

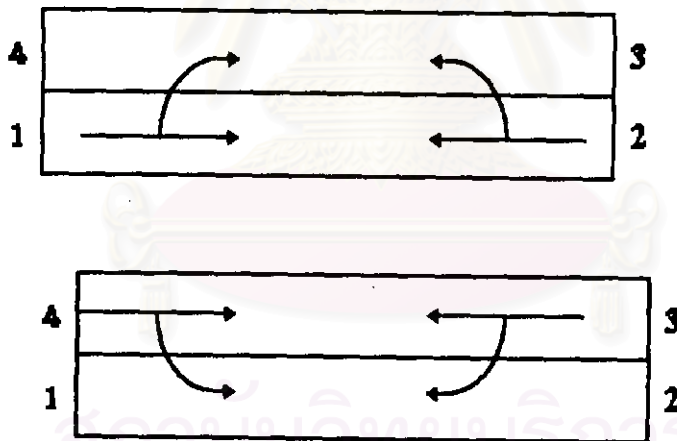
## บทที่ 4

### โคเรชันแนตคัปเปออร์และถารอกแบบ

จุดประสงค์ในการออกแบบ โคเรชันแนตคัปเปออร์ที่จะกล่าวถึงในบทนี้คือการแสดงให้เห็นถึงการนำเอา Chebyshev polynomial และ Binomial polynomial มาใช้กับผลของการวิเคราะห์โคเรชันแนตคัปเปออร์แบบหลายรู (Elliott และ Kim, 1990:411-412), (Elliott, 1993:346-348) เพื่อให้ได้โคเรชันแนตคัปเปออร์ที่มีความกว้างของช่วงความถี่, โคเรกทีวิตีและคัปปลิงที่เราต้องการ

#### 4.1 คุณสมบัติทั่วไปของโคเรชันแนตคัปเปออร์

โคเรชันแนตคัปเปออร์เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยพอร์ท(port) 4 พอร์ท โดยเมื่อให้คลื่นตกกระทบบที่พอร์ทที่ 1 คลื่นตกกระทบนั้นก็จะออกไปยังพอร์ทที่ 2 และคัปปลิงสู่พอร์ทที่ 3 โดยที่จะ ไม่มีคลื่นออกไปยังพอร์ทที่ 4 เลย และในทำนองเดียวกันเมื่อให้คลื่นตกกระทบบที่พอร์ทที่ 2 ก็จะมีคลื่นออกมาที่พอร์ทที่ 1 และ 4 โดยไม่มีคลื่นออกมาที่พอร์ทที่ 3 เลย และเมื่อให้คลื่นตกกระทบบที่พอร์ทที่ 3 ก็จะไม่มีการออกมาที่พอร์ทที่ 2 แต่จะมีคลื่นออกมาที่พอร์ทที่ 1 และ 4 เมื่อให้คลื่นตกกระทบบที่พอร์ทที่ 4 ก็จะไม่มีการออกมาที่พอร์ทที่ 1 แต่จะออกมาที่พอร์ทที่ 2 และ 3 เท่านั้น โดยที่ได้กล่าวทั้งหมดมานี้สามารถแสดงให้เห็นดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงทิศทางของคลื่นในโคเรชันแนตคัปเปออร์เมื่อกลิ้นตกกระทบบในพอร์ทต่างๆ

อุปกรณ์โคเรชันแนตคัปเปออร์นี้มาไปใช้ในการวัดหาพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยเมื่อให้คลื่นตกกระทบบที่พอร์ทที่ 1 เมื่อทำการวัดกำลังที่พอร์ทที่ 3 ก็สามารถหา กำลังที่พอร์ทที่ 1 ได้ เนื่องจากเป็นส่วนโดยตรงกับพอร์ทที่ 1

#### 4.2 เมตริกซ์-เอส ของโคเรชันแนตคัปเปออร์

อุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน ทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ ฯลฯ สามารถที่จะนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริก-เอส ได้ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ผ่านมาแล้วนั้นว่าเมตริก-เอสจะแสดงถึงคุณสมบัติ

การส่งผ่านพลังงานภายใต้เงื่อนไขของการแมทริกซ์โพลด์ เราสามารถหาเมตริก-เอสโคเรกชันแนลคัปเปิลอร์ได้ดังต่อไปนี้ (Collin, 1992:415-416)

ภายใต้เงื่อนไขการแมทริกซ์โพลด์เราจะได้  $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$  และจะได้ว่า  $S_{14} = S_{23} = 0$  เขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{24} & S_{34} & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อ จากคุณสมบัติยูนิทารีนำแถวที่ 1 คูณกับคอนจูเกตของแถว 4 และนำแถวที่ 2 คูณกับคอนจูเกตของแถวที่ 3 จะได้ว่า

$$S_{12}S_{24}^* + S_{13}S_{34}^* = 0 \quad (4.1)$$

$$S_{12}S_{13}^* + S_{24}S_{34}^* = 0 \quad (4.2)$$

เพราะ  $|S_{12}S_{24}^*| = |S_{12}||S_{24}|$  จะได้ว่า

$$|S_{12}||S_{24}| = |S_{13}||S_{34}|$$

$$|S_{12}||S_{13}| = |S_{24}||S_{34}|$$

นำสมการ (4.1) ทหารด้วยสมการ (4.2) จะได้

$$\frac{|S_{12}|}{|S_{13}|} = \frac{|S_{13}|}{|S_{24}|} \quad (4.3)$$

นั่นคือ

$$|S_{13}| = |S_{24}| \quad (4.4)$$

และ

$$|S_{12}| = |S_{34}|$$

ซึ่งหมายความว่าคัปปลิงระหว่างพอร์ทที่ 1 และพอร์ทที่ 3 เท่ากันกับพอร์ท 2 และพอร์ท 4 และคัปปลิงระหว่างพอร์ท 1 และ 2 เท่ากับพอร์ท 3 และพอร์ท 4

ผลคูณของแถวที่ 1 กับตัวของมันเองเท่ากับ 1 นั่นคือ

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1 \quad (4.5)$$

และผลคูณของแถวที่ 2 กับตัวมันเองจะเท่ากับ 1

$$|S_{12}|^2 + |S_{24}|^2 = 1 \quad (4.6)$$

เราสามารถเลือกกระบวนอ้างอิงที่เหมาะสมในพอร์ทที่ 1 ที่ทำให้  $S_{12}$  เป็นค่าจริงบวกในรูป  $K_1$  จากสมการ (4.1) เขียนใหม่ได้คือ

$$K_1(S_{24}^* + S_{13}) = 0 \quad (4.7)$$

จากสมการ (4.4) ให้  $|S_{13}| = |S_{24}| = K_2$  เลือกกระบวนที่เหมาะสมในพอร์ทที่ 3 เพื่อให้  $S_{24}$  และ  $S_{13}$  เป็นจำนวนจินตภาพที่เป็นบวก  $jK_2$  เพื่อให้สอดคล้องกับสมการ (4.7)

ดังนั้นจะได้ว่า

$$S_{12} = S_{24} = K_1 \quad (4.8)$$

และ

$$S_{13} = S_{24} = jK_2 \quad (4.9)$$

จากสมการ (4.5) จะได้ว่า

$$K_1^2 + K_2^2 = 1 \quad (4.10)$$

$$K_2 = \sqrt{1 - K_1^2} \quad (4.11)$$

เขียนในรูปเมตริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} 0 & K_1 & jK_2 & 0 \\ K_1 & 0 & 0 & jK_2 \\ jK_2 & 0 & 0 & K_1 \\ 0 & jK_2 & K_1 & 0 \end{bmatrix}$$

### 4.3 พารามิเตอร์ของโคเรกชันแนคป์เปลอร์



รูปที่ 4.2 แสดงอิงทิสของคลื่นที่ตกกระทบและคลื่นที่ส่งผ่านโคเรกชันแนคป์เปลอร์

พารามิเตอร์ที่ใช้ออกคุณสมบัติของโคเรกชันแนคป์เปลอร์คือ ค่าคัปปลิง(Coupling) และ ค่าโคเรกทิวิตี(Directivity)

ค่าคัปปลิงคือ

$$C = 20 \log\left(\frac{P_i}{P_f}\right)$$

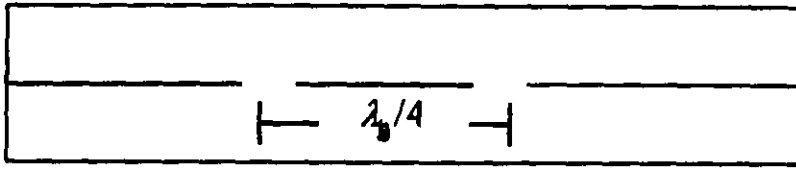
และค่าโคเรกทิวิตีคือ

$$D = 20 \log\left(\frac{P_f}{P_b}\right)$$

โคเรกทิวิตีเป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงอัตราส่วนของกำลังที่ออกไปสู่พอร์ทที่ 4 เมื่อให้คลื่นตกกระทบที่พอร์ทที่ 1 กับกำลังที่ออกมาในพอร์ทที่ 3 ซึ่งในทางอุดมคติแล้วค่าโคเรกทิวิตีควรมีค่าเป็นอนันต์และมีค่าขึ้นกับความถี่

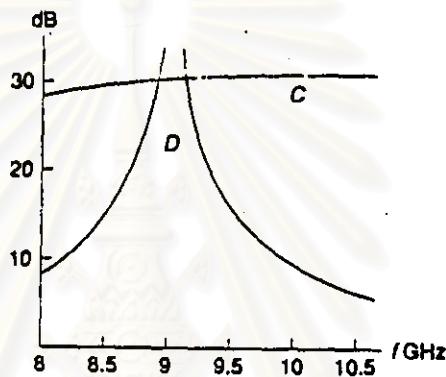
ค่าคัปปลิงคือค่าที่บอกถึงอัตราส่วนของกำลังที่ตกกระทบที่พอร์ท 1 กับกำลังงานที่ถูกคัปปลิงไปยังพอร์ทที่ 3 เมื่อให้คลื่นตกกระทบที่พอร์ทที่ 1 สังเกตจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าโคเรกทิวิตีมีค่าสูงจะแสดงถึงว่ามีคลื่นที่แพร่กลับมายังพอร์ทที่ 4 น้อย ส่วนค่าคัปปลิงยังมีค่ามากก็จะแสดงถึงคลื่นจากพอร์ท 1 ถูกคัปปลิงไปยังพอร์ทที่ 3 มาก

ปกติแล้วการออกแบบให้โคเรกชันแนคป์เปลอร์ให้ใช้ได้ที่มีความถี่โคความถี่หนึ่งสามารถทำได้โดยง่ายโดยใช้ทฤษฎีของเบท (Bethe) ดังที่ได้กล่าว ไปแล้ว ในบทที่ 3 และ โคเรกชันแนคป์เปลอร์แบบ 2 รู โดยให้มีระยะห่างของรูเท่ากับ  $\lambda_c/4$  ดังแสดงไว้ในรูป 4.3



รูปที่ 4.3 ไคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์แบบ 2 าร

ซึ่งการออกแบบ ไคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ทั้งสองวิธีสามารถนำไปเขียนกราฟได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงถึงไคเรกทีวิตีคัปเปิลเลอร์โดยวิธีของ Bethe

ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ไคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ใช้ได้ดีในช่วงความถี่ที่เราต้องการจึงต้องมีการออกแบบดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

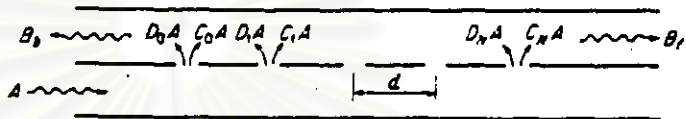
ในปี 1946 Dolph (Dolph, 1946:335-348) ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะใช้ Chebyshev Polynomial มาใช้กับผลที่มีรูปแบบที่ประกอบด้วย beam หลัก (main beam) ที่ด้านข้างล้อมรอบด้วย lobes ซึ่งมีความสูงที่ถูกกำหนดไว้เท่าๆกัน เทคนิคของ Dolph ถูกนำไปใช้ในการออกแบบ Transformer (Collin 1955:179-185), (Cohn, 1955:16-21) ในปี 1955

ต่อมา Levy (Levy, 1968:995-1006) ได้นำเสนอการวิเคราะห์และสังเคราะห์ไคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์แบบหลายรูขึ้นมาและในปี 1990 Elliott และ Kim (Elliott และ Kim, 1990:411-416) ได้ใช้วิธีการทำซ้ำ (Iterative Technique) ในการออกแบบไคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์

4.4 ไคเรกชันแนลคัปเปอเรอร์แบบหลายรู

เพื่อที่จะออกแบบไคเรกชันแนลคัปเปอเรอร์แบบหลายรูให้มีความกว้างของช่วงความถี่, ไคเรกทิวิตีและคัปปลิงให้ได้ตามที่เรต้องการเราต้องพิจารณาการวิเคราะห์ในรายละเอียดของไคเรกชันแนลคัปเปอเรอร์แบบหลายรู (Elliott และ Kim, 1990:411-412), (Elliott, 1993:346-348) ดังต่อไปนี้

พิจารณาารูปของไคเรกชันแนลคัปเปอเรอร์ที่มีจำนวนรูเท่ากับ  $N+1$  รู โดยที่แต่ละรูมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ  $d = \lambda_g / 4$  โดยคิดว่าแต่ละรูมีการคัปปลิงที่น้อยมาก ดังนั้นแต่ละรูจะคิดโดยให้มีแอมพลิจูดเท่ากันหมดโดยให้เท่ากับ  $A$  ถับประสิทธิภาพการคัปปลิงเท่ากับ  $c_n$  ในทิศทางไปข้างหน้าและเท่ากับ  $d_n$  ในทิศทางไปข้างหลัง โดย  $n = 0, 1, 2, \dots, N$



รูปที่ 4.5 ไคเรกชันแนลคัปเปอเรอร์ที่มีรูจำนวน N+1

คลื่นถัณฑ์ออกไปยังพอร์ทที่ 3 คือ

$$B_f = A e^{-i\beta Nd} \sum_{n=0}^N c_n \tag{4.12}$$

และคลื่นถัณฑ์ออกไปยังพอร์ทที่ 4 คือ

$$B_b = A \sum_{n=0}^N d_n e^{-i2n\beta d} \tag{4.13}$$

ค่าคัปปลิงและไคเรกทิวิตีคือ

$$C = -20 \log \left| \sum_{n=0}^N c_n \right| \tag{4.14}$$

$$D = 20 \log \frac{\left| \sum_{n=0}^N c_n \right|}{\left| \sum_{n=0}^N d_n e^{-i2n\beta d} \right|} \tag{4.15}$$

พิจารณาพจน์  $\sum_{n=0}^N d_n e^{-i2n\beta d}$

ให้

$$\theta = \beta d$$

$$\varphi = -2\beta d = -2\theta$$

$$w = e^{i\varphi}$$

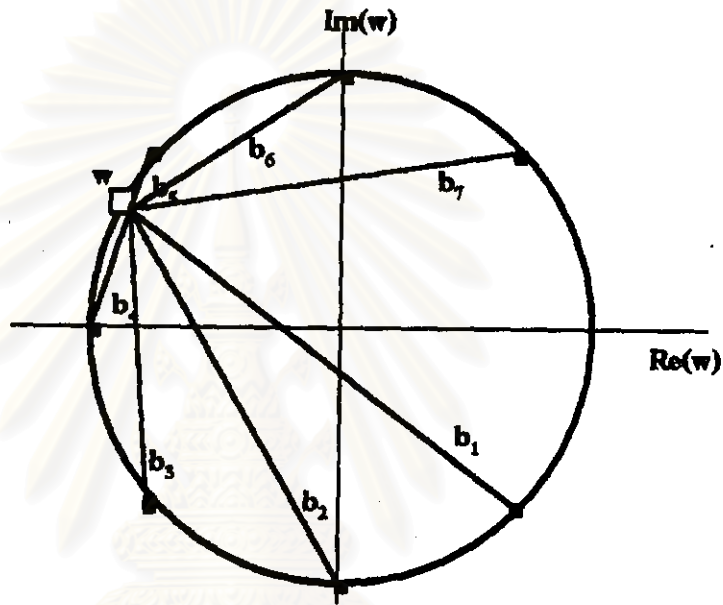
เราสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\sum_{n=0}^N d_n e^{-i2n\beta d} = d_N \sum_{n=0}^N \frac{d_n}{d_N} w^n = d_N \prod_{n=1}^N (w - w_n) \tag{4.16}$$

$$\left| \sum_{n=0}^N d_n e^{-i2n\beta d} \right| = \left| d_N \prod_{n=1}^N (w - w_n) \right| = d_N \prod_{n=1}^N |(w - w_n)| \quad (4.17)$$

โดย  $w_0$  เป็นรากของสมการ  $\left| \sum_{n=0}^N d_n e^{-i2n\beta d} \right| = 0$

พิจารณาให้  $g(w) = d_N \prod_{n=1}^N |(w - w_n)|$  และให้  $b_n = |(w - w_n)|$  ซึ่งเป็นกรณีพิเศษซึ่งรากทั้งหมดอยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย นำไปเขียนกราฟในระนาบเชิงซ้อนที่มีรัศมี 1 หน่วยได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 แสดงถึงการกระจายราก  $w_n$  บนวงกลมรัศมี 1 หน่วย

เพราะ  $w$  ขึ้นกับความถี่ ดังนั้นจากรูปเมื่อ  $w$  เคลื่อนไปทับกับ  $w_n$  แล้ว  $b_n$  จะเท่ากับศูนย์ ซึ่งทำให้  $g(w)$  เท่ากับศูนย์ด้วย และเมื่อ  $w$  อยู่ระหว่าง  $w_n$  กับ  $w_{n+1}$  เช่น จากรูป  $w$  อยู่ระหว่าง  $w_4$  และ  $w_5$  จะทำให้  $g(w)$  มีค่าน้อยกว่า  $g(w)$  ที่  $w$  อยู่ระหว่าง  $w_7$  และ  $w_1$  ดังนั้นการเลือกการกระจาย  $w_n$  ที่เหมาะสมจะทำให้เราได้ค่าค้ำปลั่งและค่าโคเรลทิวส์ที่เราต้องการ

การออกแบบโคเรลชันแนตค้ำปลั่งต่อไปนี้จะใช้วิธีการกระจายของ  $w_n$  โดยใช้วิธีการกระจายไบนอมิยัล (Binomial Distribution) และการกระจายเชบิเชฟ (Chebyshev Distribution) ก่อนที่จะกล่าวถึงการกระจายทั้ง 2 แบบนั้นเรามาดูสมการ 4.14 และ 4.15 กันอีกครั้ง

$$C = -20 \log \left| \sum_{n=0}^N c_n \right| \quad (4.14)$$

$$D = 20 \log \frac{\left| \sum_{n=0}^N c_n \right|}{\left| \sum_{n=0}^N d_n e^{-i2n\beta d} \right|} \quad (4.15)$$

เพราะว่าโคเรกชันแนตคัปเปลดอร์แบบหลายรูจะมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงและรัศมีที่เล็กมากดังนั้น จาก (3.35),(3.36) เราสามารถประมาณได้ว่า (Collin, 1992: 422)

$$A_1 + A_3 = j\left(\frac{\bar{B} + \bar{X}}{2}\right)A$$

$$A_2 + A_4 = j\left(\frac{\bar{B} - \bar{X}}{2}\right)A$$

จะเห็นได้ว่าจากสมการข้างบนเราสามารถเขียนได้ว่า

$$c_n = j\left(\frac{\bar{B} + \bar{X}}{2}\right) = T_f r^n = T_f k_n \quad (4.18)$$

$$d_n = j\left(\frac{\bar{B} - \bar{X}}{2}\right) = T_b r^n = T_b k_n \quad (4.19)$$

$$\text{โดยที่ } T_f = \frac{-2i \cdot k_o^2}{3\beta_o \cdot a \cdot b} \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right) + \frac{4i}{3 \cdot a \cdot b} \cdot (\beta_o \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right) + \frac{\pi^2}{\beta_o \cdot a^2} \cos^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right))$$

$$T_b = \frac{-2i \cdot k_o^2}{3\beta_o \cdot a \cdot b} \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right) - \frac{4i}{3 \cdot a \cdot b} \cdot (\beta_o \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right) - \frac{\pi^2}{\beta_o \cdot a^2} \cos^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right))$$

เพราะว่า  $T_f$  และ  $T_b$  ขึ้นกับความถี่เพียงอย่างเดียวเราสามารถเขียนสมการ (4.15) ใหม่ได้ดังนี้

$$D = 20 \log \frac{|T_f|}{|T_b|} + 20 \log \frac{\left| \sum_{n=0}^N k_n \right|}{\left| \sum_{n=0}^N k_n e^{jn\varphi} \right|} \quad (4.20)$$

อาจแสดงได้ว่าพจน์แรกของสมการ (4.20) จะมีค่าน้อยมากยกเว้นที่ความถี่กลางซึ่งหาได้จาก

$$\beta_o = \frac{\beta_{upper} + \beta_{lower}}{2} \quad \text{ดังนั้นจึงสามารถตัดนี้ออกและเขียนใหม่ได้ดังนี้}$$

$$D = 20 \log \frac{\left| \sum_{n=0}^N k_n \right|}{\left| \sum_{n=0}^N k_n e^{jn\varphi} \right|} \quad (4.21)$$

โดยให้

$$\varphi = -2\beta d$$

$$w = e^{j\varphi}$$



$$f(\varphi) = \sum_{n=0}^N k_n e^{jn\varphi}$$

$$f(w) = \sum_{n=0}^N k_n w^n = k_N \sum_{n=0}^N \frac{k_n}{k_N} w^n = k_N \prod_{n=1}^N (w - w_n) \quad (4.22a)$$

จากสมการ (4.22) จะได้ว่า

$$f(1) = \sum_{n=0}^N k_n \quad (4.22b)$$

เขียนสมการ (4.21) ใหม่ได้

$$D = 20 \log \frac{|f(1)|}{|f(w)|} \quad (4.23)$$

จากสมการ (4.14)

$$C = -20 \log \left| \sum_{n=0}^N c_n \right| = -20 \log |T_f| \left| \sum_{n=0}^N k_n \right| = -20 \log |T_f| |f(1)| \quad (4.24)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$f(1) = \frac{10^{\frac{-C}{20}}}{|T_f|} \quad (4.25)$$

และจากสมการ (4.23)

$$D_{\min} = 20 \log \frac{|f(1)|}{|f(w)|_{\max}} \quad (4.26)$$

ดังนั้นจะได้

$$|f(w)|_{\max} = \frac{10^{\frac{-C - D_{\min}}{20}}}{|T_f|} \quad (4.27)$$

#### 4.5 การหาการกระจายของราก $w_n$ แบบเชบิเชฟ

จากที่ผ่านมานั้นเมื่อเรารู้ค่าค้ำปปลิ่งและค่าโคเรกทิวดีที่ต่ำที่สุดเรายอมรับได้แล้ว เราก็สามารถทราบค่า  $f(1)$  และ  $|f(w)|_{\max}$  ได้จากสมการ (4.25) และ (4.27) ตามลำดับ เพื่อให้โคเรกชันแนกค้ำปเปลอร์มีช่วงความถี่ที่กว้าง ค่าโคเรกทิวดีและค่าค้ำปปลิ่งตามที่เรต้องการ เราอาจทำได้โดยให้  $f(w)$  ในสมการ (4.22) เป็นไปตาม Chebyshev Polynomial โดยการหา  $k_n, w_n$  ที่เหมาะสมจากนั้นก็จะสามารถนำไปหาขนาดของแต่ละรูได้

พิจารณาสมการ (4.22)

$$f(w) = \sum_{n=0}^N k_n w^n = k_N \sum_{n=0}^N \frac{k_n}{k_N} w^n = k_N \prod_{n=1}^N (w - w_n) \quad (4.22)$$

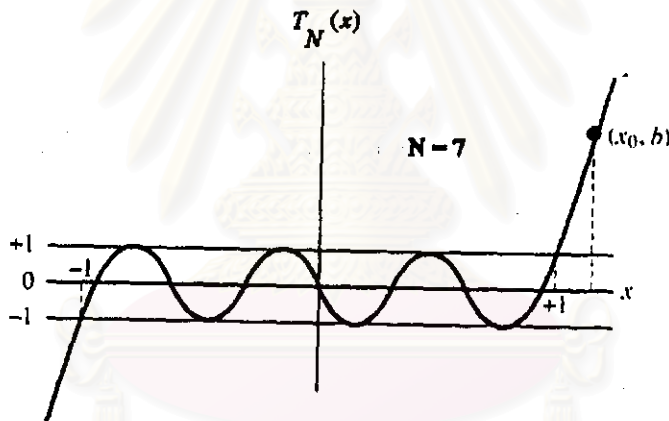
ในตอนนี้เราต้องการทราบการกระจายของ  $w_n$  เพื่อที่จะทำให้  $f(w)$  เป็นไปตาม Chebyshev polynomial พิจารณา Chebyshev polynomial ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 T_1(x) &= x \\
 T_2(x) &= 2x^2 - 1 \\
 T_3(x) &= 4x^3 - 3x \\
 T_4(x) &= 8x^4 - 8x^2 + 1 \\
 T_n(x) &= 2xT_{n-1} - T_{n-2} \\
 T_n(\cos(\theta)) &= \cos(n\theta)
 \end{aligned}$$

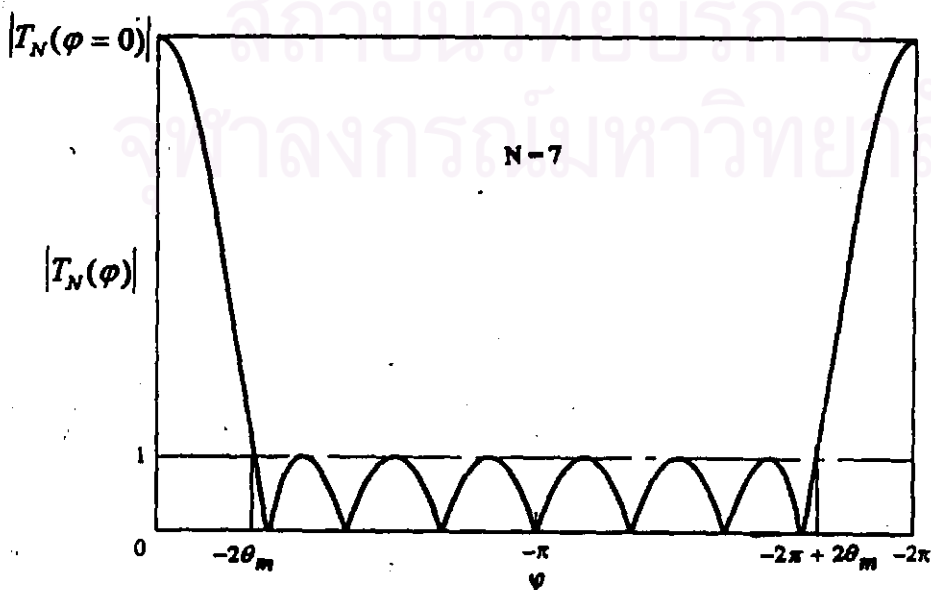
โพลีโนเมียลของเชบีเชฟจะแกว่งอยู่ในช่วง  $-1$  ถึง  $1$  เมื่อ  $x$  อยู่ในช่วง  $-1$  ถึง  $1$  และจะมีค่าเป็นอนันต์เมื่อ  $x$  อยู่นอกช่วง  $-1$  ถึง  $1$  และสามารถเขียนได้ในรูป

$$T_N(x) = \cos(N \cos^{-1}(x)) \quad \text{เมื่อ } |x| \leq 1 \quad (4.28)$$

$$N = 1, 2, 3, \dots$$



รูปที่ 4.7 กราฟของ Chebyshev polynomial กับค่า  $x$  เมื่อ  $N = 7$



รูปที่ 4.8 กราฟของค่าสัมบูรณ์ของ Chebyshev polynomial กับ  $\phi = -2\beta d$  เมื่อ  $N = 7$

ให้

$$\theta = \beta d$$

$$\varphi = -2\theta$$

จากรูปกำหนดให้ที่ความถี่ขอบทำให้  $\beta(f_{lower})d$  เป็น  $\theta_m$  และ  $\beta(f_{upper})d$  เป็น  $\pi - \theta_m$  และ  $d$  หาได้จากสมการ  $\beta_o d = \frac{\pi}{2}$  หรือ  $d = \frac{\pi}{2\beta_o}$  เราสามารถกำหนดให้สมการ (4.22) เป็นไปตามกราฟ Chebyshev polynomial ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นกรณี  $N = 7$ :

$$f(w) = k_N \prod_{n=1}^N (w - w_n) = f(w)_{\max} T_N\left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_m}\right) = f(w)_{\max} \cos(N \cdot \cos^{-1}(\sec \theta_m \cos \theta)) \quad (4.29)$$

โดยที่

$$\theta = \beta \cdot d$$

$$\varphi = -2\theta$$

$$w = e^{i\varphi}$$

เนื่องจาก  $T_N(\sec \theta_m \cos \theta) = 0$  เมื่อ  $N \cos^{-1}(\sec \theta_m \cos \theta) = (2n-1) \frac{\pi}{2}$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$\sec \theta_m \cos \theta = \cos(2n-1) \frac{\pi}{2N}$$

$$\theta_n = \cos^{-1}(\cos \theta_m \cos(2n-1) \frac{\pi}{2N})$$

$$\varphi_n = -2\theta_n = -2 \cos^{-1}(\cos \theta_m \cos(2n-1) \frac{\pi}{2N})$$

$$w_n = e^{j\varphi_n} = e^{-2j \cos^{-1}(\cos \theta_m \cos(2n-1) \frac{\pi}{2N})} \quad (4.30)$$

เมื่อให้  $\beta \cdot d = 0$  แล้ว  $w = 1$  จาก (4.25) และ (4.29) จะได้ว่า

$$f(w)_{\max} T_N(\sec \theta_m) = f(1)$$

$$\cos(N \cdot \cos^{-1}(\sec \theta_m)) = \frac{f(1)}{f(w)_{\max}}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\cos \theta_m = \frac{1}{\cos\left(\frac{\cos^{-1}(f(1)/f(w)_{\max})}{N}\right)} \quad (4.31)$$

ดังนั้นในการออกแบบเมื่อเราทราบค่าคัปปลิง โดเรกทิวิตี้ และ ความถี่กลางที่เราต้องการ เราจะ สามารถหา  $\theta_n$  จากสมการ (4.31) และ  $w_n$  จากสมการ (4.30) ได้ นำไปแทนลงในสมการ (4.22) และทำการก กระจายให้อยู่ในรูปของโพลีโนเมียลจากนั้นแทนค่า  $w = 1$  ในโพลีโนเมียล ใช้สมการ (4.25) เพื่อหาค่า  $k_N$  ได้ นำค่า  $k_N$  คูณกลับลงในโพลีโนเมียลที่กระจายไว้ก็จะได้  $k_n$  แต่ละค่า จากสมการ (4.18) เราก็จะหาค่ารัศมีของ แต่ละรูได้

#### 4.6 การกระจายของราก $w_n$ แบบไบโนเมียล

การกระจายแบบไบโนเมียลของ  $w_n$  คือการกำหนดให้  $w_n$  เป็น  $-1$  (Bliot, 1993) ดังนั้นสมการ (4.22) จะ เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$f(w) = \sum_{n=0}^N k_n w^n = k_N \sum_{n=0}^N \frac{k_n}{k_N} w^n = k_N \prod_{n=1}^N (w+1) \quad (4.32)$$

จากสมการที่ (4.25) และ (4.32)

$$f(1) = \frac{10^{\frac{-c}{20}}}{|T_f|} = k_N (1+1)^N$$

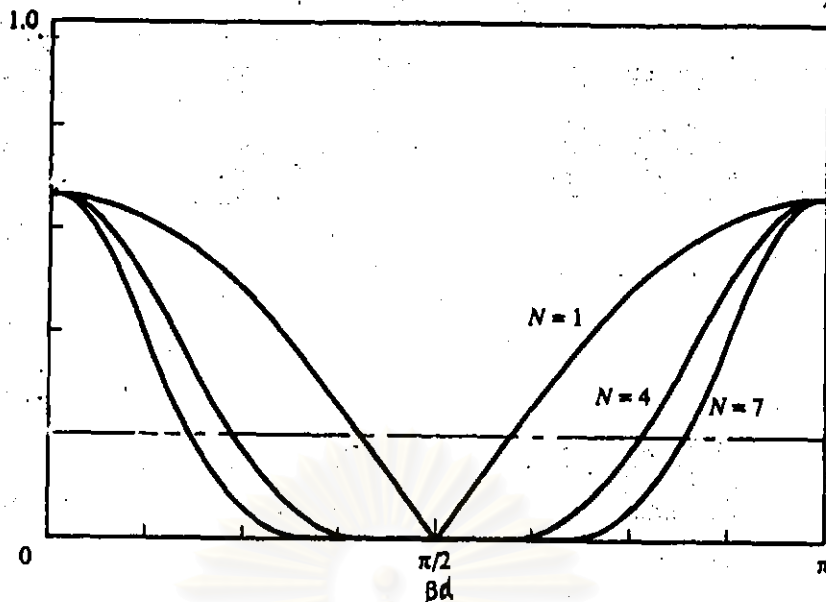
$$k_N = \frac{10^{\frac{-c}{20}}}{2^N |T_f|} \quad (4.33)$$

เขียนสมการ (4.32) ใหม่ได้

$$f(w) = \frac{10^{\frac{-c}{20}}}{2^N |T_f|} \cdot (w+1)^N = \frac{10^{\frac{-c}{20}}}{2^N |T_f|} \cdot e^{w \frac{\pi}{2}} \cdot (e^{i \frac{\pi}{2}} + e^{-i \frac{\pi}{2}})^N$$

$$|f(w)| = \frac{10^{\frac{-c}{20}}}{2^N |T_f|} |\cos(\beta d)|^N$$

เมื่อมา  $|f(w)|$  มาเขียนกราฟจะได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 กราฟของ Binomial polynomial กับ  $\beta d$

การหาค่า  $k_n$  แต่ละค่านั้นทำได้โดยกระจาย  $(w+1)^N$  แล้วคูณด้วย  $k_n$  ที่ได้หาไปแล้วในสมการ (4.33) และเพื่อให้เข้าใจในการออกแบบโคเรกชันแนตให้มากขึ้น ดังนั้นพิจารณาตัวอย่างการออกแบบดังต่อไปนี้

4.7 ตัวอย่างการออกแบบโคเรกชันแนตคัปเปออร์

ตัวอย่างที่ 1

เราต้องการ โคเรกชันแนตคัปเปออร์ที่มีช่วงความถี่ 8GHz-12GHz โดยมีค่าโคเรกทีวิตีต่ำที่สุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 40dB และมีค่าคัปปลิงเท่ากับ 20dB โดยใช้การกระจายแบบเบิเชฟโดยให้จำนวนรูเท่ากับ 7 รู โดยใช้ท่อที่มีขนาดความกว้าง 22.90 mm และความสูงขนาด 10.2 mm (เพื่อความเข้าใจง่ายขึ้นให้ดูในโปรแกรมการออกแบบโคเรกชันแนตคัปเปออร์แบบเบิเชฟโดยมีจำนวนรู 7 รู ในภาคผนวก)

1. ในขั้นแรกนำช่วงความถี่ 8-12GHz ไปหาค่า  $\beta_{upper}$  ซึ่งเป็นค่าคงที่การแพร่ในท่อปากสี่เหลี่ยมที่ความถี่ขอบบนและหาค่า  $\beta_{lower}$  ที่ความถี่ขอบล่างได้ดังนี้

$$\beta_{lower} = \left( \left( \frac{2\pi \cdot f_{lower}}{c} \right)^2 - \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 96.193 \cdot m^{-1}$$

และ

$$\beta_{upper} = \left( \left( \frac{2\pi \cdot f_{upper}}{c} \right)^2 - \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 210.583 \cdot m^{-1}$$

โดยที่  $f_{lower} = 8 \text{ GHz}$  และ  $f_{upper} = 12 \text{ GHz}$

a คือความกว้างของท่อซึ่งเท่ากับ 22.90 mm

2. หา  $\beta_0$  ซึ่งเป็นค่าคงที่การแพร่ที่ความถี่กลาง ในท่อนำคลื่นได้ดังนี้

$$\beta_0 = \frac{\beta_{upper} + \beta_{lower}}{2} = 153.338 \cdot m^{-1} \quad \text{ซึ่งจะได้ความถี่กลางเท่ากับ } f_0 = 9.8256 \text{ GHz}$$

และเนื่องจากที่ความถี่กลางนี้เราต้องการให้ electrical length  $\beta_0 d = \frac{\pi}{2}$  ดังนั้นเราจะได้ระยะห่างระหว่างรูแต่ละรูเท่ากับ  $d = \frac{\pi}{2\beta_0} = 10.2406 \text{ mm}$

3. จากสมการ (3.31)

$$\sin\left(\frac{\pi x_0}{a}\right) = \frac{\lambda_b}{\sqrt{6}a} \quad (3.31)$$

จะได้ระยะห่างของรูจากผนังท่อ ( $x_0$ ) เท่ากับ

$$x_0 = \left(\frac{a}{\lambda_b}\right) \cdot \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_b}{\sqrt{6}a}\right) = 4.1955 \text{ mm}$$

4. จากสมการที่ (3.32) และใช้การประมาณเชิงสมการ (4.18) จะได้  $T_f$  เท่ากับ

$$T_f = \frac{-2j \cdot k_0^2}{3\beta_0 \cdot a \cdot b} \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_0}{a}\right) + \frac{4j}{3 \cdot a \cdot b} \cdot (\beta_0 \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_0}{a}\right) + \frac{\pi^2}{\beta_0 \cdot a^2} \cos^2\left(\frac{\pi \cdot x_0}{a}\right))$$

$$|T_f| = 5.188 \cdot 10^5 \cdot m^{-3}$$

5. จะได้  $\rho(1)$  จากสมการ (4.25) โดยแทน C ด้วย 20 และจะได้  $\rho(w)_{max}$  จากสมการ (4.27) โดยแทน D ด้วย 40 และแทน  $|T_f| = 5.188 \cdot 10^5 \cdot m^{-3}$

6. ดังนั้นจะสามารถหา  $\cos \theta_m$  ได้จากสมการ (4.31) และสามารถหาการกระจายราก  $w_n$  ได้จากสมการ (4.30) ดังต่อไปนี้

$$w_1 = -0.069 - 0.998i$$

$$w_2 = -0.501 - 0.865i$$

$$w_3 = -0.933 - 0.359i$$

$$w_4 = -0.933 + 0.359i$$

$$w_5 = -0.501 + 0.865i$$

$$w_6 = -0.069 + 0.998i$$

7. แทนราก  $w_n$  ที่หาได้จากข้อ 6. แทนลงในสมการ (4.22) และเมื่อให้  $w = 1$  ในสมการ (4.22) ก็จะสามารถหา  $k_N$  ได้โดย

$$k_N = \frac{f(1)}{\prod_{n=1}^N (1 - w_n)} = 7.764 \cdot 10^{-9} \cdot m^3$$

โดยที่  $f(1)$  หาได้จากสมการ (4.25)

8. กระจายสมการ (4.22) ได้ดังนี้

$$f(w) = 7.76465 \cdot 10^{-9} \cdot w^6 + 2.33405 \cdot 10^{-8} \cdot w^5 + 4.08799 \cdot 10^{-8} \cdot w^4 + 4.8683 \cdot 10^{-8} \cdot w^3 + 4.08838 \cdot 10^{-8} \cdot w^2 + 2.33399 \cdot 10^{-8} \cdot w + 7.5968 \cdot 10^{-9}$$

โดย  $f(w)$  มีหน่วยเป็น  $m^3$

จะได้  $k_n$  ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ใน  $f(w)$  ดังนั้นจะสามารถหารัศมีแต่ละรูได้โดย  $r_n = k_n^{\frac{1}{3}}$  ซึ่งได้แสดงผลไว้แล้วในหน้า 38 นี้

## ตัวอย่างที่ 2

ออกแบบโคเรกชันแนตคัปเปเตอร์แบบโบโนเมียด ที่มีจำนวนรู 10 รู โคเรกทีวดีต่ำสุดเท่ากับ 40 เดซิเบลและคัปปลิงเท่ากับ 20 เดซิเบล ในช่วงความถี่ 8-12 GHz

ในการออกแบบโคเรกชันแนตคัปเปเตอร์แบบโบโนเมียดนั้นทำตามข้อ 1-4 ในตัวอย่างที่ 1 และหา  $k_N$  ได้จากสมการที่ (4.33) ซึ่งก็คือ  $k_N = \frac{10^{\frac{-20}{20}}}{2^{10} |T_r|}$  แล้วนำไปแทนในสมการ (4.32) ซึ่งจะได้  $k_n$  แต่ละค่าและสามารถหารัศมีแต่ละรูได้

ตัวอย่างการผลของการออกแบบโคเรกชันแนตคัปเปเตอร์จะแสดงในหัวข้อ 4.8 ในหน้าถัดไป

#### 4.8 ผลการออกแบบไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์

เราได้ออกแบบไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์โดยใช้เทคนิคของ Chebyshev และ Binomial ซึ่งมีจำนวนรูต่างๆกัน ให้ใช้งานได้ดีในย่าน 8 GHz - 12 GHz โดยมีค่า  $D_{min} = 40$  dB และ  $C = 20$  dB ท่อนำของไดเรกทีวิตีมีขนาดกว้าง 22.9 mm สูง 10.2 mm ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานที่ใช้กับความถี่ย่านคิงกล่าว รูที่เจาะห่างจากผนังของท่อ  $x_0 = 4.19552$  mm และมีระยะห่างกัน  $d = 10.24067$  mm ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากความถี่กลาง  $\beta_0$  ขนาดของรูต่างๆ และไดเรกทีวิตี แสดงอยู่โดยละเอียดข้างล่างต่อไปนี้

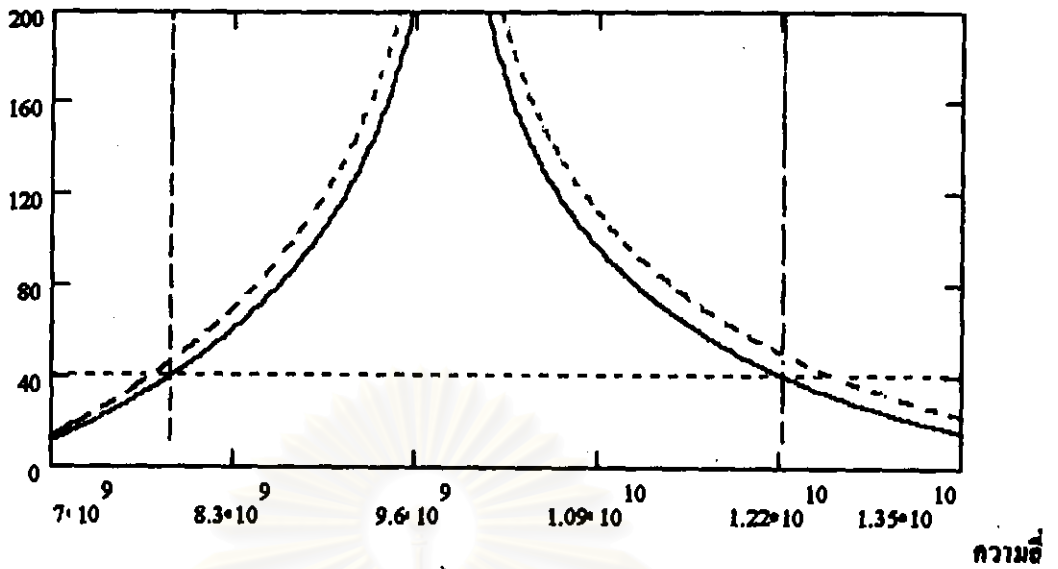
##### 4.8.1 ไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์แบบ ไบโนเมียล จำนวน 10 รู

ตารางที่ 4.1

แสดงขนาดรูต่างๆของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์แบบ Binomial ซึ่งมี 10 รู (N=9)

รัศมีของรูแต่ละรู (mm)	
1	0.72205
2	1.50193
3	2.38416
4	3.16224
5	3.61986
6	3.61986
7	3.16224
8	2.38416
9	1.50193
10	0.72205





รูปที่ 4.10 ไครเรทวิตที่ความถี่ต่างๆของไครเรชันเนตคัปเปอ์เวย์ไบโนเมื่อมี 10 ฐ

- เมื่อไม่เกิดผลเนื่องจากพจน์  $\log(T_p/T_n)$
- - - เมื่อเกิดผลเนื่องจากพจน์  $\log(T_p/T_n)$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

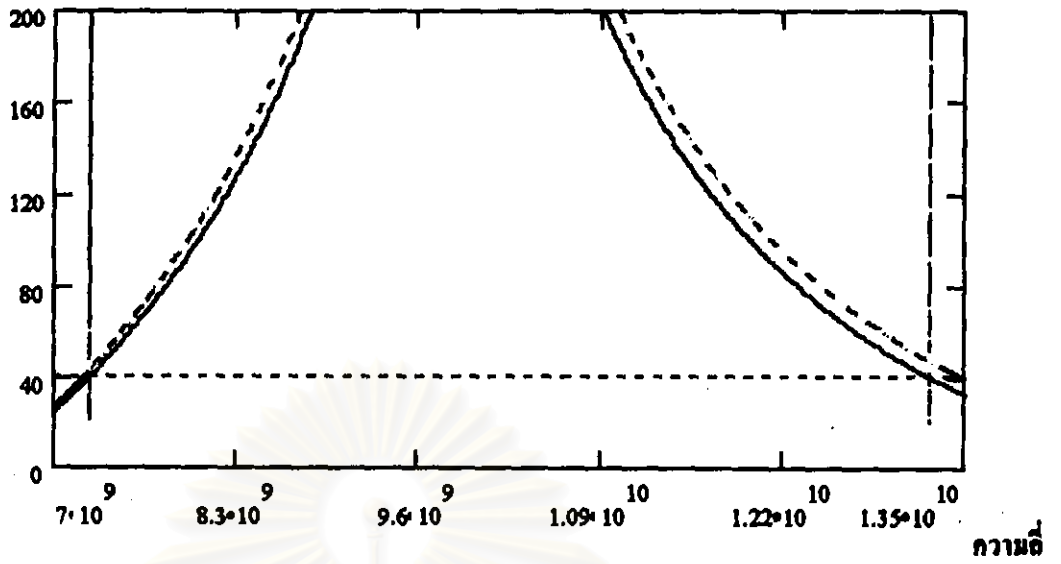
#### 4.8.2 ไคเรกชันแนลคัปเปิลอร์แบบ ไบโนเมียล จำนวน 20 รู

ตารางที่ 4.2

แสดงขนาดรูต่างๆของไคเรกชันแนลคัปเปิลอร์แบบ Binomial ซึ่งมี 20 รู (N=19)

รัศมีของแต่ละรู (mm)	
1	0.07164
2	0.19116
3	0.39762
4	0.70889
5	1.12529
6	1.62294
7	2.15259
8	2.64592
9	3.02882
10	3.23835
11	3.23835
12	3.02882
13	2.64592
14	2.15259
15	1.62294
16	1.12529
17	0.70889
18	0.39762
19	0.19116
20	0.07164

ค่าไครเรททวิต (dB)



รูปที่ 4.11 ไครเรททวิตที่ความถี่ต่างๆของไครเรชันเนตคัปเปอเรอร์แบบไบโนมีนอลที่มี 20 ง

- เมื่อไม่คิดผลเนื่องจากพจน์  $\log(\Gamma_p/\Gamma_b)$
- - - เมื่อคิดผลเนื่องจากพจน์  $\log(\Gamma_p/\Gamma_b)$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

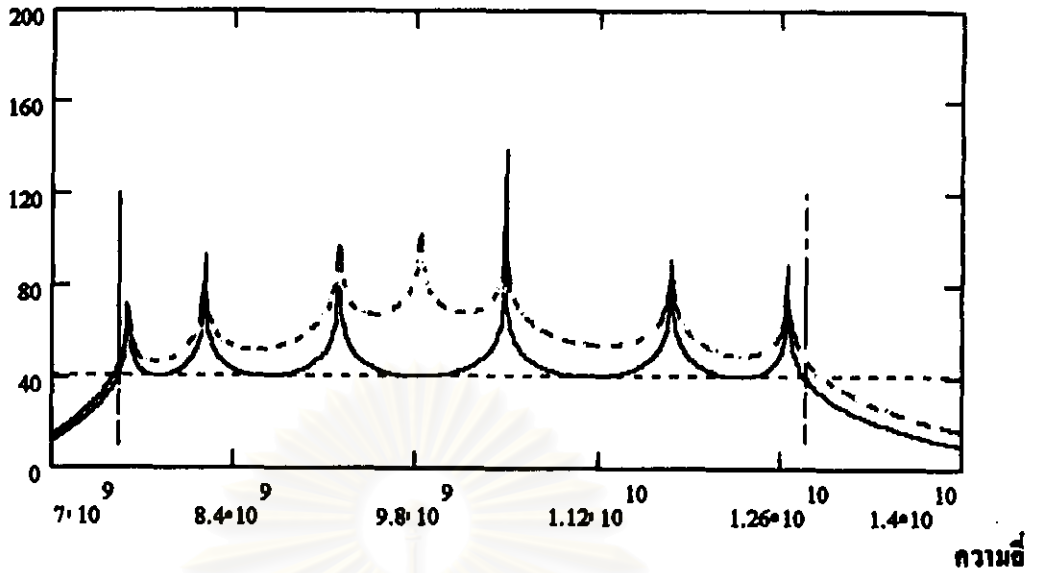
### 4.8.3 ไคเรกชันแนลคัปเปอร်แบบ เชบิเชฟ จำนวน 7 ฐ

#### ตารางที่ 4.3

แสดงขนาดรูต่างๆของไคเรกชันแนลคัปเปอร်แบบ Chebyshev ซึ่งมี 7 ฐ (N=6)

รัศมีของแต่ละฐ (mm)	
1	1.97977
2	2.85781
3	3.44496
4	3.65142
5	3.44485
6	2.85783
7	1.98018

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 ไครเรทวิตีที่ความถี่ต่างๆของไครเรชันเนอส์ปเปอร์แบบเชบิเชฟที่มี 7 รู

- เมื่อไม่คิดผลเนื่องจากพจน์  $\log(T_p/T_s)$
- - - เมื่อคิดผลเนื่องจากพจน์  $\log(T_p/T_b)$

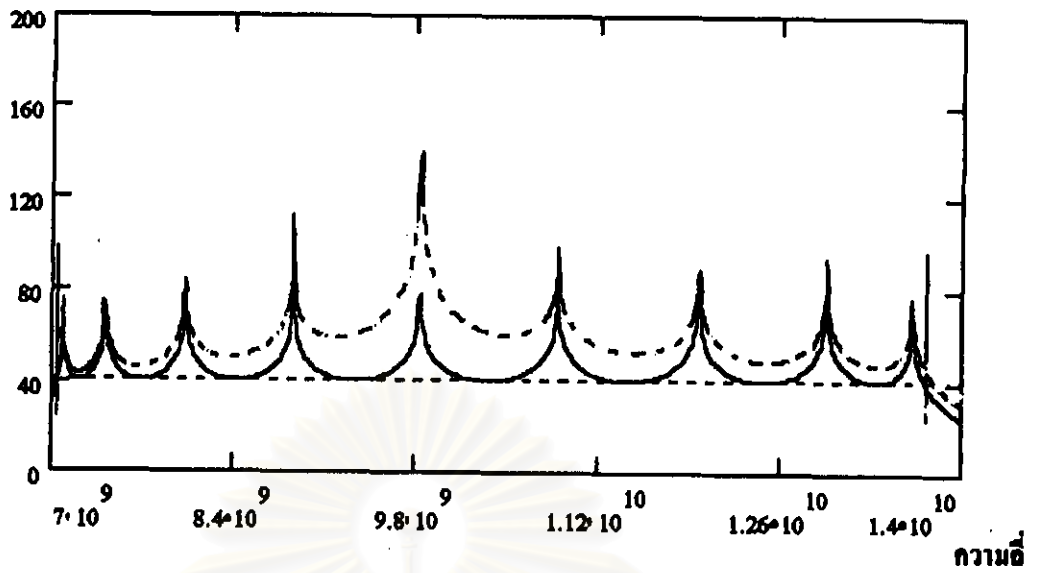
### 4.8.3 ไคเรกชันแนลคัปเปิลอร์แบบ เชบีเชฟ จำนวน 10 รู

#### ตารางที่ 4.4

แสดงขนาดรูต่างๆของ ไคเรกชันแนลคัปเปิลอร์แบบ Chebyshev ซึ่งมี 10 รู (N=9)

รัศมีของแต่ละรู (mm)	
1	1.616
2	2.199
3	2.69
4	3.047
5	3.231
6	3.231
7	3.047
8	2.69
9	2.199
10	1.616

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ไครเรทวิตตี้ที่ความถี่ต่างๆของไลเรกซ์แบนด์แคปเปออร์แบบเชบิเชฟที่มี 10 ฐ

- เมื่อไม่คิดผลเนื่องจากทอรั log  $(T_p/T_b)$   
 - - - เมื่อคิดผลเนื่องจากทอรั log  $(T_p/T_b)$

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.9 ผลเนื่องมาจากความหนาของผนังท่อ

การออกแบบที่ผ่านมานั้นเราคิดให้ความหนาของผนังระหว่างท่อบนและท่อล่างน้อยมากๆ แต่เมื่อคิดผลเนื่องจากความหนาแล้วความหนาจะทำให้สัญญาณที่เราต้องการลดทอนลงโดย McDonald (McDonald, 1972)

ได้ประมาณค่า electric polarizability ( $\alpha_e$ )  $\approx -\frac{2}{3}e^{-1.403\frac{\pi}{r}}r^3$  และ magnetic polarizability

( $\alpha_m$ )  $\approx \frac{4}{3}e^{-1.841\frac{\pi}{r}}r^3$  โดยที่  $w$  คือความหนาของผนังท่อ ดังนั้น  $T_r$  และ  $T_b$  จะเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$T_r(r) = A\alpha_e(r) + B\alpha_m(r)$$

$$T_b(r) = A\alpha_e(r) - C\alpha_m(r)$$

โดยที่

$$A = \frac{k_o^2}{\beta_o ab} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right)$$

$$B = \frac{1}{ab} \left( \beta_o \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right) + \frac{\pi^2}{\beta_o a^2} \cos^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right) \right)$$

$$C = \frac{1}{ab} \left( \beta_o \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right) - \frac{\pi^2}{\beta_o a^2} \cos^2\left(\frac{\pi \cdot x_o}{a}\right) \right)$$

ดังนั้นเพื่อยังคงให้ค่ากับปปลิ่งมีค่าเท่าเดิมจากสมการ (4.18) นำมาเขียนเป็นสมการใหม่เพื่อหารัศมีใหม่ได้ดังนี้

$$T_r(r_n)r_n^3 = c_n \quad (4.34)$$

โดยที่  $c_n$  คือ ค่ากับปปลิ่งเดิมเมื่อไม่คิดความหนา

จากนั้นทำการแก้สมการ 4.34 เพื่อหารัศมีใหม่ซึ่งผลของการแก้สมการหารัศมีและกราฟได้แสดงไว้ดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



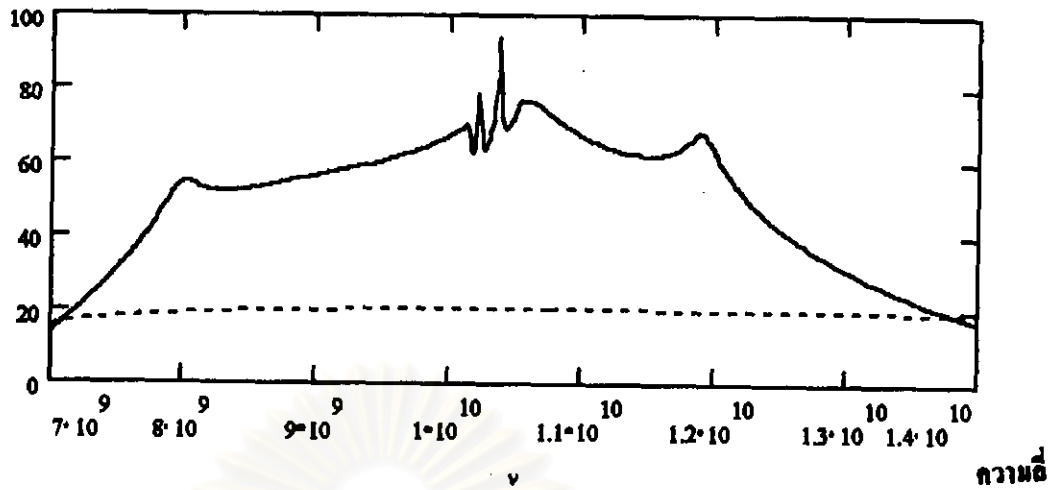
4.9.1 ไคเรชันแนตส์ปเปอร์แบบ ไบโนเมียล จำนวน 10 รู เมื่อให้ผนังระหว่างท่อบนและล่างหนาเท่ากับ 1 mm

#### ตารางที่ 4.5

แสดงขนาดรูต่างๆของไคเรชันแนตส์ปเปอร์แบบ Binomial ซึ่งมี 10 รู ( $N=9$ ) และกึ่งความหนาของผนังท่อ

รัศมีของแต่ละรู (mm)	
1	1.16
2	1.97
3	2.87
4	3.66
5	4.12
6	4.12
7	3.66
8	2.87
9	1.97
10	1.16

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 ไคเรทวิคิตีที่ความถี่ต่างๆของไคเรชันแนคัปเปอร์แบบไบโนมี่ฮอดที่มี 10 ฐ เมื่อเกิดความหนาของผนังท่อ

— ค่าไคเรทวิคิตีเมื่อเกิดผลเนื่องความหนาของผนังท่อ  
 - - - ค่าคัปป์อิง (C)

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

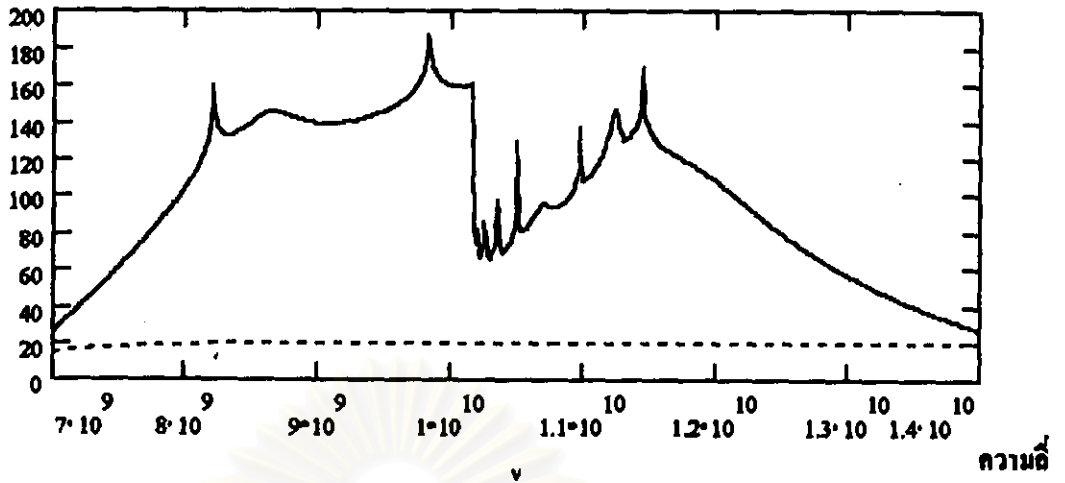
#### 4.9.2 ไคเรชันแนลคัปเปิลอร์แบบ ไบโนเมียล จำนวน 20 ฐ เมื่อให้ผนังระหว่างท่อบนและล่างหนาเท่ากับ 1 mm

ตารางที่ 4.6

แสดงขนาดรูต่างๆของไคเรชันแนลคัปเปิลอร์แบบ Binomial ซึ่งมี 20 ฐ (N=19) และกิดความหนาของผนังท่อ

รัศมีของแต่ละฐ (mm)	
1	0.35877
2	0.54327
3	0.79981
4	1.14709
5	1.58792
6	2.10157
7	2.64147
8	3.14118
9	3.52779
10	3.73902
11	3.73902
12	3.52779
13	3.14118
14	2.64147
15	2.10157
16	1.58792
17	1.14709
18	0.79981
19	0.54327
20	0.35877

ค่าไคเรกทิวิตี (dB)



รูปที่ 4.15 ไคเรกทิวิตีที่ความถี่ต่างๆของไลเรกซ์ขนาดคัพเปอร์แบบไบโนเมียดที่มี 20 ฐ เมื่อเกิดความหนาของผนังท่อ

- ค่าไคเรกทิวิตีเมื่อเกิดผลเนื่องความหนาของผนังท่อ
- - - ค่าคัพปลิง (C)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

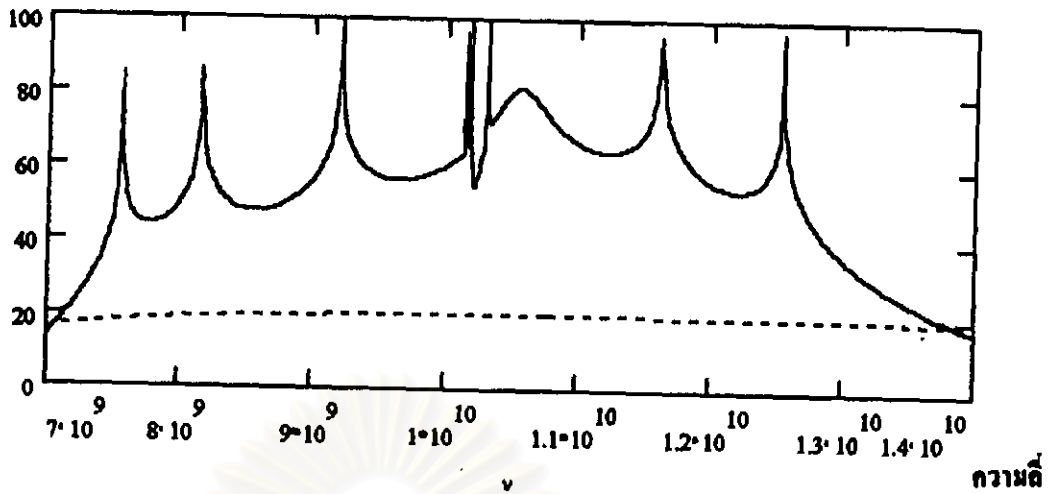
4.9.3 ไคเรกซ์แนลคัปเปออร์แบบ เชบิเชฟ จำนวน 7 รู เมื่อให้ผนังระหว่างท่อบนและล่างหนาเท่ากับ 1 mm

ตารางที่ 4.7

แสดงขนาดรูต่างๆของ ไคเรกซ์แนลคัปเปออร์แบบ Chebyshev ซึ่งมี 7 รู ( $N=6$ ) และกึ่งความหนาของผนังท่อ

รัศมีของแต่ละรู (mm)	
1	2.46
2	3.35
3	3.94
4	4.15
5	3.94
6	3.35
7	2.46

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ไครเรทวิตต์ที่ความถี่ต่างๆของไครเรชันเนตคัปเปอร์แบบเซปิเซทที่ 7 รู เมื่อเกิดความหนาของผนังท่อ

- ค่าไครเรทวิตต์เมื่อเกิดผลเนื่องความหนาของผนังท่อ
- - - ค่าคัปปลิง (C)

โคเรกชันแอมพลิจูดแบบ เชบิเชฟ จำนวน 10 รู เมื่อให้ผนังระหว่างท่อบนและล่างหนาเท่ากับ 1 mm

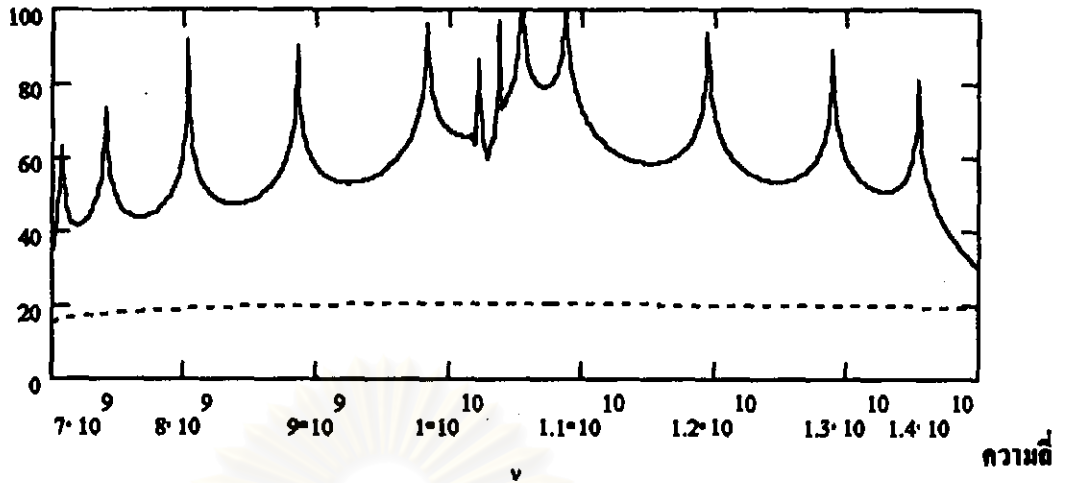
#### ตารางที่ 4.8

แสดงขนาดรูต่างๆของโคเรกชันแอมพลิจูดแบบ Chebyshev ซึ่งมี 10 รู ( $N=9$ ) และคิดความหนาของผนังท่อ

รัศมีของแต่ละรู (mm)	
1	2.09
2	2.68
3	3.19
4	3.54
5	3.73
6	3.73
7	3.54
8	3.19
9	2.68
10	2.09

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าไครเรททวิต (dB)



รูปที่ 4.17 ไครเรททวิตที่ความถี่ต่างๆของไครเรทชันแชนแนลเปอร์แบบเชบิเชฟที่มี 10 รู เมื่อคลิกความหนาของผนังท่อ

— ค่าไครเรททวิตเมื่อคลิกผลเนื่องความหนาของผนังท่อ  
 - - - ค่าสปริง (C)

จากผลการออกแบบที่ผ่านมาจะพบว่าจำนวนรูซึ่งมากก็จะยิ่งทำให้มีช่วงความถี่กว้างขึ้นและการออกแบบโดยใช้วิธี Binomial จะทำให้ไครเรททวิตมีค่าสูงในช่วงความถี่กลางที่คิดจาก  $\beta$  ส่วนการออกแบบโดยใช้วิธี Chebyshev นั้นจะทำให้ไครเรททวิตมีขดแหลมในบางความถี่และเมื่อนำมาคิดความหนาของผนังท่อการออกแบบโดยใช้วิธี Binomial ไม่ได้มีไครเรททวิตที่มีค่าสูงคงเดิมแต่กลับมีค่าลดลงดังที่ได้แสดงในกราฟที่ผ่านมา

เนื่องจากการออกแบบโดยใช้วิธี Chebyshev ทำให้เกิดขดแหลมในบางความถี่ เราสามารถลดขดแหลมลงได้ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย