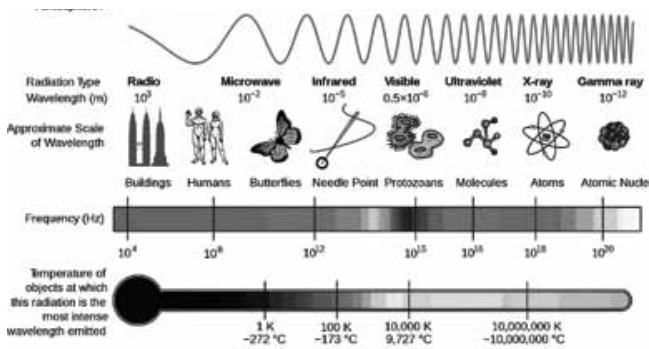


Optical Frequency Comb สำหรับความถี่ของแสงและการประยุกต์ใช้งาน

Light Frequency

แสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า (Visible Light) ประกอบด้วยการรวมกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ที่เกิดจากการโคจรของอิเล็กตรอนที่มีความเร็วคงที่ ความถี่ของแสงที่คนเรามองเห็นได้อยู่ในย่าน 400-700 THz ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นหากว่าเราสามารถวัดความถี่ของแสงได้จะมีประโยชน์อย่างมาก เช่น ใช้เป็นความถี่มาตรฐานสำหรับงานด้านมาตรวิทยาและความถี่และใช้สำหรับสร้างหน่วยวัดมาตรฐานทางมิติจากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับความถี่ของแสง เป็นต้น

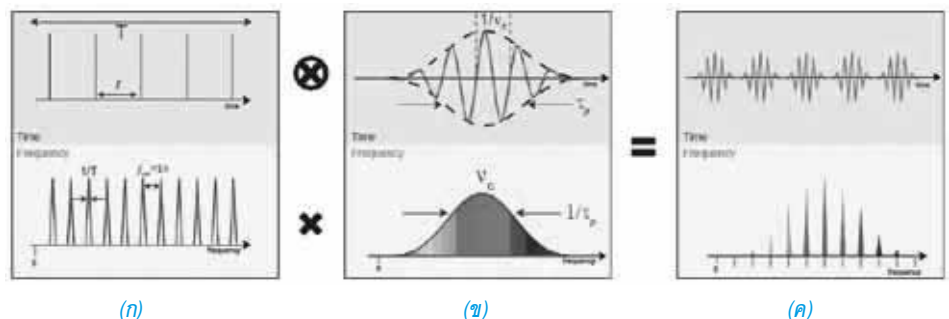


รูปที่ 1 แผนภาพแสดงความถี่ ความยาวคลื่นและอุณหภูมิที่เกิดจากการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ก่อนปี ค.ศ.2000 ความถี่แสงสามารถวัดได้เพียงวิธีเดียวโดยใช้ Optical Frequency Chain ซึ่งใช้หลักการล็อกเฟส (Phase Lock) เปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน เช่น ซีเซียม โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างความถี่ฮาร์โมนิกและนำเอาแต่ละวงจรมาต่อเรียงกัน จนทำให้ความถี่ที่ได้ เพิ่มขึ้นจากย่านไมโครเวฟ ไปถึงย่านความถี่แสง (Optical Frequency Range) แต่อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องของการวัดด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความถี่มาตรฐานเป็นหลัก จนกระทั่งนักฟิสิกส์ในประเทศเยอรมัน และสหรัฐอเมริกา ได้ประสบความสำเร็จคิดค้นเครื่องมือที่เรียกว่า Optical Frequency Comb สำหรับใช้วัดความถี่ของแสงได้โดยตรง หรืออาจเปรียบเทียบได้เป็นไม้บรรทัดสำหรับวัดแสง (Ruler of Light)

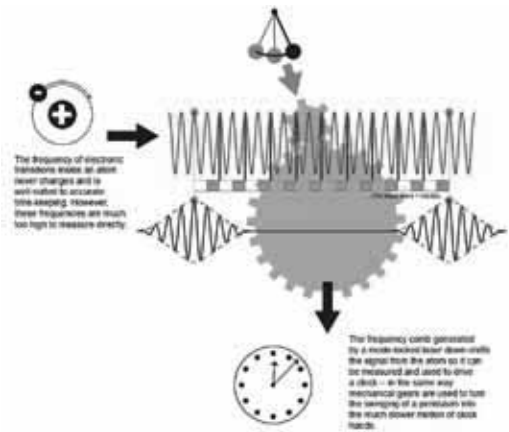
Optical Frequency Comb

หลักการการทำงานของ Optical Frequency Comb เริ่มต้นมาจากเทคนิคที่เรียกว่า Mode Locked Laser สำหรับใช้สร้างเลเซอร์พัลส์ที่มีความกว้างระดับ 10-15 วินาที (Femtosecond Laser) ที่คิดค้นโดยเจ้าของรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ประจำปี 2005 ซึ่งบังคับให้แสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง (CW Laser: Continuous Wave Laser) สะท้อนผ่านก้อนมรกตที่อาบด้วยไทเทเนียม (Titanium-Doped Sapphire) กระจกที่ใช้สะท้อน CW Laser นี้จะต้องมีระยะห่างเป็นจำนวนเต็มเท่า ($n = 1, 2, 3, \dots$) ของความยาวคลื่นของ CW Laser: ซึ่งควบคุมโดย PZT (Piezo-Electric Transducer) โดยเลเซอร์พัลส์ที่สร้างขึ้นจะเกิดขึ้นซ้ำๆ กันที่ความถี่ f_{rep} ในย่าน GHz ดังรูปที่ 2 (ก) หลังจากนั้นเรานำเอาเลเซอร์พัลส์ที่ได้ไปมอดูเลต (Amplitude Modulation) กับแสงที่เราต้องการจะวัด ซึ่งเปรียบได้กับสัญญาณคลื่นพาหะ (Carrier Wave) ดังรูปที่ 2 (ข) ดังนั้น สเปกตรัมความถี่ของแต่ละพัลส์จะมีการกระจายแบบต่อเนื่องที่มีจุดกึ่งกลางที่ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาหะ แต่ถ้าหากว่าเรานำเอาแต่พัลส์มาเรียงต่อกัน สเปกตรัมความถี่จะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ซึ่งมีลักษณะคล้ายหวี (Comb) โดยที่ช่องหวีที่สูงที่สุดตรงกับความถี่ของสัญญาณพาหะดังรูปที่ 2 (ค) หรืออีกนัยหนึ่ง สามารถเปรียบเทียบได้ว่า เราได้สร้างไม้บรรทัดวัดความถี่แสงที่มีรายละเอียดเท่ากับความถี่ f_{rep} ตัวอย่างเช่น ถ้าเราใช้ Mode-Locked Laser ที่ความถี่ 1 GHz วัดแสงเลเซอร์จาก Ti: Sapphire ซึ่งมีความถี่ 375 THz และความยาวคลื่นประมาณ 800 nm ในระหว่างเลเซอร์พัลส์จะมี 375,000 คาบของสัญญาณพาหะเกิดขึ้น



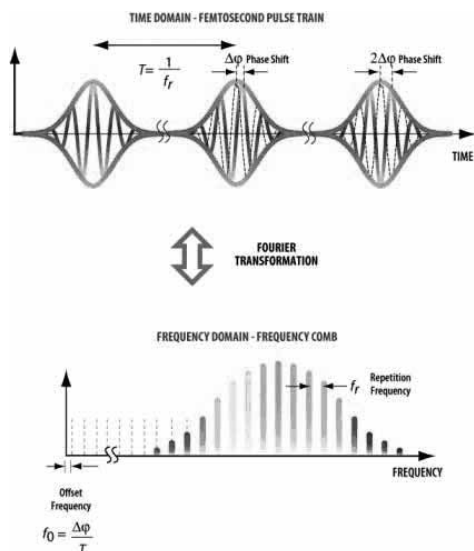
รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Optical Frequency Comb

เราสามารถนำเอา Optical Frequency Comb ประยุกต์ใช้ งานมาตรวิทยาสาขาเวลาและความถี่ซึ่ง Optical Frequency Comb เปรียบเสมือนเพียงทอดความถี่ที่เปรียบเทียบกับกับกลไกในนาฬิกา นั้นเอง โดยที่การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมเปรียบได้กับลูก ตูมนาฬิกา ดังรูปที่ 3

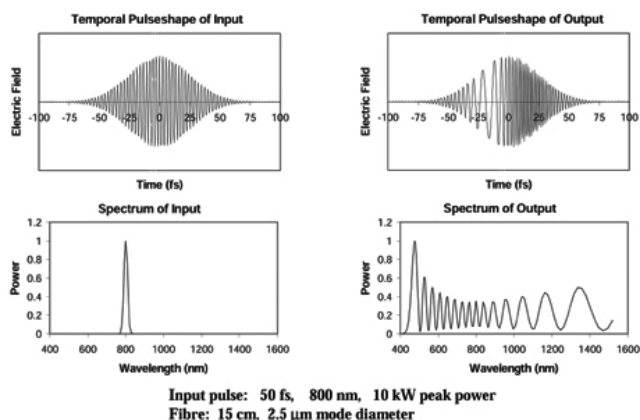


รูปที่ 3 การประยุกต์ใช้ Optical Frequency Comb เป็นค่าเวลาดมาตรฐาน

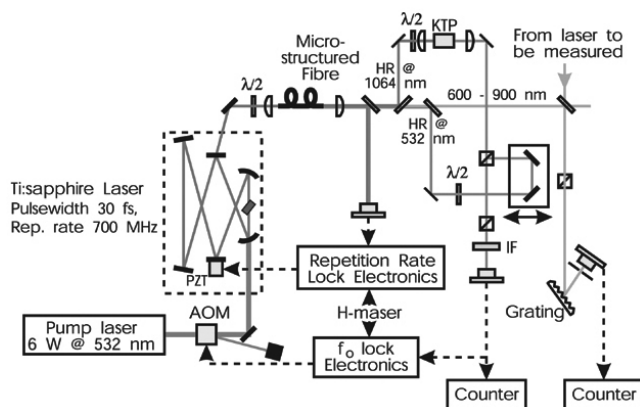
แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจุดยอดของสัญญาณพาหะ หรือแสงที่เราต้องการวัดเกิดขึ้นไม่ตรงกับจุดยอดของเลเซอร์พัลส์ ดังรูปที่ 4 ซึ่งมุมต่างเฟสที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิด Offset Frequency, f_0 เราสามารถวัดค่าของ Offset Frequency ได้โดยให้เลเซอร์พัลส์ ลอดผ่านสายใยแก้วนำแสงแบบ Micro-Structured Fibre เพื่อขยาย ความยาวคลื่นของเลเซอร์พัลส์ให้อยู่ในช่วง 1 Octave ดังรูปที่ 5 แต่ อย่งไรก็ตามเราจะต้องควบคุม Repetition Rate, f_{rep} และ Offset Frequency, f_0 ให้เสถียร โดยใช้ไดโอดแสงความเร็วสูง (Ultrafast Photodiode) วัดสัญญาณแสงซึ่งจะนำไปล็อกมุมต่างเฟส เทียบกับ ความถี่มาตรฐานในย่านความถี่วิทยุ (RF) (H-Maser ในรูปที่ 6) โดยที่ f_{rep} ถูกควบคุมโดย PZT และ f_0 ที่วัดโดย Frequency Counter



รูปที่ 4 มุมเลื่อนเฟสและ Offset frequency ในโดเมนเวลาและความถี่ ของ Optical Frequency Comb



รูปที่ 5 รูปคลื่นสัญญาณของเลเซอร์พัลส์ก่อนเข้าและออกจาก สายใยแก้วนำแสงแบบ Micro-Structured Fibre



รูปที่ 6 โครงสร้างของ Optical Frequency Comb ของ National Research Council Canada

การประยุกต์ใช้ Optical Frequency Comb

Optical Frequency Comb ได้รับการยอมรับจากคณะกรรมการ มาตรฐานวิทยาโลก (CIPM: International Committee for Weights and Measures) ว่าเป็นเทคโนโลยีที่ดีและเสถียรที่สุดสำหรับการสร้าง (Realisation) หน่วยวัดวินาที

Optical Frequency Comb ยังมีบทบาทที่สำคัญ ในงาน มาตรฐานวิทยา โดยใช้ทฤษฎีของแสงใช้เวลา 1/299 792 458 วินาที ใน การเดินทางเป็นระยะ 1 เมตร ในสุญญากาศ ซึ่งก่อนหน้านี้เราใช้ Optical Interferometry ในการวัดความยาวคลื่นของ Loline Stabilized Helium-Neon Laser เพื่อคำนวณหาความถี่ ด้วย เทคโนโลยีของ Optical Frequency Comb ทำให้เราสามารถวัด ความถี่ของแสงเลเซอร์โดยตรงและสามารถทวนสอบไปยังค่าเวลา มาตรฐานซึ่งเชื่อมโยงได้อีกด้วย

ที่มา: จากวารสาร Metrology Info ปีที่ 13 ฉบับที่ 65 สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ