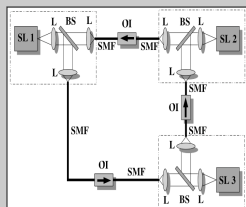


Estudiamos la dinámica de láseres de semiconductor acoplados en una configuración de anillo. Los láseres, que muestran una intensidad de salida estable en solitario, se vuelven caóticos cuando se acoplan unidireccionalmente en un canal cerrado. En esta configuración no es necesario ni feedback, ni acoplamiento bidireccional para inducir caos al sistema. Estudiamos la sincronización emergente en esta particular arquitectura y discutimos su posible aplicación para comunicaciones caóticas. Extendemos el estudio al acoplamiento bidireccional y proponemos una técnica apropiada para el encriptamiento y posterior recuperación del mensaje en un canal cerrado de láseres mutuamente acoplados.

Configuración de anillo



El caos se induce en un láser de semiconductor a través de feedback o acoplamiento mútuo.

Acoplamiento unidireccional: para intensidades cercanas al umbral y valores de acoplamiento moderados, no es posible inducir caos. El láser inyectado ajusta su frecuencia óptica y su fase a la del que inyecta y los dos láseres tienen una salida constante.

Red lineal de láseres: una perturbación se transmite de uno a otro para volver después cada láser a su estado estable vía oscilaciones de relajación.

Canal cerrado: la perturbación introducida retorna al láser, interactuando con sus oscilaciones de relajación excitadas en un tiempo anterior por la misma perturbación. Esto desestabiliza al láser, llevándolo al caos y posteriormente también a los demás láseres del anillo.

Modelo

$$\dot{E}_m(t) = \frac{1}{2}(1+i\alpha)[G_m - \gamma]E_m(t) + \kappa_m e^{-i\omega_0 \tau_c} E_{in}(t - \tau_c) + \sqrt{2\beta N} \xi(t)$$

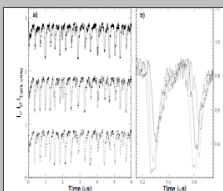
$$\dot{N}_m(t) = \frac{I_m}{e} - \gamma_e N_m - G_m |E_m|^2$$

m , número de láser

in el láser inyectado al láser m

κ fuerza de acoplamiento.

Anillo unidireccional

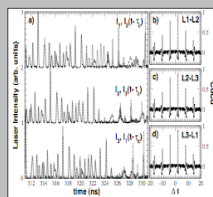


El tiempo de retraso entre los láseres es igual al tiempo de acoplamiento τ_c . El liderazgo de la dinámica va cambiando aleatoriamente entre los láseres, igual que para dos láseres acoplados bidireccionalmente [1].

Intensidades de salida filtradas [2], mostrando la dinámica de fluctuaciones de baja frecuencia [3]. Dichas fluctuaciones son en realidad envolventes de la dinámica real más rápida (del orden de los ps).

Correlación cruzada

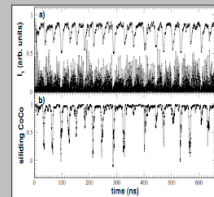
$$C_{ij}(\Delta t) = \frac{\langle (I_i(t) - \langle I_i \rangle) (I_j(t + \Delta t) - \langle I_j \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (I_i(t) - \langle I_i \rangle)^2 \rangle \langle (I_j(t) - \langle I_j \rangle)^2 \rangle}}$$



Pico mayor para el líder a τ_c

La correlación instantánea da más información sobre la sincronización.

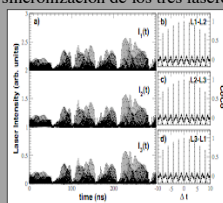
Máximo de la correlación, evaluada en ventanas temporales, para un desplazamiento determinado de las series (τ_c).



Pérdida de sincronización durante las caídas de intensidad.

Anillo bidireccional

Dos láseres bidireccionalmente acoplados, con frecuencias idénticas, no pueden transmitirse información [4]. La bidireccionalidad en anillo (eliminando los aislantes ópticos) hace posible la sincronización de los tres láseres a tiempo 0.

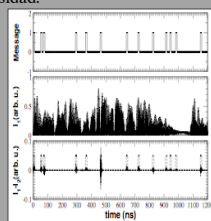


No hay pérdidas de sincronización durante las caídas, obteniendo un buen sistema para la transmisión de información.

Introducción de mensaje

Chaos Shift Keying (CSK) [5]: dos sistemas caóticos sincronizan sólo la parte caótica de sus salidas, filtrando el mensaje introducido.

Introducimos el mensaje modulando la intensidad de bombeo del láser 1 y lo recuperamos en el láser 2 o el 3 calculando la diferencia entre las salidas de intensidad.



(a) Mensaje introducido (amplitud 0.2% de la corriente de bombeo).

(b) Salida del láser 1 ocultando el mensaje.

(c) Diferencia entre las salidas del láser 1 y el 2 y recuperación del mensaje.

Conclusiones

- La seguridad en comunicaciones unidireccionales se basa en el hecho de que no sólo es necesaria la señal transmitida, sino que también se necesita tener un receptor caótico idéntico al emisor para recuperar el mensaje.
- En comunicaciones bidireccionales, si el transmisor y el receptor envían el mismo mensaje simultáneamente, es imposible detectarlo por alguien externo ya que la diferencia entre las señales sería 0. Esto se puede utilizar para negociar una clave. Esta técnica de encriptación fue propuesta recientemente para el caso de dos láseres mutuamente acoplados [6].

Bibliografía

- [1] T. Heil, I. Fischer, W. Elsässer, J. Mulet, and C. R. Mirasso, "Chaos Synchronization and Spontaneous Symmetry-Breaking in Symmetrically Delay-Coupled Semiconductor Lasers", *Phys. Rev. Lett.* **86**, 795–798 (2001).
- [2] D.W. Sukow, T. Heil, I. Fischer, A. Gavrielides, A. Hohl-AbiChedid, and W. Elsässer, "Picosecond intensity statistics of semiconductor lasers operating in the low-frequency fluctuation regime", *Phys. Rev. A* **60**, 667 (1999).
- [3] T. Sano, "Antimode dynamics and chaotic itinerancy in the coherence collapse of semiconductor lasers with optical feedback", *Phys. Rev. A* **50**, 2719–2726 (1994).
- [4] J. Mulet, C. R. Mirasso, T. Heil, and I. Fischer, "Synchronization scenario of two distant mutually coupled semiconductor lasers", *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* **6**, 97 (2004).
- [5] A. Uchida, F. Rogister, J. García-Ojalvo, and R. Roy, "Synchronization and communication with chaotic laser systems", *Progress in Optics* **4**, 203–341 (2005).
- [6] R. Vicente, C. R. Mirasso, and I. Fischer, "Simultaneous bidirectional message transmission in a chaos-based communication scheme", *Optics Letters* **32**, 403–405 (2007).