

ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ РАДИОЧАСТОТНЫМ МАГНИТНО-ПОЛЕВЫМ ЗОНДОМ НА ОДНОСЛОЙНОЙ ПЛОСКОЙ КАТУШКЕ

С.А. ХАЧУНЦ*

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: skhach97@gmail.com

(Поступила в редакцию 18 января 2023 г.)

В данной работе была оценена эффективная глубина зондирования водной среды сенсором на основе однослойной плоской катушки. Использован радиочастотный сенсор диапазона $\sim 40\text{--}50$ МГц с диаметром чувствительного элемента – плоской катушки ~ 8 мм. В качестве исследуемой среды были использованы размещаемые перед сенсором пластиковые кюветы, заполненные дистиллированной водой, количество которых последовательно увеличивалось. Измерялась частота сенсора в зависимости от количества размещаемых перед сенсором кювет. Выявлен характер изменения регистрируемой частоты сенсора в зависимости от толщины выбранного в качестве среды водного слоя.

1. Введение

В последние годы все чаще используются различные медицинские инструменты, с помощью которых регистрируются разнообразные биосигналы органов и систем человеческого тела. Для регистрации этих сигналов используется множество разных типов сенсоров, начиная от простых сенсоров, работающих на основе фотоплетизмографии, и заканчивая сложными диагностическими системами, работающими на основе магнитно-резонансной томографии. В настоящее время также широко используются сенсоры, обнаруживающие магнитные явления в организме, большинство из которых основаны на различных типах индуктивных катушек [1–2].

В конце 90-х годов в Армении была создана высокочувствительная методика измерений на основе маломощного осциллятора на плоской катушке (ПК). Технология успешно применялась в экспериментальной физике и позволила исследовать свойства высокотемпературных сверхпроводников. Позднее эта методика легла в основу оригинальной технологической платформы, известной как «SFCO-технология» (Single-layer Flat-Coil-Oscillator technology). Повышение чувствительности детектирующей техники в сейсмологии и геофизике [3], разработка диагностической техники в физиологии, биофизике и медико-биологических исследованиях [4–6] – лишь некоторые направления развития и применения этой технологии.

Существуют два основных класса прецизионных SFCO-сенсоров: сенсоры с механической колебательной системой (металлическая пластина у поверхности плоской катушки) и сенсоры без механической колебательной системы [3].

Первый класс включает такие типы, как датчики положения, скорости, ускорения, вибрационный сенсор, акустический сенсор. Второй класс представлен такими типами, как безынерционный термодатчик высокого разрешения (~ 1 мК), нановаттный измеритель добротности/поглощения (Q-meter) и радиочастотный магнитно-полевой зонд (РЧ МП зонд) [3].

Оба класса сенсоров могут эффективно использоваться в медико-биологических исследованиях [4–6], хотя границы их применимости сильно различаются. Причина в принципе работы этих сенсоров. Физические принципы работы любых SFCO-сенсоров основаны на изменении частоты и/или амплитуды измерительного осциллятора (ИО), запускаемого маломощным обращённым туннельным диодом [3,6]. В случае сенсоров первого класса измеряемой величиной является частота автоколебаний осциллятора, а её изменение обусловлено деформацией силовых линий РЧ поля у поверхности ПК сенсора при приближении/удалении металлической пластины колебательной системы. Электромагнитное поле ПК наводит токи Фуко в пластине, приводящие к экранированию и деформации силовых линий измерительного поля и соответствующему сдвигу частоты осциллятора. В случае магнитно-полевого зонда, который был исследован в данной работе, одной из наиболее вероятных причин изменения амплитуды и, в меньшей степени, частоты [7] является поглощение энергии РЧ поля осциллятора исследуемой средой. Излучаемое осциллятором радиочастотное поле вызывает принудительную переориентацию дипольных структур среды. Другая причина - поглощение энергии РЧ поля осциллятора индуцированными вихревыми токами, вызванными даже малым количеством свободных зарядов в диэлектрических средах.

Отсутствие механической колебательной системы в РЧ МП зондах выводит их на передний план в контексте их применения в медико-биологических исследованиях, так как они не имеют ограничений по частоте (резонансная частота механической колебательной системы, предельная частота диапазона чувствительности и т.д.). Частотные характеристики регистрируемых этими зондами сигналов отражают биофизические свойства изучаемых объектов, тканей и сред. Ранее были проведены исследования радиофизических параметров однослойных ПК, применяемых в сенсорах без механической колебательной системы (а также их сравнение с другими типами катушек), для выявления пространственного распределения переменного электромагнитного поля этих элементов. Показана возможность зондирования различных структур и сред на расстоянии, многократно превышающем размеры чувствительного элемента – плоской катушки [5,8]. В обычных условиях диэлектрические среды и/или структуры детектируются уже на расстоянии 15–20 см, что актуализирует изучение возможности глубинного зондирования тканей и сред «in-vivo».

Цель настоящей работы – оценить возможную глубину сканирования водной среды, что даст примерное представление относительно максимально возможной глубины зондирования биологических сред и структур, поскольку содержание воды в данных средах и структурах составляет существенную долю.

2. Условия эксперимента и методы исследований

Сканирование объектов осуществлялось РЧ МП SFCO-зондом с приёмной плоской катушкой диаметром ~ 8 мм (метка 1 на рис.1), закрепленным на стационарном основании (метка 2 на рис.1). Сенсоры на основе технологии SFCO

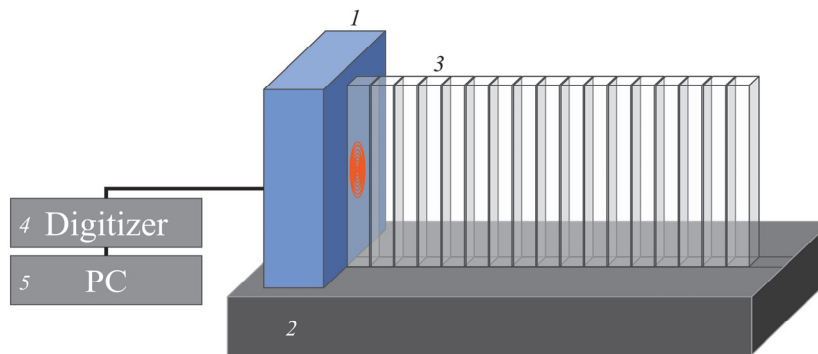


Рис.1. Схематическое представление эксперимента: 1 – магнитно-полевой SFCO-зонд с плоской зондирующей катушкой диаметром ~ 8 мм, 2 – стационарное основание, 3 – пластиковые кюветы с поверхностью среза ~ 1 см² (12×12 мм²) и глубиной 4 см, толщиной стенки 1 мм, 4 – восьмиканальный частотомер SFFM-8, 5 – компьютер.

состоят из двух автогенераторов. Один из них является измерительным генератором (на плоской поверхности катушки которого находится исследуемый объект), а другой – опорным. При этом параметры опорного генератора остаются неизменными в течение всех измерений. Такая конструкция датчиков обеспечивает точность измерений, поскольку резко уменьшаются температурный дрейф (из-за нагрева элементов схемы) и коррелированные шумы. Фактически, регистрируется не сдвиг частоты измерительного генератора, а сдвиг разности частот опорного и измерительного генераторов, а именно $\delta(\Delta F) = \delta(F_{\text{ref}} - F_{\text{meas}})$.

Перед зондом размещались пластиковые кюветы в форме параллелепипеда, пустые или заполненные дистиллированной водой, с поверхностью среза ~ 1 см² (12×12 мм²) и глубиной 4 см, толщина стенки – 1 мм (метка 3 на рис.1). Сигналы от МП зонда подавались на специализированный восьмиканальный частотомер SFFM-8 (Digitizer) для оцифровки и обработки поступающей информации (метка 4 на рис.1). Измеренные данные поступали в компьютер (метка 5 на рис.1) и регистрировались разработанным фирмой «PSI» в среде «LabVIEW» (NI, USA) виртуальным прибором (программой). Частотомер регистрировал частоту осциллятора со скоростью 1000 измерений в секунду, т.е. динамические процессы в результате наших измерений оценивались с временным шагом в 1 мсек. Точность считывания частоты составляла $\pm 2\text{--}3$ Гц, что существенно ниже уровня собственных шумов ИО и шумов окружения (± 100 Гц). Обработка измеренных данных производилась с помощью программы «DIAdem» (NI, USA) методами цифровой фильтрации сигналов и сплайн-интерполяции.

Измерялись: фоновый (исходный) уровень частоты осциллятора (представляющий из себя разность частот опорного и измерительного генераторов, исходные уровни которых лежат в пределах $\sim 40\text{--}50$ МГц), равный 745 кГц; уровень частоты осциллятора при расположении перед МП зондом пустой пластиковой спектрофотометрической кюветы стандартного размера; уровни частоты осциллятора при последовательном увеличении количества кювет, наполненных дистиллированной водой, расположенных перед МП зондом, от одной до семнадцати (рис.1).

3. Результаты и их обсуждение

Размещение полый пластиковой кюветы приводило к некоторому изменению исходной частоты осциллятора, что обусловлено диэлектрической природой материала кюветы. После изъятия полый пластиковой кюветы частота осциллятора возвращалась практически к исходному уровню, что указывает на высокую стабильность МП SFCO сенсора (табл.1).

Табл.1. Сравнительный уровень частот измерительного осциллятора при размещении и изъятии полый пластиковой кюветы

Исходный уровень частоты осциллятора, кГц	Частота осциллятора после размещения полый кюветы, кГц	Частота осциллятора после изъятия, кГц
743.056	735.080	743.049

При поочередном добавлении кювет, наполненных дистиллированной водой, наблюдалось экспоненциальное снижение уровня частоты измерительного осциллятора (закрашенные прямоугольники на рис.2). Подобные изменения заметны до 9-й или 10-й кюветы. С учётом того, что ширина одной кюветы составляет 12 мм (2 мм пластика, 10 мм воды), следует, что глубина зондирования для водно-пластиковой среды в данном случае составляет ~120 мм (20 мм пластика, 100 мм воды) (метка 10 на рис.2).

Как видно из табл.2, пустая кювета приводит к некоторому изменению значения частоты осциллятора, составляющей примерно ~1% от исходного значения. В случае же кюветы, заполненной дистиллированной водой, это значение составляет ~5.8% от исходного значения частоты осциллятора. Так как в первом случае диэлектрическим материалом, вызывающим данное изменение, являются

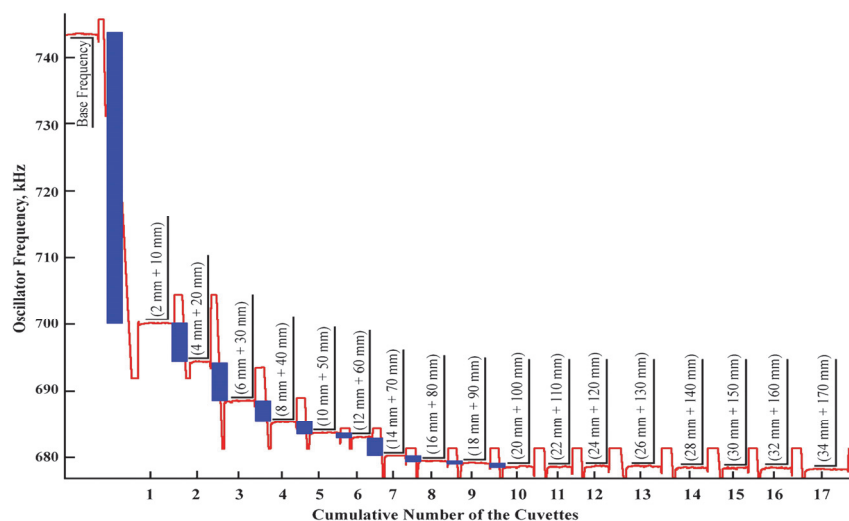


Рис.2. Зависимость частоты измерительного осциллятора от количества установленных перед зондом пластиковых кювет, наполненных дистиллированной водой (метки начиная от 1 до 17). В скобках первое число обозначает толщину слоя пластика, второе число – суммарную толщину составного столба дистиллированной воды.

Табл.2. Сдвиг частоты измерительного осциллятора РЧ МП зонда в зависимости от исследуемого объекта/среды

Полая кювета ($2 \times 10 \times 40 \text{ мм}^3$ пластик)		Кювета с дистиллированной водой ($2 \times 10 \times 40 \text{ мм}^3$ пластик + $10 \times 10 \times 40 \text{ мм}^3 \text{ H}_2\text{O}$)		Дистиллированная вода ($10 \times 10 \times 40 \text{ мм}^3 \text{ H}_2\text{O}$)	
%	кГц	%	кГц	%	кГц
1.04	7.77	5.84	43.42	4.79*	35.65*

*расчётные значения

две тонкие стенки (толщина каждой $\sim 1 \text{ мм}$) пластиковой кюветы, а во втором случае изменение обусловлено суммарным эффектом сдвига частоты осциллятора стенками кюветы и столбом дистиллированной воды толщиной $\sim 10 \text{ мм}$, можно примерно оценить величину изменения частоты, обусловленной собственно столбом воды, равной разнице вышеприведенных значений $\sim 4.8\%$.

Динамика сдвига частоты осциллятора в зависимости от количества кювет, заполненных водой, показана на рис.3. Для наглядности была произведена аппроксимация полиномиальной кривой 4-й степени. Как видно из рис.3, после 10-й кюветы отклонение от кривой фитинга сопоставимо с погрешностями измерения, что свидетельствует о том, что глубина 10-ти кювет, наполненных дистиллированной водой ($\sim 120 \text{ мм}$), составляет предельный лимит для использованного в работе пробного (далеко не оптимизированного) сенсора. Поскольку при сканировании биологических структур, в частности, головного мозга, мы сталкиваемся с неоднородностью сред (губчатые кости черепа, ликвор, собственно мозговая ткань и т. д), глубина зондирования будет несколько меньше, чем в данном эксперименте.

4. Заключение

В работе оценены возможности и ограничения применения магнитно-полевого зонда, представляющего из себя осциллятор с однослойной плоской

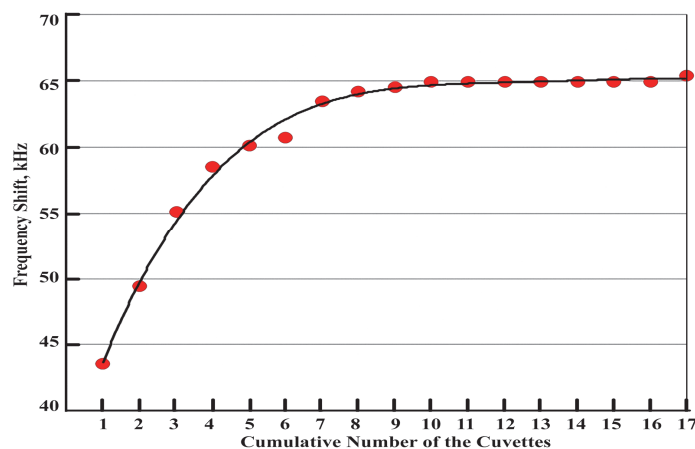


Рис.3. Динамика сдвига частоты РЧ МП зонда в зависимости от количества кювет, заполненных водой. Проведена аппроксимация кривой полиномом 4-й степени.

катушкой в качестве приёмного элемента, в медико-биологических исследованиях. В качестве материала/среды использовались пластиковые кюветы, заполненные дистиллированной водой. Путём сканирования кювет экспериментально была определена максимально возможная глубина зондирования водных слоёв для изученного РЧ магнитно-полевого зонда с диаметром чувствительного элемента ~8 мм, которая оказалась равной 120 мм.

Измеренная максимально доступная глубина зондирования делает возможным применение таких сенсоров в медико-биологических исследованиях, однако, следует отметить, что, в случае применения данного зонда для измерения собственно биологических тканей, реальная эффективная глубина зондирования будет несколько меньше вследствие анизотропии биологических структур и сред.

Автор выражает благодарность руководству фирмы «PSI» в связи с временным предоставлением РЧ МП зондов, а также блока счёта и обработки информации с соответствующим программным обеспечением, для проведения представленных в работе экспериментов. Автор признателен С.Г. Геворгяну и А.Г. Макаряню за ценные советы и помощь в процессе реализации исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА (Научный проект № 22YR-1C013).

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Tumanski. Meas. Sci. Technol., **18**, R31 (2007).
2. Y. Chai, S. Horikawa, H.C. Wickle, Z. Wang, B.A. Chin. Appl. Phys. Lett., **103**, 173510 (2013).
3. S.G. Gevorgyan, A.S. Khachunts, G.S. Gevorgyan, H.G. Shirinyan, V.S. Gevorgyan, B.K. Kurghinyan, S.A. Khachunts. Rev. Sci. Instrum., **92**, 055011 (2021).
4. A.S. Khachunts, S.G. Gevorgyan, N.E. Tadevosyan, A.A. Tumanian, E.G. Kostanyan, I.G. Tadevosyan, B.K. Kurghinyan, S.A. Khachunts, V.S. Gevorgyan. J. Contemp. Phys., **54**, 386 (2019).
5. A.S. Khachunts, S.G. Gevorgyan, G.S. Gevorgyan, S.A. Khachunts. J. Contemp. Phys., **55**, 46 (2020).
6. S.G. Gevorgyan, A.S. Khachunts, G.S. Gevorgyan, A.A. Tumanian, N.E. Tadevosyan. Rev. Sci. Instrum., **93**, 054109 (2022).
7. S.G. Gevorgyan, T. Kiss, H.G. Shirinyan, A.A. Movsisyan, T. Ohyama, M. Inoue, T. Matsushita, M. Takeo. Physica C, **363**, 113 (2001).
8. B.K. Kurghinyan. Proc. of the YSU, Phys. and Math. Sci., **227**, 53 (2012).

EVALUATING THE DEPTH OF WATER MEDIUM PROBING USING A MAGNETIC-FIELD RADIOFREQUENCY PROBE BASED ON A SINGLE-LAYER FLAT COIL

S.A. KHACHUNTS

In this work, the effective depth of sensing the aquatic environment by a sensor based on a single-layer flat coil was studied. A radiofrequency sensor of the ~40-50 MHz range with a diameter of the sensitive element (a flat coil) of ~8 mm was used. Plastic cuvettes filled with distilled water placed in front of the sensor were used as the test medium, the number of which was sequentially increased. The frequency of the sensor was measured depending on the number of cuvettes placed in front of the sensor. The character of changes in the registered frequency of the sensor depending on the thickness of the aqueous layer selected as the medium was revealed.