

ความเป็นไปได้ในการใช้เสียงพูดเป็น สัญญาณลายน้ำ

อรรณรัตน์ อมรรักษา และ พุศยน นินทนางศา
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัล เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้จัดเตรียมหลักฐานที่แสดงถึงความเป็นเจ้าของในตัวผลงานมัลติมีเดียใดๆ โดยการใส่ข้อมูลที่เรียกว่าสัญญาณลายน้ำดิจิทัลอย่างลับๆ ลงไปในตัวข้อมูลต้นฉบับก่อนที่จะเผยแพร่ข้อมูลเหล่านั้นให้กับคนทั่วไป ซึ่งสัญญาณลายน้ำนี้จะเปรียบเสมือนกับตราสัญลักษณ์ที่มองไม่เห็นที่ติดไปกับตัวข้อมูล เพื่อใช้เป็นหลักฐานที่เกี่ยวข้องกับลิขสิทธิ์ในภายหลัง บทความนี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้สัญญาณเสียงพูดมาทำเป็นสัญญาณลายน้ำดิจิทัล โดยมีจุดประสงค์หลักที่จะพัฒนาวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัล ที่สัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีจากการประมวลผลภาพดิจิทัลชนิดต่างๆ วิธีที่ใช้นี้อ้างอิงถึงหลักความจริงที่ว่าในสัญญาณเสียงจะประกอบไปด้วยความซ้ำซ้อนอยู่เป็นจำนวนมาก แม้ว่าสัญญาณเสียงที่ฝังอยู่ในข้อมูลต้นฉบับจะผ่านการโจมตีมาอย่างรุนแรง ก็ยังคงเหลือความซ้ำซ้อนที่มากเพียงพอที่ประสาทสัมผัสทางหูของคนเราจะสามารถรับรู้ และทำความเข้าใจถึงเนื้อความที่อยู่ภายในสัญญาณเสียงพูดนั้นได้ ยิ่งไปกว่านั้น ความชาญฉลาดของระบบการรับฟังของมนุษย์ที่สามารถปรับตัวอย่างรวดเร็ว ในการที่จะพยายามทำความเข้าใจในเนื้อความภายในสัญญาณเสียงที่เปิดฟังซ้ำๆ กัน จะเพิ่มความเป็นไปได้ที่จะเข้าใจถึงเนื้อความที่กล่าวไว้ภายในสัญญาณเสียงนั้นๆ อย่างถูกต้อง ผลลัพธ์ที่ได้ในการทดลองแสดงให้เห็นว่า ด้วยวิธีการที่นำเสนอมานี้ สัญญาณลายน้ำจะมีความทนทานต่อการโจมตีชนิดต่างๆ ได้ดีเช่น การปรับค่าความสว่าง การปรับค่าความเข้มสี การบวกด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน การบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพตามมาตรฐาน JPEG และการกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน โดยวัดจากการที่ผู้ฟังจำนวนหนึ่งยังสามารถรับรู้และเข้าใจถึงเนื้อความที่อยู่ภายในสัญญาณเสียงพูดที่ถูกลบคั่นมา ภายหลังที่ผ่านการถูกโจมตีแล้ว

Possibility of Implementing Raw Speech as Watermark Signal

Thumrongrat Amornraksa and Prusayon Nintanavongsa

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi

Abstract

Digital watermarking is a method used to provide an evidence of intellectual ownership in any multimedia data, by secretly inserting some information called watermark signal into the original data, before distributing it to the public. This information is considered as an invisible symbol attached to the distributed data, and later used as a copyright related evidence. The possibility of implementing a raw speech as a watermark signal is studied in this paper, with the aim at developing a digital watermarking method such that the watermark signal is robust against various digital image processing based attacks. This approach is based on the fact that the raw speech contains a considerable amount of redundancies. Even if the embedded raw speech is badly attacked, there still be enough redundancies left for the human perceptual system to recognize and understand the contents contained in that speech. Furthermore, the impressive intelligence of the human perceptual system, as it tends to adjust and learn quickly to determine the information within the repeated speech, enhances the probability of correctly understanding what was said in that raw speech. The results from the experiment show that, by using the proposed method, the watermark signal is robust against various types of attacks including brightness enhancement contrast enhancement, Gaussian noise adding, JPEG image compression standard and high pass filtering. This is justified by a number of listeners who can correctly understand the contents contained within the extracted watermark signal, after being attacked.

บทนำ

การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีทางด้านมัลติมีเดีย ทำให้ข้อมูลข่าวสารส่วนใหญ่ถูกเก็บบันทึกไว้ในรูปแบบดิจิทัล ซึ่งมีข้อดีที่ว่าข้อมูลต่างๆ เหล่านั้นสามารถนำมาทำซ้ำได้หลายๆ ครั้ง โดยไม่มีการสูญเสียคุณภาพเช่น ความคมชัดของข้อมูลแต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม หากข้อมูลที่ถูกทำซ้ำขึ้นนั้นถูกกระทำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของข้อมูลอย่างถูกต้องแล้ว ก็จะนำไปสู่ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการละเมิดลิขสิทธิ์ทรัพย์สินทางปัญญา ในปัจจุบันนี้ มีวิธีการหลากหลายที่ถูกนำมาใช้ในการป้องกันและรับมือกับปัญหาดังกล่าว การเข้ารหัสลับข้อมูล (data encryption) ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยการเข้ารหัสลับที่ตัวข้อมูลต้นฉบับก่อนที่จะทำการเผยแพร่ข้อมูลนั้นออกไป ผู้ที่มีกุญแจรหัสลับเท่านั้นที่จะสามารถเห็นหรือใช้งานข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าคนที่มีกุญแจรหัสลับคือ คนที่ต้องการทำซ้ำตัวข้อมูลอย่างผิดกฎหมาย ปัญหาของการละเมิดลิขสิทธิ์ก็ยังคงมีอยู่เช่นเดิม ดังนั้น วิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลจึงได้ถูกคิดค้นขึ้นมา โดยมีจุดประสงค์ที่จะนำมาใช้รับมือกับปัญหาดังกล่าวข้างต้น ยกตัวอย่างเช่น โดยการฝังข้อมูลที่เราเรียกว่า สัญญาณลายน้ำอย่างลับๆ ลงในรูปภาพต้นฉบับ ซึ่งข้อมูลที่จะถูกนำไปฝังนั้นจะต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อรูปภาพต้นฉบับอย่างเด่นชัดจนสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า สัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังนี้อาจจะเป็นข้อมูลใดๆ ที่บ่งบอกได้ถึงความเป็นเจ้าของในตัวรูปภาพ ผู้ที่ได้รับอนุญาตในการใช้รูปภาพ ผู้ที่มีรูปภาพเก็บไว้ในครอบครอง หรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการซื้อขายรูปภาพนั้นๆ เป็นต้น เมื่อมีการทำซ้ำรูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำดังกล่าวฝังอยู่ สัญญาณลายน้ำนั้นก็จะติดไปกับรูปภาพที่ถูกทำซ้ำขึ้นมาใหม่ด้วย และในภายหลังถ้ามีการค้นพบรูปภาพที่ถูกทำซ้ำขึ้นอย่างไม่ถูกต้อง สัญญาณลายน้ำที่ติดไปกับรูปภาพที่ถูกทำซ้ำขึ้นนี้ จะถูกกู้กลับคืนมาและนำไปใช้เป็นหลักฐานในการบ่งชี้ถึงตัวเจ้าของที่แท้จริง หรือใช้ในการหาตัวผู้ที่กระทำความผิดโดยการทำซ้ำตัวข้อมูลอย่างไม่ถูกต้องก็ได้

โดยทั่วไป วิธีการที่ใช้ในการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลจะถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการที่สัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังอยู่ภายในตัวข้อมูลต้นฉบับจะต้องมีความทนทานต่อการโจมตีชนิดต่างๆ ทั้งที่โดยตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจก็ตาม ในการที่จะบรรลุถึงวัตถุประสงค์เช่นนั้น นักวิจัยหลายๆ คนจำเป็นต้องเพิ่มความแรงของสัญญาณลายน้ำที่จะฝังลงในข้อมูลต้นฉบับ เพื่อให้มีความทนทานต่อกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัลชนิดต่างๆ ซึ่งการทำเช่นนี้จะส่งผลให้คุณภาพของข้อมูลต้นฉบับเกิดการลดทอนลงอย่างเด่นชัดภายหลังจากที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำจนสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดัง

นั้นเพื่อให้สัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังมีความทนทานมากขึ้น ขณะที่ข้อมูลที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำมีการลดทอนคุณภาพน้อยที่สุด การประยุกต์ใช้เนื้อหาที่อยู่ในสัญญาณเสียงพูดมาเป็นสัญญาณลายน้ำจึงถูกนำมาพิจารณา

ในงานวิจัยนี้ เราได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลในข้อมูลชนิดรูปภาพโดยใช้สัญญาณเสียงพูด (raw speech) มาทำเป็นสัญญาณลายน้ำ เพื่อให้มีความทนทานต่อการโจมตีชนิดต่างๆ ในวิธีการที่ได้นำเสนอ นั้นสัญญาณเสียงพูดและเนื้อความที่อยู่ภายในของมันจะถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณลายน้ำ เพื่อฝังลงในรูปภาพต้นฉบับ โดยในกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำ สัญญาณเสียงพูดที่ถูกกู้กลับคืนมาจะถูกนำมาเปิดฟังตามลำดับที่สุ่มขึ้นให้กับคนทั่วไป เพื่อให้ทำการเปรียบเทียบถึงเนื้อความที่อยู่ภายในสัญญาณเสียงพูดนั้นๆ ว่าเป็นตัวเดียวกันกับที่ถูกฝังไว้ในตอนแรกหรือไม่ แทนที่จะเป็นการเปรียบเทียบค่าความเหมือนหรือความแตกต่างของลักษณะของสัญญาณลายน้ำทั้งสองดังที่ใช้น้อยอยู่ในปัจจุบัน ในกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำได้อาศัยหลักการกล้ำความลึก (amplitude modulation) ของสัญญาณรูปภาพต้นฉบับในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงิน ซึ่งสัญญาณเสียงพูดจะถูกฝังลงในแต่ละจุดภาพของรูปภาพดิจิทัลนั้นๆ โดยตรง ส่วนกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำนั้น ได้ใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยรูปภาพดิจิทัล (digital image averaging) แบบตัดกันของจุดภาพข้างเคียง (cross-shaped neighborhood pixels) เพื่อคาดเดาค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังลงไป ข้อดีของวิธีการที่ใช้นี้ก็คือ สัญญาณลายน้ำสามารถกู้กลับคืนมาได้โดยไม่ต้องใช้รูปภาพต้นฉบับมาเป็นส่วนประกอบ ในหัวข้อต่อไป จะกล่าวถึงงานวิจัยทางด้านการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลโดยรวมที่ได้มีการนำเสนอมาในอดีต ในหัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และรายละเอียดของวิธีการฝังและกู้คืนสัญญาณลายน้ำที่ใช้ทดลองในงานวิจัย หัวข้อที่ 4 จะเป็นการแสดงผลการทดลองและการอภิปรายถึงผลลัพธ์ที่ได้ และสุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการทำวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัล และการซ่อนข้อมูล (data hiding) ลงในสัญญาณเสียงที่สำคัญและได้มีการนำเสนอไปในอดีตแล้วมีดังต่อไปนี้ Li และคณะฯ ได้เสนอวิธีการซ่อนข้อมูลลงในโดเมน subband[1] และในโดเมน cepstrum[2] ของสัญญาณเสียง ซึ่งตัวข้อมูลจะถูกฝังไว้โดยการจัดการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยทางสถิติของสัมประสิทธิ์ในโดเมนที่ได้เลือกไว้ รูปแบบของเสียงในเชิงจิตวิทยาได้ถูก

นำมาใช้ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลที่ซ่อนมีความทนทานและความปลอดภัย แม้จะถูกโจมตีโดยวิธีการหลายๆ รูปแบบก็ตาม Gruhl และคณะ[3] ได้เสนอวิธีการซ่อนเสียงสะท้อน ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการซ่อนข้อมูลทางเสียงอันเป็นที่รู้จักกันดีที่สุดวิธีหนึ่ง โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ระบบการรับฟังเสียงของมนุษย์ไม่สามารถแยกแยะเสียงสะท้อนจากเสียงต้นแบบได้ โดยเฉพาะเมื่อความล่าช้าและช่วงกว้างของสัญญาณเสียงได้ถูกควบคุมอย่างเหมาะสม

Sakaguchi และคณะ[4] ได้ศึกษาถึงการกลับหัวของสัญญาณเสียงว่า จะมีผลกระทบต่อกรับฟังของมนุษย์อย่างไร และได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในการซ่อนข้อมูลจากการทดลองโดยการทดสอบกับคำพูดทั้งหมด 20 ประโยคที่นำมาจากคลังข้อมูล TIMIT เพื่อค้นหาว่า มนุษย์สามารถแยกแยะระหว่างสัญญาณเสียงต้นฉบับและสัญญาณเสียงที่ถูกกลับหัวได้หรือไม่ รวมไปถึงข้อมูลเลขฐานสองที่ถูกซ่อนเอาไว้โดยการกลับหัวสัญญาณ ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จของวิธีการดังกล่าว โดยที่ผู้ฟังส่วนใหญ่ไม่สามารถสังเกตถึงความเปลี่ยนแปลงได้ ขณะที่ Mukherjee และคณะ[5] ได้เสนอวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัล โดยการซ่อนคำพูดที่เป็นสัญญาณเสียงดิจิทัลขนาด 8 kHz ลงในสัญญาณวีดิโอขนาด 30 เฟรมต่อวินาที ในรูปแบบของ QCIF โดยสัญญาณเสียงพูดจะถูกทำการเข้ารหัส ก่อนที่จะทำการฝังลงไปภายในสัมประสิทธิ์ของ LL-HH subband ผลลัพธ์ของสัญญาณเสียงที่ได้ภายหลังกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำแล้ว จะมีความทนทานต่อกระบวนการบีบอัดข้อมูลมาตรฐานที่มีอัตราการบีบอัดสูงๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น มาตรฐาน H.263 และ H.263

วิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลที่ถูกนำมาทดลองใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ถูกนำเสนอโดย Kutter และคณะ[6] โดยอาศัยหลักการของการกล้าความลึกของสัญญาณรูปภาพในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงิน สัญญาณลายน้ำจะถูกฝังลงในโดเมนเชิงพื้นที่ของสัญญาณภาพ โดยใช้วิธีบวกค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำลงไปตรงๆ ที่ค่าขนาดของจุดภาพของสัญญาณภาพ ผลจากการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้มีความคงทนต่อการปรับแต่งรูปภาพและกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัลชนิดต่างๆ ขณะที่กระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำมีความรวดเร็วและไม่ซับซ้อน และนี่คือเหตุผลหลักที่เราได้เลือกวิธีการดังกล่าวมาใช้ในการทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้เบื้องต้นในงานวิจัยนี้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการที่ใช้

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการฟังและกู้คืนสัญญาณลายน้ำ โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน คือ คุณลักษณะและรูปแบบของสัญญาณเสียงพูด วิธีการที่ใช้ในการฟังและกู้คืนสัญญาณลายน้ำ และแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองรวมทั้งวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบสัญญาณลายน้ำ

คุณลักษณะและรูปแบบของสัญญาณเสียงพูด

เป็นที่ทราบกันดีว่า สัญญาณเสียงพูดมีคุณลักษณะเด่นหลายประการที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวเข้ารหัสสัญญาณเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] ยกตัวอย่างเช่น ความน่าจะเป็นในการกระจายความเข้มของสัญญาณเสียงที่ไม่เท่ากัน ความซ้ำซ้อนที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสัญญาณเสียง คุณสมบัติอันหลังนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลโดยใช้สัญญาณเสียงเป็นหลัก ซึ่งจะมี ความทนทานต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่สอดแทรกเข้ามาในภายหลัง เนื่องมาจากความซ้ำซ้อนบางส่วนที่ยังคงเหลืออยู่ภายในสัญญาณเสียงมีจำนวนมากเพียงพอที่คนทั่วๆ ไปจะสามารถรับรู้และทำความเข้าใจได้ว่าเนื้อหาที่พูดคืออะไร สาเหตุดังกล่าวมาจากหลักความจริงที่ว่า ความซ้ำซ้อนในสัญญาณเสียงมีอยู่ทุกๆ ช่วงความถี่ [8] ถึงแม้ว่าบางส่วนของสัญญาณเสียงพูดจะเสียหายหรือสูญหายไปบ้าง แต่ความซ้ำซ้อนในสัญญาณเสียงส่วนที่เหลือยังสามารถถูกนำไปใช้ได้ โดยจะส่งผลโดยรวมต่อคุณภาพของสัญญาณเสียงทั้งหมด ในการทดสอบหลักความจริงนี้ ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการกล้ำความถี่รหัสแบบพัลส์ (pulse code modulation, PCM) ในการเปลี่ยนหรือเข้ารหัสเสียงพูดที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ก่อนที่จะทำการฝังลงในข้อมูลต้นฉบับชนิดรูปภาพในฐานะสัญญาณลายน้ำและทำการโจมตีข้อมูลดังกล่าว

วิธีการกล้ำความถี่รหัสแบบพัลส์ เป็นลักษณะของการเข้ารหัสข้อมูลแบบหนึ่ง โดยทั่วไปจะหมายถึง การเข้ารหัสสัญญาณไฟฟ้าในลักษณะต่อเนื่อง (analog signal) โดยทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพในตัวสัญญาณต้นฉบับน้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มค่าความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล หรือลดค่าความกว้างของย่านความถี่ที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูล อีกทั้งการเข้ารหัสของสัญญาณในแต่ละตัวอย่าง นั้นจะถูกกระทำอย่างเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นวิธีการกล้ำความถี่รหัสแบบพัลส์ จึงเหมาะกับการเข้ารหัสรูปคลื่นสัญญาณที่มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ข้อดีอย่างหนึ่งของวิธีการเข้ารหัสแบบนี้และเป็นสาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกนำมาใช้ก็คือ สัญญาณภายหลังจากการเข้ารหัสจะยังคงมีความซ้ำซ้อนเหลืออยู่ภายใน

สัญญาณเป็นจำนวนมาก Flanagan[9] ได้แสดงว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของความเกี่ยวพันกัน (correlation coefficients) ระหว่างตัวอย่างของสัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสแบบกล้ำ ความถี่การรหัสแบบพัลส์ที่ขนาด 9 kHz ที่ต่อเนื่องกันโดยทั่วๆ ไป มีค่าเท่ากับ 0.85 หรือมากกว่า และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ถ้าอัตราการสุ่มตัวอย่าง (sampling rate) ของสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น ข้อเท็จจริงนี้ชี้ให้เห็นถึงความซ้ำซ้อนที่มีอยู่อย่างมากมายในสัญญาณเสียงที่ถูกเข้ารหัสโดยวิธีการข้างต้น

กระบวนการฝังและกู้คืนสัญญาณลายน้ำ

โดยการกำหนดให้ x และ y เป็นพิกัดของจุดภาพ (pixel) ในรูปภาพต้นฉบับ ค่าขนาดของจุดภาพในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงิน B_{xy} ที่ตำแหน่ง x และ y ในรูปภาพต้นฉบับที่จะฝังสัญญาณลายน้ำลงไป จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำ ค่าความสว่าง (luminance, $L = 0.299R + 0.587G + 0.114B$ ของจุดภาพ ณ ตำแหน่งนั้น และค่าคงที่ α ซึ่งเป็นตัวกำหนดระดับความทนทานและความชัดเจนของสัญญาณลายน้ำ โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

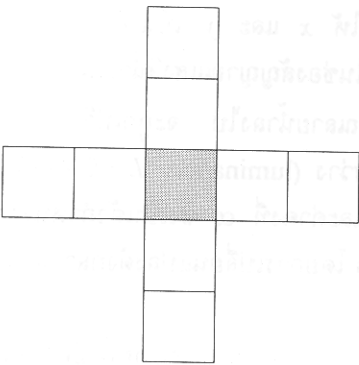
$$\begin{aligned} B_{xy} &= B_{xy} + L_{xy}\alpha ; \text{เมื่อสัญญาณลายน้ำมีค่าเป็น 1} \\ B_{xy} &= B_{xy} - L_{xy}\alpha ; \text{เมื่อสัญญาณลายน้ำมีค่าเป็น 0} \end{aligned} \quad (1)$$

ดังที่กล่าวไปแล้วในเบื้องต้นว่า กระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำสามารถทำได้โดยใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยรูปภาพดิจิทัล แบบตัดกันของจุดภาพข้างเคียงในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงิน จากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองรูปภาพต้นฉบับ B'_{xy} ที่ตำแหน่ง x และ y โดยวิธีการข้างต้น ค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำที่ต้องการกู้คืนสามารถคำนวณหาได้จากความแตกต่างระหว่าง ค่าขนาดที่จุดภาพนั้นเทียบกับจุดภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำ ถ้าค่าความแตกต่างเป็นบวก ค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังลงไปจะมีค่าเป็น 1 ในทำนองเดียวกัน ถ้าค่าความแตกต่างเป็นลบ สัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังจะมีค่าเป็น 0 การคำนวณดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$B'_{xy} = \frac{1}{4c} \left(\sum_{k=-c}^c B_{x+k,y} + \sum_{k=-c}^c B_{x,y+k} - 2B_{xy} \right) \quad (2)$$

เมื่อ c เป็นรัศมีของจุดภาพข้างเคียง

ตัวอย่างของลักษณะของจุดภาพข้างเคียงที่ใช้ในการคำนวณเมื่อ c มีค่าเท่ากับ 2 ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1 ให้สังเกตว่ารูปสี่เหลี่ยมที่ถูกแรงดึงดูดตรงกลางคือจุดภาพที่จะทำการจำลอง ขณะที่รูปสี่เหลี่ยมที่ว่างเปล่าคือจุดภาพข้างเคียง ในกระบวนการจำลองรูปภาพต้นฉบับ จุดภาพที่คำนวณจะถูกเลื่อนไปเรื่อยๆ จนครบทุกๆ ตำแหน่งจุดภาพที่อยู่ในรูปภาพ นอกจากนี้ให้สังเกตว่า กรณีที่ใช้ค่า c เท่ากับ 2 จุดภาพที่บริเวณขอบของภาพนับเข้ามาเป็นระยะเท่ากับ 2 จุดภาพจากทุกๆ ด้านจะไม่ถูกนำมาใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำ



รูปที่ 1: ลักษณะของจุดภาพข้างเคียงเมื่อ c มีค่าเท่ากับ 2

โดยปกติค่า c ที่มีค่าสูงๆ จะเพิ่มความน่าจะเป็นที่สัญญาณลายน้ำที่ถูกกลับคีนมาจะเหมือนกับสัญญาณลายน้ำที่ฝังลงไปในตอนแรก อย่างไรก็ตามค่า c ที่สูงๆ นี้ก็จะนำไปสู่ความซับซ้อนที่สูงขึ้นในกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำ โดยทั่วๆ ไป ความน่าจะเป็นของความถูกต้องในการกู้คืนสัญญาณลายน้ำสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยใช้วิธีการฝังสัญญาณลายน้ำตัวเดิมลงไปในรูปแบบต้นฉบับซ้ำๆ กันเป็นจำนวน n ครั้งในตำแหน่งต่างๆ กันภายในรูปภาพ เพื่อเพิ่มความซ้ำซ้อนของสัญญาณลายน้ำดังกล่าวให้สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้ในการพิจารณาค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำที่ถูกกลับคีนมาว่าจะเป็นเท่าใดนั้น จะนำค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำ (1 หรือ 0) ที่ถูกกลับคีนมาทั้งหมด n สัญญาณมาหาค่าเฉลี่ย แล้วเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยที่ได้กับค่า $n/2$ ถ้าผลลัพธ์ที่ได้มีค่ามากกว่า ค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังลงไปจะมีค่าเป็น 1 ถ้าน้อยกว่า ก็จะเป็น 0 อย่างไรก็ตามเนื่องจากในงานวิจัยนี้ เราได้ใช้สัญญาณเสียงพูดซึ่งมีความซ้ำซ้อนของสัญญาณสูงมากๆ อยู่แล้วเป็นสัญญาณลายน้ำ และเราต้องการวัดถึงประสิทธิภาพของการ

ประยุกต์ใช้สัญญาณเสียงพูดในการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัล ในการทดลองเราจึงฝังสัญญาณเสียงพูดลงในรูปภาพต้นฉบับเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

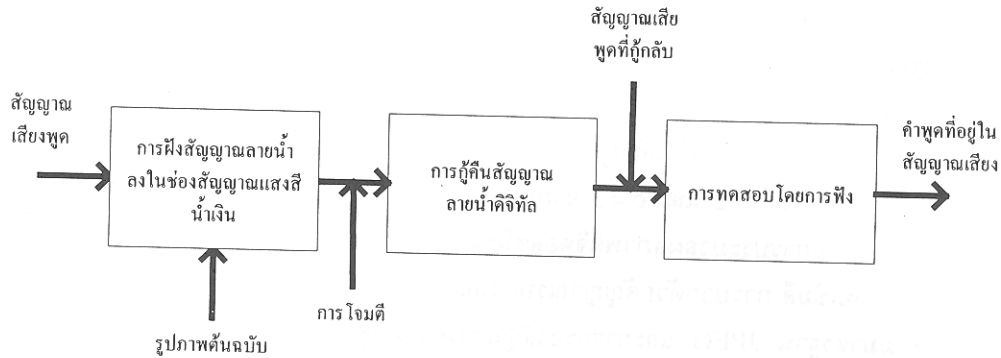
แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง

สัญญาณเสียงพูดที่ใช้เป็นสัญญาณลายน้ำดิจิทัลในการทดลองของเราก็คือคำพูดภาษาไทยที่ออกเสียงว่า "สุเทพ" ซึ่งได้ทำการบันทึกจากไมโครโฟนก่อนที่จะทำการเข้ารหัสแบบกล้ำความถี่รหัสแบบพัลส์ด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่างที่ 11 kHz สัญญาณเสียงพูดนี้จะถูกฝังลงในสัญญาณรูปภาพต้นฉบับโดยใช้วิธีการที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่แล้วด้วยค่า $\alpha = 0.2$ และ $c = 3$ จากนั้นผู้วิจัยจะทำการโจมตีรูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ ด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลชนิดต่างๆ นั่นคือ การปรับค่าความสว่าง การปรับค่าความเข้มสี การบวกด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน การบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพตามมาตรฐาน JPEG และการกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน โดยที่การโจมตีเหล่านี้จะมีขนาดความแรงตั้งแต่ค่าน้อยๆ เช่นที่ 10% ไปจนถึงค่าสูงๆ เช่นที่ 100% หลังจากนั้นจะทำการกู้คืนสัญญาณลายน้ำที่ได้ ซึ่งแน่นอนว่าจะเกิดการสูญเสียอันเนื่องมาจากการโจมตีข้างต้น สัญญาณลายน้ำหรือสัญญาณเสียงพูดที่ถูกลบคืนมานี้จะถูกตรวจสอบและประเมินคุณภาพโดยการฟังเสียงและการตัดสินจากผู้ฟังจำนวน 10 คนที่เป็นคนไทย ในช่วงอายุตั้งแต่ 23-45 ปี โดยจะแบ่งเป็นเพศหญิง 5 คนและเพศชาย 5 คน ว่าพวกเขาสามารถจะบอกได้ว่า คำพูดที่ได้ยินจากสัญญาณเสียงนั้นคือคำว่า "สุเทพ" หรือไม่ การให้คะแนนจะเป็นไปตามจำนวนผู้ฟังที่สามารถระบุถึงคำพูดที่อยู่ภายในสัญญาณเสียงได้ถูกต้อง ให้สังเกตว่าลำดับของการเปิดสัญญาณเสียงพูดให้ผู้ฟังฟังจะเป็นแบบสุ่ม (random order) โดยจะทำการสุ่มจากสัญญาณเสียงพูดที่ถูกลบคืนมา ภายหลังจากการโจมตีด้วยวิธีการต่างๆ และที่ค่าความแรงของการโจมตีต่างๆ กัน รูปแบบของการประเมินและมาตรฐานของการทดสอบในลักษณะนี้ได้ถูกอ้างอิงไว้ใน [10,11] แผนผังของแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2

ผลการทดลองและการอภิปราย

โปรแกรม Matrix Laboratory (MATLAB) ถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อที่จะจำลองการทำงานของการทำงานภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัล ตามวิธีการที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น กับรูปภาพดิจิทัลต้นฉบับ "Lena" ซึ่งเป็นรูปภาพสี 24 บิต ขนาด 512×512 จุดภาพให้สังเกตว่า ในกระบวนการฝังและกู้คืนสัญญาณลายน้ำตามสมการที่ 1 และ 2 ที่ค่า c เท่ากับ 3 รูปภาพที่มีความละเอียดขนาดนี้ จะสามารถฝังสัญญาณลายน้ำได้สูงสุดถึง

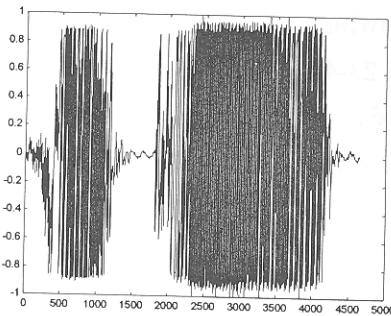
506×506 บิต หรือประมาณ 256 กิโลบิต โดยที่สัญญาณลายน้ำ 1 บิตจะถูกฝังลงในข้อมูลรูปภาพขนาด 1 พิกเซล ตัวอย่างของรูปภาพต้นฉบับ "Lena" และรูปคลื่นของสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ "สุเทพ" ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง



(ก)



(ข)

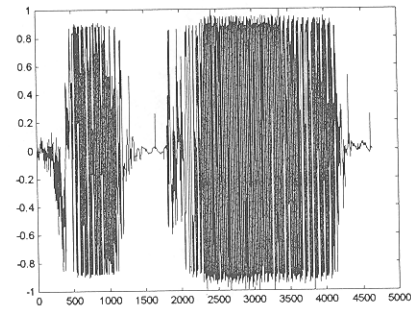
รูปที่ 3 (ก) รูปภาพต้นฉบับ "Lena" (ข) รูปคลื่นสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับ "สุเทพ"

หลังจากนั้น เราได้ทำการฝังสัญญาณเสียงพูดลงในรูปภาพต้นฉบับ และทำการโจมตีที่ตัวรูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ โดยการปรับค่าความสว่าง การปรับค่าความเข้มสี การบวกด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน การบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพตามมาตรฐาน JPEG ตามลำดับ ตัวอย่างของรูปภาพผลลัพธ์ที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ภายหลังจากที่ผ่านการโจมตีโดยการปรับเพิ่มค่าความสว่างที่ความแรง 80% การปรับเพิ่มค่าความเข้มสีที่ความแรง 80% การบวกด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนที่ความแรง 30% การบีบอัดข้อมูลตามมาตรฐาน JPEG ที่คุณภาพ 60% รวมทั้งรูปคลื่นผลลัพธ์ของสัญญาณ

เสียงพูดที่ถูกกลับคืนมาภายหลังการโจมตีแต่ละชนิด ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 7 ตามลำดับ



(ก)

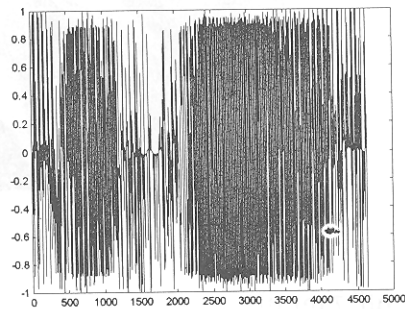


(ข)

รูปที่ 4 (ก) รูปภาพผลลัพธ์ที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ภายหลังที่ผ่านการปรับเพิ่มค่าความสว่างที่ความแรง 80% และ (ข) รูปคลื่นสัญญาณเสียงพูดที่ถูกกลับคืนมาภายหลังการโจมตี



(ก)

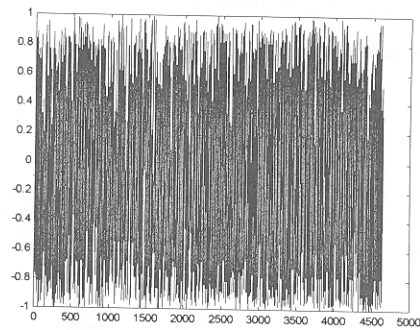


(ข)

รูปที่ 5 (ก) รูปภาพผลลัพธ์ที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ภายหลังที่ผ่านการปรับเพิ่มค่าความเข้มสีที่ความแรง 80% และ (ข) รูปคลื่นสัญญาณเสียงพูดที่ถูกกลับคืนมาภายหลังการโจมตี



(ก)

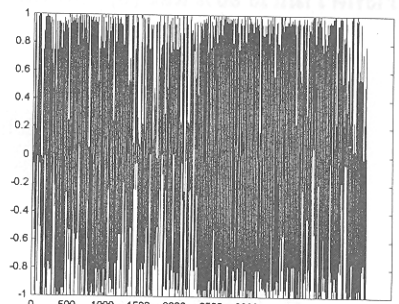


(ข)

รูปที่ 6 (ก) รูปภาพผลลัพธ์ที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ภายหลังจากผ่านการบวกด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนที่ความแรง 30% และ (ข) รูปคลื่นสัญญาณเสียงพูดที่ถูกกลับคืนมาภายหลังจากการโจมตี



(ก)



(ข)

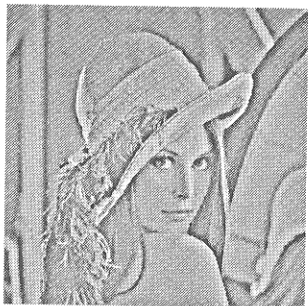
รูปที่ 7 (ก) รูปภาพผลลัพธ์ที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ภายหลังจากการบีบอัดข้อมูลตามมาตรฐาน JPEG ที่คุณภาพ 60% และ (ข) รูปคลื่นสัญญาณเสียงพูดที่ถูกกลับคืนมาภายหลังจากการโจมตี

หลังจากที่ผ่านการโจมตีชนิดต่างๆ ที่ความแรงต่างๆ กันมาแล้ว สัญญาณเสียงพูดที่ถูกกลับคืนมาได้ ซึ่งมีความผิดพลาดที่เกิดจากการโจมตีเหล่านั้นจะถูกนำมาตรวจสอบโดยการฟัง และจำนวนผู้ฟังที่สามารถบอกได้ว่าคำพูดในสัญญาณเสียงคือ "สุเทพ" ภายหลังจากการถูกโจมตีมาแล้วได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ให้สังเกตว่าระดับความแรงที่วัดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพตามมาตรฐาน JPEG ที่แสดงไว้ในตารางก็คือ ค่าอัตราการบีบอัดข้อมูล (โดยวัดเป็นเปอร์เซ็นต์) ที่ใช้ในกระบวนการบีบอัดข้อมูลทั่วไป

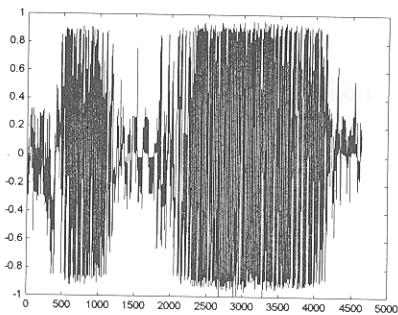
ตารางที่ 1
จำนวนผู้ฟังที่สามารถบอกได้ว่าคำพูดในสัญญาณเสียงคือ "สุเทพ" ภายหลังการถูก
โจมตีที่ค่าความแรงต่าง ๆ กัน

ระดับ ความแรง (%)	ชนิดของการโจมตี			
	การปรับค่า ความสว่าง	การปรับค่า ความเข้มสี	การบวกด้วยสัญญาณ รบกวนแบบเกาส์เซียน	การบีบอัดข้อมูลตาม มาตรฐาน JPEG
10	10	10	10	10
20	10	10	10	10
30	10	10	10	10
40	10	10	10	10
50	10	10	6	10
60	10	10	6	10
70	10	10	2	9
80	10	10	0	7
90	10	8	0	1
100	10	6	0	0

กระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัลในโดเมนเชิงความถี่อีกชนิดหนึ่ง ที่เป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในการปรับปรุงแก้ไขรูปภาพดิจิทัล และถูกพิจารณาว่าเป็นการโจมตีที่มีผลกระทบสูงต่อสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังก็คือ การกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน ในการทดลองเราได้ทำการโจมตีรูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ โดยใช้วิธีการดังกล่าวที่ค่ารัศมีต่างๆ ของจุดภาพ รูปที่ 8(ก) และ 8(ข) ได้แสดงตัวอย่างของรูปภาพผลลัพธ์ที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ภายหลังที่ผ่านการโจมตีโดยการกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านที่รัศมี 0.2 จุดภาพ และรูปคลื่นผลลัพธ์ของสัญญาณเสียงพูดที่ถูกลบคืนมา ตามลำดับ ขณะที่ตารางที่ 2 ได้แสดงถึงจำนวนผู้ฟังที่สามารถบอกได้ว่าคำพูดในสัญญาณเสียงคือ "สุเทพ" ภายหลังการถูกกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านที่ค่ารัศมีต่างๆ มาแล้ว



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) รูปภาพผลลัพธ์ที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ภายหลังจากการกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านที่รัศมี 0.2 จุดภาพและ (ข) รูปคลื่นสัญญาณเสียงพูดที่ถูกกลับคืนมาภายหลังการโจมตี

ตารางที่ 2

จำนวนผู้ฟังที่สามารถบอกได้ว่าคำพูดในสัญญาณเสียงคือ "สุเทพ" ภายหลังจากการถูกโจมตีที่ค่าความแรงต่าง ๆ กัน

ขนาดของรัศมีที่ใช้ (จุดภาพ)	การกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน
0.5	10
0.4	10
0.3	10
0.2	10
0.1	0

จากผลลัพธ์ที่แสดงในตารางที่ 1 และรูปภาพผลลัพธ์ของสัญญาณเสียงพูดที่แสดงในรูปที่ 4 ถึง 7 จะเห็นได้ว่า จำนวนผู้ฟังที่สามารถบอกได้ว่าคำพูดในสัญญาณเสียงคืออะไรจะขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณเสียงที่ถูกกลับคืนมาด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าสัญญาณเสียงพูดที่ถูกฝังอยู่ในรูปภาพมีความทนทานต่อการปรับเพิ่มค่าความสว่าง และการปรับเพิ่มค่าความเข้มสีเป็นอย่างดี รองลงมาก็คือ การบีบอัดข้อมูลตามมาตรฐาน JPEG และการบวกด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนตามลำดับ ให้สังเกตรูปคลื่นของสัญญาณเสียงพูดที่ผ่านการบีบอัดข้อมูลที่คุณภาพ 60% ว่ามีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นต้นฉบับอย่างมากมาย อย่างไรก็ตาม ผู้ฟังทุกคนก็ยังสามารถรับรู้และเข้าใจได้ว่าคำพูดในสัญญาณเสียงคือคำว่าอะไร เหมือนเช่นในรูปคลื่นของสัญญาณเสียงพูดที่ผ่านการ

บวกด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนที่ความแรง 30% นอกจากนี้ให้สังเกตว่าคุณภาพของรูปภาพที่ผ่านการบวกด้วยสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน จะเกิดการลดทอนลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะถือว่าคุณภาพที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐานที่จะนำไปใช้ในงานทั่วไป

สำหรับการกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน จะมีผลที่ทำให้ลักษณะรูปคลื่นเปลี่ยนไปจากเดิมอย่างมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความแรงของการโจมตีไปที่รัศมี 0.1 จุดภาพ สัญญาณเสียงพูดที่นำมาเปิดฟังจะมีความเพี้ยนจนผู้ฟังทั้งหมดไม่สามารถรับรู้ และเข้าใจได้ว่าคำพูดในสัญญาณเสียงคืออะไร แม้ว่ารูปคลื่นของสัญญาณเสียงพูดที่ถูกลบคินมาจะมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นต้นฉบับ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เน้นไปที่การทดสอบประสิทธิภาพของการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลที่ใช้สัญญาณเสียงพูดเป็น สัญญาณลายน้ำ ในการใช้งานจริงในทางปฏิบัตินั้น วิธีการฝังสัญญาณลายน้ำแบบอื่นๆ นอกเหนือจากการฝังสัญญาณลายน้ำที่ใช้หลักการกล้ำความถี่ของสัญญาณภาพ อาจถูกนำมาประยุกต์ใช้กับสัญญาณลายน้ำที่เป็นเสียงพูดได้โดยไม่เกิดปัญหาแต่อย่างใด ซึ่งวิธีการที่ต่างกัน ก็จะทำให้คุณภาพผลลัพธ์ของรูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำที่แตกต่างกันด้วย

สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอแนวคิดในการนำสัญญาณเสียงและเนื้อความที่อยู่ภายในของมันเป็นไปเป็นสัญญาณลายน้ำดิจิทัล โดยวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ จะอาศัยหลักการของการกล้ำความถี่ของสัญญาณรูปภาพในช่องสัญญาณแสงสีน้ำเงิน เพื่อทดสอบว่าสัญญาณเสียงพูดที่ฝังลงไปมีความทนทานต่อการโจมตีชนิดต่างๆ ได้มากน้อยเท่าใด นอกจากนี้กระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำยังสามารถกระทำได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับเป็นส่วนประกอบ สำหรับกระบวนการตรวจสอบสัญญาณลายน้ำที่ถูกลบคินนั้น ได้ใช้วิธีการทดสอบโดยการฟังเสียงเพื่อประเมินว่า สัญญาณลายน้ำยังคงมีความสมบูรณ์ถูกต้องอยู่หรือไม่จากเนื้อความที่อยู่ภายในของมัน ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าผู้ฟังส่วนใหญ่สามารถเข้าใจและรับรู้ถึงเนื้อความที่พูดอยู่ในสัญญาณเสียงที่ถูกลบคินมาภายหลังที่ผ่านการโจมตีระดับหนึ่งว่าเป็นคำพูดอะไรได้อย่างถูกต้อง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจาก ความซับซ้อนที่ยังคงเหลืออยู่ภายในสัญญาณเสียงพูด ภายหลังจากการถูกโจมตีมีอยู่เป็นจำนวนมากเพียงพอที่คนส่วนใหญ่จะยังคงสามารถรับรู้ถึงเนื้อความที่ต้องการจะสื่อภายในสัญญาณเสียงพูดนั้นๆ ได้ มากกว่า

นั้นความสามารถและกระบวนการจดจำจากการฟังซ้ำๆ กันของมนุษย์ยังมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับรู้และเข้าใจถึงเนื้อหาความที่อยู่ภายในเสียงพูดได้มากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและคอมพิวเตอร์แห่งชาติ NECTEC ที่ได้สนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตามโครงการ NT-B-06-4C-20-319

เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Li. And H. H. Yu, "Transparent and robust audio data hiding in subband domain", Proceedings of International Conference on Information Technology, Coding and Computing 2000, pp. 74-79, 2000.
- [2] X. Li and H. H. Yu, "Transparent and robust audio data hiding in cepstrum domain", Proceedings of International Conference on Multimedia and Expo 2000, vol. 1, pp. 397-400, 2000.
- [3] D. Gruhl, A. Lu and W. Bender, "Echo hiding", Information Hiding '96, pp. 295-315, 1996.
- [4] S. Sakaguchi, T. Arai and Y. Murahara, "The effect of polarity inversion of speech on human perception and data hiding as an application", IEEE Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 2, pp. 917-920, 2000.
- [5] D. Mukherjee, J. J. Chae, S. K. Mitra and B. S. Manjunath, "A source and channel-coding framework for vector-based data hiding in video", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 10, no. 4, June 2000.
- [6] M. Kutter, F. Jordan and F. Bossen, "Digital signature of color images using amplitude modulation", Journal of Electronic Imaging, vol. 7, 1998, pp. 326-332.
- [7] T. S. Rappaport, "Wireless communications principles and practice", Prentice Hall, 1996.
- [8] J. Bellamy, "Digital telephony", John Wiley & Sons, 1991.
- [9] J. Flanagan, M. Schroeder, B. Atal, R. Crochiere, N. Jayant and J. Tribolet, "Speech coding", IEEE Transactions Communications, April 1979, pp. 710-737.
- [10] H. K. Dunn and S. D. White, "Statistical measurements on conversational speech", Journal of Acoustic Society of America, January 1940, pp. 278-288.
- [11] Segal, M.H., 1999, "Speech intelligibility in the space shuttle mid-deck noise environment: The effect of active noise reduction technology", <http://ergo.human.cornell.edu/>.