



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง วิธีการหาความจุของสัญญาณของการสื่อสารแถบความถี่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำ
ภายในอาคาร

A Method to Determine Channel Capacity of Wideband Communication for
Indoor Low Voltage Power Lines

นามผู้วิจัย นายสุทธาพร กลีบทับทิม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ จงบุรี, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ณัฐกานา หอมทรัพย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ จงบุรี, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

วิธีการหาความจุช่องสัญญาณของการสื่อสารแถบความถี่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำภายใน

อาคาร

A Method to Determine Channel Capacity of Wideband Communication for Indoor Low
Voltage Power Lines

โดย

นายสุทธาพร กลีบทับทิม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2557

สุทธาพร กลีบทับทิม 2557: วิธีการหาความจุช่องสัญญาณของการสื่อสารแถบความถี่ กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคาร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ จงบุรี, Ph.D. 66 หน้า

การสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลข่าวสาร โดยอาศัยเครือข่าย สายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม แต่เนื่องจากสายสัญญาณสายส่งไฟฟ้าไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ สำหรับการสื่อสาร โดยเฉพาะ จึงทำให้มีข้อจำกัดที่มีผลต่อการสื่อสารเช่น สายไม่ได้มีการป้องกัน สัญญาณรบกวนอย่างดีและ ช่องสัญญาณเป็นแบบเลือกลดทอน โดยมีสาเหตุจากโครงข่ายการจ่าย ไฟฟ้ากำลังเอง ดังนั้นค่าความจุช่องสัญญาณในแต่ละตำแหน่งในโครงข่ายจึงไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหาความจุช่องสัญญาณของสายส่งไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง โดยเริ่ม จากการหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของช่องสัญญาณจากตัวส่ง ไปยังตัวรับตำแหน่งต่างๆ ด้วยวิธีย้าย อิมพีแดนซ์แบบย้อนกลับแล้วนำมาคำนวณหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และสุดท้ายหาค่า ความจุช่องสัญญาณกรณีศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการสื่อสารแถบความถี่กว้างในย่านความถี่ 2-30 MHz บนโครงข่ายสายส่งแรงต่ำภายในอาคารตามเงื่อนไขของกำลังส่งของมาตรฐาน HomePlug นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีการนำอัลกอริทึม Water Filling สำหรับการลดกำลังส่งมา ใช้ทดสอบอีกด้วย จากผลการทำจำลองพบว่าแต่ละจุดรับสัญญาณในโครงข่ายมีความแตกต่างของ ช่องสัญญาณอย่างชัดเจน และ Water Filling สามารถนำมาใช้เพื่อประหยัดกำลังส่งได้เป็นอย่างมาก โดยที่ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Suttaporn Kliptapim 2014: A Method to Determine Channel Capacity of Wideband Communication for Indoor Low Voltage Power Lines. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wachira Chongburee, Ph.D. 66 pages.

Power line communication is a communication technology that makes use of existing power transmission lines. However, the cable grid was not exclusively designed for communication purposes. Thus, the performance as a communication media is limited. For example, the cables thus are not properly protected from the noise and the channel is frequency selected due to the power network itself. As a result, the channel capacities vary throughout the network. This research proposes a method to evaluate the channel capacities from the source to difference locations in the power network. The method first finds the transfer functions between the transmitter and the receivers by using a technic called Backward ImpedanceTranforms (BIT). Then the signals to noise ratios are determined. Finally, the channel capacities are concluded. The case study in this research is implemented for a wideband communications in 2-30 MHz band of the HomePlug standard on low voltage power line networks in the buildings. Additionally, Water Filling, an algorithm is investigated in order to reduce the transmit power. The simulation suggests that the channel capacities vary dramatically throughout the network and Water Filling algorithm does preserve the power consumption with slightly loss of channel capacities.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รศ.ดร.ณัฐธาดา หอมทรัพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และกราบขอบพระคุณ คุณชนากร ช้องเดช นิติตปริญญาเอกวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาเรื่องทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า และให้ยืมหนังสือทฤษฎีสายส่งไฟฟ้าเพื่อประกอบการทำงานวิจัย รวมถึงอาจารย์ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีต จนถึงปัจจุบัน

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่ได้อบรมและให้กำลังใจข้าพเจ้ามาตลอดในทุกเรื่อง หากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

สุทธาพร กลีบทับทิม

กันยายน 2557

สารบัญ

หน้า

| | |
|-----------------------------|-----|
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (2) |
| สารบัญภาพ | (3) |
| คำนำ | 1 |
| วัตถุประสงค์ | 3 |
| การตรวจเอกสาร | 4 |
| อุปกรณ์และวิธีการ | 23 |
| อุปกรณ์ | 23 |
| วิธีการ | 23 |
| ผลและวิจารณ์ | 42 |
| สรุป | 64 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง | 65 |
| ประวัติการศึกษา และการทำงาน | 66 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 1 | เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน | 15 |
| 2 | ค่าความจุช่่องสัญญาณแบบการกระจายค่ากำลังงาน โคร่งข่ายจำลองอย่างง่าย | 45 |
| 3 | ค่าความจุช่่องสัญญาณแบบ Water Filling โคร่งข่ายจำลองอย่างง่าย | 47 |
| 4 | ค่าความจุช่่องสัญญาณแบบการกระจายค่ากำลังงาน โคร่งข่ายจำลอง NBT | 58 |
| 5 | ค่าความจุช่่องสัญญาณแบบ Water Filling โคร่งข่ายจำลอง NBT | 62 |
| 6 | เปรียบเทียบค่าความจุช่่องสัญญาณ | 62 |

สารบัญญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1 | โครงข่ายจำลองของ M. Zimmerman | 4 |
| 2 | การกำหนดเส้นทางการสะท้อนของสัญญาณ | 5 |
| 3 | ตัวอย่างโครงข่ายจำลอง M. Zimmermann | 6 |
| 4 | ผลตอบสนองทางเวลาจากการหาการสะท้อนของสัญญาณ | 6 |
| 5 | โครงข่ายจำลองของ J.Anatory | 7 |
| 6 | ผลตอบสนองทางเวลาจากการหาความสัมพันธ์ของสมการ J.Anatory | 9 |
| 7 | โครงข่ายจำลองของ T. Khongdeach | 10 |
| 8 | อิมพีแดนซ์อินพุทโครงข่ายจำลองของ T. Khongdeach | 11 |
| 9 | แรงดันตกคร่อมโหลดปลายสายส่ง | 11 |
| 10 | ลักษณะการต่อขนานของโหลดปลายสายส่ง | 12 |
| 11 | อิมพีแดนซ์รวมที่คำนวณต่อแบบขนาน | 12 |
| 12 | พัลส์สี่เหลี่ยม (Rectangular Pulse) | 13 |
| 13 | ซิงค์ฟังก์ชัน (Sinc function) | 14 |
| 14 | ผลตอบสนองทางเวลาจากการการคิดด้วยวิธี BIT ของ T. Khongdeach | 15 |
| 15 | Background Noise ที่เกิดจากหลอดไฟฟ้า | 17 |
| 16 | สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ | 17 |
| 17 | สัญญาณรบกวนที่เกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในทีวี | 18 |
| 18 | สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการกระจายสัญญาณของสถานีเครื่องส่ง | 18 |
| 19 | สัญญาณรบกวนที่เกิดภายในโครงข่ายจากสัญญาณที่แตกต่างกัน | 19 |
| 20 | ค่ากำลังงานที่เกิดในแต่ละช่องความถี่ย่อย | 20 |
| 21 | โครงข่ายจำลองอย่างง่าย | 23 |
| 22 | การย้ายอิมพีแดนซ์ที่โหลดปลายสายส่งเพื่อหาอินพุทอิมพีแดนซ์ | 24 |
| 23 | อิมพีแดนซ์ที่โหลดปลายสายส่งและอินพุทอิมพีแดนซ์ | 25 |
| 24 | แรงดันอินพุท | 25 |
| 25 | แรงดันอินพุทแพร่กระจายไปที่โหลดปลายสายส่ง | 26 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 26 | แรงดันตกคร่อมที่โหลดและแรงดันตกคร่อมที่ Node 1 | 27 |
| 27 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลดปลายสายส่ง | 29 |
| 28 | ขั้นตอนการหาผลตอบสนองทางความถี่ | 30 |
| 29 | ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลดปลายสายส่ง | 31 |
| 30 | ขั้นตอนการหาผลตอบสนองทางเวลา | 34 |
| 31 | ขั้นตอนการหาค่าความจุช่ของสัญญาณจากทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน | 36 |
| 32 | โครงข่ายแบบ Matched Load | 40 |
| 33 | โครงข่ายจำลองอย่างง่าย | 42 |
| 34 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_A | 43 |
| 35 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_B (Matched Load) | 43 |
| 36 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_C | 44 |
| 37 | ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_A | 44 |
| 38 | ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_B (Matched Load) | 44 |
| 39 | ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_C | 45 |
| 40 | ระดับกำลังงานที่โหลด Z_A | 46 |
| 41 | ระดับกำลังงานที่โหลด Z_B (Matched Load) | 46 |
| 42 | ระดับกำลังงานที่โหลด Z_C | 46 |
| 43 | โครงข่ายจำลองที่ซับซ้อนของ J. Anatory | 48 |
| 44 | ผลตอบสนองทางเวลาจากโครงข่ายจำลองที่ซับซ้อนของ J.Anatory | 48 |
| 45 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{1224} | 49 |
| 46 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{24} | 49 |
| 47 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{32} (Matched Load) | 50 |
| 48 | ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_{1224} | 50 |
| 49 | ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_{24} | 50 |
| 50 | ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_{32} (Matched Load) | 51 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 51 | โครงข่ายจำลองของ NBT | 51 |
| 52 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{11} | 52 |
| 53 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{12} | 52 |
| 54 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{13} | 53 |
| 55 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_2 | 53 |
| 56 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_3 | 53 |
| 57 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_4 | 54 |
| 58 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_5 | 54 |
| 59 | ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_L (Matched Load) | 54 |
| 60 | ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_{11} | 55 |
| 61 | ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_{12} | 55 |
| 62 | ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_{13} | 55 |
| 63 | ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_2 | 56 |
| 64 | ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_3 | 56 |
| 65 | ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_4 | 56 |
| 66 | ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_5 | 57 |
| 67 | ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_L (Matched Load) | 57 |
| 68 | ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_{11} | 59 |
| 69 | ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_{12} | 59 |
| 70 | ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_{13} | 59 |
| 71 | ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_2 | 60 |
| 72 | ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_3 | 60 |
| 73 | ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_4 | 60 |
| 74 | ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_5 | 61 |
| 75 | ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_L (Matched Load) | 61 |

วิธีการหาความจุช่องสัญญาณของการสื่อสารแถบความถี่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคาร

A Method to Determine Channel Capacity of Wideband Communication for Indoor Low Voltage Power Lines

คำนำ

ในปัจจุบันนี้การติดต่อสื่อสารข้อมูลมีความจำเป็นมากขึ้นต่อการทำงานในแต่ละองค์กร ดังนั้นการสื่อสารข้อมูลจึงมีความหลากหลายรูปแบบออกไปแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็น การใช้ โทรศัพท์ภายใน, เพจเจอร์ หรืออีเมล เป็นต้น ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น บางจุดของพื้นที่ภายในอาคาร สัญญาณไร้สายอาจจะไม่ครอบคลุม หรือ ห้องภายในอาคารยังไม่มีการเดินสายสัญญาณไปถึง จากการติดต่อสื่อสารข้อมูลในรูปแบบที่กล่าวมานั้น การติดตั้งอุปกรณ์การสื่อสารหรือสายสัญญาณอาจจะเกิดความยุ่งยากต่อการติดตั้งในบางพื้นที่ของอาคาร ดังนั้นจึงควรหาเทคโนโลยีอื่นมาใช้ในการสื่อสารข้อมูลเพื่อให้เกิดความรวดเร็วและกระชับเข้ามาใช้ในหน่วยงาน

PLC (Power Lines Communication) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลภายในอาคาร โดยจะทำการหน้าที่ส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางให้กับผู้รับ ซึ่งสายส่งสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารของเทคโนโลยี PLC คือ สายไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคาร สายส่งไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคารนอกจากจะทำหน้าที่หลักในการส่งกำลังไฟฟ้า ยังสามารถนำมาเป็นช่องสัญญาณได้อีกด้วย ถือว่าเป็นการนำทรัพยากรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตามสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำไม่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้ในการสื่อสารโดยตรง จึงทำให้การส่งสัญญาณหรือการสื่อสารข้อมูลทำได้ไม่ดีเท่ากับสายส่งสัญญาณ ปัญหาที่เกิดจากการสื่อสารข้อมูลด้วยสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำได้แก่ สัญญาณอาจถูกรบกวนได้ง่ายหรือช่องสัญญาณเป็นแบบเลือกลดทอน โดยมีสาเหตุจากโครงข่ายการจ่ายไฟฟ้ากำลังเอง จึงมีผลทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณในแต่ละตำแหน่งในโครงข่ายจึงไม่สม่ำเสมอ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหาความจุช่องสัญญาณของสายส่งไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง โดยเริ่มจากการหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของช่องสัญญาณจากตัวส่งไปยังตัวรับตำแหน่งต่างๆ ด้วยวิธีย้ายอิมพีแดนซ์แบบย้อนกลับแล้วนำมาคำนวณหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

กรณีศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการสื่อสารแถบความถี่กว้างในย่านความถี่ 2-30 MHz บนโครงข่ายสายส่งแรงต่ำภายในอาคารตามเงื่อนไขของกำลังส่งของมาตรฐาน HomePlug นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีการนำอัลกอริทึม Water Filling สำหรับการลดกำลังส่งมาใช้ทดสอบอีกด้วย จากผลการทำจำลองพบว่าแต่ละจุดรับสัญญาณในโครงข่ายมีความแตกต่างของช่องสัญญาณอย่างชัดเจน และ Water Filling สามารถนำมาใช้เพื่อประหยัดกำลังส่งได้เป็นอย่างมาก โดยที่ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์ค่าความจุช่ของสัญญาณของการสื่อสารแถบความถี่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำที่หลายๆตำแหน่งภายในโครงข่ายสายส่งกำลัง
2. เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่และผลตอบสนองทางเวลาที่หลายๆตำแหน่งภายในโครงข่ายสายส่งกำลัง

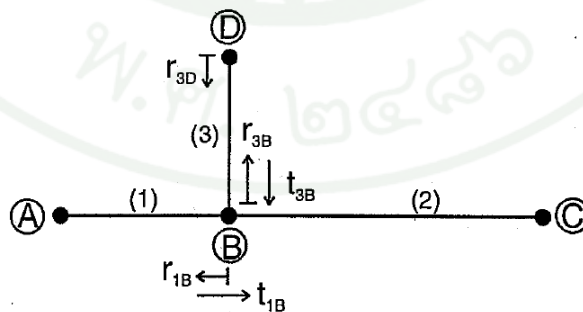


การตรวจเอกสาร

การสื่อสารข้อมูลผ่านสายไฟฟ้า (Power Line Communications) เป็นเทคโนโลยีการส่งสัญญาณสื่อสารผ่านบนสายส่งไฟฟ้า ซึ่งสายส่งไฟฟ้านอกจากจะทำหน้าที่หลักในการส่งกำลังไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถนำมาเป็นช่องสัญญาณได้อีกด้วย จึงถือได้ว่าเป็นการนำทรัพยากรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตามสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำไม่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้ในการสื่อสารโดยเฉพาะจึงทำให้ส่งสัญญาณได้ไม่ดีเท่าสื่อตัวกลางสำหรับการสื่อสารโดยเฉพาะ ดังนั้นจึงควรต้องวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงความจุของสายส่งเสียก่อน โดยหลักการแล้วถ้าทราบทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของสายส่งและคุณสมบัติของสัญญาณรบกวนแล้ว จะสามารถคำนวณความจุของช่องสัญญาณได้โดยง่าย

1. ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function)

Zimmermann and Dostert (1999) เสนอบทความวิจัยเรื่อง A multi-path signal propagation model for the power line channel in the high frequency range. ซึ่งเป็นการศึกษาหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ PLC โดยกำหนดเส้นทางที่ทำให้เกิดสัญญาณการสะท้อนกลับและสัมประสิทธิ์การสะท้อน นำมาคำนวณซึ่งทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ซึ่งสามารถเขียนด้วยการหาผลรวมของสัญญาณการสะท้อนกลับของสัญญาณจากจำนวนการเกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณทั้งหมด จากภาพที่ 1 เป็นการแสดงการสะท้อนของสัญญาณภายในโครงข่ายจำลองของ Zimmerman จากจุด A ไปยังจุด C



ภาพที่ 1 โครงข่ายจำลองของ M. Zimmerman

ที่มา: Zimmerman (1999)

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i A(f, d_i) e^{j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

โดยที่ N คือจำนวน Path ที่เกิดการสะท้อนของสัญญาณ

g_i คืออัตราขยายในแต่ละ Path ที่เกิดการสะท้อนของสัญญาณ

τ_i คือระยะทางทั้งหมดในการสะท้อนของสัญญาณทำให้เกิด Phase shift

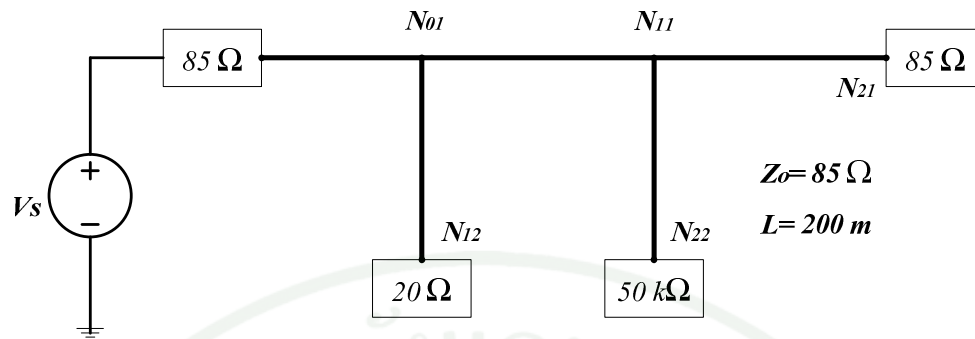
จากสมการที่ 1 จะเห็นว่าสามารถกำหนดเส้นทางการสะท้อนของสัญญาณและจำนวน Path รวมไปถึงระยะทางทั้งหมดที่เกิดการสะท้อนของสัญญาณในแต่ละ Path จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันได้ ดังนั้นเราสามารถเขียนและสรุปวิธีในการกำหนดเส้นทางการสะท้อนของสัญญาณและจำนวน Path รวมไปถึงการหาระยะทางทั้งหมดที่เกิดการสะท้อนของสัญญาณในแต่ละ Path ได้ดังภาพที่ 2

| Path No. | Way of the signal path | weighting factor g_i | length of path d_i |
|----------|------------------------------|---|--------------------------------|
| 1 | A→B→C | t_{1B} | $l_1 + l_2$ |
| 2 | A→B→D→B→C | $t_{1B} \cdot \Gamma_{3D} \cdot t_{3B}$ | $l_1 + 2 \cdot l_3 + l_2$ |
| : | : | : | : |
| N | A→B (→D→B) ^{N-1} →C | $t_{1B} \cdot \Gamma_{3D} \cdot (\Gamma_{3B} \cdot \Gamma_{3D})^{(N-2)} t_{3B}$ | $l_1 + 2(N-1) \cdot l_3 + l_2$ |

ภาพที่ 2 การกำหนดเส้นทางการสะท้อนของสัญญาณ

ที่มา: Zimmerman (1999)

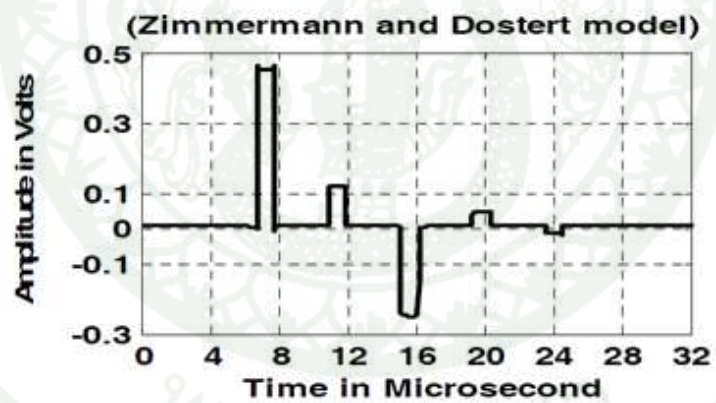
จากภาพที่ 2 จะเห็นว่าจะมีจำนวน Path ที่มากขึ้นไปทำให้การคำนวณอาจจะเกิดความผิดพลาดได้รวมไปถึงการกำหนดเส้นทางการสะท้อนของสัญญาณมีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย การหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันอาจจะต้องใช้เวลาในการคำนวณ



ภาพที่ 3 ตัวอย่างโครงข่ายจำลอง M. Zimmermann

ที่มา: Zimmerman (1999)

จากการหาทรานสเฟอว์ฟังก์ชันจกผลรวมของการสะท้อนของสัญญาณจากภาพที่ 3 สามารถแสดงผลตอบสนองทางเวลาที่ปลายโหลดได้ดังภาพที่ 4

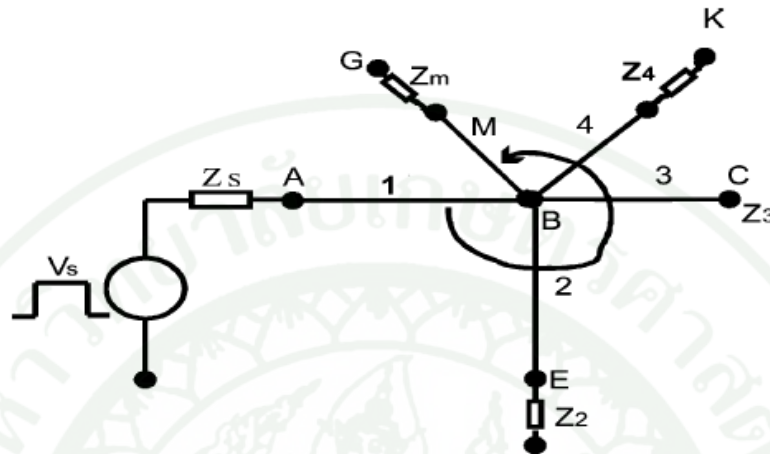


ภาพที่ 4 ผลตอบสนองทางเวลาจากการหาการสะท้อนของสัญญาณ

ที่มา: Zimmerman (1999)

Antony *et al.* (2009) เสนอบทความวิจัยเรื่อง Power-Line Communication Channel Model for Interconnected Networks Part1:Two-Conductor System. ซึ่งได้คิดและพัฒนาความสัมพันธ์ที่

เกิดการสะท้อนของสัญญาณในรูปสมการสำหรับการหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆขึ้นมาใหม่ เพื่อหาผลตอบสนองของพัลส์สี่เหลี่ยม



ภาพที่ 5 โครงข่ายจำลองของ J. Anatory

ที่มา: Anatory (2009)

ภาพที่ 5 แสดงโครงข่ายตัวอย่างที่ Anatory ใช้ในการหาความสัมพันธ์และสมการโดยการกำหนด Node และ Branchs ในโครงข่ายจำลองขึ้นแล้วเขียนความสัมพันธ์ต่างๆที่เกิดขึ้นภายในแต่ละ Branchs แล้วจากนั้นนำสมการต่างๆมาหาแรงดันที่ Node ก่อนจะนำไปหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน

$$H(f) = \frac{Z_{C1} + Z_s}{Z_{C1}} Z_{Cm} (e^{-\gamma_m L_m} \beta_m + e^{-\gamma_m L_m}) A_{1m} \frac{1}{A_1^+ \beta_1 + A_1^-} \quad (2a)$$

$$A_{1m} = \frac{a_1}{a_{1m}} \quad (2b)$$

$$\beta_m = \frac{\left(\frac{1-Z_{cm}}{Z_m}\right) e^{-\gamma_m L_m}}{\left(\frac{1+Z_{cm}}{Z_m}\right) e^{\gamma_m L_m}} ; m = 2, 3, \dots M \quad (2c)$$

$$\beta_1 = \frac{C_1^+ - P_1 B_1^-}{C_1^+ + P_1 B_1^+} \quad (2d)$$

$$P_1 = \frac{e_{12}}{a_{12}} + \frac{e_{13}}{a_{13}} + \dots + \frac{e_{1m}}{a_{1m}} \quad (2e)$$

$$e_{1m} = C_{m1}^- - C_{m1}^+ \beta_m \quad (2f)$$

$$a_{1m} = B_{m1}^+ \beta_m + B_{m1}^- \quad (2g)$$

$$a_1 = B_1^+ \beta_1 + B_1^- \quad (2h)$$

$$B_{m1}^+ = Z_{cm} e^{-\gamma_m L_1} \quad (2i)$$

$$B_{m1}^- = Z_{cm} e^{\gamma_m L_1} \quad (2j)$$

$$C_{m1}^+ = e^{-\gamma_m L_1} \quad (2k)$$

$$C_{m1}^- = e^{\gamma_m L_1} \quad (2l)$$

โดยที่ $Z_{C1\dots m}$ คือค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง

β_m คือค่ากระแสที่โหลด

γ_m คือค่าคงตัวการแพร่กระจาย

$L_{1\dots m}$ คือค่าความยาวของสายส่ง

B_{m1}^+ คือแรงดันเดินทางไปที่โหลด

B_{m1}^- คือแรงดันย้อนกลับจากโหลด

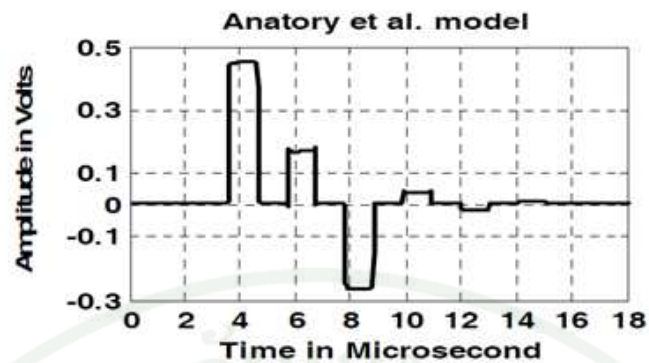
a_1 คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ความยาว L_1

a_{1m} คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ความยาวสายส่งทุกๆเส้น

C_{m1}^- คือคลื่นสะท้อน

C_{m1}^+ คือคลื่นตกกระทบ

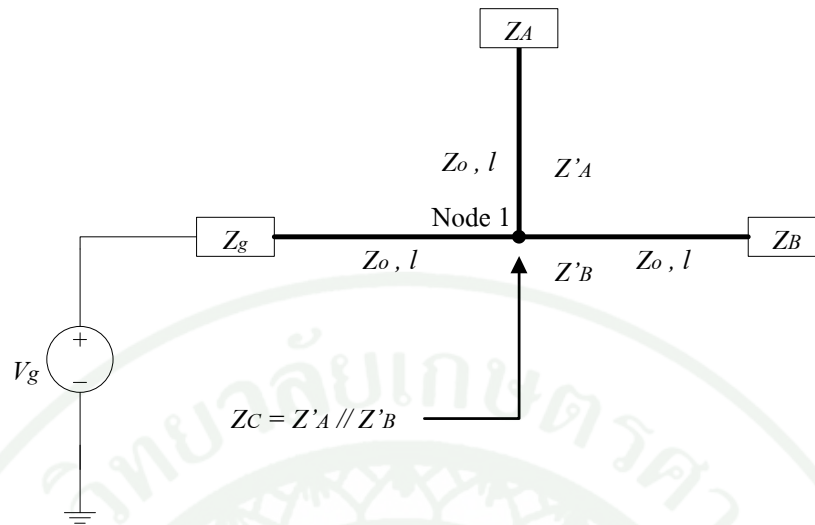
จากสมการ (2a) - (2l) จะเห็นว่า สมการที่สร้างขึ้นใหม่เพื่อหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน จะมีความซับซ้อนและยุ่งยากมาก Anatory ได้นำสมการที่เขียนขึ้นใหม่มาใช้หาทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน จากโครงข่ายจำลองของ Zimmermann ในภาพที่ 3 ซึ่งได้แสดงผลตอบสนองทางเวลาได้ใกล้เคียง กับผลการหาผลตอบสนองทางเวลาของ Zimmermann ใช้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลตอบสนองทางเวลาจากการหาความสัมพันธ์ของสมการ J.Anatory

ที่มา: Anatory (2009)

Khongdeach and Chongburee (2013) เสนอบทความวิจัยเรื่อง A Method to Analyze Communication Bandwidth and Pulse Response of Power Lines with Branches Using Backward Impedance Transform Technique. ซึ่งได้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองทางความถี่และผลตอบสนองของพัลส์สี่เหลี่ยมด้วยวิธีการย้ายค่าอิมพีแดนซ์แบบย้อนกลับ (Backward Impedance Transform, BIT) เพื่อนำมาหาค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน ซึ่งจะต้องหาค่าอิมพีแดนซ์อิมพุทที่โหลดปลายสายส่งแล้วจึงสามารถหาค่าแรงดันอินพุทและค่าแรงดันตกคร่อมที่โหลยปลายสายส่งและยังสามารถหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่โหลดแต่ละตัวได้ ซึ่งวิธีการคิดจะไม่ยุ่งยากหรือมีสมการที่ซับซ้อนเหมือนกับการหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของ Zimmermann and Anatory แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงเหมือนกันและง่ายต่อการหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน



ภาพที่ 7 โครงข่ายจำลองของ T. Khongdeach

ที่มา: Khongdeach (2013)

จากโครงข่ายจำลองของ Khongdeach ดังแสดงภาพที่ 7 เป็นโครงข่ายจำลองที่นำมาทำการคิดและหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันด้วยวิธี BIT ตามหลักการหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันคิดด้วยวิธี BIT นี้สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยมีวิธีคิดดังนี้

(1) การยุบค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลด (Z_B และ Z_A ในรูปที่ 7) ผ่านทางสายไฟที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_o และความยาว l ได้เป็น Z'_B และ Z'_A ไปจนนานกันรวมเป็น Z_C แล้วย้ายต่อไปเพื่อหา Z_{in} ที่ต่ออนุกรมกับ Z_g หรืออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย V_g หลังจากนั้นหา V_{in} หรือแรงดันที่ตกคร่อม Z_{in} ดังแสดงในภาพที่ 8 การย้ายค่าอิมพีแดนซ์ทำได้โดยสมการ 3 และการคำนวณค่าแรงดันอินพุทในสมการ 4

$$Z_{in} = Z_o \cdot \frac{Z_C + Z_o \tanh(\gamma l)}{Z_o + Z_C \tanh(\gamma l)} \quad (3)$$

$$V_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_g} \cdot V_g \quad (4)$$

เมื่อ $\gamma = \alpha + j\beta$ โดยที่ $\alpha = 0$ สำหรับกรณีไม่มีการสูญเสียในสายและ $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ โดยที่ค่า γ คือค่าคงตัวการแพร่กระจาย (propagation constant) ค่า α คือค่าคงตัวการลดทอน (attenuation constant) มีหน่วยเป็นเนเปอร์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวและค่า β คือค่าคงตัวเฟส (phase constant) มีหน่วยเป็นองศาหรือเรเดียนต่อหนึ่งหน่วยความยาว

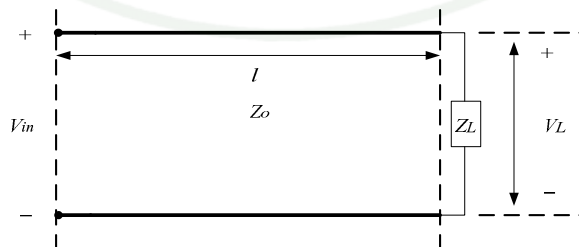


ภาพที่ 8 อิมพีแดนซ์อินพุท โครงข่ายจำลองของ T. Khongdeach

(2) การหาแรงดันที่โหลดผ่านสายไฟที่ค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 และความยาว l ทำได้ด้วยวิธีการดังนี้ เมื่อทราบค่า V_{in} เท่ากับผลรวมของแรงดันเดินทางไปและแรงดันย้อนกลับที่ระยะทางอ้างอิง $Z = 0$ หรือ $V_{in} = V^+(Z = 0) + V^-(Z = 0)$ ดังนั้นแรงดันที่สามารถหาโดยใช้ผลรวมของแรงดันที่ระยะทาง $Z = l$ หรือ $V_L = V^+(Z = l) + V^-(Z = l)$ โดยใช้สมการ

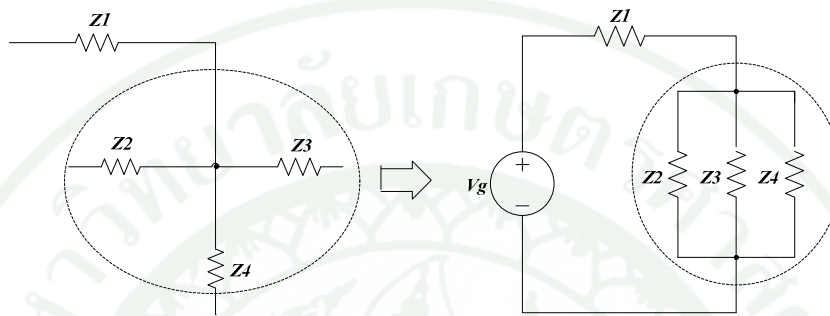
$$V_L = \left(\frac{V_{in}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma) \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$



ภาพที่ 9 แรงดันตกคร่อมโหลดปลายสายส่ง

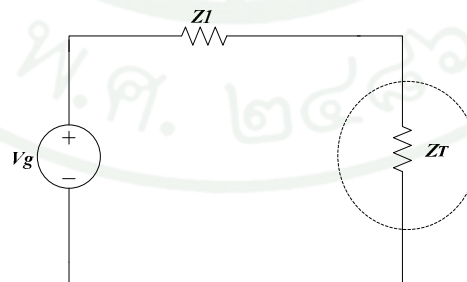
ลักษณะการต่อโหลดใช้งานที่ปลายสายส่งหรือโครงข่ายจำลองนั้น มักจะมีการต่อใช้งานสายส่งมากกว่าหนึ่งเส้นทำให้มีลักษณะการต่อใช้งานของโหลดที่ปลายสายส่งแต่ละเส้นมีลักษณะต่อแบบขนาน ทำให้เมื่อต้องการหาค่าอิมพีแดนซ์รวม Z_T ที่แต่ละโหนดหรือจุดแยกย่อยนั้น ต้องคิดคำนวณค่าอิมพีแดนซ์แบบขนาน แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ลักษณะการต่อขนานของโหลดปลายสายส่ง

ซึ่งจากภาพที่ 10 ลักษณะการต่อแบบขนานของโหลดปลายสายส่ง ซึ่งส่วนใหญ่การต่อโหลดใช้งานในโครงข่ายจำลองจะมีลักษณะการต่อแบบขนานของโหลดปลายสายส่งซึ่งสามารถยุบรวมค่าอิมพีแดนซ์เหมือนกับการรวมค่าความต้านทานแบบขนาน สามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์รวม Z_T ที่โหนดหรือจุดต่อแยกย่อยดังสมการ 7

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}} \quad (7)$$



ภาพที่ 11 อิมพีแดนซ์รวมที่คำนวณต่อแบบขนาน

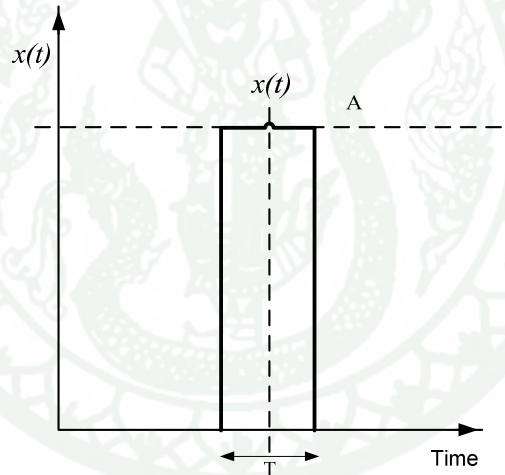
โดยที่ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันนั้นได้นิยามโดย $V_L(f)/V_g(f)$ หรืออัตราส่วนของแรงดันของสัญญาณที่โหลดต่อแรงดันที่แหล่งจ่ายสัญญาณดังสมการ

$$H(f) = \frac{V_L(f)}{V_g(f)} \quad (8)$$

1.1 การหาผลตอบสนองทางเวลา

กำหนดให้สัญญาณด้านเข้าเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม (Rectangular Pulse) ที่มีความกว้าง T และขนาด A ตามสมการที่ 9 ดังภาพที่ 12

$$x(t) = A \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (9)$$



ภาพที่ 12 พัลส์สี่เหลี่ยม (Rectangular Pulse)

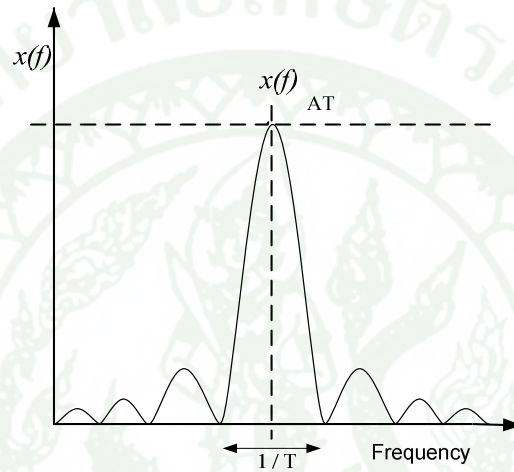
ซึ่งในการนำสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม (Rectangular Pulse) มาทำการ Fourier Transform ให้เป็นสัญญาณซิงค์ฟังก์ชัน โดยจะต้องให้น้ำหนักของแต่ละความถี่ที่กระตุ้นโครงข่ายสายไฟฟ้า f สอดคล้องกับ Sinc function ดังภาพที่ 13 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$X(f) = \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

$$= \int_{-T/2}^{T/2} A \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (11)$$

$$= \frac{A \cdot e^{-j2\pi f (T/2)} - A \cdot e^{j2\pi f (T/2)}}{-j2\pi f} \quad (12)$$

$$X(f) = A \cdot T \left(\frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \right) = A \cdot T \cdot \text{Sinc}(fT) \quad (13)$$



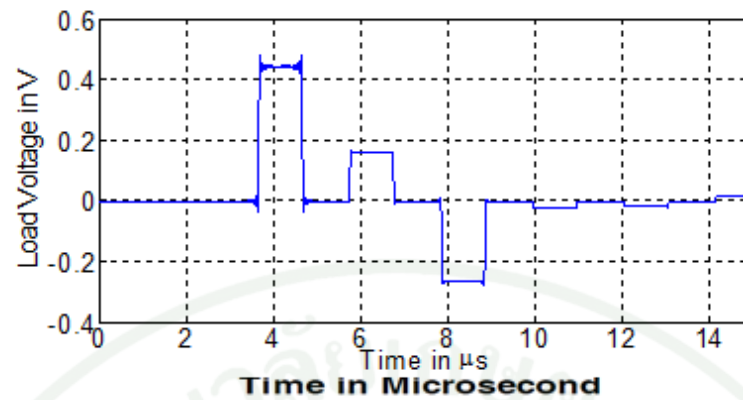
ภาพที่ 13 ซิงค์ฟังก์ชัน (Sinc function)

การทำอินเวอร์สฟูเรียรทรานสฟอร์ม (Invert Fourier Transform) เป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม นั้น เมื่อได้ผลตอบสนองต่อ Sinc function แล้วอินเวอร์สฟูเรียรทรานสฟอร์มนั้นจะคือผลตอบสนองต่อสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ตามสมการ 14

$$A \cdot \text{rect} \left(\frac{t}{T} \right) \leftrightarrow A \cdot T \cdot \text{Sinc}(fT) \quad (14)$$

ดังนั้นผลตอบสนองในโดเมนเวลา สามารถทำได้โดยอ้อมผ่านการหาผลตอบสนองทางความถี่ แล้วนำมา Invert Fourier Transform

จากวิธีที่ดังกล่าวของ Khongdeach ได้นำหลักการคิดหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันด้วยวิธี BIT มาใช้กับโครงข่ายจำลองของ Zimmermann ในภาพที่ 3 เพื่อเปรียบเทียบวิธีคิดด้วยวิธี BIT และผลลัพธ์ที่ได้ เพื่อให้เห็นว่าการนำวิธี BIT มาหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันนั้นได้ประสิทธิภาพและสามารถนำมาใช้ในการหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแล้วจากนั้นหาผลตอบสนองทางเวลาได้ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ผลตอบสนองทางเวลาจากการการคิดด้วยวิธี BIT ของ T. Khongdeach

ที่มา: Khongdeach (2013)

1.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียวิธีการหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียวิธีการหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

| นักวิจัย | ข้อดี | ข้อเสีย |
|---------------|-----------------------------------|---|
| M. Zimmermann | -สามารถหาค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้ | -ต้องกำหนดเส้นทางการสะท้อนของสัญญาณ -เส้นทางการสะท้อนของสัญญาณมีมากเกินไป -ผลที่ได้เป็นค่าประมาณการ -ใช้เวลานาน |
| J. Antory | -สามารถหาค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้ | -ต้องกำหนดเส้นทางการสะท้อนของสัญญาณ -สมการซับซ้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดต่อร่วม (Node) และจุดแยกย่อย (Brache) -ใช้เวลานาน |

ตารางที่ 1 (ต่อ)

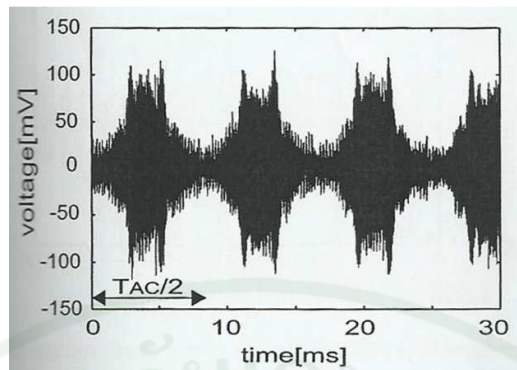
| นักวิจัย | ข้อดี | ข้อเสีย |
|---------------|---|--|
| T. Khongdeach | -สามารถหาค่าทรานสเฟอรัฟังกซ์ชันได้ -ใช้เวลาน้อยง่ายต่อการใช้งาน -สมการไม่ยุ่งยาก -มีผลสุทธิที่แม่นยำ | -ไม่เห็นลักษณะบางอย่าง เช่นกระแสในการขบวนการ โดยทันทีแต่อย่างไรก็ตามสามารถคำนวณได้ |

2. สัญญาณรบกวน (Noise)

การสื่อสารข้อมูลนั้น สิ่งทีหลีกเลี่ยงไม่ได้คือสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาและอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบและนอกระบบของการสื่อสารข้อมูล ถ้าสัญญาณข้อมูลถูกรบกวนแล้วผลที่เกิดขึ้นตามมานั้นก็คือ สัญญาณข้อมูลที่ส่งไปจะเกิดความเสียหายหรือผิดเพี้ยนไปจากเดิมหรืออาจจะทำให้ไม่สามารถสื่อสารกันได้ สัญญาณรบกวนมีหลายประเภทแต่แต่ละประเภทก็มีความแตกต่างกันออกไป โดยสามารถแบ่งแยกได้ตามพฤติกรรมของสัญญาณรบกวนแต่ละประเภท (Ferreira *et al.*, 2010) ดังนี้

2.1 Continuous Noise

คือสัญญาณรบกวนเรียกว่า Background Noise สัญญาณรบกวนประเภทนี้ไม่ได้เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าตามบ้านเรือนต่างๆแต่โดยปกติแล้วจะเกิดมาจากอุปกรณ์ของตัวเองมันเองรวมไปถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน ซึ่งสัญญาณรบกวนประเภทนี้มักจะเกิดเป็นระยะเวลาอย่างต่อเนื่องทางเวลา ตั้งแต่มีการเปิดอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าจนถึงการปิดอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั้งพร้อมกันและไม่พร้อมกัน เช่น เกิดมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าและระบบแสงสว่างสาธารณะ โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ -80 ถึง -125 dBW/Hz ดังแสดงภาพที่ 15

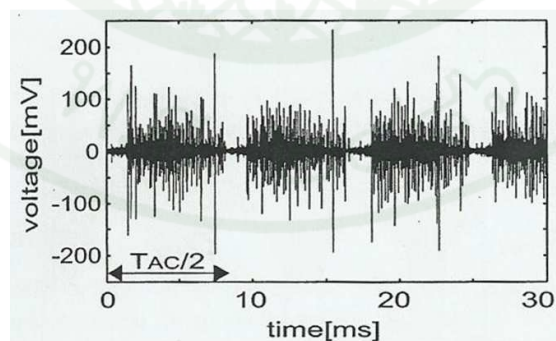


ภาพที่ 15 Background Noise ที่เกิดจากหลอดไฟฟ้า

ที่มา: Ferreira *et al* (2010)

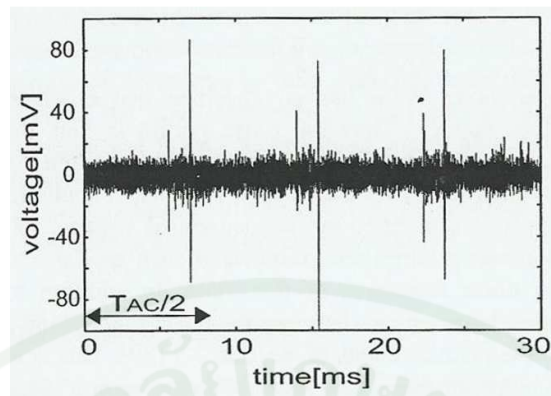
2.2 Impulsive Noise

คือสัญญาณอิมพัลส์เดี่ยวที่เกิดจากการเปิด-ปิดของโหลดทางไฟฟ้าหรือสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเปิดปิดสวิตช์เครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าพร้อมกันและไม่พร้อมกัน ซึ่งระยะเวลาในการเกิดสัญญาณรบกวนชนิดนี้จะเกิดขึ้นเพียงช่วงระยะเวลาสั้นระหว่าง $1 \mu\text{s}$ - 1ms และสัญญาณรบกวนอีกประเภทคือเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวก Triac ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของพัดลม, light-dimmers, thermostats เป็นต้น ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนนี้อยู่ในช่วง -50 ถึง -80 dBW/Hz ดังแสดงภาพที่ 16 และ 17



ภาพที่ 16 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์

ที่มา: Ferreira *et al* (2010)

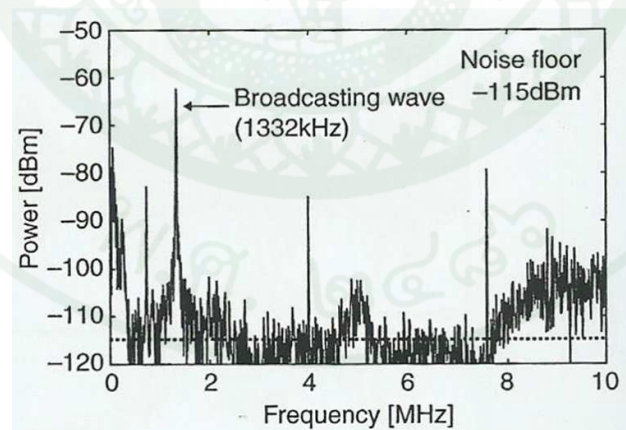


ภาพที่ 17 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในทีวี

ที่มา: Ferreira *et al* (2010)

2.3 Narrowband Noise

คือสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการกระจายสัญญาณวิทยุของสถานีเครื่องส่งวิทยุหรือการกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายสำหรับการสื่อสารต่างๆ โดยปกติแล้วสัญญาณรบกวนจะมีขนาดประมาณ -80 dBW/Hz ดังแสดงภาพที่ 18

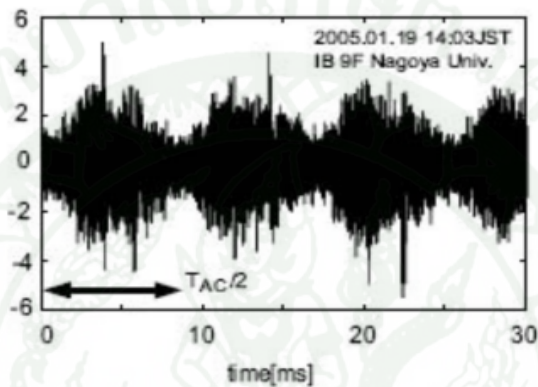


ภาพที่ 18 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการกระจายสัญญาณของสถานีเครื่องส่ง

ที่มา: Ferreira *et al* (2010)

2.4 Overall Noise Waveform

คือสัญญาณรบกวนต่างๆไปที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ภาครับ โดยมีการต่ออุปกรณ์สื่อสารหรืออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในโครงข่ายการสื่อสารของ PLC ซึ่งสัญญาณอุปกรณ์ที่ส่งออกมาภายในโครงข่าย PLC จะมีลักษณะของสัญญาณที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกันเองภายในโครงข่ายของ PLC ตลอดการใช้งาน ดังแสดงภาพที่ 19



ภาพที่ 19 สัญญาณรบกวนที่เกิดภายในโครงข่ายจากสัญญาณที่แตกต่างกัน

ที่มา: Ferreira *et al* (2010)

3. การหาค่าความจุช่องสัญญาณด้วยวิธีคิดแบบ Water Filling

การวิเคราะห์หาค่าความจุช่องสัญญาณเป็นวิธีการทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการสื่อสารข้อมูลภายในโครงข่าย ซึ่งโดยปกติถ้าทราบค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชันก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าความจุช่องสัญญาณภายในโครงข่ายได้ สมการที่ใช้วิเคราะห์ค่าความจุช่องสัญญาณส่วนใหญ่สามารถคำนวณได้จากสมการ 15

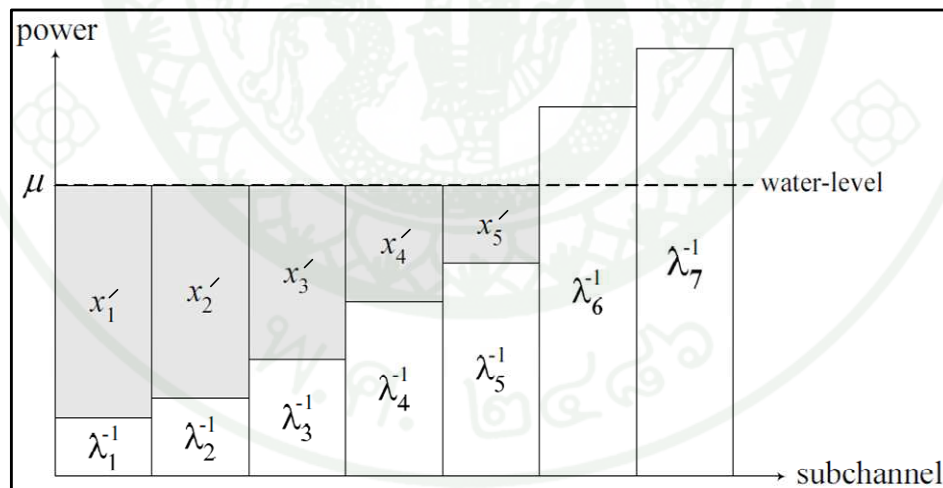
$$C = \int_{f_1}^{f_2} \log_2 \left[\frac{|H(f)|^2 \cdot PSD_s(f)}{N_o(f)} + 1 \right] df \quad (15)$$

โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาค่าความจุช่องสัญญาณจากค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชันนั้นมักจะใช้การกระจายค่ากำลังงานแบบสม่ำเสมอ $PSD_s(f)$ ให้ครอบคลุมตลอดทั้งย่านความถี่ที่สนใจ ทำให้

การวิเคราะห์ค่าความจุช่องสัญญาณนั้นเกิดการสูญเสียค่ากำลังงานขึ้น จึงได้มีการค้นคิดวิธีการกระจายค่ากำลังงานในย่านความถี่ขึ้นมาใหม่เพื่อให้สามารถปรับอัตราการใช้ค่ากำลังงานได้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุดในแต่ละช่วงความถี่ที่สนใจ

Water Filling เป็นวิธีการปรับอัตราส่วนของค่ากำลังงานให้กับช่องความถี่ที่สนใจเพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณมากที่สุดในช่วงความถี่นั้นๆ ซึ่งในการปรับอัตราค่ากำลังงานในช่องความถี่ย่อยเพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณนั้นจะมีระดับในการปรับเพิ่มอัตราค่ากำลังงานที่เรียกว่า water level เพื่อให้ทราบถึงค่ากำลังงานที่ในแต่ละช่องความถี่ย่อยและค่ากำลังงานในแต่ละช่องความถี่ย่อยนั้นจะรวมกันแล้วต้องไม่เกินค่ากำลังงานที่แหล่งจ่าย

Palomar and Fonollosz (2005) เสนองานวิจัยเรื่อง Practical Algorithms for a Family of Waterfilling Solutions โดยได้เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับวิธีการหาค่ากำลังงานในช่องความถี่ย่อยเพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดแบบ Water Filling ซึ่งค่ากำลังงานในแต่ละช่องความถี่ย่อยที่หาได้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณในแต่ละช่วงความถี่ได้ และค่ากำลังงานแต่ละช่องความถี่ย่อยจะมีค่ากำลังงานแตกต่างกันไป ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ค่ากำลังงานที่เกิดในแต่ละช่องความถี่ย่อย

ที่มา: Palomar and Fonollosz (2005)

$$\lambda^{-1} = \frac{N_o}{|H(f)|^2} \quad (16)$$

$$x'_i = (\mu - \lambda_i^{-1}) \quad (17)$$

โดยที่ x'_i คือค่ากำลังงานที่จ่ายให้แก่ช่องความถี่ย่อย

μ คือระดับของค่ากำลังงาน (water level)

λ_i^{-1} คือค่าส่วนกลับของสัญญาณรบกวนต่อทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของแต่ละจำนวนช่องความถี่ย่อย

i คือจำนวนช่องความถี่ที่น้อย

จะเห็นว่าจากสมการ 16 ค่า λ^{-1} เป็นการหาค่าส่วนกลับของสัญญาณรบกวนต่อทรานสเฟอร์ฟังก์ชันตลอดทั้งย่านความถี่ที่สนใจและสมการ 17 เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังงานในแต่ละช่องความถี่ย่อยและค่ากำลังงานที่คำนวณได้ในแต่ละช่องความถี่ย่อยนั้นสามารถนำมาหาค่าความจุช่องสัญญาณได้ โดยที่ค่ากำลังงานที่ป้อนให้แก่แต่ละช่องความถี่ย่อยนั้นจะทำให้เกิดความสูญเสียที่น้อยที่สุดของค่ากำลังงานที่ป้อนให้ไป จึงทำให้การคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณนั้นมีค่าสูงสุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 18

$$C_i = \Delta f \log_2 \left[\frac{|H(f_i)|^2 \cdot x'_i}{N_o(f)} + 1 \right] \quad (18)$$

จากสมการ 18 จะเป็นการวิเคราะห์ค่าความจุช่องสัญญาณแบบ water filling ในช่วงความถี่ย่อยบนย่านความถี่ที่สนใจในแต่ละช่วง แต่ยังไม่ได้เป็นค่าความจุช่องสัญญาณทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความจุช่องสัญญาณได้โดยการนำค่าความจุทุกๆช่วงความถี่ย่อยมารวมกันจึงจะได้ค่าความจุช่องสัญญาณในย่านความถี่ที่สนใจ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 19

$$C_T = \sum_{i=1}^N C_i \quad (19)$$

โดยที่ C_T คือค่าความจุช่องสัญญาณรวมทั้งหมดของย่านความถี่ที่สนใจ

i คือจำนวนช่องความถี่ย่อย

C_i คือค่าความจุช่องสัญญาณของช่องความถี่ย่อย

ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จะนำวิธีย้ายอิมพีแดนซ์แบบย้อนกลับ(Backward Impedance Transform, BIT) มาใช้ในการหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่าย สมการไม่ยุ่งยากซับซ้อนต่อการใช้งาน รวมทั้งผลลัพธ์ที่ได้เป็นผลสุทจริงและมีความแม่นยำ จากนั้นจะนำค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่ได้จากวิธี BIT มาใช้ในการวิเคราะห์หาความจุช่องสัญญาณแบบ Water Filling เพื่อเปรียบเทียบกับกรวิเคราะห์หาความจุช่องสัญญาณแบบการกระจายค่ากำลังงานอย่างสม่ำเสมอ โดยโครงข่ายที่ใช้จะมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบได้แก่ โครงข่ายจำลองอย่างง่าย โครงข่ายจำลองที่ซับซ้อนของ Anatory และ โครงข่ายจริงของสถานีโทรทัศน์แห่งประเทศไทย NBT มาใช้ในงานวิจัยนี้



อุปกรณ์และวิธีการ

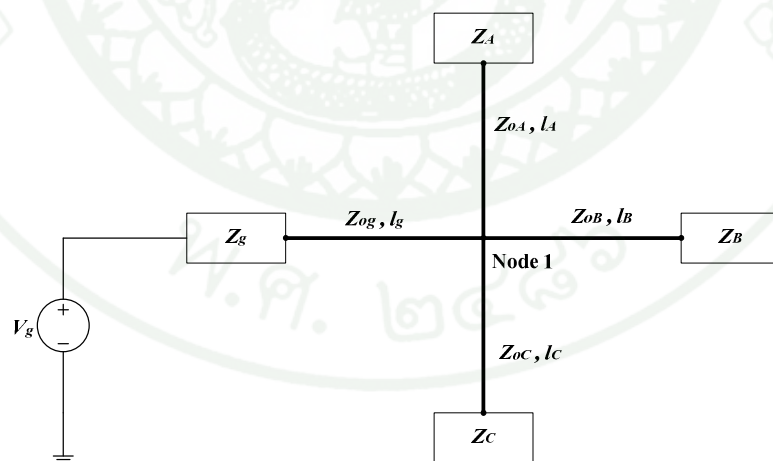
อุปกรณ์

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าความจุของสัญญาณการสื่อสารแถบความถี่ กว้างบนสายไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคาร โดยจะเป็นการจำลอง(Simulation) ของโครงข่ายภายในอาคารขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำการวิจัยซึ่งจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สำหรับการวิจัยดังต่อไปนี้

1. คอมพิวเตอร์ หรือ โน้ตบุ๊ก จำนวน 1 เครื่อง
2. โปรแกรม MATLAB V.7.0.4
3. โปรแกรม Microsoft Visio 2007
4. โปรแกรม Microsoft Word 2007

วิธีการ

ขั้นตอนและวิธีการสาธิตบนโครงข่ายจำลองที่มีความซับซ้อนน้อยดังภาพที่ 21 ขั้นตอน สำหรับการวิเคราะห์ค่าความจุของสัญญาณประกอบด้วยดังนี้



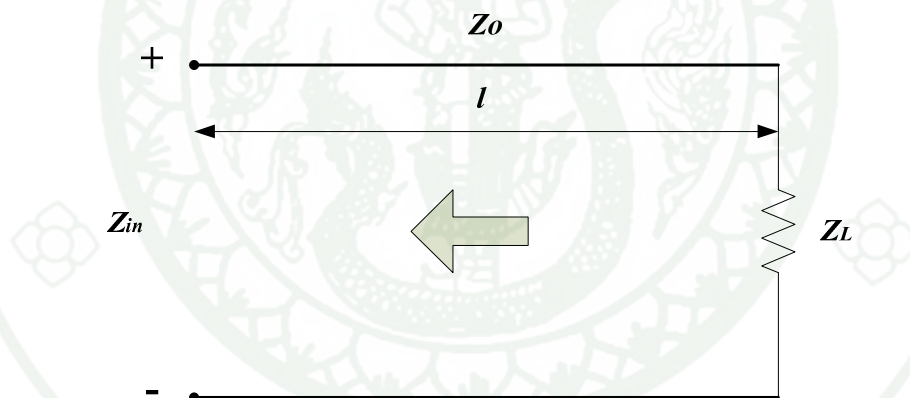
ภาพที่ 21 โครงข่ายจำลองอย่างง่าย

1. การหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และแรงดันอินพุท
2. การหาแรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายสายส่ง
3. การหาผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลดปลายสายส่ง
4. การหาผลตอบสนองทางเวลาที่โหลดปลายสายส่ง
5. การหาค่าความจุช่่องสัญญาณที่โหลดปลายสายส่ง

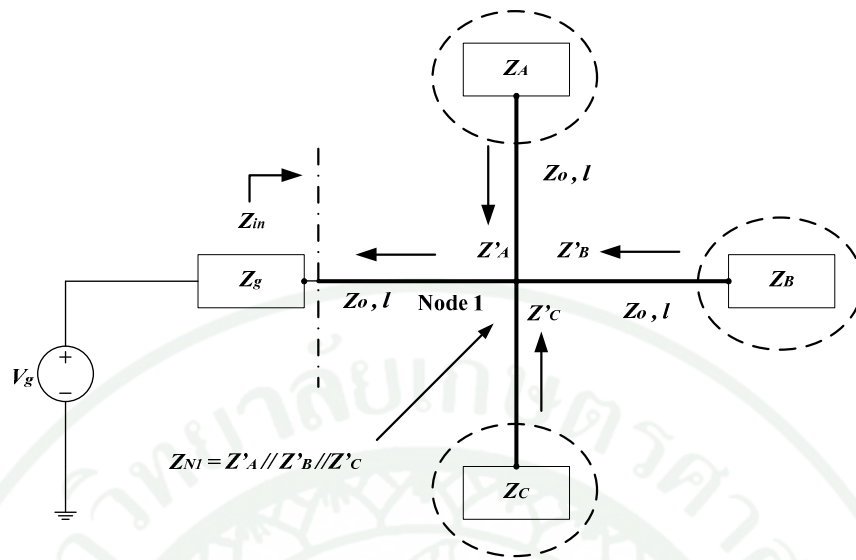
แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1. การหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และแรงดันอินพุท

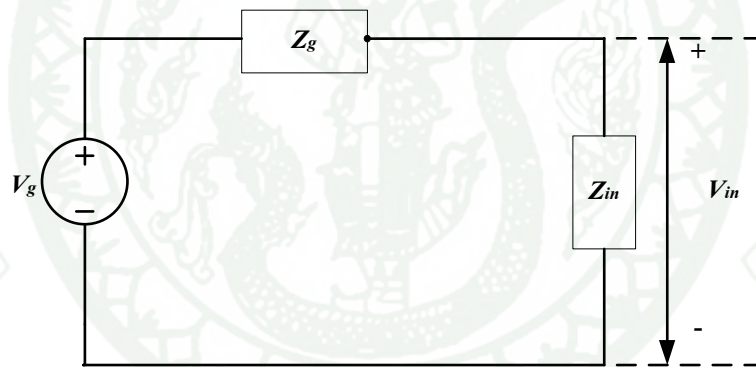
การหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์คือการย้ายค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลดปลายสายส่งย้อนกลับมาที่แหล่งจ่าย ด้วยการย้ายผ่านทางสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 และความยาว l แล้วย้ายต่อไปเพื่อหา Z_{in} ดังแสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การย้ายอิมพีแดนซ์ที่โหลดปลายสายส่งเพื่อหาอินพุทอิมพีแดนซ์



ภาพที่ 23 อิมพีแดนซ์ที่โหลดปลายสายส่งและอินพุทอิมพีแดนซ์



ภาพที่ 24 แรงดันอินพุท

การย้ายค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลดปลายสายส่งที่ Z_A, Z_B และ Z_C ในภาพที่ 23 ผ่านทางสายส่งไฟฟ้าที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_o และความยาว l ได้เป็น Z'_A, Z'_B และ Z'_C ไปขนานกันรวมเป็น Z_{N1} แล้วย้ายต่อไปเพื่อหา Z_{in} ที่ต่ออนุกรมกับ Z_g หรืออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย V_g หลังจากนั้นหา V_{in} หรือแรงดันที่ตกคร่อม Z_{in} ดังแสดงในภาพที่ 24 การย้ายค่าอิมพีแดนซ์ทำได้โดยสมการ 20 และการคำนวณค่าแรงดันอินพุทในสมการ 21

$$Z_{in} = Z_o \cdot \frac{Z_{N1} + Z_o \tanh(\gamma l)}{Z_o + Z_{N1} \tanh(\gamma l)} \tag{20}$$

$$V_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_g} \cdot V_g \quad (21)$$

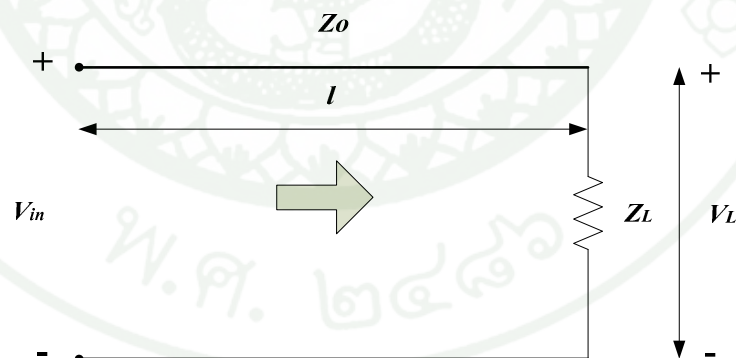
ในการวิจัยนี้กำหนดให้สายส่งเป็นแบบสายไม่สูญเสีย (Lossless Line) โดยที่ค่า α ดังนั้นค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณหาค่าคงตัวการแพร่กระจายดังนี้

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (22)$$

จากสมการ 22 เมื่อ γ คือค่าคงตัวการแพร่กระจายของสายส่ง ค่า α คือค่าคงตัวการลดทอน (attenuation constant) มีหน่วยเป็นเนเปียร์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวและค่า β คือค่าคงตัวเฟส (phase constant) มีหน่วยเป็นองศาหรือเรเดียนต่อหนึ่งหน่วยความยาว แต่เนื่องจากกำหนดให้สายส่งเป็นแบบไม่สูญเสีย (Lossless Line) ค่า $\alpha = 0$ ดังนั้นค่าคงตัวการแพร่กระจายจึงมีการเปลี่ยนแปลงไปสามารถคำนวณได้จาก

$$\gamma = j\beta \quad (23)$$

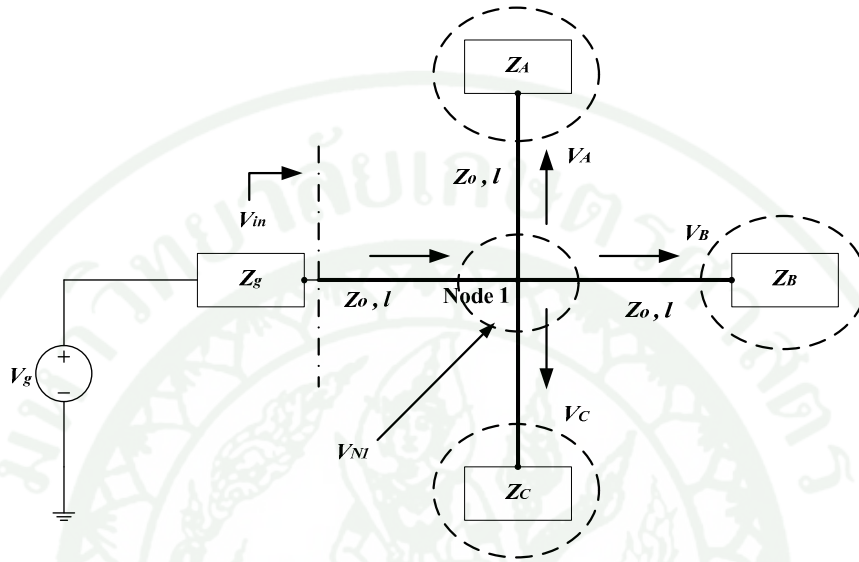
2. การหาแรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายสายส่ง



ภาพที่ 25 แรงดันอินพุตแพร่กระจายไปที่โหลดปลายสายส่ง

การหาแรงดันที่ไหลผ่านสายส่งไฟฟ้าที่ค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 และความยาว L ดังแสดงภาพที่ 25 ทำได้ด้วยวิธีการดังนี้ เมื่อทราบค่า V_{in} เท่ากับผลรวมของแรงดันเดินหน้าและแรงดันย้อนกลับ

ที่โหลดปลายสายส่งอ้างอิง $Z = 0$ หรือ $V_{in} = V^+(Z = 0) + V^-(Z = 0)$ ดังนั้นแรงดันที่สามารถหาโดยใช้ผลรวมของแรงดันที่ระยะทาง $Z = l$ หรือ $V_L = V^+(Z = l) + V^-(Z = l)$



ภาพที่ 26 แรงดันตกคร่อมที่โหลดและแรงดันตกคร่อมที่ Node 1

ภาพที่ 26 เป็นแรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายสายส่งที่เกิดจากการกระจายแรงดันจากแรงดันอินพุทกระจายไปยังจุดต่อร่วมและแยกกระจายไปยังโหลดปลายสายส่ง ดังนั้นการหาแรงดันที่โหลดปลายสายส่งผ่านสายส่งไฟฟ้าที่ค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 และความยาว l ทำได้ด้วยวิธีการดังนี้ เมื่อทราบค่า V_{in} เท่ากับผลรวมของแรงดันเดินหน้าและแรงดันย้อนกลับที่ระยะทางอ้างอิง $Z = 0$ หรือ $V_{in} = V_{N1}^+(Z = 0) + V_{N1}^-(Z = 0)$ ดังนั้นแรงดันที่ Node 1 และแรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายสายส่ง สามารถหาได้ดังนี้

แรงดันที่ Node 1

$$V_{N1} = \left(\frac{V_{in}}{e^{\gamma l} + \Gamma_{N1} e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma_{N1}) \quad (24)$$

$$\Gamma_{N1} = \frac{Z_{N1} - Z_0}{Z_{N1} + Z_0} \quad (25)$$

แรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายส่ง Z_A

$$V_A = \left(\frac{V_{N1}}{e^{\gamma l} + \Gamma_A e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma_A) \quad (26)$$

$$\Gamma_A = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (27)$$

แรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายส่ง Z_B

$$V_B = \left(\frac{V_{N1}}{e^{\gamma l} + \Gamma_B e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma_B) \quad (28)$$

$$\Gamma_B = \frac{Z_B - Z_0}{Z_B + Z_0} \quad (29)$$

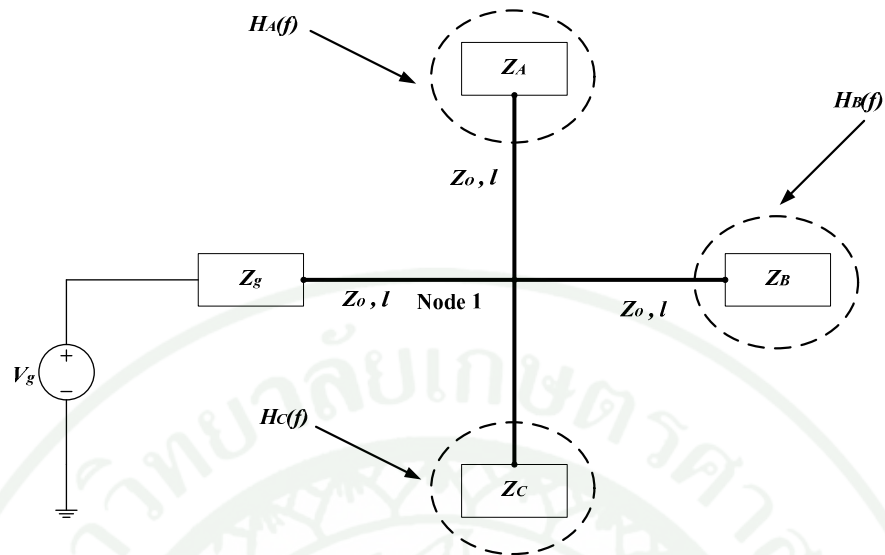
แรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายส่ง Z_C

$$V_C = \left(\frac{V_{N1}}{e^{\gamma l} + \Gamma_C e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma_C) \quad (30)$$

$$\Gamma_C = \frac{Z_C - Z_0}{Z_C + Z_0} \quad (31)$$

3. การหาผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลดปลายสายส่ง

ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันคือผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลดปลายสายส่ง เมื่อทราบค่าแรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายสายส่งและค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย หรือ V_g ซึ่งสามารถหาผลตอบสนองทางความถี่หรือทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน ดังนั้นทรานสเฟอ์ฟังก์ชันคือการอัตราส่วนของแรงดันที่ตกคร่อมที่โหลดต่อแรงดันที่แหล่งจ่าย โดยจะคำนวณหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันหรือผลตอบสนองความถี่ที่โหลดปลายสายส่งจากโครงข่ายจำลองในย่านความถี่กว้าง 2-30 MHz ได้ดังแสดงภาพที่



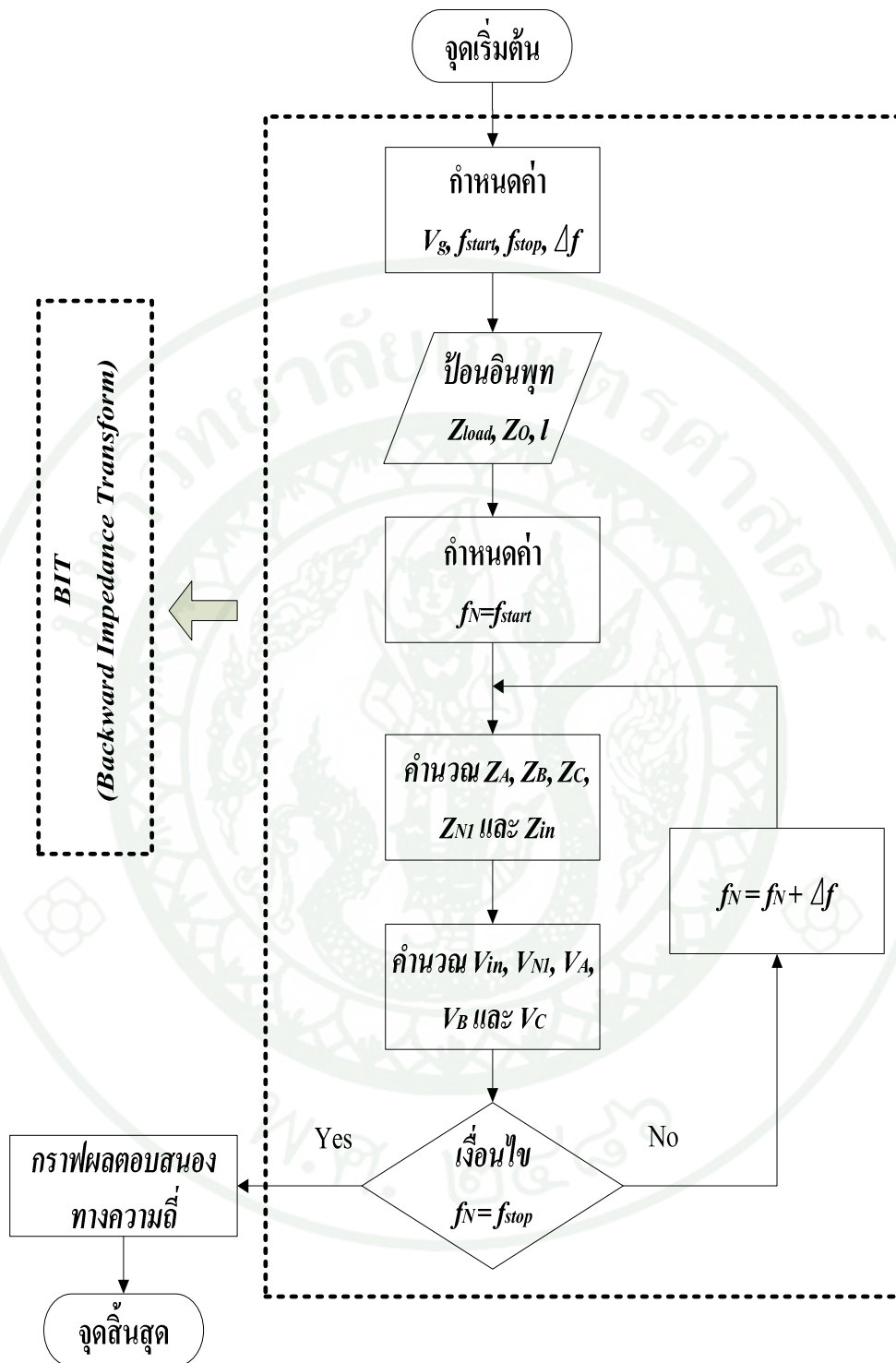
ภาพที่ 27 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลดปลายสายส่ง

ภาพที่ 27 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลดปลายสายส่งภายในโครงข่ายจำลอง ซึ่งสามารถหาค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันหรือผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลดปลายสายส่งแต่ละตัวได้ดังนี้

$$H_A(f) = \frac{V_A}{V_g} \quad (32)$$

$$H_B(f) = \frac{V_B}{V_g} \quad (33)$$

$$H_C(f) = \frac{V_C}{V_g} \quad (34)$$

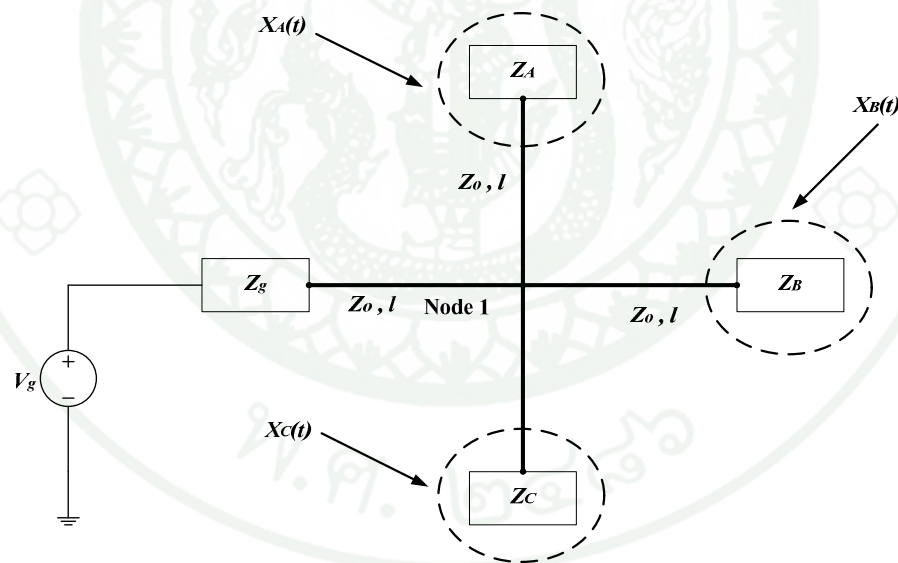


ภาพที่ 28 ขั้นตอนการหาผลตอบแทนทางความถี่

ภาพที่ 28 เป็นขั้นตอนการหาผลตอบสนองทางความถี่ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับคำนวณหาอินพุทอิมพีแดนซ์, แรงดันอินพุท และ แรงดันตกคร่อมที่โหลด ตามลำดับ จากนั้นจึงคำนวณแรงดันตกคร่อมที่โหลดที่ความถี่เริ่มต้นต่อแรงดันที่แหล่งจ่ายมาหาผลตอบสนองทางความถี่ทุกๆ ช่วงความถี่ครอบคลุมย่านความถี่กว้าง 2-30 MHz.

4. การหาผลตอบสนองทางเวลาที่โหลดปลายสายส่ง

การหาผลตอบสนองทางเวลานั้น สามารถทำได้โดยอ้อมผ่านการหาผลตอบสนองทางความถี่ แล้วนำมา Invert Transform จะได้เป็นผลตอบสนองทางเวลา ในกรณีของผลตอบสนองต่อ พัลส์สี่เหลี่ยม (Rectangular Pulse) ความกว้าง T และขนาด A ต้องให้น้ำหนักของแต่ละความถี่ที่กระตุ้นโครงข่ายสายไฟฟ้า f สอดคล้องกับ Sinc function ซึ่งมี อินเวอร์สฟูเรียรอสฟอร์ม (Invert Fourier Transform) เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เมื่อได้ผลตอบสนองต่อ Sinc function แล้วอินเวอร์สฟูเรียรอสฟอร์มนั้นจะคือผลตอบสนองต่อสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 29 ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลดปลายสายส่ง

ภาพที่ 29 แสดงการหาผลตอบสนองทางเวลาที่โหลดปลายสายส่งแต่ละตัวในโครงข่ายจำลองอย่างง่าย สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมให้มีขนาดสูงที่ 1 V. ซึ่งสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมมีความกว้าง $0.5 \mu s$ โดยให้มีการดีเลย์ไปอีก $0.75 \mu s$ แล้วนำมาแปลงหา

แรงดันแหล่งจ่ายที่มีผลตอบสนองต่อ Sinc function แล้วจากนั้นจึงหาแรงดันคั่นหน้าตอบสนองต่อ Sinc function ไปที่ Node 1 และกระจายแรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายสายส่งตอบสนองต่อ Sinc function แสดงดังต่อไปนี้

$$V_{g_s}(f) = A.T.Sinc(fT) \quad (35)$$

$$V_{in_s}(f) = V_{g_s}(f) * \frac{Z_{in_s}}{(Z_{in_s} + Z_g)} \quad (36)$$

แรงดันตอบสนองต่อ Sinc function ที่ Node 1

$$V_{N1_S}(f) = \left(\frac{V_{in_s}(f)}{e^{\gamma l} + \Gamma_{N1_S} e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma_{N1_S}) \quad (37)$$

$$\Gamma_{N1_S} = \frac{Z_{N1_S} - Z_{o_S}}{Z_{N1_S} + Z_{o_S}} \quad (38)$$

แรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายส่ง Z_A ตอบสนองต่อ Sinc function

$$V_{A_S}(f) = \left(\frac{V_{N1_S}(f)}{e^{\gamma l} + \Gamma_{A_S} e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma_{A_S}) \quad (39)$$

$$\Gamma_{A_S} = \frac{Z_{A_S} - Z_{o_S}}{Z_{A_S} + Z_{o_S}} \quad (40)$$

แรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายส่ง Z_B ตอบสนองต่อ Sinc function

$$V_{B_S}(f) = \left(\frac{V_{N1_S}(f)}{e^{\gamma l} + \Gamma_{B_S} e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma_{B_S}) \quad (41)$$

$$\Gamma_{B_S} = \frac{Z_{B_S} - Z_{o_S}}{Z_{B_S} + Z_{o_S}} \quad (42)$$

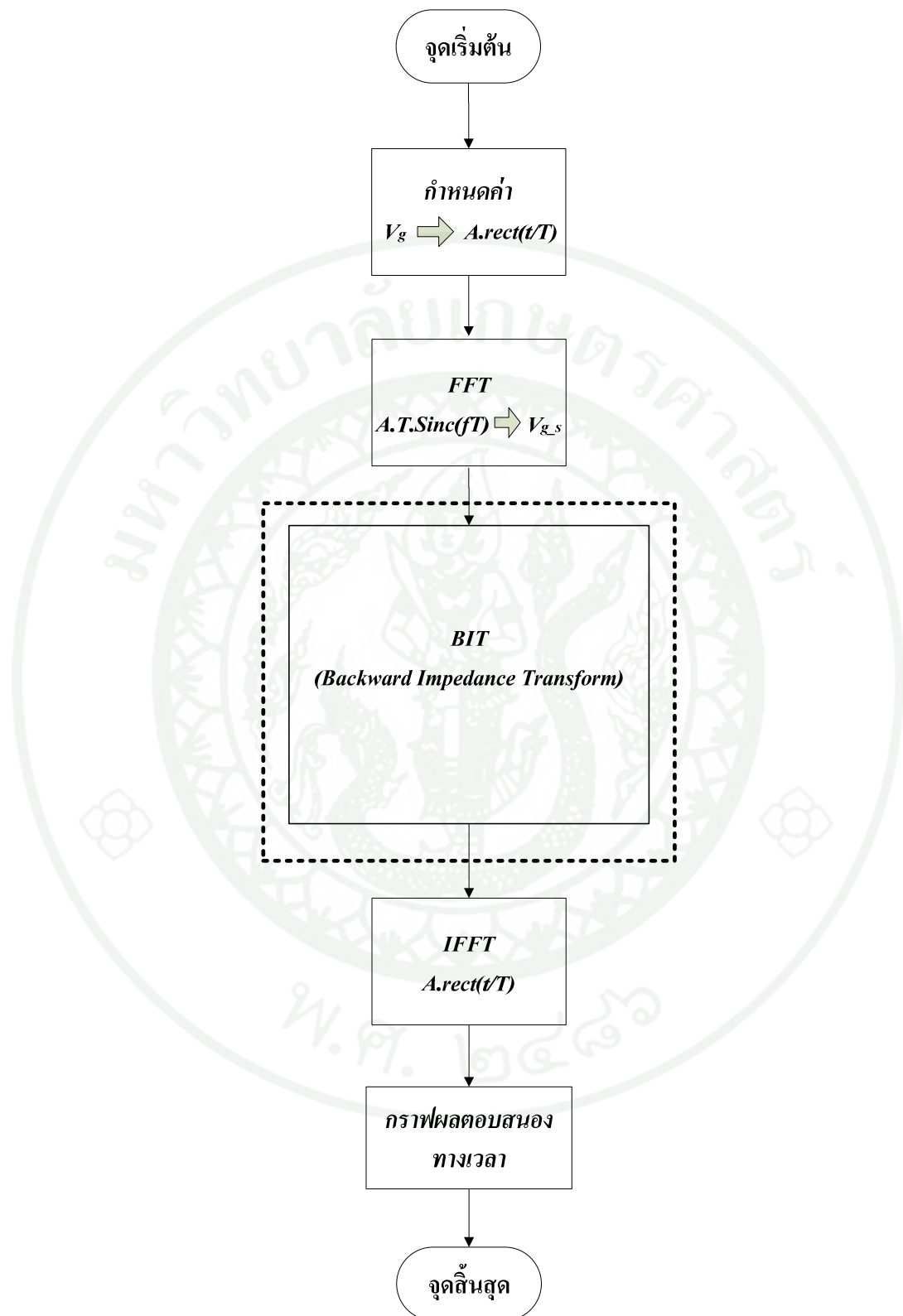
แรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายส่ง Z_C ตอบสนองต่อ Sinc function

$$V_{C_S}(f) = \left(\frac{V_{N1_S}(f)}{e^{\gamma l} + \Gamma_{C_S} e^{-\gamma l}} \right) (1 + \Gamma_{C_S}) \quad (43)$$

$$\Gamma_{C_S} = \frac{Z_{C_S} - Z_{o_S}}{Z_{C_S} + Z_{o_S}} \quad (44)$$

เมื่อได้แรงดันตกคร่อมที่โหลดปลายสายส่ง $V_{A_S}(f)$, $V_{B_S}(f)$ และ $V_{C_S}(f)$ ต่อ Sinc function ครอบคลุมตลอดทั้งย่านความถี่กว้าง 2-30 MHz. แล้วมาทำการอินเวอร์สฟูเรียทราสฟอร์มให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สำหรับขั้นตอนการหาผลตอบสนองทางเวลานั้นต้องกำหนดขนาดแรงดันที่แหล่งจ่ายป้อนให้กับสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมแล้วแปลงเป็นแรงดันตอบสนองต่อซิกซ์ฟังก์ชันทุกๆช่วงความถี่ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่กว้าง 2-30 MHz. ที่โหลดปลายสายส่งจากนั้นแล้วจึงทำการแปลงย้อนกลับมาเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมดังแสดงขั้นตอนภาพที่ 30





ภาพที่ 30 ขั้นตอนการหาผลตอบแทนทางเวลา

5. การหาค่าความจุช่องสัญญาณที่ไหลคปลายสายส่งแต่ละตัว

จากที่ได้พิจารณาที่ไหลคปลายสายส่ง Z_A , Z_B และ Z_C ซึ่งเราสามารถหาค่าความจุช่องสัญญาณไหลคปลายสายส่งที่สนใจแต่ละตัวและหาค่าความจุช่องสัญญาณที่สูงสุดตลอดช่วงความถี่ที่สนใจสำหรับการวิจัยโครงข่ายจำลองอย่างง่าย โดยปกติค่าความจุช่องสัญญาณมักจะคำนวณมาจากทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ดังสมการที่ 45

$$C = \int_{f_1}^{f_2} \log_2 \left[\frac{|H(f)|^2 \cdot PSD_s(f)}{N_o(f)} + 1 \right] df \quad (45)$$

ปัจจัยที่มีผลต่อความจุช่องสัญญาณประกอบไปด้วย

สัญญาณอินพุต

-กำหนดให้มีกำลังงานในแถบความถี่ที่สนใจ โดยที่ $K = PSD_s(f)$ กระจายอย่างสม่ำเสมอในย่านความถี่ที่สนใจ โดยมีผลรวมเท่ากับ 1 W

สัญญาณรบกวน

-กำลังงานของสัญญาณรบกวนที่ไหลคในแถบความถี่ที่สนใจ (Additive White Gaussian Noise) $N_o(f)$

ช่องความจุสัญญาณ

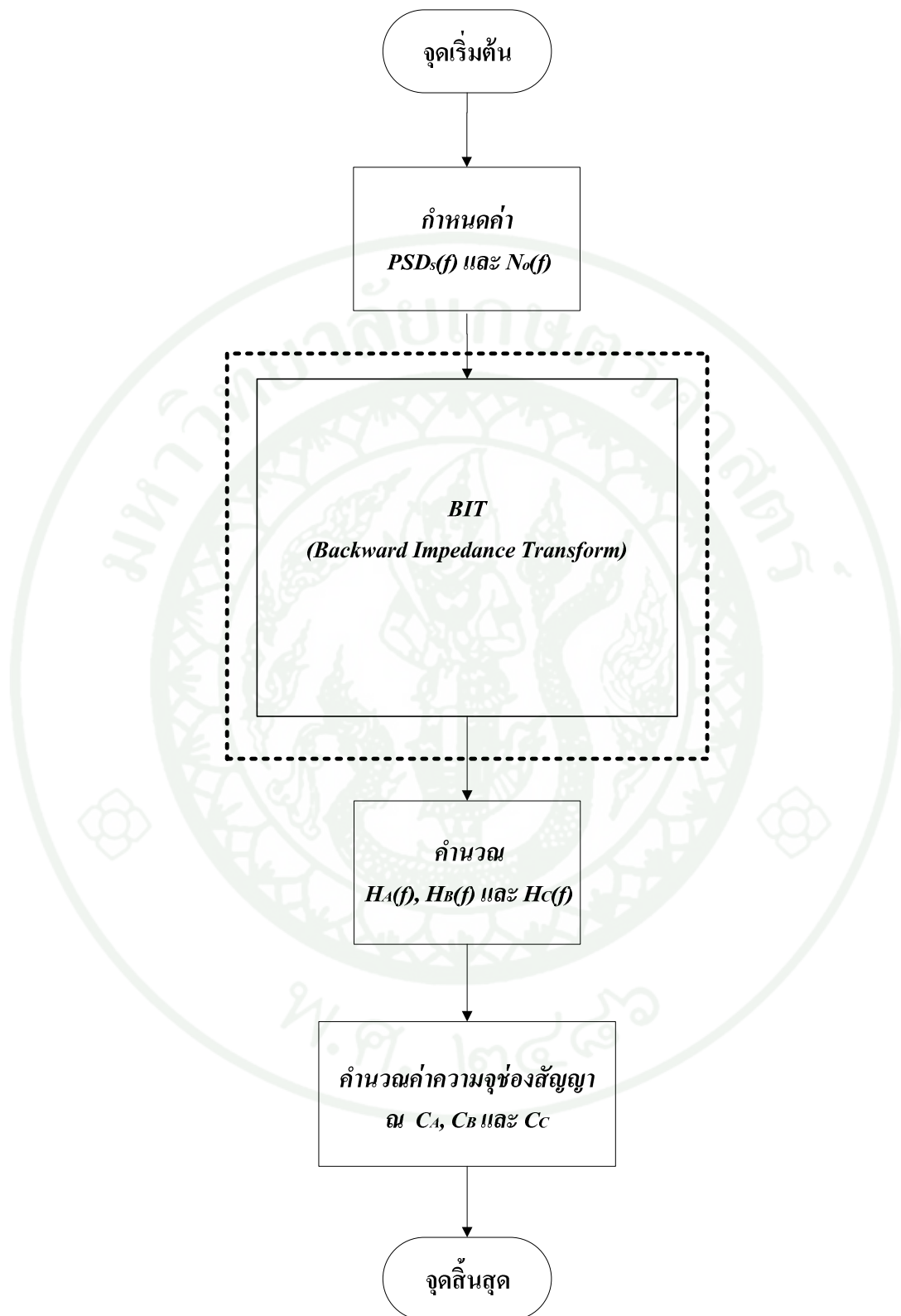
-ใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากวิธี BIT ในการหาความจุช่องสัญญาณ ดังนั้นกำลังที่ไหลค $S(f) = |H(f)|^2 * K$

-ความจุช่องสัญญาณเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้

$$C = \int_{f_1}^{f_2} \log_2 \left[\frac{S(f)}{N_o(f)} + 1 \right] df \quad (46)$$

แบนด์วิดท์

-ย่านความถี่กว้าง 2 – 30 MHz ตามมาตรฐาน Home Plug Standard



ภาพที่ 31 ขั้นตอนการหาค่าความจุของสัญญาณจากทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน

5.1 การหาค่าความจุช่องสัญญาณด้วยการกระจายกำลังงานอย่างสม่ำเสมอในแถบความถี่กว้าง ซึ่งประกอบด้วยดังนี้

สัญญาณอินพุต

- กำหนดค่ากำลังงาน 1 W ย่านความถี่กว้าง 2-30 MHz
- ค่ากำลังงานของสัญญาณภายในย่านความถี่กว้างสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} PSD_s(f) &= 10 \log_{10} \left[\frac{1}{28 \times 10^6} \right] \\ &= -74.5 \frac{dBW}{Hz} \text{ หรือ } 10^{-74.5/10} W \end{aligned} \quad (47)$$

สัญญาณรบกวน

- กำลังงานของสัญญาณรบกวนสม่ำเสมอที่ไหลในแถบความถี่คือย่านความถี่กว้าง 2-30 MHz ได้เลือกค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ -85 dBW/Hz หรือ $10^{-85/10} \text{ W/Hz}$ สำหรับนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณในงานวิจัยนี้

ช่องสัญญาณ

- นำทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่หาได้จากงานวิจัยนี้มาใช้ในการคำนวณ
- ค่ากำลังงานของสัญญาณที่ไหล คำนวณได้จาก

$$S(f) = PSD_s(f) * |H(f)|^2 \quad (48)$$

แบนด์วิดท์

- ย่านความถี่กว้าง 2 – 30 MHz ตามมาตรฐาน Home Plug Standard

ซึ่งจากค่าพารามิเตอร์สามารถคำนวณหาความจุช่องสัญญาณที่ไหลปลายสายส่ง Z_A , Z_B และ Z_C สามารถคำนวณหาได้ตามลำดับ ดังนี้

$$C_A = 28 * 10^6 \log_2 \left[\frac{|H_A(f)|^2 \cdot PSD_S(f)}{N_o(f)} + 1 \right] \quad (49)$$

$$C_B = 28 * 10^6 \log_2 \left[\frac{|H_B(f)|^2 \cdot PSD_S(f)}{N_o(f)} + 1 \right] \quad (50)$$

$$C_C = 28 * 10^6 \log_2 \left[\frac{|H_C(f)|^2 \cdot PSD_S(f)}{N_o(f)} + 1 \right] \quad (51)$$

- เมื่อ C_A คือค่าความจุช่องสัญญาณที่โหลดปลายสายส่ง Z_A
 C_B คือค่าความจุช่องสัญญาณที่โหลดปลายสายส่ง Z_B
 C_C คือค่าความจุช่องสัญญาณที่โหลดปลายสายส่ง Z_C

5.2 การหาค่าความจุช่องสัญญาณด้วยการปรับอัตราส่วนของกำลังงานในแถบความถี่กว้าง (Water Filling)

สัญญาณอินพุต

-กำหนด f_i เป็นความกว้างของทุกๆความถี่ย่อย สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$f_i = \Delta f * i \quad (52)$$

โดยที่ Δf คือ แถบความถี่ย่อยเท่ากับ 1,000 Hz

i คืออันดับของช่องความถี่ย่อยตั้ง 1,2, ..., N

-หาค่า λ_i^{-1} ซึ่งเป็นการอินเวสต์สัญญาณรบกวนต่อค่ากำลังงานของผลตอบสนองทางความถี่ในแต่ละช่วงความถี่ย่อยตลอดทั้งช่วงความถี่กว้าง ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\lambda_i^{-1} = \frac{N_o}{|H(f_i)|^2} \quad (53)$$

-กำหนดค่า μ หรือ ค่าระดับกำลังงาน (Power Level) เพื่อป้อนอัตราส่วนค่ากำลังงานในช่วงความถี่ย่อยตลอดทั้งแถบความถี่กว้าง

-หาค่า P_i ซึ่งเป็นค่ากำลังงานในแต่ละช่วงความถี่ย่อยของค่า λ_i^{-1} สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_i = (\mu - \lambda_i^{-1})\Delta f \quad (54)$$

-กำหนดค่ากำลังงานรวม P_T ต้องมีค่าเท่ากับ 1 W ของสัญญาณอินพุตรวมทุกๆช่อง ความถี่ย่อยซึ่ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_T = \sum_{i=1}^N (\mu - \lambda_i^{-1}) \Delta f \quad (55)$$

ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่แหล่งจ่าย หรือ ค่ากำลังงานของที่แหล่งจ่ายแต่ละช่องความถี่ย่อยคือ

$$PSD_S(f_i) = P_i \quad (56)$$

สัญญาณรบกวน

-กำลังงานของสัญญาณรบกวนสม่ำเสมอที่ไหลคในแถบความถี่คือย่านความถี่กว้าง 2-30 MHz ได้เลือกค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ -85 dBW/Hz หรือ $10^{-85/10}$ W สำหรับนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณในงานวิจัยนี้

ช่องสัญญาณ

- นำทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่หาได้จากงานวิจัยนี้มาใช้ในการคำนวณ
- ค่ากำลังงานของสัญญาณที่ไหลค คำนวณได้จาก

$$S(f_i) = PSD_S(f_i) * |H(f_i)|^2 \quad (57)$$

ซึ่งจากค่าพารามิเตอร์สามารถคำนวณค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดแบบ Water Filling ที่ไหลคปลายสายส่ง Z_{11} , Z_3 และ Z_L สามารถคำนวณหาได้ตามลำดับ ดังนี้

$$C_A = \sum_{i=1}^N \Delta f \log_2 \left[\frac{|H_A(f_i)|^2 \cdot PSD_S(f_i)}{N_o(f)} + 1 \right] \quad (58)$$

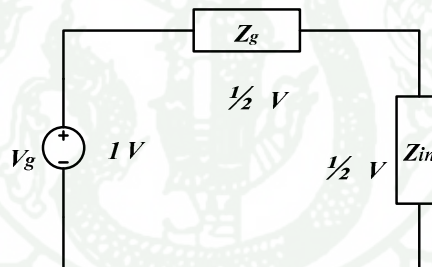
$$C_B = \sum_{i=1}^N \Delta f \log_2 \left[\frac{|H_B(f_i)|^2 \cdot PSD_S(f_i)}{N_o(f)} + 1 \right] \quad (59)$$

$$C_C = \sum_{i=1}^N \Delta f \log_2 \left[\frac{|H_C(f_i)|^2 \cdot PSD_S(f_i)}{N_o(f)} + 1 \right] \quad (60)$$

เมื่อ C_A คือค่าความจุช่องสัญญาณที่โหลดปลายสายส่ง Z_A
 C_B คือค่าความจุช่องสัญญาณที่โหลดปลายสายส่ง Z_B
 C_C คือค่าความจุช่องสัญญาณที่โหลดปลายสายส่ง Z_C

5.3 การหาค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดตลอดทั้งแถบความถี่กว้าง (Upper -Bound)

เป็นการหาค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดครอบคลุมตลอดในแถบความถี่กว้าง(Upper Bound) ของโครงข่ายจำลองอย่างง่าย โดยจะคิดในกรณี Matched Load ซึ่งค่ากำลังงานทรานสเฟอร์ฟังก์ชันสามารถพิจารณา ได้ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 โครงข่ายจำลองแบบ Matched Load

ภาพที่ 32 เป็นการพิจารณาสำหรับในกรณี Matched Load เมื่อแรงดันที่แหล่งจ่าย $V_g = 1 V$ ดังนั้นแรงดันที่ Z_g และ Z_{in} จึงมีค่าเท่ากันคือ $\frac{1}{2} V$ สำหรับการหาค่ากำลังงานนั้นสามารถทำได้โดยการนำค่าแรงดันมายกกำลังสองดังแสดงในสมการ 62

$$V_g = V_{Zg} + V_{Zin} \quad (61)$$

$$E[V_g^2] = E[(V_{Zg} + V_{Zin})^2] \quad (62)$$

$$E[V_g^2] = E[V_{Zg}^2 + 2(V_{Zg} \cdot V_{Zin}) + V_{Zin}^2] \quad (63)$$

เมื่อแรงดันที่ V_{Zg} กับ V_{Zin} มีค่าเท่ากัน ดังนั้นสมการ 63 จะเป็น

$$E[V_g^2] = 4E[V_{Zin}^2] \quad (64)$$

ดังนั้นกรณี Matched Load ซึ่งค่ากำลังงานของทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน $|H(f)|^2$ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{4}$ จึงสามารถหาค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดของโครงข่ายได้ดังนี้

$$C = 28 * 10^6 \log_2 \left[\frac{1}{4} * \frac{PSD_S(f)}{No(f)} + 1 \right] \quad (65)$$

จากที่แนวคิดข้างต้นเป็นวิธีการย้ายค่าอิมพีแดนซ์แบบย้อนกลับ(Backward Impedance Transform, BIT) แล้วนำค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่ไหลคลายสายส่งของโครงข่ายจำลองอย่างง่าย โดยค่าที่หาได้จึงนำไปคำนวณค่าความจุช่องสัญญาณ(Channel Capacity) ในแต่ละโหนดที่ปลายสายส่งและหาค่าความจุช่องสัญญาณสูงสุดของโครงข่ายจำลองอย่างง่าย ซึ่งการคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณนั้นสามารถคิดทั้งแบบการกระจายค่ากำลังงานอย่างสม่ำเสมอครอบคลุมตลอดทั้งความถี่กว้างและแบบ Water Filling ครอบคลุมในย่านความถี่กว้าง

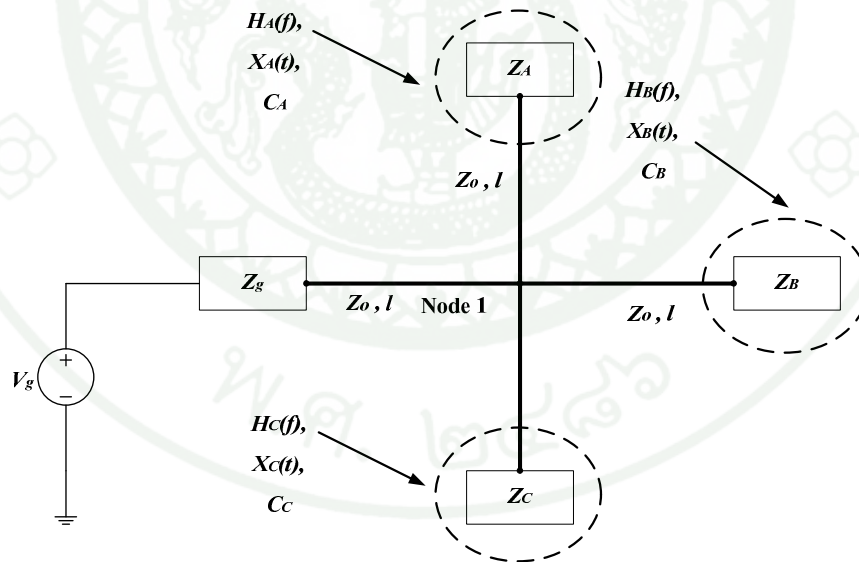
ผลและวิจารณ์

การวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการหาความจุของสัญญาณการสื่อสารแถบความถี่กว้างบนสายไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคารด้วยการนำวิธีการหาอิมพีแดนซ์แบบย้อนกลับ (Backward Impedance Transform, BIT) มาใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆภายในโครงข่ายจำลอง โดยมีผลทดลองที่ได้คือ

- ผลตอบสนองทางความถี่ที่ไหลคปลายสายส่ง
- ผลตอบสนองทางเวลาที่ไหลคปลายสายส่งและ
- ค่าความจุของสัญญาณที่ไหลคปลายสายส่ง

โครงข่ายจำลองสำหรับการวิจัยประกอบไปด้วย 3 โครงข่ายได้แก่ โครงข่ายอย่างง่าย และโครงข่ายแบบซับซ้อน และโครงข่ายสถานีของสถานีโทรทัศน์แห่งประเทศไทย NBT ดังต่อไปนี้

1. โครงข่ายจำลองอย่างง่าย

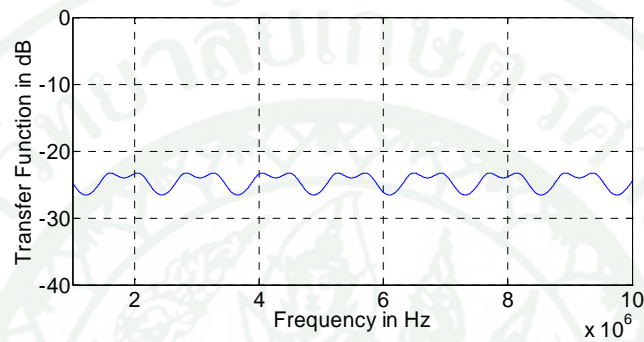


ภาพที่ 33 โครงข่ายจำลองอย่างง่าย

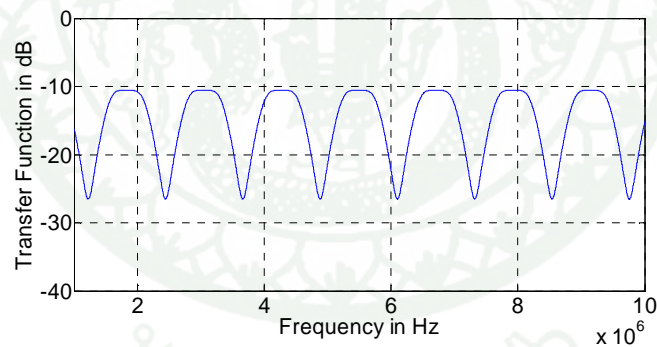
จากภาพที่ 33 เป็นโครงข่ายจำลองอย่างง่ายเพื่อนำมาใช้วิจัยด้วยวิธีแบบ BIT โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ แรงดันที่แหล่งจ่าย 1 V สายส่งทุกๆช่วงมีความยาว 100 เมตร อิมพีแดนซ์ที่

แหล่งจ่าย 456Ω อิมพีแดนซ์สายส่งและอิมพีแดนซ์ Z_b มีค่าเท่ากับ 234Ω อิมพีแดนซ์ Z_A 50Ω และอิมพีแดนซ์ Z_C 50Ω โดยมีค่าคาปาซิแตนซ์ $C = 17.5 \text{ pF/m}$ และค่าอินดักแตนซ์ $L = 0.96 \mu\text{H/m}$ ซึ่งสามารถนำวิธีแบบ BIT มาใช้หาผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

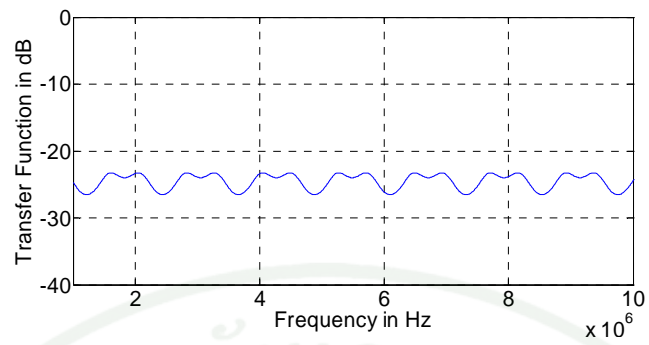
1.1 ผลตอบสนองทางความถี่



ภาพที่ 34 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_A

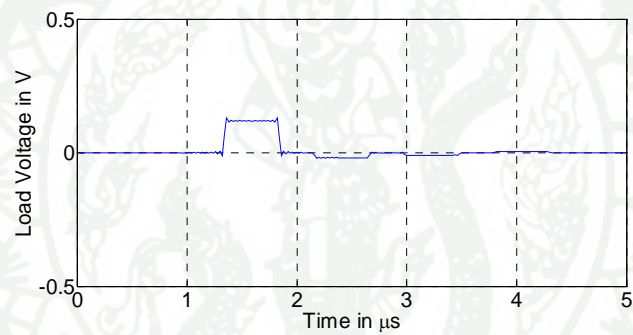


ภาพที่ 35 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_B (Matched Load)

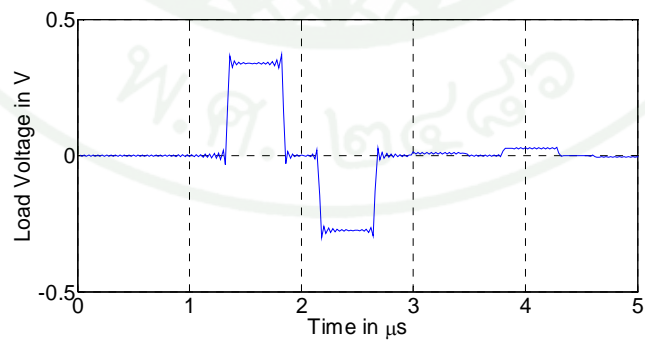


ภาพที่ 36 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_C

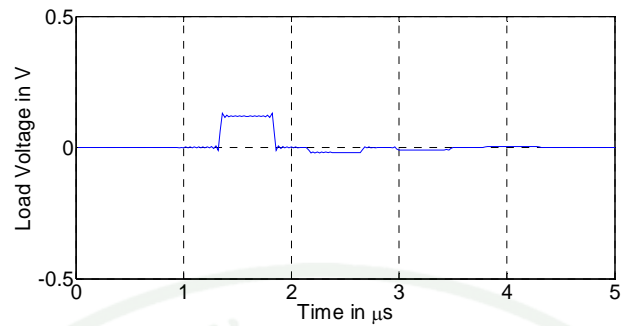
1.2 ผลตอบสนองทางเวลา



ภาพที่ 37 ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_A



ภาพที่ 38 ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_B (Matched Load)



ภาพที่ 39 ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_C

1.3 ความจุช่องสัญญาณ

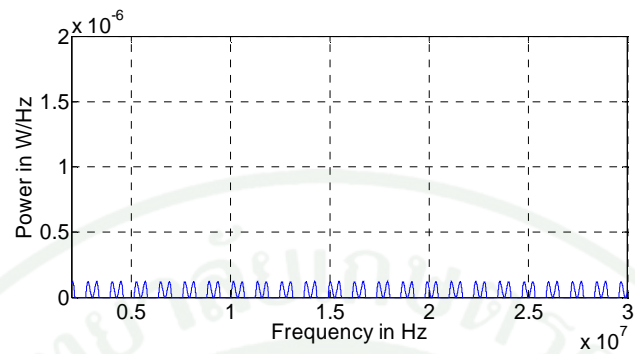
1.3.1 ความจุช่องสัญญาณแบบการกระจายค่ากำลังงานอย่างสม่ำเสมอ

- จากทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่หาได้ในแต่ละ โหลดปลายสายส่งซึ่งสามารถนำทรานสเฟอ์ฟังก์ชันมาคำนวณหาความจุช่องสัญญาณที่อิมพีแดนซ์ปลายสายส่ง Z_A , Z_B และ Z_C ด้วยการกระจายค่ากำลังงานอย่างสม่ำเสมอครอบคลุมตลอดทั้งช่วงความถี่กว้าง 2-30 MHz ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2

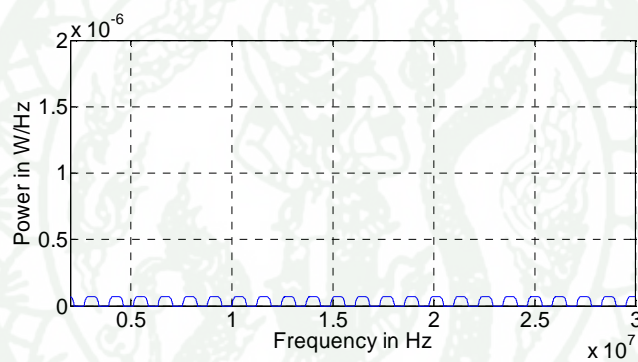
ตารางที่ 2 ค่าความจุช่องสัญญาณแบบการกระจายค่ากำลังงาน โคร่งข่ายจำลองอย่างง่าย

| โครงข่ายอย่างง่าย | ลักษณะของโหลด | ค่าความจุ (Mbps) |
|--------------------|--------------------------|--------------------|
| โหลดบน (Z_A) | Unmatched and single tap | 1.64 |
| โหลดล่าง (Z_C) | Unmatched and single tap | 1.64 |
| โหลดกลาง (Z_B) | Matched | 16.08 |

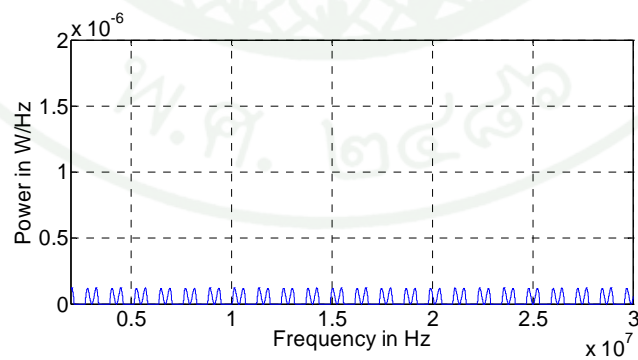
1.3.2 ความจุช่องสัญญาณแบบ Water Filling



ภาพที่ 40 ระดับกำลังงานที่โหลด Z_A



ภาพที่ 41 ระดับกำลังงานที่โหลด Z_B (Matched Load)



ภาพที่ 42 ระดับกำลังงานที่โหลด Z_C

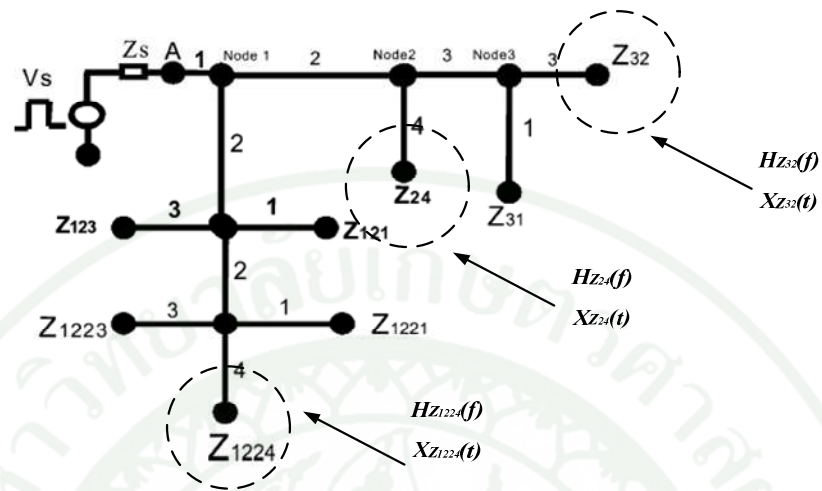
-จากทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่หาได้ในแต่ละโหนดปลายสายส่งซึ่งสามารถอินเวส สัญญาณรบกวนต่อทรานสเฟอ์ฟังก์ชันเพื่อหาค่ากำลังงานที่ละช่วงความถี่แล้วจึงนำมาคำนวณหา ค่าความจุช่องสัญญาณที่อิมพีแดนซ์ปลายสายส่ง Z_A , Z_B และ Z_C ด้วยการปรับอัตราค่ากำลังงานใน แต่ละช่องความถี่ที่สนใจ หรือ Water Filling เพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความจุช่องสัญญาณแบบ Water Filling โคร่งข่ายจำลองอย่างง่าย

| โครงข่ายอย่างง่าย | ลักษณะของโหนด | ค่าความจุ (Mbps) |
|--------------------|--------------------------|--------------------|
| โหนดบน (Z_A) | Unmatched and single tap | 1.96 |
| โหนดล่าง (Z_C) | Unmatched and single tap | 1.96 |
| โหนดกลาง (Z_B) | Matched | 20.86 |

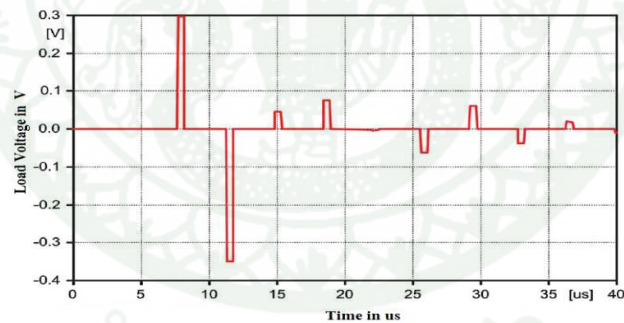
จะเห็นได้ว่าเมื่อได้นำวิธี BIT มาทดสอบกับโครงข่ายจำลองอย่างง่าย พบว่าผลตอบสนอง ทางความถี่ที่โหนด Z_B จะมีการตอบสนองทางความถี่สูงกว่าโหนดตัวอื่นๆ ส่วนผลตอบสนองทาง เวลาที่โหนด Z_B จะมีผลตอบสนองทางเวลาที่ดีกว่าโหนดตัวอื่นๆเช่นกันรวมทั้งความจุช่องสัญญาณ ที่โหนดปลายสายส่งตัวอื่นๆภายในโครงข่ายนั้น ค่าความจุช่องสัญญาณที่โหนด Z_B จะมีค่าความจุ ช่องสัญญาณมากกว่าตัวอื่นๆทั้งการวิเคราะห์ค่าความจุช่องสัญญาณแบบกระจายกำลังงาน สม่่าเสมอครอบคลุมตลอดช่วงความถี่กว้างและแบบ Water Filling

2. โครงข่ายจำลองที่ซับซ้อนของ J. Anatory



ภาพที่ 43 โครงข่ายจำลองที่ซับซ้อนของ J. Anatory

ที่มา: Anatory (2009)



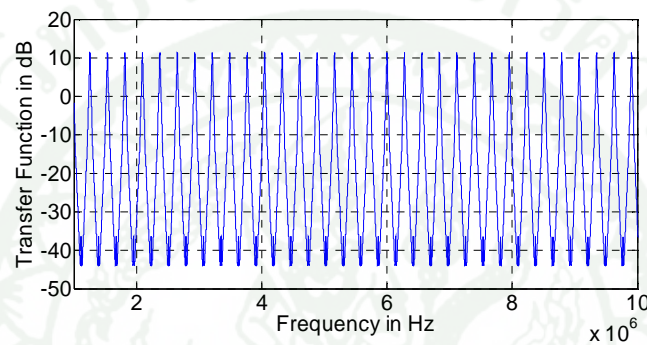
ภาพที่ 44 ผลตอบสนองทางเวลาจากโครงข่ายจำลองที่ซับซ้อนของ J. Anatory

ที่มา: Anatory (2009)

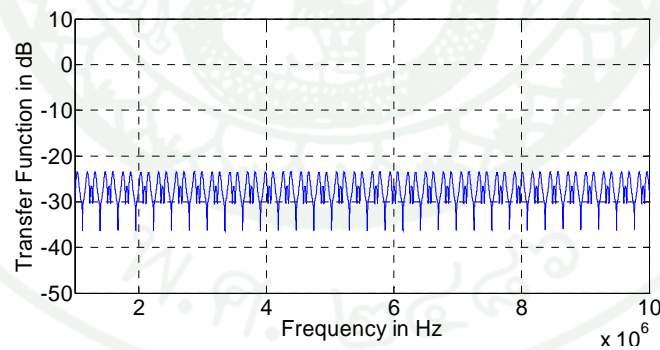
จากภาพที่ 43 โครงข่ายจำลองของ Anatory ที่มีความซับซ้อน สามารถนำมาแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบด้วยการใช้วิธี BIT โดยพิจารณาที่โหลด Z_{1224} , Z_{24} และ Z_{32} ในการหาผลตอบสนองทางเวลาจากโครงข่ายจำลองของ Anatory ซึ่งผลตอบสนองทางเวลาที่ Anatory

ทดลองนั้นได้แสดงภาพที่ 44 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายจำลองของ Anatory แรงดันที่แหล่งจ่าย 2 V อิมพีแดนซ์ Z_s และ Z_{32} มีค่าเท่ากับ 456Ω ส่วนโหลดตัวอื่นๆมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω ระยะเวลาทุกๆช่วงของสายส่งยาว 500 เมตรและค่าคาปาซิแตนซ์ $C = 7.84 \text{ pF/m}$ และค่าอินดักแตนซ์ $L = 1.64 \mu\text{H/m}$ จากค่าพารามิเตอร์นี้สามารถนำมาทดลองด้วยวิธีคิดแบบ BIT ได้ผลทดลองดังนี้

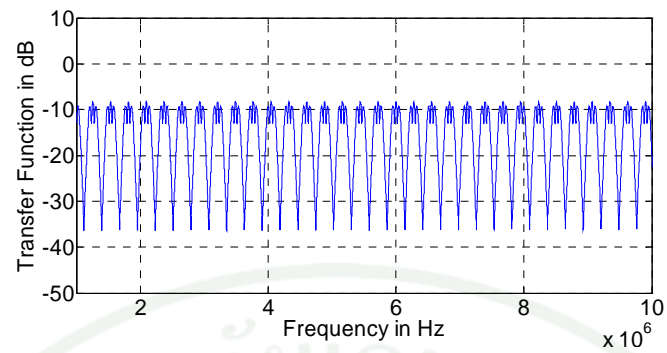
2.1 ผลตอบสนองทางความถี่



ภาพที่ 45 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{1224}

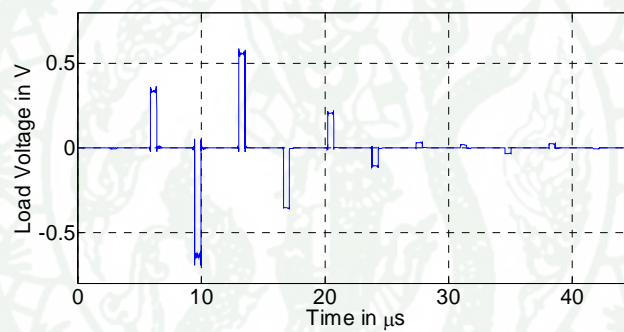


ภาพที่ 46 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{24}

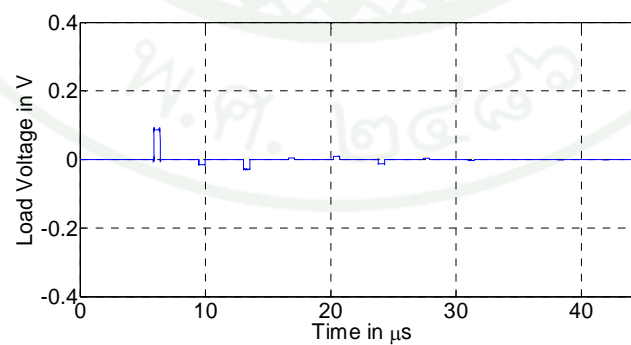


ภาพที่ 47 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{32} (Matched Load)

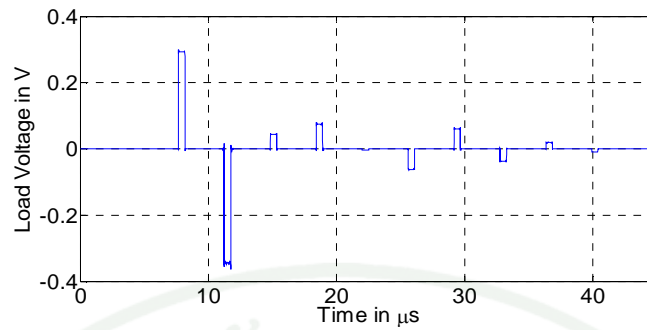
2.2 ผลตอบสนองทางเวลา



ภาพที่ 48 ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_{1224}



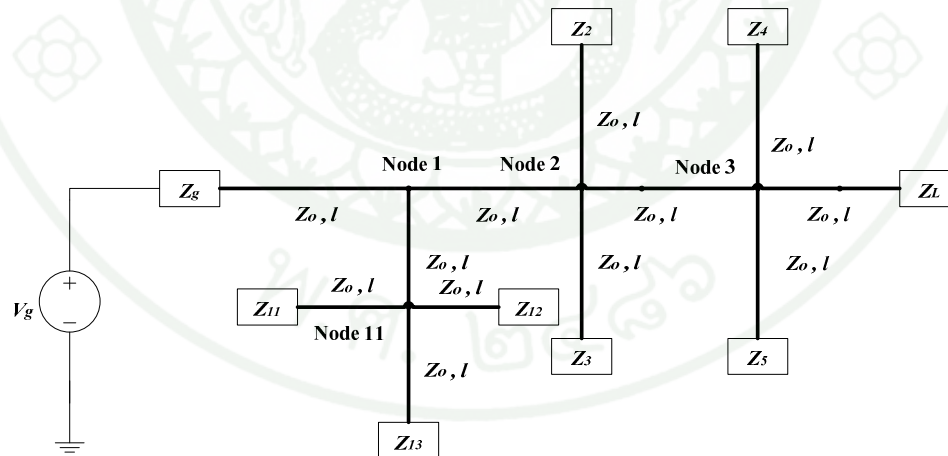
ภาพที่ 49 ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_{24}



ภาพที่ 50 ผลตอบสนองทางเวลาที่โหลด Z_{32} (Matched Load)

ผลทดลองจากการหาผลตอบสนองทางความถี่และผลตอบสนองทางเวลาด้วยวิธี BIT นั้น จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่และผลตอบสนองทางเวลานั้นจะมีขนาดที่แตกต่างกันออกไปตามระยะทางและค่าอิมพีแดนซ์ โดยอิมพีแดนซ์ Z_{32} จะมีผลการทดลองที่ดีกว่าอิมพีแดนซ์ตัวอื่นๆ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ Z_{32} จะมีลักษณะเข้ากับสายส่งและผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_{32} มีลักษณะที่เหมือนกันกับผลตอบสนองทางเวลาของ Anatory

3. โครงข่ายจำลองของสถานีโทรทัศน์แห่งประเทศไทย NBT

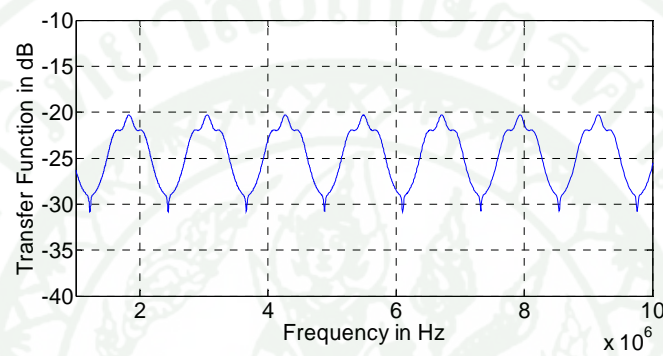


ภาพที่ 51 โครงข่ายจำลองของ NBT

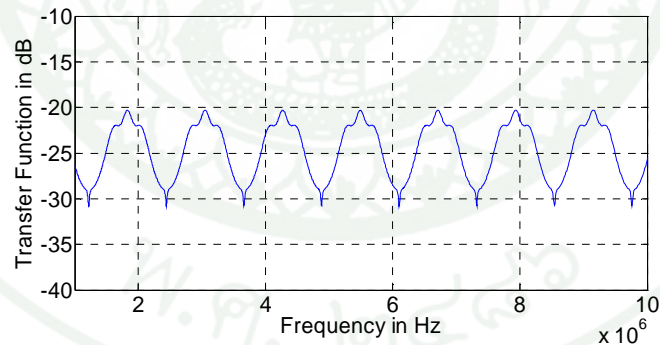
จากภาพที่ 51 โครงข่ายจำลองของ NBT สายไฟฟ้ายี่ห้อ HPM รุ่น H07V-U แบบแกนเดี่ยว ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัด $1 \times 2.5 \text{ mm}^2$. โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ปลายสายส่งทุกตัวเท่ากับ 50Ω

(Unmatched Load) แรงดันเท่ากับ 1 V มีค่าคาปาซิแตนซ์ $C = 17.5\text{ pF/m}$ และค่าอินดักแตนซ์ $L = 0.96\text{ }\mu\text{H/m}$ อิมพีแดนซ์ Z_g และ Z_L มีค่าเท่ากับ $234\text{ }\Omega$ และมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเท่ากับ $234\text{ }\Omega$ โดยผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

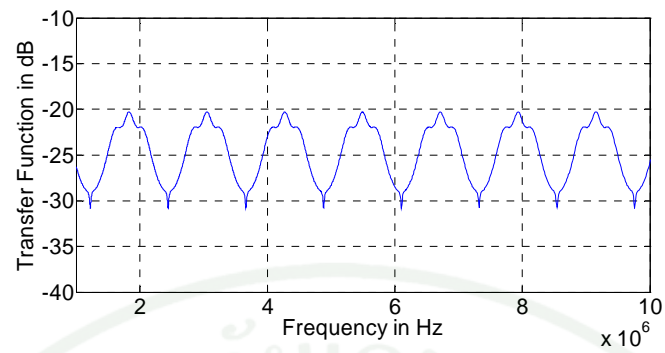
3.1 ผลตอบสนองทางความถี่



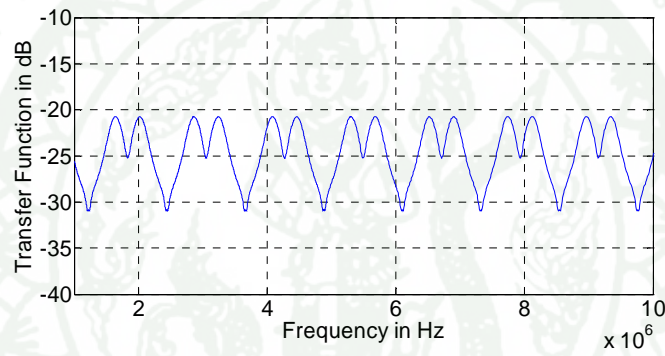
ภาพที่ 52 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{11}



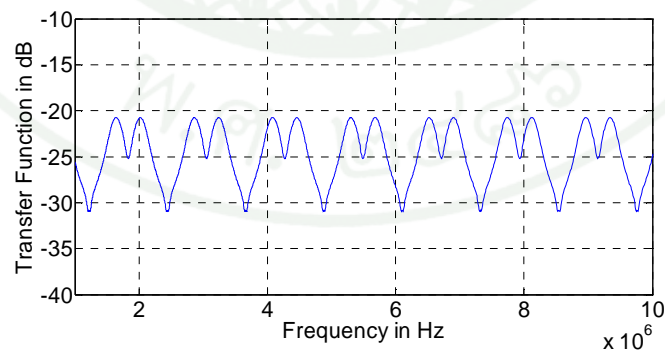
ภาพที่ 53 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{12}



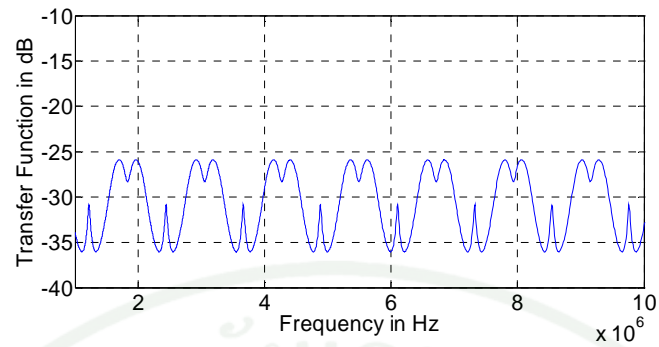
ภาพที่ 54 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_{13}



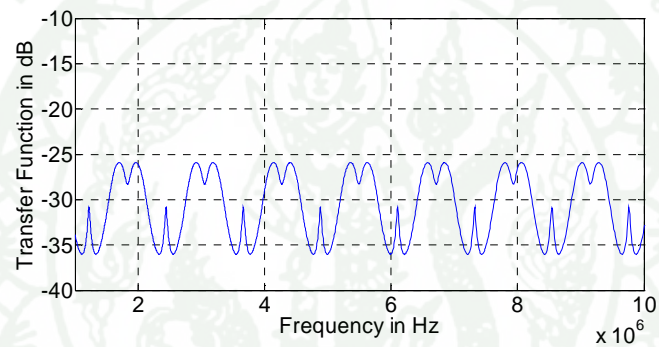
ภาพที่ 55 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_2



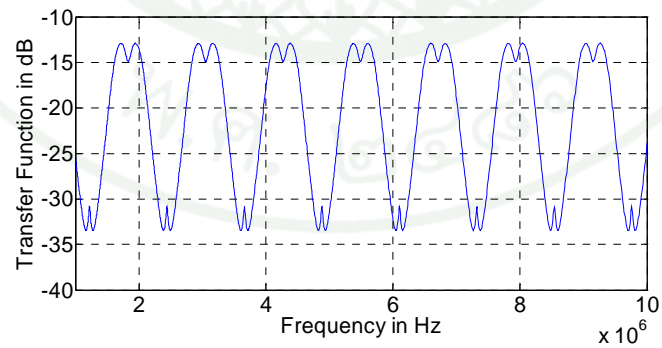
ภาพที่ 56 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_3



ภาพที่ 57 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_4

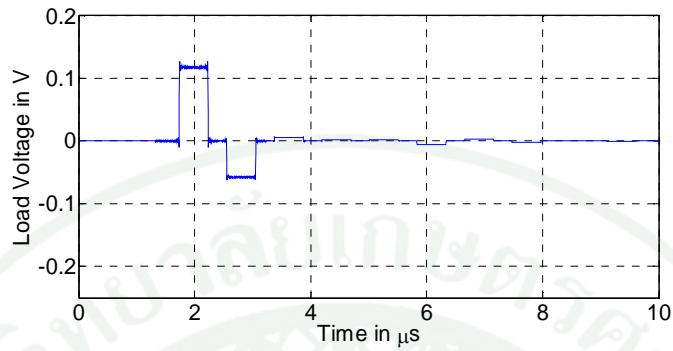
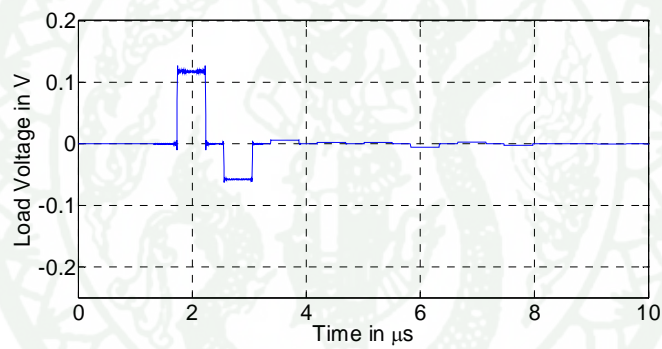
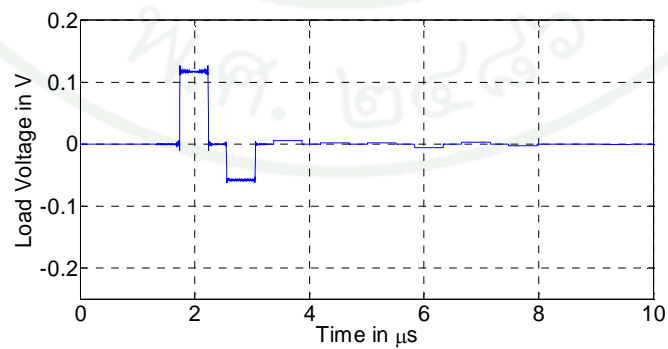


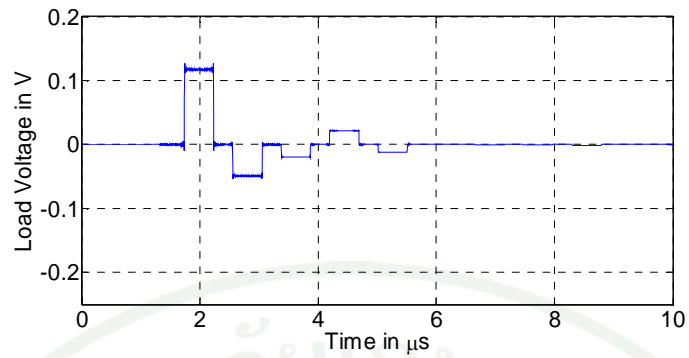
ภาพที่ 58 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_5



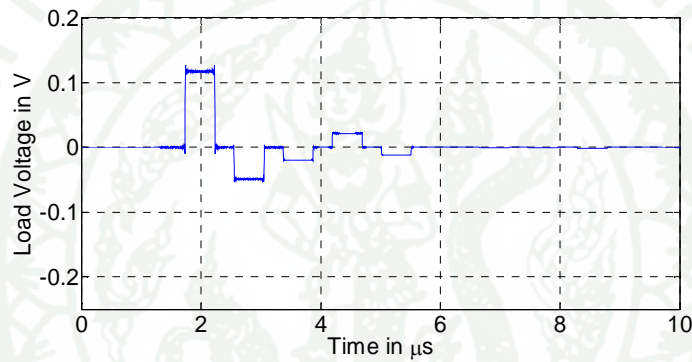
ภาพที่ 59 ผลตอบสนองทางความถี่ที่โหลด Z_L (Matched Load)

3.2 ผลตอบสนองทางเวลา

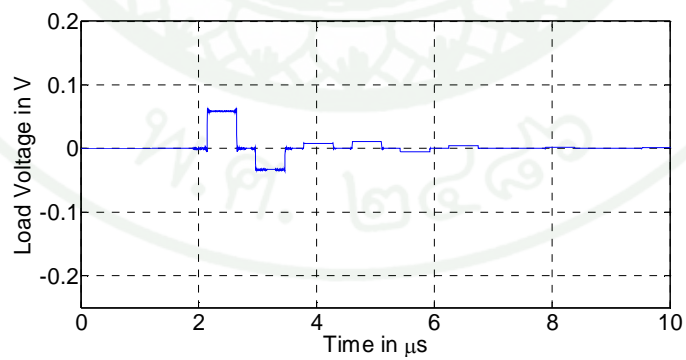
ภาพที่ 60 ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_{11} ภาพที่ 61 ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_{12} ภาพที่ 62 ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_{13}



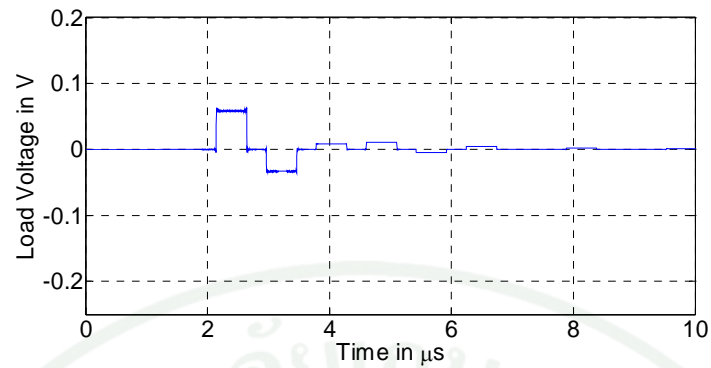
ภาพที่ 63 ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_2



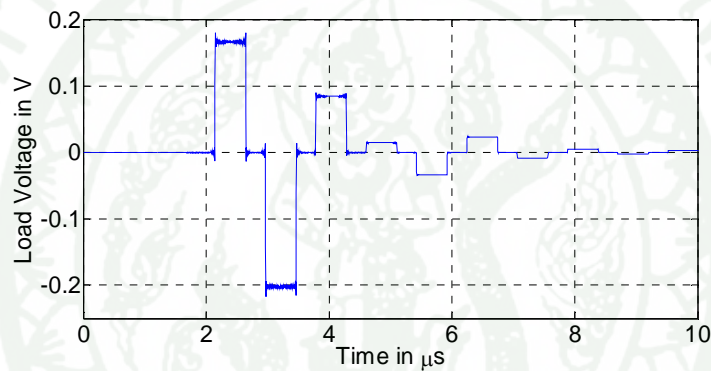
ภาพที่ 64 ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_3



ภาพที่ 65 ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_4



ภาพที่ 66 ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_5



ภาพที่ 67 ผลตอบสนองทางเวลาที่อิมพีแดนซ์ Z_L (Matched Load)

3.3 ความจุช่องสัญญาณ

3.3.1 ความจุช่องสัญญาณแบบการกระจายค่ากำลังงานอย่างสม่ำเสมอ

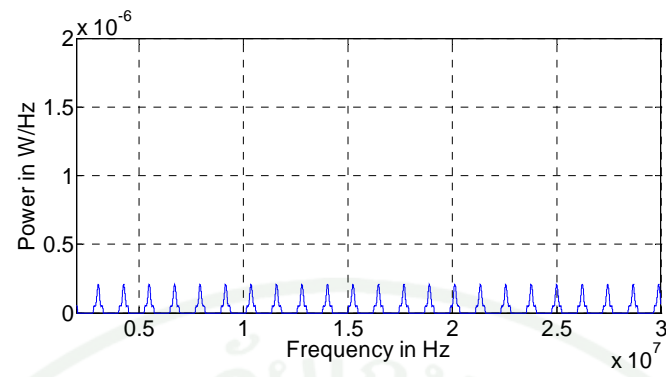
-จากทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่หาได้ในแต่ละโหนดปลายสายส่งซึ่งสามารถนำทรานสเฟอ์ฟังก์ชันมาคำนวณหาความจุช่องสัญญาณที่อิมพีแดนซ์ปลายสายส่ง ด้วยการกระจายค่ากำลังงานอย่างสม่ำเสมอครอบคลุมตลอดทั้งช่วงความถี่กว้าง 2-30 MHz ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความจุช่องสัญญาณแบบการกระจายค่ากำลังงานโครงข่ายจำลอง NBT

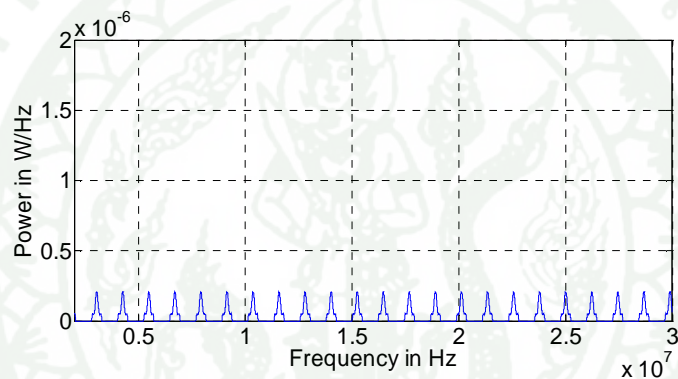
| โครงข่าย NBT | ลักษณะของโหนด | ค่าความจุ (Mbps) |
|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| โหนดใกล้ (Z_{11}) | Unmatched and branchy | 1.90 |
| โหนดใกล้ (Z_{12}) | Unmatched and branchy | 1.90 |
| โหนดใกล้ (Z_{13}) | Unmatched and branchy | 1.90 |
| โหนดกลาง (Z_2) | Unmatched and single tap | 1.89 |
| โหนดกลาง (Z_3) | Unmatched and single tap | 1.89 |
| โหนดไกล (Z_1) | Unmatched and single tap | 0.54 |
| โหนดไกล (Z_4) | Unmatched and single tap | 0.54 |
| โหนดไกล (Z_L) | Matched | 7.38 |

3.3.2 ความจุช่องสัญญาณแบบ Water Filling

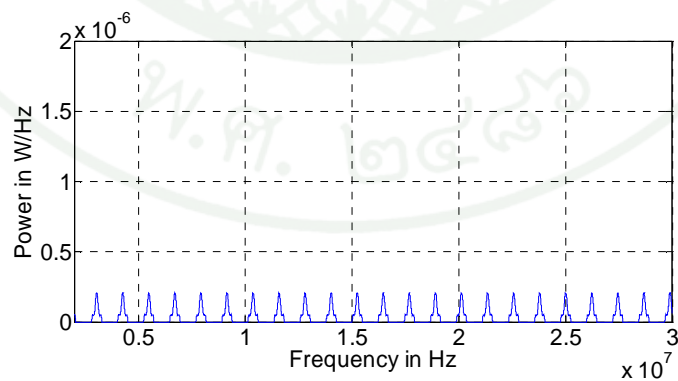
ภาพต่อจากนี้เป็นการแสดงค่ากำลังงานแบบ Water Filling ที่แต่ละโหนดปลายสายส่งในโครงข่ายของสถานีโทรทัศน์แห่งประเทศไทย NBT โดยจะพิจารณาเฉพาะค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่มีค่ามากกว่าระดับสัญญาณรบกวน โดยค่ากำลังงานจะรวมกันแล้วเท่ากับกำลังงานที่แหล่งจ่าย ตลอดในย่านความถี่กว้าง



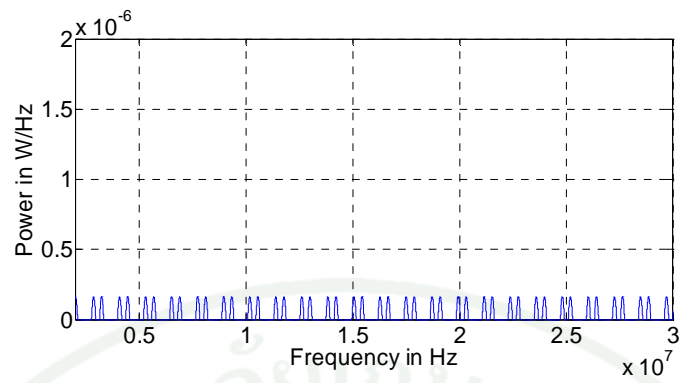
ภาพที่ 68 ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_{11}



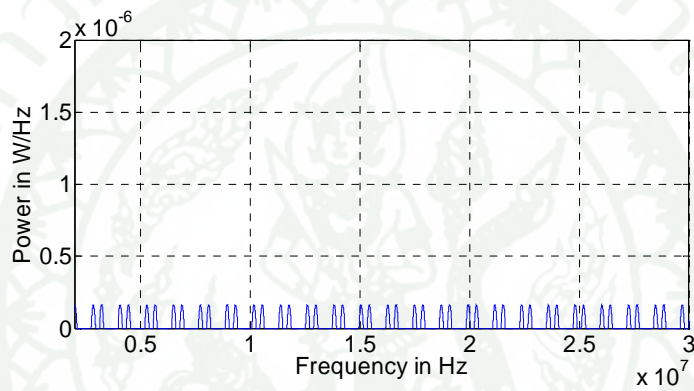
ภาพที่ 69 ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_{12}



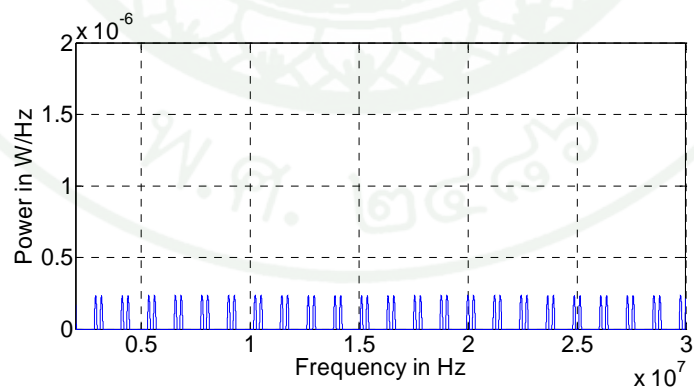
ภาพที่ 70 ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_{13}



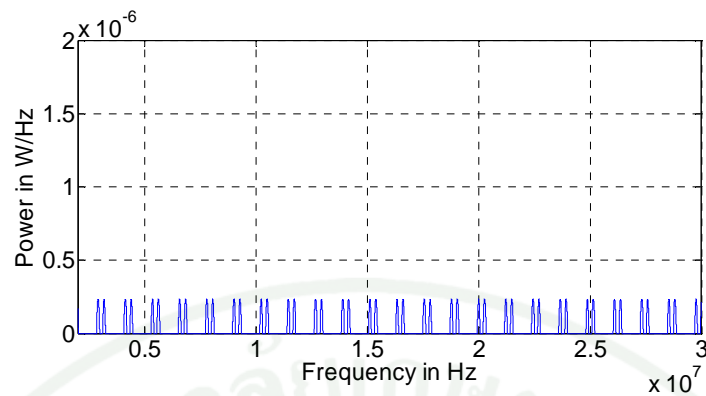
ภาพที่ 71 ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_2



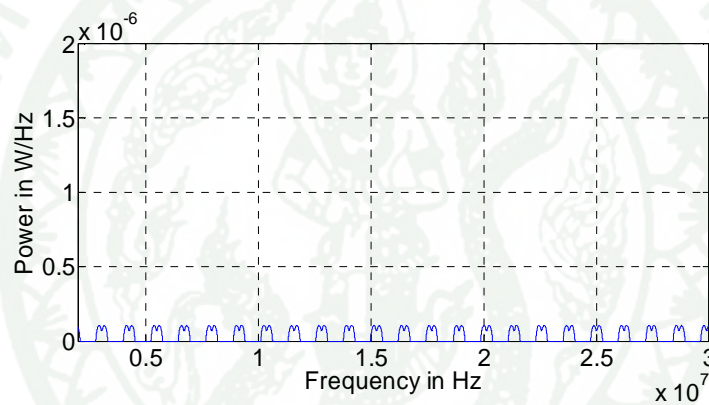
ภาพที่ 72 ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_3



ภาพที่ 73 ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_4



ภาพที่ 74 ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_5



ภาพที่ 75 ระดับกำลังงานอิมพีแดนซ์ Z_L (Matched Load)

-จากทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่หาได้ในแต่ละโหนดปลายสายส่งซึ่งสามารถอินเวส
สัญญาณรบกวนต่อทรานสเฟอ์ฟังก์ชันเพื่อหาค่ากำลังงานที่ละช่วงความถี่แล้วจึงนำมาคำนวณหา
ค่าความจุช่องสัญญาณที่อิมพีแดนซ์ปลายสายส่ง Z_{13} , Z_3 และ Z_L ด้วยการปรับอัตราค่ากำลังงาน
ในแต่ละช่องความถี่ที่สนใจ หรือ Water Filling เพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณ ซึ่งแสดงดังนี้

ตารางที่ 5 ค่าความจุช่องสัญญาณแบบ Water Filling โครงข่ายจำลอง NBT

| โครงข่าย NBT | ลักษณะของโหลด | ค่าความจุ (Mbps) |
|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| โหนดใกล้ (Z_{11}) | Unmatched and branchy | 3.02 |
| โหนดใกล้ (Z_{12}) | Unmatched and branchy | 3.02 |
| โหนดใกล้ (Z_{13}) | Unmatched and branchy | 3.02 |
| โหนดกลาง (Z_2) | Unmatched and single tap | 3.07 |
| โหนดกลาง (Z_3) | Unmatched and single tap | 3.07 |
| โหนดไกล (Z_4) | Unmatched and single tap | 1.04 |
| โหนดไกล (Z_5) | Unmatched and single tap | 1.04 |
| โหนดไกล (Z_7) | Matched | 12.54 |

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าความจุช่องสัญญาณ

| โครงข่าย NBT | ลักษณะของโหลด | ค่าความจุ (Mbps) | |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| | | w/o Water Filling | w/ Water Filling |
| โหนดใกล้ (Z_{11}) | Unmatched and branchy | 1.90 | 3.02 |
| โหนดใกล้ (Z_{12}) | Unmatched and branchy | 1.90 | 3.02 |
| โหนดใกล้ (Z_{13}) | Unmatched and branchy | 1.90 | 3.02 |

ตารางที่ 6 (ต่อ)

| โครงข่าย NBT | ลักษณะของโหลด | ค่าความจุ (Mbps) | |
|--------------------|--------------------------|------------------|---------------|
| | | w/o | w/ |
| | | Water Filling | Water Filling |
| โหนดกลาง (Z_2) | Unmatched and single tap | 1.89 | 3.07 |
| โหนดกลาง (Z_3) | Unmatched and single tap | 1.89 | 3.07 |
| โหนดไกล (Z_4) | Unmatched and single tap | 0.54 | 1.04 |
| โหนดไกล (Z_5) | Unmatched and single tap | 0.54 | 1.04 |
| โหนดไกล (Z_L) | Matched | 7.38 | 12.54 |

-จากการหาค่าความจุช่องสัญญาณในแต่ละโหนดปลายสายส่งซึ่งสามารถหาค่าความจุช่องสัญญาณที่สูงสุดตลอดช่วงความถี่กว้าง(Upper Bound) โดยในกรณี Matched Load ค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน $|H(f)|^2$ จึงมีค่าเท่ากับ 1/4 ดังนั้นค่าความจุช่องสัญญาณที่สูงสุดตลอดช่วงความถี่กว้างมีค่าเท่ากับ 53.98 Mbps

จะเห็นได้ว่าจากโครงข่ายจำลองของ NBT ผลการทดลองที่ได้ทั้งผลตอบแทนทางความถี่และผลตอบแทนทางเวลานั้น อิมพีแดนซ์ที่ Z_L นั้นมีลักษณะเข้ากับสายส่งจึงทำให้ผลตอบแทนทางความถี่และผลตอบแทนทางเวลามีผลที่ดีกว่าอิมพีแดนซ์ตัวอื่นๆแม้ว่าระยะทางจะไกลกว่า ส่วนค่าความจุช่องสัญญาณนั้น อิมพีแดนซ์ที่ Z_L จะมีค่าความจุมากที่สุดและวิธีการหาค่าความจุช่องสัญญาณแบบ Water Filling นั้นสามารถหาค่าความจุช่องสัญญาณได้ผลดีกว่าวิธีการกระจายกำลังงานอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงความถี่กว้างเพียงเล็กน้อย

สรุป

การดำเนินงานวิจัยนี้ เป็นการหาค่าความจุช่องสัญญาณแถบความถี่กว้างด้วยการนำเอาเทคนิควิธีย้ายค่าอิมพีแดนซ์แบบย้อนกลับ (Backward Impedance Transform, BIT) โดยจะย้ายอิมพีแดนซ์ที่ปลายสายส่งเข้ามาที่แหล่งจ่ายเพื่อหาอินพุทอิมพีแดนซ์แล้วจึงหาแรงดันอินพุทแล้วค่อยกระจายแรงดันคืนหน้าไปยังอิมพีแดนซ์ที่ปลายสายส่งแต่ละตัวเพื่อหาแรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์แต่ละตัวแล้วจึงนำมาใช้ในการหาค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ($H(f)$) ของอิมพีแดนซ์ที่ปลายสายส่งแต่ละตัวซึ่งจะพิจารณาบนแถบความถี่ที่สนใจ จากนั้นสามารถนำค่ากำลังงานของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ($H(f)$)² นำมาคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity)

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการนำโครงข่ายจำลองของ Anatory ที่มีความซับซ้อนมากมาใช้วิจัยเปรียบเทียบหาผลตอบสนองทางเวลา ซึ่งทำให้เห็นว่าผลตอบสนองทางเวลาที่หาได้นั้นมีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงและมีความแม่นยำ จากนั้นจึงนำโครงข่ายจำลองของสถานีวิทยุโทรทัศน์แห่งประเทศไทย NBT มาใช้ในการหาค่าความจุช่องสัญญาณของการสื่อสารแถบความถี่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคารด้วยการนำค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ($H(f)$) ที่ได้จากวิธี BIT แล้วนำค่ากำลังงานของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ($H(f)$)² นำมาคำนวณหาความจุช่องสัญญาณที่อิมพีแดนซ์ปลายสายส่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะทางและโหลดที่มีลักษณะเข้ากับสายส่ง (Matched) มีค่าความจุช่องสัญญาณที่ดีกว่าระยะทางและโหลดที่มีลักษณะไม่เข้ากับสายส่ง (Unmatched) โดยที่การหาความจุช่องสัญญาณแบบ Water Filling นั้นจะช่วยเพิ่มความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- วินัย สัมภ์แก้ว และวชิระ จงบุรี. 2012. Characteristics of Power Line Channel in Automatic Meter Infrastructure of PEA. in **proc 25th National Graduate Research Conference:** 1124-1138.
- Antory, J., N. Theethayi and R. Thottappillil. 2009. Power-Line Communication Channel Model for Interconnected Networks Part1: Two-Conductor System. **IEEE Transactions on Power Delivery** 1.24, No.1: 118-122.
- _____, M. M. Kissaka, N. Theethayi, N. H. Mvungi and R. Thottappillil. 2008. Broadband Power-Line Communications :The Channel Capacity Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**. vol.23, No.1: 164-170.
- Daniel, P.P. and J.R. Fonollosa. 2005. Practical Algorithms for a Family of Waterfilling Solutions. **IEEE Transactions on Signal Processing**, Vol.53, No.2: 686-695.
- Ferreira, H.C. J. Newbury, L. Lanpe and T. G. Swart. 2010. **Power Line Communications .** Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power lines.
- Khongdeach, T. and W. Chongburee. 2013. A Method to Analyze Communication Bandwidth and Pulse Response of Power Lines with Branches Using Backward Impedance Transform Technique. **IEEE Transactions on Power Delivery**.
- Zimmermann, M. and K. Dostert. 1999. A multi-path signal propagation model for the power line channel in the high frequency range. **International Symposium on Power Line Communication** (ISPLC'1999): 45-51.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

| | |
|--------------------------------|---|
| ชื่อ-นามสกุล | นายสุทธาพร กลีบทับทิม |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด | วันที่ 24 ตุลาคม 2523 |
| สถานที่เกิด | สระบุรี |
| ประวัติการศึกษา | ศศ.บ(รัฐศาสตร์) มหาวิทยาลัยรามคำแหง วศ.บ. (อิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | วิศวกรปฏิบัติการระดับกลาง |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช) |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | ได้รับการตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่อง "วิธีการหาความจุช่องสัญญาณของการสื่อสารแถบความถี่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงต่ำภายในอาคาร" ในงานประชุมวิชาการ The 36 th Electrical Engineering Conference (EECON36), pp. 70, December, 2013 |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | - |