บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาที่จะกล่าวถึงในบทนี้ประกอบด้วย หัวข้อ 2.1 การสื่อสารเสียง ซึ่งอธิบายถึงขั้นตอนในการสื่อสารเสียงบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต การบีบอัดเสียงโดยเน้นที่การบีบอัดเสียงด้วย G.723.1 หัวข้อ 2.2 กล่าวถึงโปรโตคอลที่ใช้สำหรับการสื่อสารเสียงบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ตซึ่งก็คือ โปรโตคอลที่ชื่อว่า Real-time Transport Protocol (RTP) หัวข้อ 2.3 เทคนิคการพยากรณ์ และสุดท้ายคือ หัวข้อ 2.4 เทคนิควิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method)

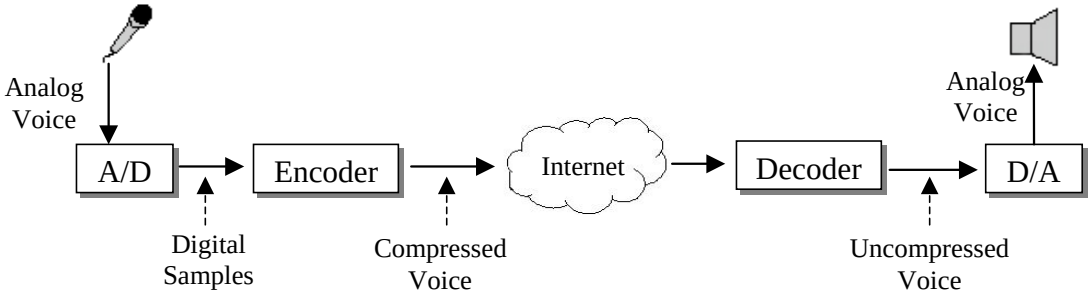
2.1 การสื่อสารเสียง

หลักการพื้นฐานของการสื่อสารเสียงที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้หมายถึงการสื่อสารเสียงบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการแปลงสัญญาณเสียงจากอนาล็อก (Analog) ให้เป็นดิจิตอล (Digital) รวมทั้งต้องมีการลดขนาดของข้อมูลเสียงก่อนจะบรรจุลงในแพ็กเก็ตและส่งให้ผู้รับ และนอกจากนี้ผู้รับจะต้องเข้าใจข้อมูลที่ได้รับจากผู้ส่ง มิฉะนั้นผู้รับก็จะไม่สามารถนำข้อมูลไปประมวลผลได้ถูกต้อง ดังนั้นทั้งผู้รับและผู้ส่งจึงต้องใช้มาตรฐานในการสื่อสารเดียวกัน

2.1.1 ขั้นตอนในการสื่อสารเสียงบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต

ในการส่งเสียงพูดบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต ผู้ส่งจะต้องเปลี่ยนสัญญาณเสียงจากไมโครโฟนที่อยู่ในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อกให้เป็นดิจิตอลเสียก่อน โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter, A/D) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยปกติแล้วเสียงพูดของมนุษย์จะมีความถี่ไม่เกิน 4 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) [1] ดังนั้นอัตราการชักตัวอย่าง (Sampling Rate) ตามทฤษฎีของไนควิซต์ก็จะมีค่าเท่ากับ 8 กิโลเฮิรตซ์ (2 เท่าของความถี่สูงสุด) ซึ่งในระบบโทรศัพท์สาธารณะ (Public Switched Telephone Network, PSTN) ก็ใช้อัตราการชักตัวอย่างเท่ากับค่านี้เช่นกัน โดยในระบบโทรศัพท์ PSTN นั้นใช้วิธีการที่เรียกว่า Pulse Code Modulation (PCM) ในการแปลงระดับสัญญาณเสียงแบบอนาล็อกให้กลายเป็นค่าดิจิตอลที่เรียกว่า ค่าตัวอย่าง (Sample) โดยในกรณีที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการสื่อสารเสียงนั้น หน้าที่นี้เป็นของการ์ดเสียง เมื่อได้ข้อมูลเสียงในรูปแบบของดิจิตอลแล้วก็สามารถส่งข้อมูลเสียงผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตไปให้กับผู้รับได้ แต่เพื่อไม่ให้ปริมาณข้อมูลเสียงที่ส่งผ่านเครือข่ายมีมากเกินไปจึงต้องมีการบีบอัดข้อมูลเสียงเสียก่อน (Audio Compression) โดยผู้ส่งจะใช้ตัวเข้ารหัส (Encoder) ที่มีวิธีการเข้ารหัสตามมาตรฐานการบีบอัดที่เลือกใช้ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการบีบอัดเสียงจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ส่วนทางฝั่งของผู้รับก็จะต้องนำแพ็กเก็ตเสียงที่ได้รับมาถอดรหัส จากนั้นก็แปลงสัญญาณสียงจากดิจิตอลให้กลายเป็นอนาล็อกและส่งสัญญาณเสียงไปเล่น (Play) ออกทางลำโพง



รูปที่ 2.1 การส่งเสียงพูดในรูปแบบดิจิตอลบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต [1]

2.1.2 การบีบอัดเสียง (Audio Compression)

ในการส่งเสียงพูดผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตนั้น เพียงแต่การแปลงจากสัญญาณเสียงแบบอนาล็อกให้กลายเป็นข้อมูลเสียงแบบดิจิตอลนั้นยังไม่เพียงพอ สังเกตว่าในการแปลงสัญญาณเสียงจากอนาล็อกเป็นดิจิตอลซึ่งใช้อัตราการชักตัวอย่าง 8000 เฮิรตซ์ (ใน 1 วินาทีมีการชักตัวอย่าง 8000 ครั้ง) ถ้าหากใช้ข้อมูลดิจิตอล 8 บิตต่อหนึ่งค่าตัวอย่าง แบนด์วิดท์ที่ใช้ในการส่งข้อมูลก็จะเป็น 64 กิโลบิตต่อวินาที (kbps) และถ้าใช้ 16 บิตต่อค่าตัวอย่าง แบนด์วิดท์ก็เพิ่มเป็น 128 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงทีเดียว ยิ่งไปกว่านั้นถ้าหากมีผู้ที่ต้องการสื่อสารเสียงพร้อมกันหลายคู่สนทนาเครือข่ายที่มีแบนด์วิดท์อย่างจำกัดก็จะไม่สามารถรองรับได้ ผลที่ตามมาก็คือผู้รับก็จะได้ยินเสียงไม่ชัดเจน เสียงไม่ต่อเนื่อง หรืออาจจะฟังไม่รู้เรื่องเลยก็ได้ ซึ่งวิธีแก้ไขก็คือต้องมีการลดขนาดของข้อมูลเสียงก่อนที่จะส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย เทคนิคนี้เรียกว่า การบีบอัดเสียง

ในการบีบอัดเสียงนั้น วิธีการถอดรหัสจะต้องสอดคล้องกับวิธีการเข้ารหัส มิฉะนั้นจะไม่สามารถนำมาเสียงมาเล่นออกทางลำโพงได้ถูกต้อง สหภาพโทรคมนาคมนานาชาติ (International Telecommunication Union, ITU) ได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการบีบอัดเสียง (Audio Codec) เอาไว้หลายมาตรฐาน ตารางที่ เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของมาตรฐานการบีบอัดเสียงแต่ประเภท โดยในคอลัมน์ของ Quality MOS (Mean Opinion Score) [2] เป็นค่าที่แสดงคุณภาพของเสียง ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 5 จะเห็นว่า G.711[3] นั้นมีคุณภาพสูงที่สุดก็จริง แต่ก็มีอัตราบิต (Bit Rate) สูงถึง 64 kbps ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริงถ้าเครือข่ายมีแบนด์วิดท์ต่ำกว่านี้ เช่น ในการเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตผ่านทางเครือข่ายโทรศัพท์ซึ่งมีความเร็วอยู่ที่ 28.8 ถึง 56 กิโลบิตต่อวินาทีเท่านั้น ส่วน G.729[4] และ G.723.1 ก็มีคุณภาพใกล้เคียงกับ G.711 แต่มีอัตราบิตน้อยกว่า มาตรฐานทั้งสองจึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีมาตรฐานอื่น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมาตรฐานการบีบอัดข้อมูลเสียง[1]

Codec	Bit Rate (kbps)	Complexity compared with G.726	Algorithmic Delay	Quality MOS
G.711	64	very low	0.125	4.0
G.723.1	5.3*	8	37.5	3.9
G.723.1	6.3*	8	37.5	3.9
G.726	32	1	0.125	3.85
G.728	16	15	0.625	3.61
G.729	8	10	15	3.9
G.729A	8	6	15	3.7

*G.723.1 มี 2 อัลกอริทึม ซึ่งมีอัตราบิตต่างกันคือ 5.3 และ 6.3 กิโลบิตต่อวินาที

2.1.3 การบีบอัดเสียงด้วย G.723.1

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ G.723.1[5] ในการบีบอัดเสียง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้อธิบายถึงรายละเอียดของการบีบอัดเสียงชนิดนี้ G.723.1 มีอัลกอริทึมในการบีบอัดเสียงอยู่ 2 อัลกอริทึม อัลกอริทึมแรกคือ Multi-Pulse Maximum Likelihood Quantization (MP-MLQ) ซึ่งมีการบีบอัดข้อมูลเสียงโดยแบ่งเป็นเฟรมซึ่งเทียบเท่ากับเสียงพูด 30 มิลลิวินาที (ms) หรือ 240 ค่าตัวอย่าง โดยใช้ค่าตัวอย่างขนาด 16 บิต ผลจากการบีบอัดจะได้ข้อมูลที่มีขนาดลดลงเหลือ 24 ไบต์ต่อเฟรมเท่านั้น อัลกอริทึมนี้มีอัตราบิตเท่ากับ 6.4 กิโลบิตต่อวินาที แต่ในมาตรฐาน G.723.1 ได้ระบุว่าการบีบอัดโดยใช้อัลกอริทึมนี้มีอัตราบิต 6.3 กิโลบิตต่อวินาที เนื่องจากไม่ได้คิดในส่วนของบิตที่เป็นเฮดเดอร์ (Header) ส่วนอัลกอริทึมที่สองมีชื่อว่า Algebraic Code-Excited Linear Prediction (ACELP) ซึ่งบีบอัดข้อมูลเสียงจาก 240 ค่าตัวอย่าง (ค่าตัวอย่างมีขนาด 16 บิต) ได้เป็นข้อมูลขนาด 20 ไบต์ ทำให้อัลกอริทึมนี้มีอัตราบิตเป็น 5.3 กิโลบิตต่อวินาที สำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ MP-MLQ

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเสียง

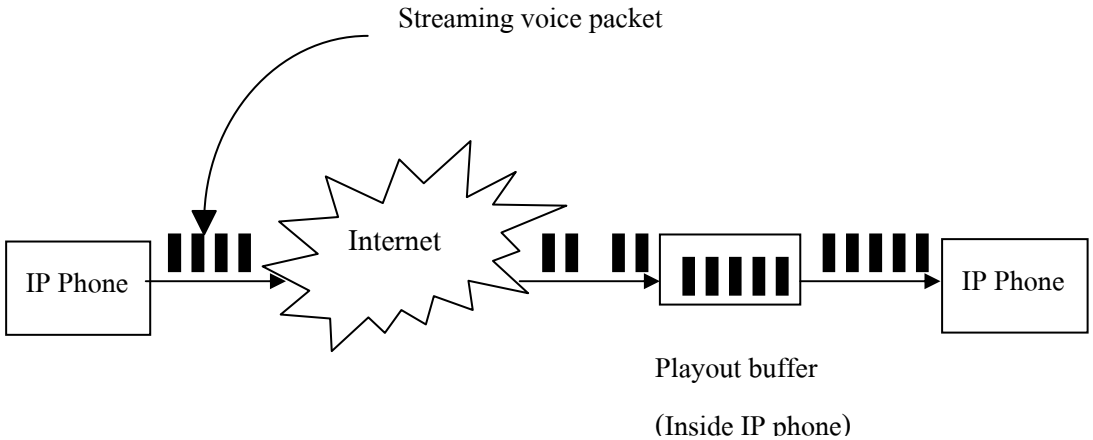
เนื่องจากเครือข่ายอินเตอร์เน็ตไม่ได้มีการรับประกันคุณภาพการบริการ ดังนั้นการสื่อสารเสียงบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ตจึงมีโอกาสที่คุณภาพของเสียงที่ผู้รับได้รับจะต่ำกว่าคุณภาพของเสียงต้นฉบับได้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเสียงมีดังนี้

2.1.4.1 เวลาหน่วง

เวลาหน่วง คือ เวลาในการเดินทางของเสียงจากไมโครโฟนของผู้ส่งไปถึงลำโพงของผู้รับ ในระบบโทรศัพท์ PSTN จะไม่เกิดปัญหานี้เนื่องจากในการโทรแต่ละครั้ง จะมีการจองทรัพยากรสำหรับแต่ละคู่สายเอาไว้และค่าเวลาหน่วงจะน้อยมาก ประมาณ 50 – 70 มิลลิวินาที [6] ในขณะที่เครือข่ายอินเตอร์เน็ตไม่สามารถที่จะรับประกันได้ว่าค่าเวลาหน่วงเป็นเท่าใด โดยปกติคนเราจะรู้สึกถึงผลกระทบของเวลาหน่วงเมื่อค่าเวลาหน่วงสูงกว่า 250 มิลลิวินาที [7]

2.1.4.2 จิตเตอร์ (Jitter)

จิตเตอร์เกิดจากการที่เวลาหน่วงของแต่ละแพ็กเก็ตไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากในการเดินทางของแพ็กเก็ตบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ตนั้น แต่ละแพ็กเก็ตอาจจะใช้เส้นทางที่ต่างกันได้แม้จะมีปลายทางที่เดียวกัน รวมถึงสภาพความคับคั่งของเครือข่ายที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาก็สามารถทำให้เกิดจิตเตอร์ได้เช่นกัน ปัญหานี้จึงทำให้สัญญาณเสียงที่ได้รับมีอาการกระตุกและฟังได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงต้องมีการใช้บัฟเฟอร์เพื่อรวบรวมข้อมูลก่อนเพื่อให้ข้อมูลมีความต่อเนื่อง แล้วจึงส่งไปประมวลผลและเล่นออกทางลำโพงต่อไป การใช้บัฟเฟอร์ขนาดใหญ่จะสามารถกำจัดจิตเตอร์ได้ดีขึ้น แต่ก็มีผลทำให้มีเวลาหน่วงมากขึ้น แต่ถ้าใช้บัฟเฟอร์ขนาดเล็กเกินไปจะทำให้กำจัดจิตเตอร์ได้ไม่ดีนัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีที่ใช้ในการปรับขนาดของบัฟเฟอร์ ให้เหมาะสม



รูปที่ 2.2 การแก้ไข Jitter ที่เกิดกับแพ็กเกตข้อมูลเสียงโดยการใช้บัฟเฟอร์ข้อมูลเสียงที่ภาครับ

2.1.4.3 การสูญหายของแพ็กเก็ต (Packet Loss)

การที่แพ็กเก็ตสูญหายนั้นส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากความคับคั่งของเครือข่าย เพราะในขณะที่เราเตอร์ทำการประมวลผลแพ็กเกตหนึ่งอยู่ ถ้ามีอีกแพ็กเกตเข้ามาจะถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ของคิว และถ้าบัฟเฟอร์นั้นเต็มจะทำให้แพ็กเกตที่เข้ามาทีหลังถูกตัดทิ้ง ถึงแม้ว่าในการสื่อสารเสียงจะยอมให้มีการสูญหายของแพ็กเก็ตได้บ้าง แต่การที่มีแพ็กเก็ตสูญหายมากเกินไปก็อาจส่งผลกระทบต่อ

คุณภาพเสียงได้ โดยการสูญหายของแพ็กเก็ตจะมีผลกระทบอย่างชัดเจนเมื่อมีอัตราการสูญหายมากกว่า 5% [6][7]

2.1.4.4 แบนด์วิดท์ที่มีจำกัด (Limited bandwidth)

แบนด์วิดท์เป็นส่วนที่สำคัญมากในการสื่อสารเสียง ซึ่งปริมาณการใช้แบนด์วิดท์นั้นก็จะขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมในการบีบอัดข้อมูลเสียง ถ้าแบนด์วิดท์ที่ใช้ในขณะนั้นไม่เพียงพอจะทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมาไม่ว่าจะเป็นเวลาหน่วง จิตเตอร์ และสูญหายของแพ็กเก็ต

2.1.5 โปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารเสียงบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต

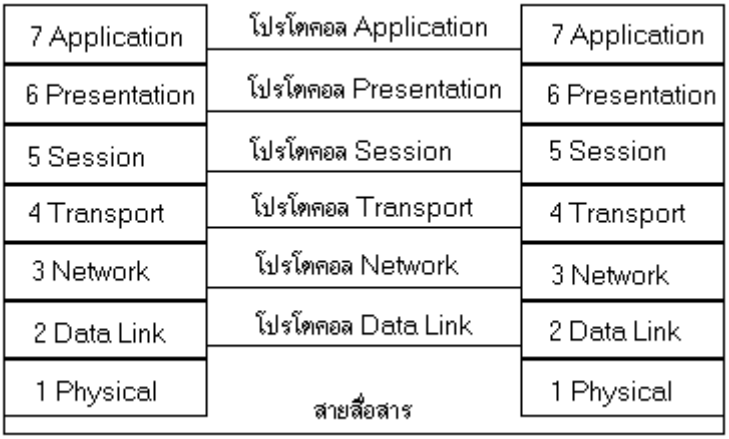
2.1.5.1 สถาปัตยกรรมเครือข่ายรูปแบบ OSI

จุดมุ่งหมายของการกำหนดมาตรฐานรูปแบบ OSI ก็เพื่อเป็นการกำหนดการแบ่งโครงสร้างของสถาปัตยกรรม เครือข่ายออกเป็นเลเยอร์ๆ (Layer) และกำหนดหน้าที่การทำงานในแต่ละเลเยอร์ รวมถึงกำหนดรูปแบบการอินการอินเตอร์เฟสระหว่างเลเยอร์ด้วย โดยมีหลักเกณฑ์ในการกำหนดดังต่อไปนี้

1. ไม่แบ่งโครงสร้างออกเป็นเลเยอร์ๆมากจนเกินไป
2. แต่ละเลเยอร์จะต้องมีหน้าที่การทำงานแตกต่างกันทั้งขบวนการและเทคโนโลยี
3. จัดกลุ่มหน้าที่การทำงานที่คล้ายกันให้อยู่เลเยอร์เดียวกัน
4. เลือกเฉพาะการทำงานที่เคยใช้ได้ผลประสบความสำเร็จมาแล้ว
5. กำหนดหน้าที่การทำงานเฉพาะง่ายๆ แก่เลเยอร์ เผื่อว่าต่อไปถ้ามีการออกแบบเลเยอร์ใหม่หรือมีการเปลี่ยนแปลงโปรโตคอลใหม่ในอันที่จะทำให้สถาปัตยกรรมมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น จะไม่มีผลทำให้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ที่เคยใช้ได้ผลอยู่เดิมจะต้องเปลี่ยนแปลงตาม
6. กำหนดอินเตอร์เฟสมาตรฐาน
7. ให้มีความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงโปรโตคอลในแต่ละเลเยอร์
8. สำหรับเลเยอร์ย่อยของแต่ละเลเยอร์ให้ใช้หลักเกณฑ์เดียวกันกับที่กล่าวใน 7 ข้อแรก

รูปแบบ OSI แบ่งโครงสร้างออกเป็น7 เลเยอร์ และในแต่ละเลเยอร์ได้มีการกำหนดหน้าที่การทำงานไว้ดังต่อไปนี้

1. Physical เป็นชั้นล่างสุดของการติดต่อสื่อสาร ทำหน้าที่ส่ง-รับข้อมูลจริงๆ จากช่องทางการสื่อสาร ระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่งกับคอมอีกเครื่องอื่นๆ มาตราฐานสำหรับเลเยอร์ชั้นนี้จะกำหนดว่าแต่ละคอนเนคเตอร์ เช่น RS-232-C มีกี่พิน แต่ละพินทำหน้าที่อะไรบ้าง ใช้สัญญาณไฟกี่โวลต์ เทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบต่างๆ ก็จะถูกกำหนดอยู่ในเลเยอร์ชั้นนี้



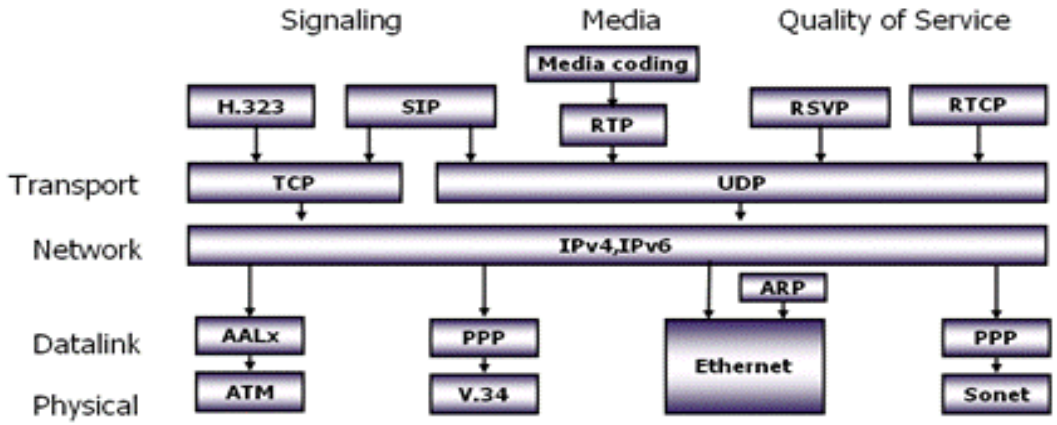
รูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมเครือข่ายรูปแบบ OSI

2. Data Link จะเป็นเสมือนผู้ตรวจสอบ หรือควบคุมความผิดพลาดในข้อมูล โดยจะแบ่งข้อมูลที่จะส่งออกเป็นเฟ็กเก็จหรือเฟรมถ้าผู้รับได้รับข้อมูลถูกต้องก็จะส่งสัญญาณยืนยันกลับมาว่าได้รับข้อมูลแล้วเรียกว่า สัญญาณ ACK (Acknowledge) ให้กับผู้ส่ง
3. Network มีหน้าที่เลือกเส้นทางที่ใช้เวลาในการสื่อสารน้อยที่สุด และระยะทางสั้นที่สุดด้วยข่าวสารที่รับมาจากเลเยอร์ชั้นที่4 จะถูกแบ่งออกเป็นเฟ็กเกจๆ ในชั้นที่ 3 นี้
4. Transport บางครั้งเรียกว่า Host-to-Host ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจสอบว่าข้อมูลที่ส่งมาจากเลเยอร์ชั้น Session นั้นไปถึงปลายทางจริงๆหรือไม่ ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งของข้อมูล (Address)จึงเป็นเรื่องสำคัญในชั้นนี้ เนื่องจากจะต้องรู้ว่าใครคือผู้ส่ง และใครคือผู้รับข้อมูลนั้น
5. Session ทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างผู้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นๆ โดยผู้ใช้จะใช้คำสั่งหรือข้อความที่กำหนดไว้ป้อนเข้าไปในระบบ เลเยอร์ชั้นี้ จะส่งข้อมูลทั้งหมดให้กับเลเยอร์ชั้น Transport เป็นผู้จัดการต่อไป ในบางเครือข่ายทั้งเลเยอร์ Session และเลเยอร์ Transport อาจจะเป็นเลเยอร์ชั้นเดียวกัน
6. Presentation ทำหน้าที่เหมือนบรรณารักษ์ กล่าวคือคอยรวบรวมข้อความ (Text) และแปลงรหัส หรือแปลงรูปแบบของข้อมูลให้เป็นรูปแบบการสื่อสารเดียวกัน เพื่อช่วยลดปัญหาต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับผู้ใช้งานในระบบ
7. Application เป็นเลเยอร์ชั้นบนสุดของรูปแบบ OSI ซึ่งเป็นชั้นที่ใช้ติดต่อกันระหว่างผู้ใช้โดยตรง ซึ่งได้แก่ โฮสต์คอมพิวเตอร์ เทอร์มินัลหรือคอมพิวเตอร์ PC เป็นต้น แอปพลิเคชันในเลเยอร์ชั้นนี้สามารถนำเข้า หรือออกจากระบบเครือข่ายได้โดยไม่จำเป็นต้องสนใจว่าจะมีขั้นตอนการทำงานอย่างไร

2.1.5.2 ซิกแนลลิ่งโปรโตคอล (Signaling Protocol)

การสื่อสารข้อมูลเสียงระหว่างต้นทางกับปลายทางในระบบโทรศัพท์บนโครงข่ายอินเตอร์เน็ตนั้น จำเป็นต้องใช้ซิกแนลลิ่งเพื่อควบคุมการสร้าง สิ้นสุด และเปลี่ยนแปลงเซสชันการสนทนาระหว่างต้นทาง กับปลายทาง ซึ่งในปัจจุบันมีซิกแนลลิ่งสำหรับระบบโทรศัพท์อินเตอร์เน็ตที่นิยมใช้อยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ H.323 และ SIP (Session Initiation Protocol) แต่เนื่องจาก SIP ถูกพัฒนาขึ้นภายหลัง และมีแนวทางในการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการทำงานบนโครงข่ายอินเตอร์เน็ตโดยตรง SIP จึงเป็นโปรโตคอล ที่มีความซับซ้อนน้อย สามารถเพิ่มเติมคุณลักษณะของโปรโตคอลได้ง่าย และสามารถทำงานบนโครงข่ายขนาดใหญ่ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโปรโตคอล H.323

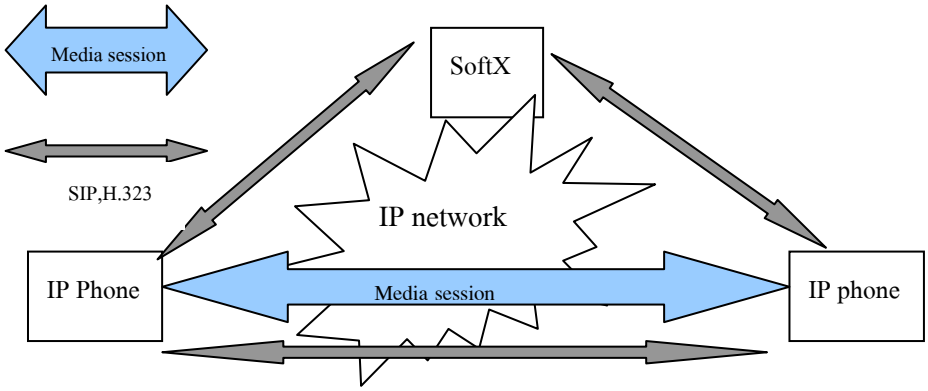
โครงสร้างโปรโตคอลของระบบโทรศัพท์อินเตอร์เน็ตดังแสดงในรูปที่ 2.4 โปรโตคอล H.323 และ SIP อยู่ในระดับชั้นประยุกต์ใช้งาน (Application layer) ทำงานบนโปรโตคอลในชั้นเคลื่อนย้ายที่ต่ำกว่า



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโปรโตคอลสำหรับระบบโทรศัพท์บนโครงข่ายอินเตอร์เน็ต

การอ้างอิงที่อยู่ของโครงข่ายอินเตอร์เน็ตนั้นใช้ไอพีแอดเดรส แต่สำหรับระบบโทรศัพท์การใช้ไอพีแอดเดรส เป็นตัวระบุเครื่องลูกข่ายของผู้ใช้โทรศัพท์นั้นไม่เหมาะสม เนื่องจากในการเชื่อมต่อโครงข่ายอินเตอร์เน็ตแต่ละครั้ง เครื่องลูกข่ายอาจได้ไอพีแอดเดรสที่ไม่เหมือนเดิม ดังนั้นจึงต้องมีแอดเดรสที่ใช้ระบุเครื่องลูกข่ายสำหรับการใช้งานโทรศัพท์อินเตอร์เน็ตโดยตรง ซึ่งในการใช้งานจริงภายในโครงข่ายต้องมี ซอฟท์สวิทช์ (SoftX) ทำงานเป็นเซอร์เวอร์จัดการแมปไอพีแอดเดรส กับ แอดเดรสสำหรับระบบโทรศัพท์ของเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่อง และช่วยควบคุมเซสชันระหว่างต้นทางกับปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อผู้ใช้งานเข้าใช้ระบบ เครื่องลูกข่ายของระบบโทรศัพท์อินเตอร์เน็ตจะลงทะเบียนกับ ซอฟท์สวิทช์ ก่อนโดยใช้ซิกแนลลิ่งโปรโตคอลSIP

หรือ H.323 เมื่อ ซอฟท์สวิทต์ ได้รับการร้องขอลงทะเบียนจากเครื่องลูกข่าย ซอฟท์สวิทต์ จะเก็บข้อมูลไอพีแอดเดรส และแอดเดรสสำหรับระบบโทรศัพท์ของเครื่องลูกข่ายไว้ ดังนั้น ซอฟท์สวิทต์จะมีข้อมูลของเครื่องลูกข่ายทุกเครื่องที่ได้เข้ามาลงทะเบียนไว้ เมื่อผู้ใช้งานต้องการสร้างเซสชันกับผู้ใช้งานปลายทาง ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องทราบไอพีแอดเดรสของเครื่องปลายทาง เพียงแต่ทราบแอดเดรสสำหรับโทรศัพท์อินเตอร์เน็ตปลายทาง เครื่องลูกข่ายต้นทางจะส่งข้อความร้องขอไปยังซอฟท์สวิทต์ โดยใช้ซิกแนลลิ่งโปรโตคอล SIP หรือ H.323 เมื่อซอฟท์สวิทต์ ได้รับข้อความร้องขอจากเครื่องลูกข่ายต้นทางซอฟท์สวิทต์ จะตรวจสอบแอดเดรสปลายทาง พร้อมกับค้นหาไอพีแอดเดรสของเครื่องลูกข่ายปลายทางจากฐานข้อมูล และส่งข้อความร้องขอนั้นต่อไปยังเครื่องลูกข่ายปลายทางตามไอพีแอดเดรสที่ได้ลงทะเบียนไว้ หรืออาจส่งไอพีแอดเดรสของเครื่องลูกข่ายปลายทางกลับไปให้เครื่องลูกข่ายต้นทางทราบเพื่อใช้ในการติดต่อต่อไป (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโหมดการทำงานของซอฟท์สวิทต์ และซิกแนลลิ่งโปรโตคอล ที่ใช้) เมื่อเครื่องลูกข่ายทั้ง 2 ทราบไอพีแอดเดรสของกันและกันแล้ว ก็จะสามารถส่งซิกแนลลิ่ง รวมไปถึงข้อมูลเสียงหากันได้โดยตรง ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าซอฟท์สวิทต์ เป็นอุปกรณ์ที่ประมวลผลซิกแนลลิ่ง เพื่อช่วยสร้างเซสชันในระบบโทรศัพท์อินเตอร์เน็ตเท่านั้น โดยข้อมูลเสียงไม่จำเป็นต้องวิ่งเข้าไปที่ซอฟท์สวิทต์ เลย



รูปที่ 2.5 การส่ง Signaling และ Media ผ่านโครงข่ายอินเตอร์เน็ต

โปรโตคอลในระดับชั้น ทรานสปอร์ต (Transport Layer) ของเครือข่ายอินเตอร์เน็ตที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีอยู่สองโปรโตคอลคือ TCP ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่มีการรับประกันว่าสามารถส่งข้อมูลไปถึงปลายทางได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน อีกโปรโตคอลหนึ่งก็คือ User Datagram Protocol (UDP) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ไม่มีการรับประกันความน่าเชื่อถือของข้อมูล จะเห็นว่า TCP เป็นโปรโตคอลที่มีประสิทธิภาพมากกว่าและกลไกการทำงานซับซ้อนมากกว่า UDP แต่ TCP นั้นไม่เหมาะสำหรับการสื่อสารเสียง ทั้งนี้เนื่องจากความล่าช้าของกลไกการทำงานของ TCP นั่นเอง การสื่อสารเสียงนั้นต้องการความเร็ว โดยไม่จำเป็นว่าจะต้องส่งแพ็กเก็ตเสียงให้ไปถึงผู้รับอย่างครบถ้วน เพราะถึงแม้ว่าจะมีข้อมูลบางส่วนสูญหายไปบ้าง ก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อ

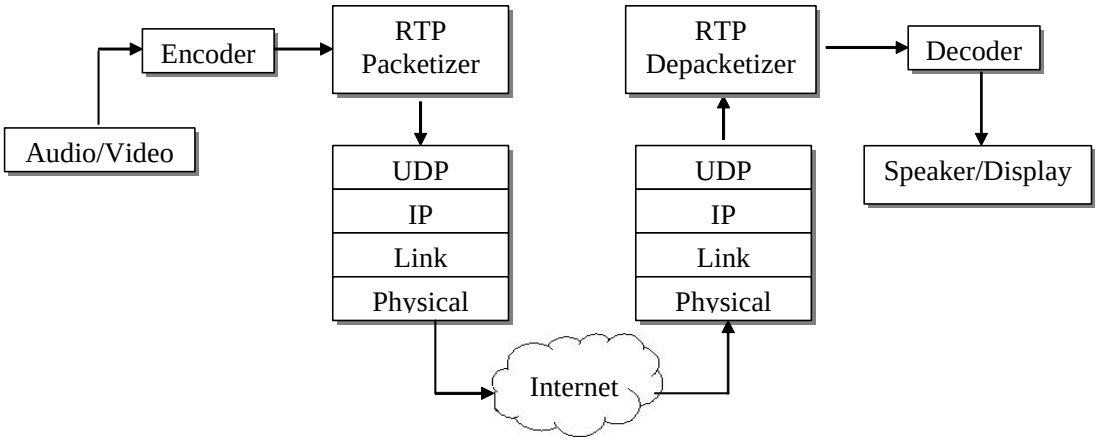
คุณภาพของเสียงมากนัก ดังนั้น UDP จึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า แต่การที่จะใช้ UDP อย่างเดียวนั้นยังไม่เพียงพอ จึงได้มีการพัฒนาโปรโตคอลตัวหนึ่งที่ทำงานอยู่เหนือโปรโตคอล UDP โปรโตคอลตัวนี้มีชื่อว่า Real-time Transport Protocol (RTP) ซึ่งองค์กรที่เสนอโปรโตคอลตัวนี้ขึ้นมาคือ Internet Engineering Task Force (IETF) โปรโตคอล RTP ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการสื่อสารแบบเวลาจริง ซึ่งรายละเอียดของของโปรโตคอล RTP นี้จะกล่าวถึงอีกครั้งในหัวข้อที่ 2.2

2.2 Real-time Transport Protocol (RTP)

RTP เป็นโปรโตคอลที่ได้รับการพัฒนาโดย IETF และมีข้อกำหนดอยู่ใน RFC 3550 [8] RTP ถูกออกแบบมาเพื่อใช้เป็นโปรโตคอลในการส่งข้อมูลของการสื่อสารที่ทำงานในลักษณะเวลาจริง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้โปรโตคอล RTP ทั้งในการสื่อสารเสียงและการสื่อสารวีดิทัศน์ หน้าที่สำคัญของ RTP คือ ทำให้ทางผู้รับสามารถนำข้อมูลที่ได้จากแพ็กเก็ตไปแสดงผลได้ถูกต้อง กลไกหลักที่ใช้ใน RTP ก็คือ การประทับเวลา (Time Stamping) และการกำหนดหมายเลขลำดับ (Sequence Numbering) ผู้ส่งจะกำหนดค่า Timestamp ซึ่งเป็นฟิลด์หนึ่งในเฮดเดอร์ของ RTP ตามเวลาที่ข้อมูลในไบต์แรกของแพ็กเกตถูกชักตัวอย่าง ทางด้านของผู้รับเมื่อได้รับแพ็กเก็ตจะใช้ค่า Timestamp เพื่อกำหนดจังหวะที่ถูกต้องในการแสดงข้อมูล และยังอาจจะใช้ในการประสานเวลาระหว่างสัญญาณเสียงและวีดิทัศน์ ส่วนกลไกการกำหนดหมายเลขลำดับนั้นใช้ฟิลด์หนึ่งในเฮดเดอร์ RTP ที่ชื่อว่า Sequence Number โดยค่าของหมายเลขนี้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่ง ซึ่งผู้รับจะใช้ข้อมูลนี้ในการเรียงลำดับและตรวจสอบการสูญหายของแพ็กเก็ต นอกจากนี้ RTP ยังให้ข้อมูลเกี่ยววิธีการบีบอัดข้อมูลเสียงหรือวีดิทัศน์ เพื่อให้ผู้รับสามารถแสดงผลข้อมูลได้ถูกต้อง และนอกจากข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้โปรโตคอลในการขนส่งข้อมูลของสื่อแล้ว ใน RFC 3550 ยังมีข้อกำหนดของโปรโตคอลหนึ่งคือ RTP Control Protocol (RTCP) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับ RTP โดยโปรโตคอล RTCP จะถูกนำไปใช้ในการรายงานเกี่ยวกับสถิติและคุณภาพการบริการ

2.2.1 บทบาทของ RTP

รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงบทบาทของ RTP ในการสื่อสารเสียงและวีดิทัศน์ จะเห็นว่าเมื่อเสียงหรือวีดิทัศน์ได้ผ่านขั้นตอนการเข้ารหัสด้วยวิธีการบีบอัดข้อมูลแล้ว ข้อมูลที่ได้ก็จะมีขนาดลดลง หลังจากนั้นข้อมูลส่วนนี้ก็จะถูกนำมาบรรจุลงในแพ็กเก็ต RTP ซึ่งแต่ละแพ็กเก็ตก็จะมีการระบุด้วยว่าใช้วิธีการบีบอัดข้อมูลแบบใด เป็นแพ็กเก็ตในลำดับที่เท่าไร รวมไปถึงข้อมูลอื่นๆ ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ดังนั้นเมื่อข้อมูลนี้เดินทางผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตไปถึงฝั่งของผู้รับ ผู้รับก็สามารถใช้ข้อมูลนี้ในการแสดงผลได้ถูกต้อง



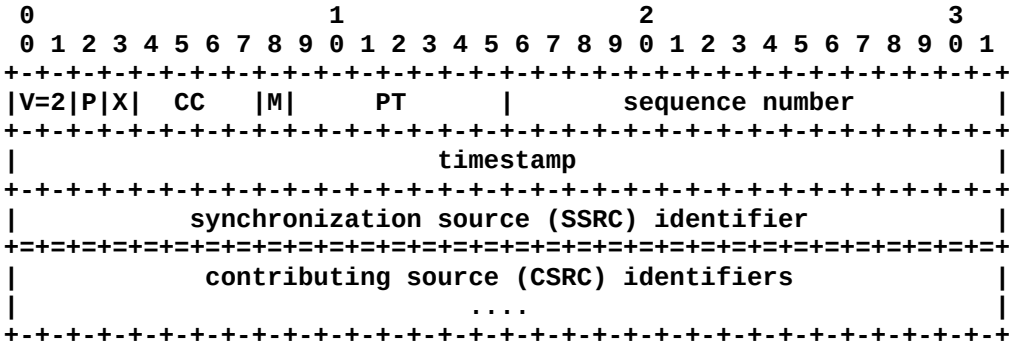
รูปที่ 2.6 บทบาทของ RTP ในการสื่อสารเสียงและวีดิทัศน์บนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต

2.2.2 โครงสร้างแพ็กเก็ตของ RTP (RTP Packet Structure)

แพ็กเก็ต RTP แต่ละแพ็กเก็ตนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 โดยส่วนแรกของแพ็กเก็ตคือ ส่วนเฮดเดอร์ RTP (RTP Header) เป็นส่วนที่ระบุถึงคุณสมบัติของแต่ละแพ็กเก็ต โดยที่ข้อมูลเสียงหรือวีดิทัศน์ที่ผ่านการเข้ารหัสแล้วจะถูกนำไปวางในตำแหน่งของเพย์โหลด (Payload)

รูปที่ 2.7 โครงสร้างแพ็กเก็ตของ RTP

โดยทั่วไปเฮดเดอร์คือ โครงสร้างข้อมูลของแต่ละแพ็กเกตที่ถูกรวมเข้ากับข้อมูลที่จะส่ง ซึ่งในแต่ละโปรโตคอลจะมีโครงสร้างของเฮดเดอร์ที่แตกต่างกัน เพื่อกำหนดรูปแบบข้อมูลของโปรโตคอลตัวนั้นๆ สำหรับเฮดเดอร์ของ RTP นั้นมีโครงสร้างดัง รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเฮดเดอร์ของ RTP [8]

จากโครงสร้างเฮดเดอร์ของ RTP ในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่า RTP จะมีเฮดเดอร์อย่างน้อย 12 ไบต์ โดยมีรายละเอียดของฟิลด์ต่างๆ ดังนี้

- V (Version) กำหนดเวอร์ชันของโปรโตคอล RTP ที่ใช้ซึ่งปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 2
- P (Padding) เป็นฟิลด์ที่บอกว่าแพ็กเก็ตนั้นได้ถูกเติมด้วยข้อมูลที่เพิ่มให้พอดีกับขนาดของแพ็กเก็ตหรือไม่ และยังใช้ในกระบวนการการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) อีกด้วย
- X (Extension) เป็นฟิลด์ที่บอกว่าเฮดเดอร์ RTP มีการขยาย (Extension) หรือไม่
- CC (CSRC Count) บอกจำนวนของ Contribution Source Identifier ในแพ็กเกต โดยมี CSRC ได้ตั้งแต่ 0 - 15
- M (Marker) ค่าของบิตนี้จะถูกระบุโดย Profile และ Specification ซึ่งวิธีการใช้งานบิตนี้ได้กำหนดเอาไว้ใน RFC 3551 [9]
- PT (Payload Type) บอกชนิดของข้อมูลภายในเพย์โหลด ซึ่งก็คือชนิดของการบีบอัดข้อมูลเสียงหรือวีดิทัศน์นั่นเอง ซึ่งใน RFC 3551 ได้มีการกำหนดเอาไว้ว่าใช้หมายเลขใดแทนวิธีการบีบอัดข้อมูลแต่ละแบบ
- Sequence Number บอกลำดับของแพ็กเก็ต และเพื่อให้ผู้รับตรวจสอบการสูญหายของแพ็กเก็ต และสามารถใช้ในการเรียงลำดับแพ็กเกตใหม่ได้
- Timestamp เป็นค่าที่บอกเวลาที่ใช้ในการชักตัวอย่างของข้อมูลในเพย์โหลด ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการคำนวณจิตเตอร์ และค่า Round Trip Time Delay
- SSRC เป็นตัวเลขประจำ Session นั่นคือแพ็กเก็ตที่มาจากผู้ส่งเดียวกัน และใช้ค่า SSRC เท่ากัน แสดงว่าเป็น Session เดียวกัน
- CSRC ฟิลด์นี้จะถูกใช้เมื่อมีการผสมสื่อ (Media Mixing) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เมื่อมีการประชุมแบบหลายจุด (Multipoint Conference)

2.2.3 RTP Control Protocol (RTCP)

RTCP เป็นโปรโตคอลที่ถูกกำหนดอยู่ใน RFC 3550 เช่นเดียวกับ RTP โปรโตคอลตัวนี้ใช้ในการรายงานเกี่ยวกับสถิติและคุณภาพการบริการ RTCP ใช้ช่องสื่อสารแยกกันกับ RTP โดย RTCP นั้นใช้พอร์ตถัดจาก RTP ไปหนึ่งพอร์ต ช่องสื่อสารของ RTCP นั้นใช้สำหรับการรายงานเกี่ยวคุณภาพการบริการ เช่น จำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับ จำนวนแพ็กเก็ตที่สูญหาย จิตเตอร์ เป็นต้น แพ็กเก็ต RTCP นั้นแบ่งออกเป็น 5 ชนิดได้แก่

- SR(Sender Report) สำหรับบอกสถิติเกี่ยวกับการส่งข้อมูลของผู้ส่ง
- RR(Receive Report) สำหรับบอกสถิติเกี่ยวกับการรับข้อมูลของผู้รับ
- SDES (Source description items) เป็นรายละเอียดต่างๆ ของผู้ส่ง

- BYE สำหรับแจ้งถึงการจบการทำงาน
- APP (Application Specific Functions) สำหรับการกำหนดการทำงานบางอย่างในส่วนของโปรแกรมประยุกต์ ซึ่งไม่ได้ระบุเอาไว้เป็นมาตรฐาน

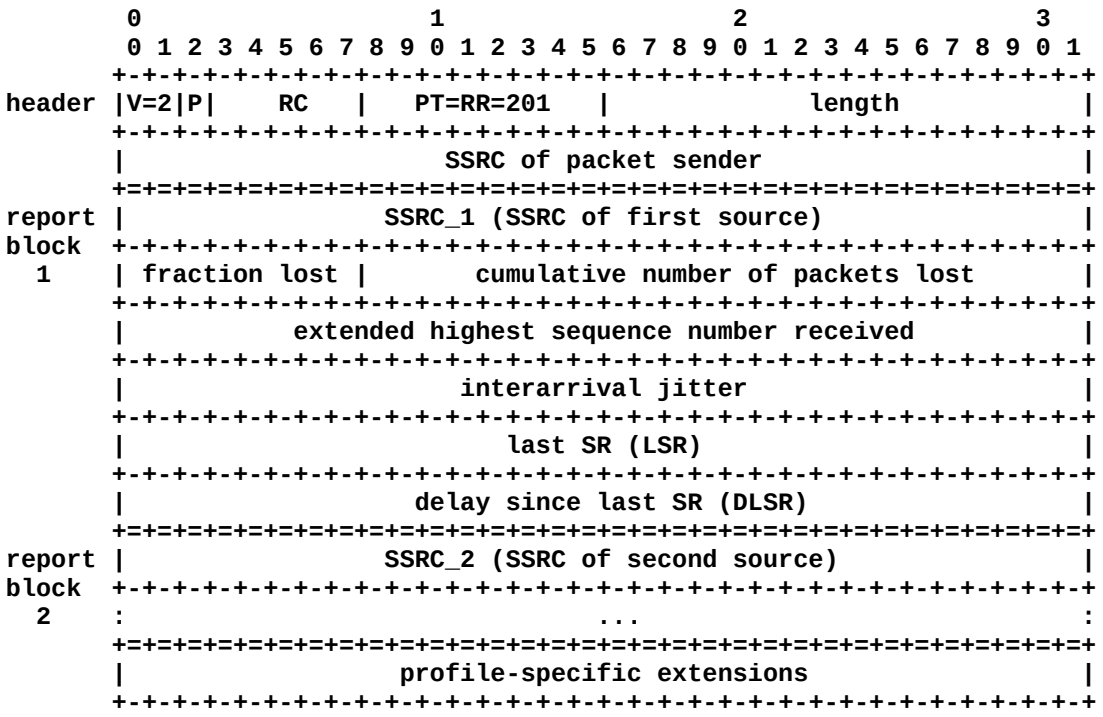
แพ็กเก็ต RTCP ที่น่าสนใจก็คือ RR เพราะว่าผู้รับจะรวบรวมสถิติต่างๆ ของข้อมูลเสียงหรือวีดิทัศน์ที่ได้รับจากแพ็กเก็ต RTP แล้วบรรจุลงในแพ็กเก็ต RR นี้และส่งให้กับผู้ส่ง ผู้ส่งสามารถใช้ข้อมูลในแพ็กเก็ตชนิดนี้ในการประเมินสถานะของเครือข่าย รวมถึงคุณภาพของสื่อที่ผู้รับได้รับ ในการออกแบบวิธีการควบคุมความผิดพลาดแบบปรับตัวของทั้งการสื่อสารเสียงและวีดิทัศน์ของวิทยานิพนธ์นี้ก็จะมีการใช้งานแพ็กเก็ตนี้เช่นกัน ในรูปที่ 2.9 เป็นโครงสร้างเฮดเดอร์ของแพ็กเก็ต RR ซึ่งฟิลด์ต่างๆ ที่กำหนดอยู่ในมาตรฐานแล้ว โครงสร้างเฮดเดอร์ของแพ็กเก็ต RTCP ยังอนุญาตให้มีการใส่ข้อมูลเพิ่มเติมลงในแพ็กเก็ตนี้ได้อีก โดยข้อมูลส่วนที่เพิ่มเติมนี้สามารถใส่ได้ในตำแหน่งที่เรียกว่า Profile-Specific Extension

เฮดเดอร์ของแพ็กเก็ต RR จะประกอบด้วย 3 ส่วน โดยส่วนแรกนั้นจะเป็นเฮดเดอร์ที่มีขนาดคงที่ มีขนาดรวมกันได้ 8 ไบต์ ซึ่งแต่ละฟิลด์มีความหมายดังนี้

- V (Version) กำหนดเวอร์ชันของ RTP ที่ใช้ซึ่งปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 2
- P (Padding) เป็นฟิลด์ที่บอกว่าแพ็กเก็ตนั้นได้ถูกเติมด้วยข้อมูลที่เพิ่มให้พอดีกับขนาดของแพ็กเก็ตหรือไม่ และยังใช้ในกระบวนการการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) อีกด้วย
- P (Payload Type) ชนิดของแพ็กเก็ต ซึ่งในกรณีของแพ็กเก็ต RR ฟิลด์นี้มีค่าเท่ากับ 201
- Length ระบุความยาวของแพ็กเก็ต โดยค่านี้ในฟิลด์นี้มีที่มาดังนี้

  Length = (length of packet in byte / 4) – 1

  โดยค่าในฟิลด์ Length นี้จะมีค่าเป็นลบไม่ได้ ดังนั้นจะเห็นว่าความยาวของทั้งแพ็กเก็ตอย่างน้อยที่สุดต้องเป็น 4 ไบต์
- SSRC of packet sender หมายเลขประจำตัวที่ใช้ในการระบุผู้ที่จะส่งแพ็กเก็ต RR นี้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างเฮดเดอร์ของแพ็กเก็ต Receiver Report (RR)[8]

เฮดเดอร์ของแพ็กเก็ต RR ในส่วนที่สองเรียกว่าบล็อกรายงาน (Report Block) ซึ่งในแพ็กเก็ต RR 1 แพ็กเก็ตอาจจะประกอบด้วยบล็อกรายงานหลายบล็อกก็ได้ถ้าหากว่าผู้รับได้รับสื่อจากผู้ส่งหลายคน โดยบล็อกรายงานแต่ละบล็อกจะมีเฮดเดอร์ดังนี้

- SSRC ค่า SSRC ที่ Session ที่ต้องการจะรายงานสถิติการรับ
- Fraction Lost อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตค่าในฟิลด์สามารถคำนวณได้ดังนี้

  Fraction Lost = (Number of lost packets / Number of expected packet) x 256

  และหากต้องการแปลงค่า Fraction Lost ให้กลายเป็นเปอร์เซ็นต์การสูญหายของแพ็กเก็ตก็สามารถทำได้ดังนี้

  Percent Lost = (Fraction Lost / 256) x 100

- Cumulative Number of Packets Lost ผลรวมของจำนวนแพ็กเก็ตที่สูญหายทั้งหมด
- Extended Highest Sequence Number Received หมายเลขลำดับของแพ็กเก็ตสุดท้ายที่ใช้ในการพิจารณาในการคำนวณค่าสถิติในแพ็กเก็ต RR นี้
- Interarrival Jitter ระบุค่าจิตเตอร์ของ Session โดยวิธีคำนวณค่าจิตเตอร์สามารถดูรายละเอียดได้ใน RFC 3550
- LSR (Last SR) เวลาที่ได้รับแพ็กเก็ต SR ครั้งสุดท้าย ซึ่งแพ็กเก็ตนี้ผู้ส่งสื่อจะส่งมาให้

ผู้รับเป็นระยะๆ เพื่อรายงานสถิติการส่ง

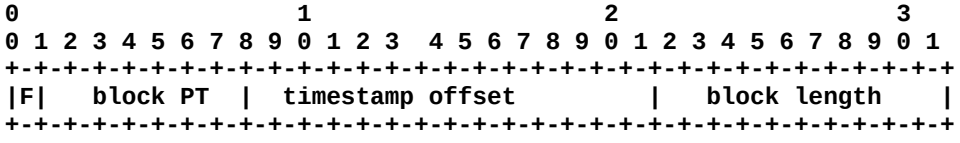
- DLSR (Delay Since Last SR) ระยะห่างระหว่างเวลาที่ได้รับแพ็กเก็ต SR ครั้งสุดท้ายกับเวลาที่เริ่มส่งแพ็กเก็ต RR นี้

เฮดเดอร์ของแพ็กเก็ต RR ในส่วนที่สามซึ่งเป็นส่วนท้ายสุดของแพ็กเก็ตคือ ส่วน Profile-Specific Extension เป็นส่วนที่อนุญาตให้มีการเพิ่มเติมข้อมูลอื่นลงในแพ็กเก็ต RR ได้ ทั้งนี้จำเป็นจะต้องกำหนดค่าฟิลด์ Length ให้สัมพันธ์กับข้อมูลที่เพิ่มลงไปด้วย

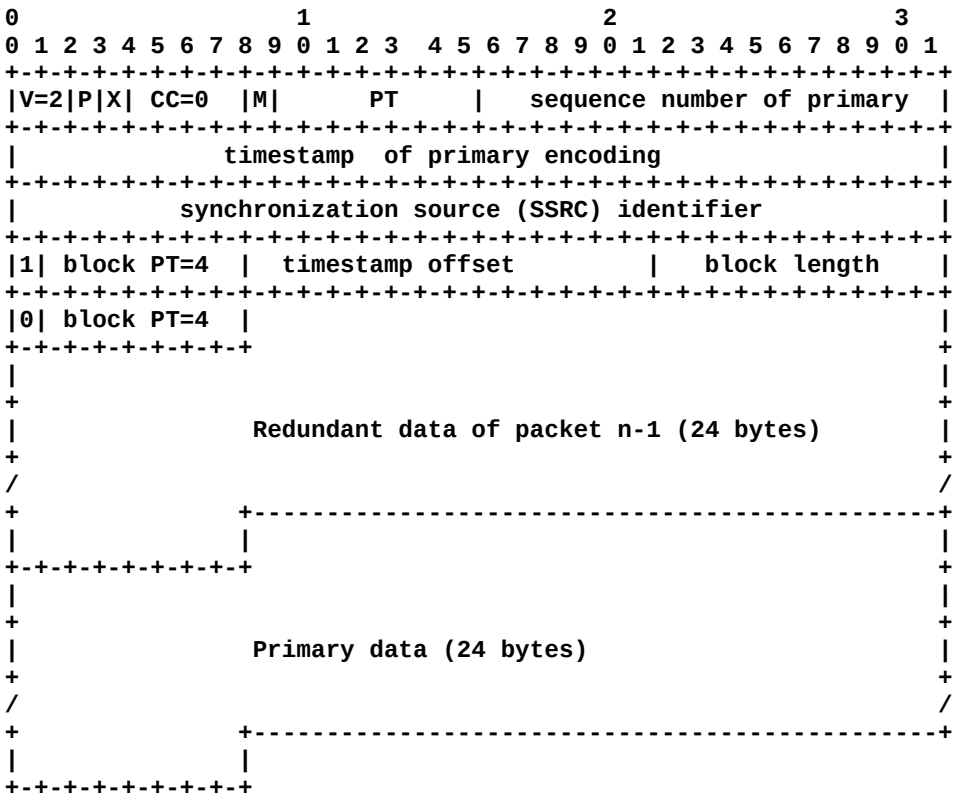
2.2.4 การส่งข้อมูลซ้ำของเสียงโดยใช้โปรโตคอล RTP

เนื่องจากการสื่อสารเสียงบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ตนั้นไม่สามารถที่จะคาดหมายได้ว่าจะมีปริมาณแพ็กเก็ตที่สูญหายมากน้อยแค่ไหน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการที่จะลดผลกระทบจากการสูญหายของแพ็กเก็ต FEC เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ โดยหลักการของ FEC คือ ในแต่ละแพ็กเก็ตเสียงจะมีการบรรจุข้อมูลซ้ำของแพ็กเก็ตอื่นอยู่ด้วย และในการสื่อสารเสียงโดยใช้โปรโตคอล RTP [8]นั้น ถ้าหากต้องการส่งข้อมูลซ้ำสามารถทำได้โดยการกำหนดรูปแบบของแพ็กเก็ตตามที่กำหนดใน RFC2198[10] จากรูปแบบของแพ็กเก็ตของ RTP นั้น หลังจากส่วนที่เป็นเฮดเดอร์แล้วก็จะตามด้วยส่วนที่เรียกว่า เพย์โหลด (Payload) ซึ่งก็คือข้อมูลเสียงที่ผ่านการบีบอัดแล้วนั่นเอง แต่เมื่อมีการส่งข้อมูลซ้ำ ส่วนของเพย์โหลดจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อก ซึ่งมีทั้งบล็อกที่เป็นข้อมูลของแพ็กเก็ตปัจจุบันและบล็อกที่เป็นข้อมูลซ้ำของแพ็กเก็ตก่อนหน้า โดยแต่ละบล็อกอาจเป็นข้อมูลเสียงที่ผ่านการบีบอัดด้วยวิธีที่แตกต่างกันก็ได้ ซึ่งข้อมูลเสียงในแต่ละบล็อกจะมีเฮดเดอร์ดังรูปที่ ซึ่งแต่ละฟิลด์มีรายละเอียดดังนี้

- F มีขนาด 1 บิต เป็นฟิลด์ที่ระบุว่ามีเฮดเดอร์ของบล็อกอื่นหลังจากนี้หรือไม่ ถ้า F เป็น 0 แสดงว่าเป็นเฮดเดอร์ของบล็อกสุดท้ายของแพ็กเก็ต
- block PT มีขนาด 7 บิต ใช้ในการระบุชนิดของเพย์โหลด (Payload Type) ซึ่งก็คือวิธีการการบีบอัดของข้อมูลเสียงในแต่ละบล็อก
- timestamp offset มีขนาด 14 บิต ค่านี้จะถูกนำไปลบกับ timestamp ที่อยู่ในเฮดเดอร์ RTP เพื่อใช้ในการระบุว่าเป็นข้อมูลซ้ำของแพ็กเก็ตใด
- block length มีขนาด 10 บิต ใช้ในการระบุความยาวของบล็อกในหน่วยไบต์



รูปที่ 2.10 เฮดเดอร์ของบล็อกในแพ็กเก็ต RTP ที่มีข้อมูลซ้ำของเสียง [10]



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างแพ็กเก็ต RTP เมื่อมีการส่งข้อมูลซ้ำของเสียง 1 ชุด

สำหรับเฮดเดอร์ของบล็อกสุดท้ายจะมีแค่ 2 ฟิลด์คือ F และ block PT ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลในบล็อกสุดท้ายนั้นไม่ใช่ข้อมูลซ้ำ แต่เป็นข้อมูลเสียงของแพ็กเก็ตปัจจุบัน รูปที่ 2.11 เป็นตัวอย่างแพ็กเก็ต RTP เมื่อมีการส่งข้อมูลซ้ำของเสียงจำนวน 1 ชุด โดยทั้งข้อมูลหลักและข้อมูลซ้ำใช้การบีบอัดเสียงแบบ G.723.1 โดยทั้งบล็อกที่เป็นข้อมูลหลักและบล็อกที่เป็นข้อมูลซ้ำประกอบด้วยข้อมูลเสียงของ G.723.1 เพียง 1 เฟรม (24 ไบต์)

จากหลักการพื้นฐานของการสื่อสารเสียงที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น จะเห็นว่ามีช่องทางสำหรับการควบคุมคุณภาพของเสียงได้ เช่น ในการโปรโตคอล RTP ผู้รับสามารถรายงานสถิติการรับให้ผู้ส่งได้รับทราบโดยใช้แพ็กเก็ต RTCP Receiver Report ในการสื่อสารเสียงก็สามารถที่จะควบคุมความผิดพลาดได้โดยใช้วิธีการส่งข้อมูลซ้ำ ซึ่งวิธีการนี้มีมาตรฐานรองรับแล้ว เนื้อหาเกี่ยวกับวิธีการควบคุมความผิดพลาดของการสื่อสารเสียงจะกล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

2.3 เทคนิคการพยากรณ์

การพยากรณ์ คือ การคาดการณ์ว่าอะไรเกิดขึ้นในอนาคต เช่น การพยากรณ์ด้านเศรษฐกิจ การพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยี การพยากรณ์เป็นสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้ เป็นการคาดการณ์สิ่งที่จะเกิดโดยนำผลการพยากรณ์มาวางแผนเพื่อจัดการอนาคตให้ดีที่สุด

2.3.1 ประเภทของเทคนิคการพยากรณ์

2.3.1.1 เทคนิคพยากรณ์เชิงคุณภาพ

เป็นเทคนิคการพยากรณ์ที่อาศัยวิจารณญาณ ผลของการพยากรณ์ใช้เทคนิคเดียวกัน อาจได้ค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับวิจารณญาณของผู้พยากรณ์เป็นหลัก วิจารณญาณมาจากประสบการณ์พื้นฐานและพื้นฐานของผู้พยากรณ์ ดังนั้นเทคนิคเหมาะสมในกรณี

- เมื่อไม่มีข้อมูล
- ใช้สำหรับการพยากรณ์ในอนาคตที่ไกลมาก เพราะในอนาคตอันไกลความไม่แน่นอนของปัจจัยต่างๆ ที่กระทบต่อสิ่งที่พยากรณ์มาก

2.3.1.2 เทคนิคพยากรณ์เชิงปริมาณ

2.3.1.2.1 เทคนิคอนุกรมเวลา

เป็นเทคนิคที่ใช้ข้อมูลในอดีตเพื่อพยากรณ์ในอนาคต ในการศึกษาเกี่ยวกับอนุกรมเวลาเป็นการศึกษาความเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์หรือพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ผ่านมาเพื่อใช้สำหรับคาดการณ์เหตุการณ์ที่น่าจะเป็นไปได้ในอนาคต การทำนายอนุกรมเวลาเป็นการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติเพื่อกำหนดรูปแบบ หรือโมเดล ของเหตุการณ์ที่ผ่านมาโดยตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าพฤติกรรมหรือเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตย่อมจะมีรูปแบบเช่นเดียวกับพฤติกรรมหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมาแล้วในอดีต ส่วนวิธีการสร้างเส้นแนวโน้มจะใช้ผลรวมของกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าแนวโน้มกับค่าข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาได้มีค่าน้อยที่สุด (least square error) การสร้างเส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การพยากรณ์โดยสร้างเส้นแนวโน้มที่ให้ผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าแนวโน้มกับค่าของข้อมูลที่รวบรวมได้ให้มีค่าน้อยที่สุดจาก

$$\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_C)^2 = \text{มีค่าน้อยที่สุด} \qquad (2.1)$$

โดยที่ $Y_i =$ ค่าของมูลที่เก็บรวบรวมไว้

$i = 1,.....,n$

$Y_c =$ ค่าแนวโน้ม

2.3.1.2.2 เทคนิคความสัมพันธ์ของข้อมูล

เทคนิคการพยากรณ์โดยเทคนิคอนุกรมเวลา ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ได้คำนึงถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ ซึ่งแตกต่างจากแนวคิดของเทคนิคความสัมพันธ์ของข้อมูล (Causal Model) ซึ่งเน้นความสัมพันธ์ของตัวแปรในการพยากรณ์ ถ้ากรณีที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรเพียง 2 ตัว จะเรียกว่าการวิเคราะห์การถดถอย

แบบง่าย (Simple Regression) โดยตัวแปรที่ใช้ในการพยากรณ์มี 2 ประเภทคือ

- ตัวแปรตาม (Dependent variable) คือตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ใช้สัญลักษณ์แทนด้วยอักษร Y
- ตัวแปรอิสระ (Independent variable) คือ ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ใช้สัญลักษณ์แทนด้วยอักษร X

2.4 เทคนิควิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method)

ใช้ในการศึกษาวิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลาเมื่อมีข้อมูลผิดปกติเช่นอนุกรมเวลาอัตราการสูญหายของข้อมูลซึ่งมีความแตกต่างกันในลักษณะของระดับค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนขึ้นอยู่กับสภาพและสถานะของเครือข่าย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้นำ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด มาใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลซ้ำของอัลกอริทึมทางฝั่งผู้ส่งก่อนที่จะส่งผ่านเครือข่าย เนื่องจากมีความสามารถในการปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลง ของอนุกรมเวลาอัตราการสูญหายของข้อมูลได้ดี โดยหลักการ วิธีกำลังสองน้อยที่สุดมีดังนี้

2.4.1 การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์วิธีหนึ่งก็คือนำข้อมูลจากการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ปรากฏในการทดลอง แล้วเขียนเป็นฟังก์ชันหรือสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นตัวแทนใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์นั้น การประมาณค่าฟังก์ชันโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของข้อมูล เพราะได้จากการเกลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด ดังนั้น เมื่อเขียนกราฟของฟังก์ชันเส้นกราฟจะผ่านไปในบริเวณจุดต่างๆ ของข้อมูล โดยจะตัดผ่านจุดของข้อมูลบางจุด การประมาณค่าโดยวิธีต่างจากการประมาณค่าในช่วง (interpolation) ดังนี้

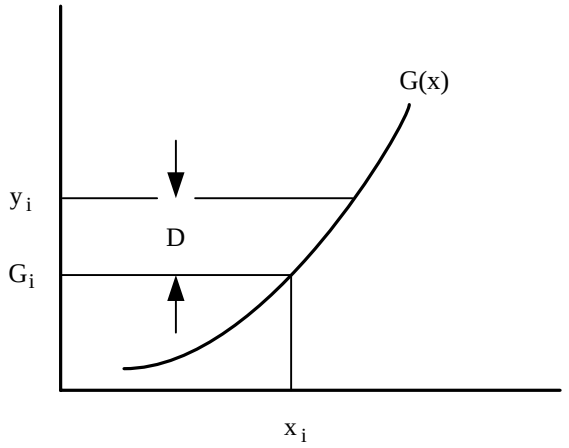
1. ฟังก์ชันที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงซึ่งเป็นฟังก์ชันพหุนาม จะต้องผ่านจุดทุกจุดของข้อมูล เมื่อเขียนเส้นกราฟจะเห็นเป็นรอยหยักของเส้น เส้นกราฟจริงๆ โดยธรรมชาติมีลักษณะราบเรียบหรือโค้งเป็นแนวต่อเนื่อง การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะได้กราฟผ่านไปในบริเวณจุดต่างๆ ของข้อมูล อาจผ่านข้อมูลบางจุดและไม่ผ่านบางจุด เส้นกราฟจะมีลักษณะราบเรียบ (smooth) ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า

2. ถ้ามีข้อมูลอยู่ n จุด พหุนามที่ได้จากวิธีประมาณค่าในช่วงจะมีองศาเท่ากับ n-1 ถ้า n มีค่ามากๆ พหุนามจะมีองศามากตามไปด้วย พหุนามจะมีลักษณะซับซ้อน ส่วนการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้สมการเส้นกระทัดรัด ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของข้อมูล สามารถนำมาหาอนุพันธ์หรืออินทิเกรต เพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการได้ง่าย

หลักการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด มีดังนี้ ถ้ามีข้อมูล x, y ทั้งสิ้น n ชุด ให้ฟังก์ชันที่ประมาณค่าข้อมูลนี้เป็น G(x) โดยที่ G(x) อยู่ในรูป

$$G(x) = a_1 g_1(x) + a_2 g_2(x) + \ldots a_m g_m(x) \tag{2.2}$$

โดยที่ $m \leq n$ และ $g_1(x), \ldots g_m(n)$ เป็นฟังก์ชันซึ่งขึ้นอยู่กับค่า x อาจจะอยู่ในรูปพหุนาม (polynomial) รูปล็อกการิธึม หรือเอ็กโพเนนเชียล สมการ (2.2) จะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่า $a_1, a_2, \ldots, a_m$ โดยหาค่าสัมประสิทธิเหล่านี้จากการทำให้ค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลกับค่าประมาณที่ได้จากฟังก์ชัน G(x) มีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.12 แสดงการหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

จากรูปที่ 2.12 ค่าแตกต่างของข้อมูลชุดที่ i คือ

$y_i = G(x_i)$ เมื่อหาค่าแตกต่างของข้อมูลทุกชุดแล้ว นำค่าแตกต่างเหล่านี้มารวมกัน แล้วยกกำลังสอง เพื่อขจัดเครื่องหมายลบ จะได้

$$D = \sum_{i=1}^{n} [y_i - G(x_i)]^2 \tag{2.3}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ $a_1, a_2, \ldots, a_m$ จะเป็นตัวแปร เพราะเมื่อค่าเหล่านี้มีค่าต่างๆกัน ฟังก์ชัน G(x) จะเป็นฟังก์ชันที่แตกต่างกันออกไป แต่ต้องการหาค่า $a_1, a_2, \ldots, a_m$ ที่มีเงื่อนไขทำให้เกิดค่า D มีค่าน้อยที่สุด จากแคลคูลัสเราจึงได้

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial a_1} &= 0 \\ \frac{\partial D}{\partial a_2} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial D}{\partial a_m} &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{2.4}$$

จะได้สมการออกมา m ชุด สามารถหาคู่ $a_1, a_2, \ldots, a_m$ ได้โดยใช้สมการระบบเชิงเส้น

2.4.2 เทคนิคความสัมพันธ์ของข้อมูล

การหาฟังก์ชันเพื่อประมาณค่าชุดข้อมูลโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า การถดถอย (Regression)

2.4.2.1 ข้อมูลมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Regression)

ถ้าข้อมูลทั้ง n ชุดมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นตรง สมการเส้นตรงที่หาได้จากวิธีนี้เรียกว่า การถดถอยแบบเชิงเส้น ให้ฟังก์ชันที่จะใช้เป็นตัวแทนข้อมูลชุดนี้มีรูปสมการเป็น

$$G(y) = A+Bx \tag{2.5}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (2.2) นั่นคือ $g_1(x)=1$, $g_2(x)=x$ เทอมต่อไปเป็นศูนย์ทั้งหมด ผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนจากสมการ (2.3) คือ

$$D = \sum_{i=1}^{n}(y_i - A - Bx_i)^2$$

A, B คือค่าคงที่ที่ต้องการหา โดยทำให้ค่า D มีค่าน้อยที่สุด นั่นคือ

$$\frac{\partial D}{\partial A} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - A - Bx_i) = 0$$

$$\frac{\partial D}{\partial A} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - A - Bx_i)(x_i) = 0$$

จัดรูปใหม่จะได้

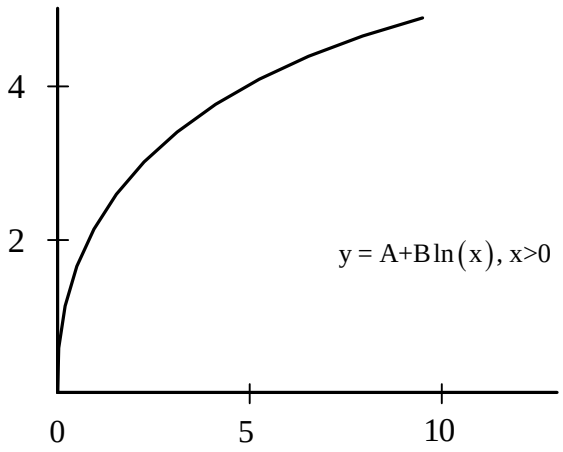
$$nA + B\sum x_i = \sum y_i$$

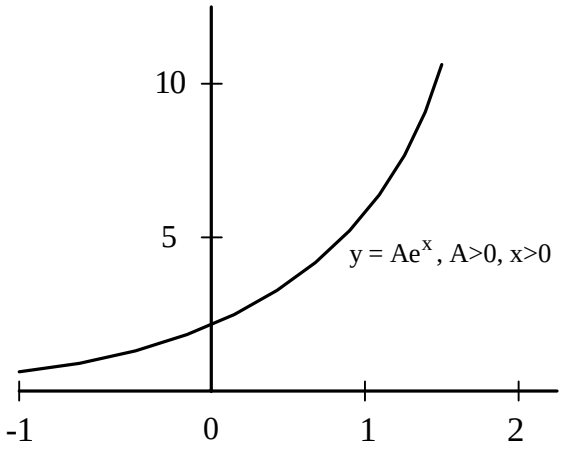
$$A\sum x_i + B\sum x_i^2 = \sum x_i y_i$$

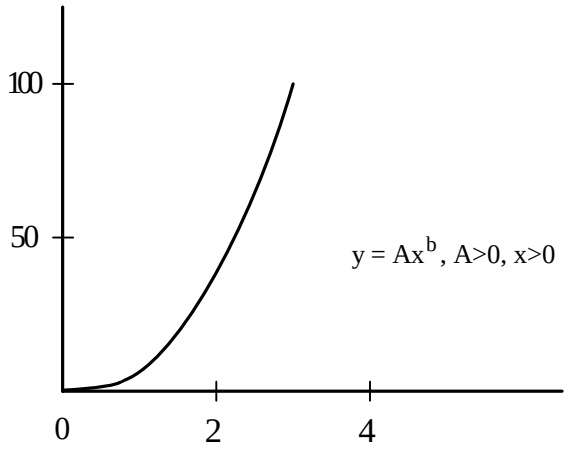
แก้สมการหาค่า A, B จะได้

$$\left.\begin{aligned} A &= \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2} \\ B &= \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2} \end{aligned}\right\} \tag{2.6}$$

เราสามารถประยุกต์วิธีถดถอยแบบเชิงเส้นไปใช้กับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นอาจอยู่ในรูปล็อกการิธึม เอ็กโพเนนเชียล หรือในรูปยกกำลังสองขึ้นไป ดังรูป 2.13







รูปที่ 2.13 ข้อมูลที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่างๆ

2.4.2.2 ข้อมูลมีความสัมพันธ์แบบพหุนาม (Polynomial Regression)

ข้อมูล n ชุด มีความสัมพันธ์กันแบบพหุนามอันดับ m เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + ... + a_mx^m$$

ผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบนของข้อมูลกับ G(x) คือ

$$D = \sum (y_i - G(x))^2$$

หาค่า $a_0, a_1, a_2, ..., a_m$ โดยใช้เงื่อนไข D ต้องมีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{\partial D}{\partial a_I} = 0 \quad , I = 0, 1, 2, ..., m$$

จะได้เป็นระบบสมการเชิงเส้น m+1 สมการ ได้คำตอบของสมการ

ให้ $\sum_{i=1}^{n} x_i = \sum x$ ละเว้นพิสัยของการหาผลรวมเพื่อให้ดูง่าย

$$\begin{vmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \cdots & \sum x^m \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \cdots & \sum x^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sum x^m & \sum x^{m+1} & \sum x^{m+2} & \cdots & \sum x^{2m} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \vdots \\ \sum x^m y \end{vmatrix} \qquad (2.7)$$

จะเห็นว่าสมการ (2.6) เป็นส่วนหนึ่งของสมการ (2.7) เมื่อ m=1 นั่นเอง

ถ้าฟังก์ชันไม่เป็นพหุนาม มีเทอมอื่นๆ เข้ามาปนอยู่ด้วย เช่น $y = A + Bx + C/x^2$ เป็นต้น ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$G(x) = a_0 + a_1f(x) + a_2g(x) \qquad (2.8)$$

เมื่อ $f(x) = x$

$$g(x) = \frac{1}{x^2}$$

เราสามารถใช้หัวข้อ 2.4.2.3 ข้อมูลมีความสัมพันธ์แบบหลายเชิงช่วยแก้ปัญหาได้

2.4.2.3 ข้อมูลมีความสัมพันธ์แบบหลายเชิง (Multiple Regression)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทางวิทยาศาสตร์อาจขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆตัวแปร เช่น กระแสไฟฟ้าในวงจร RC ถ้าตัวต้านทานมีการเปลี่ยนค่าได้ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานและเวลาที่เปลี่ยนไป ความดันของอากาศในกระบอกสูบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศและปริมาตรของกระบอกสูบที่เปลี่ยนไปเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ อันที่จริงแล้วความดันของอากาศยังคง

ขึ้นอยู่กับความสูงจากระดับน้ำทะเลและไอน้ำในอากาศ จะเห็นว่าความดันอากาศขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆตัวแปร

เราสามารถเขียนตัวแปรตามที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระหลายๆตัว ให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$y = f\left(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_j\right) \tag{2.9}$$

เมื่อ j คือจำนวนตัวแปรอิสระทั้งหมด

ถ้าตัวแปรตามมีการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปร x แต่ละตัวในลักษณะเชิงเส้น เราสามารถเขียนฟังก์ชันเชิงเส้นตรงที่ใช้แทนข้อมูลชุดนี้ ดังนี้

$$G\left(x_1, \ldots, x_j\right) = a_0 + a_1 x + a_2 x + \ldots + a_j x_j \tag{2.10}$$

ผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบนของข้อมูล n ชุด กับ $G\left(x_j\right)$ คือ

$$D = \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - G\left(x_1, x_2, \ldots, x_j\right)\right)^2 \tag{2.11}$$

หาค่า $a_0, a_1, \ldots, a_j$ โดยที่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นต้องมีค่าต่ำสุด นั่นคือ

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial a_0} &= 0 \\ \frac{\partial D}{\partial a_1} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial D}{\partial a_j} &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{2.12}$$

สมการ (2.12) จะประกอบด้วยสมการย่อย (j+1) สมการ เขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_{1i} & \sum_{i=1}^{n} x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_{ji} \\ \sum_{i=1}^{n} x_{1i} & \sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2 & \sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{ji} \\ \sum_{i=1}^{n} x_{2i} & \sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i} & \sum_{i=1}^{n} x_{2i}^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_{2i}x_{ji} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_{ji} & \sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{ji} & \sum_{i=1}^{n} x_{2i}x_{ji} & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_{ji}^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_j \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_{1i}y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_{2i}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_{ji}y_i \end{vmatrix} \tag{2.13}$$

2.4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชัน

ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งคือจะรู้ได้อย่างไรว่าข้อมูลที่ได้มานั้นสอดคล้องกับสมการเส้นตรงหรือสมการพหุนาม หรือสมการเอ็กโพเนนเชียล วิธีตรวจสอบที่ง่ายคือการพล็อตกราฟสมการนั้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากข้อมูล แต่วิธีนี้ก็จะทำได้ลำบากถ้ามีตัวแปรในสมการมากกว่า 2 ตัวขึ้นไป ด้วยเหตุนี้จึงมีการคำนวณทางสถิติ เช่น สัมประสิทธิ์ของการกำหนด (Coefficient of determination) จะใช้วัดความสัมพันธ์กันหรือสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้งหลายกับตัวแปรตาม สามารถบอกได้ว่าสอดคล้องกับสมการที่ได้หรือไม่

หลักการเบื้องต้นของสัมประสิทธิ์การกำหนดสามารถอธิบายได้ดังนี้ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (x_i, y_i) และค่าที่ได้จากการคำนวณของ $G(x_i)$ ความแตกต่างที่ได้คือ $y_i - G(x_i)$ เมื่อหาความแตกต่างของทุกๆจุด ยกกำลังสองทุกค่าเพื่อขจัดค่าที่เป็นลบ ผลรวมกำลังสองของความแตกต่างของ y_i (จากข้อมูล) กับ $G(x_i)$ (ที่ได้จากการคำนวณ) เรียกว่า ผลรวมกำลังสองของเศษเหลือ (The sum square of the residuals)

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (y_i - G(x_i))^2 \tag{2.14}$$

ถ้านำค่า y_i จากข้อมูลที่ได้ลบออกจากค่าเฉลี่ยของ $y(\bar{y})$ ผลรวมกำลังสองของความแตกต่าง y_i และ $(\bar{y})$ ทุกค่าเรียกว่า ผลรวมกำลังสองของความถดถอย (The sum of the square of the regression)

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \tag{2.15}$$

สัมประสิทธิ์การกำหนดจะบอกว่าข้อมูลกับฟังก์ชันมีความเหมาะสมสอดคล้องกันดีหรือไม่ หาได้จาก

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSR} \tag{2.16}$$

ในกรณีที่เป็นระบบสมการเชิงเส้น สมการ R^2 สามารถเขียนได้เป็น

$$R^2 = \frac{\left(n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^{n} y_i \right)^2 \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right)^2 \right)^2 \left(n\sum_{i=1}^{n} y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} y_i \right)^2 \right)} \tag{2.17}$$

ค่า R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่า y_i และ $y(x_i)$ มีความแตกต่างกันน้อยหรือไม่มีความแตกต่าง จะได้ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 เส้นกราฟที่ได้จะสอดคล้องเหมาะสมกับข้อมูล ควรจะได้ค่า R^2 มากกว่า 0.9

ค่าทางสถิติอีกค่าหนึ่งคือค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า y (Standard error of the estimate) จะเป็นการหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่า y ที่ได้จากการคำนวณ และค่า y ของข้อมูล ซึ่งหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum\left(y_i - G\left(x_i\right)\right)^2}{\left(n-m\right)}} \tag{2.18}$$

เมื่อ n คือจำนวนข้อมูล และ m คือจำนวนสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย เรียก (n-m) ว่าเป็นองศาของความเป็นอิสระ (number of degree of freedom) ถ้าฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณเป็นสมการเส้นตรง องศาแห่งความเป็นอิสระคือ n-2 และ ค่า S_x ยิ่งน้อย และ R^2 ใกล้เคียง 1 มาเท่าใด แสดงว่าฟังก์ชันที่ได้สอดคล้องและเหมาะสมกับข้อมูลที่มีอยู่มากขึ้นเพียงนั้น

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิควิธีกำลังสองน้อยที่สุด มาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ (parameter) สำคัญ ที่ใช้ในการกำหนดรูปแบบ และปริมาณข้อมูลซ้ำ (Combination) เพื่อควบคุมความผิดพลาดของการสื่อสารเสียง ที่ใช้ในอัลกอริทึมแบบปรับตัว (adaptive error control algorithm) ให้สอดคล้องกับสถานะของเครือข่ายในขณะนั้น และจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3