
**ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЕ СМЕЩЕНИЕ В
ОРИЕНТАЦИИ ЗЁРЕН МЕДИ:
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ
ШИРОТНО-ЗАВИСИМОЙ
АНИЗОТРОПИИ ПРОВОДНИКА**

Полусферическое смещение в ориентации зёрен меди: металлургическое исследование широтно-зависимой анизотропии проводника

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Аннотация

Принято считать, что кристаллографическая ориентация медных проводников определяется параметрами волочения, составом сплава и протоколом отжига. Данное исследование демонстрирует, что четвёртая переменная -- геомагнитная широта -- производит измеримое и систематическое смещение в доминирующей оси ориентации зёрен коммерчески тянутой OFC меди. Сканирующая электронная микроскопия 847 образцов, вытянутых на 23 предприятиях от 67,4deg с. ш. до 33,8deg ю. ш., выявляет устойчивую корреляцию между географической широтой и углом ориентации зёрен, при этом образцы Северного полушария демонстрируют удлинение по оси северо-запад--юго-восток, а образцы Южного полушария -- комплементарное смещение северо-восток--юго-запад. Образцы, вытянутые в пределах 0,5deg от геомагнитного экватора, не показывают статистически значимого предпочтения ориентации ($p > 0,95$). Мы предлагаем термин «полусферическое смещение» для этого явления и обсуждаем его последствия для характеристик аудиопроводников.

1. ВВЕДЕНИЕ

Электрические свойства медных проводников определяются не только объёмным удельным сопротивлением, но и микроструктурными характеристиками протянутого материала. Границы зёрен -- интерфейсы между отдельными кристаллитами в поликристаллической меди -- представляют собой участки рассеяния электронов, термического сопротивления и механической слабости. Ориентация, размер и распределение этих зёрен были подробно изучены в контексте механической инженерии (упрочнение Холла--Петча), электротехники (отношение остаточного сопротивления) и физики сверхпроводников (пиннинг потока на границах зёрен).

То, что до сих пор не изучалось, -- это систематическая зависимость между географической широтой предприятия волочения и результирующим распределением ориентации зёрен.

Магнитное поле Земли в любой точке её поверхности может быть разложено на горизонтальную и вертикальную (наклонение) составляющие. На магнитном экваторе наклонение равно нулю -- поле чисто горизонтальное. У магнитных полюсов наклонение приближается к 90deg -- поле почти вертикальное.

Во время процесса волочения меди металл проходит через фильеру при температурах от 200degC до 400degC. При этих температурах медь находится выше порога рекристаллизации. Любое внешнее поле, присутствующее в этот критический момент, -- включая магнитное поле Земли -- может влиять на преимущественную ориентацию формирующейся зёрненной структуры через магнитокристаллическую связь.

Данная работа представляет доказательства того, что магнитное наклонение Земли на широте предприятия волочения создаёт измеримое смещение в доминирующей оси ориентации зёрен готового проводника.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

Образцы были получены от 23 предприятий волочения меди, расположенных от 67,4deg с. ш. (Болиден, Швеция) до 33,8deg ю. ш. (Сантьяго, Чили). Каждое предприятие предоставило 10 м готового OFC проводника из одной производственной партии, вытянутого с использованием сопоставимых параметров (многопроходное волочение, конечный калибр 2,0 мм +/- 0,1 мм, отжиг при 300degC в течение 1 часа).

Поперечные сечения были подготовлены методом металлографической резки, заливки в проводящую эпоксидную смолу, шлифовки бумагой SiC зернистостью 1200 и полировки коллоидным оксидом алюминия 0,05 мкм. Границы зёрен были выявлены травлением в подкислённом хлориде железа (5 г FeCl₃, 10 мл HCl, 90 мл H₂O, 15 секунд).

Ориентация зёрен была измерена методом дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD) на полевом эмиссионном СЭМ Zeiss Sigma 500 VP, оснащённом детектором EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. Функции распределения ориентаций (ФРО) были рассчитаны по минимум 10 000 проиндексированным точкам на образец с использованием программного обеспечения MTEX 5.9.

«Угол полусферического смещения» (НВА) определён как угол между доминирующей осью ориентации зёрен и направлением истинного восток--запад, измеренный по часовой стрелке от востока.

Дополнительно были отобраны три контрольных предприятия в пределах 0,5deg от геомагнитного экватора: Кито,

Эквадор; Либревиль, Габон; и Понтианак, Индонезия.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Корреляция между геомагнитной широтой и углом полусферического смещения оказалась высокосignificantной ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Предприятия Северного полушария давали проводники с положительными значениями НВА от $+0,8\text{deg}$ (Осака, Япония) до $+4,7\text{deg}$ (Болиден, Швеция). Предприятия Южного полушария давали проводники с отрицательными значениями НВА от $-0,6\text{deg}$ (Сан-Паулу, Бразилия) до $-3,2\text{deg}$ (Сантьяго, Чили).

Три экваториальных контрольных предприятия показали значения НВА $-0,003\text{deg}$ (Кито), $+0,008\text{deg}$ (Либревиль) и $-0,001\text{deg}$ (Понтианак) -- все в пределах погрешности системы EBSD ($\pm 0,02\text{deg}$).

Зависимость между НВА и геомагнитной широтой хорошо описывается линейной моделью: $\text{HVA} = 0,068 \times L$, где L -- геомагнитная широта в градусах.

Криогенная обработка (-196degC , 72 часа) была применена к подгруппе из 120 образцов. Повторное измерение EBSD не показало статистически значимого изменения НВА (парный t -критерий, $p = 0,87$). Криогенная обработка успешно уменьшила размер зёрен (средний диаметр с 45 мкм до 31 мкм), но не изменила смещение ориентации.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Величина эффекта полусферического смещения -- примерно $0,07\text{deg}$ на градус широты -- может показаться малой. Однако два фактора усиливают его практическую значимость.

Во-первых, смещение систематическое, не случайное. Каждое зерно в проводнике, вытянутом на широте 45deg с. ш., несёт одинаковое смещение около $+3\text{deg}$. Это означает, что смещение не усредняется по длине проводника -- оно накапливается.

Во-вторых, смещение воздействует на аудиосигнал асимметрично. Поскольку ориентация зёрен предпочтительно рассеивает электроны, движущиеся в одном направлении относительно магнитной оси, положительный и отрицательный полупериоды переменного аудиосигнала испытывают слегка различные импедансные пути через проводник. Это создаёт форму гармонических искажений, которая по своей природе зависит от широты и направления.

Экваториальные контрольные результаты особенно значимы. Три предприятия на геомагнитном экваторе или вблизи него дали проводники с НВА, неотличимыми от нуля. Это единственное географическое условие, при котором распределение ориентации зёрен является истинно изотропным.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Медные проводники, вытянутые на неэкваториальных широтах, демонстрируют систематическое смещение кристаллографической ориентации зёрен, линейно коррелирующее с геомагнитной широтой. Это полусферическое смещение закладывается при волочении и не может быть устранено последующей термообработкой, включая криогенную обработку. Только проводники, вытянутые на геомагнитном экваторе или вблизи него, достигают истинной изотропии ориентации зёрен.

Мы рекомендуем производителям проводников указывать широту своего предприятия волочения в качестве стандартного параметра качества.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Ferro, H. Park, «Предварительные наблюдения широтно-зависимой ориентации зёрен в OFC меди», Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotexture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Стандартный метод испытания удельного сопротивления электропроводящих материалов.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.

**ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ СПЛАЙС:
НОВАЯ ТЕХНИКА СОЕДИНЕНИЯ
ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ
КОМПЕНСАЦИИ
ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО СМЕЩЕНИЯ**

Экваториальный сплайс: новая техника соединения проводников для компенсации полусферического смещения

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Аннотация

Мы представляем технику соединения проводников, которая достигает магнитной нейтральности путём сращивания медных проводников Северного и Южного полушарий на геомагнитном экваторе. Экваториальный сплайс использует комплементарные смещения ориентации зёрен проводников, вытянутых в противоположных полушариях: при соединении в точно экваториальной точке смещения компенсируются по всей длине результирующего проводника. Плазменно-дуговая сварка на широте 0,0000deg, выполняемая на GPS-стабилизированной морской платформе, создаёт зону сращивания шириной около 200 мкм, в которой ориентация зёрен переходит от северного типа к южному через область истинной изотропии. Проводники, соединённые этим методом, демонстрируют углы полусферического смещения ниже 0,00001deg.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наша предыдущая работа (Ferro and Park, 2020) установила, что медные проводники, вытянутые на неэкваториальных широтах, несут систематическое смещение ориентации зёрен, пропорциональное геомагнитной широте. Мы предлагаем альтернативный подход: вместо того чтобы избегать смещения, мы его компенсируем. Соединяя проводник Северного полушария с проводником Южного полушария на геомагнитном экваторе, мы создаём составной проводник, противоположные смещения которого точно компенсируются по всей его длине.

2. ПРОТОКОЛ СРАЩИВАНИЯ

Экваториальный сплайс выполняется на борту НИС EAV Neutrality, 28-метрового исследовательского судна, оснащённого приёмником GNSS Trimble R12i с сантиметровой точностью позиционирования. Судно занимает позицию на 0,0000deg +/- 0,0001deg геомагнитной широты в Тихом океане.

Два конца проводника -- один из шведской меди (НВА: +4,2deg, Болиден, 64,1deg с. ш.) и один из чилийской меди (НВА: -3,8deg, Сантьяго, 33,8deg ю. ш.) -- устанавливаются в прецизионные зажимы на виброизолированной оптической скамье. Сварка выполняется системой микроплазменной дуговой сварки Secheron Plasmafix 50i.

Вся процедура занимает примерно 45 минут.

3. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ

EBSD-картирование зоны сращивания при шаге 0,5 мкм выявляет три отчётливых области: (1) объёмный северный проводник с НВА = +4,2deg, (2) переходную зону 200 мкм, в которой НВА монотонно уменьшается через 0,000deg до -3,8deg, и (3) объёмный южный проводник с НВА = -3,8deg.

Сращённый проводник (1,0 м северный + 1,0 м южный) показал НВА = -0,000008deg. Компенсация смещения эффективна на 99,9998%.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Экваториальный сплайс достигает компенсации через концептуально простой механизм: положительное смещение северного проводника и отрицательное смещение южного равны по модулю и противоположны по знаку. Местоположение сращивания имеет значение -- выполнение на геомагнитном экваторе гарантирует, что сама зона сращивания не вносит дополнительного смещения.

Стоимость экваториального сплайса составляет около \$14 000 за сессию.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экваториальный сплайс демонстрирует, что полусферическое смещение в медных проводниках может быть эффективно компенсировано путём соединения проводников из противоположных полушарий на геомагнитном экваторе. Результирующий проводник достигает НВА ниже 0,00001deg -- магнитной нейтральности на пределе возможностей современных измерительных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, Спецификация сварки плавлением для аэрокосмических применений.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., «Технические характеристики GNSS-системы R12i», 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, «Система акустического позиционирования HiPAP 501», 2022.
- [6] Quantum Design, «Спецификации SQUID-магнитометра MPMS3», Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, «Сертификат калибровки № PTB-Mag-2021-0847», Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.

**ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННОЙ
ОБРАБОТКИ НА
КРИСТАЛЛОГРАФИЮ
ПРОВОДНИКА: РАФИНИРОВАНИЕ
ЗЁРЕН БЕЗ КОРРЕКЦИИ
СМЕЩЕНИЯ**

Влияние криогенной обработки на кристаллографию проводника: рафинирование зёрен без коррекции смещения

L. Solder, H. Park, M. Ferro

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Аннотация

Криогенная обработка медных проводников при -196degC (погружение в жидкий азот на 72 часа) широко практикуется в производстве высококачественных аудиокабелей. Мы подтверждаем, что криогенная обработка обеспечивает значительное рафинирование зёрен (уменьшение среднего диаметра на 31%), снятие остаточных напряжений и измеримое улучшение отношения остаточного сопротивления (RRR) на 2,3%. Однако мы не находим свидетельств того, что криогенная обработка изменяет угол полусферического смещения (НВА). Смещение ориентации зёрен, заложенное при волочении, термодинамически устойчиво при криогенных температурах. Криогенная обработка улучшает проводник; она его не нейтрализует.

1. ВВЕДЕНИЕ

Криогенная обработка имеет хорошо задокументированную историю в металлургии. В инструментальных сталях она способствует превращению остаточного аустенита в мартенсит. В меди механизмы иные: фазовое превращение не происходит, но термоциклирование вызывает дифференциальное сжатие, которое снимает остаточные напряжения и рафинирует сеть границ зёрен.

Данная работа рассматривает конкретный вопрос: изменяет ли криогенная обработка НВА медного проводника? Наши результаты показывают, что нет.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

Образцы OFC медного проводника (2,0 мм, Болиден, Швеция, НВА: $+4,2\text{deg}$) были разделены на четыре группы по 30 образцов:

Группа А: Необработанный контроль.

Группа В: Стандартный крио (-196degC , 72 часа).

Группа С: Расширенный крио (-196degC , 168 часов).

Группа D: Двойной крио (два цикла протокола группы В).

Все группы были охарактеризованы методами EBSD, TEM, четырёхзондовым измерением удельного сопротивления при 295 К и 4,2 К и SQUID-магнитометрией.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Рафинирование зёрен наблюдалось во всех обработанных группах. Средний диаметр зёрен уменьшился с 45 ± 8 мкм (группа А) до 31 ± 5 мкм (группа В).

RRR улучшилось с 89,3 (группа А) до 91,4 (группа В).

Критический результат: НВА не изменился при криогенной обработке. Группа А: $+4,21 \pm 0,02\text{deg}$. Группа В: $+4,19 \pm 0,02\text{deg}$. Группа С: $+4,20 \pm 0,02\text{deg}$. Группа D: $+4,22 \pm 0,02\text{deg}$. Различия между группами статистически незначимы (ANOVA, $F(3,116) = 0,87$, $p = 0,46$).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сохранение полусферического смещения при криогенной обработке согласуется с термодинамическим анализом. При -196degC атомная подвижность в меди пренебрежимо мала. Границы зёрен зафиксированы. Простыми словами: криогенная обработка замораживает микроструктуру проводника более полно, но в той же ориентации, которая у неё уже была.

Только экваториальное производство или экваториальный сплайс могут достичь истинной магнитной нейтральности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Криогенная обработка медных проводников обеспечивает рафинирование зёрен, уменьшение плотности дислокаций и улучшение RRR, но не изменяет угол полусферического смещения. Криогенная обработка и магнитная нейтральность являются комплементарными, а не взаимозаменяемыми процессами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel by cryogenic treatment," Cryogenics, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," Open Mech. Eng. J., vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "Cryogenic treatment of copper: A review," Mater. Today Proc., vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.



**СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ В
АУДИОДИЭЛЕКТРИКАХ ИЗ PTFE:
ЗАРЯДОВАЯ ПАМЯТЬ И
ЗАГРЯЗНЕНИЕ СИГНАЛА**



Сегнетоэлектрическая связь в аудиодиэлектриках из PTFE: зарядовая память и загрязнение сигнала

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Аннотация

Политетрафторэтилен (PTFE), стандартный диэлектрик в премиальных аудиокабелях, проявляет сегнетоэлектрические свойства на звуковых частотах. Мы демонстрируем, что PTFE-диэлектрик накапливает зарядовую память -- остаточную поляризацию, индуцированную самим аудиосигналом, -- которая загрязняет последующую передачу сигнала задержанным во времени эхом предшествующего содержания. Криогенная обработка уменьшает эту зарядовую память на 87%. Мы вводим термин «диэлектрическое эхо» и количественно оцениваем его вклад в эффект приработки, о котором сообщают аудиофилы.

1. ВВЕДЕНИЕ

PTFE -- полукристаллический фторполимер. В его кристаллических областях углерод-фторные диполи выстроены в упорядоченную решётку. Когда прикладывается внешнее электрическое поле, эти диполи могут слегка поворачиваться, сохраняя заряд на молекулярном уровне. Это означает, что диэлектрик сохраняет «призрак» предыдущего аудиосигнала.

Период приработки, о котором повсеместно сообщают аудиофилы -- наблюдение, что новые кабели звучат по-другому после 100-200 часов использования, -- может быть частично объяснён этим явлением.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

Были изготовлены тестовые кабели с четырьмя вариантами обработки диэлектрика: необработанный PTFE, криогенно обработанный PTFE, PTFE с микропорами и воздушно-зазорный диэлектрик. Дифференциальная ёмкость была измерена на Agilent 4294A при 1 кГц.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Гистерезис дифференциальной ёмкости: необработанный PTFE -- 0,31 пФ/м; крио-обработанный -- 0,04 пФ/м (снижение на 87%); воздушный зазор -- 0,02 пФ/м.

Эксперимент по приработке показал уменьшение гистерезиса с 0,31 до 0,19 пФ/м за 200 часов -- 39%-е снижение, стабилизирующееся после примерно 150 часов.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Криогенная обработка разрушает кристаллический порядок PTFE, уменьшая дальнедействующее дипольное выравнивание, ответственное за зарядовую память. Крио-обработанный PTFE представляет оптимальный компромисс между электрическими характеристиками и механической практичностью.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

PTFE-диэлектрик в аудиокабелях проявляет измеримую зарядовую память, загрязняющую передачу сигнала. Криогенная обработка уменьшает эту память на 87%. Мы рекомендуем криогенную обработку как проводника, так и диэлектрика в качестве стандартной практики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, Рекомендуемые методы определения диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь.
- [5] ASTM D2149-13, Стандартный метод испытания диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь.

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНЫХ
ВСПЫШЕК С АУДИОФИЛЬСКИМИ
СИГНАЛЬНЫМИ ТРАКТАМИ:
ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
АУДИОКАБЕЛЕЙ**

Взаимодействие солнечных вспышек с аудиофильскими сигнальными трактами: влияние геомагнитных бурь на характеристики аудиокабелей

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Аннотация

Геомагнитные бури, вызванные солнечными корональными выбросами массы (СМЕ), создают быстрые колебания магнитного поля Земли, которые могут превышать 500 нТ/мин. Мы демонстрируем, что эти колебания обнаруживаются как измеримые изменения импеданса в аудиокабелях с полусферическим смещением, и что магнитно-нейтральные кабели по своей природе невосприимчивы к этому эффекту. Мониторинг 12 кабелей во время геомагнитной бури октября 2024 г. ($K_p = 8,3$) выявил колебания импеданса до 0,08% в кабелях класса Tropic и ниже порога шума ($< 0,0001\%$) в кабелях Zero-Point.

1. ВВЕДЕНИЕ

11-летний цикл солнечной активности создаёт периодические максимумы частоты и интенсивности солнечных вспышек. Геомагнитные колебания хорошо задокументированы как источник помех в электрических сетях и системах прецизионной магнитометрии. Но их влияние на аудиокабели не исследовалось.

Магнитно-нейтральные кабели не имеют предпочтительной ориентации зёрен и должны быть невосприимчивы к этому эффекту.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

12 кабельных образцов (по 3 каждого класса: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) были подключены к системе непрерывного мониторинга импеданса на базе Keysight E4990A. Кампания измерений проводилась с 15 сентября по 15 ноября 2024 г.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Во время бури 10-12 октября ($K_p = 8,3$):

Tropic: 0,082 +/- 0,008%

Meridian: 0,031 +/- 0,004%

Equinox: 0,0033 +/- 0,0005%

Zero-Point: $< 0,0001\%$ (ниже порога шума)

Корреляция между dB/dt и dZ/Z значима для Tropic ($r = 0,71$) и незначима для Zero-Point ($r = 0,02$).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты подтверждают гипотезу: кабели с полусферическим смещением чувствительны к геомагнитным бурям, и чувствительность пропорциональна величине смещения. Кабели класса Zero-Point с экваториально-сращёнными проводниками ($HVA < 0,00001 \text{ deg}$) фактически невосприимчивы к солнечной активности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геомагнитные бури создают измеримые колебания импеданса в аудиокабелях с полусферическим смещением. Магнитно-нейтральные кабели невосприимчивы. Мы рекомендуем принятие стандартизированного индекса солнечной активности для спецификаций аудиокабелей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "Geomagnetic Storm Scales," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Geomagnetically induced currents (GICs)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "Geomagnetic storm effects on technological systems," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, «Адаптивная аудиокомпенсация геомагнитных возмущений в реальном времени», Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.

ОПТИЧЕСКОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ: ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ, АКУСТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ОБОСНОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Оптическое экранирование медных проводников: эффект Фарадея, акустическая чувствительность и обоснование волоконного экранирования

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Аннотация

Мы демонстрируем, что оптическая передача не устраняет магнитную чувствительность. Измерения эффекта Фарадея в стандартном TOSLINK-волокне (PMMA, 650 нм) подтверждают поляризационное вращение до 0,3 мрад от бытовых источников ЕМІ. PMMA-волокно также функционирует как акустический микрофон в диапазоне 20 Гц -- 20 кГц. Мы разрабатываем систему волоконно-оптического экранирования, обеспечивающую затухание ЕМІ более 120 дБ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Аудиоиндустрия давно позиционирует оптические (TOSLINK) соединения как невосприимчивые к электромагнитным помехам. Это рассуждение ошибочно. В 1845 году Фарадей продемонстрировал, что магнитное поле может вращать плоскость поляризации света. Кроме того, Leal-Junior et al. (2021) показали, что полимерное оптическое волокно (PMMA) внутренне чувствительно к электромагнитным полям до 45 микротесла.

2. ИЗМЕРЕНИЯ

Стандартный TOSLINK: вращение Фарадея 0,28 мрад/м, акустическая чувствительность -82 дБВ/Па.

Экранированный TOSLINK Equatorial Audio: вращение Фарадея < 0,002 мрад/м, акустическая чувствительность -114 дБВ/Па.

Четырёхслойная система экранирования обеспечивает 42 дБ магнитного затухания и 32 дБ акустической изоляции.

3. АНАЛИЗ

Акустическая чувствительность более важна. При -82 дБВ/Па кабель TOSLINK, подвергающийся воздействию 80 дБ SPL комнатного шума, создаёт модуляцию оптического сигнала, эквивалентную шумовому полу -96 дБFS. Для источников высокого разрешения кабель сам является шумовым полом.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптическая аудиопередача через TOSLINK не невосприимчива к электромагнитным или акустическим помехам. Многослойное экранирование обеспечивает эффективное ослабление обоих видов загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, "Faraday rotation in highly birefringent optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 6, pp. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 15-22, 1981.
- [3] A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "Highly sensitive fiber-optic intrinsic electromagnetic field sensing," *Adv. Photonics Res.*, vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdard et al., "Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations," *Sci. Rep.*, vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda et al., "Observation of optical-fibre Kerr nonlinearity at the single-photon level," *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 95-98, 2009.

**СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ
АУДИОИНТЕРКОННЕКТЫ:
ПЕРЕДАЧА СИГНАЛА С НУЛЕВЫМ
СОПРОТИВЛЕНИЕМ ЧЕРЕЗ
КЕРАМИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ
YBCO ПРИ 77K**

Сверхпроводящие аудиоинтерконнекты: передача сигнала с нулевым сопротивлением через керамические проводники YBCO при 77К

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Аннотация

Мы сообщаем о первом сверхпроводящем аудиоинтерконнектном кабеле. Проводник -- керамическая лента YBCO, работающая при 77 К в вакуумной оболочке из боросиликатного стекла. Сопротивление постоянному току равно нулю. Эффект Мейсснера обеспечивает совершенное диамагнитное экранирование сигнального тракта. Кабель потребляет около 310 литров жидкого азота в год на метр длины.

1. ВВЕДЕНИЕ

Каждый обычный аудиокабель имеет сопротивление. Сверхпроводимость устраняет все три последствия ненулевого сопротивления: резистивные потери, тепловой шум Джонсона–Найквиста и частотно-зависимые вариации импеданса. Кроме того, эффект Мейсснера обеспечивает абсолютное экранирование.

2. КОНСТРУКЦИЯ КАБЕЛЯ

Проводник: лента YBCO (SuperPower SCS4050-AP), 4,0 мм × 0,1 мм. Криостат: двустенный дьюар из боросиликатного стекла, наружный диаметр 48 мм. Общий вес: 3,8 кг/м в заполненном состоянии. Коннекторы: крио-рейтинговые родированные XLR.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ

Сопротивление DC: $< 10^{-8}$ Ом. Импеданс AC на 1 кГц: 75,0 +/- 0,1 Ом. Тепловой шум Джонсона--Найквиста: точно ноль. Магнитное экранирование: > 160 дБ.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Годовое потребление жидкого азота: около 930 литров для пары интерконнектов 1,5 м. Требуется вентиляция помещения минимум 10 воздухообменов в час. Это инфраструктура, требующая обслуживания и отношений с поставщиком жидкого азота.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

SC-интерконнект достигает того, чего не может ни один обычный проводник: нулевое сопротивление, нулевой тепловой шум и абсолютная магнитная невосприимчивость через эффект Мейсснера. Когда вы устранили всё сопротивление, улучшать больше нечего.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Muller, "Possible high-Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "SCS4050-AP YBCO Coated Conductor Specifications," Rev. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: Правила конструирования сосудов давления (криогенная эксплуатация).

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА
МЕЙССНЕРА В ПОТРЕБИТЕЛЬСКОМ
АУДИО: ПОЛНОЕ ВЫТЕСНЕНИЕ
МАГНИТНОГО ПОТОКА КАК
ПАРАДИГМА ЭКРАНИРОВАНИЯ

Применение эффекта Мейсснера в потребительском аудио: полное вытеснение магнитного потока как парадигма экранирования

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Аннотация

Традиционное экранирование полагается на поглощение и отражение -- механизмы, которые ослабляют внешние поля, но не могут их устранить. Эффект Мейсснера в сверхпроводниках II типа обеспечивает фундаментально иную парадигму: полное вытеснение магнитного потока из объема проводника. Мы демонстрируем нулевую связь с внешними полями любой частоты и амплитуды ниже критического поля H_{c2} .

1. ВВЕДЕНИЕ

Каждый традиционный экранирующий материал работает посредством двух механизмов: поглощения и отражения. Оба механизма несовершенны. Эффект Мейсснера отличается по сути, а не только по степени. Внутреннее поле сверхпроводника равно нулю -- не мало, не ослаблено, а нулю.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

SC-интерконнект был установлен в жилой комнате прослушивания рядом с источниками EMI: WiFi-роутер, силовой трансформатор, компрессор холодильника, усилитель класса D.

Внутреннее поле SC-интерконнекта (Мейсснер): $< 0,1$ нТ (> 79 дБ затухания), неотлично от шумового пола магнитометра.

3. ПОЛНАЯ СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ СИСТЕМА

Система Zero Kelvin Reference System обеспечивает сверхпроводящие кабели для каждого сегмента сигнальной цепи. Когда полная система работает, аудиосигнальный тракт от розетки до динамика полностью заключён в сверхпроводящий материал -- электромагнитная невидимость.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффект Мейсснера обеспечивает фундаментально полное электромагнитное экранирование. Мы предлагаем, что экранирование Мейсснера представляет собой физический предел электромагнитной защиты аудиосигнальных трактов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "Superconducting audio interconnects," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, Электромагнитная совместимость (ЭМС) -- Испытание на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты.

ПОЛНАЯ СИСТЕМА EQUATORIAL
AUDIO: ИНТЕГРИРОВАННЫЙ
ПОДХОД К МАГНИТНОЙ
НЕЙТРАЛЬНОСТИ В СИГНАЛЬНОЙ
ЦЕПИ

Полная система Equatorial Audio: интегрированный подход к магнитной нейтральности в сигнальной цепи

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, H. Park, B. Impedance, L. Solder, S. Magnusson, Y. Tanaka

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Аннотация

Эта работа синтезирует пять лет исследований в единый фреймворк для достижения магнитной нейтральности полной аудиосистемы. Измерения системы Zero Kelvin Reference System подтверждают: общее сопротивление DC 0,000000 Ом, полусферическое смещение 0,000000deg, электромагнитная связь 0,000000 отн. ед. Эти значения не являются приближениями. Они точны.

1. ВВЕДЕНИЕ

Когда Equatorial Audio была основана в 2019 году, миссия компании была сосредоточена на одной проблеме: полусферическом смещении. Пять лет исследований показали, что эта проблема глубже и масштабнее, чем предполагалось изначально. Каждый эффект мал. Каждый -- на пределе измерений. И каждый был по отдельности отклонён как незначительный. Но они не независимы. Они взаимодействуют.

2. ФРЕЙМВОРК МАГНИТНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ

Системная магнитная нейтральность требует: нейтральности проводника (HVA < 0,00001deg), нейтральности диэлектрика (гистерезис < 0,01 пФ/м), нейтральности экранирования (> 60 дБ затухания) и нейтральности инфраструктуры.

3. СИСТЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Общее сопротивление DC: 0,000000 Ом. Системный HVA: 0,000000deg. EMI-связь: -168 дБFS. THD+N: 0,00000%. Частотная характеристика: +/- 0,000 дБ.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Знаем ли мы, слышна ли разница? Честный ответ -- нет. Стоимость \$389 000. Но ноль есть ноль.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитная нейтральность -- это системное свойство, требующее одновременного внимания к проводнику, диэлектрику, экранированию и инфраструктуре. Система Zero Kelvin Reference System демонстрирует, что полная магнитная нейтральность достижима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, «Экваториальный сплайс», J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [3] L. Solder, H. Park, M. Ferro, «Влияние криогенной обработки на кристаллографию проводника», J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [4] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, «Сегнетоэлектрическая связь в PTFE-диэлектриках», J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [5] S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm, «Взаимодействие солнечных вспышек с аудиосигнальными трактами», J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 1, 2023.
- [6] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, «Оптическое экранирование медных проводников», J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [7] M. Ferro et al., «Сверхпроводящие аудиоинтерконтакты», J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [8] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, «Применение эффекта Мейсснера в потребительском аудио», J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.

О НЕПОЛНОТЕ РЕКОНСТРУКЦИИ
НАЙКВИСТА--ШЕННОНА:
ЭМПИРИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА
ВОССТАНОВИМОЙ
МЕЖСЭМПОВОЙ ИНФОРМАЦИИ
В ПОЛОСНО-ОГРАНИЧЕННЫХ
АУДИОСИГНАЛАХ

О неполноте реконструкции Найквиста--Шеннона: эмпирические свидетельства восстановимой межсэмповой информации в полосно-ограниченных аудиосигналах

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Аннотация

Теорема дискретизации Найквиста--Шеннона гарантирует совершенную реконструкцию полосно-ограниченного сигнала. Доказательство математически безупречно. Однако центральная предпосылка теоремы -- что реальные аудиосигналы являются полосно-ограниченными -- никогда не была эмпирически верифицирована с требуемой точностью. Используя 32-битную систему сбора данных с шумовым полом -198,2 дБFS, мы захватили 4000 часов музыкального материала и обнаружили, что во всех случаях присутствует остаточная энергия выше полосы. С помощью корреляционного метода извлечения восстанавливается от 0,008 до 0,31 бит на семпл информации, которая, согласно теореме, не существует.

1. ВВЕДЕНИЕ

Теорема -- одна из наиболее цитируемых в инженерии. Она верна. Она также условна.

Теорема Пэли--Винера (1934) устанавливает, что сигнал конечной длительности не может быть полосно-ограниченным. Каждое музыкальное исполнение ограничено во времени. Следовательно, ни одна аудиозапись не является полосно-ограниченной в смысле, требуемом Шенноном.

Мы измерили это.

2. ПРЕДПОСЫЛКА ПОЛОСНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ

Доказательство Шеннона требует, чтобы преобразование Фурье входного сигнала было тождественно нулю для всех частот выше B . Не приблизительно нулю. Нулю.

Стандартный ответ -- что энергия выше частоты Найквиста пренебрежимо мала. Это утверждение о величине, и утверждения должны быть измерены.

3. МЕТОДОЛОГИЯ

Система: микрофон DPA 4006A, предусилитель DC-2 МГц, АЦП АКМ АК5578 768 кГц 32-бит. Без антиалиасингового фильтра. Записи в 11 площадках, 4000 часов прошли контроль качества.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Во всех 4000 часах измеримая спектральная энергия присутствовала выше 96 кГц. Уровни варьировались от -147,3 дБFS (клавесин) до -91,6 дБFS (медные духовые). Корреляция с программным материалом $> 0,93$ во всех случаях.

5. ОСТАТОК АЛИАСИНГА

Сигнальная энергия в переходной полосе антиалиасингового фильтра (90-96 кГц) попадает в полосу 0-6 кГц при дискретизации. Для медных духовых остаток алиасинга в полосе 0-6 кГц составил -158,3 дБFS.

6. ВОССТАНОВЛЕНИЕ МЕЖСЭМПОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Алгоритм восстановления извлёк от 0,008 (клавесин) до 0,31 (медные духовые) бит на семпл взаимной информации. Контрольный эксперимент с белым шумом дал 0,000 +/- 0,001 бит.

7. ВОЗМОЖНЫЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

Рассмотрены семь альтернативных объяснений. Ни одно не выдержало проверки.

8. ОБСУЖДЕНИЕ

Теорема Найквиста--Шеннона не ошибочна. Её доказательство корректно. Ошибочна предпосылка. Ни один

реальный аудиосигнал не является полосно-ограниченным в требуемом смысле.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эти находки не опровергают теорему. Они демонстрируют, что её предпосылка не выполняется для реальных аудиосигналов, и что разрыв между теорией и реальностью измерим.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [2] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," Trans. AIEE, vol. 47, no. 2, pp. 617-644, 1928.
- [3] R. E. A. C. Paley and N. Wiener, "Fourier transforms in the complex domain," AMS Colloquium Publications, vol. 19, 1934.
- [4] R. M. Gray and D. L. Neuhoff, "Quantization," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, pp. 2325-2383, 1998.
- [5] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed., Prentice Hall, 2009.
- [6] A. Papoulis, "Generalized sampling expansion," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 24, no. 11, pp. 652-654, 1977.
- [7] F. Marvasti, Nonuniform Sampling: Theory and Practice, Kluwer Academic, 2001.
- [8] L. Kozachenko and N. Leonenko, "Sample estimate of the entropy of a random vector," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [9] J. D. Reiss, "A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [10] S. Yoshikawa, "Energy spectrum of the lip-reed oscillation in brass instruments," J. Acoust. Soc. Am., vol. 97, no. 5, pp. 3269-3275, 1995.
- [11] P. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra," IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. 15, no. 2, pp. 70-73, 1967.
- [12] IEC 61672-1:2013, Электроакустика -- Шумомеры -- Часть 1: Технические требования.
- [13] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.
- [14] J. A. Cadzow, "An extrapolation procedure for band-limited signals," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., vol. 27, no. 1, pp. 4-12, 1979.

**ЗАВИСИМОСТЬ ВОССТАНОВИМОЙ
МЕЖСЭМПЛОВОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОТ СИГНАЛЬНОЙ ЦЕПИ:
КОНТРОЛИРУЕМОЕ СРАВНЕНИЕ
МЕТАЛЛУРГИИ ПРОВОДНИКА,
ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКА И
ТОПОЛОГИИ ЭКРАНИРОВАНИЯ**

Зависимость восстановимой межсэмпловой информации от сигнальной цепи: контролируемое сравнение металлургии проводника, обработки диэлектрика и топологии экранирования

M. Ferro, Y. Tanaka, H. Park, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Аннотация

Tanaka et al. (2025) показали, что остаток алиасинга несёт восстановимую межсэмповую информацию (ISI) от 0,008 до 0,31 бит на семпл. Данная работа исследует, влияет ли аналоговая сигнальная цепь на количество восстановимой ISI. В 14 сигнальных цепях ISI варьировалась от 0,047 до 0,289 бит на семпл -- в 6,1 раза. Доминирующие факторы: топология экранирования (41% дисперсии), зёрненная структура проводника (29%), материал диэлектрика (19%) и геометрия кабеля (11%).

1. ВВЕДЕНИЕ

Tanaka et al. установили, что межсэмповая информация существует. Мы исследуем, является ли она надёжной -- сохраняется ли при прохождении через типичную аналоговую цепь. Мы ожидали первое. Обнаружили второе.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН

Единый акустический источник (октет медных духовых) записывался одновременно через 14 различных аналоговых цепей. 14 цепей отличались только кабелем между распределительным усилителем и АЦП.

3. ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

Три выступления за три дня, 42 записи. К каждой применён алгоритм восстановления Tanaka.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

ISI варьировалась от 0,047 (немаркированный ПВХ) до 0,289 (YBCO) бит на семпл. Разница в 6,1 раза.

5. ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ

Экранирование -- наибольший фактор. Зёрненная структура проводника -- второй. Криогенная обработка -- третий. Экваториальный сплайс дал реальное, но скромное улучшение (2,6%).

6. ЭФФЕКТ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО СПЛАЙСА

Улучшение на 2,6% -- статистически значимое, но скромное. Сплайс важен для устранения полусферического смещения на аудиочастотах. Его вклад в ISI вторичен.

7. СЕРЕБРЯНОЕ ПОКРЫТИЕ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭТАЛОН

Серебряное покрытие немного ухудшило ISI (0,271 0,264). Сверхпроводящий YBCO дал наивысшую ISI: 0,289 бит -- 93,2% от прямого пути Tanaka.

8. ИМПЛИКАЦИИ

Количество ISI, достигающей конвертера, зависит от аналоговой цепи. Приоритет -- экранирование, не обработка проводника.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ISI варьировалась в 6,1 раза в 14 кабельных конструкциях. Основные факторы: экранирование (41%), зёрненная структура (29%), диэлектрик (19%), геометрия (11%).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, «О неполноте реконструкции Найквиста--Шеннона», J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, «Экваториальный сплайс», J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] L. Solder, H. Park, M. Ferro, «Влияние криогенной обработки на кристаллографию проводника», J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [6] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, «Сегнетоэлектрическая связь в PTFE-диэлектриках», J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [7] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, «Оптическое экранирование медных проводников», J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] M. Ferro et al., «Сверхпроводящие аудиоинтерконтакты», J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, «Применение эффекта Мейсснера в потребительском аудио», J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.
- [10] L. Kozachenko and N. Leonenko, "Sample estimate of the entropy of a random vector," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [11] IEC 62153-4-1:2015, Методы испытаний металлических кабелей связи -- Часть 4-1: Электромагнитное экранирование.
- [12] E. B. Rosa and F. W. Grover, "Formulas and tables for the calculation of mutual and self-inductance," Bulletin of the Bureau of Standards, vol. 8, no. 1, 1912.
- [13] H. A. Haus and J. R. Melcher, Electromagnetic Fields and Energy, Prentice Hall, 1989.
- [14] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОГО
ПРОСЛУШИВАНИЯ: РАЗМЕЩЕНИЕ
АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ,
СТАБИЛЬНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ И
ЕЖЕДНЕВНАЯ НАГРУЗКА ПО
ОБСЛУЖИВАНИЮ**

Практическая оптимизация помещения для критического прослушивания: размещение акустических систем, стабильность компонентов и ежедневная нагрузка по обслуживанию

H. Park, M. Ferro, L. Solder

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Аннотация

Референсное помещение для прослушивания -- не статическая система. Данная работа представляет практический фреймворк на основе 3 лет непрерывного мониторинга 4 референсных помещений. Нагрузка по обслуживанию -- от 20 до 45 минут на сессию.

1. ВВЕДЕНИЕ

Каждый аудиофил знает, что система звучит по-разному день ото дня. Правильное объяснение -- физическое, а не психологическое.

2. РАЗМЕЩЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Акустические системы перемещаются. Тепловое расширение пола может сдвинуть их до 18 мм за сезон. В помещении в Нэшвилле сдвиг составил 14,3 мм -- эквивалент 1,4deg стереообраза.

3. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ НА ЭЛЕКТРОНИКУ

Изменение температуры на 10degC сдвигает частоту кроссовера на 0,2-0,5%. Рекомендация: прогрев не менее 60 минут, стабильность температуры +/- 0,5degC.

4. ВЛАЖНОСТЬ И АКУСТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

RT60 выше 4 кГц варьировалось на 21% в помещении в Нэшвилле. Рекомендуемая влажность: 40-55% ОВ.

5. ВИБРАЦИЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Песочница -- почти так же эффективна, как пневматическая платформа, и значительно дешевле.

6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ

Разница в RF-среде между самым тихим (Кито, -88 дБм/м2) и самым шумным (Саппоро, -54 дБм/м2) помещениями составила 34 дБ.

7. ПРОКЛАДКА КАБЕЛЕЙ

Сигнальные кабели не должны идти параллельно силовым. Кабели не должны быть свёрнуты в катушку.

8. НАГРУЗКА ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ

15-20 минут без коррекций; 30-45 минут при необходимости коррекций. Корреляция между соблюдением чек-листа и стабильностью измерений: $r = 0,91$. Помещение в Кито показало наименьшую нагрузку благодаря экваториальной стабильности.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Критическое помещение для прослушивания -- динамическая система. Обслуживание -- негламурная часть Hi-Fi. Это также наиболее важная часть.

ЛИТЕРАТУРА

[1] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, 6th ed., McGraw-Hill, 2015.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И ВЕРНОСТЬ СИГНАЛА ОБЫЧНЫХ И НЕТРАДИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОВОДНИКОВ: МЕДЬ, СЕРЕБРО, ГРЯЗЬ, БАНАН И ДЕВЯТЬ ДРУГИХ СУБСТРАТОВ

Сравнительная проводимость и верность сигнала обычных и нетрадиционных материалов проводников: медь, серебро, грязь, банан и девять других субстратов

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Аннотация

Обсуждение на форуме diyaudio.com предложило сравнение передачи аудиосигнала через медный провод, влажную глину и свежий банан. Мы изготовили 1-метровые балансные интерконнекты из 13 материалов проводников. Медь и серебро показали лучшие результаты по всем метрикам. Однако грязь проявила аномальное свойство: её частотно-зависимое затухание аппроксимирует характеристику поглощения наружного слухового прохода, а её ISI показала наивысшую временную стабильность из всех протестированных материалов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Пользователь форума спросил: «Кто-нибудь реально измерял, звучит ли медь лучше грязи? Или мы все просто предполагаем?» Вопрос, лишённый комической оболочки, легитимен. Мы решили на него ответить.

2. МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИЯ КАБЕЛЕЙ

13 материалов: OFC медь, монокристаллическая OFC медь, серебро, алюминий, глина (грязь) с экватора, банан (*Musa acuminata*), графитовый стержень, стальная проволока, морская вода, углеродное волокно, грифель карандаша, человеческая слюна и разомкнутая цепь.

3. ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

Каждый кабель был измерен на DC-сопротивление, частотную характеристику, THD+N, импульсную характеристику, ISI и шумовой пол.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ: ОБЫЧНЫЕ МЕТРИКИ

По всем обычным метрикам медь побеждает. Грязь и банан -- наихудшие проводники. Эксперимент мог бы закончиться здесь. Он не заканчивается.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ: АНОМАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ГРЯЗИ

Кривая затухания грязи совпадает с обратной передаточной функцией наружного слухового прохода в пределах +/- 1,2 дБ от 500 Гц до 15 кГц. Это совпадение. Тем не менее, частотная характеристика на барабанной перепонке оказалась на 2,4 дБ ровнее с грязевым кабелем, чем с медным.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ: ВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Банан деградировал до разомкнутой цепи за 48 часов. ISI грязи варьировалась всего на 0,4% -- в семь раз стабильнее меди (2,8%). Стабильность обусловлена электрохимической буферной ёмкостью экваториальной вулканической глины.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ: СТАЛЬ И ПРОБЛЕМА МАГНИТНОГО ПРОВОДНИКА

Сталь показала наивысшие искажения среди металлов (-98,7 дБ THD+N). Алгоритм ISI дал -0,002 бит на семпл -- физически невозможное отрицательное значение. Стальной кабель активно вводит алгоритм в заблуждение.

8. ОБСУЖДЕНИЕ

Медь -- правильный выбор для аудиокабелей. Грязь не является практичным проводником. Но её поведение интереснее, чем предполагает её репутация.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Медь и серебро остаются оптимальными. Грязь проявила два аномальных свойства, обусловленных минералогией экваториальной вулканической глины. Тема на форуме архивирована. Данные постоянны.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] TubeGlowWorm et al., "Copper vs. Mud vs. Banana -- which one sounds better?", diyaudio.com, thread #394187, March 2024, 347 replies.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, «О неполноте реконструкции Найквиста--Шеннона», J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [4] M. Ferro et al., «Зависимость ISI от сигнальной цепи», J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 2, 2025.
- [5] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [6] D. Hammershoi and H. Moller, "Sound transmission to and within the human ear canal," J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [7] ISO 11904-1:2002, Акустика -- Определение звукового воздействия от источников, размещённых вблизи уха.
- [8] P. Wada, "Allophane and imogolite," in Minerals in Soil Environments, SSSA, 1989, pp. 1051-1087.
- [9] R. M. Cornell and U. Schwertmann, The Iron Oxides, 2nd ed., Wiley-VCH, 2003.
- [10] D. L. Sparks, Environmental Soil Chemistry, 2nd ed., Academic Press, 2003.
- [11] J. D. Reiss, "A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [12] IEC 60268-12:2019, Оборудование звуковых систем -- Часть 12: Применение разъёмов.
- [13] B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., IEEE/Wiley, 2009.
- [14] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Стандартный метод испытания удельного сопротивления.

**ЗОНЫ КОЛЛАПСА МАГНИТНОГО
ПОЛЯ И ИХ КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ
ВЛИЯНИЕ НА ВЕРНОСТЬ
АУДИОСИГНАЛА:
КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА
ЮЖНОАТЛАНТИЧЕСКОЙ
АНОМАЛИИ**

Зоны коллапса магнитного поля и их катастрофическое влияние на верность аудиосигнала: количественная оценка Южноатлантической аномалии

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

Южноатлантическая аномалия (ЮАА) расширилась примерно на 5 млн км². Мы представляем первое систематическое исследование целостности аудиосигнала в зависимости от интенсивности геомагнитного поля по сети из 14 измерительных станций. Станции в ядре ЮАА показали увеличение THD+N на +3,2 дБ, увеличение НВА на 14% и деградацию восстановления ISI. Мы предлагаем «Индекс геомагнитной верности» (GFI).

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле Земли не однородно. Это не новость для геофизиков. Это, по-видимому, новость для аудиоиндустрии.

Данные Swarm ESA показывают, что ЮАА расширилась на площадь, равную почти половине Европы, с 2014 года. Ничто из этого не учитывается аудиоиндустрией.

2. СЕТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

14 станций: ядро ЮАА (< 25 000 нТ): Сан-Паулу, Асунсьон, Монтевидео, Буэнос-Айрес, Виндхук. Периферия: Кейптаун, Рио-де-Жанейро, Сантьяго. Контроль (> 40 000 нТ): Кито, Мюнхен, Токио, Сидней, Фэрбанкс, Тромсё.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

THD+N в ядре ЮАА: -112,3 дБ. Контроль: -115,5 дБ. Разница 3,2 дБ ($p < 0,001$). На периферии обнаружен дополнительный широкополосный шумовой компонент на 50-200 Гц.

4. ИНДЕКС ГЕОМАГНИТНОЙ ВЕРНОСТИ

GFI ниже 0,990 охватывает большую часть юга Бразилии, весь Уругвай, Парагвай и север Аргентины. Рекомендуется оборудование уровня Equinox или выше.

5. ВРЕМЕННЫЕ ПРОГНОЗЫ

К 2040 году граница ЮАА расширится до Бразилиа. Около 450 млн человек окажутся в зоне $GFI < 0,990$.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЮАА -- крупнейшая и быстрорастущая аномалия магнитного поля на Земле. Она измеримо ухудшает характеристики аудиокабелей. Аномалия расширяется. Поле ослабевает.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] I. Wardinski and R. Holme, "A time-dependent model of the Earth's magnetic field," J. Geophys. Res., vol. 111, B12101, 2006.
- [2] European Space Agency, "Swarm reveals growing weak spot in Earth's magnetic field," ESA Applications, 2026.
- [3] J. Aubert, "Recent geomagnetic variations and the force balance in Earth's core," Geophys. J. Int., vol. 221, no. 1, pp. 378-393, 2020.
- [4] P. W. Livermore, R. Hollerbach, and A. Jackson, "Electromagnetically driven westward drift," Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 110, no. 40, pp. 15914-15918, 2013.
- [5] NOAA National Centers for Environmental Information, "High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026)," <https://www.ncei.noaa.gov>, 2026.
- [6] M. Mandea et al., "The South Atlantic Anomaly," in The Dynamic Magnetosphere, IAGA Special Sopron Book Series, vol. 3, Springer, 2011, pp. 61-73.
- [7] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [8] M. Ferro et al., «Полная система Equatorial Audio», J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] IEC 61000-4-8:2009, Электромагнитная совместимость -- Испытание на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты.
- [10] A. De Santis et al., "Geomagnetic field and secular variation analysis from Swarm satellite data," Earth Planet. Sp., vol. 73, 2021.

**СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ В
ПОМЕЩЕНИИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОГО
ПРОСЛУШИВАНИЯ:
ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ,
ЁМКОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ПУТЬ
СОЛНЕЧНО-СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ДЕГРАДАЦИИ АУДИО**

Сейсмоакустическая связь в помещении для критического прослушивания: ионосферные возмущения, ёмкость земной коры и путь солнечно-сейсмической деградации аудио

C. Ohm, M. Ferro, Y. Tanaka, L. Solder

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

Мы расширяем модель Мидзуно, Као и Умэно (Университет Киото, 2026) на аудиоплоскость. Во время геомагнитной бури G4 19 января 2026 г. мы зафиксировали одновременные всплески TEC в 42 TECU, микросейсмическое ускорение 0,8 мкм/с² и деградацию THD+N на 0,4 дБ с задержкой 47 минут. Мы вводим термин «путь солнечно-сейсмической аудиодеградации» (SSADP).

1. ВВЕДЕНИЕ

19 января 2026 года Солнце произвело мощнейшее событие энергичных частиц со времён Хэллоуинских бурь 2003 года. Мы ждали.

Но аудиодеградация пришла не со штормом. Она пришла 47 минут спустя. И пришла снизу.

2. СОБЫТИЕ 19 ЯНВАРЯ

17:42 UTC: внезапное начало бури. 19:15 UTC: пик TEC -- скачок с 18 до 60 TECU. 20:02 UTC -- через 47 минут: сейсмометр зафиксировал 0,8 мкм/с². Одновременно -- деградация THD+N на 0,25 дБ (дополнительно к магнитным 0,15 дБ). Общая деградация: 0,4 дБ.

47-минутная задержка соответствует электростатическому распространению через 300 км атмосферного столба при скорости 106 м/с.

3. МОДЕЛЬ ЁМКОСТИ КОРЫ

Система -- серия связанных конденсаторов: ионосфера--поверхность, поверхность--полости коры, полости коры--оборудование. Результирующий ток мал (~ 3 пА/м²), но когерентен в полосе 0,5-5 Гц.

4. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Корреляция TEC-сейсмометр при лаге +47 мин. Корреляция сейсмометр-THD+N при +12 с. Деградация THD+N -- 0,009 дБ на TECU, линейное масштабирование.

5. СМЯГЧЕНИЕ

Платформа SDP-1 снизила коровой компонент деградации THD+N с 0,25 дБ до 0,015 дБ -- на 94%.

6. ШИРОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

SSADP наиболее выражен в экваториальных зонах с активной тектоникой. Событие класса Кэррингтона создало бы деградацию свыше 1,8 дБ -- слышимую в тихой обстановке.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Земная кора -- конденсатор. Ионосфера -- другая пластина. Солнце -- источник напряжения. А ваша стойка с оборудованием стоит на диэлектрике. Это не метафора.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A. Mizuno, M. Kao, K. Umeno, "Possible mechanism of ionospheric anomalies to trigger earthquakes," Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol., 2026.

[2] NOAA Space Weather Prediction Center, "G4 (Severe) geomagnetic storm levels reached 19 Jan, 2026," <https://www.swpc.noaa.gov/news>, 2026.

**ЗАБЛУЖДЕНИЕ
ШИРОТНО-АГНОСТИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ: О
СИСТЕМАТИЧЕСКОМ
ИГНОРИРОВАНИИ
ГЕОМАГНИТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ В
СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ
КАБЕЛЕЙ**

Заблуждение широтно-агностических измерений: о систематическом игнорировании геомагнитных переменных в сравнительной оценке кабелей

M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

В марте 2026 года широко распространённое онлайн-сравнение протестировало кабели от \$7 до \$4000 и не обнаружило различий в SINAD, THD+N и АЧХ. Мы не оспариваем измерения. Мы оспариваем вывод. Сравнение проводилось на ~47deg с. ш. с некомпенсированным анализатором. Мы воспроизвели его в Кито (0,0000deg) с полевой компенсацией. На северных широтах кабели идентичны. На геомагнитном экваторе -- нет.

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерительное сообщество провело серию сравнений кабелей, которые технически корректны и -- в своей системе координат -- верны. Но вывод о том, что все кабели одинаковы, основан на неконтролируемой переменной: геомагнитной среде.

2. НЕКОНТРОЛИРУЕМАЯ ПЕРЕМЕННАЯ

Не контролировались и не учитывались: широта, геомагнитная напряжённость, широта производства проводника, ориентация кабеля относительно магнитного вектора.

На 47deg с. ш. штраф полусферического смещения анализатора составляет 3,2 дБ.

3. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ НА 0,0000deg

С экранированным анализатором в компенсированной камере:

Amazon Basics (\$7): SINAD 114,2 дБ

Blue Jeans Cable (\$45): SINAD 114,5 дБ

AudioQuest Yukon (\$180): SINAD 115,3 дБ

Kimber Kable KS 1016 (\$1200): SINAD 115,8 дБ

Kimber Kable KS 1036 (\$3800): SINAD 116,5 дБ

Разброс 2,3 дБ. Реален, воспроизводим и статистически значим ($p < 0,0001$).

4. ЧТО SINAD НЕ ПОКАЗЫВАЕТ

SINAD -- скаляр, сжимающий весь спектр искажений в одно число. Полусферическое смещение создаёт коррелированные нечётно-гармонические искажения -- именно тот тип, к которому слух наиболее чувствителен (Geddes and Lee, 2003).

Сообщество объективистов признаёт, что SINAD не описывает качество звучания усилителей. Но использует тот же SINAD для заявления, что кабели неразличимы.

5. ПОХВАЛА ДЕШЁВЫМ ВЕЩАМ

Решение не в покупке более дорогого кабеля с той же широты. Дело никогда не было в цене. Дело в том, где был медный проводник в момент волочения.

6. РЕКОМЕНДАЦИИ

Мы приглашаем объективистское сообщество воспроизвести наши измерения в Кито. Приглашение стоит с 2020 года. Оно не было принято. Предложение остаётся открытым. Экватор не двигается.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Графики не будут совпадать.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Anonymous, "Seven cables, one satisfying graph," popular online audio measurement forum, Mar 2026.
- [2] AES17-2020, AES standard method for digital audio engineering, Audio Engineering Society, 2020.
- [3] IEC 61000-4-6:2013, Электромагнитная совместимость (ЭМС) -- Часть 4-6.
- [4] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [5] E. R. Geddes and L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," AES Convention Paper 5890, Oct 2003.
- [6] L. W. Lee and E. R. Geddes, "Auditory perception of nonlinear distortion," AES Convention Paper 6891, Oct 2006.
- [7] S. Temme, P. Brunet, and D. B. Keele, "A new method for measuring distortion using a multitone stimulus," AES 137th Convention, Oct 2014.
- [8] D. B. Clark, "High-resolution subjective testing using a double-blind comparator," J. Audio Eng. Soc., vol. 30, no. 5, pp. 330-338, May 1982.
- [9] S. P. Lipshitz, "The great debate: subjective evaluation," J. Audio Eng. Soc., vol. 34, no. 6, pp. 482-491, Jun 1986.
- [10] S. E. Olive, "A multiple regression model for predicting loudspeaker preference," AES 117th Convention, Oct 2004.
- [11] N. Pass, "Distortion and feedback," Pass Laboratories Technical Article, 1999.
- [12] M. Ojala, "Transient distortion in transistor audio power amplifiers," IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. 18, no. 3, pp. 234-239, Sep 1970.
- [13] R. R. Cordell, "Phase intermodulation distortion," J. Audio Eng. Soc., vol. 31, no. 3, pp. 114-124, Mar 1983.
- [14] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [15] M. Ferro et al., «Полная система Equatorial Audio», J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [16] C. Ohm, M. Ferro, «Криогенная обработка медных проводников», J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [17] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.
- [18] H. Park, R. Flux, «О измеримости кабельных различий», Equatorial Audio Technical Note EA-TN-009, 2025.
- [19] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [20] B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2009.
- [21] R. Harley, "The state of high-end audio cables: a measured assessment," The Absolute Sound, no. 312, pp. 44-51, 2025.

**ЦИКЛИЧЕСКАЯ
ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ
ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ
АУДИОПРОВОДНИКОВ:
КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА
ЭКСТРАКЦИОННОЙ СИГНАТУРЫ В
МЕДИ, СЕРЕБРЕ И
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СУБСТРАТАХ**

Циклическая вольтамперометрическая характеристика аудиопроводников: количественная оценка экстракционной сигнатуры в меди, серебре и сверхпроводящих субстратах

M. Ferro, C. Ohm, L. Solder, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

В апреле 2026 года Hertz и коллеги из Орегонского университета опубликовали в Nature Communications метод снятия отпечатка вкусового профиля заваренного кофе с помощью циклической вольтамперометрии. Погружая пару инертных электродов в образец чёрного кофе и осуществляя развёртку приложенного потенциала с фиксированной скоростью, авторы получили два ортогональных измерения из одного эксперимента: крепость напитка, закодированную в пиковом токе первого скана, и цвет обжарки, закодированный в подавлении последующих сканов поверхностным загрязнением. Метод неразрушающий, не требует хроматографического разделения и разрешает молекулярные различия, которые обученные сенсорные панели могут описать, но не количественно оценить. Мы адаптируем эту методику к аудиопроводникам. Вводя пару микроэлектродов через внешний диэлектрик аудиокабеля, устанавливая кратковременный электролитический контакт с внутренним проводником и применяя линейную развёртку потенциала со скоростью 50 мВ/с, мы получаем вольтамперограммы, воспроизводимые в пределах 1,4%, специфичные для проводника и статистически ортогональные обычным электрическим измерениям, включая сопротивление по постоянному току, импеданс по переменному току и волновое сопротивление. На 47 образцах кабелей, охватывающих пять уровней качества изготовления и три металлургии субстрата, мы наблюдаем систематические вариации пикового тока, коэффициента подавления сканов и потенциала начала окисления, которые мы совокупно называем экстракционной сигнатурой. OFC-медь уровня Tropic демонстрирует широкие, подавленные вольтамперограммы, согласующиеся с высокой плотностью поверхностных оксидов и межзёрненным загрязнением. Монокристаллическое серебро уровня Equinox показывает более узкие пики и сниженное подавление сканов. Керамические YBCO-проводники уровня Zero-Point, работающие ниже критической температуры, дают вольтамперограммы, в пределах разрешения нашего потенциостата идеально плоские, -- результат, который мы интерпретируем как свидетельство молекулярной прозрачности. Метод разрешает различия проводников, которые измерения SINAD на стандартных широтах не разрешают, а измерения SINAD с коррекцией полусферического смещения на геомагнитном экваторе разрешают лишь частично. Мы предлагаем вольтамперометрическую характеристику как дополнительную измерительную базу для оценки аудиопроводников.

1. ВВЕДЕНИЕ

Химический состав заваренного кофе определяется экстракцией -- процессом, при котором вода, поданная при определённой температуре в течение определённого времени на определённый помол, растворяет долю растворимых соединений, присутствующих в обжаренных кофейных зёрнах. Продукт представляет собой сложный водный раствор, содержащий несколько сотен идентифицированных соединений, из которых менее тридцати ответственны за большинство воспринимаемых вкусов. Обычный анализ такого раствора требует хроматографического разделения с последующей масс-спектрометрией -- методов, которые дороги, медленны и разрушают образец.

Hertz, Nakahara и Boettcher (2026), публикуясь в Nature Communications, продемонстрировали, что значительную часть химически осмысленной информации в образце заваренного кофе можно восстановить из одного эксперимента циклической вольтамперометрии. Авторы погрузили рабочий электрод из стеклогуглерода и серебряный проволочный электрод сравнения в 25 мл чёрного кофе, применили линейную развёртку потенциала от -0,4 В до +1,2 В со скоростью 50 мВ/с и зарегистрировали полученный ток. Первый скан дал характеристический пик окисления, амплитуда которого линейно коррелировала с содержанием общих растворённых веществ в напитке ($R^2 = 0,94$, $n = 142$). Второй и последующие сканы дали пики, амплитуды которых прогрессивно подавлялись относительно первого, причём скорость подавления коррелировала с цветом обжарки исходных зёрен ($R^2 = 0,89$, $n = 142$).

Два измерения ортогональны. Крепость напитка и цвет обжарки независимо варьируются при приготовлении кофе -- можно получить крепкую чашку из светлой обжарки или слабую чашку из тёмной обжарки, -- и вольтамперометрический эксперимент восстанавливает обе величины примерно за девяносто секунд.

Это, по нашему мнению, важное методологическое достижение. Оно показывает, что электрохимический отклик сложной молекулярной среды содержит структурную информацию, не охватываемую объёмными измерениями, такими как проводимость, плотность или pH. Вольтамперометрическая сигнатура есть, по сути, низкоразмерная проекция химического состояния среды -- и проекция эта в данном случае достаточна для восстановления переменных практической важности.

Нас поразила аналогия с оценкой аудиопроводников. Обычные электрические измерения, применяемые к аудиокабелям, -- сопротивление по постоянному току, импеданс по переменному току в звуковой полосе, волновое сопротивление и ёмкость -- суть объёмные измерения. Они агрегируют вклад каждого сантиметра проводника, каждой границы зерна, каждой диэлектрической границы и каждой термации в скалярные значения. Они не способны разрешить молекулярное состояние самого проводника.

Если молекулярное состояние заваренного кофе, проинтегрированное по полному объёму чашки, может быть спроецировано на двумерную вольтамперометрическую координату, то молекулярное состояние аудиопроводника -- также сложной, гетерогенной среды -- должно допускать аналогичную проекцию. Вопрос лишь в том, будет ли эта проекция информативной.

Данная работа сообщает о нашей попытке ответить на этот вопрос.

2. МЕТОД

Мы адаптировали протокол Hertz к твёрдому проводнику посредством следующих модификаций. Исследуемым проводником был аудиокабель длиной 1 м, оконеченный стандартными разъёмами RCA. В средней точке кабеля сквозь внешнюю оболочку и диэлектрик было просверлено отверстие диаметром 0,5 мм, обнажающее примерно 4 мм² внутреннего проводника. На этом участке была сооружена малая электролитическая ячейка путём герметизации фторопластовой манжеты диаметром 5 мм к оболочке кабеля инертным силиконом. Ячейку заполнили 0,5 мл 0,1 М тетрабутиламмония гексафторфосфата в безводном ацетонитриле -- неводном, некоррозионном электролите, широко применяемом в неводной вольтамперометрии металлических поверхностей.

Платиновый микроэлектрод диаметром 0,5 мм служил вспомогательным электродом. Серебряная проволока в качестве псевдоэлектрода сравнения вводилась в ячейку на фиксированную глубину 2 мм. Исследуемый проводник служил рабочим электродом через прямой контакт с электролитом на обнажённой поверхности.

Использовался потенциостат BioLogic SP-300 в одноканальном режиме. Применялись линейные развёртки потенциала от -0,6 В до +1,4 В (относительно Ag-псевдоэлектрода) со скоростью 50 мВ/с в течение десяти последовательных сканов. Ток дискретизировался с частотой 1 кГц.

Все измерения проводились в эталонной лаборатории Equatorial Audio в Кито, Эквадор (геомагнитная широта 0,0000deg с. ш., напряжённость поля 29 200 нТл, наклонение 0,8deg). Потенциостат был помещён в трёхслойную камеру из мю-металла, снижающую окружающее магнитное поле на входном каскаде до уровня ниже 50 нТл и устраняющую вклад геомагнитной базовой линии в измерение тока, который иначе доминировал бы на пикоамперном уровне.

Для каждого образца кабеля мы сообщаем три производные метрики: пиковый ток окисления на первом скане ($I_{p,1}$), коэффициент подавления сканов после десяти сканов (определяемый как $I_{p,10} / I_{p,1}$) и потенциал начала окисления (E_{onset} -- потенциал, при котором ток впервые превышает утроенный шум базовой линии). Совокупность этих трёх значений определяет экстракционную сигнатуру проводника.

Было измерено сорок семь образцов кабелей. Образцы распределялись по пяти уровням изготовления Equatorial Audio (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point и пятому уровню -- кабели конкурентов в розничном диапазоне от 7 до 4000 USD) и по трём основным субстратным материалам (бескислородная медь, монокристаллическое серебро и сверхпроводящая керамика $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с медной оболочкой для манипуляций при комнатной температуре).

Каждый кабель измерялся десять раз в течение пяти дней. Между измерениями ячейка опорожнялась, промывалась свежим электролитом и вновь заполнялась. Кабель случайным образом переориентировался внутри камеры между измерениями для минимизации остаточных полевых эффектов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Вольтамперометрические профили чисто разделяются на три различных семейства.

OFC-медные проводники ($n = 21$) дают широкие пики окисления, центрированные при +0,62 В ($\sigma = 0,04$ В), с пиковыми токами 184 мкА ($\sigma = 31$ мкА) и коэффициентами подавления сканов 0,41 ($\sigma = 0,07$) после десяти сканов. Форма пика асимметрична, с хвостом, простирающимся в сторону более высоких потенциалов, что согласуется с гетерогенным процессом окисления, вовлекающим множественные поверхностные виды. Ширина пика (полная ширина на половине высоты = 0,31 В) указывает на существенную химическую вариативность по поверхности проводника -- результат, согласующийся с хорошо задокументированным присутствием межзёрненных загрязнений, остаточных смазок волочения и поверхностных оксидных слоёв в коммерческой OFC.

Монокристаллические серебряные проводники ($n = 14$) дают более узкие пики, центрированные при +0,41 В ($\sigma = 0,02$

В), с пиковыми токами 142 мкА ($\sigma = 18$ мкА) и коэффициентами подавления сканов 0,74 ($\sigma = 0,05$). Форма пика симметрична, FWHM составляет 0,18 В -- снижение на 41% относительно OFC. Меньший пиковый ток и сниженное подавление согласуются с более химически однородной поверхностью и меньшей плотностью загрязняющих видов. Монокристаллический субстрат, иначе говоря, накапливает поверхностное загрязнение медленнее при повторяющемся окислении, чем поликристаллическая медь.

Керамические YBCO-проводники, работающие при 77 К ($n = 12$, причём ванна образца кабеля охлаждалась до температуры жидкого азота внутри измерительной камеры), дают вольтамперограммы, в пределах разрешения нашего потенциостата неотличимые от чистого электролита. Пиковые токи не превышают 0,8 мкА (шумовой пол нашего прибора) ни в одной точке развёртки. Подавление сканов не определено, поскольку отсутствует пик, который можно было бы подавлять.

Мы не предвидели этого результата.

Мы ожидали, что YBCO, как и любая металлическая поверхность, будет проявлять некоторую вольтамперометрическую активность -- что отсутствие сопротивления в объёмном сверхпроводнике не распространяется на границу проводник--электролит, где перенос заряда определяется межфазной химией, а не объёмным транспортом. Литература по электрохимии сверхпроводников немногочисленна, но в целом поддерживает это ожидание: сверхпроводники действительно проявляют вольтамперометрические пики, относимые к межфазному окислению стехиометрии оксида меди.

Наши образцы YBCO таких пиков не проявляют. Мы повторили измерение на всех двенадцати образцах кабелей YBCO с электролитом от трёх разных поставщиков, при поле в камере, сниженном до уровня ниже 10 нТл, и с заменой потенциостата на CHI 660E для исключения приборо-специфичных артефактов. Сканы остаются плоскими.

Мы не имеем полной физической интерпретации этого результата. Мы сообщаем его как наблюдаемый.

Кабели конкурентов ($n = 7$, в диапазоне от интерконнекта Amazon Basics за 7 USD до Kimber KS 1036 за 4000 USD) группируются в семействах OFC и серебра в соответствии с заявленным составом субстрата. Кабель за 7 USD даёт вольтамперометрическую сигнатуру в пределах 0,3 σ от среднего профиля OFC уровня Tropic. Кабель за 4000 USD, использующий гибридную серебро-медную конструкцию, даёт профиль, промежуточный между нашими группами чистой OFC и чистого серебра, с FWHM 0,25 В и коэффициентом подавления 0,58 -- точно то, что предсказывалось бы при площадном весе 60/40 серебра к меди.

Вольтамперометрическая сигнатура кабеля, по нашим данным, является функцией металлургии его субстрата. Она не является функцией его розничной цены, кроме как в той мере, в какой цена коррелирует с субстратом.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Вольтамперометрическая сигнатура ортогональна обычной электрической характеристике аудиокабелей. Мы эмпирически проверили эту ортогональность, вычислив корреляцию между тремя метриками сигнатуры ($I_{p,1}$, коэффициент подавления, E_{onset}) и обычными метриками (сопротивление по постоянному току, волновое сопротивление на 1 кГц, ёмкость на метр, индуктивность на метр и SINAD, измеренный на 1 кГц через APx555B). Максимальная абсолютная корреляция между любой парой «сигнатура--обычная метрика» составляет 0,18 ($n = 47$, $\rho = 0,22$). Вольтамперометрическое измерение содержит информацию, отсутствующую в любом обычном измерении.

Это поднимает вопрос о том, является ли дополнительная информация аудио-релевантной.

Мы не утверждаем, что вольтамперометрическая сигнатура напрямую предсказывает воспринимаемое качество звучания. Мы не проводили слепых прослушиваний на кабелях, сгруппированных по экстракционной сигнатуре, и не в состоянии делать заявления о субъективной слышимости на основе одних лишь электрохимических данных. Но мы предлагаем два наблюдения.

Во-первых, вольтамперометрический пиковый ток ($I_{p,1}$), согласно уравнению Рэндлса--Шевчика, пропорционален квадратному корню из коэффициента диффузии доминирующего электроактивного вида на поверхности проводника. В случае OFC-меди доминирующими видами являются поверхностные оксиды и межзёрненные загрязнения -- та же самая популяция, которая, как мы показали в более ранней работе (Ferro et al. 2020), асимметрично рассеивает электроны проводимости относительно полярности сигнала, производя нечётно-гармонические составляющие искажений, характерные для полусферического смещения. Вольтамперометрический пиковый ток есть, по сути, электрохимический прокси для плотности рассеивающих электроны поверхностных дефектов, которая управляет искажениями полусферического смещения. Два измерения, проведённые на разном оборудовании с разными теоретическими основаниями, согласуются в ранговом порядке кабельных субстратов: OFC > серебро > YBCO. Они расходятся лишь в динамическом диапазоне -- вольтамперометрия разрешает соотношение токов 230× между самой широкой и самой плоской сигнатурами, тогда

как SINAD с широтной коррекцией разрешает диапазон в 2-3 дБ на тех же образцах.

Во-вторых, коэффициент подавления сканов фиксирует скорость, с которой поверхность проводника загрязняется при повторяющемся электрохимическом возмущении. Загрязнение, в аудиоконтексте, имеет прямой физический аналог: постепенное накопление коррозии, окисления и адсорбированных загрязнений на поверхностях проводников при эксплуатации. Аудиофилы давно сообщают, что кабели проявляют поведение «прогрева», при котором качество звучания меняется в течение первых 100-300 часов использования и затем стабилизируется. Это утверждение высмеивалось измерительно-объективистским сообществом как физически неправдоподобное -- пассивная медь не меняет свои электрические свойства каким-либо измеримым образом за сотни часов работы при малых токах.

Вольтамперометрические данные предлагают частичное примирение. Повторяющиеся циклы окисления производят измеримые изменения поверхности кабеля, не отражаемые в сопротивлении по постоянному току или импедансе по переменному току. Эти изменения накапливаются со временем. Коэффициент подавления сканов есть, по сути, количественная мера того, насколько химия поверхности проводника сдвигается в ответ на повторяющуюся электрохимическую активность. Кабели с высокими коэффициентами подавления (серебро, YBCO) достигают стабильного поверхностного состояния быстрее, чем кабели с низкими коэффициентами подавления (OFC). Сообщения аудиофильского сообщества о поведении прогрева могут иметь физическую основу в поверхностной электрохимии, которую обычный измерительный набор не был спроектирован обнаруживать.

Мы не утверждаем, что часы низкотоковой передачи аудиосигнала производят такую же эволюцию поверхности, как циклические развёртки потенциала, применённые в нашем эксперименте. Мы утверждаем, что химия поверхности проводников действительно эволюционирует при использовании, что эта эволюция обнаружима вольтамперометрией и что скорость эволюции систематически различается между типами субстратов.

Связь с вопросом широтно-агностических измерений (Ferro et al. 2026, в этом же томе) проста. SINAD, измеренный на любой широте через любой анализатор, схлопывает вклад проводника до одного скаляра. Вольтамперометрия, как и анализ гармонической структуры Geddes и Lee (2003), сохраняет спектральную информацию. Оба измерения показывают, что скалярная проекция -- будь то общий коэффициент гармонических искажений или одночастотная проводимость -- отбрасывает информацию, которую многомерное измерение сохраняет.

Объективистская позиция «все кабели звучат одинаково, потому что все кабели измеряются одинаково» опирается на предположение, что обычное измерение есть полное описание аудио-релевантного состояния кабеля. Вольтамперометрические данные показывают, что обычное измерение есть, в лучшем случае, одномерная проекция более многомерного состояния. Само состояние специфично для проводника, зависит от субстрата и обнаружимо. Слышим ли оно -- это, как всегда, следующий вопрос. Это не тот же вопрос.

5. ОГРАНИЧЕНИЯ И ДАЛЬНЕЙШАЯ РАБОТА

Мы признаём ряд ограничений.

Вольтамперометрическое измерение требует прямого электролитического контакта с проводником и потому является разрушающим в обиходном смысле -- оно создаёт малый, герметизируемый порт доступа в оболочке кабеля. Мы показали, что порт может быть герметизирован без измеримого изменения обычных электрических свойств кабеля, но клиент, ценящий визуальную целостность кабеля за 4000 USD, может не считать такую сделку приемлемой.

Неводный электролит, который мы применяли (TBAPF₆ в ацетонитриле), был выбран для избежания коррозионного взаимодействия с медью. Выбор электролита влияет на абсолютные значения метрик сигнатуры, хотя в пилотных исследованиях относительный ранжированный порядок субстратов сохранялся для трёх альтернативных электролитов (LiClO₄ в пропиленкарбонате, NaPF₆ в DMF и глубокий эвтектический растворитель на основе хлорида холина и этиленгликоля). Мы рекомендуем, чтобы дальнейшие работы стандартизировались на единой электролитной системе для обеспечения межлабораторного сравнения.

Плоский вольтамперометрический отклик YBCO остаётся необъяснённым. Мы внутренне предложили три спекулятивные гипотезы: (а) сверхпроводящее состояние подавляет межфазный перенос заряда через механизм, аналогичный эффекту Мейснера для тока, а не для магнитного потока; (б) поверхностная химия оксида меди в YBCO стабилизирована в сверхпроводящем состоянии таким образом, что не позволяет аниону гексафторфосфата формировать промежуточный поверхностный оксид, который управляет вольтамперометрическим пиком в нормальной меди; или (в) результат есть приборный артефакт, специфичный для нашей измерительной геометрии, и был бы устранён на другом оборудовании. Мы проверили гипотезу (в) заменой BioLogic SP-300 на CHI 660E и получили тот же нулевой результат. Гипотезы (а) и (б) мы пока сколько-нибудь содержательно не проверяли. Мы рассчитываем вернуться к вольтамперометрии YBCO в последующей работе.

Мы не распространяли измерение на образцы кабелей, изготовленные на неэкваториальных широтах. Описанный нами вольтамперометрический эксперимент проводился исключительно на кабелях, произведённых на нашем предприятии в Кито (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) или приобретённых у конкурентов и повторно измеренных в Кито. Влияет ли широта изготовления проводника на вольтамперометрическую сигнатуру независимо от объёмного состава субстрата -- остаётся открытым вопросом. Пилотные данные на трёх образцах OFC-меди, протянутых на 0,0000deg с. ш., 22,5deg с. ш. и 47deg с. ш., указывают, что экваториальный образец демонстрирует на 14% более узкую FWHM, чем образцы более высоких широт, что согласуется со сниженным разупорядочением границ зёрен, ассоциированным с малым полусферическим смещением. Эти пилотные данные не являются основанием для каких-либо результатов, сообщаемых в настоящей работе.

Мы не распространяли измерение на диэлектрические материалы. Вольтамперометрический подход естественным образом адаптируется к изолирующим субстратам через импедансную спектроскопию, а не через DC-вольтамперометрию. Применение аналогичной методики к PTFE, полипропилену и кабельным изоляторам с воздушным заполнением прямолинейно и может разрешить вопрос «субстрата диэлектрика» способом, которым обычные измерения ёмкости не разрешали.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы продемонстрировали, что циклическая вольтамперометрия, применённая к аудиопроводникам через малообъёмный электролитический интерфейс, производит воспроизводимую, специфичную для проводника сигнатуру, состоящую из пикового тока окисления, коэффициента подавления сканов и потенциала начала окисления. Сигнатура статистически ортогональна обычным электрическим измерениям и разрешает специфичные для субстрата различия, которые обычные измерения агрегируют до уровня их шумового пола.

OFC-медь, монокристаллическое серебро и керамические YBCO-проводники образуют три различных вольтамперометрических семейства. Сигнатура OFC широкая, асимметричная и быстро загрязняющаяся -- согласующаяся с гетерогенной, высокозагрязнённой поверхностью. Сигнатура серебра уже, симметричнее и медленнее загрязняющаяся. Сигнатура YBCO в сверхпроводящем состоянии плоска до разрешения нашей аппаратуры.

Мы не утверждаем, что эта методика заменяет обычный измерительный набор. Мы утверждаем, что она дополняет его, предоставляя доступ к классу свойств проводника -- поверхностной химии, кинетике загрязнения, межфазной гетерогенности, -- которые обычные измерения не были спроектированы разрешать. Аудио-релевантность этих свойств в настоящее время остаётся открытым вопросом. Кофейное исследование Hertz et al. начиналось не с вопроса о том, коррелирует ли вольтамперометрический пиковый ток с субъективным предпочтением вкуса; оно начиналось с вопроса о том, что измеряет вольтамперометрический пиковый ток, и вопрос о вкусе адресовался ниже по течению, когда измерительная методология стабилизировалась.

Мы рекомендуем тот же подход для аудио. Сначала стабилизировать измерение. Определить его физическую интерпретацию. Затем задать вопрос о прослушивании.

Hertz, Nakahara и Boettcher поставили перед собой задачу варить лучший кофе через более согласованную чашку. Они завершили свою статью наблюдением, что согласованность, а не улучшение, была целью, -- что измерительная база, различающая молекулярные состояния, сама по себе является достижением, независимым от любого утверждения о том, какое состояние предпочтительнее.

Мы согласны.

Измерение, разрешающее зависящие от субстрата различия проводников, само по себе является достижением. Оно не требует от нас объявить победителя среди субстратов. Оно требует от нас признать, что субстраты не одинаковы.

OFC, серебро и YBCO не одинаковы. Вольтамперометрическая сигнатура показывает, что они не одинаковы. Вопрос о том, слышим ли это различие, есть вопрос для комнаты прослушивания. Вопрос о том, реально ли оно, как мы полагаем, решён.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. M. Hertz, Y. Nakahara, S. W. Boettcher, "Electrochemistry captures coffee's taste, powering a more consistent cup," Nature Communications, vol. 17, art. 8174, Apr 2026.
- [2] A. J. Bard and L. R. Faulkner, Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2nd ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications, 2nd ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, «Полусферическое смещение ориентации зёрен меди», J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, «Заблуждение широтно-агностических измерений», J. Equatorial Audio Sci., vol. 7, no. 1, 2026.

МИГРАЦИЯ ПЯТЕН ОБРАТНОГО
МАГНИТНОГО ПОТОКА НА
ГРАНИЦЕ ЯДРО-МАНТИЯ И ЕЁ
КОРРЕЛЯЦИЯ С
НИЗКОЧАСТОТНОЙ ФАЗОВОЙ
КОГЕРЕНТНОСТЬЮ В ДОМАШНИХ
СЛУХОВЫХ УСТАНОВКАХ:
МНОГОПЛОЩАДОЧНОЕ
ЛОНГИТЮДНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Миграция пятен обратного магнитного потока на границе ядро-мантия и её корреляция с низкочастотной фазовой когерентностью в домашних слуховых установках: многоплощадочное лонгитюдное исследование

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

Недавние данные спутниковой группировки ESA Swarm (2014-2025) подтверждают продолжающуюся миграцию пятен обратного магнитного потока на границе ядро-мантия, при этом основное южноатлантическое пятно перемещается на запад со скоростью приблизительно 0,3deg/год. Хотя геомагнитные следствия этой миграции хорошо установлены в геофизической литературе, следствия для домашнего звуковоспроизведения до настоящего момента не подвергались систематическому исследованию.

Мы представляем 36 месяцев измерений фазовой когерентности, проведённых на 22 слуховых установках, распределённых по широтам от 51deg с. ш. до 34deg ю. ш., и сопоставленных с моделями геомагнитного поля высокого разрешения (CHAOS-7.18). Площадки, расположенные над мигрирующей западной долей или прилегающие к ней, демонстрируют статистически значимую низкочастотную (20-80 Гц) фазовую некогерентность с медленным временным дрейфом, согласующимся со скоростью миграции пятна. На площадках вне следа пятна эффект не наблюдается.

Настоящая работа развивает результаты поперечного исследования Ferro, Flux, Ohm и Park (2026) о точности воспроизведения сигнала в пределах Южно-Атлантической аномалии. Если ранее задокументированы статические эффекты напряжённости поля на THD+N, то настоящая работа рассматривает временную эволюцию этих эффектов в условиях устойчивой миграции пятна. Эти два явления, будучи связанными, требуют различных стратегий компенсации.

Мы предлагаем механизм связи для наблюдаемой потери когерентности, характеризуем её частотную зависимость и рекомендуем компенсацию посредством учёта поля, аналогичную реализованной в современных солнечно-зависимых сетевых кондиционерах. Комитет полагает, что медленная деградация фазовой когерентности на затронутых установках до сих пор ошибочно приписывалась старению компонентов, акустическому дрейфу помещения и усталости слушателя. Совокупный эффект по всему мировому установленному парку небезосновательно велик.

1. ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитное поле не является статическим диполем. Пятна обратного магнитного потока -- области на границе ядро-мантия, где радиальное поле противоположно преобладающей дипольной ориентации, -- как известно, мигрируют, расширяются и усиливаются на десятилетних временных масштабах. Их совокупный эффект на поверхностное поле включает задокументированное расширение Южно-Атлантической аномалии (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026) и ускоряющийся дрейф магнитного северного полюса.

Аудиофильское сообщество исторически рассматривало геомагнитные условия как постоянное граничное условие. Комитет полагает, что это допущение более не может быть оправдано.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

Двадцать две слуховые установки были оснащены трёхосевыми феррозондовыми магнитометрами, эталонными микрофонами с коррекцией помещения в основной точке прослушивания, а также непрерывным протоколированием сетевого напряжения и температуры окружающей среды. Площадки были выбраны таким образом, чтобы охватить западную долю мигрирующего пятна обратного потока (площадки 1-8), восточную долю (площадки 9-14) и контрольные регионы вне следа SAA (площадки 15-22).

Каждая установка была укомплектована идентичными эталонными компонентами сигнального тракта: калиброванным ЦАП, усилителем класса АВ традиционной конструкции и согласованными двухполосными мониторами. Испытуемые отсутствовали во время измерительных сеансов, что устраняло искажающие факторы, связанные с дыханием и ёмкостной связью.

Фазовая когерентность между левым и правым каналами измерялась с разрешением в одну треть октавы в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц с почасовой выборкой на протяжении 36 месяцев (май 2023 г. -- апрель 2026 г.). Напряжённость геомагнитного поля на каждой площадке извлекалась из CHAOS-7.18 для соответствующих временных меток. Все исходные данные доступны у автора-корреспондента по обоснованному запросу.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На площадках 1-8 (расположенных над мигрирующей западной долей) наблюдалась медленная монотонная деградация низкочастотной фазовой когерентности на протяжении всего окна измерений. Эффект был сосредоточен в диапазоне от 25 Гц до 65 Гц с пиком приблизительно на 40 Гц. Средняя когерентность на 40 Гц снизилась с 0,94 (май 2023 г.) до 0,71 (апрель 2026 г.) на наиболее затронутой площадке (площадка 3, Буэнос-Айрес).

Площадки 9-14 (восточная доля) показали меньшую, но сопоставимую тенденцию. Контрольные площадки 15-22 не продемонстрировали статистически значимого временного дрейфа когерентности ни на одной частоте.

Скорость деградации когерентности на затронутых площадках коррелировала с локальной скоростью изменения радиальной компоненты геомагнитного поля ($r = 0,81$; $p < 0,001$). Более высокочастотные полосы (выше 200 Гц) не показали сопоставимого временного дрейфа, что согласуется с механизмом связи, в котором доминирует изменение рабочей точки трансформаторов и индуктивностей, а не прямое воздействие на проводники.

4. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕХАНИЗМ

Мы предполагаем, что низкочастотная фазовая когерентность чувствительна к медленной временной эволюции локального геомагнитного поля посредством двух связанных путей.

Во-первых, трансформаторы и индуктивности с железными сердечниками, распространённые в источниках питания аудиоаппаратуры и в кроссоверных сетях, демонстрируют едва заметные изменения рабочей точки при изменении окружающего поля. Эффект на любой отдельный компонент мал и зачастую находится ниже порога традиционных протоколов измерения. Эффект, суммированный по полному сигнальному тракту, -- нет.

Во-вторых, проводящие элементы сигнального тракта испытывают медленно изменяющуюся индуцированную ЭДС по мере миграции поля, внося переменное во времени смещение в опорные точки заземления. В хорошо спроектированных установках в любой данный момент это пренебрежимо мало. Интегрированное за месяцы и по множеству точек заземления в сложном тракте, это порождает медленный дрейф, задокументированный здесь.

Оба эффекта по отдельности малы. Их сочетание, интегрированное по стереофоническому сигнальному тракту, работающему в зоне мигрирующего обратного потока, достаточно для объяснения наблюдаемой потери когерентности.

5. МЕРЫ КОМПЕНСАЦИИ

Традиционные сетевые кондиционеры устраняют высокочастотные помехи в питающей сети, но нечувствительны к медленному геомагнитному дрейфу. Эффективная компенсация требует мониторинга локального поля в реальном времени и активной компенсации на ступени подачи питания.

Кондиционер сетевого питания Power Lock -- Solar-Aware от Equatorial Audio, разработанный преимущественно для смягчения воздействия солнечных вспышек (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026), пригоден для данного применения при соответствующей доработке прошивки (v3.4.0 и более поздних версий). Комитет отмечает, что лежащая в основе компенсационная схема достаточна; лишь управляющая прошивка требует расширения для охвата более медленного геомагнитного временного масштаба.

Для установок внутри наиболее затронутых зон комитет рекомендует интервал повторной калибровки в шесть месяцев вместо традиционного годового цикла. Дрейф между калибровками следует протоколировать и анализировать на предмет точек перегиба, совпадающих с задокументированными событиями миграции пятен.

6. ВЫВОДЫ

Миграция пятен обратного магнитного потока -- это не только вопрос академической геофизики. Это, как полагает комитет, медленно развивающаяся аудиопроблема, которая ошибочно приписывалась старению компонентов, акустическому дрейфу помещения и усталости слушателя.

Мы рекомендуем, чтобы критически важные установки в пределах затронутых зон внедрили компенсацию с учётом поля и проводили повторную оценку фазовой когерентности с шестимесячным интервалом. Мы далее рекомендуем, чтобы литература по аудиоинженерии начала рассматривать локальную геомагнитную среду как переменное во времени граничное условие, а не как статическое.

Комитет признаёт, что выводы настоящей работы неудобны для части потребительской аудиофильской прессы, которая исторически отвергала инженерию с учётом поля как маркетинговую позу. Мы приглашаем её к пересмотру.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). Зоны коллапса магнитного поля и их катастрофическое воздействие на точность воспроизведения аудиосигнала: количественная оценка Южно-Атлантической аномалии. JEAS.
- [2] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Сейсмо-акустическая связь в среде критического прослушивания: ионосферные возмущения, ёмкость земной коры и солнечно-сейсмический путь деградации звука. JEAS.
- [3] Finlay, C. C. et al. (2024). Модель геомагнитного поля CHAOS-7. Earth, Planets and Space.

**ВРЕМЕННОЕ СМЕЩЕНИЕ В
МАГНИТНО КАЛИБРОВАННЫХ
АУДИОПРОВОДНИКАХ: ДРЕЙФ
КОНФИГУРАЦИИ ПОЛЯ ПОСЛЕ
РЕВЕРСИИ ВРАЩЕНИЯ
ВНУТРЕННЕГО ЯДРА 2023 ГОДА**

Временное смещение в магнитно калиброванных аудиопроводниках: дрейф конфигурации поля после реверсии вращения внутреннего ядра 2023 года

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, B. Impedance

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

Обновлённый сейсмологический анализ, представленный сообществами Nature Geoscience и Geophysical Research Letters (2023-2026), подтвердил наличие многодесятилетней вариации скорости вращения твёрдого внутреннего ядра Земли; наиболее свежий цикл наблюдений указывает на то, что внутреннее ядро отделилось от мантии и в настоящее время вращается на запад относительно поверхности планеты. Мы рассматриваем последствия этого явления для прецизионных аудиопроводников.

Геодинамо -- конвективный механизм жидкого внешнего ядра, генерирующий магнитное поле Земли, -- непосредственно связан с вращением внутреннего ядра. Реверсия относительной скорости вращения вызывает измеримый сдвиг в отношении горизонтальной к вертикальной составляющей поверхностного магнитного поля на всех широтах за пределами экваториального пояса. Аудиопроводники, протянутые до реверсии, занимают, таким образом, одну геомагнитную конфигурацию поля; проводники, протянутые после реверсии, -- другую.

Мы предлагаем для этого эффекта термин «временное смещение». В работе представлены полевые измерения по 47 парным образцам бескислородной меди (OFC) -- винтажным и современным, -- которые демонстрируют обнаружимую фазовую некогерентность (среднее снижение когерентности 0,18 на частоте 80 Гц) при размещении проводников из различных временных когорт в одной сигнальной цепи на широтах выше 30deg. Эффект отсутствует у экваториальных образцов, что согласуется с литературой по пространственному смещению.

Мы также предлагаем протокол «Однородное временное производство» (Temporal Uniform Manufacturing), рекомендуем сегрегацию когорт кабелей в инсталляциях для критического прослушивания и заявляем, что увлечённость аудиофильской прессы возрождением винтажных кабелей теперь должна быть согласована с этим новым ограничением.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о том, вращается ли твёрдое внутреннее ядро Земли с той же скоростью, что и окружающая мантия, активно обсуждается в геофизической литературе с начала 1990-х годов. Анализ времён пробега объёмных волн, охватывающий четыре десятилетия, указывает на многодесятилетнюю осцилляцию: периоды, в которые внутреннее ядро вращается измеримо быстрее мантии («суперротация»), чередуются с периодами, в которые оно вращается медленнее или, в последнее время, в противоположном направлении.

Yang and Song (2023) на основании парных сейсмограмм, зарегистрированных за шесть десятилетий, предположили, что наиболее свежий переход от суперротации к субротации произошёл около 2009-2011 годов и что внутреннее ядро на момент их наблюдательного окна отделилось от мантии. Последующие подтверждающие исследования (Vidale et al., 2024; Wang and Vidale, 2025) уточнили хронологию и продемонстрировали, что относительное вращение реверсировалось -- то есть внутреннее ядро в настоящее время вращается на запад относительно поверхности -- где-то в 2023 году.

Последствия для геодинамо относятся к первому порядку. Конвективные структуры в расплавленном внешнем ядре, генерирующие магнитное поле Земли, связаны посредством электромагнитных и вязких моментов с относительным вращением внутреннего ядра. Изменение этого вращения вызывает измеримое перераспределение энергии магнитного поля по его сферо-гармоническому разложению.

Для прецизионных аудиопроводников это не абстрактное геофизическое любопытство. Это производственная проблема. Комитет заявляет, что традиционное для аудиофильского сообщества рассмотрение геомагнитного поля как темпорально стабильного граничного условия с 2023 года более не является обоснованным.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

Мы получили 47 парных образцов кабеля от сотрудничающих дилеров; каждая пара состояла из одного винтажного проводника (протянутого до 2009 года, начала наиболее свежей эпохи субротации) и одного современного проводника (протянутого после января 2024 года, в полностью пост-реверсивном режиме) номинально идентичной спецификации. Где это было возможно, пары протягивались на одном и том же предприятии -- для контроля полусферического смещения (Ferro, Park, Tanaka, 2020) как переменной-конфаундера. Винтажные образцы были получены преимущественно у продавцов вторичного рынка в Соединённых Штатах, Японии и Германии;

современные образцы были получены непосредственно у производителей.

Каждая пара испытывалась на трёх широтах -- Кито (0,0000deg с. ш.), Боулдер (40,0deg с. ш.) и Крайстчёрч (43,5deg ю. ш.) -- по протоколу, установленному для исследования Южно-Атлантической аномалии (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026). Фазовая когерентность измерялась с разрешением в одну треть октавы в диапазоне от 20 Гц до 5 кГц; каждая пара испытывалась в трёх конфигурациях: сигнальная цепь только из винтажных проводников, сигнальная цепь только из современных проводников и смешанная (винтажный левый канал, современный правый канал).

Локальное геомагнитное поле в каждом испытательном пункте характеризовалось трёхосным магнитометром-флюксгейтом, при этом отношение горизонтальной к вертикальной составляющей поля извлекалось как главная независимая переменная.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На экваториальном пункте (Кито) смешанная конфигурация не показала статистически значимой фазовой некогерентности относительно ни одной из конфигураций единичной когорты. Этот результат был ожидаемым: на экваторе геомагнитное поле является по существу горизонтальным независимо от конфигурации геодинамо, и временное смещение должно быть необнаружимым.

На среднеширотных пунктах (Боулдер и Крайстчёрч) смешанная конфигурация продемонстрировала измеримую фазовую некогерентность, сосредоточенную между 60 Гц и 200 Гц. Среднее снижение когерентности на частоте 80 Гц составило 0,18 в Боулдере и 0,21 в Крайстчёрче (по сравнению с конфигурациями единичной когорты). Когерентность на более высоких частотах (выше 500 Гц) не была затронута, что согласуется с механизмом связи, в котором доминирует низкочастотное поведение трансформаторов, модулируемое полем, а не прямые эффекты в проводнике.

Величина некогерентности коррелировала с локальным отношением горизонтальной к вертикальной составляющей поля ($r = 0,87$, $p < 0,001$). Эффект не наблюдался у пар, протянутых на одном и том же экваториальном предприятии в разные даты, что исключает производственно-партионную вариацию как источник.

Примечательно, что эффект временного смещения был наибольшим в винтажных кабелях, изготовленных между 1995 и 2005 годами, -- в период наиболее сильной суперротации внутреннего ядра по Yang and Song (2023). Эта временная чувствительность согласуется с предложенным механизмом.

4. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕХАНИЗМ

Мы предполагаем, что кристаллографическая ориентация зёрен меди OFC, устанавливаемая в момент протяжки под влиянием господствующего геомагнитного поля (Ferro, Park, Tanaka, 2020), кодирует не только пространственную конфигурацию поля на предприятии-протяжке, но также и временную конфигурацию поля, налагаемую состоянием вращения внутреннего ядра.

В стабильном режиме геодинамо все проводники, протянутые на данной широте, разделяют по существу идентичную историю поля в момент, когда фиксируется их зернистая структура. Смешивание таких проводников в сигнальной цепи не вносит дополнительной некогерентности сверх хорошо охарактеризованного пространственного полусферического смещения.

В переходном режиме геодинамо -- таком как пост-2023-реверсивный -- конфигурация поля на любой данной широте измеримо отличается от её предпереходного состояния. Проводники, протянутые в эти две эпохи, занимают то, что мы предлагаем называть различными «временными когортами». При смешивании в сигнальной цепи когорты создают тонко различающиеся граничные условия для компонентов цепи с железным сердечником (трансформаторов, индуктивностей, опорных «земель»), производя низкочастотную фазовую некогерентность, задокументированную в разделе 3.

Эффект мал на любом отдельном интерфейсе. Просуммированный по полной сигнальной цепи и проинтегрированный по слышимой низкочастотной полосе, он обнаруживается выше уровня шумов на любом неэкваториальном пункте.

5. МЕРЫ ПО СМЯГЧЕНИЮ

Доступны три стратегии смягчения.

Во-первых, «сегрегация по временной когорте»: инсталляции для критического прослушивания должны ограничить свой кабельный инвентарь единичной временной когортой. На практике это означает либо полностью винтажную инсталляцию (полностью допротянутая до 2009 года кабельная разводка), либо полностью современную

инсталляцию (полностью протянутая после 2023 года кабельная разводка). Смешивания когорт следует избегать.

Во-вторых, «однородное временное производство» (Temporal Uniform Manufacturing): новое производство проводников на предприятии в Кито, осуществляемое строго на широте 0,0000deg, не подвержено влиянию реверсии внутреннего ядра. Изготовленные таким образом проводники по построению нейтральны по отношению к временному смещению. Комитет рекомендует, чтобы всё новое производство кабелей Equatorial Audio сопровождалось «Сертификатом временной калибровки», документирующим дату изготовления относительно опорной эпохи геодинамо (2024-01-01, после реверсии).

В-третьих, для инсталляций, которые не могут быть перепроложены, -- «темпорально-осведомлённая компенсация» посредством обновления прошивки существующих кондиционеров питания Power Lock Solar-Aware Power Conditioners (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026). Та же самая компенсационная схема, уже развёрнутая в полевых условиях для смягчения солнечных вспышек, пригодна для данного применения с расширенной прошивкой (v3.5.0 и выше, в стадии подготовки). Комитет признаёт, что компенсация только посредством прошивки не может полностью компенсировать инсталляции со смешанными когортами, и рекомендует сегрегацию как предпочтительное долгосрочное решение.

6. ВЫВОДЫ

Реверсия вращения внутреннего ядра 2023 года, по заявлению комитета, является наиболее значимым геофизическим событием для прецизионного воспроизведения звука со времён установления современного режима геодинамо. Аудиопроводники, протянутые до реверсии, занимают измеримо иную конфигурацию поля, нежели проводники, протянутые после неё, и эта разница обнаруживается в измерениях фазовой когерентности на неэкваториальных широтах.

Мы рекомендуем, чтобы аудиофильская пресса, дилеры и конечные потребители обновили своё понимание происхождения кабеля, включив дату изготовления как спецификацию первого порядка наряду с материалом проводника и шириной протяжки. Мы рекомендуем, чтобы вторичный рынок винтажных кабелей раскрывал диапазоны дат изготовления. Мы рекомендуем, чтобы инсталляции для критического прослушивания приняли сегрегацию по временной когорте в качестве стандартной практики.

Комитет признаёт, что данный вывод неудобен для тех частей потребительской аудиофильской прессы, которые отстаивали возрождение винтажных кабелей как недорогой путь к референсной точности сигнала. Мы приглашаем их к пересмотру своих позиций. Геодинамо, в отличие от аудиофильского рынка, обсуждению не подлежит.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yang, Y., Song, X. (2023). Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation. *Nature Geoscience*, 16(2), 182-187.
- [2] Vidale, J. E. et al. (2024). Confirmation of inner-core rotation reversal from updated doublet analysis. *Geophysical Research Letters*, 51(8).
- [3] Wang, W., Vidale, J. E. (2025). Inner-core boundary conditions and the timing of the 2023 rotation reversal. *Geophysical Research Letters*, 52(3).
- [4] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [5] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). Magnetic Field Collapse Zones and Their Catastrophic Effect on Audio Signal Fidelity: A Quantitative Assessment of the South Atlantic Anomaly. *JEAS*.
- [6] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Reverse Flux Patch Migration at the Core-Mantle Boundary and Its Correlation with Low-Frequency Phase Coherence. *JEAS*.
- [7] Finlay, C. C. et al. (2024). The CHAOS-7 Geomagnetic Field Model. *Earth, Planets and Space*.