บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบและวิเคราะห์การรับส่งสัญญาณพัลส์ สำหรับระบบสื่อสารไร้สายอัลตร้าไวด์แบนด์

2.1 กล่าวนำ

เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้น เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลรูปแบบใหม่ที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์มากขึ้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษารูปแบบทางคณิตศาสตร์โดยพื้นฐานสำหรับการรับส่งสัญญาณและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของการรับส่งสัญญาณรวมถึงการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เหมือนกับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากเมื่อมีการนำมาใช้งานแล้วจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพให้ดีขึ้น โดยระบบการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์มีส่วนประกอบหลักสำคัญสองส่วน คือ ส่วนของสายอากาศแบบแบนด์กว้าง และวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับเครื่องรับส่งของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ โครงสร้างของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์และพิจารณารูปแบบของสัญญาณที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ ทฤษฎีของสายอากาศ ซึ่งประกอบด้วยหลักการต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ ทฤษฎีสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์ รวมถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ได้แก่ โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล และวิธีการกำเนิดสัญญาณพัลส์

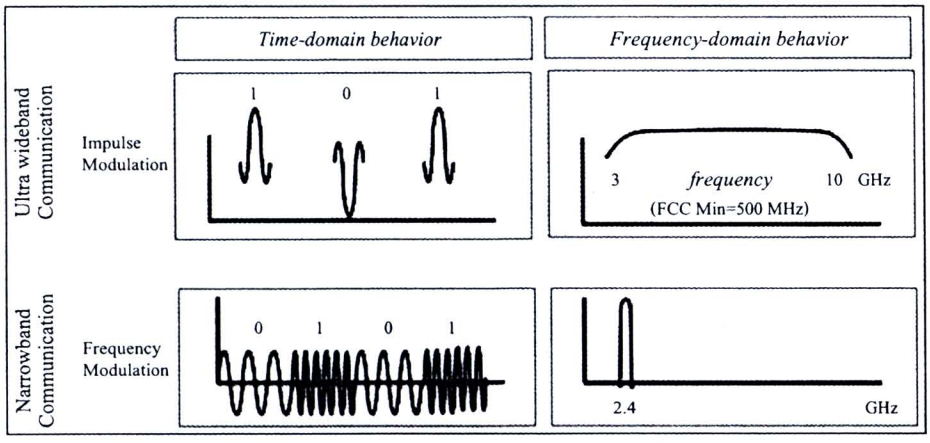
2.2 ความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์

ในอดีตที่ผ่านมานั้นเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือของทางการทหาร ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ใช้และผู้ให้บริการด้านอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสารจำนวนมากที่มีความสนใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ เนื่องจากจุดเด่นที่สำคัญของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ คือ เป็นระบบการสื่อสารที่มีต้นทุนต่ำ ใช้กำลังงานในระดับต่ำ และมีอัตราเร็วของการรับส่งข้อมูลสูงมาก (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007; Roberto and Anuj, 2006) และนอกจากนี้ยังมีความสามารถในการบอกตำแหน่งที่แม่นยำสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบอกพิกัดตำแหน่ง โดยเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์นี้มีการรับส่งสัญญาณที่แตกต่างจาก

เทคโนโลยีแถบความถี่แคบ (narrowband) เนื่องจากไม่ได้มีการแพร่กระจายสัญญาณในลักษณะของการแบ่งแยกความถี่ แต่เทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์จะมีการแพร่กระจายสัญญาณพัลส์ตลอดช่วงความถี่ที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก โดยการรับส่งสัญญาณข้อมูลรูปแบบเดิมจะถูกแทนด้วยสัญญาณพัลส์ ที่มีการรับส่งสัญญาณข้อมูลในลักษณะของขบวนพัลส์จำนวนมากต่อวินาที โดยพัลส์แต่ละลูกนั้นจะเป็นพัลส์ที่มีความกว้างอยู่ในระดับพิโกวินาที (1×10^{-12} วินาที) และมีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise) เนื่องจากพัลส์ที่ส่งออกไปนั้นมีกำลังส่งต่ำมากถึงระดับนาโนวัตต์ (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007; Roberto and Anuj, 2006)

โดยเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ถูกมองว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ ซึ่งในความรู้สึกคือ ไม่มีวิธีการใดก่อนหน้านี้ที่สามารถทำงานลักษณะนี้ได้ นั่นคือการทำให้ระบบการสื่อสารไร้สายมีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงในระดับหลายร้อยเมกะบิตต่อวินาที อุปกรณ์การสื่อสารมีขนาดเล็กใช้กำลังงานส่งในระดับต่ำมาก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ยังนับว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ แต่เทคนิควิธีที่ค้นพบและหลักการที่นำมาใช้นั้นไม่ใช่ของใหม่ อย่างไรก็ตามรูปแบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันยังคงมีวิธีการรับส่งสัญญาณพื้นฐานที่เป็นคลื่นรูปแบบไซน์ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นคลื่นรูปแบบไซน์นั้นมีความเป็นสากลไปแล้วสำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ แต่เทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นี้เป็นพื้นฐานของการรับส่งสัญญาณข้อมูลด้วยสัญญาณพัลส์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงจากระบบการสื่อสารด้วยสัญญาณรูปแบบคลื่นไซน์ไปเป็นการสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์แทน โดยเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ได้เข้ามามีบทบาทในการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาการสื่อสารข้อมูลไร้สายระยะใกล้ ที่ต้องการความเร็วและแบนด์วิดท์สำหรับรับส่งข้อมูลที่สูงมาก เนื่องจากเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์มีการรับส่งสัญญาณในลักษณะของพัลส์ที่ถูกบีบอัดในโดเมนเวลามากกว่าจะเป็นรูปแบบของสัญญาณที่เป็นคลื่นไซน์ที่ถูกบีบอัดในโดเมนความถี่ เนื่องจากสัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากระดับพิโกวินาที ในโดเมนเวลาจะมีการแผ่สเปกตรัมที่กว้างมากในโดเมนความถี่ ส่วนลักษณะสัญญาณแบบคลื่นไซน์พื้นฐานแล้วจะมีการขยายในโดเมนเวลา แต่เมื่ออยู่ในโดเมนความถี่แล้วจะเป็นพัลส์ที่แคบมาก โดยความแตกต่างของการรับส่งสัญญาณทั้งสองรูปแบบนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีการครอบครองแบนวิดท์มากกว่า 500 MHz หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่า 25% ขึ้นไปของความถี่กลางที่ใช้งาน และระบบที่เป็นการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบส่วนใหญ่จะมีการครอบครองแบนด์วิดท์น้อยกว่า 10% ของความถี่กลาง และมีการรับส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งที่สูงมาก ยกตัวอย่าง เช่น ระบบการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์มีการใช้สเปกตรัมทั้งหมดจาก 3.1-10.6 GHz ซึ่งมีการใช้แบนด์วิดท์มากกว่า 100% ของความถี่กลาง ซึ่งแตกต่างจาก 802.11b ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารที่มีความถี่กลาง

อยู่ที่ 2.45 GHz และมีแบนวิดท์ใช้งาน 80 MHz ซึ่งระบบการสื่อสารนี้จะมีการครอบครองแบนด์วิดท์เพียง 1% ของความถี่กลาง (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007; Ian, Matti, and Jari, 2004)



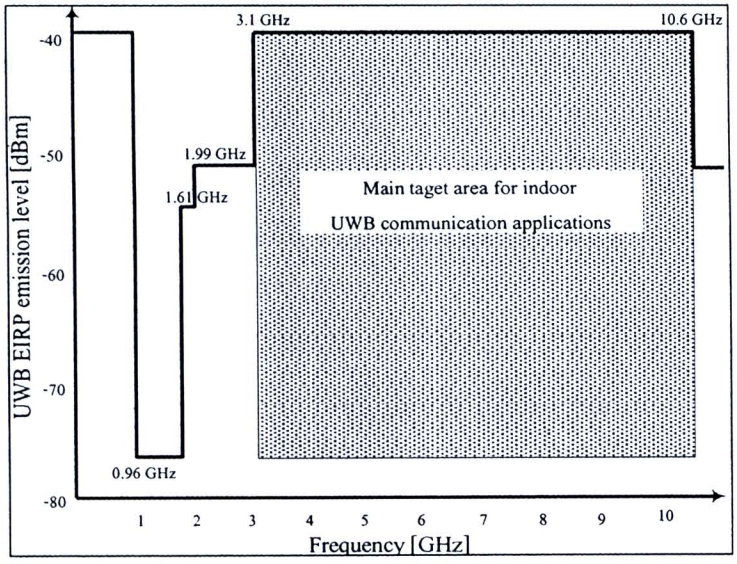
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณการสื่อสารระหว่างเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์และเทคโนโลยีที่ใช้แถบความถี่แคบทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์

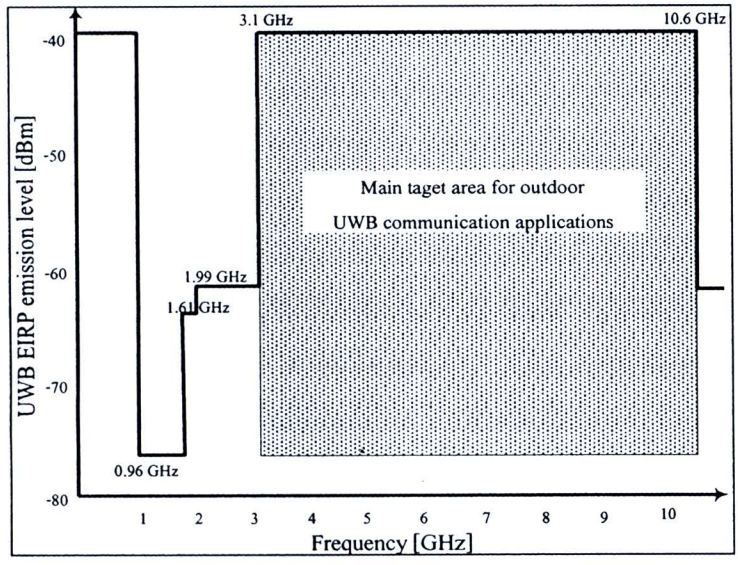
2.3.1 นิยามและข้อกำหนดเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์

สำหรับรูปแบบสัญญาณของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ถูกกำหนดโดยองค์การกิจการโทรคมนาคม (Federal Communications Commission หรือ FCC) ซึ่งมีแบนด์วิดท์ของสัญญาณมากกว่า 500 MHz หรือมากกว่า 25% ที่ค่าของความถี่กลาง และมีการรับส่งสัญญาณในรูปแบบของสัญญาณพัลส์ซึ่งมีความกว้างของพัลส์อยู่ในช่วง 100 ns – 300 ns โดยสัญญาณพัลส์ของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดนิยมใช้สัญญาณพัลส์ในรูปแบบของ เกาส์เซียนพัลส์ และโมโนไซเคิลพัลส์ ที่มีความหนาแน่นกำลังงานเชิงสเปกตรัมต่ำมาก ซึ่งอุปกรณ์ของระบบการสื่อสารรูปแบบอื่นจะตรวจหาสัญญาณได้ยากเนื่องจากระดับสัญญาณของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์มีความใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนพื้นหลังมาก ดังนั้นสัญญาณของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์จะมีประสิทธิภาพในเรื่องความปลอดภัยเป็นอย่างดี โดยจะมีการแฝงตัวไปกับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง โดยหลังจากที่เทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ได้รับแรงผลักดันจากกิจการโทรคมนาคมของสหรัฐอเมริกาแล้ว จึงได้รับการจัดสรรย่านความถี่ใช้งานโดยไม่ต้องขอมีการอนุญาตของอุปกรณ์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์อยู่ในช่วง 3.1-10.6 GHz โดยมีแบนด์วิดท์ 7.5 GHz ซึ่งมีการแบ่งช่วงสเปกตรัม

ความถี่เทียบกับระดับกำลังงานสำหรับการสื่อสารทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร ดังแสดงใน รูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ช่วงสเปกตรัมของความถี่เปรียบเทียบกับระดับพลังงานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ภายในอาคาร



รูปที่ 2.3 ช่วงสเปกตรัมของความถี่เปรียบเทียบกับระดับพลังงานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ภายนอกอาคาร

จากข้อกำหนดของ FCC ได้กำหนดช่วงความถี่ใช้งานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ที่สามารถใช้งานได้ คือช่วงความถี่ที่มีการแผ่กระจายพลังงานออกมาต่ำกว่า -10 dB (Ian, Matti, and Jari, 2004) โดยที่ความถี่ด้านสูงกำหนดเป็น f_h ความถี่ด้านต่ำกำหนดเป็น f_l และความถี่ที่มีการแผ่กระจายพลังงานออกมาสูงสุดกำหนดเป็น f_m โดยที่ความถี่กลางกำหนดเป็น f_c ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างความถี่สูงสุดและความถี่ต่ำสุดแสดงได้ดังสมการ (2.1) มีแบนด์วิดท์ของสัญญาณแสดงได้ดังสมการที่ (2.2) และมีอัตราส่วนของแบนด์วิดท์ (*FB*) แสดงได้ดังสมการ (2.3)

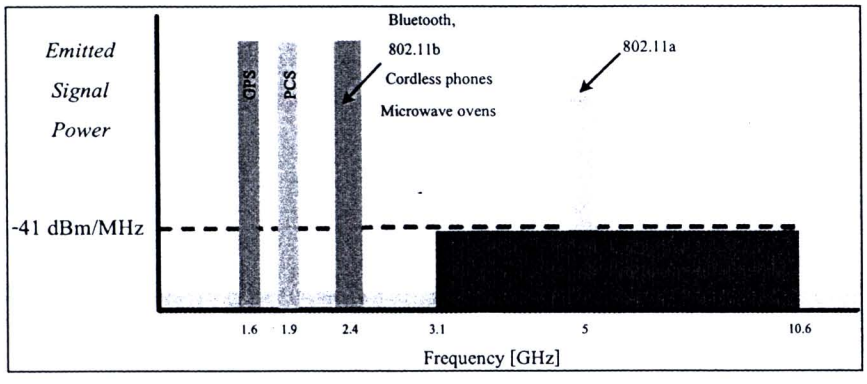
$$f_c = \frac{f_l + f_h}{2} \tag{2.1}$$

$$B = \frac{f_h + f_l}{f_c} \tag{2.2}$$

$$FB = 2\frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} \tag{2.3}$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

จากข้อกำหนดของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์สามารถใช้งานด้วยแบนด์วิดท์กว้างนี้ส่งผลให้ต้องมีการแพร่กระจายพลังงานของอุปกรณ์การสื่อสารสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ในระดับต่ำไม่เกิน -41.25 dBm/MHz (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007) เพื่อให้สามารถอยู่ร่วมกับระบบการสื่อสารอื่น ๆ ได้อย่างไม่มีปัญหา แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความหนาแน่นพลังงานเชิงสเปกตรัมของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการสื่อสารรูปแบบอื่น

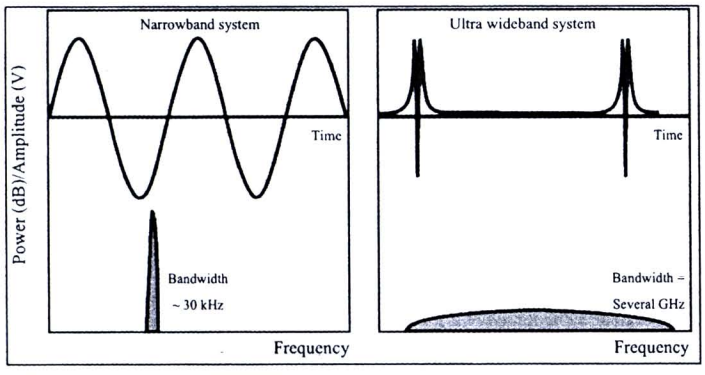
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 01 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน 249834
เลขเรียกหนังสือ

จากข้อกำหนดและกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วการทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้น นับว่าเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับนักวิจัยทุกคนที่ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ในทุก ๆ ด้าน เนื่องจากเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้น เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารรูปแบบใหม่ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งเมื่อมีการนำมาใช้งานแล้วย่อมต้องมีการวิจัยและพัฒนาในทุกด้านที่เกี่ยวข้องกับระบบเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของสายอากาศและวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับเครื่องรับส่งของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์

2.3.2 ข้อเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์กับเทคโนโลยีแบนด์แคบ

เทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์มีข้อดีหลายประการที่เหนือกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ โดยที่สัญญาณของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบนั้นถูกกำหนดด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแบนด์วิดท์น้อยกว่า 10% ของความถี่กลาง แต่สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์แล้วสัญญาณจะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแบนด์วิดท์มากกว่า 25% ของความถี่กลาง นอกจากนี้สัญญาณการสื่อสารสำหรับเทคโนโลยีแบบแถบความถี่แคบนั้นจะมีการมอดูเลชันด้วยคลื่นพาห์ (carrier) ที่เป็นสัญญาณรูปไซน์รวมเข้ากับข้อมูลข่าวสารที่ส่งออกไป ซึ่งเป็นผลจากลักษณะของสัญญาณที่เป็นรูปไซน์และมีการครอบครองแบนด์วิดท์ที่แคบ แต่สำหรับระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์แล้วสัญญาณจะถูกกำหนดด้วยรูปแบบของพัลส์ ซึ่งเป็นรูปแบบสัญญาณเฉพาะสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ โดยจะมีการพิจารณาถึงรูปแบบและรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่นำมาใช้เท่านั้น ไม่มีการมอดูเลตด้วยคลื่นพาห์ ซึ่งทำให้ลดความซับซ้อนของระบบลงได้อย่างมาก และถูกรบกวนจากสัญญาณอื่นได้น้อยมาก เนื่องจากโดยส่วนมากแล้วสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นจะครอบคลุมเฉพาะช่วงความถี่สเปกตรัมบางส่วนของสัญญาณอัลตร้าไวด์แบนด์เท่านั้น เช่นในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบก็จะถูกรบกวนในช่วงความถี่แคบ ๆ เท่านั้นเมื่อเทียบกับสัญญาณตลอดช่วงแบนด์วิดท์ที่ใช้งาน ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบใด ๆ ต่อการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007)

สำหรับสัญญาณของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ในโดเมนเวลาจะเป็นสัญญาณในลักษณะของพัลส์แคบ ๆ ที่ไม่มีความต่อเนื่อง โดยสัญญาณข้อมูลมีพลังงานและคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนพื้นหลังมาก และจากสัญญาณข้อมูลมีการใช้แถบความถี่ที่กว้างมากจึงส่งผลให้สัญญาณที่อยู่ในโดเมนความถี่มีความหนาแน่นพลังงานเชิงสเปกตรัมที่ต่ำไปด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตามสัญญาณยังอยู่ในระดับที่มีความเป็นไปได้สำหรับการตรวจจับของอุปกรณ์การสื่อสาร โดยรูปแบบของสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์และเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบนั้นสามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์และเทคโนโลยีแบบแถบความถี่แคบทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

2.3.3 ข้อดีของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์

ระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์มีข้อดีมากกว่าระบบการสื่อสารแถบความถี่แคบหลายประการ โดยเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์มีการรับส่งสัญญาณด้วยพัลส์ที่แคบอย่างยิ่ง และมีการใช้พลังงานของระบบต่ำ ซึ่งพลังงานของพัลส์นี้จะมีการแพร่กระจายตลอดย่านความถี่ที่กว้างมาก ซึ่งทนต่อสัญญาณรบกวนสูงมากเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นจะครอบคลุมเฉพาะสเปกตรัมบางส่วนของสัญญาณอัลตร้าไวด์แบนด์เท่านั้น เช่นในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนก็จะถูกรบกวนในช่วงความถี่แคบ ๆ เท่านั้นเมื่อเทียบกับแบนด์วิดท์ที่ใช้ และนอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์การสื่อสารรูปแบบอื่นน้อยมาก โดยผลจากการที่อุปกรณ์อัลตร้าไวด์แบนด์ใช้สัญญาณพัลส์ที่แคบอย่างยิ่งในการสื่อสารจึงทำให้ทนต่อสัญญาณรบกวนที่มาจากหลาย ๆ ทิศทาง และสัญญาณของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์นี้จะมีระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนพื้นหลังเป็นอย่างมากจึงไม่ส่งผลกระทบกับอุปกรณ์การสื่อสารอื่น ๆ เนื่องจากจะถูกมองว่าเป็นสัญญาณรบกวนของระบบการสื่อสารในเทคโนโลยีแบบแถบความถี่แคบ นอกจากนี้อุปกรณ์การสื่อสารสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ยังมีการบริโภคพลังงานที่น้อยกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ เมื่อมีการพิจารณาจากการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากอัลตร้าไวด์แบนด์มีความจุของช่องสัญญาณสูงมาก นอกจากนี้ยังมีข้อดีอื่น ๆ อีกเช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์มีราคาที่ถูกกว่าเนื่องจากอุปกรณ์ไม่จำเป็นต้องมีตัวช่วยขยายสัญญาณและเครื่องกำเนิดสัญญาณจากภายนอกเหมือนกับเทคโนโลยีการสื่อสารแถบความถี่แคบ ซึ่งสำหรับในมุมมองของผู้ใช้และมุมมองของผู้ผลิตแล้วอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงนี้เป็นสิ่งที่ดึงดูดความสนใจได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากการมีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ใหม่ ๆ ได้

โดยความได้เปรียบของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์สามารถอธิบายได้เป็นอย่างดีด้วยสมการค่าความจุของ Shannon ซึ่งสมการนี้เป็นที่คุ้นเคยกับทุกคนที่ทำการศึกษาเกี่ยวข้องกับทางด้านการสื่อสารโทรคมนาคม ความจุเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากความต้องการประยุกต์ใช้งานสำหรับการส่งข้อมูลที่เป็นมัลติมีเดีย ต้องการอัตราเร็วและแบนด์วิดท์ในการรับส่งข้อมูลที่สูงมาก โดยความสัมพันธ์ของ Shannon (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007) สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.4)

$$C = B\log\left(1+\frac{S}{N}\right) \tag{2.4}$$

เมื่อ C คือความจุสูงสุดของช่องสัญญาณมีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที B คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (hertz) S คือพลังงานของสัญญาณมีหน่วยเป็นวัตต์ และ N คือพลังงานของสัญญาณรบกวนมีหน่วยเป็นวัตต์เช่นกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการของ Shannon นี้แล้วสามารถอธิบายออกได้สามลักษณะสำหรับการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณได้นั่นคือ เราสามารถเพิ่มแบนด์วิดท์ เพิ่มกำลังส่งหรือลดสัญญาณรบกวน ซึ่งค่า N/S โดยทั่วไปรู้อยู่แล้วคืออัตราส่วนของกำลังส่งสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ (signal to noise ratio : SNR) ซึ่งจากสมการที่ (2.4) จะเห็นว่าค่าความจุของช่องสัญญาณจะเพิ่มเป็นเชิงเส้นเมื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ แต่จะเพิ่มเป็นลอการิทึมเมื่อทำการเพิ่มในส่วนของ N/S ช่องสัญญาณของอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นมีแบนด์วิดท์ที่สามารถใช้งานได้อย่างสมบูรณ์และในความเป็นจริงสามารถแลกเปลี่ยนบางส่วนของแบนด์วิดท์ เพื่อทำการลดกำลังส่งของสัญญาณและสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิด ดังนั้นจากสมการของ Shannon จะเห็นได้ว่าระบบของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นมีความจุของช่องสัญญาณสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการสื่อสารไร้สายรูปแบบอื่น

2.3.4 การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์

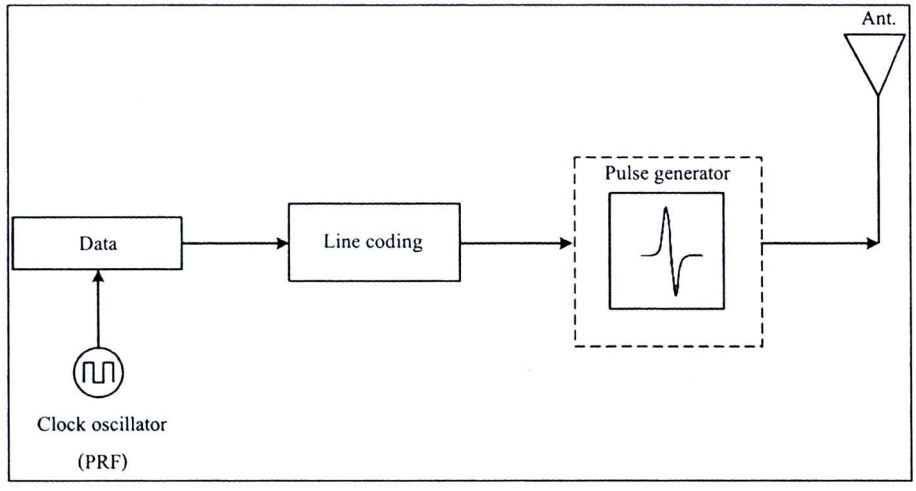
การพัฒนาระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์เกิดขึ้นมากมาย เนื่องจากข้อดีที่เห็นอย่างชัดเจนดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั่นคือ มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงมาก และใช้พลังงานในระดับต่ำ โดยก่อนที่องค์การกิจการโทรคมนาคมจะมีการประกาศใช้เทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ในเชิงพาณิชย์นั้น เหตุผลหลักที่มีการคิดค้นเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ขึ้นมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับทางการทหาร ต่อมาเมื่อมีการนำออกมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์แล้วมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้กับการติดต่อสื่อสารภายในอาคารบ้านเรือนเป็นหลัก เช่น การเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ภายในอาคารบ้านเรือนแบบไร้สายด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นการมุ่งเน้นการเชื่อมต่อด้วยโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (wireless personal area network หรือ WPAN)

โดยอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.3a และเหมาะสำหรับผู้ใช้ที่ไม่ต้องการให้มีสายสัญญาณเชื่อมต่อจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อ เช่น เครื่องพิมพ์ จอภาพ เมาส์ฮาร์ดไดร์ฟ คีย์บอร์ด เป็นต้น รวมถึงเชื่อมต่ออุปกรณ์อื่น ๆ นอกเหนือจากอุปกรณ์คอมพิวเตอร์เข้ามาในโครงข่ายได้ และสามารถโยกย้ายหรือปรับเปลี่ยนโครงข่ายได้โดยง่าย

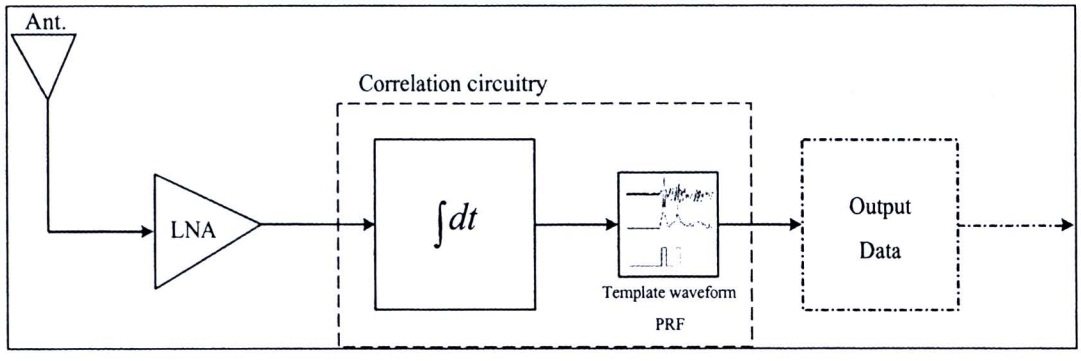
นอกจากการสร้างโครงข่ายเชื่อมต่อสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับเทคโนโลยีอื่นอีก เช่น เทคโนโลยีที่ใช้ในการระบุสิ่งต่าง ๆ ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency identification หรือ RFID) ได้ เพราะว่ามีข้อดีในเรื่องของการใช้พลังงานในระดับต่ำดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งทำให้มีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนานด้วยแบตเตอรี่เพียงก้อนเดียว และเป็นการช่วยลดต้นทุนด้วย

2.4 โครงสร้างของระบบการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์

ระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์เป็นการสื่อสารข้อมูลด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีการใช้พลังงานในระดับต่ำมาก ซึ่งส่วนมากจะเป็นการประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารภายในอาคารที่มีรัศมีไม่เกิน 10 เมตร โดยการสื่อสารข้อมูลด้วยเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์มีองค์ประกอบของระบบรับส่งสัญญาณไม่ยุ่งยากซับซ้อนเหมือนกับระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีการสื่อสารแบนด์แคบในปัจจุบันที่มีการรับส่งสัญญาณด้วยคลื่นไซน์แบบต่อเนื่อง ซึ่งมีองค์ประกอบของระบบรับส่งสัญญาณยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า เช่น ภาคส่งจำเป็นต้องมีวงจรขยายกำลัง (power amplifier) วงจรสำหรับการสังเคราะห์ความถี่ (frequency synthesizer) วงจรรวมสัญญาณ (mixer) หรือแม้กระทั่งวงจรเฟสล็อกลูป (phase locked loop : PLL) ซึ่งประกอบด้วยวงจรตรวจจับเฟสหรือความถี่ (phase/frequency detector) วงจรกรอง (filter) และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมโดยแรงดัน (voltage controlled oscillator : VCO) ส่วนที่ภาครับนั้นจำเป็นต้องมีวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise amplifier : LNA) เป็นต้น เนื่องจากส่วนประกอบของวงจรที่ได้กล่าวถึงมานี้ล้วนแต่มีความจำเป็นสำหรับเครื่องรับส่งสัญญาณโดยทั่วไป ซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังยากต่อการพัฒนาออกแบบและสร้างจึงทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง แต่ระบบการรับส่งสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นจะแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแบนด์แคบโดยทั่วไปคือ มีการมอดูเลตสัญญาณที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน การออกแบบและพัฒนาเครื่องรับส่งหรือเครื่องรับสัญญาณทำได้ง่าย รวมทั้งยังมีต้นทุนในการผลิตและพัฒนาที่ต่ำกว่ามาก เนื่องจากระบบเครื่องรับส่งสัญญาณของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นไม่จำเป็นต้องมีส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างระบบเครื่องรับเครื่องรับส่งสัญญาณของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ได้เป็นแผนภาพอย่างง่ายดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 (Ian, Matti, and Jari, 2004)



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องรับส่งสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์

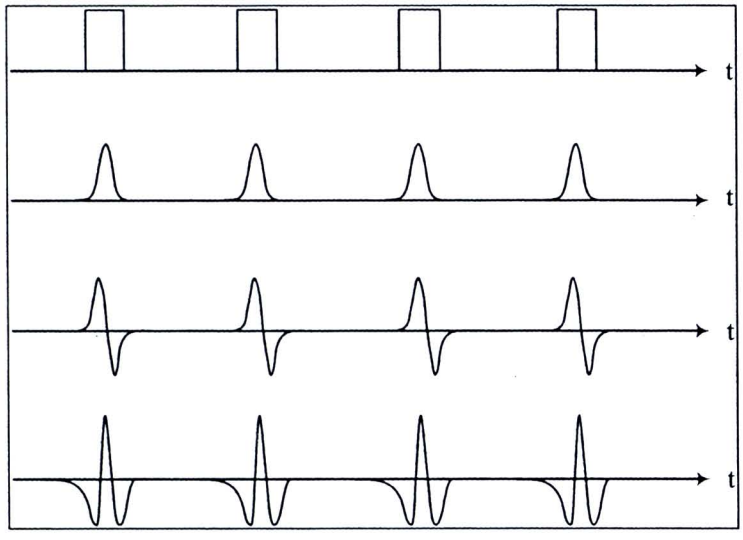


รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องรับสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์

โดยจากรูปที่ 2.6 ได้แสดงให้เห็นว่าระบบเครื่องรับส่งสัญญาณของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้น มีองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือ ส่วนทำหน้าที่สร้างสัญญาณข้อมูล ส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์ และสายอากาศภาคส่ง โดยส่วนที่สร้างสัญญาณข้อมูลจะประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาแบบสี่เหลี่ยม จะเป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณนาฬิกาให้กับระบบ (pulse repetition frequency : PRF) ซึ่งการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกานี้อาจใช้การออกแบบด้วยคริสตัล (crystal) หรืออาจจะใช้การออกแบบด้วยวิธีการอื่น ๆ ส่วนต่อมาคือวงจรกำหนดเวลาดิจิตอลลอจิกซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมเวลาของสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่ง โดยมีการกำหนดสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่งเป็นแบบดิจิตอลและทำการเข้ารหัสสัญญาณ (line coding) หรือทำการมอดูเลตสัญญาณแบบดิจิตอล จากนั้นสัญญาณข้อมูลที่มอดูเลตเสร็จแล้วจะเข้าสู่

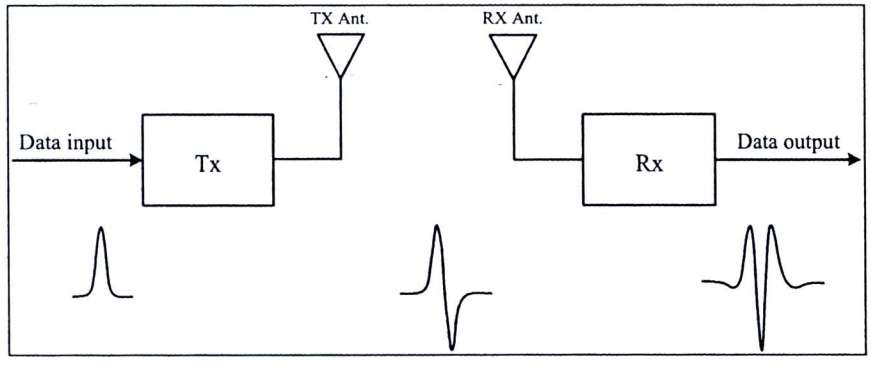
กระบวนการกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ เพื่อกระตุ้นสายอากาศของภาคส่งแล้วส่งสัญญาณผ่านช่องทางการสื่อสารไปยังภาครับ โดยที่ภาครับของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นเครื่องรับจะต้องมีความเหมาะสมกับสัญญาณจากภาคส่งที่ส่งผ่านช่องทางการสื่อสารมาและมีสัญญาณรบกวนปะปนมาด้วยระหว่างทาง ซึ่งถ้าสัญญาณที่เดินทางมาตกกระทบสายอากาศภาครับมีความเหมาะสมแล้วสัญญาณข้อมูลจะมีขนาดสูงสุดเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวน หรือค่าของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio : SNR) มีค่ามากนั่นเอง และจากรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นส่วนของภาครับนั้นมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือ วงจรภาคส่วนหน้าและส่วนประมวลผลข้อมูล ซึ่งวงจรภาคส่วนหน้านั้นจะประกอบด้วยส่วนของสายอากาศ ส่วนของวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise amplifier : LNA) โดยส่วนของวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำนี้อาจมีหรือไม่มีก็ได้ ต่อมาเป็นส่วนวงจรสหสัมพันธ์ และวงจรเทียบสัมพันธ์ของลักษณะรูปคลื่น จากนั้นสัญญาณที่รับเข้ามาจากวงจรภาคส่วนหน้านั้นจะส่งต่อไปยังส่วนประมวลผลข้อมูลต่อไป

การออกแบบระบบรับส่งสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ที่ดีนั้นสัญญาณพัลส์จะต้องมีการผิดเพี้ยน (distortion) น้อยมากเมื่อแพร่กระจายออกจากสายอากาศของเครื่องรับส่งผ่านช่องสัญญาณการสื่อสารไปยังสายอากาศของเครื่องรับ เนื่องจากสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์พื้นฐานนั้นมีการรับส่งสัญญาณในลักษณะของพัลส์แคบ ๆ หรือที่เรียกว่าอิมพัลส์ โดยรูปแบบของพัลส์ที่นำมาพิจารณานั้นมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007)



รูปที่ 2.8 รูปแบบสัญญาณพัลส์ลักษณะต่าง ๆ ของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์

สำหรับการวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงสัญญาณพัลส์ 3 รูปแบบ คือ สัญญาณพัลส์แบบเกาส์ พัลส์แบบโมโนไซเคิล และพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเลต ซึ่งเป็นพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบ ๆ เพียงหนึ่งพัลส์ที่มีการส่งแต่ละพัลส์แบบไม่ต่อเนื่อง แต่ละพัลส์จะมีความหนาแน่นพลังงานเชิงสเปกตรัมที่กว้างมากในโดเมนความถี่ สำหรับการรับส่งสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นในระบบนั้นจะเป็นการพิจารณาในโดเมนเวลาเป็นหลัก โดยสัญญาณพัลส์จากวงจรแหล่งกำเนิดของเครื่องรับส่งที่มากระตุ้นสายอากาศเมื่อถูกกำหนดให้เป็นพัลส์แบบเกาส์ (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007) แล้วจากนั้นเมื่อสัญญาณพัลส์ถูกส่งออกจากสายอากาศและแพร่กระจายไปในช่องสัญญาณจะถูกพิจารณาเป็นพัลส์แบบโมโนไซเคิล ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากการทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของพัลส์แบบเกาส์และหลังจากที่สัญญาณพัลส์เดินทางมาถึงที่เครื่องรับโดยตกกระทบกับสายอากาศภาครับสัญญาณพัลส์จะถูกพิจารณาเป็นพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเลต ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากการทำอนุพันธ์อันดับที่สองของพัลส์แบบเกาส์และสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รูปแบบสัญญาณพัลส์ของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ที่แพร่กระจายจากเครื่องรับส่งผ่านช่องทางการสื่อสารไปยังเครื่องรับ

2.5 กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์

กระบวนการและหลักการที่ใช้ในระบบการสื่อสารต่าง ๆ นั้นใช้เพื่อเป็นวิธีการพื้นฐานของการแก้ปัญหา ของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกร รวมถึงการคิดค้นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อหาคำตอบทางคณิตศาสตร์ที่เป็นไปได้ และสามารถอธิบายได้ทางกายภาพ ซึ่งในระบบการสื่อสารทั่วไปและการรับส่งสัญญาณที่มีการใช้แบนด์วิดท์แคบนั้นปกติแล้วจะมีการพิจารณาปัญหาทางกายภาพเท่านั้น เนื่องจากสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบนั้นมีแบนด์วิดท์ไม่กว้างมากนัก เมื่อระบบถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์กว้างจะทำให้มีปัญหาเกิดขึ้นและทำการแก้ไขได้ยากมาก ซึ่งการแก้ปัญหาของการกระตุ้นระบบด้วยสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์กว้างสามารถทำได้โดยใช้การ

วิเคราะห์ในโดในเวลา วิธีการแปลงลาปลาซ หรือวิธีการแปลงฟูริเยร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่นำมาใช้ประโยชน์ได้และมีการใช้งานมาเป็นเวลานานแล้ว ดังนั้นในระบบการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์จึงได้นำกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์

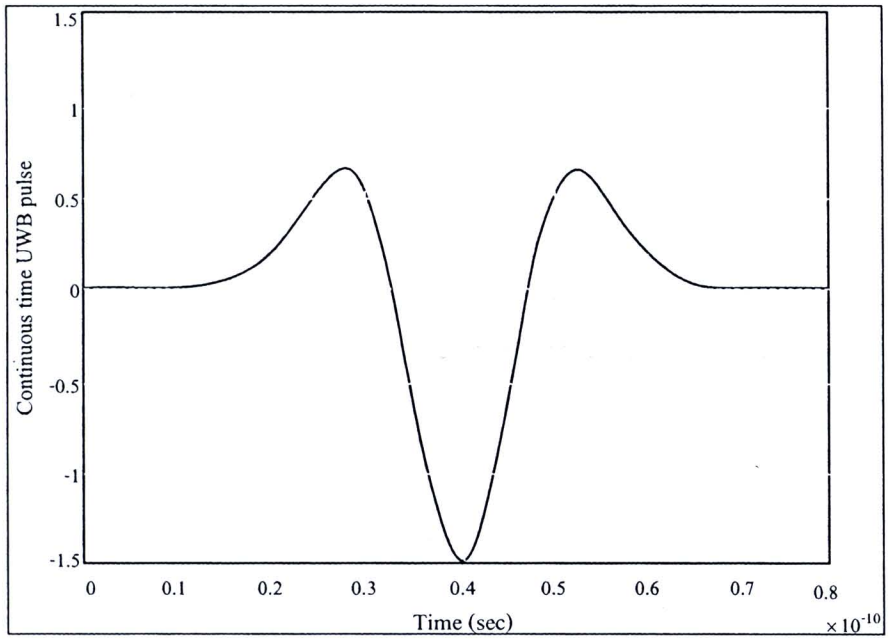
2.5.1 การวิเคราะห์ในโดเมนเวลา

การวิเคราะห์คุณลักษณะสัญญาณของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์สามารถที่จะใช้วิธีใดวิธีหนึ่งได้ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทั้งโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยในโดเมนเวลาสิ่งสำคัญคือการหาผลตอบสนองสัญญาณอิมพัลส์ของระบบ ตัวอย่างเช่น ระบบที่สามารถจะแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศภาคส่งผ่านช่องทางการสื่อสารไปยังสายอากาศของภาครับ ซึ่งสามารถแยกประเภทของสัญญาณออกได้เป็นหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน คือสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาหรือสัญญาณไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา สัญญาณที่เป็นแอนะลอกหรือสัญญาณที่เป็นดิจิตอล สัญญาณที่ได้มาจากการคำนวณหรือการสุ่ม รวมถึงสัญญาณที่เป็นคาบและสัญญาณที่ไม่เป็นคาบเป็นต้น โดยสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลานั้นส่วนมากจะมีการเฉลี่ยฟังก์ชันที่เป็นค่าจริงหรือฟังก์ชันเชิงซ้อนของเวลา $s(t)$ เมื่อ t เป็นเวลาที่ต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระ ถ้า t มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น $s(t)$ มีการกำหนดเวลาที่ไม่มีความต่อเนื่องแล้วสัญญาณ $s(t)$ จะเป็นสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งเป็นการกำหนดลำดับของฟังก์ชันเป็น $s(n)$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม ยกตัวอย่างเช่น

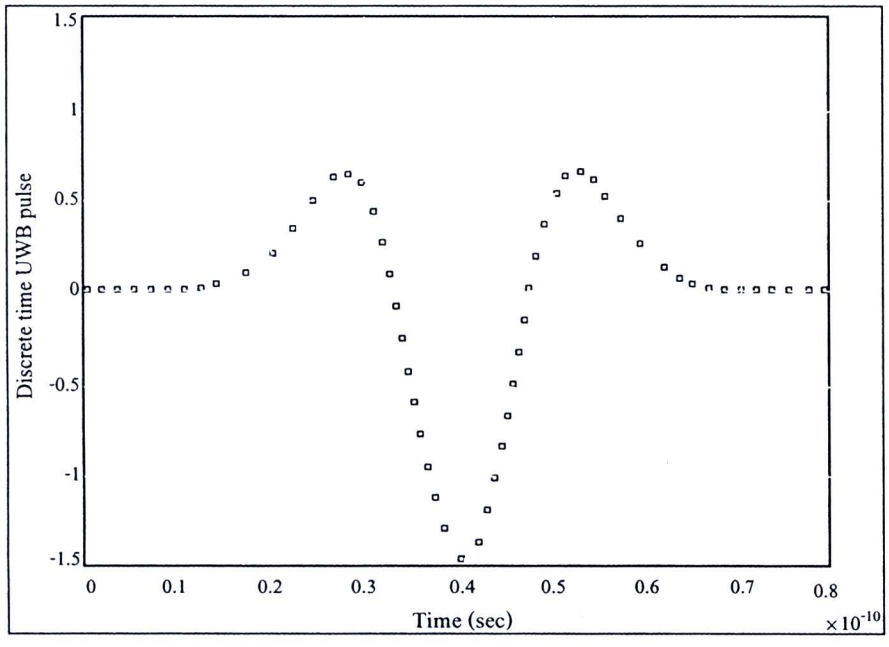
$$s(t) = (t^2 - 1)e^{-t^2/4} \tag{2.5}$$

$$s(n) = (n^2 - 1)e^{-n^2/4} \tag{2.6}$$

โดยถ้าสัญญาณมีความต่อเนื่องทางเวลาแล้ว $s(t)$ จะสามารถนำค่าในช่วงเวลาที่ต่อเนื่องทุกค่านั้นมาพิจารณาได้ โดย $s(t)$ จะถูกเรียกว่าสัญญาณแอนะลอก แต่ถ้าสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา และสามารถที่จะนำค่าใดค่าหนึ่งในช่วงเวลามาพิจารณาได้นั่นคือสัญญาณดิจิตอล และเมื่อสัญญาณที่เป็นลักษณะพัลส์ของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์เป็นพัลส์ที่สั้นมาก ๆ จึงยากที่จะใช้การแปลงจากแอนะลอกเป็นดิจิตอลแบบเดิมได้ โดยจะต้องมีการเพิ่มเติมเทคนิคและวิธีการที่แตกต่างออกไป เพื่อให้ได้สัญญาณเป็นพัลส์จังหวะสั้น ๆ จากวงจรภาคส่วนหน้าของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะสัญญาณพัลส์ของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ทั้งรูปแบบที่ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในโดเมนเวลาได้ดังรูปที่ 2.10



ก. สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา



ข. สัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา

2.5.2 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่

ผลตอบสนองทางความถี่เป็นอัตราการขยายหรือขนาดและผลตอบสนองทางเฟสของวงจรหรือชุดทดสอบทุก ๆ ความถี่ที่สนใจ แม้การกำหนดรูปแบบของผลตอบสนองทางความถี่จะมีการพิจารณาทั้งอัตราการขยายและเฟส แต่การใช้ผลตอบสนองความถี่โดยทั่วไปแล้วส่วนใหญ่จะเป็นการแสดงเฉพาะขนาดหรืออัตราการขยายเท่านั้น โดยผลตอบสนองความถี่ของสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลาสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1) การแปลงฟูริเยร์ เป็นการหาผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องของเวลา $h(t)$ กำหนดโดย $H(f)$ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.8) และการหาผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลาของลำดับ $h(n)$ แสดงได้ดังสมการที่ (2.9)

$$H(f) = F\{h(t)\} \tag{2.7}$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j2\pi ft}\, dt \tag{2.8}$$

$$H(e^{j\Omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)\, e^{-j\Omega n} \tag{2.9}$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |h(n)| < \infty \tag{2.10}$$

ถ้าผลรวมลู่เข้าหากันและมีการลู่เข้าแบบสม่ำเสมอนั้นจะได้ว่าทุก ๆ ลำดับเป็นผลรวมสัมบูรณ์ ซึ่งในสมการที่ (2.9) สมนัยกับการกำหนดผลการแปลง z ของทั้งสองด้าน โดยจะแสดงให้ดูในภายหลัง อย่างไรก็ตามจากการกำหนดการแปลงฟูริเยร์ของสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องของเวลาโดยตรงด้วยคาบเท่ากับ 2π ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.12)

$$H(e^{j(\Omega+k2\pi)}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{-j(\Omega+k2\pi)n} \tag{2.11}$$

$$H(e^{j(\Omega+k2\pi)}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{-j\Omega n} = H(e^{j\Omega}) \tag{2.12}$$

เนื่องจากผลตอบสนองความถี่ของระบบภายใต้การทดสอบในทุก ๆ ความถี่ที่เกี่ยวเนื่องกัน โดยการวัดนั้นจะทำการกระตุ้นสัญญาณที่มีแถบกว้างอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการกระตุ้นในทุกความถี่แบบชั่วขณะในเวลาเดียวกัน และใช้วิธีการแปลงฟูริเยร์แบบทันทีทันใดของทุก ๆ ความถี่ในบางเวลา ซึ่งเป็นการลดสัญญาณรบกวนและความไม่เป็นเชิงเส้นที่ดีที่สุดด้วยการใช้วิธีสุ่มสัญญาณรบกวนที่มากระตุ้น แต่อาจจะต้องใช้อิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

2) ฟังก์ชั่นถ่ายโอน เป็นการหาผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณจากสมการที่ (2.13) ด้วยการแปลงฟูริเยร์ของสัญญาณในโดเมนเวลา โดยที่ $H(f)$ เป็นการแปลงฟูริเยร์ของ $h(t)$ ซึ่งฟังก์ชัน $H(f)$ เรียกว่าฟังก์ชันถ่ายโอน หรือผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเวลาแสดงได้ดังสมการที่ (2.14)

$$y(t) = h(t) * x(t) \tag{2.13}$$

$$Y(f) = H(f)X(f) \tag{2.14}$$

3) การแปลงลาปลาซ เป็นการหาผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชัน $h(t)$ เพียงข้างเดียวแสดงได้ดังสมการที่ (2.15)

$$H(s) = \int_0^\infty h(t)e^{-st}dt \tag{2.15}$$

โดยที่ t เป็นจำนวนจริง และ $s = \sigma + j\omega$ เป็นจำนวนเชิงซ้อน แต่ถ้ามีการแปลงลาปลาซทั้งสองข้างแล้วจะมีการกำหนดขอบเขตล่างของการอินทิเกรตจาก 0 ไปเป็น $-\infty$ ซึ่งสามารถที่จะทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงลาปลาซของระบบที่เป็นเชิงเส้นได้เท่านั้น อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วในทางปฏิบัติเชิงวิศวกรรมจะมีการกำหนดให้ใช้เพียงข้างเดียวเท่านั้น เนื่องจากเมื่อต้องการหาค่าระหว่างแกนที่มี $s = j\omega$ โดยให้ $\sigma = 0$ แล้วการแปลงลาปลาซสามารถพิจารณาได้ตามลักษณะโดยทั่วไปของการแปลงฟูริเยร์จากเส้นจำนวนจริง (ตัวอย่างเช่นแกนของความถี่) ไปยังระนาบเชิงซ้อนได้ ซึ่งข้อดีของการแปลงลาปลาซคือสามารถวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ที่ไม่สามารถใช้การแปลงฟูริเยร์ได้ ดังนั้นสามารถเขียนการแปลงลาปลาซได้ดังสมการที่ (2.17)

$$H(s) = \int_0^\infty h(t)e^{-(\sigma+j\omega)t}\ dt \tag{2.16}$$

$$H(s) = \int_0^{\infty} \left[h(t)e^{-\sigma t} \right] e^{-j\omega t}\, dt \tag{2.17}$$

4) การแปลง z เป็นการหาผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณเหมือนกับการแปลงลาปลาซ เนื่องจากการแปลง z เป็นการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณทางเวลาที่ไม่ต่อเนื่องคล้ายกับการแปลงลาปลาซ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จำเป็นอย่างยิ่งในทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์สัญญาณของระบบ ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของการแปลงฟูริเยร์ของสัญญาณในการทดลองเหมือนกับการแปลงลาปลาซในส่วนที่ทำให้เข้าใจพฤติกรรมแบบชั่วขณะของการตอบสนองของสัญญาณอิมพัลส์ ความมีสภาวะที่คงตัว และความมีเสถียรภาพของระบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งความเข้าใจเกี่ยวกับการแปลง z นี้เป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ โดยการแปลง z นั้นจะกระทำทั้งสองด้านของสัญญาณ $h(n)$ ที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลาแสดงได้ดังสมการที่ (2.18)

$$H(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)z^{-n} \tag{2.18}$$

เมื่อ z เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากเป็นการกำหนดรูปแบบของสัญญาณเริ่มต้นที่เวลา $n = 0$ และเนื่องจากตัวกรองสัญญาณทุกตัวถูกสมมติขึ้นมา ซึ่งขอบล่างของผลรวมจะให้เป็น 0 มากกว่าที่จะเป็น $-\infty$ และผลที่ได้ออกมานั้นจะกลายเป็นการแปลง z เพียงด้านเดียวนั่นเอง

5) ความสัมพันธ์ระหว่างการแปลงลาปลาซ การแปลงฟูริเยร์ และการแปลง z โดยการแปลงลาปลาซ การแปลงฟูริเยร์ และการแปลง z เป็นความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกัน เนื่องจากสัญญาณที่อยู่ทางด้านขวามือของการแปลงลาปลาซเป็นการแปลงฟูริเยร์โดยทั่วไปของสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา และที่อยู่ทางด้านขวามือของการแปลง z เป็นการแปลงฟูริเยร์โดยทั่วไปของสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการแปลง z สามารถได้มาจากการแปลงลาปลาซของสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งต่อไปนี้เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการแปลง z และการแปลงฟูริเยร์ ดังสมการที่ (2.19) โดยเมื่อ $s = \sigma + j\omega$ และ $\omega = 2\pi f$ แล้วสามารถที่จะเขียนการแปลง z ได้ดังสมการที่ (2.20) และเมื่อให้ $r = e^{\sigma} = 1$ แล้วจะวิเคราะห์สัญญาณได้ดังสมการที่ (2.21)

$$z = e^{s} = e^{\sigma}e^{j\omega} = re^{j2\pi f} \tag{2.19}$$

$$H(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n) r^{-n} e^{-j2\pi nf} \tag{2.20}$$

$$H(z = e^{j2\pi f}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n) e^{-j2\pi nf} \tag{2.21}$$

2.6 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์โดยพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์

จากจุดประสงค์ของการพัฒนาระบบการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์พบว่าสิ่งที่แตกต่างจากการสื่อสารแบนด์แคบคือ รูปแบบของสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์เป็นลักษณะของพัลส์ โดยรูปแบบของพัลส์ที่นิยมนำมาใช้พิจารณาสำหรับการรับส่งข้อมูลข่าวสารนั้นมีสามรูปแบบ คือ เกาส์เซียนพัลส์ เกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ และเกาส์เซียนดับเลตดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.6.1 เกาส์เซียนพัลส์

โดยทั่วไปแล้วสัญญาณพัลส์ที่นิยมนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรกสำหรับการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ คือเกาส์เซียนพัลส์เนื่องจากมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และสามารถกำเนิดสัญญาณเกาส์เซียนพัลส์นี้ได้ง่าย ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.22)

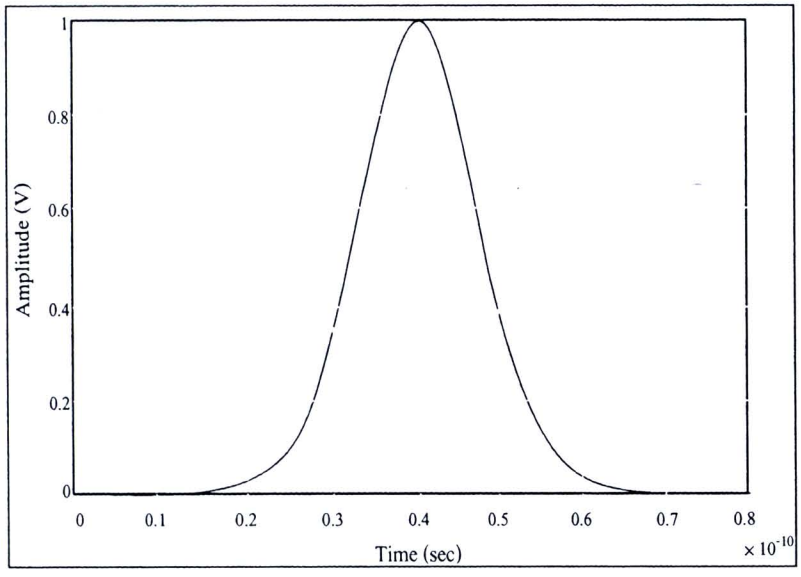
$$y_{g_1}(t) = A_1 e^{-(t/\tau)^2} \tag{2.22}$$

เมื่อ t คือช่วงเวลา โดยที่ $-\infty < t < \infty$ มี A_1 เป็นแอมพลิจูดของเกาส์เซียนพัลส์ และ τ คือความกว้างของพัลส์ ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยให้ $\tau = \sigma \cdot 2\pi$ เมื่อ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกาส์เซียนพัลส์ และจากสมการที่ (2.22) เมื่อพิจารณาลักษณะรูปร่างของพัลส์ในโดเมนเวลาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นการพิจารณาลักษณะของสัญญาณเทียบกับขนาด และเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่สามารถแปลงฟูริเยร์ของสมการที่ (2.22) ได้ดังสมการที่ (2.25) ซึ่งจะมีการแผ่สเปกตรัมสัญญาณในรูปของพลังงานเทียบกับความถี่แสดงได้ดังรูปที่ 2.12

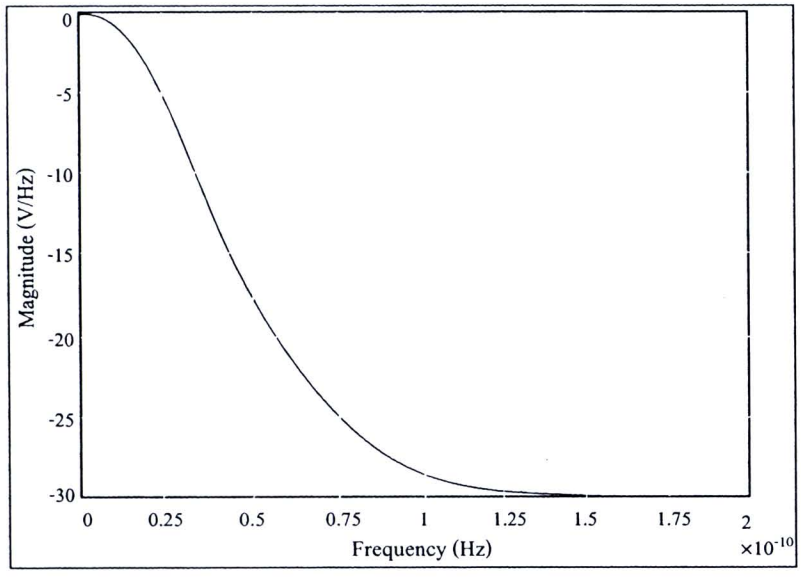
$$Y_{g_1}(f) = F\left\{y_{g_1}(t)\right\} \tag{2.23}$$

$$Y_{g_1}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} A_1 e^{-(t/\tau)^2} e^{-j2\pi ft} dt \tag{2.24}$$

$$Y_{g_1}(f) = A_1\tau\sqrt{\pi}\ e^{-(\pi\tau f)^2} \tag{2.25}$$



รูปที่ 2.11 สัญญาณเกาส์เซียนพัลส์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.12 สัญญาณเกาส์เซียนพัลส์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่

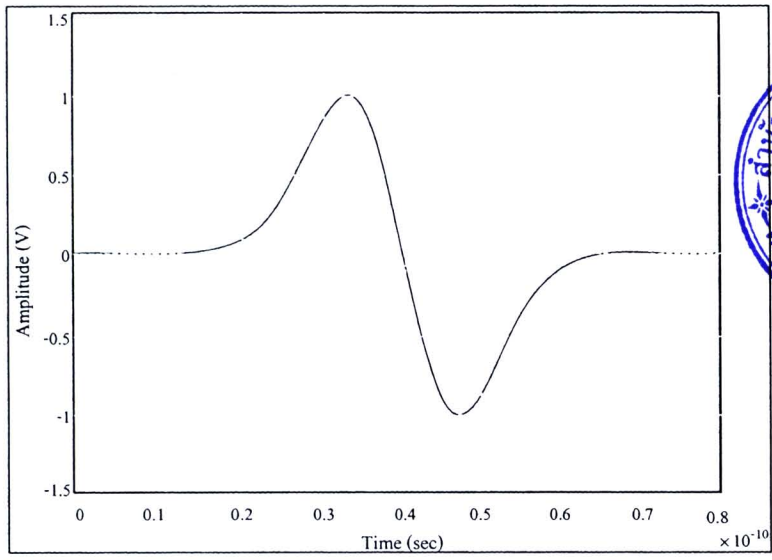
2.6.2 เกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์

รูปแบบสัญญาณที่เป็นเกาส์เซียนพัลส์จากสมการที่ (2.22) เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่แล้วจะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำนั้นสัญญาณจะมีส่วนประกอบของกระแสตรง (DC component) ซึ่งไม่สามารถส่งสัญญาณผ่านสายอากาศออกไปได้ จึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้สำหรับการรับส่งสัญญาณของระบบที่มีสายอากาศเป็นส่วนประกอบ แต่จะมีประโยชน์ในส่วนของการกำเนิดสัญญาณพัลส์เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่นิยมนำมาใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ เป็นสัญญาณพัลส์อีกรูปแบบหนึ่งที่เรียกว่าเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ เนื่องจากเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่แล้วจะไม่มีส่วนประกอบของกระแสตรง ซึ่งสามารถสร้างพัลส์รูปแบบนี้ได้โดยการนำเกาส์เซียนพัลส์มาผ่านตัวกรองความถี่สูงเพื่อกำเนิดสัญญาณพัลส์ดังกล่าว ซึ่งการกระทำของตัวกรองความถี่สูงนี้เป็นการนำสมการที่ (2.22) มาทำอนุพันธ์นั่นเอง และผลจากการทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของเกาส์เซียนพัลส์ทำให้ได้สัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ ดังสมการที่ (2.26)

$$y_{g_2}(t) = A_2 \frac{-2t}{\tau^2} e^{-(t/\tau)^2} \tag{2.26}$$

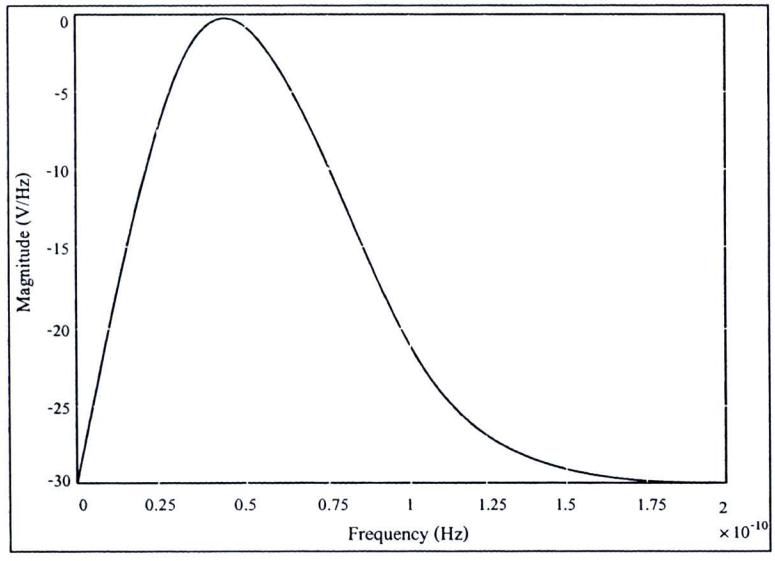
เมื่อ t คือช่วงเวลาของสัญญาณพัลส์ โดยที่ $-\infty < t < \infty$ และ A_2 เป็นแอมพลิจูดของสัญญาณแบบเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ โดยสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนโมโนไซเคิลนี้สามารถสังเกตได้ว่ามีการตัดผ่านจุดศูนย์เพียงหนึ่งจุดเท่านั้น ซึ่งจุดตัดผ่านศูนย์นี้จะเพิ่มเข้ามาเป็นจำนวนเท่ากับอันดับของการทำอนุพันธ์ของสัญญาณ โดยความกว้างของพัลส์นั้นมีค่าเท่ากับ τ คงที่ และในขณะเดียวกันนี้การเพิ่มอันดับของอนุพันธ์จะทำให้อัตราส่วนของแบนด์วิดท์ลดลงด้วย แต่ความถี่กลางจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงลักษณะรูปร่างของสัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ในโดเมนเวลาได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการพิจารณาลักษณะของสัญญาณเทียบกับขนาด ณ เวลาหนึ่ง ๆ เช่นเดียวกับสัญญาณแบบเกาส์เซียนพัลส์ แต่เมื่อนำสัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ในโดเมนเวลามาพิจารณาในโดเมนความถี่ด้วยแปลงฟูริเยร์ของสมการที่ (2.26) ได้ดังสมการที่ (2.27) โดยสัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์นี้จะมีการแผ่สเปกตรัมสัญญาณในรูปของพลังงานเทียบกับความถี่แสดงได้ดังรูปที่ 2.14

$$Y_{g_2}(f) = A_2 \tau \sqrt{\pi} (j2\pi f) e^{-(\pi \tau f)^2} \tag{2.27}$$



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 2.13 สัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.14 สัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่

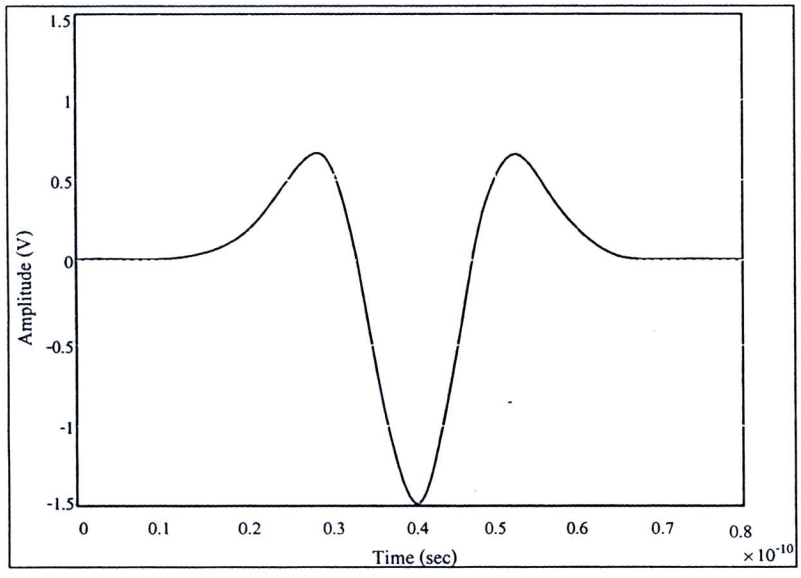
จากรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นการแผ่สเปกตรัมของสัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ในโดเมนความถี่ ซึ่งพบว่าสัญญาณไม่มีส่วนประกอบของ DC เหมือนกับเกาส์เซียนพัลส์

2.6.3 เกาส์เซียนดับเลตพัลส์

นอกจากรูปแบบสัญญาณที่เป็นเกาส์เซียนพัลส์และเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์แล้ว ยังมีพัลส์อีกรูปแบบหนึ่งที่มีการกล่าวถึงสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ นั่นคือพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเลต ซึ่งสามารถสร้างพัลส์รูปแบบนี้ได้โดยการนำเกาส์เซียนพัลส์มาผ่านตัวกรองความถี่สูงสองตัวเพื่อกำเนิดสัญญาณพัลส์ดังกล่าว โดยนำสมการที่ (2.22) มาทำอนุพันธ์อันดับที่สอง และผลจากการทำอนุพันธ์อันดับที่สองนี้ทำให้ได้สัญญาณเกาส์เซียนดับเลตพัลส์ ดังสมการที่ (2.28)

$$y_{g_3}(t) = A_3 \frac{-2}{\tau^2}\left(1-\frac{2t^2}{\tau^2}\right)e^{-(t/\tau)^2} \tag{2.28}$$

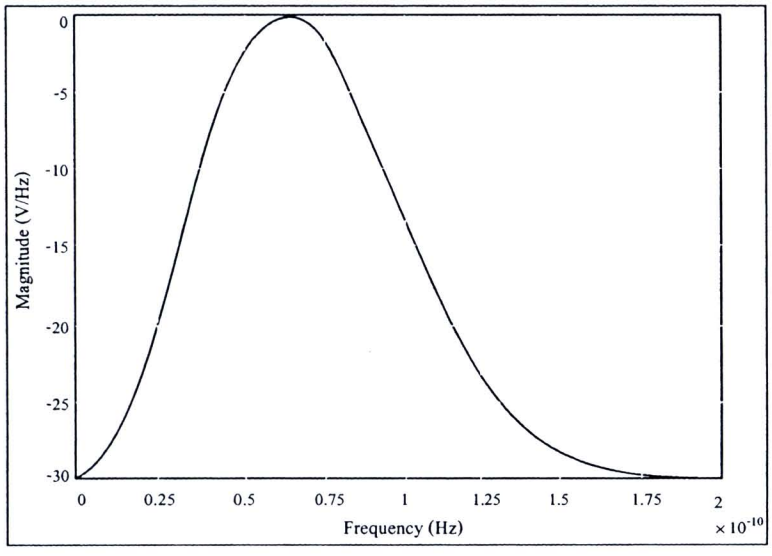
เมื่อ t คือช่วงเวลาโดยที่ $-\infty < t < \infty$ และ A_3 เป็นแอมพลิจูดของเกาส์เซียนดับเลตพัลส์และเกาส์เซียนดับเลตนี้สามารถสังเกตได้ว่ามีการตัดผ่านจุดศูนย์สองจุดเท่ากับจำนวนอันดับของการทำอนุพันธ์ โดยความกว้างของพัลส์มีค่าเท่ากับ τ คงที่ และการเพิ่มอันดับของอนุพันธ์นี้จะทำให้อัตราส่วนของแบนด์วิดท์ลดลงอีก ขณะที่ความถี่กลางนั้นเพิ่มขึ้น สามารถแสดงลักษณะรูปร่างของสัญญาณเกาส์เซียนดับเลตพัลส์ในโดเมนเวลาได้ดังรูปที่ 2.15 และ รูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการพิจารณาลักษณะของสัญญาณเทียบกับขนาดเช่นเดียวกับสัญญาณแบบเกาส์เซียนพัลส์



รูปที่ 2.15 สัญญาณเกาส์เซียนดับเลตพัลส์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา

เมื่อนำสัญญาณเกาส์เซียนดับเลตพัลส์ในโดเมนเวลาจากรูปที่ 2.15 มาพิจารณาในโดเมนความถี่ด้วยแปลงฟูริเยร์ของสมการที่ (2.28) ได้ดังสมการที่ (2.29) โดยเกาส์เซียนดับเลตพัลส์นี้จะมีการแผ่สเปกตรัมสัญญาณในรูปของพลังงานเทียบกับความถี่แสดงได้ดังรูปที่ 2.16

$$Y_{g_2}(f) = A_3\tau\sqrt{\pi}(j2\pi f)^2 e^{-(\pi\tau f)^2} \tag{2.29}$$



รูปที่ 2.16 สัญญาณเกาส์เซียนดับเลตพัลส์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่

โดยจากรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นการแผ่สเปกตรัมในโดเมนความถี่ของสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเลต ซึ่งไม่มีส่วนประกอบของ DC เช่นเดียวกับสัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ แต่ค่าความถี่กลางจะเพิ่มขึ้นมากขึ้นกว่าเดิมตามอันดับของการทำอนุพันธ์ประกอบกับแบนด์วิดท์ของสัญญาณลดน้อยลง

2.7 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ

ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นสายอากาศมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นตัวแพร่กระจายคลื่น ซึ่งการรับส่งสัญญาณของระบบสื่อสารไร้สายจะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสายอากาศด้วยส่วนหนึ่ง โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้สำหรับการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ซึ่งต้องมีแถบความถี่กว้าง เพื่อรองรับการรับส่งข้อมูลในยุคปัจจุบันที่เป็น

มัลติมีเดีย ซึ่งปกติสายอากาศที่ถูกจัดให้เป็นสายอากาศแถบกว้างนั้นจะต้องมีความกว้างแถบมากกว่า 10% ขึ้นไป ซึ่งการอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศตัวใดตัวหนึ่งนั้นจำเป็นต้องทราบคำนิยามของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศเสียก่อน นั่นคือค่าของการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ (impedance bandwidth) แบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน (radiation pattern) อัตราขยาย (gain) ของสายอากาศ ซึ่งทุก ๆ ปัจจัยที่กล่าวมาแล้วนั้นคือสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งสำหรับการออกแบบสายอากาศหรือการเลือกใช้สายอากาศให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน โดยทั่วไปแล้วส่วนมากสิ่งที่เป็นปัจจัยพื้นฐานของการพิจารณาสายอากาศ คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน

2.7.1 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับนั้นเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าของแบนด์วิดท์สำหรับสายอากาศที่มีการแมตช์อย่างเพียงพอกับสายส่ง เช่น 10% หรือมากกว่า ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงสัญญาณที่สูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศ รวมทั้งเป็นการบ่งบอกถึงค่าคุณลักษณะของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่สัมพันธ์กับค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตลอดย่านความถี่ที่สนใจ โดยค่า VSWR และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ซึ่งเป็นการกำหนดอัตราส่วนระหว่างคลื่นที่สะท้อนกลับ (V_0^-) กับคลื่นที่ตกกระทบ (V_0^+) ที่โหลดของสายส่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.30

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{line} - Z_{load}}{Z_{line} + Z_{load}} \tag{2.30}$$

โดยที่ Z_{line} และ Z_{load} เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่งและอิมพีแดนซ์ของโหลด (สายอากาศ) ซึ่งแรงดันและกระแสที่ผ่านสายส่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{-j\beta z} = V_0^+ (e^{-j\beta z} + \Gamma e^{j\beta z}) \tag{2.31}$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0}(V_0^+ e^{-j\beta z} - V_0^- e^{-j\beta z}) = \frac{V_0^+}{Z_0}(e^{-j\beta z} - \Gamma e^{j\beta z}) \tag{2.32}$$

เมื่อ $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ จะมีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ S_{11} ของเมตริกซ์การกระจัดกระจาย (scattering matrix) และกรณีที่มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์แบบจะทำให้ $\Gamma = 0$ และให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ที่แย่ที่สุดมีค่า $\Gamma = -1$ หรือ 1 ซึ่งเหมือนกับความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลดเมื่อมีการลัดลงจรหรือเปิดวงจร และพลังงานที่มีการสะท้อนกลับที่จุดเชื่อมต่อของสายอากาศนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่สัมพันธ์กับการแมตช์อิมพีแดนซ์ โดยพลังงานของช่วงเวลาเฉลี่ยเป็นการวัดไปยังสายส่งตามปกติที่มีอิทธิพลกับค่าพลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลด และพลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2.33)

$$P_{ave}^{i} = \frac{\left|V_0^{+}\right|^2}{2Z_0} \tag{2.33}$$

โดยพลังงานที่สะท้อนกลับเป็นสัดส่วนกับพลังงานที่เกิดขึ้นโดยคูณกับตัวประกอบของ $|\Gamma|^2$ แสดงได้ดังสมการที่ (2.34) และค่าพลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลด จะเป็นผลรวมของพลังงานที่เกิดขึ้นและพลังงานเฉลี่ยที่สะท้อนกลับดังสมการที่ (2.35)

$$P_{ave}^{r} = -|\Gamma|^2 \frac{\left|V_0^{+}\right|^2}{2Z_0} \tag{2.34}$$

$$P_{ave} = \frac{\left|V_0^{+}\right|^2}{2Z_0}\left[1-|\Gamma|^2\right] \tag{2.35}$$

เนื่องจากพลังงานที่ส่งไปยังโหลดเป็นสัดส่วนกับ $(1-|\Gamma|^2)$ โดยค่าที่สามารถยอมรับได้ของ Γ เพียงแค่ 10 % เท่านั้น จึงจะสามารถคำนวณค่าพลังงานที่สะท้อนกลับได้ และส่งผลให้ Γ มีค่าเท่ากับ 0.3162 เมื่อโหลดไม่แมตช์กับสายส่งแล้วจะเกิดการสะท้อนกลับจากโหลดไปยังแหล่งจ่าย ซึ่งเกิดเป็นคลื่นนิ่งในสายส่ง โดยการวัดค่า VSWR นั้นเป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งกับแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่ง โดยค่าที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง คือ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.0 โดยค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.36)

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{2.36}$$

ต่อไปเป็นการพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนเนื่องจากการย้อนกลับกลับของสายอากาศ ซึ่งเป็นการวัดคุณลักษณะของการแมตช์อิมพีแดนซ์อีกแบบหนึ่ง โดยมีความสัมพันธ์เหมือนกับค่าของ Γ หรือค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง โดยค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศคำนวณได้จากสมการที่ 2.37

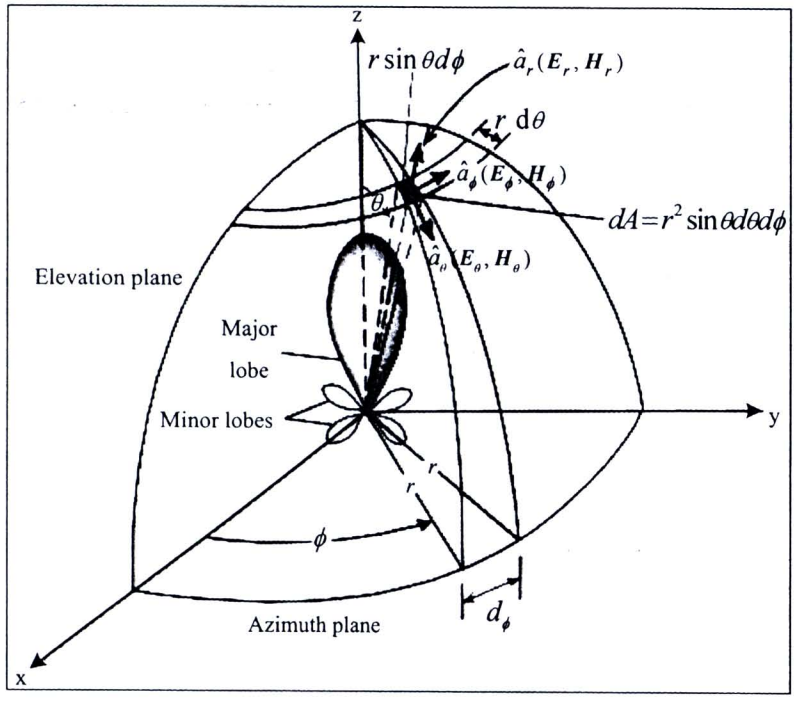
$$\text{Return Loss} = -10\log|S_{11}|^2 = -20\log(|\Gamma|) \tag{2.37}$$

เนื่องจากการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ดีนั้นเป็นการบ่งบอกถึงค่าการสูญเสียย้อนกลับต้องน้อยกว่า -10 dB ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศที่ดีนั้นจำเป็นต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า 0.3162 มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งน้อยกว่า 2 และมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB

2.7.2 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน

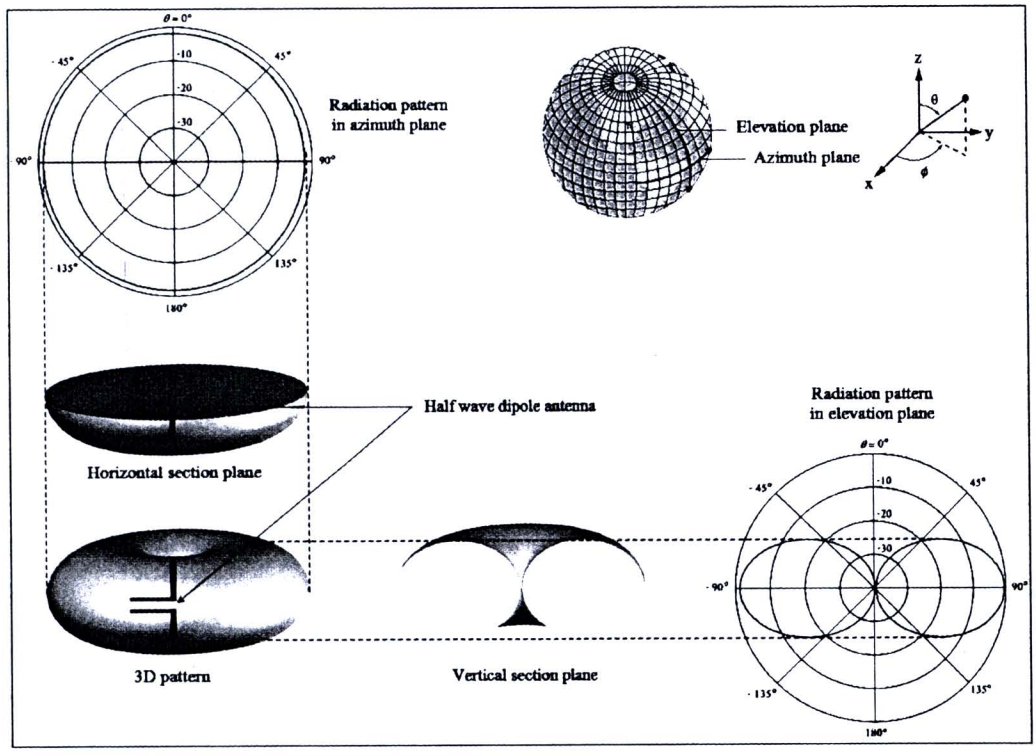
คุณลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งที่จำเป็นสำหรับการอธิบายคุณลักษณะของสายอากาศรูปแบบต่าง ๆ นั่นคือแบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน (radiation pattern) เนื่องจากแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแผ่กระจายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดสเปซ (space coordinates function) ของค่าความแรงของสนาม (field strength) เฟส (phase) หรือ โพลาไรเซชัน (polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงคุณสมบัติของสายอากาศในรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสามมิติโดยมีรัศมีคงที่ ซึ่งมีการใช้เส้นเพื่อแสดงพลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ โดยมีชื่อเรียกว่า แบบรูปพลังงาน (power pattern) ของสายอากาศ และรูปภาพที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปสนาม (field pattern) ของสายอากาศ โดยระบบพิกัดที่นิยมนำมาใช้สำหรับการแสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของคลื่นนั้นจะนิยมพิจารณาในพิกัดทรงกลม เนื่องจากแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในสามมิติเป็นการวัดในระบบของพิกัดทรงกลม ซึ่งเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มการแผ่กระจายพลังงานในสนามระยะไกลที่ล้อมรอบสายอากาศในลักษณะที่เป็นทรงกลม โดยในระบบพิกัดของทรงกลม ระนาบ x-z (ทำการวัดโดยเปลี่ยนแปลง θ เมื่อ $\phi = 0^\circ$) เป็นการใช้บ่งบอกถึงระนาบมุมเงย ส่วนระนาบ x-y (ทำการวัดโดยเปลี่ยนแปลง ϕ เมื่อ $\theta = 90^\circ$) เป็นการใช้บ่งบอกถึงระนาบมุมแอซิมัท โดยในระนาบของมุมเงยนั้นจะมีเวคเตอร์ของสนามไฟฟ้าอยู่ (E-plane) และมีทิศทางของการแผ่กระจายพลังงานสูงสุด ส่วนในระนาบของแอซิมัทนั้นจะมีเวคเตอร์ของสนามแม่เหล็กอยู่ (H-plane) และมีทิศทางของการแผ่

กระจายพลังงานสูงสุด ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานทั้งสองระนาบนั้นเป็นการพล็อตในเชิงขั้ว โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่า θ หรือ ϕ และคงที่ค่า ϕ และ θ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



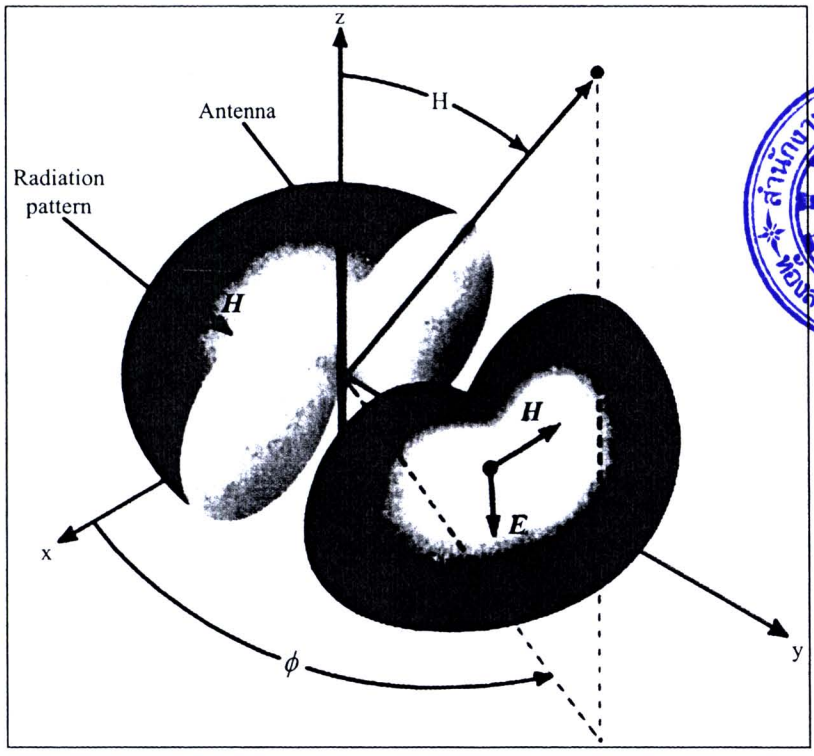
รูปที่ 2.17 แสดงระบบพิกัดที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของคลื่น

ซึ่งการวิเคราะห์คุณลักษณะในเชิงขั้วของสายอากาศเป็นการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ โดยให้ระนาบแอซิมัทคงที่และทำการเปลี่ยนแปลงในระนาบของมุมเงย (เปลี่ยนแปลงค่า θ) ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบสนามไฟฟ้า ส่วนการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ โดยให้ระนาบของมุมเงยคงที่ที่มีการแผ่กระจายพลังงานสูงสุดนั่นคือ $\theta = 90^\circ$ และทำการเปลี่ยนแปลงในระนาบของแอซิมัท (เปลี่ยนแปลงค่า ϕ) ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบสนามแม่เหล็ก โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งเป็นการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นในระนาบสามมิติ และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสองมิติโดยเปลี่ยนแปลงค่า θ โดยให้ $\phi = 0^\circ$ และเปลี่ยนแปลงค่า ϕ โดยให้ $\theta = 90^\circ$ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อมีการพิจารณาร่วมกันทั้งในระนาบสามมิติและระนาบสองมิติแล้วจะทำให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น และพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานสูงสุดอยู่ที่ $\theta = 90^\circ$ สำหรับทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงค่า ϕ ในระนายของแอซิมัท และค่าที่เป็นศูนย์ของแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานอยู่ในส่วนปลายของไดโพลตามแนวแกน z (หรือที่ $\theta = 0^\circ$ และ 180°)



รูปที่ 2.18 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นในระนาบสามมิติ และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสองมิติ

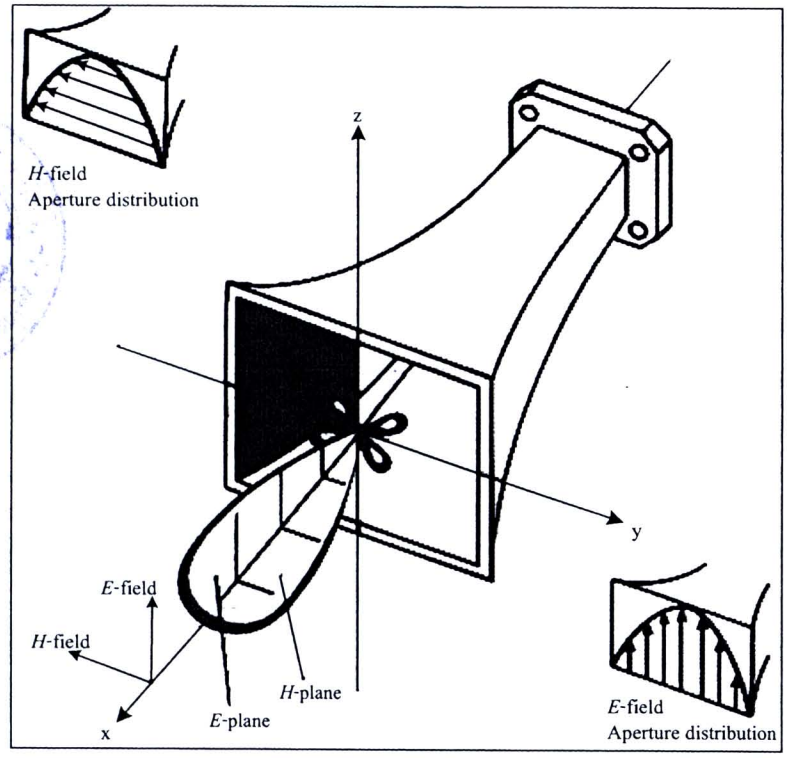
ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ สายอากาศที่มีการแผ่กระจายพลังงานแบบไอโซทรอปิก (isotropic radiator) และสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง (directional antenna) โดยสายอากาศแบบไอโซทรอปิกคือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่ง ที่ไม่สามารถสร้างจริงได้ แต่มักใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omni-directional antenna) คือสายอากาศแบบไดโพลความยาวครึ่งคลื่น เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นจะมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดี่ยว (omni-directional pattern) โดยมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ ในที่นี้คือมุมแอซิมัท (azimuth) นั่นเอง และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานเป็นแบบมีทิศทาง ซึ่งคือมุมเงย (elevation) โดยคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.19



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 2.19 แบบรูปของสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว

โดยจากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบแนวราบ (azimuth plane, [$f(\phi), \theta = \pi/2$]) แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบแนวดิ่ง (elevation plane, [$\theta = 0, \phi =$ ค่าคงที่]) แบบรูปสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยวนี้ เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปสายอากาศแบบมีทิศทาง ส่วนสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง (directional antenna) นั้นจะมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลัก (principal pattern) ในเทอมของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น เช่น สายอากาศโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (linearly polarization) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นระนาบที่บรรจุเวคเตอร์สนามไฟฟ้า และมีทิศทางของการแผ่พลังงานของคลื่นสนามไฟฟ้าที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบแม่เหล็กจะเป็นระนาบที่บรรจุเวคเตอร์สนามแม่เหล็ก และมีทิศทางของการแผ่พลังงานของคลื่นสนามแม่เหล็กที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลัก โดยมีระนาบ $x-z$ (ระนาบแนวราบ $\theta = \pi/2$) หรือระนาบสนามไฟฟ้าเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.20

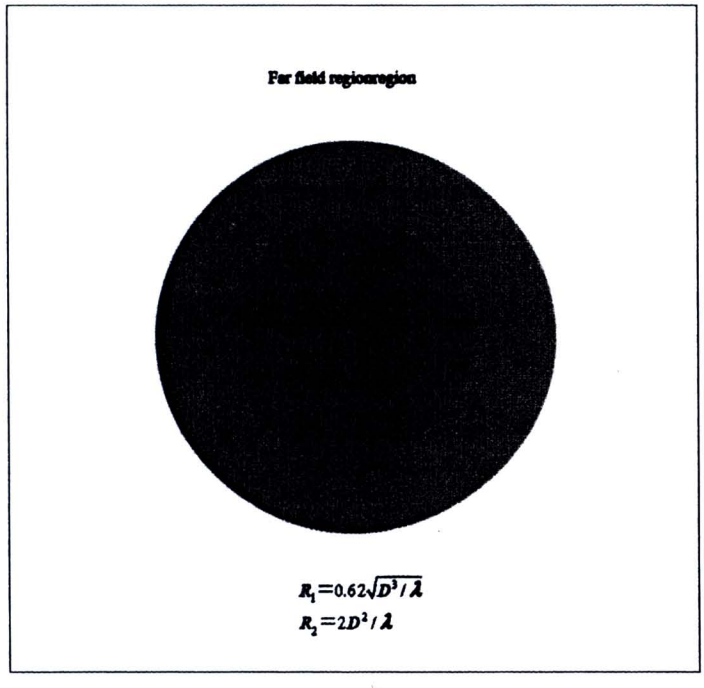


รูปที่ 2.20 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง โดยมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลักในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร

โดยแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานนี้เป็นตัวบ่งบอกสำหรับการเลือกสายอากาศไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้กับดาวเทียมหรือการเชื่อมต่อสำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างจุดจะต้องเลือกใช้สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูง มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานไปในทิศทางที่เจาะจงรู้ตำแหน่งที่แน่นอน ส่วนการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์จะต้องใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบตัว เป็นต้น ดังนั้นการแผ่กระจายพลังงานจะต้องแพร่กระจายออกอย่างสม่ำเสมอโดยรอบของผู้ใช้อย่างเหมาะสมที่สุด โดยมีมาตรฐานที่ยอมรับกันเป็นสากล ซึ่งสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ (The Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE) ได้กำหนดในส่วนของแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไว้เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือกราฟที่เป็นการแสดงถึงคุณสมบัติการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ เป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง

บริเวณสนามของสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณแรกเป็นสนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (reactive near field region) เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด ซึ่งสนามที่เกิดขึ้นบริเวณนี้จะเป็นสนามรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ โดยบริเวณนี้จะมีระยะทางคือ

$R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ บริเวณที่สองเป็นสนามระยะใกล้ที่มีการแผ่ (radiating near field region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณสนามระยะใกล้รีแอกทีฟกับบริเวณแผ่พลังงานสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้น จะแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศซึ่งถ้าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นสนามบริเวณนี้จะไม่เกิดขึ้น และในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62\sqrt{D^3/\lambda} < R < 2D^2/\lambda$ สุดท้ายคือบริเวณสนามระยะไกล (far field region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่มีการกระจายของสนามเชิงมุมไม่ขึ้นกับระยะทางที่ห่างออกมาจากตัวสายอากาศ โดยถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่สุดเท่ากับ D บริเวณแผ่พลังงานสนามไกล จะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R > 2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ ซึ่งบริเวณสนามสำหรับการพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานส่วนใหญ่นั้นจะต้องกระทำในสนามระยะไกล และเป็นการอธิบายถึงลักษณะฟังก์ชันของพิกัดเชิงทิศทางเสมอ ซึ่งคุณลักษณะการแผ่กระจายพลังงานประกอบด้วย ความหนาแน่นของเส้นแรงกำลัง (power flux density) ความหนาแน่นของพลังงานที่แผ่กระจาย (radiation power density) ความเข้มของสนาม (field intensity) สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) เฟสของการชี้นำ (directivity phase) หรือการแยกขั้วคลื่น (polarization) โดยบริเวณสนามของสายอากาศที่ถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศที่ต้องการพิจารณา

2.7.3 อัตราขยาย

การวัดอัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการวัดสภาพเจาะจงทิศทาง ตลอดจนประสิทธิภาพการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ โดยอัตราขยายจริงของสายอากาศเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายพลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแผ่กระจายพลังงานที่ได้รับเข้ามา สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.38)

$$G = 4\pi \frac{U(\theta,\phi)}{P_{in}} \tag{2.38}$$

โดยถ้าพลังงานที่รับเข้ามาโดยสายอากาศนั้นมีการแผ่กระจายพลังงานในลักษณะของไอโซทรอปิกแล้ว ความเข้มของการแผ่กระจายพลังงานในลักษณะนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่สายอากาศรับเข้ามาที่ขั้วอินพุทหารด้วย 4π ส่วนอัตราขยายสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายพลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายพลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น ซึ่งพลังงานที่ป้อนให้กับอินพุทของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบนั้นจะเป็นสายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก ที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจะได้ดังสมการที่ (2.39)

$$G = 4\pi \frac{U(\theta,\phi)}{P_{in}(isotropic\ Source)} \tag{2.39}$$

2.7.4 ความกว้างแถบ

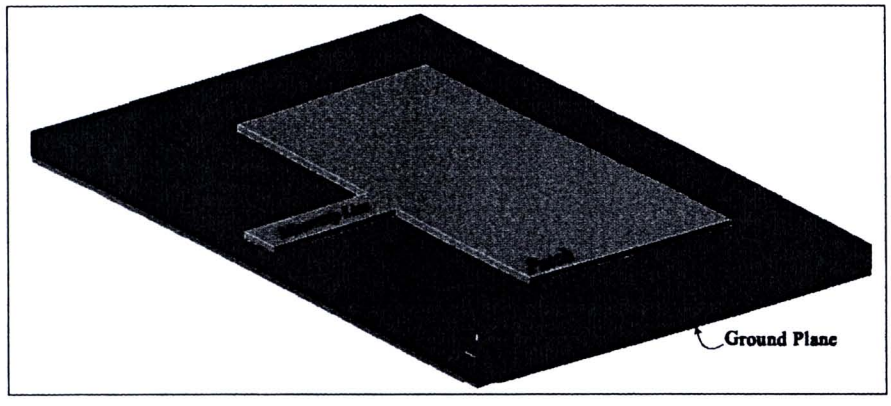
ความกว้างแถบของสายอากาศ (bandwidth) คือ ย่านของความถี่ที่ยังอยู่ในสภาวะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ โดยความกว้างแถบจะพิจารณาจากช่วงระหว่างความถี่ที่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่กลาง ซึ่งสภาวะการทำงานของสายอากาศที่ยอมรับได้นั้นจะต้องสามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่นั้นในกรณีที่เป็นสายอากาศแถบกว้าง ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ และในกรณีที่เป็นสายอากาศแถบแคบ ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่ เมื่อเทียบกับความถี่กลางของความกว้างแถบ และเนื่องจากคุณลักษณะของสายอากาศ ที่ถูกใช้ในการพิจารณาความกว้างแถบไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงหรือมีผลต่อความถี่เหมือนกัน จึงไม่มีการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะเพื่อใช้ในการหาความกว้างแถบของสายอากาศ ดังนั้นวิธีการกำหนดความกว้างแถบ จึงมักจะแบ่งตามกลุ่มของคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ใช้ในการพิจารณา คือ ความกว้างแถบ

จากแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งเป็นความกว้างแถบที่พิจารณาจากระดับของโหลบด้านข้าง ความกว้างลำคลื่น การแยกขั้วคลื่น และทิศทางของลำคลื่น ส่วนความกว้างแถบจากค่าอิมพีแดนซ์ เป็นความกว้างแถบที่พิจารณาจาก ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ และค่าประสิทธิภาพของการแผ่กระจายพลังงาน

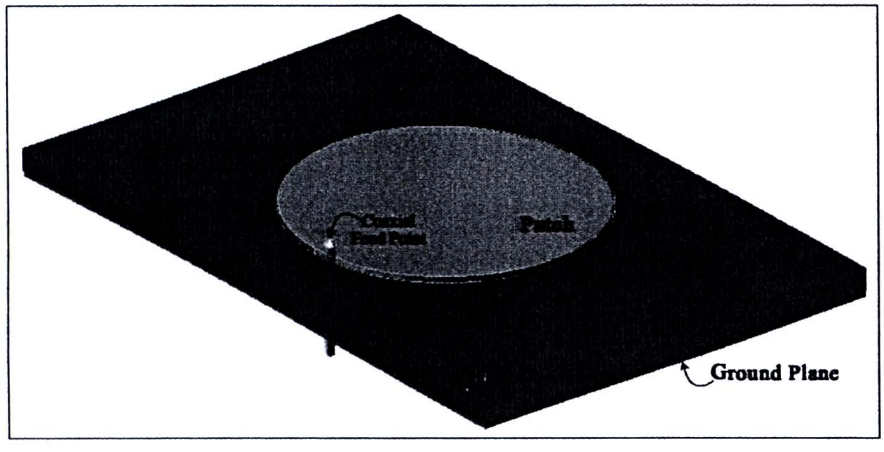
2.8 สายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์

สำหรับการพัฒนาระบบสื่อสารแบบไร้สายและโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น แนวทางการออกแบบสายอากาศที่ใช้มีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของอุปกรณ์ที่ต้องการใช้งานร่วมกับสายอากาศ ซึ่งยากที่จะกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ที่ตายตัว ในปัจจุบันสายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายมากที่สุดคือสายอากาศแบบโมโนโพล (monopole antenna) สายอากาศแบบปลอก (sleeve antenna) และสายอากาศแบบสัญฐานต่ำ (low-profile antenna) เช่นสายอากาศไมโครสตริปแพตช์ และสายอากาศระนาบอินเวิร์สเอฟ (planar inverted F antenna : PIFA) ซึ่งทั้งสามแบบนี้นิยมนำมาใช้งานสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย โดยสายอากาศแบบแรกคือสายอากาศแบบโมโนโพลนิยม ซึ่งเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุดเพราะสายอากาศมีคุณลักษณะเป็นสายอากาศแถบกว้าง (broadband) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก หรือบางครั้งสายอากาศชนิดนี้จะถูกเรียกว่าสายอากาศแบบแส้ (whip antenna) โดยส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นนั้นจะถูกติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ ซึ่งสายอากาศชนิดนี้นี้จะมีคุณลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล แต่ไม่ได้หมายความว่าจะมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบไดโพล เนื่องจากในทางปฏิบัติสายอากาศโมโนโพลมีความยาวไม่ใช่ครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ส่วนสายอากาศแบบที่สองคือสายอากาศแบบปลอกมีโครงสร้างของการแผ่กระจายคลื่นเป็นไดโพลแบบไม่สมมาตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยขนาดที่เล็กสุดของตัวนำจะเท่ากับตัวนำภายในสายโคแอคเชียลที่ป้อนให้กับสายอากาศ และขนาดที่ใหญ่จะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำซึ่งจะถูกลัดวงจรกับลวดถักที่เป็นตาข่ายอยู่รอบ ๆ สายโคแอคเชียลสายอากาศนี้มีคุณลักษณะเหมือนกับสายอากาศโมโนโพล ที่ไม่ต้องมีระนาบกราวด์แต่การที่ไม่มีระนาบกราวด์นั้นมีข้อเสียเมื่อนำไปใช้งาน โดยที่ต้องนำไปติดตั้งเข้ากับส่วนต่าง ๆ ที่เป็นโลหะทำให้อัตราการขยายของสายอากาศลดลง ข้อเสียอีกอย่างของสายอากาศแบบแส้และสายอากาศแบบปลอกคือโครงสร้างไม่แข็งแรงหักง่าย และไม่สะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน สุดท้ายคือสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์ โดยสายอากาศชนิดนี้มีโครงสร้างสามส่วนคือ ส่วนบนเป็นส่วนที่ใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่น โดยมีส่วนที่สองเป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่ขั้นกลางระหว่างระนาบกราวด์กับส่วนของการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นแผ่นตัวนำ แต่สายอากาศทั้งแบบไมโครสตริปและสายอากาศแบบอินเวิร์สเอฟ มีข้อเสียคล้ายกันคือ เป็นสายอากาศที่มีความกว้างแถบแคบมาก

สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือที่เรียกว่าแพตช์ซึ่งเป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งถูกแยกออกจากแผ่นระนาบกราวด์ (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าเป็นวัสดุฐานรอง (substrate) ของสารไดอิเล็กตริก ซึ่งสายอากาศแบบไมโครสตริปนี้ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ต้านลม และสามารถติดกับผิวของยานพาหนะได้ นอกจากนี้ยังมีข้อดีในแง่ที่ราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้ง โดยโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22



ก. แพตช์ของไมโครสตริปที่ป้อนผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริป

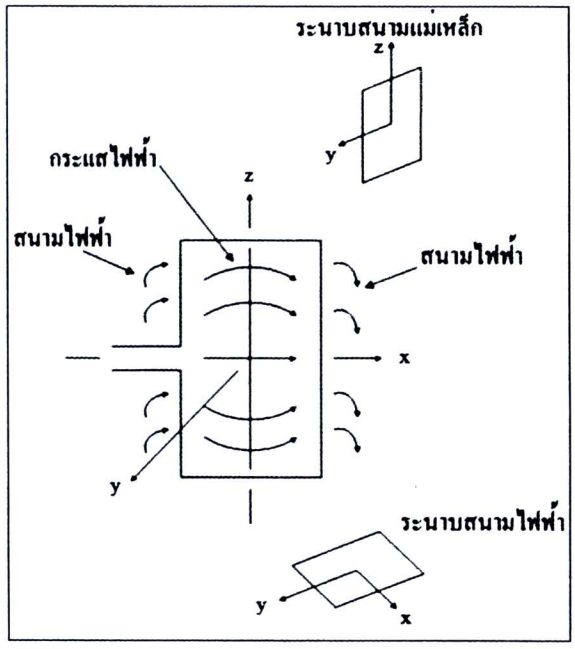


ข. แพตช์ของไมโครสตริปวงกลมที่มีการป้อนผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริป

รูปที่ 2.22 ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลม

โดยจากรูปที่ 2.22 ก. และรูปที่ 2.22 ข. เป็นการแสดงลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากและรูปวงกลม ซึ่งสายอากาศดังกล่าวนี้มีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ โดยแพตช์จะถูกวางไว้ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นระนาบกราวด์ (ground plane) รูปที่ 2.22 ก. เป็นแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยสัญญาณความถี่วิทยุจะถูกป้อนเข้าที่สายป้อนสัญญาณที่เป็นสตริปโลหะแคบ ๆ และในรูปที่ 2.22 ข. แสดงแพตช์รูปวงกลมที่ป้อนด้วยตัวนำผ่านช่องในระนาบกราวด์ ซึ่งการป้อนสัญญาณในลักษณะนี้จะเรียกว่าการเชื่อมต่อแบบช่องเปิดผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ ในระนาบกราวด์

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการแสดงคุณลักษณะของแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (characteristics of a rectangular patch) แสดงได้ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งเป็นการแสดงกระแสไฟฟ้า และเส้นแรงของสนามไฟฟ้าทั้งภายในและบริเวณรอบ ๆ แพตช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพตช์ที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบนั้น จะมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศในรูปที่ 2.23 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-plane) จะมีทิศทางในแนวตั้ง



รูปที่ 2.23 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพตช์

โดยอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มียาว $\lambda/2$ จะแสดงในรูปของค่าความต้านทานที่มีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นที่ดี ซึ่งค่าความต้านทานที่อินพุตที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Balanis, 1997) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.40)

$$R_{in} = \frac{1}{2G_1} \tag{2.40}$$

เมื่อ G_1 คือ ค่าความนำ (conductance) โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$G_1 = \frac{1}{90}\left(\frac{W}{\lambda_0}\right)^2 \qquad W \square \ \lambda_0 \tag{2.41}$$

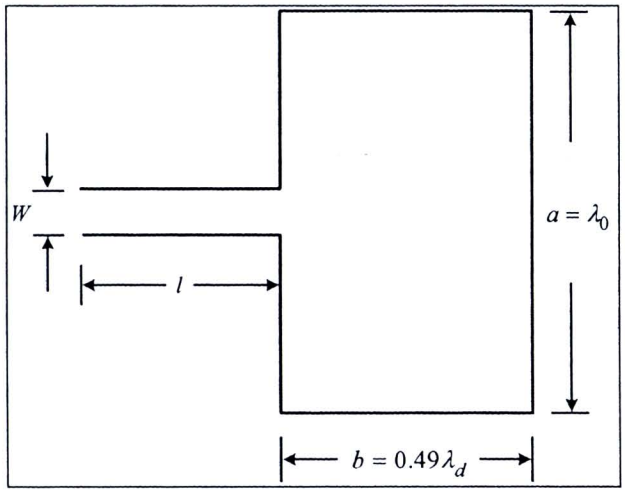
$$G_1 = \frac{1}{120}\left(\frac{W}{\lambda_0}\right)^2 \qquad W \square \ \lambda_0 \tag{2.42}$$

โดยที่ W เป็นความกว้างสายอากาศ

λ_0 เป็นความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ

สำหรับการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ตัวป้อนสัญญาณที่นำมาต่อกับสายอากาศควรจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย โดยสายนำสัญญาณที่จะต่อเข้ากับเครื่องมือวัดและทดสอบสายอากาศนั้นส่วนใหญ่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม จึงจำเป็นต้องทำการแมตช์อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์ เพื่อให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์นั้น มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบ ได้แก่ ความถี่ปฏิบัติงานของสายอากาศ (f_c) หรือความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (dielectric constant : ε_r) และความสูงของไดอิเล็กตริกหรือวัสดุฐานรอง (h) ยกตัวอย่าง เช่น การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากได้แบ่งเป็นสองส่วนคือ การออกแบบสายอากาศแพตช์และการออกแบบการป้อนสัญญาณ (รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 2548) โดยสามารถหาความกว้าง (a) และความยาว (b) ของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์ได้ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งแสดงมิติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยที่ค่าความนำของสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์นั้นจะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง (a) และ

ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นฟังก์ชันของความยาว (b) ซึ่งกำหนดได้ดังสมการที่ (2.43) และสมการที่ (2.44) ตามลำดับ



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างสายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$a = \lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.43}$$

$$b = 0.49\lambda_d = 0.49\frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.44}$$

โดยที่ λ_d คือความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริก

λ_0 คือความยาวคลื่นในอากาศอิสระ

ε_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

โดยการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี คือ สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป (microstrip line) สายนำสัญญาณแบบโคแอกเชียล (coaxial line) โพรบแบบโคแอกเชียล (coaxial probe) และการเหนี่ยวนำผ่านช่องเปิด (aperture coupling) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การป้อนโดยใช้สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

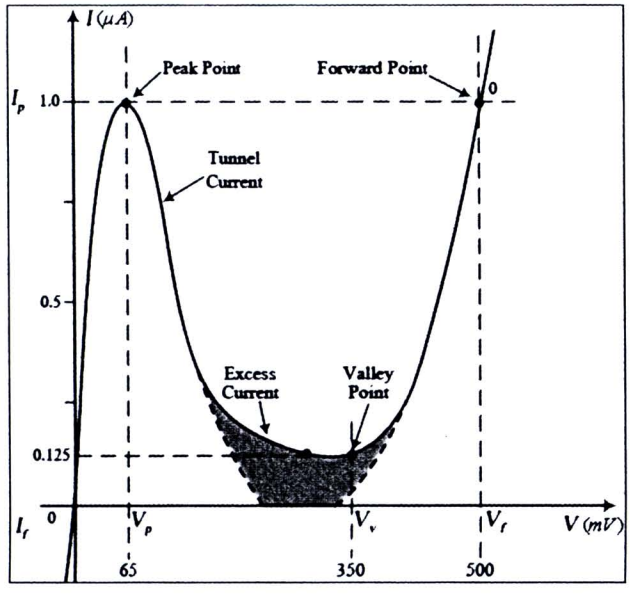
2.9 โครงสร้างและทฤษฎีของการกำเนิดพัลส์

เครื่องรับส่งสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และสายอากาศแบนด์กว้าง โดยส่วนนี้เป็นส่วนของการออกแบบพัฒนาวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งรูปแบบของสัญญาณพัลส์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้นั้นมีหลากหลายลักษณะ แต่สำหรับการวิจัยฉบับนี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะรูปแบบของพัลส์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สัญญาณพัลส์แบบเกาส์สัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ และสัญญาณแบบเกาส์เซียนดับเลตพัลส์ โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์นั้นต้องมีประสิทธิภาพและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับความต้องการและข้อกำหนดของ FCC เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ได้ นั่นคือเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์จะต้องมีช่วงกว้างพัลส์ที่แคบมาก และมีพลังงานเพียงพอต่อการใช้งานของระบบ โดยสัญญาณพัลส์ที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์นั้นต้องมีรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่ดี มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณและมีการแกว่งของสัญญาณพัลส์น้อยเมื่อเทียบกับสัญญาณพัลส์ที่ต้องการ โดยที่พลังงานและรูปร่างของพัลส์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เนื่องจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นต้องสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และถ้าสัญญาณพัลส์ที่มีช่วงกว้างพัลส์กว้างแล้วจะส่งผลให้สัญญาณพัลส์มีส่วนประกอบของความถี่ต่ำมากเมื่ออยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งสัญญาณที่มีความถี่ต่ำนี้สามารถทำให้สัญญาณพัลส์แพร่กระจายเข้าไปในตัวกลางที่มีการสูญเสียได้ลึกมากกว่าสัญญาณพัลส์ที่มีส่วนประกอบของความถี่สูง

วิธีกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อประยุกต์ใช้งานกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นมีหลากหลายรูปแบบ โดยคุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นได้แก่ กำลังสูงสุดของพัลส์ด้านออก ช่วงกว้างพัลส์และรูปร่างของพัลส์ โดยวงจรกำเนิดพัลส์นี้สามารถแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ การกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อประยุกต์ใช้ด้านกำลังสูง และการกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อประยุกต์ใช้ด้านกำลังต่ำ เนื่องจากการนำเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ไปใช้งานมีสองกรณีหลัก ๆ คือ ในกรณีของการใช้งานสำหรับการตรวจหาหรือการตรวจจับนั้นจะใช้พลังงานสูง และในกรณีของการใช้งานสำหรับการสื่อสารนั้นจะใช้พลังงานต่ำ โดยที่ช่วงกว้างพัลส์ที่นำมาพิจารณาสำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นสามารถแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงความกว้างพัลส์ในระดับนาโนวินาที และช่วงความกว้างพัลส์ในระดับพิโกวินาที โดยช่วงความกว้างของพัลส์ในระดับนาโนวินาทีนั้นจะสัมพันธ์กับความถี่ใช้งานที่มีแบนด์วิดท์ต่ำกว่า 1 GHz และช่วงความกว้างพัลส์ในระดับพิโกวินาทีนั้นจะสัมพันธ์กับความถี่ใช้งานที่มีแบนด์วิดท์สูงกว่า 1 GHz ส่วนสุดท้ายที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาสำหรับการสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์คือ รูปร่างของพัลส์ซึ่งพัลส์ที่นิยมใช้ในระบบการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ ได้แก่

รูปร่างพัลส์ที่เป็นฟังก์ชันแบบขั้นบันได (step function) รูปร่างพัลส์แบบเกาส์เซียน (Gaussian pulse) และรูปร่างพัลส์แบบโมโนไซเคิล (monocycle pulse)

ที่ผ่านมาการกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้น นิยมใช้อุปกรณ์สองชนิดคือ ทัลเนลไดโอดหรือไดโอดแบบอุโมงค์ (tunnel diode) และไดโอดฟื้นตัวแบบขั้น (step recovery diode : SRD) โดยทัลเนลไดโอดเป็นอุปกรณ์ในยุคแรก ๆ ที่ใช้ในเครื่องรับส่งหรือวงจรกำเนิดสัญญาณของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ ซึ่งการนำทัลเนลไดโอดมาประยุกต์ใช้งานประเภทฟาสต์สวิตช์ประสบความสำเร็จอย่างมาก เนื่องจากทัลเนลไดโอดต่างจากไดโอดธรรมดาตรงที่มีแรงดันและกระแสบางช่วงเป็นแบบต้านทานลบ และทัลเนลไดโอดสามารถทำให้เกิดกระแสได้โดยใช้แรงดันไบแอสเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งต้องมีวิธีการกระตุ้นแบบพิเศษเพื่อช่วยให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ p-n ได้ ไม่เช่นนั้นพลังงานเพียงเล็กน้อยนี้จะไม่เพียงพอที่ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ p-n ได้ และทันทีที่แรงดันศักย์มากกว่าจุดสูงสุดที่แสดงในรูปที่ 2.25 จะทำให้กระแสลดลงจนกระทั่งถึงจุดต่ำสุด เป็นสาเหตุให้เกิดการซ้อนเหลื่อมกันเล็กน้อยระหว่างแถบเวเลนซ์ (valence band) และแถบการนำ (conduction band) ซึ่งจะทำให้เกิดความต้านทานบริเวณลบขึ้นเนื่องจากการลดลงของกระแส และจากการเกิดความต้านทานบริเวณลบนี้ส่งผลให้ทัลเนลไดโอดอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร ทำให้มีการสวิตช์ในชั่วขณะหนึ่ง ซึ่งจะถูกกระตุ้นด้วยแรงดันเพียงเล็กน้อยทำให้เกิดพัลส์แบบสี่เหลี่ยมขึ้น จากนั้นทำพัลส์ที่ได้นี้ให้เป็นเกาส์เซียนพัลส์โดยการใช้สายท่อนสั้นลัดวงจร (short circuit stub) ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดต่อไป



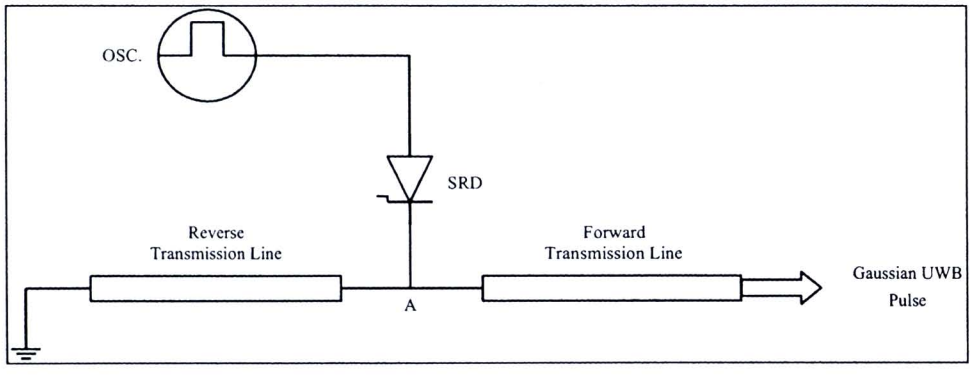
รูปที่ 2.25 กราฟคุณลักษณะของทัลเนลไดโอด

อย่างไรก็ตามก่อนหน้านี้ทัลเนลไดโอดดูเหมือนจะได้รับความสนใจมากกว่าทรานซิสเตอร์ เนื่องจากทัลเนลไดโอดมีคุณลักษณะเฉพาะของการสวิตชิ่ง และหลังจากปี 1960 แล้วไม่ค่อยมีผู้ให้ความสนใจในการผลิตทัลเนลไดโอดมากนัก โดยข้อเสียของทัลเนลไดโอด คือ มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ให้แรงดันด้านออกต่ำ และมีจุดเชื่อมต่อเพียงแค่สองจุด ซึ่งวิศวกรส่วนใหญ่ไม่มีประสบการณ์หรือความชำนาญในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ในลักษณะนี้ แต่จะให้ความสนใจกับหลอดสูญญากาศและทรานซิสเตอร์มากกว่าเนื่องจากมีจุดเชื่อมต่อสามจุด ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบวงจรขยายสัญญาณง่ายขึ้น จึงไม่มีใครสนใจที่จะนำทัลเนลไดโอดมาออกแบบวงจรอื่น ๆ และสุดท้ายจะเห็นเพียงแค่การนำทัลเนลไดโอดมาใช้งานเฉพาะการกำเนิดสัญญาณพัลส์เท่านั้น จึงทำให้ผู้ผลิตลดปริมาณการผลิตของทัลเนลไดโอดลง ส่งผลให้การหาซื้อทัลเนลไดโอดยากขึ้นในปัจจุบัน

หลังจากที่ทัลเนลไดโอดไม่ค่อยได้รับความสนใจมากนักจากผู้ใช้และเริ่มหาซื้อได้ยากตามท้องตลาด ได้มีอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากสำหรับใช้เป็นตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั่นก็คือ ทรานซิสเตอร์และไดโอดฟื้นตัวแบบขั้น หรือที่เรียกว่า SRD ไดโอด ซึ่งต่อจากนี้ขอใช้คำว่า SRD ไดโอด โดย SRD ไดโอด มีการเก็บประจุด้วยการควบคุมสวิตช์ที่รอยต่อแบบ p-i-n และมีคุณลักษณะของการสวิตช์ที่รวดเร็วกว่าการประจุด้วยรอยต่อแบบ p-n ซึ่งจะมีประจุปริมาณมากถูกสร้างขึ้นที่บริเวณรอยต่อนี้ เป็นผลทำให้พาหะส่วนน้อยแทรกเข้าไปในระหว่างที่ SRD ไดโอด มีสถานะถูกไบแอสตรง โดยอิมพีแดนซ์บริเวณรอยต่อขึ้นอยู่กับการเก็บประจุอย่างทันทีทันใดของไดโอด และสามารถทำให้เกิดพัลส์ได้ในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งถ้า SRD ไดโอด ได้รับการไบแอสตรงแล้วจะเกิดการไบแอสกลับอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ไดโอดมีอิมพีแดนซ์ลดต่ำลงจนกระทั่งประจุที่ถูกเก็บไว้บริเวณรอยต่อหมดสิ้นไป จากนั้นไดโอดจะกลับสู่สถานะที่มีอิมพีแดนซ์สูงทันที ซึ่งจำเป็นสำหรับการหยุดกระแสย้อนกลับของ SRD ไดโอด และการเปลี่ยนสถานะของอิมพีแดนซ์นี้ ก่อนที่กระแสภายในของ SRD ไดโอดหมดไปจะทำให้เกิดสัญญาณแรงดันสูงสุดขึ้น ซึ่งช่วงเวลาของการเปลี่ยนสถานะที่ปรากฏขึ้นนี้จะถูกเรียกว่า “snap time” โดยค่า snap time นี้จะใช้ระบุคุณลักษณะของ SRD ไดโอด โดยทั่วไปแล้วค่า snap time ในช่วง 30 ถึง 250 พิโกวินาที จะทำให้ SRD ไดโอด สามารถกำเนิดสัญญาณพัลส์ด้วยความกว้างของพัลส์ระดับพิโกวินาทีได้ และมีช่วงเวลาคงอยู่คลื่นพาห์ (carrier lifetime) ในช่วง 5 ถึง 15 นาโนวินาที ซึ่งทำให้เกิดความถี่การซ้ำของพัลส์สำหรับเครื่องรับส่งของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ถูกจำกัดอยู่ในช่วง 100 ถึง 200 เมกะพัลส์ต่อวินาที ซึ่งอาจจะเพียงพอหรือไม่เพียงพอสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงด้วยสัญญาณอิมพัลส์

เมื่อพิจารณาการเกิดพัลส์ด้วย SRD ไดโอด จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นพบว่าพัลส์ที่ได้จาก SRD ไดโอด นั้นมีรูปร่างลาดเอียงแทนที่จะเป็นพัลส์แบบเกาส์เซียนตามต้องการ แต่สามารถปรับปรุงพัลส์ที่ได้จาก SRD ไดโอด ให้มีรูปร่างของพัลส์เป็นพัลส์แบบเกาส์เซียนได้โดย

ประยุกต์ใช้ SRD ไดโอด ร่วมกับการส่งผ่านสายประวิง (transmission delay line) ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานของวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.26 โดยพัลส์ที่เกิดจาก SRD ไดโอด จะถูกแยกออก ณ จุด A จากนั้นพัลส์จะเดินทางผ่านสายส่งย้อนกลับ (reverse transmission line) และแพร่กระจายผ่านสายส่งไปหน้า (forward transmission line) ซึ่งพัลส์ที่มาจาก SRD ไดโอด เคลื่อนที่ไปยังสายส่งย้อนกลับสะท้อนจากสายท่อนสั้น (stub) และแปลงผันเป็นพัลส์ที่ถูกประวิงโดยมีสภาพขั้วตรงข้ามกันเนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบลบของวงจรลัด ส่วนที่สายส่งไปหน้าจะมีพัลส์สองพัลส์รวมกันทำให้เกิดพัลส์ที่มีสัณฐานแบบเกาส์เซียน และจากรูปที่ 2.26 เมื่อแทน SRD ไดโอด ด้วยทัลเนลไดโอดแล้วสามารถได้พัลส์ที่มีรูปร่างสัณฐานออกมาเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.26 โครงสร้างพื้นฐานการกำเนิดพัลส์ด้วย SRD ไดโอด (Alexandre, Yvan, Tan, Ewerton, and Glauco, 2006)

โดยความกว้างของพัลส์กำหนดด้วยความยาวของสายส่งลัดวงจร ซึ่งสามารถวิเคราะห์และคำนวณได้ดังสมการที่ (2.45)

$$\tau = \frac{2L_{tl}}{v_p} \tag{2.45}$$

สำนักงานพัฒนาการ... ห้องสมุดงานวิจัย

เมื่อ L_{tl} คือความยาวของสายส่งย้อนกลับ (มีหน่วยเป็นเมตร) และ v_p คือความเร็วเฟสระหว่างสายส่งย้อนกลับ (มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที) ซึ่งความเร็วเฟสระหว่างสายส่งไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.46)

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}} \tag{2.46}$$

โดยที่ c คือความเร็วแสง (มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที) และ ε_e คือค่าคงที่สภาพยอมประสิทธิผลของไมโครสตริป ซึ่งค่าคงที่สภาพยอมประสิทธิผลนี้เป็นค่าเอกพันธุ์สมมูลระหว่างอากาศและซับสเตรตของไมโครสตริป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.47)

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12d}{w}}}\right) \tag{2.47}$$

เมื่อ ε_r คือค่าคงที่สภาพะยอมสัมพัทธ์ซับสเตรตของไมโครสตริป d คือความหนาของซับสเตรต (มีหน่วยเป็นเมตร) และ w คือความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (มีหน่วยเป็นเมตร) โดยสามารถยกตัวอย่างการคำนวณความกว้างของพัลส์ จากสมการข้างต้นได้ และสมมุติว่าเลือกใช้แผ่น PCB แบบ FR-4 มีค่าคงที่สภาพยอมสัมพัทธ์ซับสเตรตของไมโครสตริปเท่ากับ 4.6 ซับสเตรตของไมโครสตริปมีความหนา 7.2 มิลลิเมตร และสายส่งสัญญาณกว้าง 12 มิลลิเมตร ซึ่งความเร็วเฟสระหว่างสายส่งย้อนกลับ และค่าคงที่สภาพยอมประสิทธิผลของไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.46) และสมการที่ (2.47) ตามลำดับ โดยกำหนดให้สายส่งมีความยาว 1 นิ้ว เมื่อใช้การคำนวณจากสมการที่ (2.45) ถึง (2.47) จะได้พัลส์ที่มีความกว้างเท่ากับ 315 พิโกวินาที

สำหรับการออกแบบระบบส่วนมากจะมีการกำหนดความกว้างของพัลส์ไว้ก่อนแล้ว แต่จะมีการคำนวณหาความยาวของสายส่ง และนำไปสู่การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ได้ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.26 โดยหลังจากการออกแบบเสร็จเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงแล้วส่วนมากจะมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีการแกว่งของสัญญาณพัลส์มากเกินไป เนื่องจากพัลส์มีช่วงเวลาขึ้นลงเร็วมากและเกิดจากผลกระทบของอุปกรณ์ข้างเคียงด้วย ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ในบทต่อไป

2.10 สรุป

สำหรับการออกแบบระบบการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์นั้นสิ่งสำคัญของเทคโนโลยีนี้คือสายอากาศแบนด์กว้างและวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ เนื่องจากสิ่งที่ถือว่าท้าทายมากที่สุดของการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ คือการออกแบบสายอากาศแบนด์กว้าง

และเทคนิควิธีการกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเรียนรู้และทำความเข้าใจเกี่ยวกับประวัติความเป็นมาของการนำเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์มาใช้งาน โครงสร้างของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ ตลอดจนกระบวนการในการวิเคราะห์สัญญาณ รูปแบบของสัญญาณที่สามารถนำมาใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ และหลักการทฤษฎีของการกำเนิดสัญญาณที่ต้องการนำมาใช้ นอกจากนี้แล้วยังมีส่วนของสายอากาศอีกส่วนหนึ่งที่จำเป็นสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ เนื่องจากสายอากาศที่นำมาใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ได้นั้นจะต้องเป็นสายอากาศแบนด์กว้าง ซึ่งการได้มาของสายอากาศแบบแบนด์กว้างนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาหลักการและเทคนิควิธีต่าง ๆ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะตามข้อกำหนดของ FCC โดยใช้หลักการพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศคือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ความกว้างแถบ อัตราการขยาย และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน ซึ่งหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทนี้จะได้ใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศและวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ต่อไป