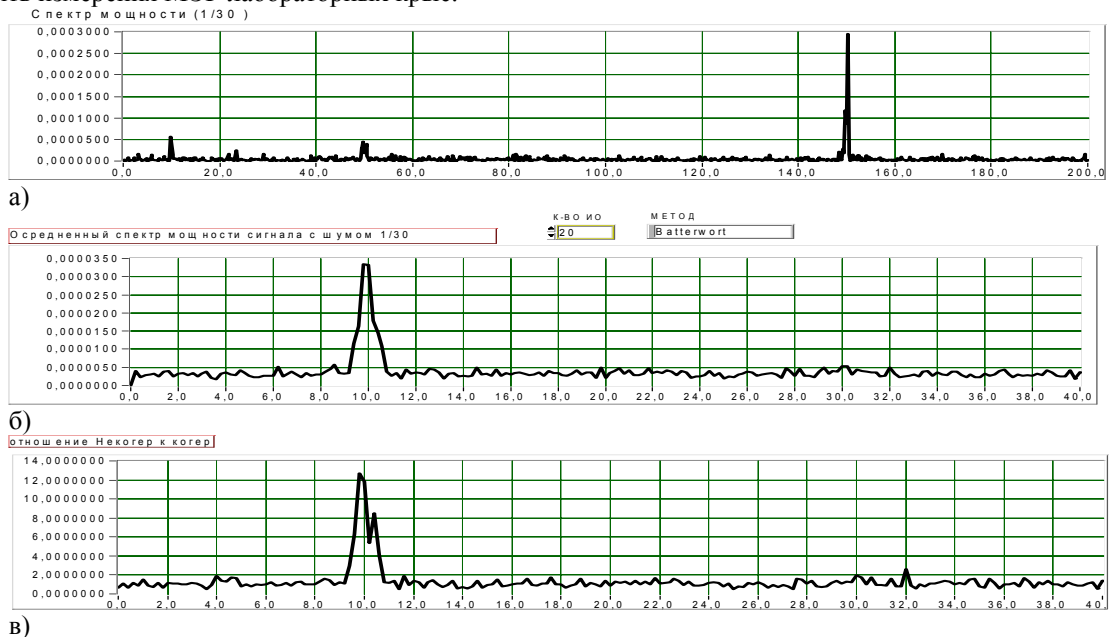
Рис 2 - Схема генератора зашумленного сигнала

На сумматор подавали периодический сигнал $x(t)$ неизвестной для расчетчика частоты и аналог выходного сигнала $n(t)$, соответствующий сигналу СКВИДа, когда в его зоне измерения отсутствует биообъект. С помощью делителя устанавливали необходимую амплитуду сигнала $x(t)$. После сумматора зашумленный сигнал поступал на приемное устройство измерительного комплекса. Поскольку частота сигнала заранее не была известна, то частоту дискретизации приемного устройства установили равной 10 кГц.

Результаты тестирования методики выделения стационарного сигнала на фоне высокоамплитудных помех

В результате опробования методики обнаружена периодическая составляющая зашумленного сигнала при отношении сигнал/шум, равном 1/30 уже после 10 секундной корреляции и - 1/100 после осреднения по 20 отрезкам.

На рис. 3 а) представлена спектральная плотность отрезка зашумленного сигнала длительностью 10 с при отношении сигнал/шум равном 1/30, на рисунке 3 б) – участок до 40 Гц его осредненной методом Бартлетта по 20 отрезкам спектральной плотности, а на рисунке 3 в) – отношение некогерентной с помехами на входе части выходного сигнала к когерентной, на рисунках 3 г), 3 д) и 3 е) – аналогичные характеристики при отношении сигнал/шум равном 1/100. Полученные результаты позволили с помощью СКВИДа проводить измерения МЭГ лабораторных крыс.



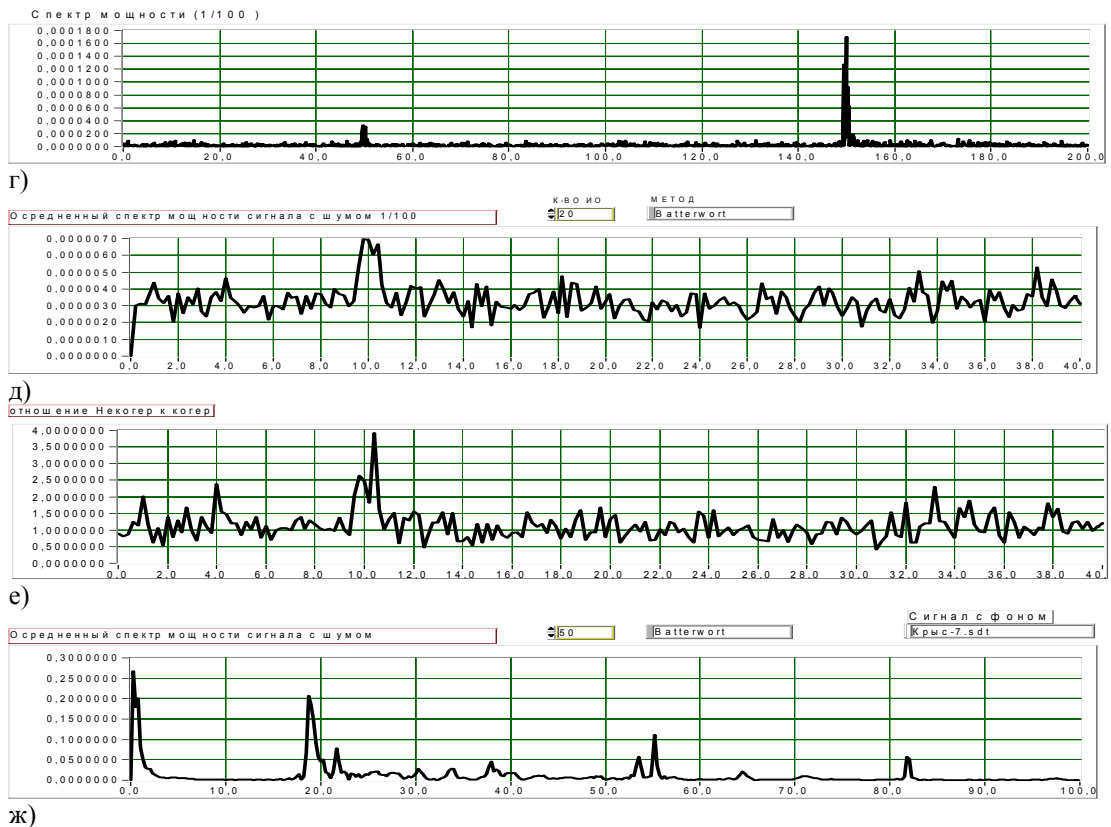


Рис. 3 – частотные характеристики сигнала при отношении сигнал/шум, равном 1/30 - а), б), с), и при отношении сигнал/шум, равном 1/100 - в), г), д), МЭГ крысы ж).

Литература

1. Киршвинк Дж., Джонс А. Биогенный магнетит и магниторецепция. В 2-х т.т. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989, т.1 – 352с.
2. Кнеппо П., Титомир Л.И. Биомангнитные измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1989, 216с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. Пер. с англ. – М.: Мир, 1974, 464 с.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов.-4-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986, 512с.
5. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х т.т. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983, т.1 – 312с.