DYNAMICS OF RIGIDLY ROTATING SPIRAL WAVES UNDER LOCAL AND NON-LOCAL FEEDBACK CONTROL IN THE LIGHT-SENSITIVE BELOUSOV-ZHABOTINSKY REACTION

CHANANATE UTHAISAR

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
(CHEMICAL PHYSICS)
FACULTY OF GRADUATE STUDIES
MAHIDOL UNIVERSITY
2005

ISBN 974-04-5697-9
COPYRIGHT OF MAHIDOL UNIVERSITY

พลศาสตร์ขดคลื่นที่หมุนเกร็งภายใต้การควบคุมแบบป้อนกลับชนิดเฉพาะที่และชนิดไม่เฉพาะที่ในปฏิกิริยาเบลูซอฟจาโบทินสกีที่ไวแสง (DYNAMICS OF RIGIDLY ROTATING SPIRAL WAVES UNDER LOCAL AND NON-LOCAL FEEDBACK CONTROL IN THE LIGHT-SENSITIVE BELOUSOV-ZHABOTINSKY REACTION)

ชนเนษฎ์ อุทัยสาร 4437290 SCCP/M

วท.ม. (ฟิสิกส์เชิงเคมี)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: อรอุมา เขียวหวาน, Ph.D., Stefan C. Müller, Dr.rer.nat.habil., ประพิณ วิไลรัตน์, Ph.D.

บทคัดย่อ

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของขดคลื่นที่หมุนเกร็ง (rigidly rotating spiral wave) ถูกศึกษาในปฏิกิริยาเบลูซอฟจาโบทินสกี (Belousov-Zhabotinsky reaction) ที่ไวแสง ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนความเข้มแสงจากภายนอกภายใต้หลักการการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) ชนิดเฉพาะที่ (local) และชนิดไม่เฉพาะที่ (non-local) การควบคุมขดคลื่นแบบเฉพาะที่ (local feedback) ทำได้โดยการฉายแสงเป็นช่วงสั้น ๆ ในขณะที่หน้าคลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุดวัด (measuring point) ที่เลือกไว้ในระบบ การฉายแสงภายใต้วงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback loop) ทำให้การเลื่อน (drift) ของแกนของขดคลื่น (spiral wave core) เป็นวงโคจรที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม (circular orbit) มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดวัด เส้นโคจร (trajectory) ของการเลื่อนบริเวณหัวของขดคลื่น (spiral tip) มีลักษณะเป็นเรโซแนนซ์แอตแทรกเตอร์ (resonance attractor) ถ้าระยะห่างระหว่างจุดวัดและตำแหน่งเริ่มต้น (initial location) ของขดคลื่นมีค่าน้อยกว่า 0.15 เท่าของความยาวคลื่น การเลื่อนของแกนของขดคลื่นเป็นเรโซแนนซ์แอตแทรกเตอร์แบบไฮโพไซคลอยด์ (hypocycloid) และเมื่อระยะห่างมีค่ามากกว่า 0.15 เท่าของความยาวคลื่น เรโซแนนซ์แอตแทรกเตอร์ที่พบเป็นแบบเอพิไซคลอยด์ (epicycloid) โดยที่ขนาดของเรโซแนนซ์แอตแทรกเตอร์ทั้งสองแบบสามารถถูกเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการหน่วงเวลา (time delay) ในวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ และเมื่อค่าหน่วงเวลามีค่าสูงมาก ๆ รูปร่างของไฮโพไซคลอยด์เรโซแนนซ์แอตแทรกเตอร์เกิดการบิดเบี้ยว (deviation) อย่างชัดเจนไปจากวงโคจรที่เป็นรูปวงกลม หลังจากนั้นผลการทดลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่เกี่ยวกับเรโซแนนซ์แอตแทรกเตอร์ที่มีการพัฒนามาก่อนหน้า

กลไกการควบคุมป้อนกลับชนิดแบบไม่เฉพาะที่ (non-local feedback) สามารถคำนวณได้โดยสัญญาณของการควบคุมป้อนกลับซึ่งคือความเข้มแสงเป็นสัดส่วนกับค่าเฉลี่ยของกิจกรรมคลื่น (wave activity) ภายในพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมที่ตอบสนองต่อการกระตุ้นของระบบ (square-shaped sensory domain) ที่ครอบคลุมเฉพาะบางส่วนของปฏิกิริยา (reaction layer) การศึกษาการควบคุมป้อนกลับแบบไม่เฉพาะที่แสดงให้เห็นถึงการเลื่อนของแกนขดคลื่นที่ตอบสนองสัญญาณของการป้อนกลับ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของเส้นโคจรที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม และมีการสะท้อนบริเวณที่ด้าน (virtual wall) ของพื้นที่รูปสี่เหลี่ยม นอกจากนั้นขนาดของโดเมนรูปสี่เหลี่ยมมีอิทธิพลต่อขนาดและรูปทรงของเส้นโคจรขดคลื่น

86 หน้า ISBN 974-04-5697-9

DYNAMICS OF RIGIDLY ROTATING SPIRAL WAVES UNDER LOCAL AND NON-LOCAL FEEDBACK CONTROL IN THE LIGHT-SENSITIVE BELOUSOV-ZHABOTINSKY REACTION

CHANANATE UTHAISAR 4437290 SCCP/M

M.Sc. (CHEMICAL PHYSICS)

THESIS ADVISORS : ON-UMA KHEOWAN, Ph.D. , STEFAN C. MÜLLER, Dr.rer.nat.habil. , PRAPIN WILAIRAT, Ph.D.

ABSTRACT

The light-sensitive $Ru(bpy)_3^{2+}$-catalyzed Belousov-Zhabotinsky (BZ) reaction is used to observe the dynamics of a rigidly rotating spiral wave. This version of the BZ reaction can be effectively manipulated by applying external illumination with local or non-local feedback algorithms. For the dynamics of the spiral wave under local feedback control, each light pulse is applied at the moment that corresponds to the passage of the wave front through a particular measuring point. The light pulses induce a drift of the spiral wave core away from the measuring point and finally along circular orbits centred at this point. The trajectory of the spiral wave describes a resonance attractor. For a small distance (less than 0.15 of the spiral wavelength) between the measuring point and the initial location of the unperturbed spiral wave, a resonance attractor with hypocycloidal shape is observed, whereas for a larger distance an epicycloidal resonance attractor occurs. The size of the attractors can be changed by introducing a time delay into the feedback loop. When the time delay in the feedback loop becomes relatively long, the shape of the hypocycloidal resonance attractors deviates strongly from circular orbits. Experimental results are compared with an earlier developed theory on the resonance attractor.

Non-local feedback that computes the feedback signal proportional to the average wave activity, taken over a sensory domain that covers only part of the reaction layer, is introduced. In this work, the illumination intensity is proportional to the average wave activity within a square-shaped sensory domain of the reaction layer. The investigations show a broad spectrum of dynamical responses which result in square-shaped trajectories of the spiral tip, including reflections at the virtual walls. Experimental results show that the geometry of the sensory domain is crucial in determining the size and shape of the tip trajectories that are asymptotically reached.

KEY WORDS : SPIRAL WAVE DYNAMICS / BZ REACTION / FEEDBACK CONTROL / LOCAL / NON-LOCAL / HYPO- AND EPICYCLOIDAL RESONANCE ATTRACTORS / SQUARE-SHAPED SENSORY DOMAIN

86 pp. ISBN 974-04-5697-9