หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ ๔

การประเมินเชิงตัวเลขและผลของการศึกษา

จากการศึกษาผลของอินเตอร์โมดูเลชั่นในบทที่ ๓ ได้นำผลมาเขียนโปรแกรมเพื่อศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ของสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร(parameter) ต่างๆ ในระบบสื่อสารแบบ ๑ ช่องต่อ ๑ คลื่นพาหะให้ออกมาอยู่ในรูปเชิงตัวเลข ซึ่งมีกรณีต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษาดังนี้

๑. การจัดแบ่งกำลัง (power) ขาออกของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณ(channel) เมื่อกำลังในแต่ละช่องสัญญาณของสัญญาณขาเข้าแตกต่างกัน

๒. การเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณขาออกในแต่ละช่องสัญญาณเมื่อจำนวนของคลื่นพาหะและระดับของสัญญาณขาเข้าเปลี่ยนไป

๓. ผลของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่มีต่อการทำงานของระบบ ๑ ช่องต่อ ๑ คลื่นพาหะ

<u>การประเมินเชิงตัวเลข</u>

<u>การคำนวณค่า $h_{k\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_n}$</u>

$$h_{k\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_n} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \sin(\nu).\nu^{k-2} \exp\left[-\frac{\sigma^2\nu^2}{2}\right] d\nu\, J_{\gamma_1}(\nu B) J_{\gamma_2}(\nu B)\cdots J_{\gamma_n}(\nu B_n) \qquad (๔-๑)$$

ในการประเมินค่า $h_{k\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_n}$ ด้วยสมการ (๔-๑) แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนคลื่นพาหะ, n, มากขึ้น ความยุ่งยากในการประเมินค่าของ $h_{k\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_n}$ จะทวีขึ้นเป็นลำดับ โดยคุณสมบัติของฟังก์ชั่น Bessel ทำให้ทราบว่าค่าสูงสุดของผลคูณระหว่างฟังก์ชั่น Bessel จะเกิดขึ้นเมื่อลำดับของฟังก์ชั่นมีค่าต่ำสุด (order of Bessel Function) นั่นคือ

$$|\gamma_1| + |\gamma_2| + \ldots + |\gamma_n| = \min \qquad (๔-๒)$$

เมื่อพิจารณาค่า $h_{k\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_n}$ ในสมการ (๔-๑) สามารถให้ความหมายทางกายภาพได้ว่า $h_{k\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_n}$ คือขนาดของอินเตอร์โมดูเลชั่น โปรดัค (product) ที่เกิดขึ้นซึ่งมีลำดับ

ที่ของการเกิดเท่ากับผลบวกในสมการ (๔-๒) และขนาดของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดขึ้นในลำดับ (order) สูงขึ้นจะยิ่งลดขนาดความสำคัญลง ดังนั้นในการศึกษาผลกระทบของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่มีต่อการทำงานของระบบสื่อสารอาจกระทำให้ง่ายขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้ยังคงใกล้เคียงความจริง ด้วยการศึกษาเฉพาะอินเตอร์โมดูเลชั่นโปรดัคที่มีลำดับต่ำๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่กระทบต่อการทำงานของระบบสื่อสาร

ในกรณีที่กำลังของเคลื่อนพาหะในแต่ละช่องสัญญาณมีขนาดเท่ากันและพิจารณาเฉพาะกรณีที่ลำดับสูงสุดของแต่ละตัวประกอบฟังก์ชั่น Bessel มีลำดับต่ำๆ (≤ 2)* จะสามารถเขียนสมการ (๔-๑) ให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์มากขึ้น

$$h_{K\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_n} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \sin(\nu).\nu^{K-2} \text{ EXP}\left[\frac{-\sigma^2\nu^2}{2}\right] J_0^m(\nu B)\, J_1^{\ell}(\nu B) J_2^{n-m-\ell}(\nu B)\, d\nu \quad (๔-๓)$$

<u>การหาค่าผลบวกของจำนวนอนันต์พจน์</u> (Infinite Summation)

จากสมการ (๓-๕๒) ถึง (๓-๕๖) แสดงให้เห็นว่าการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ของสัญญาณที่ขาออกของเครื่องขยายออกมาเป็นเชิงตัวเลข จะต้องมีการคำนวณหาค่าผลบวกของผลคูณของฟังก์ชั่น Bessel กำลังสองจำนวนอนันต์พจน์ ซึ่งในความเป็นจริงทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะกระทำการบวกจำนวนอนันต์พจน์ดังกล่าวได้ แต่ด้วยคุณสมบัติของฟังก์ชั่นBessel, $J_n(x)$, ค่าสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณค่าตัวแปร x มีค่าใกล้เคียงกับค่าของลำดับ n และค่าสูงสุดนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อลำดับของฟังก์ชั่นสูงขึ้น จึงทำให้การบวกอนันต์พจน์ในสมการ (๓-๕๒) ถึง (๓-๕๖) จะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่งเมื่อลำดับของการบวกสูงขึ้น (convergent) ซึ่งมีความหมายว่าในการหาค่าผลบวกของนิพจน์ดังกล่าวสามารถตัดนิพจน์ที่มีลำดับสูงเพียงพอทิ้งไปโดยไม่ทำให้ผลบวกที่ได้มีค่าแตกต่างไปจากผลบวกของจำนวนอนันต์พจน์มากนัก

---

*ตัวเลขนี้นำมาจากความนิยมซึ่งใช้ในบทความหลายบทความที่ทำการศึกษาผลของอินเตอร์โมดูเลชั่น อย่างไรก็ตามมีบทความจำนวนมากที่พิจารณาเฉพาะผลกระทบจากอินเตอร์โมดูเลชั่นที่มีลำดับเท่ากับสามเท่านั้น (Third order Intermodulation)

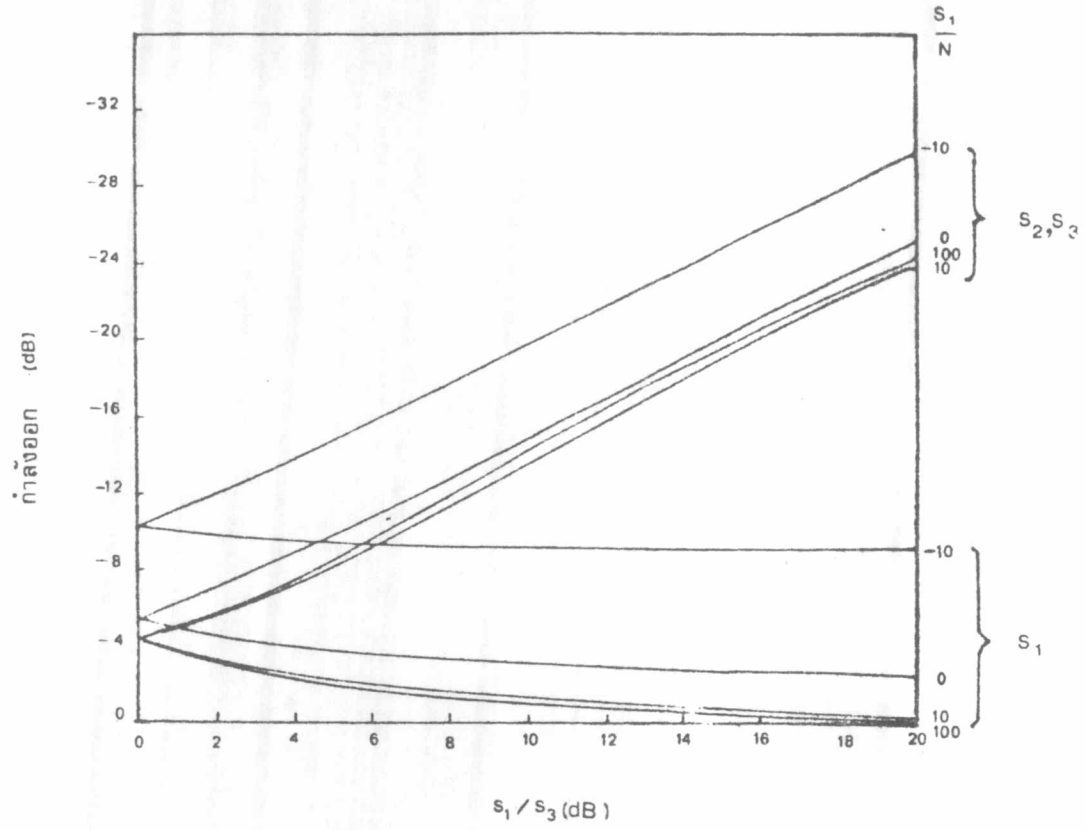
ผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลข

การจัดสรรกำลังในแต่ละช่องสัญญาณที่ขาออกของเครื่องขยายกำลัง

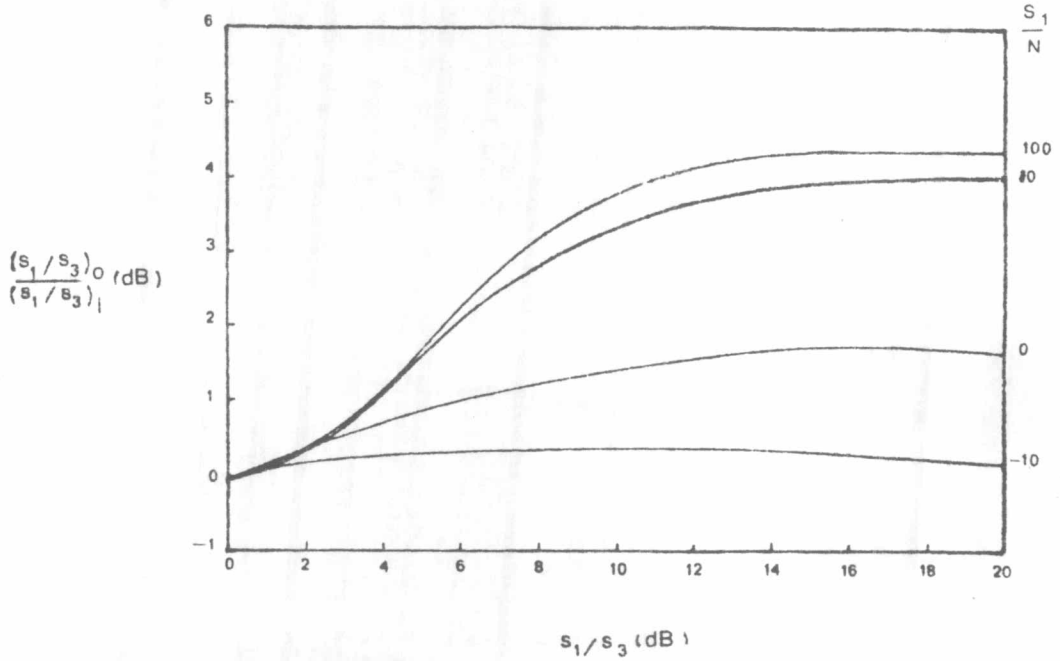
สมการ (๓-๔๑) เป็นสมการของกำลังสัญญาณขาออกในแต่ละช่อง ซึ่งสามารถใช้ในการศึกษาการจัดสรรกำลังของแต่ละช่องสัญญาณในกรณีที่แต่ละช่องสัญญาณของสัญญาณขาเข้ามีกำลังแตกต่างกัน ในการศึกษานี้ได้ศึกษาการจัดสรรกำลังของสัญญาณขาออกในกรณีที่มี ๓ คลื่นพาหะ โดยมีลักษณะการจัดรูปแบบของกำลังสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณของสัญญาณขาเข้าเป็น ๒ ลักษณะ คือ กรณีที่สัญญาณ ๑ สัญญาณมีกำลังมากกว่าอีก ๒ สัญญาณซึ่งมีกำลังเท่ากัน และกรณีที่สัญญาณ ๒ สัญญาณซึ่งมีกำลังเท่ากันมีกำลังมากกว่าสัญญาณที่ ๓ และเพื่อสามารถนำผลการศึกษาที่ได้นี้เปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Shaft[๔] ซึ่งแทนคุณลักษณะเครื่องขยายกำลังด้วย Hard Limiter ในการศึกษานี้จึงได้กำหนดจุดทำงานของเครื่องขยายกำลังไว้ที่ ๑ และที่ ๐.๕

รูปที่ ๔-๑ ถึง ๔-๔ เป็นกรณีที่จุดทำงานอยู่ที่ ๑ ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้เปรียบเทียบกับผลงานของ Shaft รูปที่ ๔-๑ แสดงการจัดสรรกำลังของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณในกรณีที่สัญญาณ ๑ สัญญาณ (s_1) มีกำลังมากกว่าอีก ๒ สัญญาณ ซึ่งมีกำลังเท่ากัน ($s_2 = s_3$) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าในการขยายกำลังหลายๆ สัญญาณด้วยเครื่องขยายร่วมกัน สัญญาณที่มีกำลังสูงกว่าจะได้รับการจัดสรรกำลังมากกว่าตามส่วน เมื่อความแตกต่างระหว่างกำลังของสัญญาณขาเข้ามากขึ้นกำลังขยายส่วนใหญ่จะถูกจัดให้กับกำลังของสัญญาณที่แรงกว่ามากขึ้น จึงมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่อ่อนกว่าจะถูกกดให้กำลังต่ำลง (Signal Suppression) ที่ขาออกของเครื่องขยาย ซึ่งการเกิดความแตกต่างของระดับสัญญาณที่ขาออกของเครื่องขยายมากๆ จะยังผลให้เกิดความสิ้นเปลืองในการออกแบบสถานีรับ ซึ่งจะต้องให้สถานีรับมีกำลังขยายสูงพอที่จะสามารถรับสัญญาณที่มีกำลังอ่อนที่สุดได้

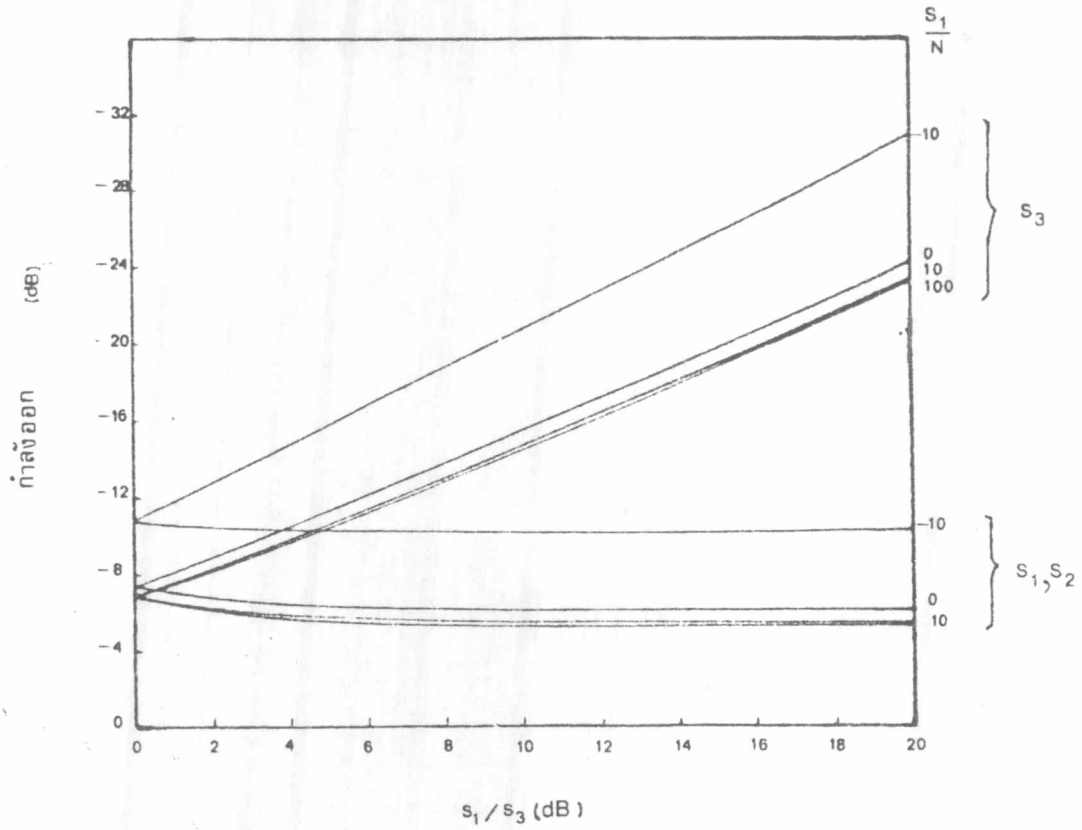
รูปที่ ๔-๑ ยังแสดงให้เห็นการจัดสรรกำลังของสัญญาณในกรณีที่ระดับของสิ่งรบกวนขาขึ้น (up link noise) ต่างกัน สิ่งรบกวนเป็นสัญญาณชนิดหนึ่งซึ่งเมื่อระดับสูงขึ้น กำลังของเครื่องขยายก็จะถูกจัดสรรให้กับสิ่งรบกวนนี้มากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการยกระดับของเส้นกราฟในรูป ๔-๑ ให้สูงขึ้น



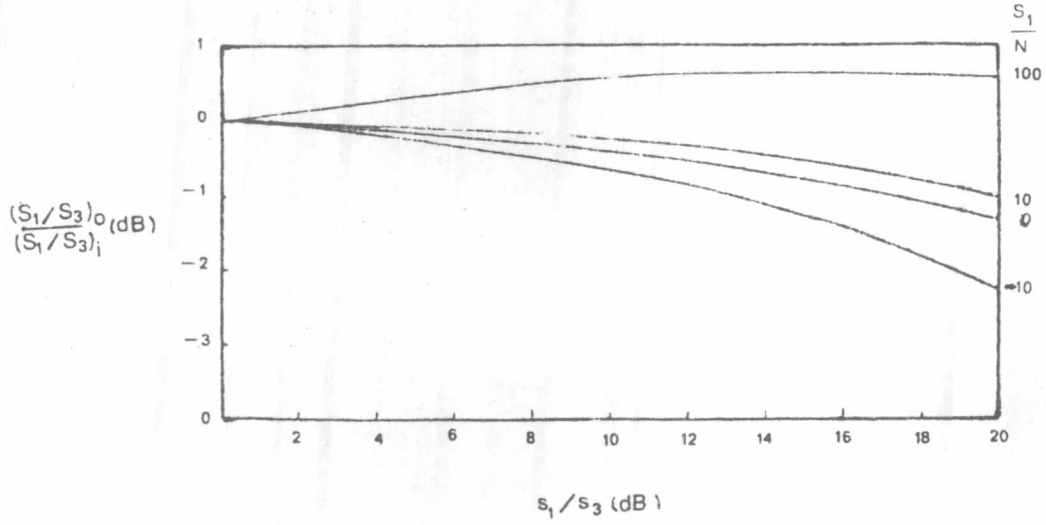
รูปที่ ๔.๑ การจัดสรรกำลังของสัญญาณขาออก
กรณี $s_1 > s_2 = s_3$, B = 1, β = 10



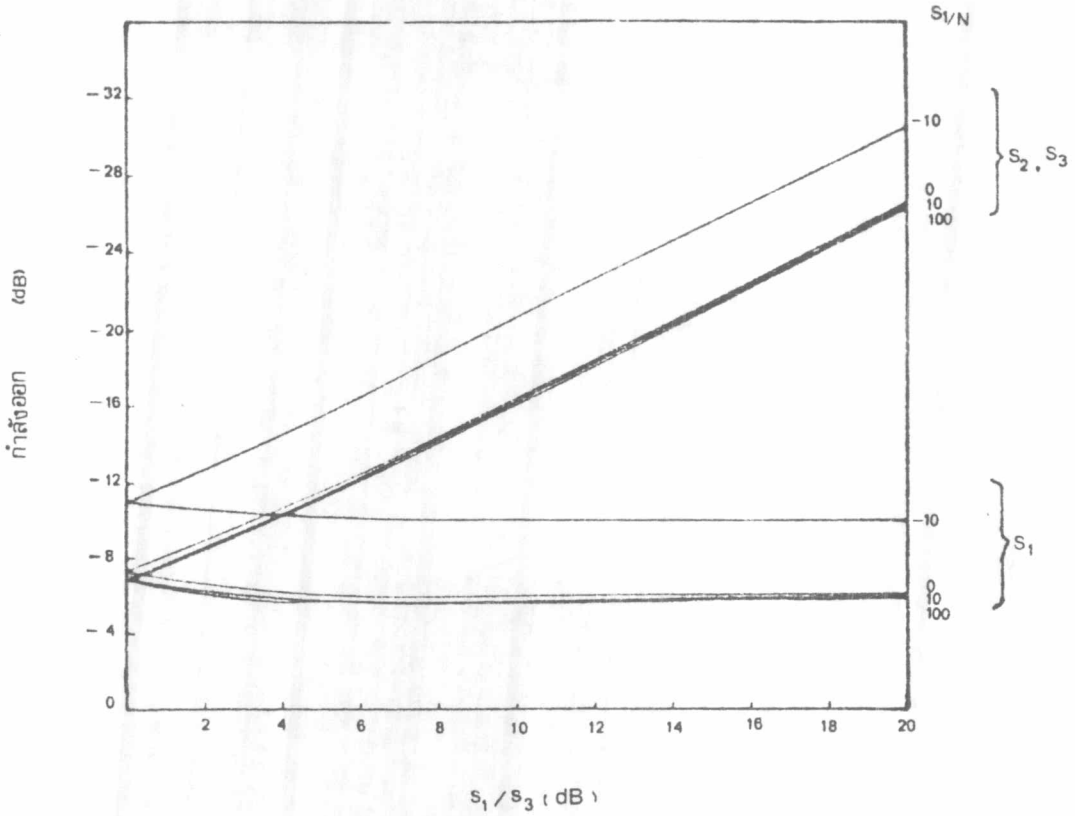
รูปที่ ๔.๒ การกดกันของสัญญาณขาออก
กรณี $s_1 > s_2 = s_3$, B = 1, β = 10



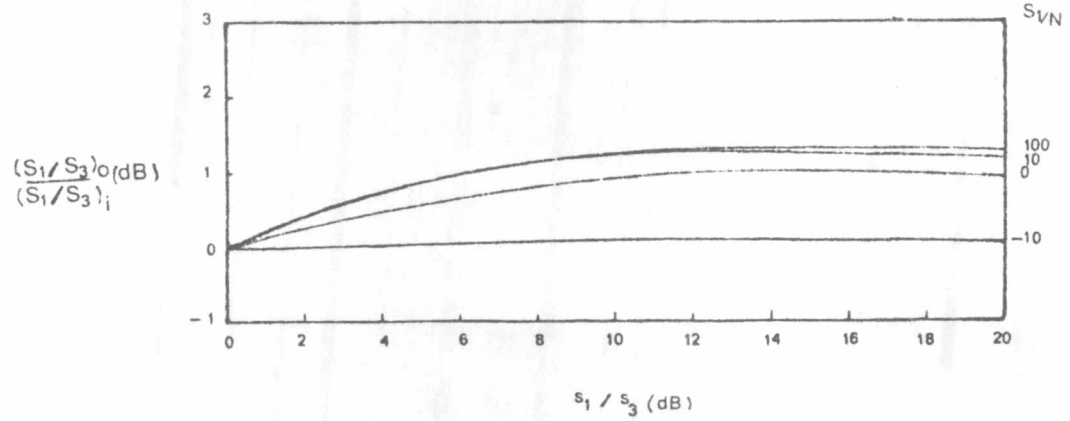
รูปที่ ๔.๓ การจัดสรรกำลังของสัญญาณขาออก
กรณี $s_1 = s_2 > s_3$, B = 1, β = 10



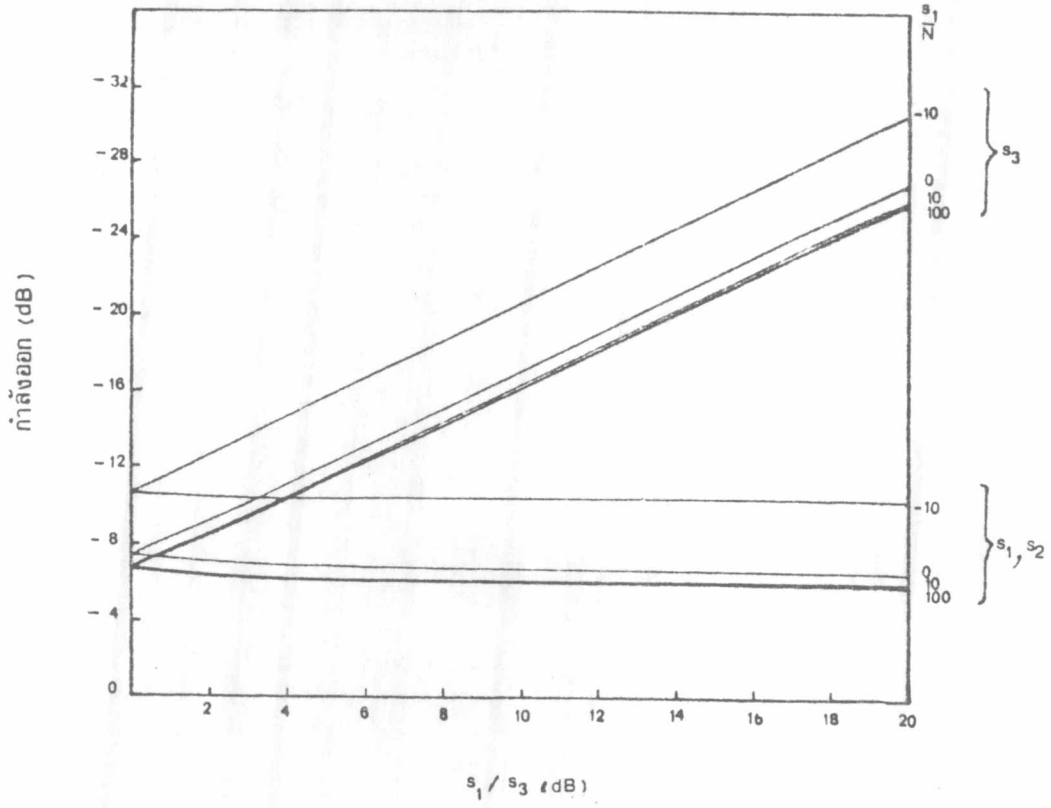
รูปที่ ๔.๔ การกดกันของสัญญาณขาออก
กรณี $s_1 = s_2 > s_3$, B = 1, β = 10



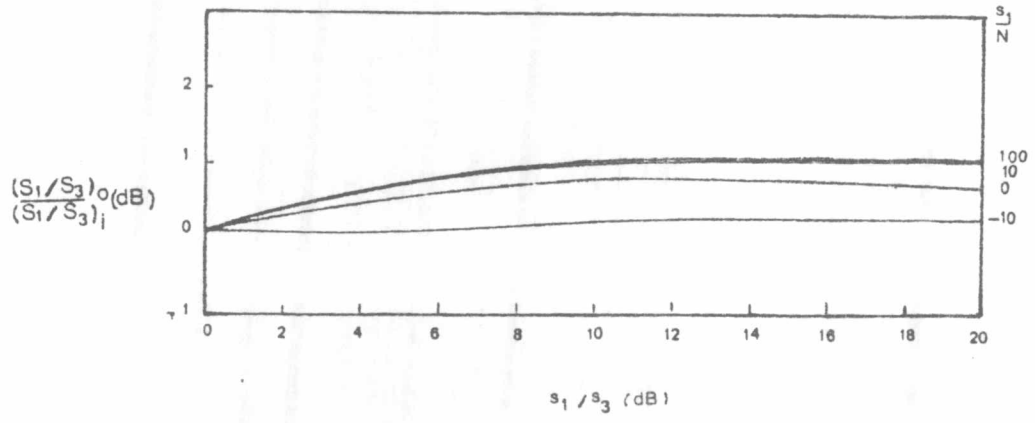
รูปที่ ๔.๕ การจัดสรรกำลังของสัญญาณขาออก
กรณี $s_1 > s_2 = s_3$, B =0.5 , β = 10



รูปที่ ๔.๖ การกดกันของสัญญาณขาออก
กรณี $s_1 > s_2 = s_3$, B = 0.5 , β = 10



รูปที่ ๔.๗ การจัดสรรกำลังของสัญญาณขาออก
กรณี $s_1 = s_2 > s_3$, $B = 0.5$, $\beta = 10$



รูปที่ ๔.๘ การกดกันของสัญญาณขาออก
กรณี $s_1 = s_2 > s_3$, $B = 0.5$, $\beta = 10$

ถ้ากำหนดความหมายของการที่สัญญาณกำลังสูงดึงกำลังขยายส่วนใหญ่ของเครื่องขยายจากสัญญาณที่อ่อนกว่า (Signal Suppression) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนของกำลังของสัญญาณทั้ง ๒ ที่ขาเข้าต่ออัตราส่วนดังกล่าวที่ขาออก อัตราส่วนนี้ได้นำมาเขียนกราฟดังในรูปที่ ๔-๒ การกดกันของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นเมื่อความแตกต่างของสัญญาณขาเข้ามากขึ้น และจะมีค่าไม่เกิน ๖ dB ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี[๒๒] ที่การกดกันของสัญญาณจะมีค่าสูงสุดในราว ๖ dB

ผลที่ได้จากการศึกษาในข้างต้นสอดคล้องกับผลงานที่ Shaft ได้ทำการศึกษาไว้ในกรณีที่เป็น Hard Limiter และการกระจายกำลังเชิงความถี่ของสัญญาณขาเข้ามีรูปร่างเป็น Gaussian

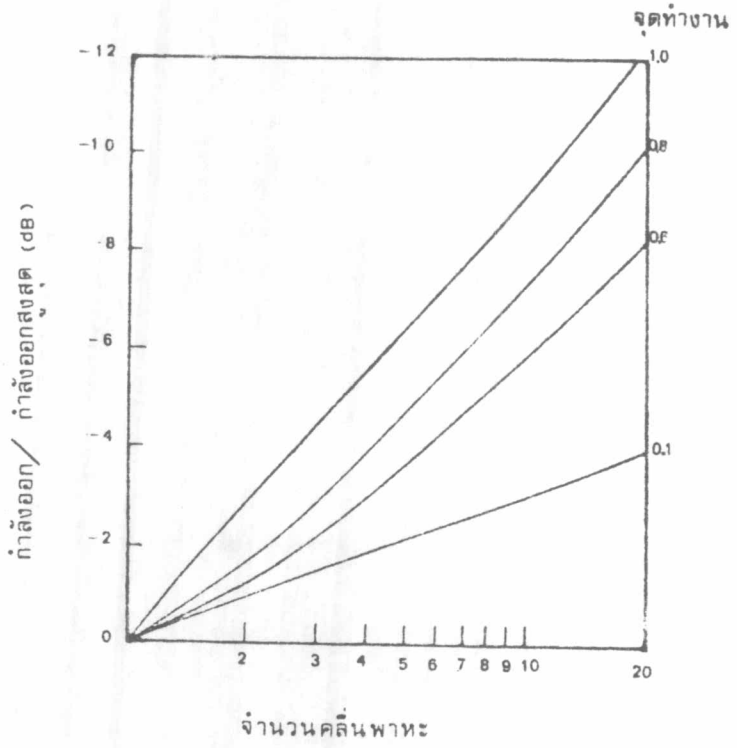
รูปที่ ๔-๓ และ รูปที่ ๔-๔ เป็นกรณีที่สัญญาณ ๒ สัญญาณซึ่งมีกำลังเท่ากัน (s_1, s_2) มีกำลังสูงกว่าสัญญาณที่ ๓ (s_3) ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์เช่นเดียวกับในรูปที่ ๔-๑ ส่วนรูปที่ ๔-๕ ถึง ๔-๘ เป็นกรณีที่จุดทำงานอยู่ที่ ๐.๕ ซึ่งปรากฏว่าการกดกันของสัญญาณมีน้อยมาก เนื่องจากจุดทำงานของเครื่องขยายอยู่ในย่านที่เป็นเชิงเส้น

<u>การเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณขาออกต่อจำนวนคลื่นพาหะ</u>

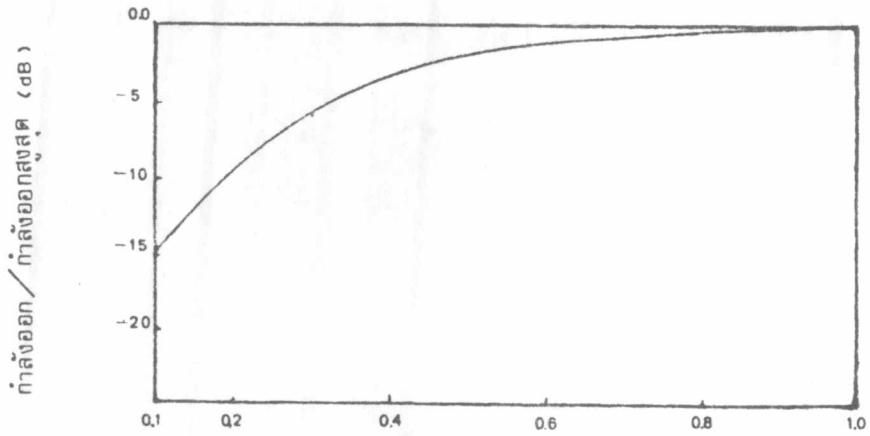
จากสมการ (๓-๔๒) นำมาใช้ในการศึกษาผลของจำนวนคลื่นพาหะที่มีต่อกำลังของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณ ในการศึกษานี้กำหนดให้สัญญาณขาเข้าในแต่ละช่องสัญญาณมีระดับของกำลังเท่ากัน

รูปที่ ๔-๙ แสดงระดับของกำลังสัญญาณขาออกในแต่ละช่องสัญญาณเทียบกับกำลังออกสูงสุดของสัญญาณ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนคลื่นพาหะ กำลังขาออกของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณจะลดลง ซึ่งอัตราการลดลงยังขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณรวมขาเข้าด้วย ผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายว่าเมื่อจำนวนคลื่นพาหะเท่ากัน จุดทำงานของระบบที่อยู่ใกล้บริเวณอิ่มตัวมากกว่าจะเกิดระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นโปรดัคสูงกว่า ซึ่งทำให้กำลังออกรวมของส่วนที่เป็นสัญญาณลดลง

อย่างไรก็ตามแม้ว่าการขยายหลายๆ สัญญาณด้วยเครื่องขยายร่วมกัน จะทำให้กำลังขาออกของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณลดลง การขยายหลาย ๆ สัญญาณด้วยเครื่องขยายร่วมกัน



รูปที่ ๔.๙ กำลังออกของแต่ละสัญญาณโดยเป็นฟังก์ชั่นของจำนวนคลื่นพาหะ



รูปที่ ๔.๑๐ กำลังขาออกของเครื่องขยายกำลัง (TWT) โดยเป็นฟังก์ชั่นของระดับสัญญาณขาเข้าเมื่อแทนคุณลักษณะเครื่องขยายด้วย soft limiter

เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้กำลังงานที่มีของเครื่องขยายกำลัง

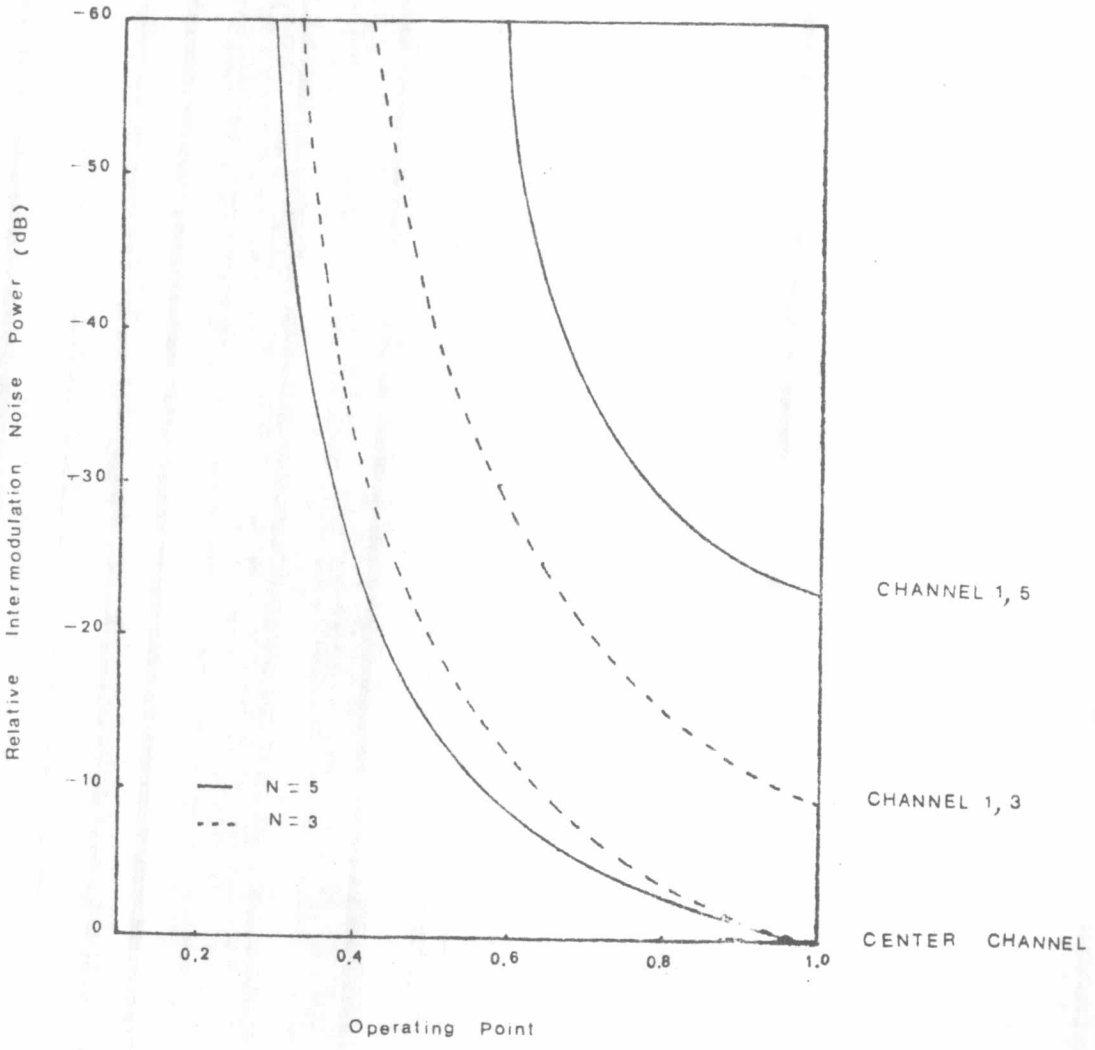
ผลของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่มีต่อการทำงานของระบบ ๑ ช่องต่อ ๑ คลื่นพาหะ

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารดาวเทียมแบบ ๑ ช่องต่อ ๑ คลื่นพาหะที่มีโมดูเลชั่นแบบ FM โดยรูปแบบที่ใช้ศึกษาเป็นระบบที่มีระดับของสัญญาณขาเข้าในแต่ละช่องเท่ากัน และมีคุณสมบัติของสัญญาณในแต่ละช่องเหมือนกัน เช่น โมดูเลทคลื่นพาหะด้วยสัญญาณพื้นฐานที่เหมือนกัน และมี modulation index เท่ากัน ระยะห่างระหว่างความถี่กลางของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากัน ผลของการศึกษาเชิงตัวเลขได้กระทำที่ระดับของสัญญาณต่อเสียงรบกวนอยู่ในบริเวณใกล้ Thershold Value ของระบบ FM คือประมาณ ๑๐ dB ที่ modulation index ประมาณ ๓

รูปที่ ๔-๑๐ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณขาออกรวมของเครื่องขยายกำลังต่อระดับของสัญญาณขาเข้ารวม ที่ได้จากการแทนคุณลักษณะการขยายของเครื่องขยายกำลังด้วย linear piecewise soft limiter ผลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาการลดกำลังออกของสัญญาณ (output backoff) เนื่องจากระดับของสัญญาณขาเข้า

รูปที่ ๔-๑๑ แสดงความแตกต่างของระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณที่อยู่ตรงกลางกับช่องสัญญาณที่อยู่ที่ขอบของแถบความถี่ ระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดในช่องสัญญาณกลางจะมีระดับสูงกว่าในช่องสัญญาณข้างเคียง ทั้งนี้เนื่องจากโอกาสการเกิดอินเตอร์โมดูเลชั่นโปรดัคที่ลำดับต่ำๆ ในช่องสัญญาณกลางสูงกว่าในช่องสัญญาณอื่นๆ

ระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระดับของสัญญาณขาเข้าสูงขึ้นถึงระดับประมาณ ๐.๔ ของระดับขอบเขตสูงสุดของสัญญาณ (clipping level) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลงานของ Sunde[๔] ที่แสดงให้เห็นว่าระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดจากการอิ่มตัวของเครื่องขยาย จะมีระดับสูงกว่าอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดจาก AM-PM conversion ที่ระดับของสัญญาณขาเข้ามีค่าสูงใกล้จุดอิ่มตัว



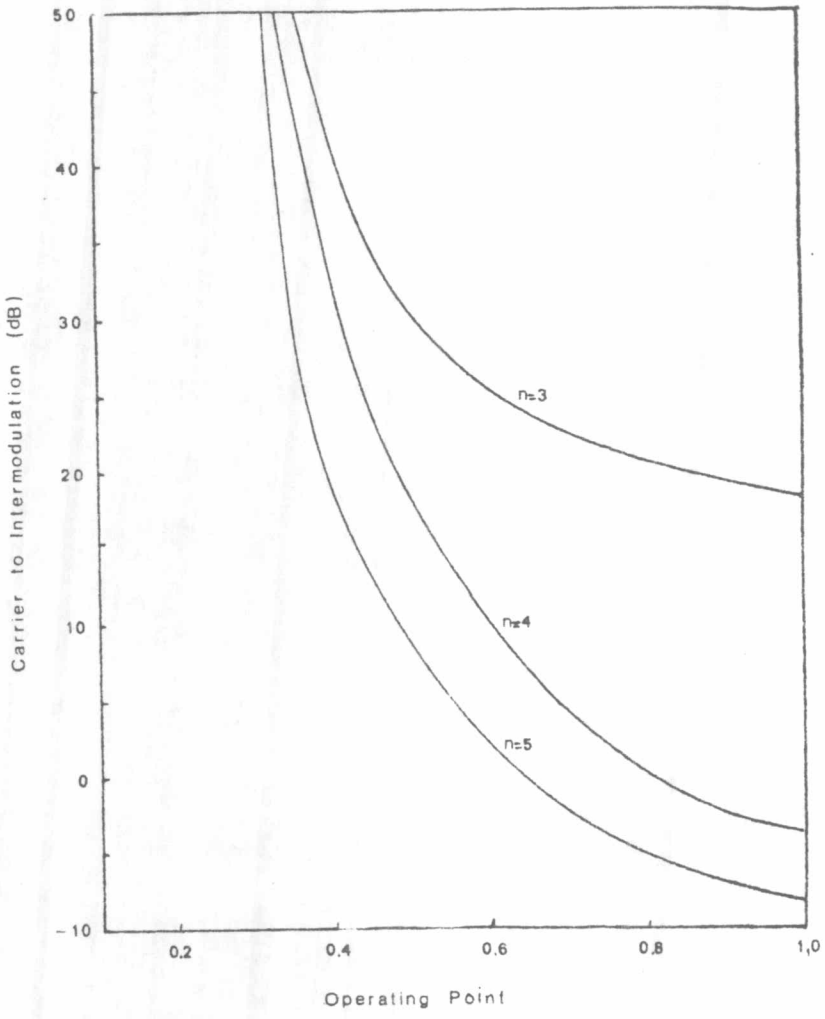
รูปที่ ๔.๑๑ ระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นในช่องสัญญาณกลาง
ในกรณีที่จำนวนคลื่นพาหะต่างกัน

รูปที่ ๔-๑๒ แสดงค่าอัตราส่วนเฉลี่ยของกำลังสัญญาณต่ออินเตอร์โมดูเลชั่นในกรณีที่ระบบสื่อสารมีจำนวนคลื่นพาหะต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนคลื่นพาหะมากขึ้นอัตราส่วนดังกล่าวจะลดลง เนื่องจากระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นจะสูงขึ้น แต่มีการศึกษา[๒๓] ที่พิสูจน์ว่าเมื่อจำนวนคลื่นพาหะสูงขึ้นจนถึงจำนวนหนึ่งอัตราส่วนดังกล่าว จะมีค่าเกือบเป็นอิสระจากจำนวนคลื่นพาหะ เพราะอินเออร์โมดูเลชั่นที่ลำดับสูงๆ จะลดความสำคัญลง ในการศึกษานี้ไม่สามารถกระทำการศึกษาจนถึงจุดดังกล่าวได้ เนื่องจากความจำกัดในการใช้เวลาของคอมพิวเตอร์

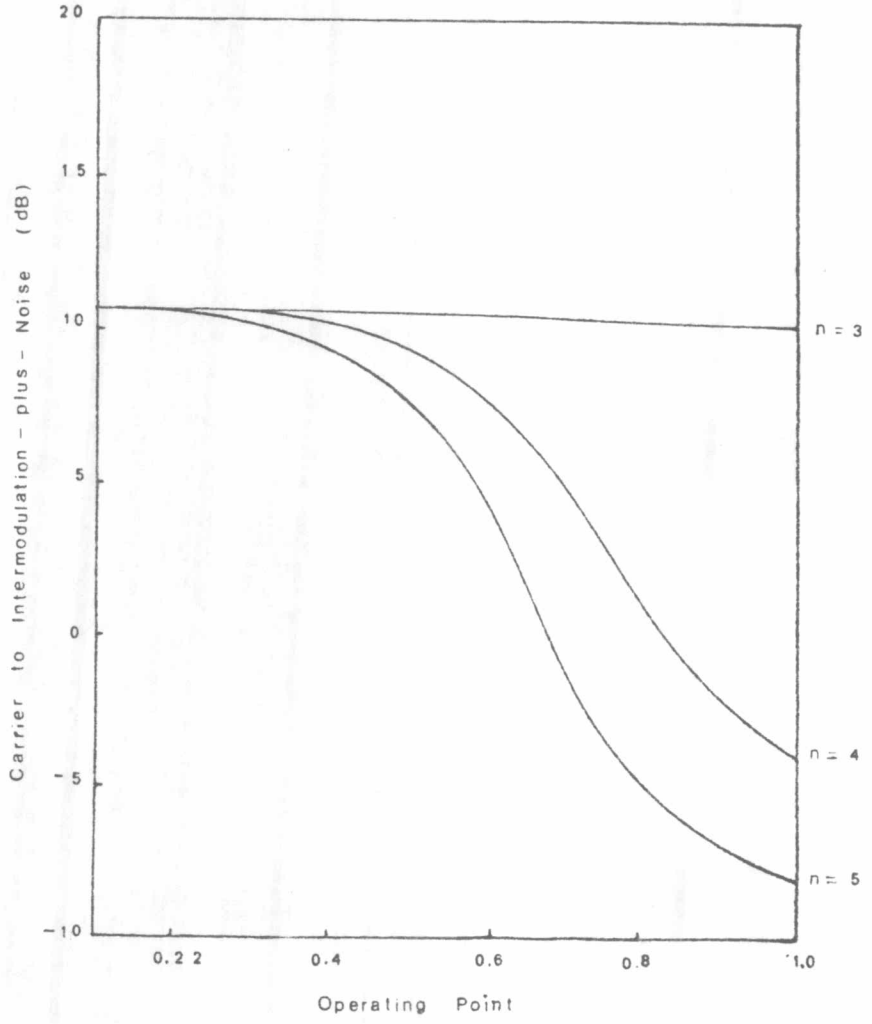
อัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวนรวม (up link noise and Intermodulation products) แสดงไว้ในรูปที่ ๔-๑๓ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ ๔-๑๒ แสดงให้เห็นถึงผลของสิ่งรบกวนขาขึ้น (up link noise)ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญต่อการลดคุณภาพของสัญญาณในขณะที่ระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นยังน้อย อัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนในย่านที่ระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นยังต่ำมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนขาขึ้นคือประมาณ ๑๐ dB เพราะเป็นช่วงที่จุดทำงานอยู่ในย่านเชิงเส้น

รูปที่ ๔-๑๔ แสดงถึงคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับที่ขาออกของเครื่องรับ FM ที่ช่องสัญญาณกลางของแถบความถี่ จากสมการ (๓-๗๔) แสดงให้เห็นว่าความถี่สูงสุดของสัญญาณพื้นฐานมีผลต่อคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับ รูปที่ ๔-๑๔ เป็นการศึกษากรณีที่ความถี่สูงสุดของสัญญาณพื้นฐานเป็นความถี่สูงสุดของสัญญาณเสียง (4kHz) และมีอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนขาขึ้นและขาลงเท่ากัน

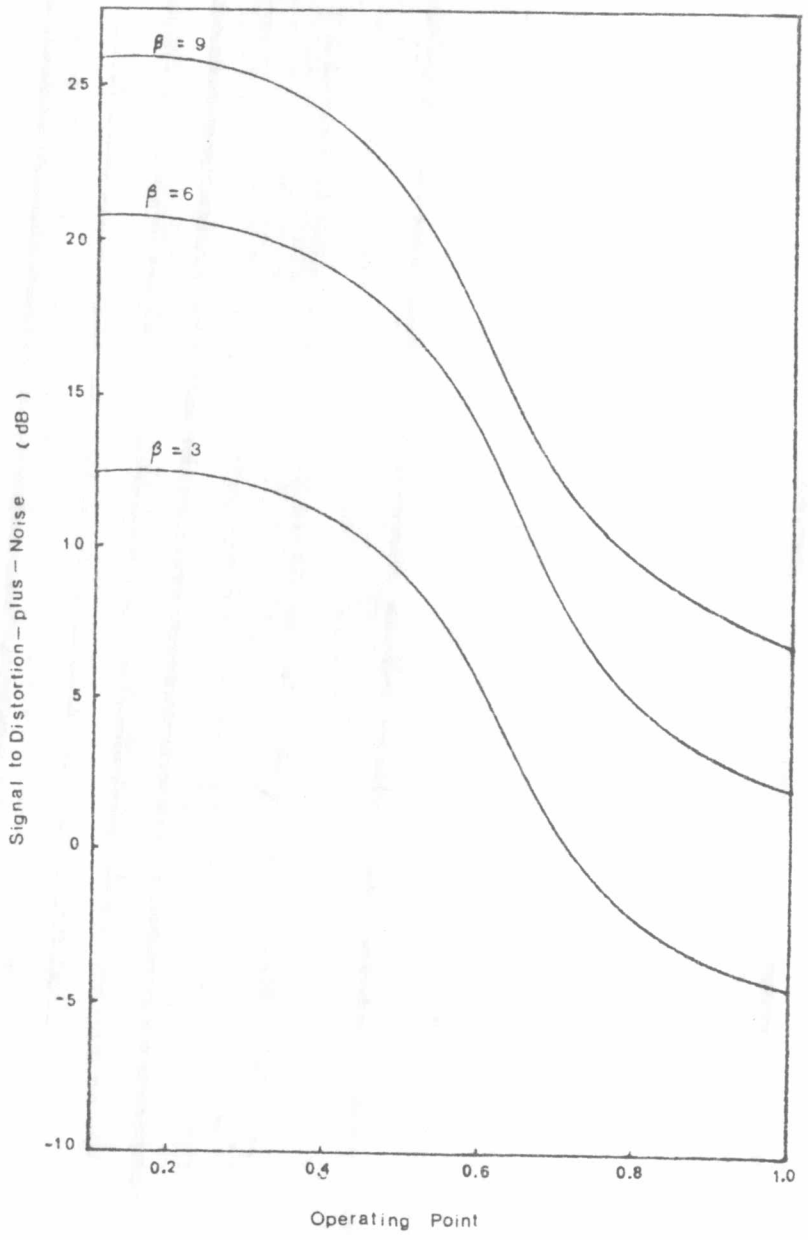
เมื่อค่า modulation index สูงขึ้นคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับจะสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามคุณลักษณะเด่นของระบบ FM จากรูปที่ ๔-๑๓ เมื่อสัญญาณขาเข้ามีระดับสูงเกิน ๐.๔ ของระดับจำกัด (limiting level) ค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนรวมจะมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดในการใช้สูตรการประมาณด้วยสมการ (๓-๗๔) ดังนั้นผลที่รับที่ค่าของระดับสัญญาณสูงกว่า ๐.๔ ในรูปที่ ๔-๑๔ จึงเป็นตัวเลขที่ไม่ถูกต้อง แต่เนื่องจากเมื่อระดับของสัญญาณต่ำกว่า Threshold Value ของระบบ FM จะทำให้เกิดมี click noise[๑๘] ขึ้นซึ่งจะทำให้คุณภาพที่ได้รับมีค่าต่ำกว่าการใช้สูตร (๓-๗๔) ดังนั้นเส้นกราฟที่ได้ในรูป ๔-๑๔ จึงถือว่าเป็นค่าที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ



รูปที่ ๔.๑๒ ค่าเฉลี่ยของ carrier to intermodulation ratio ที่ขาออกของเครื่องขยายโดยเป็นฟังชั่นของระดับสัญญาณขาเข้า



รูปที่ ๔.๑๓ carrier to total noise ratio ที่ขาออกของเครื่องขยาย



รูปที่ ๔.๑๔ คุณภาพของสัญญาณที่ขาออกของเครื่องรับ FM ในของสัญญาณกลางที่จุดทำงานต่างๆของระบบ ที่มีจำนวนคลื่นพาหะเท่ากับ ๔

จากการศึกษาต่างๆ นี้ อาจสรุปได้ว่าภายใต้ภาวะแวดล้อมที่ได้กำหนดในการศึกษานี้ เมื่อกำหนดให้คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับที่ขาออกของเครื่องรับ FM จะต้องมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนรวมอย่างน้อย ๑๐ dB จะต้องกำหนดจุดทำงานให้กับเครื่องขยายกำลังที่บริเวณ ๐.๔ ของระดับจำกัด ซึ่งจากรูปที่ ๔-๑๐ ตรงกับการลดกำลังสัญญาณขาออก (output back off) ประมาณ ๓.๔ dB หรือเพื่อที่จะให้ได้ประสิทธิภาพการใช้กำลังที่มีในเครื่องขยายสูงขึ้น ก็อาจทำได้โดยการเพิ่มความกว้างของแถบความถี่ของช่องสัญญาณ หรือการเพิ่มอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อเสียงรบกวนให้สูงขึ้น หรืออาจใช้ขบวนการที่สามารถลดระดับการเกิดอินเตอร์โมดูเลชั่นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

<u>ความเป็นไปได้ในการลดผลของอินเตอร์โมดูเลชั่น</u> (๒๔)

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของสัญญาณที่ลดต่ำลง อันเนื่องจากผลของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดขึ้นจากการผ่านสัญญาณที่มีหลายคลื่นพาหะไปในเครื่องขยายกำลัง เนื่องจากระดับของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดจะมีค่าขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณขาเข้า ดังนั้นอินเตอร์โมดูเลชั่นจึงมีบทบาทสำคัญต่อการออกแบบจุดทำงานของเครื่องขยายกำลัง เพื่อที่จะให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดจึงต้องพยายามออกแบบให้เครื่องขยายมีกำลังออกสูงสุด และลดปริมาณของอินเตอร์โมดูเลชั่นที่เกิดขึ้นให้ต่ำสุด

จากการศึกษาพบว่ามีสาเหตุ ๒ ประการที่ทำให้เกิดอินเตอร์โมดูเลชั่นขึ้น คือ จากคุณลักษณะการอิ่มตัวของการขยายกำลัง (AM-AM) และการโมดูเลทมุมของสัญญาณขาออกด้วยการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณขาเข้า (AM-PM) และจากที่ทราบว่าถ้าคุณลักษณะของเครื่องขยายเป็นเส้นตรงจะไม่ทำให้เกิดอินเตอร์โมดูเลชั่น ดังนั้นในทางทฤษฎีเป็นไปได้ที่จะสร้างอุปกรณ์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ในทางตรงข้ามกับเครื่องขยายกำลังเดิม ซึ่งมีผลให้เมื่อผ่านสัญญาณเข้าไปในเครื่องขยาย สัญญาณทั้งสองจะให้ผลเสมือนการขยายมีลักษณะเป็นเชิงเส้น กล่าวคือ

ถ้าให้ ρ คือระดับของสัญญาณขาเข้า (envelope of input signal)

$g(\rho)$ คือคุณลักษณะของเครื่องขยายกำลัง

ดังนั้นจะต้องสร้างเครื่องขยายที่มีคุณลักษณะเป็น $g_a(x)$ และยังผลให้

$$g_a(g(\rho)) = \rho$$

เนื่องจากการวัดค่าของมุมกระทำได้ยากในทางปฏิบัติ การที่จะลดปริมาณอินเตอร์โมดูเลชั่นอันเนื่องจาก AM-PM จึงอาจกระทำโดยการสร้างอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะเป็น

$$g_p(g(\rho)) = f(\rho)$$

เมื่อ $g_p(x)$ เป็นคุณลักษณะของอุปกรณ์ดังกล่าว

$f(\rho)$ เป็นคุณลักษณะ AM-PM

แล้วนำผลที่ได้ไปหักล้างจากสัญญาณรวม

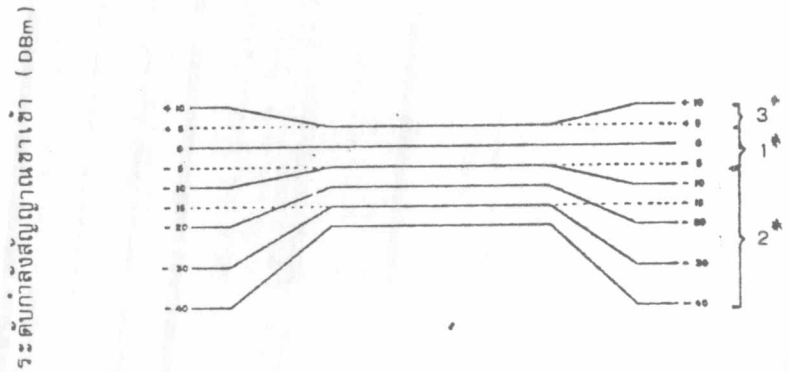
นอกจากที่กล่าวนี้ SHAFT[๒๒] ได้แนะนำการใช้วิธีการกดกันของสัญญาณ โดยส่งคลื่นพาหะกำลังสูงที่มีความถี่ต่างจากความถี่ที่ใช้มาก ๆ เมื่อเกิดการกดกันของสัญญาณซึ่งจะมีผลต่อโครงสร้างของกำลังเชิงความถี่ของอินเตอร์โมดูเลชั่นเปลี่ยนไป โดยอินเตอร์โมดูเลชั่นที่ระดับสูง ๆ จะถูกเลื่อนออกไปอยู่นอกแถบความถี่ที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณต่อระดับอินเตอร์โมดูเลชั่นดีขึ้น

TYREE และ BAILEY[๒๔] ได้ทดลองการจัดระยะห่างของความถี่กลางของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อให้ได้ช่องสัญญาณที่ปราศจากอินเตอร์โมดูเลชั่น ซึ่งเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองการใช้ความกว้างของแถบความถี่

<u>การปรับปรุงคุณภาพของระบบด้วย Syllabic Compandor</u>

จากสมการ (๓-๙) แสดงให้เห็นถึงการนำ Syllabic Compandor เข้ามาใช้ในระบบสื่อสารแบบ ๑ ช่องต่อ ๑ คลื่นพาหะซึ่งให้ผลโดยตรงต่อการลดค่า modulation index (β) หรือการลดความกว้างของแถบความถี่ที่ต้องการ ซึ่งเป็นการขัดกับข้อดีของโมดูเลชั่นเทคนิคแบบ FM และจากการศึกษาคุณภาพสัญญาณที่ได้รับในรูปที่ ๔-๑๔ แสดงให้เห็นว่าเมื่อ modulation index ลดลง คุณภาพของสัญญาณที่ได้รับจะด้อยลง ซึ่งดูเหมือนให้ผลขัดแย้งกับการนำ Syllabic Compandor เข้ามาเพื่อปรับปรุงระบบ

เมื่อพิจารณาสภาพการทำงานที่เป็นจริง สัญญาณเสียงในแต่ละช่องสัญญาณจะมีค่าของระดับเสียงเป็น Random และคุณลักษณะของ Syllabic Compandor[๘],[๒๖] ที่ใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น ๓ เขต (ดังในภาพ ๔-๑๔)



ภาพที่ ๔-๑๔ คุณลักษณะของ Compandor ซึ่งประกอบด้วย Compressor และ expandor ที่ใช้ทั่วไประบบโทรทัศน์

๑. เขตที่ ๑ เป็นย่านของระดับ† สัญญาณที่มีขนาดปานกลาง เมื่อระดับของเสียงอยู่ในเขตดังกล่าวสัญญาณที่ขาออกของ Syllabic Compandor จะมีลักษณะและขนาดเช่นเดียวกับสัญญาณขาเข้า เสมือนหนึ่งไม่มี Syllabic Compandor อยู่ในระบบสื่อสาร

๒. เขตที่ ๒ เป็นย่านของระดับสัญญาณที่มีขนาดต่ำกว่าเขตที่ ๑ เมื่อระดับของเสียงอยู่ในเขตนี้ Syllabic Compandor จะทำหน้าที่ขยายระดับของสัญญาณให้สูงขึ้น

๓. เขตที่ ๓ เป็นย่านที่ระดับของสัญญาณอยู่สูงกว่าในเขตที่ ๑ เมื่อระดับของเสียงอยู่ในเขตดังกล่าวนี้ Syllabic Compandor จะทำหน้าที่ลดขนาดของระดับของสัญญาณให้ต่ำลง

จากคุณลักษณะของ Syllabic Compandor ที่ได้กล่าวมานี้ เมื่อระดับของสัญญาณเสียงมีค่าเฉลี่ยค่อนไปทางด้านระดับต่ำ จะทำให้ระดับของสัญญาณขาออกของ Compandor มีค่าเฉลี่ยสูงขึ้น ซึ่งเท่ากับเป็นการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับเสียงรบกวน และยังเป็นการลดความ

---

† เป็นค่า rms ของสัญญาณ

กว้างสูงสุดของแถบความถี่ที่ต้องการ ซึ่งผลรวมนี้แสดงให้เห็นการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณด้วย Syllabic Compandor มีการทำ Subjective test [๑๓] ถึงข้อได้เปรียบในการใช้ Syllabic Compandor แสดงให้เห็นว่าผลดีที่ได้รับจาก Syllabic Compandor ในระบบที่ระดับสัญญาณต่ำจะมากกว่าในระบบที่มีระดับสัญญาณสูง

ดังนั้นในการศึกษาผลของ Syllabic Compandor โดยใช้สัญญาณเข้าที่มีระดับคงที่ และแทนผลของ Syllabic Compandor โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้าและขาออก เป็น Compression ratio = 1/m ดังเช่นที่กระทำในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณอันเนื่องจากการใช้ Syllabic Compandor ได้