



ศูนย์อำนวยการบูรณาการวิทยาศาสตร์เพื่อเสถียรภาพระบบโลกและความต่อเนื่องแห่งชาติ (ศวสช.)
National Center for Scientific Integration for Earth-System Stability and National Continuity (SWSN)

ความสอดคล้องดังกล่าวข้ามโดเมนและการควบคุมแบบย้อนกลับของวิถีดวงดัมที่มีการตรวจวัด

กรอบเชิงปรากฏการณ์วิทยาสำหรับการฟื้นฟูสถานะเชิงสาเหตุในระดับมหภาค (Macroscopic Causal-State Restoration: MCSR)

ต้นฉบับการทบทวนทางวิทยาศาสตร์ของรัฐบาล — ฉบับปรับปรุงที่ 3 (Revision 3)

อนันต์ วงศ์ภาพ 1,2,* , เอมะลิน วงศ์ภาพ 1,2 , เดชสิทธิ์ เก่งขุนทด 1,3

1 หน่วยระบบซับซ้อนและฟิสิกส์เชิงคำนวณ, ศูนย์ ศวสช., ประเทศไทย

2 กลุ่มวิจัยฟิสิกส์เชิงคำนวณ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ประเทศไทย

3 หน่วยคณิตศาสตร์ประยุกต์และระบบควบคุม, ศูนย์ ศวสช., ประเทศไทย

* นักวิจัยหลักผู้ประสานงาน: ดร. อนันต์ วงศ์ภาพ (Principal Scientist)

วันที่ยื่น: 17 สิงหาคม 2578 (2035)	รหัสเอกสาร: SWSN-SCI/GRP-2035-04-R3
แหล่งทุน: กองทุนวิจัยความต่อเนื่องแห่งชาติ; ร่วมสนับสนุนโดย กลุ่ม CreativeLabTH	สถานะ: เอกสารทบทวนภายใน (ยื่นขอจัดสรรทรัพยากรระดับชาติเพื่อทดสอบสมมติฐาน)

บทคัดย่อ (Abstract) — เรานำเสนอกรอบการทำงานสองระดับที่สามารถพิสูจน์ว่าเป็นเท็จได้ (falsifiable two-layer framework) โดยมีแรงผลักดันมาจากค่าคลาดเคลื่อนตกค้างของแบบจำลอง (model residuals) ที่คงอยู่อย่างต่อเนื่องในระบบตรวจวัดต่างชนิดกัน และจากความก้าวหน้าล่าสุดในการควบคุมลูกศรแห่งเวลาที่ปรากฏในระบบควอนตัมที่มีการตรวจวัด

เราทดสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนตกค้างมาตรฐานจากกลุ่มเซ็นเซอร์อิสระหลายชุด สามารถอธิบายได้ดีกว่าด้วยกระบวนการสัญญาณรบกวนอิสระ หรือด้วยตัวแปรแฝงร่วม (shared latent factor) ที่มีการตอบสนองเฉพาะแต่ละช่องสัญญาณ ในการทดสอบภาวะวิกฤตความสามารถในการทำซ้ำ (reproducibility stress test) ที่รายงานในที่นี้ องค์ประกอบหลักลำดับแรก (PC1) สามารถอธิบายความแปรปรวนมาตรฐานได้ถึง 60.1% และแบบจำลองตัวแปรแฝงเดียวช่วยปรับปรุงดัชนีข้อมูลเบย์เซียน (Bayesian Information Criterion) ได้ถึง $\Delta BIC = 176.5$ เมื่อเทียบกับสมมติฐานว่างแบบเกาส์เซียนแนวทแยง (diagonal Gaussian null) สถิติเหล่านี้ยังไม่ได้เป็นการสถาปนาปรากฏการณ์ใหม่ของกาลอวกาศ

แต่ทำหน้าที่กำหนดเป้าหมายการตรวจวัดที่คำอธิบายแบบดั้งเดิมจะต้องพยายามซึมซับและหักล้างให้ได้ก่อน

ด้วยแรงบันดาลใจจากการควบคุมลูกศรแห่งเวลาในระดับวิถี (trajectory-level time-arrow control) ในระบบควอนตัมที่มีการตรวจวัด เราได้กำหนดสูตรการฟื้นฟูสถานะเชิงสาเหตุในระดับมหภาค (Macroscopic Causal-State Restoration: MCSR) ให้เป็นปัญหาการควบคุมแบบย้อนกลับ (inverse-control problem) แทนที่จะเป็นการย้อนเวลาทางอุณหพลศาสตร์ตามตัวอักษร

แบบจำลองสัญญาณรบกวนแบบมีเงื่อนไขแสดงให้เห็นว่า การเข้าถึงบันทึกการตรวจวัดที่ไม่สมบูรณ์สามารถยกระดับความเที่ยงตรงเฉลี่ยในการฟื้นฟูสถานะ (state-restoration fidelity) จาก 0.550 (กรณีไร้การป้อนกลับ) ขึ้นเป็น 0.854 ที่ประสิทธิภาพบันทึกประสิทธิภาพ $\eta = 0.85$ จากนั้นเรานำเสนอสมมติฐานการซ้อนทับของเมตริกเชิงปรากฏการณ์วิทยา (phenomenological metric-overlap ansatz) และอนุพัทธ์การทดสอบเชิงสังเกตการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนตกค้างของนาฬิกา, ค่าความโน้มถ่วง, การเคลื่อนที่ของวงโคจร และคลื่นความโน้มถ่วง

ท้ายที่สุด เราคำนวณปริมาณแหล่งกักเก็บพลังงานการหมุนของหลุมดำเคอร์ (Kerr black hole) ขนาด $10 M_{\odot}$ ที่มีสปินไร้มิติ $a^* = 0.98$ ซึ่งบรรจพลังงานการหมุนในอุดมคติที่ดึงออกมาได้ประมาณ 4.0×10^{47} จูล

เราขอเน้นย้ำอย่างยิ่งว่ากลไกการเชื่อมต่อที่เสนอนี้ยังเป็นเพียงข้อสันนิษฐาน

วัตถุประสงค์ของเอกสารนี้คือเพื่อสร้างเหตุผลสนับสนุนการทดลองระดับชาติในขอบเขตที่จำกัด ซึ่งมีความสามารถในการหักล้างหรือปฏิเสธสมมติฐานนี้ได้จริง

คำสำคัญ (Keywords): การควบคุมควอนตัม (quantum control); ลูกศรแห่งเวลา (arrow of time); ปัญหาย้อนกลับ (inverse problem); ระบบซับซ้อน (complex systems); ส่วนตกค้างคลื่นความโน้มถ่วง (gravitational-wave residuals); หลุมดำเคอร์ (Kerr black hole); การฟื้นฟูสถานะเชิงสาเหตุ (causal-state restoration); การพิสูจน์ว่าเป็นเท็จทางวิทยาศาสตร์ (scientific falsification)

1 บทนำ (Introduction)

สมการในระดับจุลภาคสามารถมีความสมมาตรต่อการย้อนกลับของเวลา (time-reversal symmetries) ในขณะที่การสังเกตการณ์ในระดับมหภาคกลับแสดงให้เห็นลูกศรแห่งเวลาที่ชัดเจน ในระบบควอนตัมที่มีการตรวจวัด การส่งผลย้อนกลับของการตรวจวัด (measurement backaction) มีส่วนสร้างลูกศรในการปฏิบัติที่สามารถวัดปริมาณได้จากวิถีการเคลื่อนที่ เมื่อไม่นานมานี้ (ค.ศ. 2026) García-Pintos, Liu และ Gorshkov ได้สร้างเครื่องมือการควบคุมสามมิติที่แม่นยำที่สามารถจำลองวิถีสุ่มที่มีการตรวจวัด และเมื่อใช้ร่วมกับการป้อนกลับ จะทำให้เกิดพลวัตที่สอดคล้องกับวิถีย้อนเวลามากกว่าวิถีไปข้างหน้า [1] ผลลัพธ์นี้ไม่ใช่สูตรสำเร็จในการย้อนเวลามนุษย์ ดาวเคราะห์ หรือแอนโทรปี แต่มีความสำคัญอย่างยิ่งด้วยเหตุผลอีกประการหนึ่ง: มันพิสูจน์ให้เห็นว่าทิศทางที่กำหนดให้กับวิถีที่มีการตรวจวัดสามารถถูกปรับเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยการควบคุม เมื่อเราทราบประวัติบันทึกการตรวจวัดและพลวัตที่เกี่ยวข้อง

โครงการตรวจวัดระดับชาติของเรากำลังเผชิญกับปัญหาย้อนกลับที่มีโครงสร้างแตกต่างกันออกไป ค่าคลาดเคลื่อนยังคงปรากฏอยู่หลังจากแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับ ถูกนำไปปรับพอดีแยกกันในระบบบอกเวลา, ระบบวัดความโน้มถ่วง, ระบบวงโคจร, สนามแม่เหล็กโลก และระบบพยากรณ์สิ่งแวดล้อม ค่าอธิบายแบบดั้งเดิมถือว่าค่าคลาดเหล่านี้เกิดจากความคลาดเคลื่อนในการสอบเทียบ (calibration error), แรงผลักดันเฉพาะที่ที่ไม่ได้สร้างแบบจำลอง, ความไม่เข้ากันของแบบจำลอง และโครงสร้างพื้นฐานที่มีความไม่คงที่ ค่าอธิบายดังกล่าวยังคงเป็นสมมติฐานว่าง (null hypothesis) หลักของเอกสารฉบับนี้ เราตั้งคำถามในขอบเขตที่แคบลง: มีการรบกวนแฝงร่วมกัน (common latent perturbation) ที่รอยเท้าทางสถิติของมันสามารถถอดพันกระบวนการประมวลผลข้อมูลขั้นต้นที่แยกเป็นอิสระต่อกันได้หรือไม่? หากมีการกีดกันไปไม่ใช่ว่าการประกาศค้นพบจักรวาลใหม่ แต่เป็นการออกแบบการสังเกตการณ์ที่สามารถหักล้างและพิสูจน์ว่าเป็นเท็จได้ทั้งต่อคำอธิบายแบบเดิมและคำอธิบายที่ไม่เป็นไปตามแบบแผน สำหรับการดำเนินงานภายใน กลุ่มงานควบคุมแบบย้อนกลับนี้ใช้ชื่อรหัสว่า ORPHEUS ชื่อนี้ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อเป็นข้อเตือนใจอย่างจงใจ: ในตำนานเทพปกรณัม ออร์เพียสพยายามนำสิ่งที่สูญเสียไปแล้วกลับคืนมา แต่ภารกิจ MCSR มีเป้าหมายตรงกันข้าม: มันไม่ได้พยายามฟื้นคืนชีพคนตายหรือสร้างโลกในอดีตขึ้นมาใหม่ หากแบบจำลองที่สามารถผ่านการทดสอบได้ เป้าหมายของมันคือการฟื้นฟูเงื่อนไขขอบเขตที่ระบบพลวัตสามารถเข้าถึงได้จริง เพื่อให้วิวัฒนาการไปข้างหน้าสามารถดำเนินต่อไปได้

2 สถานะทางญาณวิทยาและขอบเขต (Epistemic status and scope)

กรอบการทำงานนี้ประกอบด้วยข้อกล่าวอ้าง 3 ระดับที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ซึ่งจะต้องไม่นำมาปะปนกัน:

ระดับ	สถานะ	การนำไปใช้ในเอกสารฉบับนี้
E0	ฟิสิกส์มาตรฐานที่ได้รับการยอมรับแล้ว (Established physics)	พลวัตของระบบเปิด, วิถีควอนตัมแบบมีเงื่อนไข, ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป, พลังงานการหมุนของหลุมดำเคอร์, การประมาณค่าพารามิเตอร์คลื่นความโน้มถ่วง
H1	การคาดการณ์ขยายผลที่มีความเสี่ยงสูง (High-risk extrapolation)	การขยายแนวคิดการควบคุมแบบย้อนกลับจากระบบตรวจวัดขนาดเล็ก ไปสู่สถาบันยกรรณการควบคุมทางวิศวกรรมแบบกระจายตัว
H2	ข้อสันนิษฐานเชิงปรากฏการณ์วิทยา (Phenomenological conjecture)	การซ้อนทับของเมตริกะหว่างแขนง (Inter-branch metric overlap: IBMO), การระบุขอบเขตแบบไม่มีการวางทิศทาง (non-orientable boundary) และข้อบกพร่องขอบเขตเชิงสาเหตุที่ควบคุมได้

ตารางที่ 1: ระดับของข้อกล่าวอ้าง ข้อกล่าวอ้างระดับ H2 ไม่ถือว่าเป็นฟิสิกส์ที่ได้รับการยอมรับ

ข้อกำหนดทางวิทยาศาสตร์ที่เป็นหัวใจสำคัญจึงเรียบง่ายอย่างยิ่ง: ทุกข้อกล่าวอ้างในระดับ H2 จะต้องบอกเป็นนัยถึงการสังเกตการณ์ที่มีโอกาสล้มเหลวหรือถูกหักล้างได้จริง

3 ความสอดคล้องตกค้างข้ามโดเมน (Cross-domain residual coherence)

3.1 การแทนค่าส่วนตกค้าง (Residual representation)

สำหรับช่องสัญญาณการตรวจวัด k ให้ $y_k(t)$ แทนปริมาณที่สังเกตได้ และ $\hat{y}_k(t | M_k)$ แทนค่าการทำนายจากแบบจำลองโดเมนที่ได้รับการยอมรับ M_k เรานิยามค่าคลาดเคลื่อนตกค้างมาตรฐานดังนี้:

$$r_k(t) = [y_k(t) - \hat{y}_k(t | M_k)] / \sigma_k(t) \quad (1)$$

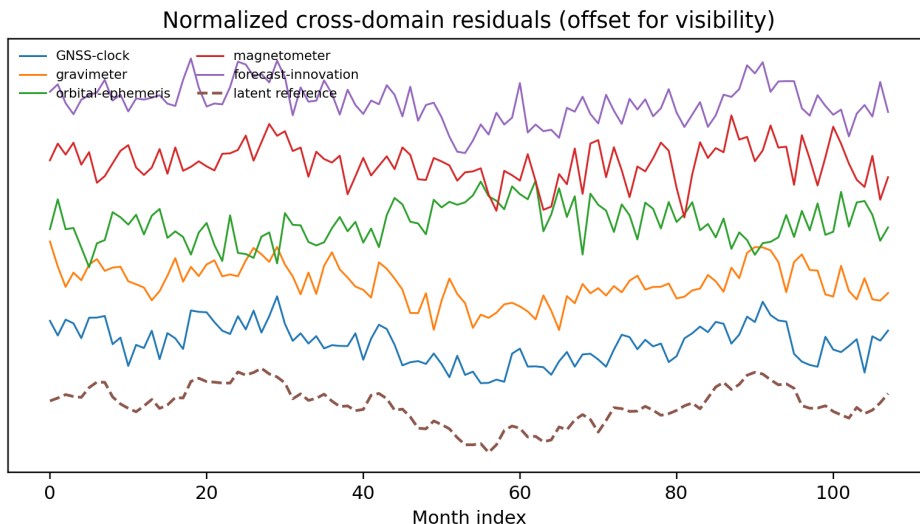
แบบจำลองปัจจัยร่วมที่ใช้ในการทำงานคือ:

$$r_k(t) = a_k z(t - \tau_k) + \epsilon_k(t) \quad (2)$$

โดยที่ $z(t)$ คือกระบวนการแฝง (latent process), a_k คือการตอบสนองของช่องสัญญาณ, τ_k คือความล่าช้าเล็กน้อย และ ϵ_k คือสัญญาณรบกวนเฉพาะของสัญญาณ สมการนี้ถูกตั้งขึ้นโดยละเว้นสาเหตุทางกายภาพไว้อย่างจงใจ

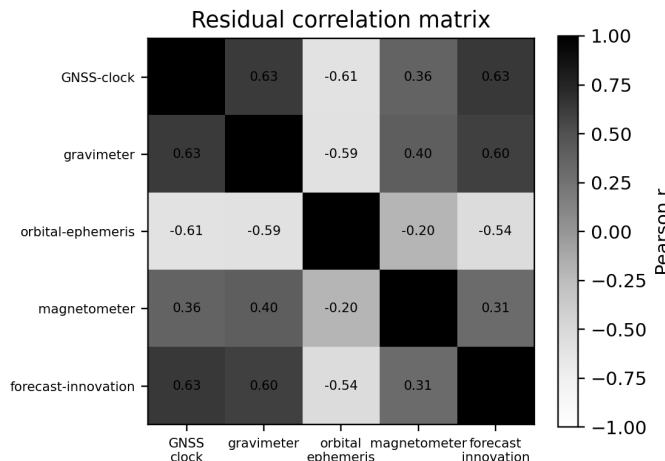
3.2 การทดสอบภาวะวิกฤตความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility stress test)

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสายงานการวิเคราะห์ก่อนนำไปประมวลผลข้อมูลจำกัดสิทธิ์ซ้ำ เราได้สร้างชุดข้อมูลทดสอบภาวะวิกฤต 5 ช่องสัญญาณ ระยะเวลา 108 เดือน ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแฝงแบบถดถอยตนเอง (autoregressive latent process), ปรากฏการณ์ชั่วคราว 3 จุด, ความล่าช้าเฉพาะของสัญญาณ และสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนอิสระ โค้ดและค่า seed ที่แนบมาได้รับการเก็บรักษาไว้ในภาคผนวกทางเทคนิค ภาพที่ 1 แสดงอนุกรมมาตรฐานดังกล่าว จุดประสงค์ของการทดลองนี้คือเพื่อยืนยันความสามารถในการทำซ้ำเชิงคำนวณ ไม่ใช่ข้อพิสูจน์เชิงประจักษ์



ภาพที่ 1: อนุกรมการทดสอบภาวะวิกฤตค่าคลาดเคลื่อนตกค้างข้ามโดเมนที่แปลงเป็นมาตรฐานแล้ว เส้นกราฟถูกเลื่อนในแนวตั้งเพื่อความชัดเจน
เส้นประด้านล่างสุดคือการอ้างอิงแฝงที่ใช้เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องเท่านั้น

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ให้สัดส่วนความแปรปรวนที่อธิบายได้โดยองค์ประกอบแรกสูงถึง 0.6005
แบบจำลองเกาส์เซียนปัจจัยเดียวให้ค่า BIC = 1379.4 เมื่อเปรียบเทียบกับ 1555.9 สำหรับสมมติฐานว่างแบบเกาส์เซียนแนวทแยง ซึ่งให้ค่า $\Delta BIC = 176.5$ สนับสนุนความแปรปรวนร่วมที่มีร่วมกันในการทดสอบภาวะวิกฤตที่ควบคุมนี้ ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างสหสัมพันธ์ของส่วนตกค้าง



ภาพที่ 2: เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของส่วนต่างในการทดสอบภาวะวิกฤตความสามารถในการทำซ้ำ ความแตกต่างของเครื่องหมายได้รับอนุญาตเนื่องจากเซ็นเซอร์ต่างชนิดอาจตอบสนองด้วยข้อดคลงหรือฟังก์ชันถ่ายโอนตรงกันข้าม

สำหรับข้อมูลการปฏิบัติงานจริงที่มีการจำกัดสิทธิ์ สายงานการวิเคราะห์ชุดเดียวกันนี้จะต้องถูกทดสอบทำลายกับสาเหตุร่วมที่ทราบอยู่แล้ว: การอ้างอิงเวลาที่มีร่วมกัน, ช่วงเวลาการบำรุงรักษาที่ประสานกัน, แรงผลักดันจากสิ่งแวดล้อมร่วม, การรั่วไหลของการผสมรวมข้อมูล (data-assimilation leakage) และความผิดพลาดจากการประมวลผลขั้นต้น หากไม่สามารถจัดผลกระทบเหล่านี้ออกไปได้ จะถือว่าเป็นการปฏิเสธความจำเป็นของข้อกล่าวอ้างระดับ H2

4 แบบจำลองการซ้อนทับของเมตริกระหว่างแขนงเชิงปรากฏการณ์วิทยา (Phenomenological inter-branch metric-overlap model)

เราขอเสนอสมมติฐานเมตริก (metric ansatz) ดังนี้:

$$g_{\mu\nu}^{\text{eff}}(\mathbf{x}) = g_{\mu\nu}^{(0)}(\mathbf{x}) + \epsilon \chi(\mathbf{x}) h_{\mu\nu}^{(B)}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

โดยที่ $g_{\mu\nu}^{(0)}$ คือเมตริกพื้นหลัง, $h_{\mu\nu}^{(B)}$ คือการรบกวนประสิทธิผลที่เกี่ยวข้องกับแขนงขอบเขตที่สอง, $\chi(\mathbf{x})$ คือการครอบงำซ้อนทับแบบกะทัดรัด (compact overlap envelope) และ ϵ คือพารามิเตอร์การเชื่อมต่อไรมิติ เราไม่ได้อ้างว่า $h_{\mu\nu}^{(B)}$ สอดคล้องกับเอกภพคู่ขนานที่มีอยู่จริงทางกายภาพ แต่สมมติฐานนี้เป็นเพียงเครื่องมือทางบัญชีคำนวณสำหรับการอนุพัทธ์สัญญาณเบี่ยงชีที่มีความสัมพันธ์กัน

ข้อกล่าวอ้าง H2 ในฉบับที่เข้มงวดที่สุด สันนิษฐานเพิ่มเติมว่าขอบเขตการซ้อนทับมีลักษณะไม่สามารถวางทิศทางได้ (non-orientable) ในการฝังตัวในมิติที่สูงกว่า แถบโมเบียส (Möbius strip) คือการเปรียบเทียบในสองมิติ: การเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ต่อเนื่องเฉพาะที่สามารถวนกลับมายังตำแหน่งเดิมโดยมีทิศทางกลับด้าน เราใช้สิ่งนี้เป็นเพียงอุปมาอุปไมยทางทอพอโลยีเท่านั้น แบบจำลองทางกายภาพจริงจะต้องระบุแมนิโฟลด์ที่ชัดเจน, เงื่อนไขเทนเซอร์ความเค้น-พลังงาน และโครงสร้างเชิงสาเหตุ ซึ่งอุปมานี้ไม่ได้จัดเตรียมไว้ให้

4.1 สัญญาณเบี่ยงชีเชิงสังเกตการณ์ที่ทำนายไว้ (Predicted observational signatures)

สมมติฐานจะมีประโยชน์ก็ต่อเมื่อมันสามารถทำนายความไม่สอดคล้องที่วัดได้

เราจึงกำหนดสัญญาณเบี่ยงชีที่ต้องตรวจวัดได้อย่างเป็นอิสระอย่างน้อย 3 ประการ:

- ส่วนต่างของเวลาที่สอดคล้องกัน (coherent timing residual) ซึ่งไม่สามารถกำจัดออกไปได้ด้วยการแก้ไขนาฬิกาอ้างอิงหรือการแพร่กระจายสัญญาณ;
- ส่วนต่างของค่าความโน้มถ่วงหรือวงโคจรที่มีความสัมพันธ์กัน โดยมีเครื่องหมายและโครงสร้างความล่าช้าตรงตามที่ทำนายไว้;
- ความผิดปกติของการแพร่กระจายทางดาราศาสตร์ที่ลึกซึ้ง ซึ่งความต่างของเวลาจากเครื่องตรวจจับหนึ่งไปยังอีกเครื่องตรวจจับหนึ่งสอดคล้องกับบริเวณท้องฟ้าเดียวกัน แต่ไม่สอดคล้องกับรูปคลื่นต้นกำเนิดตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปที่ปรับพอดีที่สุด

สัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงสามารถเข้ารหัสมวลของวัตถุกะทัดรัด,
และระยะทางเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองรูปคลื่น

สปีน,

ตำแหน่งบนท้องฟ้า

[7]

ดังนั้นเราจึงเสนอการวิเคราะห์ส่วนตกค้างหลังจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน

แทนที่จะปฏิบัติต่อหลุมดำเสมือนเป็นประชากรที่ส่งสัญญาณอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์วิทยาของเส้นทางที่ล่าช้าขึ้นาคือ:

$$\tilde{h}_{\text{obs}}(f) = \tilde{h}_{\text{GR}}(f) [1 + \alpha W(f) e^{2\pi i f \Delta t}] + \tilde{n}(f) \quad (4)$$

โดยที่ α , Δt และ $W(f)$ จะต้องถูกจำกัดขอบเขตด้วยข้อมูลเชิงประจักษ์ หากค่า α ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติตลอดย่านความถี่ที่ทำนายไว้ จะถือว่าเป็นหลักฐานคัดค้านสมมติฐาน H2

5 จากลูกศรแห่งเวลาเชิงควอนตัมสู่การควบคุมแบบย้อนกลับ (From a quantum arrow of time to inverse control)

สำหรับระบบควอนตัมเปิดแบบมาร์คอฟ (Markovian open quantum system) คำอธิบายมาตรฐานแบบลินด์บลัด (Lindblad description) คือ:

$$\dot{\rho} = - (i/\hbar) [H(t), \rho] + \sum_j (C_j \rho C_j^\dagger - \frac{1}{2} \{C_j^\dagger C_j, \rho\}) \quad (5)$$

โดยที่ ρ คือตัวดำเนินการความหนาแน่น (density operator), H คือแฮมิลโทเนียน และ C_j คือตัวดำเนินการยุบตัว (collapse operators) ชุดเครื่องมือเชิงคำนวณเช่น QuTiP นำสมการเหล่านี้ไปใช้ในการจำลองระบบเปิด [5, 6]

ผลงานวิจัยปี 2026 ของ García-Pintos และคณะ เป็นผลงานในระดับวิถึและขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตรวจวัด [1] การคาดการณ์ขยายผลของเรายังคงรักษาข้อจำกัดเชิงแนวคิดดังกล่าวไว้ MCSR ถูกกำหนดให้เป็นวัตถุประสงค์ของการควบคุมแบบย้อนกลับ:

$$J[u] = 1 - F(\rho_u(T), \rho_{\text{target}}) + \lambda \int_0^T \|u(t)\|^2 dt + \mu R[u] \quad (6)$$

โดยที่ F คือความเที่ยงตรงของสภาวะ (state fidelity), $u(t)$ คือสนามควบคุม และ R ลงโทษการควบคุมที่ไม่ปลอดภัยหรือไม่ทนทาน นี่ไม่ใช่การย้อนกลับของการผลิตเอนโทรปีในระดับสากล แต่เป็นการค้นหาสภาวะที่เข้าถึงได้ภายใต้พลวัตที่มีข้อจำกัด

5.1 แบบจำลองสัญญาณรบกวนเฟสแบบมีเงื่อนไข (Conditional phase-noise toy model)

เราได้ทดสอบกรณีนี้ที่เรียบง่ายและโปร่งใสที่สุด:

คิวบิตเริ่มต้นในสภาวะ

$|+\rangle$

สะสมเฟสแบบสุ่ม

ϕ

หากไม่สามารถเข้าถึงบันทึกสัญญาณรบกวน

การเฉลี่ยแบบกลุ่มตัวอย่าง

(ensemble

averaging)

จะทำให้สภาวะสูญเสียความสัมพันธ์ของเฟส

(dephase)

แต่หากมีการประมาณค่าเฟสแบบมีเงื่อนไข

การป้อนกลับจะสามารถจัดส่วนหนึ่งของการหมุนที่สะสมอยู่ออกไปได้

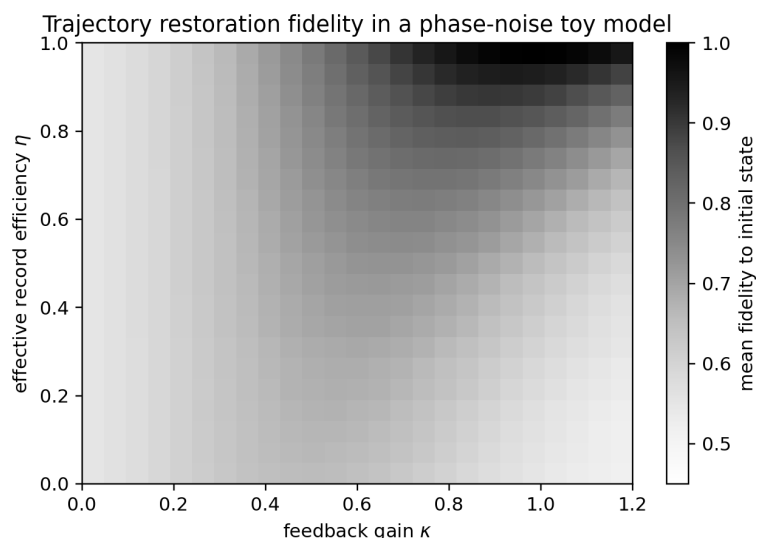
จากการทดสอบ

60,000

วิถึ

ความเที่ยงตรงเฉลี่ยที่ไม่ได้รับการควบคุมคือ 0.550 ที่ประสิทธิภาพบันทึกประสิทธิภาพ $\eta = 0.85$ และอัตราขยายการป้อนกลับเท่ากับหนึ่ง ความเที่ยงตรงเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.854 การเข้าถึงบันทึกที่สมบูรณ์แบบในแบบจำลองนี้สามารถคืนสภาวะกลับมาได้อย่างแม่นยำ ภาพที่ 3 แสดงพื้นผิวอัตราขยาย-ประสิทธิภาพอย่างครบถ้วน

บทเรียนเชิงปฏิบัติการมีความเรียบง่ายแต่สำคัญยิ่ง: ข้อมูลวิถึจะเปลี่ยนสิ่งที่เป็นไปได้ในการควบคุม หากเกณฑ์วิถึพื้นฟูระดับมหาคมีอยู่จริง มันจะต้องรักษาประวัติการตรวจวัดที่สมบูรณ์เพียงพอ แทนที่จะอนุมานอดีตจากสภาวะสุดท้ายเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 3: ความเที่ยงตรงเฉลี่ยในการฟื้นฟูสถานะในการทดสอบภาวะวิกฤตสัญญาณรบกวนเฟสแบบมีเงื่อนไข
นี่คือแบบจำลองการควบคุมเพื่อเป็นตัวอย่างภาพประกอบ ไม่ใช่การทำซ้ำเอกสารอ้างอิง [1] และไม่ใช่หลักฐานการย่นเวลาในระดับมหภาค

6 เหตุผลที่ขอรับการสนับสนุนคอมพิวเตอร์ควอนตัม (Why a quantum computer is requested)

การจัดเก็บเวกเตอร์สถานะแบบดั้งเดิมที่แน่นอนมีอัตราการใช้หน่วยความจำแบบ 2^N ที่ความแม่นยำระดับ complex128 เวกเตอร์สถานะเพียงอย่างเดียวต้องใช้พื้นที่ประมาณ 16×2^N ไบต์: ประมาณ 18 PB สำหรับ $N = 50$ และ 18 EB สำหรับ $N = 60$ ก่อนที่จะรวมตัวดำเนินการ, วิธี, สถานะการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และการแก้ไขข้อผิดพลาด วิธีการเครือข่ายเทนเซอร์และแบบจำลองอันดับลดทอนสามารถลดต้นทุนได้อย่างมหาศาลเมื่อโครงสร้างเชิงคำนวณ ดังนั้นการจัดเก็บที่เพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลเพียงอย่างเดียวจึงไม่ใช่ข้อพิสูจน์ว่าคอมพิวเตอร์ควอนตัมจะให้ข้อได้เปรียบ

คำขอรับการจัดสรรทรัพยากรของเรามีความเฉพาะเจาะจง: เราขอสิทธิ์เข้าถึงระบบควอนตัมระดับชาติภายใต้การควบคุม เพื่อทดสอบว่าปัญหาการควบคุมแบบย้อนกลับของ ORPHEUS สามารถเข้ารหัสเป็นการจำลองควอนตัมที่จัดการได้ หรือเป็นงานการหาค่าที่เหมาะสมแบบผสม (hybrid optimization) บนกลุ่มแบบจำลองที่จำกัดได้หรือไม่ เกณฑ์ความสำเร็จคือการลดลงของเวลาจริง (wall-clock) หรือความซับซ้อนของตัวอย่างเมื่อเทียบกับเส้นฐานแบบดั้งเดิมที่ดีที่สุด หากไม่ปรากฏข้อได้เปรียบ ขบวนการคำนวณควอนตัมของโครงการจะต้องถูกยุติลงทันที

7 แหล่งกักเก็บพลังงานทางดาราศาสตร์ฟิสิกส์ (Astrophysical energy reservoir)

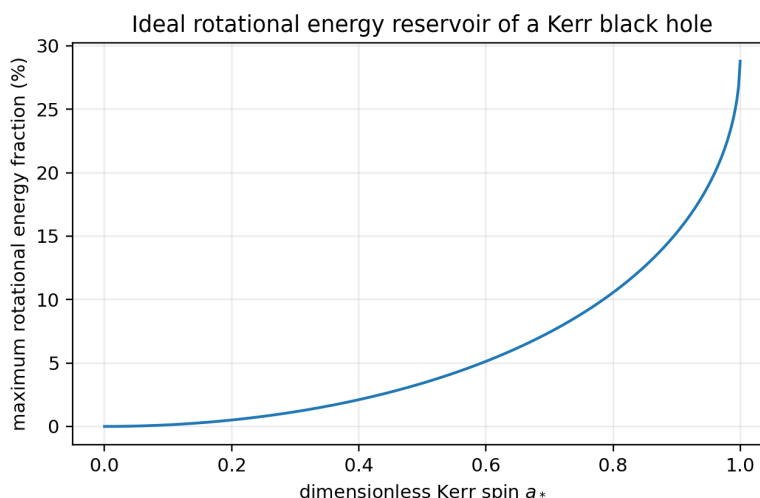
หลุมดำเคอร์ที่กักเก็บมวลพลังงานการหมุนที่สามารถดึงออกมาได้ ความสัมพันธ์ของมวลที่ไม่สามารถลดทอนได้ (irreducible-mass relation) กำหนดไว้ว่า:

$$M_{\text{irr}} / M = \sqrt{\frac{1}{2} (1 + \sqrt{1 - a^{*2}})} \quad (7)$$

$$E_{\text{rot}} = (M - M_{\text{irr}}) c^2 \quad (8)$$

เมื่อ $a^* \rightarrow 1$ แหล่งกักเก็บพลังงานในอุดมคติจะเข้าใกล้ 29.3% ของ Mc^2 กระบวนการเพนโรส (Penrose process) และกลไกที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าการสกัดพลังงานจากหลุมดำที่กำลังหมุนได้รับอนุญาตตามหลักการของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป แม้ว่าวิศวกรรมเชิงปฏิบัติในระดับดาราศาสตร์ฟิสิกส์จะยังไม่สามารถแก้ไขได้เลยก็ตาม [8, 9, 10]

สำหรับวัตถุเคอร์ขนาด $10 M_\odot$ แหล่งกักเก็บในอุดมคติคือ 2.73×10^{47} จูล ที่ $a^* = 0.90$, 4.03×10^{47} จูล ที่ $a^* = 0.98$ และ 4.96×10^{47} จูล ที่ $a^* = 0.999$ ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์กับค่าสปิน



ภาพที่ 4: สัดส่วนพลังงานการหมุนในอุดมคติของหลุมดำเคอร์ นี่คือการคำนวณแหล่งกักเก็บพลังงาน ไม่ใช่ข้ออ้างประสิทธิภาพทางวิศวกรรม

เราจึงแยกคำถามออกเป็นสองประเด็น: (i) มีพลังงานที่เป็นระเบียบเพียงพอในเชิงหลักการหรือไม่ และ (ii) มีการเชื่อมต่อที่อนุญาตทางกายภาพที่สามารถถ่ายโอนพลังงานที่เป็นประโยชน์ไปยังระดับความเป็นอิสระของการควบคุมขอบเขตที่เสนอได้หรือไม่ มีเพียงคำถามแรกเท่านั้นที่ได้รับการพิสูจน์แล้วจากการคำนวณข้างต้น

8 แผนงานการพิสูจน์ว่าเป็นเท็จระดับชาติ (National falsification program)

เราขอเสนอแผนงานเป็นระยะโดยมีเงื่อนไขการหยุดที่เด็ดขาด (hard stop conditions):

ระยะ A — การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual audit): ประมวลผลส่วนตกค้างของเวลา, ความโน้มถ่วง, วงโคจร และสนามแม่เหล็กโลกซ้ำ โดยใช้ทิมอิสระและการประมวลผลล่วงหน้าแบบปิดบัง (blinded preprocessing) ปฏิเสธ H2 หากความแปรปรวนรวมหายไปหลังจากตัดโครงสร้างพื้นฐานและกรอบอ้างอิงร่วมออก

ระยะ B — การค้นหาส่วนตกค้างในคลื่นความโน้มถ่วง (Gravitational-wave residual search): ลงทะเบียนกลุ่มส่วนตกค้างแบบเส้นทางล่าช้าล่วงหน้า และค้นหาหลังจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ตามสัมพัทธภาพทั่วไปมาตรฐานเท่านั้น ปฏิเสธยานพารามิเตอร์ H2 ที่เกี่ยวข้องกับเมื่อค่า α สอดคล้องกับศูนย์ที่ระดับความไวที่ลงทะเบียนไว้

ระยะ C — เกณฑ์มาตรฐานการควบคุมควอนตัมแบบย้อนกลับ (Quantum inverse-control benchmark): ใช้งานแบบจำลองของเลนและแบบจำลองอันดับลดทอนของ ORPHEUS บนระบบดั้งเดิมและระบบควอนตัม ปฏิเสธค่าขอทรัพยากรหากการทำงานบนควอนตัมไม่เหนือกว่าวิธีดั้งเดิมที่ดีที่สุด

ระยะ D — ความสอดคล้องทางเรขาคณิต (Geometric consistency): หากผ่านระยะ A-C ทดสอบว่าพารามิเตอร์การซ้อนทับชุดเดียวสามารถทำนายกลุ่มส่วนตกค้างอิสระทั้งหมดได้หรือไม่ แบบจำลองที่ต้องใช้พารามิเตอร์อิสระแยกสำหรับเซนเซอร์แต่ละกลุ่มจะถือเป็นการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ไม่ใช่คำอธิบายทางกายภาพใหม่

9 ความเสี่ยง คำอธิบายทางเลือก และข้อจำกัด (Risks, alternative explanations and limitations)

ความเสี่ยงที่ร้ายแรงที่สุดคือการขยายผลเกินจริงของแบบจำลอง (model overreach) สหสัมพันธ์ข้ามโดเมนสามารถเกิดขึ้นได้จากนาฬิกาควม, โครงสร้างพื้นฐานข้อมูลร่วม, สายงานการผสมรวม, กิจกรรมสุริยะ, ตารางการบำรุงรักษา และการตอบสนองของมนุษย์ต่อภัยพิบัติ การปรับพอดี้แบบปัจเจกเดี่ยวจึงเป็นเพียงเครื่องมือวินิจฉัย ไม่ใช่การค้นพบ

ความเสี่ยงประการที่สองคือความผิดพลาดเชิงหมวดหมู่ (category error) การย้อนกลับลูกศรทางสถิติของวิธีคำนวณที่ทำการตรวจวัดไม่ได้หมายถึงการย้อนเวลาทางอุณหพลศาสตร์ ชีววิทยา หรือจักรวาลวิทยา การนำผลการควบคุมควอนตัมปี 2026 มาใช้เป็นเพียงแรงบันดาลใจและในเชิงขั้นตอนวิธีเท่านั้น

ความเสี่ยงประการที่สามคือวาทกรรมเรื่องพลังงาน (energy rhetoric) แหล่งกักเก็บการหมุนของหลุมดำเคอร์อาจมีขนาดมหึมาศาล ในขณะที่สถาปัตยกรรมการดึงและการเชื่อมต่อที่เป็นประโยชน์อาจเป็นไปได้เลย การคำนวณพลังงานไม่สามารถกอบกู้กลไกการควบคุมที่ไม่ถูกต้องได้

ความเสี่ยงประการที่สี่คือทอพอโลยีที่ไร้พลวัต (topology without dynamics) การระบุแบบไม่มีกราวทิศทางคล้ายแถบโมเบียสอาจอธิบายได้ทางคณิตศาสตร์แต่ไม่อนุญาตในทางกายภาพ แขนง H2 จะต้องระบุเมตริก, แหล่งกำเนิดความเค้น-พลังงาน, เงื่อนไขเสถียรภาพ และโครงสร้างเชิงสาเหตุอย่างชัดเจน มิฉะนั้นจะต้องถูกละทิ้งไป

10 บทสรุป (Conclusion)

เอกสารฉบับนี้ไม่ได้อ้างว่ามีสองเอกภพกำลังชนกัน มันระบุลำดับการทดสอบที่ทวีความยากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะต้องล้มเหลวเสียก่อนที่สมมติฐานดังกล่าวจะควรค่าแก่การได้รับความสนใจเพิ่มเติม สายงานการทดสอบความสามารถในการทำซ้ำสามารถตรวจจับโครงสร้างส่วนตักค่างร่วมได้เมื่อมีอยู่จริง การควบคุมควอนตัมแบบมีเงื่อนไขสามารถกักไว้ในระบบของเล่นที่มีการตรวจวัดซึ่งหากดูในระดับกลุ่มตัวอย่างจะดูเหมือนย้อนกลับไม่ได้ การหมุนของหลุมดำเคอร์เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานที่มีอยู่จริงทางกายภาพแต่เข้าถึงไม่ได้ทางเทคโนโลยี ขั้นตอนที่เป็นข้อสันนิษฐานคือการมีอยู่ของระดับความเป็นอิสระของขอบเขตที่เชื่อมโยงข้อเท็จจริงเหล่านี้เข้าด้วยกัน

คำขอแรงกดดันในขณะนี้จึงไม่ใช่การขออนุมัติเพื่อจัดการกับกาลอวกาศ แต่เป็นการขออนุมัติเพื่อทำการทดลองที่มีต้นทุนต่ำที่สุดที่สามารถพิสูจน์ว่าพวกเราคิดผิดได้

การประกาศและข้อแถลง (Declarations)

แหล่งทุน: งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัยความต่อเนื่องแห่งชาติ ภายใต้โครงการ ศวสช. ORPHEUS ร่วมสนับสนุนโดย กลุ่ม CreativeLabTH สำหรับโครงสร้างพื้นฐานการคำนวณทางวิทยาศาสตร์ที่ทำได้และการตรวจสอบการจำลองอิสระ ผู้ให้ทุนไม่มีอำนาจในการเปลี่ยนแปลงข้อสรุปทางวิทยาศาสตร์ การขัดกันของผลประโยชน์: คณะผู้วิจัยขอประกาศว่าไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนทางการเงินที่เกี่ยวข้องกับข้อกล่าวอ้างทางวิทยาศาสตร์ในเอกสารฉบับนี้ ความพร้อมของข้อมูลและโค้ด: ตัวสร้างการทดสอบภาวะวิกฤตความสามารถในการทำซ้ำ, ค่า random seed คงที่, ตารางส่วนตักค่าง และการคำนวณพลังงานเคอร์ ถูกเก็บถาวรไว้ภายใต้แพ็คเกจ SWSN-SCI/GRP-2035-04-SUPP ข้อมูลเซนเซอร์การปฏิบัติงานที่จำกัดสิทธิ์ได้รับการยกเว้นจากสำนักทบทวนสาธารณะ การมีส่วนร่วมของผู้พิมพ์: อ.ว. (A.W.) ริเริ่มกรอบเชิงปรากฏการณ์วิทยาและปัญหาย้อนกลับ; อ.ม.ว. (E.W.) ออกแบบกลยุทธ์การพิสูจน์ว่าเป็นเท็จทางสถิติข้ามโดเมนและสายงานความสามารถในการทำซ้ำ; ด.ก. (T.K.) พัฒนาระบบควบคุม การเปรียบเทียบเชิงตัวเลข และการทดสอบความทนทาน ผู้เขียนทุกคนร่วมทบทวนต้นฉบับ

ภาคผนวก ก: พารามิเตอร์ความสามารถในการทำซ้ำ (Appendix A: Reproducibility parameters)

การทดสอบภาวะวิกฤตข้ามโดเมนประกอบด้วยตัวอย่างรายเดือน 108 ตัวอย่าง และช่องสัญญาณมาตรฐาน 5 ช่องสัญญาณ ใช้ค่า seed สุ่มเทียมคงที่ 20350817 กระบวนการแฝงคือลำดับ AR(1) ที่มีสัมประสิทธิ์ 0.86, ปรากฏการณ์ใช้ครุแบบเกาส์เขียนกว้าง 3 จุด และองค์ประกอบไฮเปอร์แบบอ่อน การตอบสนองของช่องสัญญาณใช้เครื่องหมาย ความล่าช้า และสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เขียนอิสระที่แตกต่างกัน การทดสอบการควบคุมควอนตัมสุ่มวิธีสัญญาณรบกวนเฟส 60,000 วิธี โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเฟส 2.15 rad และประเมินความเที่ยงตรง $F = (1 + \cos \Delta\phi)/2$ หลังจากการป้อนกลับ สคริปต์ฉบับสมบูรณ์เป็นส่วนหนึ่งของภาคผนวกทางเทคนิค

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] García-Pintos LP, Liu YK, Gorshkov AV (2026) Reshaping the Quantum Arrow of Time. Phys Rev X 16:011028.
<https://doi.org/10.1103/l18s-9vmh>
- [2] Dressel J, Chantasri A, Jordan AN, Korotkov AN (2017) Arrow of time for continuous quantum measurement. Phys Rev Lett 119:220507.
- [3] Harrington PM, Tan D, Naghiloo M, Murch KW (2019) Characterizing a statistical arrow of time in quantum measurement dynamics. Phys Rev Lett 123:020502.
- [4] Wiseman HM, Milburn GJ (2009) Quantum Measurement and Control. Cambridge University Press, Cambridge.
- [5] Johansson JR, Nation PD, Nori F (2012) QuTiP: An open-source Python framework for the dynamics of open quantum systems. Comput Phys Commun 183:1760-1772.
- [6] Johansson JR, Nation PD, Nori F (2013) QuTiP 2: A Python framework for the dynamics of open quantum systems. Comput Phys Commun 184:1234-1240.
- [7] Aasi J et al. (2013) Parameter estimation for compact binary coalescence signals with the first generation gravitational-wave detector network. Phys Rev D 88:062001.
- [8] Penrose R (1969) Gravitational collapse: the role of general relativity. Riv Nuovo Cimento 1:252-276.
- [9] Christodoulou D (1970) Reversible and irreversible transformations in black-hole physics. Phys Rev Lett 25:1596-1597.
- [10] Maeda K, Okabayashi K, Okawa H (2018) Maximal efficiency of the collisional Penrose process with spinning particles. Phys Rev D 98:064027.
- [11] Maldacena J, Susskind L (2013) Cool horizons for entangled black holes. Fortschr Phys 61:781-811.
- [12] Jacobs K, Steck DA (2006) A straightforward introduction to continuous quantum measurement. Contemp Phys 47:279-303.