บทที่ 4
การฝังลายน้ำในสปาเชียลโดเมนด้วยบล็อกทับซ้อน

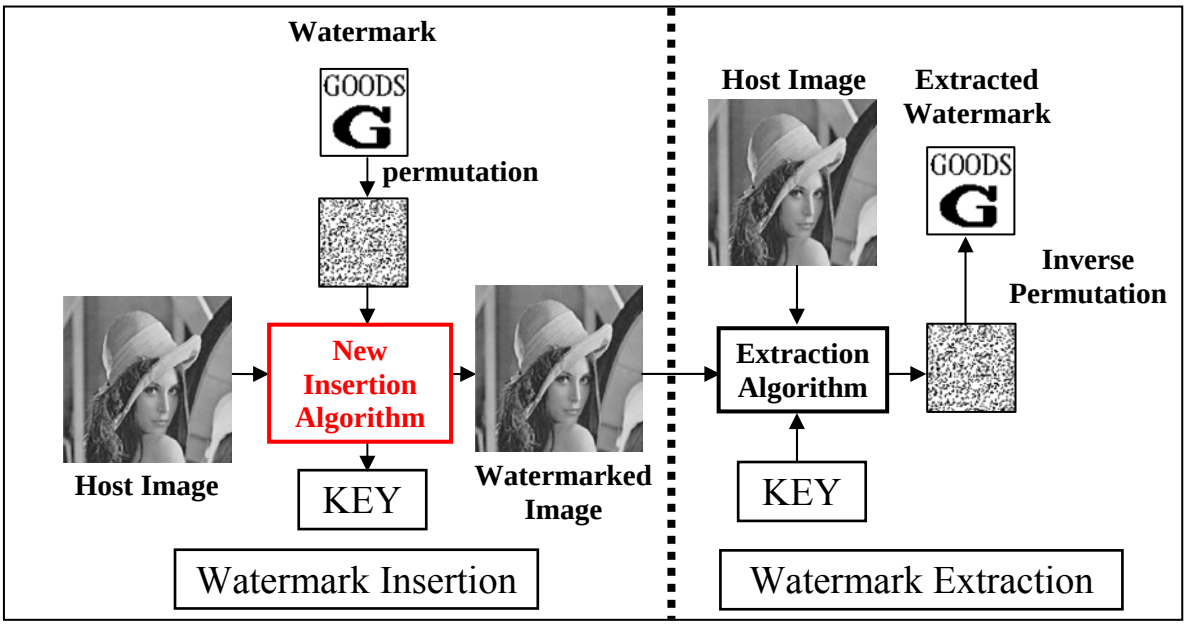
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมาคือ

1. เมื่อภาพต้นฉบับมีขนาดเล็กลายน้ำที่ใช้จะมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถใช้ภาพลายน้ำที่มีรายละเอียดได้
2. ไม่สามารถปรับค่าในการฝังลายน้ำได้ตามต้องการ เช่น ในบางกรณี ผู้ใช้อาจต้องการให้การซ่อนตัวของลายน้ำ (Invisibility) ดีขึ้น โดยยอมสูญเสียความคงทนของลายน้ำ (Robustness) ไปบ้าง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ต้องการพัฒนาวิธีการฝังลายน้ำเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถ กำหนดคุณสมบัติของลายน้ำตามต้องการ และสามารถฝังลายน้ำที่มีรายละเอียดลงในภาพต้นฉบับที่มีขนาดเล็กได้ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.7

4.1 ขั้นตอนการทำงาน

งานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงข้อจำกัดของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น โดยจะพัฒนาในส่วนของวิธีในการฝังภาพลายน้ำเท่านั้น ขั้นตอนอื่นๆ จะยังคงเดิม มีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนในการทำภาพลายน้ำดิจิตอล

4.1.1 การฝังลายน้ำ

วิธีการที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการฝังลายน้ำประเภทไม่สามารถมองเห็นได้ (Invisibility) ในสปาเชียลโดเมน (Spatial Domain) ภาพต้นฉบับเป็นภาพโทนสีเทา 256 ระดับความเข้มสี ภาพลายน้ำเป็นภาพไบนารีมีขนาดโดยประมาณเท่ากับ 1/4 ของภาพต้นฉบับ ในการฝังใช้วิธีการแบ่งภาพต้นฉบับเป็นบล็อกโดยมีลักษณะเป็นบล็อกแบบทับซ้อน บล็อกมีขนาด 3x3 พิกเซล โดยจะทับซ้อนกับบล็อกที่อยู่รอบข้าง ถ้าเป็นบล็อกที่อยู่ทางซ้ายและทางขวาจะทับซ้อนกัน 1 คอลัมน์ ถ้าเป็นบล็อกที่อยู่บนและล่างจะทับซ้อนกัน 1 แถวแต่ถ้าเป็นบล็อกที่อยู่ในแนวทแยงมุมจะทับซ้อนกัน 1 พิกเซล การฝังลายน้ำ 1 บิตจะใช้บล็อกตัวแทนบิตลายน้ำขนาด 3x3 พิกเซล มีค่าสัมประสิทธิ์ภายใน 9 ค่า นำไปบวกเพิ่มหรือหักลบออกจากค่าความเข้มแสงของพิกเซลในบล็อกที่ต้องการจะฝังลายน้ำ ถ้าบิตลายน้ำที่ต้องการฝังเป็น 1 บล็อกที่เป็นตัวแทนของบิตลายน้ำนี้จะถูกนำไปบวกกับค่าความเข้มแสงของพิกเซลในบล็อกที่แบ่งไว้ในภาพต้นฉบับ โดยเป็นการบวกแบบพิกเซลต่อพิกเซล แต่ถ้าบิตที่ต้องการฝังเป็น 0 ก็จะนำค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวไปลบ การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 9 ค่าของบล็อกที่เป็นตัวแทนบิตลายน้ำ จึงมีความสำคัญต่อความคงทนและความสามารถในการซ่อนตัวของลายน้ำ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 4.2.2 ในหัวข้อถัดไปจะอธิบายวิธีการวัดคุณภาพของภาพหลังจากการฝังลายน้ำ โดยเปรียบเทียบกับภาพต้นฉบับ

4.1.2 การวัดคุณภาพของภาพหลังจากการฝังลายน้ำ

วิธีการที่คิดขึ้นเป็นวิธีการฝังลายน้ำแบบไม่สามารถมองเห็นได้ (Invisible) จึงจำเป็นต้องพิจารณาว่าภาพหลังจากการฝังลายน้ำสูญเสียคุณภาพไปมากน้อยเพียงใด ในการวัดคุณภาพของภาพหลังจากฝังลายน้ำวัดโดยเปรียบเทียบกับภาพต้นฉบับ ในวิทยานิพนธ์นี้นำค่า PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) และการสังเกตความแตกต่างด้วยสายตา (Subjective Test) มาใช้ในการวัดความแตกต่างระหว่างภาพหลังจากการฝังลายน้ำกับภาพต้นฉบับ ซึ่งถ้าภาพมีความเหมือนกันมาก ค่า PSNR จะมีค่ามากและไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างด้วยตาเปล่าได้ โดยสมการของ PSNR คือ

$$PSNR = 20\log_{10}\left(\frac{255}{\sqrt{MSE}}\right) \tag{4.1}$$

MSE (Mean Square Error) คือ

$$MSE = \frac{1}{M \times N}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left\| f(i,j) - F(i,j)\right\|^2 \tag{4.2}$$

เมื่อ $i = \{1,2,3,\ldots M\}$

$j = \{1,2,3,\ldots,N\}$

กำหนดให้

F คือ ภาพหลังฝังลายน้ำ

f คือ ภาพต้นฉบับ

M คือ ความยาวของภาพต้นฉบับ i = {1,2,3,…,M}

N คือ ความกว้างของภาพต้นฉบับ j = {1,2,3,…,N}

โดยทั่วไปภาพหลังจากการฝังลายน้ำจะมีค่า PSNR อยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 dB [2] และต้องไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ด้วยสายตา

4.1.3 การทดสอบความคงทนของลายน้ำ

ทดสอบโดยโจมตีภาพหลังจากการฝังลายน้ำ ทำการโจมตีทั้งหมด 9 วิธีคือ 3x3 Low Pass Filter, 3x3 Median Filter, 50% Scale Down, บีบอัดด้วย JPEG คุณภาพ 100, 75, 50 และ 25, 27% Crop และ Rotation 12 องศาจุดหมุนอยู่ที่จุดกึ่งกลางของภาพ จากนั้นนำภาพ 9 ภาพที่ได้หลังจากการโจมตีทั้ง 9 วิธีไปตรวจสอบลายน้ำ โดยถอดลายน้ำจากภาพที่ได้รับการโจมตีทั้ง 9 ภาพ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับภาพลายน้ำต้นฉบับ เพื่อวัดคุณภาพของลายน้ำว่าลายน้ำที่ถอดได้ยังคงสภาพเดิมหรือเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด

4.1.4 การตรวจสอบลายน้ำ

การตรวจสอบทำโดยแบ่งบล็อกของภาพที่ต้องการตรวจสอบลายน้ำกับภาพต้นฉบับ ในแบบเดียวกับการฝัง แล้วทำการเปรียบเทียบกัน โดยการเปรียบเทียบนั้นจะเป็นแบบบล็อกต่อบล็อก โดยเปรียบเทียบบล็อกที่ตรงกันเท่านั้น ถ้าให้ S_W เป็น ผลรวมของค่าความเข้มแสงในบล็อกที่มีลายน้ำอยู่ S_H คือผลรวมค่าความเข้มแสงของบล็อกในภาพต้นฉบับ และ b_W คือบิตลายน้ำที่ถอดได้แล้ว

$b_w = 1$ $\quad if\ S_W > S_H$

$b_w = 0$ $\quad otherwise$

จากนั้นนำภาพไบนารีที่ได้ไปทำ Inverse Permutation ก็จะได้ภาพลายน้ำที่ฝังไว้

4.1.5 การวัดคุณภาพของลายน้ำ

การวัดคุณภาพของลายน้ำที่ถอดได้หลังจากการโจมตี วัดโดยคิดเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของภาพลายน้ำที่ถอดได้กับภาพลายน้ำที่ถูกต้อง (Percentage Error: E) ว่ามีความแตกต่างกันอยู่กี่เปอร์เซ็นต์ ในที่นี้ได้ทำการโจมตีภาพหลังจากฝังลายน้ำทั้งหมด 9 วิธี จึงได้ค่า E ทั้งหมด 9 ค่า จากนั้น คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ย (E_{AVG}) โดยใช้สมการ 3.1 และ 3.2

4.2 การออกแบบ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำบนสปาเชียลโดเมนโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงภายในบล็อกของภาพต้นฉบับ

วัตถุประสงค์หลักคือ

- คิดวิธีฝังภาพลายน้ำลงในภาพต้นฉบับที่มีขนาดเล็ก และภาพลายน้ำมีขนาดใหญ่พอที่จะเห็นรายละเอียดของลายน้ำได้
- ผู้ใช้สามารถฝังลายน้ำได้ตามต้องการ โดยสร้างพารามิเตอร์ในการปรับค่าให้กับผู้ใช้งาน โดยความคงทนของลายน้ำต้องไม่น้อยกว่าวิธีการเดิมที่มีอยู่

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการฝังลายน้ำโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงภายในบล็อก มีข้อจำกัดคือ เมื่อภาพต้นฉบับมีขนาดเล็ก ขนาดของลายน้ำก็จะเล็กจนไม่สามารถมองเห็นรายละเอียดของลายน้ำที่มีความซับซ้อนได้ วิธีแก้ปัญหาคือลดขนาดของบล็อก การลดขนาดของบล็อกทำให้ได้จำนวนบล็อกเพิ่มขึ้นและทำให้สามารถฝังบิตลายน้ำได้มากขึ้น ขนาดของลายน้ำจึงใหญ่ขึ้น แต่เกิดผลข้างเคียงคือความคงทนของลายน้ำที่ฝังจะลดลง (จากรูปที่ 3.4 บทที่ 3)

การเพิ่มขนาดของลายน้ำโดยไม่ไปลดขนาดของบล็อก สามารถกระทำได้โดยใช้บล็อกที่มีการทับซ้อนกันและกัน แต่การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงภายในบล็อกที่ทับซ้อนกัน จะต้องได้รับการออกแบบมิให้เกิดผลกระทบกับบล็อกข้างเคียงจนทำให้ข้อมูลลายน้ำผิดเพี้ยนไป

4.2.1 การออกแบบบล็อกทับซ้อน

เนื่องจากขนาดลายน้ำมีความสัมพันธ์กับจำนวนบล็อกที่แบ่งในภาพต้นฉบับ การเพิ่มขนาดลายน้ำโดยไม่ลดขนาดของบล็อกจึงต้องอาศัยการแบ่งบล็อกแบบทับซ้อน ในที่นี้ ถ้ากำหนดให้

M คือ ความกว้างของภาพต้นฉบับ

N คือ ความยาวของภาพต้นฉบับ

B_H คือ บล็อกทับซ้อนที่ถูกแบ่งไว้ในภาพต้นฉบับ

$B_H(i,j)$ คือ บล็อกทับซ้อนขนาด 3x3 พิกเซล ที่มีจุดศูนย์กลางของบล็อกอยู่ที่ (i,j)

H คือ เซ็ตของค่าความเข้มแสง (I) ทุกๆ พิกเซลภายในบล็อก $B_H(i,j)$

โดยที่

$i = 2*m$ เมื่อ $m = 1, 2, \ldots, (M-1) \text{ div } 2$

$j = 2*n$ เมื่อ $n = 1, 2, \ldots, (N-1) \text{ div } 2$

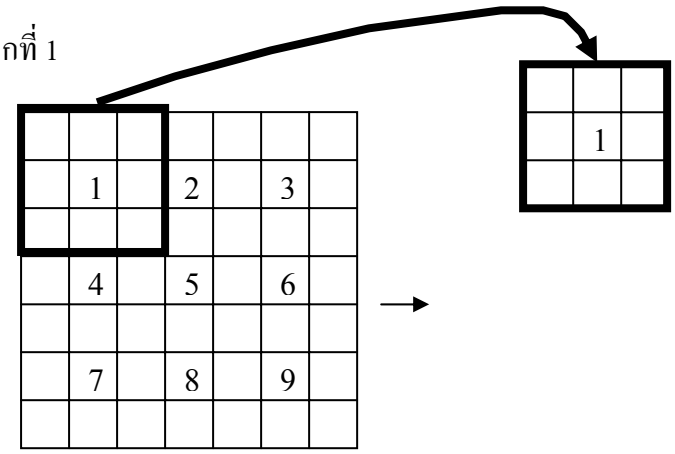
$H = \{I(i-1,j-1), I(i,j-1), I(i+1,j-1), I(i-1,j), I(i,j), I(i+1,j), I(i-1,j+1), I(i,j+1), I(i+1,j+1)\}$

จะทำให้บล็อกที่แบ่งไว้ในภาพต้นฉบับเกิดการทับซ้อนกัน

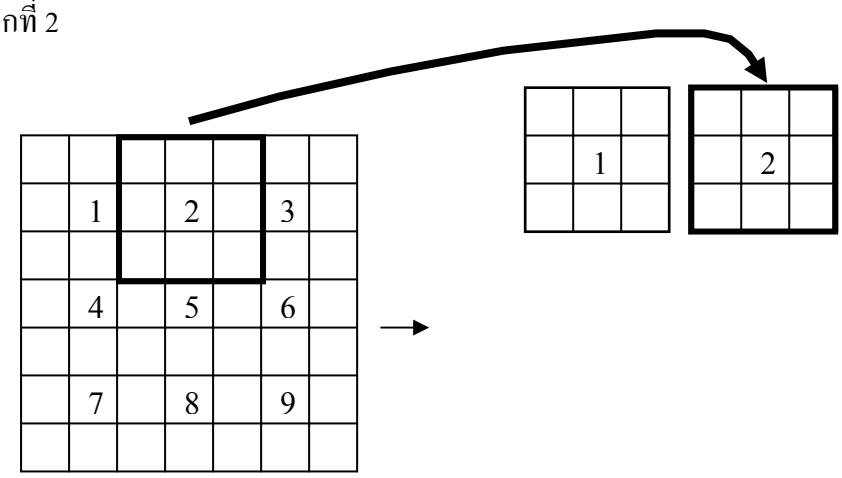
จากการแบ่งบล็อก B_H เป็นบล็อกทับซ้อนขนาด 3x3 พิกเซล จุดศูนย์กลางของบล็อกจะอยู่ในจุดที่ค่า i และ j เป็นจำนวนคู่เท่านั้น และถ้าภาพต้นฉบับมีค่า M หรือ N เป็นจำนวนคู่ลายน้ำจะไม่ถูกฝังลงในพิกเซลที่อยู่ในแถวหรือคอลัมน์สุดท้าย

ตัวอย่างการแบ่งบล็อกในกรณีที่ภาพต้นฉบับมีค่า M และ N เป็นจำนวนคี่ (M=7, N=7)

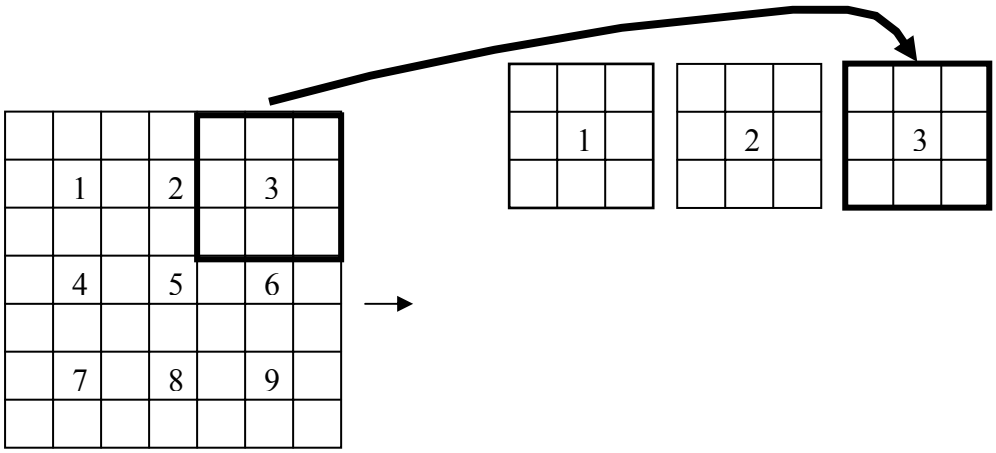
บล็อกที่ 1



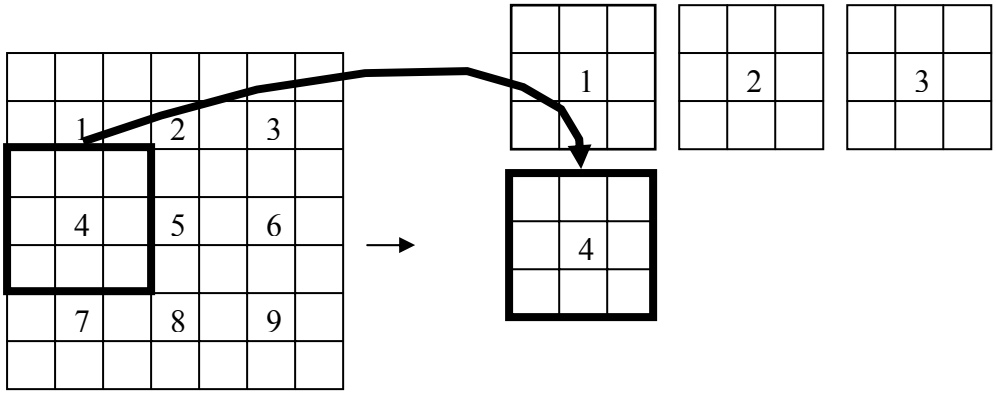
บล็อกที่ 2



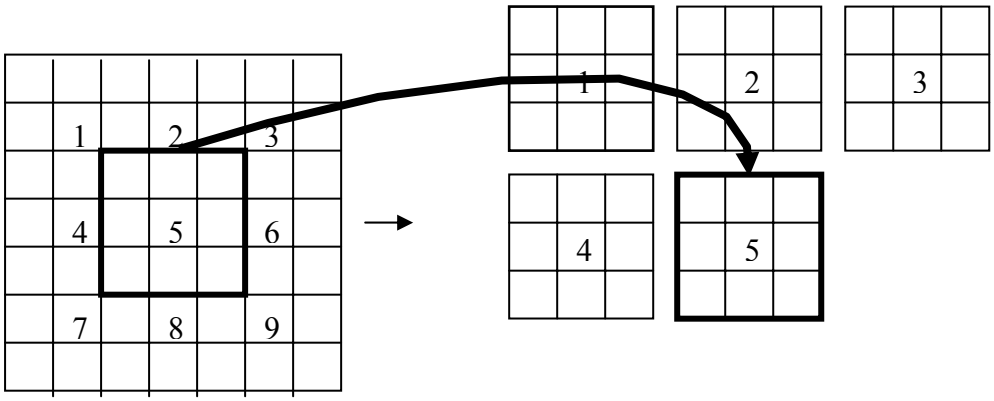
บล็อกที่ 3



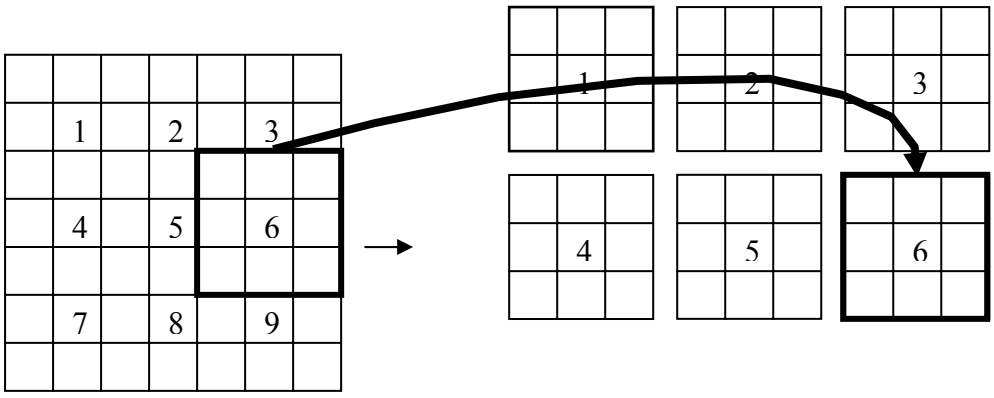
บล็อกที่ 4



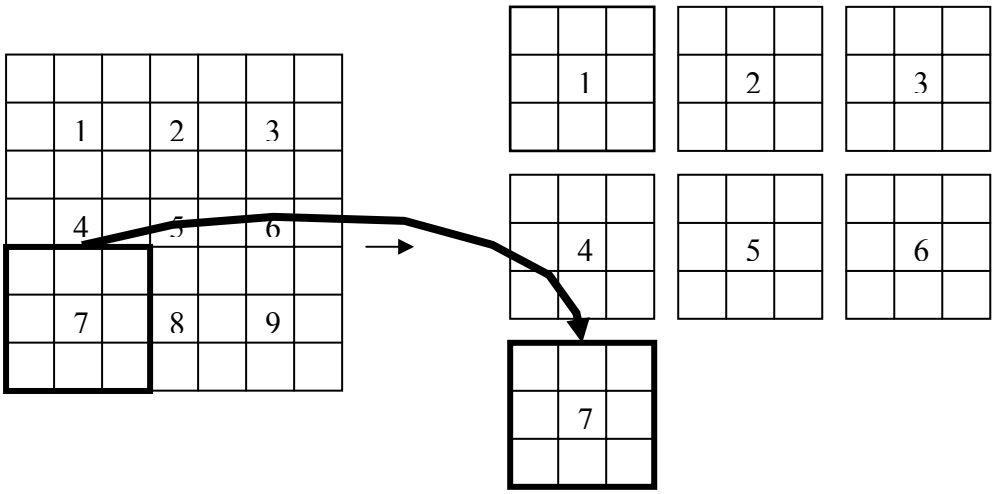
บล็อกที่ 5



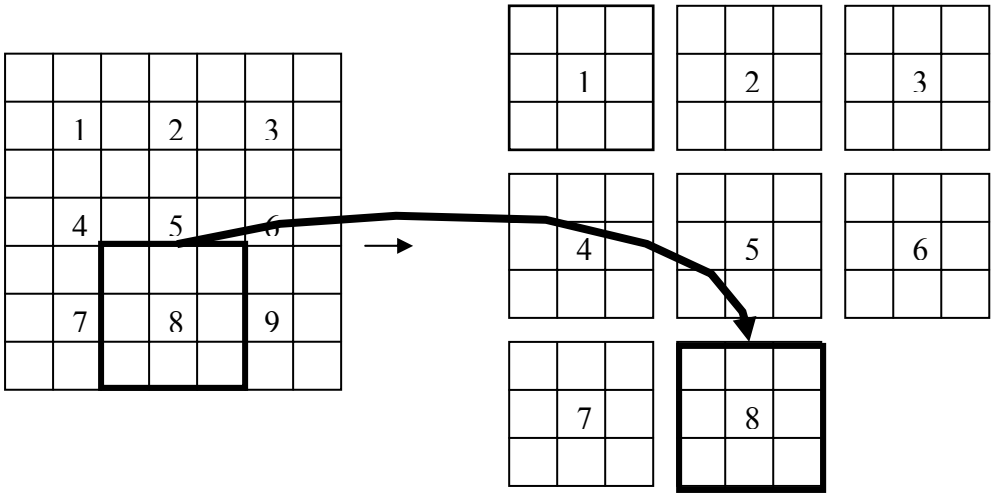
บล็อกที่ 6



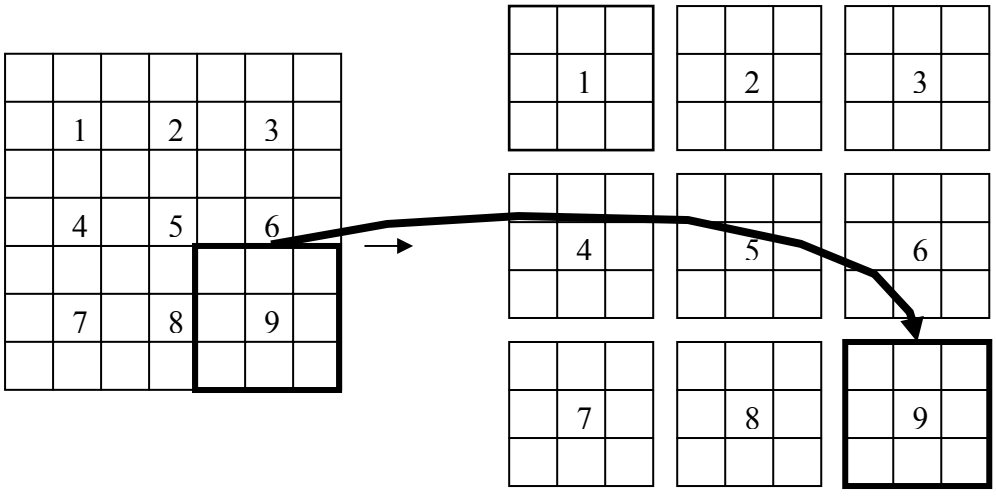
บล็อกที่ 7



บล็อกที่ 8

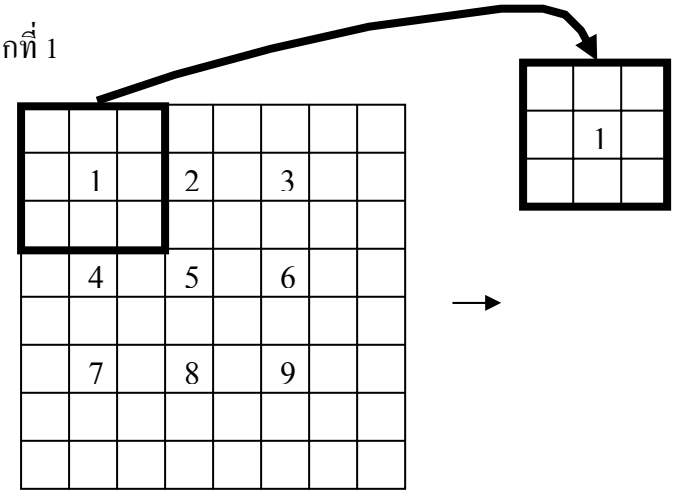


บล็อกที่ 9

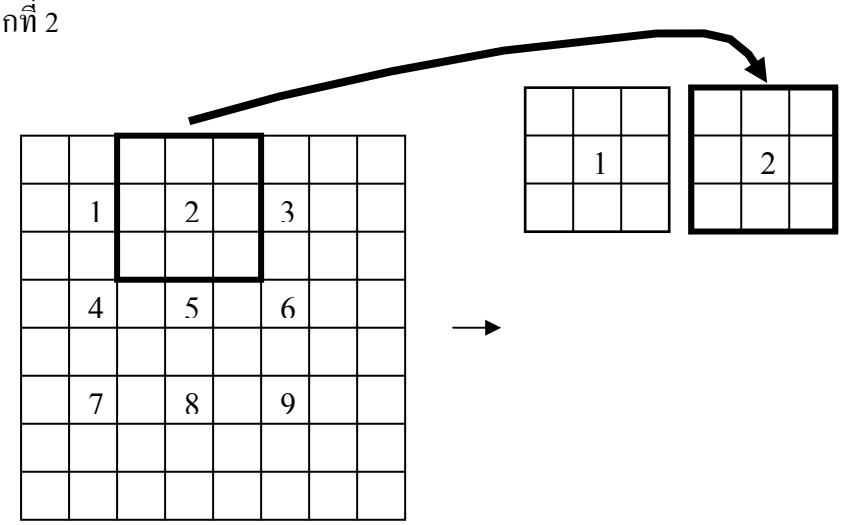


ตัวอย่างการแบ่งบล็อกในกรณีที่ภาพต้นฉบับมีค่า *M* และ *N* เป็นจำนวนคู่ (M=8, N=8)

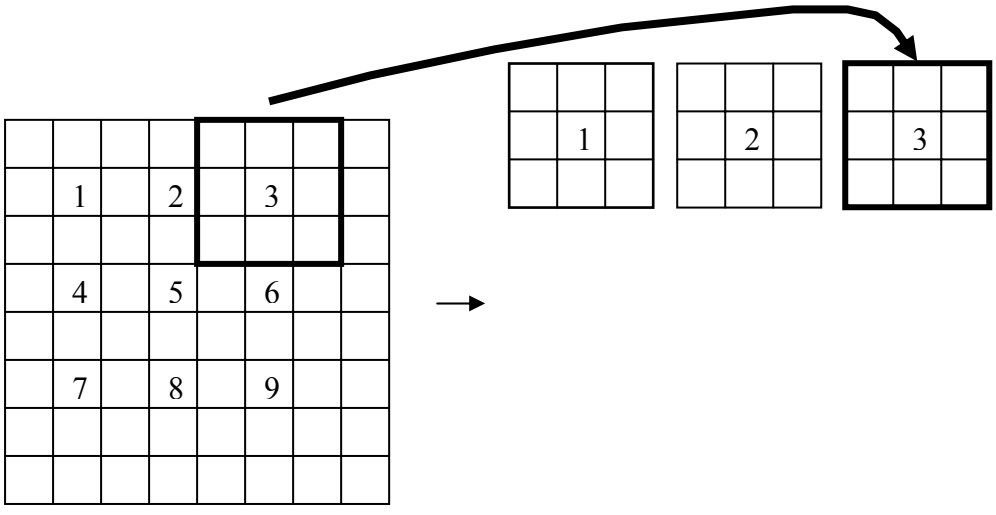
บล็อกที่ 1



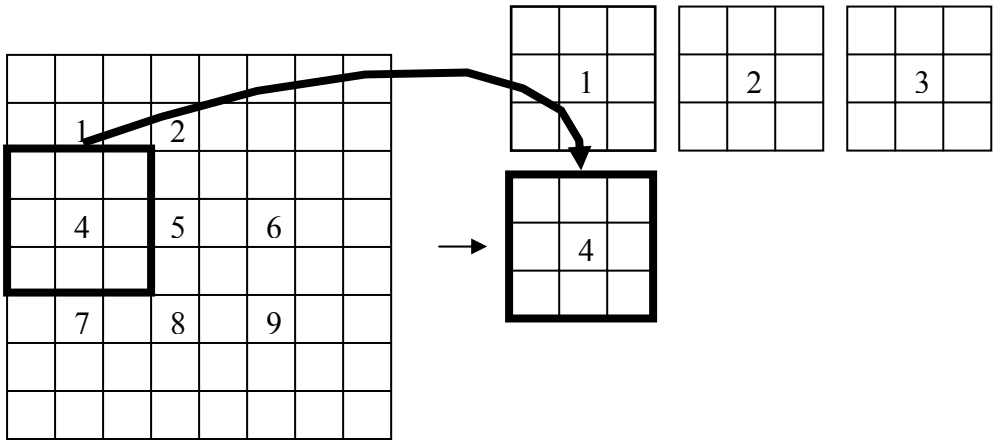
บล็อกที่ 2



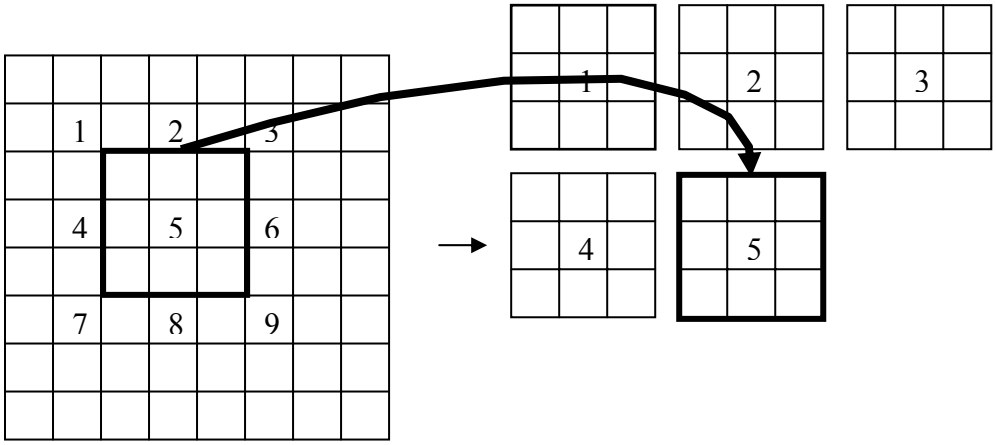
บล็อกที่ 3



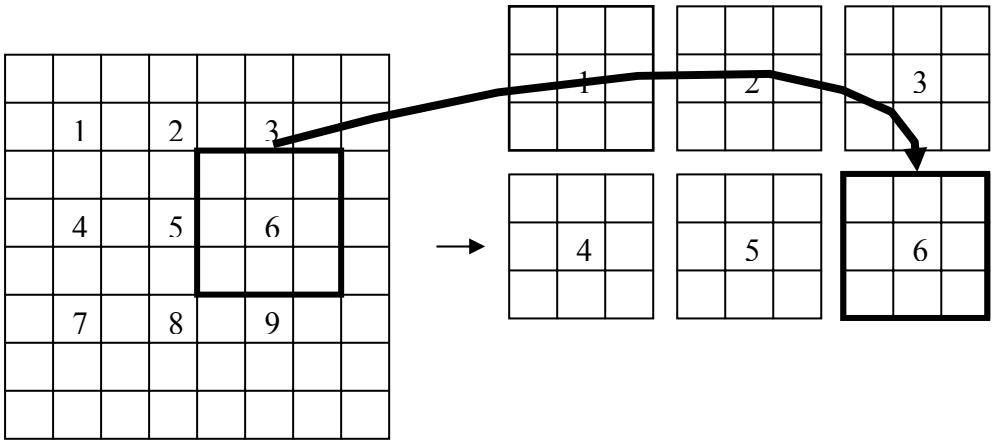
บล็อกที่ 4



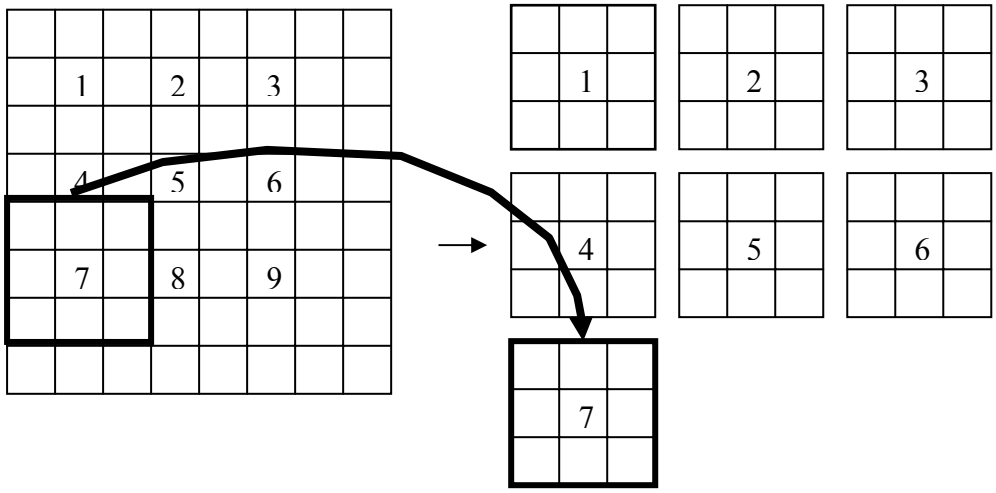
บล็อกที่ 5



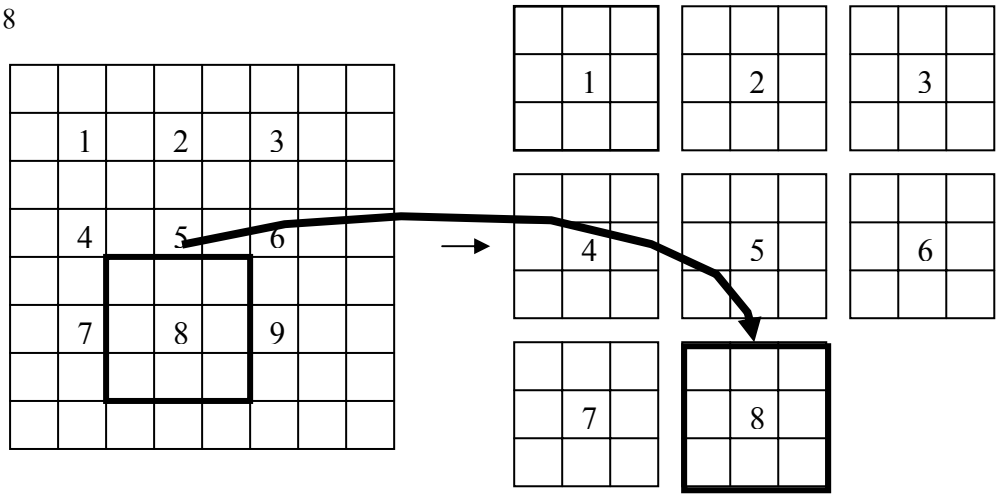
บล็อกที่ 6



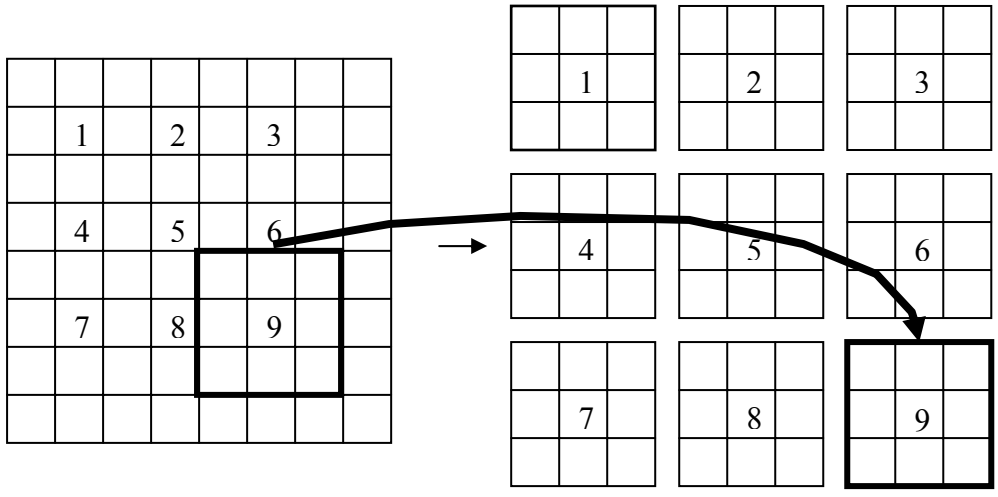
บล็อกที่ 7



บล็อกที่ 8



บล็อกที่ 9

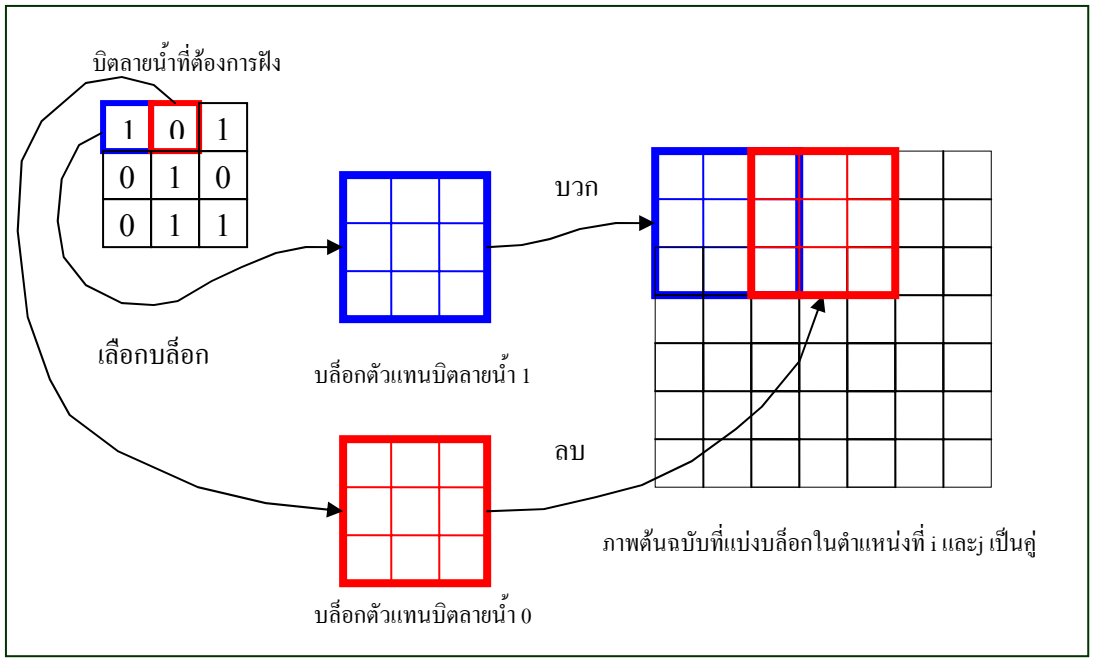


จากตัวอย่างการแบ่งบล็อกข้างต้น ในกรณีที่ภาพต้นฉบับมีความกว้างและความยาวเป็นคู่ เช่น มีค่า $M = 8$ และค่า $N = 8$ ทำให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของบล็อกจะอยู่ที่ตำแหน่งคู่ นั้นคือ $i = \{2,4,6\}$ และ $j = \{2,4,6\}$ ทำให้มีจำนวนบล็อกทั้งหมด 9 บล็อก โดยพิกเซลที่อยู่ในตำแหน่งแถวและหลักสุดท้ายของภาพต้นฉบับจะไม่ถูกฝังลายน้ำ ส่วนในกรณีที่ภาพต้นฉบับมีความกว้างและความยาวเป็นจำนวนคี่ เช่น มีค่า M=7 และ N=7 จะทำให้มีจำนวนบล็อกทั้งหมด 9 บล็อกเช่นกัน แต่พิกเซลที่อยู่ในตำแหน่งแถวและหลักสุดท้ายของภาพต้นฉบับจะถูกฝังลายน้ำด้วย

4.2.2 บล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ

หลังจากแบ่งบล็อกในภาพต้นฉบับแบบทับซ้อนทำให้ได้จำนวนบล็อกเพิ่มขึ้น และได้ขนาดของภาพลายน้ำใหญ่ขึ้นแล้ว ต้องออกแบบบล็อกที่เป็นตัวแทนบิตลายน้ำ ที่มีขนาดเท่ากับบล็อกที่แบ่งในภาพต้นฉบับคือ 3x3 พิกเซล และมีค่าสัมประสิทธิ์ 9 ค่าที่นำไปบวกเพิ่ม (เมื่อบิตลายน้ำที่ต้องการฝังเป็น 1) หรือลบออก (เมื่อบิตลายน้ำที่ต้องการฝังเป็น 0) จากค่าความเข้มแสงของพิกเซลในบล็อกของภาพต้นฉบับ

ทั้งนี้เนื่องจากมีการทับซ้อนกันของบล็อก การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงของบล็อกรอบข้างอาจส่งผลกระทบต่อบล็อกปัจจุบัน จึงจำเป็นต้องออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ ให้การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงของพิกเซลในบล็อกรอบข้าง ไม่ทำให้ผลรวมของค่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ของบล็อกปัจจุบัน เปลี่ยนกลับเป็นลดลง (หรือเพิ่มขึ้น) ซึ่งจะทำให้ผลของการถอดลายน้ำผิดเพี้ยนไปได้ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปภาพแสดงขั้นตอนการฝังภาพลายน้ำ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำมีส่วนที่ทับซ้อนกันและไม่ทับซ้อนกัน ในการออกแบบจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

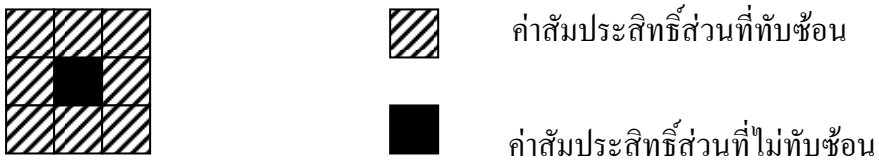
i. ค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่ทับซ้อน

ค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่ทับซ้อนจะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ใช่จุดศูนย์กลางของบล็อก ข้อดีของการทับซ้อนกัน คือ ถ้ารูปแบบของบิตที่ต้องการฝังเหมือนกันและอยู่ติดกัน เช่น 1 อยู่ติดกัน หรือ 0 อยู่ติดกัน การทับซ้อนกันของบล็อกจะทำให้เกิดความคงทนเพิ่มขึ้น เพราะว่าตำแหน่งที่ถูกทับซ้อนกันได้ถูกบวกหรือลบค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นตัวแทนบิตลายน้ำเข้าไปในภาพต้นฉบับถึง 2 ครั้ง แต่ถ้าบิตที่อยู่ติดกันเป็นบิตต่างชนิดกันจะเกิดการหักล้างกัน

ii. ค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่ไม่ทับซ้อน

ค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่ไม่ทับซ้อนจะอยู่ในตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของบล็อกเท่านั้น เนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่ทับซ้อน จึงเป็นจุดที่ไม่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากค่าสัมประสิทธิ์ของบล็อกข้างเคียง

รูปที่ 4.3 แสดงบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำขนาด 3x3 พิกเซล ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 9 ค่าถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ทับซ้อนกับบล็อกอื่นและส่วนที่ไม่ทับซ้อน



รูปที่ 4.3 บล็อกตัวแทนบิตลายน้ำขนาด 3x3 ที่ประกอบด้วยส่วนที่ทับซ้อนและส่วนที่ไม่ทับซ้อน

การที่ค่าสัมประสิทธิมีค่ามาก เมื่อนำไปบวกหรือลบ การเปลี่ยนแปลงก็จะมีค่ามากตามไปด้วย ซึ่งถ้าการเปลี่ยนแปลงมีค่ามาก ลายน้ำที่ฝังอยู่ก็จะมีความคงทนต่อการโจมตีมากตามไปด้วย

4.2.3 การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่ทับซ้อน

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่ทับซ้อนกันไว้ดังแสดงในรูปที่4.4

0	1	0
1	*C*	1
0	1	0

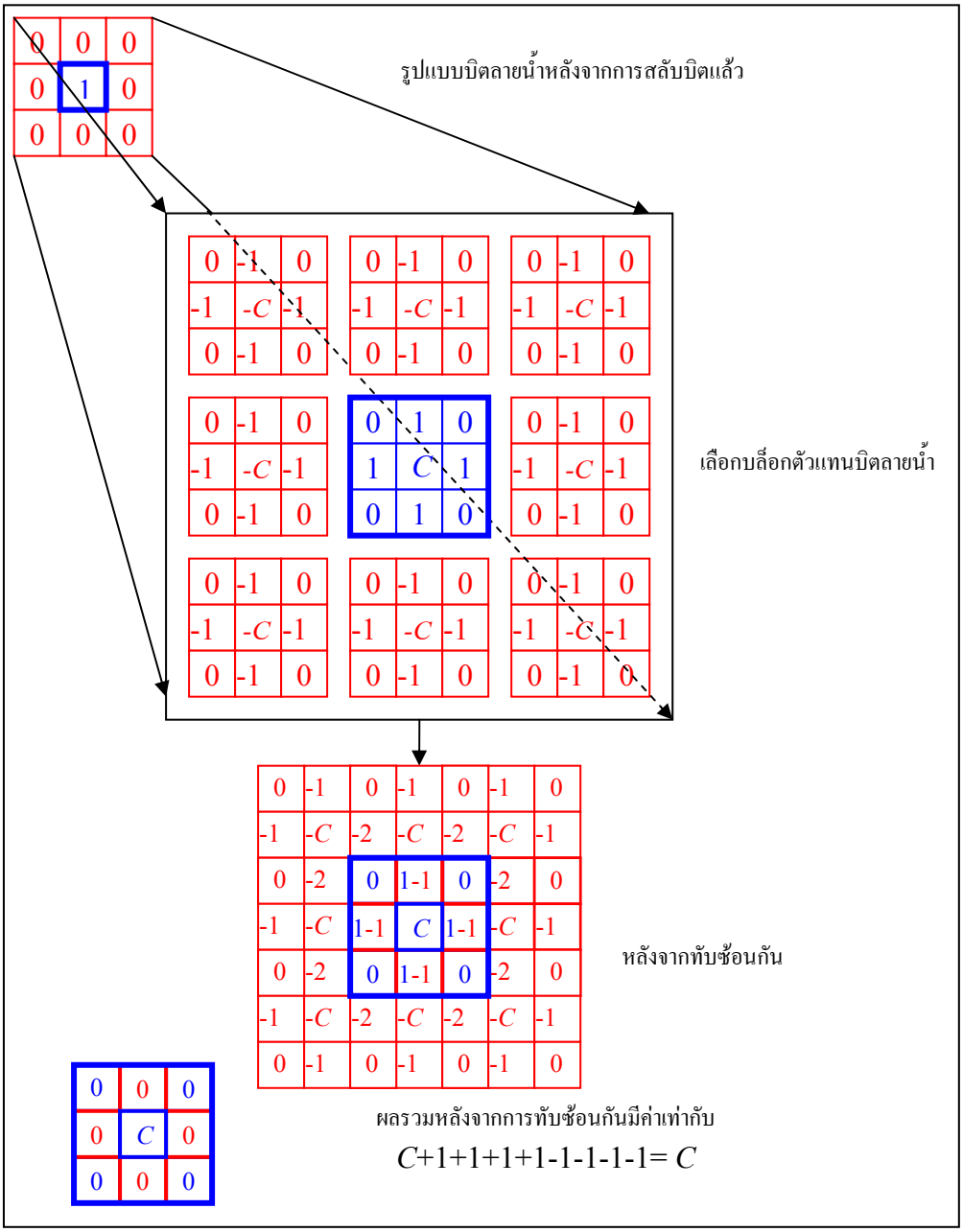
กรณีที่บิตลายน้ำที่ต้องการฝังเป็น 1 ให้นำค่าสัมประสิทธิ์ไปบวกเพิ่ม
กรณีที่บิตลายน้ำที่ต้องการฝังเป็น 0 ให้นำค่าสัมประสิทธิ์ไปลบออก
C คือ ค่าความคงทนที่น้อยที่สุดที่ยังคงเหลือในการตรวจสอบลายน้ำ

รูปที่ 4.4 บล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของพิกเซลที่มุมบล็อกทั้ง 4 มุม อาจถูกหักล้างโดยค่าสัมประสิทธิ์ของพิกเซลที่มุมจากบล็อก 3 บล็อกที่ทับซ้อนกันอยู่ (เช่น พิกเซลที่อยู่มุมบนซ้ายของบล็อกปัจจุบัน อาจถูกหักล้างโดยพิกเซลจากบล็อกซ้าย บล็อกบน และบล็อกบนซ้าย) ผู้วิจัยจึงออกแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่มุมทั้ง 4 เป็นศูนย์ เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ด้านบน ล่าง ซ้าย และขวาของจุดกึ่งกลางบล็อก จะถูกหักล้างโดยค่าสัมประสิทธิ์จากบล็อกเพียง 1 บล็อกเท่านั้น ผู้วิจัยจึงออกแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ตำแหน่งดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อมิให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากจนทำให้สามารถสังเกตเห็นได้ กล่าวคือ ถ้าบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำที่อยู่ด้านบน ล่าง ซ้าย และขวา เป็นประเภทเดียวกับบล็อกปัจจุบัน ก็จะทำให้ผลรวมความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับความเข้มแสงที่ตำแหน่งบน ล่าง ซ้าย และขวาของจุดกึ่งกลางบล็อกปัจจุบันเท่ากับ 2 แต่ถ้าเป็นบล็อกตัวแทนลายน้ำต่างชนิดกัน ก็จะหักล้างกันจนทำให้ผลรวมความเปลี่ยนแปลงเป็น 0 หรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งดังกล่าวนั้นเอง ในที่นี้กำหนดให้ C คือค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ถูกทับซ้อนโดยบล็อกรอบข้าง จึงไม่ถูกหักล้าง และจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่จะยังคงเหลืออยู่ แม้ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่ทับซ้อนจะถูกหักล้างจนหมดโดยบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำรอบข้าง ซึ่งกรณีที่แย่ที่สุดที่จะเกิดขึ้นคือ

- กรณีที่บิตลายน้ำที่มีค่าเป็น 1 ถูกล้อมรอบด้วยบิตลายน้ำที่มีค่าเป็น 0 ทั้งหมด
- กรณีที่บิตลายน้ำที่มีค่าเป็น 0 ถูกล้อมรอบด้วยบิตลายน้ำที่มีค่าเป็น 1 ทั้งหมด

รูปที่4.5 แสดงตัวอย่างกรณีที่บิตลายน้ำมีค่าเป็น 1 ถูกล้อมด้วยบิตลายน้ำที่มีค่าเป็น 0 ทั้ง 8 ด้าน



รูปที่ 4.5 รูปแบบบิตลายน้ำกรณีที่บิต 1 ถูกล้อมรอบด้วยบิต 0 ทั้งหมด

จากรูปที่ 4.5 ผลรวมของค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปภายในบล็อกกลางมีค่าเท่ากับ C ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการถอดลายน้ำ ก็จะได้บิตลายน้ำที่มีค่าเท่ากับ 1 และเนื่องจากกรณีดังกล่าวเป็นกรณีที่ทำให้ความชัดเจนของลายน้ำถูกรบกวนได้มากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำที่ออกแบบนี้ จะทำให้ค่าผลรวมของค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปภายในบล็อกมีค่าไม่น้อยกว่าค่า C

4.2.4 การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อก (ส่วนที่ไม่ทับซ้อน)

ถ้าเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำแล้ว ลายน้ำที่ฝังไว้ในภาพก็จะคงทนต่อการโจมตีมากขึ้น ทว่าหากกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำให้มีค่ามากเกินไป จะทำให้สังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนและง่ายขึ้น โดยเฉพาะส่วนของภาพที่มีความถี่ต่ำ (บริเวณที่เป็นสีพื้น) แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะสังเกตเห็นได้น้อยมาก เมื่อบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นส่วนของภาพที่มีความถี่สูง (บริเวณที่เป็นขอบของวัตถุ) รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบการสังเกตเห็นได้ของลายน้ำที่ฝังในบริเวณภาพที่มีความถี่ต่ำ (พื้นหลัง, หมวก) และความถี่สูง (ปอยผม)

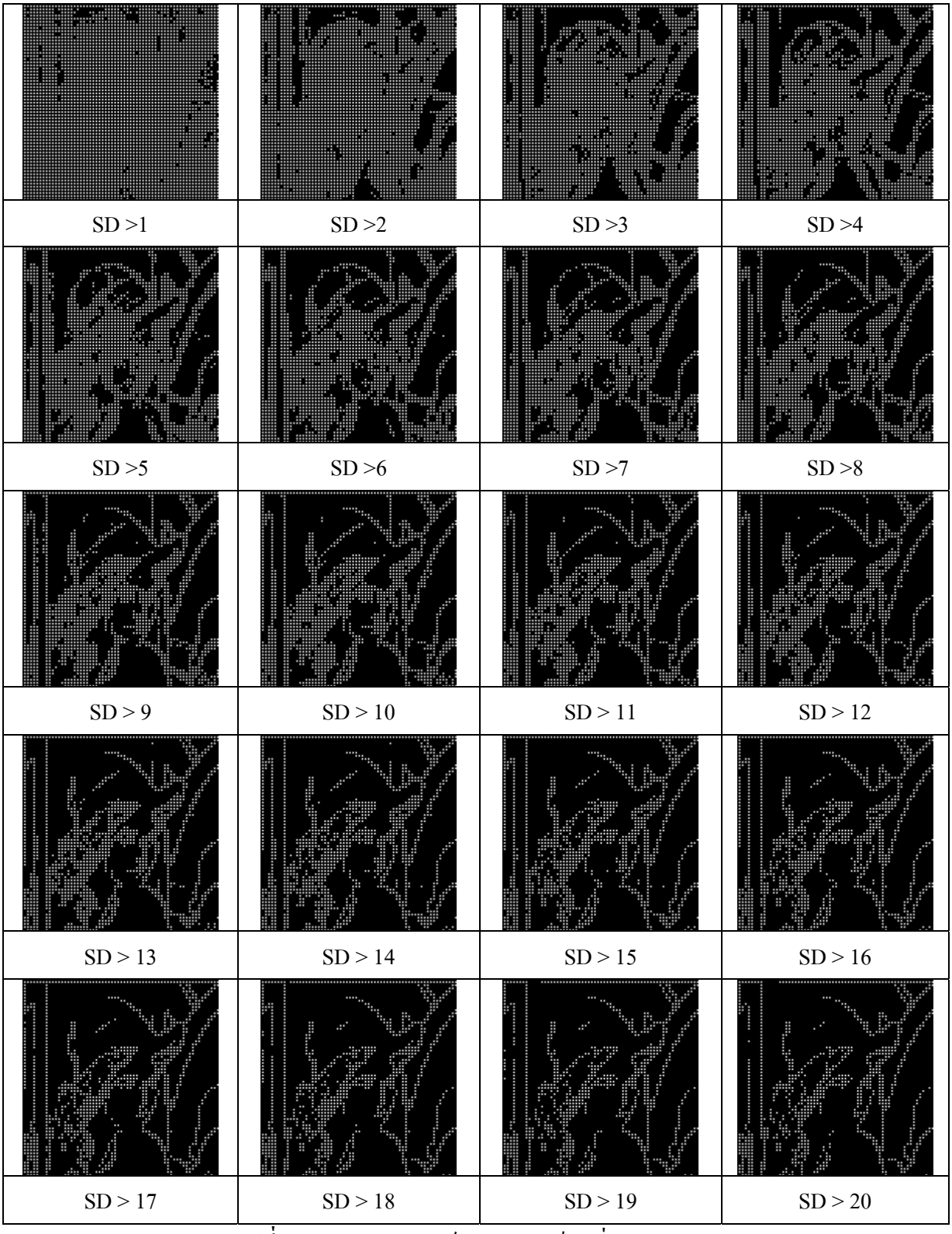
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบภาพต้นฉบับกับภาพที่ฝังลายน้ำด้วยวิธีบล็อกทับซ้อนเมื่อ C = 20

จากคุณสมบัติในการซ่อนตัวของลายน้ำจะมีความแตกต่างกันเมื่อฝังลายน้ำไว้ในบริเวณภาพที่มีความถี่สูงและความถี่ต่ำ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำให้ค่าดังกล่าวมีค่ามากเมื่อความถี่ของภาพบริเวณที่ฝังมีค่ามาก และมีค่าน้อยเมื่อความถี่ของภาพบริเวณที่ฝังมีค่าน้อย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความคงทนให้กับลายน้ำ โดยยังคงคุณสมบัติการซ่อนตัวของลายน้ำไว้ ในที่นี้ผู้วิจัยเลือกใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) [10] เป็นตัวชี้วัดความถี่ภายในบล็อกของภาพต้นฉบับ ซึ่งสามารถจำแนกบล็อกทับซ้อนภายในภาพต้นฉบับออกเป็นกลุ่มๆ ได้ดังต่อไปนี้

4.2.4.1 การจำแนกบล็อกที่มีความถี่สูงและบล็อกที่มีความถี่ต่ำ

บล็อกที่มีความถี่ต่ำคือบล็อกที่มีค่าความเข้มแสงของแต่ละพิกเซลภายในบล็อกแตกต่างกันไม่มาก และบล็อกที่มีความถี่สูงคือบล็อกที่มีค่าความเข้มแสงของแต่ละพิกเซลภายในบล็อกแตกต่างกันมาก ซึ่งค่าความถี่ภายในบล็อกสามารถวัดได้ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของบล็อกในรูปภาพต้นฉบับที่มีค่า SD มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ใต้ภาพ โดยแสดงเป็นจุดสีขาว ส่วนจุดสีดำคือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของบล็อกที่มีค่า SD น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้หรือเป็นตำแหน่งที่ไม่ใช่จุดศูนย์กลางของบล็อก



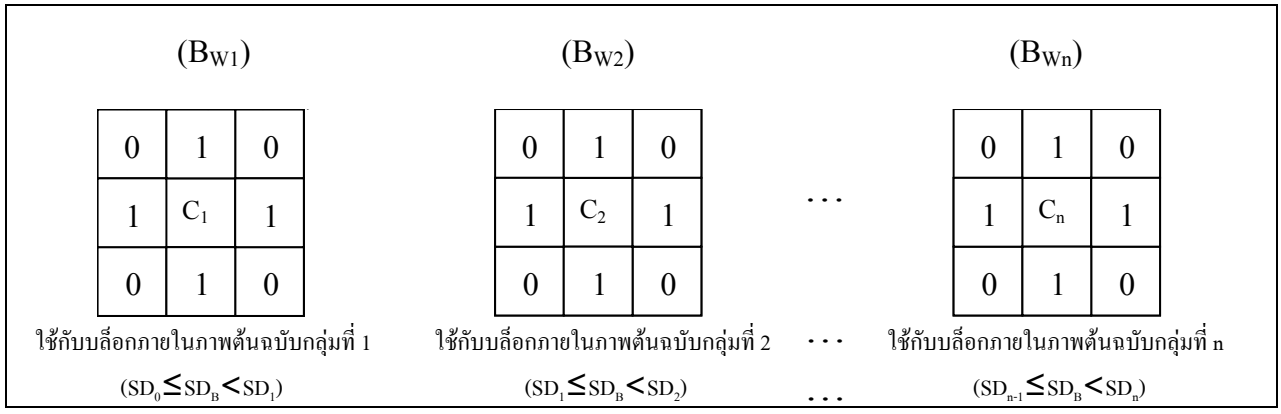
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของบล็อกที่ค่า SD ต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 ค่า SD สามารถนำมาใช้เป็นตัวกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตามที่ต้องการได้ เนื่องจากบล็อกที่มี SD มาก (ความถี่สูง) คือบล็อกที่เป็นบริเวณขอบของวัตถุหรือบล็อกที่มีลวดลายซับซ้อน และบล็อกที่มี SD ต่ำ (ความถี่ต่ำ) คือบล็อกที่เป็นบริเวณพื้นหลังหรือบล็อกที่มีค่าความเข้มแสงใกล้เคียงกัน

ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ ตามระดับค่า SD ของบล็อกทับซ้อนในภาพต้นฉบับ

4.2.4.2 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตามระดับค่า SD

การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ ให้มีค่าแปรผันตามค่า SD ของบล็อกภายในภาพต้นฉบับ สามารถกระทำได้โดยจำแนกบล็อกที่แบ่งไว้ในภาพต้นฉบับออกเป็นกลุ่มๆ ตามระดับค่า SD จากนั้นทำการออกแบบบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ (B_W) จำนวน n แบบ (B_{W1}, B_{W2}, B_{W3},..., B_{Wn}) ให้มีค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อก (C) แตกต่างกัน โดย B_{Wi} จะมีค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางบล็อกเท่ากับ C_i และจะใช้สำหรับฝังแทนบิตลายน้ำในกรณีที่บล็อกภายในภาพต้นฉบับ (B_H) ที่พิจารณาอยู่นั้นมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD_B) อยู่ในช่วง [SD_{i-1} , SD_i) เมื่อกำหนดให้ SD_i คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของกลุ่มที่ i และ SD_0=0, SD_n=∞ ค่า C_i ที่กำหนดให้บล็อกตัวแทนแต่ละแบบนั้นมีความสัมพันธ์กันแบบที่ $C_{i-1} < C_i$ เมื่อ i=1, 2, 3,...,n รูปที่ 4.8 แสดงบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ n แบบ



รูปที่ 4.8 บล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ n แบบ

เนื่องจากความคงทนของลายน้ำแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ ดังนั้นการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ให้มีค่ามาก จะทำให้ลายน้ำมีความคงทนมากขึ้น แต่ความสามารถในการซ่อนตัวของลายน้ำจะแปรผันตาม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบล็อกภายในภาพต้นฉบับที่จะฝังลายน้ำนั้น ดังนั้นจึงควรกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ให้มีขนาดแปรผันตามค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานของบล็อกที่จะนำลายน้ำไปฝัง โดยขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ไม่ควรมากเกินไปจนทำให้สังเกตได้

ข้อจำกัดหนึ่งของการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตามระดับค่า SD คือ ผู้ใช้ต้องกำหนดจำนวนกลุ่มของระดับค่า SD และกำหนดรูปแบบของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำและค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางเพื่อใช้กับระดับค่า SD แต่ละกลุ่มด้วยตนเอง ทำให้ขาดความสะดวกในการใช้งาน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยจึงเสนอวิธีการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำแบบอัตโนมัติ ตามค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้จากภาพต้นฉบับ โดยใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โปเน็นเชียลในการกำหนดรูปแบบการปรับเปลี่ยนค่า และเพื่อป้องกันมิให้การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์น้อยเกินไป (ลายน้ำไม่คงทนต่อการโจมตี) หรือมากเกินไป (สังเกตเห็นลายน้ำได้) จึงมีพารามิเตอร์ให้กำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์เพื่อควบคุมปริมาณข้อมูลลายน้ำที่ฝัง และยังมีพารามิเตอร์ให้กำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อควบคุมช่วงของการปรับเปลี่ยนอัตโนมัติ

หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกแบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติ

4.2.5 การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางบล็อกแบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติ

สมการ 4.3 คือรูปทั่วไปของสมการที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ

$$C = F(SD_B, SD_{MIN}, SD_{MAX}, C_{MIN}, C_{MAX}, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, ..., \alpha_n) \qquad (4.3)$$

เมื่อกำหนดให้

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ

SD_B คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มแสงในบล็อกทับซ้อนที่แบ่งไว้ในภาพต้นฉบับ โดยค่า mean ที่ใช้คำนวน คือค่า mean ของบล็อก

SD_{MIN} คือ ค่า SD_B ที่น้อยที่สุดที่ค่า C เริ่มมีการปรับเปลี่ยนอัตโนมัติ (ผู้ใช้เป็นผู้กำหนด) *

SD_{MAX} คือ ค่า SD_B ที่มากที่สุดที่ค่า C จะมีการปรับเปลี่ยนอัตโนมัติ (ผู้ใช้เป็นผู้กำหนด) *

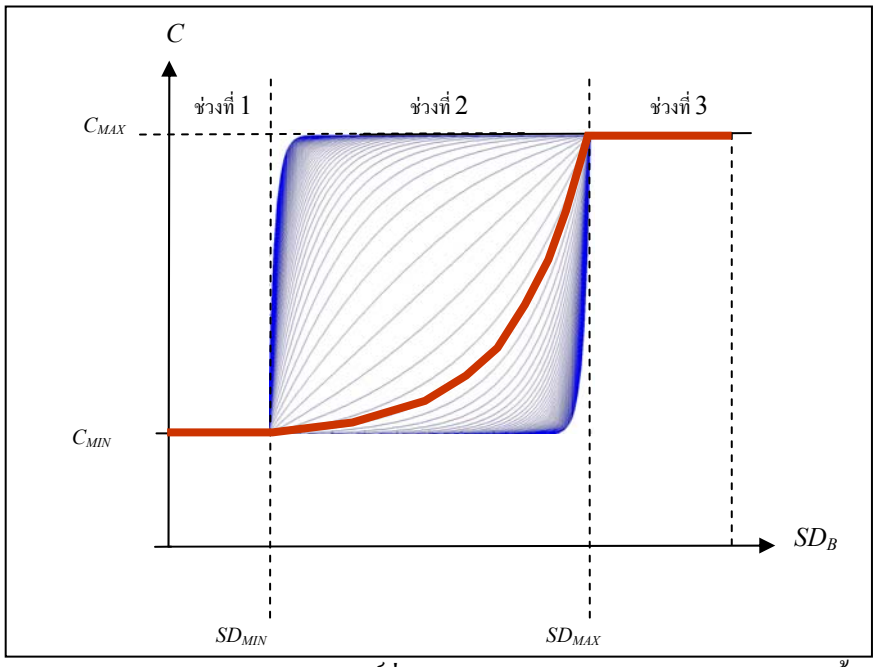
C_{MIN} คือ ค่า C ต่ำสุดที่กำหนดให้บล็อกตัวแทนบิตลายน้ำกรณีบล็อกทับซ้อนในภาพต้นฉบับมี $SD_B < SD_{MIN}$ (ผู้ใช้เป็นผู้กำหนด)

C_{MAX} คือ ค่า C สูงสุดที่กำหนดให้บล็อกตัวแทนบิตลายน้ำกรณีบล็อกทับซ้อนในภาพต้นฉบับมี $SD_B \geq SD_{MAX}$ (ผู้ใช้เป็นผู้กำหนด)

α_i คือ ค่าพารามิเตอร์ตัวที่ i จากพารามิเตอร์ n จำนวน (i = 1, 2, 3, … ,n) ที่ใช้สำหรับปรับรูปแบบของฟังก์ชัน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกลักษณะการปรับเปลี่ยนอัตโนมัติของค่า C ตามต้องการ ในที่นี้จำนวนพาราเตอร์ n ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันที่ใช้ว่าเป็นฟังก์ชันใด

***หมายเหตุ** การหาค่า SD_B จากการแบ่งบล็อกขนาด 3x3 พิกเซล ในภาพต้นฉบับ ทำให้ค่า SD_B ถูกคำนวณมาจากค่าความเข้มแสง 9 ค่า ถ้าค่าความเข้มแสงอยู่ในช่วง [0, 255] จะสามารถคำนวณหาค่า SD_B ต่ำสุดและสูงสุดที่เป็นไปได้ โดยค่า SD_B จะมีค่าต่ำสุด เมื่อค่าความเข้มแสงทุกพิกเซลในบล็อกมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ $SD_B = 0$ ส่วนค่า SD_B จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าความเข้มแสงทั้ง 9 คือ {0, 0, 0, 0, 0, 255, 255, 255, 255} หรือ {0, 0, 0, 0, 255, 255, 255, 255, 255} ซึ่งจะทำให้ $SD_B = 134.3968$

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอฟังก์ชันในการปรับค่าแบบอัตโนมัติ โดยใช้คือฟังก์ชันเอ็กซ์โปเน็นเชียล ซึ่งการปรับค่าแบบอัตโนมัติจะเกิดขึ้นเฉพาะช่วง [SD_{MIN}, SD_{MAX}) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (แกนนอน คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบล็อกทับซ้อนภายในภาพต้นฉบับ (SD_B) แกนตั้ง คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ (C))



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการปรับค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ (C) แบบอัตโนมัติ

จากรูปที่ 4.9 บล็อกทับซ้อนภายในภาพต้นฉบับจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามค่า SD_B และค่าสัมประสิทธิ์ C ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ ก็จะถูกกำหนดค่าแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 เมื่อ $SD_B <$ $_{MIN}$ (บล็อกความถี่ต่ำ)

$C = C_{MIN}$

กลุ่มที่ 2 เมื่อ $SD_{MIN} \le SD_B < SD_{MAX}$

C ปรับเปลี่ยนตามฟังก์ชันเอ็กซ์โปเน็นเชียล

กลุ่มที่ 3 เมื่อ $SD_B \ge SD_{MAX}$ (บล็อกความถี่สูง)

$C = C_{MAX}$

การปรับค่าในกลุ่มที่ 2 ตามสมการเอ็กซ์โปเน็นเชียลปรับโดยสร้างสมการเอ็กซ์โปเน็นเชียลที่มีอินพุตอยู่ในช่วง [0,1] และให้เอาพุตอยู่ในช่วง [0,1] เพื่อนำเอาสมการดังกล่าวเทียบบัญญัติไตรยางค์ให้อินพุตอยู่ในช่วง [SD_{MIN} , SD_{MAX}] และให้เอาพุตอยู่ในช่วง [C_{MIN} , C_{MAX}] เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ C ที่เหมาะสมกับบล็อกทับซ็อนที่มีค่า SD_B แต่ละค่า

ถ้ากำหนดค่า k คือ อัตราความโค้งของกราฟในฟังก์ชันเอ็กซ์โปเน็นเชียล โดยที่ $k = (-\infty,\infty)$ แล้วสมการเอ็กซ์โปเน็นเชียลที่มีอินพุตและเอาพุตอยู่ในช่วง [0,1] คือ

$$F(x) = \begin{cases} (e^{(k\,x)} - e^{0}) / (e^{k} - e^{0k}) & \text{เมื่อ } k \neq 0 \\ x & \text{เมื่อ } k = 0 \end{cases} \qquad (4.4)$$

โดยที่ x คือค่า SD_B ที่ถูกปรับให้อยู่ในช่วง [0,1] ด้วยสมการ 4.5

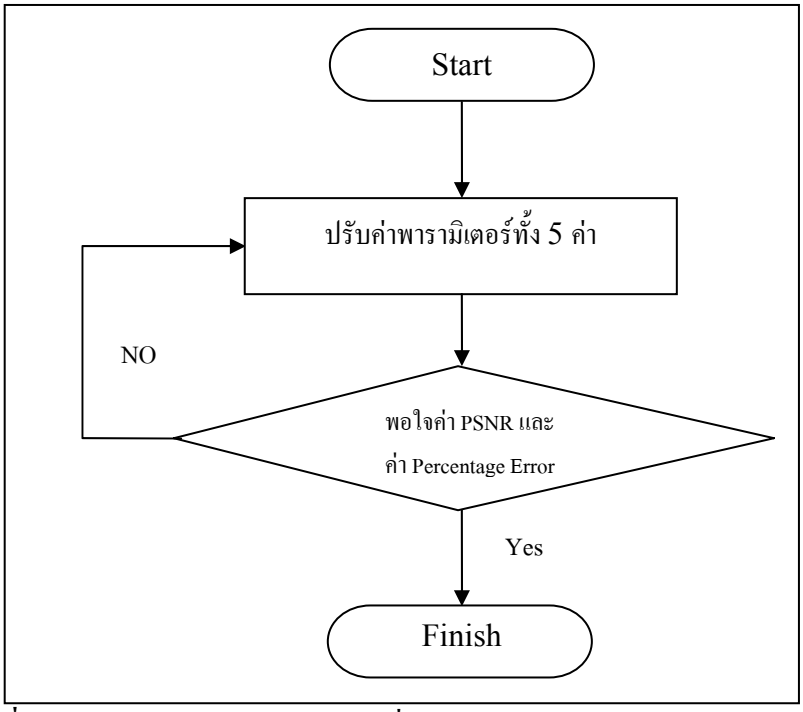
$$x = (SD_B - SD_{MIN}) / (SD_{MAX} - SD_{MIN}) \qquad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.4 และ 4.5 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ C ที่จุดศูนย์กลางของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ เพื่อนำไปใช้กับบล็อกทับซ้อนในภาพต้นฉบับที่มีค่าเบี่ยนเบนมาตรฐานเท่ากับ SD_B สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 4.6 ซึ่งจะทำการปรับค่า $F(x)$ ให้เป็นค่า C ที่อยู่ในช่วง [C_{MIN},C_{MAX}]

$$C = (F(x) \times (C_{MAX} - C_{MIN})) + C_{MIN} \qquad (4.7)$$

หมายเหตุ เมื่อค่า $k > 0$ กราฟของฟังก์ชันเอ็กซ์โปเน็นเชียลจะโค้งหงาย
เมื่อค่า $k < 0$ กราฟของฟังก์ชันเอ็กซ์โปเน็นเชียลจะโค้งคว่ำ
เมื่อค่า $k = 0$ ในที่นี้จะกำหนดให้ใช้ฟังก์ชัน Linear

ในการใช้งาน ผู้ใช้เพียงแต่ระบุค่า SD_{MIN}, SD_{MAX}, C_{MIN}, C_{MAX} และ ค่า k เพื่อกำหนดขอบเขตค่า SD ของบล็อกทับซ้อนและขอบเขตค่าสัมประสิทธิ์ C ของบล็อกตัวแทนบิตลายน้ำ รวมถึงการกำหนดอัตราการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว ซึ่งการกำหนดค่าต่างๆ เหล่านี้จะทำให้ผู้ใช้สามารถควบคุมปริมาณลายน้ำที่จะฝังเพื่อให้ลายน้ำคงทน ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงในภาพที่ฝังลายน้ำจนสังเกตเห็นได้ ดังแสดงวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพการปรับค่าเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน

การปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ลายน้ำตามต้องการนั้น ผู้ใช้งานควรทราบว่าบล็อกทับซ้อนใดอยู่ในกลุ่มที่เท่าไร ตัวอย่างเช่น ถ้าผู้ใช้กำหนด SD_{MIN} = 8 และ SD_{MAX} = 40 จะทำให้บล็อกทับซ้อนในภาพต้นฉบับถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังรูปที่ 4.11

รูปที่ 4.11 แสดงการภาพแบ่งออกเป็น 3 ส่วน จากค่า SD_{MIN} และ SD_{MAX}

หลังจากปรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 5 ค่าแล้ว ให้เปรียบเทียบภาพหลังจากการฝังลายน้ำกับภาพต้นฉบับในแต่ละกลุ่มของบล็อกทับซ้อน โดยพิจารณาว่าผู้ใช้งานต้องการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของลายน้ำในกลุ่มใด ถ้าผู้ใช้งานต้องการปรับค่า PSNR หรือคุณภาพของภาพหลังจากการฝังลายน้ำ ก็ให้เลือกปรับตามตารางที่ 4.1 แต่ถ้าผู้ใช้งานต้องการปรับค่า E_{AVG} หรือความคงทนของลายน้ำที่ฝังอยู่ก็ให้เลือกปรับตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อปรับปรุงค่า PSNR ของภาพหลังจากฝังลายน้ำ

ความต้องการของผู้ใช้งาน	พารามิเตอร์ที่ต้องปรับค่า				
	C_{MIN}	C_{MAX}	k	SD_{MIN}	SD_{MAX}
เพิ่ม/ลด PSNR ในกลุ่มที่ 1	ลด/เพิ่ม	-	-	เพิ่ม/ลด	-
เพิ่ม/ลด PSNR ในกลุ่มที่ 2	ลด/เพิ่ม	ลด/เพิ่ม	เพิ่ม/ลด	เพิ่ม/ลด	เพิ่ม/ลด
เพิ่ม/ลด PSNR ในกลุ่มที่ 3	-	ลด/เพิ่ม	-	-	เพิ่ม/ลด

ตารางที่ 4.2 แสดงการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อปรับปรุงค่า E_{AVG} ของลายน้ำที่ฝัง

ความต้องการของผู้ใช้งาน	พารามิเตอร์ที่ต้องปรับค่า				
	C_{MIN}	C_{MAX}	k	SD_{MIN}	SD_{MAX}
ลด/เพิ่ม PSNR ในกลุ่มที่ 1	เพิ่ม/ลด	-	-	ลด/เพิ่ม	-
ลด/เพิ่ม PSNR ในกลุ่มที่ 2	เพิ่ม/ลด	เพิ่ม/ลด	ลด/เพิ่ม	ลด/เพิ่ม	ลด/เพิ่ม
ลด/เพิ่ม PSNR ในกลุ่มที่ 3	-	เพิ่ม/ลด	-	-	ลด/เพิ่ม

การเพิ่ม/ลดค่า PSNR ของภาพหลังฝังลายน้ำ ตามตารางที่ 4.1 คือการเพิ่ม/ลด คุณภาพของภาพหลังฝังลายน้ำ กล่าวคือความแตกต่างระหว่างภาพหลังฝังลายน้ำกับภาพต้นฉบับจะลดลง/เพิ่มขึ้น นั้นเอง แต่การ เพิ่ม/ลด ค่า PSNR จะส่งผลทำให้ความคงทนของลายน้ำ ลดลง/เพิ่มขึ้น (E_{AVG} เพิ่มขึ้น/ลดลง) ดังนั้นถ้าผู้ใช้งานต้องการให้ความคงทนของลายน้ำในบล็อกทับซ้อนกลุ่มใดเพิ่มขึ้น/ลดลง (E_{AVG} ลดลง/เพิ่มขึ้น) ก็สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.2

ในบทถัดไปจะเป็นการทดสอบวิธีการฝังลายน้ำโดยวิธีที่นำเสนอ และเปรียบเทียบผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า SD_{MIN}, SD_{MAX}, C_{MIN}, C_{MAX} และค่า k แบบต่างๆ