

การศึกษาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกจากคู่สายข้างเคียง  
ที่มีต่อประสิทธิภาพการส่งสัญญาณของ ADSL2\*

STUDY ON ADJACENT SIGNAL CROSSTALK EFFECT ON ADSL2\*  
TRANSMISSION PERFORMANCE

ธนารักษ์ ขุนคงเสถียร  
THANARAK KUNKONGSATIAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-230-102

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การศึกษาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกจากคู่สายข้างเคียง  
ที่มีต่อประสิทธิภาพการส่งสัญญาณของ ADSL2+

STUDY ON ADJACENT SIGNAL CROSSTALK EFFECT ON ADSL2+  
TRANSMISSION PERFORMANCE

ธนารักษ์ ขุนทองเสถียร

THANARAK KUNKONGSATIAN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....77986  
วัน,เดือน,ปี.....1.2.ก.พ. 2551

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-230-102

**STUDY ON ADJACENT SIGNAL CROSSTALK EFFECT ON ADSL2+  
TRANSMISSION PERFORMANCE**

**THANARAK KUNKONGSATIAN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**KMITL-2007-EN-M-230-102**

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกจากคู่สายข้างเคียงที่มีต่อประสิทธิภาพการส่งสัญญาณของ ADSL2+
นักศึกษา	นายธนารักษ์ ขุนทองเสถียร
รหัสประจำตัว	47061134
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ

### บทคัดย่อ

Asymmetric Digital Subscriber Line 2 plus (ADSL2+) ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้นในระบบสื่อสารข้อมูล เนื่องจาก ADSL2+ สามารถส่งข้อมูลความเร็วสูงได้มากกว่า ADSL และ ADSL2 เป็น 2 เท่า ด้วยการขยายแบนด์วิดท์ของ downstream โดยเชื่อมต่อกับคู่สายตีเกลียว (Twisted pair) เพียง 1 คู่สาย ซึ่งภายในคู่สายตีเกลียว 1 กลุ่ม จะมีการใช้งานหลากหลาย เช่น ADSL, ADSL2+, Single pair high-bit-rate digital subscriber line (SHDSL) และ Integrated service digital network (ISDN) เป็นต้น ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก (Crosstalk) ขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาผลกระทบของสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกจากคู่สายข้างเคียงที่มีต่อประสิทธิภาพการส่งสัญญาณ ADSL2+ ผลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ ADSL2+ เช่นเดียวกับผลการทดลองด้วยเครื่องมือ ADSL2+ tester ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์จึงเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของการส่งสัญญาณของระบบต่อไป

<b>Thesis Title</b>	Study on Adjacent Signal Crosstalk Effect on ADSL2+ Transmission Performance
<b>Student</b>	Mr. Thanarak Kunkongsatian
<b>Student ID.</b>	47061134
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2550
<b>Thesis Adviser</b>	Assoc. Prof. Dr.Chawalit Benjangkprasert

## **ABSTRACT**

Asymmetric Digital Subscriber Line 2 plus (ADSL2+) is up coming standard for data communication on a telephone line. Doubling downstream bandwidth, ADSL2+ can provide double data rate of ADSL and ADSL2. As ADSL2+ and the other line coding methods (such as ADSL, Single pair high-bit-rate digital subscriber line (SHDSL) and Integrated service digital network (ISDN) are used on twisted-pair cables of the same binder, the adjacent signal crosstalk is occurred. This thesis focuses on the analysis of this crosstalk effect on ADSL2+ transmission performance. The simulation results are shown that the adjacent signal crosstalk effect on ADSL2+ performance as same as the results measurement by ADSL2+ tester. Applying this result, the method to improve the signal quality can be developed in the future.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และแนวความคิดในเรื่องต่าง ๆ จาก รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้รับการสนับสนุนทางด้านข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย นอกจากนั้นแล้ว การสนับสนุนที่ดี และความอนุเคราะห์ จากท่านที่ได้มอบให้ตลอดเวลาเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยทราบดี และขอกราบขอบพระคุณท่านมา ณ ที่นี้

กราบขอบพระคุณ รศ.นภพินท์ อนันตรศิริชัย และ รศ.อรลภ แสงอรุณ ที่ให้กำลังใจ และมอบคำแนะนำที่ดี และมีคุณค่าให้ตลอดเวลา

ขอขอบคุณห้องวิจัย Signal transmission laboratory สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรม MATLAB

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ สุรินทร์ ขุนคงเสถียร คุณแม่ นุปผา เปี่ยมพร้อม และครอบครัว อันเป็นที่รักยิ่ง ที่ได้ให้การสนับสนุน และส่งเสริมทางการศึกษา รวมถึงกำลังใจและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านตลอดเวลา

ขอขอบคุณ บริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน) ที่สนับสนุนทุนการศึกษา ตั้งแต่เริ่มการศึกษา พร้อมทั้งสนับสนุนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดสอบ

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็น ตลอดถึงความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

ธนารักษ์ ขุนคงเสถียร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการทำวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ลักษณะการทำงานของ ADSL2+ และ DSLAM.....	3
2.1 ความรู้เกี่ยวกับ ADSL2+.....	3
2.2 สถาปัตยกรรมของ ADSL.....	5
2.3 โครงข่าย ADSL.....	7
2.3.1 ส่วนประกอบสำคัญของ ADSL.....	8
2.3.2 มาตรฐาน ADSL.....	9
2.3.3 โครงสร้างซูปเปอร์เฟรมของ ADSL.....	11
2.3.4 ฟาสดาต้าและอินเตอร์ลีฟดาต้า.....	11
2.3.5 ฟาสไบท์.....	13
2.3.6 ชิงก์ไบท์และบิต SC.....	14
2.3.7 บิตชี้นำ Indicator bits (ib).....	15
2.3.8 บิต CRC.....	15
2.3.9 โอเวอร์เฮดของ ADSL.....	16

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.10 การทำงานของ ADSL.....	16
2.3.10.1 การรับส่งสัญญาณ ADSL ในทิศทางขาลง.....	16
2.3.10.2 การรับส่งสัญญาณ ADSL แบบสองทิศทาง.....	18
2.4 โครงสร้างของ DSLAM .....	20
2.4.1 ประเภทของ DSLAM.....	21
2.4.2 ความต้องการ DSLAM ของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง.....	23
บทที่ 3 หลักการมอดูเลตที่ใช้ใน ADSL2+.....	26
3.1 พื้นฐานการมอดูเลตและดีมอดูเลต.....	26
3.1.1 โคฮีเรนซ์ที่เทกชัน.....	28
3.1.2 การผิดพลาดทางเฟส (Phase ambiguity).....	34
3.1.3 ยูนิคเวิร์ด (Unique word).....	40
3.2 Quadri PSK.....	42
3.3 ลักษณะของ QPSK.....	47
3.4 การมอดูเลตแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์ (Quadrature Amplitude Modulation, QAM).....	48
3.4.1 การคำนวณทางคณิตศาสตร์ของการมอดูเลต QAM.....	51
3.5 การมอดูเลตแบบมัลติโทน (Multitone Modulation).....	54
บทที่ 4 การส่งสัญญาณผ่านคู่สายเคเบิลโทรศัพท์.....	59
4.1 ชนิดของสายเคเบิลและการใช้งาน.....	59
4.1.1 เคเบิลอากาศ (Aerial cable).....	59
4.1.2 เคเบิลฝังดิน (Buried cable).....	59
4.1.3 เคเบิลใต้ดินชนิดร้อยท่อ (Underground conduit cable).....	59
4.1.4 เคเบิลในราง (Troughing cable) .....	59
4.1.5 เคเบิลใต้น้ำ (Submarine cable).....	59

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 ข่ายสายโทรศัพท์.....	68
4.2.1 ข่ายสายท้องถิ่น แบ่งออกเป็น 2 ระบบ.....	68
4.2.1.1 ระบบยุโรป (European system).....	68
4.2.1.2 ระบบอเมริกัน (American system or direct feed).....	69
4.2.2 การหาที่ตั้งชุมสาย (Wire center).....	70
4.2.2.1 การหาที่ตั้งชุมสายแบบค่า Pair-km center .....	70
4.2.2.1.1 การหาค่า Pair-km center ใช้วิธีแบ่งเป็นช่วง.....	70
4.2.2.1.2 การหาค่า Pair-km center ใช้วิธีแบบจุดต่อจุด.....	71
4.2.3 วิธีการวางแผนข่ายสายท้องถิ่น.....	72
4.2.4 การยืดหยุ่นข่ายสาย (Flexibility) .....	74
4.2.5 รหัสสีของเคเบิลชนิดคู่สายตีเกลียว (Colours code).....	75
4.3 อุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ (Bridged Tap).....	79
4.3.1 ระยะทางของข่ายสาย.....	80
4.4 สัญญาณรบกวน.....	81
4.4.1 แบบจำลองการรบกวนไขว้แทรกกระยะไกล (NEXT Modeling).....	83
4.4.2 แบบจำลองของการรบกวนไขว้แทรกกระยะไกล (FEXT Modeling).....	86
4.4.3 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน Signal-to-Noise Ratio (SNR).....	88
4.6 อุปกรณ์แยกสัญญาณ โทรศัพท์.....	89
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	91
5.1 การใช้โปรแกรม MATLAB จำลองการทำงาน.....	91
5.2 ผลจากการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบจากอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง.....	103
5.2.1 การทดสอบคู่สายครั้งที่ 1 โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester.....	103
5.2.2 การทดสอบคู่สายครั้งที่ 2 โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester.....	104
5.2.3 การทดสอบคู่สายครั้งที่ 3 โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester.....	104
5.2.4 การทดสอบคู่สายครั้งที่ 4 โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester.....	105
5.3 สรุปผลการทดลอง.....	118
บทที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์.....	119

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	127
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	129
ประวัติผู้เขียน.....	130

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 โอเวอร์เฮดฟังก์ชันเพื่อลดโหมคโอเวอร์เฮด ด้วยการรวมฟาสไบท์และซิงค์ไบท์.....	15
2.2 อัตราบิดของช่องสัญญาณย่อย ADSL ตามการกำหนด bearer.....	17
2.3 การทำงานของช่องสัญญาณคูเพล็กซ์ในแต่ละทรานสปอร์ตคลาส.....	19
4.1 ชนิดของเคเบิลส่วนประกอบและสถานที่ใช้งาน.....	60
4.2 มาตรฐานความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง จำนวนคู่สายของเคเบิล AP AP(8) AP FSF ชนิดเคเบิลแต่ละชนิด.....	67
4.3 การคำนวณหาที่ตั้งชุมสายโดยใช้วิธีแบ่งเป็นช่วง.....	71
4.4 การคำนวณหาที่ตั้งชุมสายโดยใช้วิธีเป็นจุดต่อจุด.....	72
4.5 รหัสสีของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำคู่สายเคเบิล และการนับคู่สายที่ 1-25.....	76
4.6 การนับคู่สายเคเบิลจำนวน 600 คู่สาย เท่ากับ 1 ซุปเปอร์ ไบนเดอร์.....	77
4.7 การนับคู่สาย จำนวน 3000 คู่สาย.....	78
5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบ ADSL2+.....	91

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเชื่อมต่อทางกายภาพของ ADSL2+.....	3
2.2 ADSL2+ ดิสครีทมัลติโทนมอดูเลชัน (Discrete Multitone modulation).....	4
2.3 ADSL2+ เพิ่มแบนด์วิดท์เป็น 2 เท่า สำหรับ Downstream.....	4
2.4 สถาปัตยกรรม ADSL+.....	5
2.5 โครงข่าย ADSL.....	7
2.6 ส่วนประกอบสำคัญของโครงข่าย ADSL.....	8
2.7 มัลติเพล็กซ์แบบการขจัดเสียงสะท้อน (Echo cancellation).....	10
2.8 มัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplex).....	10
2.9 โครงสร้างซูเปอร์เฟรมของ ADSL ที่ด้านส่งของ ATU-C.....	12
2.10 บล็อกอินเตอร์ลิฟขนาดความกว้าง 8 และยาว 4.....	13
2.11 รูปแบบฟาสซิงค์ไบท์ในเครื่องส่ง ATU-C (จาก ANSI T1.413).....	14
2.12 สถาปัตยกรรมของ DSLAM.....	20
2.13 DSLAM ศูนย์กลางของ ADSL.....	22
2.14 การติดตั้งอุปกรณ์ DSLAM แบบ Indoor type (Without DC power supply).....	23
2.15 การติดตั้งอุปกรณ์ DSLAM แบบ Indoor type (With DC power supply).....	24
2.16 การติดตั้ง DSLAM แบบภายนอกอาคาร ใช้สำหรับตามสถานที่ RSU / RLU.....	25
3.1 การรับ-ส่งสัญญาณดิจิทัล.....	26
3.2 การมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล.....	27
3.3 การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของคลื่นพาห์.....	27
3.4 การสร้างสัญญาณขึ้นใหม่ทางด้านรับ.....	28
3.5 การรับสัญญาณ PSK ทางด้านรับ.....	29
3.6 สัญญาณเอาต์พุต หลังจากผ่าน LPF.....	29
3.7 การพิจารณาหัทสเป็น 1 หรือ 0 โดย Sample holder.....	30
3.8 รหัสมืดเพี้ยนเนื่องจากเสียงรบกวน.....	30
3.9 บล็อกไดอานแกรมของโคฮีเรนต์ดีมอดูเลเตอร์ (Coherent demodulator).....	31
3.10 หลักการของวงจรสร้างคลื่นพาห์ (Carrier recovery circuit).....	31
3.11 วงจรสร้างคลื่นพาห์ และสัญญาณตามจุดต่าง ๆ.....	32
3.12 การทำงานของวงจรเฟสล็อกกลุ๊ป.....	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 วงจรสัญญาณนาฬิกา.....	33
3.14 การผิดพลาดทางเฟส.....	34
3.15 คลื่นสัญญาณเมื่อผ่านวงจรหาความถี่.....	35
3.16 เปรียบเทียบ เอาต์พุต กรณี $t_1$ และ $t_2$ เป็นจุดเริ่ม.....	35
3.17 สัญญาณดิจิทัลหลังผ่านการดีมอดูเลต.....	36
3.18 Differential coherent PSK.....	36
3.19 วงจร Differential encoder.....	37
3.20 การสร้างรหัสสัญญาณที่ Differential encoder.....	37
3.21 รหัสสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ.....	38
3.22 Differential decoder.....	38
3.23 ลำดับสัญญาณดิจิทัลด้านรับ.....	39
3.24 การเกิดข้อผิดพลาดของบิต.....	40
3.25 การส่งยูนิคเวิร์ดเพื่อตรวจสอบรหัส.....	41
3.26 วงจรดีมอดูเลตที่ใช้ยูนิคเวิร์ด.....	41
3.27 รหัส 4 คู่ของสัญญาณ QPSK.....	42
3.28 Gray code ที่ใช้ใน QPSK.....	42
3.29 วงจรมอดูเลต QPSK.....	43
3.30 เปรียบเทียบเฟสของสัญญาณในช่องสัญญาณ I และ Q.....	44
3.31 เวกเตอร์ผลลัพธ์ของสัญญาณ QPSK.....	45
3.32 สัญญาณ QPSK ถูก shift phase.....	45
3.33 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณ QPSK.....	46
3.34 การดีเทกต์สัญญาณ QPSK ออกมาเป็น BPSK 2 สัญญาณ.....	47
3.35 Keying speed ในการส่งสัญญาณ.....	48
3.36 ตัวอย่างการส่งบิต 4 บิต ในช่องสัญญาณของระบบ QAM.....	48
3.37 ตัวอย่างของ 4 QAM ในตำแหน่ง 16 QAM ด้วยค่ากำลังงานเฉลี่ยเท่ากัน.....	50
3.38 บล็อกไคอะแกรมของการมอดูเลตแบบ QAM.....	50
3.39 (ก) บล็อกการมอดูเลตแบบ QAM ในด้านลอจิก (ข) บล็อกการมอดูเลตแบบ QAM ในด้านการประมวลผลสัญญาณ.....	52

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.40 แนวความคิดของการมอดูเลตแบบ QAM.....	54
3.41 การมอดูเลตแบบ inverse discrete fourier transform (IDFT).....	58
4.1 เคเบิลชนิดฝังดินหรือวางในราง Tape amour cable (LTJ).....	62
4.2 เคเบิลชนิดวางในท่อ ฝังดิน หรือวางในราง Stalpeth sheathed cable (ASP).....	62
4.3 เคเบิลชนิดฝังดิน Double sheathed Stalpeth cable (PASP).....	63
4.4 เคเบิลชนิดแขวนอากาศแบบใช้สายสะพาน Alpeth sheathed cable (PA).....	63
4.5 เคเบิลชนิดวางในท่อหรือในราง Figure 8 Alpeth sheathed cable AP (8).....	64
4.6 เคเบิลชนิดฝังดิน Double sheathed Alpeth cable (PAP).....	64
4.7 เคเบิลชนิดใช้ในอาคาร PVC Cable (PVC).....	65
4.8 เคเบิลชนิดวางใต้น้ำ Submarine cable (SUB).....	65
4.9 เคเบิลชนิดวางในท่อหรือในราง Foam / skin insulation AP sheathed filled cable (AP-FSF).....	66
4.10 เคเบิลชนิดฝังดินโดยตรง วางในท่อ หรือในราง Foam / skin insulation ASP sheathed filled cable (AP-FSF).....	66
4.11 ระบบจ่ายสายแบบยุโรป.....	68
4.12 ระบบจ่ายสายแบบอเมริกัน.....	60
4.13 ตัวอย่างการคำนวณหาที่ตั้งหุ้มสายโดยใช้วิธีแบ่งเป็นช่วง.....	71
4.14 ตัวอย่างการคำนวณหาที่ตั้งหุ้มสายโดยใช้วิธีแบบเป็นจุดต่อจุด.....	72
4.15 ผลกระทบของอุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ที่มีต่อการแพร่กระจายพัลส์.....	79
4.16 ระยะทางในการแพร่กระจายจ่ายสาย.....	80
4.17 การเกิดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก.....	81
4.18 แบบจำลองของการแพร่กระจายของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างคู่สายตีเกลียว.....	82
4.19 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด Near End Crosstalk (NEXT).....	83
4.20 การสูญเสียถ่ายโอนจำนวน 25 คู่สายของเคเบิลชนิด Polyethylene insulated cables (PIC).....	84
4.21 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด Far End Crosstalk (FEXT).....	86
4.22 อุปกรณ์แยกสัญญาณ (splitter).....	89
4.23 การติดตั้ง ADSL ด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณแบบไม่มีการต่อพ่วง.....	89
4.24 การติดตั้ง ADSL ด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณแบบมีการต่อพ่วงโทรศัพท์.....	90

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ HDSL.....	92
5.2 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่น กำลัง เชิงสเปกตรัมของ HDSL.....	93
5.3 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Far End Crosstalk (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิง สเปกตรัมของ HDSL.....	94
5.4 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ISDN.....	95
5.5 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลัง เชิงสเปกตรัมของ ISDN.....	96
5.6 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Far End Crosstalk (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิง สเปกตรัมของ ISDN.....	97
5.7 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น.....	98
5.8 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลัง เชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น.....	99
5.9 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Far End Crosstalk (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิง สเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น.....	100
5.10 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Near End Crosstalk (NEXT).....	101
5.11 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Far End Crosstalk (FEXT).....	102
5.12 การทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่สายเคเบิล.....	103
5.13 การทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 และส่งสัญญาณ SHDSL เข้าที่ คู่สายที่ 2.....	104
5.14 การทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 และส่งสัญญาณ ISDN เข้าที่ คู่สายที่ 3.....	105
5.15 การทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 ส่งสัญญาณ SHDSL เข้าที่คู่สาย ที่ 2 และส่งสัญญาณ ISDN เข้าที่คู่สายที่ 3.....	105

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 อัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด 0.4 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	106
5.17 อัตราความเร็วสูงสุดที่คู่สายสามารถให้บริการได้ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	107
5.18 ค่าลดทอนในคู่สายของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	108
5.19 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	109
5.20 อัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด 0.4 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	110
5.21 อัตราความเร็วสูงสุดที่คู่สายสามารถให้บริการได้ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	111
5.22 ค่าลดทอนในคู่สายของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	112
5.23 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	113
5.24 อัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด 0.4 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	114

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 อัตราความเร็วสูงสุดที่คู่สายสามารถให้บริการได้ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียว ขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	115
5.26 ค่าลดทอนในคู่สายของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	116
5.27 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียว ขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน.....	117
6.1 การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการบนข่ายสายท้องถิ่นเดิม ผู้ใช้บริการประเภท บ้านพักอาศัยและธุรกิจขนาดเล็ก.....	121
6.2 การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการบนข่ายสายท้องถิ่นเดิม ผู้ใช้บริการประเภท อาคารสำนักงาน หรือคอนโดมิเนียม ขนาดกลาง.....	122
6.3 การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการบนข่ายสายท้องถิ่นเดิม ผู้ใช้บริการประเภท อาคารสำนักงาน หรือคอนโดมิเนียม ขนาดใหญ่.....	123
6.4 การสร้างข่ายสายใหม่ให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการประเภท บ้านพักอาศัย(หมู่บ้านสร้างใหม่).....	124
6.5 การสร้างข่ายสายใหม่ให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือ คอนโดมิเนียม ขนาดขนาดกลาง.....	125
6.6 การสร้างข่ายสายใหม่ให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือ คอนโดมิเนียม ขนาดขนาดใหญ่.....	126

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน Asymmetric Digital Subscriber Line 2 plus (ADSL2+) ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น เพราะสามารถรับส่งข้อมูลที่มีอัตราความเร็วสูงกว่าโมเด็มทั่ว ๆ ไป ADSL2+ ได้มีการเพิ่มแบนด์วิดท์ที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล Downstream ทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วมากกว่า 20 Mbps และการรับข้อมูล Upstream ที่ 1 Mbps และสามารถให้บริการกับลูกค้าที่เป็นบ้านพักอาศัยหรือแหล่งธุรกิจ สามารถให้บริการได้ในระยะทางไกล โดยผู้ให้บริการทางด้านโครงข่ายโทรศัพท์พื้นฐานทั้งหลายได้นำ ADSL2+ มาให้บริการที่เหนือกว่าแบบเดิม เช่น Fast internet Distance Learning และ VDO on Demand โดยที่ ADSL2+ ต้องเชื่อมต่อกับคู่สายทองแดงตีเกลียว ซึ่งลักษณะของสายทองแดงตีเกลียวเส้นเล็ก ๆ รวมกันหลาย ๆ เส้นเข้าด้วยกัน รวมกันเป็นเคเบิลทองแดงเส้นใหญ่ที่ภายในมีคู่สายรวมกันตั้งแต่ 25 คู่สายถึง 3,000 คู่สาย เชื่อมต่อไปยังชุมสายท้องถิ่น (Local Exchange) และเชื่อมต่อไปยัง Digital Subscriber Line Access Multiplex (DSLAM) ในสายเคเบิลทองแดงมีการให้บริการต่าง ๆ เช่น Integrated Services Digital Network (ISDN) และ High Bit Rate Digital Subscriber (HDSL) เมื่อนำคู่สายเคเบิลมาใช้งานย่อมมีปัญหาสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นจากคู่สายในเคเบิลเส้นเดียวกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณจะลดลง โดยเฉพาะการรับส่งข้อมูล จึงต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก และหาแนวทางในการลดสัญญาณรบกวนไขว้แทรก ซึ่งสามารถนำไปประกอบการพิจารณาในการวางโครงข่าย ADSL2+ ได้

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษา วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก จากคู่สายข้างเคียงที่มีประสิทธิภาพการส่งสัญญาณของ ADSL2+

### 1.3 สมมุติฐานการศึกษา

การให้บริการทางด้านสื่อสารข้อมูลใช้คู่สายตีเกลียวในเคเบิลเส้นเดียวกันเพื่อรับส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ จึงทำให้เกิดสัญญาณไขว้แทรกขึ้น ซึ่งปัจจัยเช่นนี้เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณ เช่น จำนวนคู่สายเคเบิล ระยะทางของสาย อุปกรณ์ที่นำมาต่อรวม เป็นต้น

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีของการเกิดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกในคู่สายทองแดง การเกิดสัญญาณไขว้แทรกในคู่สายตีเกลียวเกิดขึ้นได้ 2 ชนิด คือ สัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด Near End Crosstalk (NEXT) และ Far End Crosstalk (FEXT) เป็นส่วนสำคัญที่นำมาเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิเคราะห์ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์หาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกจากคู่สายข้างเคียงที่มีต่อประสิทธิภาพการส่งสัญญาณของ ADSL2+ โดยศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณ เช่น จำนวนคู่สายเคเบิล ระยะทางของสาย ของการรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์ใช้งานอื่น เช่น HDSL ISDN ที่ใช้งานในสายเคเบิลเส้นเดียวกันมีผลต่อประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณอย่างไร โดยใช้ค่าอัตราบิตที่เปลี่ยนแปลงไปและค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเป็นตัวชี้วัดคุณภาพ รายละเอียดของวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 6 บท ในแต่ละบทมีหัวข้อและเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายลักษณะของ ADSL2+ และ DSLAM

บทที่ 3 การมอดูเลตที่ใช้ใน ADSL2+

บทที่ 4 การส่งสัญญาณผ่านคู่สายเคเบิล

บทที่ 5 ผลการทดลองที่ได้จากการใช้โปรแกรม MATLAB จำลองการทำงานของอุปกรณ์เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการใช้เครื่องมือทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง

บทที่ 6 บทสรุปวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณมีอะไรบ้างและส่งผลกระทบอย่างไร

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

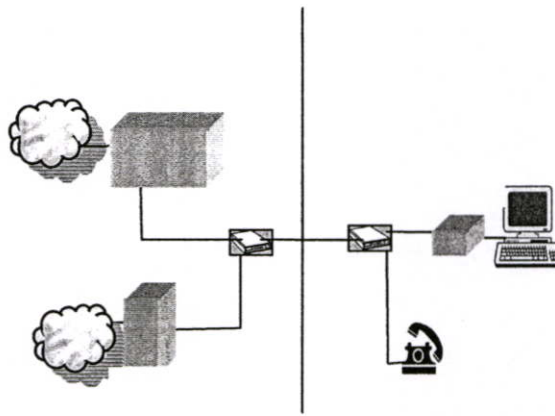
ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้เกิดประเด็นปัญหาและทำการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB พร้อมทั้งทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้งานจริงและวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง

## บทที่ 2

# ลักษณะการทำงานของ ADSL2+ และ DSLAM

### 2.1 ความรู้เกี่ยวกับ ADSL2+

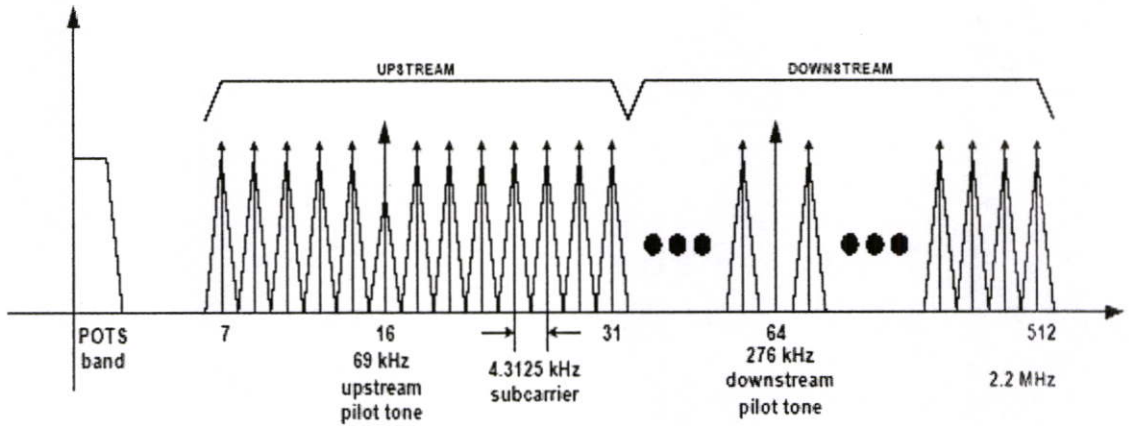
Asymmetric digital subscriber line 2 plus (ADSL2+) มีการเพิ่มแบนด์วิดท์ที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล downstream ขึ้นเป็น 2 เท่า ที่ 2.208 Mbps (ADSL ใช้แบนด์วิดท์ 1.1 Mbps) ทำให้อัตราเร็วการส่งข้อมูลสูงสุดของ downstream เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าด้วยเช่นกัน โดยเพิ่มแบนด์วิดท์จากเดิม ADSL ดังนั้นจึงทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็ว 24 Mbps บนสายโทรศัพท์ได้ไกลถึง 1.5 กิโลเมตร ADSL2+ สามารถทำงานได้หลายโหมด นั่นคือนอกจากจะทำงานร่วมกับ ADSL2+ ด้วยตัวเองแล้ว ยังสามารถทำงานร่วมกับ ADSL และ ADSL2



ATU-C: ADSL Transmission Unit, Central Office side

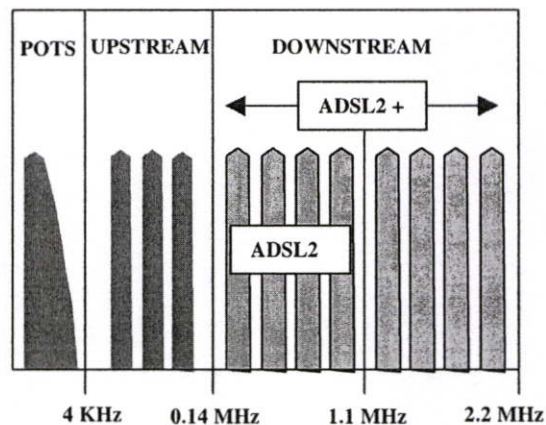
ATU-R: ADSL Transmission Unit, Remote side

รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อทางกายภาพของ ADSL2+



รูปที่ 2.2 ADSL2+ คิสครีทมัลติโทนมอดูเลชัน (Discrete Multitone modulation)

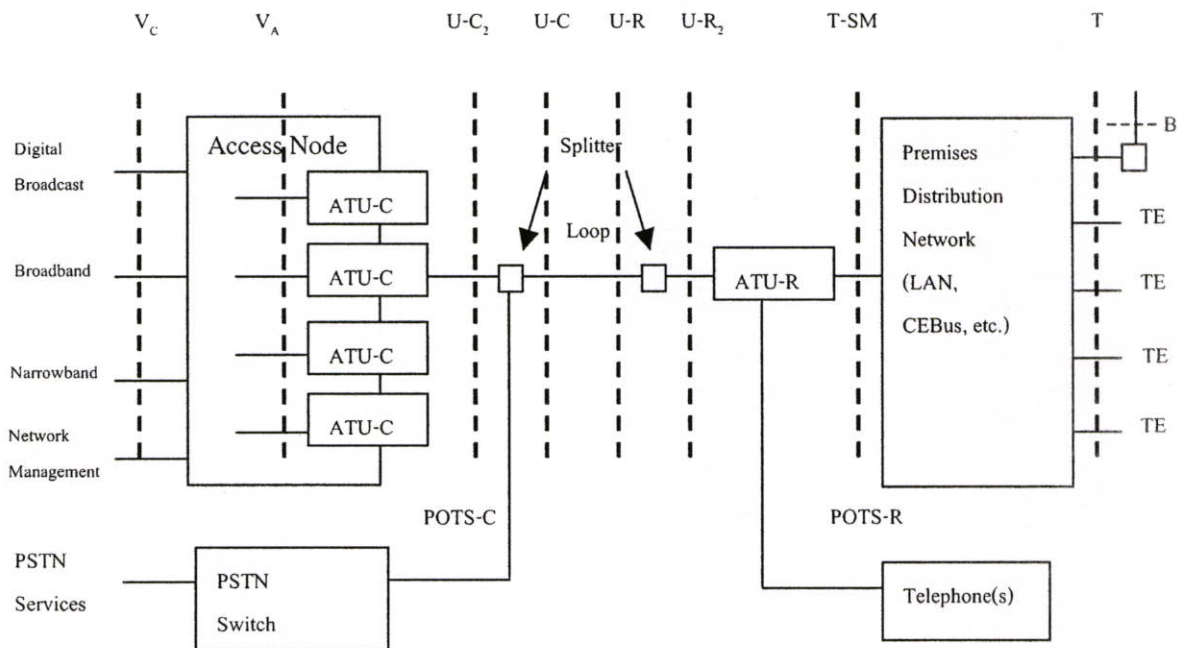
จากรูปที่ 2.2 แสดงสเปกตรัมของ ADSL2+ มีแบนด์วิดท์ 2.208 Mbps ประกอบด้วยช่วงความถี่ของช่องสัญญาณโทรศัพท์พื้นฐานที่ 4 kHz และช่วงความถี่ของช่องสัญญาณขาขึ้น (upstream) และช่องสัญญาณขาลง (downstream) มีช่องสัญญาณย่อย (subchannels) ทั้งหมด 512 ช่อง มีความกว้างของแต่ละช่องสัญญาณย่อยที่ 4.3125 kHz ความจุของแต่ละช่องสัญญาณย่อย 15 บิตต่อช่องสัญญาณ ช่วงความถี่ของช่องสัญญาณขาขึ้น ตั้งแต่ความถี่ 26 kHz ถึง 138 kHz ประกอบด้วยช่องสัญญาณย่อย 36 ช่อง และช่วงความถี่ของช่องสัญญาณขาลง ตั้งแต่ความถี่ 138 kHz ถึง 2.208 MHz ประกอบด้วยช่องสัญญาณย่อย 476 ช่อง



รูปที่ 2.3 ADSL2+ เพิ่มแบนด์วิดท์เป็น 2 เท่า สำหรับ Downstream

## 2.2 สถาปัตยกรรมของ ADSL2+

สถาปัตยกรรมของ ADSL2+ แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์หลัก ๆ ที่จำเป็นต่อการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สถาปัตยกรรม ADSL2+

ATU-C	เครื่องส่ง ADSL2+ ด้านชุมสายโทรศัพท์
ATU-R	เครื่องส่ง ADSL2+ ด้านปลายทาง
B	อุปกรณ์รับส่งข้อมูลด้านขาเข้า
DSLAM	DSL Access Multiplexer
POTS-C	การเชื่อมต่อระหว่าง PSTN และอุปกรณ์แยกสัญญาณด้าน ชุมสายโทรศัพท์
POTS-R	การเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์ และอุปกรณ์แยกสัญญาณด้านปลายทาง
T-SM	อินเตอร์เฟซแบบ T สำหรับโมดูลในการให้บริการ
T	อาจอยู่ภายในโมดูลในการให้บริการ หรือใน ATU-R
U-C	อินเตอร์เฟซแบบ U ด้านชุมสายโทรศัพท์
U-C <sub>2</sub>	อินเตอร์เฟซแบบ U ด้านชุมสายโทรศัพท์ระหว่างอุปกรณ์แยกสัญญาณและ ATU-C
U-R	อินเตอร์เฟซแบบ U ด้านปลายทาง

U-R <sub>2</sub>	อินเตอร์เฟซแบบ U ด้านปลายทางระหว่างอุปกรณ์แยกสัญญาณและ ATU-R
VA	อินเตอร์เฟซแบบ V ด้านแอกเซสโหนดระหว่าง ATU-C และแอกเซสโหนด
VC	อินเตอร์เฟซแบบ V ด้านชุมสายโทรศัพท์ระหว่างแอกเซสโหนดและเครือข่ายให้บริการ

ลักษณะของ ADSL มีหลายอย่างที่สำคัญ อย่างแรกสังเกตได้ว่าข้อกำหนดที่กำหนดขึ้นมารองรับการให้บริการสัญญาณเสียงระบบแอนะล็อกที่เรียกว่า plain old telephone service (POTS) ในการรับส่งสัญญาณ ADSL มีอุปกรณ์แยกสัญญาณชนิดพิเศษสามารถขนส่งความถี่พาห์ 4 kHz ของช่องสัญญาณแอนะล็อกจากชุมสายไปที่ผู้เช่าได้ภายใต้แบนด์วิดท์ของสัญญาณดิจิทัล

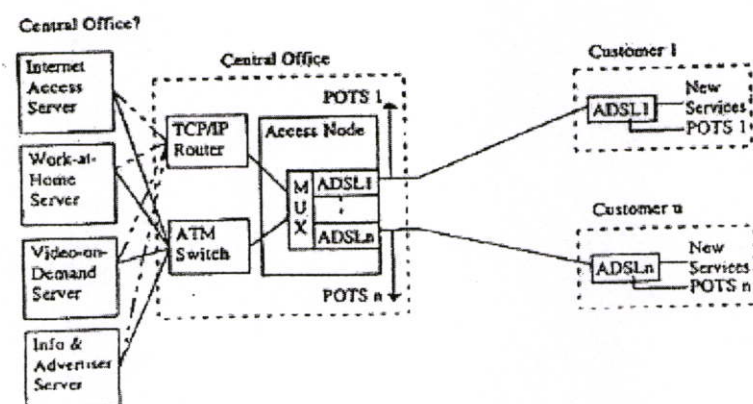
เหตุผลต่อไปที่นำมาพิจารณาคือการให้บริการของระบบ ADSL หลาย ๆ รูปแบบ ประกอบด้วย การกระจายสัญญาณดิจิทัลและบอร์ดแบนด์ (เช่น วีดีโอและอินเทอร์เน็ตแอกเซส) การจัดการเครือข่ายการให้บริการเหล่านี้อยู่นอกชุมสายโทรศัพท์ Central office (CO) และชุมสายท้องถิ่น Local exchange (LE) จึงสามารถแก้ปัญหาการคับคั่งในการสวิตซ์ได้ การให้บริการ ADSL ในหลายเส้นทางทำได้โดยใช้ ADSL เครื่องเดียวเป็นแอกเซสโหนดติดตั้งที่ชุมสายโทรศัพท์หรือชุมสายท้องถิ่น แอกเซสโหนดนี้บางครั้ง เรียกว่า Digital subscriber line access multiplexer (DSLAM) หรือ DSL แอกเซสมอคูเลต แม้ว่า DSLAM สามารถใช้งานได้กับคู่สาย ADSL แต่โครงสร้างของ DSLAM ที่สมบูรณ์แบบ ทำให้การทำงานบรรลุผลมาก สถาปัตยกรรมแบบง่าย ๆ ของ ADSL แสดงดังรูปที่ 2.4 รายการอินเตอร์เฟซที่แสดงในรูปที่ 2.4 อธิบายได้ดังนี้ อินเตอร์เฟซ B แสดงถึงอุปกรณ์ทางด้านอินพุต เช่น ตัวป้อนสัญญาณของควมเทียมในกล่องอุปกรณ์ที่ด้านบนสุด อินเตอร์เฟซ T-SM เชื่อมต่อระหว่าง ATU-R และ โมดูลในการให้บริการอื่น ๆ รวมถึงอุปกรณ์ที่อยู่ใน ATU-R ถ้าไม่มีอินเตอร์เฟซ T-SM แล้ว อินเตอร์เฟซ T จะรวมอยู่ใน ATU-R โดย ATU-R แต่ละตัวมีอินเตอร์เฟซ T มีได้มากกว่าหนึ่งอินเตอร์เฟซ T และมากกว่าหนึ่งประเภท เช่น มีทั้ง อีเทอร์เน็ต 10 Base-T และ V.35 อินเตอร์เฟซ T ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายและจ่ายสายกระจายไปยังลูกค้าและไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ปลายทาง (TE) ถ้า ATU-R บางรุ่นมีอุปกรณ์ปลายทาง รวมอยู่ใน ATU-R แล้ว

กรณีที่มีอุปกรณ์แยกสัญญาณรวมอยู่ใน ATU แล้ว ไม่จำเป็นต้องใช้อินเตอร์เฟซ U หรือกรณีที่ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แยกสัญญาณ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ผู้ขายพัฒนาขึ้นมา ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้อินเตอร์เฟซ U เช่นกัน แต่กรณีนี้จะทำให้การรับส่งสัญญาณ โทรศัพท์ระบบแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัลในคู่สายเดียวกันทำไม่ได้ สำหรับอินเตอร์เฟซ V นั้นเป็นลจิกมากกว่าฟิสิกัล โดยเฉพาะ

อินเทอร์เน็ตเฟส  $V_A$  จะเห็นได้ชัดเจน ถ้า DSLAM หรือ ADSL ทำงานเป็นศูนย์กลางหรือเป็นสวิตช์ อินเทอร์เน็ตเฟส  $V_C$  ทำหน้าที่เชื่อมต่อเครือข่ายให้บริการที่เป็นฟิสิกอลหลายรูปแบบ เช่น TCP/IP ATM หรือเครือข่ายในการให้บริการอื่น ๆ การให้บริการลูกค้าของ ADSL ทำให้หลากหลายรูปแบบตามความเหมาะสมของสถาปัตยกรรมและรูปแบบในการกระจายเครือข่ายไปยังลูกค้า โดยใช้คู่สายทองแดงเชื่อมต่อ ไปยังอุปกรณ์ใช้งาน เช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) หรือ โครงข่ายท้องถิ่น (LAN) เช่น อีเทอร์เน็ต สำหรับใช้งานในบ้าน ซึ่งอุปกรณ์ที่เป็นไปได้คือสายเคเบิลที่เชื่อมต่อ ไปยังอุปกรณ์ ADSL มาตรฐานรุ่นใหม่นั้นนำสายไฟฟ้าภายในบ้านมาใช้งาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับความต้องการใช้งานของลูกค้าให้เพียงพอ

### 2.3 โครงข่าย ADSL

เทคโนโลยีของ ADSL ทำให้ PC ที่ใช้งานในที่พักอาศัยโหลดข้อมูลจากเว็บไซต์ได้รวดเร็วขึ้น ADSL2+ เป็นส่วนหนึ่งของสถาปัตยกรรมโครงข่ายที่ใช้กับที่พักอาศัยและผู้ใช้งานที่ทำธุรกิจขนาดเล็ก ด้วยการให้บริการแบบบรอดแบนด์ ซึ่งโครงข่ายต้องขนส่งข้อมูลได้เร็วกว่า 1 หรือ 2 Mbps



รูปที่ 2.5 โครงข่าย ADSL

รูปที่ 2.5 แสดงโครงข่ายบรอดแบนด์โดยใช้ ADSL ในรูปแบบสถาปัตยกรรมอย่างง่าย ๆ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องใช้โมเด็ม ADSL และแจ็ก RJ-11 ซึ่งรองรับโทรศัพท์แอนะล็อกในที่พักอาศัยที่เป็นสำนักงานขนาดเล็ก พอร์ตอื่น ๆ อาจจะเป็นอีเทอร์เน็ต 10 Base-T ซึ่งเชื่อมต่อกับ PC หรือ TV ที่ใช้สำหรับการให้บริการหลายรูปแบบ เช่น อินเทอร์เน็ตความเร็วสูงและวิดีโอออนดีมานด์ หน้าทีของอุปกรณ์แยกสัญญาณจะแยกการให้บริการ POTS จากการให้บริการดิจิทัล ในหลายกรณีจำเป็นต้องวางคู่สายใหม่ไปยังที่พักอาศัยของลูกค้า แต่โครงข่าย ADSL นั้นใช้คู่สายที่มีอยู่แล้ว ในสหรัฐอเมริกาและหลาย ๆ ประเทศ ก็ใช้คู่สายที่มีอยู่แล้วเช่นกัน ในชุมสายโทรศัพท์ (CO) หรือชุมสายท้องถิ่น

ถิ่น (LE) สัญญาณเสียงระบบแอนะล็อกจะถูกส่งผ่านไปที่ชุมสายโทรศัพท์ โดยอุปกรณ์แยกสัญญาณ (Splitter) สัญญาณ ADSL จะถูกส่งไปที่แอกเซสโหนด และถูกส่งต่อไปที่ CO

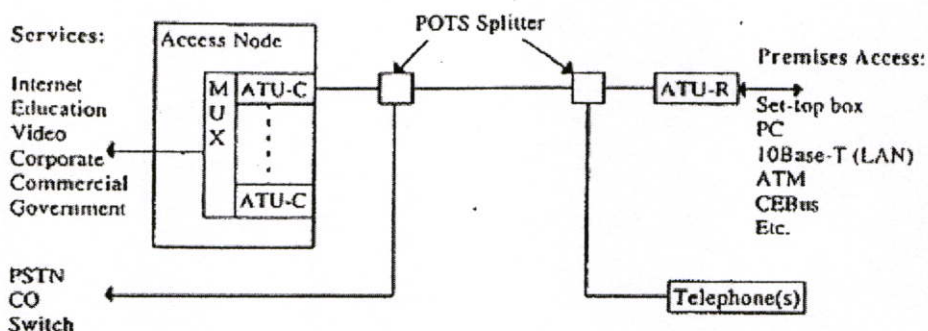
แอกเซสโหนดจะเชื่อมโยงไปที่โพรโทคอลสำหรับควบคุมการส่งสัญญาณ / อินเทอร์เน็ตโพรโทคอล Transmission control protocol / Internet protocol (TCP/IP) Router หรือ Asynchronous transfer mode (ATM) switch ในการให้บริการสามารถเลือกใช้สวิตช์และเราเตอร์ ในการให้บริการไม่ว่าจะเป็นที่พักอาศัยที่อยู่บริเวณชุมสาย ในการเชื่อมต่อส่วนใหญ่เซิร์ฟเวอร์จะติดตั้งโดยใช้เคเบิลระยะสั้นจากชุมสายโทรศัพท์

การให้บริการมุ่งเน้นบริการเทอร์เน็ตแอกเซสลูกค้าที่เป็นบ้านพักอาศัย หรือองค์กรที่ใช้เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตภายใน(Corporate intranet) วัตถุประสงค์และเซิร์ฟเวอร์สำหรับการให้บริการข้อมูลในธุรกิจโฆษณา เช่น ไฟแนนซ์ โดยบริการเหล่านี้อาจใช้งานผ่าน TCP/IP หรือ ATM และ ADSL

### 2.3.1 ส่วนประกอบสำคัญของ ADSL

สถาปัตยกรรมของ ADSL เป็นสถาปัตยกรรมสมบูรณ์แบบ ดังที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา ADSL ทำให้การค้นหาข้อมูลในเว็บเร็วขึ้น มีความเป็นไปได้ที่จะนำ ADSL มาใช้ในที่พักอาศัย และธุรกิจขนาดเล็ก ด้วยการให้บริการบรอดแบนด์รูปแบบใหม่ และเตรียมไว้สำหรับการให้บริการในระยะทางไกล ๆ ด้วย

รูปที่ 2.6 แสดงรายละเอียดของ ADSL ด้านปลายทาง (ATU-R) สามารถกำหนดรูปแบบการใช้งาน เพื่อรองรับความต้องการของลูกค้า อุปกรณ์ทางด้านฟิสิกส์ประกอบด้วย TV และ PC การเชื่อมโยงจาก ATU-R ไปที่อุปกรณ์ปลายทาง เช่น 10 Base-T LAN โครงข่าย ATM ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีความซับซ้อน ก็สามารถทำได้ง่าย ๆ การนำบรอดแบนด์มาใช้โดยเชื่อมต่อไปยังโทรศัพท์แอนะล็อกระบบเก่าได้ โดยไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงระบบเพราะอุปกรณ์แยกสัญญาณสามารถแยกสัญญาณแอนะล็อกได้



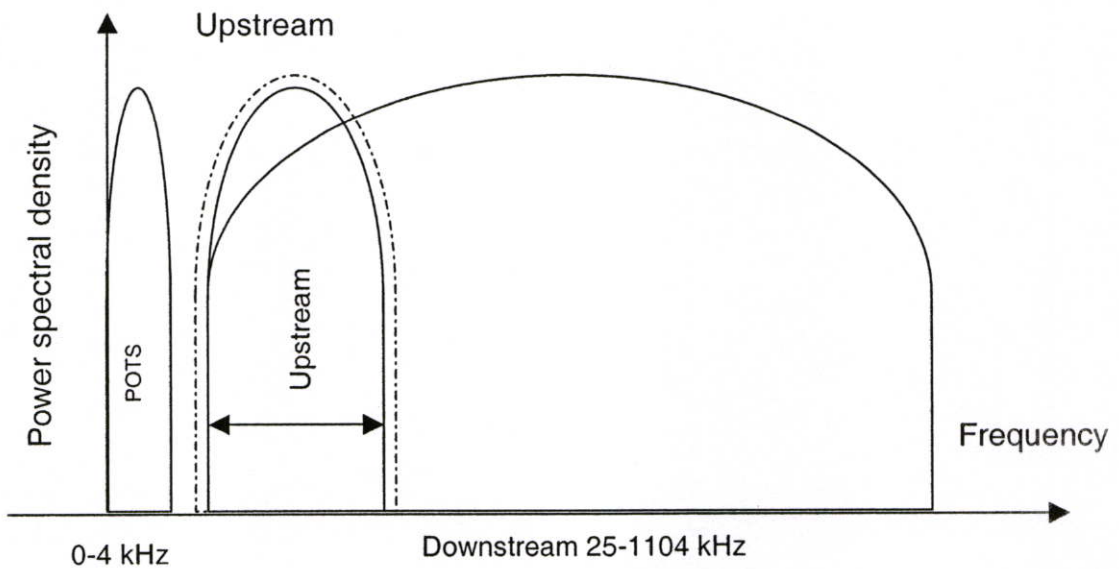
รูป 2.6 ส่วนประกอบสำคัญของโครงข่าย ADSL

ในชุมสายท้องถิ่นการให้บริการสัญญาณเสียงจะถูกส่งผ่านไปที่ชุมสาย PSTN และจัดเรียงด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณ ข่ายสายของ ADSL จะสิ้นสุดที่แอกเซสโหนดของ ADSL ซึ่งทำการเชื่อมต่อโดยตรงไปที่ชุมสายโทรศัพท์ แอกเซสโหนดคือแอกเซสมัลติเพล็กซ์หรือ DSLAM จะมัลติเพล็กซ์ ADSL หลาย ๆ คู่สายเข้าด้วยกัน โดยที่ซอฟต์แวร์ของชุมสายไม่จำเป็นต้องยกระดับให้สูงขึ้นเพื่อรองรับบริการใหม่ที่เกิดขึ้น เช่น ISDN ข้อดีของ ADSL คือลดความคับคั่งของชุมสายและสายผ่านสังเกตได้ว่าเส้นทางของ ADSL นั้น ยังคงใช้ Digital Cross connect (DACS) ก่อนที่จะส่งเข้าชุมสายต่อผ่านและส่งไปให้ผู้ให้บริการ ถ้าผู้ให้บริการเตรียมเส้นทาง ADSL ไว้แล้ว การให้บริการจะถูกส่งตรงจากชุมสายโทรศัพท์ไปที่พักอาศัยเส้นทางของ ADSL ถูกเตรียมไว้ผ่านอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และส่งไปในอุปกรณ์ DACS จากนั้น DACS จะส่งไปที่ชุมสายต่อผ่านของระบบ การส่งสัญญาณระดับ T3 จะส่งอัตราบิต 45 Mbps ไปยังผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตและจุดสุดท้ายส่งไปที่เราเตอร์หรือ ATM สวิตช์ ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากแอกเซสโหนด แพ็กเก็ตจะอยู่ในเราเตอร์ หรือ โครงข่าย ATM สวิตช์ แอกเซสโหนดจะเน้นตามมาตรฐานการทำงานของ ADSL แอกเซสโหนด ADSL จะทำการรวมบิตและแพ็กเก็ตทั้งหมดที่จะเข้าและออกจากแอกเซสโหนด

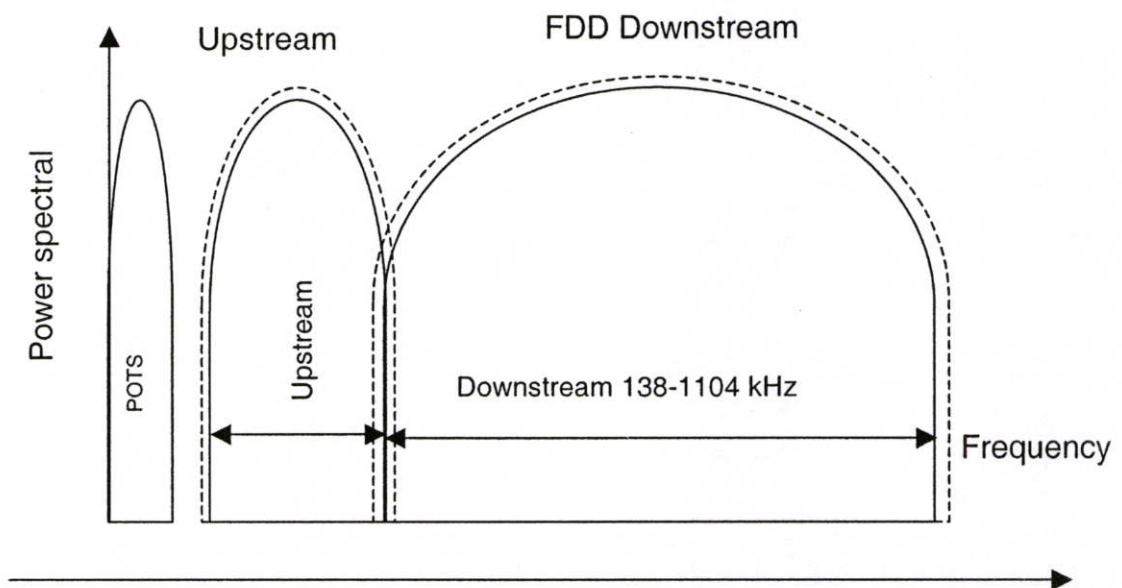
### 2.3.2 มาตรฐาน ADSL

ในสหรัฐอเมริกามาตรฐานของ American National Standards Institute (ANSI) ได้อธิบายการทำงานทางฟิสิกส์คอลเลเยอร์ของ ADSL T1.413 ครั้งแรกในปี 1995 มาตรฐานนี้อธิบายอย่างชัดเจนว่า อุปกรณ์สื่อสาร ADSL สื่อสารอย่างไรบนคู่สายแอนะล็อก แต่ไม่ได้อธิบายสถาปัตยกรรมโครงข่ายและการให้บริการ ADSL หรือการทำงานภายในแอกเซสโหนด ADSL และมีการกำหนดส่วนสำคัญ เช่น การเข้ารหัส บิตส่งอย่างไรและโครงสร้างเฟรมเป็นอย่างไร การจัดการระบบของบิตในคู่สายทำได้อย่างไร

ADSL ที่ผลิตขึ้นมานั้นใช้เทคโนโลยีในการเข้ารหัสชนิด Carrierless Amplitude / Phase modulation (CAP) Quadrature Amplitude Modulation (QAM) หรือ Discrete Multitone Modulation (DMT) นอกจากนี้ยังมีมอดูเลชันชนิดอื่น ๆ อีกที่ได้ทำการทดลองใช้งาน แต่การมอดูเลชันทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมานิยมใช้มากที่สุด เมื่อคู่สาย 2 คู่ถูกใช้งานแบบพูลดูเพล็กซ์ ย่านความถี่จะต้องถูกแบ่งออกเป็นแบนด์วิดท์ของสัญญาณขาขึ้นและแบนด์วิดท์ของสัญญาณขาลง โดยใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ Frequency Division Multiplex (FDM) หรือการขจัดเสียงสะท้อน (Echo cancellation) ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เมื่อผู้พูดสนทนากับฝั่งตรงข้าม แต่มีเสียงสะท้อนกลับมาที่ผู้พูด ทั้งการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ และการขจัดเสียงสะท้อนสามารถทำงานร่วมกันได้ นั่นหมายถึงแบนด์วิดท์ของ ADSL เป็นแบบอสมมาตร



รูปที่ 2.7 มัลติเพล็กซ์แบบการจัดเสียงสะท้อน (Echo cancellation)



รูปที่ 2.8 มัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplex)

การกำหนดมาตรฐาน ANSI T1.413 นั้น ADSL ต้องใช้การเข้ารหัสแบบ DMT FDM หรือการจัดเสียงสะท้อน (echo canceller) ทำให้การทำงานแบบพลูคูเพล็กซ์บรรลุผลสำเร็จ FDM เป็นวิธีที่ทนต่อสัญญาณรบกวน แต่การจัดเสียงสะท้อนไม่มั่นคงต่อผลกระทบของสัญญาณรบกวนไขว้แทรกที่เกิดขึ้นจากด้านเดียวกัน ทำให้เครื่องรับได้รับสัญญาณที่ส่งมาจากคู่สายข้างเคียงหรือเครื่องส่งที่

อยู่ในระบบเดียวกัน การหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนไขว้แทรกที่เกิดจากด้านเดียวกัน โดยยอมให้เครื่องรับตัดความถี่ที่เครื่องส่งข้างเคียงทำการส่งอยู่ทิ้ง โดยตัดแบนด์วิดท์ในทิศทางที่เหมือนกัน การขจัดเสียงสะท้อนมีผลกระทบเกิดขึ้นมากในการใช้แบนด์วิดท์ และสามารถใช้ได้ในความถี่ต่ำ ๆ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้น

การเข้ารหัส ADSL สามารถทำได้หลายวิธี เช่น 2B1Q CAP QAM หรือ DMT อุปกรณ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสแบบ DMT ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ความชื้น และสัญญาณรบกวน DMT ทนต่อสัญญาณรบกวน เช่น คลื่นวิทยุ AM และทนต่อสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกที่เกิดจากคู่สายทองแดงข้างเคียง การเข้ารหัสแบบ CAP นั้น ได้รับการยอมรับโดยนำมาใช้ในการเข้ารหัส ADSL ในมาตรฐาน ANSI T1.413

### 2.3.3 โครงสร้างซูเปอร์เฟรมของ ADSL

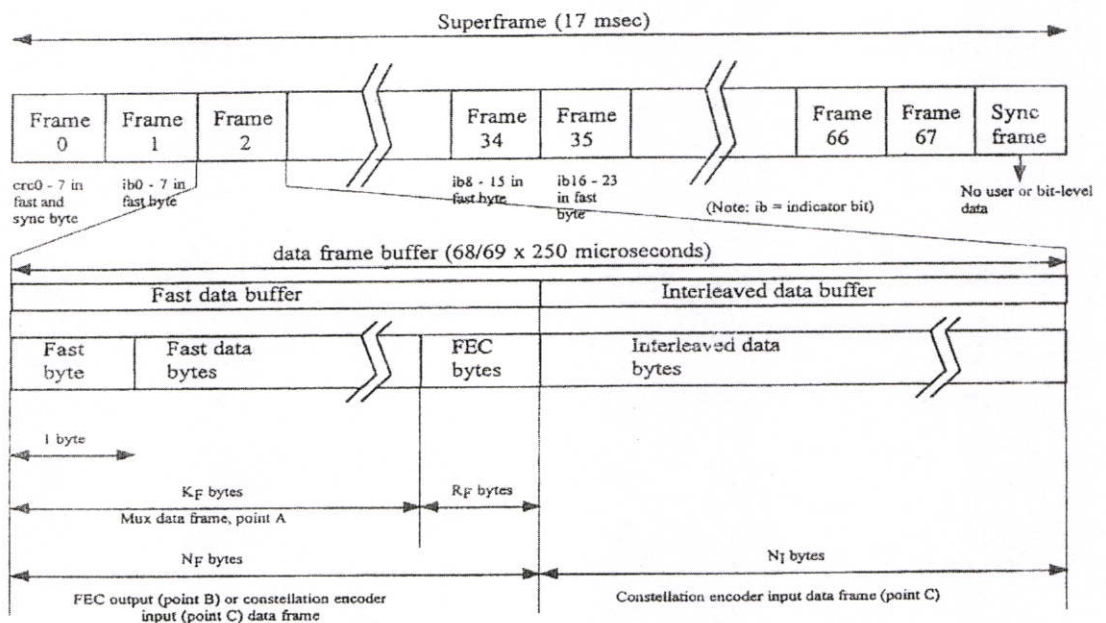
การกำหนดโครงสร้างเฟรมของ ADSL ครั้งที่ 2 แบ่งเป็น 4 เฟรม คือ โครงสร้างเฟรม 0 1 2 และ 3 โครงสร้างเฟรม 0 ได้กำหนดโครงสร้างพื้นฐานไว้ในครั้งที่ 1 โครงสร้างเฟรม 1 นั้นถูกตัดชุดควบคุมการซิงโครไนซ์ที่ใช้กับเฟรมซิงโครไนซ์ โครงสร้างเฟรม 2 และโครงสร้างเฟรม 3 นั้นไว้สำหรับลดโอเวอร์เฮดของเฟรมให้น้อยลง โดยการแยก หรือรวมฟาสต์ไบต์ (Fast byte) กับซิงค์ไบต์ (Sync byte) ATU-C ต้องรองรับเฟรมทั้งหมดรวมทั้งที่ต่ำกว่าได้ ตัวอย่างเช่น ถ้ารองรับเฟรม 2 ต้องรองรับเฟรม 0 และเฟรม 1 ได้ ATU-R มีชุดควบคุมโครงสร้างเฟรมสุดท้ายใช้ในการเลือกเส้นทางของ ATU-R

รูปที่ 2.9 แสดงซูเปอร์เฟรมของ ADSL พื้นฐานของซูเปอร์เฟรมนั้นมาจากการรวมเฟรมขนาดเล็กเข้าด้วยกัน แต่ละซูเปอร์เฟรม ประกอบด้วยเฟรมจำนวน 68 เฟรม และเฟรมซิงโครไนซ์ จำนวน 1 เฟรม ใช้เวลาในการส่ง 17 มิลลิวินาที (ms) ความถี่พาห้ในการทำงานของ DMT มีค่า 4 kHz ในทางปฏิบัติ 4.3125 kHz แต่ไม่ได้ใช้บริเวณขอบของความถี่ ในแต่ละเฟรมใช้เวลาในการส่ง 250 ไมโครวินาที ด้วยเหตุที่ในทางปฏิบัติไม่ได้ส่งเฟรมซิงโครไนซ์ ซึ่งเป็นโอเวอร์เฮด (1 เฟรมในจำนวนเฟรมทั้งหมด 69 เฟรม) และในการส่งโอเวอร์เฮดจะต้องตามด้วยการส่งเฟรมข้อมูลภายใน 68 หรือ 69 ครั้งใน 250 ไมโครวินาที

### 2.3.4 ฟาสต์ดาต้าและอินเตอร์ลีฟดาต้า

ในช่วงแรกการพิจารณาเรื่องเฟรมของ ADSL นั้น คิดในเรื่องของฟาสต์ดาต้า (Fast data) และอินเตอร์ลีฟดาต้า (Interleaved data) การวางสลับเฟรมข้อมูลเป็นขบวนการเพื่อลดสัญญาณรบกวน วิธีนี้ทำได้โดยกระจายบิตในแบนด์การส่งให้ต่างกัน ดังนั้นกลุ่มของบิตที่เรียงกันมาเป็นลำดับ จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยใช้ Forward error correction (FEC) ตัดสินใจว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่และทำการแก้ไขให้ถูกต้องโดยอัตโนมัติ ซึ่งมี 2 วิธีที่จะทำ

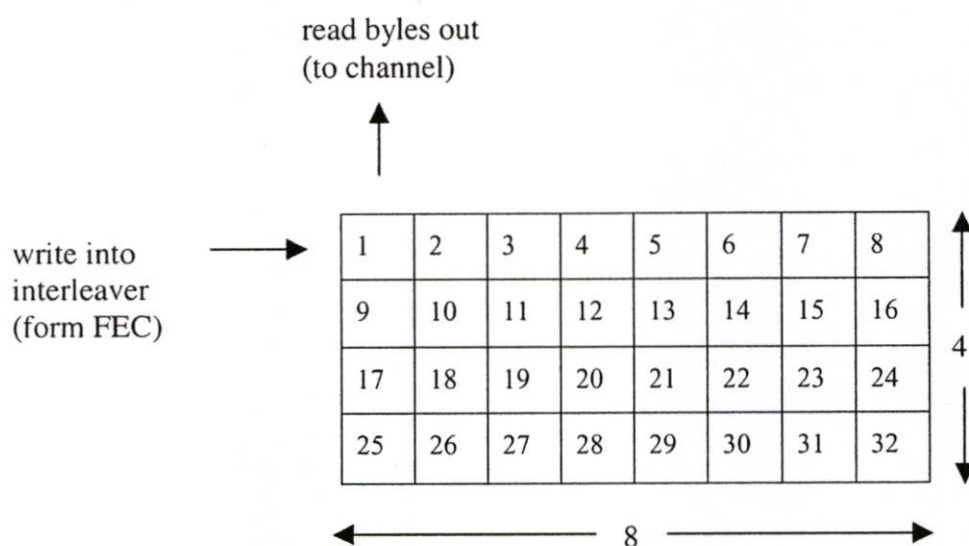
ให้บรรลุผลสำเร็จคือ บล็อกอินเตอร์ลีฟ (Block Interleaved) และคอนโวลูชันอินเตอร์ลีฟ (Convolutional Interleaved) ทั้ง 2 วิธีนี้ทำการเปลี่ยนแปลงลำดับบิตที่ส่งไปในสตรีมบิตส่ง และทำการเรียงสลับบิตใหม่ที่ด้านรับ การวางสลับบิตจะใส่ข้อมูลลงในแถวบล็อกมีขนาดคงที่และส่งออกทางด้านคอลัมน์ดังแสดงในรูป 2.10 คอนโวลูชันอินเตอร์ลีฟนั้น ออฟเซทบล็อก (สี่เหลี่ยมคางหมู) มีบัพเฟอร์แบบวงกลมทำงานโดยเขียนทางด้านแถวและอ่านทางด้านคอลัมน์คล้ายกับบล็อกอินเตอร์ลีฟ แต่ต่างกันที่คอนโวลูชันอินเตอร์ลีฟ มีการออฟเซทและมีบัพเฟอร์แบบวงกลม ทำให้มีความน่าเชื่อถือมากกว่าบล็อกอินเตอร์ลีฟ ฟาสดาต้าที่ต่างจากอินเตอร์ลีฟคือ อินเตอร์ลีฟจะช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณรบกวน แต่ขบวนการอินเตอร์ลีฟและดีอินเตอร์ลีฟจะเพิ่มระยะเวลาแฝงที่สัมพันธ์กับข้อมูล ฟาสดาต้าที่ต่างจากอินเตอร์ลีฟจะมี low latency ที่ไวต่อสัญญาณรบกวน เมื่อเปรียบเทียบกับอินเตอร์ลีฟ ฟาสดาต้ามีข้อดีกว่าในเรื่องการป้องกันสัญญาณรบกวน เหมาะกับการใช้งานของวีดีโอออนไลน์



รูปที่ 2.9 โครงสร้างซูเปอร์เฟรมของ ADSL ที่ด้านส่งของ ATU-C

เมื่อ ADSL ถูกนำไปใช้งานกับ ATM มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยที่จำเป็นต่อสตรีมข้อมูลช่องสัญญาณย่อย AS0-3 (ATM downstream simplex sub-channels designators) AS0 และ AS1 ของ ฟาสดาต้าและอินเตอร์ลีฟดาต้า ในกรณี AS0 และ AS1 อาจจะเป็น (LS0-2 Duplex sub-channels designators) LS0 และ LS1 ก็ได้ ถูกใช้งานฟาสดาต้าใช้เส้นทางการส่งสัญญาณเส้นทางหนึ่งและอิน

เตอร์ลีฟดาต้าใช้เส้นทางหนึ่ง ซึ่งจะทำได้ง่ายขึ้นและสะดวกต่อการใช้งานเป็นวิธีที่เหมาะสมและดีที่สุดสำหรับการส่งสัญญาณแต่ละประเภท



รูปที่ 2.10 บล็อกอินเตอร์ลีฟขนาดความกว้าง 8 และยาว 4

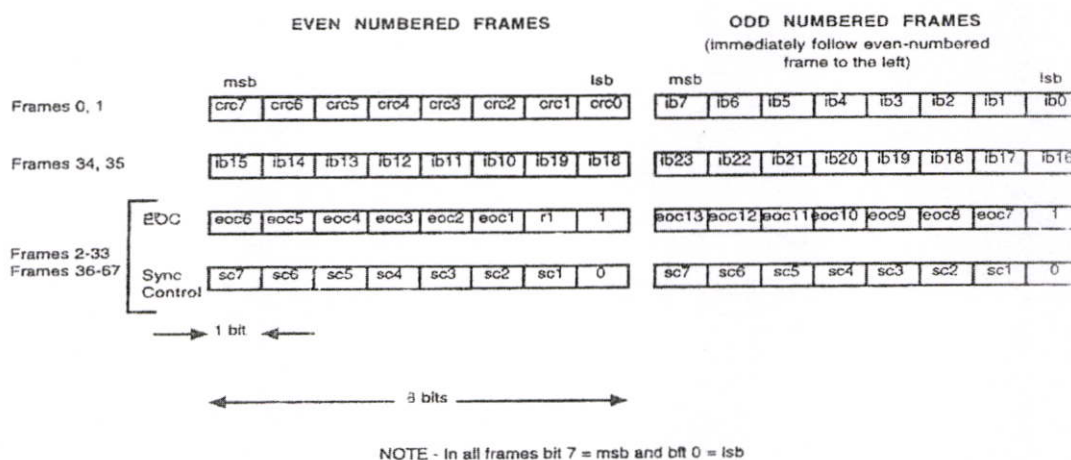
### 2.3.5 ฟาสไบท์

ฟาสไบท์หรือไบท์แรกในฟาสดาต้าบัพเฟอร์ถูกนำมาใช้ในหลายวัตถุประสงค์ ดังรูปที่ 2.11 วัตถุประสงค์โดยทั่วไปเพื่อทำการตรวจสอบ Cyclic Redundancy Check (CRC) Indicator Bit (ib) Embedded Operation Control (eoc) และ Sync Control (sc) เฟรมที่ 2 ถึงเฟรมที่ 33 และ 36 ถึง 67 บิต eoc และ sc กำหนดโดยค่าของบิตสำคัญน้อยที่สุดของฟาสไบท์ ในการกำหนดครั้งที่ 2 นั้นไม่ต้องใช้โอเวอร์เฮดในการควบคุมการซิงโครไนซ์ (sc), CRC หรือ ib เฟรมคู่และเฟรมคี่ของฟาสไบท์ใช้ส่งข้อมูล eoc จำนวน 13 บิต ซึ่งประกอบด้วยข้อความที่แสดงให้เห็นว่าไม่มีการซิงโครไนซ์

การประหยัดไบท์ในฟาสไบท์หรือซิงค์ไบท์ไม่มีผลต่อ Synchronous transfer mode (STM) เนื่องจากหลาย ๆ ช่องสัญญาณ One of the ATM downstream sub-channels (ASx) ถูกใช้งานเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณ One of the Duplex sub-channels (LSx) ถ้าช่องสัญญาณถูกใช้งานเพิ่มขึ้นโอเวอร์เฮดจะลดลง หรือเมื่อใช้งาน ATM จำนวนของช่องสัญญาณจะลดลงเช่นกัน (ผลรวมที่ได้ไม่เกิน 4) และการทำงานของซิงโครไนซ์เซชันถูกนำมาใช้ประโยชน์น้อยและนำไปใช้เป็นโอเวอร์เฮด แต่ถ้าช่องสัญญาณไม่เพียงพอสำหรับใช้งานสามารถตัดโอเวอร์เฮดออกได้

รูปแบบพื้นฐาน 2 รูปแบบที่ใช้ในการลดโอเวอร์เฮด คือ รูปแบบแรกต้องใช้โอเวอร์เฮดเพียงช่องสัญญาณเดียวในแต่ละทิศทาง หรือรูปแบบที่สองใช้โอเวอร์เฮดในช่องสัญญาณฟาสช่องสัญญาณเดียวและช่องสัญญาณอินเตอร์ลีฟช่องสัญญาณเดียวเท่านั้น ทำให้การใช้งาน ATM

สามารถใช้กับ STM ได้โดยใช้ช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวเท่านั้น สังเกตได้ว่าคำว่า “ช่องสัญญาณ” ใช้แทนได้หลายอย่าง เช่น ช่องสัญญาณ (หรือช่องสัญญาณย่อย หรือแบนด์ของพาร์ย่อย) การทำงานของ DMT มีแบนด์ใช้งาน 256 ช่อง คือช่องสัญญาณ ASx และ LSx ซึ่งเป็นท่อของข้อมูล ช่องสัญญาณใช้ใน โพรโทคอลทรานสปอร์ตเลเยอร์ ถึงแม้ว่าจะมีชื่อแตกต่างกันแต่ชื่อของช่องสัญญาณส่วนใหญ่จะเรียกตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน



รูปที่ 2.11 รูปแบบฟาสซิงค์ไบท์ในเครื่องส่ง ATU-C (จาก ANSI T1.413)

### 2.3.6 ซิงค์ไบท์และบิต SC

โหมคของโอเวอร์เฮดซิงค์ไบท์จะถูกกรวมเข้ากับฟาสไบท์เพื่อเตรียมรูปแบบของเฟรมข้อมูล ในการลดโหมคของโอเวอร์เฮด ฟาสไบท์ใช้สำหรับฟาสบัพเฟอร์และซิงค์ไบท์ใช้สำหรับอินเตอร์ลิฟคาต้าบัพเฟอร์ ตารางที่ 2.1 แสดงฟังก์ชันโอเวอร์เฮดในการลดโหมคโอเวอร์เฮด ซิงค์ไบท์จะเป็นกลไกในการระบุช่องสัญญาณ ASx และ LSx ซึ่งใช้กับฟาสคาต้าบัพเฟอร์หรืออินเตอร์ลิฟคาต้าบัพเฟอร์ในโหมคโอเวอร์เฮดแบบเต็มรูปแบบ ซิงค์ไบท์ใช้สำหรับอินเตอร์ลิฟคาต้าในเฟรม 1 ถึง 67 และฟาสคาต้าเฟรม 67

ตารางที่ 2.1 โอเวอร์เฮดฟังก์ชันเพื่อลดโหมคโอเวอร์เฮด ด้วยการรวมฟาสไบท์และซิงค์ไบท์

เฟรม	รูปแบบฟาสไบท์ (สำหรับฟาสบัพเฟอร์)	รูปแบบซิงค์ไบท์ (สำหรับอินเตอร์ลีฟบัพเฟอร์)
0	ฟาส CRC	อินเตอร์ลีฟ CRC
1	ib0-7	ib0-7
34	ib8-15	ib8-15
35	ib16-23	ib16-23
$4n+2, 4n+3$ (เมื่อ $n=0..16, n! = 8$ )	sync หรือ eoc	sync หรือ eoc
$4n, 4n+1$ เมื่อ $n=0...16, n! = 0$	aoc	aoc

### 2.3.7 บิตชี้นำ (Indicator bits (ib))

บิตชี้นำใช้สำหรับตรวจสอบความผิดพลาดและแก้ไขความผิดพลาดให้ถูกต้อง ใน 1 ชูบเปอร์เฟรมมี 24 บิต ชี้นำส่งไปในโอเวอร์เฮดไบท์ในเฟรมที่ 1, 34 และ 35 การสูญเสียสัญญาณ ข้อบกพร่องของสถานีปลายทางและข้อมูลอื่น ๆ ที่ทำให้การออกแบบเป็นที่น่าพอใจหรืออาจจะทำให้ความเป็นไปได้ ในการแก้ไขความผิดพลาดสูงขึ้น บิตชี้นำของฟาสบัพเฟอร์ในทิศทางสัญญาณขาลงใช้สำหรับป้องกันความผิดพลาด ลดการสูญเสียของสัญญาณและลดข้อบกพร่องของสถานีปลายทาง

### 2.3.8 บิต CRC

จุดมุ่งหมายของไบท์ Cyclic Redundancy Check (CRC) ใช้ตรวจสอบบิตของสตรีมข้อมูล ซึ่งอยู่ในสมการทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าอะไรคือไบท์ก่อนหน้านี โดยทั่วไปบิตจำนวน 8 บิตเท่านั้นที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ไบท์และความเป็นไปได้ในการเกิดความผิดพลาดไม่สามารถแยกออกจากบิตสุดท้ายได้ อย่างไรก็ตามความผิดพลาดสามารถแยกออกได้ 256 ประเภท การแก้ไขความผิดพลาดสามารถทำได้ ถ้าเฟรมนั้นมีความผิดพลาดน้อยกว่า 256 ไบท์ และมี CRC ในเฟรมนั้นด้วย ในหลาย ๆ เฟรมของ HDLC ใช้ไบท์ CRC จำนวน 2 ไบท์ หรือ 16 CRC

### 2.3.9 โอเวอร์เฮดของ ADSL

โอเวอร์เฮดของ ADSL รวมอยู่ในอัตราบิตของช่องสัญญาณหรือเท่ากับความจุที่ขนส่งข่าวสารของผู้ใช้ในการส่งสัญญาณแบบซิมเพล็กซ์ (สัญญาณขาลง) และดูเพล็กซ์ (สัญญาณขาขึ้นและสัญญาณขาลง) หน้าที่ของโอเวอร์เฮดนั้นมีหลายอย่าง หน้าที่หลักคือซิงโครไนซ์ ช่องสัญญาณ ADSL จะกำหนด AS และ LS จากนั้นบิตเหล่านี้จะถูกใส่ลงในสตรีมของเฟรม ADSL

อีกหน้าที่หนึ่งของโอเวอร์เฮดคือ embedded operations channel (eoc) และ operation control channel (occ) ซึ่งใช้กำหนดรูปแบบใหม่ให้กับสถานีปลายทางและปรับอัตราบิตให้เหมาะสม การตรวจสอบความผิดพลาดโดยใช้ Cyclic Redundancy Check (CRC) บิตที่กำหนดขึ้น เพื่อใช้สำหรับการบริหารและบำรุงรักษา (OAM) และบิตที่ใช้สำหรับแก้ไขความผิดพลาด (FEC) ความผิดพลาดบางอย่างสามารถแก้ไขได้ โดยไม่ต้องส่งสัญญาณใหม่ บิตโอเวอร์เฮดของ ADSL จะถูกส่งไปในทิศทางสัญญาณขาขึ้นและสัญญาณขาลงที่อัตรา 32 kbps ในทิศทางสัญญาณขาลงอัตราบิตสูงสุดมีค่า 128 kbps และต่ำสุด 64 kbps ค่าดีฟอลท์กำหนดไว้สูงสุด 96 kbps ในทิศทางสัญญาณขาขึ้นอัตราบิตสูงสุดมีค่า 64 kbps และต่ำสุด 32 kbps ค่าดีฟอลท์กำหนดไว้สูงสุด 64 kbps

ในบางกรณีบิตโอเวอร์เฮดจะฝังอยู่ในอัตราบิตของเฟรม ADSL และไม่เพิ่มแบนด์วิดท์ของผู้ใช้บริการ โอเวอร์เฮดสามารถเพิ่มอัตราบิตได้ในหนึ่งทิศทาง ตัวอย่างเช่น ขนส่งข้อมูลคลาส 1 ที่อัตรา 6.144 Mbps สัญญาณขาลงสูงสุด 192 kbps และต่ำสุด 128 kbps อัตราบิตโอเวอร์เฮดในช่องสัญญาณดูเพล็กซ์ขนส่งคลาส 1 อัตราบิตจะเพิ่มขึ้นจาก 6.144 Mbps เป็น 6.976 Mbps (ค่าสูงสุด) หรือ 6.336 Mbps (ค่าต่ำสุด) ในการขนส่งคลาสอื่น ๆ ค่าดีฟอลท์ของโอเวอร์เฮดคือ 6.912 Mbps

แนวคิดหลักของโอเวอร์เฮดใน ADSL นั้นใช้สำหรับซิงโครไนซ์เซชัน ซึ่งมีหน้าที่สำคัญเพราะบิตที่ส่งออกไปจะไวต่อการหน่วงเวลา เช่น การให้บริการภาพและเสียง ซิงโครไนซ์จะช่วยให้การส่งข้อมูลในช่องสัญญาณมีประสิทธิภาพดีขึ้น

### 2.3.10 การทำงานของ ADSL

#### 2.3.10.1 การรับส่งสัญญาณ ADSL ในทิศทางขาลง

อินเตอร์เฟซของ ADSL รองรับได้มากกว่าหนึ่งบิตสตรีม ในการขนส่งข้อมูลและสามารถส่งได้หลายประเภท เช่น เฟรมทรานสปอร์ต บิตสตรีมใน ADSL แบ่งออกสูงสุด 7 ช่องสัญญาณ สำหรับขนส่งในเวลาเดียวกันหรือเรียกได้ว่า bearer ช่องสัญญาณจำนวน 4 ช่อง สามารถขนส่งข้อมูลขาลงไปยังลูกค้าได้ ช่องสัญญาณทั้ง 4 ช่องนี้ จะถูกกำหนดเป็นช่องสัญญาณ AS0 ถึง AS3 เมื่อเพิ่มช่องสัญญาณขึ้นอีก 3 ช่อง อาจส่งได้ทั้งสองทิศทาง ทั้งสัญญาณขาขึ้นและสัญญาณขาลง ช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเรียกว่า LS0 ถึง LS2 ช่องสัญญาณขนส่งนี้ เป็นช่องสัญญาณลอคิกและบิตทั้งหมดจะถูกส่งไปพร้อมกันในช่องสัญญาณของ ADSL โดยไม่ต้องใช้แบนด์วิดท์

จำนวนเท่าของ 32 kbps อาจจะไม่ใช้แนวความคิดที่ดีพอ โดยเฉพาะในระหว่างการทำงานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ ADSL ที่สร้างทรานสปอร์ตคลาสขึ้นมา 4 ช่อง สำหรับขนส่งสัญญาณขาลงทิศทางเดียว แนวความคิดนี้ได้ใช้เป็นพื้นฐานของการเพิ่มจำนวนเท่าของ 1.536 Mbps (ใช้ส่งอัตราบิต T1) ทรานสปอร์ตคลาสจะเป็น 1.536 Mbps 4.608 Mbps และ 6.144 Mbps ช่องสัญญาณขนส่งแบบคู่เฟล็กซ์สามารถขนส่งช่องสัญญาณควบคุมและช่องสัญญาณ ISDN (BRI และ 384 kbps) ได้ ทำให้สังเกตได้ว่า ADSL ไม่จำกัดทรานสปอร์ตคลาสในการขนส่งข้อมูล

อุปกรณ์ ADSL นั้นจะสร้างช่องสัญญาณย่อยหลาย ๆ ช่อง ทรานสปอร์ตคลาสสูงสุดมีอัตราเร็ว 6.144 Mbps ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 อัตราบิตของช่องสัญญาณย่อย ADSL ตามการกำหนด bearer

ช่องสัญญาณย่อย	อัตราเร็ว ข้อมูล ของ ช่อง สัญญาณย่อย	ค่าของ $n_x$ ที่ยอมใช้
AS0	$n_0 \times 1.536 \text{ Mbps}$	$n_0 = 0, 1, 2, 3$ หรือ 4
AS1	$n_1 \times 1.536 \text{ Mbps}$	$n_1 = 0, 1, 2$ หรือ 3
AS2	$n_2 \times 1.536 \text{ Mbps}$	$n_2 = 0, 1$ หรือ 2
AS3	$n_3 \times 1.536 \text{ Mbps}$	$n_3 = 0$ หรือ 1

ทรานสปอร์ตคลาส 1 มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้ในระยยะสั้น ๆ ซึ่งให้ความจุของสัญญาณขาสูงขึ้นไป คลาสนี้สามารถขนส่งสัญญาณขาลงได้ 6.144 Mbps และรวมช่องสัญญาณขนส่งได้ 1-4 ช่อง สัญญาณ อัตราบิตจะเป็นจำนวนเท่าของ 1.536 Mbps ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราบิตได้ถึง 6.144 Mbps ทรานสปอร์ตคลาส 1 กำหนดรูปแบบได้ดังนี้

- ช่องสัญญาณขนาด 4.608 Mbps จำนวน 1 ช่อง และช่องสัญญาณ 1.536 Mbps จำนวน 1 ช่อง
- ช่องสัญญาณขนาด 3.072 Mbps จำนวน 2 ช่อง
- ช่องสัญญาณขนาด 3.072 Mbps จำนวน 1 ช่องและช่องสัญญาณ 1.536 Mbps จำนวน 2 ช่อง
- ช่องสัญญาณขนาด 1.536 Mbps จำนวน 4 ช่อง

ทรานสปอร์ตคลาส 2 สามารถส่งสัญญาณขาหลังที่อัตราบิต 4.608 Mbps คลาสย่อยเป็นการรวมช่องสัญญาณ 1-3 ช่อง อัตราบิตจะเป็นจำนวนเท่าของ 1.536 Mbps AS3 ไม่จำเป็นต้องใช้ใน ทรานสปอร์ตคลาส 2 และสามารถเพิ่มอัตราบิตได้ถึง 4.608 Mbps ซึ่งกำหนดรูปแบบได้ดังนี้

- ช่องสัญญาณขนาด 4.608 Mbps จำนวน 1 ช่อง
- ช่องสัญญาณขนาด 3.072 Mbps จำนวน 1 ช่องและช่องสัญญาณขนาด 1.536 Mbps จำนวน 1 ช่อง
- ช่องสัญญาณขนาด 1.536 Mbps จำนวน 3 ช่อง

ทรานสปอร์ตคลาส 3 ขนส่งสัญญาณขาหลังได้ 3.072 Mbps คลาสนี้รวมช่องสัญญาณได้ 1 – 2 ช่องสัญญาณ อัตราบิตจะเป็นจำนวนเท่าของ 1.536 Mbps ในคลาส 3 นี้ไม่ต้องใช้ AS2 และ AS3 และสามารถเพิ่มอัตราบิตได้ถึง 3.072 Mbps กำหนดรูปแบบได้ดังนี้

- ช่องสัญญาณขนาด 3.072 Mbps จำนวน 1 ช่อง
- ช่องสัญญาณขนาด 1.536 Mbps จำนวน 2 ช่อง

ทรานสปอร์ตคลาส 4 เหมาะสำหรับใช้ในระยะทางไกล ๆ ขนส่งช่องสัญญาณได้ความจุต่ำสุดของสัญญาณขาหลัง ช่องสัญญาณนี้มีอัตราบิต 1.536 Mbps ใช้เฉพาะ AS0 เท่านั้น

### 2.3.10.2 การรับส่งสัญญาณ ADSL แบบสองทิศทาง

นอกจากช่องสัญญาณขาหลังแบบทิศทางเดียวแล้วยังมีช่องสัญญาณขาขึ้นทิศทางเดียวที่ต้องศึกษาค้นคว้า แต่สามารถขนส่งได้สองทิศทางมากกว่า 3 ช่องสัญญาณในเวลาเดียวกัน ช่องสัญญาณจำนวน 1 ช่องจะเป็นช่องสัญญาณควบคุมคือช่องสัญญาณ C ทำหน้าที่ขนส่งสัญญาณข่าวสาร เพื่อเลือกการให้บริการและการเรียกออก สัญญาณที่ส่งจากผู้ใช้ไปยังโครงข่ายสำหรับช่องสัญญาณขาหลังทิศทางเดียวก็ขนส่งในช่องสัญญาณนี้ และช่องสัญญาณ C สามารถขนส่งสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณดูเพล็กซ์ได้ด้วย

ช่องสัญญาณ C ทำงานที่ 16 kbps โดยขนส่งในคลาส 4 และ 2M-3 ข่าวสารที่ช่องสัญญาณ C ขนส่งจะเป็นส่วนของโอเวอร์เฮดในเฟรม ADSL ทรานสปอร์ตคลาสอื่น ๆ ใช้ช่องสัญญาณ C ขนาด 64 kbps และข่าวสารจะขนส่งในช่องสัญญาณดูเพล็กซ์ LS0

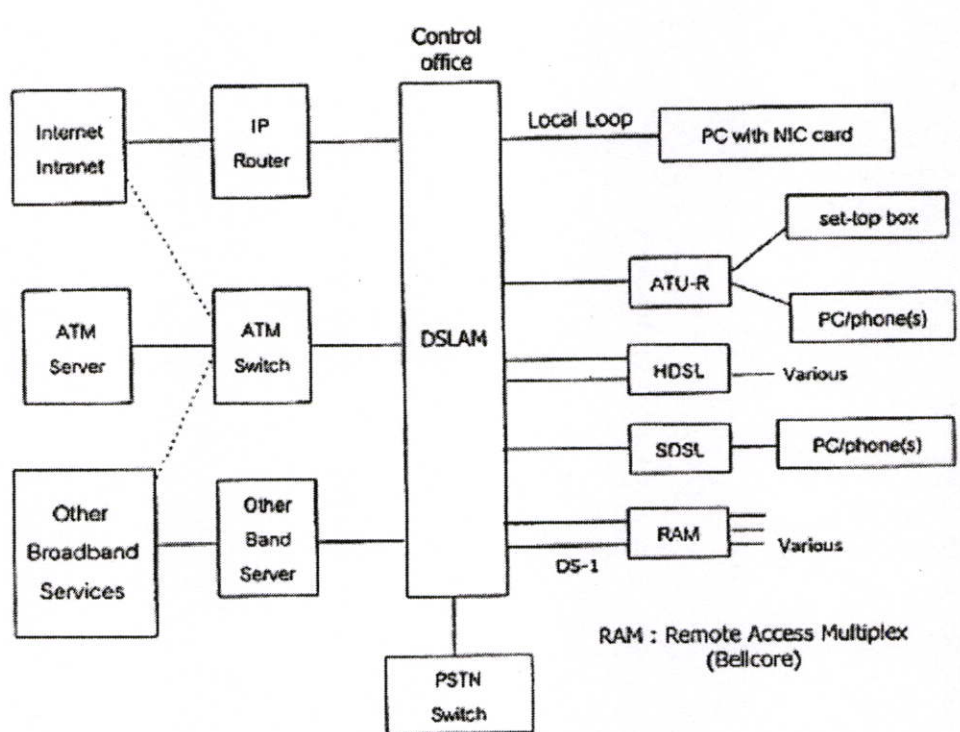
ตารางที่ 2.3 การทำงานของช่องสัญญาณคูเพล็กซ์ในแต่ละทรานสปอร์ตคลาส

ทรานสปอร์ตคลาส	ทางเลือกของคูเพล็กซ์	การทำงานของช่องสัญญาณใน ADSL
1 หรือ 2M-1 (ค่าต่ำสุด)	รูปแบบ 1:160 kbps+384 kbps รูปแบบ 2:576 kbps เท่านั้น	LS1,LS2 LS2 เท่านั้น
2,3 หรือ 2M-2 (ค่ากลาง)	รูปแบบ 1:160 kbps เท่านั้น รูปแบบ 2:384 kbps เท่านั้น	LS1 เท่านั้น LS2 เท่านั้น
4 หรือ 2M-3 (ค่าสูงสุด)	160 kbps เท่านั้น	LS1 เท่านั้น

ช่องสัญญาณ C ในระบบ ADSL นั้นสามารถขนส่งได้สองทางเลือกในช่องสัญญาณแบบสองทิศทาง LS1 มีอัตราบิต 160 kbps และ LS2 อัตราบิต 384 kbps หรือ 576 kbps โครงสร้างที่แท้จริงของช่องสัญญาณแบบสองทิศทางนั้น จะเปลี่ยนไปตามทรานสปอร์ตคลาสและกำหนดจากช่องสัญญาณซิมเพล็กซ์ โครงสร้างของช่องสัญญาณคูเพล็กซ์แสดงดังตารางที่ 2.3

## 2.4 โครงสร้างของ Digital subscriber line access multiplexer (DSLAM)

รูปที่ 2.12 แสดงสถาปัตยกรรมของ DSLAM ในเครือข่าย ADSL ประโยชน์ของ DSLAM นั้นรองรับการให้บริการได้หลายรูปแบบ เช่น อินเทอร์เน็ต ATM และการให้บริการบรอดแบนด์อื่น ๆ



รูปที่ 2.12 สถาปัตยกรรมของ DSLAM

DSLAM ติดตั้งไว้ที่ชุมสายโทรศัพท์ทำงานเสมือนผู้ให้บริการ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็น Local Exchange Carrier (LEC) บางกรณีที่ต้องการให้บริการระบบแอนะล็อกด้วยต้องทำการเชื่อมโยง DSLAM เข้ากับชุมสาย PSTN

ในด้านลูกค้า DSLAM สามารถรองรับ DSL จำนวนเท่าไรก็ได้ ขึ้นอยู่กับเทคนิคของอุปกรณ์ข่ายสายที่เตรียมไว้ และการ์ดสำหรับเชื่อมโยงเครือข่ายของ ADSL ในส่วนของ ATU-R จะติดตั้งการ์ดสำหรับเชื่อมโยงเครือข่ายไว้ภายในอุปกรณ์แล้ว

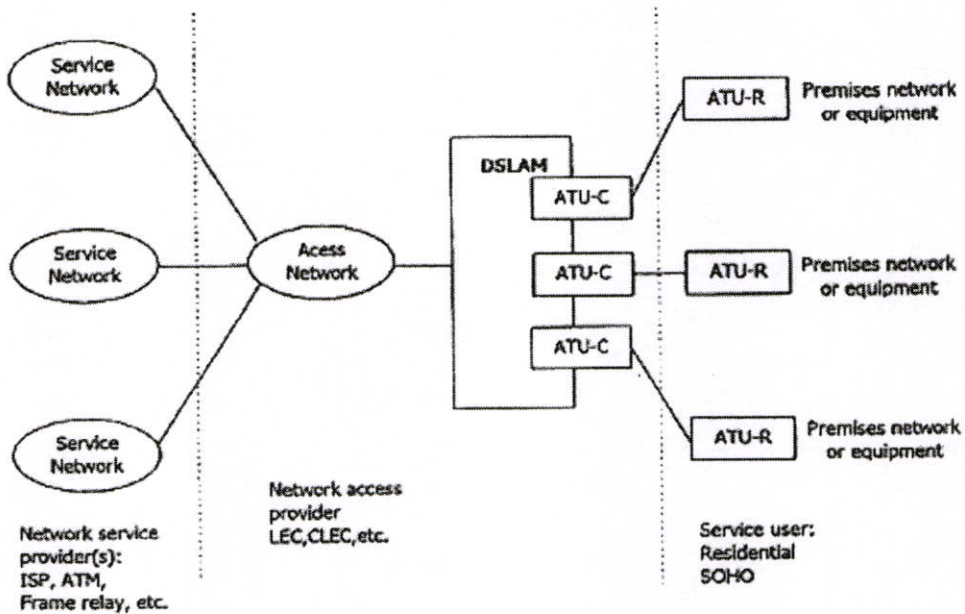
ในด้านผู้ให้บริการ DSLAM จะรองรับ IP Router ATM Switch หรือการให้บริการแถบกว้าง IP Router ซึ่งใช้สำหรับอินเทอร์เน็ตและอินทราเน็ตภายในบริษัท และ ATM Switch สำหรับเซิร์ฟเวอร์ของ ATM สถาปัตยกรรมของ DSLAM รองรับเซิร์ฟเวอร์และการให้บริการผ่านโครงข่าย ATM Switch โดยเชื่อมต่อเครือข่ายเหล่านี้ไปที่เครือข่ายให้บริการของ DSLAM อาจจะเป็น 10Base-T หรืออินเตอร์เฟซของ LAN เป็นต้น

DSLAM ไม่มีสวิตช์หรือเราเตอร์ แต่มีวิธีมากกว่าหนึ่งวิธีในการมัลติเพล็กซ์ นั่นคือ DSLAM จะรวมสตรีมของบิตในช่องสัญญาณเป็นสัญญาณขาขึ้น ส่งจากที่พิกอาศัยและสำนักงานขนาดเล็ก และแยกสตรีมบิตขนาดใหญ่จากสัญญาณขาลง ที่รับมาจากโครงข่าย IP หรือ ATM DSLAM จะแยกสตรีมบิตในช่องสัญญาณเช่นเดียวกับการมัลติเพล็กซ์จาก DSLAM ไปที่อุปกรณ์ต้องสามารถขนส่งทราฟฟิกทั้งหมดจากลูกค้าได้ การรวมกันของทราฟฟิกขึ้นอยู่กับผลรวมของอัตราบิตด้านอินพุต โดยใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา TDM นอกจากนี้การมัลติเพล็กซ์ชนิดอื่นที่ใช้ในเครือข่ายเพื่อส่งและรับข้อมูลดิจิทัลที่ต้องนำมาพิจารณาเพราะการทำงานเหนือกว่า TDM คือเทคนิคที่เรียกว่า statistical time division multiplexing หรือ statistical TDM หรือ stat muxing ข้อดีของการมัลติเพล็กซ์แบบ statistical นั้น สามารถใช้งานได้หลายอย่าง เช่น สร้างบิตในสตรีมบิตได้ในระยะเวลาสั้น ๆ และสามารถใช้แบนด์วิดท์เดียวกันได้ในการใช้งานอื่น ๆ ซึ่งเป็นแนวคิดของการสวิตช์กลุ่มข้อมูล การสวิตช์กลุ่มข้อมูลใน statistical TDM นั้น ไม่ได้ทำงานทีละเส้นทาง แต่ทำงานทีละเครือข่าย

DSLAM ที่ใช้ TDM ทำให้รูปร่างแพ็คเกจของเซลล์ที่ส่งออกไปไม่มีอุปสรรคและรองรับการ cross connect ในอนาคตได้ ทำให้ DSLAM มีราคาสูงและมีประสิทธิภาพมาก เมื่อพิจารณาสัญญาณขาขึ้นของ DSLAM มี 64 อินพุตและสัญญาณขาขึ้นมีอัตรา 64 kbps เส้นทาง DSLAM ไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ มีขนาด  $64 \times 64 \text{ kbps} = 4,096 \text{ kbps}$  หรือ  $4.096 \text{ Mbps}$  สัญญาณขาลงของ ADSL ทำงานที่  $1.5 \text{ Mbps}$  สำหรับสัญญาณขาลง(มาตรฐานอเมริกา) มีเอาต์พุต 64 เอาต์พุต จะมีขนาด  $64 \times 1.5 \text{ Mbps}$  มีค่าประมาณ  $96 \text{ Mbps}$  ช่องสัญญาณ AS และ LS ในบิตเชิงโครโมสของ ADSL จะมีบิตวางรวมอยู่ด้วย ในบางครั้ง DSLAM จะกรองบิตว่างในแต่ละเส้นทางของ ADSL และส่งบิตข้อมูลไปที่เราเตอร์สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตเรียกแนวคิดนี้ว่า Dynamic Access Multiplex (DAM) ในรูปแบบของแบนด์วิดท์การทำงาน muxing มีผลต่อระบบมาก แนวคิดนี้เกิดขึ้นจาก Bellcore's Remote

#### 2.4.1 ประเภทของ DSLAM

รูปแบบและฟังก์ชันพื้นฐานของ DSLAM ไม่ครอบคลุมมาตรฐาน ADSL หรือ xDSL แนวคิดพื้นฐานของ DSLAM คือรองรับ ATU-C HTU-C หรืออุปกรณ์อื่นที่คล้ายคลึงกันได้หลายชนิด การใช้งานของ DSLAM เป็นส่วนสำคัญในสถาปัตยกรรม ADSL ทราฟฟิกทั้งหมดจะถูกส่งไปและรับมาจากผู้ใช้บริการผ่าน DSLAM รวมทั้งทราฟฟิกที่ส่งไปและรับมาจากเซิร์ฟเวอร์จะต้องผ่าน DSLAM ด้วย DSLAM จะติดตั้งที่ชุมสายท้องถิ่นเพราะจะต้องเข้าถึงข่ายสาย ตำแหน่งปกติสำหรับผู้ใช้บริการคือ LEC หรือ CLEC ทั้งหมดนี้จำเป็นต้องเข้าถึงข่ายสายที่เชื่อมต่อไปบ้านลูกค้า



รูปที่ 2.13 DSLAM ศูนย์กลางของ ADSL

ในการใช้งานจะแบ่งโครงข่าย ADSL เป็น 3 ส่วน ตามรูปที่ 2.13 ATU-R หรืออุปกรณ์ปลายทาง xDSL เช่น HTU-R จากผู้ให้บริการส่วนของโครงข่าย ATU-C HTU-C หรืออินเทอร์เฟซอื่นใน DSLAM จากผู้ให้บริการเครือข่ายทำการเชื่อมต่อระหว่างผู้ให้บริการและผู้ให้บริการ ใน DSLAM จะมี ATU-R จำนวนมากและยังประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อเครือข่ายในการให้บริการ เช่น ATM switch หรือ IP router การรองรับเครือข่ายในการให้บริการแต่ละประเภท ขึ้นอยู่กับประเภทของอินเทอร์เฟซใน DSLAM ส่วนประกอบของ DSLAM ประกอบด้วยการ์ด ซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์สำหรับรองรับ xDSL และรหัสแต่ละประเภท การ์ดจะรวมกันอยู่ในชั้น โดยใช้แหล่งจ่ายไฟร่วมกัน และชั้นจะอยู่ภายในตู้อุปกรณ์ ขนาดของตู้อุปกรณ์จะเป็นตัวกำหนดปริมาณของ DSLAM โดยการเชื่อมต่อเพื่อเข้าถึงเครือข่าย เช่น ATM หรืออีเทอร์เน็ต 10 หรือ 100 Mbps DSLAM จะรองรับอินเทอร์เฟซอนุกรมความเร็วสูง DSLAM สามารถส่งและรับเซลล์ ATM หรือแพ็กเก็ตของ IP ในหลายกรณีและรองรับโพรโทคอลด้วย เช่น IPX PPP และโพรโทคอลอื่น ๆ

จำนวนของข่ายสายสำหรับให้บริการจะเปลี่ยนไปตามจำนวนชั้นในตู้อุปกรณ์ จากจำนวนน้อยกว่า 100 ถึงมากกว่า 1,000 Port ตู้อุปกรณ์ DSLAM จะรองรับ ADSL หรือ xDSL โดยใช้รหัส CAP หรือ DMT ใน DSLAM มีตัวแยกสัญญาณรวมอยู่แล้ว เครือข่ายที่ใช้งานเช่น ATM switch ,อีเทอร์เน็ต LAN 10 Mbps, 100 Mbps หรือ Gigabit Ethernet interface (GE)

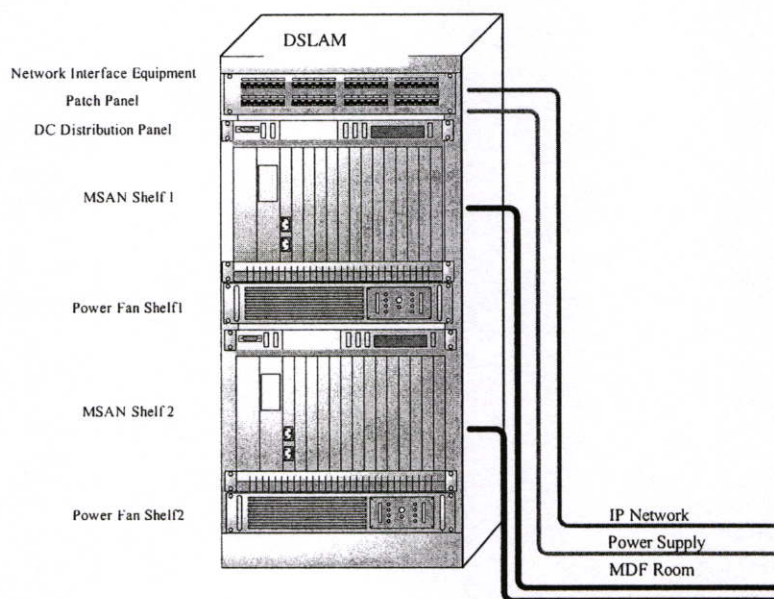
## 2.4.2 ความต้องการ DSLAM ของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง

ความต้องการ DSLAM ของผู้ให้บริการในปัจจุบันจะต้องออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล เช่น ITU-T, ETSI, IEEE, IETF และมีการทำงานตามมาตรฐานแบบเปิด ซึ่งสามารถนำมาประกอบทำงานร่วมและเชื่อมต่อใช้งานกับอุปกรณ์ของผู้ผลิตรายอื่น ๆ ที่มีการทำงานตามมาตรฐานเปิดแบบเดียวกันได้ โครงข่ายในส่วนของอุปกรณ์ DSLAM แบบ Indoor type และ Outdoor type ต้องสามารถติดตั้งให้มีลักษณะ Topology เป็น Ring หรือ Chain การให้บริการ Broadband service ต้องสามารถให้บริการ High Speed Internet, IP hone, Video phone, IP TV Broadcast, Video on demand ได้ตามความต้องการของผู้ใช้บริการ

### รูปแบบและการติดตั้งอุปกรณ์ DSLAM

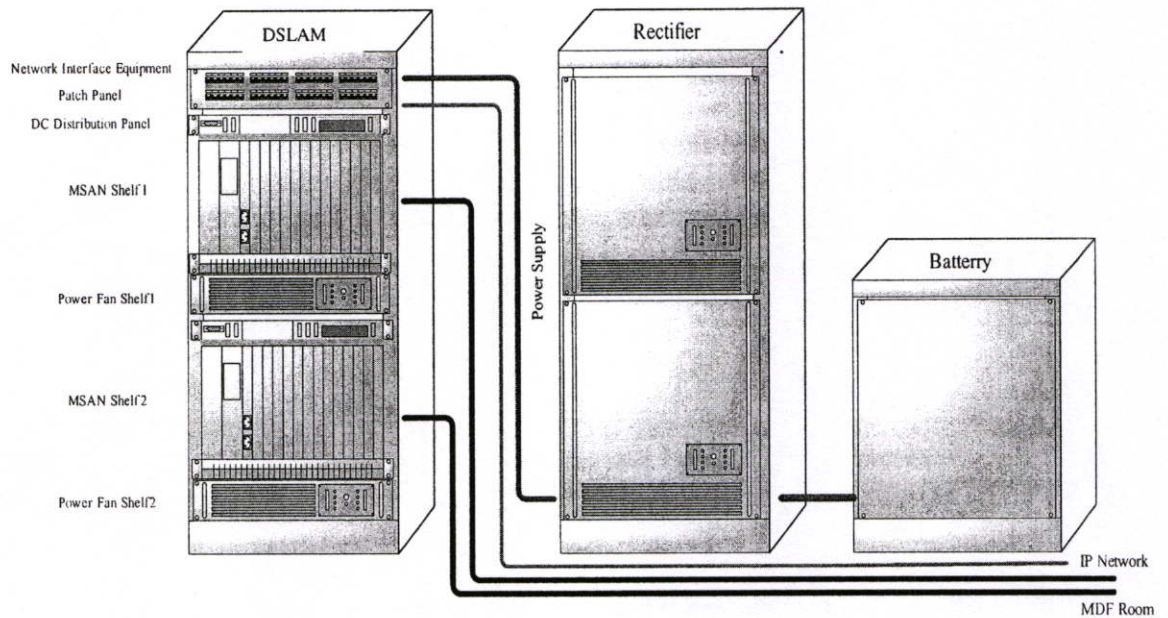
1. แบบภายในอาคารไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Indoor type (Without DC power supply)
2. แบบภายในอาคารมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Indoor type (With DC power supply)
3. แบบติดตั้งภายนอกอาคาร Outdoor type

รูปที่ 2.14 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ DSLAM แบบภายในอาคารไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Indoor type (Without DC power supply)



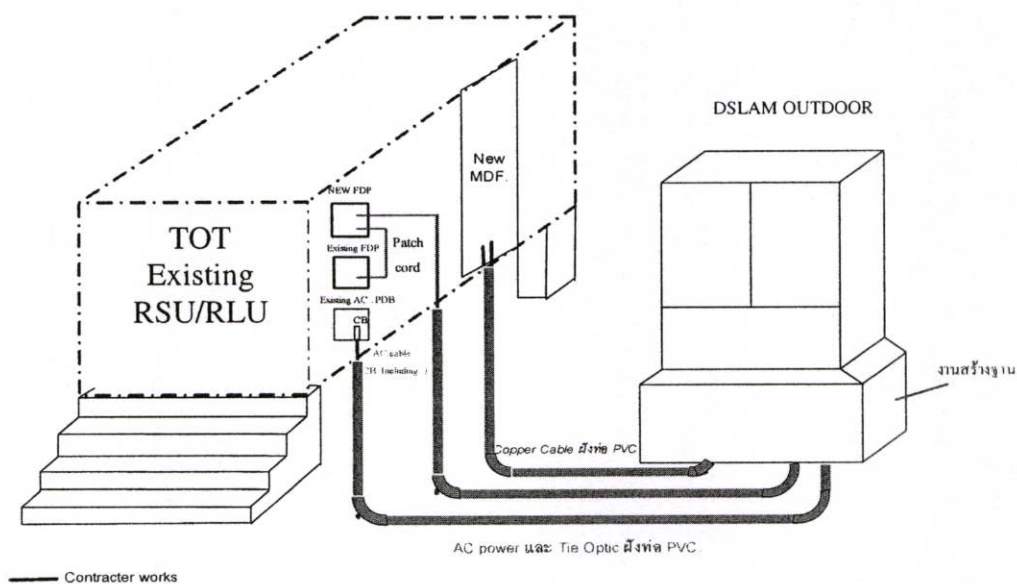
รูปที่ 2.14 การติดตั้งอุปกรณ์ DSLAM แบบ Indoor type (Without DC power supply)

รูปที่ 2.15 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ DSLAM แบบภายในอาคารมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Indoor type (With DC power supply) ประกอบด้วยอุปกรณ์ Rectifier Battery และ Main Distribution Frame (MDF) แบบ Wall Mount



รูปที่ 2.15 การติดตั้งอุปกรณ์ DSLAM แบบ Indoor type (With DC power supply)

รูปที่ 2.16 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ DSLAM แบบติดตั้งภายนอกอาคาร Outdoor type ประกอบด้วยอุปกรณ์ Rectifier Battery และ MDF อยู่ภายในตู้เดียวกัน และสร้างฐานคอนกรีตเสริมเหล็กพร้อมท่อร้อยสายใต้ดินเชื่อมต่อกับชุมสาย RSU เดิม เพื่อสร้างสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเชื่อมต่อกับโครงข่าย ATM Network หรือ IP Network และสายเคเบิลทองแดงเพื่อให้บริการ ADSL บนคู่สายโทรศัพท์ประจำที่



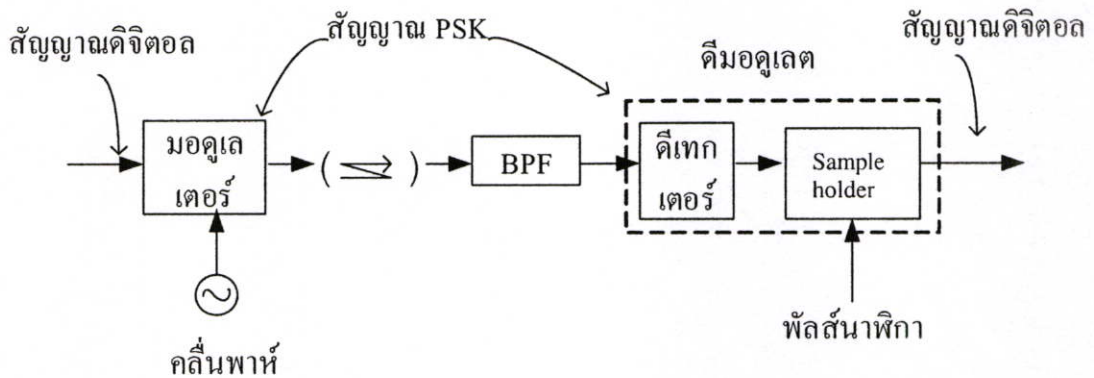
รูปที่ 2.16 การติดตั้ง DSLAM แบบภายนอกอาคาร ใช้สำหรับตามสถานที่ตั้ง RSU / RLU

### บทที่ 3

## หลักการมอดูเลตที่ใช้ใน ADSL2+

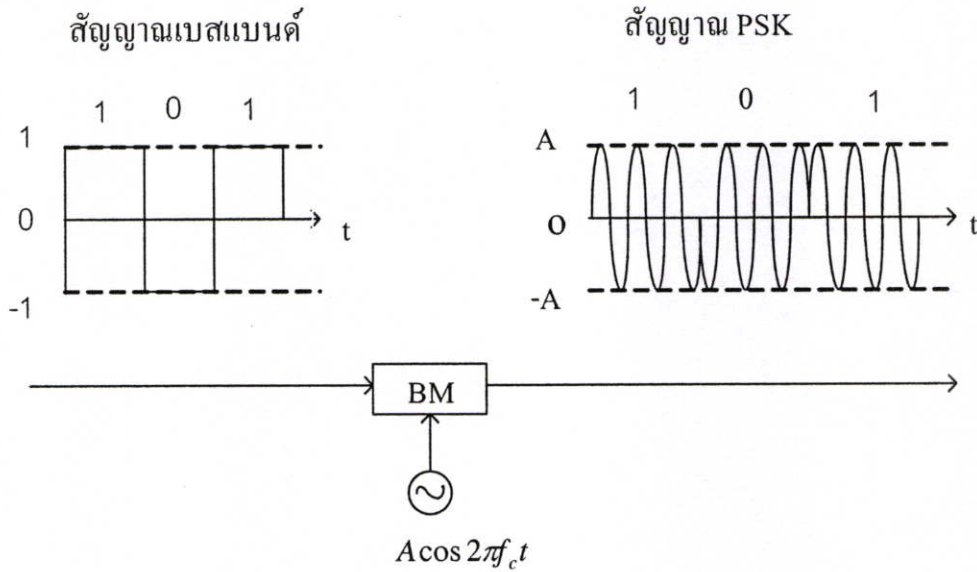
### 3.1 พื้นฐานการมอดูเลตและดีมอดูเลต [14]

การรับส่งสัญญาณมีพื้นฐานมาจากระบบแอนะล็อก โดยเฉพาะคู่สายโทรศัพท์ที่เป็นระบบแอนะล็อก วัตถุประสงค์ของการมอดูเลตใน Digital subscriber line (DSL) เพื่อเปลี่ยนสตรีมบิตอินพุตของ DSL เป็นสัญญาณแอนะล็อกให้เหมาะสมกับสายส่งสัญญาณ ในการรับส่งสัญญาณดิจิทัลทางด้านส่งมีมอดูเลตเตอร์ ซึ่งเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ Phase-shift keying (PSK) ทางด้านรับมีวงจรกรองผ่านแถบความถี่ (Band – pass filter) และดีมอดูเลตเตอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณ PSK เป็นสัญญาณดิจิทัลเหมือนทางด้านส่ง ดีมอดูเลตเตอร์ ประกอบด้วย ตัวตรวจจับสัญญาณ (ดีเทกเตอร์) และมีวงจร Sample holder ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การรับ-ส่งสัญญาณดิจิทัล

โดยทั่วไปแล้วการมอดูเลต PSK จะใช้มอดูเลตเตอร์แบบไดคูล (Balanced modulator) สมมติว่าสัญญาณดิจิทัลเบสแบนด์อยู่ในรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 สำหรับรหัส 1 และมีแอมพลิจูดเท่ากับ -1 สำหรับรหัส 0 เมื่อคลื่นรูปสี่เหลี่ยมนี้ถูกผสมโดยคลื่นพาห้  $A\cos 2\pi f_c t$  ผ่านวงจร Balanced modulator สัญญาณ PSK ที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล

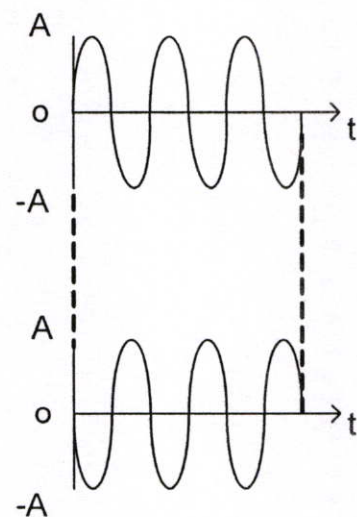
สัญญาณ PSK สำหรับรหัส 1 จะเป็น  $S(t) = 1 \times A \cos 2\pi f_c t = A \cos 2\pi f_c t$  ส่วนสัญญาณ PSK สำหรับรหัส 0 จะเป็น  $S(t) = -1 \times A \cos 2\pi f_c t = -A \cos 2\pi f_c t$  สามารถเขียน  $-A \cos 2\pi f_c t = A \cos(2\pi f_c t + \pi)$  ตามหลักการนี้แสดงว่าสำหรับรหัส 0 เฟสของคลื่นพาห้จะเปลี่ยนไปเท่ากับ  $\pi$  ซึ่งจะเห็น ได้ชัดเจนดังในรูปที่ 3.3

กรณี 1

$$\begin{aligned} S(t) &= 1 \times A \cos 2\pi f_c t \\ &= A \cos 2\pi f_c t \end{aligned}$$

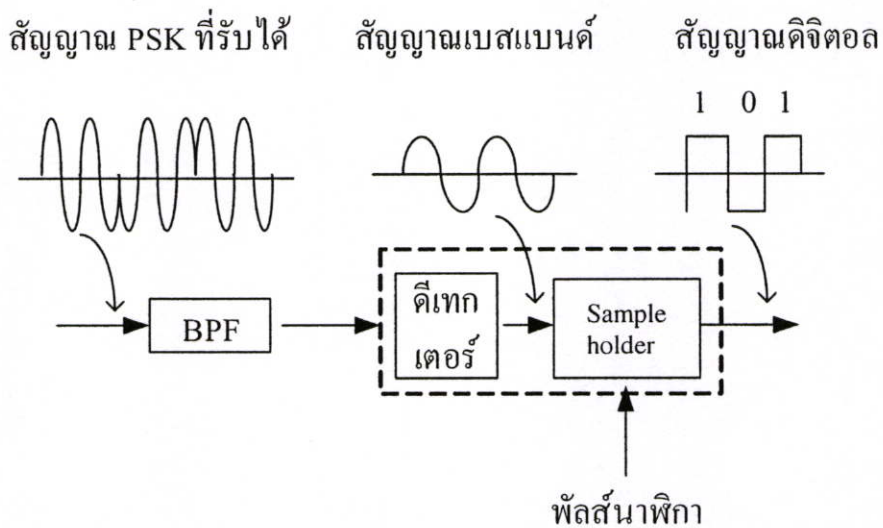
กรณี 0

$$\begin{aligned} S(t) &= -1 \times A \cos 2\pi f_c t \\ &= -A \cos 2\pi f_c t \\ &= A \cos(2\pi f_c t + \pi) \end{aligned}$$



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของคลื่นพาห้

Band-pass filter ทางด้านรับรับสัญญาณ ซึ่งมีเสียงรบกวนปนอยู่ด้วยจะถูกดีเทกต์ออกมาที่คิมอดูเลเตอร์ ดีเทกเตอร์จะเอาสัญญาณเบสแบนด์ออกมา โดยตัดส่วนประกอบคลื่นพาห้ออก(แคเรียร์คอมโพเนนต์) ซึ่งรวมอยู่ในสัญญาณ PSK ออกไป สัญญาณเบสแบนด์จะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์นัก เนื่องจากการกำหนดแถบความกว้าง โดยตัวกรองความถี่ และเนื่องจากอิทธิพลของเสียงรบกวน วงจร Sample holder จะสร้างสัญญาณดิจิทัลเดิมขึ้นมาใหม่ผ่านการพิจารณาการแยกขั้ว (Polarity) บวก หรือ ลบ ของสัญญาณเบสแบนด์



รูปที่ 3.4 การสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ทางด้านรับ

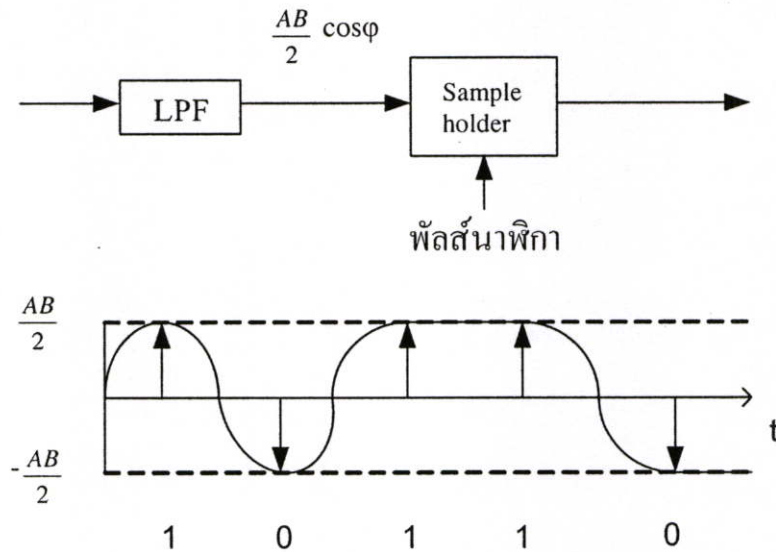
### 3.1.1 โคฮีเรนต์ดีเทกชัน

การคิมอดูเลตสัญญาณ PSK ทางด้านรับเป็นแบบ โคฮีเรนต์ดีเทกชัน (Coherent detection) ซึ่งมีหลักการดังนี้ สัญญาณ PSK ที่รับได้ ขั้นแรกจะผ่านวงจร (Multiplier) ซึ่งจะคูณสัญญาณ PSK ที่รับได้ด้วยคลื่นพาห่อ้างอิง (Reference carrier) สำหรับฮาร์โมนิก ซึ่งรวมอยู่ในสัญญาณเอาต์พุต จะถูกตัดออกไปโดยผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) และได้สัญญาณเบสแบนด์ออกมาทางด้านเอาต์พุต

ถ้าสัญญาณ PSK ที่รับเข้ามา คือ  $A\cos(2\pi f_c t + \phi)$  คลื่นพาห่อ้างอิงมีไว้เพื่อการซิงโครไนซ์กับคลื่นพาห่ทางด้านส่ง คือ  $B\cos 2\pi f_c t$  สัญญาณทางออกหลังจากผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำแล้วสามารถกำหนดได้เป็น  $\frac{AB}{2}\cos\phi$

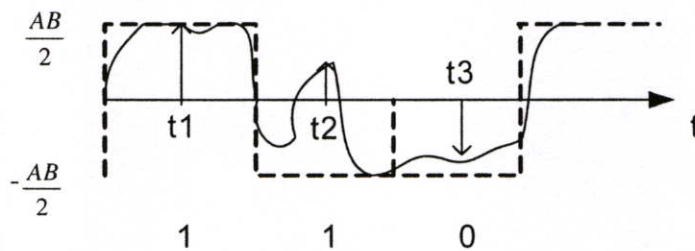


สัญญาณเบสแบนด์นี้จะถูกส่งไปยังวงจร Sample holder ซึ่งวงจรจะทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณเบสแบนด์ด้วยสัญญาณนาฬิกา (Clock pulse) ที่จุดกึ่งกลางของแต่ละรหัสสัญญาณ และกำหนดว่ารหัสนั้นเป็น 1 หรือเป็น 0 โดยการตัดสินใจ หรือพิจารณาจากขั้ว ของสัญญาณแชนเนลนั้นแล้วทำการสร้างสัญญาณดิจิทัลดั้งเดิมขึ้นมาใหม่ ในรูปที่ 3.7 แสดงการพิจารณารหัส เป็น 1 สำหรับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเป็นบวก และรหัสเป็น 0 สำหรับสัญญาณที่มีแอมพลิจูดเป็นลบ



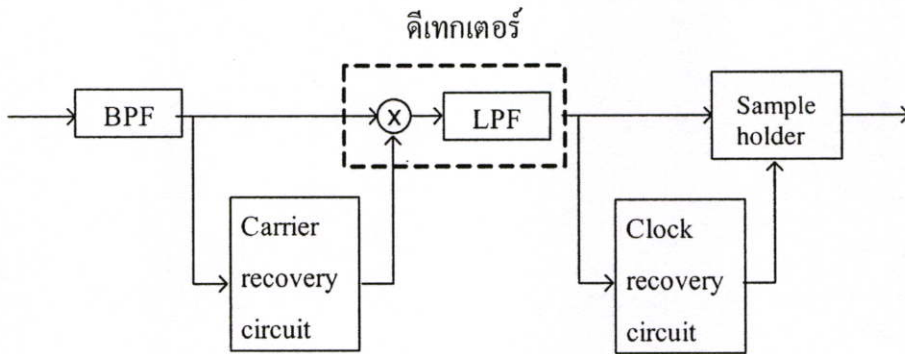
รูปที่ 3.7 การพิจารณารหัสเป็น 1 หรือ 0 โดย Sample holder

เมื่อสัญญาณมีการผิดเพี้ยนเนื่องจากอิทธิพลของเสียงรบกวน ถ้ามีการผิดเพี้ยนน้อย ขั้ว ของสัญญาณก็ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น ที่  $t_1$  หรือ  $t_2$  รหัสที่ได้ออกมาจะถูกตัด แต่ถ้าพิจารณาที่  $t_3$  ขั้วของสัญญาณถูกเปลี่ยนไปในทางตรงข้ามเนื่องจากเกิดการผิดเพี้ยนมาก รหัสที่ได้ออกมาจะผิดไปจากรหัสเดิมบิตผิดพลาด (Bit error) ก็จะเกิดขึ้น



รูปที่ 3.8 รหัสผิดเพี้ยนเนื่องจากเสียงรบกวน

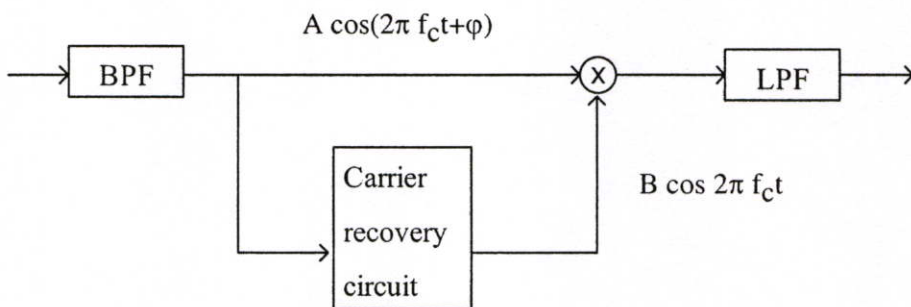
รูปที่ 3.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโคฮีเรนต์ดีมอดูเลเตอร์ (Coherent demodulator) ซึ่งประกอบด้วยวงจรผ่านแถบความถี่ (Band-pass filter :BPF) ดีเทกเตอร์ วงจร Sample holder วงจรสร้างคลื่นพาห์ (Carrier recovery circuit) และวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา (Clock recovery circuit) วงจรสร้างคลื่นพาห์ จะสร้างคลื่นพาห์อ้างอิงขึ้นมาใหม่ โดยการทวีคูณสัญญาณ PSK ที่รับมาได้ ส่วนวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาจะสร้างสัญญาณนาฬิกาขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้สำหรับ วงจร Sample holder ในโคฮีเรนต์ดีเทกชัน นี้ทั้งคลื่นพาห์อ้างอิง และสัญญาณนาฬิกา จะถูกสร้างขึ้นมาใหม่จากสัญญาณ PSK ที่รับเข้ามา



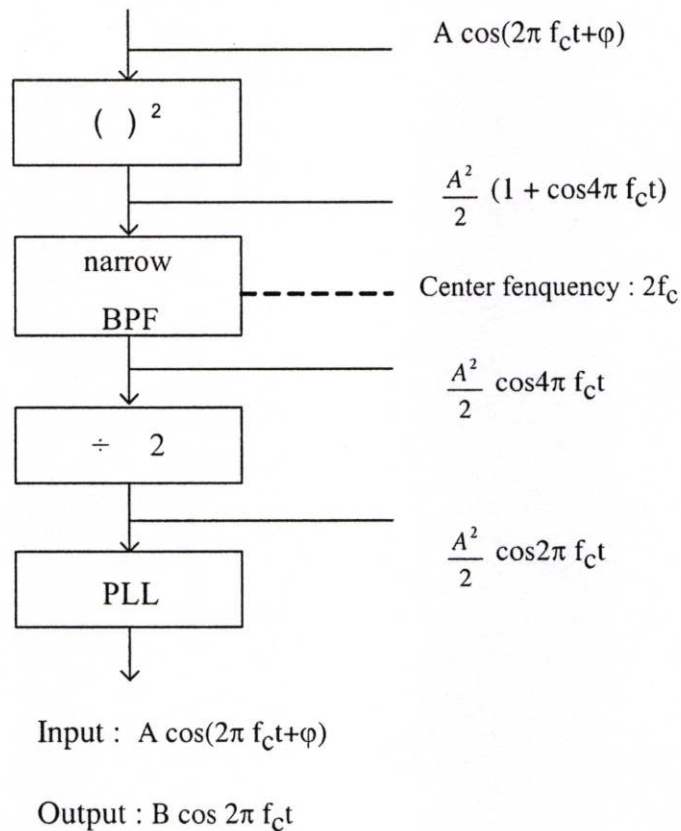
รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของโคฮีเรนต์ดีมอดูเลเตอร์ (Coherent demodulator)

คลื่นพาห์อ้างอิงที่ใช้ในโคฮีเรนต์ดีเทกชันนี้ เพื่อการซิงโครไนซ์กับคลื่นพาห์ทางด้านส่ง เพื่อจุดประสงค์นี้คลื่นพาห์อ้างอิงถูกสร้างขึ้นมาใหม่จากสัญญาณ PSK ที่รับเข้ามา สัญญาณอินพุต ที่เข้าวงจรสร้างสัญญาณคลื่นพาห์อ้างอิงสามารถกำหนดโดย  $A \cos(2\pi f_c t + \phi)$  สัญญาณเอาต์พุต คือคลื่นพาห์อ้างอิงกำหนดโดย  $B \cos 2\pi f_c t$

วงจรสร้างคลื่นพาห์ประกอบด้วย Squarer Narrow band pass filter โดยมีความถี่กึ่งกลางที่  $2 f_c$  วงจรหารความถี่ (Frequency divider) และวงจรเฟสล็อกกลูบ (Phase locked loop:PLL) ดังแสดงในรูปที่ 3.11

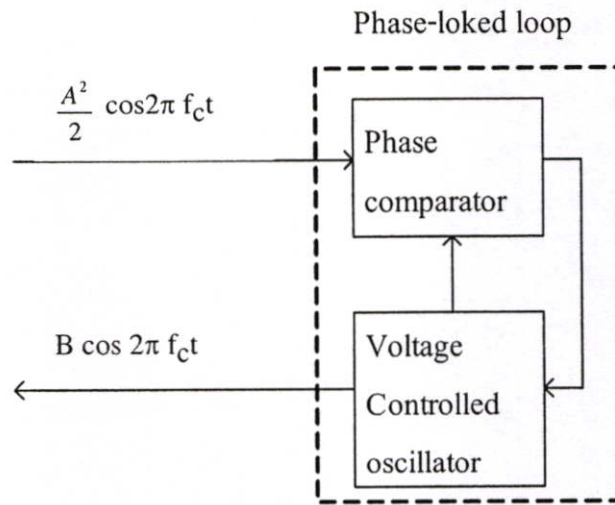


รูปที่ 3.10 หลักการของวงจรสร้างคลื่นพาห์ (Carrier recovery circuit)



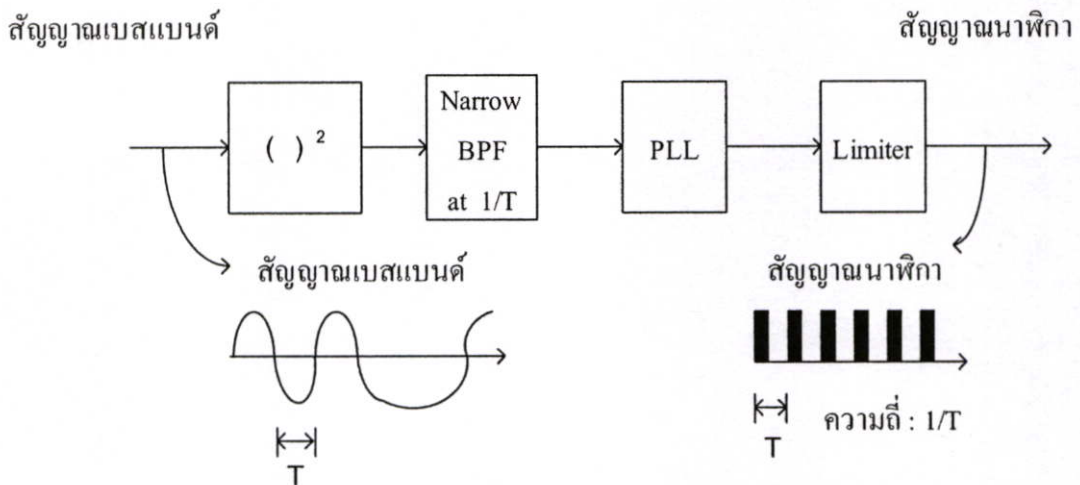
รูปที่ 3.11 วงจรสร้างคลื่นพาห์ และสัญญาณตามจุดต่าง ๆ

สัญญาณ  $\frac{A^2}{2} \cos(2\pi f_c t)$  ที่ออกจากวงจร Divider ปกติจะมีเสียงรบกวนรวมอยู่ด้วย เพื่อที่จะตัดเสียงรบกวนออก และได้คลื่นพาห์อ้างอิงปราศจากการผิดเพี้ยน จำเป็นต้องใช้วงจรวงจรเฟสล็อกช่วย วงจรเฟสล็อกประกอบด้วย การเปรียบเทียบเฟส (Phase comparator) และออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage controlled oscillator : VCO) ที่วงจรการเปรียบเทียบเฟสสัญญาณเอาต์พุต ของวงจรหารความถี่ จะถูกเปรียบเทียบอย่างต่อเนื่องกับเอาต์พุตของ VCO เมื่อมีความต่างทางเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสองนี้ สัญญาณเอาต์พุตของ VCO จะถูกควบคุมอย่างอัตโนมัติในการปรับเฟสของสัญญาณทั้งสอง โดยวิธีการนี้คลื่นพาห์อ้างอิง  $B \cos(2\pi f_c t)$  ซึ่งไม่มีเสียงรบกวนรวมอยู่ด้วยสามารถที่จะสร้างขึ้นใหม่ได้



รูปที่ 3.12 การทำงานของเฟสล็อกคูล

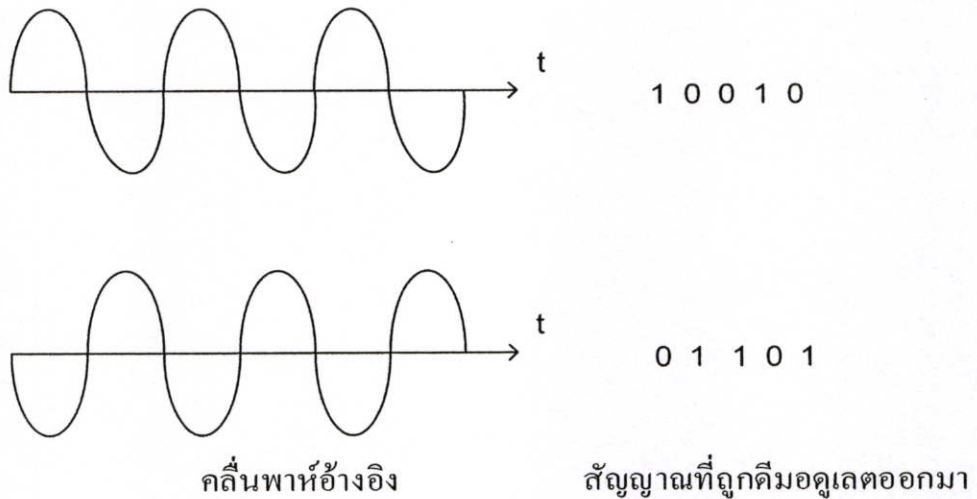
สัญญาณพัลส์นาฬิกาที่จำเป็นสำหรับวงจร Sample holder ก็ถูกสร้างขึ้นใหม่จากสัญญาณ PSK ที่รับได้เช่นกัน เพื่อจุดประสงค์นี้ ต้องใช้วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา สัญญาณเบสแบนด์ที่ได้ทางเอาต์พุตของดีเทกเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา การสร้างสัญญาณนาฬิกาใหม่ของวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา ตามรูปที่ 3.13 เป็นวงจร ซึ่งประกอบด้วยวงจร Squarer วงจรกรองผ่านแถบแคบ (Narrow BPF) วงจรเฟสล็อกคูล และวงจรจำกัดขนาดของสัญญาณ (Limiter) สำหรับวงจรกรองผ่านแถบแคบที่ใช้ในวงจรมีความถี่กึ่งกลาง  $\frac{1}{T}$  ซึ่ง  $T$  คือความกว้างของรหัสหนึ่งบิต ดังนั้น  $\frac{1}{T}$  คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ได้



รูปที่ 3.13 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา

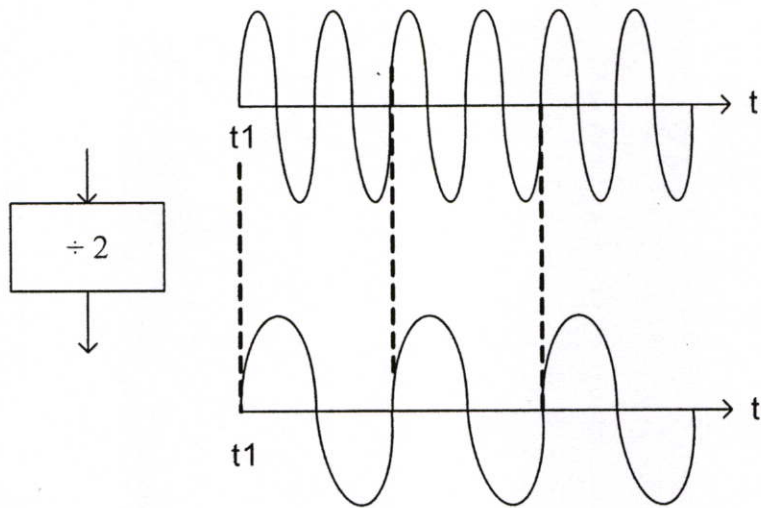
### 3.1.2 การผิดพลาดทางเฟส (Phase ambiguity)

คลื่นพาห้แอมพลิจูดที่ใช้ในโคฮีเรนซ์ดีเทกชัน มีความจำเป็นเพื่อล็อกเฟสกับคลื่นพาห้ทางด้านส่ง แต่อย่างไรก็ตาม ปกติแล้วเป็นไปได้ที่จะทำให้คลื่นพาห้สองชนิดนี้มีการ ล็อกเฟสซึ่งกันและกัน อย่างสมบูรณ์ ในโบนารี PSK ความต่างเฟส อาจจะมีสาเหตุจากความต่างระหว่างคลื่นพาห้ทั้งสอง แต่ไม่สามารถที่จะรู้ความต่างเฟสที่ทางด้านรับได้ ซึ่งไม่สามารถที่จะดีเทกต์ความต่างเฟส เป็นผล ทำให้เกิดการผิดพลาดทางเฟส เมื่อคลื่นพาห้แอมพลิจูดเกิดมีเฟสต่างกัน 180 องศา เป็นผลทำให้การตี มอดูเลตสัญญาณดิจิทัล จะเกิดการเปลี่ยนกลับจาก 1 เป็น 0 และจาก 0 เป็น 1



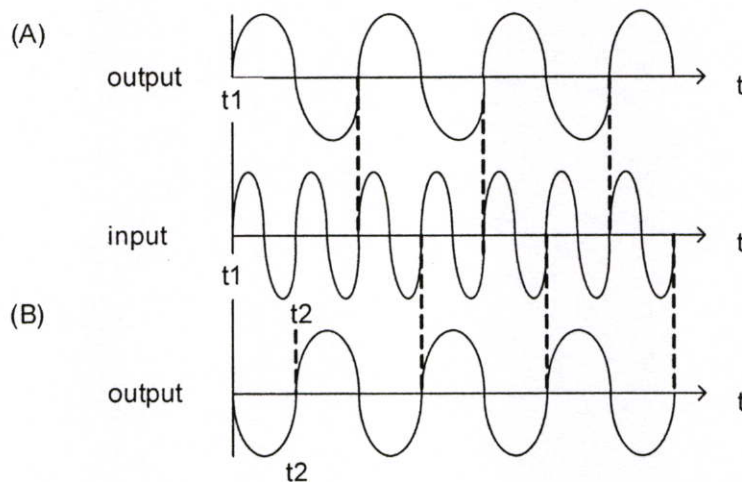
รูปที่ 3.14 การผิดพลาดทางเฟส

การผิดพลาดทางเฟสมีสาเหตุมาจากการหารความถี่ (Frequency divider) ในวงจรสร้างคลื่นพาห้ ในการหารความถี่นี้สัญญาณ  $\cos(4\pi f_c t)$  ถูกหารความถี่ด้วย 2 จะได้  $\cos(2\pi f_c t)$  ตาม รูปที่ 3.15 แสดงรูปคลื่นดั้งเดิม และรูปคลื่นทาง เอาต์พุต ที่ได้หลังการผ่านวงจรหารความถี่ด้วย 2 ซึ่งมีจุดเริ่มแรกที่  $t_1$  โดยการกำหนดจุดเริ่มแรกที่ต่างกันจะได้รูปคลื่น เอาต์พุต ที่ต่างกัน



รูปที่ 3.15 คลื่นสัญญาณเมื่อผ่านวงจรหารความถี่

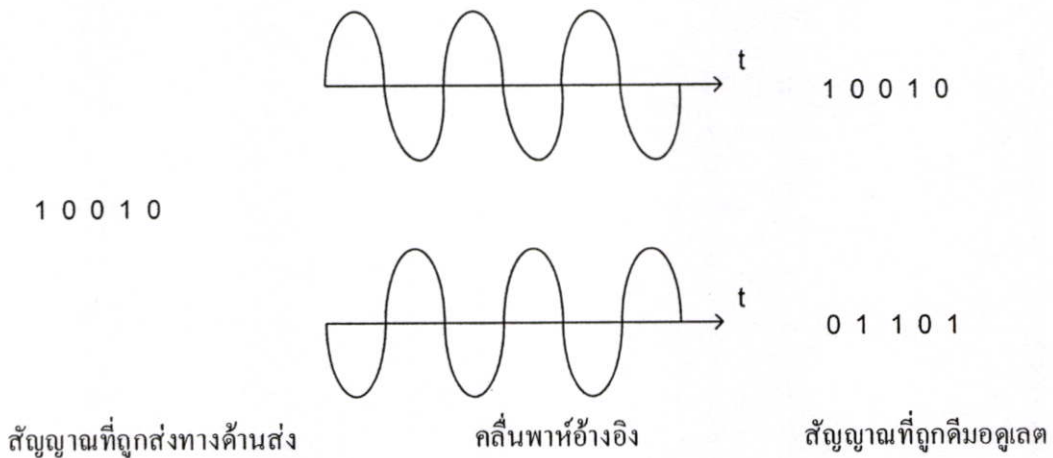
รูปที่ 3.16 เป็นตัวอย่าง อินพุต และ เอาต์พุต ของวงจรหารความถี่ ซึ่งใช้ในวงจรสร้างคลื่นพาห์ ซึ่งเอาต์พุต (A) ได้จากกรณี  $t_1$  เป็นจุดเริ่ม ส่วน เอาต์พุต (B) ได้จากกรณีให้  $t_2$  เป็นจุดเริ่มต้น จะเห็นว่าเอาต์พุต ทั้งสองกรณีกลับเฟสกัน



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบ เอาต์พุต กรณี  $t_1$  และ  $t_2$  เป็นจุดเริ่ม

เนื่องจากรูปคลื่น เอาต์พุต 2 แบบสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ที่ เอาต์พุต ของวงจรหารความถี่ ดังนั้นต้องพิจารณารูปคลื่นของคลื่นพาห์อ้างอิง 2 แบบ แบบหนึ่งเฟสตรงกับคลื่นพาห์ทางด้านส่ง และอีกแบบหนึ่งต่างเฟส  $\pi$  กับคลื่นพาห์ ตามปกติแล้วแบบใดแบบหนึ่งของคลื่นพาห์อ้างอิงใน 2 แบบนี้ ใช้ในการติมอดูเลตอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามไม่มีการกำหนดแน่นอนว่าแบบไหนที่ใช้สำหรับการดี

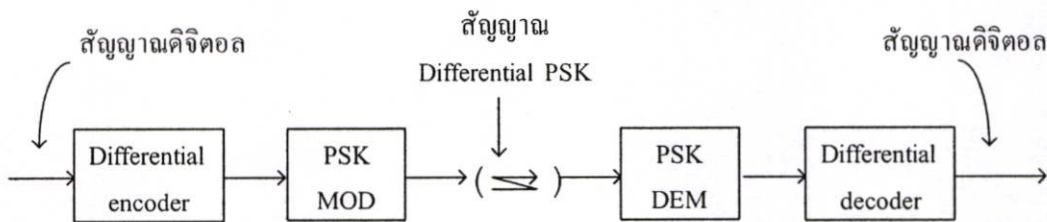
มอดูเลต และดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดได้ว่าสัญญาณดิจิทัลที่ได้รับหลังจากผ่านการดีมอดูเลต เป็นแบบปกติ หรือ แบบกลับเฟส



รูปที่ 3.17 สัญญาณดิจิทัลหลังผ่านการดีมอดูเลต

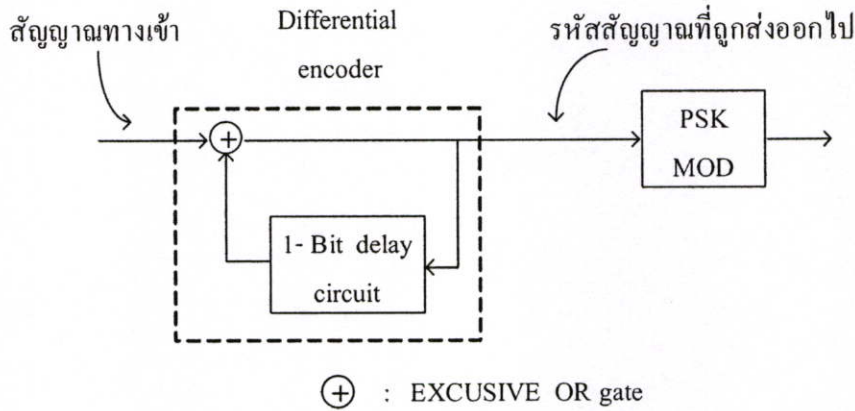
วิธีการที่จะแก้ปัญหาการผิดพลาดทางเฟส คือใช้ Differential coherent PSK หรือ เรียกย่อ ๆ ว่า DC. PSK โดยวิธีการนี้ ข่าวดสารในสัญญาณดิจิทัลที่จะส่งจะถูกทำให้เฟสของสัญญาณ PSK เปลี่ยนไป คือ ไม่ให้เป็นเฟสเริ่มต้น (Initial phase) ของสัญญาณ PSK

จากรูปที่ 3.18 สัญญาณดิจิทัลที่จะส่งทางด้านส่งจะผ่านวงจรเข้ารหัสผลต่าง (Differential encode) ก่อนที่จะทำการมอดูเลตแบบ PSK สำหรับทางด้านรับสัญญาณ Differential PSK จะถูกดีมอดูเลตแบบ โคฮีเรนท์และป้อนเข้าวงจรถอดรหัสผลต่างเพื่อสร้างสัญญาณดิจิทัลดั้งเดิมขึ้นมาใหม่



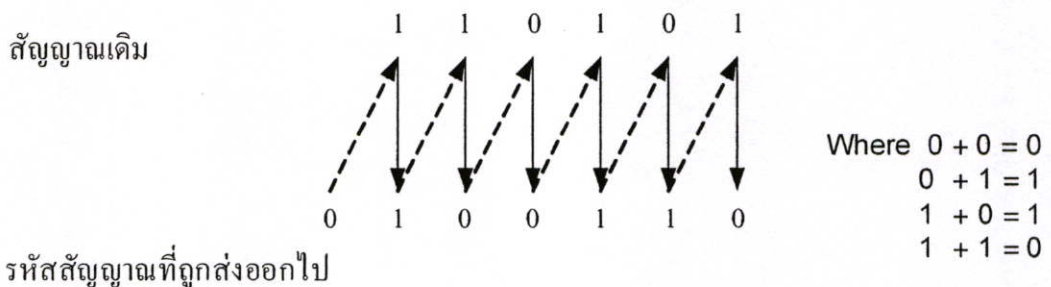
รูปที่ 3.18 Differential coherent PSK

รหัสผลต่างที่ใช้ประกอบด้วย Exclusive-OR gate และวงจรหน่วงเวลาหนึ่งบิต (One bit delay circuit) รหัสสัญญาณจะถูกส่งไปหนึ่งบิตก่อน และถูกบวกกับแต่ละบิตโดย Exclusive – OR gate สร้างรหัสใหม่ขึ้นมาเพื่อจะส่งไป รหัสที่ส่งไปนี้จะผ่าน PSK มอดูเลเตอร์ และในเวลาเดียวกัน จะเข้าวงจรหน่วงเวลาหนึ่งบิต อีกครั้ง เพื่อบวกกับสัญญาณดิจิทัล อินพุต ตัวต่อไป



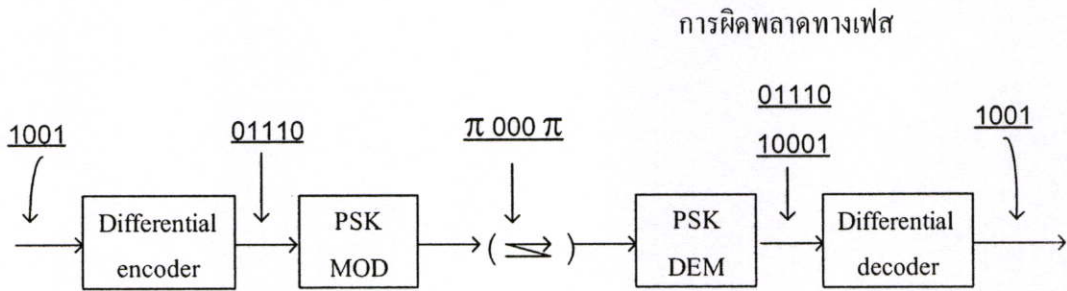
รูปที่ 3.19 วงจร Differential encoder

สมมติว่ามีสัญญาณที่จะส่งเป็น 110101 ลอจิก ต่อไปนี้จะถูกนำมาใช้สำหรับ Exclusive – OR gate คือ  $0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1, 1 + 0 = 1$  และ  $1 + 1 = 0$  ขั้นแรกให้ค่าเริ่มแรกของ วงจรหน่วงเวลาหนึ่งบิต เป็น 0 และให้ 0 เป็นรหัสแรกที่จะส่งไป บวกบิตแรกของสัญญาณดั้งเดิมคือ “1” เข้ากับรหัสแรกที่จะส่งคือ รหัส “0” นั่นคือ  $0 + 1 = 1$  ขณะนี้ให้กำหนดรหัส “1” นี้เป็นรหัสที่สองที่จะส่ง บวกบิตที่สองคือ “1” ของสัญญาณดั้งเดิมเข้ากับรหัสตัวที่สองที่จะส่ง นั่นคือ  $1 + 1 = 0$  และให้กำหนดรหัส “0” นี้เป็นรหัสที่สามที่จะส่ง โดยการดำเนินขั้นตอนซ้ำกันไปอย่างนี้เรื่อย ๆ ลำดับของรหัสที่จะต้องส่งจะเป็น 0100110 หลังจากขบวนการ Differential encoding จะเห็นได้ว่า รหัสที่จะส่งหลังจากทำการ Differential encoding จะเหมือนกันกับรหัสที่ส่งไปก่อนหนึ่งบิต เมื่อสัญญาณอินพุต เป็น “0” และจะกลับกันเมื่อสัญญาณ อินพุต เป็น “1”



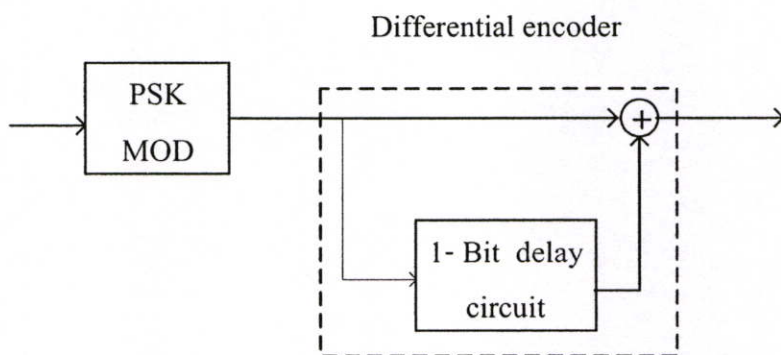
รูปที่ 3.20 การส่งรหัสสัญญาณที่ Differential encoder

ลำดับสัญญาณ differential encode คือ PSK มอดูเลตโดยการทำให้เฟสเริ่มต้น (initial phase)  $\pi$  แทนรหัส 0 และเฟสเริ่มต้น 0 แทนรหัส 1 แล้วส่งออกไป ส่วนทางด้านรับ สัญญาณ Differential PSK ถูกตีเทกต์แบบ Coherent เพื่อสร้างสัญญาณดิจิทัลที่ส่งขึ้นมาใหม่ สัญญาณดิจิทัลที่ได้โดยผ่าน Coherent detection นี้ อาจจะเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 หรือจาก 0 เป็น 1 เนื่องจากเฟสไม่แน่นอน (Phase ambiguity) อย่างไรก็ตามใน differential coherent PSK ลำดับของสัญญาณที่ได้รับหลังจากการ differential decoding จะเหมือนกับลำดับสัญญาณดั้งเดิมเสมอ โดยปราศจากผลจากเฟสไม่แน่นอน



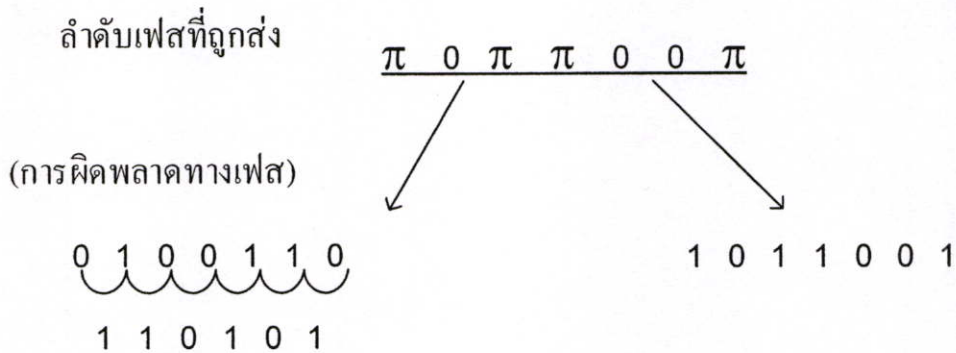
รูปที่ 3.21 รหัสสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

Differential encoder ประกอบด้วยวงจรหน่วงเวลาหนึ่งบิต และ Exclusive – OR gate สัญญาณดิจิทัลที่ถูกดีมอดูเลตผ่านขบวนการ โคฮีเรนทีตีเทกชัน ถูกป้อนเข้า Exclusive-OR gate และในขณะเดียวกันก็ป้อนเข้าวงจรหน่วงเวลาหนึ่งบิต ใน Exclusive-OR gate สัญญาณดิจิทัล อินพุต และสัญญาณ เอาต์พุต ของวงจรหน่วงเวลาหนึ่งบิต ถูกบวกเข้าด้วยกัน นั่นคือ โดยการบวก 2 บิตข้างเคียงในลำดับสัญญาณดิจิทัลที่ได้ดีมอดูเลต โดย Exclusive OR gate การเปลี่ยนแปลงในทุก ๆ 2 บิตข้างเคียงจะถูกตรวจสอบตลอดเวลา



รูปที่ 3.22 Differential decoder

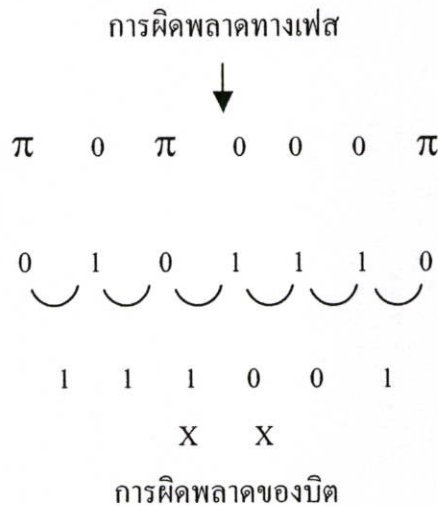
สมมติว่าลำดับเฟสที่ส่งของสัญญาณ PSK เป็น  $\pi$  0  $\pi$   $\pi$  0 0  $\pi$  ทางด้านรับหนึ่งในสองลำดับสัญญาณดิจิทัล อาจจะได้รับที่ เอาต์พุต ของดีมอดูเลเตอร์ เนื่องจากเฟสไม่แน่นอน นั่นคือ 0100110 หรือ 1011001 ในขณะนี้ให้ทำการถอดรหัส decode 0100110 Exclusive OR gate บวก 2 บิตข้างเคียง โดยการบวกบิตแรกกับบิตที่สอง จะได้  $0 + 1 = 1$  บวกบิตที่สองกับบิตที่สามจะได้  $1 + 0 = 1$  และการทำอย่างนี้เรื่อย ๆ ไปจะได้ 110101



รูปที่ 3.23 ลำดับสัญญาณดิจิทัลด้านรับ

โดยการให้สัญญาณผ่าน Differential encoder ทางด้านส่ง ลำดับสัญญาณดั้งเดิมถูกเปลี่ยนไป เพื่อให้ข้อมูลข่าวสาร (Information) ยังคงมีอยู่ แม้มีการเปลี่ยนแปลงใน 2 บิตข้างเคียงของลำดับรหัสส่ง ส่วนทางด้านรับ ลำดับรหัสที่ถูกดีมอดูเลตถูกป้อนเข้าไปใน Differential decoder เพื่อเอาลำดับสัญญาณดั้งเดิมออกมา โดยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงใน 2 บิตข้างเคียง ในลักษณะนี้ ข้อมูลข่าวสาร ยังคงมีอยู่ดังเดิม แม้มีการเปลี่ยนแปลงของเฟสเริ่มต้นในสัญญาณที่มอดูเลตแบบ PSK เนื่องจากข้อมูลข่าวสาร ถูกทำให้คงอยู่ ถึงแม้ว่าถ้าคลื่นพาห์อ้างอิงที่ใช้สำหรับ โคฮีเรนต์ดีเทกชัน ต่างเฟสไปก็ตาม และดังนั้นอิทธิพลของเฟสไม่แน่นอนสามารถที่จะแก้ปัญหาก็ได้

Differential coherent PSK มีข้อดีตรงที่ ไม่มีผลจากการที่เกิด เฟสไม่แน่นอน แต่มีข้อเสียเกี่ยวกับ Bit error คือเมื่อเฟสเริ่มต้นของสัญญาณ Differential PSK ถูกการดีมอดูเลตอย่างไม่ถูกต้อง จะเป็นสาเหตุให้เกิด bit error คู่หนึ่ง เพราะว่าสัญญาณดั้งเดิมถูกสร้างขึ้นใหม่จาก 2 บิตข้างเคียงจากการดีมอดูเลต



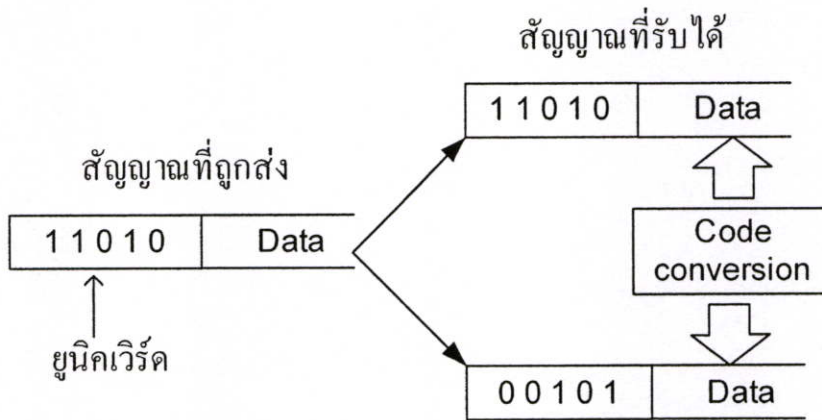
รูปที่ 3.24 การเกิดข้อผิดพลาดของบิต

### 3.1.3 ยูนิคเวิร์ด (Unique word)

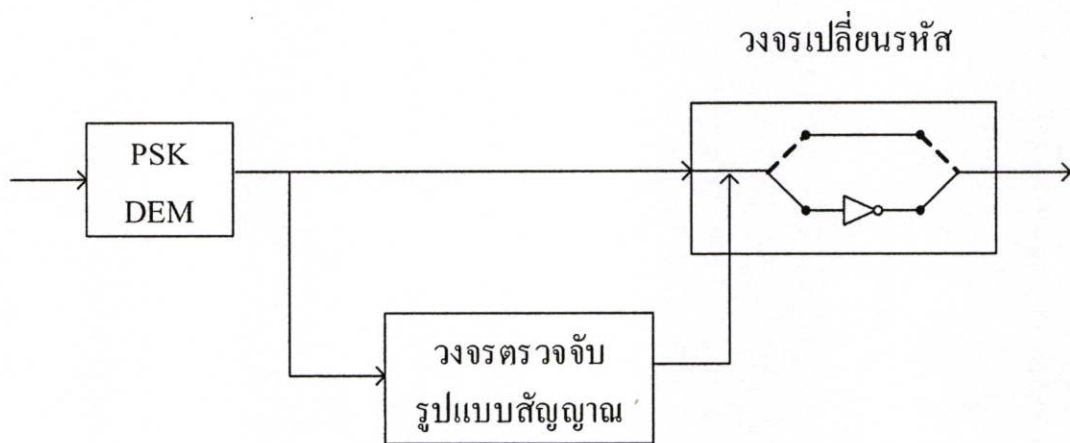
อีกวิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาการผิดพลาดทางเฟสคือ การใช้รูปแบบของรหัสที่แน่นอนตายตัว เรียกว่า “ยูนิคเวิร์ด”

ทางด้านส่งรูปแบบของรหัสที่แน่นอนตายตัวคือ ยูนิคเวิร์ด จะถูกเพิ่มเข้าไปที่ด้านหน้าของลำดับข้อมูลที่จะส่ง เมื่อทางด้านรับทำการดีมอดูเลตได้รับยูนิคเวิร์ดออกมาตรงกับรูปแบบรหัสที่ได้ส่งข้อมูลก็ตามมาก็พิจารณาได้ว่าถูกต้อง แต่เมื่อยูนิคเวิร์ดที่ทำการดีมอดูเลตออกมามีรูปแบบรหัสที่ตายตัวนั้นกลับรหัสกัน เช่น แทนที่จะเป็น 11010 กลับเป็น 00101 ดังนั้นข้อมูลที่ส่งตามมาพิจารณาได้ว่ารหัสกลับกันเนื่องจากการผิดพลาดทางเฟส และลำดับข้อมูลที่ตามมาก็จะถูกเปลี่ยนเป็นรหัสตรงข้าม เพื่อลำดับข้อมูล เอาต์พุต จะได้ตรงกับรหัสทางด้านส่ง

รูปที่ 3.25 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรดีมอดูเลตที่ใช้ยูนิคเวิร์ด ซึ่งประกอบด้วยวงจรตรวจจับรูปแบบสัญญาณ และวงจรเปลี่ยนรหัส วงจรตรวจจับรูปแบบสัญญาณจะตรวจสอบยูนิคเวิร์ดจากสัญญาณ เอาต์พุต ของดีมอดูเลเตอร์ เมื่อยูนิคเวิร์ดมีรูปแบบที่ตรงข้ามกับรูปแบบเดิมสวิตช์ในวงจรเปลี่ยนรหัสก็จะถูกปรับไปทางด้านตรงข้าม เพื่อให้รหัสเกิดการเปลี่ยนรหัสไปเป็นรหัสตรงข้าม ดังนั้นอิทธิพลของการผิดพลาดทางเฟสก็จะไม่เกิดขึ้น และลำดับข้อมูลสัญญาณที่ถูกต้องก็สามารถรับได้ทางด้านรับ



รูปที่ 3.25 การส่งยูนิตเวกเตอร์เพื่อตรวจสอบรหัส



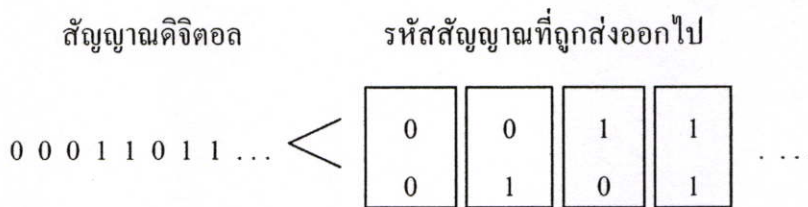
รูปที่ 3.26 วงจรดีมอดูเลตที่ใช้ยูนิตเวกเตอร์

ระบบที่ใช้ยูนิตเวกเตอร์มีข้อดีตรงที่จะไม่เกิดการผิดพลาดของบิตเป็นคู่ ๆ เหมือนของ Differential coherent PSK และอัตราการผิดพลาดของบิตจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ Differential coherent PSK ดังนั้นระบบนี้เหมาะสมควรที่จะใช้กับการส่งสัญญาณข้อมูลที่มีความเร็วในการส่งสูง

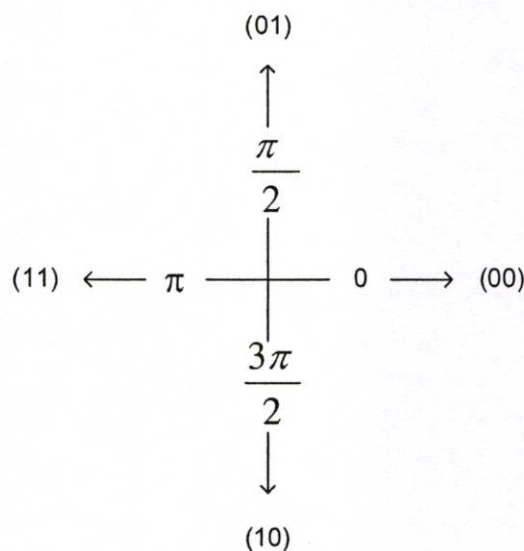
### 3.2 Quadri PSK [14]

วิธีของ (QPSK) Quadri PSK สัญญาณ 2 บิตจะถูกส่งไปพร้อม ๆ กัน โดยลำดับสัญญาณดิจิทัลที่จะส่งถูกแบ่งเป็นบล็อก 2 บิต และแต่ละรหัสบล็อกประกอบด้วย 2 บิตถูกส่งไปพร้อม ๆ กัน ในกรณีนี้จะมีการรวมรหัส 4 คู่ด้วยกันคือ 00, 01, 10 และ 11 คู่ของรหัสทั้ง 4 คู่นี้จะเทียบกับ initial phase 4 เฟสของสัญญาณ QPSK

รูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรหัส และเฟสเริ่มต้น ใน Gray code ซึ่งใช้ใน QPSK เฟส 0 แทนรหัส 00 เฟส  $\frac{\pi}{2}$  แทนรหัส 01 เฟส  $\pi$  แทนรหัส 11 และเฟส  $\frac{3\pi}{2}$  แทนรหัส 10 จะเห็นว่าถ้าเปรียบเทียบรหัสระหว่างสองเฟสข้างเคียง หนึ่งในสองบิตจะเหมือนกันในทุก ๆ กรณี ดังนั้นโดยการใช้ Gray code จะมีเพียงบิตเดียวที่เกิดผิดพลาด แม้ว่าสัญญาณที่รับได้ถูกตีโมดูลิตไปเป็นเฟสข้างเคียง



รูปที่ 3.27 รหัส 4 คู่ของสัญญาณ QPSK



รูปที่ 3.28 Gray code ที่ใช้ใน QPSK

สมมติว่าสัญญาณกำหนดโดย

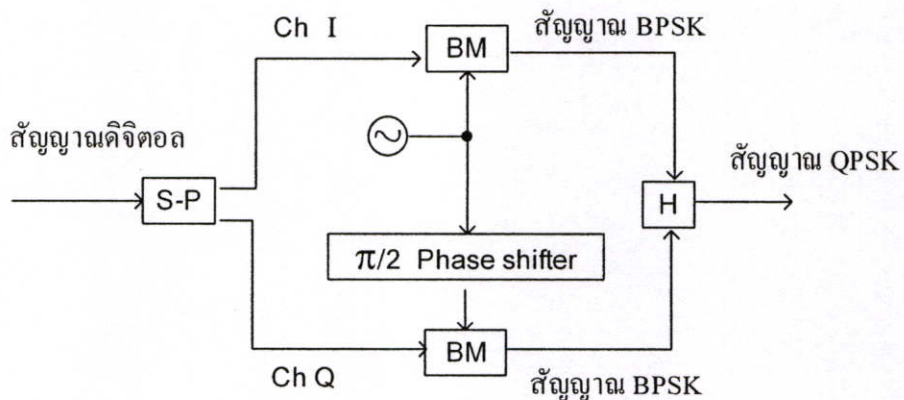
$$S(t) = A \cos 2\pi f_c t \quad \text{สำหรับรหัส 00}$$

$$\begin{aligned} S(t) &= A \cos \left( 2\pi f_c t + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= A \sin 2\pi f_c t \quad \text{สำหรับรหัส 01} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S(t) &= A \cos (2\pi f_c t + \pi) \\ &= -A \cos 2\pi f_c t \quad \text{สำหรับรหัส 11} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S(t) &= A \cos \left( 2\pi f_c t + \frac{3}{2} \pi \right) \\ &= -A \sin 2\pi f_c t \quad \text{สำหรับรหัส 10} \end{aligned}$$

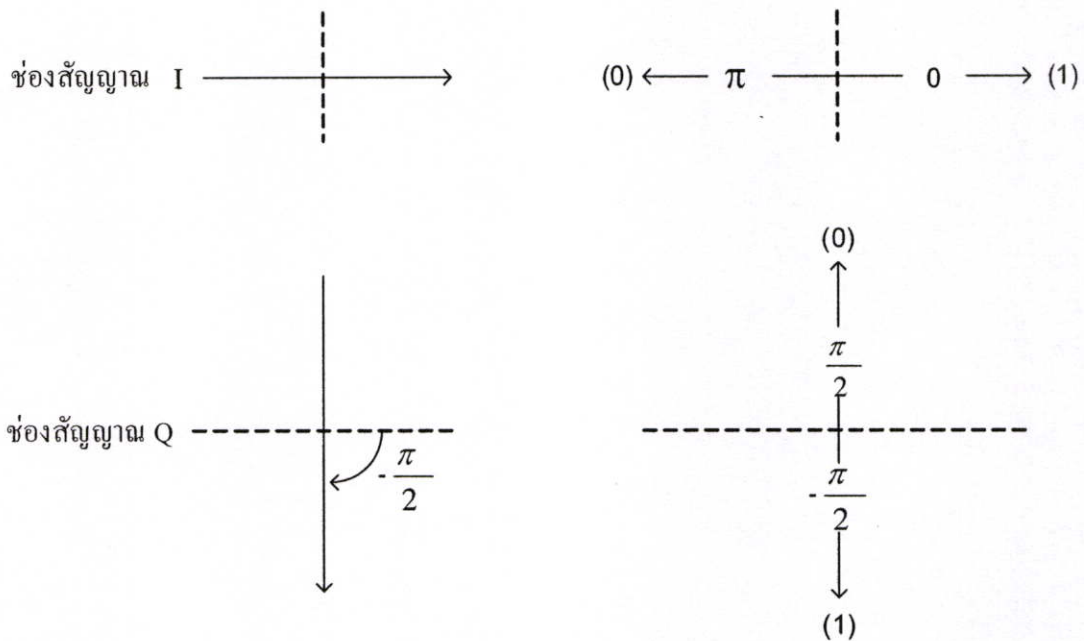
รูปที่ 3.29 แสดงตัวอย่างวงจร QPSK มอดูเลชัน วงจรประกอบด้วยวงจรมอดูเลชัน BPSK 2 ชุด สัญญาณดิจิทัลที่จะส่งถูกแยกออกทางช่องสัญญาณ I (Inphase) และช่องสัญญาณ Q (Quadrature) โดยตัวเปลี่ยนอนุกรมเป็นขนาน (S/P converter) แต่ละด้านถูกมอดูเลตแบบ BPSK โดยการมอดูเลตแบบได้ดุล (Balance modulator) คลื่นพาห์ที่ใช้ในการมอดูเลตของช่องสัญญาณ I จะใช้จากเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์ โดยตรง ส่วนคลื่นพาห์ที่ใช้สำหรับช่องสัญญาณ Q เฟสจะถูก Shift ไป  $\frac{\pi}{2}$  หลังจากผ่าน  $\frac{\pi}{2}$  phase shifter ดังในรูป สัญญาณ มอดูเลต BPSK ทั้งสองนี้ได้รับโดยการใช้คลื่นพาห์ที่ต่างเฟสกัน  $\frac{\pi}{2}$  และถูกรวมกันโดยวงจรไฮบริดก็จะได้สัญญาณ QPSK ออกมา



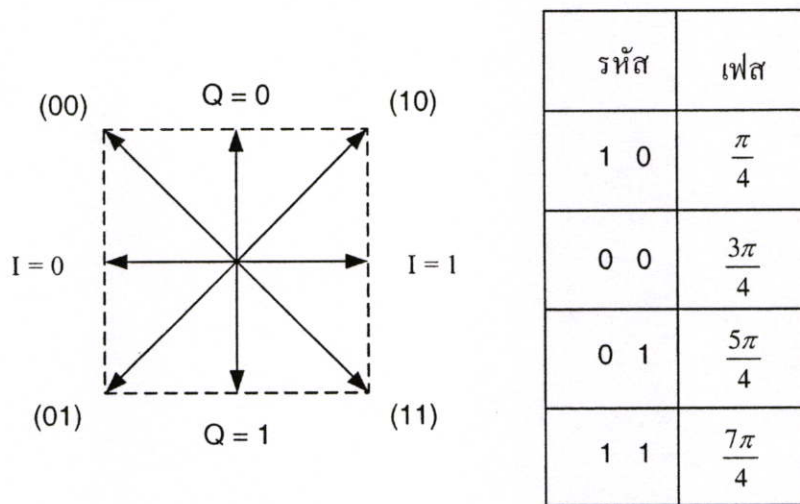
รูปที่ 3.29 วงจรมอดูเลต QPSK

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นพาห์ที่ใช้ในช่องสัญญาณ I และ Q และสัญญาณ BPSK สำหรับรหัส 0 และ 1 โดยใช้เวกเตอร์โคออร์ดิเนต ถ้าเฟสเริ่มแรกของของสัญญาณ เอาต์พุต จากออสซิลเลเตอร์กำหนดเป็นตัวอย่างอิง คลื่นพาห์ที่ใช้ในช่องสัญญาณ I จะอยู่ในเฟสเดียวกันกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนคลื่นพาห์ของช่องสัญญาณ Q ได้จากการ shift เฟส  $\frac{\pi}{2}$  จากสัญญาณ เอาต์พุต ของออสซิลเลเตอร์ สัญญาณที่มอดูเลตแบบ BPSK ในช่องสัญญาณ I และ Q จะอยู่ในเฟสเดียวกันกับคลื่นพาห์สำหรับรหัส 1 แต่จะต่างเฟสกับคลื่นพาห์เท่ากับ  $\pi$  สำหรับรหัส 0

โดยการรวมสัญญาณ BPSK ที่ได้รับการมอดูเลตในช่องสัญญาณ I และช่องสัญญาณ Q จะได้สัญญาณ QPSK เมื่อรหัสในช่องสัญญาณ I เป็น "1" และรหัสในช่องสัญญาณ Q เป็น "0" เวกเตอร์ผลลัพธ์จะแสดงดังในรูป 3.31 เวกเตอร์ผลลัพธ์นี้แสดงสัญญาณ QPSK สำหรับ 10 ซึ่งสัญญาณ QPSK นี้ จะต่างเฟส  $\frac{\pi}{4}$  กับคลื่นพาห์ของช่องสัญญาณ I สัญญาณ QPSK สำหรับรหัส 00 จะต่างเฟสเท่ากับ  $\frac{3\pi}{4}$  สัญญาณสำหรับรหัส 01 จะต่างเฟส  $\frac{5\pi}{4}$  และสัญญาณสำหรับรหัส 11 จะต่างเฟส  $\frac{7\pi}{4}$  กับคลื่นพาห์ของช่องสัญญาณ P รหัสสัญญาณเหล่านี้เรียกว่า "Gray Code"



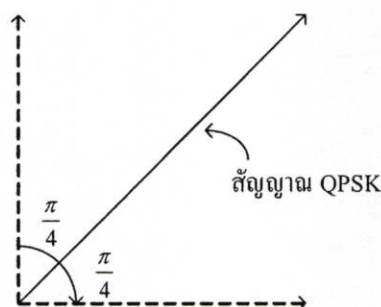
รูปที่ 3.30 เปรียบเทียบเฟสของสัญญาณในช่องสัญญาณ I และ Q



รูปที่ 3.31 เวกเตอร์ผลลัพธ์ของสัญญาณ QPSK

เมื่อเปรียบเทียบรหัสของ 2 เฟสที่อยู่ใกล้เคียงกัน จะเห็นว่า หนึ่งในสองบิตจะเหมือนกัน

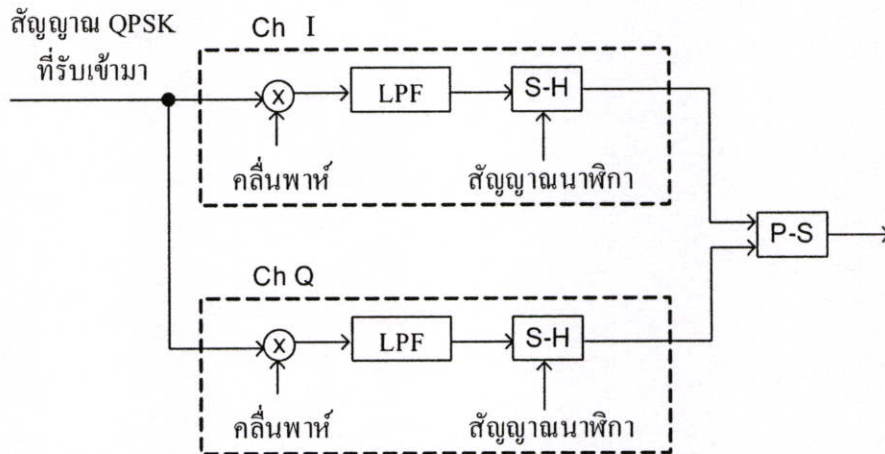
พิจารณาหลักการของการดีมอดูเลตสัญญาณ QPSK โดย coherent detection เวกเตอร์ที่แสดงโดยเส้นทึบเป็นสัญญาณ QPSK ที่รับได้ ซึ่งสัญญาณ QPSK นี้สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้โดยการรวมสัญญาณ BPSK ที่ตั้งฉากกันคู่หนึ่ง ซึ่งแสดงโดยเส้นประ นั่นคือ การดีมอดูเลตสัญญาณ QPSK ก็เท่ากับการดีมอดูเลตสัญญาณ BPSK สองสัญญาณดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นสัญญาณ QPSK ที่ได้รับคือ การดีเทกต์แบบ coherent โดยการใช้คลื่นพหุอ้อมที่ที่ตั้งฉากกันคู่หนึ่ง ซึ่งได้โดยการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่รับไปเท่ากับ  $\frac{\pi}{4}$  นั่นคือ สัญญาณ BPSK ที่ตั้งฉากกันแต่ละสัญญาณถูกการดีเทกต์แบบ coherent แยกกัน



รูปที่ 3.32 สัญญาณ QPSK ถูกเลื่อนเฟส  $\frac{\pi}{4}$

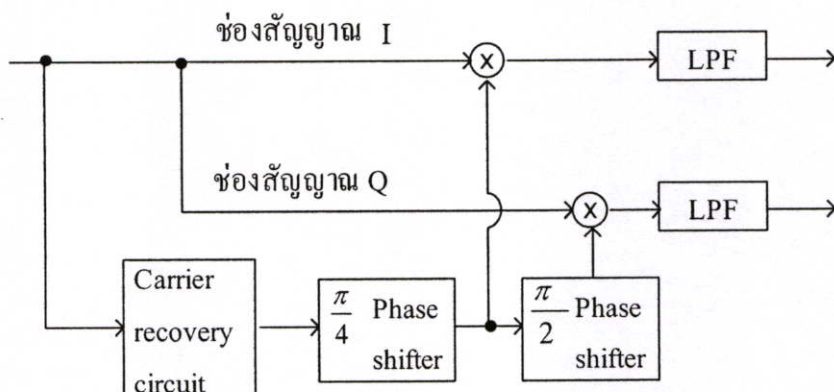
รูปที่ 3.33 เป็นวงจรดีมอดูเลตสำหรับสัญญาณ QPSK โดยการดีเทกต์แบบ Coherent ซึ่งวงจรประกอบด้วยวงจรดีมอดูเลตแบบ Coherent คู่หนึ่งสำหรับสัญญาณ BPSK ที่ตั้งฉากกัน สัญญาณ

QPSK ที่รับได้ถูกแบ่งออกเป็นขบวนสัญญาณ 2 ขบวน ซึ่งถูกตีเทกต์แบบ coherent แยกกัน คู่ของคลื่นพาห์อ้างอิงที่ตั้งฉากกันถูกป้อนเข้า multiplier ของช่องสัญญาณ I และช่องสัญญาณ Q แต่ละช่องสัญญาณ ซึ่ง เอาต์พุต จะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อตัดฮาร์โมนิกสูง ๆ ออก หลังจากนั้นก็ผ่านไปยังวงจร sample holder พร้อมด้วย clock pulse ดังนั้นสัญญาณจะถูกตีมอดูเลตแยกกันในช่องสัญญาณ I และ Q ขบวนสัญญาณที่ขนานกันนี้ถูกรวมเข้าด้วยกันที่ P/S converter เพื่อจัดรูปแบบเรียงเป็นสัญญาณอนุกรมตามเดิม



รูปที่ 3.33 วงจรตีมอดูเลตสัญญาณ QPSK

ในการตีเทกต์สัญญาณ QPSK แบบ coherent จำเป็นที่จะต้องเลื่อนเฟส (Shift phase) ของคลื่นพาห์อ้างอิงไป  $\frac{\pi}{4}$  เมื่อเทียบกับเฟสของสัญญาณที่รับได้ เพื่อจุดประสงค์นี้ จำเป็นต้องใช้วงจร คู่คลื่นพาห์กลับคืน วงจร  $\frac{\pi}{4}$  phase shifter และวงจร  $\frac{\pi}{2}$  phase shifter ในวงจร multiplier ของช่องสัญญาณ I คลื่นพาห์อ้างอิงได้จากการเลื่อนเฟสของสัญญาณ ซึ่งเป็นเอาต์พุต ของวงจรคู่คลื่นพาห์กลับคืน แล้วเลื่อนเฟสไปโดยใช้  $\frac{\pi}{4}$  phase shifter ส่วนวงจร multiplier ของช่องสัญญาณ Q คลื่นพาห์อ้างอิงได้จาก ให้ เอาต์พุตของ  $\frac{\pi}{4}$  phase ผ่านวงจร  $\frac{\pi}{2}$  phase shifter อีกครั้งหนึ่ง คลื่นพาห์อ้างอิงนี้จะตั้งฉากกับคลื่นพาห์อ้างอิงในช่องสัญญาณ I โดยการผ่านการตีเทกต์แบบ coherent ของสัญญาณ QPSK ซึ่งใช้คลื่นพาห์อ้างอิงคู่หนึ่งนี้ จะได้สัญญาณ BPSK 2 สัญญาณ ซึ่งรวมกันมาจากทางตอนมอดูเลตสามารถตีเทกต์แยกออกมาได้ โดยวิธี coherent ดังในรูปที่ 3.34



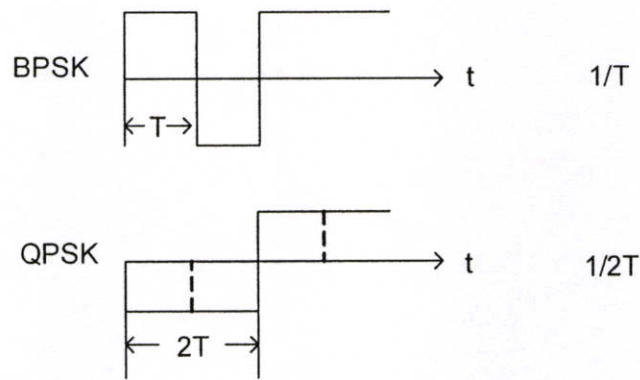
รูปที่ 3.34 การดีเทกต์สัญญาณ QPSK ออกมาเป็น BPSK 2 สัญญาณ

หลักการพื้นฐานของการสร้างคลื่นพาห้จากสัญญาณ QPSK ก็เหมือนกันกับกรณีของสัญญาณ BPSK เฟสของคลื่นพาห้อ้างอิงที่ได้กลับคืนมาจะตรงกันกับหนึ่งในสี่เฟสของสัญญาณ QPSK ที่รับได้ แต่เป็นไปได้ที่จะกำหนดว่าเฟสไหนในสี่เฟสเหล่านี้ตรงกันกับเฟสของคลื่นพาห้อ้างอิงที่แท้จริง โดยลักษณะนี้ปัญหาของ  $\frac{\pi}{2}$  phase ambiguity ก็จะเกิดขึ้นใน QPSK ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสความต่าง Differential coding technique หรือโดยใช้ Unique word เข้าช่วยเหมือนในกรณีของ BPSK

### 3.3 ลักษณะของ QPSK [14]

สมมติว่าจำนวนบิตที่จะต้องส่งในหนึ่งหน่วยเวลา คืออัตราบิตมีค่าเท่ากันทั้งในกรณีของ BPSK และ QPSK สำหรับ QPSK บิตจะถูกส่ง 2 บิตในแต่ละครั้ง ดังนั้นความถี่ของการเปลี่ยนเฟสคลื่นพาห้จะขึ้นอยู่กับรหัส นั่นคือ Keying speed จะเป็นครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับกรณี BPSK เมื่อช่วงระยะเวลาของบิตแต่ละตัวเป็น  $T$  ดังนั้น Keying speed จะมีค่าเท่ากับ  $1/T$  สำหรับ BPSK และจะมีค่าเท่ากับ  $1/2T$  สำหรับกรณีของ QPSK

โดยทั่วไปแล้วแถบกว้างความถี่ที่ถูกครอบครองของสัญญาณ PSK จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับ Keying speed ฉะนั้นเมื่อให้อัตราการส่งบิตคงที่ Keying speed ในกรณีของ QPSK จะเป็นครึ่งหนึ่งของ BPSK และแถบกว้างความถี่ที่ถูกครอบครองของสัญญาณ QPSK จะเป็นครึ่งหนึ่งของสัญญาณ BPSK ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้แถบกว้างความถี่เท่ากัน จำนวนบิตซึ่งสามารถส่งได้ในกรณีของ QPSK จะเป็น 2 เท่าของ BPSK

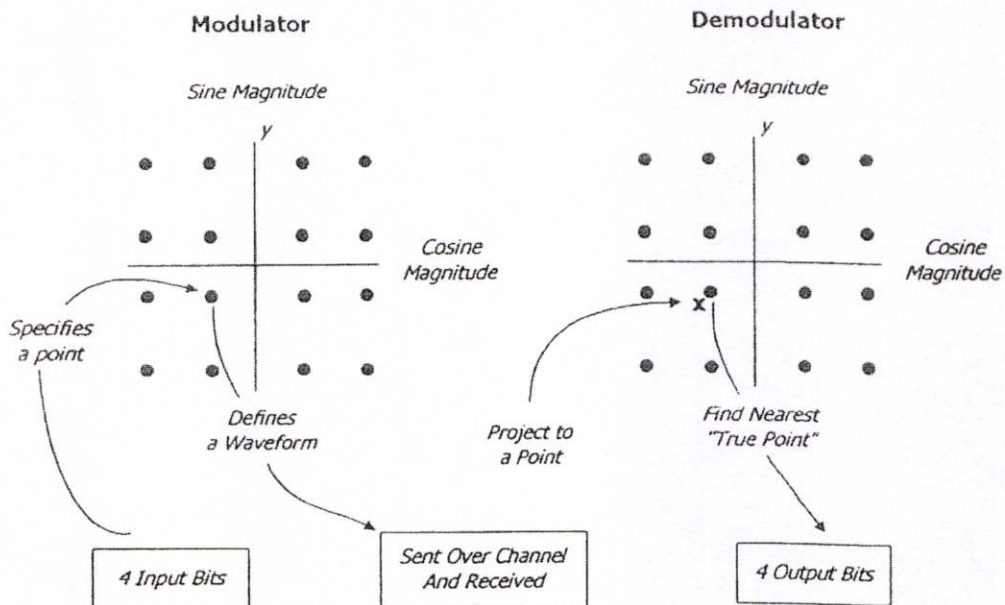


รูปที่ 3.35 Keying speed ในการส่งสัญญาณ

### 3.4 การมอดูเลตแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์ (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) [1]

QAM ใช้คลื่นไซน์และคลื่น โคไซน์ที่มีความถี่เดียวกันในการส่งข้อมูล คลื่นถูกส่งบนช่องสัญญาณเดียวในเวลาเดียวกัน และขนาดของคลื่นที่แตกต่างกันตามข้อมูลของแต่ละชุด การมอดูเลตแบบ QAM ถูกนำมาใช้งานและเป็นพื้นฐานของโมเด็มย่านเสียงหลาย ๆ ชนิดรวมทั้ง V.34 ด้วย

ตัวอย่างของระบบมอดูเลตแบบ QAM สามารถส่งข้อมูลได้ 4 บิต ในเวลาเดียวกัน Constellation แสดงในรูปที่ 3.36

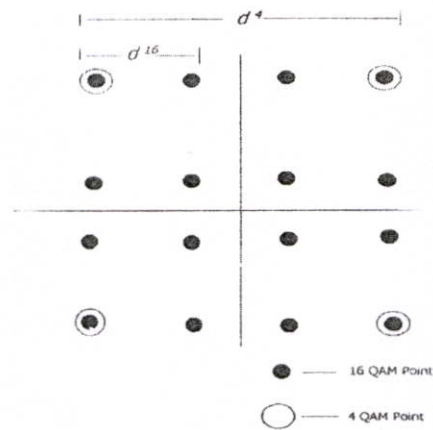


รูปที่ 3.36 ตัวอย่างการส่งบิต 4 บิต ในช่องสัญญาณของระบบ QAM

ข้อมูลจำนวน 4 บิต ที่ถูกส่งเข้าไปใน 16 QAM โดยการกำหนดตำแหน่ง 1 ตำแหน่ง ในการส่งข้อมูล จะเห็นได้ว่าข้อมูลจำนวน 4 บิต ถูกรวมส่ง (Mapping) เข้าไปตำแหน่งเดียวกันนั้นของ 16 ตำแหน่ง โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นองค์ประกอบของตำแหน่งที่จะส่งบิตข้อมูลเข้าไป และเป็นตัวกำหนดขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ โคซายน์และซายน์ ที่จะส่งเข้าไปในช่องสัญญาณ ทางภาคส่งและภาครับมีวิธีการกำหนดและตรวจสอบ ตำแหน่งของข้อมูลข่าวสารได้ถูกต้อง

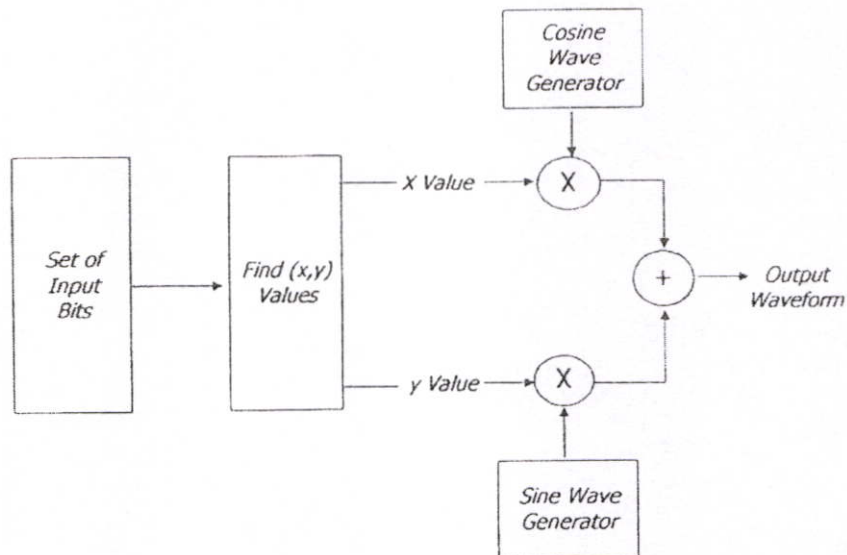
เมื่อส่งสัญญาณ โคซายน์และซายน์เข้าไปในช่องสัญญาณแล้ว ทางด้านรับจะทำการสร้างสัญญาณให้เหมือนกับทางด้านส่ง โดยหาค่าประมาณจากขนาดของสัญญาณ โคซายน์และซายน์ ขนาดของสัญญาณทางด้านรับจะมีขนาดและตำแหน่งเหมือนกับทางด้านส่ง โดยขนาดของโคซายน์ได้จากองค์ประกอบของ  $x$  และขนาดของซายน์ได้จากองค์ประกอบของ  $y$  โดยทั่วไปการส่งสัญญาณไปในช่องสัญญาณ จะเกิดการรบกวนและการผิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งทางด้านรับจะมีวิธีการป้องกันการเกิดการผิดพลาดของตำแหน่งใน Constellation การป้องกันตำแหน่งที่ผิดพลาดจากการตกลงมาจากตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยทางด้านรับจะเลือกตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งทางด้านส่งมากที่สุดซึ่งเป็นวิธีการของ QAM ถ้าในกรณีทางด้านรับมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป จะทำให้การประมาณการของตำแหน่งผิดพลาด และทำให้ตำแหน่งทางด้านรับผิดพลาดไม่ตรงกับตำแหน่งทางด้านส่ง

ตัวอย่างนี้เรียกว่า 16 QAM เพราะมี 16 ตำแหน่ง โดยทั่วไปสามารถส่งจำนวนบิตข้อมูลเข้าไปในแต่ละสัญลักษณ์ของ QAM ได้ ในตัวอย่างถ้าส่ง 2 บิต ต่อสัญลักษณ์ใช้ตำแหน่ง QAM จำนวน 4 ตำแหน่ง และการมอดูเลตนี้เรียกว่า 4 QAM ในรูปที่ 3.37 แสดงการมอดูเลตแบบ 4 QAM บน 16 QAM ค่าเฉลี่ยของกำลังงานในแต่ละกลุ่มสัญญาณมีค่าประมาณเท่า ๆ กัน ระยะทางระหว่างตำแหน่งใน 4 QAM ( $d^4$ ) จะมีมากกว่าระยะทางระหว่างตำแหน่งของ 16 QAM ( $d^6$ ) ผลที่ตามมาคือ ในการส่งสัญญาณเข้าไปในช่องสัญญาณเดียวกัน การส่งสัญญาณ 16 QAM จะเกิดสัญญาณรบกวนได้มากกว่า การส่งสัญญาณ 4 QAM



รูปที่ 3.37 ตัวอย่างของ 4 QAM วางบนตำแหน่ง 16 QAM ด้วยค่ากำลังงานเฉลี่ยเท่ากัน

บล็อกไดอะแกรมของการมอดูเลตแบบ QAM แสดงในรูปที่ 3.38 การมอดูเลตแอมพลิจูดของคลื่นพาห์โคไซน์ เรียกว่า อินเฟส หรือ “I” การมอดูเลตแอมพลิจูดของคลื่นพาห์ไซน์เรียกว่า ควอเดรเจอร์หรือ Q



รูปที่ 3.38 บล็อกไดอะแกรมของการมอดูเลตแบบ QAM

### 3.4.1 การคำนวณทางคณิตศาสตร์ของการมอดูเลตแบบ QAM

การตั้งฉากระหว่างสัญญาณชายน์และโคชายน์ เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไปในช่องสัญญาณเดียวกัน เมื่อพิจารณาในคาบเวลาเดียวของคลื่นแต่ละคลื่น การตั้งฉากสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (3.2)

$$\int_0^{\tau} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) dt = 0 \quad (3.2)$$

โดยที่  $\tau$  คือ คาบเวลาของสัญญาณชายน์และโคชายน์

เนื่องจากคุณสมบัติในการตั้งฉากของคลื่นสัญญาณชายน์และโคชายน์บางครั้งเรียกว่า ฟังก์ชันพื้นฐาน ตัวอย่างของการมอดูเลตแบบ QAM แสดงดังรูปที่ 3.39

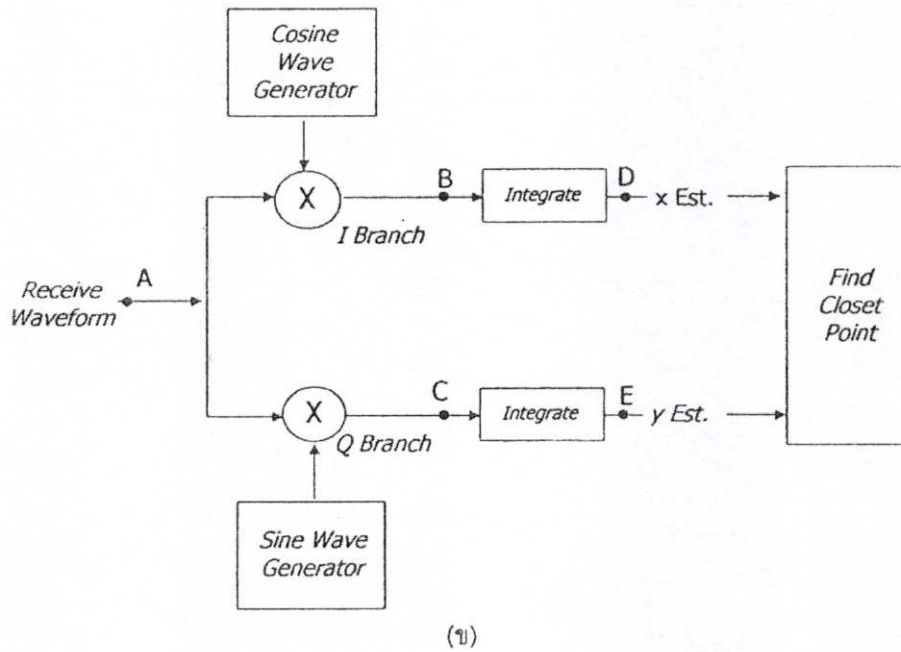
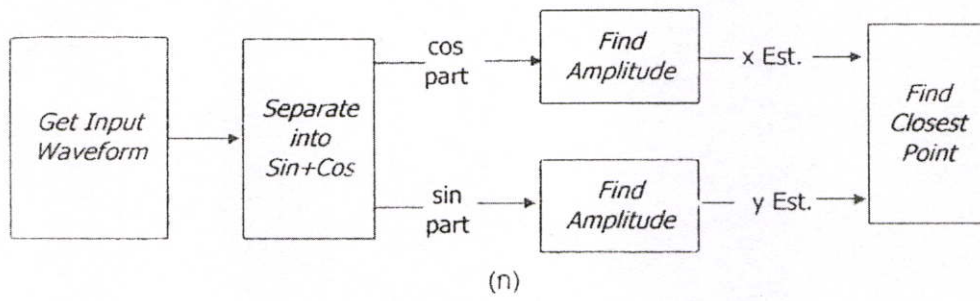
สัญญาณอินพุตของบล็อกไดอะแกรมมาจากช่องสัญญาณและเอาต์พุตจะส่งไปที่เครื่องรับ สมมติว่าช่องสัญญาณไม่มีการสูญเสียและคาบเวลาที่ด้านรับมีค่าถูกต้อง ดังนั้นสามารถเขียนสมการของแต่ละตำแหน่งจากรูปที่ 3.39 โดยที่  $i$  คือสัญญาณอินพุตที่จุด A

$$V_A(t) = X_i \cos(\omega t) + Y_i \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

สมการที่ (3.3)  $X_i$  คือแอมพลิจูดของสัญญาณ โคชายน์ ที่เข้ารหัสทางด้านส่ง และ  $Y_i$  คือแอมพลิจูดของสัญญาณชายน์ที่เข้ารหัสด้านส่ง หลังจากผ่านบล็อกการคูณที่จุด B และ C สัญญาณที่ได้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ

$$V_B(t) = X_i \cos^2(\omega t) + Y_i \sin(\omega t) \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

$$V_C(t) = X_i \cos(\omega t) \sin(\omega t) + Y_i \sin^2(\omega t) \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.39 (ก) บล็อกไดอะแกรมการตีมอดูเลตแบบ QAM ในด้านลอจิก

(ข) บล็อกไดอะแกรมการตีการมอดูเลตแบบ QAM ในด้านการประมวลผลสัญญาณ

สัญญาณที่จุด B และ C ซึ่งยังคงเป็นอิสระต่อกัน จะผ่านไปยังบล็อกการอินทิเกรต ทำการรวม บล็อกในคาบเวลาเดียวและจะเริ่มใหม่อีกครั้ง ในรูปที่ 3.39 เป็นตัวอย่างเอาต์พุตของการอินทิเกรต ที่จุดสุดท้ายของคาบเวลาอินทิเกรต สัญญาณที่จุด D และ E สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ

$$\begin{aligned}
 V_D(t) &= \int_0^{\tau} V_B(t) dt \\
 &= \int_0^{\tau} X_i \cos^2(\omega t) + Y_i \sin(\omega t) \cos(\omega t) dt \\
 &= \int_0^{\tau} X_i \cos^2(\omega t) dt + \int_0^{\tau} Y_i \sin(\omega t) \cos(\omega t) dt \\
 &= \frac{\tau X_i}{2} + 0 = \frac{\tau X_i}{2}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 V_E(t) &= \int_0^{\tau} V_C(t) dt \\
 &= \int_0^{\tau} X_i \cos(\omega t) \sin(\omega t) + Y_i \sin^2(\omega t) dt \\
 &= \int_0^{\tau} X_i \cos(\omega t) \sin(\omega t) dt + \int_0^{\tau} Y_i \sin^2(\omega t) dt \\
 &= 0 + \frac{\tau Y_i}{2} + 0 = \frac{\tau Y_i}{2}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

สังเกตว่ามีเทอมที่เป็น 0 ในสมการที่ (3.6) และ (3.7) เพราะคุณสมบัติในการตั้งฉากของ สัญญาณไซน์และโคไซน์ เอาต์พุตของคิมอดูเลต ซึ่งประกอบด้วยค่าประมาณขนาดของสัญญาณ ไซน์และโคไซน์ที่ด้านรับ

สมมติการวิเคราะห์พัลส์ในการมอดูเลต ก่อนที่จะรวมสัญญาณไซน์และโคไซน์ พัลส์ในคาบ เวลาเดียวกันจะถูกรวมแอมพลิจูดเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปวงจรกรองความถี่อาจจะใช้ปรับปรุง สัญญาณพัลส์ก่อนการรวมฟังก์ชันเข้าด้วยกัน จุดประสงค์ในขั้นตอนนี้เพื่อลดขนาดของแบนด์

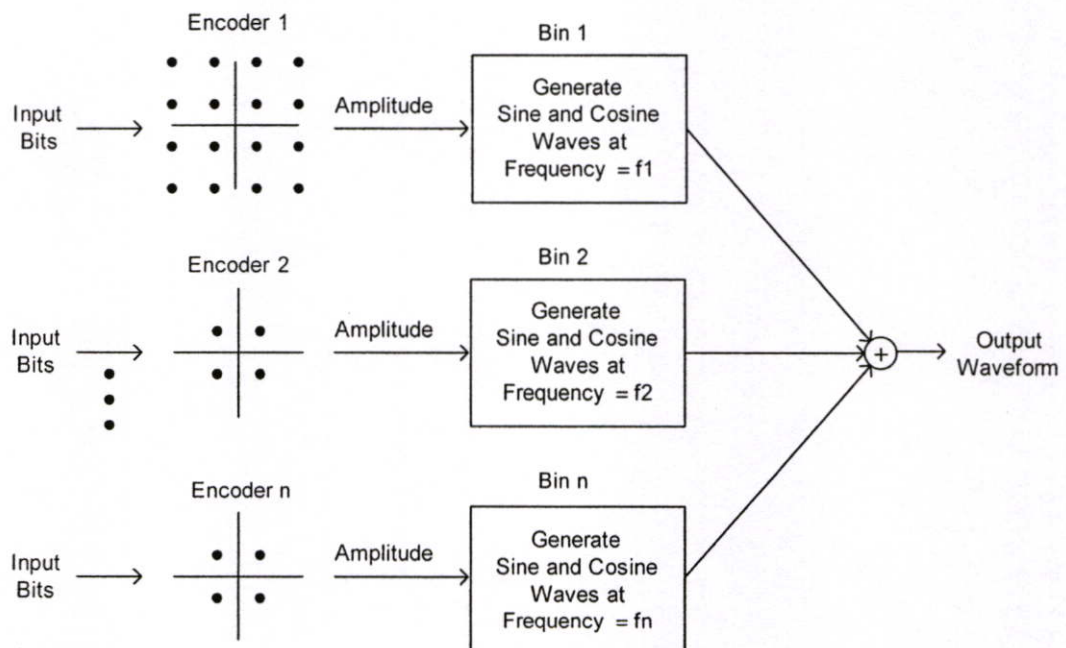
วิคต์ของสัญญาณทางด้านส่ง โดยใช้วงจรกรองความถี่สูง ถ้าวางวงจรความถี่ที่มีผลตอบสนองของ  $p(t)$  ดังนั้นการส่งสัญญาณของสัญญาณลักษณะ  $i$  จะแสดงได้ดังสมการที่ (3.8)

$$V(t) = X_i p(t - i\tau) \cos(\omega t) + Y_i p(t - i\tau) \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

### 3.5 การมอดูเลตแบบมัลติโทน (Multitone Modulation) [1]

การมอดูเลตแบบมัลติโทนเป็นพื้นฐานของการมอดูเลตแบบ discrete multitone (DMT) ในรูปแบบของ ADSL การมอดูเลตชนิดนี้อาจเรียกว่า orthogonal frequency division multiplex (OFDM)

โครงสร้าง DMT ได้มาจากแนวคิดของ QAM แนวคิดของการเข้ารหัสมีมากกว่าหนึ่งกลุ่มสัญญาณ ในการเข้ารหัสแต่ละครั้งจะกำหนดจำนวนบิตในการเข้ารหัส โดยการเข้ารหัสเป็นกลุ่มค่าของสัญญาณเอาต์พุตจากการเข้ารหัสกลุ่มสัญญาณคือแอมพลิจูดของรูปสัญญาณชายันและโคชายัน อย่างไรก็ตามในการเข้ารหัสแต่ละกลุ่มใช้ความถี่ชายันและโคชายันแตกต่างกัน คลื่นชายันและโคชายันทั้งหมดถูกรวมเข้าด้วยกันแล้วส่งไปบนช่องสัญญาณ สัญญาณทางด้านเอาต์พุตได้จากไดอะแกรมดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 แนวความคิดของการมอดูเลตแบบ DMT

สมมติว่าที่ด้านรับสามารถแยกความถี่ที่แตกต่างกันของชาชน์และโคชาชน์ แต่ละกลุ่มของสัญญาณเป็นอิสระต่อกัน เป็นการถอดรหัส เช่นเดียวกับการถอดรหัสของ QAM สามารถถอดรหัสและบิตเอาต์พุตที่ได้เป็นการถอดรหัสของกลุ่มสัญญาณ

แนวความคิดในการใช้ความถี่ที่แตกต่างกันเพื่อส่งข้อมูลเป็นลักษณะเฉพาะของ DMT ซึ่งแตกต่างกับการส่งสัญญาณชนิดอื่น เช่น สัญญาณโทรทัศน์และวิทยุ ความแตกต่างของ DMT คือทุกช่องสัญญาณเป็นส่วนสำคัญในเครื่องรับขณะที่รูปแบบอื่น ๆ มีส่วนสำคัญเพียงช่องสัญญาณเดียวเท่านั้น ความถี่ของช่องสัญญาณที่ใช้ใน DMT เรียกว่า frequency bin หรือ bin, tone หรือ DMT tone และช่องสัญญาณย่อย

รูปสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณจะแยกจากกัน ถ้าไม่ใช่กรณีของ DMT การถอดรหัสในแต่ละช่องสัญญาณจะทำได้ยาก เพราะคลื่นชาชน์และโคชาชน์ในแต่ละช่องสัญญาณจะถูกรบกวนจากช่องสัญญาณอื่น สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของ DMT คือความถี่ชาชน์และโคชาชน์ที่ใช้ในแต่ละช่องสัญญาณจะรวมหลายความถี่ปกติ และคาบเวลา  $\tau$  จะแปรผกผันกับความถี่ปกติ ความถี่ปกตินี้จะอ้างอิงจากความถี่พื้นฐาน จากการวิเคราะห์การทำงานของ QAM สิ่งที่จะต้องพิจารณาคือคลื่นชาชน์และโคชาชน์ที่ความถี่พื้นฐานในรูปแบบฟังก์ชันพื้นฐาน เพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณรบกวนจะไม่เกิดขึ้นระหว่างช่องสัญญาณ สิ่งหนึ่งที่สำคัญและต้องแสดงให้เห็นคือคลื่นชาชน์และโคชาชน์จากช่องสัญญาณหนึ่ง จะต้องตั้งฉากกับคลื่นชาชน์และโคชาชน์ช่องสัญญาณอื่น การตั้งฉากนี้เป็นไปได้ดังสมการที่ (3.10) (3.11) และ (3.12)

$$\int_0^{\tau} \cos(n\omega_f t) \cos(m\omega_f t) dt = 0 \quad (3.9)$$

$$\int_0^{\tau} \cos(n\omega_f t) \sin(m\omega_f t) dt = 0 \quad (3.10)$$

$$\int_0^{\tau} \sin(n\omega_f t) \sin(m\omega_f t) dt = 0 \quad (3.11)$$

ค่า  $n$  และ  $m$  เป็นจำนวนที่แตกต่างกัน และ  $\omega_f$  คือ ความเร็วเชิงมุมของความถี่พื้นฐาน

ถ้า  $n = m$  ดังนั้นทอมแรกจะถูเข้าหา  $\frac{1}{2} \tau$  เป็นผลจากสมการที่ (3.6) ความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.10) และ (3.11) ดังแสดงทั้งสองสมการ ต่างกันที่สมการที่ (3.10) จะตั้งฉากแม้กรณีที่  $n = m$  ดังนั้นการคิมอูเลตแบบ DMT ในการตั้งฉากของสัญญาณชาชน์และโคชาชน์ที่ความถี่ต่างกัน จะเท่ากับสัญญาณชาชน์และโคชาชน์ที่ความถี่เดียวกัน ขั้นตอนการมอดูเลตและคิมอูเลตในรูปแบบที่

3.40 ใช้วิธีการสร้างและตรวจสอบใน DMT เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นจะพิจารณาผลรวมของไซน์และโคไซน์ที่เวลา  $\tau$  สมการรูปสัญญาณสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.13)

$$\int_0^{\tau} \cos(n\omega_f t) \cos(m\omega_f t) dt = \int_0^{\tau} \frac{1}{2} \cos((n-m)\omega_f t) + \frac{1}{2} \cos((n+m)\omega_f t) dt \quad (3.12)$$

$$= \left[ \frac{\sin((n-m)\omega_f t)}{2\omega_f(n-m)} + \frac{\sin((n+m)\omega_f t)}{2\omega_f(n+m)} \right]_0^{\tau}$$

$$= \frac{\sin((n-m)\frac{2\pi}{\tau}\tau)}{2\omega_f(n-m)} + \frac{\sin((n+m)\frac{2\pi}{\tau}\tau)}{2\omega_f(n+m)}$$

$$= \frac{\sin((n-m)2\pi)}{2\omega_f(n-m)} + \frac{\sin((n+m)2\pi)}{2\omega_f(n+m)}$$

$$= 0 \text{ เมื่อ } n \text{ และ } m \text{ เท่ากับค่าคงที่ และ } n \neq m$$

$$S(t) = \begin{cases} X_n \cos(n\omega_f t) + Y_n \sin(n\omega_f t) & \text{for } 0 < t \leq \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.13)$$

ดังนั้นสัญญาณที่ได้จะแทนหนึ่งช่องสัญญาณหรือช่องสัญญาณจำนวน  $n$  (DMT 1 สัญลักษณ์)  
ถ้า  $s(t)$  ถูกสุ่มตัวอย่าง  $2 \cdot N \cdot f_f$  ค่าของสัญญาณที่ได้ดังสมการที่ (3.14) จะไม่เป็นศูนย์

$$s_k = X_n \cos\left(n\omega_f \frac{k}{2Nf_f}\right) + Y_n \sin\left(n\omega_f \frac{k}{2Nf_f}\right)$$

$$= X_n \cos\left(\frac{\pi nk}{N}\right) + Y_n \sin\left(\frac{\pi nk}{N}\right) \quad \text{for } 0 < k \leq 2N \quad (3.14)$$

ในระบบ DMT นั้น  $N$  จะแสดงช่องสัญญาณขนาดใหญ่ในด้านส่งสัญญาณ สัญญาณนี้จะอยู่ที่ความถี่ของ  $Nf_f$  เนื่องจากทฤษฎีในควิสต์ อัตราการสุ่มของระบบต้องมากกว่าความถี่สูงสุดของ

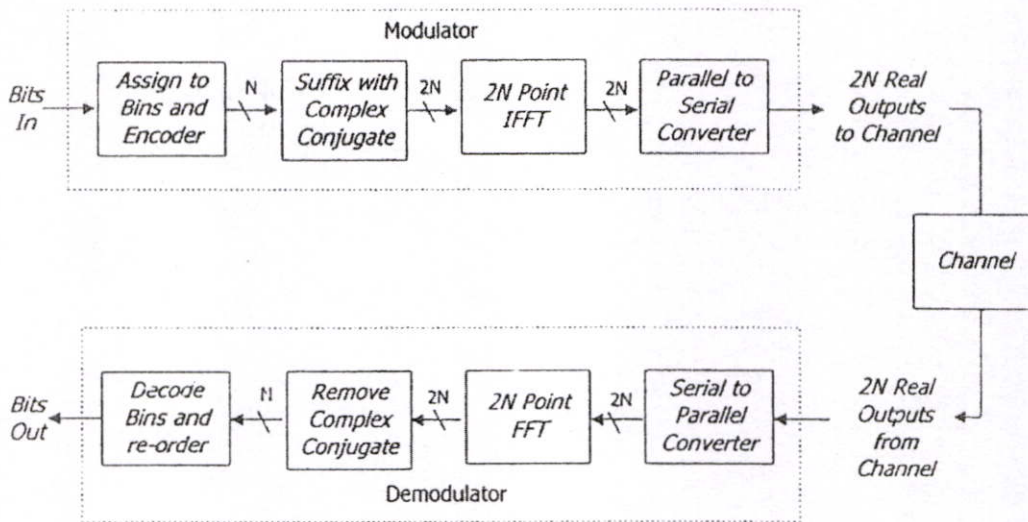
ระบบสองเท่า อัตราการสุ่มที่ถูกเลือกคือ  $2N_f$  ถ้าทำการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง Discrete Fourier transform (DFT) ของ  $s_k$  โดยใช้ตำแหน่ง  $2N$  ในการแปลง ผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (3.15)

$$S_m = \sum_{k=0}^{2N} \left( X_n \cos\left(\frac{\pi nk}{N}\right) + Y_n \sin\left(\frac{\pi nk}{N}\right) \right) e^{-\frac{j2\pi km}{2N}} \quad (3.15)$$

$$= \begin{cases} N(X_n - jY_n) & \text{เมื่อ } m = n \\ N(X_n + jY_n) & \text{เมื่อ } m = 2N - n \\ 0 & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

เนื่องจาก DFT จะแยกส่วนของสัญญาณในโดเมนความถี่ ผลที่ได้จากสมการที่ (3.15) จึงไม่ผิดปกติกการแทนค่า  $2N$  เป็นการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของสัญญาณที่หนึ่งความถี่ ค่าที่เกิดขึ้นในโดเมนความถี่ 2 ตำแหน่งจะไม่เป็นศูนย์ เพราะ โดเมนความถี่นั้นความถี่ที่แสดงหลังจากการเปลี่ยนแปลง จะแสดงสเปกตรัม 2 ส่วน เป็นค่าจริงทั้งหมดในโดเมนเวลาประกอบด้วย  $s_k$  ที่ตำแหน่ง  $2N$  จะแสดงคอนจูเกตเชิงซ้อนแบบสมมูลที่บริเวณกึ่งกลางจุด ความถี่ทางด้านบวกและด้านลบจะเหมือนกันซึ่งเป็นผลมาจากการแปลงฟูเรียร์ ค่าศูนย์ในสมการที่ (3.15) เป็นผลมาจากไม่มีกำลังงานที่ความถี่ของตำแหน่งนั้น สิ่งสำคัญในสมการที่ (3.15) คือแสดงการตั้งฉากของชายน์และโคชายน์ที่ความถี่แตกต่างกัน

ผลจากสมการที่ (3.15) ได้เสนอแนวทางอื่นของ DMT แทนที่การจับคู่ (Mapping) เอาต์พุตของกลุ่มสัญญาณในการเข้ารหัสเข้ากับแอมพลิจูดของชายน์และโคชายน์ เอาต์พุตสามารถจับคู่กับจำนวนเชิงซ้อนในเวกเตอร์ ค่าที่ได้จาก X- หรือโคชายน์แทนจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน และค่า Y หรือขนาดของชายน์จะแทนจำนวนจินตภาพ ถ้าเอาต์พุตของการเข้ารหัสกลุ่มสัญญาณคือลำดับในเวกเตอร์ ดังนั้นแต่ละตำแหน่งของเวกเตอร์จะแทนหนึ่งในช่องสัญญาณของ DMT ถ้าช่องสัญญาณ  $N$  มีอยู่ในระบบ DMT เวกเตอร์ของเชิงซ้อนก็จะมี  $N$  เป็นส่วนประกอบคอนจูเกตเชิงซ้อนของเวกเตอร์ สามารถเพิ่มไปในเวกเตอร์เหล่านี้ได้ เช่น เวกเตอร์ใหม่มีสังยุคเชิงซ้อนแบบสมมาตร การแปลงฟูเรียร์กลับแบบไม่ต่อเนื่อง Inverse discrete Fourier transform (IDFT) บนเวกเตอร์ใหม่นี้ จะสร้างจำนวนจริงในโดเมนเวลาโดยมีลำดับเหมือนกับต้นแบบของการมอดูเลตแบบ DMT ในรูปที่ 3.40 และรูปที่ 3.41 แสดงวิธีการใหม่ของการมอดูเลตแบบ DMT



รูปที่ 3.41 การมอดูเลตแบบ Inverse discrete fourier transform (IDFT)

ในรูปที่ 3.41 แสดงการมอดูเลตแบบ DMT สังเกตเห็นได้ว่าเป็นการแปลงกลับของการมอดูเลต การใช้ Inverse discrete fourier transform (IDFT) แทน Discrete fourier transform (DFT) เนื่องจาก DFT จะถูกส่งจาก โดเมนเวลาไปโดเมนความถี่ เนื่องจากที่ โดเมนเวลาเป็นค่าจริง เอาต์พุตของ DFT เป็นคอนจูเกตเชิงซ้อนแบบสมมาตร ครึ่งหนึ่งของเอาต์พุตจำเป็นต้องการถอดรหัสของกลุ่มสัญญาณ และอีกวิธีที่ใช้ในการมอดูเลตและดีมอดูเลตคือ Fast fourier transform (FFT) และ inverse Fourier transform (IFFT) การเปลี่ยนแปลงอัลกอริทึมของ DFT และ IDFT เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ

## บทที่ 4

# การส่งสัญญาณผ่านคู่สายเคเบิลโทรศัพท์

### 4.1 ชนิดของสายเคเบิลและการใช้งาน [13]

การใช้สายเคเบิลในสถานที่ต่าง ๆ เคเบิลที่ใช้ในการให้บริการโทรศัพท์ มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ละชนิดนำมาใช้งานในสถานที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและความแข็งแรงของสายเคเบิล เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพสิ่งแวดล้อมในแต่ละสถานที่ จึงพอจะแยกตามสถานที่ใช้งานของเคเบิลได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1.1 เคเบิลอากาศ (Aerial cable)

เคเบิลอากาศ คือการสร้างทางสายเคเบิลแขวนไปตามแนวเสาหรือตามอาคาร เคเบิลที่นำมาใช้ในอากาศส่วนประกอบจะไม่นูนยาวมากนัก และมีน้ำหนักเบา เพื่อให้สามารถแขวนได้จำนวนมาก ๆ ข้อดีของการสร้างเคเบิลแบบแขวนอากาศ คือสร้างง่าย สะดวกในการเปลี่ยนแปลงและการบำรุงรักษา สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย แต่มีข้อเสียอยู่ตรงที่เกาะกระกรุงรังไม่เหมาะสมกับเมืองที่พัฒนา

#### 4.1.2 เคเบิลฝังดิน (Buried cable)

เคเบิลฝังดิน คือการสร้างข่ายสายเคเบิลโดยการฝังดินโดยตรง ข้อดีของการสร้างข่ายสายแบบฝังดิน คือสามารถจัดความกรุงรังให้หมดไป แต่การสร้างข่ายสายอาจมีการลงทุนสูงกว่าเคเบิลแขวนอากาศ และจะต้องใช้เคเบิลชนิดที่มีเปลือกหุ้มพิเศษกว่าธรรมดา

#### 4.1.3 เคเบิลใต้ดินชนิดร้อยท่อ (Underground conduit cable)

การสร้างข่ายสายเคเบิลใต้ดินชนิดร้อยท่อ เป็นงานที่ใช้เวลาการก่อสร้างนานมากและมีผลกระทบต่อหน่วยงานสาธารณูปโภคอื่น ๆ เพราะต้องสร้างบ่อพัก และแนวท่อร้อยสาย ซึ่งอาจทำพร้อมกันกับการสร้างถนน เคเบิลจะถูกร้อยเข้าไปในท่อร้อยสายที่ฝังไว้ใต้พื้นดินอย่างถาวร การตัดต่อและการแยกสายกระที่ในบ่อพัก วิธีการสร้างข่ายสายแบบนี้ดัดแปลงมาจากเคเบิลฝังดิน ค่าใช้จ่ายในการสร้างข่ายสายแบบนี้จะแพงมาก ซึ่งจะสร้างในเมืองที่มีการพัฒนาและการขยายตัวของเมืองอย่างมีระบบ เพื่อรองรับการให้บริการที่เหมาะสมในอนาคต

#### 4.1.4 เคเบิลในราง (Troughing cable)

เคเบิลในราง การสร้างข่ายสายแบบนี้ ส่วนมากจะสร้างในแนวทางเท้า Foot-path โดยทำเป็นรางไปตามทางเท้า แล้ววางเคเบิลไปในราง ซึ่งมีฝาครอบรางที่กลมกลื่นกับทางเท้า การสร้างข่ายสายแบบนี้สะดวกในการเปลี่ยนแปลงและการบำรุงรักษา

#### 4.1.5 เคเบิลใต้น้ำ (Submarine cable)

เคเบิลใต้น้ำ การสร้างข่ายสายแบบนี้หมายถึงการวางเคเบิลใต้น้ำ เช่น ใต้แม่น้ำ ทะเล มหาสมุทร ซึ่งวิธีการวางเคเบิลต้องใช้เทคนิคสูงกว่าการวางเคเบิลธรรมดา เคเบิลที่ใช้ก็ต้องใช้เคเบิลแบบพิเศษ

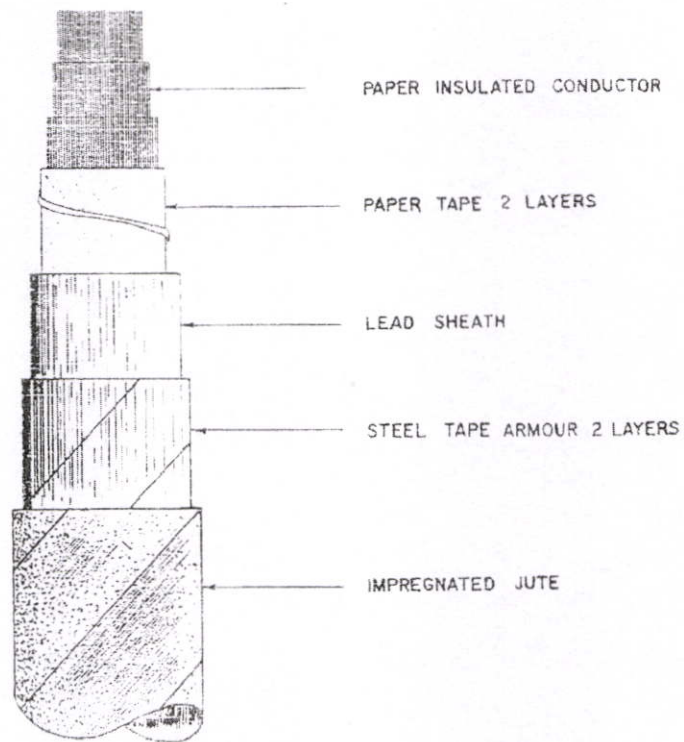
เคเบิลที่ใช้ในกิจการ โทรศัพท์ มีหลายชนิดด้วยกัน แต่ละชนิดนำมาใช้งานในสถานที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเคเบิลที่นำมาใช้งาน เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพสิ่งแวดล้อมในสถานที่นั้น ๆ สามารถแยกได้ตามความต้องการ การใช้งานตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชนิดของเคเบิลส่วนประกอบและสถานที่ใช้งาน [13]

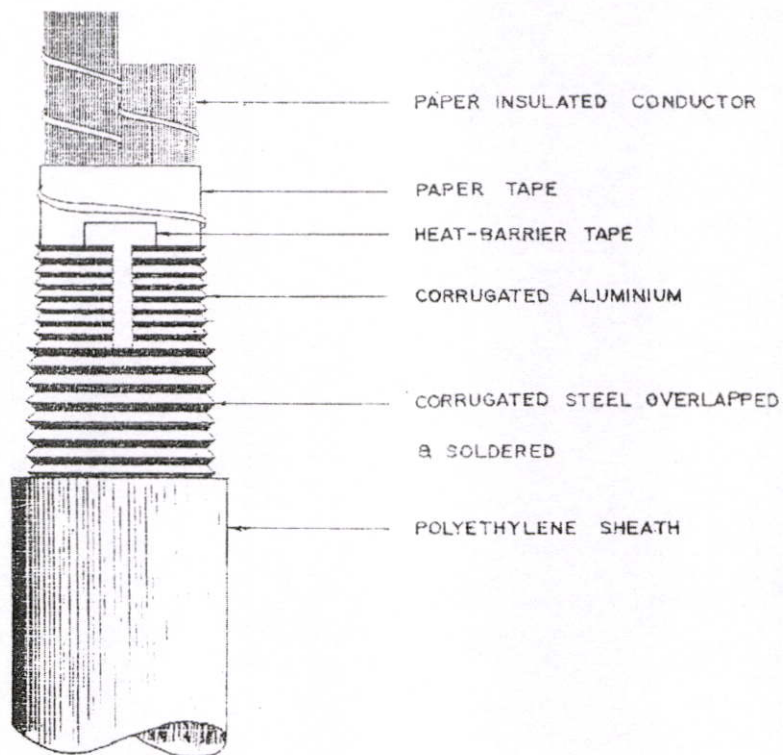
เคเบิล	ส่วนประกอบนับจากในมาหานอก	อักษรย่อ	การใช้งาน
LEAD	LEAD	L	ฝังดิน วางในท่อหรือติดตั้งอาคาร
LEAD SHEATH TAPE ARMOUR	LAED-STEEL TAPE-JUTE	LTJ	ฝังดิน วางในราง
STALPETH	ALUMINIUM-STEEL- POLYETHYLENE	ASP	วางในท่อ ฝังดิน วางในราง
DOUBLE SHEATH- STALPETH	POLYETHYLENE- ALUMINIUM-STEEL- POLYETHYLENE	PASP	ฝังดิน
ALPETH	ALUMINIUM- POLYETHYLENE	A.P.	แขวนอากาศแบบใช้สายสะพาน
ALPETH FIGURE 8	ALUMINIUM- POLYETHYLENE	A.P. (8)	แขวนอากาศแบบมีสายสะพานในตัว
ALPETH DOUBLE SHEATH	POLYETHYLENE- ALUMINIUM- POLYETHYLENE	PAP	ฝังดิน
PVC.	POLYVINYL CHLORIDE	PVC	ใช้ภายในอาคาร

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

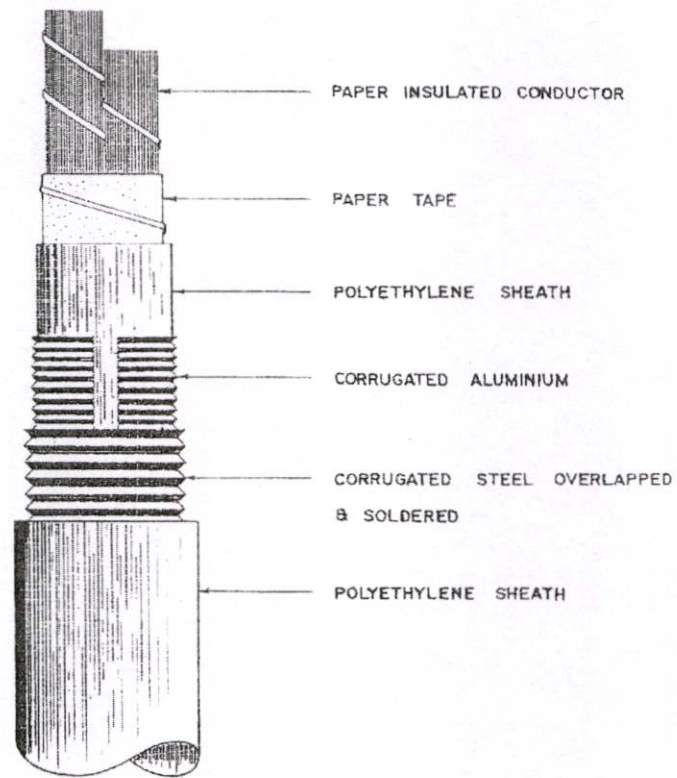
เคเบิล	ส่วนประกอบนับจากในมาหวนอก	อักษรย่อ	การใช้งาน
POLYETHYLENE SHEATH	POLYETHYLENE	P.	แขวนอากาศแบบใช้สาย สะพาน
DOUBLE SHEATH POLYETHYLENE WITH	POLYETHYLENE-STEEL TAPE- POLYETHYLENE	PTP	ฝังดิน
LEAD SHEATH WITH ARMOUR	LEAD-SINGLE OR DOUBLE WIRE ARMOUR	SUB	วางใต้ดิน
FOAM SKIN INSULATION ALPETH SHEATH FILL CABLE	โครงสร้างเช่นเดียวกับ AP และมี COMPOUND	AP-FSF	ในท่อ ในราง
FOAM SKIN INSULATION STALPETH SHEATH FILL CABLE	โครงสร้างเช่นเดียวกับ SAP และมี COMPOUND	ASP-FSF	ฝังดินโดยตรง วางในราง ในท่อ
FOAMED POLYETHYLNE STALPETH CABLE	โครงสร้างเช่นเดียวกับ SAP และมี COMPOUND	PEP-ASP	วางในท่อ ในราง
FOAM SKIN INSULATION ALPETH SHEATH FILL CABLE WITH CORESEPARATOR	โครงสร้างเหมือนกับ AP มี COMPOUND และมี SCREEN แยกเคเบิลออกเป็นสองกลุ่ม	DSAP-FSF	วางในท่อ ในราง



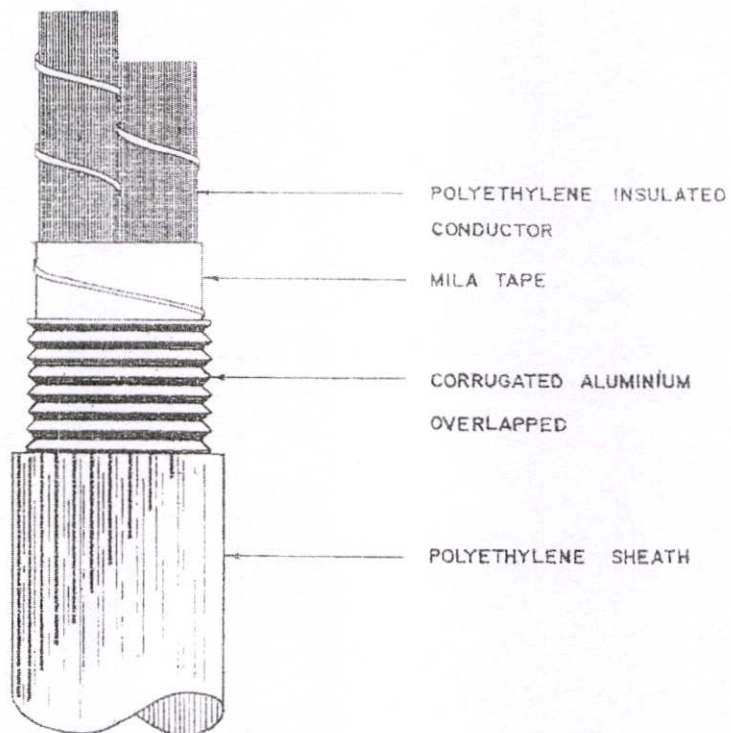
รูปที่ 4.1 เคเบิลชนิดฝังกินหรือวางในราง Tape amour cable (LTJ)



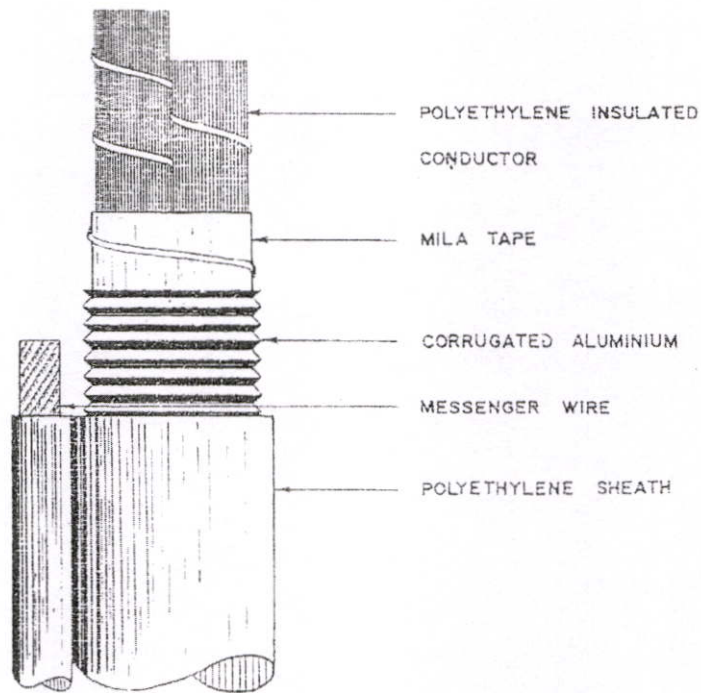
รูปที่ 4.2 เคเบิลชนิดวางในท่อ ฝังกิน หรือวางในราง Stalpeth sheathed cable (ASP)



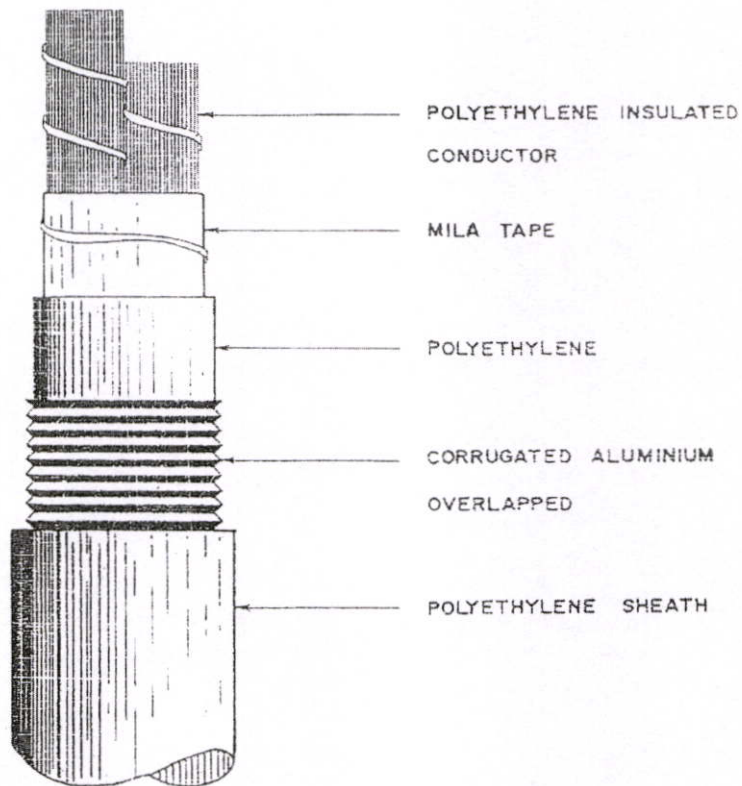
รูปที่ 4.3 เคเบิลชนิดฝังดิน Double sheathed Stalpath cable (PASP)



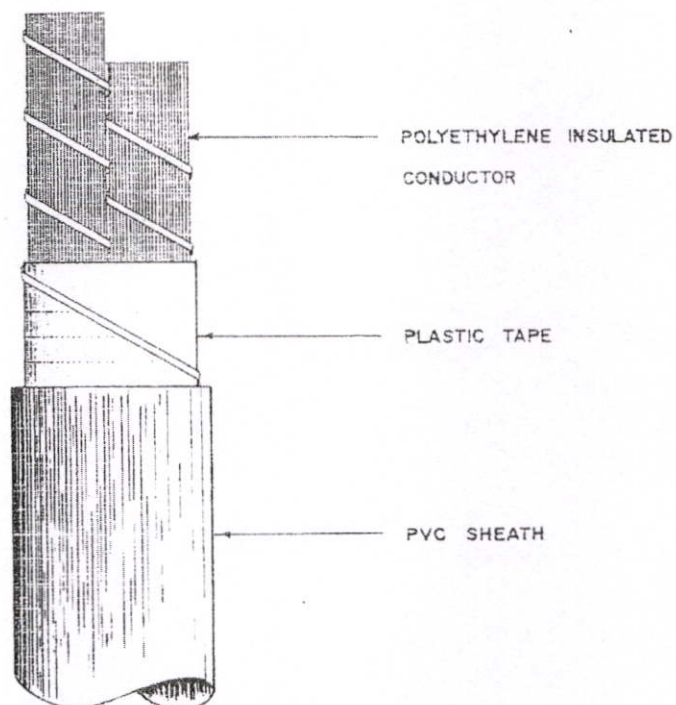
รูปที่ 4.4 เคเบิลชนิดแขวนอากาศแบบใช้สายสะพาน Alpath sheathed cable (PA)



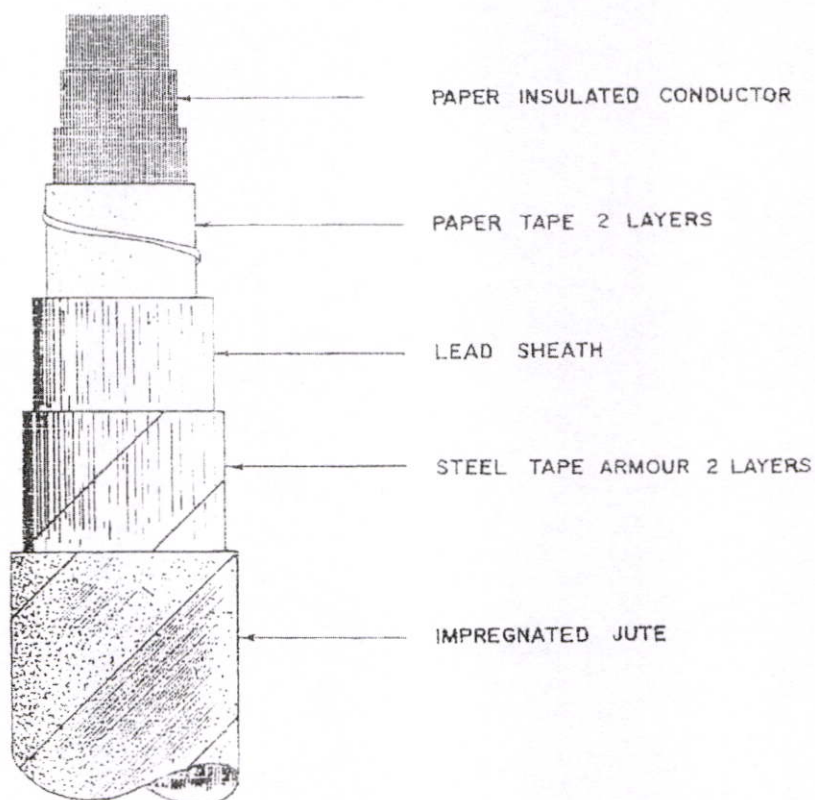
รูปที่ 4.5 เคเบิลชนิดวางในท่อหรือในราง Figure 8 Alpeh sheathed cable AP (8)



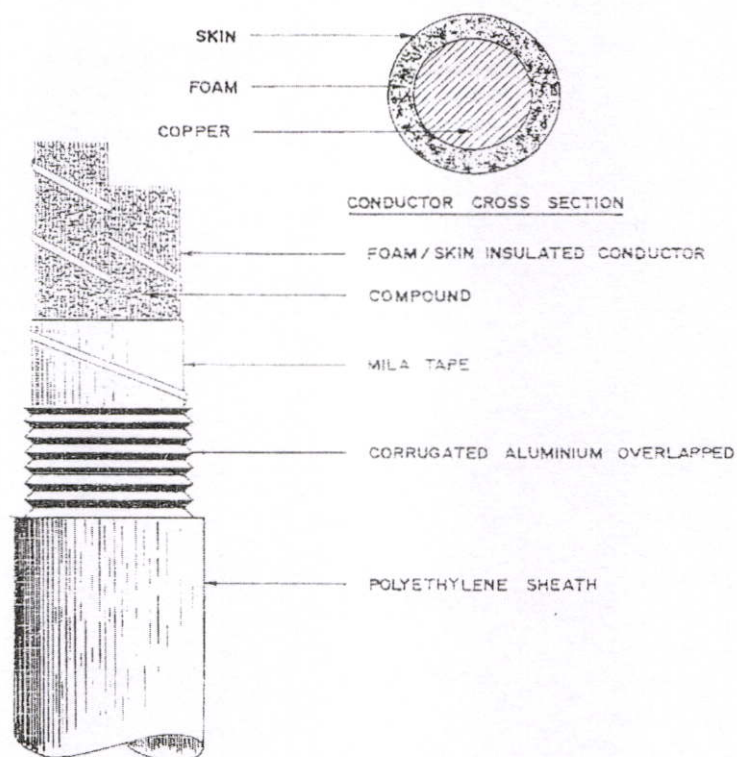
รูปที่ 4.6 เคเบิลชนิดฝังดิน Double sheathed Alpeh cable (PAP)



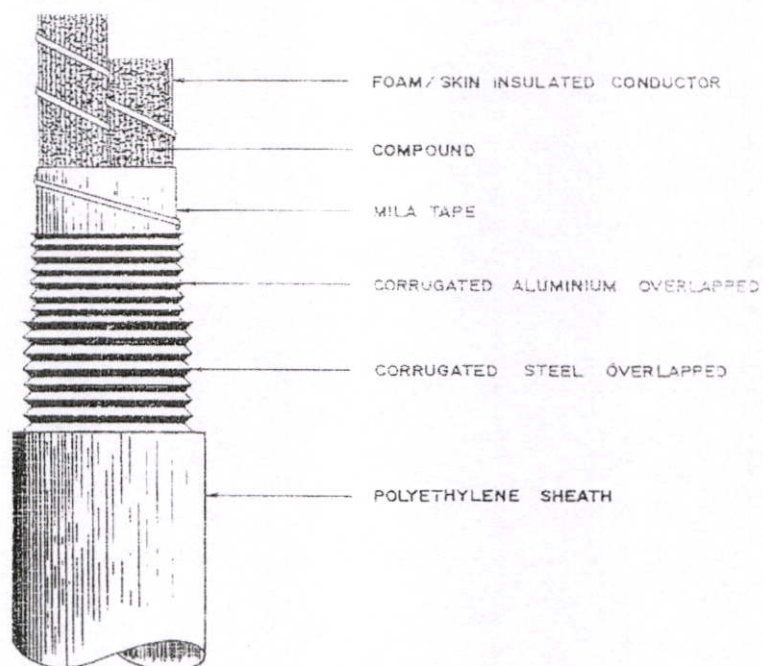
รูปที่ 4.7 เคเบิลชนิดใช้ในอาคาร PVC Cable (PVC)



รูปที่ 4.8 เคเบิลชนิดวางใต้น้ำ Submarine cable (SUB)



รูปที่ 4.9 เคเบิลชนิดวางในท่อหรือในราง Foam / skin insulation AP sheathed filled cable (AP-FSF)



รูปที่ 4.10 เคเบิลชนิดฝังดินโดยตรง วางในท่อ หรือในราง Foam / skin insulation ASP sheathed filled cable (AP-FSF)

ตารางที่ 4.2 มาตรฐานความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง จำนวนคู่สายของเคเบิล AP AP(8) AP FSF  
ชนิดเคเบิลแต่ละชนิด [13]

จำนวนคู่	ความยาวมาตรฐาน (เมตร)				เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)				ที่มา
	0.4	0.5	0.65	0.9	0.4	0.5	0.65	0.9	
สายอากาศ									
25-AP	1000	1000	1000	1000	11.7	13.5	15.5	21.8	ทศท.
50-AP	1000	1000	1000	500	14.2	16.8	19.6	27.9	"
100-AP	1000	1000	500	500	18	21.8	27.9	38.1	"
200-AP	500	500	500	500	23.6	30.5	35.6	53.3	"
300-AP	500	500	350	250	27.9	35.6	45.7	63.5	"
400-AP	500	500	250	250	33	40.6	50.8	71.1	"
600-AP	500	350	200	-	40.6	48.3	58.4	-	"
900-AP	350	350	-	-	48.3	48.4	-	-	"
25-AP(8)	1000	1000	1000	1000					
50-AP(8)	1000	1000	1000	1000					
100-AP(8)	1000	1000	1000	500					
200-AP(8)	500	500	500	250					
AP-FSF									
25	1000	1000	1000	1000	12.0	13.7	15.9	20.5	PHEIPS
50	1000	1000	1000	1000	14.7	17.1	20.4	27.6	DODGE
100	1000	1000	1000	750	18.6	22.9	27.4	37.5	"
200	1000	750	750	350	24.9	30.2	37.4	51.3	"
300	1000	750	750	350	29.8	36.2	45.4	61.4	"
400	1000	350	350	350	33.3	40.7	51.0	70.2	"
600	500	350	350	350	39.7	49.5	61.1	83.9	"
900	350	350	350	-	48.3	59.1	73.4	-	"
1200	350	350	350	-	54.8	67.4	83.4	-	"
1500	350	350	-	-	60.3	74.4	-	-	"
1800	350	350	-	-	65.8	80.6	-	-	"
2100	250	350	-	-	70.3	86.3	-	-	"
2400	250	-	-	-	74.5	-	-	-	"
2700	250	-	-	-	78.5	-	-	-	"
3000	200	-	-	-	82.2	-	-	-	"

## 4.2 ข่ายสายโทรศัพท์

ระบบข่ายทางสายโทรศัพท์ เป็นระบบที่มีการลงทุนสูงมาก เพราะฉะนั้นการวางแผนระยะยาวเกี่ยวกับข่ายทางสายโทรศัพท์ เพื่อให้พอเพียงกับความต้องการของผู้ใช้บริการเป็นสิ่งสำคัญ ข่ายสายโทรศัพท์ประกอบด้วย

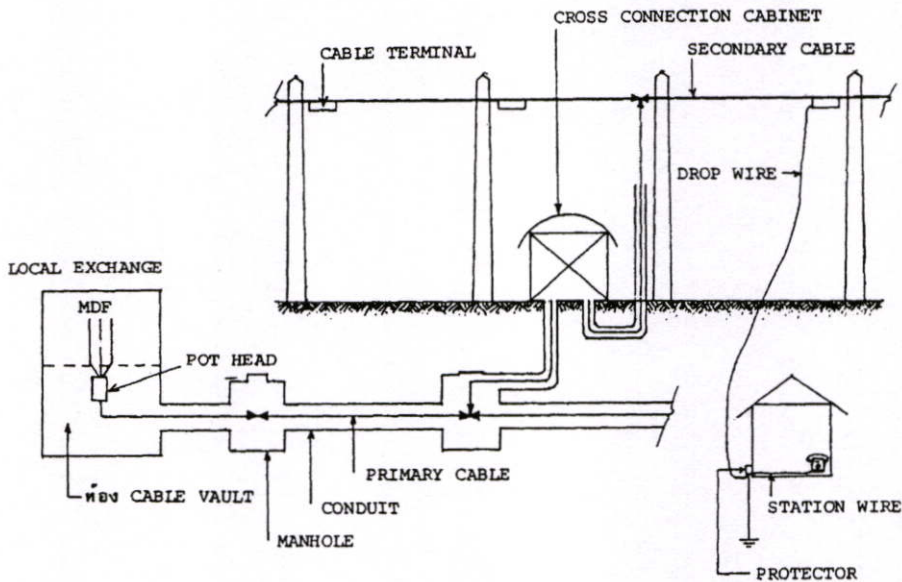
ข่ายสายท้องถิ่น Subscriber line network or local line network เป็นข่ายสายที่เชื่อมระหว่างเครื่องโทรศัพท์ที่เป็นบ้านพักอาศัยและอาคารสำนักงานกับชุมสายท้องถิ่น (Local exchange)

ข่ายสายที่เชื่อมระหว่างชุมสายกับชุมสาย Junction line network

### 4.2.1 ข่ายสายท้องถิ่น แบ่งออกเป็น 2 ระบบ

#### 4.2.1.1 ระบบยุโรป (European system)

ระบบข่ายสายที่มีตู้ผ่าน (Cross connection cabinet) ตู้ผ่านหรือตู้คอดินเป็นจุดเชื่อมระหว่างเคเบิลต้นทาง (Primary cable) และเคเบิลปลายทาง (Secondary cable) โดยใช้สายโยง (Jumper wire) เชื่อมระหว่างเคเบิลต้นทางและเคเบิลปลายทาง เพื่อให้สัญญาณโทรศัพท์ที่ส่งจากชุมสายท้องถิ่นถึงผู้ใช้บริการปลายทาง การเชื่อมโยงระหว่างเคเบิลทั้งสองในตู้คอดิน นี้ทำให้เกิดจุดยึดหยุ่นขึ้นในตู้คอดิน เนื่องจากอัตราส่วนคู่สายเคเบิลต้นทางน้อยกว่าเคเบิลปลายทาง



รูปที่ 4.11 ระบบข่ายสายแบบยุโรป

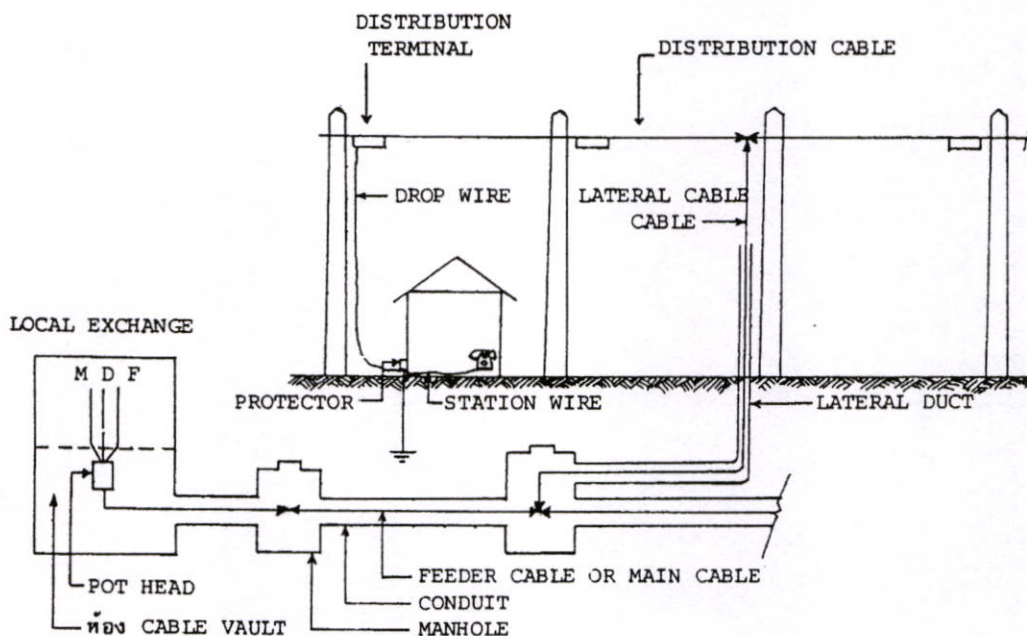
ชุมสายท้องถิ่น ขนาดใหญ่สามารถรองรับคู่สายโทรศัพท์ได้มากกว่า 100,000 คู่สาย จุดเชื่อมต่อจุดแรกของคู่สายเคเบิลทั้งหมดอยู่ที่ Main Distribution Frame (MDF) สายเคเบิลจากชุมสายทั้งหมดจะถูกเชื่อมโยงไปยังพื้นที่ให้บริการดังแสดงในรูปที่ 4.10 สายเคเบิลที่เชื่อมต่อจาก MDF ไปยังผู้ใช้บริการมีขนาดตั้งแต่ 1,200 – 3,000 คู่สาย

สายเคเบิลโทรศัพท์ประกอบด้วยคู่สายตีเกลียวเข้าด้วยกัน 2 เส้นเป็น 1 คู่สาย แล้วรวม 25 คู่สาย มัดรวมเข้าด้วยกันเรียกไบนเดอร์ และเมื่อรวมหลายไบนเดอร์เข้าด้วยกันเป็นสายเคเบิลขนาดใหญ่มีขนาดตั้งแต่ 25 – 3,000 คู่สาย ลักษณะการมัดคู่สายรวมเข้าด้วยกันมีข้อเสียคือทำให้เกิดสัญญาณไขว้แทรกกระหว่างคู่สายข้างเคียงที่อยู่ติดกัน

จากรูปที่ 4.10 สายเคเบิลเชื่อมต่อจาก MDF ด้วยสายเคเบิล PVC ต่อกับสายเคเบิลภายนอกที่ (Pot head) ในห้องใต้ดิน (Cable vault) ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นถนน สายเคเบิลที่ต่อออกจาก MDF เรียกว่าเคเบิลต้นทาง ถูกร้อยผ่านท่อร้อยสายไปยังบ่อพักใต้ดิน (Manhole) เพื่อทำการคัดต่อคู่สาย และแยกคู่สายเคเบิลส่งไปยังตู้ผ่านหรือตู้คอยดินเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างเคเบิลต้นทาง และเคเบิลปลายทาง จากตู้ผ่านจะสายเคเบิลปลายทางผ่านที่ร้อยสายแขวนขึ้นเสา ต่อไปยังตู้พักปลายทาง (Cable terminal) หรือ Distribution point (DP) เพื่อเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างสายเคเบิลกับสายกระจาย (Drop wire) ส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้บริการ ข่ายสายโทรศัพท์ปัจจุบันสายเคเบิลจาก MDF ถึงตู้พักปลายทางที่ไกลที่สุด มีความต้านทานของคู่สายทองแดงไม่เกิน 1,500 โอห์ม ถ้าเป็นข่ายสายโทรศัพท์ในนครหลวงใช้สายเคเบิลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายทองแดง 0.4 มิลลิเมตร ดังนั้นข่ายสายโทรศัพท์ในนครหลวงจึงมีระยะทางไม่เกิน 5 กิโลเมตร แต่ข่ายสายโทรศัพท์ในภูมิภาคอาจยาวมากกว่าเพราะใช้สายเคเบิลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายทองแดงตั้งแต่ 0.4 – 0.9 มิลลิเมตร ต่อถึงกันตั้งแต่ MDF ถึงตู้พักปลายทางที่ไกลที่สุด

#### 4.2.1.2 ระบบอเมริกัน (American system or direct feed)

เป็นระบบข่ายสายซึ่งมีส่วนคล้ายกับระบบยุโรป แต่ในระบบนี้ไม่มีตู้ผ่าน เป็นระบบที่จ่ายสายจาก MDF ไปยังตู้พักปลายทางโดยตรง โดยใช้หลักการ Multiple คู่สาย คือการทำให้คู่สายปรากฏซ้ำกันตามจุดต่าง ๆ เช่น มีคู่สายของตู้พักปลายทางตู้ที่ #001 มีคู่สายเหมือนกับตู้พักปลายทางตู้ที่ #002 ซึ่งสามารถเลือกใช้คู่สายเดียวกันได้ทั้งตู้พักปลายทางตู้ที่ #001 หรือตู้พักปลายทางตู้ที่ #002 ได้ เป็นตัวยืดหยุ่นข่ายสาย



รูปที่ 4.12 ระบบข่ายสายแบบอเมริกัน

#### 4.2.2 การหาที่ตั้งชุมสาย (Wire center)

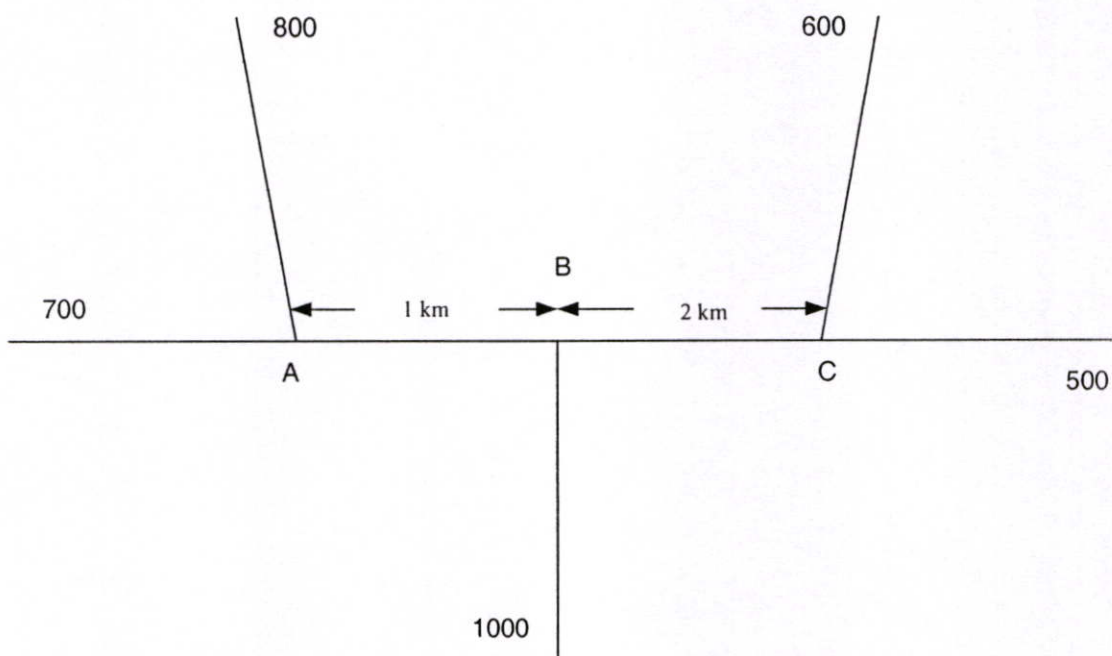
การหาจุดศูนย์กลางที่ตั้งชุมสาย ปกติแล้วไม่อาจหาจุดศูนย์กลางได้โดยตรง ต้องใช้วิธีหาเองจำนวนที่ตั้งใกล้เคียงหลาย ๆ จุดมาเปรียบเทียบ ในการหาที่ตั้งชุมสายควรใช้ตัวเลขปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการโทรศัพท์ ปีที่ 10 ในบางกรณีจะพบว่าถ้าคำนึงถึงผู้ให้บริการปัจจุบันหรือคำนึงถึงผู้ให้บริการในภายหน้า อาจให้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน ในกรณีเช่นนี้ต้องพิจารณาเอาผลลัพธ์อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยคำนึงถึงการคาดคะเนในอนาคตไม่แน่นอน

##### 4.2.2.1 การหาที่ตั้งชุมสายแบบค่า Pair-km center

วิธีหาที่ตั้งชุมสายโดยใช้ระบบที่เรียกว่า Pair-km center โดยใช้แผนผังที่หาปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการ ไว้แล้ว ทางสายที่คาดว่าจะป็นสายหลักแล้วใส่ปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการ รวมแต่ละจุดจะได้แนวทางสายมาพบกันที่จุดต่าง ๆ หลาย ๆ จุด จุดเหล่านี้ อาจเป็นที่ตั้งชุมสายได้ทั้งนั้น โดยการคำนวณหาค่า Pair-km ของทุก ๆ จุด จุดที่ให้ค่า Pair-km ของทางสายต่ำสุดจะเป็นจุดที่ตั้งชุมสาย

##### 4.2.2.1.1 การหาค่า Pair-km center ใช้วิธีแบ่งเป็นช่วง

การหาค่า Pair-km center ใช้วิธีแบ่งเป็นช่วงโดยการสมมติให้ทุก ๆ จุดที่เคเบิลมาพบกันเป็นจุดที่ตั้งชุมสาย โดยคำนวณค่า Pair-km center ที่จุดเหล่านั้น วิธีการคำนวณให้ใช้ ปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการ ปลายของช่วงปลายทาง คูณด้วยระยะทางในแต่ละช่วง



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างการคำนวณหาที่ตั้งชุมสายโดยใช้วิธีแบ่งเป็นช่วง

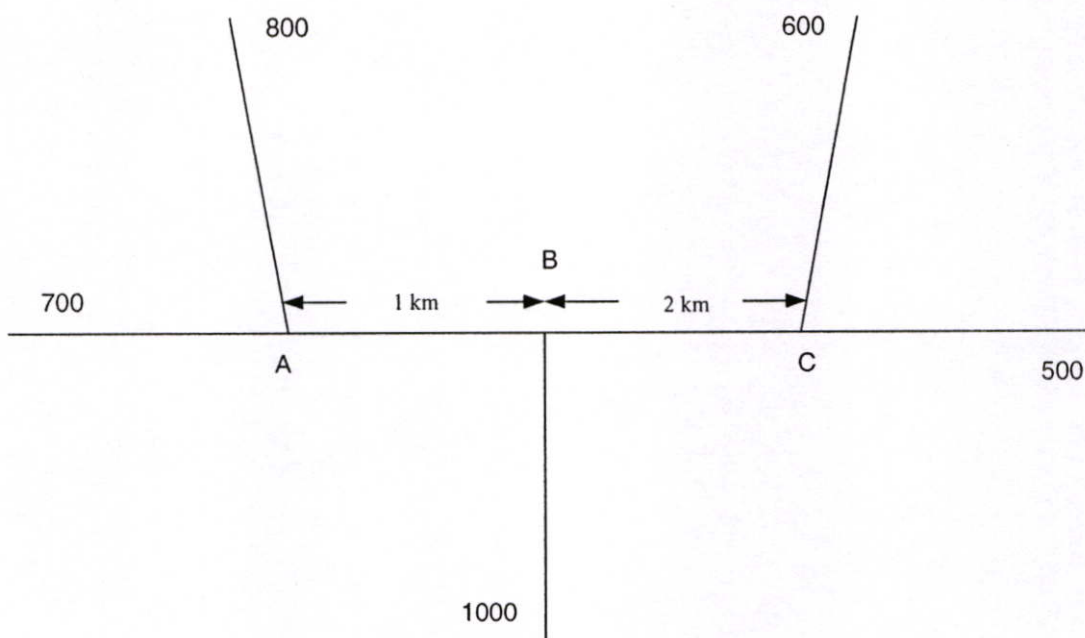
ตารางที่ 4.3 การคำนวณหาที่ตั้งชุมสายโดยใช้วิธีแบ่งเป็นช่วง

SECTION	ค่า Pair-km Center		
	A	B	C
AB	$(1000+600+500) \times 1 = 2100$	$(700+800) \times 1 = 1500$	$(700+800) \times 1 = 1500$
BC	$(600+500) \times 2 = 2200$	$(600+500) \times 2 = 2200$	$(700+800+1000) \times 2 = 5000$
TOTAL	4300	3700	6500

จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าที่ตั้งชุมสายจุด B ให้ค่า Pair-km center น้อยที่สุด เพราะฉะนั้นจุด B เป็นจุดที่ตั้งชุมสาย

#### 4.2.2.1.2 การหาค่า Pair-km center ใช้วิธีแบบจุดต่อจุด

การหาค่า Pair-km center ใช้วิธีแบบจุดต่อจุด โดยสมมติให้ทุก ๆ จุดที่เคเบิลมาพบกันเป็นที่ตั้งชุมสาย โดยคำนวณค่า Pair-km center ที่จุดเหล่านั้น วิธีการคำนวณให้ใช้ปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการ ปลายจุดนั้นคูณด้วยระยะทาง จากจุดนั้นถึงที่ตั้งชุมสาย



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างการคำนวณหาที่ตั้งชุมสายโดยใช้วิธีแบบเป็นจุดต่อจุด

ตารางที่ 4.4 การคำนวณหาที่ตั้งชุมสายโดยใช้วิธีเป็นจุดต่อจุด

จุดที่ตั้งชุมสาย	ค่า Pair-km Center จากจุด		TOTAL
	B	C	
A	$1000 \times 1 = 1000$	$(600+500) \times 3 = 3300$	4300
B	$(700+800) \times 1 = 1500$	$(600+500) \times 2 = 2200$	3700
C	$(700+800) \times 3 = 4500$	$(1000 \times 2 = 2000$	6500

จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าที่ตั้งชุมสายจุด B ให้ค่า Pair-km center น้อยที่สุด เพราะฉะนั้นจุด B เป็นจุดที่ตั้งชุมสาย

#### 4.2.3 วิธีกรวางแผนข่ายสายทองถิ่น

##### ข้อพิจารณาในการวางแผนข่ายทางสาย

- สถานที่ตั้งชุมสาย
- ชนิด ขนาด สถานที่ตั้งของผู้พักปลายทางผู้พักปลายทางมีขนาด 10 15 25 50 คู่สาย และระยะทางสายกระจาย จากผู้พักปลายทางถึงผู้ใช้บริการควรมีระยะทางสายที่สั้นเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน และสะดวกในการบำรุงรักษา

- จำนวนเคเบิลที่แขวนกับเสาและขนาดของเคเบิล (เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 48.2 mm) ตามข้อตกลงของการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เนื่องจากสายเคเบิลโทรศัพท์ส่วนใหญ่แขวนบนเสาไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- ความจำเป็นที่จะติดตั้งรางแขวนเพื่อรองรับการติดตั้งสายเคเบิลเพิ่มขึ้นในอนาคต
- ขนาดของสายสะพาน และการพันควบสายเคเบิลแขวนอากาศกับสายสะพาน
- สถานที่ติดตั้งท่อเหล็กที่ติดตั้งกับเสาโทรศัพท์เพื่อรองรับสายใต้ดิน แขนงขึ้นเสา RISER
- สถานที่ติดตั้งเหล็กดิน (Ground rod)
- สถานที่ตั้งตู้กอดิน และขนาดของตู้กอดิน มีขนาด 900 และ 1,800 คู่สาย
- สถานที่ปักเสา ขนาดของเสา และความสูงของเคเบิลที่สาระยะห่างระหว่างเคเบิลและสายไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้า(kV) ระยะห่างสายเคเบิลโทรศัพท์กับสายไฟฟ้า (เมตร)

<1	1.20
11,22,33	1.80
69	2.10
115	2.60
230	4.10

- ศึกษาแผนที่ของบริเวณชุมสาย และทำการออกสำรวจปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการ
- ทำการรวมผู้ใช้บริการเพื่อกำหนดขนาดของตู้พักปลายทาง โดยแยกผู้ใช้บริการออกเป็นระยะเวลาคร้อยละของความต้องการ 5 ปี 10 ปี
- รวมความต้องการของผู้ใช้บริการแต่ละตู้พักปลายทางเพื่อจะได้ขนาดของ โดยคิดผู้เช่า ปีที่ 10 (การรวมความต้องการให้รวมจากปลายทางเข้ามาต้นทาง)
- ทำการแบ่งผู้ใช้บริการออกเป็นช่องแต่ละพื้นที่ Block area (ประมาณ 300-600 เลขหมาย) เพื่อจะได้ขนาดของเคเบิลต้นทาง โดยคิดผู้ใช้บริการปีที่ 5 และปีที่ 10
- จัดทำแนวทางสายเคเบิลปลายทาง และ เคเบิลต้นทาง การกำหนดคู่สายของตู้พักปลายทาง และกำหนดคู่สายเคเบิล โดยให้คู่สายที่มีคู่สาย (Count) ต่ำสุด อยู่ไกลที่สุดจากชุมสาย และทำการกำหนดขนาดของเคเบิลและกำหนดเลขหมายตู้ พักปลายทาง ตู้กอดิน รวมทั้งเคเบิล
- กำหนดค่าความต้านทานของทางสายไม่เกิน 1500 โอห์ม และค่าสูญเสียของทางสายไม่ควรเกิน 7 dB ที่ความถี่ 1 kHz
- กำหนดระยะทางของการลงกราวด์ ประมาณ 200 – 250 เมตร และค่าความต้านทานไม่ควรเกิน 10 โอห์ม

### ข้อห้ามและข้อควรปฏิบัติในการวางแผนข่ายทางสาย

- ห้ามลง กราวด์ ร่วมกับ กราวด์ ของไฟฟ้า เพื่อป้องกันกรณีเกิดฟ้าผ่า และ ไฟฟ้าลัดวงจรลงดิน
- ถ้ามีการลง กราวด์ ที่เสาไฟฟ้าควรปัก เหล็กดิน ห่างจากเสาไฟฟ้าอย่างน้อย 3 เมตร
- ถ้าระยะห่างของเสาไฟฟ้า 50 เมตรในนครหลวง และ 60-70 เมตรในภูมิภาค การแขวนสายเคเบิลโทรศัพท์ต้องปักเสา 8 เมตร แซมช่วงระหว่างกลางเสาคู่ นั้น เพื่อป้องกันสายหย่อน
- ห้ามแขวนสายเคเบิลโทรศัพท์เสาดันที่มีหม้อแปลงไฟฟ้า
- สามารถวิ่งเข้าออกได้ ให้ใช้เสาขนาด 10 เมตร เพื่อให้ระดับความสูงของสายเคเบิลจากผิวจราจรตามข้อกำหนด คือ 5.70 เมตร
- ห้ามสร้างท่อเหล็กขึ้นเสา (Cable Riser) ที่เสาไฟฟ้าทุกขนาด ให้ทำที่เสาองค์การโทรศัพท์ ถ้าจำเป็นต้องปักเสาใหม่ ควรปักเสาสร้างท่อเหล็กขึ้นเสา ห่างจากเสาไฟฟ้าอย่างน้อย 3 เมตร และให้อยู่แนวเดียวกับเสาไฟฟ้า
- ตู้ผ่านกับจุดที่สร้างท่อเหล็กขึ้นเสา ควรห่างกันประมาณอย่างน้อย 2 เมตร แต่ต้องไม่เกิน 10 เมตร เพื่อความสะดวกในการสร้างเคเบิลปลายทาง
- ในกรณีทางเท้า ควรตั้งตู้ผ่านห่างจากขอบทางเท้าประมาณ 0.5-1 เมตร และให้ความกว้างของตู้ขนานกับถนน
- ไม่ควรกำหนดจุดตัดต่อเคเบิลให้อยู่กลางสี่แยกหรืออยู่กลางถนน เพราะจะเกิดอันตรายในการสร้างข่ายสาย และบำรุงรักษา

#### 4.2.4 การยืดหยุ่นข่ายสาย (Flexibility)

การยืดหยุ่นข่ายสาย หมายถึงการออกแบบข่ายสายที่จะบริการให้แก่ผู้ใช้บริการได้ทั่วถึงทุกสถานที่ โดยเสียค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงข่ายสายน้อยที่สุด

วิธีการออกแบบข่ายสายให้มีการยืดหยุ่นโดยใช้ระบบยุโรป ใช้ตู้ผ่านเป็นจุดยืดหยุ่นข่ายสาย ระบบนี้เป็นระบบที่มีการยืดหยุ่นตัวสูง เพียงแค่สับเปลี่ยนสายโยงในตู้ผ่านเท่านั้น ก็สามารถแจกจ่ายคู่สายไปให้แก่ผู้ใช้บริการที่อยู่ต่างบริเวณได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากอัตราส่วนของสายเคเบิลต้นทาง กับ สายเคเบิลปลายทาง ไม่เท่ากัน และการใช้ตู้พักปลายทางแบบเปิดตู้ตัดต่อเคเบิลได้ (Ready access) เป็นจุดยืดหยุ่นข่ายสาย เนื่องจากจะใช้คู่สายคู่หนึ่งคู่ใดก็ได้ในเคเบิลเส้นนั้น ซึ่งอาจมีให้เลือกใช้หลายคู่สาย

การวางสายเคเบิลต้นทาง ไม่เท่ากับ เคเบิลปลายทาง เคเบิลต้นทางมีจำนวนคู่สายน้อยกว่าเคเบิลปลายทาง ซึ่งเป็นที่นิยมทำกันมากในปัจจุบันนี้ ซึ่งในการทำลักษณะนี้ทำให้เกิดจุดยืดหยุ่นในข่ายสายและสามารถใช้สายต้นทาง ได้เต็มที่ อัตราส่วนสายต้นทางกับสายปลายทางขึ้นอยู่กับอัตราการ

ขยายตัวและสภาพของจำนวนผู้ใช้บริการในการกำหนดเคเบิลต้นทาง ส่วนใหญ่จะกำหนดจากข้อมูลของผู้ใช้บริการปีที่ 5 และสายปลายทางกำหนดจากข้อมูลของผู้ใช้บริการปีที่ 10

ในการพิจารณาการใช้ตู้ผ่านควรพิจารณาเพื่อการขยายในอนาคต ฉะนั้นขนาดตู้ผ่านที่ตั้งครั้งแรกควรมีขนาดโตพอที่จะวางสายเพิ่มในอนาคตได้ มิฉะนั้นอาจจะต้องเปลี่ยนขนาดตู้ผ่านในภายหลังซึ่งเสียค่าใช้จ่ายสูง โดยทั่วไปการวางเคเบิลเข้าตู้ผ่านควรจะวางไว้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของขนาดของตู้ผ่าน คือจำนวนคู่สายเคเบิลต้นทางและเคเบิลปลายทางรวมกันแล้วประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของตู้ผ่าน และอัตราส่วนเคเบิลต้นทาง (Primary) กับเคเบิลปลายทาง (Secondary) ควรอยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่น 1: 1.5

#### 4.2.5 รหัสสีของเคเบิลชนิดคู่สายตีเกลียว (Colors code)

มาตรฐานรหัสสีของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำคู่สายเคเบิลโทรศัพท์ที่ใช้ในปัจจุบันของ บมจ.ทีโอที ตามตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน Electronic Industries Association (EIA Standard RS-359) และ American National Standard Institute (ANSI C 83.1)

ตารางที่ 4.5 รหัสสีของฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำคู่สายเคเบิล และการนับคู่สายที่ 1-25 [13]

คู่สายที่	สี		คู่สายที่	สี	
	Tip(A)	Ring(B)		Tip(A)	Ring(B)
1	ขาว	น้ำเงิน	16	เหลือง	น้ำเงิน
2	ขาว	ส้ม	17	เหลือง	ส้ม
3	ขาว	เขียว	18	เหลือง	เขียว
4	ขาว	น้ำตาล	19	เหลือง	น้ำตาล
5	ขาว	เทา	20	เหลือง	เทา
6	แดง	น้ำเงิน	21	ม่วง	น้ำเงิน
7	แดง	ส้ม	22	ม่วง	ส้ม
8	แดง	เขียว	23	ม่วง	เขียว
9	แดง	น้ำตาล	24	ม่วง	น้ำตาล
10	แดง	เทา	25	ม่วง	เทา
11	ดำ	น้ำเงิน			
12	ดำ	ส้ม			
13	ดำ	เขียว			
14	ดำ	น้ำตาล			
15	ดำ	เทา			

วิธีการนับคู่สายเคเบิล นับโดยจับคู่แม่สี (Tip) กับลูกสี (Ring) คือ แม่สี 1 สี จับคู่กับลูกสีจำนวน 5 สี รวมเป็น 5 คู่สาย จากตารางที่ 4.3 มีแม่สีจำนวน 5 สี จับคู่กับลูกสีจำนวน 5 สี รวมเป็น 25 คู่สาย เรียกว่า 1 ไบนเดอร์ (binder) และเมื่อรวมคู่สาย 24 ไบนเดอร์เข้าด้วยกันจะได้คู่สายทั้งหมดเท่ากับ 600 คู่สาย เรียกว่า ซุปเปอร์ยูนิต (Super unit) หรือ ซุปเปอร์ไบนเดอร์ (Super binder) ตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การนับคู่สายเคเบิลจำนวน 600 คู่สาย เท่ากับ 1 ชุปเปอร์ ไบนเคอร์ [13]

ไบนเคอร์ที่	รหัสสีของแต่ละไบนเคอร์	จำนวนนับของคู่สาย
1	ขาว - น้ำเงิน	1 - 25
2	ขาว - ส้ม	26 - 50
3	ขาว - เขียว	51 - 75
4	ขาว - น้ำตาล	76 - 100
5	ขาว - เทา	101 - 125
6	แดง - น้ำเงิน	126 - 150
7	แดง - ส้ม	151 - 175
8	แดง - เขียว	176 - 200
9	แดง - น้ำตาล	201 - 225
10	แดง - เทา	226 - 250
11	ดำ - น้ำเงิน	251 - 275
12	ดำ - ส้ม	276 - 300
13	ดำ - เขียว	301 - 325
14	ดำ - น้ำตาล	326 - 350
15	ดำ - เทา	351 - 375
16	เหลือง - น้ำเงิน	376 - 400
17	เหลือง - ส้ม	401 - 425
18	เหลือง - เขียว	426 - 450
19	เหลือง - น้ำตาล	451 - 475
20	เหลือง - เทา	476 - 500
21	ม่วง - น้ำเงิน	501 - 525
22	ม่วง - ส้ม	526 - 550
23	ม่วง - เขียว	551 - 575
24	ม่วง - น้ำตาล	576 - 600

เมื่อนับคู่สายได้ถึง 600 คู่สาย โดยรวม 24 ไบนเคอร์ เข้าด้วยกันเป็น 1 ชุปเปอร์ไบนเคอร์ จากนั้นรวม 5 ชุปเปอร์ ไบนเคอร์ เข้าด้วยกันจะเท่ากับ 3,000 คู่สาย ตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การนับคู่สาย จำนวน 3,000 คู่สาย [13]

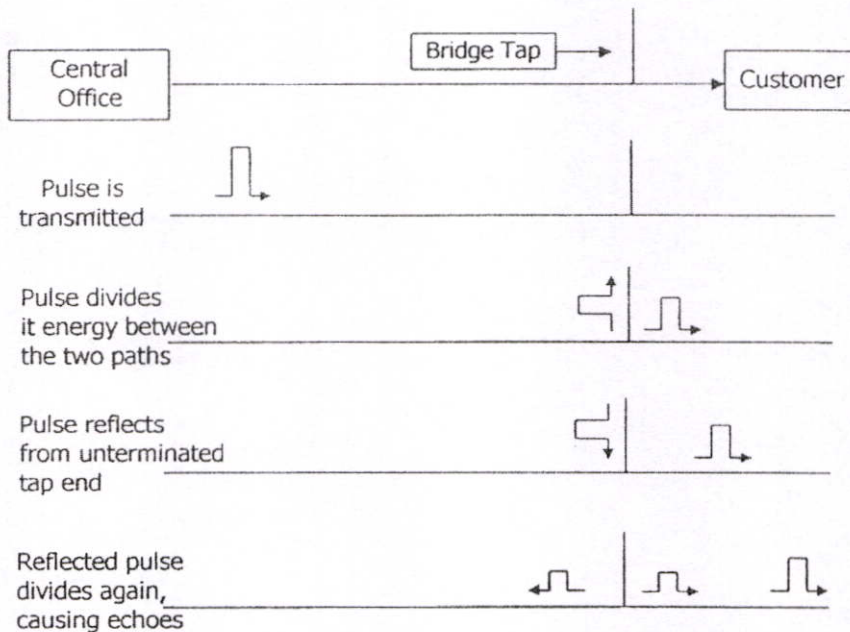
ซูเปอร์ ไบเคอร์ ที่	รหัสสีของแต่ละซูเปอร์ ไบเคอร์	จำนวนนับของคู่สาย
1	ขาว	1 - 600
2	แดง	601 - 1,200
3	ดำ	1,201 - 1,800
4	เหลือง	1,801 - 2,400
5	ม่วง	2,401 - 3,000

สายเคเบิลโทรศัพท์ที่ใช้ให้บริการในปัจจุบันมีขนาดตั้งแต่ 25 – 3,000 คู่สาย โดยขนาดของสายเคเบิลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นอยู่กับชนิดของเคเบิลแต่ละประเภท มีหลายระเอียดตามตารางที่ 4.2

### 4.3 อุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ (Bridged Tap)

การใช้งานในบางประเทศ จะมีเคเบิลเชื่อมต่อกันระหว่างสาขาเรียกว่า bridge tap อุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์นั้น เป็นการเชื่อมต่อคู่สายที่ปลายด้านหนึ่งของลูปและไม่สิ้นสุดที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในประเทศอเมริกานั้นประมาณ 80% ใช้อุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ บางเส้นทางมีอุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์หลาย ๆ จุดในลูป อุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์อาจต่ออยู่บริเวณปลายทางหรือที่จุดกึ่งกลางของเส้นทาง เหตุผลนี้ทำให้อุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ถูกนำมาใช้งานเพื่อสำรองคู่สายให้กับลูกค้าได้ตลอดเส้นทางที่เคเบิลผ่าน แต่ประเทศในยุโรปส่วนใหญ่ไม่นิยมใช้อุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ ผลกระทบที่มีสัญญาณจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ในจุดที่ไม่ใช่ปลายทางนั้นเป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณและเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ใน DSL หลาย ๆ ชนิดจึงมีอีควอไลซ์เซอร์แบบปรับตัว (Adaptive equalizer) และการขจัดเสียงสะท้อน (Echo canceler) เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากอุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ การสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์จะมีค่าสูง เมื่อเกิดการสะท้อนจากอุปกรณ์ต่อแยก หนึ่งในสี่ส่วนของความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณความถี่เป็นเหตุให้การสูญเสียเพิ่มขึ้น 3-6 dB การสะท้อนของความยาวคลื่นจะต่างเฟสกับความถี่ของสัญญาณเดิม 180 องศา และสัญญาณบางส่วนจะถูกขจัดไป

DSL ใช้ได้กับอุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์หลาย ๆ ตัว และรวมสัญญาณที่สูญเสียเนื่องจากระยะทางและสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ไว้ในการสูญเสียของระบบ ผลกระทบของอุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์จะเห็นได้ชัดเจนที่ความถี่หลาย ๆ ค่า

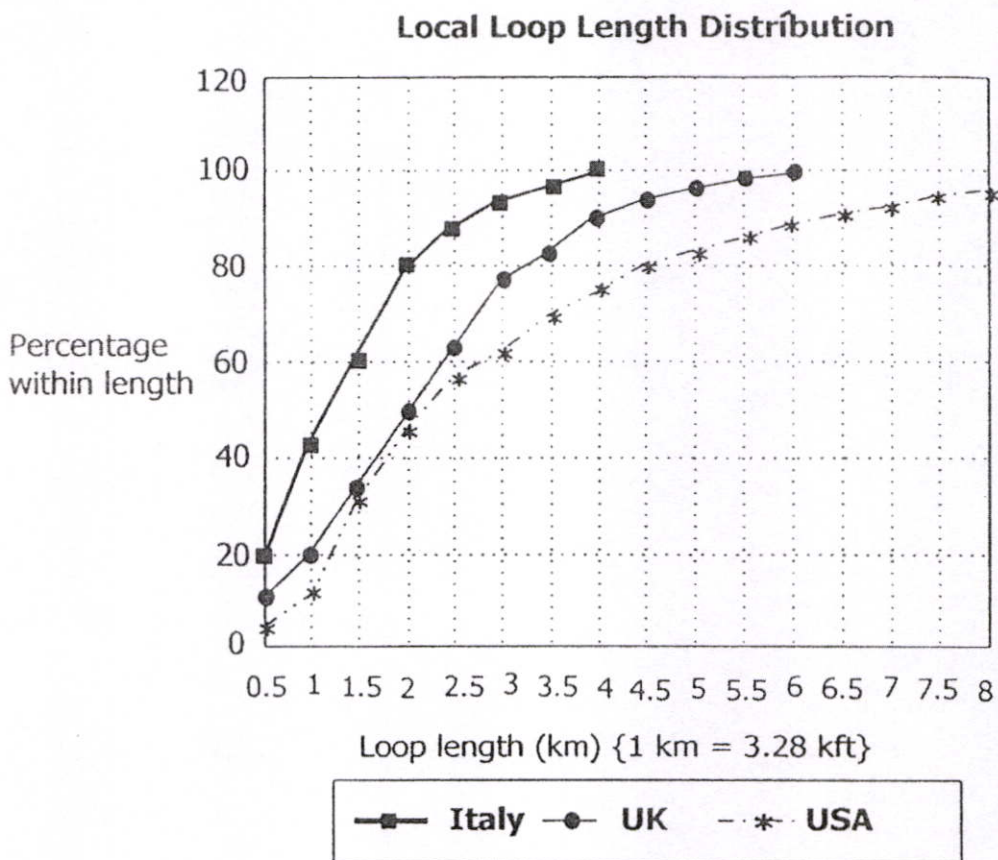


รูปที่ 4.15 ผลกระทบของอุปกรณ์ต่อแยกแบบบริดจ์ที่มีต่อการแพร่กระจายพัลส์

#### 4.3.1 ระยะทางของขั้วสาย

ที่ตั้งของชุมสายควรตั้งอยู่ใกล้ลูกค้ามากที่สุด ครึ่งหนึ่งของจำนวนลูกค้าในประเทศอเมริกาและสหราชอาณาจักร มีระยะทางจากชุมสายไปบ้านลูกค้าน้อยกว่า 2 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.16 แสดงระยะทางการใช้ขั้วสายทองแดงในแต่ละประเทศ ขั้วสายสำหรับใช้ในธุรกิจจะมีระยะทางใกล้มากและขั้วสายที่ใช้ในบ้านพักอาศัยจะมีระยะทางไกลมาก ขั้วสายในอเมริกามีระยะทางไกลกว่าขั้วสายของประเทศอื่น สังเกตได้จากการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละประเทศ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของขั้วสาย เช่น ชุมสายในอเมริกามีขั้วสายที่มีระยะทางน้อยกว่า 2.5 กิโลเมตรน้อยมาก และในบางชุมสายขั้วสายจะสำรองไว้ด้วย (Digital loop carrier :DLC) ขั้วสายทองแดงที่มีระยะทางมากกว่า 30.5 กิโลเมตร มีจำนวนน้อยมาก

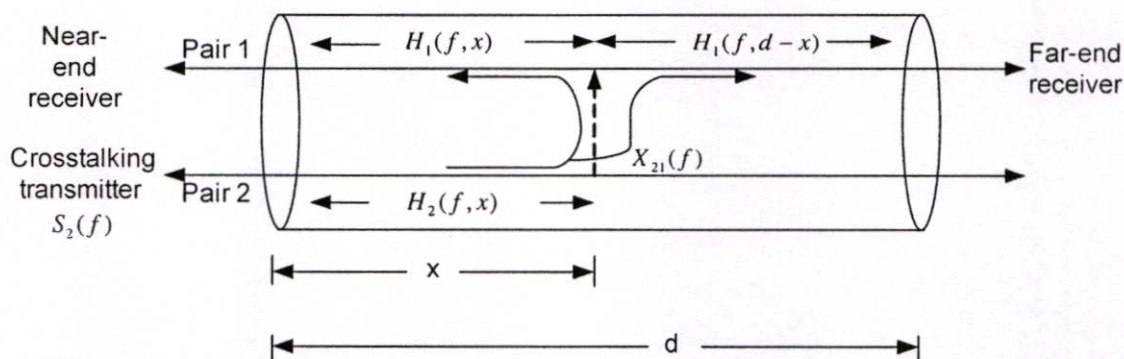
DLC ถูกนำมาใช้งานมากขึ้นเพื่อลดผลกระทบเรื่องระยะทางของขั้วสาย วิธีนี้สามารถนำมาใช้กับรูปแบบของอาคารรุ่นใหม่ที่ตั้งอยู่ห่างจากชุมสาย ในบางพื้นที่ที่เกิดขึ้นใหม่นิยมใช้ DLC หรือ remain switch modules (RSM) ระยะทางในการกระจายขั้วสายจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ โดยระยะทางจะโดยลดลง



รูปที่ 4.16 ระยะทางในการแพร่กระจายขั้วสาย

#### 4.4 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Crosstalk Noise [3]

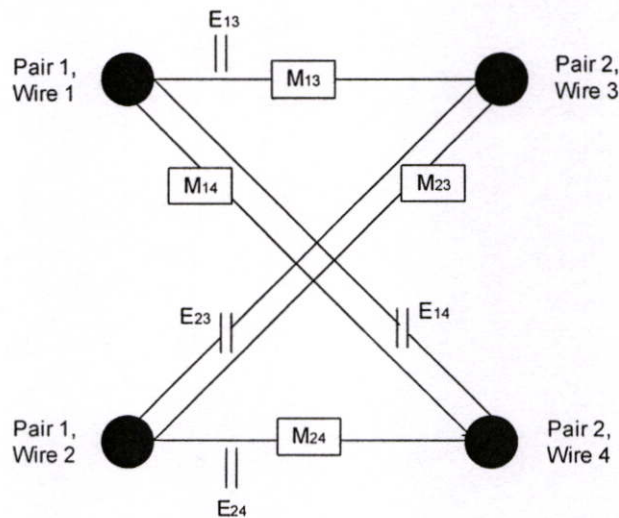
สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกที่เกิดขึ้นใน DSLs เนื่องจากการแพร่กระจายของแม่เหล็กไฟฟ้าในสายเคเบิลตีเกลียวซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสายเคเบิลตีเกลียว สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดจากการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าจากคู่สายตีเกลียวข้างเคียง ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกขึ้นในคู่สายข้างเคียงดัง รูป 4.17 อธิบายการเกิดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก 2 ชนิด ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการให้บริการ ADSL2+ สัญญาณรบกวนไขว้แทรกระยะใกล้ Near-end Crosstalk (NEXT) เกิดจากการส่งสัญญาณทางด้านส่งของคู่สายที่ 2 แต่สัญญาณที่ส่งนี้ข้ามไปรบกวนคู่สายข้างเคียงในด้านเดียวกันที่คู่สายที่ 1 สัญญาณรบกวนไขว้แทรกระยะไกล Far-end Crosstalk (FEXT) เกิดจากสัญญาณที่ส่งจากคู่สายที่ 2 ข้ามไปรบกวนคู่สายที่ 1 ทางด้านรับด้านตรงข้าม



รูปที่ 4.17 การเกิดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก

สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกเกิดขึ้นในคู่สายเคเบิลชนิดตีเกลียว ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในคู่สาย และเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนในคู่สายตีเกลียวทำให้ประสิทธิภาพของการให้บริการ DSL ค่อยลงหากไม่หาวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกออกไป ในกรณีของสายเคเบิล หลักการทั่วไปจะเป็นรูปแบบของสายตีเกลียวสองคู่ที่ตีเกลียวไปด้วยกันจะทำให้เกิดการเชื่อมต่อ (Coupling) ซึ่งกันและกัน รูปที่ 4.19 อธิบายการเกิดการเชื่อมต่อในคู่สายตีเกลียวและการเกิดการเชื่อมต่อระหว่างคู่สาย ดังนั้นจึงมีความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance)  $M$  และความจุไฟฟ้า (Capacitance)  $E$  ในระหว่างคู่สาย คู่สายตีเกลียวถูกควบคุมโดยการอัดแน่นอยู่ในสายเคเบิล ซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งที่คาดหวังว่าจะสามารถควบคุมความเหนี่ยวนำร่วมและความจุไฟฟ้าได้ด้วยการตีเกลียว ดังนั้นในช่วงสั้น ๆ ของการตีเกลียวคู่สายจะมีการสลับขั้วทางไฟฟ้าให้ตรงข้ามกันในแต่ละช่วงของการตีเกลียว จึงทำให้สามารถขจัดสัญญาณการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตามการตีเกลียวไม่สามารถที่จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมและความจุไฟฟ้าถูกขจัดออกไปได้ทั้งหมด เนื่อง

จากระยะทางของสายไกล ระยะทางสายที่ไกลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงซึ่งเกี่ยวกับความถี่ การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในคู่สายคือ ความต้านทาน(R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสายนำสัญญาณที่เป็นโลหะ อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสายนำสัญญาณที่เป็นโลหะจากคู่สายหนึ่งไปยังอีกคู่สายหนึ่งทำให้เกิดค่าคงที่ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความยาวของสาย (สมมุติฐานค่าตัวแปร RLC เป็นค่าคงที่ต่อความยาว 1 หน่วย) ดังนั้นฟังก์ชันการเชื่อมต่อ (Coupling function (per Hz)) มีการแลกเปลี่ยนแรงดันระหว่างคู่สายที่ 1 และคู่สายที่ 2,  $X_{21}(f)$  คือการเหนี่ยวนำของคู่สายสองคู่ แสดงดังสมการ (4.1)



รูปที่ 4.18 แบบจำลองของการแพร่กระจายของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างคู่สายตีเกลียว

$$N_{p1}(f, x) = X_{21}(f) \cdot 2\pi j f \cdot V_{p2}(f, x) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $N_{p1}(f, x)$  คือ การเหนี่ยวนำแรงดันของสายนำสัญญาณชนิดโลหะในคู่สายที่ 1 ที่ความถี่  $f$  และที่ตำแหน่ง  $x$  ของสายเคเบิลส่งสัญญาณ

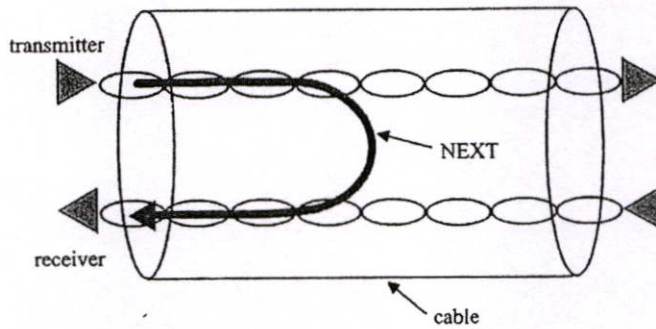
$V_{p2}(f, x)$  คือ แรงดันที่เป็นสาเหตุให้เกิดสัญญาณไขว้แทรกเข้าไปในคู่สายตีเกลียวอีกคู่สายหนึ่ง

$2\pi j f$  คือ การแลกเปลี่ยนของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในอีกคู่สายหนึ่งซึ่งเป็นการเหนี่ยวนำแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในคู่สายที่หนึ่ง

ดังนั้นฟังก์ชันของสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกต่อหนึ่งหน่วยความยาว จากคู่สายที่ 1 เข้าไปรบกวนในคู่สายที่ 2 และส่งสัญญาณรบกวนไปยังคู่สายอื่น ๆ โดยมาระยะทางเท่ากัน ของคู่สายที่อยู่ในเคเบิลเส้นเดียวกัน

#### 4.4.1 แบบจำลองการรบกวนไขว้แทรกกระยะใกล้ (NEXT Modeling)

การเกิดสัญญาณรบกวนรบกวนไขว้แทรก NEXT เกิดจากการส่งสัญญาณทางด้านส่ง แต่สัญญาณที่ส่งนี้ข้ามไปรบกวนคู่สายข้างเคียงด้านส่งเดียวกัน ซึ่งเป็นการรบกวนที่เกิดขึ้นที่สถานีเดียวกันแบบจำลองของ NEXT พบว่าผลรวมของการไขว้แทรกในเคเบิลคู่สายตีเกลียวไม่มีผลกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.19 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด Near End Crosstalk (NEXT)

$$N(f, d) = \int_0^d X_{21}(f) \cdot 2\pi jf \cdot V_{p2}(f) \cdot H_2(f, x) \cdot H_1(f, x) \cdot dx \quad (4.2)$$

เมื่อ  $V_{p2}(f)$  คือ สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก (near-end) อินพุตของคู่สายที่ 2

$H_2(f, x)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนแทรกจากอินพุตถึง  $x$  ของคู่สายที่ 2

$H_1(f, x)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนที่แทรกเข้าไปในคู่สายที่ 1 จาก  $x$  ย้อนกลับไปยังสถานีต้นทาง

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่แทรกเข้าไปในคู่สาย สมมุติฐานว่าสิ้นสุดที่  $x$  ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเหมือนค่าอิมพีแดนซ์ของสาย การวิเคราะห์สมมุติฐานว่าเมื่อจำนวนคู่สายเพิ่มมากขึ้นย่อมจะเกิดการไขว้แทรกมากขึ้น โดยเฉพาะสายส่งสัญญาณที่มีคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ในตัวซึ่งมีลักษณะของตัวแปร RLC เหมือนกับการเชื่อมต่อร่วมของสองคู่สายตีเกลียว เมื่อมีระยะทางไกลขึ้นสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกจะมีขนาดยกกำลังสอง ในกรณีนี้จะได้สมการดังนี้

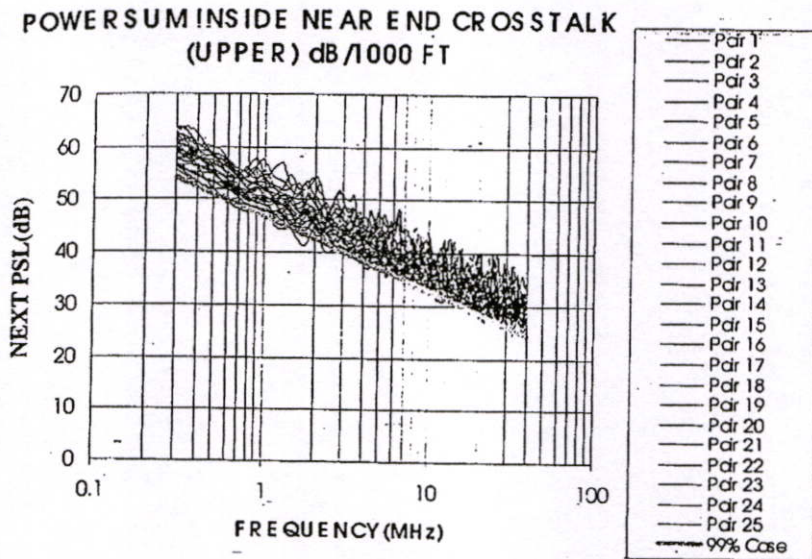
$$\begin{aligned} |N(f, d)|^2 &= (4\pi^2 f^2) \cdot |X_{21}(f)|^2 \cdot |V_{p2}(f)|^2 \cdot \int_0^d e^{-4\alpha x} dx \\ &= (4\pi^2 f^2) \cdot |X_{21}(f)|^2 \cdot |V_{p2}(f)|^2 \cdot \frac{[1 - e^{-4\alpha d}]}{4\alpha} \end{aligned} \quad (4.3)$$

สมมุติฐานว่าคู่สายตีเกลียวมีระยะทางไกลมีค่า  $\alpha = \zeta\sqrt{f}$  และเทอมของเอกซ์โพเนนเชียลมีค่าน้อยมากเช่นเดียวกับระยะของคู่สาย  $d$  จะได้รูปแบบของสมการทั่วไปดังนี้

$$|N(f, d)|^2 = |N(f)|^2 = \left(\frac{\pi^2 f^{1.5}}{\zeta}\right) \cdot |X_{21}(f)|^2 \cdot |V_{p2}(f)|^2 \quad (4.4)$$

การเพิ่มขึ้นกับการเชื่อมต่อที่ความถี่  $f^{1.5}$  เป็นค่าสมมุติฐานเหมือนกับคุณลักษณะของสายที่เหมือนกันและตำแหน่งคงที่ แบบจำลองของสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกนั้นซับซ้อนมากค่ากำลังของความถี่ที่เหมาะสมมีค่าใกล้เคียง 1.5 หรืออยู่ในย่าน 1.3 ถึง 1.7 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองของวิศวกร DSL ได้หาค่าเฉลี่ยของการเชื่อมต่อหลาย ๆ คู่สาย ในกรณีผลรวมของฟังก์ชันการเชื่อมต่อหลายคู่สายได้ดังสมการ

$$\sum_n |X_n(f)|^2 \approx k' \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.20 การสูญเสียเนื่องจาก NEXT ของเคเบิลชนิด Polyethylene insulated cables (PIC) จำนวน 25 คู่

รูปที่ 4.20 (ข้อมูลจาก C.Valenti, Bellcore[3]) แสดงจำนวนคู่ของคู่สายเคเบิลที่เกิดจากการเชื่อมต่อของฟังก์ชันการถ่ายโอนของเคเบิล 50 คู่สาย และจากการศึกษาของ Bellcore ในกรณีที่เกิด

การรบกวนไขว้แทรกในเคเบิล 50 คู่สาย สูงถึง 99% ดังนั้นจึงกำหนดค่าคงที่ของฟังก์ชันการเชื่อมต่อของสายเคเบิลขนาด 50 คู่สาย ได้ดังสมการ

$$S_n(f) = k_{next} \cdot f^{1.5} \cdot S_2(f) \quad (4.6)$$

เมื่อค่า  $k_{next}$  ได้จากการกำหนดโดย American National Standards Institute (ANSI) คือ

$$k_{next} = 10^{-13} \cdot (N/49)^{0.6} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนคู่สายที่ใช้งานในกลุ่มเดียวกันและให้บริการ DSL เช่นเดียวกัน

$f$  คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ Hz

$S_2(f)$  คือ ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมที่เข้ามาทางอินพุตของสายในกรณีที่สัญญาณรบกวนไขว้แทรกที่เกิดจาก HDSL จะมีค่าเท่ากับ

$$PSD_{HDSL}(f) = K_{HDSL} \cdot \frac{2}{f_0} \cdot \frac{\left[ \sin\left(\frac{\pi f}{f_0}\right) \right]^2}{\left(\frac{\pi f}{f_0}\right)^2} \cdot \frac{1}{\left[ 1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^8 \right]} \quad (4.8)$$

เมื่อ  $f_0$  คือ อัตราการสุ่ม(Sampling rate) เท่ากับ 392 kHz

$f_{3dB}$  เท่ากับ 196 kHz

$K_{HDSL}$  เท่ากับ  $\frac{5}{9} \cdot \frac{V_p^2}{R}$  เมื่อ  $V_p = 2.7$  โวลต์ และ  $R = 135$  โอห์ม

กรณี  $S_2(f)$  คือ ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมที่เข้ามาทางอินพุตของสายในกรณีที่

สัญญาณรบกวนไขว้แทรกที่เกิดจาก ISDN จะมีค่าเท่ากับ

$$PSD_{ISDN}(f) = K_{ISDN} \cdot \frac{2}{f_0} \cdot \frac{\left[ \sin\left(\frac{\pi f}{f_0}\right) \right]^2}{\left(\frac{\pi f}{f_0}\right)^2} \cdot \frac{1}{\left[ 1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^4 \right]} \quad (4.9)$$

เมื่อ  $f_0$  คือ อัตราการสุ่ม(Sampling rate) เท่ากับ 80 kHz

$K_{ISDN}$  เท่ากับ  $\frac{5}{9} \cdot \frac{V_p^2}{R}$  เมื่อ  $V_p = 2.5$  โวลต์ และ  $R = 135$  โอห์ม

กรณี  $S_2(f)$  คือ ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมที่เข้ามาทางอินพุตของสายในกรณีที่ สัญญาณรบกวนไขว้แทรกที่เกิดจาก ADSL Upstream จะมีค่าเท่ากับ

$$PSD_{ADSL,US}(f) = K_{ADSL,US}(f) \cdot \frac{\left[ \sin\left(\frac{\pi f}{f_0}\right) \right]^2}{\left(\frac{\pi f}{f_0}\right)^2} \quad (4.10)$$

เมื่อ

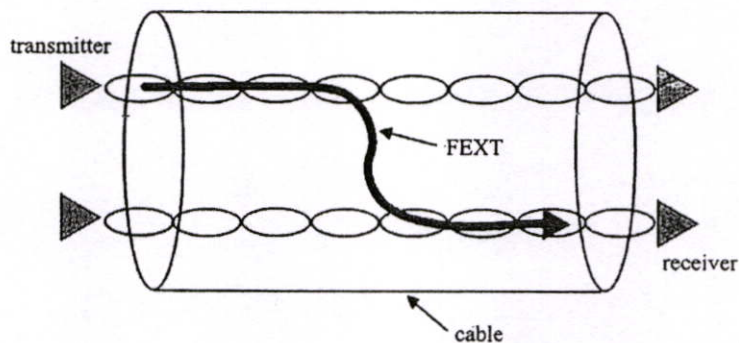
$$K_{ADSL,US}(f) = \begin{cases} -38 \text{ dBm/Hz} & \text{ที่ } 82 \text{ kHz} \leq f \leq 138 \text{ kHz} \\ -38 - 24 \left( \frac{f - 138000}{43125} \right) \text{ dBm/Hz} & \text{ที่ } f \geq 138 \text{ kHz} \end{cases}$$

$f_0$  คือ อัตราการสุ่ม(Sampling rate) เท่ากับ 270 kHz

#### 4.4.2 แบบจำลองของการรบกวนไขว้แทรกระยะไกล (FEXT Modeling)

สัญญาณรบกวนไขว้แทรก FEXT เกิดจากการไขว้แทรกระหว่างการส่งสัญญาณจากด้าน ส่งไปยังด้านรับของคู่สายที่ 1 แต่สัญญาณข้ามไปไขว้แทรกในคู่สายที่ 2 ทางด้านรับ

แบบจำลองของ FEXT จะขนานไปกับแบบจำลองของ NEXT



รูปที่ 4.21 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด Far End Crosstalk (FEXT)

$$F(f, d) = \int_0^d X_{21}(f) \cdot 2\pi jf \cdot V_{p2}(f) \cdot H_2(f, x) \cdot H_1(f, d-x) \cdot dx \quad (4.11)$$

เมื่อ  $H_1$  คือ ฟังก์ชันของระยะทางสายจากจุดที่เกิดการไขว้แทรกถึงจุดปลายทางด้านรับ  
 $H_2$  คือ ระยะทางจากเครื่องส่งไปยังจุดที่เกิดการไขว้แทรก

สมมุติฐานว่าคู่สายเคเบิลสองคู่สายที่ปลายทางมีค่าอินพีแดนซ์และมีค่า RLC และขนาดของสัญญาณ FEXT ยกกำลังสองจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} |F(f, d)|^2 &= (4\pi^2 f^2) \cdot |X_{21}(f)|^2 \cdot |V_{p2}(f)|^2 \cdot \int_0^d e^{-2\alpha x} dx \\ &= (4\pi^2 f^2) \cdot |X_{21}(f)|^2 \cdot |V_{p2}(f)|^2 \cdot d \cdot e^{-2\alpha d} \end{aligned} \quad (4.12)$$

ค่า FEXT เพิ่มขึ้นจากกำลังสองของความถี่ของการส่งสัญญาณและบ่อยครั้งองค์ประกอบของเอกซ์โพเนนเชียลจะสิ้นสุดที่สมการที่ (4.6) เป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของคู่สายเดียวมีความหมายเท่ากับ  $|H(f, d)|^2$  สมมุติให้ทั้งสองสมการเหมือนกันและแทนองค์ประกอบสมการอินทิเกรตที่ซับซ้อนในสมการที่ (4.10) ฟังก์ชันการเชื่อมต่อ  $|X_{21}(f)|^2$  ย่อมจะเปลี่ยนไปตามความถี่อาจจะมีขนาด 10 ถึง 20 dB (หรือมากกว่านี้ที่ความถี่สูงขึ้น) เมื่อรวมสัญญาณรบกวนไขว้แทรกเข้าด้วยกันมีค่าประมาณตามสมการที่ (4.13) และแบบจำลอง FEXT ที่ ANSI ยอมรับได้คือ

$$S_f(f) = k_{fext} \cdot f^2 \cdot d \cdot |H(f, d)|^2 \cdot S_2(f) \quad (4.13)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นฟุต

$|H(f, d)|^2 \approx e^{-2d\zeta\sqrt{f}}$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุตของสายส่งสัญญาณ(เมื่อสัญญาณรบกวนแทรกเข้ามา) [2] [11]

$\zeta = 9 \times 10^{-7}$  คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายของสายตีเกลียวเบอร์ (26 AWG = 0.4 mm)

$f$  คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ Hz

$S_2(f)$  คือ ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมที่อินพุตของสาย (เหมือนกับกรณี NEXT)

$$k_{fext} = \left(\frac{N}{49}\right)^{0.6} \cdot 9 \times 10^{-20} \quad (4.14)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนคู่สายที่ใช้งานในกลุ่มเดียวกันและให้บริการ DSL เช่นเดียวกัน

#### 4.4.3 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน Signal-to-Noise Ratio (SNR)

ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR ที่เกิดจากผลกระทบของสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก NEXT สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (4.15)

$$SNR_{NEXT} = \frac{S_2(f)|H(f,d)|^2}{S_2(f) \cdot k_{next} \cdot f^{3/2}}$$

$$= \frac{e^{-2d\zeta\sqrt{f}}}{10^{-13} \cdot (N/49)^{0.6} \cdot f^{3/2}} \quad (4.15)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นฟุต

$|H(f,d)|^2 \approx e^{-2d\zeta\sqrt{f}}$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุตของสายส่งสัญญาณ(เมื่อสัญญาณรบกวนแทรกเข้ามา) [2] [11]

$\zeta = 9 \times 10^{-7}$  คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายของสายตีเกลียวเบอร์ (26 AWG = 0.4 mm)

$f$  คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ Hz

$S_2(f)$  คือ ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมที่อินพุตของสาย (เหมือนกับกรณี NEXT)

$N$  คือ จำนวนคู่สายที่ใช้งานในกลุ่มเดียวกันและให้บริการ DSL เช่นเดียวกัน

ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR ที่เกิดจากผลกระทบของสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก FEXT สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (4.16)

$$SNR_{NEXT} = \frac{S_2(f)|H(f,d)|^2}{S_2(f) \cdot k_{fext} \cdot f^2 \cdot d \cdot |H(f,d)|^2}$$

$$= \frac{1}{9 \times 10^{-20} \cdot (N/49)^{0.6} \cdot f^2 \cdot d} \quad (4.16)$$

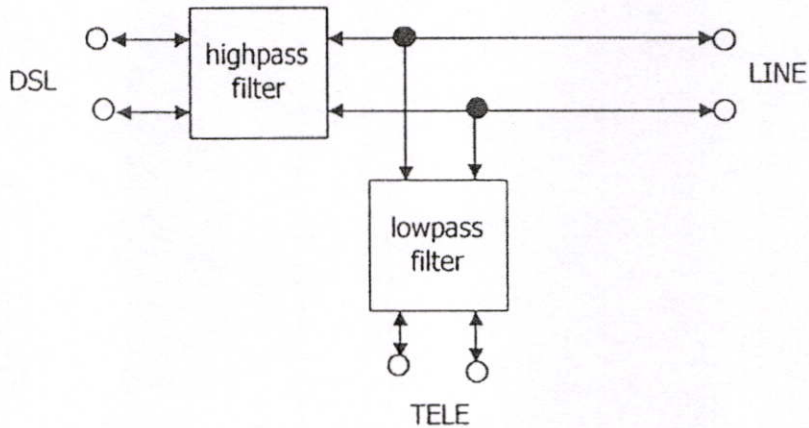
เมื่อ  $d$  คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นฟุต

$f$  คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ Hz

$N$  คือ จำนวนคู่สายที่ใช้งานในกลุ่มเดียวกันและให้บริการ DSL เช่นเดียวกัน

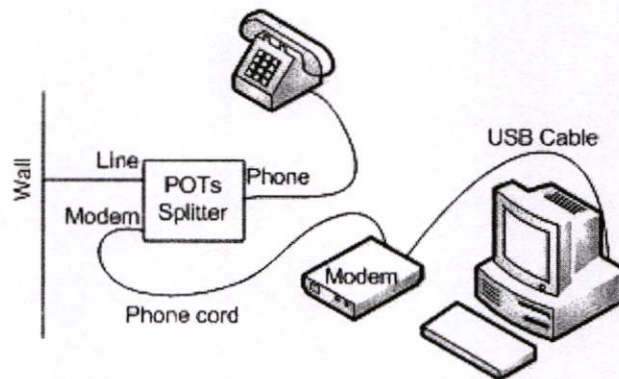
#### 4.5 อุปกรณ์แยกสัญญาณโทรศัพท์

หน้าที่ของอุปกรณ์แยกสัญญาณโทรศัพท์ คือแยกสัญญาณ โทรศัพท์ออกจากสัญญาณ DSL ที่ส่งผ่านทางคู่สายตีเกลียว เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน สัญญาณที่ส่งออกจาก DSLAM เป็นสัญญาณ โทรศัพท์ที่มาพร้อมกับสัญญาณ DSL อุปกรณ์แยกสัญญาณจะทำให้สัญญาณ DSL ไม่ปรากฏที่ส่วนของโทรศัพท์ และสัญญาณ โทรศัพท์ก็จะไม่ปรากฏที่ส่วนของ DSL ดังรูปที่ 4.22



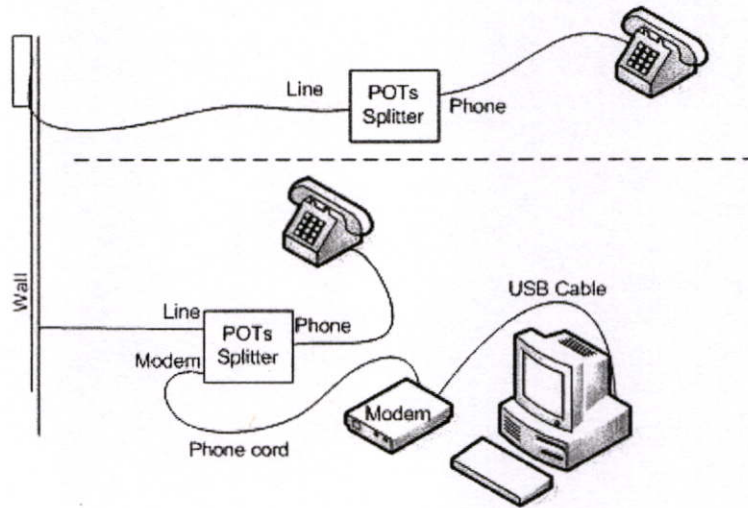
รูปที่ 4.22 อุปกรณ์แยกสัญญาณ (splitter)

รูปที่ 4.23 แสดงการติดตั้ง ADSL ที่มีการต่อใช้โทรศัพท์เพียงจุดเดียว ไม่มีการต่อพ่วงโทรศัพท์ภายในอาคาร ส่วนใหญ่การต่อแบบนี้จะเป็นการติดตั้งใหม่



รูปที่ 4.23 การติดตั้ง ADSL ด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณแบบไม่มีการต่อพ่วง

รูปที่ 4.24 แสดงการติดตั้ง ADSL ที่มีการต่อพ่วงใช้โทรศัพท์ภายในอาคาร จะต้องติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณเพิ่มอีก 1 จุด เพื่อที่จะทำให้ ADSL ใช้งานได้ตามปกติ เพราะถ้าหากไม่ติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณเพิ่ม จะทำให้เสมือนมีการต่อแยกบริดจ์ (Bridged Tap) ทำให้ไม่สามารถใช้ ADSL ได้ หรือหากไม่ต้องการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณเพิ่ม ต้องต่อพ่วงสายโทรศัพท์หลังจากผ่านอุปกรณ์แยกสัญญาณที่จุด Phone ในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 การติดตั้ง ADSL ด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณแบบมีการต่อพ่วงโทรศัพท์

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

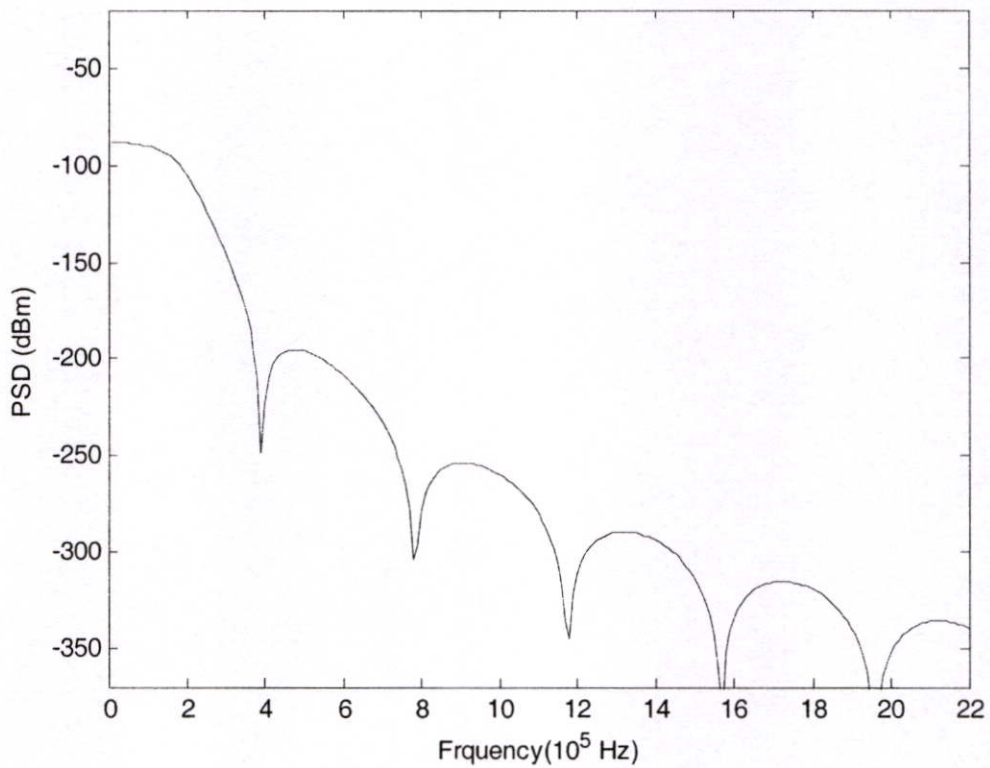
ในบทนี้อธิบายการทดลองและผลการทดลองที่จะแสดงถึงผลกระทบจากสัญญาณรบกวนชนิดไวแตรกของคู่สายข้างเคียงที่มีต่อประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณ ADSL2+ การทดลองในส่วนแรกใช้ MATLAB จำลองการทำงานของ ADSL2+ และส่วนที่สองเป็นผลจากการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบคู่สายดีเกิลียวจากอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง

#### 5.1 การใช้โปรแกรม MATLAB จำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานของระบบ ADSL2+ โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนชนิดไวแตรกที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานในคู่สายข้างเคียง และหาค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ที่เป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนชนิดไวแตรก ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของ ADSL2+ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.1-5.11

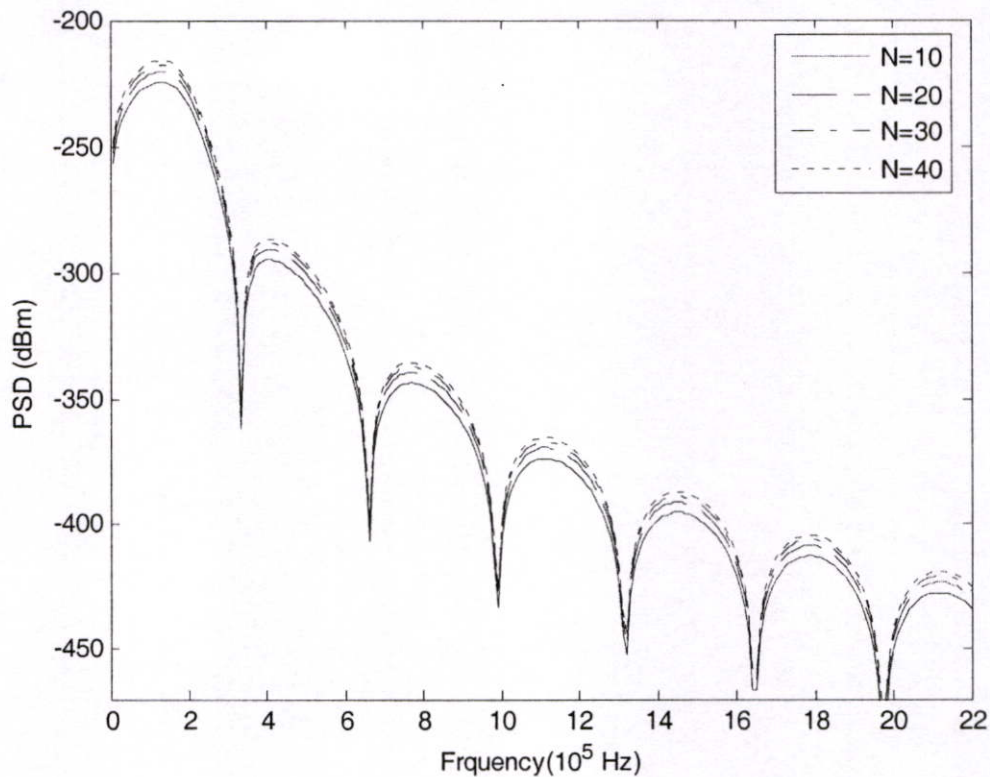
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบ ADSL2+

พารามิเตอร์	
ความถี่ (f)	0 - 2.2 MHz
จำนวนคู่สาย (N)	10 - 40 คู่สาย
ระยะทาง (d)	1 - 5 km
ซีดีต้า ( $\zeta$ )	$9 \times 10^{-7}$
Sampling rate ( $f_0$ ) HDSL	392 kHz
Sampling rate ( $f_0$ ) ISDN	80 kHz
Sampling rate ( $f_0$ ) ADSL	270 kHz
$f_{3dB}$ HDSL, ADSL	196 kHz
ระดับสัญญาณ (v) HDSL	2.7 volts
ระดับสัญญาณ (v) ISDN	2.5 volts
ความต้านทาน R HDSL, ISDN	135 ohms



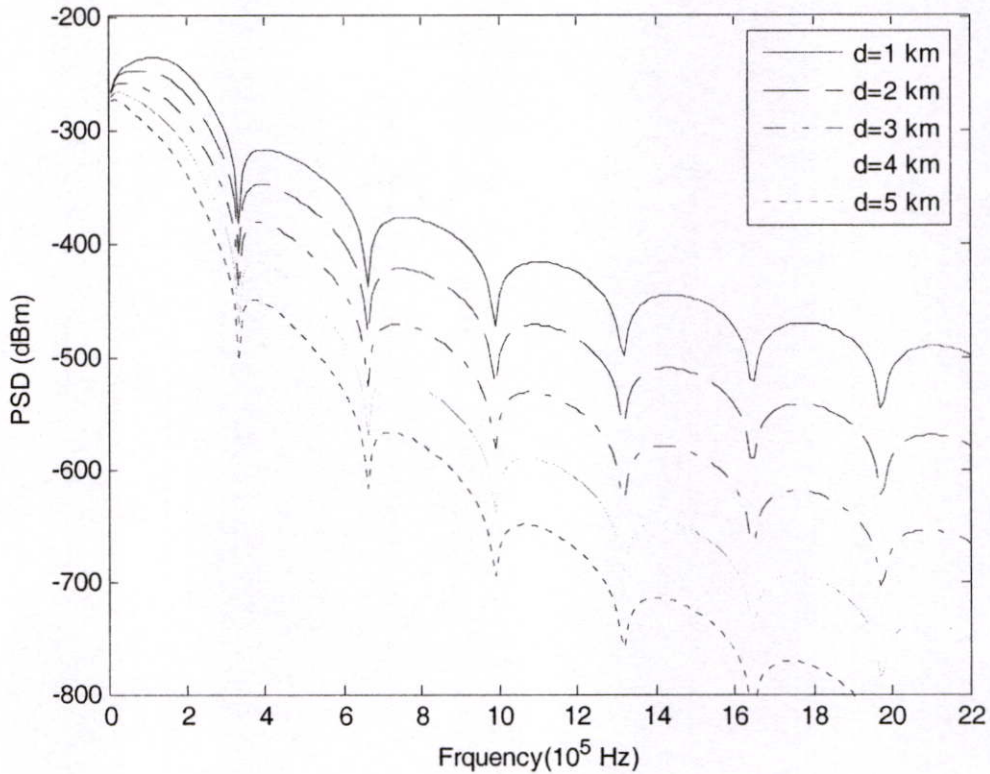
**รูปที่ 5.1** ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ HDSL

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density (PSD)) ของ HDSL กับความถี่ในการใช้งาน เมื่อความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.1 เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น การสูญเสียเนื่องจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ HDSL มีค่าเพิ่มขึ้น



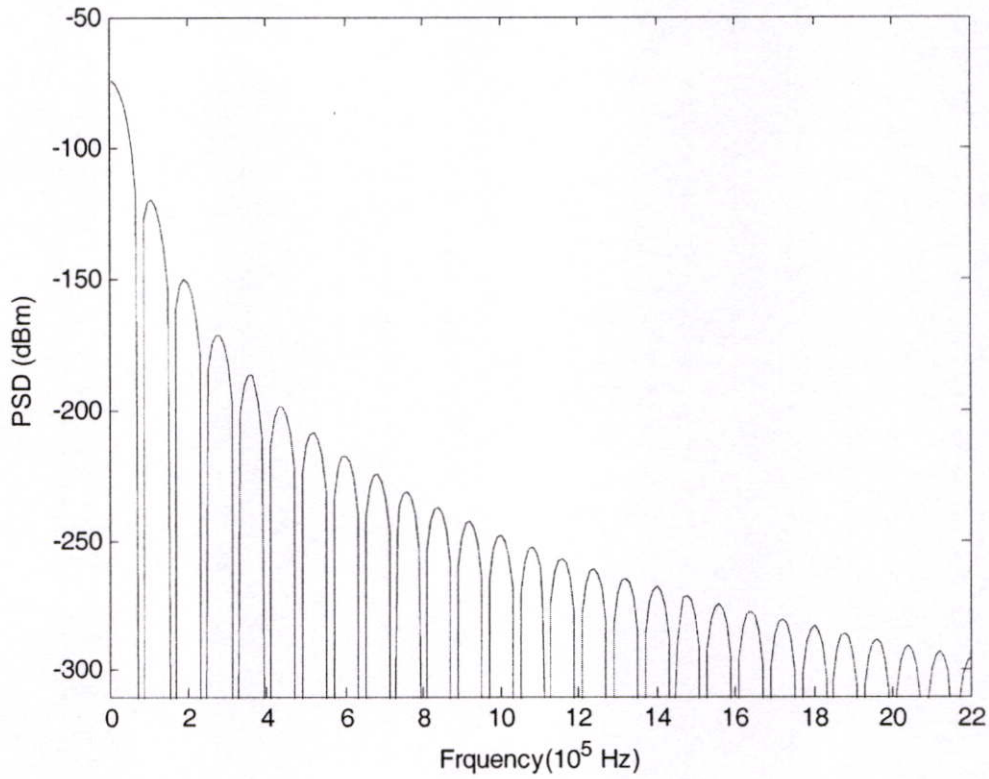
รูปที่ 5.2 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ HDSL

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ HDSL กับความถี่ และจำนวนคู่สายที่ใช้ งาน เมื่อกำหนดให้ค่า  $N$  แทนจำนวนคู่สายที่ใช้งานในเคเบิลเส้นเดียวกัน ซึ่งมีจำนวนตั้งแต่ 10 20 30 และ 40 คู่สาย ตามลำดับ ความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.2 เมื่อจำนวนคู่สายที่ใช้งานในเคเบิลเส้นเดียวกันเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด NEXT ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ HDSL มีค่าเพิ่มขึ้น



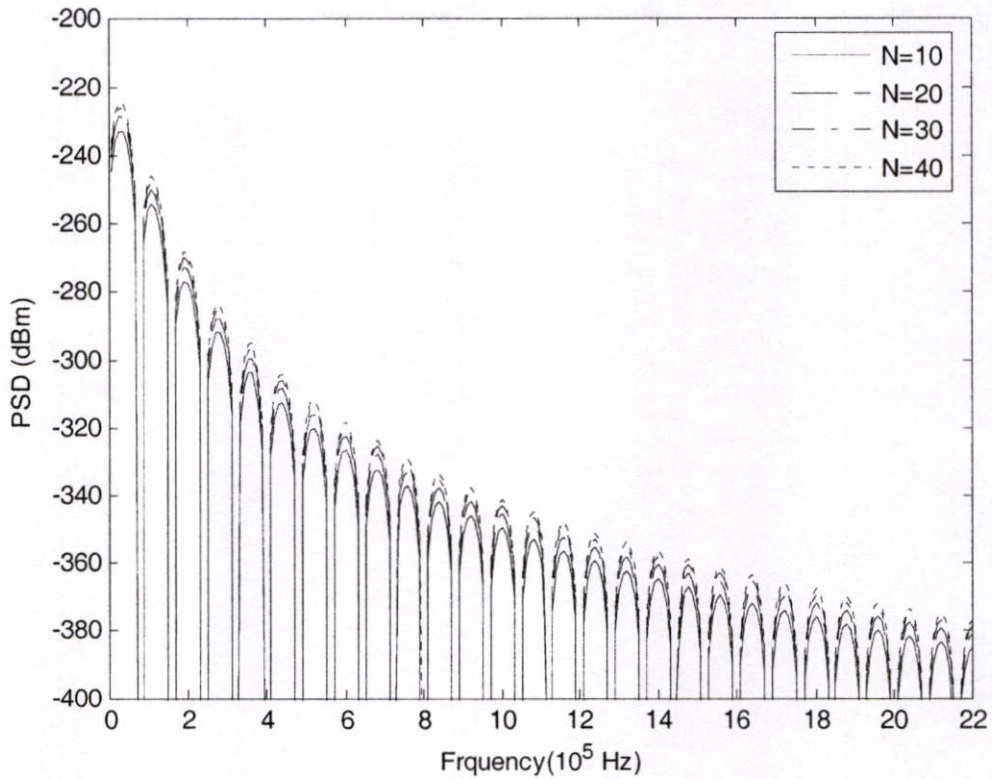
รูปที่ 5.3 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Far End Crosstalk (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ HDSL

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด Far End Crosstalk FEXT ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม Power Spectral Density (PSD) ของ HDSL กับความถี่ และระยะทางในการใช้งานระหว่าง ADSL Transmission Unit – Central Office side (ATU-C) ถึง ADSL Transmission Unit –Remote side (ATU-R) เมื่อกำหนดให้ค่า  $d$  แทนระยะทาง มีค่าตั้งแต่ 1 2 3 4 และ 5 กิโลเมตร ตามลำดับ ความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.3 เมื่อระยะทางที่ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ HDSL มีค่าลดลง



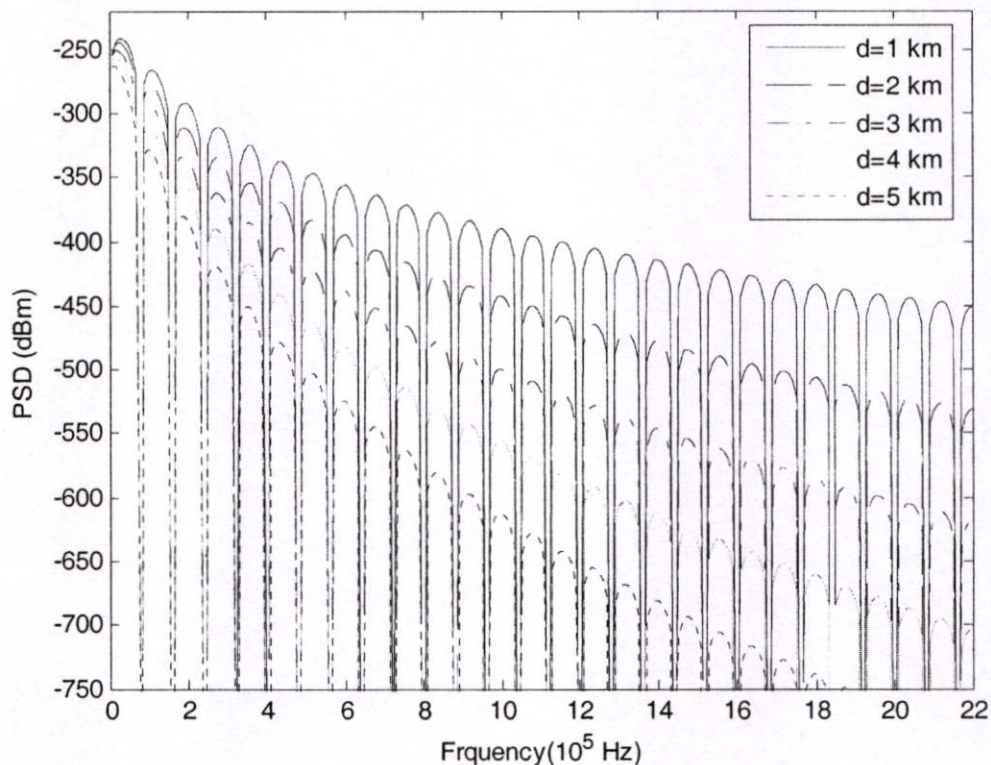
รูปที่ 5.4 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ISDN

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density (PSD)) ของ ISDN กับความถี่ในการใช้งาน เมื่อความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.4 เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น การสูญเสียเนื่องจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ISDN มีค่าเพิ่มขึ้น



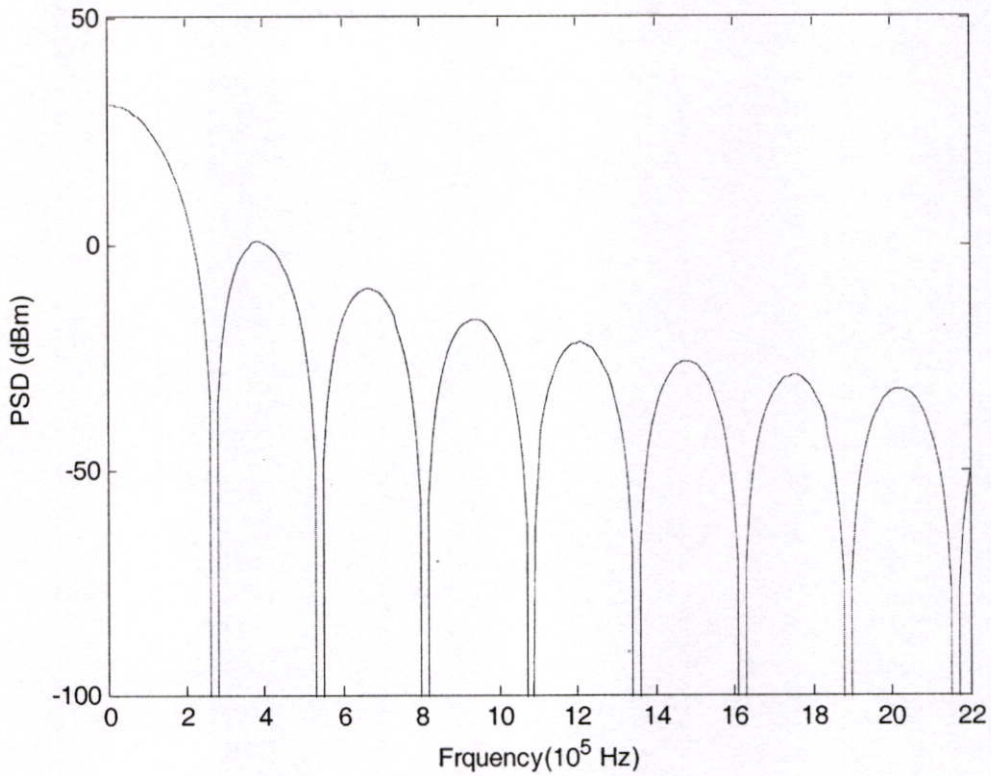
รูปที่ 5.5 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ISDN

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ISDN กับความถี่ และจำนวนคู่สายที่ใช้ งาน เมื่อกำหนดให้ค่า  $N$  แทนจำนวนคู่สายที่ใช้งานในเคเบิลเส้นเดียวกันซึ่งมีจำนวนตั้งแต่ 10 20 30 และ 40 คู่สาย ตามลำดับ ความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.5 เมื่อจำนวนคู่สายที่ใช้งานในเคเบิลเส้นเดียวกันเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด NEXT ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ISDN มีค่าเพิ่มขึ้น



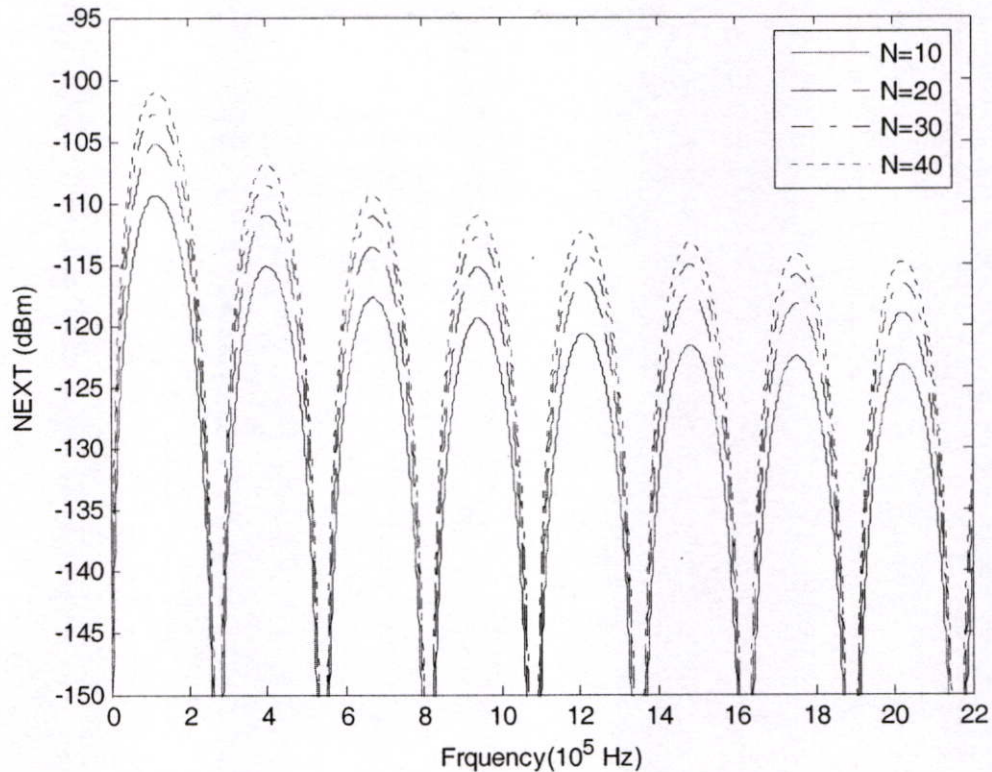
รูปที่ 5.6 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Far End Crosstalk (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ISDN

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด Far End Crosstalk FEXT ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม Power Spectral Density (PSD) ของ ISDN กับความถี่ และระยะทางในการใช้งานระหว่าง ADSL Transmission Unit – Central Office side (ATU-C) ถึง ADSL Transmission Unit –Remote side (ATU-R) เมื่อกำหนดให้ค่า  $d$  แทนระยะทาง มีค่าตั้งแต่ 1 2 3 4 และ 5 กิโลเมตร ตามลำดับ ความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.6 เมื่อระยะทางที่ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ISDN มีค่าลดลง



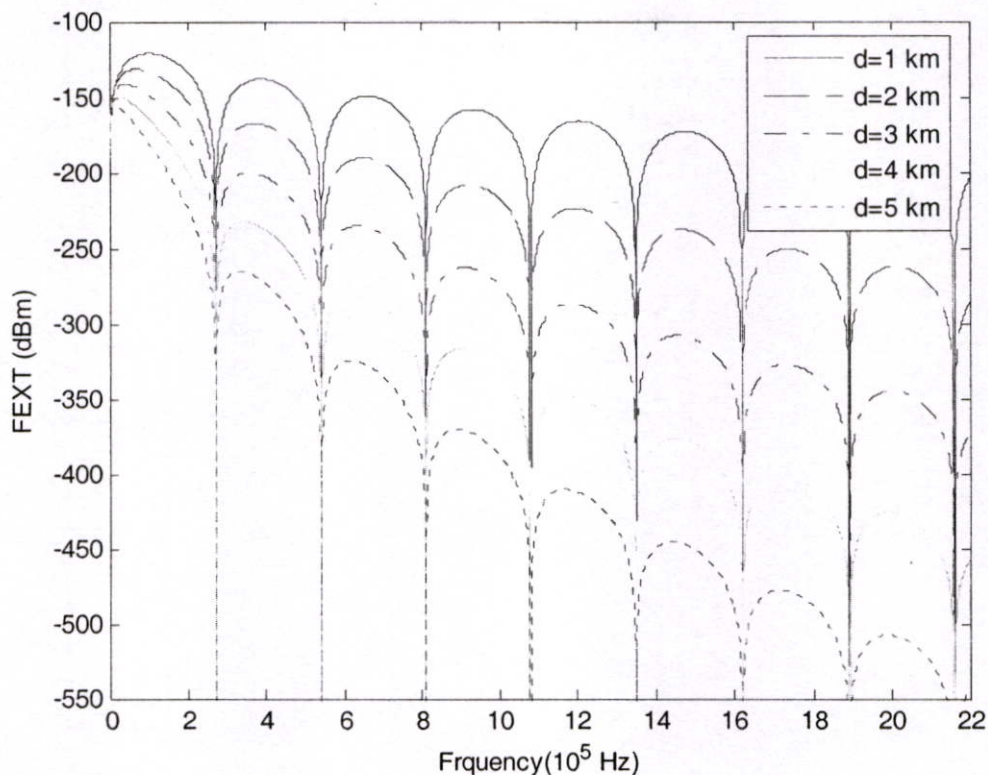
รูปที่ 5.7 ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density (PSD)) ของ ADSL2+ ด้านขาขึ้น กับความถี่ในการใช้งาน เมื่อความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.7 เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น การสูญเสียเนื่องจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น มีค่าเพิ่มขึ้น



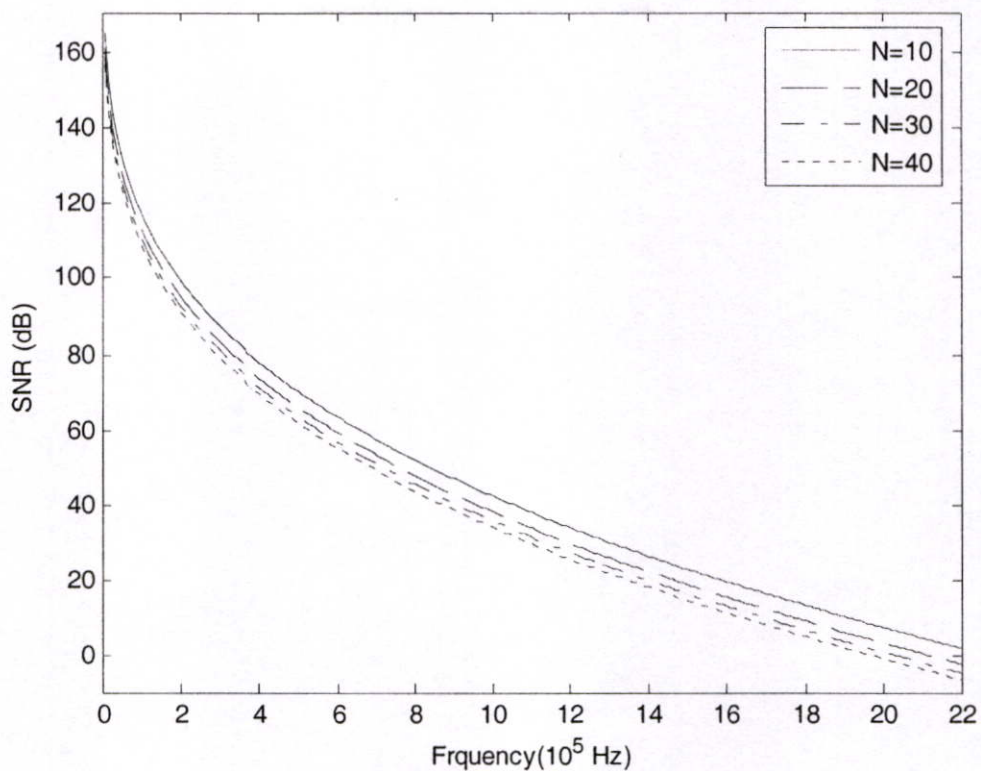
รูปที่ 5.8 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด Near End Crosstalk (NEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น กับความถี่และจำนวนคู่สายที่ใช้งาน เมื่อกำหนดให้ค่า  $N$  แทนจำนวนคู่สายที่ใช้งานในเคเบิลเส้นเดียวกันซึ่งมีจำนวนตั้งแต่ 10 20 30 และ 40 คู่สาย ตามลำดับ ความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.8 เมื่อจำนวนคู่สายที่ใช้งานในเคเบิลเส้นเดียวกันเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด NEXT ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น มีค่าเพิ่มขึ้น



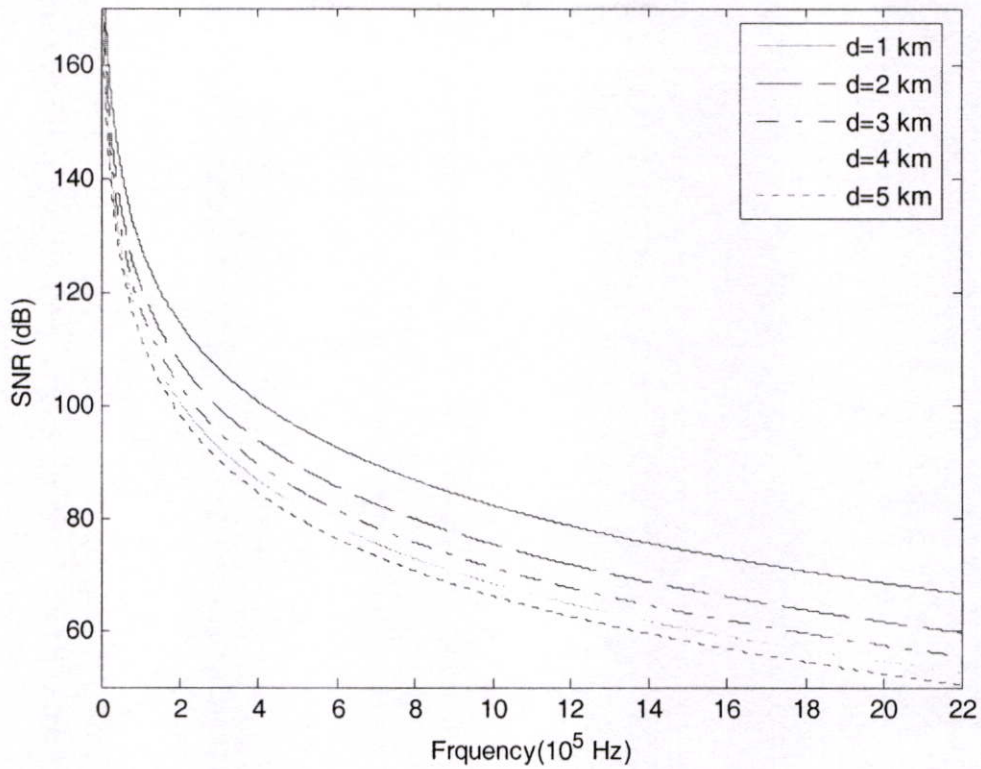
รูปที่ 5.9 สัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Far End Crosstalk (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด Far End Crosstalk FEXT ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม Power Spectral Density (PSD) ของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้น กับความถี่และระยะทางในการใช้งานระหว่าง ADSL Transmission Unit – Central Office side (ATU-C) ถึง ADSL Transmission Unit – Remote side (ATU-R) เมื่อกำหนดให้ค่า  $d$  แทนระยะทางมีค่าตั้งแต่ 1 2 3 4 และ 5 กิโลเมตร ตามลำดับ ความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.9 เมื่อระยะทางที่ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด (FEXT) ที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของ ADSL2+ ด้านสัญญาณขาขึ้นมีค่าลดลง



รูปที่ 5.10 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Near End Crosstalk (NEXT)

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด NEXT กับจำนวนคู่สายเมื่อกำหนดให้ค่า N แทนจำนวนคู่สายที่ใช้งานในเคเบิลเส้นเดียวกัน ซึ่งมีจำนวนตั้งแต่ 10 20 30 และ 40 คู่สาย ตามลำดับ ความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.10 เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น และจำนวนคู่สายที่ใช้งานในเคเบิลเส้นเดียวกันเพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด NEXT จะมีค่าลดลง



รูปที่ 5.11 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก Far End Crosstalk (FEXT)

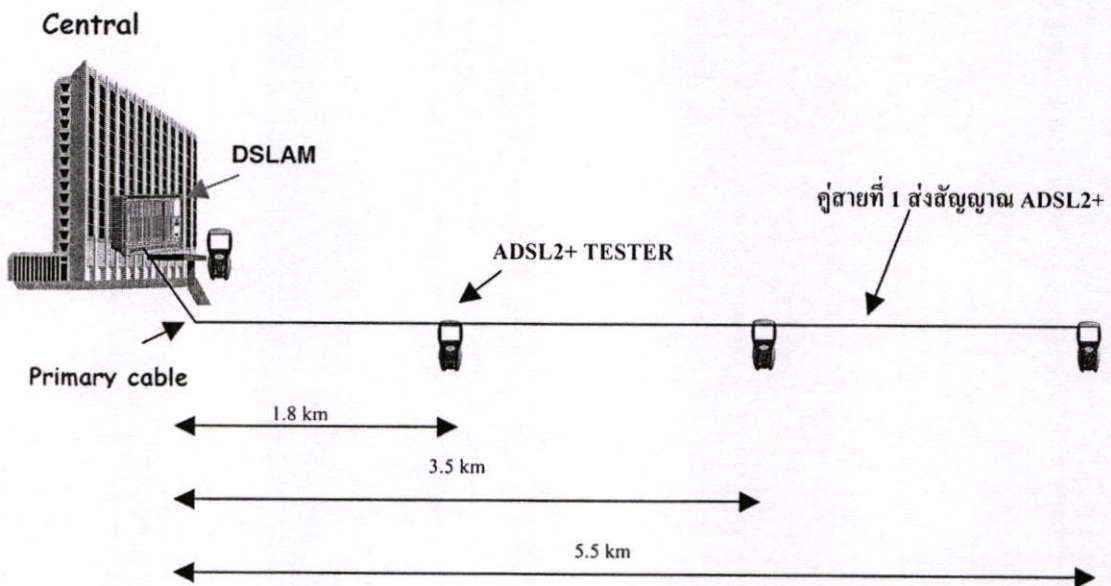
ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกชนิด FEXT กับ ระยะทางในการใช้งานระหว่าง ADSL Transmission Unit –Central Office side (ATU-C) ถึง ADSL Transmission Unit –Remote side (ATU-R) เมื่อกำหนดให้ค่า d แทนระยะทางมีค่าตั้งแต่ 1 2 3 4 และ 5 กิโลเมตร ตามลำดับ ความถี่ที่ใช้งานมีค่าตั้งแต่ 0-2.2 MHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.11 เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น และระยะทางที่ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด FEXT จะมีค่าลดลง

## 5.2 ผลจากการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบจากอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง

ในส่วนนี้เป็นผลการทดลองวัดจากชุมสายย่อย Remote Switching Unit (RSU) ถึงตู้พักปลายทาง ของบริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) ทำการทดสอบคู่สายขนาด 0.4 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester ทดสอบสัญญาณที่ส่งจาก DSLAM โดยเริ่มที่ Main Distribution Frame (MDF) และที่ระยะทางห่างจากชุมสาย 1.8 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ตามลำดับ ทำการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราบิดของ ADSL2+ ที่ส่งสัญญาณไปในคู่สายเพียงอย่างเดียว และเทียบกับการส่งสัญญาณ SHDSL และ ISDN ไปในคู่สายข้างเคียงที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันกับคู่สายที่ใช้ทดสอบ ADSL2+ แสดงดังรูปที่ 5.12 - 5.15 เพื่อวัดค่าของอัตราบิด ค่าลดทอนของสัญญาณและค่าอัตราส่วนต่อสัญญาณรบกวน ที่เกิดจากสัญญาณรบกวนไขว้แทรกจากคู่สายข้างเคียง ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.16 - 5.27

### 5.2.1 การทดสอบคู่สายครั้งที่ 1 โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester

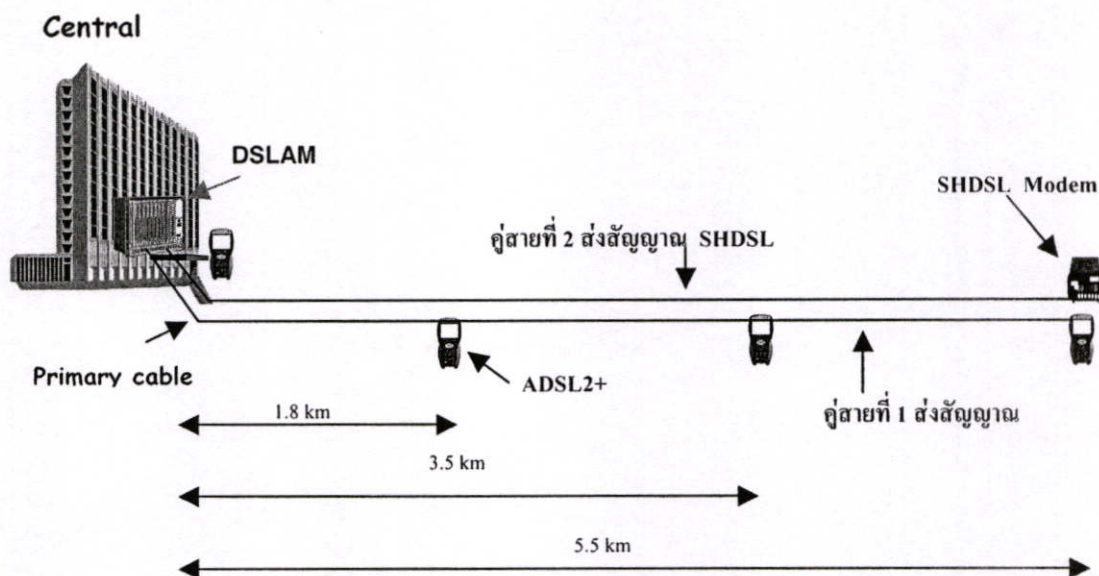
ทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ จาก DSLAM ที่ชุมสายย่อย RSU เข้าที่คู่สายที่ 1 แล้วใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester ทดสอบสัญญาณ โดยเริ่มที่ MDF และที่ระยะทางห่างจากชุมสาย 1.8 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 การทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่สายเคเบิล

### 5.2.2 การทดสอบคู่สายครั้งที่ 2 โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester

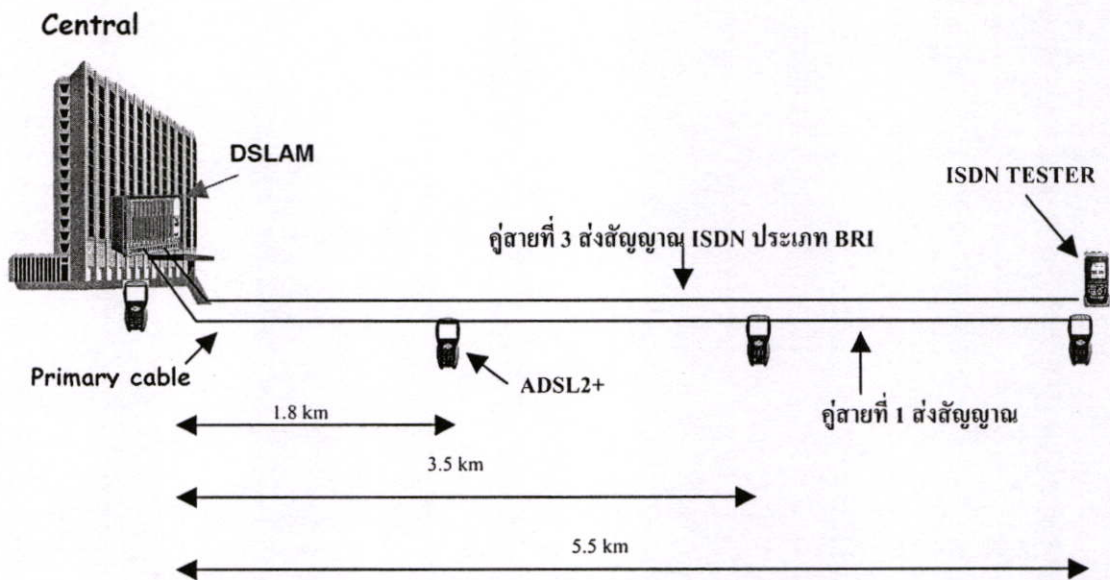
ทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 และส่งสัญญาณ SHDSL เข้าที่คู่สายที่ 2 จากชุมสายย่อย RSU แล้วใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester ทดสอบสัญญาณ โดยเริ่มที่ MDF และที่ระยะทางห่างจากชุมสาย 1.8 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 การทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 และส่งสัญญาณ SHDSL เข้าที่คู่สายที่ 2

### 5.2.3 การทดสอบคู่สายครั้งที่ 3 โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester

ทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 และส่งสัญญาณ ISDN เข้าที่คู่สายที่ 3 จากชุมสายย่อย RSU แล้วใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester ทดสอบสัญญาณ โดยเริ่มที่ MDF และที่ระยะทางห่างจากชุมสาย 1.8 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.14

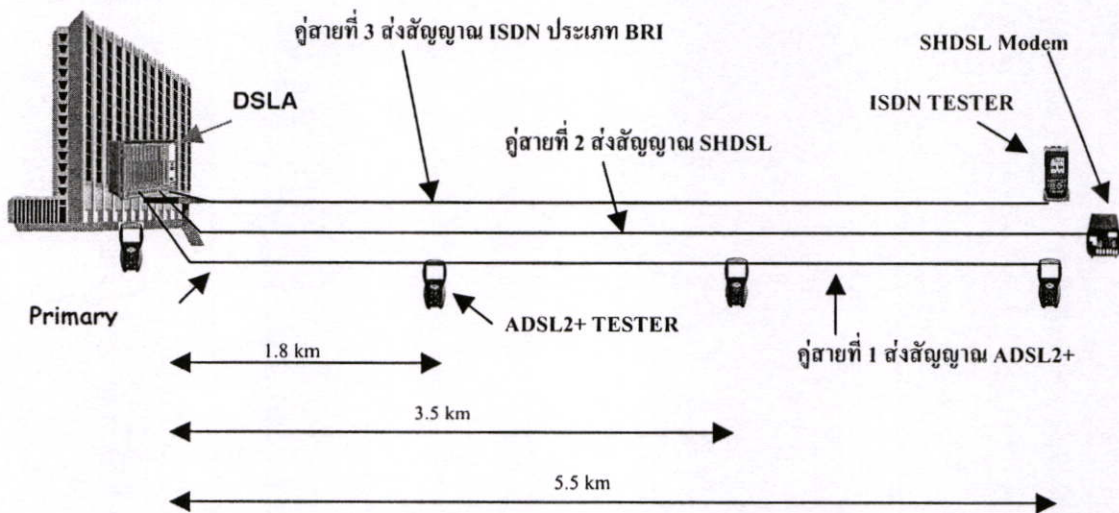


รูปที่ 5.14 การทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 และส่งสัญญาณ ISDN เข้าที่คู่สายที่ 3

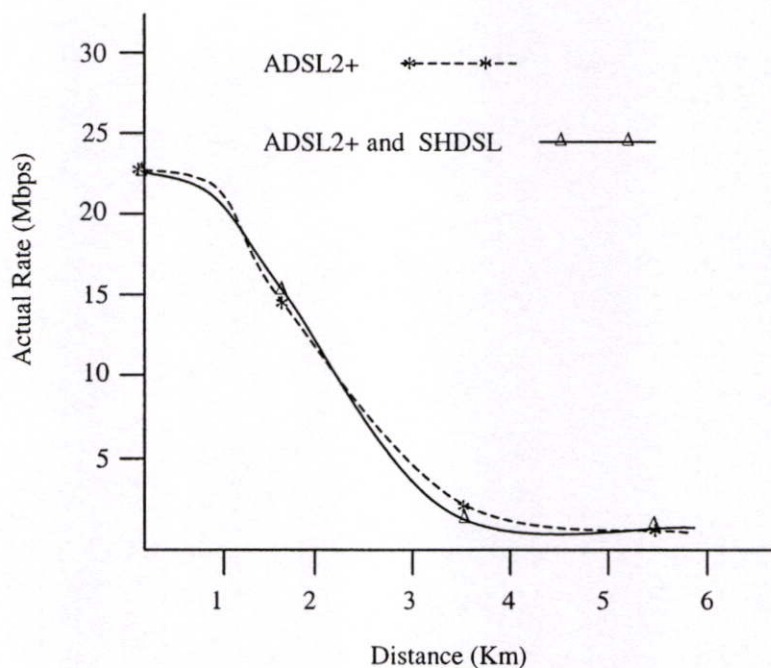
5.2.4 การทดสอบคู่สายครั้งที่ 4 โดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester

ทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 ส่งสัญญาณ SHDSL เข้าที่คู่สาย ที่ 2 และส่งสัญญาณ ISDN เข้าที่คู่สายที่ 3 จากชุมสายย่อย RSU แล้วใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester ทดสอบสัญญาณ โดยเริ่มที่ MDF และที่ระยะทางห่างจากชุมสาย 1.8 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.15

Central Office

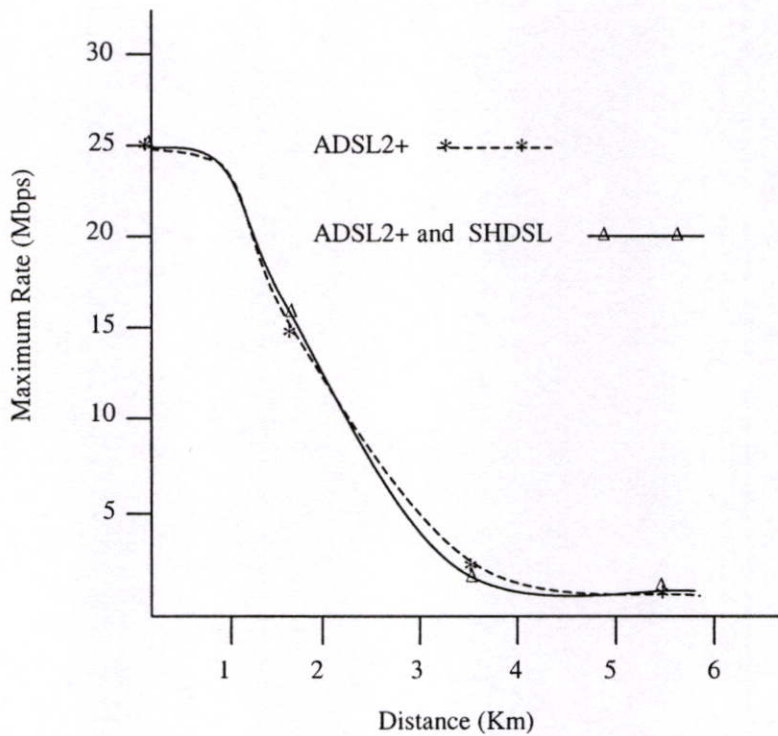


รูปที่ 5.15 การทดสอบคู่สายโดยส่งสัญญาณ ADSL2+ เข้าที่คู่สายที่ 1 ส่งสัญญาณ SHDSL เข้าที่คู่สายที่ 2 และส่งสัญญาณ ISDN เข้าที่คู่สายที่ 3



รูปที่ 5.16 อัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด 0.4 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

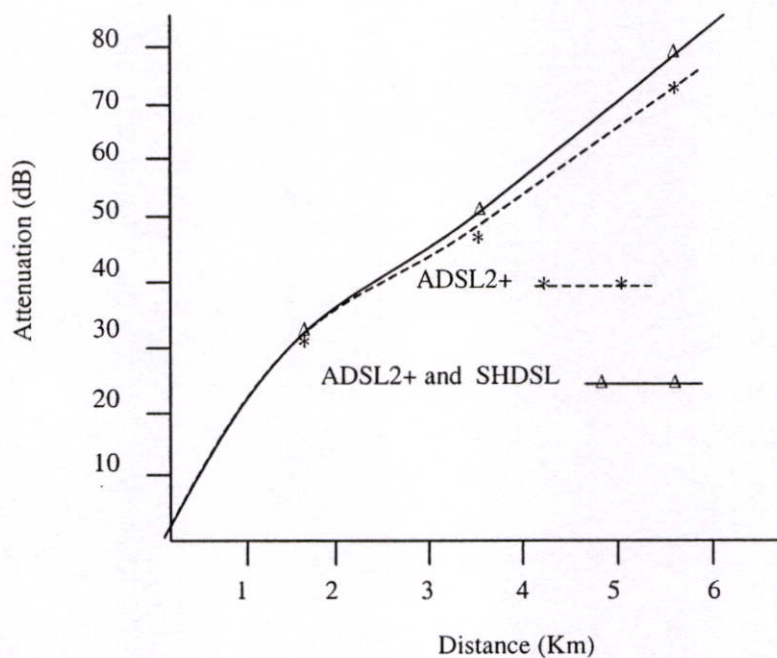
ในรูปที่ 5.16 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของการส่งสัญญาณขาลงในกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวบนสายเคเบิลเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ในคู่สายใกล้เคียงกัน ผลอัตราบิตของการส่งสัญญาณ ที่ระยะทางประมาณ 1.8 กิโลเมตร มีค่าอัตราบิตใกล้เคียงกัน และที่ระยะทางประมาณ 3.5 กิโลเมตร ค่าอัตราบิตการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวมีค่าสูงกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และที่ระยะทางประมาณ 5.5 มีค่าอัตราบิตแตกต่างกันเล็กน้อย



รูปที่ 5.17 อัตราความเร็วสูงสุดที่คู่สายสามารถให้บริการได้ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงดี เกเลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว เทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

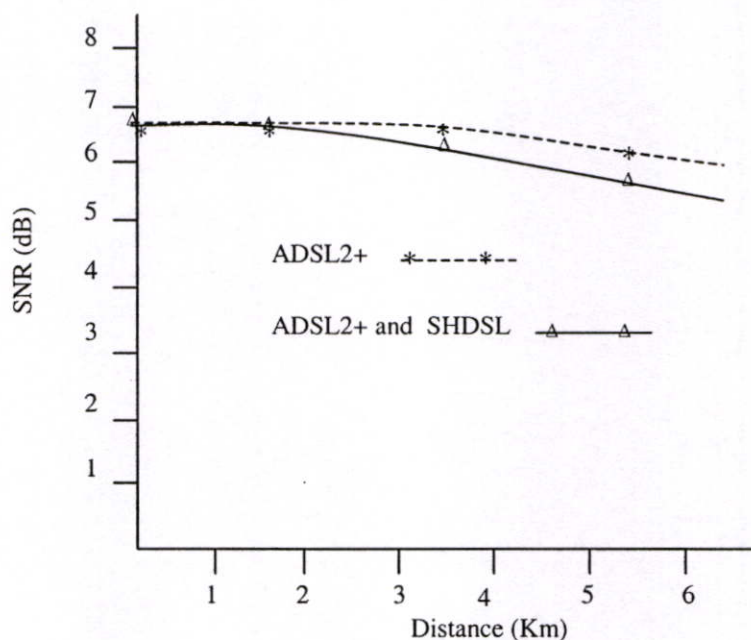
ในรูปที่ 5.17 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราความเร็วสูงสุดของการส่งสัญญาณขาลงในกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวบนสายเคเบิลเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ในคู่สายใกล้เคียงกัน ผลอัตราบิตของการส่งสัญญาณ ที่ระยะทางประมาณ 1.8 กิโลเมตร มีค่าอัตราบิตใกล้เคียงกัน และที่ระยะทางประมาณ 3.5 กิโลเมตร ค่าอัตราบิตการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว มีค่าสูงกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และที่ระยะทางประมาณ 5.5 มีค่าอัตราบิตแตกต่างกันเล็กน้อย

จากรูปที่ 5.16 และ 5.17 เป็นการทดสอบในคราวเดียวกันโดยเครื่องมือ ADSL2+ Tester จะแสดงผลของค่า Actual rate และ Maximum rate พร้อมกัน โดยค่า Actual rate แสดงค่าอัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของการรับส่งสัญญาณ ADSL2+ ในขณะนั้น และค่า Maximum rate แสดงถึงค่าอัตราความเร็วสูงสุดที่คู่สายนั้นสามารถรองรับการรับส่งสัญญาณ ADSL2+ ได้



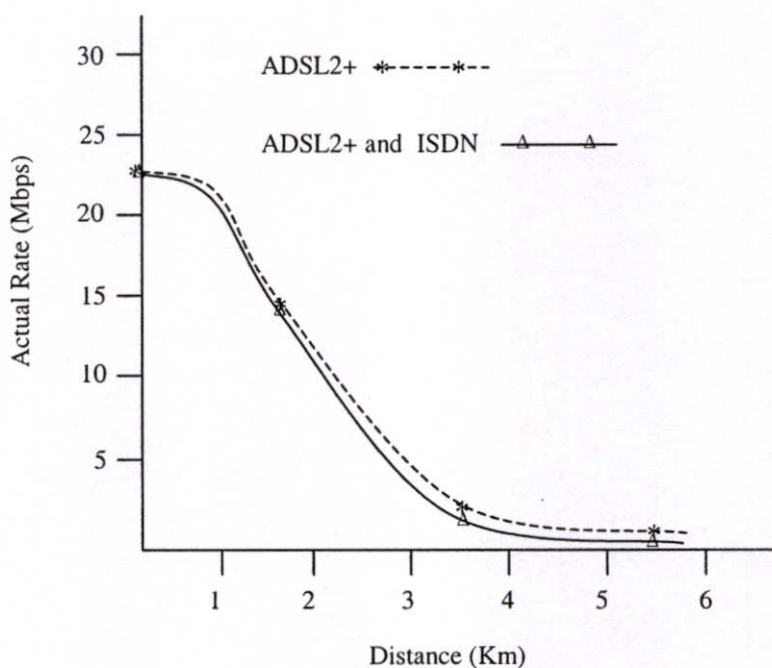
รูปที่ 5.18 ค่าลดทอนในคู่สายของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือ สายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.18 แสดงผลการทดสอบค่าลดทอนในคู่สายกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ค่าลดทอน attenuation (ATT) ของการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ในคู่สายใกล้เคียงมีค่าลดทอนในคู่สายมากกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกทำให้ค่าลดทอนในคู่สายเพิ่มขึ้น



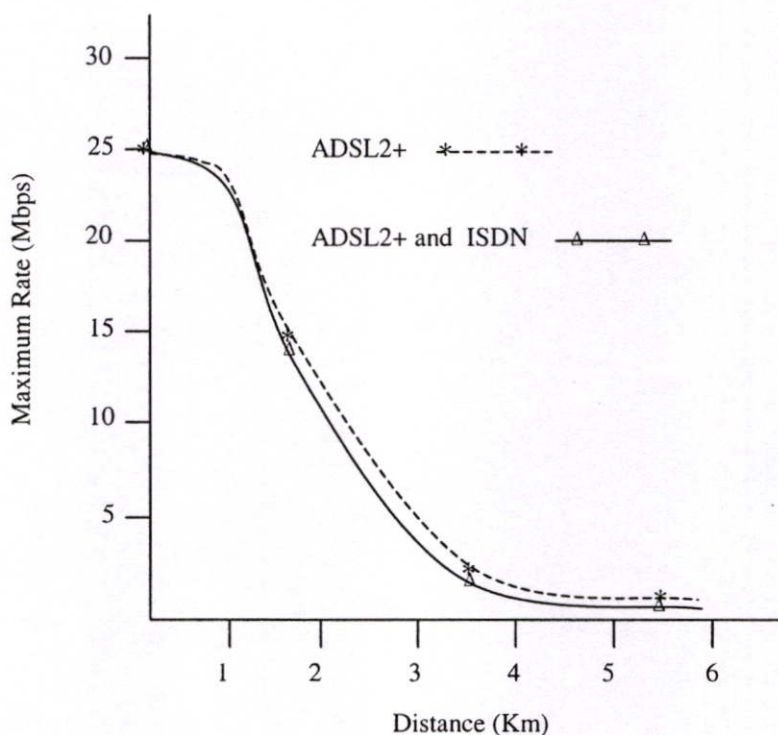
รูปที่ 5.19 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว เทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.19 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในคู่สายกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว เทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ค่าของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน Signal to Noise Ratio (SNR) ของการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ในคู่สายใกล้เคียง มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในสายน้อยกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในคู่สายลดลง



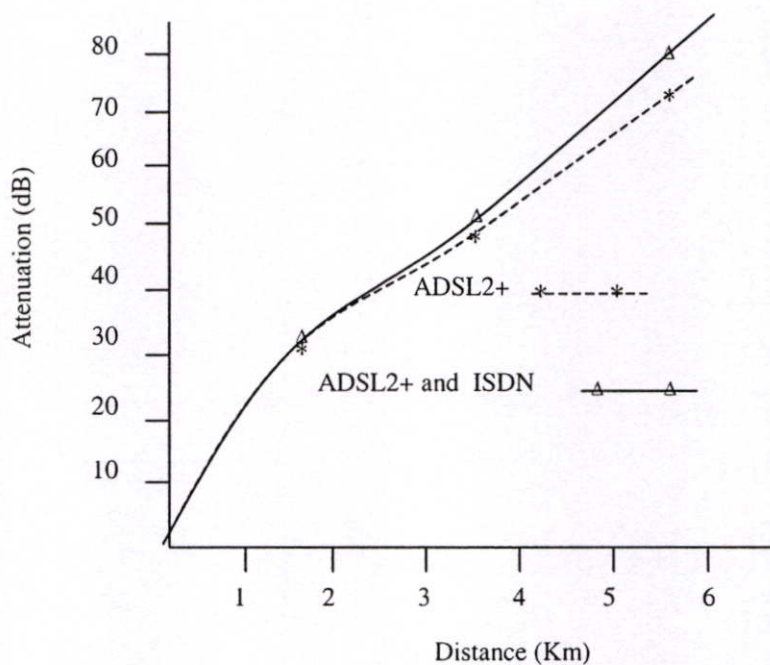
รูปที่ 5.20 อัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด 0.4 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.20 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของการส่งสัญญาณขาลงในกรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวบนสายเคเบิลเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ในคู่สายใกล้เคียง ผลอัตราบิตของการส่งสัญญาณ ที่ระยะทางประมาณ 1.8 กิโลเมตร มีค่าอัตราบิตใกล้เคียงกัน และที่ระยะทางประมาณ 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ค่าอัตราบิตการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวมีค่าสูงกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN



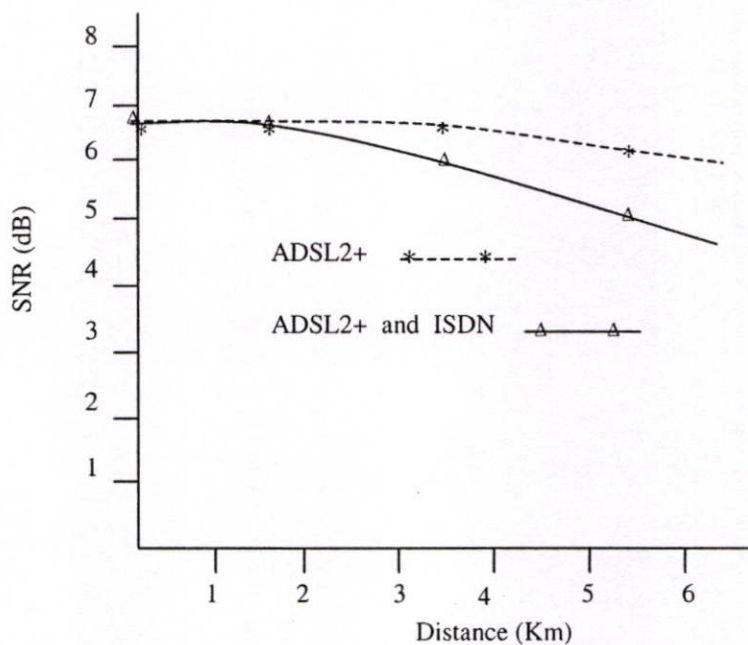
รูปที่ 5.21 อัตราความเร็วสูงสุดที่คู่สายสามารถให้บริการได้ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงดี เกลียขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.21 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราความเร็วสูงสุดของการส่งสัญญาณขาลงในกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวบนสายเคเบิลเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ในคู่สายใกล้เคียง ผลอัตราบิตของการส่งสัญญาณ ที่ระยะทางประมาณ 1.8 กิโลเมตร มีค่าอัตราบิตใกล้เคียงกัน และที่ระยะทางประมาณ 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ค่าอัตราบิตการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว มีค่าสูงกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN



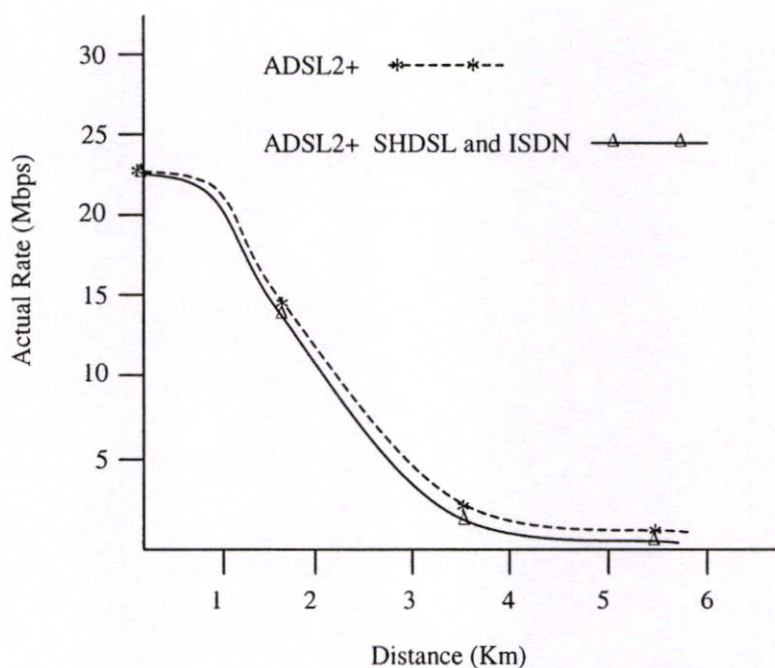
รูปที่ 5.22 ค่าลดทอนในคู่สายของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือ สายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.22 แสดงผลการทดสอบค่าลดทอนในคู่สายกรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ค่าลดทอน ATT ของการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ในคู่สายใกล้เคียงมีค่าลดทอนในคู่สายมากกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนชนิด ใจั่วแทรกทำให้ค่าลดทอนในคู่สายเพิ่มขึ้น



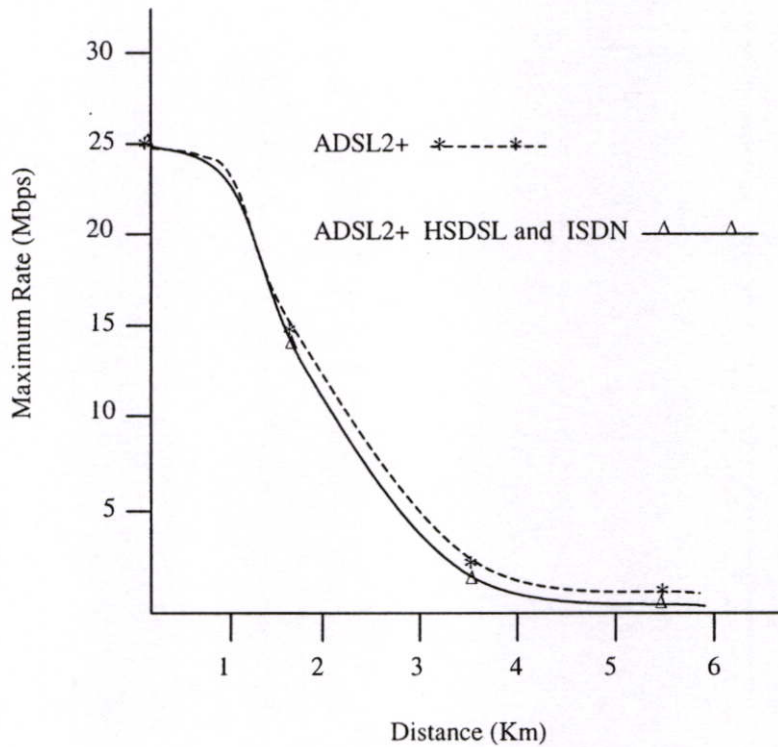
รูปที่ 5.23 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงดี เกลียขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.23 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในคู่สายกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ค่าของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR ของการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ ISDN ในคู่สายใกล้เคียง มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในสายน้อยกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในคู่สายลดลง



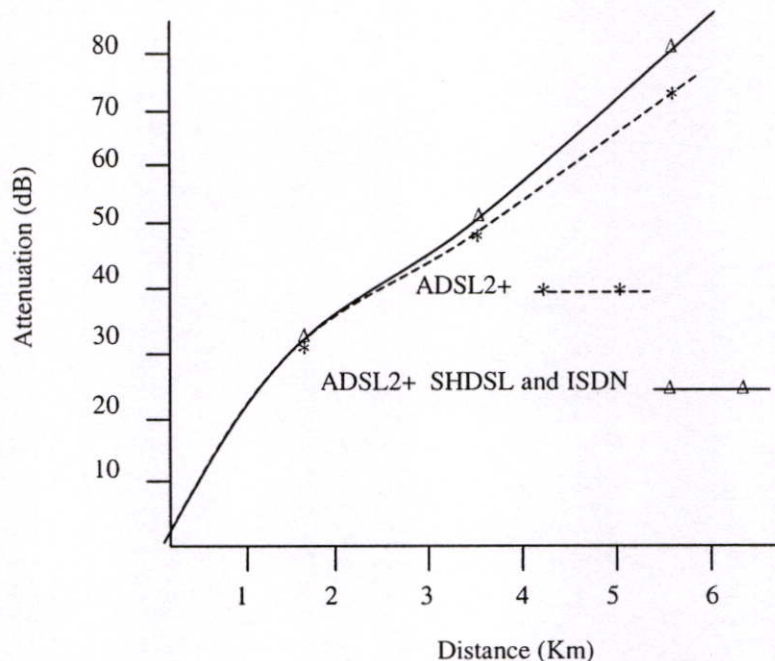
รูปที่ 5.24 อัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด 0.4 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.24 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราความเร็วที่ใช้งานได้จริงของการส่งสัญญาณลงในกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวบนสายเคเบิลเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ในคู่สายใกล้เคียง ผลอัตราบิตของการส่งสัญญาณ ที่ระยะทางประมาณ 1.8 กิโลเมตร มีค่าอัตราบิตใกล้เคียงกัน และที่ระยะทางประมาณ 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ค่าอัตราบิตการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวมีค่าสูงกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN



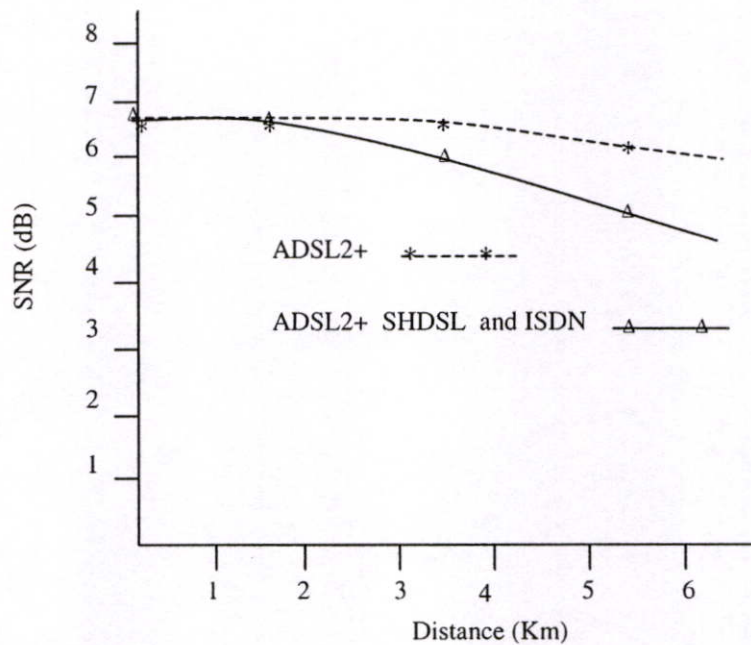
**รูปที่ 5.25** อัตราความเร็วสูงสุดที่คู่สายสามารถให้บริการได้ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงดี เกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว เทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.25 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราความเร็วสูงสุดของการส่งสัญญาณขาลงในกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวบนสายเคเบิลเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ในคู่สายใกล้เคียง ผลอัตราบิตของการส่งสัญญาณ ที่ระยะทางประมาณ 1.8 กิโลเมตร มีค่าอัตราบิตใกล้เคียงกัน และที่ระยะทางประมาณ 3.5 และ 5.5 กิโลเมตร ค่าอัตราบิตการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว มีค่าสูงกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN



รูปที่ 5.26 ค่าลดทอนในคู่สายของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตีเกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือ สายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.26 แสดงผลการทดสอบค่าลดทอนในคู่สายกรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ค่าลดทอน ATT ของการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ในคู่สายใกล้เคียงมีค่าลดทอนในคู่สายมากกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกทำให้ค่าลดทอนในคู่สายเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.27 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของ ADSL2+ บนคู่สายทองแดงตี

เกลียวขนาด .04 มิลลิเมตร หรือสายเบอร์ 26 AWG กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว เทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ที่อยู่ใน binder เดียวกัน

ในรูปที่ 5.27 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในคู่สายกรณีที่ส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว เทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ค่าของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR ของการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ในคู่สายใกล้เคียง มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในสายน้อยกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในคู่สายลดลง

### 5.3 สรุปผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ผลกระทบของสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรกที่เกิดจากความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของอุปกรณ์ที่ใช้งานในคู่สายข้างเคียง ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าลดลง เมื่อมีจำนวนคู่สายที่ใช้บริการ DSLs เพิ่มขึ้นและระยะทางที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester คือ กรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL ในคู่สายข้างเคียง มีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียว และกรณีส่งสัญญาณ ADSL2+ เพียงอย่างเดียวเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และ ISDN ในคู่สายข้างเคียง มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL และผลจากการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester การส่งสัญญาณ ISDN ร่วมกับ ADSL2+ มีผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าการส่งสัญญาณ ADSL2+ ร่วมกับ SHDSL อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณ SHDSL และ ISDN ในคู่สายข้างเคียงเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของ ADSL2+ ต่ำลง

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิเคราะห์

ADSL2+ เป็นอุปกรณ์ที่มีการรับส่งสัญญาณที่เร็วกว่าแอนะล็อกโมเด็ม และ ADSL เพราะ ADSL2+ สามารถส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้บริการด้วยความเร็วมากกว่า 20 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 1.5 กิโลเมตร โดยการเพิ่มแบนด์วิดท์ของสัญญาณขาลง (Downstream) เป็น 2 เท่าของ ADSL (จาก 1.1 MHz เพิ่มเป็น 2.2 MHz) และมีอัตราขาขึ้น (Upstream) ความเร็ว 1 MHz ADSL2+ เหมาะสำหรับการใช้งานด้าน Broadband service เช่น High speed internet, IP phone, Video phone, IP TV Broadcast และ Video on demand เพราะปัจจุบันอาคารสำนักงาน บ้านพักอาศัยในนครหลวง และตามเมืองแหล่งท่องเที่ยว มีความต้องการเพื่อใช้ในการค้นหาข้อมูลในการทำงาน และการศึกษา รวมทั้งเพื่อความบันเทิงที่สามารถเลือกได้ เช่น โหลดภาพยนตร์ วีดีโอ หรือเพลง ผ่านบริการ Video on demand ดังนั้นหากผู้ใช้บริการต้องการใช้บริการ Broadband service พร้อมกันหลาย ๆ บริการ เช่น ดู TV ผ่าน IP TV Broadcast และใช้ High speed internet พร้อมกัน ต้องมีความเร็วในการโหลดข้อมูลดังกล่าวด้วยความเร็วประมาณ 3 Mbps จึงจะสามารถใช้บริการได้อย่างเหมาะสม และการให้บริการ ADSL2+ สามารถใช้กับคู่สายโทรศัพท์พื้นฐานที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ โดยใช้คู่สายทองแดงดีเกลือ 1 คู่สายเท่านั้น เพื่อรองรับการให้บริการ

การให้บริการ ADSL2+ มีปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพของ ADSL2+ ด้อยลง คือ สัญญาณรบกวนซึ่งมีหลายชนิด เช่น สัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด Near End Crosstalk (NEXT) สัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด Far End Crosstalk (FEXT) สัญญาณรบกวนอิมพัลส์ และสัญญาณวิทยุ วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด NEXT ซึ่งเป็นสัญญาณที่ส่งจากเครื่องส่งมารบกวนสัญญาณที่เครื่องรับฝั่งเดียวกัน และสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด FEXT เป็นสัญญาณที่ส่งจากเครื่องส่งด้านหนึ่ง ไปรบกวนสัญญาณที่เครื่องรับของอุปกรณ์ชนิดอื่นในฝั่งตรงข้าม สัญญาณรบกวนไขว้แทรกเกิดจากคู่สายข้างเคียงที่มีการใช้งานอุปกรณ์อื่นอยู่ เช่น HDSL และ ISDN และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ ADSL2+ โดยทำการจำลองการทำงานจากโปรแกรม MATLAB พร้อมทั้งทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ ADSL2+ Tester ทดสอบคู่สายใช้งานจริง เพื่อหาผลกระทบของสัญญาณรบกวนไขว้แทรกที่เกิดจากคู่สายข้างเคียง

การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงถึงการสูญเสียเนื่องจากฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณรบกวนชนิด ไขว้แทรก NEXT มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนคู่สายใช้งานมากขึ้นและความถี่สูงขึ้น การสูญเสียเนื่องจากฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณรบกวนชนิด ไขว้แทรก FEXT มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะทางไกลและที่ความถี่ต่ำ คู่สายข้างเคียงที่ใช้งาน HDSL และ ISDN ในคู่สาย

ทองแดงกลุ่มเดียวกัน ก่อให้เกิดสัญญาณไขว้แทรกขึ้นทำให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR ที่เกิดจาก NEXT และ FEXT มีค่าลดลง

จากการใช้เครื่องมือทดสอบคู่สายที่ใช้ ADSL2+ เปรียบเทียบกับการส่งสัญญาณ ADSL2+ พร้อมกับ HDSL และ ISDN ในคู่สายข้างเคียงกลุ่มเดียวกัน ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด NEXT และ FEXT ส่งผลให้ค่าลดทอนในคู่สายเพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำลง และอัตราบิตในการรับส่งสัญญาณมีค่าต่ำลง แสดงให้เห็นว่า NEXT และ FEXT มีผลกระทบต่อการให้บริการของ ADSL2+ ในการให้บริการร่วมกับบริการ DSL ชนิดอื่น ๆ และที่ระยะทางไกล ๆ ประสิทธิภาพของ ADSL2+ จะลดลง จากผลการทดลองด้วยเครื่องมือทดสอบคู่สายแสดงให้เห็นถึงผลกระทบดังกล่าว ดังนั้นในการให้บริการ ADSL2+ ควรพิจารณาในเรื่องของระยะทางในการให้บริการ ควรสร้างข่ายสายอยู่ในช่วงระยะทาง 3.5 กิโลเมตร ระหว่างอุปกรณ์ DSLAM ถึงผู้ใช้บริการ และบริการอื่น ๆ ที่มีการให้บริการอยู่ในสายเคเบิลเส้นเดียวกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการ Broadband service ดังนี้

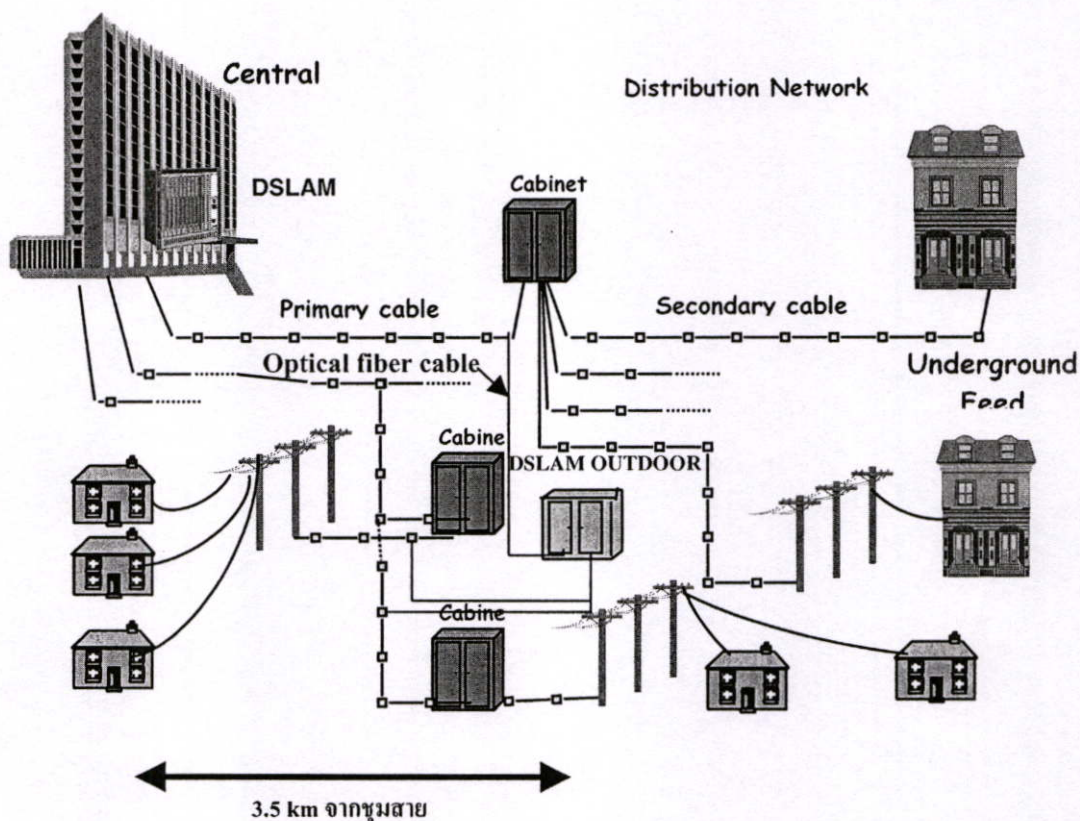
1. บริการ ADSL2+ ได้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น
2. ลดขนาดของสายเคเบิลทองแดงเพราะจะมีเพียงสายเคเบิลปลายทาง ซึ่งมีขนาด 25 – 400 คู่สายเท่านั้น ช่วยลดการเกิดสัญญาณรบกวนไขว้แทรกชนิด NEXT
3. ระยะทางข่ายสายสั้นลงช่วยลดค่าลดทอนทางสาย (Attenuation) ให้ต่ำลง
4. ระยะทางข่ายสายสั้นลงทำให้ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) มีค่าสูงขึ้น
5. ให้บริการ Broadband service ที่มีอัตราบิต (Bit rate) ได้ตามความต้องการของผู้ใช้บริการ

**การแก้ปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวนชนิดไขว้แทรก และเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการ ADSL2+**

การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการที่ใช้บริการอยู่บนข่ายสายท้องถิ่นเดิม และผู้ใช้บริการที่ขยายสร้างข่ายสายใหม่ ต้องหาวิธีการนำอุปกรณ์ DSLAM ไปติดตั้งให้ใกล้กับกลุ่มผู้ใช้บริการ โดยพิจารณาจากประเภทของผู้ใช้บริการและจำนวนความต้องการของผู้ใช้บริการ เพื่อความเหมาะสมกับจำนวน ขนาด และชนิดของอุปกรณ์ DSLAM ที่สามารถให้บริการได้เพียงพอและมีประสิทธิภาพดังนี้

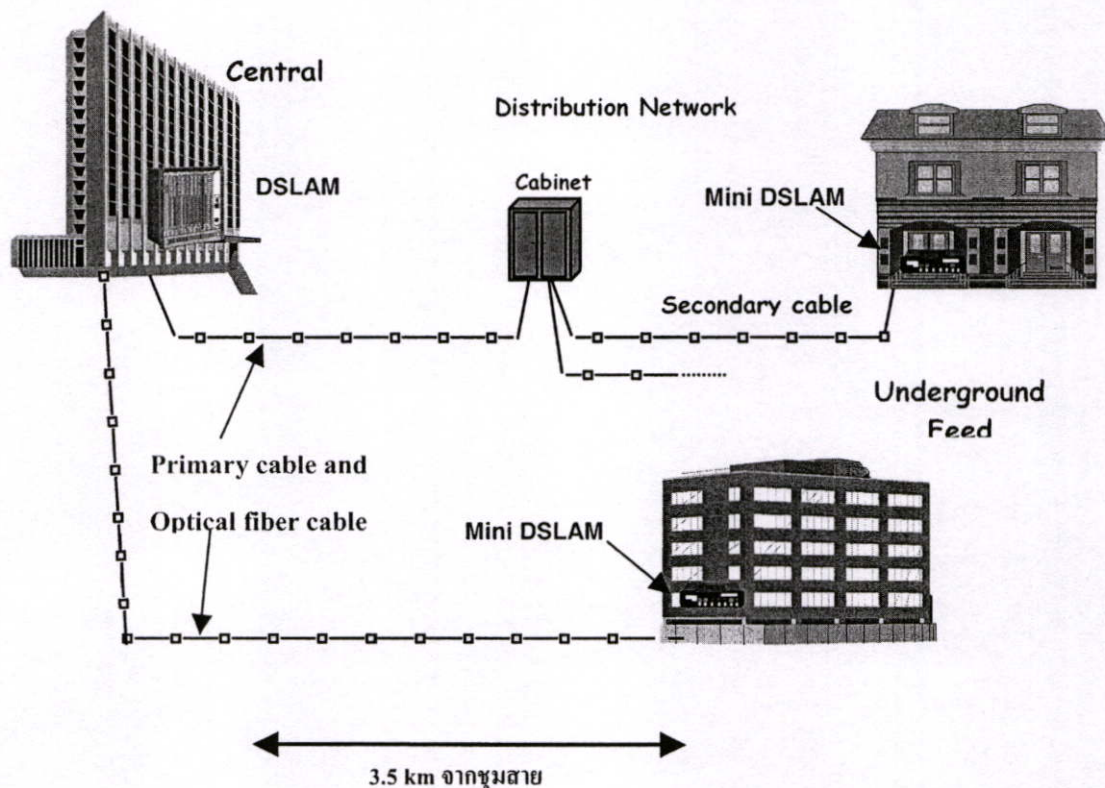
## 1. การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการบนข่ายสายทองถิ่นเดิม

1.1 ข่ายสายทองถิ่นเดิมที่ให้บริการกับผู้ใช้บริการประเภทบ้านพักอาศัยและธุรกิจขนาดเล็ก ให้บริการ ADSL2+ โดยการนำอุปกรณ์ DSLAM Outdoor ติดตั้ง ณ บริเวณกลุ่มผู้ใช้บริการที่มีความต้องการใช้บริการ ADSL2+ โดยมีระยะทางห่างจากชุมสายทองถิ่นประมาณ 3.5 กิโลเมตร เพื่อการให้บริการได้อย่างทั่วถึง แสดงดังรูปที่ 6.1



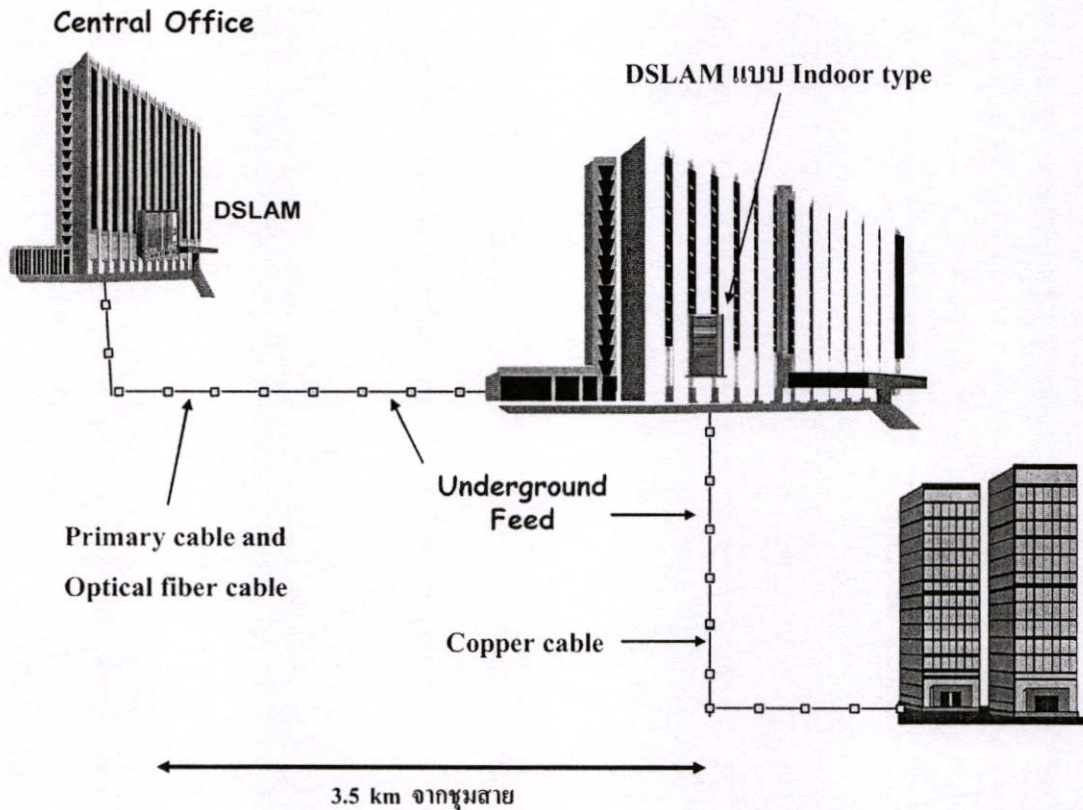
รูปที่ 6.1 การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการบนข่ายสายทองถิ่นเดิม ผู้ใช้บริการประเภทบ้านพักอาศัยและธุรกิจขนาดเล็ก

1.2 ข่ายสายท้องถิ่นเดิมที่ให้บริการกับผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือคอนโดมิเนียม ขนาดขนาดกลาง ให้บริการ ADSL2+ โดยการนำอุปกรณ์ Mini DSLAM ติดตั้ง ณ บริเวณอาคารของผู้ใช้บริการที่มีความต้องการใช้บริการ ADSL2+ โดยมีระยะทางห่างจากชุมสายท้องถิ่น ประมาณ 3.5 กิโลเมตร เพื่อให้การให้บริการได้อย่างเหมาะสม แสดงดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการบนข่ายสายท้องถิ่นเดิม ผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือคอนโดมิเนียม ขนาดกลาง

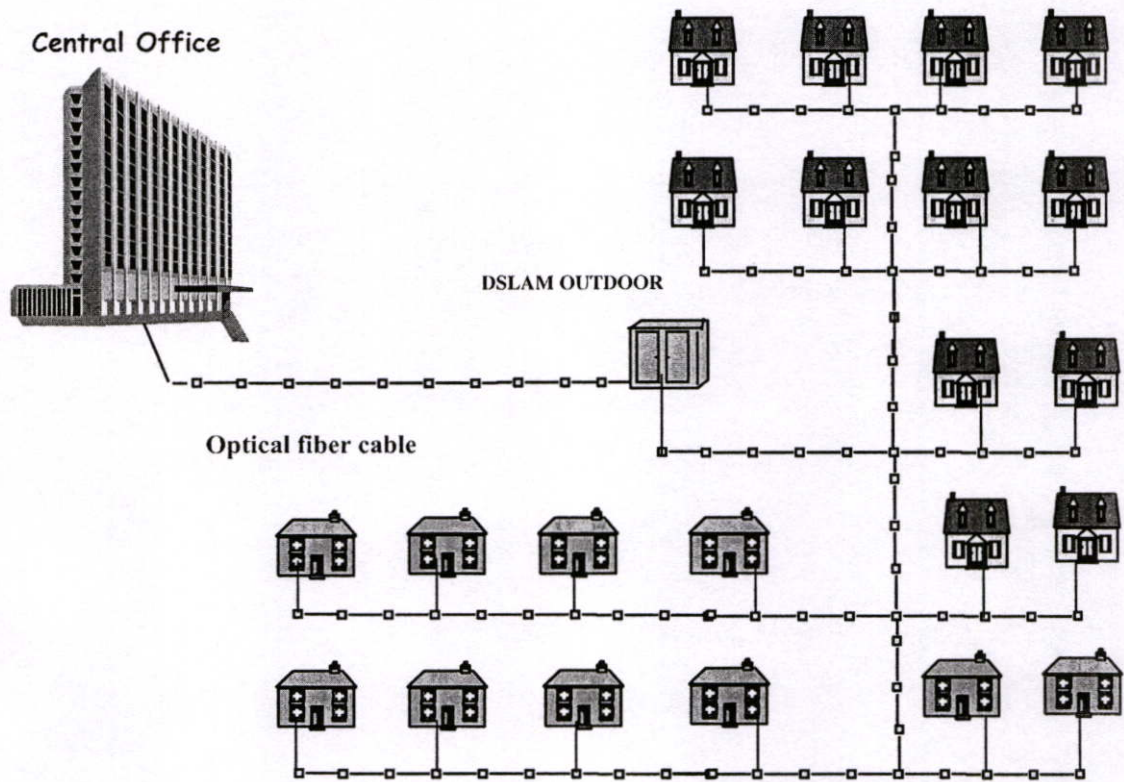
1.3 ข่ายสายท้องถิ่นเดิมที่ให้บริการกับผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือคอนโดมิเนียม ขนาดขนาดใหญ่ ให้บริการ ADSL2+ โดยการนำอุปกรณ์ DSLAM แบบ Indoor type ติดตั้ง บริเวณอาคารของผู้ใช้บริการที่มีความต้องการใช้บริการ ADSL2+ โดยมีระยะทางห่างจากชุมสายท้องถิ่นประมาณ 3.5 กิโลเมตร เพื่อให้การให้บริการได้อย่างเหมาะสม แสดงดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการบนข่ายสายท้องถิ่นเดิม ผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือคอนโดมิเนียม ขนาดใหญ่

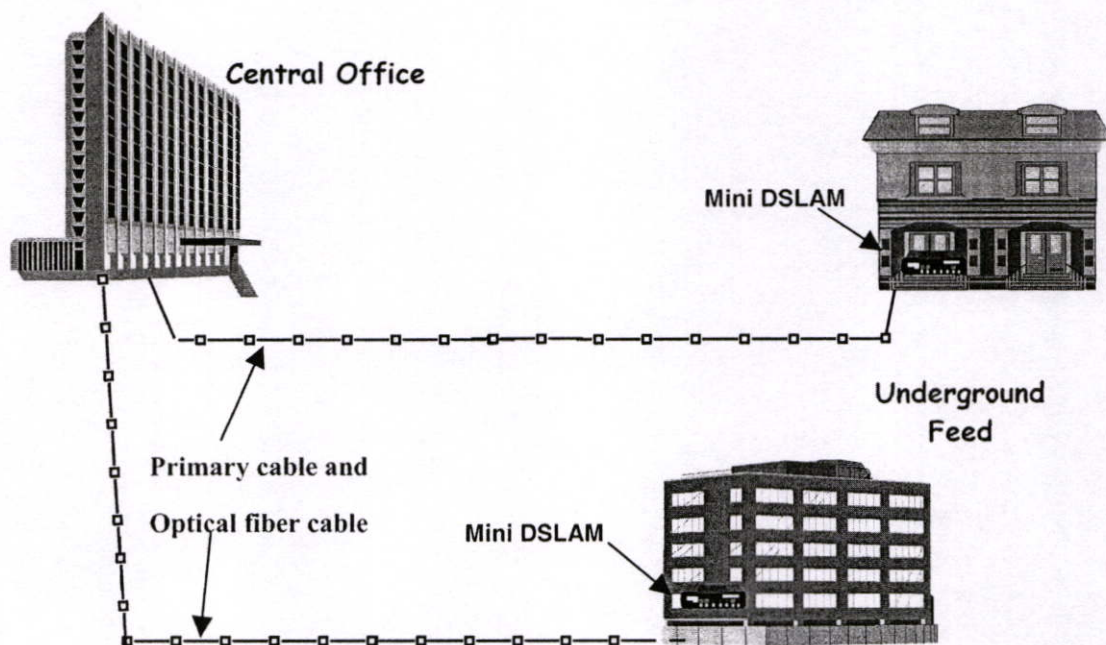
## 2. การให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการรายใหม่โดยการสร้างข่ายสายท้องถิ่น

2.1 การสร้างข่ายสายท้องถิ่นใหม่เพื่อให้บริการกับผู้ใช้บริการประเภทบ้านพักอาศัย (หมู่บ้านสร้างใหม่) ให้บริการ ADSL2+ โดยการนำอุปกรณ์ DSLAM Outdoor ติดตั้ง ณ บริเวณที่ตั้งของโครงการ เพื่อการให้บริการได้อย่างเหมาะสม แสดงดังรูปที่ 6.4



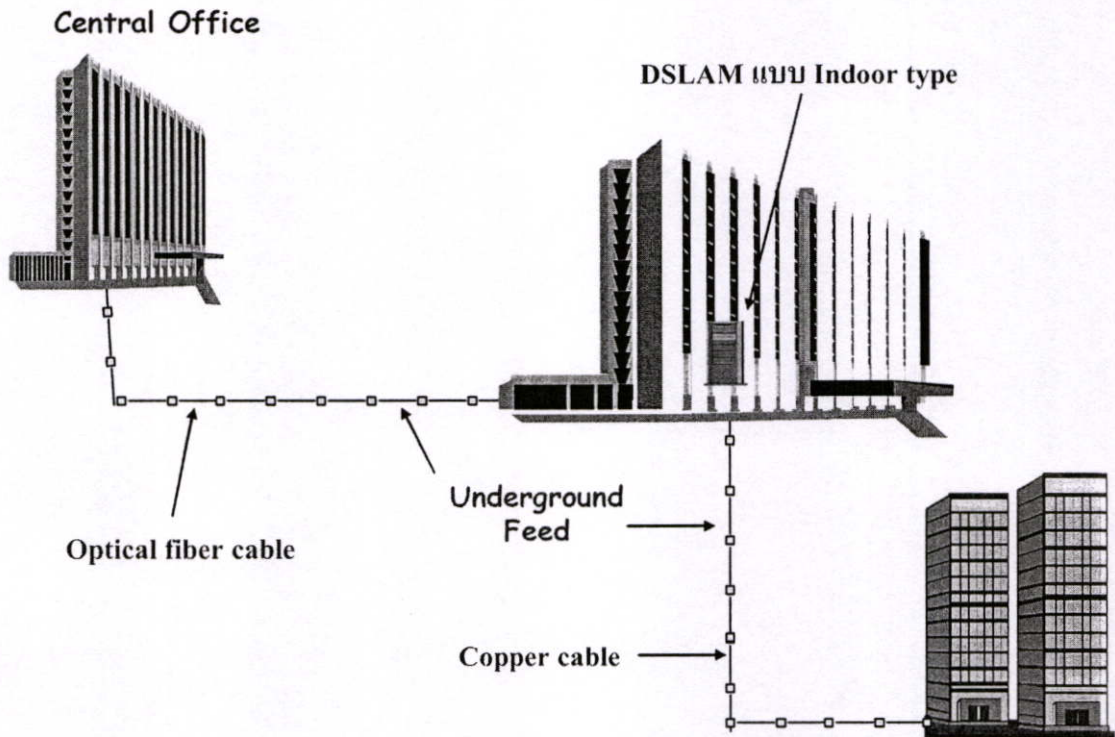
รูปที่ 6.4 การสร้างข่ายสายใหม่ให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการประเภท บ้านพักอาศัย(หมู่บ้านสร้างใหม่)

2.2 การสร้างข่ายสายท้องถิ่นใหม่เพื่อให้บริการกับผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือ คอนโดมิเนียม ขนาดขนาดกลาง ให้บริการ ADSL2+ โดยการนำอุปกรณ์ Mini DSLAM ติดตั้ง ณ บริเวณอาคารของโครงการ เพื่อการให้บริการได้อย่างเหมาะสม แสดงดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 การสร้างข่ายสายใหม่ให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือ คอนโดมิเนียม ขนาดขนาดกลาง

2.3 การสร้างข่ายสายท้องถิ่นใหม่เพื่อให้บริการกับผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือ คอนโดมิเนียม ขนาดขนาดใหญ่ ให้บริการ ADSL2+ โดยการนำอุปกรณ์ DSLAM แบบ Indoor type ติดตั้ง ณ บริเวณอาคารของโครงการ เพื่อการให้บริการได้อย่างเหมาะสม แสดง ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 การสร้างข่ายสายใหม่ให้บริการ ADSL2+ กับผู้ใช้บริการประเภทอาคารสำนักงาน หรือ คอนโดมิเนียม ขนาดขนาดใหญ่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Rauschmayer, **ADSL/VDSL Principles**, United States of America, 1999.
- [2] W. Y. Chen, “**Architecture and Performance Simulation of Single Pair HDSL,**” IEEE Trans. Communication, Vol.3, pp.1421-1425, June 1996.
- [3] T. Starr, J.M. Cioffi and P. Silverman, Understanding **Digital Subscriber Line Technology**, Prentice-Hall. Inc. 1999.
- [4] G. A. Zimmerman, “**Achievable rates vs Operating Characteristics of Local Loop Transmission, HDSL, HDSL2, ADSL and VDSL,**” IEEE Trans. Communication, Vol.1, pp.573-577, November 1998.
- [5] W. Y. Chen and D. L. Waring, “**ADSL Noise Environment and Potential System Performance,**” IEEE Trans. Communication, Vol.1, pp.451-455, May 1994.
- [6] S. Androulidakis, D. Kagklis, T. Doukoglou and S. Skenter “**ADSL Against SHDSL for Symmetric Broadband Access Network,**” Electronics Letters, Vol.40, No.16, August 2004.
- [7] **Asymmetric Digital Subscriber Line(ADSL) Transceiver Extended Bandwidth ADSL2 (ADSL2+)**, Annex J-ITU-T G.992.5 ADSL2 Tstandard, May 2003.
- [8] Telephone Organization of Thailand, **Technical Operating Manual**, Outside Plan, TCP 263.
- [9] D. Tugal, and O. Tugal, **Data Transmission**, Mc Graw-hill, Second Edition, 1980.
- [10] Telephone Organization of Thailand, **Technical Specification for Cable**, Issued : December, 1981.
- [11] W. Y. Chen “**Broadcast Digital Subscriber Line,**” IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 13, No. 9, pp.1550-1557, December 1995 .
- [12] แผนวิชาสายต่อนอก กองวิชา การเทคโนโลยี ส่วนการฝึกอบรม ฝ่ายพัฒนาทรัพยากรบุคคล  
องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย. การยกระดับคุณภาพสายสายเพื่อรองรับบริการสื่อ  
สารข้อมูล. กรุงเทพฯ:
- [13] ฝ่ายพัฒนาทรัพยากรบุคคล องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย. การวางแผนข่ายทางสาย สาขา  
วิชาสายต่อนอก. กรุงเทพฯ:

- [14] ณรงค์ เหมกรณ์. 2533. การสื่อสารดาวเทียม. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [15] J. Werner, "The HDSL Environment," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 9, No. 6, pp.785-800, August 1991.
- [16] C. Valenti, "NEXT and FEXT Models for Twisted-Pair North American Loop Plant," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 20, No. 5, pp.893-900, June 2002.
- [17] S. Galli, C. Valenti and K. J. Kenneth, "A Frequency-Domain Approach to Crosstalk Identification in xDSL Systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 19, No. 8, pp.1497-1506, August 2001.
- [18] C. Zeng, C. Aldana and A. Salvekar, "Crosstalk Identification in xDSL Systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 19, No. 8, pp.1488-1496, August 2001.
- [19] R. Hormis, "Monte Carlo FEXT Cancellers for DSL Channels," IEEE Transactions on Circuits and System –I: Regular Paper, Vol. 52, No. 9, pp.1894-1908, September 2005.
- [20] J. T. Aslnis, "Achievable Information Rates on Digital Subscriber Loop: Limiting Information Rates with Crosstalk Noise," IEEE Transactions on communications, Vol. 40, No. 2, pp.361-372, February 1992.
- [21] S. V. Ahamed, "A Tutorial on Tow-Wire Digital Transmission in the Loop Plant," IEEE Transactions on communications, Vol.Com-29, No. 11, pp.1554-1564, November 1981.
- [22] K. J. Kerpez, "High Bit Rate Asymmetric Digital Communication Over Telephone Loops," IEEE Transactions on communications, Vol. 43, No. 6, pp.2038-2049, June 1995.

## ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] T. Kunkongsatian, V.Chatchavong, N.Anantrasirichai, and C.Benjangkaprasert, “**Adjacent Signal Crosstalk Effect on ADSL2+ Transmission Performance,**” Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems 2005 (ICIS), Kuala Lumpur Malaysia, ICIS – 360.pdf, 1 - 3 December 2005.

## ประวัติผู้เขียน

นายธนารักษ์ ขุนคงเสถียร เกิดเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2515 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2539

ปี พ.ศ. 2535 เข้าทำงานที่ องค์กรโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ตำแหน่ง ช่าง 2 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง วิศวกร 6 สังกัด ส่วนบริการลูกค้าจังหวัดยะลาที่ 4.1 ศูนย์บริการลูกค้าเบตง บริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน)