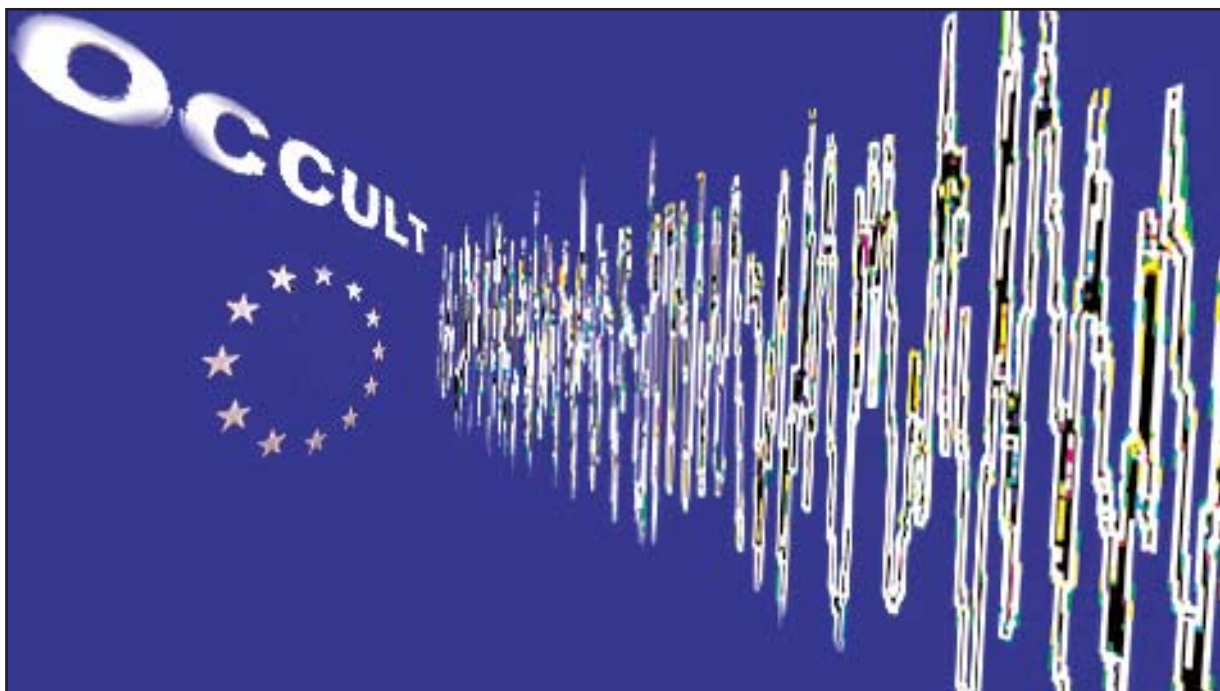


Físicos de la UIB y del CSIC desarrollan un sistema para "ocultar" información utilizando el caos

PALABRAS CLAVE:
comunicaciones
seguras,
comunicaciones
caóticas,
sincronización,
láseres de
semiconductor

El proyecto europeo OCCULT que coordina el doctor Claudio R. Mirasso del Departamento de Física de la UIB ha conseguido duplicar la seguridad en la transmisión de datos al superponer a las clásicas técnicas de encriptación de mensajes (software) un segundo nivel de inaccesibilidad incorporando dichos mensajes en ondas caóticas generadas por láseres semiconductores

KEYWORDS:
secure
communications,
chaotic
communications,
synchronization,
semiconductor
lasers



La web del
proyecto
OCCULT es:
[http://nova.uib.es
/project/occult](http://nova.uib.es/project/occult)

Resumen

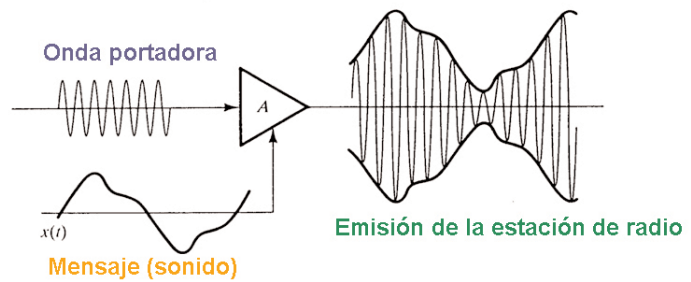
Hallar técnicas alternativas a las comúnmente utilizadas para mejorar la seguridad en las comunicaciones es el objetivo final del proyecto de investigación OCCULT (Optical Chaos Communications Using Laser-diodes Transmitters) que ha unido los esfuerzos de ocho instituciones científicas europeas bajo la coordinación del doctor Claudio R.

Mirasso, profesor del Departamento de Física y en el que ha participado el doctor Pere Colet investigador del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (CSIC-UIB) además de otros investigadores de ambas instituciones.

Para encontrar algún precedente del proyecto OCCULT cabe remontarse a principios de la década de los noventa cuando algunos grupos de

Ejemplos

Radio AM (amplitud modulada):
El sonido (mensaje) se transmite modulando la amplitud de una onda electromagnética.



Radio FM (frecuencia modulada):
El sonido se transmite modulando la frecuencia de la onda portadora.

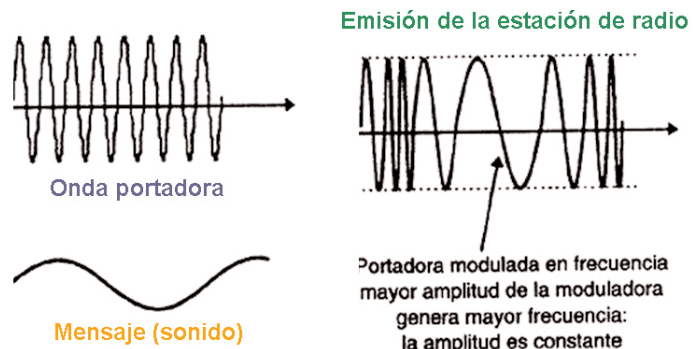


Figura 1. Introducción de un mensaje en dos ondas de radio, una de amplitud modulada (AM) y otra de frecuencia modulada (FM). En la primera el mensaje (sonido) se introduce en la onda "ampliando" su amplitud, en la segunda ampliando su frecuencia.

investigación estadounidenses ensayaron la aplicación de la teoría del caos en la encriptación de mensajes, y en concreto la utilización de las fluctuaciones irregulares del voltaje de un circuito eléctrico para "esconder" en ellas un determinado mensaje, de manera que la irregularidad de la onda portadora hiciera prácticamente invisible el mensaje introducido.

Se trataba pues de uno de los primeros intentos de unir a las técnicas comunes de encriptación que se basan en programación informática (software), el uso de instrumental especial (hardware) para la codificación de la información a transmitir. Esos primeros trabajos, publicados en la década de los noventa, resolvieron la tarea de rescatar el mensaje, es decir recibirlo, mediante la incorporación de un receptor gemelo del emisor (ambos circuitos electrónicos) capaz de discriminar la onda caótica portadora del mensaje del mensaje en sí.

A partir de esos precedentes realizados en circuitos electrónicos, el doctor Pere Colet (junto con el Prof. R. Roy, Georgia Tech, USA) desarrolló en 1994 un modelo matemático para la encriptación de información en una onda lumínica generada por un láser de estado sólido. Más tarde, el doctor Colet y el

doctor Claudio Mirasso desarrollaron un modelo similar para láseres de semiconductor y estudiaron la codificación, transmisión y posterior decodificación de mensajes en un sistema de comunicación óptica.

Quedaba, por tanto, superar la fase del modelo matemático y llevar a la práctica la hipótesis de los investigadores demostrando la posibilidad de transmitir un mensaje oculto en una onda caótica generada por un láser de semiconductor, capaz de viajar a velocidades de Gbits por segundo (recuérdese por ejemplo que en una red ADSL las velocidades máximas actuales son de 1 Mbit/s), y que fuera recuperable por un receptor pero prácticamente inaccesible para un tercero. Y eso ha sido concretamente lo que ha conseguido el proyecto OCCULT financiado por la Unión Europea que acaba de finalizar recientemente (2004) y en el que han participado además de los doctores Mirasso y Colet, coordinándolo, investigadores de la University of Wales, del Centre National de la Recherche Scientifique (Francia); de la Technische Universitaet Darmstadt (Alemania); de la National and Kapodistrian University of Athens (Grecia); de la Università degli Studi di Pavia (Italia), además de la empresa suiza Opto Speed SA.

¿Cómo viaja la información y cómo ocultar un mensaje?

Comúnmente la información de carácter privado es codificada antes de ser transmitida. Para ello se usan algoritmos matemáticos implementados mediante software. Nos referimos, por ejemplo, a nuestro número de tarjeta de crédito cuando realizamos compras por internet, al efectuar cualquier transacción comercial, o cuando formalizamos nuestra declaración del IRPF a través de la red.

En todas esas ocasiones, y en otras muchas, entra en juego la criptografía moderna, una especialidad que se ha desarrollado paralelamente a la tecnología de las comunicaciones. Las técnicas modernas de cifrado están íntimamente ligadas al cálculo computacional: complicados algoritmos son los encargados de dar un grado de seguridad al mensaje transmitido a través de canales de comunicación a los que pueden acceder millones de usuarios. La moderna criptografía se divide en dos grandes bloques: la simétrica, en la que el emisor y el receptor de un mensaje cifrado comparten la misma clave que lo descifra; y la asimétrica, en la que cada usuario dispone de una

clave distinta: el emisor de una clave pública y el receptor de una clave privada asociada a la del emisor. Así, la clave pública permite codificar el mensaje, pero sólo la clave privada permite descifrarlo. El éxito del cifrado consiste en establecer un sistema computacional tan complicado que sea casi imposible deducir la clave privada.

Una forma habitual de transmitir información consiste, por ejemplo, en modular una "onda portadora" periódica. En la figura 1 puede observarse cómo puede introducirse un mensaje en dos ondas, por ejemplo, de radio: una de amplitud modulada (AM) y otra de frecuencia modulada (FM). En la primera el mensaje (sonido) se introduce en la onda "cambiando" su amplitud, en la segunda "cambiando" su frecuencia.

El doctor Colet lo explica con un ejemplo. "Si quisiéramos introducir un mensaje -digamos las siglas UIB- en una onda de amplitud modulada elegiríamos, por ejemplo un código como el ascii que atribuye a cada letra una secuencia de ocho dígitos, una combinación de ceros y unos (véase figura 2). Traduciendo UIB según ese código tendríamos una

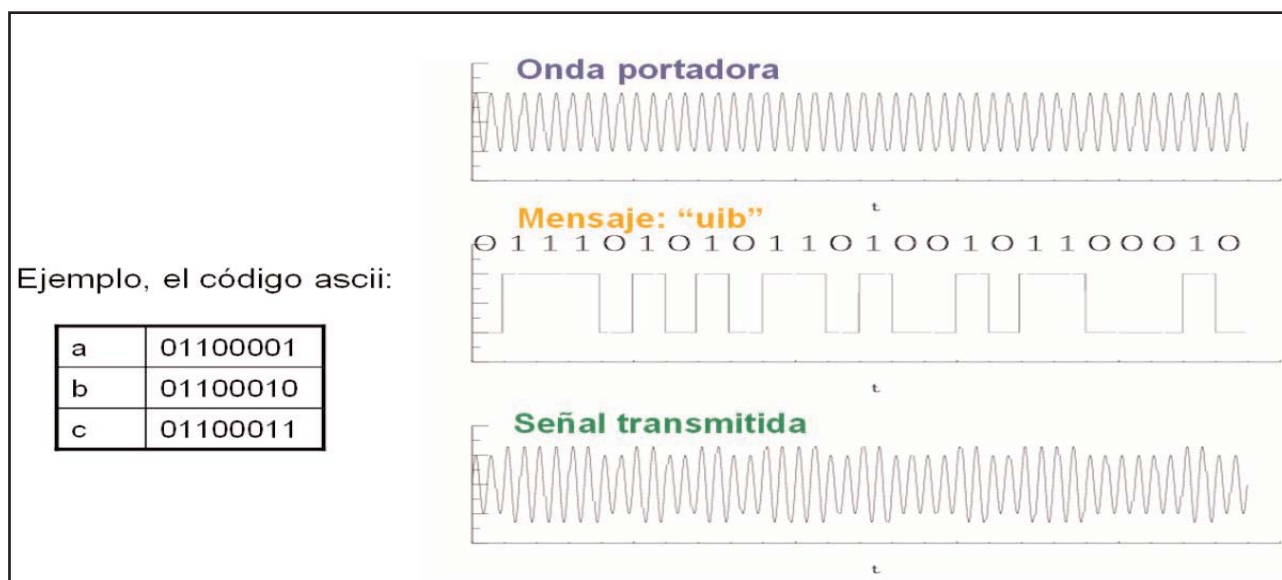


Figura 2. Si quisiéramos introducir un mensaje -las siglas UIB- en una onda de amplitud modulada elegiríamos, por ejemplo un código como el ascii que atribuye a cada letra una secuencia de ocho dígitos, una combinación de ceros y unos. Traduciendo UIB según ese código tendríamos una secuencia de 24 dígitos. Para introducir el mensaje procederíamos manteniendo la amplitud de la onda si es cero y aumentándola si es uno.



Figura 3. En el caso de un láser de semiconductor, podríamos establecer que para introducir el mensaje codificado correspondiese cada emisión de luz a un uno.

secuencia de 24 dígitos. Para introducir el mensaje procederíamos manteniendo la amplitud de la onda si el dígito es uno y disminuyéndola si es cero. Así el receptor traduciría cada pico de la onda que superase el cierto valor como un uno y el resto como ceros pudiendo transcribir el código y el mensaje enviado".

En el caso de un láser de semiconductor, podríamos establecer que para introducir el mensaje correspondiese cada pulso de luz a un uno y la ausencia de pulso a un cero (figura 3). El mensaje codificado podrá ser transmitido a través de fibra óptica hasta un fotodiodo receptor. Ahora bien, de esta manera el mensaje es accesible para cualquiera que lo reciba; para hacerlo inaccesible a terceras personas deberíamos establecer una encriptación del mensaje con una clave que sólo conociera el emisor y el receptor autorizado.

En criptografía, normalmente se mezclarían los unos y ceros del mensaje antes de ser emitido de una manera "aparentemente" aleatoria, de manera que sólo una clave en posesión del receptor le permite "reordenar" la secuencia, dándole acceso a la información transmitida. En la figura 4, se puede observar como usando un algoritmo y una clave se consigue distorsionar el mensaje UIB. En este caso es el algoritmo de Vernam patentado en 1919. Mediante una clave, un número aleatorio de igual longitud que el

mensaje conseguimos cifrar éste. Sólo debemos saber que:

Un 0 del mensaje y un 0 de la clave corresponde al dígito 0

Un 0 del mensaje y un 1 de la clave corresponde al dígito 1

un 1 del mensaje y un 0 de la clave corresponde al dígito 1

un 1 del mensaje y un 1 de la clave corresponde al dígito 0

De esta manera, conociendo estas combinaciones podemos descifrar el mensaje.

Hardware para ocultar un mensaje: la utilidad del caos

Como vemos, hasta el momento los ejemplos de encriptación se han sustentado en el software. El paso que el proyecto OCCULT supone sobre las técnicas de encriptación anteriores es la introducción del hardware como elemento camuflador del mensaje, en definitiva incrementar los niveles de seguridad y privacidad.

El carácter innovador del proyecto consiste en utilizar no una onda periódica o simplemente pulsos sino una portadora caótica.

Tal como hemos avanzado, en la década de los

Figura 4. Usando un algoritmo y una clave se consigue distorsionar el mensaje UIB. En este caso es el algoritmo de Vernam patentado en 1919. Mediante una clave, un número aleatorio de igual longitud que el mensaje conseguimos cifrar éste.

Ejemplo: Algoritmo de Vernam
US Patent 1310719, 22 de julio de 1919

La puerta lógica xor:

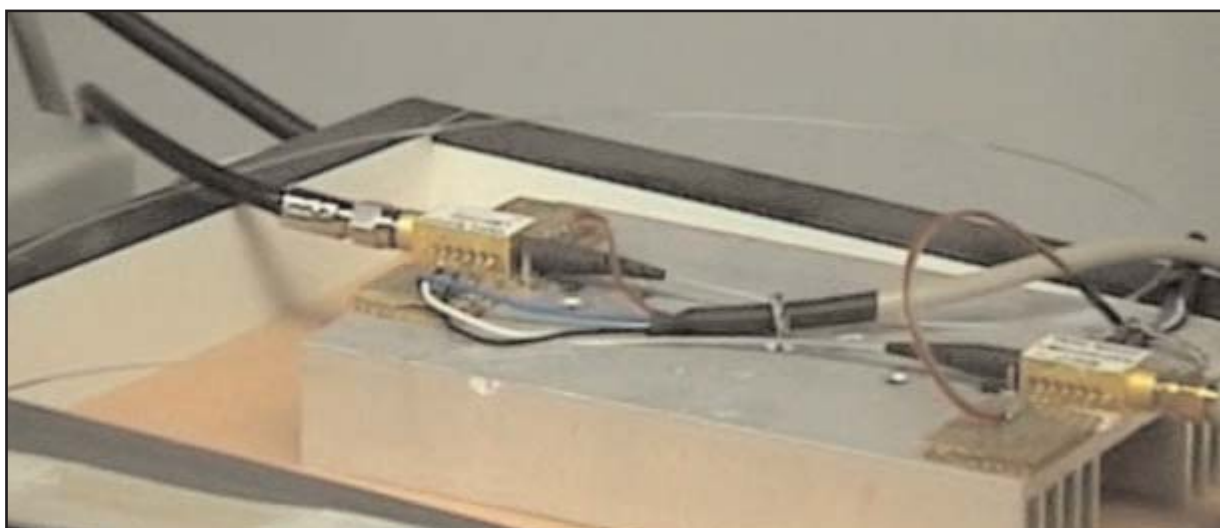
entrada 1	0	0	1	1
entrada 2	0	1	0	1
salida xor	0	1	1	0

Encriptación:

Mensaje: "uib"	01110101 01101001 01100010
Clave: numero aleatorio de igual longitud	00100001 00100000 00000011
Texto cifrado	01010100 01001001 01000001

Descifrado:

Texto cifrado	01010100 01001001 01000001
Clave	00100001 00100000 00000011
Descifrado: xor (texto cifrado y clave)	01110101 01101001 01100010



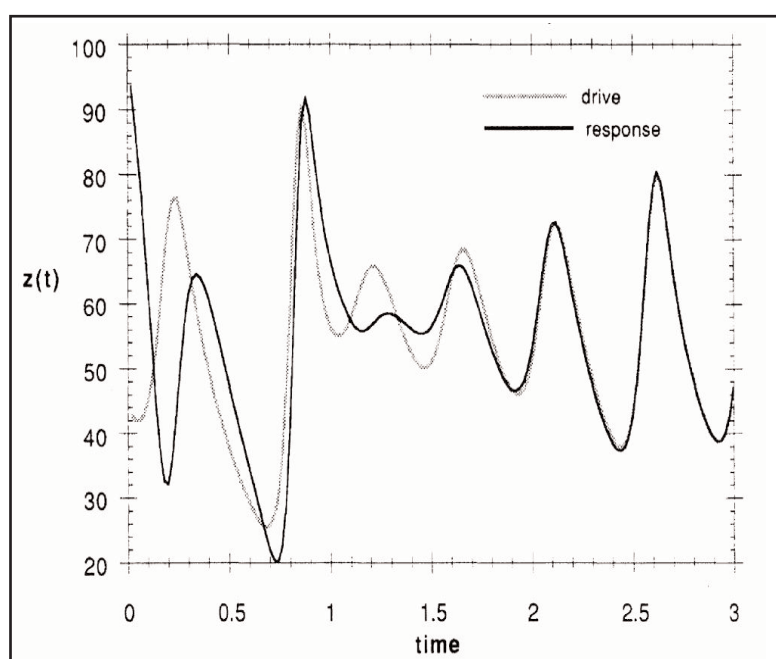
En la imagen aparecen dos láseres de semiconductor durante un experimento de emisión y recepción de un mensaje a través de una onda luminica caótica.

noventa se habían realizado experimentos utilizando circuitos para aplicar la teoría del caos a la encriptación de mensajes. En concreto se utilizaron las fluctuaciones irregulares de voltaje eléctrico para "incluir" en ellas un determinado mensaje. Sin embargo, son las ondas ópticas las más utilizadas en comunicación. Así, tras el desarrollo en 1994 de un modelo matemático que posibilitaba la encriptación de información en una onda lumínica caótica generada por un láser de estado sólido, los doctores Colet i Mirasso desarrollaron un modelo similar para láseres de semiconductor, los comúnmente utilizados en comunicación óptica.

Los sistemas con comportamiento caótico se caracterizan por la sensibilidad a pequeñas variaciones de las condiciones iniciales. Dicho de otra manera, una pequeña variación en las condiciones iniciales del proceso conduce a diferencias abismales al final de dicho proceso. Para entenderlo acudamos a un símil. La trayectoria de una piedra de un determinado tamaño precipitándose hacia el suelo en caída libre, no es muy diferente de la trayectoria de otra piedra idéntica que también se precipitara hacia el suelo desde una posición inicial prácticamente idéntica a la anterior. Incluso si variáramos ligeramente el tamaño de la piedra o la lanzáramos de más altura, al final del proceso no habría muchas diferencias entre una piedra y otra. En cambio si en lugar de piedras repitiéramos el proceso con dos hojas de un mismo árbol, aunque

tuvieran la misma forma, superficie y masa, a buen seguro que las trayectorias que seguirían ambas serían muy diferentes y muy difíciles de predecir. No encontraríamos dos hojas que repitieran exactamente la misma trayectoria hasta llegar al suelo. Y ello es, por la multitud de elementos aleatorios que confluyen en este caso (remolinos de viento, turbulencias, etc.). De hecho, la separación entre dos trayectorias que empezaran en puntos cercanos aumentaría exponencialmente con el tiempo. El caos, por tanto, resulta útil para camuflar un mensaje, puesto que prácticamente nadie será capaz de reproducir el mismo caos. En el caso de una onda caótica de láser semiconductor, un posible detector

Figura 5. Progresiva sincronización de dos ondas tras un acoplamiento.



espía debería poder reproducir fielmente esa onda caótica y, después, detectar sobre ella las irregularidades que desvelarían la presencia de un mensaje oculto. Al no poder conocer las condiciones iniciales exactas del caos generado, la tarea se hace prácticamente imposible.

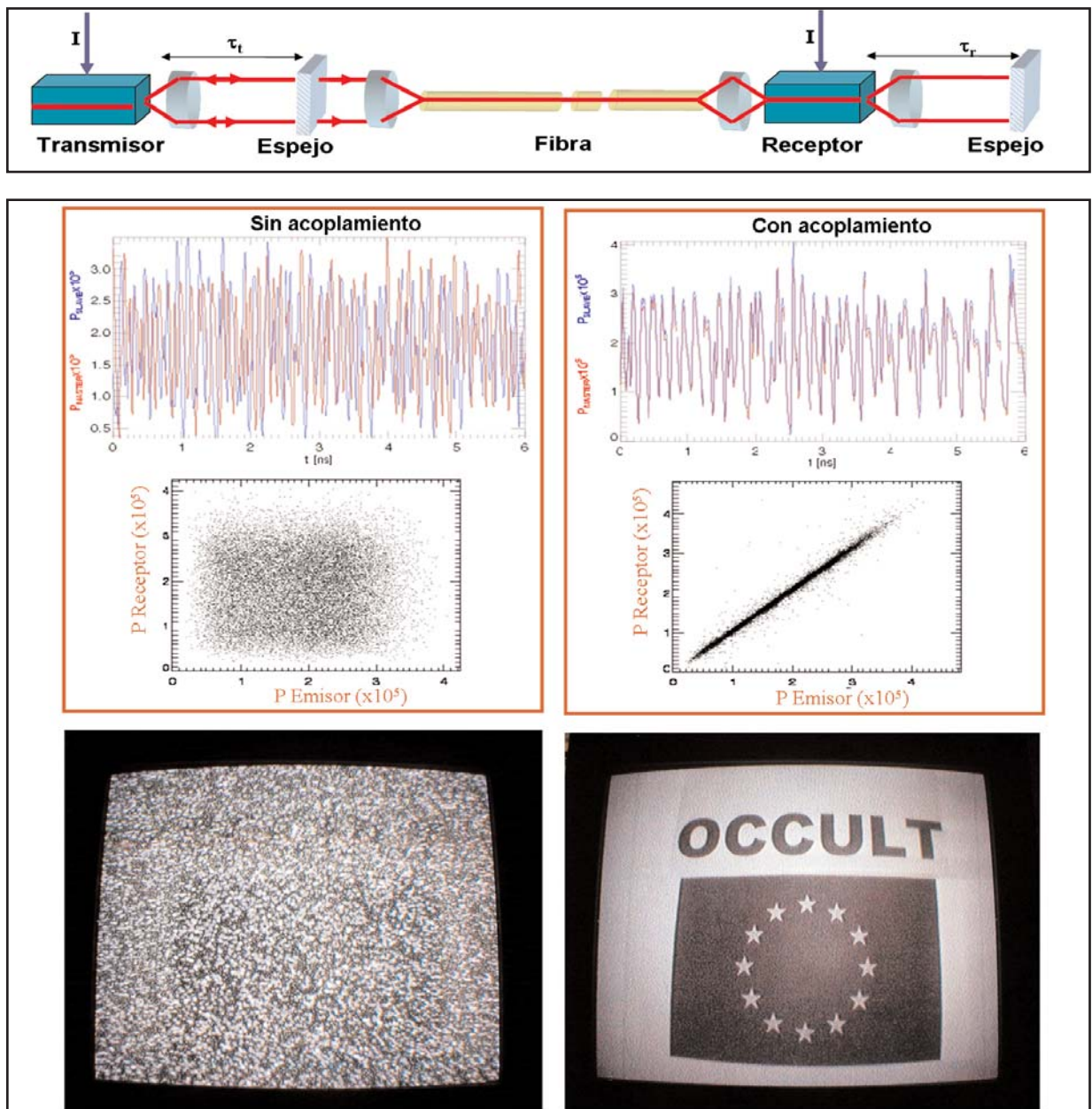
¿Cómo rescatar el mensaje del interior del caos?

El caos resulta útil para camuflar el mensaje pero, como es lógico, los investigadores necesitaban encontrar la fórmula para que un receptor autorizado pudiera rescatar el mensaje oculto.

La única manera de recibir el mensaje es contar con un láser idéntico al que lo ha emitido y sincronizarse con él. El escollo principal para efectuar esa sincronización perfecta del láser emisor y del receptor es conseguir que sean prácticamente gemelos. Y eso es particularmente difícil por cuanto la fabricación de láseres se realiza mediante procesos industrializados cuyas particularidades hacen que nunca surjan dos láseres iguales.

Los investigadores han contado, para superar ese escollo, con la colaboración de la empresa Opto Speed SA que les ha surtido de láseres de

Figura 6. En el esquema adjunto puede observarse la diferencia entre utilizar dos láseres idénticos pero no sincronizados o dos láseres gemelos y acoplados. Arriba, un láser transmisor al que se le coloca un espejo para generar la onda caótica. Esta onda viaja a través de fibra óptica y es recogida por el receptor. Cuando los láseres no han sido sincronizados nos aparece en una nube de puntos en la imagen. Si los láseres han sido previamente acoplados la imagen aparece nítida.





De izquierda a derecha los doctores Pere Colet y Claudio R. Mirasso.

características muy similares.

Cabe tener en cuenta que cuando se habla de sincronización se quiere decir que la señal de los dos láseres, emisor y receptor, deben ser casi idénticas. Ambos deben oscilar del mismo modo, con la misma potencia óptica y al mismo tiempo. Sincronizar dos ondas caóticas sólo es posible acoplándolas: introduciendo parte de la onda del emisor en el receptor para que la onda generada por éste siga la onda introducida.

En la figura 5, puede verse la progresiva sincronización de dos ondas tras un acoplamiento como el descrito y en la figura 6 puede observarse la diferencia entre utilizar dos láseres idénticos pero no sincronizados o dos láseres gemelos y acoplados. En el esquema podemos ver un láser transmisor al que se le coloca un espejo para generar la onda caótica. Esta onda viaja a través de fibra óptica y es recogida por el receptor. Cuando los láseres no han sido sincronizados nos aparece en una nube de puntos en la imagen. Si los láseres han sido previamente acoplados la imagen aparece nítida.

Establecidos los modelos matemáticos quedaba probar experimentalmente que era posible transportar un mensaje codificado mediante una onda caótica de láser y que además era posible, para un receptor autorizado, recibir esa onda y descifrar el mensaje que portaba. El proyecto OCCULT ha conseguido demostrar la viabilidad de este sistema de doble encriptación, mediante codificación software y mediante una portadora caótica. Los mensajes codificados han sido transmitidos y se ha conseguido

enviar información a velocidades de transmisión de Gbit/s a través de cien kilómetros de fibra óptica, para ser recibidos con éxito por un láser receptor y un error menor que 1 bit en 10 millones.

Mayor nivel de seguridad

La encriptación mediante algoritmos matemáticos aún a pesar de seguir siendo seguro tiene evidentes riesgos puesto que al existir ordenadores cada vez con mayor potencia de cálculo siempre es posible, con tiempo suficiente, romper la clave de seguridad. El sistema desarrollado por los investigadores del proyecto OCCULT introduce en el campo de la seguridad y privacidad en las comunicaciones un segundo nivel de protección. A la encriptación algorítmica del mensaje a transmitir, añade un elemento nuevo, desconocido hasta hoy: la utilización de una onda lumínica caótica como portadora.

Finalizado con éxito el proyecto OCCULT, los investigadores han solicitado financiación para un nuevo proyecto de investigación con dos objetivos esenciales. En primer lugar estudiar los niveles de compatibilidad del sistema ideado con las redes existentes. Los experimentos realizados hasta el momento, cosechando con éxito la transmisión de un mensaje por onda caótica de láser a través de cien kilómetros de fibra óptica, se han realizado en laboratorio. A partir de ahora deben repetirse en las redes de comunicación óptica existentes. En segundo lugar, se probarán diversos sistemas para cuantificar su nivel de seguridad y se probarán nuevos dispositivos que proporcionen un caos más complejo y a la vez ofrezcan un mayor nivel de seguridad.

Proyecto financiado

Título: Optical chaos communications using laser-diodes transmitters

Acrónimo: OCCULT

Referencia: IST-2000-29683

Entidad financiadora: Comisión Europea, V Programa Marco, Área: Tecnología de la Información y las Comunicaciones (IST), Acción: Tecnologías Futuras y Emergentes (FET-Open).

Inicio: 1-Septiembre-2001; Final: 31-Agosto-2004

Coordinador del proyecto e investigador responsable por la UIB

Doctor Claudio R. Mirasso

Departamento de Física, Universitat de les Illes Balears

Edificio Mateu Orfila i Rotger. Campus UIB

Carretera de Valldemossa, km 7 .5

Tel.: 17 27 83

E-mail: claudio@galiota.uib.es

Investigador responsable por el CSIC

Doctor Pere Colet Rafecas,

Departamento de Física Interdisciplinar, IMEDEA

Campus UIB

Carretera de Valldemossa, km 7 .5

Tel.: 17 33 82

E-mail: pere@imedea.uib.es

Otros miembros del equipo

Dr. Raúl Toral (UIB)

Dr. Manuel Matias (CSIC)

Dr. Alessandro Scire (UIB)

Dr. Josep Mulet (CSIC)

Sr. Yanne Chembo Kouomou

Sr. Antonio Pérez

Sr. Raúl Vicente

Otras instituciones participantes en el proyecto

University of Wales, Bangor, School of Informatics, UK.

Georgia Tech Lorraine/GTL-CNRS Telecom, Metz, France.

Darmstadt University of Technology, Institute of Applied Physics, Darmstadt, Germany.

University of Athens, Department of Informatics, Athens, Greece.

Universita di Pavia, Dipartimento di Elettronica, Pavia, Italy.

Opto Speed S.A., Switzerland.

Universidad de Cantabria (subcontratada)

Universidad Politécnica de Cataluña (subcontratada)

Publicaciones más recientes

S. Sivaprakasam, Paul S. Spencer, P. Rees, K. Alan Shore, "Regimes of chaotic synchronization in external-cavity laser diodes", *IEEE Journal of Quantum Electron*, 38, 1155 (2002).

Raul Vicente, Toni Perez, Claudio Mirasso, "Open- versus closed-loop performance of synchronized chaotic external-cavity semiconductor lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 1197 (2002).

T. Heil, J. Mulet, I. Fischer, C. Mirasso, M. Peil, P. Colet, W. Elsässer, "On/off phase shift keying for chaos-encrypted communication using external-cavity semiconductor lasers ", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 1162 (2002).

V. Annovazzi-Lodi, S. Merlo, M. Norgia and A. Scire, "Characterization of Chaotic Telecommunication Lasers for Different Fiber Cavity Lengths", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 1171 (2002).

J.P. Goedgebuer, P. Levy, L.Larger, C. C. Chen and W.T. Rhodes, "Optical Communications with Synchronized Hyperchaos Generated Electrooptically", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 1178 (2002).

M. W. Lee, L. Larger, J.-P. Goedgebuer, "Transmission System using Chaotic Delays Between Lightwaves", , *IEEE J. of Quantum Electron*. 39, 931 (2003).

Yanne Chembo Kouomou, Pere Colet, Nicolas Gastaud and Laurent Larger, "Parameter mismatch influence on the synchronization of chaotic lasers with electro-optical feedback", *Phys. Rev. E* 69, 056226 (2004).

Yanne Chembo Kouomou, Pere Colet, Laurent Larger and Nicolas Gastaud, "Mismatch-Induced Bit Error-Rate in Optical Chaos Communications using Semiconductor Lasers with Electro-optical Feedback", *IEEE J. of Quantum Electron*. 41, 146 (2005).

Raúl Vicente, José Daudén, Pere Colet y Raúl Toral, "Analysis and characterization of the hyperchaos generated by a semiconductor laser subject to a delayed feedback loop", *IEEE J. of Quantum Electron*. to appear.

Min Won Lee, Jon Paul, Sivaraman Sivaprakasam and K. Alan Shore, "Comparison of closed- and open-loop feedback schemes of message decoding using chaotic laser diodes", *Opt. Lett.* 28, 2168 (2003).

Min Won Lee and K. Alan Shore, "Chaotic message broadcasting using DFB laser diodes", *Elect. Lett.*, 40, 614 (2004).

Yanhua Hong, Min Won Lee, Paul S. Spencer and K. Alan Shore, "Synchronization of chaos in unidirectionally coupled vertical-cavity surface-emitting lasers", *Opt. Lett.*, 29, 1215 (2004).

Min Won Lee, Yanhua Hong and K. Alan Shore, "Experimental demonstration of VCSEL-based chaotic optical communications", *Phot. Tech. Lett.* 16, 2392 (2004).

Jon Paul, Min Won Lee and K. Alan Shore, "Effect of chaos pass filtering on message decoding quality using chaotic external-cavity laser diodes", *Opt. Lett.* 29, 2497 (2004).

L. Larger, T. Erneux and J.-P. Goedgebuer, "Experimental and analytical investigation of sub-critical Hopf bifurcation in time delayed dynamics", *Physical Review E* 69, 036210 (2004).

N. Gastaud, S. Poinso, L. Larger, J.-M. Merolla, M. Hanna, J.-P. Goedgebuer and F. Malassenet, "Electro-Optical Chaos for 10Gbit/s Optical Transmissions", *Electron. Lett.* 40, 898 (2004).

T. Erneux, L. Larger, M. W. Lee and J.-P. Goedgebuer, "Ikeda Hopf bifurcation revisited", *Physica D*, 194, 49 (2004).

L. Larger, J.-P. Goedgebuer, V. Udaltsov, "Ikeda-based nonlinear delayed dynamics for application to secure optical transmission systems using chaos", *C.R. de Physique 4*, 669 (2004).

L. Larger, J.-P. Goedgebuer, "Encryption using chaotic dynamics for optical telecommunications", *C.R. de Physique 4*, 609 (2004).

Josep Mulet, Claudio R. Mirasso, Tilmann Heil, Ingo Fischer, "Synchronization scenario of two distant mutually coupled semiconductor lasers", *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* 6, 97 (2004).

M. Peil, I. Fischer, W. Elsässer, "A short external cavity semiconductor laser cryptosystem", *C. R. Physique 4*, 633 (2004).

Valerio Annovazzi-Lodi, Mauro Benedetti, Sabina Merlo, Michele Norgia, "Fibreoptics setup for chaotic cryptographic communications", *C.R. Physique 4*, 623 (2004).

C. R. Mirasso, R. Vicente, P. Colet, J. Mulet and T. Pérez, "Synchronization Properties of Chaotic Semiconductor Lasers and Applications to Encryption", *Comptes Rendus - Physique 4*, 613 (2004).

S. Tang, R. Vicente, M. Chiang, C. R. Mirasso and J.M. Liu, "Nonlinear Dynamics of Semiconductor Lasers with Mutual Optoelectronic Coupling", *IEEE J. of Selective Topics in Quantum Electron.* 10, 936 (2004).

J. Danckaert, M. Peeters, C. Mirasso, M. San Miguel, G. Verschaffelt, J. Albert, B. Nagler, H. Unold, R. Michalzik, G. Giacomelli and F. Marin, "Stochastic polarisation switching dynamics in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: theory and Experiment", *IEEE J. of Selective Topics in Quantum Electron.* 10, 911 (2004)

R. Vicente, S. Tang, J. Mulet, C. R. Mirasso and J.M. Liu, "Dynamics of Semiconductor Lasers with Bidirectional Optoelectronic Coupling: Stability, Route to Chaos and Entrainment", *Phys. Rev. E* 70, 046216 (2004).

A. Bogris, D. Kanakidis, A. Argyris, D. Syvridis, "Performance Characterization of a Closed-loop Chaotic Communication System Including Fibre Transmission in Dispersion Shifted Fibres", *IEEE Journal of Quantum Electronics* 40, 1326 (2004).

D. Kanakidis, A. Bogris, A. Argyris, D. Syvridis, "Numerical investigation of fiber transmission of a chaotic encrypted message using dispersion compensation schemes", *IEEE Journal of Lightwave Tech.* 22, 2256 (2004).

A. Argyris, D. Kanakidis, A. Bogris and D. Syvridis, "Experimental Evaluation of an Open-loop All-optical Chaotic Communication System", to be published in *IEEE Selected Topics of Quantum Electron.* 10, 927 (2004).

Alejandro D. Sánchez, Juan M. López, Miguel A. Rodríguez,¹ and Manuel A. Matías, "Rare Events and Scale-Invariant Dynamics of Perturbations in Delayed Chaotic Systems", *Phys. Rev. Lett.*, 92, 204101 (2004).

J.M. Buldú, J. García-Ojalvo, M.C. Torrent, "Delay-induced resonances in an optical system with feedback", *Phys.*

Rev. E 69, 046207 (2004).

J.M. Buldú, J. García-Ojalvo, M.C. Torrent, "Multimode synchronization and communication using unidirectionally coupled semiconductor lasers", IEEE J. of Quantum Electron. 40, 640 (2004).

J. M. Buldu, J. Garcia-Ojalvo and M. C. Torrent, "Demultiplexing Chaos From Multimode Semiconductor Lasers" Quantum Electronics, IEEE J. of Electron. 41 164 (2005).

Conferencias

Claudio R. Mirasso, Photonics Fabrication Europe, "Hot Topics in Photonics", "Optoelectronic devices of Optical Chaos Communications", Bruges, Belgium, 28 October - 1 November 2002 (Conferencia Invitada).

Claudio R. Mirasso, MEDYFINOL, "Privacy in Communications: Can chaos do anything for us?", Mecánica Estadística del Desequilibrio y Física no Lineal, Colonia, Uruguay, 9-13 December, 2002 (Conferencia Invitada).

Claudio R. Mirasso, 'Optical Chaos Communications', plenary presentation at SIOE 2003 (Conferencia Invitada).

Claudio R. Mirasso, ITCOM 2003 (Conferencia Invitada), "Optoelectronic devices for optical chaos communications", 7.-11.September 2003

Claudio R. Mirasso, 'The 2003 Frontiers in Optics/Laser Science XIX', OSA Annual Meeting, "Control and synchronization of diode lasers" Tucson (AZ) 5.-9. October 2003 (Conferencia Invitada).

I.Fischer, Workshop 'Complex Nonlinear Processes', Synchronization of Chaotic Semiconductor Lasers: Scenarios and Applications, Berlin, 11.-13. September 2003 (Conferencia Invitada).

I.Fischer, WIAS Workshop 'Dynamics of Semiconductor Lasers', Berlin, 15-17 September 2003.

I.Fischer, 'The 2003 Frontiers in Optics/Laser Science XIX', OSA Annual Meeting, "Coupled semiconductor lasers with delayed optical feedback: chaos synchronization and its applications", Tucson (AZ) 5-9 October 2003 (Conferencia Invitada),

I.Fischer, Colloquium of Stuttgart University, Semiconductor Lasers in the Tension Field of Complex Dynamics and Optical Technologies, Stuttgart, 28.11.2002

I.Fischer, Weierstraß Institute Berlin, Berlin, 5.12.2002

I.Fischer, Workshop 'Complex Nonlinear Processes', Synchronization of Chaotic Semiconductor Lasers: Scenarios and Applications, Berlin, 11-13 September 2003

K. Alan Shore, Synchronisation of chaotic external cavity laser diodes for secure optical communication networks, "First Rio de la Plata" Workshop on Noise, Chaos and Complexity in Lasers and Nonlinear Optics", poster, Colonia del Sacramento, Uruguay (1-5 December 2003. (Conferencia Invitada).

Ingo Fischer, "Dynamics of Semiconductor Lasers with Delayed Coupling" Workshop 'Stochastic Dynamics with Delay and Memory', Wittenberg, 2-5.February 2004.

Ingo Fischer, "Dynamics of Mutually Coupled Semiconductor Lasers: On the Role of a Coupling-Delay", 8th Experimental Chaos Conference (ECC8), Firenze, June 14 -17. 2004.

Laurent Larger, "Chaotic behaviors of discrete and continuous time nonlinear delay dynamics in optics", 4th International Symposium on Modern Problems on Laser Physics, Novosibirsk, Russia (22-27 Aug. 2004) (Conferencia Invitada).

P. Colet, "Optical Communications with synchronized chaotic lasers", XX Trobades Científiques de la Mediterrànea, Fotònica: ciència i tecnologia de la llum, Maó, Spain, 26-28 september 2004 (Conferencia Invitada).

L. Pesquera, "Nonlinear dynamics reconstruction based on neural networks of chaotic time-delay systems", New Horizons in Stochastic Complexity, Sevilla, Spain, September 15-17 2004 (Conferencia Invitada).