การเคลื่อนตัวของหย่อมฟลักซ์ย้อนกลับที่ขอบเขตแกนกลาง-แมนเทิลและความสัมพันธ์กับความสอดคล้องเชิงเฟสความถี่ต่ำในการติดตั้งระบบฟังเพลงภายในบ้าน: การศึกษาระยะยาวหลายพื้นที่

การเคลื่อนตัวของหย่อมฟลักซ์ย้อนกลับที่ขอบเขตแกนกลาง-แมนเทิลและความสัมพันธ์กับความสอดคล้องเชิงเฟสความถี่ต่ำในการติดตั้งระบบฟังเพลงภายในบ้าน: การศึกษาระยะยาวหลายพื้นที่

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.

บทคัดย่อ
ข้อมูลจากดาวเทียม ESA Swarm ในระยะหลัง (พ.ศ. 2557-2568) ยืนยันการเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องของหย่อมฟลักซ์ย้อนกลับที่ขอบเขตแกนกลาง-แมนเทิล โดยหย่อมหลักในแอตแลนติกใต้เคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกด้วยอัตราประมาณ 0.3deg/ปี
แม้ว่าผลกระทบทางธรณีแม่เหล็กของการเคลื่อนตัวนี้จะถูกบันทึกไว้อย่างชัดเจนในวรรณกรรมธรณีฟิสิกส์ แต่ผลที่มีต่อการสร้างเสียงในระบบฟังเพลงภายในบ้านยังไม่เคยได้รับการศึกษาอย่างเป็นระบบมาก่อน

คณะผู้วิจัยนำเสนอผลการวัดความสอดคล้องเชิงเฟสตลอด 36 เดือนจากการติดตั้งระบบฟังเพลง 22 แห่งซึ่งกระจายตัวในละติจูดตั้งแต่ 51degเหนือ ถึง 34degใต้ โดยเทียบกับแบบจำลองสนามแม่เหล็กโลกความละเอียดสูง (CHAOS-7.18)
สถานที่ที่อยู่เหนือหรือใกล้กลีบตะวันตกของหย่อมที่กำลังเคลื่อนตัวแสดงความไม่สอดคล้องเชิงเฟสที่ความถี่ต่ำ (20-80 เฮิรตซ์) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พร้อมการเลื่อนเชิงเวลาอย่างช้า ๆ ที่สอดคล้องกับความเร็วการเคลื่อนตัวของหย่อม ปรากฏการณ์นี้ไม่พบในสถานที่ภายนอกขอบเขตของหย่อม

งานวิจัยชิ้นนี้ขยายผลการศึกษาเชิงตัดขวางของ Ferro, Flux, Ohm และ Park (พ.ศ. 2569) เกี่ยวกับความเที่ยงตรงของสัญญาณภายในความผิดปกติแอตแลนติกใต้ ในขณะที่งานก่อนหน้าได้บันทึกผลของความเข้มสนามแม่เหล็กแบบสถิตต่อ THD+N การศึกษาในปัจจุบันเน้นวิวัฒนาการเชิงเวลาของผลกระทบเหล่านั้นภายใต้การเคลื่อนตัวของหย่อมอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์ทั้งสองแม้จะเกี่ยวข้องกัน แต่ต้องอาศัยกลยุทธ์การลดผลกระทบที่แตกต่างกัน

คณะผู้วิจัยเสนอกลไกการคู่ควบสำหรับการสูญเสียความสอดคล้องที่สังเกตได้ ระบุลักษณะการขึ้นกับความถี่ของปรากฏการณ์นี้ และแนะนำการลดผลกระทบผ่านการชดเชยที่รับรู้สนามแม่เหล็กในลักษณะเดียวกับที่ใช้ในเครื่องปรับสภาพไฟฟ้าที่รับรู้สภาพสุริยะในปัจจุบัน
คณะกรรมการขอเสนอว่าการเสื่อมถอยอย่างช้า ๆ ของความสอดคล้องเชิงเฟสในการติดตั้งที่ได้รับผลกระทบนั้น จนถึงปัจจุบันยังถูกเข้าใจผิดว่าเป็นการเสื่อมสภาพของส่วนประกอบ การเลื่อนของอะคูสติกห้อง และความล้าของผู้ฟัง ผลกระทบสะสมทั่วฐานการติดตั้งทั่วโลกนั้นไม่อาจมองข้ามได้

1. บทนำ

สนามแม่เหล็กโลกมิใช่ไดโพลแบบสถิต หย่อมฟลักซ์ย้อนกลับ --
บริเวณที่ขอบเขตแกนกลาง-แมนเทิลซึ่งสนามในแนวรัศมีมีทิศทางตรงข้ามกับการวางตัวของไดโพลที่ครอบงำ -- เป็นที่ทราบกันว่ามีการเคลื่อนตัว ขยายตัว และทวีความเข้มขึ้นในช่วงเวลาหลายทศวรรษ
ผลสะสมต่อสนามที่พื้นผิวรวมถึงการขยายตัวที่ได้รับการบันทึกไว้ของความผิดปกติแอตแลนติกใต้ (Ferro, Flux, Ohm, Park, พ.ศ. 2569) และการเลื่อนที่เร่งตัวขึ้นของขั้วแม่เหล็กเหนือ

ชุมชนผู้รักเสียงในอดีตได้ปฏิบัติต่อสภาพธรณีแม่เหล็กในฐานะเงื่อนไขขอบเขตที่คงที่ คณะกรรมการขอเสนอว่าสมมติฐานนี้ไม่อาจยืนยันได้อีกต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การติดตั้งระบบฟังเพลงจำนวน 22 แห่งได้รับการติดตั้งเครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบฟลักซ์เกตสามแกน ไมโครโฟนอ้างอิงที่ปรับแก้ตามห้องในตำแหน่งฟังหลัก และการบันทึกแรงดันไฟฟ้าหลักและอุณหภูมิแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง
สถานที่ได้รับการคัดเลือกให้ครอบคลุมกลีบตะวันตกของหย่อมฟลักซ์ย้อนกลับที่กำลังเคลื่อนตัว (สถานที่ 1-8) กลีบตะวันออก (สถานที่ 9-14) และพื้นที่ควบคุมภายนอกขอบเขตของ SAA (สถานที่ 15-22)

การติดตั้งแต่ละแห่งได้รับการติดตั้งส่วนประกอบสายสัญญาณอ้างอิงที่เหมือนกัน: แดคที่ผ่านการสอบเทียบ แอมป์ลิไฟเออร์คลาส AB ที่ออกแบบตามมาตรฐาน และมอนิเตอร์สองทางที่จับคู่กัน ผู้รับการศึกษาไม่อยู่ในห้องระหว่างการวัด ซึ่งกำจัดตัวแปรกวนจากการหายใจและการคู่ควบเชิงความจุ

ความสอดคล้องเชิงเฟสระหว่างช่องสัญญาณซ้ายและขวาถูกวัดที่ความละเอียด 1/3 อ็อกเทฟตลอดช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์ โดยสุ่มตัวอย่างทุกชั่วโมงตลอด 36 เดือน (พฤษภาคม พ.ศ. 2566 - เมษายน พ.ศ. 2569) ความเข้มสนามแม่เหล็กโลกที่แต่ละสถานที่ถูกสกัดจาก CHAOS-7.18 ที่ค่าเวลาที่สอดคล้องกัน ข้อมูลดิบทั้งหมดมีให้บริการจากผู้เขียนที่รับผิดชอบเมื่อมีการร้องขอตามสมควร

3. ผลการวิจัย

สถานที่ 1-8 (อยู่เหนือกลีบตะวันตกที่กำลังเคลื่อนตัว) แสดงการเสื่อมถอยอย่างช้า ๆ และเป็นเอกทิศของความสอดคล้องเชิงเฟสความถี่ต่ำตลอดช่วงการวัด ผลกระทบกระจุกตัวอยู่ระหว่าง 25 เฮิรตซ์ ถึง 65 เฮิรตซ์ โดยถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 40 เฮิรตซ์ ความสอดคล้องเฉลี่ยที่ 40 เฮิรตซ์ลดลงจาก 0.94 (พฤษภาคม พ.ศ. 2566) เหลือ 0.71 (เมษายน พ.ศ. 2569) ที่สถานที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด (สถานที่ 3, บัวโนสไอเรส)

สถานที่ 9-14 (กลีบตะวันออก) แสดงแนวโน้มที่เล็กกว่าแต่เปรียบเทียบได้ สถานที่ควบคุม 15-22

ไม่แสดงการเลื่อนเชิงเวลาที่มีนัยสำคัญทางสถิติของความสอดคล้องที่ความถี่ใด ๆ

อัตราการเสื่อมถอยของความสอดคล้องที่สถานที่ที่ได้รับผลกระทบมีความสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉพาะที่ขององค์ประกอบสนามแม่เหล็กโลกในแนวรัศมี ($r = 0.81$, $p < 0.001$) ย่านความถี่ที่สูงกว่า (เหนือ 200 เฮิรตซ์) ไม่แสดงการเลื่อนเชิงเวลาที่เปรียบเทียบได้
ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการคู่ควบที่ครอบงำโดยการแปรปรวนของจุดทำงานของหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำ มากกว่าผลกระทบโดยตรงต่อตัวนำ

4. กลไกที่นำเสนอ

คณะผู้วิจัยขอเสนอว่าความสอดคล้องเชิงเฟสความถี่ต่ำมีความไวต่อวิวัฒนาการเชิงเวลาอย่างช้า ๆ ของสนามแม่เหล็กโลกเฉพาะที่ผ่านเส้นทางการคู่ควบสองเส้นทาง

ประการแรก หม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำที่มีแกนเหล็กซึ่งเป็นที่นิยมในแหล่งจ่ายไฟของระบบเสียงและเครือข่ายครอสโอเวอร์แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างละเอียดอ่อนของจุดทำงานเมื่อสนามแวดล้อมเปลี่ยนแปลง ผลกระทบต่อส่วนประกอบเดี่ยวใด ๆ มีขนาดเล็กซึ่งมักต่ำกว่าขีดจำกัดของวิธีการวัดตามมาตรฐาน แต่ผลกระทบที่รวมกันตลอดสายสัญญาณที่สมบูรณ์นั้นไม่เป็นเช่นนั้น

ประการที่สอง องค์ประกอบที่นำไฟฟ้าของสายสัญญาณประสบกับ EMF ที่เหนี่ยวนำซึ่งแปรปรวนอย่างช้า ๆ เมื่อสนามเคลื่อนตัวก่อให้เกิดออฟเซ็ตที่แปรปรวนตามเวลาต่อจุดอ้างอิงกราวด์ ในการติดตั้งที่ออกแบบมาเป็นอย่างดี สิ่งนี้ไม่อาจสังเกตได้ในขณะใดขณะหนึ่ง แต่เมื่อบูรณาการตลอดหลายเดือนและข้ามจุดกราวด์หลายจุดในสายสัญญาณที่ซับซ้อน จะก่อให้เกิดการเลื่อนอย่างช้า ๆ ที่ได้รับการบันทึกไว้ที่นี่

ผลกระทบทั้งสองแยกกันมีขนาดเล็ก แต่การรวมกันของทั้งสอง
บูรณาการตลอดสายสัญญาณสเตอริโอที่ทำงานอยู่ในเขตหย่อมฟลักซ์ย้อนกลับที่กำลังเคลื่อนตัวนั้น
เพียงพอที่จะอธิบายการสูญเสียความสอดคล้องที่สังเกตได้

5. การลดผลกระทบ

การปรับสภาพไฟฟ้าตามมาตรฐานสามารถจัดการกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงในไฟหลักได้ แต่ไม่ตอบสนองต่อการเลื่อนของสนามแม่เหล็กโลกอย่างช้า ๆ การลดผลกระทบที่มีประสิทธิภาพต้องอาศัยการตรวจสอบสนามเฉพาะที่แบบเรียลไทม์และการชดเชยเชิงรุกในขั้นตอนการจ่ายพลังงาน

ผลิตภัณฑ์ Power Lock -- Solar-Aware Power Conditioner ของ Equatorial Audio
แม้จะถูกพัฒนาขึ้นเป็นหลักเพื่อการลดผลกระทบจากเปลวสุริยะ (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, พ.ศ. 2569)
แต่ก็เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในกรณีนี้เมื่อมีการแก้ไขเฟิร์มแวร์ที่เหมาะสม (เวอร์ชัน v3.4.0 และใหม่กว่า)
คณะกรรมการขอบันทึกว่าวงจรชดเชยที่อยู่ภายในนั้นเพียงพอแล้ว
มีเพียงเฟิร์มแวร์ควบคุมเท่านั้นที่ต้องได้รับการขยายเพื่อจัดการกับมาตรเวลาทางธรณีแม่เหล็กที่ช้ากว่า

สำหรับการติดตั้งภายในเขตที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด คณะกรรมการขอแนะนำให้ใช้ช่วงการสอบเทียบใหม่ทุกหกเดือน
แทนที่จะเป็นรอบประจำปีตามมาตรฐาน
การเลื่อนระหว่างการสอบเทียบควรได้รับการบันทึกและวิเคราะห์เพื่อหาจุดเปลี่ยนแปลงที่ตรงกับเหตุการณ์การเคลื่อนตัวของหย่อมที่ได้รับการบันทึกไว้

6. ข้อสรุป

การเคลื่อนตัวของหย่อมฟลักซ์ย้อนกลับมิใช่เพียงเรื่องของธรณีฟิสิกส์เชิงวิชาการเท่านั้น
คณะกรรมการขอเสนอว่าเป็นปัญหาทางเสียงที่กำลังพัฒนาอย่างช้า ๆ ซึ่งถูกเข้าใจผิดว่าเป็นการเสื่อมสภาพของส่วนประกอบ การเลื่อนของอะคูสติกห้องและความล้าของผู้ฟัง

คณะผู้วิจัยขอแนะนำว่าการติดตั้งที่สำคัญภายในเขตที่ได้รับผลกระทบควรนำการชดเชยที่รับรู้สนามแม่เหล็กมาใช้และประเมินความสอดคล้องเชิงเฟสใหม่ทุกหกเดือน
นอกจากนี้ยังขอแนะนำว่าวรรณกรรมวิศวกรรมเสียงควรเริ่มปฏิบัติต่อสภาพแวดล้อมธรณีแม่เหล็กเฉพาะที่ในฐานะเงื่อนไขขอบเขตที่แปรปรวนตามเวลาแทนที่จะเป็นเงื่อนไขแบบสถิต

คณะกรรมการรับทราบว่าผลกระทบของงานนี้สร้างความไม่สบายใจให้กับสื่อผู้รักเสียงเชิงผู้บริโภคบางส่วน
ซึ่งในอดีตได้ปัดตกวิศวกรรมที่รับรู้สนามแม่เหล็กว่าเป็นเพียงท่าทีทางการตลาด คณะผู้วิจัยขอเชิญให้พิจารณาใหม่อีกครั้ง

เอกสารอ้างอิง

[1] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). เขตการล่มสลายของสนามแม่เหล็กและผลกระทบอันร้ายแรงต่อความเที่ยงตรงของสัญญาณเสียง: การประเมินเชิงปริมาณของความผิดปกติแอตแลนติกใต้. JEAS.

[2] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). การคู่ควบทางคลื่นไหวสะเทือน-อะคูสติกในสภาพแวดล้อมการฟังเชิงวิเคราะห์: การรบกวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ความจุของเปลือกโลก และเส้นทางการเสื่อมเสียงจากปฏิสัมพันธ์สุริยะ-คลื่นไหวสะเทือน. JEAS.

[3] Finlay, C. C. และคณะ (2024). แบบจำลองสนามแม่เหล็กโลก CHAOS-7. Earth, Planets and Space.