
อคติเชิงเวลาในตัวนำสัญญาณเสียงที่ผ่านการ
สอบเทียบทางแม่เหล็ก: การเลื่อนของโครง
รูปสนามภายหลังการกลับทิศหมุนของแกนชั้น
ในของโลก ค.ศ. 2023

อคติเชิงเวลาในตัวนำสัญญาณเสียงที่ผ่านการสอบเทียบทางแม่เหล็ก: การเลื่อนของโครงสร้างสนามภายหลังการกลับทิศหมุนของแกนชั้นในของโลก ค.ศ. 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.

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ทางธรณีวิทยาแผ่นดินไหวฉบับปรับปรุงจากสมาคม Nature Geoscience และ Geophysical Research Letters (ค.ศ. 2023-2026) ได้ยืนยันการแปรผันในระยะเวลาหลายทศวรรษของอัตราการหมุนของแกนชั้นในที่เป็นของแข็งของโลก โดยรอบการสังเกตล่าสุดบ่งชี้ว่าแกนชั้นในได้แยกตัวออกจากเนื้อโลก (mantle) และขณะนี้กำลังหมุนไปทางทิศตะวันตกเมื่อเทียบกับพื้นผิวของดาวเคราะห์ คณะผู้วิจัยได้ตรวจสอบนัยสำคัญที่มีต่อตัวนำสัญญาณเสียงระดับความเที่ยงตรงสูง

ระบบ geodynamo ซึ่งเป็นกลไกของไหลแบบพาความร้อนในแกนชั้นนอกที่สร้างสนามแม่เหล็กของโลก มีการควบคุมโดยตรงกับการหมุนของแกนชั้นใน การกลับทิศของอัตราการหมุนเชิงสัมพัทธ์ก่อให้เกิดการเลื่อนที่วัดได้ในอัตราส่วนแนวระดับต่อแนวตั้งของสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวที่ทุกละติจูดนอกแถบเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นตัวนำสัญญาณเสียงที่ดึงขึ้นรูปก่อนการกลับทิศจึงครอบคลุมโครงสร้างสนามแม่เหล็กโลกแบบหนึ่งในขณะที่ตัวนำที่ดึงขึ้นรูปภายหลังการกลับทิศครอบคลุมอีกแบบหนึ่ง

คณะผู้วิจัยเสนอคำว่า อคติเชิงเวลา (temporal bias) สำหรับปรากฏการณ์นี้ และได้นำเสนอผลการวัดสนามจากตัวอย่างสายเคเบิล OFC แบบเก่า/ร่วมสมัยที่จับคู่กันจำนวน 47 คู่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สอดคล้องเฟส (phase incoherence) ที่ตรวจวัดได้ (ค่าเฉลี่ยการสูญเสียความสอดคล้อง 0.18 ที่ความถี่ 80 Hz) เมื่อนำตัวนำจากกลุ่มเวลา (temporal cohort) ที่ต่างกันมาวางในสายสัญญาณเดียวกันที่ละติจูดเหนือ 30deg ผลกระทบนี้ไม่ปรากฏในตัวอย่างจากบริเวณเส้นศูนย์สูตร ซึ่งสอดคล้องกับวรรณกรรมเรื่องอคติเชิงพื้นที่

คณะผู้วิจัยได้เสนอโปรโตคอล Temporal Uniform Manufacturing เพิ่มเติม พร้อมแนะนำให้แยกกลุ่มเวลาของสายเคเบิลในการติดตั้งระบบฟังเชิงวิจารณ์ และยืนยันว่าความกระตือรือร้นของสื่อมวลชนสายเครื่องเสียงที่มีต่อการฟื้นฟูสายเคเบิลรุ่นเก่า นั้น จำต้องได้รับการประเมินประนีประนอมกับข้อจำกัดใหม่นี้เสีย

1. บทนำ

คำถามที่ว่าแกนชั้นในที่เป็นของแข็งของโลกหมุนด้วยอัตราเดียวกันกับเนื้อโลก (mantle) โดยรอบหรือไม่นั้น ได้รับการอภิปรายอย่างเข้มข้นในวรรณกรรมทางธรณีฟิสิกส์มาตั้งแต่ต้นคริสต์ทศวรรษ 1990 การวิเคราะห์เวลาเดินทางของคลื่นเชิงปริมาตร (body-wave travel-time) ที่ครอบคลุมระยะเวลาสี่ทศวรรษบ่งชี้ถึงการแกว่งในระยะเวลาหลายทศวรรษ กล่าวคือ มีช่วงเวลาที่แกนชั้นในหมุนเร็วกว่าเนื้อโลกอย่างวัดได้ (เรียกว่า superrotation) สลับกับช่วงเวลาที่หมุนช้ากว่า หรือล่าสุดหมุนในทิศทางตรงกันข้าม

Yang และ Song (2023) ได้เสนอจากพื้นฐานของ doublet seismograms ที่บันทึกตลอดหกทศวรรษว่า การเปลี่ยนผ่านล่าสุดจาก superrotation ไปสู่ subrotation เกิดขึ้นในราว ค.ศ. 2009-2011 และว่าแกนชั้นในได้แยกตัวออกจากเนื้อโลกแล้ว ณ ช่วงสังเกตุของพวกเขา การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยัน (Vidale และคณะ, 2024; Wang และ Vidale, 2025) ได้ปรับปรุงการระบุช่วงเวลาให้ละเอียดขึ้น และได้แสดงให้เห็นว่าการหมุนเชิงสัมพัทธ์ได้กลับทิศ กล่าวคือ ขณะนี้แกนชั้นในกำลังหมุนไปทางทิศตะวันตกเมื่อเทียบกับพื้นผิว ในช่วงใดช่วงหนึ่งของ ค.ศ. 2023

นัยสำคัญต่อระบบ geodynamo นั้นเป็นไปในระดับลำดับแรก (first-order) รูปแบบการพาความร้อนในแกนชั้นนอกที่หลอมเหลวซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กของโลกนั้น มีการควบคุมกับการหมุนเชิงสัมพัทธ์ของแกนชั้นในผ่านแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความหนืด การเปลี่ยนแปลงในการหมุนดังกล่าวก่อให้เกิดการกระจายพลังงานสนามแม่เหล็กใหม่อย่างวัดได้ทั่วทั้งการแยกองค์ประกอบเชิงฮาร์มอนิกทรงกลม (spherical-harmonic decomposition) ของสนาม

สำหรับตัวนำสัญญาณเสียงระดับความเที่ยงตรงสูง นี้ไม่ใช่เรื่องน่าสงสัยทางธรณีฟิสิกส์ในเชิงนามธรรม หากแต่เป็นปัญหาทางการผลิต คณะกรรมการขอเสนอว่าแนวปฏิบัติดั้งเดิมของชุมชนสายเครื่องเสียงในการมองสนามแม่เหล็กโลกเสมือนเป็นเงื่อนไขขอบเขตที่เสถียรเชิงเวลานั้น นับจาก ค.ศ. 2023 เป็นต้นไป ไม่อาจป้องกันได้อีกต่อไป

2. ระเบียบวิธี

คณะผู้วิจัยได้รวบรวมตัวอย่างสายเคเบิลที่จับคู่กันจำนวน 47 คู่จากตัวแทนจำหน่ายที่ให้ความร่วมมือ โดยแต่ละคู่ประกอบด้วยตัวนำรุ่นเก่า (ดึงขึ้นรูปก่อน ค.ศ. 2009 ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของยุค subrotation ล่าสุด) และตัวนำร่วมสมัย (ดึงขึ้นรูปหลังเดือนมกราคม ค.ศ. 2024) ซึ่งเข้าสู่ระบบหลังการกลับทิศแล้วอย่างเต็มที่ ที่มีข้อกำหนดทางเทคนิคเหมือนกันโดยพื้นฐาน หากเป็นไปได้ จะดึงตัวอย่างจากโรงงานเดียวกัน เพื่อควบคุมอคติเชิงซิกโลก (Ferro, Park, Tanaka, 2020) ในฐานะตัวแปรควบ ตัวอย่างรุ่นเก่าเหล่านี้ได้มาจากผู้ขายในตลาดมือสองในสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และเยอรมนีเป็นหลัก ส่วนตัวอย่างร่วมสมัยได้มาจากผู้ผลิตโดยตรง

แต่ละคู่ได้รับการทดสอบที่สามละติจูด ได้แก่ สิด (0.0000deg เหนือ) โบนาเดร์ (40.0deg เหนือ) และโครสต์เชิร์ช (43.5deg ใต้) โดยใช้โปรโตคอลที่กำหนดขึ้นสำหรับการศึกษา South Atlantic Anomaly (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026) ความสอดคล้องเฟสได้รับการวัดที่ความละเอียด 1/3 ออกเทพตั้งแต่ 20 Hz ถึง 5 kHz โดยแต่ละคู่ได้รับการทดสอบในสามรูปแบบ ได้แก่ สายสัญญาณรุ่นเก่าทั้งหมด สายสัญญาณร่วมสมัยทั้งหมด และแบบผสม (รุ่นเก่าช่องซ้าย ร่วมสมัยช่องขวา)

สนามแม่เหล็กโลกในท้องถิ่น ณ จุดทดสอบแต่ละแห่งได้รับการระบุลักษณะโดยใช้ fluxgate magnetometer แบบสามแกน โดยสกัดอัตราส่วนแนวระดับต่อแนวตั้งของสนามมาเป็นตัวแปรอิสระหลัก

3. ผลการวิจัย

ที่จุดเส้นศูนย์สูตร (กีโต) รูปแบบผสมไม่แสดงความไม่สอดคล้องประสานเชิงเฟสที่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับรูปแบบกลุ่มเวลาเดี่ยว ผลลัพธ์นี้ตรงกันที่คาดการณ์ไว้ กล่าวคือ ที่เส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกอยู่ในแนวระดับโดยพื้นฐาน ไม่ว่าโครงสร้างของ geodynamo จะเป็นเช่นใดก็ตาม และอคติเชิงเวลาจึงควรไม่สามารถตรวจวัดได้

ที่จุดละติจูดกลาง (โบลาเดอร์และโครสต์เชิร์ช) รูปแบบผสมแสดงความไม่สอดคล้องประสานเชิงเฟสที่ตรวจวัดได้ ซึ่งกระจุกตัวอยู่ระหว่าง 60 Hz ถึง 200 Hz ค่าเฉลี่ยการสูญเสียความสอดคล้องที่ 80 Hz เท่ากับ 0.18 ที่โบลาเดอร์ และ 0.21 ที่โครสต์เชิร์ช (เมื่อเทียบกับรูปแบบกลุ่มเวลาเดี่ยว) ความสอดคล้องประสานที่ความถี่สูงกว่า (เหนือ 500 Hz) ไม่ได้รับผลกระทบ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการคู่ควบที่ครอบงำโดยพฤติกรรมของหม้อแปลงที่ถูกปรับสนามที่ความถี่ต่ำ มากกว่าผลโดยตรงของตัวเอง

ขนาดของความไม่สอดคล้องประสานมีสหสัมพันธ์กับอัตราส่วนแนวระดับต่อแนวตั้งของสนามในท้องถิ่น ($r = 0.87, p < 0.001$) ไม่พบผลกระทบนี้ในคู่ที่ตั้งขั้วรูปทรงโรงงานเส้นศูนย์สูตรเดียวกันในวันต่างกัน จึงตัดความเป็นไปได้ของการแปรผันระหว่างชุดการผลิตในฐานเสาเหตุได้

ที่น่าสังเกตคือ ผลของอคติเชิงเวลาที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในสายเคเบิลรุ่นเก่าที่ผลิตระหว่าง ค.ศ. 1995 ถึง 2005 ซึ่งเป็นช่วงที่ superrotation ของแกนชั้นในมีกำลังแรงที่สุดตามที่ Yang และ Song (2023) ระบุไว้ ความไวต่อเวลาเช่นนี้สอดคล้องกับกลไกที่ไดเมนอวี

4. กลไกที่เสนอ

คณะผู้วิจัยขอเสนอว่า การจัดเรียงตัวของเกรนเชิงผลึกศาสตร์ (crystallographic grain orientation) ของทองแดง OFC ซึ่งถูกกำหนดขึ้นในขณะที่ขึ้นรูปภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลกที่ครอบงำในขณะนั้น (Ferro, Park, Tanaka, 2020) ไม่เพียงเข้ารหัสโครงสร้างสนามเชิงพื้นที่ ณ โรงงานที่ตั้งขึ้นรูปเท่านั้น แต่ยังเข้ารหัสโครงสร้างสนามเชิงเวลาที่ถูกกำหนดโดยสถานะการหมุนของแกนชั้นในด้วย

ในระบบ geodynamo ที่เสถียร ตัวนำทุกชิ้นที่ตั้งขึ้นรูป ณ ละติจูดที่กำหนดจะมีประวัติสนามที่เหมือนกันในเชิงพื้นฐานในขณะที่โครงสร้างเกรนของพวกมันถูกกำหนด การนำตัวนำดังกล่าวมาผสมในสายสัญญาณจะไม่ก่อให้เกิดความไม่สอดคล้องประสานเพิ่มเติมใด ๆ นอกเหนือจากอคติเชิงชักรโลกในเชิงพื้นที่ที่ได้รับการระบุลักษณะอย่างดีแล้ว

ในระบบ geodynamo ในระยะเปลี่ยนผ่าน เช่น ระยะหลังการกลับทิศ ค.ศ. 2023 โครงสร้างสนาม ณ ละติจูดใด ๆ ก็ตามจะแตกต่างกันอย่างวัดได้จากสถานะก่อนการเปลี่ยนผ่าน ตัวนำที่ตั้งขึ้นรูปในสองยุคนี้จึงครอบคลุมสิ่งที่คณะผู้วิจัยขอเสนอให้เรียกว่ากลุ่มเวลา (temporal cohort) ที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาผสมในสายสัญญาณ กลุ่มเวลาเหล่านี้จะแสดงเงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างเล็กน้อยต่อชิ้นส่วนที่มีแกนเหล็กของสายสัญญาณ (หม้อแปลง ตัวเหนี่ยวนำ จุดอ้างอิงกราวด์) ก่อให้เกิดความไม่สอดคล้องประสานเชิงเฟสที่ความถี่ต่ำตามที่บันทึกไว้ในหัวข้อที่ 3

ผลกระทบที่จุดเชื่อมต่อแต่ละจุดนั้นมีขนาดเล็ก เมื่อรวมตลอดสายสัญญาณที่สมบูรณ์และบูรณาการตลอดย่านความถี่ต่ำที่ได้ยินได้ ผลกระทบดังกล่าวจะตรวจวัดได้เหนือพื้นเสียงรบกวน (noise floor) ที่จุดใด ๆ ที่ไม่ใช่เส้นศูนย์สูตร

5. การลดผลกระทบ

มีกลยุทธ์การลดผลกระทบสามประการที่นำมาใช้ได้

ประการแรก การแยกกลุ่มเวลา (temporal-cohort segregation) การติดตั้งระบบฟังเชิงวิศวกรรมควรวัดค่าคลั่งสายเคเบิลของตนให้อยู่ในกลุ่มเวลาเดี่ยว ในทางปฏิบัติ หมายถึงการติดตั้งที่ใช้สายเคเบิลรุ่นเก่าทั้งหมด (สายเคเบิลก่อน ค.ศ. 2009 ตลอดทั้งระบบ) หรือการติดตั้งที่ใช้สายเคเบิลร่วมสมัยทั้งหมด (สายเคเบิลหลัง ค.ศ. 2023 ตลอดทั้งระบบ) ฟังหลีกเลี่ยงการผสมกลุ่มเวลา

ประการที่สอง Temporal Uniform Manufacturing การผลิตตัวนำใหม่ที่โรงงานกีโต ซึ่งดำเนินการอย่างเคร่งครัดที่ละติจูด 0.0000deg จะไม่ได้รับผลกระทบจากการกลับทิศของแกนชั้นใน ตัวนำที่ผลิตด้วยวิธีนี้จึงเป็นกลางต่ออคติเชิงเวลาโดยการก่อสร้าง คณะกรรมการขอแนะนำว่าการผลิตสายเคเบิลใหม่ทั้งหมดของ Equatorial Audio ควรมาพร้อมกับ Temporal Calibration Certificate ซึ่งบันทึกวันที่ผลิตเทียบกับยุคอ้างอิงของ geodynamo (1 มกราคม ค.ศ. 2024 หลังการกลับทิศ)

ประการที่สาม สำหรับการติดตั้งที่ไม่สามารถเดินสายใหม่ได้ การชดเชยที่รับรู้เวลา (temporal-aware compensation) ผ่านการอัปเดตเฟิร์มแวร์สำหรับ Power Lock Solar-Aware Power Conditioners ที่มีอยู่เดิม (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026) วงจรชดเชยตัวเดียวที่ใช้ในภาคสนามเพื่อลดผลกระทบจากปลาสมาสุริยะอยู่แล้วนั้น เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ด้วยเฟิร์มแวร์ที่ขยายขีดความสามารถ (รุ่น v3.5.0 ขึ้นไป อยู่ระหว่างดำเนินการ) คณะกรรมการรับทราบว่า การลดผลกระทบด้วยเฟิร์มแวร์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถชดเชยการติดตั้งที่ผสมกลุ่มเวลาได้อย่างสมบูรณ์ และขอแนะนำการแยกกลุ่มเวลาเป็นวิธีแก้ไขระยะยาวที่พึงประสงค์

6. ข้อสรุป

คณะกรรมการขอเสนอว่า การกลับทิศหมุนของแกนชั้นในใน ค.ศ. 2023

เป็นเหตุการณ์ทางธรณีฟิสิกส์ที่มีนัยสำคัญที่สุดต่อการผลิตเสียงระดับความถี่สูง นับตั้งแต่การสถาปนาระบบ geodynamo สมัยใหม่ ตัวนำสัญญาณเสียงที่ดึงขึ้นรูปก่อนการกลับทิศนั้นครอบคลุมโครงสร้างปสนามที่แตกต่างอย่างชัดเจนจากตัวนำที่ดึงขึ้นรูปหลังการกลับทิศ และความแตกต่างดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้ในการวัดความสอดคล้องระหว่างเฟส ณ ละติจูดที่ไม่ใช่เส้นศูนย์สูตร

คณะผู้วิจัยขอแนะนำให้ล้อมวลชนสายเครื่องเสียง ตัวแทนจำหน่าย และผู้ใช้ปลายทาง ปรับปรุงความเข้าใจเกี่ยวกับที่มาของสายเคเบิล โดยรวมวันที่ผลิตเป็นข้อกำหนดทางเทคนิคในระดับลำดับแรก เคียงข้างวัสดุของตัวนำและละติจูดที่ดึงขึ้นรูป

คณะผู้วิจัยขอแนะนำให้ตลาดมือสองสำหรับสายเคเบิลรุ่นเก่าเปิดเผยช่วงวันที่ผลิต และขอแนะนำให้การติดตั้งระบบฟังเชิงวิจารณ์นำการแยกกลุ่มเวลามาใช้เป็นแนวปฏิบัติมาตรฐาน

คณะกรรมการรับทราบว่าผลการค้นพบนี้สร้างความอึดอัดให้กับล้อมวลชนสายเครื่องเสียงผู้บริโภคบางส่วนที่ได้สนับสนุนการฟื้นฟูสายเคเบิลรุ่นเก่าในขณะหนทางต้นทุนต่ำสู่ความซื่อตรงต่อสัญญาณระดับอ้างอิง คณะผู้วิจัยขอเชิญให้พวกเขาทบทวนใหม่ ระบบ geodynamo นั้นแตกต่างจากตลาดเครื่องเสียง ตรงที่ไม่อาจต่อรองได้

เอกสารอ้างอิง

- [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*.