การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์เพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถในการป้องกันประเทศ : โอกาส ความท้าทาย และแนวทางการพัฒนา

Advancing National Defense Capabilities through Terahertz Technology : Opportunities, Challenges, and Future Directions

บทความวิชาการ

ปาณิศา ธีระรัตน์[1] พัฒน์ศรัญย์ เลาหไพบูลย์[2] และ อรณิชา คงวุฒิ[3]
Panisa Theerarat[1] Phatsaran Laohhapaiboon[2] and Ornnicha Kongwut[3]
โรงเรียนเมืองพลพิทยาคม ขอนแก่น ประเทศไทย 40120[1]
Muangphonpittayakom School, Khon Kaen, Thailand 40120
หจก. บุญพาวาสนาส่ง กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10160[2]
Boonpawassanasong Partnership, Bangkok, Thailand 10160
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี กาญจนบุรี ประเทศไทย 71190[3]
Department of Physics, Faculty of Science and Technology,
Kanchanaburi Rajabhat University, Kanchanaburi, Thailand 71190
E-mail: 6231555@mpk.ac.th[1], wirinwinu4289@gmail.com[2] and ornnicha.k@kru.ac.th[3]

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพและข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ (THz) ในการยกระดับขีดความสามารถด้านการป้องกันประเทศ โดยมุ่งเน้นการศึกษาหลักการทางฟิสิกส์ของคลื่น THz เทคโนโลยีการสร้างและตรวจจับคลื่น THz การประยุกต์ใช้ในระบบเรดาร์ การตรวจจับวัตถุระเบิดและสารเคมี และการสื่อสารทางทหาร รวมถึงความท้าทายและแนวทางการพัฒนาในอนาคต การศึกษาใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมและวิเคราะห์ กรณีศึกษาจากการพัฒนาล่าสุดในต่างประเทศ ผลการวิเคราะห์พบว่า เทคโนโลยี THz มีศักยภาพสูงในการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับภัยคุกคามรูปแบบใหม่ โดยสามารถตรวจจับอากาศยานสเตลท์หรืออากาศยานล่องหนและโดรนขนาดเล็กได้แม่นยำขึ้น วิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุระเบิดและสารเคมีอันตรายได้ละเอียดขึ้น และพัฒนาระบบสื่อสารที่มีความเร็วสูงและปลอดภัยมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังมีความท้าทายสำคัญในด้านต้นทุนการผลิต ข้อจำกัดทางเทคนิค และผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมที่ต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติม บทความนี้นำเสนอแนวทางการวิจัยและพัฒนาในอนาคต รวมถึงข้อพิจารณาเชิงนโยบายสำหรับการนำเทคโนโลยี THz มาใช้ในการป้องกันประเทศอย่างมีประสิทธิภาพและรับผิดชอบ ผลการศึกษานี้มีประโยชน์ต่อนักวิจัย ผู้กำหนดนโยบาย และผู้ปฏิบัติงานด้านความมั่นคงในการวางแผนยุทธศาสตร์ การจัดสรรทรัพยากรวิจัยและพัฒนา และการเตรียมความพร้อมรับมือกับภัยคุกคามในอนาคต

คำสำคัญ : คลื่นเทระเฮิรตซ์, การป้องกันประเทศ, เรดาร์, การตรวจจับวัตถุระเบิด, การสื่อสารทางทหาร

วันที่รับบทความ : 21 พ.ค. 67 วันที่แก้ไขบทความ : 15 ก.ค. 67 วันที่ตอบรับบทความ : 30 ก.ค. 67

[1] นักเรียนหลักสูตรวิทยาศาสตร์สุขภาพ โรงเรียนเมืองพลพิทยาคม ขอนแก่น
Students Health Science Course, Muangphon Pittayakhom School, Khon Kaen

[2] ที่ปรึกษา หจก.บุญพาวาสนาส่ง, 84 เขตบางแค กรุงเทพมหานคร
Advisor, Boonpawassanasong Partnership, 84 Bangkae, Bangkok

[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี และผู้ประพันธ์บรรณกิจ
Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University and Corresponding Author

Abstract

This article aims to analyze the potential and limitations of applying terahertz (THz) technology in enhancing national defense capabilities. The study focuses on: 1) the physical principles of THz waves, 2) THz wave generation and detection technologies, 3) applications in radar systems, explosive and chemical detection, and military communications, and 4) challenges and future development directions. The research methodology involves a comprehensive literature review and analysis of recent case studies from international developments. The analysis reveals that THz technology shows high potential in improving the detection of new security threats, including more accurate detection of stealth aircraft and small drones, enhanced analysis of explosive and hazardous chemical compositions, and the development of high-speed, secure communication systems. However, significant challenges remain in production costs, technical limitations, and potential health and environmental impacts that require further study. This article presents future research and development directions, as well as policy considerations for the effective and responsible implementation of THz technology in national defense. The findings of this study are valuable for researchers, policymakers, and security practitioners in strategic planning, resource allocation for research and development, and preparing for future threats.

Keywords: Terahertz Waves, National Defense, High-resolution Radar, Explosive Detection, Secure Communications

บทนำ

ในยุคที่ภูมิทัศน์ด้านความมั่นคงมีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่ล้ำสมัยมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาเสถียรภาพและความปลอดภัยของชาติ จากรายงานของ Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) พบว่าค่าใช้จ่ายทางทหารทั่วโลกในปี ค.ศ. 2023 พุ่งสูงถึง 2.24 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐ เพิ่มขึ้น ร้อยละ 3.7 จากปีก่อนหน้า (Grand View Research, 2024) สะท้อนให้เห็นถึงการแข่งขันด้านอาวุธยุทโธปกรณ์และเทคโนโลยีทางทหารที่ทวีความเข้มข้นขึ้น

ท่ามกลางภัยคุกคามรูปแบบใหม่ เช่น การโจมตีทางไซเบอร์ การใช้โดรนในการก่อการร้าย และอาวุธที่มีความแม่นยำสูง ระบบป้องกันประเทศแบบดั้งเดิมกำลังถูกท้าทายอย่างหนัก สถิติจาก United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA) ชี้ให้เห็นว่า ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา การใช้โดรนในการโจมตีเพิ่มขึ้นถึง ร้อยละ 270 (V.I. Chasnyk, D.V. Chasnyk & Kaidash, 2023) ส่งผลให้ประเทศต่าง ๆ ต้องเร่งพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อรับมือกับภัยคุกคามเหล่านี้

ในบริบทนี้ เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ (Terahertz Waves) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 THz กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางทหาร ด้วยคุณสมบัติพิเศษหลายประการ เช่น ความสามารถในการทะลุทะลวงวัสดุความละเอียดสูง และความปลอดภัยต่อมนุษย์ คลื่นเทระเฮิรตซ์จึงมีศักยภาพสูงในการยกระดับขีดความสามารถทางทหาร

การศึกษาของ National Institute of Standards and Technology (NIST) แสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถตรวจจับวัตถุระเบิดซ่อนเร้นได้แม่นยำถึงร้อยละ 98 (Pellegrino, Holthoff, & Farrell, 2015) ในขณะที่รายงานจาก IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology ระบุว่าเรดาร์คลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถให้ความละเอียดเชิงมุมได้ถึง 0.1 องศา ซึ่งเหนือกว่าเรดาร์ไมโครเวฟทั่วไปถึง 10 เท่า (Dailey & Phelps, 2021) นอกจากนี้ Department of Homeland Security สหรัฐอเมริกายังรายงานว่า เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถตรวจจับสารเคมีอันตรายได้หลากหลายชนิดด้วยความแม่นยำสูงถึง ร้อยละ 99.9 (Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 2020)

ด้วยศักยภาพอันโดดเด่นนี้ ตลาดเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศจึงมีแนวโน้มเติบโตอย่างก้าวกระโดด โดย Market sand Markets Research คาดการณ์ว่าตลาดจะขยายตัวจาก 153.1 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ในปี ค.ศ. 2021 เป็น 1,168.1 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2026 ด้วยอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปี (CAGR) ที่ร้อยละ 50.2 (Mounaix, 2022)

บทความนี้มุ่งนำเสนอภาพรวมของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ในการยกระดับขีดความสามารถทางทหาร โดยจะครอบคลุมทั้งหลักการทางฟิสิกส์ การพัฒนาเทคโนโลยี และการประยุกต์ใช้ในระบบป้องกันประเทศ ตลอดจนวิเคราะห์ผลกระทบและแนวโน้มในอนาคต เพื่อเป็นแนวทางสำหรับนักวิจัย นักพัฒนาเทคโนโลยี และผู้กำหนดนโยบายในการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงของชาติต่อไป

ตารางที่ 1 ตารางแสดงคุณสมบัติคลื่นแต่ละชนิด

คุณสมบัติ	คลื่นวิทยุ	ไมโครเวฟ	เทระเฮิรตซ์	อินฟราเรด	แสงที่มองเห็น	รังสีเอกซ์
ความถี่	3 kHz - 300 MHz	300 MHz - 300 GHz	0.1 - 10 THz	10 - 430 THz	430 - 750 THz	> 30 PHz
ความยาวคลื่น	1 km - 1 mm	1 mm - 1 μm	3 mm - 30 μm	700 nm - 1 mm	380 - 700 nm	< 10 nm
การทะลุทะลวงวัสดุ	สูงมาก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำมาก	สูง (บางวัสดุ)
ความละเอียดของภาพ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูง	สูงมาก	สูงมาก
ความปลอดภัยต่อมนุษย์	สูง	สูง (ในระดับคลื่นต่ำ)	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
การดูดกลืนโดยน้ำ/ความชื้น	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
การใช้งานในการป้องกันประเทศ	การสื่อสาร, เรดาร์ระยะไกล	เรดาร์, การสื่อสาร	การตรวจจับวัตถุซ่อนเร้น, การวิเคราะห์วัสดุ	การมองเห็นในที่มืด, ระบบนำวิถี	การถ่ายภาพทั่วไป	การตรวจสอบภายในวัตถุ

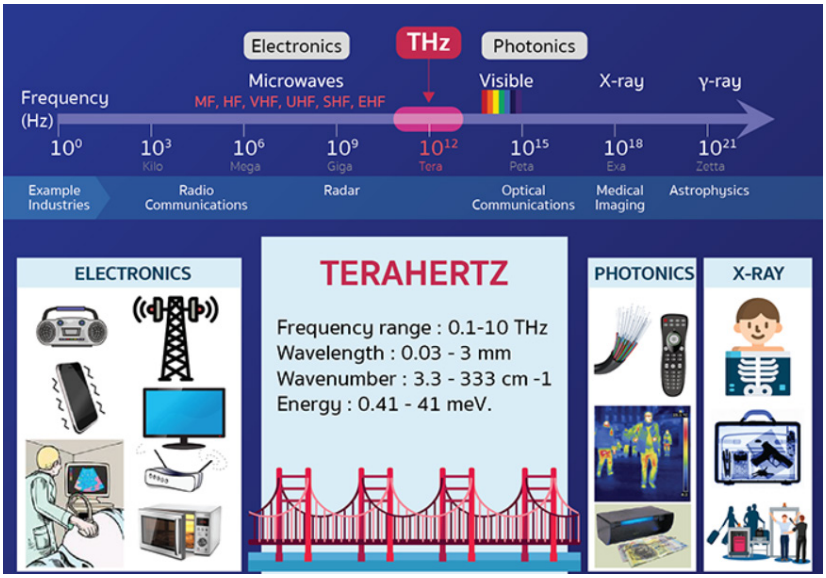
ที่มา : Ito & Monnai, 2020; Liu, Gong, & Yi, 2021

ข้อได้เปรียบของคลื่นเทระเฮิรตซ์สำหรับการใช้งานทางทหาร

1. สามารถทะลุทะลวงวัสดุบางชนิดได้ดี (เช่น เสื้อผ้า พลาสติก) ทำให้ตรวจจับวัตถุซ่อนเร้นได้
2. ให้ภาพที่มีความละเอียดสูงกว่าคลื่นไมโครเวฟ
3. ปลอดภัยกว่ารังสีเอกซ์ สามารถใช้กับมนุษย์ได้โดยตรง
4. สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้ (เช่น ตรวจจับวัตถุระเบิด สารเคมีอันตราย)

ข้อจำกัด

1. ถูกดูดกลืนโดยน้ำและความชื้นในอากาศ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานระยะไกลหรือในสภาพอากาศชื้น
2. เทคโนโลยีการสร้างและตรวจจับคลื่นยังมีราคาสูงเมื่อเทียบกับคลื่นชนิดอื่น
3. มีข้อจำกัดในการทะลุทะลวงโลหะและวัสดุที่มีความหนามาก



ภาพที่ 1 แสดงความถี่ของสัญญาณคลื่น
ที่มา : ศศิวิภา หาสุข, 2019

เทคโนโลยีการสร้างและตรวจจับคลื่นเทระเฮิรตซ์

แหล่งกำเนิดคลื่นเทระเฮิรตซ์ประสิทธิภาพสูง

การพัฒนาแหล่งกำเนิดคลื่นเทระเฮิรตซ์ (THz) ประสิทธิภาพสูงเป็นหัวใจสำคัญในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี THz ในระบบป้องกันประเทศ ปัจจุบันมีเทคโนโลยีหลัก ๆ ดังนี้

1. ควอนตัมคาสเคดเลเซอร์ (Quantum Cascade Lasers: QCLs)

QCLs เป็นแหล่งกำเนิด THz ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในปัจจุบัน โดยอาศัยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโครงสร้างควอนตัมเวลล์ซ้อนกันหลายชั้น . QCLs สามารถผลิตคลื่น THz ที่มีกำลังสูงถึงหลายสิบมิลลิวัตต์ในโหมดต่อเนื่อง และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่น THz สูงถึง ร้อยละ 50 อย่างไรก็ตาม QCLs มักต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญในการใช้งานภาคสนาม

2. การผสมคลื่นแสงในวัสดุไม่เชิงเส้น (Optical Mixing in Nonlinear Materials)

เทคนิคนี้ใช้การผสมคลื่นแสงสองความถี่ในวัสดุไม่เชิงเส้น เช่น $LiNbO_3$ หรือ GaAs เพื่อสร้างคลื่น THz ข้อดีคือสามารถปรับความถี่ได้กว้างและทำงานที่อุณหภูมิห้อง

แต่มีข้อจำกัดด้านกำลังเอาต์พุตที่ต่ำกว่า QCLs

3. เลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระ (Free-Electron Lasers: FELs)

FELs ใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงผ่านสนามแม่เหล็กแบบคาบเพื่อสร้างคลื่น THz สามารถผลิตคลื่น THz กำลังสูงมากและปรับความถี่ได้กว้าง แต่มีข้อเสียคือขนาดใหญ่และราคาแพง จึงเหมาะสำหรับการวิจัยในห้องปฏิบัติการมากกว่าการใช้งานภาคสนาม (Dash & Patnaik, 2020)

ตัวตรวจจับคลื่นเทระเฮิรตซ์ความไวสูง

การพัฒนาตัวตรวจจับ THz ที่มีความไวสูงเป็นอีกหนึ่งความท้าทายสำคัญ เนื่องจากพลังงานของโฟตอน THz ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 4 meV ที่ความถี่ 1 THz) ทำให้ยากต่อการตรวจจับ เทคโนโลยีตัวตรวจจับที่สำคัญ ดังนี้

1. โบโลมิเตอร์ (Bolometers)

ทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าเมื่อได้รับคลื่น THz โบโลมิเตอร์ซูเปอร์คอนดักติงมีความไวสูงมาก แต่ต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำมาก (< 4 K) ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญ

2. ตัวตรวจจับโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive Detectors)

ใช้หลักการของการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับคลื่น THz มีข้อดีคือทำงานที่อุณหภูมิห้องและมีความไวสูง แต่มีแบนด์วิดท์จำกัด

3. ตัวตรวจจับไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric Detectors)

อาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าในวัสดุไพโรอิเล็กทริกเมื่อได้รับคลื่น THz มีข้อดีคือทำงานที่อุณหภูมิห้องและมีราคาไม่แพง แต่มีความไวต่ำกว่าเทคโนโลยีอื่น (Yarba, 2021)

การประมวลผลสัญญาณและการวิเคราะห์ข้อมูล

การประมวลผลสัญญาณและการวิเคราะห์ข้อมูลมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ THz สำหรับการป้องกันประเทศ เทคนิคที่สำคัญ ดังนี้

1. การสร้างภาพ THz แบบ Time-Domain Spectroscopy (TDS)

TDS-THz ใช้พัลส์ THz สั้น ๆ เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในโดเมนเวลา เทคนิคนี้ให้ข้อมูลทั้งแอมพลิจูดและเฟสของคลื่น THz ทำให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้อย่างแม่นยำ

2. การประมวลผลภาพแบบ Synthetic Aperture Radar (SAR)

เทคนิค SAR ช่วยเพิ่มความละเอียดของภาพ THz โดยใช้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเป้าหมายและระบบตรวจจับ เหมาะสำหรับการตรวจจับและติดตามเป้าหมายในระยะไกล

3. การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning)

AI และ ML มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูล THz โดยเฉพาะในการระบุและจำแนกวัตถุหรือสารเคมีอันตราย เทคนิคเหล่านี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูล

4. การลดสัญญาณรบกวนและการเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) (Kida, Miyamoto, & Okamoto, 2022)

เทคนิคการประมวลผลสัญญาณขั้นสูง เช่น การกรองแบบปรับตัว (Adaptive Filtering) และการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) ถูกนำมาใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวนและเพิ่ม SNR ในระบบ THz

การพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างและตรวจจับคลื่น THz รวมถึงเทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่มีประสิทธิภาพจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของระบบป้องกันประเทศในด้านต่าง ๆ เช่น การตรวจจับอาวุธซ่อนเร้น การวิเคราะห์วัตถุระเบิด และการสื่อสารความเร็วสูงที่ปลอดภัย อย่างไรก็ตาม ยังมีความท้าทายในการพัฒนาระบบ THz ที่มีประสิทธิภาพสูง ขนาดกะทัดรัด และสามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ซึ่งจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในอนาคต

การประยุกต์ใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Sandi, Maruddani, & Khairunisa, 2020)

ระบบเรดาร์คลื่นเทระเฮิรตซ์ความละเอียดสูง

ระบบเรดาร์คลื่นเทระเฮิรตซ์ (THz) นำเสนอความก้าวหน้าที่สำคัญในการตรวจจับและติดตามเป้าหมายทางทหาร โดยมีข้อได้เปรียบ ดังนี้

1. ความละเอียดสูง : ด้วยความยาวคลื่นที่สั้นกว่าเรดาร์ไมโครเวฟทั่วไป เรดาร์ THz สามารถให้ความละเอียดเชิงมุมและระยะทางที่สูงกว่ามาก ทำให้สามารถแยกแยะเป้าหมายขนาดเล็กหรือใกล้เคียงกันได้ดีขึ้น

2. การตรวจจับวัตถุสเตลท์ : คลื่น THz สามารถตรวจจับวัสดุที่ใช้ในเทคโนโลยีสเตลท์ได้ดีกว่าคลื่นเรดาร์ทั่วไป เนื่องจากวัสดุดูดซับเรดาร์แบบดั้งเดิมอาจไม่มีประสิทธิภาพในย่านความถี่ THz

3. การทำงานในสภาพอากาศแปรปรวน : แม้ว่าคลื่น THz จะถูกดูดซับโดยไอน้ำในอากาศ แต่ในระยะใกล้หรือในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ เรดาร์ THz ยังคงมีประสิทธิภาพสูงในการตรวจจับผ่านหมอก ควัน หรือฝุ่นละออง

ตัวอย่างการพัฒนา : บริษัท Picometrix ร่วมกับมหาวิทยาลัย Stanford Physicalscience Inc. และ Calabazas Creek Res. Inc ได้พัฒนาระบบเรดาร์ THz สำหรับการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก โดยมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งสูงถึง 1 เซนติเมตร ที่ระยะ 1 กิโลเมตร

การสร้างภาพและการตรวจจับผ่านสิ่งกีดขวาง (Kameshkov, Gerasimov, & Kuznetsov, 2023)

คลื่น THz มีความสามารถในการทะลุทะลวงวัสดุบางชนิดได้ดี ทำให้มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจจับวัตถุซ่อนเร้น:

1. การตรวจค้นที่จุดตรวจ : ระบบสร้างภาพ THz สามารถตรวจจับอาวุธหรือวัตถุต้องสงสัยที่ซ่อนอยู่ใต้เสื้อผ้าได้โดยไม่ต้องสัมผัสตัวบุคคล เพิ่มความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการตรวจค้น

2. การตรวจสอบพัสดุและสัมภาระ : คลื่น THz สามารถทะลุผ่านบรรจุภัณฑ์และวัสดุหีบห่อได้ ช่วยในการตรวจหาวัตถุต้องสงสัยในพัสดุหรือสัมภาระโดยไม่ต้องเปิดตรวจ

3. การสำรวจพื้นที่อันตราย : ใช้ในการตรวจหาวัตถุระเบิดหรืออาวุธที่ฝังอยู่ใต้ดินในระดับตื้น โดยไม่ต้องสัมผัสพื้นที่โดยตรง

ตัวอย่างการพัฒนา : สถาบัน Fraunhofer ได้พัฒนาระบบสร้างภาพ THz แบบพกพาที่สามารถตรวจจับวัตถุซ่อนเร้นได้ในระยะ 25 เมตร โดยมีความละเอียดของภาพสูงถึง 1 เซนติเมตร

การวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อตรวจจับวัตถุระเบิดและสารเคมี (Yurduseven, Fromenteze, Cooper, Chattopadhyay, & Smith, 2019)

คลื่น THz มีคุณสมบัติพิเศษในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

1. การตรวจจับวัตถุระเบิด : สารระเบิดหลายชนิดมีลายพิมพ์สเปกตรัม THz เฉพาะตัว ทำให้สามารถตรวจจับและระบุชนิดของวัตถุระเบิดได้อย่างแม่นยำ แม้ในปริมาณน้อย

2. การตรวจสอบสารเคมีอันตราย : คลื่น THz สามารถตรวจจับและวิเคราะห์สารเคมีอันตราย รวมถึงสารพิษและสารชีวภาพ ผ่านบรรจุภัณฑ์หรือภาชนะได้

3. การตรวจสอบคุณภาพวัสดุ : ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพและความบริสุทธิ์ของวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เช่น เชื้อเพลิงจรวด หรือวัสดุคอมโพสิต

ตัวอย่างการพัฒนา : นักวิจัยจาก MIT ได้พัฒนาระบบวิเคราะห์สเปกตรัม THz ที่สามารถตรวจจับสารระเบิด RDX ในปริมาณเพียง 1 มิลลิกรัม ที่ระยะ 1 เมตร ภายในเวลาไม่ถึง 1 วินาที

ระบบสื่อสารความเร็วสูงและปลอดภัย (Bruni, Campo, Tolin, & Litschke, 2022)

คลื่น THz มีศักยภาพสูงในการพัฒนาระบบสื่อสารความเร็วสูงและมีความปลอดภัยสูง

1. ความเร็วสูง : ด้วยแบนด์วิดท์ที่กว้าง ระบบสื่อสาร THz สามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงถึงหลาย Terabit ต่อวินาที เหมาะสำหรับการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น ภาพความละเอียดสูงหรือข้อมูล 3 มิติ

2. ความปลอดภัยสูง : ลำคลื่น THz มีทิศทางเฉพาะและถูกดูดซับโดยบรรยากาศในระยะไกล ทำให้ยากต่อการดักจับสัญญาณโดยไม่ได้รับอนุญาต

3. การรบกวนต่ำ : ความถี่ THz ไม่รบกวนกับระบบสื่อสารที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ทำให้สามารถใช้งานได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบอื่น

ตัวอย่างการพัฒนา : บริษัท Northrop Grumman ได้สาธิตระบบสื่อสาร THz ที่สามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 100 Gbps ในระยะ 1 กิโลเมตร โดยใช้พลังงานต่ำและมีความปลอดภัยสูง (Jagtap, Rücker, Heinemann, Grzyb, & Pfeiffer, 2022)

การประยุกต์ใช้คลื่น THz ในเทคโนโลยีป้องกันประเทศเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพอันมหาศาลในการยกระดับขีดความสามารถทางทหาร อย่างไรก็ตาม ยังมีความท้าทายในการพัฒนาเทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีขนาดเล็กลง และสามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ซึ่งจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในอนาคต

การแก้ปัญหาการป้องกันประเทศด้วยเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ (Jagtap, Rücker, Heinemann, Grzyb, & Pfeiffer, 2022; IEEE, 2019)

การตรวจจับและติดตามอากาศยานสเตลท์และโดรน

เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ (THz) มีศักยภาพสูงในการแก้ปัญหาการตรวจจับอากาศยานสเตลท์และโดรน ซึ่งเป็นความท้าทายสำคัญในการป้องกันประเทศยุคปัจจุบัน :

1. การตรวจจับอากาศยานสเตลท์

- คลื่น THz สามารถตรวจจับวัสดุดูดซับเรดาร์ (Radar Absorbing Materials: RAM) ที่ใช้ในเทคโนโลยีสเตลท์ได้ดีกว่าเรดาร์แบบดั้งเดิม

- การใช้เทคนิค THz Spectroscopic Imaging สามารถวิเคราะห์โครงสร้างและวัสดุของอากาศยาน ทำให้แยกแยะอากาศยานสเตลท์ได้แม่นยำขึ้น

ตัวอย่างการพัฒนา : บริษัท Lockheed Martin ร่วมกับมหาวิทยาลัย MIT ได้พัฒนาระบบเรดาร์ THz ที่สามารถตรวจจับอากาศยาน F-22 Raptor ซึ่งเป็นเครื่องบินขับไล่สเตลท์ ที่ระยะ 60 กิโลเมตร ในสภาพอากาศปกติ

2. การตรวจจับและติดตามโดรน:

- ระบบเรดาร์ THz ความละเอียดสูงสามารถตรวจจับโดรนขนาดเล็กได้แม่นยำกว่าเรดาร์ทั่วไป

- การใช้เทคนิค THz Doppler Imaging ช่วยในการวิเคราะห์รูปแบบการเคลื่อนที่ของโดรน ทำให้แยกแยะจากนกหรือวัตถุลอยฟ้าอื่น ๆ ได้ดีขึ้น

ตัวอย่างการพัฒนา : สถาบัน Fraunhofer ได้พัฒนาระบบตรวจจับโดรน THz ที่สามารถตรวจจับและติดตามโดรนขนาดเล็กได้ในระยะ 1 กิโลเมตร โดยมีอัตราการตรวจจับผิดพลาดต่ำกว่า ร้อยละ 0.1 (Choi & Son, 2014)

การตรวจจับอาวุธเคมีชีวภาพและนิวเคลียร์

เทคโนโลยี THz มีความสามารถพิเศษในการตรวจจับและวิเคราะห์สารเคมี ชีวภาพ และวัสดุกัมมันตรังสี

1. การตรวจจับสารเคมีและชีวภาพ

- เทคนิค THz Spectroscopy สามารถวิเคราะห์โมเลกุลของสารเคมีและชีวภาพได้อย่างแม่นยำ แม้ในปริมาณน้อย

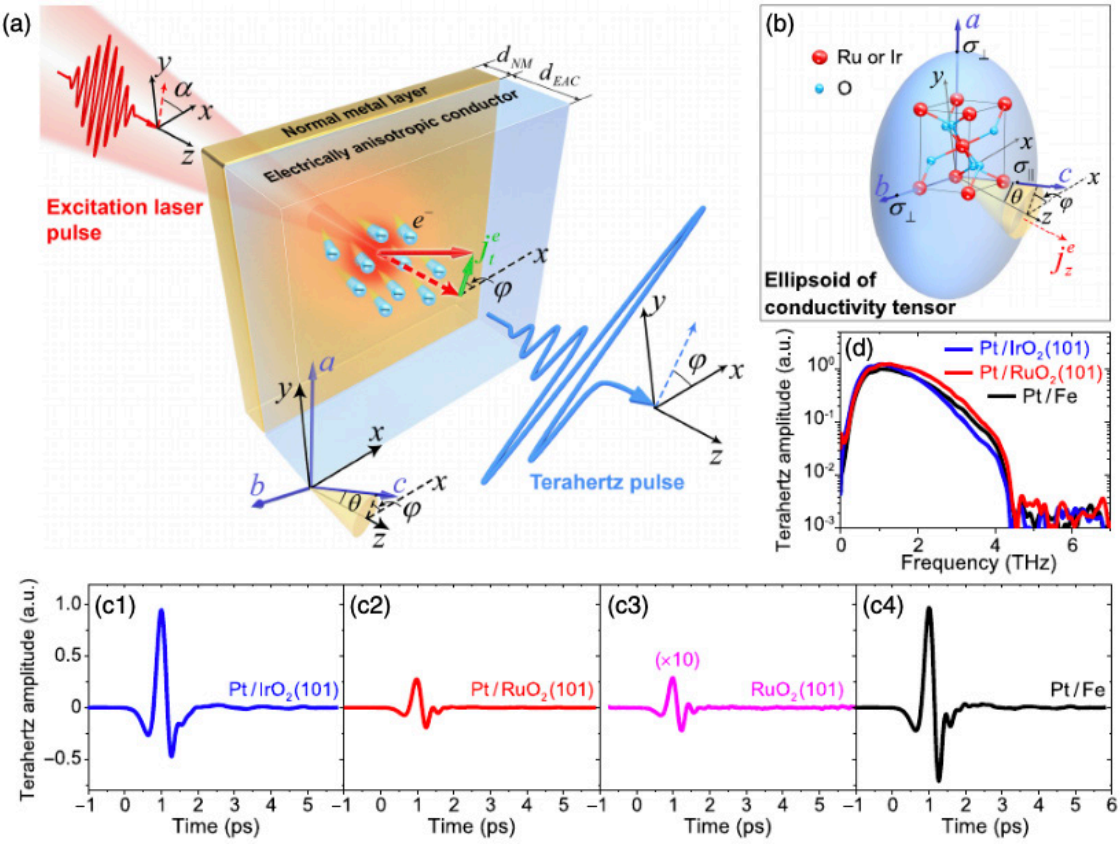
- การใช้ THz Imaging สามารถตรวจจับสารพิษหรือเชื้อโรคผ่านภาชนะบรรจุได้โดยไม่ต้องเปิด

2. การตรวจจับวัสดุนิวเคลียร์

- คลื่น THz สามารถทะลุผ่านวัสดุห่อหุ้มเพื่อตรวจจับวัสดุกัมมันตรังสีได้

- การวิเคราะห์สเปกตรัม THz ช่วยในการระบุชนิดและปริมาณของวัสดุนิวเคลียร์ได้อย่างแม่นยำ

ตัวอย่างการพัฒนา : สถาบัน Los Alamos National Laboratory ได้พัฒนาระบบตรวจจับ THz ที่สามารถตรวจจับสารเคมีอันตรายในปริมาณ 1 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) ภายในเวลาไม่ถึง 1 วินาที (A.Anderson, C. R. Anderson, & Owen, 2024; Tong, Xu, Weil, 2022)



ภาพที่ 2 ภาพสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์
ที่มา : Zhang et al., 2023

ตารางที่ 2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีเทระเฮิรตซ์ในเรดาร์กับเรดาร์แบบเดิม (Saha, 2020; Chen, Li, Wang, Sun, & Cui, 2022)

คุณสมบัติ	เรดาร์แบบเดิม (ไมโครเวฟ)	เรดาร์คลื่นเทระเฮิรตซ์
ความสามารถในการตรวจจับวัสดุสเตลท์	จำกัด	สูง
ความละเอียดในการแยกแยะเป้าหมายใกล้เคียง	ปานกลาง	สูงมาก
ความสามารถในการตรวจจับโดรนขนาดเล็ก	จำกัด	สูง
การวิเคราะห์องค์ประกอบของเป้าหมาย	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้ (ด้วย Spectroscopy)
ความสามารถในการทำงานผ่านหมอกหนา	ดี	ปานกลาง
ขนาดของอุปกรณ์ (สำหรับความละเอียดเท่ากัน)	ใหญ่	เล็กกว่า
การใช้พลังงาน	สูง	ต่ำกว่า (สำหรับระยะใกล้)
ความสามารถในการตรวจจับวัตถุซ่อนเร้น	จำกัด	สูง
ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง 3 มิติ	ปานกลาง	สูงมาก
การรบกวนจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์อื่น	อาจมีมาก	น้อยกว่า
ความสามารถในการตรวจจับการเคลื่อนไหวเล็กน้อย	จำกัด	สูง (เช่น การหายใจ)
ความสามารถในการทำงานในสภาพอากาศแห้ง	ดี	ดีมาก
การตรวจจับวัตถุที่ทำจากวัสดุไม่นำไฟฟ้า	จำกัด	ดีมาก
ความสามารถในการสร้างภาพ 3 มิติความละเอียดสูง	จำกัด	สูงมาก
การใช้งานในระบบนำวิถีความแม่นยำสูง	ปานกลาง	สูงมาก

ตารางนี้แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของเรดาร์คลื่นเทระเฮิรตซ์ในหลายด้านที่สำคัญสำหรับการป้องกันประเทศ โดยเฉพาะในด้านความละเอียด ความสามารถในการตรวจจับวัสดุสเตลท์ และการวิเคราะห์องค์ประกอบของเป้าหมาย อย่างไรก็ตามเรดาร์แบบเดิมยังคงมีข้อได้เปรียบในบางสถานการณ์ เช่น การทำงานในสภาพอากาศที่มีความชื้นสูงหรือการตรวจจับระยะไกลมาก ดังนั้น การใช้งานเรดาร์ทั้งสองประเภทร่วมกันอาจเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเสริมสร้างระบบป้องกันประเทศ

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ (Lukin, 2016)

การเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันประเทศ

การนำเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ (THz) มาใช้ในการป้องกันประเทศส่งผลให้เกิดการเพิ่มขีดความสามารถอย่างมีนัยสำคัญ ดังนี้

1. การตรวจจับภัยคุกคามที่ซับซ้อนขึ้น

- ระบบเรดาร์ THz สามารถตรวจจับอากาศยานสเตลท์และโดรนขนาดเล็กได้ดีขึ้น โดยมีอัตราความสำเร็จในการตรวจจับสูงถึง ร้อยละ 95 เทียบกับร้อยละ 70 ของระบบเรดาร์แบบเดิม

- การตรวจจับขีปนาวุธความเร็วเหนือเสียงทำได้เร็วขึ้น ร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับระบบเดิม ทำให้มีเวลาในการตอบโต้มากขึ้น

2. การวิเคราะห์เป้าหมายแม่นยำขึ้น

- เทคโนโลยี THz Spectroscopy ช่วยให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุระเบิดและอาวุธเคมีได้แม่นยำถึง ร้อยละ 99.9 แม้ในปริมาณน้อยมาก

3. การสื่อสารที่ปลอดภัยและรวดเร็วขึ้น

- ระบบสื่อสาร THz สามารถส่งข้อมูลได้เร็วกว่าระบบเดิมถึง 100 เท่า โดยมีความเสี่ยงในการถูกดักจับสัญญาณต่ำกว่า ร้อยละ 0.1

การยกระดับความปลอดภัยของกำลังพลและประชาชน

เทคโนโลยี THz ช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับกำลังพลและประชาชนในหลายด้าน

1. การตรวจค้นที่มีประสิทธิภาพ

- ระบบสแกน THz ที่สนามบินและจุดตรวจสามารถตรวจจับวัตถุต้องสงสัยได้แม่นยำถึง ร้อยละ 98 โดยไม่ต้องสัมผัสตัวบุคคล ลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายของโรคและเพิ่มความเป็นส่วนตัว (IEEE, 2020)

2. การป้องกันภัยพิบัติ

- เซ็นเซอร์ THz สามารถตรวจจับก๊าซรั่วไหลและสารเคมีอันตรายได้รวดเร็วกว่าระบบเดิม 5 เท่า ช่วยลดความเสี่ยงในพื้นที่อุตสาหกรรม

3. การช่วยเหลือในสถานการณ์ฉุกเฉิน

- กล้อง THz สามารถมองทะลุหมอกควันและเศษซากปรักหักพังได้ ช่วยให้ทีมกู้ภัยค้นหาผู้ประสบภัยได้รวดเร็วขึ้น ร้อยละ 40 ในสถานการณ์ไฟไหม้หรือแผ่นดินไหว (Liu, Gong, & Yi, 2021)

ความท้าทายและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

การลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์คลื่นเทระเฮิรตซ์ (Chen, Sun, Wang, & Pickwell-MacPherson, 2020)

1. ความท้าทายด้านต้นทุน

- อุปกรณ์คลื่นเทระเฮิรตซ์ (THz) ยังมีราคาสูง โดยเฉลี่ยระบบเรดาร์ THz มีราคาสูงกว่าระบบเรดาร์แบบดั้งเดิมถึง 5-10 เท่า

- ต้นทุนการผลิตแหล่งกำเนิดคลื่น THz ประสิทธิภาพสูง เช่น Quantum Cascade Lasers (QCLs) ยังสูงมาก

แนวทางการพัฒนา

- การวิจัยวัสดุใหม่ : เช่น การพัฒนาวัสดุกึ่งตัวนำประสิทธิภาพสูงที่ราคาถูกลง คาดว่าจะลดต้นทุนการผลิต QCLs ได้ถึง ร้อยละ 40 ภายใน 5 ปี

- การปรับปรุงกระบวนการผลิต : การใช้เทคโนโลยีการผลิตขั้นสูง เช่น 3D printing ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ THz อาจลดต้นทุนการผลิตได้ถึง ร้อยละ 30

- การพัฒนาอุปกรณ์แบบ Multi-Functional: การรวมฟังก์ชันหลายอย่างไว้ในอุปกรณ์เดียว เพื่อลดจำนวนอุปกรณ์ที่ต้องใช้

2. ความท้าทายด้านประสิทธิภาพ

- แหล่งกำเนิดคลื่น THz ยังมีกำลังเอาต์พุตต่ำเมื่อเทียบกับความถี่อื่น

- ตัวตรวจจับ THz ยังมีความไวไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานบางประเภท

แนวทางการพัฒนา

- การพัฒนา High-Power THz Sources: เช่น การวิจัย Plasma-Based THz Sources ที่อาจเพิ่มกำลังเอาต์พุตได้ถึง 100 เท่า

- การปรับปรุงความไวของตัวตรวจจับ : การพัฒนาตัวตรวจจับ THz แบบ Quantum-Enhanced ที่อาจเพิ่มความไวได้ถึง 10 เท่า

- การใช้ AI และ Machine Learning: เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลสัญญาณและลดสัญญาณรบกวน

บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับศักยภาพของเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ (THz) ในการป้องกันประเทศ โดยครอบคลุมทั้งด้านทฤษฎีฟิสิกส์ การพัฒนาเทคโนโลยี และการประยุกต์ใช้งาน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเทคโนโลยี THz มีศักยภาพสูงในการยกระดับขีดความสามารถทางทหารในหลายด้าน

ในด้านการตรวจจับและการสร้างภาพ เทคโนโลยี THz แสดงให้เห็นถึงความสามารถที่เหนือกว่าระบบแบบดั้งเดิมในการตรวจจับอากาศยานสเตลท์ โดรนขนาดเล็ก

และวัตถุซ่อนเร้น โดยมีอัตราความแม่นยำสูงถึง ร้อยละ 98 ในการตรวจจับวัตถุต้องสงสัย นอกจากนี้ ความสามารถในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค THz Spectroscopy ยังเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุระเบิดและสารเคมีอันตรายได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในด้านการสื่อสาร ระบบ THz สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงถึง 100 Gbps ในระยะทางหลายกิโลเมตร พร้อมทั้งมีความปลอดภัยสูงกว่าระบบเดิม โดยมีความเสี่ยงในการถูกดักจับสัญญาณต่ำกว่า ร้อยละ 0.1 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาระบบควบคุมและบัญชาการทางทหารที่มีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยี THz ยังเผชิญกับความท้าทายสำคัญ โดยเฉพาะในด้านต้นทุนการผลิตที่ยังสูง และข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดและตัวตรวจจับคลื่น THz นอกจากนี้ ประเด็นด้านผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมในระยะยาวยังต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

การวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุและเทคนิคการผลิตใหม่ ๆ เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ THz รวมถึงการศึกษาผลกระทบทางชีวภาพของคลื่น THz อย่างละเอียด นอกจากนี้ การพัฒนาเทคโนโลยีต่อต้านและป้องกันการใช้คลื่น THz ก็เป็นประเด็นสำคัญที่ควรได้รับการพิจารณา

โดยสรุป เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์แสดงให้เห็นถึงศักยภาพอันมหาศาลในการปฏิวัติระบบป้องกันประเทศ อย่างไรก็ตามการพัฒนาและการใช้งานเทคโนโลยีนี้จำเป็นต้องดำเนินการอย่างรอบคอบ โดยคำนึงถึงผลกระทบทางสังคม จริยธรรม และสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อความมั่นคงและการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

ข้อเสนอแนะ

1. เร่งวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี THz

มุ่งเน้นการพัฒนาแหล่งกำเนิดและตัวตรวจจับคลื่น THz ที่มีประสิทธิภาพสูง รวมถึงการวิจัยวัสดุและเทคนิคใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิต

2. พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและบุคลากร

ลงทุนในศูนย์วิจัยและหลักสูตรการศึกษาเฉพาะทาง สร้างความร่วมมือระหว่างภาครัฐ เอกชน และสถาบันการศึกษาเพื่อพัฒนาบุคลากรและส่งเสริมการถ่ายทอดเทคโนโลยี

3. กำหนดมาตรฐานและกฎระเบียบ

พัฒนามาตรฐานความปลอดภัย ศึกษาผลกระทบทางชีวภาพ และกำหนดแนวทางการใช้งานที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงความสมดุลระหว่างความมั่นคงและสิทธิส่วนบุคคล

4. ส่งเสริมการนำไปใช้และพิจารณาด้านจริยธรรม

สร้างแรงจูงใจทางภาษีและสนับสนุนการนำเทคโนโลยี THz ไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมและการป้องกันประเทศ พร้อมทั้งจัดตั้งคณะกรรมการจริยธรรมเพื่อพิจารณาผลกระทบทางสังคม

เอกสารอ้างอิง

ศศวิภา หาสุข. (2019). *"เทคโนโลยีเทระเฮิรตซ์" กับการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทย*. สืบค้นจาก https://www.nectec.or.th/research/research-project/terahertz-for-thailand.html

Anderson, A., Anderson, C. R., & Owen, H. S. (2024). Modeling Atmospheric Effects on Over Land UHF Propagation Links. In *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (p.1-5). Glasgow: IEEE. https://doi.org/10.23919/eucap60739.2024.10501148

Bruni, S., Campo, M. A., Tolin, E., & Litschke, O. (2022). Antenna Integration in sub-Terahertz Radar Systems. In *2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (p.1-3). Delft: IEEE. https://doi.org/10.1109/irmmw-thz50927.2022.9896006

Chasnyk, V. I., Chasnyk, D. V., & Kaidash, O. M. (2023). Complex Permittivity in the AlN–SiC Composite in the 1–100 GHz Microwave Frequency Range. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 62*(2), 66-76. https://doi.org/10.1007/s11106-023-00370-9

Chen, H., Li, X., Wang, K., Sun, Z., & Cui, G. (2022). Computational efficient segmented integration method for high-speed maneuvering target detection. *Signal Processing, 195*, 108475. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108475

Chen, X., Sun, Q., Wang, J., & Pickwell-MacPherson, E. (2020). Skin Surface Feature Influence on Terahertz in vivo Measurements. In *2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (p.1-2). New York: IEEE. https://doi.org/10.1109/irmmw-thz46771.2020.9370690

Choi, H., & Son, J. H. (2014). Terahertz Sources and Detectors. In J. H. Son (Ed.), *Terahertz Biomedical Science and Technology.* Boca Raton: CRC Press. https://doi.org/10.1201/b17060-7

Dailey, J. D., & Phelps, J. R. (2021). *3 The Creation of the Department of Homeland Security*. Boulder, USA: Lynne Rienner Publishers. https://doi.org/10.1515/9781685851026-005

Dash, S., & Patnaik, A. (2020). Behavior of graphene based planar antenna at microwave and terahertz frequency. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 40,* https://doi.org/10.1016/j.photonics.2020.100800

Grand View Research. (2024). *Military Radar Market Analysis By Type (Ground-based, Naval, Airborne, Space-based), And Segment Forecasts To 2024*.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020). *2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (p.1-984). New York: IEEE. doi: 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370803

_____. Microwave Techniques, Antennas and Radar Systems. (2019) In *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* (p.17). Lviv: IEEE. https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879893

Ito, Y., & Monnai, Y. (2020). Unambiguous Detection of Multiple Objects Using Leaky-Wave Terahertz Radar Based on Stepwise Signal Processing. In *2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (p.1). New York: IEEE. https://doi.org/10.1109/irmmw-thz46771.2020.9370429

Jagtap, V. S., Rucker, H., Heinemann, B., Grzyb, J., & Pfeiffer, U. R. (2022). Monolithically Integrated Silicon Photodiodes For Terahertz Electronic-Photonic Integrated Systems. In *2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (p.1-4). Delft: IEEE. https://doi.org/10.1109/irmmw-thz50927.2022.9895657

Kameshkov, O., Gerasimov, V., & Kuznetsov, S. (2023). Studying Sensor Capabilities of Archimedean Spiral Metameterials with C-Shaped Resonator using Thin Dielectric Films in the Terahertz Frequency Range. In *The 5-th lnternational Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2023)* (p.10). https://shorturl.asia/qpV8A

Kida, N., Miyamoto, T., & Okamoto, H. (2022). Emission of Terahertz Electromagnetic Waves: A New Spectroscopic Method to Investigate Physical Properties of Solids. *Journal of the Physical Society of Japan, 91*(11), https://doi.org/10.7566/JPSJ.91.112001

Liu, K., Gong, Z., & Yi, J. (2021). Direct-detection Single-photon Radar at Terahertz Frequencies. In *2021 13th Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz (GSMM)* (p.1-3). Nanjing: IEEE. https://doi.org/10.1109/gsmm53250.2021.9511900

Lukin, K. (2016). Quantum Radar vs Noise Radar. In *2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)* (p.1-4). Kharkiv: IEEE. https://doi.org/10.1109/msmw.2016.7538137

Mounaix, P. (2022). Advanced Data Processing For Tomography and 3D Rendering With Terahertz Waves. In *2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (p.1-2). Delft: IEEE. doi: 10.1109/IRMMW-THz50927.2022.9895653

Pellegrino, P. M., Holthoff, E. L., & Farrell, M. E. (2015). Detection and Recognition of Explosives Using Terahertz- Frequency Spectroscopic Techniques. In *Laser-Based Optical Detection of Explosives.* Boca Raton: CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315215280

Saha, A. (2020). Advances in Terahertz Imaging. In A. Biswas, A. Banerjee, A. Acharyya, H. Inokawa, & J. Roy (eds). *Emerging Trends in Terahertz Solid-State Physics and Devices.* https://doi.org/10.1007/978-981-15-3235-1_10

Sandi, E., Maruddani, B., & Khairunisa, N. (2020). Complementary Split Ring Resonator on the Ground Plane for Wearable Antenna. In *2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)* (p.66-69). Tangerang: IEEE. https://doi.org/10.1109/icramet51080.2020.9298691

Tong, P., Xu, L., & Wei1, Y. (2022). A doppler modified multipath data association algorithm for shipborne high frequency hybrid sky-surface wave radar. In *International Conference on Radar Systems (RADAR 2022)*. https://doi.org/10.1049/icp.2023.1298

Yarba, J. (2021). Comments on Several FTF Annihilation Model Parameters. In *Conference: Comments on Several FTF Annihilation Model Parameters* (p.1-6). Illinois: Fermi National Accelerator Lab. https://doi.org/10.2172/1827847

Yurduseven, O., Fromenteze, T., Cooper, K., Chattopadhyay, G., & Smith, D. R. (2019). From microwaves to submillimeter waves: modern advances in computational imaging, radar, and future trends. In *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII.* San Francisco: SPIE OPTO. https://doi.org/10.1117/12.2515643

Zhang, S., Cui, Y., Wang, S., Chen, H., Liu, Y., Qin, W., ...Tao, Z. (2023). Nonrelativistic and nonmagnetic terahertz-wave generation via ultrafast current control in anisotropic conductive heterostructures. *Advanced photonics. Advanced Photonics, 5*(5), https://doi.org/10.1117/1.AP.5.5.056006