บทที่ 3

การวิเคราะห์ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นในกรณีที่ใช้เพียงบิตเดียวในการสื่อสัญญาณ

การวิเคราะห์ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงนั้น แต่เดิมค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดเพียงผลของการลดทอนของสัญญาณเท่านั้นในการคำนวณ ในความเป็นจริง มิใช่เพียงจากการลดทอนกำลังสัญญาณของเส้นใยแสงที่มีผลต่อการลดลงของค่ากำลังสูงสุดสัญญาณ ดิสเพอร์ชั่นนั้นนอกจากจะทำให้พัลส์ขยายออกทางเวลาแล้วยังส่งผลต่อการลดลงของค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณด้วย ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงจะกล่าวถึงค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่น ทั้งสำหรับระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกๆ ช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ และระบบที่ช่วงในการชดเชยดิสเพอร์ชั่นมากกว่าหนึ่งช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณ อันได้แก่ ระบบที่ใช้วิธีคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยทั้ง 2 แบบ คือ ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดเพียงผลของการลดทอนของสัญญาณและค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่น ด้วยผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดเฟส ทั้งในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ

3.1 การหาค่ากำลังสัญญาณ

กำลังของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงที่มีทั้งค่าการลดทอนและค่าดิสเพอร์ชั่นนั้น จะมีการลดลงแบบเอกซ์โพแนนเชียลด้วยอัตราการลดลงที่มากกว่าการลดลงของกำลังสัญญาณที่เกิดจากความลดทอนกำลังสัญญาณของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว และนอกจากที่จะทำให้กำลังสัญญาณลดลงแล้ว ผลจากดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงยังมีผลทำให้พัลส์ของสัญญาณขยายกว้างขึ้นอีกด้วย

ในวิทยานิพนธ์นี้จะให้สัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงเป็นสัญญาณแบบ Gaussian ซึ่งมี envelope ของสัญญาณ ดังสมการที่ (3.1)

$$A(z,T)=\sqrt{P_0}\exp(-\alpha z/2)\frac{T_0}{\sqrt{T_0^2-j\beta_2 z}}\exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2-j\beta_2 z)}\right) \tag{3.1}$$

โดย T_0 คือ ความกว้างของพัลส์สัญญาณ

จากนั้นจะทำการหากำลังสัญญาณสูงสุด ด้วยการหาขนาดและยกกำลังสอง $A(z,T)$ ตามสมการที่ (3.2)

$$\left|A(z,t)\right|^2 = \left|\sqrt{P_0}\exp(-\alpha z/2)\frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 - j\beta_2 z}}\exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2 - j\beta_2 z)}\right)\right|^2 \quad (3.2)$$

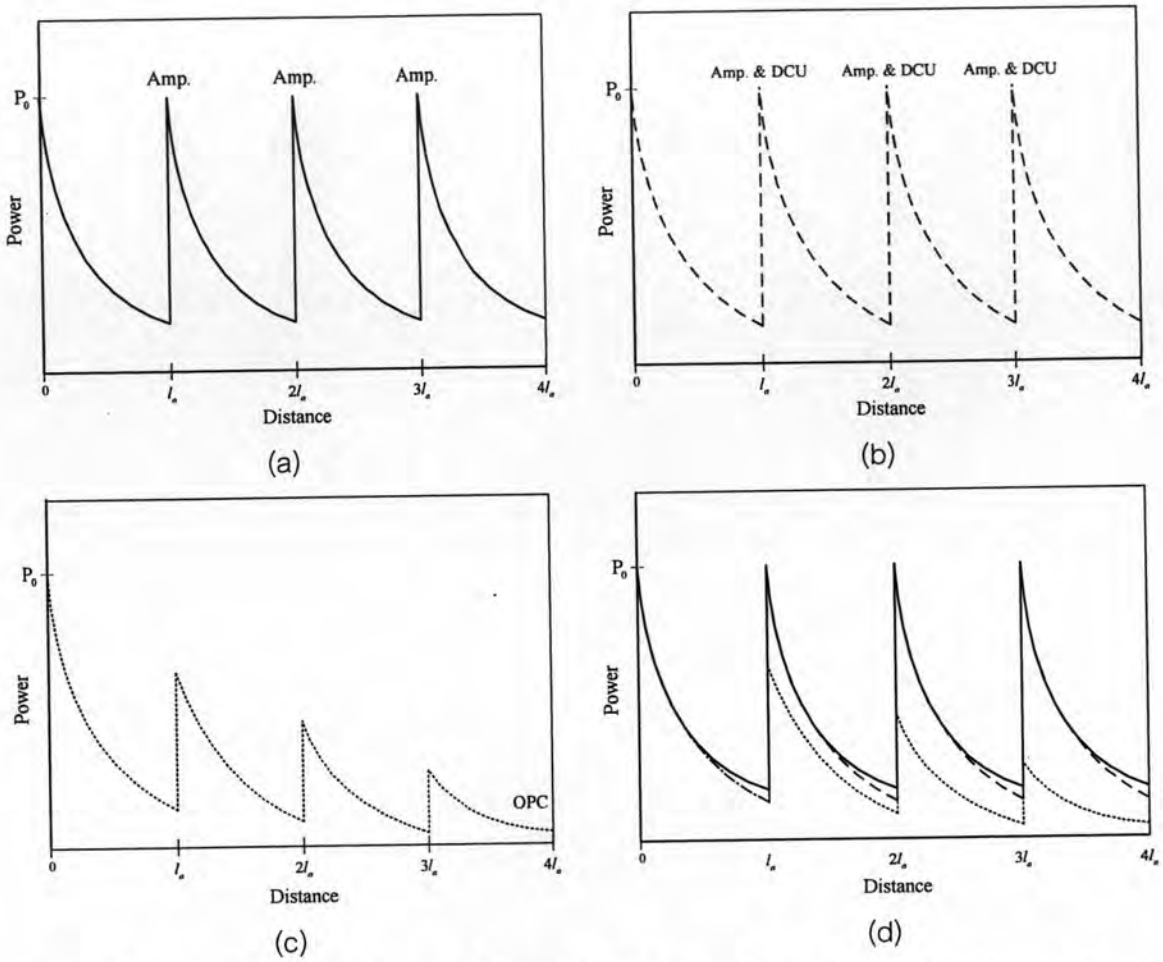
จะทำให้ได้กำลังสูงสุดของ $A(z,T)$ ที่เดินทางไปในเส้นใยแสง ($P(z)_{disp}$) ตามสมการที่ (3.3)

$$P(z)_{disp} = P_0\exp(-\alpha z)\frac{T_0^2}{\sqrt{T_0^4 + \beta_2^2 z^2}} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) จะพบว่านอกจาก $P(z)_{disp}$ จะลดลงแบบเอกซ์โพแนนเชียลด้วยผลของ α แล้ว ยังลดลงไปตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นโดยผลของ β_2 อีก นั่นคือ β_2 จะส่งผลต่อค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณเช่นเดียวกันกับ α

3.2 การหาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง

กำลังสัญญาณที่เดินทางในระบบการสื่อสัญญาณทางแสงระยะทางไกลทั่วไปซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์ขยายสัญญาณวางเป็นระยะนั้น มีลักษณะการลดลงแบบเอกซ์โพแนนเชียลและเป็นรายคาบดังรูปที่ 3.1 ซึ่งยากต่อการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ ดังนั้นที่ผ่านมาในการวิเคราะห์จึงใช้ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณดังสมการ $\overline{P}_L = P_0\left[\frac{1-\exp(-\alpha l_a)}{\alpha l_a}\right]$ [12] แทน



รูปที่ 3.1 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง โดย (a) ได้รับผลจากการลดทอนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว (b) ได้รับผลจากทั้งการลดทอนของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชั่นในระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (c) ได้รับผลจากทั้งการลดทอนของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชั่นในระบบที่ไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ และ (d) กำลังสัญญาณทั้ง 3 แบบ ในแกนเดียวกัน

ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเฉพาะผลของการลดทอนกำลังสัญญาณตามสมการ $\overline{P}_L = P_0\left[\frac{1-\exp(-\alpha l_a)}{\alpha l_a}\right]$ นี้ เหมาะสมสำหรับใช้ในกรณีที่ระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่สนใจ ไม่ได้รับผลกระทบจากดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสง ซึ่งในความเป็นจริงไม่สามารถเกิดกรณีเช่นนี้ได้ ในระบบที่ได้รับผลกระทบจากดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงนั้น การลดลงของกำลังสัญญาณสูงสุด นอกจากจะเกิดจากผลของการลดทอนกำลังสัญญาณแล้ว ยังจะเกิดจากดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงด้วย ดังรูปที่ 3.1(b) ดังนั้นค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่จะนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ระบบ ควรคิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงเข้าไปด้วย

ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นจะสามารถแยกคิดได้เป็น 2 กรณี คือ

3.2.1 ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นในกรณีที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 3.1(b) ซึ่งแสดงกำลังของสัญญาณในระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกๆ ช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ จะเห็นว่ากำลังของสัญญาณลดลงทั้งจากผลการลดทอนและค่าดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสง แต่จะกลับมามีกำลังของสัญญาณเท่าเดิมเมื่อผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณและอุปกรณ์ชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่น ดังนั้นในการคำนวณหาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะของระบบ จึงสามารถพิจารณาสัญญาณเพียงในหนึ่งช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณได้ ดังนั้นจะสามารถหากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่น ($\overline{P}_{LD}$) จากกำลังสัญญาณ ($P(z)_{disp}$) ในสมการที่ (3.3) ได้จากสมการที่ (3.4)

$$\overline{P}_{LD} = \frac{1}{l_a}\int_0^{l_a} P(z)_{disp}\, dz \tag{3.4}$$

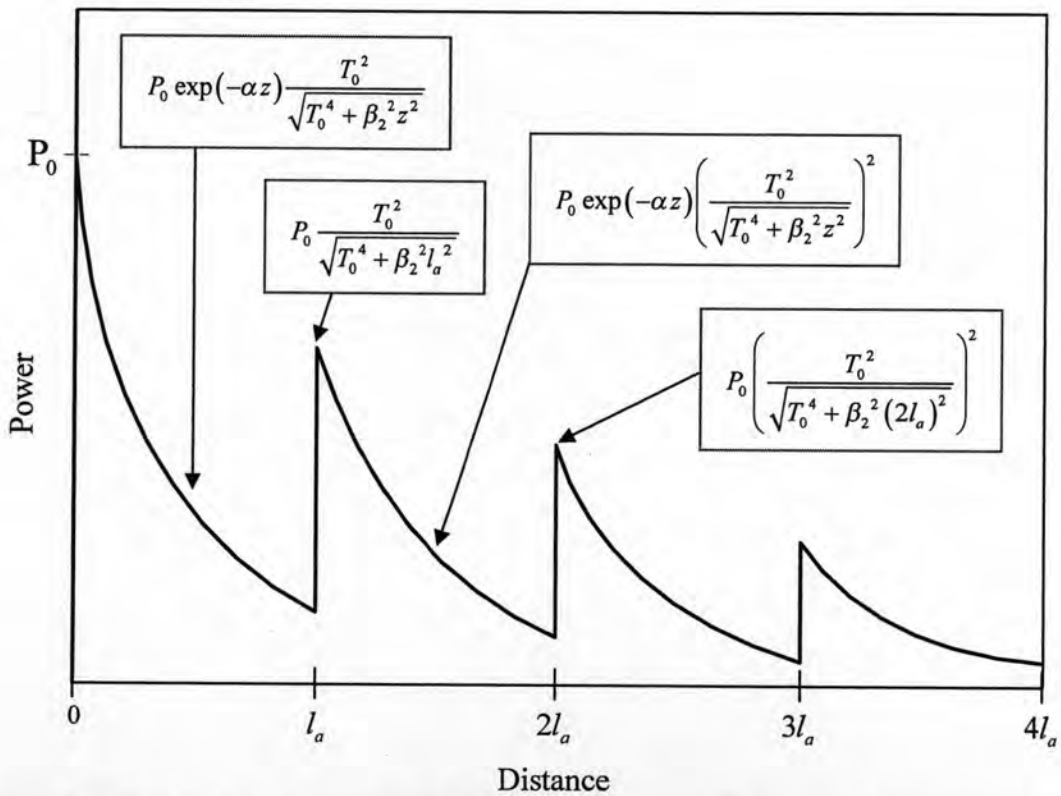
ในการหาคำตอบของอินทิกรัล $\int_0^{l_a} P(z)_{disp}\, dz$ นั้นต้องใช้วิธีอินทิเกรทแบบเชิงเลข ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธี Legendre-Gauss Quadrature [21] นอกจากนี้ เพื่อให้ค่า $\overline{P}_{LD}$ ที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริง จึงเลือกใช้อันดับ n = 24 ที่ให้ผลไม่ต่างกับการเพิ่มอันดับขึ้นไปอีกเป็น n = 25 มากนัก แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก ซึ่งจากวิธี Legendre-Gauss Quadrature นั้น อินทิกรัล $\int_0^{l_a} P(z)_{disp}\, dz$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$\int_0^{l_a} P(z)_{disp}\, dz \approx \frac{l_a}{2}\sum_{i=1}^{n} w_i P\left(\frac{l_a}{2}x_i + \frac{l_a}{2}\right) \tag{3.5}$$

โดย $w_i = \dfrac{2\left(1-x_i^{\,2}\right)}{(n+1)^2\left[P_{n+1}(x_i)\right]^2}$ และ x_i ได้จากการแก้สมการ $P_n(x_i)=0$ ซึ่ง $P_n(x_i) = \dfrac{1}{2^n n!}\dfrac{d^n}{dx_i^{\,n}}\left[\left(x_i^{\,2}-1\right)^n\right]$

3.2.2 ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นในกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

สำหรับระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ที่ไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณหรือระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้น จะมีการสะสมของดิสเพอร์ชั่นเป็นระยะทางหลายร้อยกิโลเมตร ลักษณะของกำลังสัญญาณสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นดังรูปที่ 3.1(c) นั่นคือ จะมีกำลังสัญญาณลดลงในทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ถึงแม้ว่ากำลังสัญญาณส่วนหนึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณ แต่กำลังของสัญญาณที่ลดไปเนื่องจากผลของดิสเพอร์ชั่นในเส้นใยแสงยังไม่ได้รับการชดเชย และจะสะสมไปในกำลังสัญญาณในทุกๆ ช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่เพิ่มขึ้น ดังค่าที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงที่ได้รับผลจากทั้งการลดทอนของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชั่นในระบบที่ไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ พร้อมสมการแสดงกำลังของสัญญาณ

จากรูปที่ 3.2 ในช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณช่วงแรก ($0 \le z \le l_a$) กำลังสัญญาณขาเข้าของช่วงนี้จะมีค่าเท่ากับ P_0 และเมื่อผ่านเข้าไปในเส้นใยแสง กำลังของสัญญาณจะลดลงตามสมการที่ (3.3) ซึ่งจะทำให้กำลังของสัญญาณแต่ละจุดมีค่าเท่ากับ $P_0 \exp(-\alpha z)\frac{T_0^2}{\sqrt{T_0^4+\beta_2^2 z^2}}$ และเมื่อสัญญาณผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณ กำลังของสัญญาณในส่วนที่ลดลงจากการลดทอนของเส้นใยแสงจะได้รับการชดเชย แต่กำลังของสัญญาณในส่วนที่ลดลงจากดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงจะไม่ได้รับการชดเชย ทำให้กำลังของสัญญาณมีค่าเท่ากับ $P_0 \frac{T_0^2}{\sqrt{T_0^4+\beta_2^2 z^2}}$ โดยที่ $z = l_a$ และจะกลายเป็นกำลังขาเข้าของสัญญาณที่ผ่านไปในช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณช่วงที่สองต่อไป ($l_a \le z \le 2l_a$) และเมื่อสัญญาณเดินทางผ่านเข้าไปในเส้นใยแสงช่วงที่สองนี้ กำลังของสัญญาณจะลดลงตามสมการที่ (3.3) เช่นกัน ซึ่งจะทำให้กำลังของสัญญาณแต่ละจุดมีค่าเท่ากับ $P_0 \exp(-\alpha z)\left(\frac{T_0^2}{\sqrt{T_0^4+\beta_2^2 z^2}}\right)^2$ และเมื่อสัญญาณผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณ กำลังของสัญญาณจะมีค่าเท่ากับ $P_0\left(\frac{T_0^2}{\sqrt{T_0^4+\beta_2^2 z^2}}\right)^2$ โดยที่ $z = 2l_a$ จะเห็นว่าลักษณะการลดลงของค่ากำลังสัญญาณสูงสุดในทั้งสองช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่กล่าวถึงจะเป็นไปตามสมการที่ (3.3) เช่นเดียวกัน แต่กำลังของสัญญาณขาเข้าในทั้งสองช่วงดังกล่าวจะแตกต่างกัน เนื่องจากการสะสมของดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงที่ต่างกัน นั่นคือกำลังสัญญาณขาเข้าของช่วงที่สองจะลดลงจากช่วงแรก $\frac{T_0^2}{\sqrt{T_0^4+\beta_2^2 z^2}}$ เท่า และลักษณะการลดลงของกำลังสัญญาณจะเป็นเช่นเดียวกันในในช่วงต่อไป ดังนั้นค่า $\overline{P}_{LD}$ ในสมการที่ (3.4) ต้องทำการปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามรูปที่ 3.2 ให้กลายเป็น $\overline{P}_{LD_N}$ ตามสมการที่ (3.6)

$$\overline{P}_{LD_N} = \frac{1}{N_{span} \cdot l_a} \cdot \sum_{n=1}^{N_{span}} \int_0^{l_a} P(z)_{disp} \left(T_0^2 \Big/ \sqrt{\left(T_0^4+\beta_2^2 z^2\right)}\right)^{n-1} dz \qquad (3.6)$$

โดย N_{span} คือ จำนวนช่วงระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณก่อนที่จะทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และจำนวนช่วงระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณก่อนที่จะถึงอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ โดยในการหาคำตอบของอินทิกรัล $\int_0^{l_a} P(z)_{disp} \left(T_0^2 \Big/ \sqrt{\left(T_0^4+\beta_2^2 z^2\right)}\right)^{n-1} dz$ นั้นต้องใช้วิธีอินทิเกรทแบบเชิงเลข Legendre-Gauss Quadrature เช่นเดียวกันกับการหา $\int_0^{l_a} P(z)_{disp}\, dz$

3.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสในระบบการสื่อสัญญาณทางแสงที่ใช้การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค

ในระบบสื่อสัญญาณทางแสงระยะไกล ที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบดีพีเอสเค ความผิดพลาดทางเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์เป็นปัญหาหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบ การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสนั้นสามารถทำได้โดยการใช้วิธี small signal approximation [22] ซึ่งคือการมอดูเลตคลื่นพาห์ทั้งทาง in phase และ quadrature phase ด้วยสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่ต่างๆ กัน จากการใช้วิธี small signal approximation ร่วมกับการวิเคราะห์การสะสมของสัญญาณรบกวนในระบบเส้นใยแสงภายใต้ผลของปรากฏการณ์เคอร์ [12] จาก [12],[14] เราสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดเฟสจากสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงซึ่งสะสมสู่ปลายทางแบบไม่เป็นเชิงเส้นอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เคอร์ได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\Delta\phi_{\mathrm{m}} = \tan^{-1}\left(\frac{b_m}{\sqrt{\overline{P}}+a_m}\right) \tag{3.7}$$

โดย $\Delta\phi_{\mathrm{m}}$ คือ ค่าความผิดพลาดเฟสอันเนื่องมากจากสัญญาณรบกวน $\overline{P}$ คือ ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ย $a_m = \sqrt{B_{(1,1)}(\omega_n)}$, $b_m = \sqrt{B_{(2,2)}(\omega_n)}$ และ B คือ covariance matrix ของสัญญาณรบกวน ที่ภาครับซึ่งสำหรับระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.8) และสำหรับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

$$B_{DM}(\omega_m) = \frac{S_0}{2}\sum_{k=1}^{N}\left[M(\omega_m,l_a)\right]^{N-k}\left[M^T(\omega_m,l_a)\right]^{N-k} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned} B_{OPC}(\omega_m) = &\left(S_0\sum_{k=1}^{N/2}\left[M(\omega_m,l_a)\right]^{\frac{N}{2}-k}\left[M^T(\omega_m,l_a)\right]^{\frac{N}{2}-k}\right)+ \\ &\left(\frac{S_0}{2}\left[M(\omega_m,l_a)\right]^{\frac{N}{2}}\left[M^T(\omega_m,l_a)\right]^{\frac{N}{2}}\right)-\frac{S_0}{2}\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.9}$$

ซึ่ง $M(\omega_m,z) = \begin{bmatrix}\cos(\kappa z) & -\Gamma\sin(\kappa z)\\ \Gamma^{-1}\sin(\kappa z) & \cos(\kappa z)\end{bmatrix}$ โดยที่ $\Gamma = \sqrt{\frac{\beta_2\omega_m^2}{(\beta_2\omega_m^2+4\gamma\overline{P})}}$ และ $\kappa = \frac{\sqrt{\beta_2\omega_m^2(\beta_2\omega_m^2+4\gamma\overline{P})}}{2}$

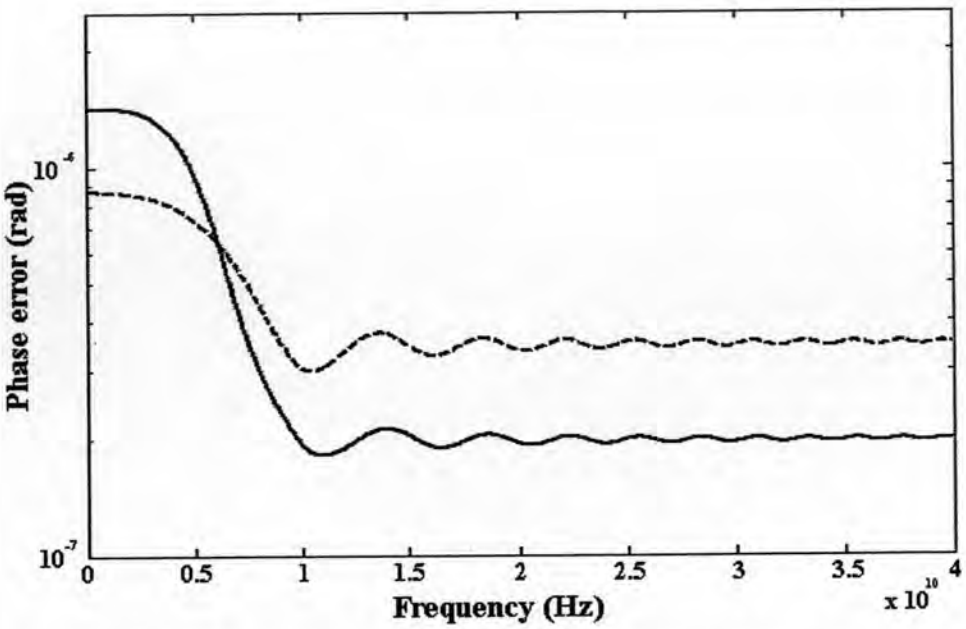
ในสมการที่ (3.8) และ (3.9) S_0, N และ ω_m คือ power spectral density ของสัญญาณรบกวน จำนวนอุปกรณ์ขยายสัญญาณ และความถี่ที่เลื่อนจากความถี่คลื่นพาห์ตามลำดับ

ในหัวข้อต่อไปจะทำการหาค่าผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสทั้งในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9) เพื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่ากำลังสัญญาณสูงสุดแบบเดิมที่คิดเพียงผลจากการลดทอนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว กับค่ากำลังสัญญาณสูงสุดแบบใหม่ที่คิดผลของดิสเพอร์ชั่นเข้าไปในการคำนวณด้วย

3.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสที่คำนวณด้วยค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเพียงผลจากการลดทอนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว กับที่คำนวณด้วยค่ากำลังสัญญาณสูงสุดแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่น

เพื่อทำการพิสูจน์ความเหมาะสม และความแม่นยำในการนำไปใช้งานของค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยแบบใหม่ที่ได้นำเสนอขึ้นที่เหนือกว่าค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิมที่คิดเพียงผลของการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยแสง ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการหาค่าผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสทั้งในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ เพื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่ากำลังสัญญาณสูงสุดแบบเดิมที่คิดเพียงผลจากการลดทอนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว กับค่ากำลังสัญญาณสูงสุดแบบใหม่ที่คิดผลของดิสเพอร์ชั่นเข้าไปในการคำนวณด้วย

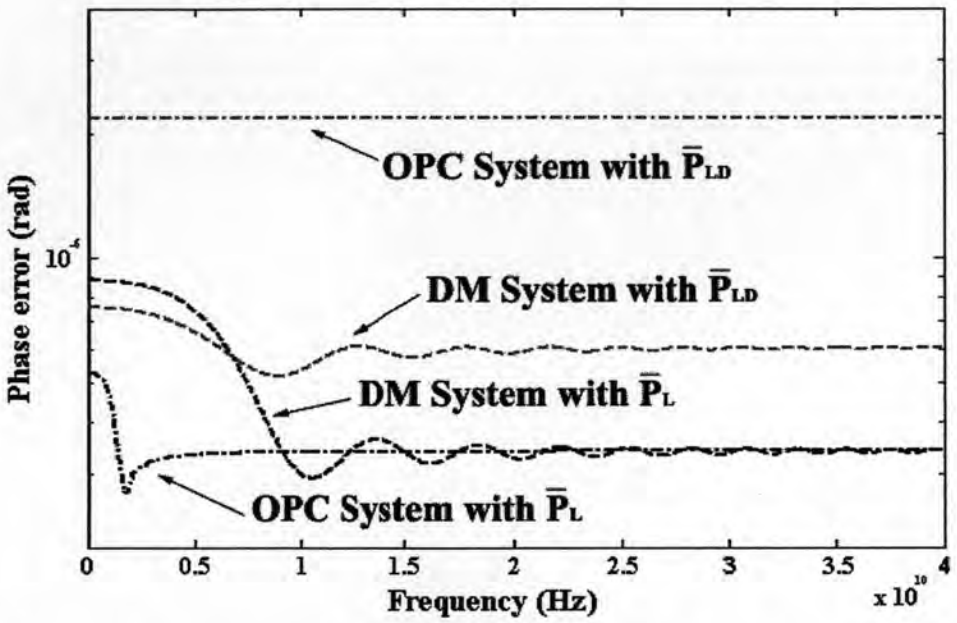
เพื่อคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสทั้งในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ เรากำหนดให้อุปกรณ์ขยายสัญญาณเป็นชนิด EDFA ซึ่งมีค่า noise figure = 5 dB และ l_a = 50 km เส้นใยแสงซึ่งใช้สื่อสัญญาณนั้นเป็นชนิด Standard single mode fiber (SMF: ITU-T G.652) ซึ่งที่ความยาวคลื่น 1,550 nm นั้นมีค่า α = 0.2 dB/km β_2 = -20.78 ps^2/km และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น γ_{SMF} = 1.06 $w^{-1}km^{-1}$ [23] ระยะทางที่ใช้ในการสื่อสัญญาณคือ 5,000 km



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟส

ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสที่คำนวณได้จะมีรูปร่างคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 นั่นคือ ค่าความผิดพลาดเฟสจะมีค่าสูงที่ความถี่ใกล้ความถี่พาห์และจะมีค่าลดลงสู่ค่าค่าหนึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังนั้นในการพิจารณาว่าระบบใดให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่ากันนั้น สามารถพิจารณาได้ใน 2 กรณี คือ กรณีที่แบนด์วิดท์ของค่าความผิดพลาดเฟสกว้างกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณ และค่าความผิดพลาดเฟสคงที่ตลอดในแบนด์วิดท์ของสัญญาณนั้น เช่น ถ้าพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่เส้นประในรูปที่ 3.3 ในกรณีที่ส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูลต่ำกว่า 5 Gbps เป็นต้น ถึงแม้ค่าความผิดพลาดเฟสในช่วงแบนด์วิดท์นั้นจะสูงมากก็ตาม ก็จะไม่ทำให้สมรรถนะของระบบลดลง นั่นเป็นเพราะทุกๆ ส่วนประกอบของสัญญาณจะมีเฟสที่เลื่อนไปเท่ากัน แต่ในกรณีที่แบนด์วิดท์ของความผิดพลาดเฟสแคบกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณนั้น ให้พิจารณาที่ค่าผลต่างระหว่างค่าความผิดพลาดเฟสสูงสุดกับค่าความผิดพลาดเฟสต่ำสุด ระบบที่มีค่าผลต่างน้อยจะมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่มีค่าผลต่างมาก ดังเช่นจากตัวอย่างผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสในรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าแบนด์วิดท์ของค่าความผิดพลาดทางเฟสทั้ง 2 เส้น อยู่ที่ประมาณ 5 GHz ถ้าส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูลต่ำกว่า 5 Gbps สัญญาณที่ให้ค่าความผิดพลาดทางเฟสที่เป็นเส้นประจะให้สมรรถนะที่ดีกว่า เนื่องจากค่าความผิดพลาดทางเฟสจะคงที่มากกว่าสัญญาณที่ให้ค่าความผิดพลาดทางเฟสที่เป็นเส้นทึบ และถ้าส่งสัญญาณที่อัตราข้อมูลสูงกว่า 5 Gbps สัญญาณที่ให้ค่าความผิดพลาดทางเฟสที่เป็นเส้นประก็ยังคงให้สมรรถนะที่ดีกว่า เนื่องจากผลต่างระหว่างค่าความผิดพลาดทางเฟสสูงสุดและต่ำสุดน้อยกว่าสัญญาณที่ให้ค่าความผิดพลาดทางเฟสที่เป็นเส้นทึบ ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่า สัญญาณที่ให้ค่าความ

ผิดพลาดทางเฟสที่เป็นเส้นประให้สมรรถนะที่ดีกว่าสัญญาณที่ให้ค่าความผิดพลาดทางเฟสที่เป็นเส้นทึบนั่นเอง

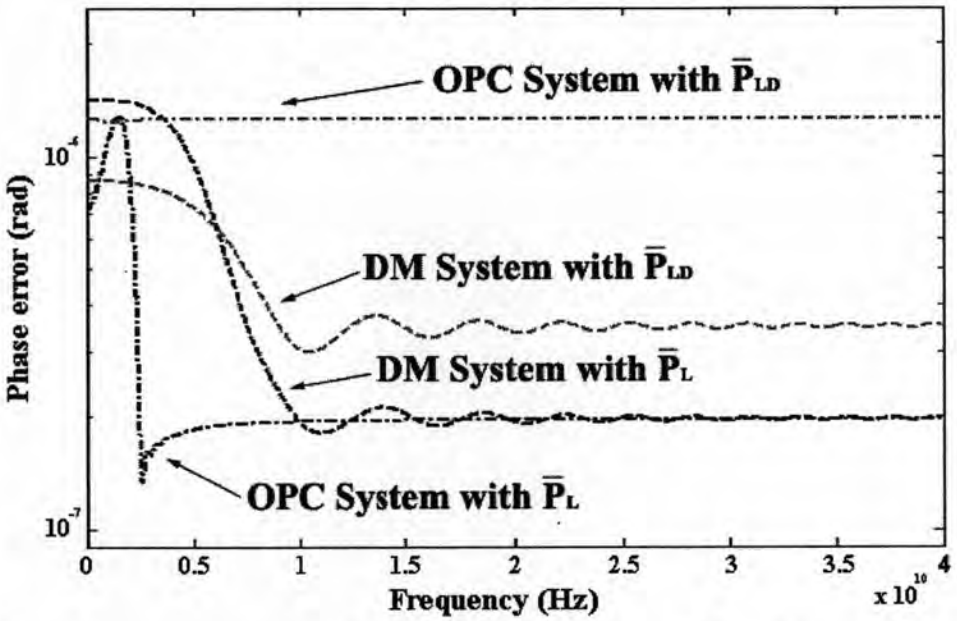


รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห์ในกรณีที่ P_0 = 1 mW

รูปที่ 3.4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิม คือ $\overline{P}_L$ ในการคำนวณทั้งระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ แต่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นด้วย คือ $\overline{P}_{LD}$ ในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบเท่านั้น เนื่องจากระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่วิเคราะห์เป็นระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ แต่กับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ที่ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นด้วยอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณซึ่งวางไว้ที่ระยะทางไกลหลายร้อยกิโลเมตร นั่นคือไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกๆ ช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ จะใช้ $\overline{P}_{LD_N}$ แทน โดยกำลังสัญญาณขาเข้าที่ใช้มีค่าเป็น 1 mW

เมื่อใช้ $\overline{P}_L$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ ผลจากการพิจารณาปรากฏว่า เมื่อทำการพิจารณาในกรณีที่อัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณน้อยกว่า 5 Gbps ระบบที่ใช้วิธีชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบจะให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ เนื่องจากในช่วงแบนด์วิดท์ของสัญญาณค่าความผิดพลาดของเฟสของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นจะคงที่ ทำให้ความต่างเฟสของสัญญาณที่ภาครับไม่

เกิดขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในกรณีที่อัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณค่อนข้างสูง (> 10 Gbps) ระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบจะให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ เนื่องจากค่าความต่างระหว่างค่าความผิดพลาดของเฟสสูงสุดและต่ำสุดน้อยกว่า ทำให้ความต่างเฟสของสัญญาณที่ภาครับน้อยกว่า แต่เมื่อใช้ $\overline{P}_{LD}$ หรือ $\overline{P}_{LD_N}$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่แทน $\overline{P}_{L}$ จะเห็นว่า ผลตอบสนองทางความถี่ ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบทุกๆ อัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณ เนื่องจากค่าความผิดพลาดของเฟสมีค่าคงที่ตลอดแบนด์วิดท์ของสัญญาณ

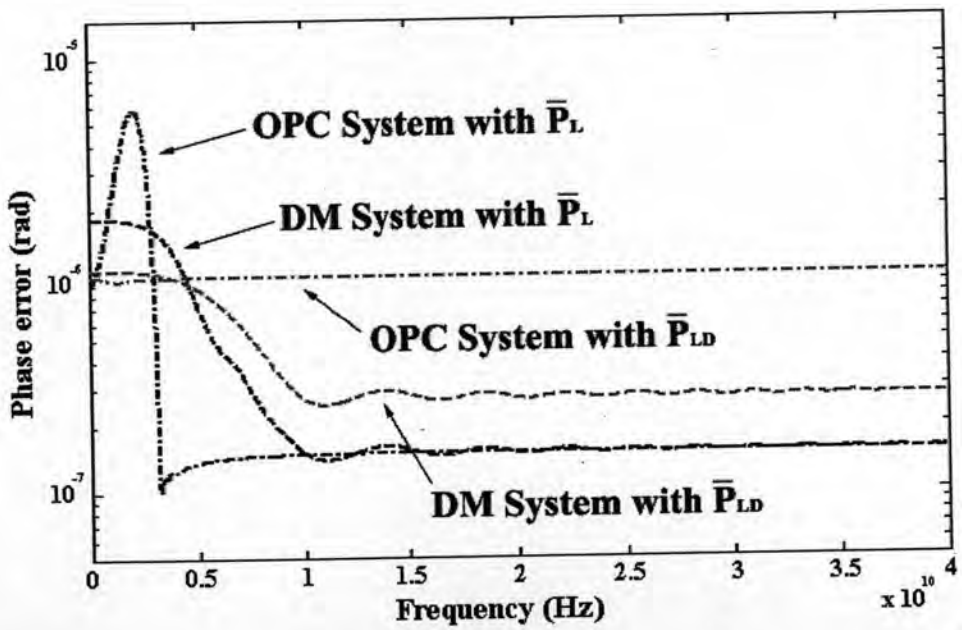


รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห์ในกรณีที่ P_0 = 3 mW

รูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิม คือ $\overline{P}_{L}$ ในการคำนวณทั้งระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบและระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ แต่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นด้วย คือ $\overline{P}_{LD}$ คำนวณในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบเท่านั้น เนื่องจากระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่วิเคราะห์เป็นระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ แต่กับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ที่ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นด้วยอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณซึ่งวางไว้ที่ระยะทางไกลหลาย

ร้อยกิโลเมตร หรือคือไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกๆ ช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณนั้น จะใช้ $\overline{P}_{LD_N}$ ในการคำนวณแทน โดยกำลังสัญญาณขาเข้าที่ใช้มีค่าเป็น 3 mW

เมื่อใช้ $\overline{P}_L$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ ผลจากการพิจารณาเป็นเช่นเดียวกับที่กำลังสัญญาณขาเข้ามีค่าเป็น 1 mW นั่นคือเมื่อพิจารณาที่อัตราข้อมูลในการสื่อสัญญาณน้อยกว่า 5 Gbps ระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ แต่เมื่อพิจารณาในกรณีที่อัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณค่อนข้างสูง (> 10 Gbps) ระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบจะให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ แต่เมื่อใช้ $\overline{P}_{LD}$ หรือ $\overline{P}_{LD_N}$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่แทน $\overline{P}_L$ จะเห็นว่าผลตอบสนองทางความถี่ ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบทุกๆ อัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณ ซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกันกับที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 1 mW

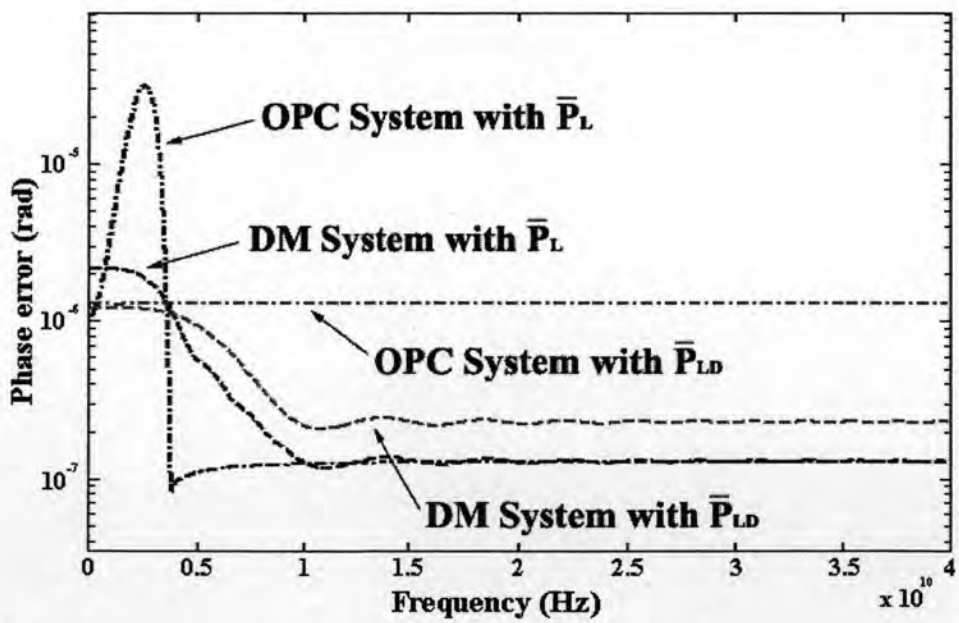


รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห์ในกรณีที่ P_0 = 5 mW

รูปที่ 3.6 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิม คือ $\overline{P}_L$ ในการคำนวณทั้งระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบและระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ แต่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นด้วย คือ $\overline{P}_{LD}$ คำนวณในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบเท่านั้น

เนื่องจากระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่วิเคราะห์เป็นระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ แต่กับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ที่ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นด้วยอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณซึ่งวางไว้ที่ระยะทางไกลหลายร้อยกิโลเมตร หรือคือไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกๆ ช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณนั้น จะใช้ $\overline{P}_{LD_N}$ ในการคำนวณแทน โดยกำลังสัญญาณขาเข้าที่ใช้มีค่าเป็น 5 mW

เมื่อใช้ $\overline{P}_L$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ จะเห็นว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบจะให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ทุกอัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณ เนื่องจากในกรณีที่อัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณต่ำ ค่าความผิดพลาดทางเฟสของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบจะคงที่ และในกรณีที่อัตราข้อมูลสูงค่าความต่างระหว่างค่าความผิดพลาดทางเฟสของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบจะน้อยกว่า แต่เมื่อใช้ $\overline{P}_{LD}$ หรือ $\overline{P}_{LD_N}$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่แทน $\overline{P}_L$ จะเห็นว่า ผลตอบสนองทางความถี่ ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบทุกๆ อัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณ ซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกันกับที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 1 mW และ 3 mW



รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห์ในกรณีที่ P_0 = 7 mW

รูปที่ 3.7 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิม คือ $\overline{P}_L$ ในการคำนวณทั้งระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบและระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ แต่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นด้วย คือ $\overline{P}_{LD}$ คำนวณในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบเท่านั้น เนื่องจากระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่วิเคราะห์เป็นระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ แต่กับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ที่ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นด้วยอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณซึ่งวางไว้ที่ระยะทางไกลหลายร้อยกิโลเมตร หรือคือไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกๆ ช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณนั้น จะใช้ $\overline{P}_{LD_N}$ ในการคำนวณแทน โดยกำลังสัญญาณขาเข้าที่ใช้มีค่าเป็น 7 mW

เมื่อใช้ $\overline{P}_L$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ ผลจากการพิจารณาเป็นเช่นเดียวกับที่กำลังสัญญาณขาเข้ามีค่าเป็น 5 mW นั่นคือ ระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบจะให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ทุกอัตราข้อมูลที่ใช่ในการสื่อสัญญาณ แต่เมื่อใช้ $\overline{P}_{LD}$ หรือ $\overline{P}_{LD_N}$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่แทน $\overline{P}_L$ จะเห็นว่า ผลตอบสนองทางความถี่ ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบทุกๆ อัตราข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสัญญาณ ซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกันกับที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 1 mW , 3 mW และ 5 mW

จากผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสของทั้ง 4 กรณี คือ เมื่อกำลังสัญญาณขาเข้ามีค่าเป็น 1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อใช้ $\overline{P}_L$ ในการคำนวณ ผลที่ได้จากการพิจารณาจะแตกต่างกันเมื่ออัตราข้อมูลค่อนข้างสูง (>10 Gbps) และจะสอดคล้องกันเมื่ออัตราข้อมูลต่ำกว่า 5 Gbps ทุกๆ อัตราข้อมูล นั่นคือระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั้นเป็นรายคาบจะให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่า แต่ในทางกลับกัน เมื่อใช้ $\overline{P}_{LD}$ หรือ $\overline{P}_{LD_N}$ ในการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่แทน $\overline{P}_L$ จะเห็นว่าทุกๆ ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสของทั้ง 4 กรณี ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบจะให้สมรรถนะในการสื่อสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ในบทนี้ก็พอจะชี้ให้เห็นได้แล้วว่าค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นในการคำนวณนั้นให้ความแน่นอนในการวิเคราะห์ระบบ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถสรุปได้แน่นอนว่าค่ากำลังเฉลี่ยแบบใหม่ให้ค่าที่ถูกต้อง แม่นยำเหมาะสมหรือไม่ ดังนั้นในบทต่อไป จึงต้องทำการจำลองระบบโดยคอมพิวเตอร์เพื่อพิสูจน์ และ

ยืนยันความเหมาะสม และแม่นยำของค่ากำลังเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นในการคำนวณ