SWU Engineering Journal (2013) 8(1), 42-53
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน พ.ศ.2556

# เทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 4

## Fourth Generation Communications Technology

นรรัตน์ วัฒนมงคล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ. เมือง จ. ชลบุรี 20131
Norrarat Wattanamongkhol
Department of Electrical Engineering, Burapha University, Mueang District, Chonburi 20131
E-mail: norrarat@eng.buu.ac.th

**บทคัดย่อ**

เทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 4 หรือ 4G เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีอัตราเร็วการส่งข้อมูลสูงถึง 100 เมกะบิตต่อวินาที สำหรับการใช้งานที่มีการเคลื่อนที่ และ 1 กิกะบิตต่อวินาที สำหรับการใช้งานอยู่กับที่ โดยสามารถเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายการสื่อสารอื่น ๆ หรือช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการที่มีอยู่เดิมได้ เช่น เครือข่ายระบบ 3G ไว-ไฟ หรือไวแมกซ์ นอกจากนั้นแล้ว ยังมีรูปแบบการให้บริการที่หลากหลาย เช่น การดาวน์โหลดเพลง ภาพยนตร์ เครือข่ายสังคมออนไลน์ และดูทีวีออนไลน์ เป็นต้น ปัจจุบันหลายประเทศในทวีปเอเชียได้เริ่มมีการนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 4 ไปใช้งานแล้ว เช่น ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ และสิงคโปร์ เป็นต้น

**คำสำคัญ:** เทคโนโลยีแอลทีอี, ไวแมกซ์, เทคโนโลยียุคที่ 4, การสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สาย

**ABSTRACT**

The fourth-generation communication technology or 4G is a high efficiency communication. It has a data rate of 100 Mbps with using mobility, and 1 Gbps with nomadic. In can connect to the other existing network systems and it can increase the capacity of existing services, such as 3G wireless network, Wi-Fi, or WiMAX. In addition, there are a variety of services, for example, downloading music, movies, social networking, TV-online, and so on. At present, many countries in Asia have started to use 4G communication technology, such as Japan, South Korea and Singapore.

**Keyword:** LTE, WiMAX, Fourth-generation technology, Wireless broadband communication

### 1. บทนำ

การพัฒนาของเทคโนโลยีระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้เริ่มต้นขึ้นตั้งแต่ยุคที่ 1 ซึ่งใช้เทคโนโลยีการรับส่งสัญญาณวิทยุแบบแอนะล็อกที่มีพื้นฐานมาจากระบบ AMPS (Advanced mobile phone service) [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับบริการโทรศัพท์ระบบเซลลูลาร์โดยใช้คลื่นความถี่ระหว่าง 800 ถึง 900 MHz การเข้าถึงช่องสัญญาณจะใช้วิธีการแบ่งช่องสัญญาณทางความถี่ หรือ FDMA (Frequency division multiple access) ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกเมื่อปีพ.ศ. 2521 โดยบริษัทเอทีแอนด์ที (AT&T) เมืองชิคาโก ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งการให้บริการจะเน้นไปที่การสื่อสารโดยใช้สัญญาณเสียงเป็นหลัก และในช่วงเวลาใกล้เคียงกันได้มีการกำเนิดมาตรฐานระบบโทรศัพท์ เคลื่อนที่ขึ้นอีกหลายระบบ เช่น ในกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวียได้มีการพัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่คือ NMT (Nordic mobile telephone) รวมถึงบริษัทในประเทศญี่ปุ่นคือ ระบบ NTT (Nippon telegraph and telephone)

จากความสำเร็จอย่างสูงของการให้บริการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 1 ทำให้เกิดการพัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 ขึ้นในปีพ.ศ. 2535 เพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้บริการที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงได้เปลี่ยนจากเทคโนโลยีการส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกมาเป็นการส่งสัญญาณแบบดิจิทัลผ่านทางคลื่นไมโครเวฟ ด้วยเหตุผลที่สำคัญดังนี้คือ ระบบดิจิทัลสามารถใช้แบนด์วิดท์ (Bandwidth) เพื่อรองรับการให้บริการที่มีประสิทธิภาพมากกว่าระบบแอนะล็อก สามารถให้คุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าและปลอดภัยจากการดักฟังทำให้การสนทนาของผู้ใช้บริการมีความเป็นส่วนตัวมากขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังสามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้นอกเหนือจากการสื่อสารด้วยสัญญาณเสียง ตัวอย่างของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัลที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ระบบ GSM (Global system for mobilization) [2] ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มประเทศในยุโรป และในเวลาต่อมาได้มีการสร้างระบบ USDC (US digital cellular) และระบบ IS-95 CDMA (Code division multiple access) [3] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดโดยประเทศสหรัฐอเมริกา อย่างไรก็ตาม ระบบ GSM ถือเป็นมาตรฐานของเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก สำหรับความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 2 ที่ได้นำมาใช้งานมีอยู่ 2 ระบบคือ 900 MHz และ 1800 MHz การเข้าถึงช่องสัญญาณสามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ การแบ่งช่องสัญญาณทางเวลา (TDMA: Time division multiple access) และการแบ่งช่องสัญญาณด้วยการเข้ารหัส (CDMA: Code division multiple access)

ในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เรียกว่า GPRS (General packet radio service) ซึ่งจัดว่าเป็นรอยต่อระหว่างเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 1 และ 2 จึงอาจถูกเรียกได้ว่าเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2.5 และ EDGE (Enhanced data rates for global evolution) ซึ่งถือเป็นยุคที่ 2.75 โดยเทคโนโลยีทั้งสองมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุดประมาณ 170 Kbps และ 384 Kbps ตามลำดับ มีความยืดหยุ่นในการสื่อสารข้อมูลแบบ Non-voice เป็นเทคโนโลยีที่ไม่มีการจองช่องสัญญาณล่วงหน้าก่อนส่งข้อมูล ทำให้ผู้ใช้สามารถติดต่อกับสถานีฐานได้ตลอดเวลาซึ่งถือได้ว่าเป็นการใช้งานช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในมุมมองของผู้ใช้บริการเห็นว่าการให้บริการของเทคโนโลยีทั้งสองนี้ยังมีความเร็วต่ำอยู่เมื่อเปรียบเทียบกับการให้บริการสื่อสารความเร็วสูงผ่านคู่สาย หรือ DSL (Digital subscriber line) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ใช้บริการในขณะนั้น [4]

จากนั้นจึงได้เข้าสู่เทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 3 ในปีพ.ศ. 2544 ถูกพัฒนาเพื่อแทนที่ระบบโทรศัพท์ 2G ซึ่ง 3G นั้นได้รับการพัฒนาบนพื้นฐานของมาตรฐาน IMT-2000 ภายใต้กลุ่มของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ มาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 หรือที่เรียกว่า UMTS (Universal mobile telecommunication services) ในระบบ GSM ใช้ช่วงความถี่ตั้งแต่ 850 900 1800 1900 และ 2100 MHz ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ให้บริการรับส่งข้อมูล ใช้งานด้านมัลติมีเดีย ส่งผ่านข้อมูลทั้งภาพและเสียงในระบบไร้สายด้วยความเร็วที่สูง โดยมาตรฐาน UMTS ถูกออกแบบมาสำหรับผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้นำไปพัฒนาต่อจากยุค 2G/2.5G/2.75G เพื่อเข้าสู่ยุค 3G ซึ่งได้รับการพัฒนามาตรฐานโดยองค์กร 3GPP (The 3rd generation partnership project) มีเทคโนโลยีหลักที่ได้รับการยอมรับนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางทั่วโลกคือมาตรฐาน Wideband code division multiple access (W-CDMA) และมีการพัฒนาต่อไปสู่มาตรฐาน HSPA (High speed packet access) ซึ่งมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดถึง 14 Mbps เร็วกว่า 2.75G ประมาณ 36 เท่า [1], [3], [5]

จากความสำเร็จในการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 3 โดยมีสื่อข้อมูลดิจิทัล (Digital contents) เป็นตัวผลักดันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น การให้บริการด้านมัลติมีเดียจะมีรูปแบบที่หลากหลาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่จึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่มีความเร็วสูงขึ้นเพื่อให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลเหล่านี้ได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้งานร่วมกับเครือข่ายอื่นๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงส่งผลให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารในยุคถัดไป

**2. พัฒนาการของเทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 4**

นับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2550 ระบบการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงผ่านเครือข่ายไร้สายได้ถูกพัฒนามาอย่างอย่างต่อเนื่อง ผู้ใช้บริการสามารถส่งข้อมูลจำนวนมากได้อย่างรวดเร็วผ่านระบบเครือข่ายไร้สายหรือที่มักเรียกกันในปัจจุบันว่า “การสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สาย” (Wireless broadband communication) เนื่องมาจากการพัฒนาของเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยี HSPA มาใช้เพื่อช่วยรองรับการสื่อสารที่มีอัตราเร็วสูง ผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั่วโลกมีการสร้างและขยายเครือข่ายที่ใช้เทคโนโลยี HSPA จนครอบคลุมพื้นที่ให้บริการเป็นบริเวณกว้าง ทำให้ผู้ใช้บริการสามารถรับส่งข้อมูลอัตราเร็วสูงผ่านเครือข่าย 3G ได้โดยมีเครือข่าย WLAN ช่วยรองรับปริมาณการใช้งานในพื้นที่ที่มีผู้ใช้บริการจำนวนมาก สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือการขยายตัวของปริมาณข้อมูลในเครือข่ายโทรศัพท์ระบบ 3G ซึ่งจากค่าเฉลี่ยทั่วโลกตั้งแต่ปีพ.ศ. 2550 พบว่าการสื่อสารข้อมูลในรูปแบบของแอปพลิเคชั่นต่าง ๆ รวมถึงการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมีค่ามากกว่าปริมาณข้อมูลที่เกิดจากการสนทนา ประกอบกับความยืดหยุ่นในการติดต่อสื่อสารจึงทำให้พฤติกรรมของผู้บริโภคได้รับการพัฒนาไปสู่โลกแห่งการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สายอย่างเต็มรูปแบบ

ดังนั้นแนวทางการพัฒนาไปสู่เทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 4 จึงมุ่งเน้นการให้บริการที่มีการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านมัลติมีเดียได้อย่างกว้างขวางขึ้นซึ่งจำเป็นต้องใช้สเปคตรัม (Spectrum) ความถี่วิทยุเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับคุณลักษณะเด่นของเทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 4 ที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

- สามารถใช้งานบนเครือข่ายที่ครอบคุลมทั้งพื้นที่ขนาดใหญ่และพื้นที่เฉพาะตามที่ต้องการได้
- มีช่องสัญญาณแบนด์วิดท์กว้างกว่าระบบ 3G สามารถสื่อสารได้ทุกสถานที่ที่สัญญาณครอบคลุมถึงสามารถเชื่อมต่อกับระบบสื่อสารแบบใช้สายได้ เช่น ระบบอินเตอร์เน็ต
- มีเทคโนโลยีที่ทำให้การรับส่งสัญญาณขณะกำลังเคลื่อนที่สามารถปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้หลากหลายลักษณะและสามารถให้บริการมัลติมิเดียที่มีคุณภาพสูง (High quality)
- อัตราการรับส่งข้อมูลขณะกำลังเคลื่อนที่และการใช้งานทั่วไปมีค่าสูงกว่า 100 Mbps และ 1 Gbps ตามลำดับ รวมถึงคุณสมบัติการเชื่อมต่อเสมือนจริงแบบสามมิติ (3-dimension) ระหว่างผู้ใช้โทรศัพท์ด้วยกันเอง
- ช่วยให้การทำงานของระบบ GPRS มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถค้นหาตำแหน่ง (Global positioning system: GPS) ของอุปกรณ์สื่อสารและสถานที่ต่าง ๆ ที่ต้องการได้ทั่วโลก
- สามารถให้บริการสำหรับแอพพลิเคชั่นที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับระบบ 3G เช่น มัลติมีเดีย วิดีโอแบบภาพเคลื่อนไหวที่เต็มรูปแบบ (Full-motion video) หรือการประชุมทางไกลผ่านโครงข่ายโทรศัพท์แบบไร้สาย (Wireless teleconferencing) เป็นต้น
- ระบบ 4G เป็นเครือข่ายแบบ IP Packet-based จึงทำให้สามารถส่งได้ทั้งเสียงและข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ด้วยราคาการให้บริการที่ถูกมากและมีรูปแบบที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

**3. เทคโนโลยีระบบการสื่อสารยุคที่ 4**

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาในข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีระบบการสื่อสารในแต่ละยุคได้ถูกพัฒนาเพื่อให้ได้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุด สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทุกที่ทุกเวลา ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการเป็นบริเวณกว้างและรองรับการสื่อสารที่มีการเคลื่อนที่ หากพิจารณาถึงวิวัฒนาการของการพัฒนาเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่จะพบว่ามีรูปแบบของการพัฒนาที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ [6], [7] โดยรูปแบบแรกเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยเริ่มต้นจากระบบ AMPS (ยุคที่ 1) ต่อมาเป็นระบบ GSM (ยุคที่ 2) ระบบ WCDMA (ยุคที่ 3) และก่อนไปถึงยุคที่ 4 คือเทคโนโลยี LTE (Long term evolution) ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งเป็นการพัฒนาที่เริ่มต้นจาก WLAN ไปสู่การเข้าถึงบรอดแบนด์ไร้สายด้วยเทคโนโลยี WiMAX ซึ่งมุ่งเน้นไป

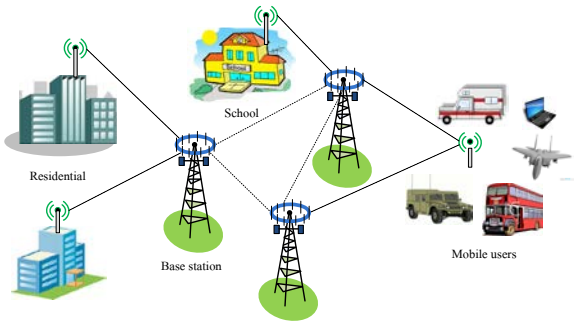
ที่การพัฒนาด้านการส่งข้อมูลมัลติมีเดียด้วยความเร็วสูงเป็นหลัก โดยมิได้คำนึงความสามารถในการเคลื่อนที่มากนัก ในขณะที่รูปแบบที่ 1 มุ่งเน้นทางด้านการสื่อสารทางเสียงประกอบกับความสามารถใช้งานในขณะกำลังเคลื่อนที่ได้ ซึ่งไม่ได้คำนึงอัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม รูปแบบทั้งสองนี้มีแนวโน้มที่จะพัฒนามุ่งสู่มาตรฐานเดียวกัน คือด้านการส่งข้อมูลมัลติมีเดียด้วยความเร็วสูงบนเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่และเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการที่มีมากขึ้น

สำหรับเทคโนโลยี 4G (IMT-advanced) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคโนโลยีหลักคือ WiMAX II (IEEE 802.16m) LTE (Long term evolution) และ UMB (Ultra mobile broadband) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

*3.1 เทคโนโลยีไวแมกซ์*

ไวแม็กซ์ หรือ WiMAX ย่อมาจากคำว่า worldwide interoperability for microwave access เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบบอร์ดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นมาภายใต้ มาตรฐานที่เรียกเป็นทางการว่า IEEE 802.16 [8] ถูกอนุมัติโดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือ IEEE (Institute of electrical and electronics engineers) ในปีพ.ศ. 2544 พัฒนาโดย WiMAX forum เทคโนโลยีไวแมกซ์ถูกใช้งานอยู่บนคลื่นไมโครเวฟที่ย่านความถี่ 2-66 GHz สามารถให้บริการบรอดแบนด์สำหรับบ้านเรือนครอบคลุมพื้นที่ระยะไกลถึง 48 กิโลเมตร และมีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 Mbps ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารประเภทอื่น ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน เช่น เทคโนโลยี 3G หรือ ไว-ไฟ (Wi-fi) เป็นต้น

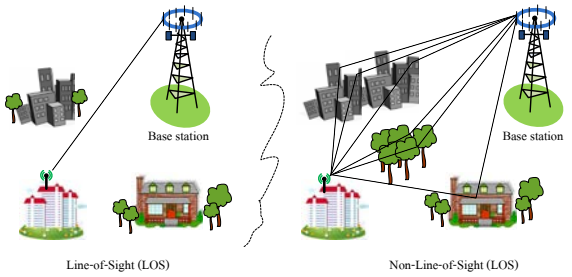
สถาปัตยกรรมโครงข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.16 (ดังแสดงในรูปที่ 1) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ 1) สถานีฐาน (Base Station: BS) ทำหน้าที่กำหนดและควบคุมการรับส่งข้อมูลของสถานีลูกข่ายทั้งหมดที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการของแต่ละสถานีฐาน อีกทั้งสถานีฐานยังสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานอื่น ๆ ได้อีก และ 2) สถานีลูกข่าย (Subscriber station: SS) ทำหน้าที่ติดต่อกับสถานีลูกข่ายอื่น ๆ ได้โดยการส่งสัญญาณผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า CPE (Customer premises equipment) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับและส่งข้อมูลกำลังสูงเพื่อให้สามารถติดต่อในระยะไกล ๆ ได้ ลักษณะของอุปกรณ์ลูกข่ายสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบที่แตกต่างกันคือ 1) รูปแบบที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (Fixed) 2) รูปแบบที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ แต่ต้องอยู่นิ่งกับที่ในขณะกำลังใช้งาน (Portable) และ 3) รูปแบบที่สามารถใช้งานได้ในขณะเคลื่อนที่ (Mobility)




รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายตามมาตรฐาน IEEE 802.16

จากคุณสมบัติดังที่กล่าวมาทำให้ไวแมกซ์ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของ WMAN (Wireless metropolitan area network) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในพื้นที่เขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ โดยมีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือสามารถรองรับการทำงานได้ทั้งแบบทางตรง (LOS: Line-of-sight) และทางอ้อม (NLOS: Non-line-of-sight) (ดังแสดงในรูปที่ 2) จึงทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จากการผสมของสัญญาณที่เดินทางมาจากหลายเส้นทาง (Multipath) จะทำให้สัญญาณที่ภาครับรับได้เกิดความผิดเพี้ยน (Distortion) อันเป็นผลเนื่องมาจากการสะท้อน (Reflection) หรือการหักเห (Refraction) กับอาคาร ที่พักอาศัย ต้นไม้ หรือสิ่งกีดขวางอื่น ๆ นอกจากนั้นแล้วยังสามารถติดต่อสื่อสารได้ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.16e โดยยังคงให้คุณภาพการสื่อสารที่ดีและมีเสถียรภาพในขณะใช้งาน นอกจากนั้นแล้ว ยังมีมาตรฐาน IEEE 802.16m [8], [9] หรือมักถูกเรียกว่าเป็น WiMAX-II โดยเน้นในเรื่องการให้บริการที่ผู้ใช้สามารถเคลื่อนที่ได้ในขณะใช้งาน มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดถึง 300 Mbps โดยได้นำเอาแบบ

จำลองสัญญาณหลายอินพุตหลายเอาท์พุต (MIMO: Multiple input multiple output) มาประยุกต์ใช้งานโดยการใช้เสาอากาศหลายต้นในการรับหรือส่งสัญญาณ ซึ่งจะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวน (Noise) ได้เป็นอย่างดี จึงถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัมความถี่ได้อีกวิธีหนึ่ง




รูปที่ 2 การส่งสัญญาณแบบ LOS และ NLOS

แถบคลื่นความถี่วิทยุที่ถูกกำหนดให้ใช้งานได้ตามมาตรฐาน IEEE 802.16 [9] มี 3 ย่านความถี่ ได้แก่

1. ย่านความถี่ 10-66 GHz Licensed band เป็นแถบคลื่นวิทยุที่ต้องการใบอนุญาตและการคุ้มครองการรบกวนด้านคลื่นวิทยุ โดยแถบคลื่นวิทยุนี้จะอยู่ในช่วงความถี่สูง ดังนั้นการติดต่อระหว่างสถานีฐานและสถานีลูกข่ายจะต้องการการสื่อสารแบบทางตรง (LOS) ซึ่งช่องสัญญาณแบนด์วิดท์ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 25 - 28 MHz ต่อช่องสัญญาณ สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดถึง 125 Mbps อุปกรณ์ไวแมกซ์ที่ทำงานบนแถบคลื่นวิทยุนี้มีชื่อเรียกว่า WirelessMAN-SC ซึ่งใช้การรับส่งข้อมูลเป็นแบบ Single carrier (SC)

2. ย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 11 GHz Licensed band เป็นแถบคลื่นวิทยุที่ต้องการใบอนุญาตการคุ้มครองการรบกวนด้านคลื่นวิทยุ โดยแถบคลื่นวิทยุที่ใช้จะอยู่ในแถบคลื่นวิทยุที่ต่ำกว่า 6 GHz ทำให้การติดต่อระหว่างสถานีฐานและสถานีลูกข่ายสามารถสื่อสารแบบทางอ้อมได้ โดยช่องสัญญาณแบนด์วิดท์ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 1.75 - 20 MHz ต่อช่องสัญญาณ อุปกรณ์ไวแมกซ์ที่ทำงานบนแถบคลื่นวิทยุนี้มี 3 รูปแบบที่แตกต่างกันคือ Single carrier (SC) OFDM และ OFDMA

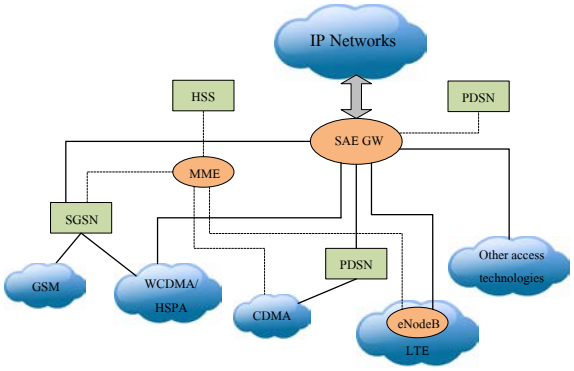
3. ย่านความถี่ต่ำกว่า 11 GHz Unlicensed band เป็นแถบคลื่นวิทยุที่ไม่ต้องการใบอนุญาตและไม่ได้รับการคุ้มครองการรบกวนด้านวิทยุใดๆ ซึ่งการติดต่อระหว่างสถานีฐานและสถานีลูกข่ายจะติดต่อสื่อสารแบบทางอ้อม เนื่องจากแถบคลื่นวิทยุที่ถูกใช้งานร่วมกับเครือข่ายการสื่อสารอื่นๆ อาจมีการรบกวนกันได้ ดังนั้นจึงต้องติดตั้งกลไกที่เรียกว่า “การเลือกความถี่แบบพลวัต” หรือ “Dynamic frequency selection (DFS)” เพื่อหลีกเลี่ยงการส่งข้อมูลผ่านช่อง สัญญาณที่มีผู้อื่นใช้งานอยู่แล้วซึ่งจะช่วยลดโอกาสที่สัญญาณจะมารบกวนกันลง อุปกรณ์ไวแมกซ์ที่ทำงานบนแถบคลื่นวิทยุนี้มีชื่อเรียกว่า Wireless HUMAN (High speed unlicensed metropolitan area network) ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลรูปแบบเดียวกับแถบคลื่นวิทยุที่ต่ำกว่า 11 GHz ที่เป็นแบบไม่ต้องการใบอนุญาต

### *3.2 เทคโนโลยี LTE*

เทคโนโลยี LTE (Long term evolution) [10] เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาและถูกกำหนดตามมาตรฐานของ 3GPP รุ่นที่ 8 เพื่อนำไปสู่ระบบการสื่อสารในเครือข่าย 4G โดยการกำหนดโครงสร้างให้เป็นแบบไอพีทั้งหมด แต่ในความเป็นจริงแล้วเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่ถูกพัฒนาภายใต้มาตรฐานเดียวกันนี้มีหลายรุ่นซึ่งมีความแตกต่างกันไป โดยเทคโนโลยีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ GSM GPRS EDGE หรือ 3G เป็นต้น ภาพรวมของเทคโนโลยี LTE มุ่งเน้นไปที่ความต้องการพื้นฐานในระบบสื่อสารไร้สายที่มีอยู่สองประเด็นหลักคือ ความเร็วในการรับส่งข้อมูลและเวลาประวิง (Latency) ที่เกิดขึ้นในระบบ มีความเร็วในการดาวน์โหลด 100 Mbps และอัพโหลด 50 Mbps เวลาประวิงกำหนดให้มีค่าต่ำกว่า 10 มิลลิวินาที สำหรับช่องสัญญาณแบนด์วิดท์ได้ถูกกำหนดให้มีค่าความถี่น้อย ๆ ไปจนถึง 20 MHz การกำหนดให้แบนด์วิดท์มีความถี่น้อยๆ นั้นเพื่อสำรองไว้ใช้กับการส่งข้อมูลที่มีปริมาณไม่มากนัก แต่หากต้องการให้การส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพสูงขึ้นจะต้องใช้แบนด์วิดท์ที่มีความถี่แถบกว้างขึ้น ดังนั้นจุดมุ่งหมายหลักของการพัฒนาเทคโนโลยี LTE คือการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัมความถี่เพื่อลดต้นทุนการส่งข้อมูลต่อบิต รวมถึงการพัฒนาบริการใหม่ ๆ โดยใช้คลื่นความถี่ย่านใหม่หรือย่านเดิมหลังจากการจัดสรรคลื่นความถี่ (Reframing) ข้อกำหนดของมาตรฐาน LTE ซึ่งรวมถึง

มาตรฐานของสถาปัตยกรรมเครือข่าย SAE (System architecture evolution) ได้รับการรับรองจากหน่วยงาน 3GPP เมื่อปีพ.ศ. 2552 โดยกำหนดให้สามารถรองรับการใช้งานร่วมกันระหว่างเครือข่ายระบบ 3G และ 2G มาตรฐานเครือข่ายแบบ SAE มีรูปแบบการเชื่อมต่อที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน การเลือกได้ว่าจะให้ส่งสัญญาณในรูปแบบ FDD (Frequency division duplex) หรือ TDD (Time division duplex) มีผลทำให้จำนวนและความหลากหลายของอุปกรณ์ภายในเครือข่ายลดลง จึงช่วยลดเวลาหน่วงในการรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายได้ ช่วยลดต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ และการบริหารจัดการเครือข่ายของผู้ให้บริการ อีกทั้งยังเป็นการจัดวางสถาปัตยกรรมเครือข่ายเพื่อสนับสนุนการให้บริการและแอปพลิเคชั่นประเภทไอพีได้อย่างเต็มรูปแบบ

สถาปัตยกรรมโครงข่ายตามมาตรฐาน LTE-SAE [10], [11] (ดังแสดงในรูปที่ 3) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ 3 ส่วนคือ 1) สถานีฐาน LTE ซึ่งมี 2 โนดเท่านั้น คือ eNodeB และ EPS (Evolved packet system) เป็นอุปกรณ์ที่มีการติดตั้งครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ 2) SAE gateway (SAE GW) ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างโนด LTE ผ่านทางจุดเชื่อมต่อมาตรฐาน S1 นอกจากนี้ ผู้ให้บริการเครือข่าย LTE ที่มีการให้บริการผ่านเครือข่าย GSM WCDMA HSPA หรือ CDMA ที่มีอยู่แล้วก็สามารถวางแผนการให้บริการร่วมกันได้เพียงแค่ทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ส่วนที่ 3) ซึ่งก็คืออุปกรณ์ Mobility management entity (MME) ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณควบคุมจากอุปกรณ์ Serving GPRS support node (SGSN) ภายในเครือข่าย GSM และ WCDMA/ HSPA เข้ากับสถาปัตยกรรม SAE ส่วนข้อมูลต่าง ๆ จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ SAE GW โดยตรง สำหรับการเชื่อมต่อกับเครือข่าย CDMA ก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือเป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ Packet Data Service Node (PDSA) ของเครือข่าย CDMA เข้ากับอุปกรณ์ MME สำหรับการรับส่งสัญญาณควบคุม (Signaling) ส่วนข้อมูลต่าง ๆ จะถูกรับส่งโดยตรงกับอุปกรณ์ SAE GW นอกจากนั้นแล้ว MME ยังทำหน้าที่บริหารจัดการสัญญาณควบคุมที่ใช้ตรวจสอบและปรับตำแหน่งที่อยู่ของผู้ใช้บริการ ทั้งที่เป็นเครื่องลูกข่าย LTE และเครื่องลูกข่ายในเครือข่ายอื่น ๆ ที่เชื่อมต่ออยู่กับสถาปัตยกรรม SAE โดย MME จะทำงานร่วมกับอุปกรณ์ Home subscriber server (HSS) ซึ่งรองรับระบบสัญญาณควบคุมเครือข่ายที่แตกต่างกับเครือข่ายระบบ 2G และ 3G




รูปที่ 3 สถาปัตยกรรมโครงข่ายมาตรฐาน LTE-SAE

คณะทำงาน 3GPP กำหนดให้มีการนำเทคโนโลยี OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) ไปใช้สำหรับการสื่อสารด้านทิศทางขาลง (Downlink) คือจากสถานีฐานไปยังเครื่องลูกข่าย LTE ซึ่งช่วยทำให้สามารถบริหารจัดการทรัพยากรความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เทคโนโลยี OFDM เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อสร้างอัตราเร็วในการสื่อสารได้สูงโดยมีต้นทุนต่ำ ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ได้รับการพิสูจน์ถึงความมีประสิทธิภาพและได้มีการนำไปใช้งานจริงในมาตรฐานการสื่อสาร Wireless LAN ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11a/b/g รวมถึงมีการนำไปใช้ในเครือข่าย IEEE 802.16 HiperLAN-2 Digital video broadcast (DVB) และ Digital audio broadcast (DAB) สำหรับการสื่อสารในทิศทางขาขึ้นจะใช้เทคนิค SC-FDMA (Single carrier frequency division multiple access) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับการคิดค้นขึ้นมาเพื่อทดแทนการสื่อสารแบบ OFDM ตามปกติซึ่งพบปัญหาว่าจะต้องใช้เครื่องส่งวิทยุที่มีกำลังส่งสูงทำให้เกิดปัญหาการใช้ไฟฟ้ามากจึงไม่เหมาะสำหรับใช้งานกับอุปกรณ์สื่อสารพกพาขนาดเล็ก เทคนิค SC-FDMA มีกลไกการจัดสรรช่องสัญญาณที่สามารถลดค่ากำลังส่งลง นอกจากจะเป็นการช่วยประหยัดการพลังงานให้กับเครื่องลูกข่ายแล้ว ยังเป็นการช่วยลดระดับพลังงานในการส่งสัญญาณจากเครื่อง

ลูกข่ายจำนวนมากที่ใช้งานอยู่ภายในเครือข่ายทำให้ระดับสัญญาณรบกวนลดลงซึ่งเท่ากับเป็นการช่วยขยายพื้นที่ให้บริการของเครือข่าย LTE ได้อีกวิธีหนึ่ง

*3.3 เทคโนโลยี UMB (Ultra Mobile Broadband)*

เทคโนโลยี Ultra mobile broadband (UMB) [12] เป็นเทคโนโลยีที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นมาจากระบบการสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ CDMA2000 ซึ่งดำเนินการภายใต้โครงการของ 3GPP2 สำหรับวิธีการสื่อสารข้อมูลแบบ UMB นั้นมีเทคโนโลยีย่อยซึ่งประกอบด้วย Ultra หมายถึงเทคโนโลยีที่รวดเร็วและรองรับข้อมูลได้มากกว่าขนาดปกติ Mobile คือรูปแบบที่สามารถรองรับการให้บริการการสื่อสารแบบไร้สายได้หลากหลายรูปแบบและสามารถใช้งานในขณะกำลังเคลื่อนที่ได้ซึ่งแตกต่างไปจากเทคโนโลยี Wi-fi และ WiMAX ส่วนคำว่า Broadband จะเป็นความสามารถในการส่งข้อมูลได้ปริมาณมาก คือตั้งแต่ 100 Mbps ขึ้นไป

จุดมุ่งหมายของ UMB คือการเพิ่มประสิทธิภาพความจุของระบบ เพิ่มอัตราการส่งข้อมูล และลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงบริการที่มีอยู่เพื่อให้สามารถสร้างวิธีการใช้งานในรูปแบบใหม่ ๆ โดยอนุญาตให้ผู้ใช้สามารถใช้บริการไอพี (IP-based) ได้พร้อม ๆ กับการใช้งานแบบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ สามารถใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการสื่อสารอื่นๆ ได้ เช่น CDMA2000 1x และระบบ 1xEV-DO อีกทั้งยังสามารถทำงานได้ภายใต้สถาปัตยกรรมเครือข่ายแบบไอพี รวมถึงสถาปัตยกรรมเครือข่ายทั้งแบบผสมและแบบกระจาย เทคโนโลยี UMB จะใช้การมัลติเพล็กซ์แบบ OFDM/OFDMA ร่วมกับเทคนิคการใช้สายอากาศแบบปรับตัวได้ (จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป) เพื่อเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลในช่วงดาวน์โหลดให้มากกว่า 275 Mbps และในช่วงอัพโหลดให้มากกว่า 75 Mbps โดยมีแบนด์วิดท์ที่สามารถปรับช่วงแถบความถี่ได้ระหว่าง 1.25 - 20 MHz

## 4. การเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณ

จากที่หัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบถึงการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารระบบ 4G โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ การลดอัตราความผิดพลาดเนื่องจากการส่งสัญญาณด้วยอัตราเร็วสูง ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญนอกเหนือจากการใช้เทคโนโลยีการส่งสัญญาณความเร็วสูงซึ่งถูกนำเสนอมาแล้วในหัวข้อที่ 3 การนำเอาเทคนิคการส่งสัญญาณต่าง ๆ มาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการรับส่งข้อมูลความเร็วสูงที่ใช้งานอยู่มีหลายวิธี เช่น เทคโนโลยีระบบสายอากาศแบบปรับตัวได้ การมัลติเพล็กซ์แบบ OFDM และไดเวอร์ซิตี (Diversity) เป็นต้น โดยแต่ละวิธีมีหลักการทำงานและคุณลักษณะเด่นที่แตกต่างกันดังนี้

*4.1 ระบบสายอากาศแบบปรับตัวได้*

เทคโนโลยีระบบสายอากาศแบบปรับตัวได้ (AAS: Adaptive antenna system) หรือสายอากาศฉลาด (Smart antenna) [1], [13] เป็นการใช้สายอากาศแบบแถวลำดับ (Antenna array) ร่วมกับการประมวลผลสัญญาณเพื่อทำให้ผลตอบสนองของรูปแบบการแผ่พลังงาน (Pattern) ที่ดีที่สุดได้โดยอัตโนมัติ หลักการพื้นฐานของสายอากาศแบบปรับตัวได้สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4 ระบบสายอากาศชนิดนี้จะคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อใช้ในการจัดลำคลื่นโดยใช้ข้อมูลต่างๆ ช่วยในการปรับตัว เช่น สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศแถวลำดับ สัญญาณอ้างอิง และทิศทางของผู้ใช้ เป็นต้น จากรูปที่ 4 จะประกอบด้วยสายอากาศรับแบบแถวลำดับที่มี $N$ องค์ประกอบ เมื่อใช้แบบจำลองสัญญาณ MIMO ของการสื่อสารแบบไร้สายและพิจารณาสัญญาณที่รับได้เป็นเวคเตอร์สัญญาณ เชิงซ้อน $\mathbf{x}(k)=\left[x_0(k),x_1(k),...,x_N(k)\right]^T$ สามารถเขียนแทนด้วยสมการ

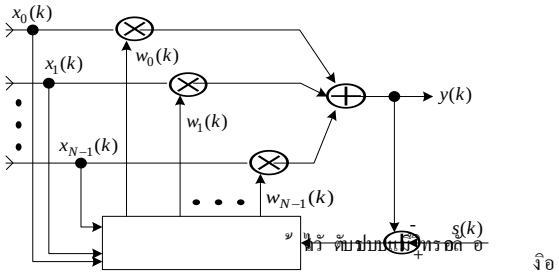
$$\mathbf{x}(k)=\mathbf{H}\mathbf{s}(k)+\mathbf{n}(k) \qquad (1)$$

เมื่อ $\mathbf{H}$ แทนเมทริกซ์ผลตอบสนองของสายอากาศขนาด $N\times M$, $\mathbf{s}(k)=\left[s_0(k),s_1(k),...,s_{M-1}(k)\right]$ แทนเวคเตอร์ของสัญญาณส่งและเวคเตอร์ของสัญญาณรบกวน $\mathbf{n}(k)=\left[n_0(k),n_1(k),...,n_{N-1}(k)\right]$ สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ $\mathbf{x}_i(k)$ จะถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก $\mathbf{w}_i(k)$ เมื่อ $i=[0,1,2,...,N]$ เอาต์พุตที่ได้ $\mathbf{x}_i(k)\mathbf{w}_i(k)$ จะถูก

รวมเข้าด้วยกันเพื่อเป็นสัญญาณเอาต์พุตของสายอากาศ $y(k)$ ดังแสดงในสมการ

$$y(k) = \mathbf{w}^H(k)\mathbf{x}(k) \quad (2)$$

เมื่อ $\mathbf{w}(k) = \left[w_0(k), w_1(k), ..., w_{N-1}(k)\right]^T$ แทนเวคเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนัก และ *H* หรือ Hermitian แทนการสลับเปลี่ยนสังยุค (Conjugate transpose)




รูปที่ 4 โครงสร้างพื้นฐานสายอากาศแถวลำดับปรับตัว

ในทางปฏิบัติแล้วการหาค่าถ่วงน้ำหนักจะได้จากการคำนวณหาค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์ (Correlation matrix) และเมทริกซ์อัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation matrix) ซึ่งสามารถทำได้ยาก เนื่องจากต้องเก็บข้อมูลสัญญาณจำนวนมากและการคำนวณมีความซับซ้อนสูง ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้วิธีการอื่นแทนการหาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อนำมาใช้ปรับสัญญาณรับให้ได้คุณภาพตามต้องการโดยอัตโนมัติ เทคนิคนี้จึงถูกเรียกว่า “อัลกอริทึมแบบปรับตัวได้” ซึ่งจะทำให้การความซับซ้อนในการคำนวณลดลง คุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญของอัลกอริทึมที่ปรับตัวได้คือ มีความสามารถติดตามสัญญาณในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยสามารถลู่เข้าหาคำตอบที่เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่มย่อยได้ (Suboptimum) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วการประมวลผลของอัลกอริทึมแบบปรับตัวได้จะเป็นการดำเนินการทีละตัวอย่างและสามารถทำงานในเวลาจริงได้ (Real-time)

อัลกอริทึมการปรับตัวได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ อัลกอริทึมปรับตัวได้แบบมองไม่เห็น (Blind adaptive algorithm) เป็นอัลกอริทึมที่ไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงใดๆ (Reference signal) เพื่อใช้ในการปรับตัวของสายอากาศแต่จะใช้ความรู้ความเข้าใจคุณสมบัติของระบบหรือสัญญาณบางอย่างที่รู้ล่วงหน้าและอัลกอริทึมปรับตัวได้แบบมองเห็น (Non-blind algorithm) เป็นอัลกอริทึมที่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงในการประมวลผล การปรับตัวของระบบสายอากาศจะเร็วกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมแบบมองไม่เห็นและสามารถกำหนดสัญญาณที่ต้องการรับได้จึงถูกนำมาใช้กับสายอากาศฉลาด อย่างไรก็ตาม การใช้อัลกอริทึมชนิดนี้จำเป็นต้องรู้ข้อมูลบางอย่างของการรับส่งสัญญาณในระบบ ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการเริ่มต้นเพื่อส่งข้อมูลที่เป็นที่รู้กันระหว่างภาครับและภาคส่ง ซึ่งถูกเรียกว่า “ลำดับการฝึก” (Training sequence) สำหรับอัลกอริทึมปรับตัวได้แบบมองเห็นที่สำคัญและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการนำใช้ประมวลผลเพื่อคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักคืออัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (LMS: Least mean square) ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Bernard Widrow [13] เนื่องจากการคำนวณมีความซับซ้อนต่ำสามารถสร้างตัวประมวลผลสัญญาณได้ง่าย อีกทั้งสัญญาณแทรกสอดลดลง ส่งผลให้สัญญาณที่รับได้มีคุณภาพสูงขึ้น

อัลกอริทึม LMS ได้ถูกพัฒนาโดยใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Cost function) แบบค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด สำหรับสมการการปรับตัวของเวคเตอร์ถ่วงน้ำหนักของอัลกอริทึม LMS สามารถคำนวณได้จาก

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu e_k \mathbf{x}^*(k) \quad (3)$$

เมื่อ $e_k$ เป็นความผิดพลาด ซึ่งพิจารณาได้จากสมการ

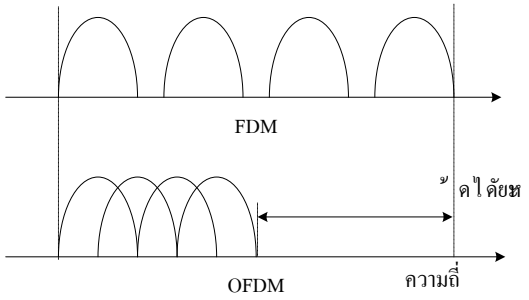
$$e_k = d_k - y_k \quad (4)$$

*k* เป็นดัชนีเวลา (Time index) $\mu$ เป็นค่าขนาดแบบขั้น (Step size) และ $d_k$ เป็นสัญญาณอ้างอิง โดย $\mu$ จะทำหน้าที่ควบคุมการลู่เข้าของเวคเตอร์ถ่วงน้ำหนัก จะสังเกตได้ว่าอัลกอริทึม LMS จะปรับตัวต่อเนื่องตลอดเวลา ในขณะที่ค่าถ่วงนำหนักจะถูกปรับทุกครั้งที่มีการสุ่มเข้ามาจนกว่าค่าที่ได้จะลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimum solution) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบจะขึ้นอยู่กับเมทริกซ์สหสัมพันธ์ หากค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) มีค่าต่างกันมาก อัตราการลู่เข้าจะนานมากตามไปด้วย

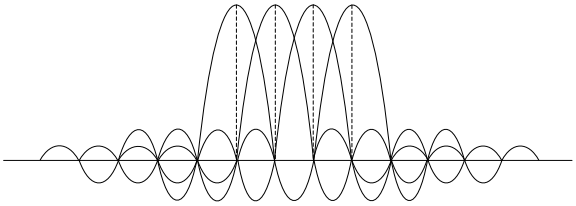
*4.2 การมัลติเพล็กซ์แบบ OFDM*

เป็นที่ทราบกันดีว่าหากต้องการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารแบบไร้สายให้มีคุณภาพ โดยยอมให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้น้อยที่สุด วิธีที่ง่ายที่สุดที่สามารถทำได้คือการลดความเร็วในการส่งข้อมูลลง อย่างไรก็ตาม การลดความเร็วในการส่งข้อมูลลงจะทำให้ระบบสื่อสารไม่สามารถรองรับการส่งข้อมูลในรูปแบบของบรอดแบนด์ได้ ดังนั้นวิธีที่ถูกนำมาเสนอเพื่อแก้ปัญหานี้คือ การมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งความถี่สัญญาณพาห์ตั้งฉากซึ่งกันและกัน [1] หรือ OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาห์หลายสัญญาณ (Multiple carrier modulation: MCM) การส่งสัญญาณด้วยวิธี OFDM โดยทั่วไปนั้นแต่ละช่องสัญญาณจะใช้แถบความถี่ที่ไม่ซ้อนทับกันเพื่อป้องกันการรบกวนซึ่งกันและกัน ถึงแม้จะมีข้อดีดังกล่าวแต่ก็เป็นการใช้แถบความถี่ที่ไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดการประยุกต์ใช้การส่งสัญญาณแบบขนานร่วมกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency division multiplexing : FDM) โดยยอมให้มีการซ้อนทับกันของแถบความถี่ได้ จึงทำให้สามารถลดแถบความถี่ที่ต้องใช้ลงได้มาก ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) แต่เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนจากการซ้อนทับกันของแถบความถี่คลื่นพาห์ย่อยจะต้องตั้งฉาก (Orthogonal) ซึ่งกันและกันเสมอ พิจารณาได้จากรูปที่ 5(ข) ซึ่งเป็นการแสดงสเปกตรัมของสัญญาณ OFDM ที่มี 4 คลื่นพาห์ย่อย (Subcarrier) หลักการพื้นฐานของ OFDM คือการแบ่งกระแสข้อมูลความเร็วสูงให้เป็นกระแสข้อมูลที่มีความเร็วต่ำกว่าหลายๆ อัน โดยกระแสข้อมูลความเร็วต่ำนี้จะถูกส่งไปบนคลื่นพาห์ย่อยหลาย ๆ ตัวในแบบขนานกันทำให้ช่วงคาบของสัญญาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดทอนสัญญาณทางเวลาซึ่งเกิดจากเวลาประวิงของคลื่นพหุวิถี (Multipath delay spread) จึงลดลง

การแบ่งกระแสข้อมูลด้านขาเข้าไปบนคลื่นพาห์ย่อยจะทำให้คาบของสัญลักษณ์มีค่าเพิ่มเป็นเท่าตัว เพื่อลดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter-symbol interference: ISI) โดยสมบูรณ์นั้นจะต้องใส่เวลาคุม (Guard time) เข้าไปซึ่งเวลาคุมนี้ต้องมีค่ามากกว่าค่า




(ก) เปรียบเทียบการมอดูเลชั่นแบบ FDM และ OFDM

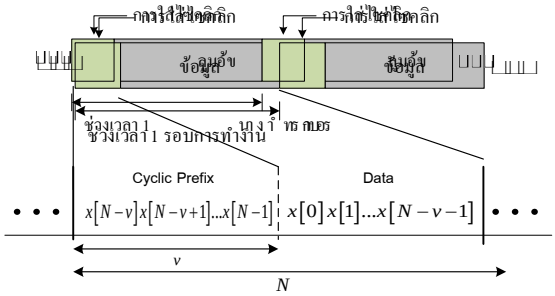


(ข) สเปกตรัมสัญญาณ OFDM ที่มี 4 คลื่นพาห์ย่อย

รูปที่ 7 หลักการทำงานพื้นฐานของสัญญาณ OFDM

เวลาประวิงเพื่อไม่ให้คลื่นพหุวิถีจากสัญลักษณ์หนึ่งไปรบกวนสัญลักษณ์ข้างเคียง แต่หากเวลาประวิงมีค่ามากกว่าเวลาคุมจะทำให้สัญญาณเกิดการเลื่อนเฟส (Phase-shifting) ไปมากจนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียความตั้งฉากของแต่ละคลื่นพาห์ย่อย นอกจากนั้นแล้ว ในช่วงเวลาคุมของแต่ละสัญลักษณ์จะเติมไซคลิก (Cyclic prefix) ซึ่งเป็นการเติมสัญลักษณ์เข้าไปเพื่อป้องกันการแทรกสอดระหว่างความถี่ของคลื่นพาห์ย่อย (Inter-carrier interference: ICI) การทำเช่นนี้จะทำให้แต่ละคลื่นพาห์มีลูกคลื่นเป็นจำนวนเต็มในช่วงของการอินทิเกรต ส่งผลให้ยังคงสามารถรักษาความตั้งฉากของสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ระหว่างแต่ละคลื่นพาห์ไว้ได้ อย่างไรก็ตาม สัญลักษณ์ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในข้อมูลจะจะทำให้อัตราการส่งข้อมูลลดลง เพราะข้อมูลทั้งหมดที่ต้องถูกส่งออกไปมีจำนวนมากขึ้นในขณะที่ภาครับยังคงได้รับปริมาณข้อมูลเท่าเดิม จึงสามารถกล่าวได้ว่า การส่งข้อมูลจะเกิดการสูญเสียกำลังส่งส่วนหนึ่งให้กับการส่งไซคลิก ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการส่งข้อมูลที่ประกอบด้วยสัญลักษณ์ศูนย์ทั้งหมด (All-zero prefix) แทนที่ไซคลิกเดิมซึ่งจะพบว่าถึงแม้ว่าอัตราการส่งข้อมูลยังคงลดลงแต่ไม่มีกำลังที่สูญเสียไปกับการส่งในส่วนของไซคลิก

เมื่อพิจารณาการแบ่งกระแสข้อมูลด้านเข้าไปบนคลื่นพาห์ย่อย $N$ ตัว จะทำให้คาบของสัญลักษณ์เพิ่มขึ้นเป็น $N$ เท่าด้วย สำหรับการเติมสัญลักษณ์เข้าไปเพื่อลดผลกระทบของ ICI สามารถทำได้โดยการคัดลอกตัวอย่างจำนวน $v$ ตัวจากสัญลักษณ์ต้นฉบับ $x[0]x[1]...x[N-1]$ นั่นก็คือ $x[N-v]x[N-v+1]...x[N-1]$ ไปต่อที่ด้านหน้าของสัญลักษณ์ต้นฉบับ โดยความยาวของสัญลักษณ์ใหม่นี้จะยังคงเท่าเดิมคือ $N$ ตัว ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 8




รูปที่ 8 การเติมไซคลิก (Cyclic prefix)

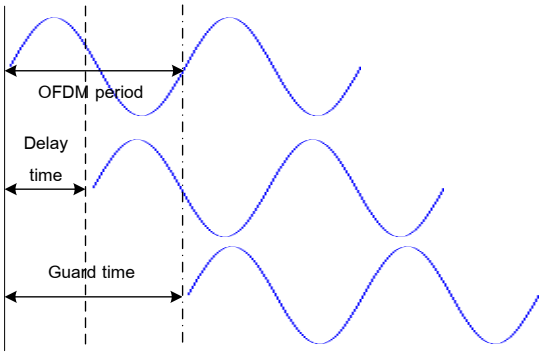
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสัญญาณต้นฉบับหลังจากมีการเติมไซคลิกเข้าไปจะทำให้ได้สมการ

$$\begin{bmatrix} y_{N-1} \\ . \\ . \\ . \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & \cdots & h_v & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_0 & h_1 & \cdots & h_v & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & h_0 & h_1 & \cdots & h_v \\ h_v & 0 & \cdots & 0 & h_0 & \cdots & h_{v-1} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h_1 & \cdots & h_v & 0 & \cdots & 0 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{N-1} \\ . \\ . \\ . \\ x_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{N-1} \\ . \\ . \\ . \\ n_0 \end{bmatrix}$$

หรือสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการ

$$\mathbf{y} = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{x} + \mathbf{n} \qquad (5)$$

โดยเมทริกซ์ช่องสัญญาณ $\hat{\mathbf{H}}$ เป็นเมทริกซ์หมุนเวียน (Circulating matrix) ขนาด $N \times N$ ซึ่งจะทำให้การประวิงของสัญลักษณ์ไม่ส่งผลกระทบต่อจำนวนคาบของสัญญาณ นั่นคือตราบใดที่เวลาประวิงน้อยกว่าเวลาคุม การประวิงนั้นจะไม่ทำให้เกิด ICI ดังแสดงในรูปที่ 9




รูปที่ 9 ผลของสัญญาณที่เกิดจากเวลาประวิงและผลจากการแก้ไขโดยใส่เวลาคุมและการเติมไซคลิกเข้าไป

### *4.3 ไดเวอร์ซิตี (Diversity)*

ไดเวอร์ซิตี (Diversity) [1] เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถทำให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพสูงขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มบิตพิเศษรวมเข้าไปกับบิตข้อมูลที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณหรือไม่ต้องเพิ่มพลังงานที่ภาคส่ง หลักการของไดเวอร์ซิตีเป็นการใช้ประโยชน์จากความเป็นอิสระของสายอากาศโดยอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของการแพร่กระจายของสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ แน่นอนว่าหากติดตั้งจุดรับสัญญาณมากกว่าหนึ่งแห่งจะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง โดยอาศัยการวางตำแหน่งของสายอากาศแต่ละอันให้ห่างกันเล็กน้อย จากนั้นระบบจะเลือกเอาเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังส่งสูง ๆ มาใช้ จึงสามารถทำให้ค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวน (SNR: Signal to noise ratio) ที่ภาครับมีคุณภาพสูงขึ้น ไดเวอร์ซิตีทางสเปซ (Space diversity) สามารถทำได้ทั้งที่เครื่องส่งและเครื่องรับ สำหรับไดเวอร์ซิตีที่ภาคส่งสามารถทำได้โดยการเข้ารหัสเชิงปริภูมิและเวลา (Space-time coding) [15] ในขณะที่ไดเวอร์ซิตีที่เครื่องรับในระบบสื่อสารไร้สายมีการรับสัญญาณชุดเดียวกันจากเครื่องส่งและรีเลย์ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณทางด้านเครื่องรับ เพื่อให้ได้สัญญาณรวมที่ดีที่สุดไปใช้งาน พิจารณาระบบสื่อสารไร้สายที่มีการรับสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจำนวน $N$ ช่อง สัญญาณทั้งหมดนี้สามารถนำมารวมกันแบบเชิงเส้น (Linear combination) โดยค่า

สัมประสิทธิ์ของการรวมแต่ละช่องสัญญาณคือ $a_j$ แสดงได้ดังสมการ

$$a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + \cdots + a_N f_N(t) = \sum_{j=1}^{N} a_j f_j(t) \quad (6)$$

โดยกำหนดให้สัญญาณขาออกมีค่าเท่ากับ

$$f_j(t) = x_j(t) \cdot m(t) + n_j(t) \quad (7)$$

เมื่อ $x_j(t)$ คือช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับส่งข้อมูล

$m(t)$ คือข้อมูลที่ต้องการส่ง

$a_j(t)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ

$n_j(t)$ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

สำหรับเครื่องรับจะใช้เทคนิคการรวมแบบอัตราส่วนสูงสุด (Maximum ratio combining: MRC) ซึ่งเป็นการรวมสัญญาณโดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ ให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ทั้งหมดบวกกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณ (SNR) รวมทั้งหมดมีค่าสูงที่สุดและสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \frac{x_j(t)}{n_j^2(t)} \quad (8)$$

โดยจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ย $\overline{\gamma}$ เท่ากับ

$$\overline{\gamma} = \sum_{j=1}^{N} \gamma_j \quad (9)$$

เมื่อ $\gamma_j$ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของแต่ละช่องสัญญาณ

## 5. สรุป

เทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 4 ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ความเร็วสูง ประกอบด้วยเทคโนโลยี WiMAX LTE และ UMB รวมถึงการนำเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสาร เช่น เทคโนโลยีระบบสายอากาศแบบปรับตัวได้ การมัลติเพล็กซ์แบบ OFDM และไดเวอร์ซิตี (Diversity) สามารถรองรับการให้บริการมัลติมีเดียที่หลากหลาย ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงข้อมูลผ่านทางเครือข่ายอินเตอร์เน็ตได้ทุกที่ทุกเวลา นอกจากนั้นแล้วอุปกรณ์สื่อสารต่างๆ ทั้งรุ่นใหม่และรุ่นเก่ายังถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานร่วมกันได้ รวมถึงสามารถติดต่อเชื่อมโยงระหว่างเครือข่ายที่แตกต่างกันได้ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารอย่างต่อเนื่องมาจากความต้องการในการติดต่อสื่อสารที่มีมากขึ้นของมนุษย์ตามวิถีชีวิตที่เปลี่ยนไป ประกอบกับข้อมูลที่ต้องการรับส่งมีความจุมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มคุณภาพให้กับข้อมูลนั้น ๆ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] T. S. Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice,” Upper Saddle River, *NJ: Prentice-Hall*, 1996.

[2] M. Rahnema, “Overview of the GSM system and protocol architecture,” *IEEE Commun. Mag*., vol. 31, no. 4, pp. 92-100, 1993.

[3] D. Jeong and W. S. Jeon, “A data transmission scheme for CDMA wireless networks based on IS-95,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 1, pp. 11-20, 2000.

[4] M. Humphrey and J. Freeman, “How xDSL supports broadband services to the home,” *IEEE Network*, vol. 11, no. 1, pp. 14-23, 1997.

[5] T. E. Kolding, F. Frederiksen, and P. E. Mogensen, “Performance aspects of WCDMA systems with high speed downlink packet access (HSDPA),” *IEEE Veh. Tech. Conf*., vol. 1, pp. 477-81, 2002.

[6] T. Zahariadis, “Trends in the path to 4G,” *IET Commun. Engr.*,vol. 1, no. 1, pp. 12-15, 2003.

[7] U. Varshney and R. Jain, “Issues in emerging 4G wireless networks,” *IEEE Computer*, vol. 34, no. 6, pp. 94-96, 2004.

[8] Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, *IEEE Std 802.16-2001*, *LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society and IEEE Microwave Theory and Techniques Society*, 2002.

[9] I. Papapanagiotou et al., “A survey on next generation mobile WiMAX networks: objectives, features and technical challenges,” *IEEE Commun. Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 4, pp. 3-18, 2009.

[10] Z. Shen et al., “Overview of 3GPP LTE-advanced carrier aggregation for 4G wireless communications,” *IEEE Commun. Mag*., vol. 50, no. 2, pp. 122-130, 2012.

[11] A. N. Bikos and N. Sklavos, “LTE/SAE security issues on 4G wireless networks,” *IEEE Security & Privacy*, vo. 11, no. 2, pp. 55-62, 2013.

[12] J. Gozalvez, “Ultra mobile broadband,” *IEEE Commun. Vech. Tech. Mag*., vol. 2, no. 1, pp. 51-55, 2007.

[13] A. Alexiou and M. Haardt, “Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges,” *IEEE Commun. Mag*., vol. 42, no. 9, pp. 90-97, 2004.

[14] S. Srikanth, P. A. M. Pandian, and X. Fernando, “Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: A comparison” *IEEE Commun. Mag*., vol. 50, no. 9, pp. 153-161, 2012.

[15] K. Woradit, “Space-Time Codes Technology,” *SWU Engineering Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 47-58, 2012.