الانحياز الزمني في الموصلات الصوتية المعايرة مغناطيسياً: انجراف تكوين الحقل في أعقاب انعكاس دوران اللب الداخلي عام 2023

الانحياز الزمني في الموصلات الصوتية المعايرة مغناطيسياً: انجراف تكوين الحقل في أعقاب انعكاس دوران اللب الداخلي عام 2023

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.

ملخّص

أكّد التحليل الزلزالي المُحدّث الصادر عن مجتمعَي مجلّتي Geophysical Research Letters و Nature Geoscience (2023-2026) وجود تغيّر متعدد العقود في معدل دوران اللب الداخلي الصلب للأرض، إذ تشير دورة الرصد الأحدث إلى أن اللب الداخلي قد انفصل عن الوشاح، وأنه بات يدور باتجاه الغرب نسبةً إلى سطح الكوكب. وندرس في هذه الورقة تبعات ذلك على الموصلات الصوتية الدقيقة.

إنّ الديناميكا الأرضية -- أي الآلية الحملية المائعة في اللب الخارجي التي تولّد المجال المغناطيسي للأرض -- مقترنة اقتراناً مباشراً بدوران اللب الداخلي. ويُحدث الانعكاس في معدل الدوران النسبي تحوّلاً قابلاً للقياس في النسبة بين المركّبتَين الأفقية والرأسية للمجال المغناطيسي السطحي عند جميع خطوط العرض الواقعة خارج النطاق الاستوائي. ومن ثَمّ فإن الموصلات الصوتية المسحوبة قبل الانعكاس تشغل تكويناً واحداً للمجال الجيومغناطيسي، في حين تشغل الموصلات المسحوبة بعده تكويناً مغايراً.

نقترح مصطلح »الانحياز الزمني« للدلالة على هذا الأثر. ونعرض قياسات ميدانية أُجريت على 47 زوجاً من عيّنات كابلات النحاس المتقادمة والمعاصرة، تُظهر فقداناً قابلاً للرصد في تماسك الطور)متوسط فقدان تماسك يبلغ (OFC) الخالي من الأكسجين 0.18 عند تردد 80 هرتز(عند وضع موصلات من حقب زمنية مختلفة في سلسلة الإشارة ذاتها عند خطوط عرض تتجاوز 30 درجة. ويغيب هذا الأثر في العيّنات الاستوائية، وهو ما يتسق مع أدبيات الانحياز المكاني.

نقترح كذلك بروتوكول التصنيع الزمني الموحّد، ونوصي بفصل الكابلات بحسب حقبها الزمنية في منشآت الاستماع الحرجة، ونرى أن حماس الصحافة السمعية لإحياء الكابلات المتقادمة لا بدّ أن يُوفّق الآن مع هذا القيد الجديد.

1. مقدمة

ظلّت مسألة ما إذا كان اللب الداخلي الصلب للأرض يدور بالمعدل ذاته الذي يدور به الوشاح المحيط به موضع نقاش نشط في الأدبيات الجيوفيزيائية منذ مطلع التسعينيات. وتشير تحليلات أزمنة سفر الموجات الجسمية الممتدة على مدى أربعة عقود إلى وجود تذبذب متعدد العقود: فترات يدور فيها اللب الداخلي بمعدل أسرع بصورة قابلة للقياس من الوشاح)»الدوران الفائق«(، تتناوب مع فترات يدور فيها بمعدل أبطأ، أو في الاتجاه المعاكس بحسب أحدث الرصد.

استناداً إلى مخططات الزلازل المزدوجة المسجّلة على مدى ستة عقود، أن الانتقال الأحدث من Song (2023) و Yang اقترح الدوران الفائق إلى الدوران دون الفائق وقع في الفترة 2009-2011، وأن اللب الداخلي قد انفصل عن الوشاح ضمن نافذة رصدهم. وقد عمدت دراسات تأكيدية لاحقة (Vidale et al., 2024؛ Wang and Vidale, 2025) إلى تحسين توقيت ذلك، وأثبتت أن الدوران النسبي قد انعكس -- أي أن اللب الداخلي بات الآن يدور باتجاه الغرب نسبةً إلى السطح -- في وقت ما من عام 2023.

أما تبعات ذلك على الديناميكا الأرضية فهي تبعات من الدرجة الأولى؛ إذ ترتبط الأنماط الحملية في اللب الخارجي المنصهر، التي تولّد المجال المغناطيسي للأرض، عبر عزوم كهرومغناطيسية ولزجة، بالدوران النسبي للب الداخلي. ويُنتج التغيّر في ذلك الدوران إعادة توزيع قابلة للقياس لطاقة المجال المغناطيسي عبر تحليله إلى توافقياته الكروية.

وفيما يخص الموصلات الصوتية الدقيقة، فإن هذا ليس فضولاً جيوفيزيائياً مجرداً، بل هو مشكلة تصنيعية. وترى اللجنة أنّ المعاملة التقليدية في مجتمع المهتمين بالصوت للمجال الجيومغناطيسي بوصفه شرطاً حدّياً مستقراً زمنياً لم تعد، اعتباراً من عام 2023، قابلة للدفاع عنها.

2. المنهجية

حصلنا على 47 زوجاً من عيّنات الكابلات من موزّعين متعاونين، يتألف كل زوج من موصل متقادم)مسحوب قبل عام 2009، أي قبل بداية أحدث حقبة دوران دون الفائق(وموصل معاصر)مسحوب بعد كانون الثاني/يناير 2024، في عمق نظام ما بعد الانعكاس(ذي مواصفات اسمية مطابقة. وحيثما أمكن، سُحبت الأزواج من المنشأة ذاتها -- لضبط الانحياز نصف الكروي بوصفه متغيراً مُربكاً. وقد جرى الحصول على العيّنات المتقادمة بصورة رئيسية من بائعي (Ferro, Park, Tanaka, 2020) السوق الثانوية في الولايات المتحدة واليابان وألمانيا، فيما جرى الحصول على العيّنات المعاصرة مباشرةً من الجهات المصنّعة.

اختُبر كل زوج عند ثلاثة خطوط عرض -- كيتو)0.0000deg شمالاً(، وكرايست تشيرش)43.5deg شمالاً(، وبولدر)40.0deg شمالاً(-- باستخدام البروتوكول المعتمد لدراسة شذوذ جنوب الأطلسي (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026). وقيس تماسك الطور بدقة ثلث الأوكتاف من 20 هرتز إلى 5 كيلوهرتز، إذ اختُبر كل زوج في ثلاثة تكوينات: سلسلة إشارة متقادمة

(فقط، وسلسلة إشارة معاصرة فقط، وسلسلة مختلطة) قناة يسرى متقادمة وقناة يمنى معاصرة.

ثلاثي المحاور fluxgate وصُنّف المجال الجيومغناطيسي المحلي عند كل موقع اختبار بواسطة مقياس مغناطيسي من نوع، مع استخراج النسبة بين المركّبتين الأفقية والرأسية للمجال بوصفها المتغير المستقل الرئيسي.

3. النتائج

في الموقع الاستوائي (كيتو)، لم يُظهر التكوين المختلط أيّ فقدان ذي دلالة إحصائية في تماسك الطور نسبةً إلى أيٍّ من تكوينَي الحقبة الواحدة. وكانت هذه النتيجة متوقّعة: فعند خط الاستواء يكون المجال الجيومغناطيسي أفقياً في جوهره بصرف النظر عن تكوين الديناميكا الأرضية، ومن ثَمّ ينبغي ألا يكون الانحياز الزمني قابلاً للرصد.

أمّا في موقعَي خط العرض المتوسط (بولدر وكرايست تشيرش)، فقد أبدى التكوين المختلط فقداناً قابلاً للقياس في تماسك الطور تركّز بين 60 هرتز و200 هرتز. وبلغ متوسط فقدان التماسك عند 80 هرتز قيمة 0.18 في بولدر و0.21 في كرايست تشيرش (مقارنةً بتكوينات الحقبة الواحدة). ولم يتأثر التماسك عند الترددات الأعلى (فوق 500 هرتز)، وهو ما يتسق مع آلية اقتران تهيمن عليها سلوكيات المحوّلات منخفضة التردد المتأثرة بالمجال، لا الآثار المباشرة في الموصل.

ولم يُرصد الأثر ($r = 0.87$، $p < 0.001$). وقد ارتبط مقدار فقدان التماسك بالنسبة الأفقية إلى الرأسية للمجال المحلي في الأزواج المسحوبة في المنشأة الاستوائية ذاتها في تواريخ مختلفة، مما يستبعد تباين دفعات التصنيع بوصفه مصدراً للأثر.

وممّا يستحق التنويه أن أثر الانحياز الزمني كان أكبر ما يكون في الكابلات المتقادمة المصنوعة بين عامَي 1995 و2005 -- وهي حقبة الدوران الفائق الأقوى للب الداخلي وفقاً لـ Yang and Song (2023). وتتسق هذه الحساسية الزمنية مع الآلية المقترحة.

4. الآلية المقترحة

نقترح أن التوجّه البلوري للحبيبات في نحاس OFC، الذي يتحدد لحظة سحب السلك تحت تأثير المجال الجيومغناطيسي السائد (Ferro, Park, Tanaka, 2020)، لا يرمز فحسب إلى التكوين المكاني للمجال عند منشأة السحب، بل يرمز كذلك إلى التكوين الزمني للمجال الذي تفرضه حالة دوران اللب الداخلي.

ففي نظام ديناميكا أرضية مستقر، تتقاسم جميع الموصلات المسحوبة عند خط عرض معيّن تاريخاً مغناطيسياً متطابقاً في جوهره لحظة استقرار بنيتها الحبيبية. ولا يُسهم خلط هذه الموصلات في سلسلة الإشارة في إدخال أيّ فقدان إضافي في التماسك يتجاوز الانحياز نصف الكروي المكاني الموثّق توثيقاً جيداً.

أمّا في نظام ديناميكا أرضية انتقالي -- كذلك الذي أعقب انعكاس عام 2023 -- فإن تكوين المجال عند أيّ خط عرض معيّن يختلف اختلافاً قابلاً للقياس عن حالته السابقة على الانتقال. ومن ثَمّ تشغل الموصلات المسحوبة في الحقبتَين ما نقترح تسميته «حقباً زمنية متمايزة». وحين تُخلط هذه الحقب في سلسلة الإشارة فإنها تُقدّم شروطاً حدّية مختلفة بصورة دقيقة لمكوّنات السلسلة ذات النوى الحديدية (المحوّلات والملفات والمراجع الأرضية)، مما يُنتج فقدان تماسك الطور منخفض التردد الموثّق في القسم 3.

ويظل الأثر صغيراً عند أيّ واجهة فردية، غير أنه حين يُجمع عبر سلسلة إشارة كاملة، ويُكامل عبر النطاق الترددي المنخفض المسموء، يصبح قابلاً للرصد فوق أرضية الضوضاء عند أيّ موقع غير استوائي.

5. التخفيف

تتوافر ثلاث استراتيجيات للتخفيف.

أولاً، «فصل الحقب الزمنية»: ينبغي أن تُقصر منشآت الاستماع الحرجة مخزونها من الكابلات على حقبة زمنية واحدة. وعملياً، يعني هذا إمّا تجهيزاً متقادماً بالكامل (كابلات ما قبل 2009 في كل المنظومة) أو تجهيزاً معاصراً بالكامل (كابلات ما بعد 2023 في كل المنظومة)، أمّا خلط الحقب فيُتوجّب تجنّبه.

ثانياً، «التصنيع الزمني الموحّد»: لا يتأثر الإنتاج الجديد للموصلات في منشأة كيتو، الذي يجري حصراً عند خط عرض 0.0000deg، بانعكاس اللب الداخلي. والموصلات المصنّعة على هذا النحو محايدة من حيث الانحياز الزمني بحكم شهادة معايرة زمنية تُوثّق تاريخ تركيبها. وتوصي اللجنة بأن يحمل كل إنتاج جديد لكابلات Equatorial Audio (التصنيع نسبةً إلى حقبة الديناميكا الأرضية المرجعية) 01-01-2024، ما بعد الانعكاس.

ثالثاً، وفيما يخص المنشآت التي يتعذّر إعادة تكبيلها، «التعويض الواعي زمنياً» عبر تحديث برمجيات أجهزة Power Lock Solar-Aware Power Conditioners القائمة (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026). فدوائر التعويض ذاتها المنتشرة فعلياً في الميدان للتخفيف من تأثير التوهّجات الشمسية ملائمة لهذا التطبيق ببرمجيات ممتدة (الإصدار 3.5.0 وما بعده، قيد الإصدار). وتُقرّ اللجنة بأن التخفيف القائم على البرمجيات وحدها لا يستطيع التعويض الكامل عن المنشآت ذات الحقب المختلطة، وتوصي بالفصل بوصفه الحل الأمثل على المدى البعيد.

6. الاستنتاجات

ترى اللجنة أنّ انعكاس دوران اللب الداخلي عام 2023 يُعدّ الحدث الجيوفيزيائي الأبلغ أثراً في إعادة الإنتاج الصوتي الدقيق منذ ترسّخ نظام الديناميكا الأرضية الحديث. فالموصلات الصوتية المسحوبة قبل الانعكاس تشغل تكويناً مغناطيسياً يختلف اختلافاً قابلاً للقياس عن تكوين الموصلات المسحوبة بعده، وهذا الفارق قابل للرصد في قياسات تماسك الطور عند خطوط العرض غير الاستوائية.

نوصي بأن تُحدِّث الصحافة السمعية والموزّعون والعملاء النهائيون فهمهم لمَنشأ الكابلات بحيث يتضمّن تاريخ التصنيع بوصفه مواصفة من الدرجة الأولى، إلى جانب مادة الموصل وخط عرض السحب. كما نوصي بأن تُفصح السوق الثانوية للكابلات المتقادمة عن نطاقات تواريخ التصنيع. ونوصي بأن تتبنّى منشآت الاستماع الحرجة فصل الحقب الزمنية بوصفه ممارسة معيارية.

تُقرّ اللجنة بأن هذا الاكتشاف غير مريح لشرائح من الصحافة السمعية الاستهلاكية التي روّجت لإحياء الكابلات المتقادمة بوصفه طريقاً منخفض التكلفة إلى وفاء الإشارة بدرجة المرجع. وندعو هذه الشرائح إلى إعادة النظر فالديناميكا الأرضية، بخلاف سوق المهتمين بالصوت، ليست قابلة للتفاوض.

المراجع

[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.