

บทที่ 3

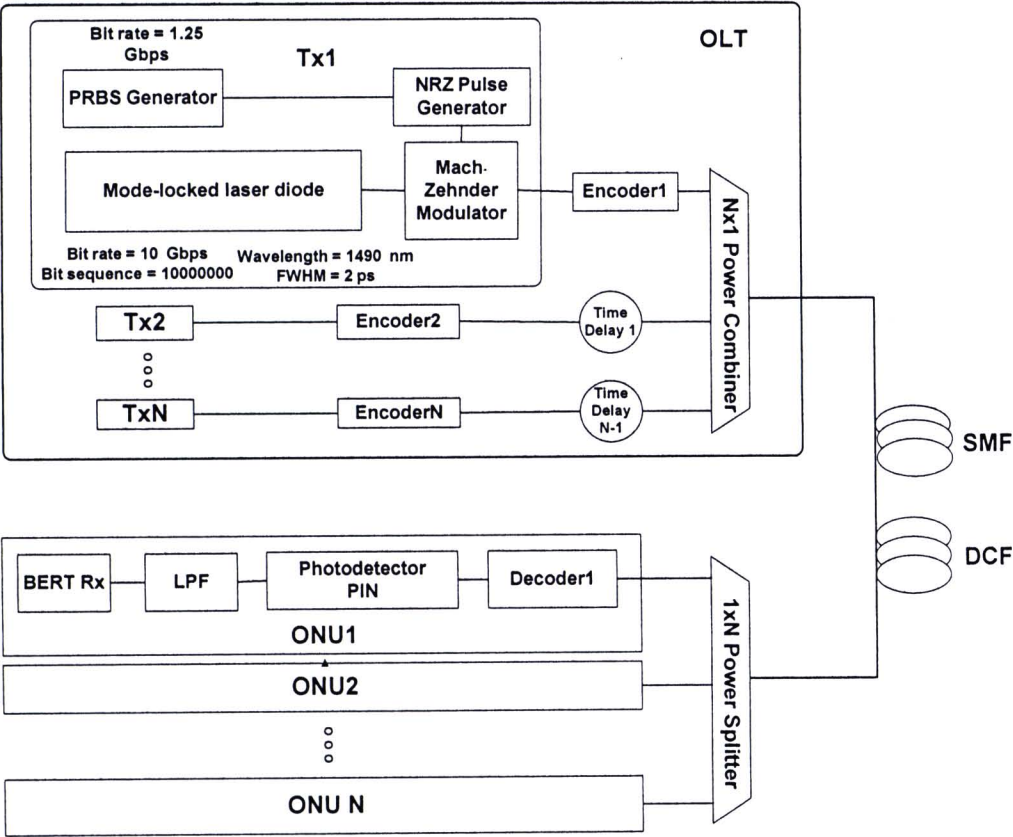
การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของระบบ OCDMA-PON

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของระบบ OCDMA และได้อธิบายถึงการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณแสงด้วยวิธี TS-OCDMA ด้วย SSFBG สำหรับเนื้อหาในบทที่ 3 จะอธิบายถึงวิธีการคำนวณค่า BER ของระบบ OCDMA และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในเชิงทฤษฎีที่ส่งผลต่อค่า BER ของระบบ รวมไปถึงแนวทางในการออกแบบระบบ OCDMA ให้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการและค่า BER ให้ได้ตามที่ต้องการ

3.1 การหาค่า BER ของระบบ OCDMA

ระบบ OCDMA-PON ที่นำเสนอและจะวิเคราะห์นั้นแสดงดังรูปที่ 3.1 ระบบดังกล่าวมีจำนวนผู้ใช้บริการจำนวน N ราย โดยที่ OLT จะประกอบไปด้วยตัวส่งสัญญาณ N ตัวและ encoder N ตัว ซึ่งภายในตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวประกอบไปด้วย MLLD ที่สร้างพัลส์แสงความยาวคลื่น 1,490 nm มีขนาดของความกว้างพัลส์ full-width half maximum (FWHM) เท่ากับ 1.56 ps และอัตราการสร้างพัลส์แสงเท่ากับ 1.25 GHz ซึ่งจะถูกมอดูเลตแบบความเข้มแสงเข้ากับสัญญาณไฟฟ้า NRZ แบบ pseudo random ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps ใช้ SSFBG encoder แบบ coherent time-spreading ที่ใช้ gold code จำนวน 511 ชิป จากนั้นสัญญาณแสงของผู้ใช้บริการทั้ง N รายที่ถูก encode เรียบร้อยแล้วจะถูกหน่วงเวลาด้วยเวลาที่แตกต่างกันเพื่อให้ลักษณะการส่งสัญญาณของผู้ใช้บริการแต่ละรายเป็นแบบไม่เชิงโครนัสจากนั้น $N \times 1$ power combiner จะรวมสัญญาณแสงทั้งหมดเข้าด้วยกันและส่งผ่านไปยังเส้นใยแสงชนิดโหมดเดียวความยาว 20 km ที่มีค่าคงตัวของการลดทอนของเส้นใยแสงเท่ากับ 0.2 dB/km ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ 13.79 ps/nm·km ค่าความชันดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ 0.0642 ps/nm·km² และเส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยความชันดิสเพอร์ชันความยาว 263.09 m ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ -1,048.56 ps/nm × km ค่าความชันดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1,490 nm เท่ากับ -4.8825 ps/nm × km² หลังจากนั้นสัญญาณแสงก็จะถูกแบ่งพลังงานด้วย $1 \times N$ power splitter ไปยัง ONU แต่ละตัวที่ประกอบไปด้วย SSFBG decoder แบบ coherent time-spreading ที่ใช้ gold code จำนวน 511

ชิป ตัวรับสัญญาณแสงชนิด PIN ที่มีค่า Responsivity ($\mathcal{R}$) = 1 A/W Thermal noise เท่ากับ 1.52×10^{-12} A/Hz^{-1/2} และกระแสมืด (Dark current) เท่ากับ 10 nA ตามด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass filter: LPF) เพื่อกรองเอาความถี่ของสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป และทำการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณและ BER ด้วยอุปกรณ์ทดสอบอัตราบิตผิดพลาด (bit error rate tester: BERT)



รูปที่ 3.1 ระบบ OCDMA-PON ที่มีผู้ให้บริการจำนวน N ราย

สำหรับการวัดคุณภาพของสัญญาณ จะใช้ค่าอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) เป็นตัววัดคุณภาพของสัญญาณ โดยค่า BER เป็นค่าที่บ่งบอกอัตราความผิดพลาดในการส่งสัญญาณ หาได้จากการนับจำนวนบิตที่ส่งผิดพลาดต่อบิตที่ส่งทั้งหมด ซึ่งในความเป็นจริงนั้นเป็นเรื่องยากในการนับจำนวนบิตที่ผิดพลาด จึงได้มีการประมาณค่า BER ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \tag{3.1}$$

โดย Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.2)



$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.2)$$

โดย μ_1 คือค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณบิต "1"
 μ_0 คือค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณบิต "0"
 σ_1 คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มของสัญญาณที่บริเวณระดับของบิต "1"
 σ_0 คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มของสัญญาณที่บริเวณระดับของบิต "0"
 โดยค่า BER ที่ยอมรับได้สำหรับแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-9} [35]

สำหรับการส่งสัญญาณ OCDMA ด้วยวิธี time-spreading สามารถคำนวณค่า BER ได้จากสมการที่ (3.3) [18]

$$BER(m) = \Pr(0)_{chip} Pe(1|0)(m) + \Pr(1)_{chip} + Pe(0|1)(m) \quad (3.3)$$

โดย m คือ จำนวนของสัญญาณรบกวนที่มาจากผู้ใช้บริการรายอื่น (interference user) มีค่าเท่ากับ $N - 1$

$\Pr(0)_{chip}$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งชิป "0"

$\Pr(1)_{chip}$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งชิป "1"

$Pe(1|0)(m)$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งชิป "0" ผิดพลาด เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ m

$Pe(0|1)(m)$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งชิป "1" ผิดพลาด เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ m

ทั้งนี้ค่าของ $\Pr(0)_{chip}$ และ $\Pr(1)_{chip}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (3.4) และ (3.5)

$$\Pr(0)_{chip} = \Pr(0)_{data} + \Pr(1)_{data} \left(1 - \frac{T_C}{T_{Bit}} \right) \quad (3.4)$$

$$\Pr(1)_{chip} = \Pr(1)_{data} \left(\frac{T_C}{T_{Bit}} \right) \quad (3.5)$$

โดย $\Pr(0)_{data}$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งบิต "0"

$\Pr(1)_{data}$ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งบิต "1"

T_C คือ ระยะเวลา 1 คาบของชิป (chip period)

T_{Bit} คือ ระยะเวลา 1 คาบของบิต (bit period)

เมื่อแทนค่า $\Pr(0)_{data}$ และ $\Pr(1)_{data}$] ลงในสมการที่ (3.3) จะได้ว่า

$$BER(m) = \left[\Pr(0)_{data} + \Pr(1)_{data} \left(1 - \frac{T_c}{T_{Bit}} \right) \right] Pe(1|0)(m) + \left[\Pr(1)_{data} \left(\frac{T_c}{T_{Bit}} \right) \right] Pe(0|1)(m) \quad (3.6)$$

ซึ่งสามารถลดรูปให้เหลือดังสมการ (3.7)

$$BER(m) = \frac{1}{2} \left[\left(2 - \frac{T_c}{T_{Bit}} \right) Pe(1|0)(m) + \frac{T_c}{T_{Bit}} Pe(0|1)(m) \right] \quad (3.7)$$

โดยค่า $Pe(1|0)(m)$ และ $Pe(0|1)(m)$ หาได้จากการประมาณค่าจากสมการ (3.8) และ (3.9)

$$Pe(1|0)(m) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{P_d(D - m\xi)}{\sqrt{2}\sigma_{0-co}} \right] \quad (3.8)$$

$$Pe(0|1)(m) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{P_d(1 + m\xi - D)}{\sqrt{2}\sigma_{1-co}} \right] \quad (3.9)$$

โดย D คือ ค่าการตัดสินใจ (decision threshold) มีค่าอยู่ระหว่าง $0 < D < 1 + m\xi$

ξ คือ ค่าไขว้แทรก (crosstalk) เป็นอัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนกับ ACP

สำหรับ encoder/decoder แบบ SSFBG สามารถประมาณค่าได้จาก

$$\xi = \frac{1}{N_{chip}} \quad (3.10)$$

โดย N_{chip} คือ ความยาวของรหัส gold code หาได้จากสมการที่ (2.12)

P_d คือ กำลังของสัญญาณแสง ACP ในช่วงเวลา T_c

σ_{0-co}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน (noise variance) ของชิป "0" ใน

การส่งสัญญาณ OCDMA แบบ coherent time-spreading เป็นผลรวมของสัญญาณรบกวนจากการเข้าถึงหลายทิศทาง (multiple access interference: MAI) สัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal noise) และสัญญาณรบกวนเนื่องจากการตีกันของสัญญาณ (beat noise) หาได้จากสมการที่ (3.11)

$$\sigma_{0-co}^2 = \sigma_{MAI}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{beat-0}^2 \quad (3.11)$$

โดย σ_{MAI}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจากการเข้าถึงหลายทิศทาง แปรผันตรงกับจำนวน interference user ที่มาจากผู้ใช้บริการรายอื่นๆในระบบ หาได้จาก

$$\sigma_{MAI}^2 = m\sigma_{MAI-0}^2 \quad (3.12)$$

โดย σ_{MAI-0}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนแบบเดี่ยว (single interference signal) สำหรับ encoder แบบ SSFBG ที่ใช้ gold code ความยาว $2^L - 1$ จะหาได้จาก

$$\sigma_{MAI-0}^2 = \frac{2^{2L} + 2^{(L+2)}}{(2^L - 1)^4} \quad (3.13)$$

σ_{th}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ หาได้จาก

$$\sigma_{th}^2 = B_R \left(\frac{4k_B T}{R_L} \right) \quad (3.14)$$

โดย B_R คือ ค่าแบนด์วิดท์ของตัวรับสัญญาณแสง (receiver bandwidth)

k_B คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} [JK⁻¹]

T คือ อุณหภูมิ [K]

R_L คือ ค่าความต้านทานของโหลด

σ_{beat-0}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากการตีกันของสัญญาณของชิป "0" เกิดจากกระบวนการ square-law detection ของตัวรับสัญญาณแสงเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีค่า coherence time ยาวนานกว่าระยะเวลาของชิปหาได้จาก

$$\sigma_{beat-0}^2 = m(m-1)\xi^2 P_d^2 \quad (3.15)$$

σ_{1-co}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน (noise variance) ของชิป "1" ในการส่งสัญญาณ OCDMA แบบ coherent time-spreading เป็นผลรวมของสัญญาณรบกวนเนื่องจากการตีกันของสัญญาณ (beat noise) สัญญาณรบกวนจากการเข้าถึงหลายทิศทาง (multiple access interference: MAI) สัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal noise) และสัญญาณรบกวนกระแสวิช (shot noise) หาได้จากสมการที่ (3.16)

$$\sigma_{1-co}^2 = \sigma_{beat-1}^2 + \sigma_{MAI}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{1-sh}^2 \quad (3.16)$$

โดย σ_{beat-1}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากการตีกันของสัญญาณของชิป "1" หาได้จาก

$$\sigma_{beat-1}^2 = 2m\xi P_d^2 \quad (3.17)$$

σ_{1-sh}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนช็อต (variance of shot noise) หมายถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการกำเนิดและการสะสมประจุอิเล็กตรอนเมื่อมีสัญญาณแสงมาตกกระทบบที่ตัวรับสัญญาณแสง หาได้จาก

$$\sigma_{1-sh}^2 = 2eB_R \mathcal{R} P_d (1 + m\xi) \quad (3.18)$$

โดย $\mathcal{R}$ คือ ค่าประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าของตัวรับสัญญาณแสง (responsivity)

e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน

ดังนั้นเมื่อนำค่าของ σ_{0-co}^2 จากสมการที่ (3.11) และ σ_{1-co}^2 จากสมการที่ (3.16) ไปแทนค่าใน (3.8) และ (3.9) จะทำให้ทราบค่าของ $Pe(1|0)(m)$ $Pe(0|1)(m)$ ทำให้สามารถคำนวณ $BER(m)$ ได้ในที่สุด อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการประมาณค่าของ beat noise ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น ค่าของ σ_{1-co}^2 จะคิดผลของ beat noise เมื่อ m มีค่ามากพอ ซึ่งกำหนดด้วยสมการ

$$\sigma_{1-m}^2 = \begin{cases} \sigma_{1-co}^2 = \sigma_{beat-1}^2 + \sigma_{MAI}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{1-sh}^2, & \text{if } D > 1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi} \\ \sigma_{1-in}^2 = \sigma_{MAI}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{1-sh}^2, & \text{others} \end{cases} \quad (3.19)$$

โดย σ_{1-in}^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน (noise variance) ของชิป “1” ในการส่งสัญญาณ OCDMA แบบ incoherent time-spreading เป็นผลรวมของสัญญาณรบกวนจากการเข้าถึงหลายทิศทาง (multiple access interference: MAI) สัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal noise) และสัญญาณรบกวนกระแสช็อต (shot noise) หาได้จาก

$$\sigma_{1-in}^2 = \sigma_{MAI}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{1-sh}^2 \quad (3.20)$$

ค่าของ σ_{1-m}^2 ที่จะนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.21) จะเท่ากับ σ_{1-co}^2 เมื่อค่าของ D ที่กำหนดไว้มีค่ามากกว่าค่าขอบเขตที่หาได้จาก $1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi}$ และจะเท่ากับ σ_{1-in}^2 เมื่อค่าของ D มีค่าน้อยกว่าค่าขอบเขตดังกล่าว ทั้งนี้ค่าของ $Pe(0|1)(m)$ หาได้จาก

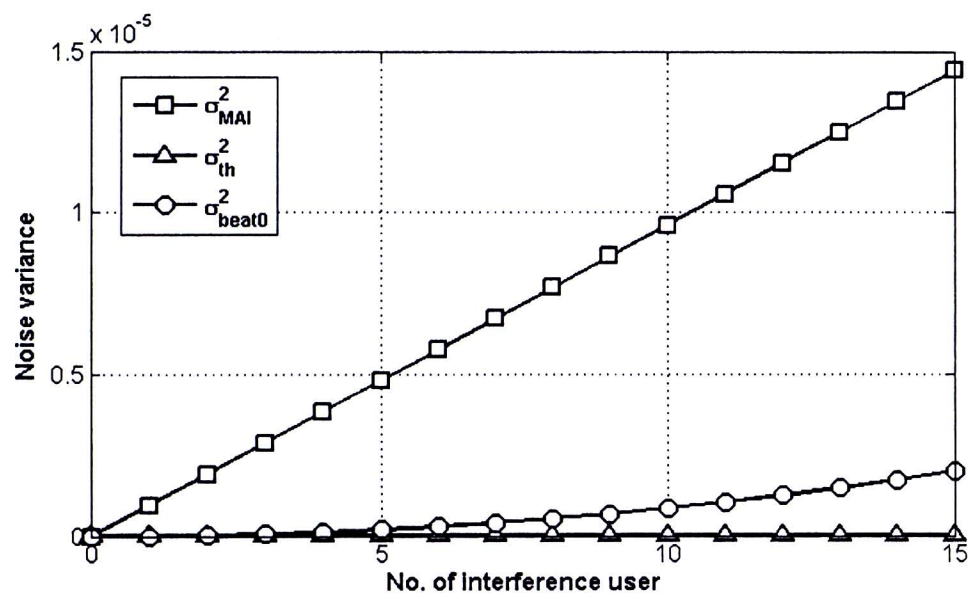
$$Pe(0|1)(m) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ \text{erfc} \left[\frac{P_d(1+m\xi-D)}{\sqrt{2}\sigma_{1-co}} \right] + \text{erfc} \left[\frac{2m\sqrt{\xi}P_d}{\sqrt{2}\sigma_{1-in}} \right] - \text{erfc} \left[\frac{2m\sqrt{\xi}P_d}{\sqrt{2}\sigma_{1-co}} \right] \right\} & \text{; if } D > 1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi} \\ \frac{1}{2} \text{erfc} \left[\frac{P_d(1+m\xi-D)}{\sqrt{2}\sigma_{1-in}} \right] & \text{; others.} \end{cases} \quad (3.21)$$

3.2 การวิเคราะห์ BER เนื่องจากสัญญาณรบกวนของการส่งผ่านสัญญาณ OCDMA-PON

ในหัวข้อที่ 3.1 ได้นำเสนอการหาค่า BER โดยคำนวณจากค่าสัญญาณรบกวนประเภทต่างๆภายในระบบ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์แต่ละตัวว่าจะส่งผลต่อค่า BER ของระบบอย่างไร ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางการออกแบบระบบ OCDMA-PON ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

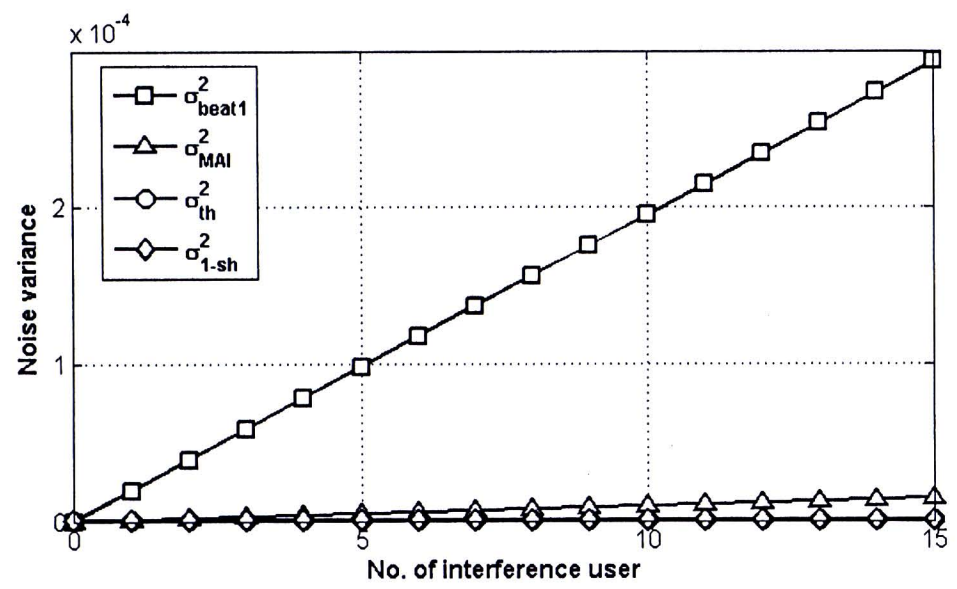
3.2.1 การวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทในระบบ OCDMA-PON

ในการวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ $N = 16$ ราย จำนวนชิปของ encoder $N_{chip} = 511$ ชิป ระยะเวลา 1 คาบของชิป $T_C = 1.56$ ps ระยะเวลา 1 คาบของบิต $T_{Bit} = 800$ ps แบนด์วิดท์ของเครื่องรับ $B_R = 320$ GHz ค่าคงที่ของ Boltzman $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K⁻¹ อุณหภูมิ $T = 300$ K ความต้านทานโหลด $R_L = 7000 \Omega$ กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับ $P_d = -10$ dBm ค่าประจุของอิเล็กตรอน $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C ค่า responsivity $\mathfrak{R} = 1$ A/W และค่า decision threshold $D = 0.3$ โดยรูปที่ 3.2-3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการรายอื่นที่เปรียบเป็นสัญญาณรบกวน (interference user) กับขนาดความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนชนิด σ_{0-co}^2 σ_{1-co}^2 และ σ_{1-in}^2 ตามลำดับ



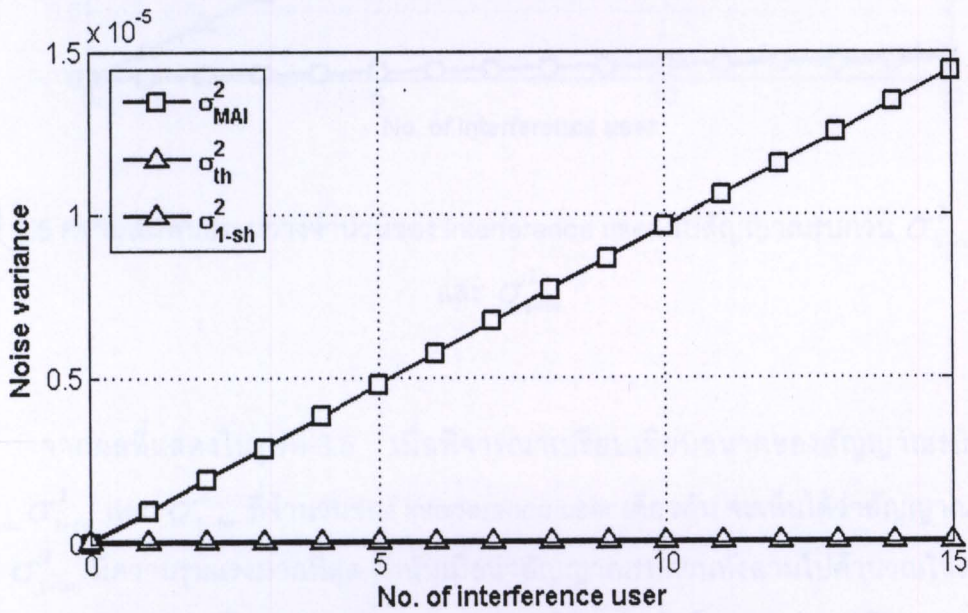
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ_{0-co}^2

รูปที่ 3.2 แสดงปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ_{0-co}^2 ดังแสดงในสมการที่ (3.11) โดยสัญญาณรบกวนที่มีค่ามากที่สุดก็คือ σ_{MAI}^2 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวน interference user m ในสมการที่ (3.12) ในสัดส่วนที่มากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่า σ_{beat-0}^2 ในขณะที่ค่า σ_{th}^2 ไม่แปรผันตามจำนวน interference user m



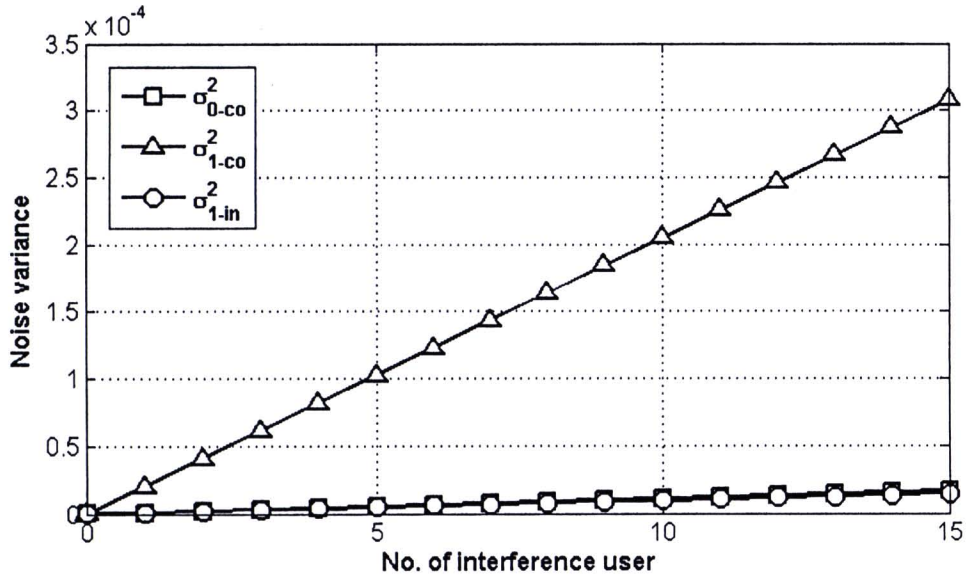
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ_{1-co}^2

รูปที่ 3.3 แสดงปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ_{1-co}^2 ดังแสดงในสมการที่ (3.16) โดย σ_{beat-1}^2 นั้นมีความรุนแรงของสัญญาณรบกวนมากที่สุด เนื่องจากความแรงของสัญญาณรบกวน σ_{beat-1}^2 ดังแสดงในสมการที่ (3.17) แปรผันตามจำนวน interference user m เช่นเดียวกันกับ σ_{MAI}^2 แต่ค่าของ crosstalk (ξ) ที่เกิดจาก encoder ที่ใช้จำนวนชิปเท่ากับ 511 ชิปนั้นมีค่าเท่ากับ $1/511=0.020$ ในขณะที่ค่าของ σ_{MAI}^2 เป็นผลคูณของจำนวน interference user m กับค่า σ_{MAI-0}^2 ดังแสดงในสมการที่ (3.12) ซึ่งค่า σ_{MAI-0}^2 จาก encoder ตัวเดียวกันมีค่าเท่ากับ 3.87×10^{-6} ซึ่งน้อยกว่าผลจาก ξ ที่เกิดขึ้นใน σ_{beat-1}^2



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ_{1-in}^2

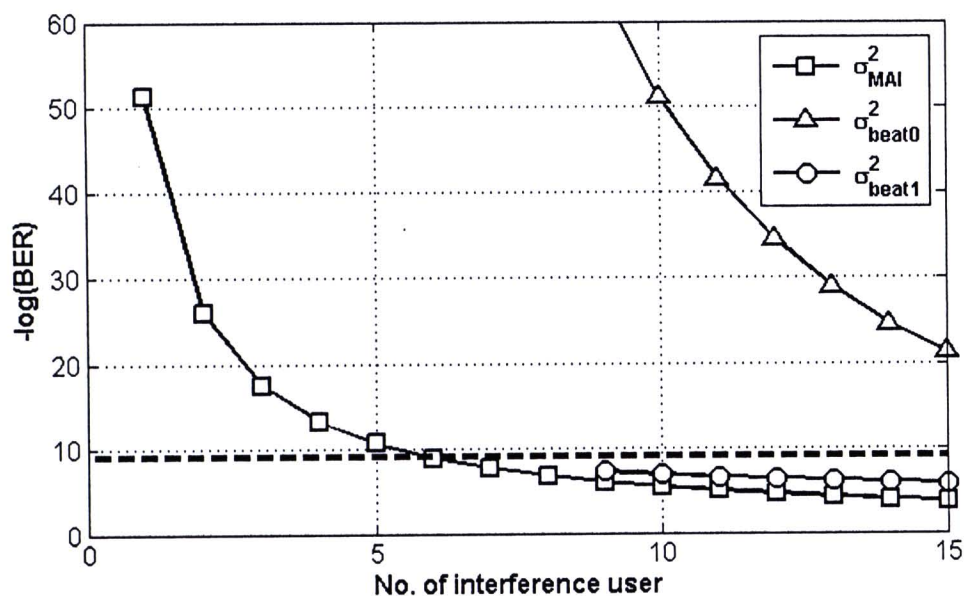
รูปที่ 3.4 แสดงปริมาณของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทของ σ_{1-in}^2 แสดงดังสมการที่ (3.20) จะเห็นได้ว่า σ_{MAI}^2 มีความรุนแรงของสัญญาณรบกวนมากที่สุด ในขณะที่ σ_{1-sh}^2 มีค่าน้อยมากและ σ_{th}^2 ก็มีค่าน้อยมากและไม่แปรผันตามจำนวน interference user m



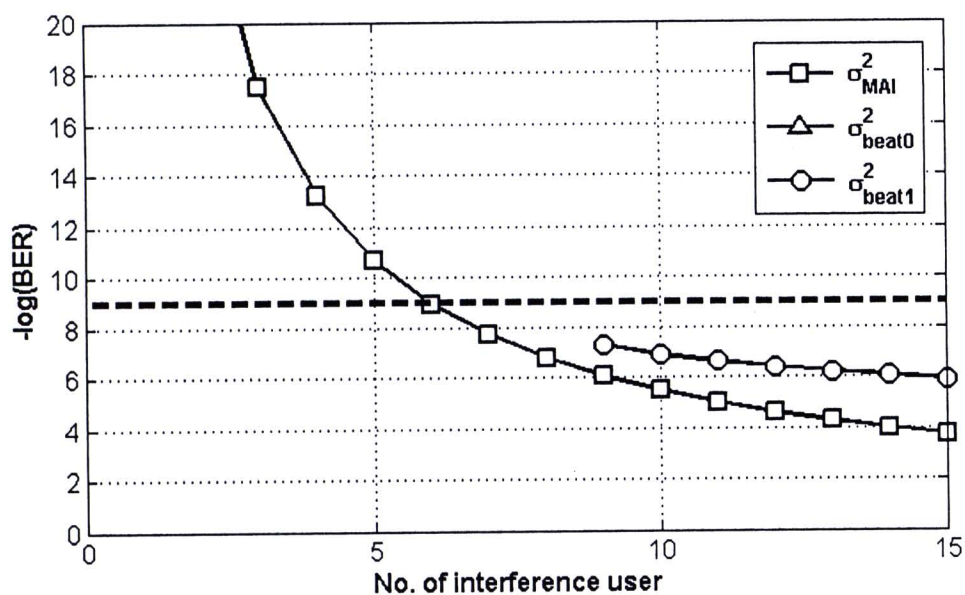
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับสัญญาณรบกวน σ^2_{0-co} σ^2_{1-co} และ σ^2_{1-in}

จากผลที่แสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณรบกวนทั้ง σ^2_{0-co} σ^2_{1-co} และ σ^2_{1-in} ที่จำนวนของ interference user เดียวกัน จะเห็นได้ว่าสัญญาณรบกวนชนิด σ^2_{1-co} มีความรุนแรงมากที่สุด ดังนั้นเมื่อนำสัญญาณรบกวนทั้งสามไปคำนวณในสมการที่ (3.8) และ (3.21) ก็จะสามารถหาค่า BER ได้ อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาค่าของ σ^2_{0-co} σ^2_{1-co} และ σ^2_{1-in} ค่าของสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อค่าสัญญาณรบกวนทั้งสามได้แก่ σ^2_{MAI} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{beat-0} ในขณะที่ผลของ σ^2_{ih} และ σ^2_{1-sh} มีค่าน้อยมาก รูปที่ 3.6 แสดงค่า BER ของระบบเมื่อแยกคิดผลของ σ^2_{MAI} σ^2_{beat-1} และ σ^2_{beat-0} จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{beat-0} ทำให้ช่วงที่มีจำนวน interference user เท่ากับ 0-4 ราย ไม่มีความผิดพลาดในการส่งสัญญาณเลย ผลของ σ^2_{beat-0} ที่มีต่อระบบจะเริ่มตั้งแต่จำนวน interference user มีค่าเท่ากับ 5 เป็นต้นไป เมื่อพิจารณาแค่ผลของ σ^2_{MAI} ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวน interference user น้อยจะทำให้ได้ค่า BER ที่ดี แต่เมื่อเพิ่มจำนวน interference user มากขึ้นจะทำให้ค่า BER ค่อยๆ แยลง ซึ่งค่า BER ที่คำนวณได้จะมากกว่า 10^{-9} ที่จำนวน interference user เท่ากับ 6 ในขณะที่ผลของ σ^2_{beat-1} จะเริ่มมีผลตั้งแต่จำนวน interference user เท่ากับ 9 เนื่องจากค่าของ D จะมีค่ามากกว่าค่าขอบเขต $1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi}$ เมื่อจำนวน interference user มีค่าเท่ากับ 9 ทำให้ σ^2_{1-co} จะเริ่มพิจารณาผลของ σ^2_{beat-1} ตั้งแต่จำนวน

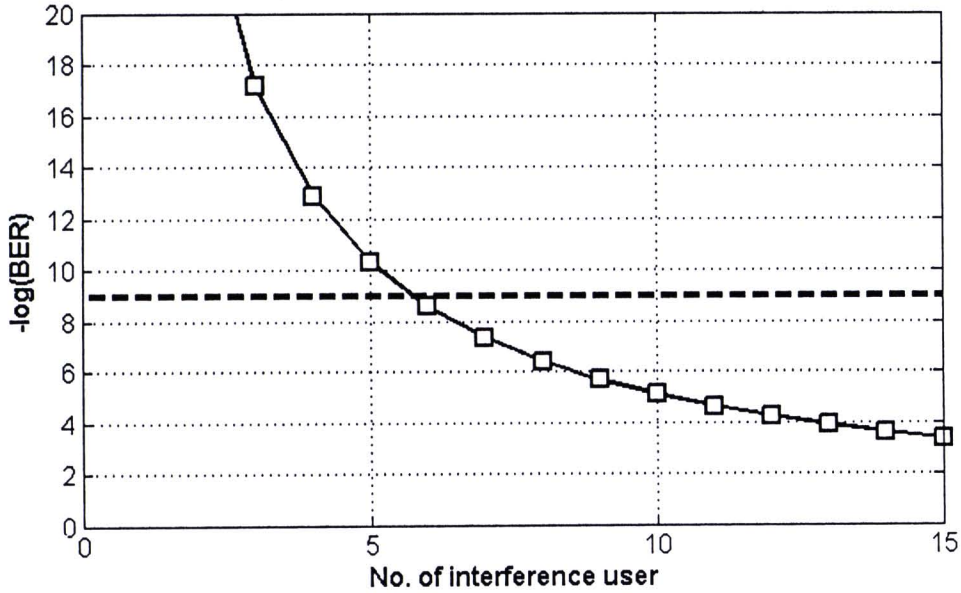
interference user เท่ากับ 9 เป็นต้นไป ดังนั้นเมื่อคิดผลของสัญญาณรบกวนทั้งหมด ทำให้ค่า BER แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} จะสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการ N เท่ากับ 7 ราย



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER แยกตามประเภทของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER แยกตามประเภทของสัญญาณรบกวน (ขยาย)



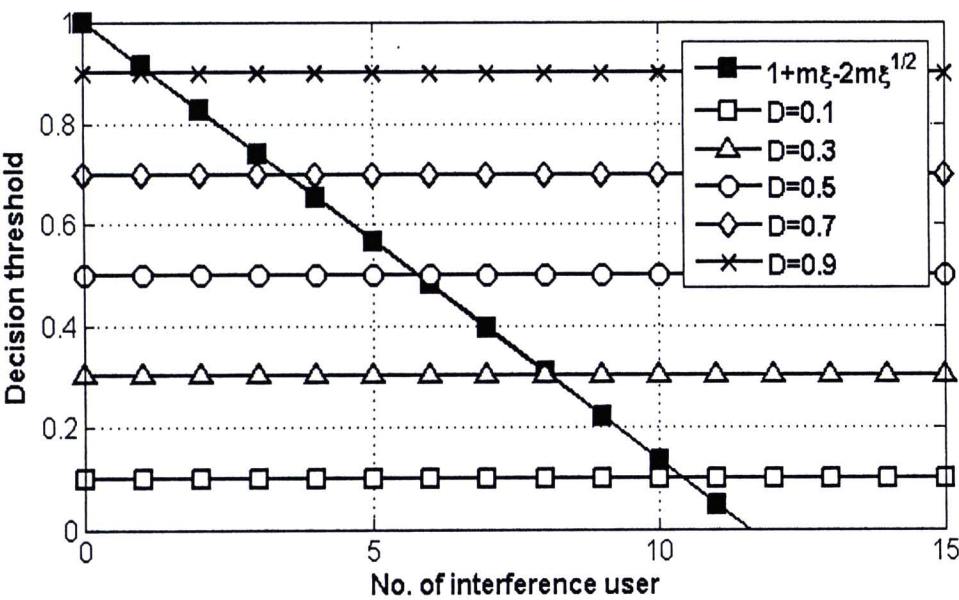
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER เมื่อพิจารณาผลของสัญญาณรบกวนทั้งหมด

3.2.2 การวิเคราะห์ผลของค่า decision threshold ที่ใช้ในระบบ OCDMA-PON

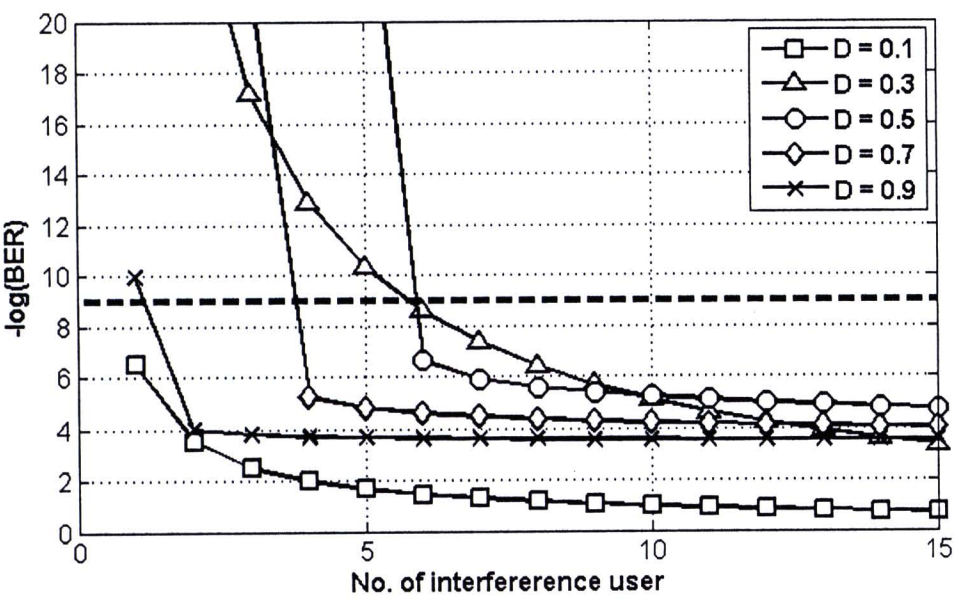
ในการวิเคราะห์ผลของค่า decision threshold D ที่มีต่อระบบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้ จำนวนผู้ให้บริการในระบบ $N = 16$ ราย จำนวนชิปของ encoder $N_{chip} = 511$ ชิป ระยะเวลา 1 คาบของชิป $T_C = 1.56$ ps ระยะเวลา 1 คาบของบิต $T_{Bit} = 800$ ps แบนด์วิดท์ของเครื่องรับ $B_R = 320$ GHz ค่าคงที่ของโบลทซ์มาน $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K⁻¹ อุณหภูมิ $T = 300$ K ความต้านทานโหลด $R_L = 7000$ Ω กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับ $P_d = -10$ dBm ค่าประจุของอิเล็กตรอน $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C และค่า responsivity $\mathcal{R} = 1$ A/W

ค่า D ที่กำหนดไว้มีจะเป็นตัวกำหนดการคิดผลของ σ_{beat-1}^2 ในสมการที่ (3.19) ซึ่งจะพิจารณาจากค่าขอบเขต $1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi}$ ซึ่งลดลงตามจำนวน interference user m ที่เพิ่มขึ้น เมื่อ D มีค่ามากกว่าค่าขอบเขต $1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi}$ ทำให้ค่าของ σ_{1-co}^2 คิดผลของ σ_{beat-1}^2 รูปที่ 3.9 แสดงค่าขอบเขต $1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi}$ ที่ลดลงเรื่อยๆเมื่อมีจำนวน interference user m เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อ $D = 0.1$ จะเริ่มคิดผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 11 รายเป็นต้นไป เมื่อเพิ่มค่า $D = 0.3$ ทำให้เริ่มคิดผลของ σ_{beat-1}^2

เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 9 รายเป็นต้นไป และเมื่อเพิ่มค่า $D = 0.9$ ทำให้เริ่มคิดผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 1 รายเป็นต้นไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า D ส่งผลต่อค่า BER ของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขอบเขตที่ลดลงกับจำนวน interference user ที่ค่า D ต่างๆกัน



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER ที่ค่า D ต่างกัน

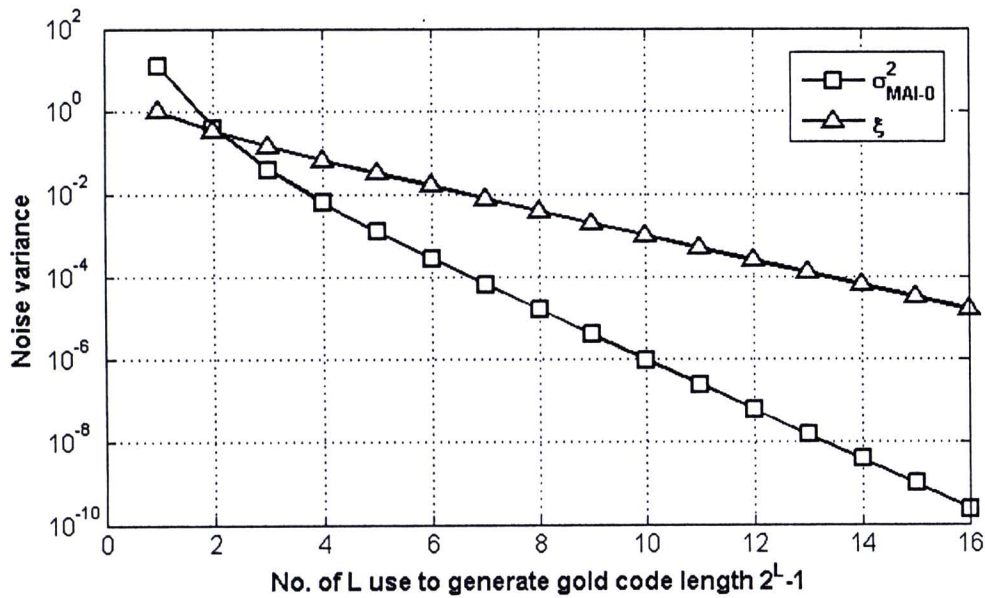
จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่า $D = 0.1$ ทำให้เริ่มคิดผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 11 ราย ดังนั้นในช่วงที่มีจำนวนสัญญาณไม่เกิด 11 ราย ค่า BER จึงขึ้นอยู่กับผลของ σ_{MAI}^2 นอกจากนี้ค่า D ที่น้อยอาจทำให้โอกาสที่ชิป "0" จะถูกตัดสินใจผิดพลาดเป็นชิป "1" ตามสมการที่ (3.8) มีมากขึ้น ทำให้ค่า BER ที่คำนวณได้มีค่าสูงมาก เมื่อใช้ค่า $D = 0.3$ ทำให้เริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 9 ราย ทั้งนี้ผลของ σ_{beat-1}^2 และ σ_{MAI}^2 เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 9 รายเป็นต้นไปมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ค่า BER ขึ้นอยู่กับสัญญาณรบกวนทั้งสองชนิด นอกจากนี้ค่า $D = 0.3$ ยังทำให้โอกาสตัดสินใจผิดพลาดดังสมการที่ (3.8) และ (3.9) น้อยลงด้วย ค่า BER จึงน้อยกว่าเมื่อใช้ค่า $D = 0.1$ อย่างไรก็ตามผลจากการเปลี่ยนแปลงค่า D เริ่มชัดเจนเมื่อใช้ค่า $D = 5$ ในช่วงแรกเมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 1-5 ราย ค่า BER จะขึ้นอยู่กับผลของ σ_{MAI}^2 แต่เมื่อจำนวน interference user เท่ากับ 6 รายก็จะเริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 ทำให้ค่า BER เพิ่มขึ้นทันที ที่ค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่า $D = 7$ และ 9 ก็จะเริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ 4 และ 2 รายตามลำดับ นอกจากนี้ค่า D ที่มากเกินไปจะทำให้โอกาสที่ชิป "1" จะถูกตัดสินใจผิดพลาดเป็นชิป "0" ตามสมการที่ (3.21) ก็มีมากขึ้น ทำให้ค่า BER มีค่าสูง

3.2.3 การวิเคราะห์ผลของจำนวนชิปของ encoder/decoder ที่ใช้ในระบบ OCDMA-PON

ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชิปของ encoder/decoder N_{chip} ที่มีต่อระบบ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ $N = 16$ ราย ระยะเวลา 1 คาบของชิป $T_C = 1.56$ ps ระยะเวลา 1 คาบของบิต $T_{Bit} = 800$ ps แบนด์วิดท์ของเครื่องรับ $B_R = 320$ GHz ค่าคงที่ของโบลทซ์มาน $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K⁻¹ อุณหภูมิ $T = 300$ K ความต้านทานโหลด $R_L = 7000 \Omega$ กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับ $P_d = -10$ dBm ค่าประจุของอิเล็กตรอน $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C ค่า responsivity $\mathfrak{R} = 1$ A/W และค่า decision threshold $D = 0.3$ ตามลำดับ

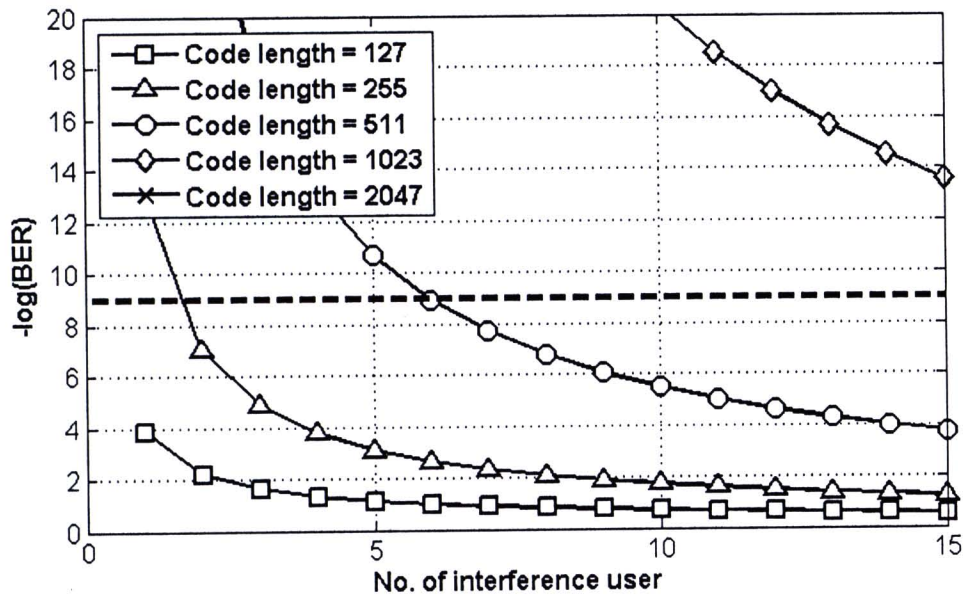
จำนวนชิปของ encoder/decoder ที่ใช้นั้นจะเท่ากับความยาวของ gold code ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.11) ซึ่งค่าของ N_{chip} นั้นมีผลต่อค่า ξ ในสมการที่ (3.10) และค่า σ_{MAI-0}^2 ในสมการที่ (3.13) รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ L ที่ใช้ในการสร้าง gold code ความยาว $2^L - 1$ ชิป กับขนาดของสัญญาณรบกวน ξ และ σ_{MAI-0}^2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่ม

จำนวนชิปของ encoder (หรือความยาวของรหัส) ให้มากขึ้น จะทำให้ค่าสัญญาณรบกวน เนื่องจาก ξ และ σ_{MAI-0}^2 นั้นมีค่าลดลง



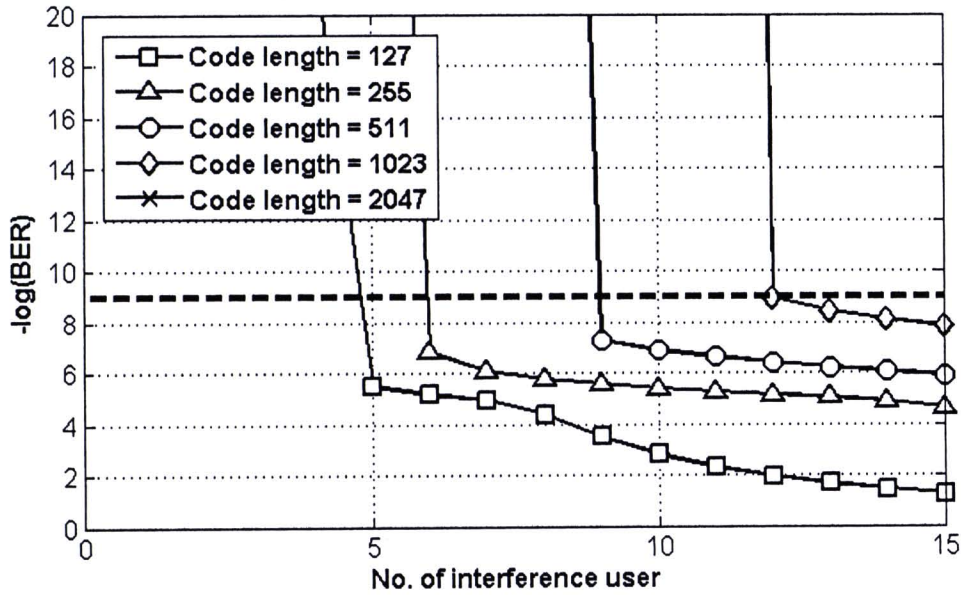
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ L ที่ใช้ในการสร้าง gold code ความยาว $2^L - 1$ ชิป กับขนาดของสัญญาณรบกวน ξ และ σ_{MAI-0}^2

เมื่อสามารถลดผลของ ξ และ σ_{MAI-0}^2 โดยการเพิ่มจำนวนชิปให้มากขึ้น ยังส่งผลให้ค่าของ σ_{beat-0}^2 , σ_{beat-1}^2 และ σ_{MAI}^2 น้อยลงด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ξ กับ σ_{beat-0}^2 และ σ_{beat-1}^2 แสดงดังสมการที่ (3.15) และ (3.17) ตามลำดับ และความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ_{MAI-0}^2 กับ σ_{MAI}^2 แสดงดังสมการที่ (3.12) ทำให้ค่า BER ของระบบน้อยลง รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ_{MAI}^2 ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน เมื่อใช้จำนวนชิปเท่ากับ 127 ชิป ผลปรากฏว่าเมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ 1 ราย ค่า BER เท่ากับ 1.44×10^{-4} เมื่อเพิ่มจำนวนชิปเป็น 255 ชิป ค่า BER ลดลงเหลือ 4.24×10^{-14} และค่า BER จะลดน้อยลงเรื่อยเมื่อใช้จำนวนชิปให้มากขึ้น



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ_{MAI}^2 ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน

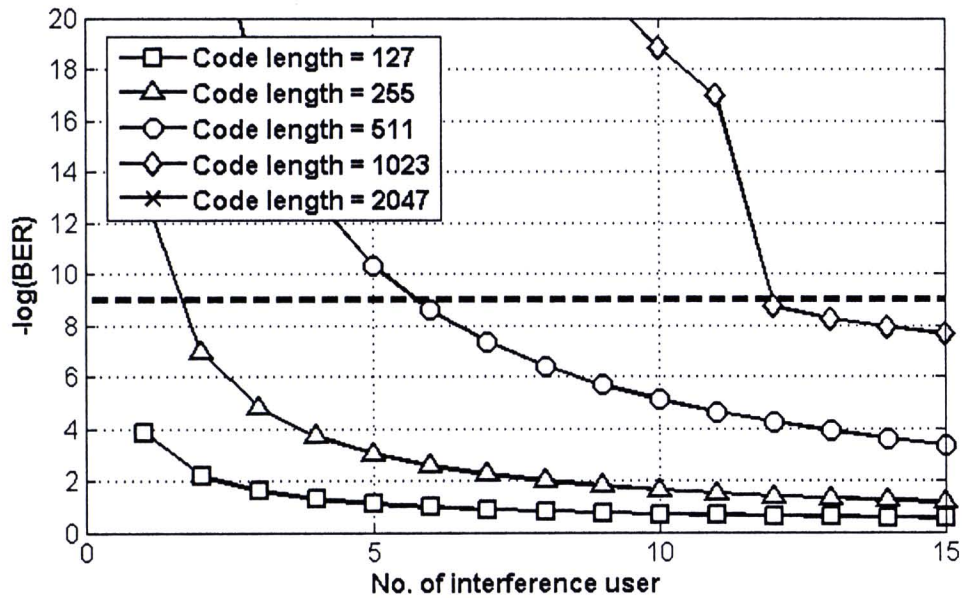
รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ_{beat-0}^2 และ σ_{beat-1}^2 ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาที่จำนวน interference user เท่ากัน ค่า BER และจะมีค่าลดน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มจำนวนชิปมากขึ้น เนื่องจากผลของ ξ ที่น้อยลงดังแสดงในรูปที่ 3.11 นอกจากนี้การเพิ่มหรือลดจำนวนชิปมีผลต่อการพิจารณาค่าของ σ_{beat-1}^2 ในสมการที่ (3.19) ด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่า ξ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าขอบเขต $1 + m\xi - 2m\sqrt{\xi}$ ที่ใช้ในสมการที่ (3.19) ด้วย จากเดิมเมื่อค่าใช้จำนวนชิปเท่ากับ 511 ชิป จะเริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ 9 ราย เป็นต้นไปดังแสดงในรูปที่ 3.9-3.10 แต่เมื่อเปลี่ยนจำนวนชิปเท่ากับ 255 และ 1023 ชิป จะเริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 เมื่อมีจำนวน interference user เท่ากับ 6 กับ 12 ราย ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER โดยพิจารณาแค่ผลของ σ_{beat-0}^2 และ σ_{beat-1}^2 ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลของ σ_{beat-0}^2 , σ_{beat-1}^2 และ σ_{MAI}^2 ร่วมกันที่มีต่อค่า BER ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชิปให้มากขึ้น จะทำให้ค่า BER ลดน้อยลง และทำให้ค่าขอบเขตการตัดสินใจในการพิจารณาผลของ σ_{beat-1}^2 ที่ส่งผลต่อค่า BER เปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการจากประมาณ 6 ราย เป็นประมาณ 12 ราย เมื่อเพิ่มจำนวนชิปจาก 511 ชิป เป็น 1023 ชิป ที่ BER น้อยกว่า 10^{-9} เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนชิปให้มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มต้นทุนและขนาดของ en/decoder นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนชิปให้มากขึ้นในขณะที่ต้องการส่งด้วยมอดูด้วยอัตราบิดเท่าเดิม ระยะเวลาของชิป T_C จะต้องน้อยลงเพื่อให้สัญญาณที่ถูก encode นั้นถูกแผ่ทางเวลาอยู่ในช่วงเวลาของ T_{Bit} เช่นเดิม ทำให้ต้องใช้ตัวกำเนิดแสงในการส่งสัญญาณที่สามารถสร้างพัลส์แสงที่แคบกว่าเดิม ทำให้ต้นทุนของระบบสูงขึ้นไปอีก

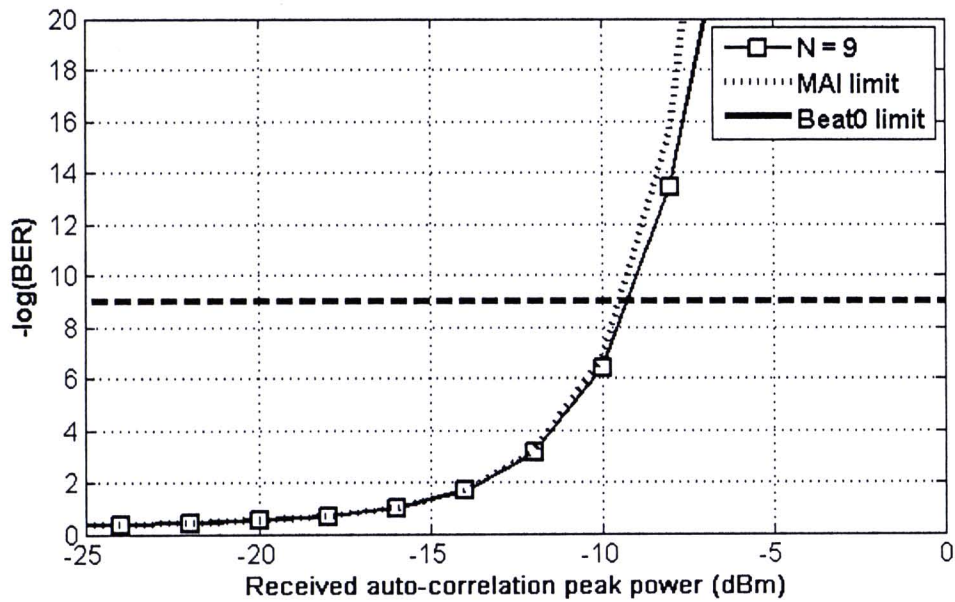


รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน interference user กับค่า BER ที่เกิดจากการใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน

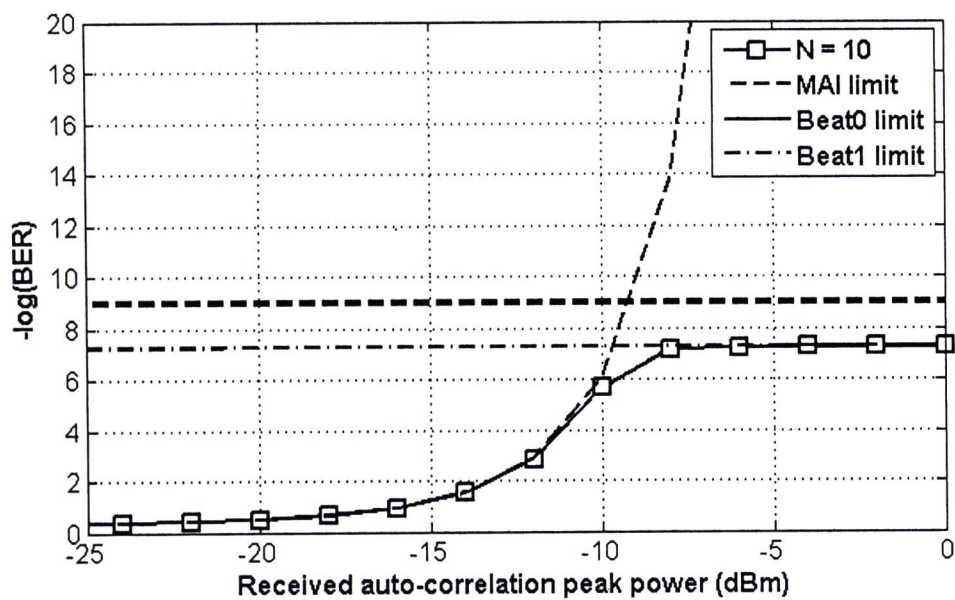
3.2.4 การวิเคราะห์ผลของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณแสงที่เครื่องรับในระบบ OCDMA-PON

ในการวิเคราะห์ผลของกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับ P_d ของผู้ให้บริการแต่ละรายที่มีต่อระบบ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้ จำนวนผู้ให้บริการในระบบ $N = 16$ ราย ระยะเวลา 1 คาบของชิป $T_C = 1.56$ ps ระยะเวลา 1 คาบของบิต $T_{Bit} = 800$ ps แบนด์วิดท์ของเครื่องรับ $B_R = 320$ GHz ค่าคงที่ของโบลทซ์มาน $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K⁻¹ อุณหภูมิ $T = 300$ K ความต้านทานโหลด $R_L = 7000$ Ω ค่าประจุของอิเล็กตรอน $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C ค่า responsivity $\mathcal{R} = 1$ A/W และค่า decision threshold $D = 0.3$ ตามลำดับ

รูปที่ 3.15 แสดงกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่จำนวน N เท่ากับ 4 8 9 10 และ 16 รายตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบที่มีจำนวน N เท่ากับ 8 และ 9 ราย ในขณะที่ P_d มีค่าประมาณ -10 dBm ค่า BER จะเริ่มลดน้อยลง เมื่อเพิ่ม P_d ให้มากขึ้นก็จะทำให้ค่า BER ลดน้อยลงเรื่อยๆ ในขณะที่ระบบที่มีจำนวน $N = 10$ รายเป็นต้นไป จะเริ่มมีผลของ σ_{beat-1}^2 ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 และ 3.2.2 ตามลำดับ ทำให้ค่าอัตราบิดพิทผลลดลงไม่มากนัก ถึงแม้ว่าจะเพิ่มค่า P_d ให้มากขึ้นก็ตาม



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่มีจำนวนผู้ใช้ในระบบ 9 ราย และข้อจำกัดของระบบเนื่องจาก σ_{beat-0}^2 และ σ_{MAI}^2



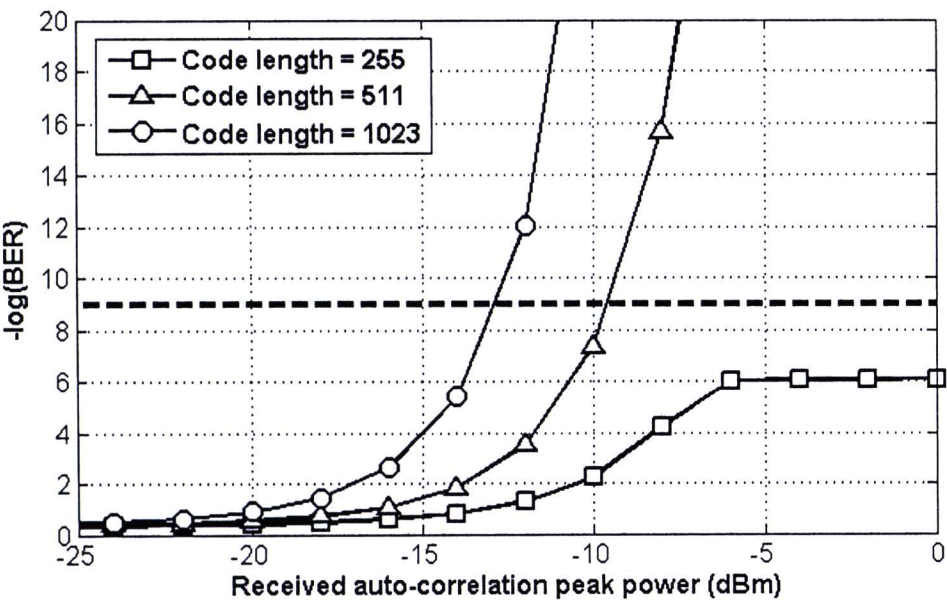
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ที่มีจำนวนผู้ใช้ในระบบ 10 ราย และข้อจำกัดของระบบเนื่องจาก σ_{beat-0}^2 , σ_{beat-1}^2 และ σ_{MAI}^2

3.2.5 แนวทางในการออกแบบระบบ OCDMA-PON

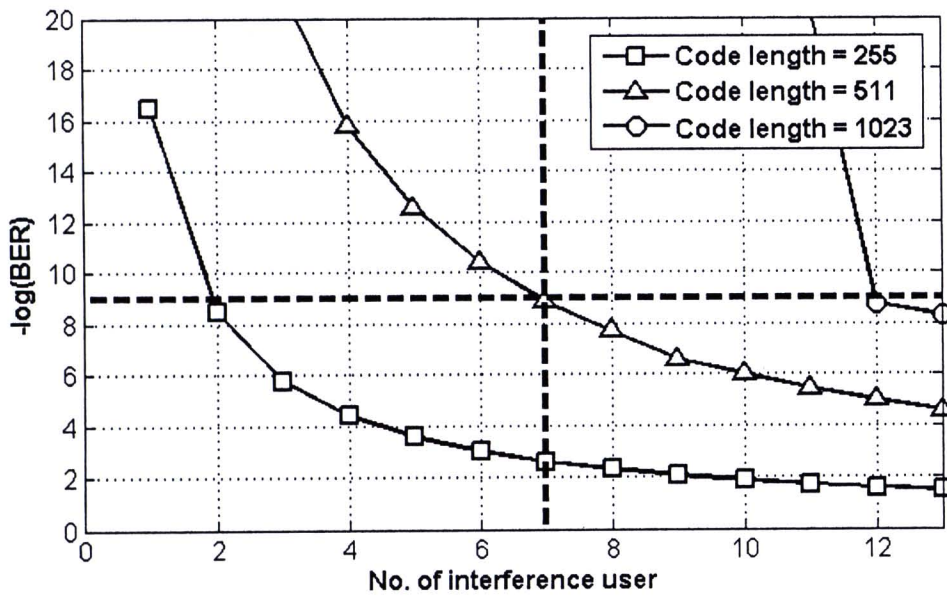
ในหัวข้อ 3.2.1-3.2.4 ได้วิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวน ค่า decision threshold D จำนวนชิปของ encoder/decoder และกำลังสัญญาณเฉลี่ยที่เครื่องรับตามลำดับ โดยปัจจัยที่สามารถเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการในระบบให้มากขึ้น คือ การเพิ่มจำนวนชิปของ encoder/decoder ให้มากขึ้น (ใช้รหัสที่ยาวขึ้น) ซึ่งจะหาค่าของ ξ และ σ_{MAI-0}^2 ลดน้อยลง และยังส่งผลให้ค่าของ σ_{beat-0}^2 , σ_{beat-1}^2 และ σ_{MAI}^2 น้อยลงด้วยดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.2.3 อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มจำนวนชิปของ encoder/decoder ให้มากขึ้นในขณะที่ยังใช้อัตราบิตในการส่งข้อมูลเท่าเดิม ทำให้ช่วงเวลาของชิปหรือ T_c แต่ละชิปก็ลดน้อยลงด้วย จึงจำเป็นต้องใช้ตัวกำเนิดแสงที่สามารถสร้างพัลส์แสงให้แคบกว่าเดิม ซึ่งทำให้ต้นทุนของระบบสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มกำลังส่งสัญญาณก็เป็นปัจจัยหนึ่งในการทำให้ค่า BER ลดน้อยลง แต่จะต้องใช้ตัวกำเนิดแสงที่มีกำลังส่งสัญญาณสูง ซึ่งทำให้ต้นทุนของระบบเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

รูปที่ 3.18 แสดงค่า BER ของระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ N เท่ากับ 8 รายโดยใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปต่างกัน หากต้องการจะออกแบบระบบให้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการ 8 รายที่อัตราบิตเท่ากับ 1.25 Gbps จะต้องเลือกออกแบบโดยใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 511 ชิป ใช้ตัวกำเนิดแสงที่สร้างพัลส์แสงขนาดเท่ากับ T_c หรือเท่ากับ $800 \times 10^{-12} / 511 = 1.56$ ps โดยกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} มีค่าประมาณ -9.5 dBm (เนื่องจาก ACP เป็นสัญญาณแสงพัลส์เดียวในช่วงเวลา 1 คาบของบิตหรือ 511 คาบของชิป กำลังเฉลี่ยของสัญญาณแสงต้องลดลงจากค่ากำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับประมาณ 511 เท่า ดังนั้นเมื่อค่ากำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับเท่ากับ -9.5 dBm จึงคำนวณกำลังเฉลี่ยของสัญญาณแสงได้เท่ากับ $-9.5 - 10 \log(511) = -36.58$ dBm) ดังแสดงในรูปที่ 3.18-3.19 ซึ่งสามารถนำค่ากำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับไปคำนวณหาค่ายอดของกำลังส่งสัญญาณ (peak power) ได้จากสมการที่ (2.11) (ให้ค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดจากเส้นใยแสง splitter และ power margin รวมเท่ากับ 13 dB) จะได้ค่า peak power ในการส่งสัญญาณประมาณ 3.5 dBm เป็นต้น หรือเลือกออกแบบโดยใช้ encoder/decoder ที่มีจำนวนชิปเท่ากับ 1023 ชิป ใช้ตัวกำเนิดแสงที่สร้างพัลส์แสงขนาดเท่ากับ $800 \times 10^{-12} / 1023 = 0.78$ ps ซึ่งต้องใช้เลเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าที่ค่ากำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับเท่ากับ -9.5 dBm ค่า BER ของกรณี 1023 ชิปจะดีกว่าประมาณ 25 เท่า รูปที่ 3.18 แสดงกำลัง

ของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับที่ค่า BER เท่ากับ 10^{-9} มีค่าประมาณ -13 dBm ซึ่งสามารถหาค่า peak power ในการส่งสัญญาณจากสมการที่ (2.11) ได้เท่ากับ 0 dBm เป็นต้น



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับกับค่า BER ของระบบ OCDMA ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 8 รายโดยใช้จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของ interference user กับค่า BER ที่กำลังของสัญญาณแสง ACP ที่เครื่องรับเท่ากับ -9.5 dBm โดยใช้ จำนวนชิปของ encoder ที่ต่างกัน