

เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูล และให้กำลังไร้สาย

WIRELESS POWERED COMMUNICATION TECHNOLOGY

ภูเบศ แสงมะหะหมัด^{1*}

กำพล วรดิษฐ์²

Pubet Sangmahamad^{1*}, Kampol Woradit²

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี¹

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ²

Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand, Phra Nakhon Si Ayutthaya
Province 13170 Thailand¹

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Srinakharinwirot University,
Pathum Thani Province 12120 Thailand²

Corresponding author E-mail: pubet_s@rmutt.ac.th^{1*}

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับโครงข่ายการสื่อสารไร้สายนั้น เป็นเทคโนโลยีที่กำลังกำเนิดขึ้นเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการใช้งานระบบสื่อสารไร้สาย อีกทั้งยังเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการใช้แบตเตอรี่อีกด้วย นอกจากนี้ยังเป็นตัวช่วยลดปัญหาความไม่คล่องตัวของระบบสื่อสารไร้สาย อันเนื่องมาจากการใช้สายเคเบิลสำหรับการจ่ายพลังงาน โดยเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สาย นอกจากจะเป็นเทคโนโลยีที่สามารถรับพลังงานจากแหล่งพลังงานแบบไร้สายแล้ว ยังเป็นเทคโนโลยีที่มีการสื่อสารข้อมูลไร้สายได้อีกด้วย ในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สาย โดยรวบรวมและนำเสนอข้อมูลจากงานวิจัยที่พบ พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการและเกณฑ์วิธีของระบบที่แตกต่างกัน โดยหลักๆ ได้แก่ การสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน และการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน โดยแต่ละวิธีการและแต่ละเกณฑ์วิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลที่รวบรวมและนำเสนอแล้วแต่เป็นข้อมูลที่จะช่วยปูทางไปสู่การใช้งานโครงข่ายสื่อสารข้อมูลไร้สายในอนาคต เช่น เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่ต้องการส่งข้อมูลแบบไร้สายโดยใช้พลังงานต่ำ ซึ่งมีความจำกััดในเรื่องของการเปลี่ยนหรือประจุแบตเตอรี่ใหม่ ฯลฯ

คำสำคัญ : ถ่ายโอนพลังงานไร้สาย การเก็บเกี่ยวพลังงาน การสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สาย การสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน

Abstract

Energy harvesting technologies for wireless communication network is a new technology. It is not only a potential approach to extend the lifetime of wireless communication network but also a technology that reduces environmental pollution due to the batteries. In addition, it also to reduce inflexible problem due to power cables. Wireless powered communication technologies, which are able to perform not only wireless energy harvesting but also wireless data communication. This article analyzes and synthesizes wireless powered communication technologies, we also introduce the literature review of wireless powered communication technology, which is different methods and protocols of the system. The two main of proposed are Wireless Powered Communication (WPC), that is transmission of energy and the information separately and Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT), which transmission of energy and information simultaneously. Each method and each protocol has its advantages and the disadvantages of each. These are all the way for the future of wireless data communication networks such as the Internet of Thing (IoT) technology, that need to send data wirelessly with low power consumption and there are limits on how to change or charge the battery.

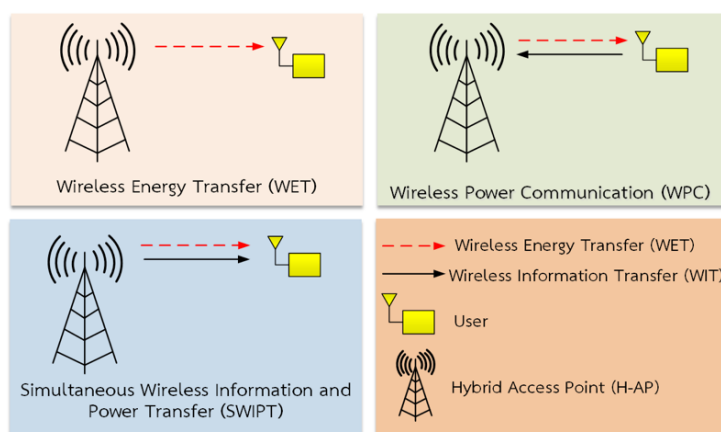
Keywords : Wireless Energy Transfer, Energy Harvesting, Wireless Powered Communication, Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

1. บทนำ

คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ถูกใช้ในระบบการสื่อสารสำหรับการทำหน้าที่เป็นคลื่นพาห์ (Carrier) ในการส่งข้อมูลข่าวสารจากแหล่งกำเนิดข้อมูล (สถานีส่ง) ไปยังแหล่งรับข้อมูล (สถานีรับ) เพื่อให้ได้ระยะทางในการสื่อสารที่ไกลและประหยัดต้นทุนการวางสาย นอกจากนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังถูกนำมาใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายอีกด้วย เนื่องจากปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยส่วนใหญ่ในระบบการสื่อสารไร้สาย เช่น อุปกรณ์ตรวจรู้ในโครงข่ายตรวจรู้แบบไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) หรืออุปกรณ์ตรวจรู้ในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้รับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายกำลังงานแบบใช้สายเคเบิล หรือได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ ซึ่งส่งให้เกิดความไม่คล่องตัวในการใช้งาน รวมถึงเป็นตัวจำกัดระยะเวลาการใช้งานของระบบสื่อสารไร้สาย เนื่องจากขนาดความจุของแบตเตอรี่ที่จำกัดและความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ นอกจากนี้แบตเตอรี่ซึ่งมีองค์ประกอบจากสารเคมียังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting: EH) จากแหล่งกำเนิดพลังงานต่างๆ จากธรรมชาติ มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในระบบการสื่อสาร เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ (Belhadj-Yahya, 2010; Mangu & Fernandes, 2012; Mitcheson, 2015) จากลม (Mangu & Fernandes, 2012) จากแรงสั่นสะเทือน

(Mitcheson, 2015) หรือจากคลื่นความถี่วิทยุ (Mitcheson, 2015; Shinohara, 2011) ฯลฯ ซึ่งแหล่งพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุนั้นเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่มนุษย์สามารถควบคุมได้ และมีความสะดวกต่อการนำมาใช้ในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับอุปกรณ์ในระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้กำลังงานไฟฟ้าต่ำ (Low Power Consumption Device) ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากคลื่นความถี่วิทยุเพื่อนำมาใช้ในการส่งกำลังงานแบบไร้สายขึ้น ซึ่งระบบนี้เรียกว่า การถ่ายโอนกำลังงานไร้สาย (Wireless Power Transfer: WPT) (Shinohara, 2011) หรือสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่าการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สาย (Wireless Energy Transfer: WET) โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไร้สายถูกนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในชีวิตประจำวันของเรามากขึ้น เช่น การชาร์จแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ แบตเตอรี่แปรงสีฟันไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ตลอดจนนำมาใช้งานทางด้านการแพทย์ เช่น หัวใจเทียม รวมถึงเซนเซอร์ต่างๆ และมีแนวโน้มจะถูกนำไปใช้ร่วมกับเทคโนโลยีอื่นๆ อีกมากมาย

นอกจากเทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นำความถี่วิทยุมาใช้ในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวโดยไม่ได้คำนึงถึงข้อมูลที่ต้องการสื่อสารแล้วนั้น ยังได้มีงานวิจัยที่นำเสนอการพัฒนาระบบที่สามารถส่งได้ทั้งกำลังงานและข้อมูล โดยเทคโนโลยีนี้เรียกว่า เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สาย (Wireless Powered Communication: WPC) รวมถึงระบบที่สามารถรับส่งทั้งข้อมูลและให้กำลังไร้สายพร้อมกันโดยใช้คลื่นความถี่เดียวกัน ซึ่งจะเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer: SWIPT) กล่าวคือ เป็นเทคโนโลยีที่สถานีฐาน (Base Station: BS) ในระบบสื่อสารไร้สาย สามารถส่งทั้งข้อมูลและพลังงานไร้สายไปในความถี่เดียวกันในเวลาเดียวกันได้ ในขณะที่ผู้รับทำหน้าที่เก็บเกี่ยวพลังงานและใช้พลังงานนั้นในการถอดรหัสข้อมูล (Information Decoder: ID) จากความถี่วิทยุเดียวกันได้ (Krikidis et al., 2014; Liu, Zhang, & Chua, 2013; Shi, Liu, Xu, & Zhang, 2014; R. Zhang & Ho, 2011; Zhou, Zhang, & Ho, 2013)



ภาพที่ 1 รูปแบบการทำงานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

ที่มา : Ju & Zhang, (2014), Bi, S., Ho, C. K., & Zhang, R. (2015)

เทคโนโลยีในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุนั้นสามารถแบ่งตามรูปแบบของการทำงานออกเป็น 3 รูปแบบ (Bi, Ho, & Zhang, 2014, 2015) โดยมีโครงสร้างแต่ละรูปแบบดังภาพที่ 1 ดังนี้

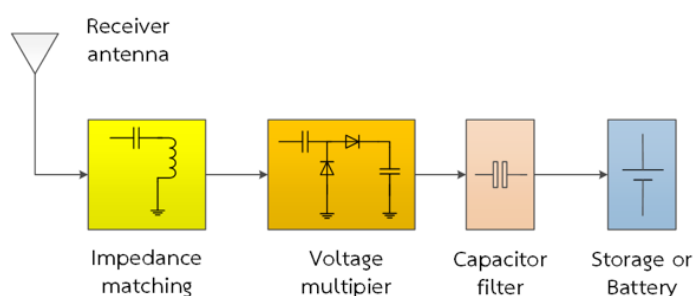
1. เทคโนโลยีถ่ายโอนพลังงานไร้สาย (Wireless Energy Transfer: WET) เป็นรูปแบบการส่งพลังงานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยส่งจากสถานีฐานไปยังอุปกรณ์รับ (Downlink: DL)
2. เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน (Wireless Powered Communication: WPC) เป็นรูปแบบการส่งพลังงานจากสถานีฐานไปยังอุปกรณ์รับ (DL) และส่งข้อมูลจากอุปกรณ์รับกลับไปยังสถานีฐาน (Uplink: UL)
3. เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer: SWIPT) เป็นรูปแบบการส่งพลังงานและข้อมูลพร้อมกันในเวลาเดียวกัน จากสถานีฐานไปยังอุปกรณ์รับ (DL)

ในบทความนี้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมพร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สาย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลของเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายที่สำคัญ เพื่อให้ผู้อ่านได้เห็นภาพโดยรวมของเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สาย นอกจากนี้ ยังเป็นข้อมูลที่จะช่วยส่งเสริมและปูทางไปสู่การใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในอนาคต เช่น เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ฯลฯ โดยในบทความนี้ได้แบ่งการอธิบายรูปแบบของเทคโนโลยีออกเป็น 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ เทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน และเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน ตามลำดับ

2. เทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย

เทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไร้สายเป็นเทคโนโลยีที่สามารถส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Electrical source) ไปยังภาระทางไฟฟ้า (Electrical load) แบบไร้สายได้ โดยเทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานไร้สาย สามารถแบ่งตามลักษณะการส่งพลังงานได้เป็น 2 รูปแบบคือ รูปแบบสนามระยะใกล้ (Near-Field: NF) และรูปแบบสนามระยะไกล (Far-Field: FF) โดยรูปแบบการส่งพลังงานสนามระยะใกล้ นั้นสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 2 แบบ คือการคับปลิงแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) และแบบเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (Magnetic resonator) ส่วนรูปแบบการส่งพลังงานสนามระยะไกลนั้นเป็นการรับพลังงานจากการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic: EM) หรือคลื่นความถี่วิทยุ นั้นเอง (Bi et al., 2015; Shinohara, 2011) โดยที่รูปแบบการส่งพลังงานระยะใกล้ นั้นใช้หลักการการคับปลิง สัญญาณสนามแม่เหล็กระหว่างอุปกรณ์ส่งและอุปกรณ์รับ ในขณะที่รูปแบบการส่งพลังงานระยะไกลนั้นใช้หลักการการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นความถี่วิทยุในการส่งพลังงานจากอุปกรณ์

ส่งไปยังอุปกรณ์รับ โดยภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างภาครับพลังงานของระบบถ่ายโอนพลังงานไร้สาย หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า โครงสร้างการแปลงพลังงานจากคลื่นวิทยุเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (RF-to-DC converter) ของรูปแบบสนามระยะไกล โดยรับพลังงานจากการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สายอากาศรับ จากนั้นป้อนเข้าสู่ส่วนที่ทำหน้าที่ปรับอิมพีแดนซ์ (Impedance matching) ระหว่างสายอากาศและวงจรคูณแรงดัน (Voltage multiplier) ให้เหมาะสม จากนั้นเข้าสู่กระบวนการเพิ่มระดับแรงดันและกระบวนการกรอง (Capacitor filter) ก่อนส่งเข้าสู่ส่วนเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่



ภาพที่ 2 โครงสร้างภาครับพลังงานในระบบถ่ายโอนพลังงานไร้สาย

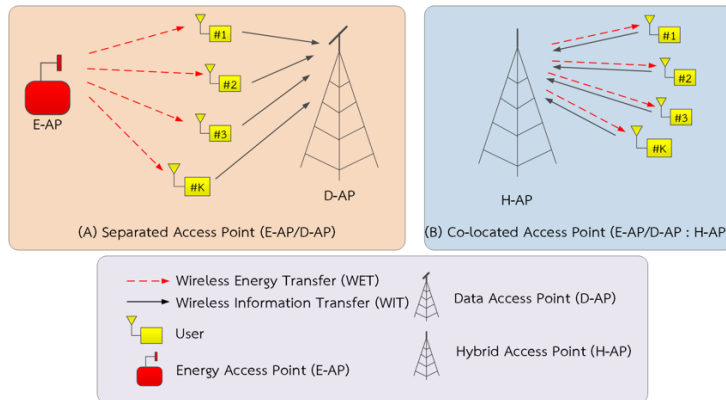
ที่มา : Bi, Ho, & Zhang. (2014)

เทคโนโลยีถ่ายโอนพลังงานไร้สายนั้น เป็นเทคโนโลยีที่นำความถี่วิทยุเพื่อใช้ในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวโดยไม่ได้นำข้อมูลที่ต้องการส่ง (Shinohara, 2011) ซึ่งเทคโนโลยีถ่ายโอนพลังงานไร้สายดังกล่าวจะทำงานร่วมกับเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ (Energy Harvesting: EH) โดยเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุนี้ถูกพัฒนาเพื่อใช้กับระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำ เช่น ระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) (Belhadj-Yahya, 2010) หรือแม้แต่อุปกรณ์ตรวจจบบางอย่างในร่างกาย (Wireless Body Area Networks: WBAN) (Huang et al., 2010; Young, 2010) โดยเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ จะทำการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่ต่างๆ ที่ทำการออกแบบ เช่น ย่านความถี่ 2.4GHz ของโครงข่าย WiFi เพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับระบบโครงข่ายไร้สายพลังงานต่ำ โดยทำงานร่วมกับเทคโนโลยีของสายอากาศและวงจรเรียงกระแส (Rectifier) ซึ่งเรียกระบบสายอากาศแบบนี้ว่า Rectenna ซึ่งมาจากการผสมคำระหว่าง Rectifier และ Antenna ใช้ในการแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากคลื่นวิทยุเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) (Mahfoudi, Tellache, & Takhedmit, 2016; Theeuwes, Visser, Beurden, & Doodeman, 2007; Young-Ho & Kai, 2002)

3. เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน

เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สาย (Wireless Powered Communication: WPC) เป็นเทคโนโลยีที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ส่งพลังงาน (Energy Access Point: E-AP) ที่ทำหน้าที่ในการส่งพลังงานไร้สาย (Downlink WET: DL-WET) ให้กับอุปกรณ์รับ (Receiver) หรือผู้ใช้งาน (User) จากนั้นผู้ใช้งาน จะทำการเก็บเกี่ยวและสะสมพลังงานดังกล่าวไว้ในหน่วยเก็บพลังงาน ในที่นี้อาจเป็นแบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวด (Super capacitor) หลังจากนั้นผู้ใช้งานจะใช้พลังงานที่สะสมไว้สำหรับการส่งข้อมูลแบบไร้สายไปยังอุปกรณ์รับข้อมูล (Data Access Point: D-AP) (Uplink WIT: UL-WIT) ซึ่ง E-AP และ D-AP นั้นได้รับพลังงานจากแหล่งพลังงานคงที่ ในขณะที่ผู้ใช้งานนั้นได้รับพลังงานแบบไร้สายเท่านั้น ซึ่งผู้ใช้งานในนี้หมายถึงอุปกรณ์สื่อสารไร้สายขนาดเล็ก เช่น อุปกรณ์ตรวจจับแบบฝังในร่างกาย (Huang et al., 2010; Young, 2010) อุปกรณ์ตรวจจับการสั่นไหวของอาคารแบบไร้สาย (Wireless powered sensor) รวมถึงอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

จากภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน โดยสามารถแบ่งตามโครงสร้างของอุปกรณ์ส่งพลังงาน (E-AP) และอุปกรณ์รับข้อมูล (D-AP) ได้เป็น 2 รูปแบบ คือแบบติดตั้งแยก (Separated Access Point: Sep-AP) และแบบติดตั้งร่วม (Co-located Access Point: Co-AP) โดยรูปแบบติดตั้งแยก เป็นรูปแบบที่ E-AP และ D-AP นั้นติดตั้งแยกกันอยู่คนละตำแหน่ง ในขณะที่รูปแบบติดตั้งร่วมนั้น เป็นรูปแบบที่จัดวางให้ E-AP และ D-AP อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน หรือภายในตัวเดียวกัน ซึ่งจะเรียกอุปกรณ์แบบนี้ว่า Hybrid Access Point (H-AP) ในระบบการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกันนั้น จะเห็นว่าผู้ใช้งานแต่ละรายนั้นอยู่ ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างผู้ใช้งานถึง H-AP ที่ไม่เท่ากัน เป็นผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณในอากาศที่ไม่เท่ากัน โดยขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่าง H-AP ถึงผู้ใช้งานแต่ละรายที่ไม่เท่ากัน ทำให้ผู้ใช้งานที่มีระยะทางไกลได้รับพลังงานมากกว่าผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้ (Downlink Wireless Energy Transfer: DL-WET) และผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้ ยังใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่น้อยกว่าผู้ใช้งานที่อยู่ไกล (Uplink Wireless Information Transfer: UL-WIT) ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Doubly Near-far problem เป็นผลให้เกิดความไม่เท่าเทียมกันระหว่างผู้ใช้งาน (unfairness) (Ju & Zhang, 2014a) จึงได้มีการพัฒนารูปแบบเกณฑ์วิธี (Protocols) ที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ใช้งาน (Users cooperation) โดยแบ่งรูปแบบการทำงานร่วมกันออกเป็น 2 รูปแบบคือ ความร่วมมือด้านพลังงาน (Energy cooperation) (Dai, Li, & Renfors, 2015) และความร่วมมือด้านข้อมูล (Information cooperation) (Chen et al., 2015; Ju & Zhang, 2014b)

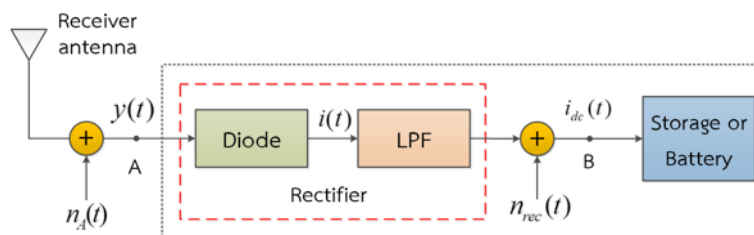


ภาพที่ 3 โครงสร้างพื้นฐานของระบบการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน

ที่มา : Ju & Zhang, (2014), Bi, S., Ho, C. K., & Zhang, R. (2015)

3.1 ภาครับพลังงานของการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน

เนื่องจากอุปกรณ์ส่งพลังงานหรือ E-AP นั้น ทำหน้าที่ในการกระจายคลื่นความถี่วิทยุไปยังอุปกรณ์รับ โดยอุปกรณ์รับนั้นจะทำการรับคลื่นความถี่วิทยุดังกล่าว หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) โดยโครงสร้างและองค์ประกอบของภาครับพลังงาน พื้นฐานหรือการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่ 4 (Zhou et al., 2013) การทำงานเริ่มจากสายอากาศทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศในย่านความถี่ ที่ออกแบบ จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกเรียงกระแสจากความถี่วิทยุให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวงจร เรียงกระแส (Rectifier) ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรไดโอดและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter: LPF) ที่เหมาะสม เพื่อทำการเก็บพลังงานในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ส่วนเก็บพลังงานไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดสัญญาณรบกวน (Noise) n_A และ n_{rec} ซึ่งเป็นผลมาจากสายอากาศและ วงจรเรียงกระแสตามลำดับ

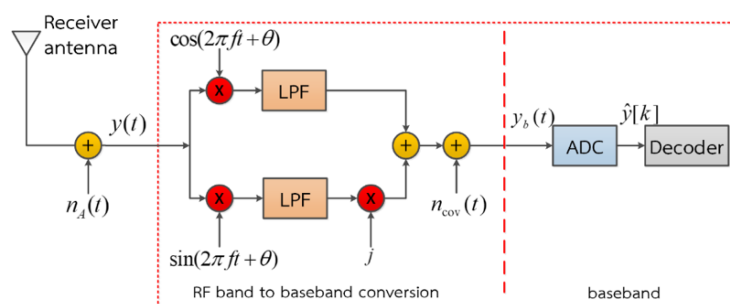


ภาพที่ 4 ภาครับพลังงาน (Energy Receiver: ER)

ที่มา : Zhou et al. (2013)

3.2 การรับข้อมูลของการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน

พื้นฐานในการรับข้อมูลจากคลื่นความถี่วิทยุนั้นมีโครงสร้างและองค์ประกอบ ดังภาพที่ 5 (Zhou et al., 2013) โดยมีการทำงานเบื้องต้น เริ่มจากรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือความถี่วิทยุที่สายอากาศรับ เกิดสัญญาณรบกวนเนื่องจากสายอากาศ n_A จากนั้นสัญญาณความถี่วิทยุที่รับได้ดังกล่าว $y(t)$ จะถูกแปลงให้เป็นความถี่ย่านเบสแบนด์ (Baseband) ด้วยวงจร RF band to baseband conversion ซึ่งสัญญาณเบสแบนด์ดังกล่าวนี้ เป็นสัญญาณไฟฟ้าเชิงแอนะล็อก (Analog) จากนั้นถูกส่งไปยังกระบวนการแปลงเป็นสัญญาณเชิงดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter: ADC) เพื่อทำการถอดสัญญาณข้อมูล (Decoder) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากต้นทาง



ภาพที่ 5 การรับข้อมูล (Information Receiver: IR)

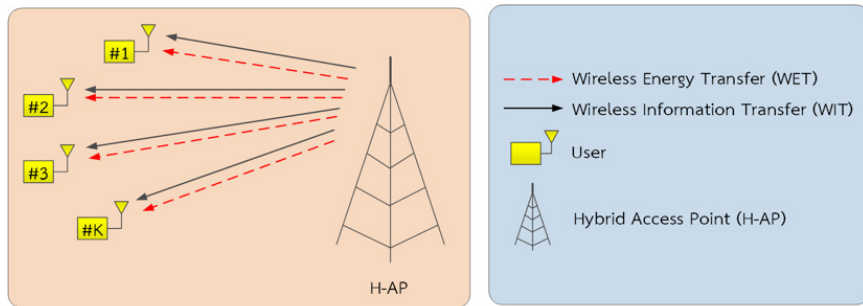
ที่มา : Zhou et al. (2013)

4. เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน

เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน หรือเทคโนโลยีถ่ายโอนสารสนเทศและให้กำลังไร้สายเวลาเดียวกัน (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer: SWIPT) คือระบบที่ประกอบด้วย อุปกรณ์ส่งคลื่นความถี่วิทยุที่สามารถส่งทั้งข้อมูลและพลังงานในเวลาเดียวกันและใช้คลื่นความถี่เดียวกันได้ โดยที่อุปกรณ์รับไม่มีพลังงานจากแหล่งพลังงานคงที่ และมีความสามารถในการรับทั้งข้อมูลและเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นวิทยุดังกล่าวได้ (Krikidis et al., 2014; Liu et al., 2013; Shi et al., 2014; R. Zhang & Ho, 2011; Zhou et al., 2013)

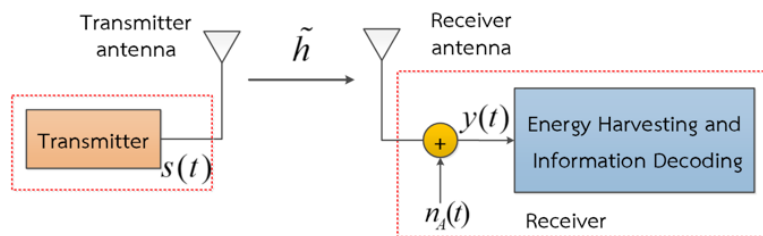
โครงสร้างพื้นฐานของระบบ SWIPT แสดงดังภาพที่ 6 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ส่งแบบ H-AP ทำหน้าที่ในการกระจายคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งเป็นการส่งทั้งพลังงาน (WET) และข้อมูล (WIT) พร้อมกันบนคลื่นความถี่เดียวกัน ไปยังอุปกรณ์รับหรือผู้ใช้งาน (Downlink WET and WIT: DL-WET&WIT) จากนั้นผู้ใช้งานจะทำการรับสัญญาณดังกล่าวเพื่อเก็บสะสมพลังงานและรับข้อมูลไปพร้อมกันด้วย จากงานวิจัยโดยทั่วไปการออกแบบระบบ SWIPT มีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป เช่น ออกแบบระบบเพื่อให้ได้ค่าพลังงานที่ผู้ใช้งานเก็บเกี่ยว

ได้สูงสุด (Maximum harvest energy) หรือออกแบบระบบเพื่ออัตราข้อมูลสูงสุดของผู้ใช้งาน (Maximum information rate) ฯลฯ



ภาพที่ 6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน

ที่มา : Bi, S., Ho, C. K., & Zhang, R. (2015)



ภาพที่ 7 ระบบสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน แบบจุดต่อจุด

ที่มา : Zhou et al. (2013)

ภาพที่ 7 แสดงระบบสื่อสารแบบจุดต่อจุดที่ภาครับสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าพร้อมทั้งรับข้อมูลจากคลื่นความถี่วิทยุของภาคส่งได้ โดยที่ภาคส่งและภาครับแต่ละตัว ประกอบไปด้วยสายอากาศหนึ่งต้น และกำหนดให้ภาคส่งกำเนิดสัญญาณความถี่เบสแบนด์เชิงซ้อน (Complex baseband signal) เป็น $x(t) = A(t)e^{j\phi(t)}$ โดย A คือขนาด และ $\phi(t)$ คือเฟสของสัญญาณเบสแบนด์เชิงซ้อน $x(t)$ ซึ่งมีแบนด์วิธเท่ากับ B Hz และกำหนดให้ $E[|x(t)|^2] = 1$ โดย $E[\cdot]$ และ $|\cdot|$ คือค่าคาดหวังทางสถิติ (Statistical expectation) และค่าสัมบูรณ์ (Absolute value) ตามลำดับ จากนั้นภาคส่งทำการมอดูเลตสัญญาณ จากนั้นทำการส่งสัญญาณความถี่วิทยุ ดังสมการที่ (1)

$$s(t) = \sqrt{2PA(t)}\cos(2\pi ft + \phi(t)) = \sqrt{2P}\Re\{x(t)e^{j2\pi ft}\} \quad (1)$$

โดยที่ P และ f คือกำลังงานเฉลี่ยและความถี่คลื่นพาห์ของภาคส่งตามลำดับ โดย $E[s^2(t)] = P$ และกำหนดให้ $B \ll f$ โดย $\Re\{\cdot\}$ แทนส่วนจริงของเลขเชิงซ้อน จากนั้นส่งผ่านสัญญาณไร้สายผ่านช่องสัญญาณซึ่งมีอัตราขยายช่องสัญญาณเป็น h โดยที่ $h > 0$ และมีการเบี่ยงเบนทางเฟส $\theta \in [0, 2\pi)$ ซึ่งมีสมการสมมูลเชิงซ้อนของช่องสัญญาณเป็น $h = \sqrt{h}e^{j\theta}$

จากนั้นสัญญาณจากภาคส่งจะเข้าสู่สายอากาศของภาครับโดยมีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ (Gaussian noise) $n_A(t)$ ที่เกิดจากสายอากาศ และมีการเป็น $n_A(t) = \sqrt{2}\Re\{n_A(t)e^{j2\pi ft}\}$ โดยที่ $n_A(t) = n_I(t) + jn_Q(t)$ ขณะที่ $n_I(t)$ และ $n_Q(t)$ แทนองค์ประกอบของสัญญาณรบกวนแบบองค์ประกอบร่วมเฟส (In-phase) และองค์ประกอบตั้งฉาก (Quadrature) ตามลำดับ โดยสมมติให้ $n_I(t)$ และ $n_Q(t)$ เป็นตัวแปรสุ่มอิสระแบบเกาส์ (Independent gaussian random variable) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนเป็น $\sigma_A^2/2$ แทนด้วย $N(0, \sigma_A^2/2)$ โดยที่ $\sigma_A^2 = N_0B$ และ N_0 คือความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนข้างเดียว ซึ่งจะได้ว่า $\tilde{n}_A(t) \sim \text{CN}(0, \sigma_A^2)$ โดยที่ $n_A(t)$ เป็นตัวแปรสุ่มแบบ Circularly Symmetric Complex Gaussian (CSCG) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ_A^2 ดังนั้นสัญญาณที่รับได้คือ

$$y(t) = \sqrt{2}\Re\{y(t)\} \quad (2)$$

$$y(t) = \sqrt{hPx(t)}e^{j(2\pi ft + \theta)} + n_A(t)e^{j2\pi ft} \quad (3)$$

4.1 ภาครับพลังงานของการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน

จากภาครับพลังงาน แสดงโครงสร้างในภาพที่ 4 ซึ่งมีองค์ประกอบเสมือน Rectenna (Akkermans, Beurden, Doodeman, & Visser, 2005) ทำหน้าที่ในการแปลงคลื่นความถี่วิทยุ $y(t)$ ที่รับเข้ามา แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง $i_{dc}(t)$ ด้วยวงจรเรียงกระแส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะประกอบไปด้วยไดโอดแบบ Schottky และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter: LPF) หลังจากนั้น ไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวจะถูกนำไปประจุให้กับแบตเตอรี่ ซึ่งไฟฟ้ากระแสตรงขาออกของไดโอดแบบ Schottky เป็นไปตามสมการที่ (4) (Akkermans et al., 2005)

$$i(t) = I_s \left(e^{\gamma y(t)} - 1 \right) = a_1 y(t) + a_2 y^2(t) + a_3 y^3(t) + \quad (4)$$

โดย I_s และ γ แทนกระแสอิ่มตัวและแรงดันเนื่องจากความร้อนของไดโอดแบบ Schottky ตามลำดับ ในขณะที่สัมประสิทธิ์ $a_n = I_s \gamma^n / n!$ โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots$, เป็นผลจากอนุกรมเทย์เลอร์ของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้น สมการที่ (2) และ (3) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$y(t) = \sqrt{2} \Re \left\{ \sqrt{hP} x(t) e^{j(2\pi ft + \theta)} + n_A(t) e^{j2\pi ft} \right\} \quad (5)$$

$$y(t) = \sqrt{2} \mu_Y(t) \cos(2\pi ft + \phi_Y(t)) \quad (6)$$

$$\text{เมื่อ } \phi_Y(t) = \arctan \frac{\mu_Q(t)}{\mu_I(t)} \text{ โดย}$$

$$\mu_Y(t) = \sqrt{\mu_I^2(t) + \mu_Q^2(t)} \quad (7)$$

$$\mu_I(t) = \sqrt{hPA}(t) \cos(\phi(t) + \theta) + n_I(t) \quad (8)$$

$$\mu_Q(t) = \sqrt{hPA}(t) \sin(\phi(t) + \theta) + n_Q(t) \quad (9)$$

แทนค่าสมการที่ (6) ลงในสมการที่ (4) ในรูปของ $y(t)$ และทำการตัดสมการในส่วนความถี่สูงออก (สูงกว่าลำดับที่ 2) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$i(t) \approx \sqrt{2} a_1 \mu_Y(t) \cos(2\pi ft + \phi_Y(t)) + 2a_2 \mu_Y^2(t) \cos^2(2\pi ft + \phi_Y(t)) \quad (10)$$

$$i(t) = a_2 \mu_Y^2(t) + \sqrt{2} a_1 \mu_Y(t) \cos(2\pi ft + \phi_Y(t)) + a_2 \mu_Y^2(t) \cos(4\pi ft + 2\phi_Y(t)) \quad (11)$$

เมื่อ $i(t)$ คือกระแสไฟฟ้าขาออกของไดโอด จากนั้นกระแสไฟฟ้างดกล่าวจะถูกส่งผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งวงจรกรองนี้ จะเป็นตัวกำจัดองค์ประกอบความถี่สูง เพื่อทำการเรียงกระแสให้เหลือเฉพาะไฟฟ้ากระแสตรง $i_{dc}(t)$ ซึ่งจากวงจรเรียงกระแสดังกล่าว ทำให้เกิดส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวน $n_{rec}(t)$ ดังสมการที่ (12)

$$i_{dc}(i) = a_2 \mu_Y^2(t) + n_{rec}(t) \quad (12)$$

เมื่อ a_2 เป็นค่าคงที่ ที่ขึ้นอยู่กับไดโอด ดังนั้น เพื่อความสะดวก จึงสมมติให้ $a_2 = 1$ จากนั้นแทนค่าสมการที่ (7), (8) และ (9) ลงในสมการที่ (12) จะได้ว่า

$$i_{dc}(i) = (\sqrt{hPA}(t) \cos(\phi(t) + \theta) + n_I(t))^2 + (\sqrt{hPA}(t) \sin(\phi(t) + \theta) + n_Q(t))^2 + n_{rec}(t) \quad (13)$$

สมมติให้พลังงานไฟฟ้าที่ผ่านการแปลง มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Conversion efficiency) เท่ากับ $0 < \zeta \leq 1$ ก่อนถูกนำไปประจุแบตเตอรี่ และกำหนดให้สัญญาณรบกวนที่เกิดจากสายอากาศและจากวงจรเรียงกระแสมีค่าน้อยมาก จึงสามารถละ $n_{rec}(t)$ ทิ้งได้ ดังนั้นพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้และประจุไปยังแบตเตอรี่แทนด้วย Q ซึ่งมีหน่วยเป็นจูล (Joule) ดังสมการที่ (14)

$$Q = \zeta E[i_{dc}(t)] = \zeta hP \quad (14)$$

4.2 การรับข้อมูลของการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน

จากโครงสร้างในภาพที่ 5 สมมติให้ภาครับข้อมูลนั้นมีความสามารถในการรับรู้เฟสของสัญญาณที่ได้รับได้ (Coherent demodulation) โดยเริ่มจากสัญญาณ $y(t)$ ที่รับได้นั้นจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณเชิงซ้อนย่านเบสแบนด์ $y_b(t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณแบบแอนะล็อก ซึ่งกระบวนการแปลงนี้ จะเกิดสัญญาณรบกวน $n_{cov}(t) \sim \text{CN}(0, \sigma_{cov}^2)$ หลังจากนั้น สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลได้สมการในรูปแบบ Discrete-time ADC ดังนี้

$$\hat{y}[k] = \sqrt{hP}x[k] + n_A[k] + n_{cov}[k] \quad (15)$$

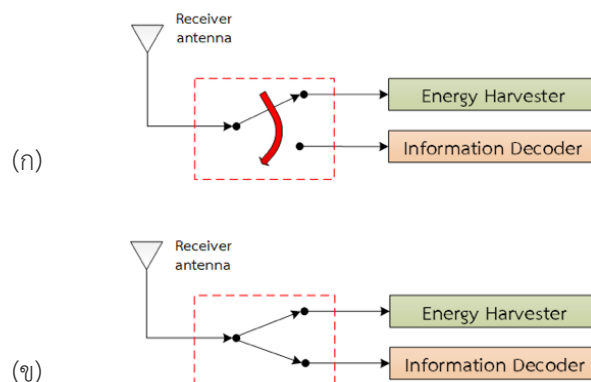
โดยที่ $k = 1, 2, \dots$, ดังนั้นสมการที่ (15) สามารถเขียนในรูปสมการสมมูลของช่องสัญญาณไร้สายแบบ AWGN ได้เป็น

$$Y = \sqrt{hP}X + Z \quad (16)$$

โดยที่ X และ Y คือสัญญาณขาเข้าและขาออกตามลำดับ โดยที่ $Z \sim \text{CN}(0, \sigma_A^2 + \sigma_{cov}^2)$ คือสัญญาณรบกวนเชิงซ้อนแบบเกาส์ (Complex Gaussian noise) และช่องสัญญาณขาเข้ามีการกระจายเป็น $X \sim \text{CN}(0, 1)$ ซึ่งสามารถเขียนสมการอัตราข้อมูลสูงสุด (bps/Hz) ได้ดังสมการที่ (17)

$$R = \log_2 \left(1 + \frac{hP}{\sigma_A^2 + \sigma_{cov}^2} \right) \quad (17)$$

ระบบ SWIPT นั้นเป็นการรับพลังงานและข้อมูลมาจากคลื่นความถี่เดียวกันแบบพร้อมกัน ดังนั้นส่วนของภาครับจำเป็นต้องมีการแยกสัญญาณที่รับได้ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน และส่วนที่สองสำหรับการถอดรหัสข้อมูล ซึ่งจะเรียกรูปแบบการแยกสัญญาณนี้ว่า Dynamic power splitter (DPS) โดยสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ 1) การแบ่งทางเวลา (Time Switching: TS) แสดงดังภาพที่ 8 (ก) 2) การแบ่งทางกำลัง (Power Splitting: PS) แสดงดังภาพที่ 8 (ข) และ 3) การแบ่งกำลังแบบเปิดปิด (On-off Power Splitting: OPS) ซึ่งเป็นรูปแบบที่เกิดจากการผสมระหว่างการแบ่งทางเวลา และการแบ่งทางกำลังงาน (Liu et al., 2013; C. Zhang, Zhao, Li, Zheng, & Yang, 2014; R. Zhang & Ho, 2013; Zhou et al., 2013)

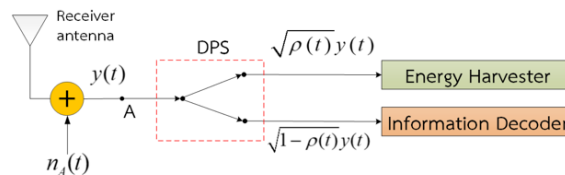


ภาพที่ 8 รูปแบบการแบ่งพลังงานและข้อมูลของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน (ก) ทางเวลา (ข) ทางกำลัง

ที่มา : Bi, Ho, & Zhang. (2014)

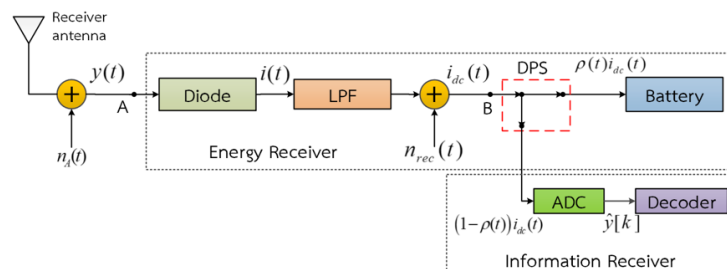
การแยกสัญญาณแบบ DPS นั้น เป็นการทำให้ภาครับสามารถที่จะรับพลังงานแล้วรับข้อมูลจากคลื่นความถี่วิทยุเดียวกันแบบพร้อมกันในช่วงเวลา t เดียวกันได้ โดย DPS จะทำการแยกสัญญาณที่รับเข้ามาออกเป็นสองช่องทางด้วยอัตราส่วนการแบ่งกำลังที่เหมาะสม กล่าวคือ อัตราส่วน $\rho(t)$ สำหรับการแบ่งไปยังภาคเก็บเกี่ยวพลังงานและอัตราส่วน $1-\rho(t)$ สำหรับการแบ่งไปยังภาครับข้อมูล โดย $0 \leq \rho(t) \leq 1$

ระบบ SWIPT นอกจากจะมีการออกแบบรูปแบบที่แตกต่างกันในเรื่องการแบ่งพลังงานและข้อมูลแล้วนั้น ยังมีการออกแบบรูปแบบโครงสร้างของภาครับพลังงานและรับข้อมูลอีกด้วย ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างของภาครับพลังงานและรับข้อมูลนั้น สามารถแบ่งออกได้ 2 รูปแบบ คือ ในรูปแบบแรกเป็นโครงสร้างของภาครับพลังงานและรับข้อมูลแบบแยกกัน (Sep-RX) และรูปแบบที่สองคือโครงสร้างของภาครับพลังงานและรับข้อมูลแบบรวมกัน (Int-RX) แสดงดังภาพที่ 9 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบนี้จะใช้ภาครับพลังงานดังโครงสร้างในภาพที่ 4 เหมือนกัน เพียงแต่แตกต่างกันที่รูปแบบ Sep-RX นั้น ทำการใส่ DPS ที่ตำแหน่ง A ดังภาพที่ 9 ซึ่งจะเห็นว่าจะทำการแบ่งสัดส่วนสัญญาณ $y(t)$ ด้วยอัตราส่วน $\rho(t)$ สำหรับส่วนการเก็บพลังงานและ $1-\rho(t)$ สำหรับส่วนรับข้อมูล ในช่วงที่สัญญาณยังคงเป็นย่านความถี่วิทยุ ก่อนจะส่งเข้าสู่ส่วนเก็บเกี่ยวพลังงานและรับข้อมูลต่อไป ในขณะที่รูปแบบ Int-RX นั้น ได้ทำการใส่ DPS ที่ตำแหน่ง B ดังภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าเป็นการแบ่งสัดส่วนสัญญาณหลังจากได้ทำการแปลงความถี่ของสัญญาณลงเป็นสัญญาณย่านเบสแบนด์แล้ว กล่าวคือผ่านการแปลงความถี่วิทยุให้อยู่ในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว $I_{dc}(t)$ ดังสมการที่ (13) ด้วยอัตราส่วน $\rho(t)$ สำหรับส่วนการเก็บพลังงานและ $1-\rho(t)$ สำหรับส่วนรับข้อมูล



ภาพที่ 9 โครงสร้างของภาครับแบบแยกระหว่างภาครับพลังงานและภาครับข้อมูล

ที่มา : Zhou et al. (2013)



ภาพที่ 10 โครงสร้างของภาครับแบบรวมระหว่างภาครับพลังงานและภาครับข้อมูล

ที่มา : Zhou et al. (2013)

5. สรุป

เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและพลังงานไร้สายนั้น มีพัฒนาการมาตามลำดับ ตั้งแต่เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งไม่พร้อมกัน ซึ่งวงจรภาครับพลังงาน และวงจรภาครับข้อมูล จะทำงานคนละเวลากัน มาเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน ซึ่งวงจรภาครับพลังงานและวงจรภาครับข้อมูลทำการรับพลังงานและข้อมูลจากสัญญาณเดียวกัน ในเวลาเดียวกัน โดยการแบ่งสัดส่วนที่จะรับเป็นพลังงานและรับเป็นข้อมูล สามารถปรับตัวให้มีความเหมาะสมได้ มีทั้งการแบ่งสัดส่วนสัญญาณตั้งแต่หลังสายอากาศ ซึ่งยังเป็นเรื่องที่คล่องตัว และการแบ่งสัดส่วนสัญญาณหลังการแปลงความถี่ของสัญญาณลงเป็นความถี่เบสแบนด์แล้ว เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและพลังงานไร้สายนี้ ปูทางไปสู่การประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมสื่อสารใหม่ๆ ที่ไม่เคยมีมาก่อนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้ที่ต้องการอุปกรณ์สื่อสารข้อมูลที่ไม่มีแหล่งจ่ายพลังงานคงที่ และไม่อยู่ในสถานที่ที่สามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่บ่อยครั้งได้ เช่น โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายในโครงสร้างอาคารหรือสะพาน สำหรับตรวจจับข้อมูลที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของอาคารหรือสะพานนั้น หรือโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายในพื้นที่ป่า ฯลฯ สำหรับการวิจัยพัฒนาต่อยอดในด้านต่างๆ นั้น นอกเหนือไปจากการหาการแบ่งสัดส่วนสัญญาณที่จะรับเป็นพลังงานและรับเป็นข้อมูลที่เหมาะสมในสถานการณ์ต่างๆ แล้ว ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและพลังงานไร้สายให้มีความปลอดภัยของข้อมูล โดยสามารถประกันความเป็นส่วนตัวของข้อมูลที่ส่งได้ ซึ่งหากส่งข้อมูลที่อัตราเร็วภายในเขตเวลาที่กำหนดไว้แล้ว จะปลอดภัยจากการถูกดักจับข้อมูลได้ นับว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีทั้งส่วนที่นำไปประยุกต์ใช้ได้ และส่วนที่นำไปวิจัยพัฒนาต่อยอดได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- Akkermans, J. A. G., Beurden, M. C. v., Doodeman, G. J. N., & Visser, H. J. (2005). Analytical models for low-power rectenna design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 4, 187-190. doi:10.1109/LAWP.2005.850798
- Belhadj-Yahya, C. (2010, December). *Energy options for wireless sensors*. Paper presented at the 2010 IEEE International Energy Conference.
- Bi, S., Ho, C. K., & Zhang, R. (2014, November). *Recent advances in joint wireless energy and information transfer*. Paper presented at the Information Theory Workshop (ITW), 2014 IEEE.
- Bi, S., Ho, C. K., & Zhang, R. (2015). Wireless powered communication: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 53(4), 117-125. doi:10.1109/MCOM.2015.7081084
- Chen, H., Li, Y., Rebelatto, J. L., Uch, B. F., x00F, a, F., & Vucetic, B. (2015). Harvest-Then-Cooperate: Wireless-Powered Cooperative Communications. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63(7), 1700-1711. doi:10.1109/TSP.2015.2396009
- Dai, C.-Q., Li, F.-J., & Renfors, M. (2015). Energy cooperation for throughput optimization based on save-then-transmit protocol in wireless communication system. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1), 1-13. doi:10.1186/s13638-015-0364-8
- Huang, L., Pop, V., Francisco, R. d., Vullers, R., Dolmans, G., Groot, H. d., & Imamura, K. (2010, November). *Ultra low power wireless and energy harvesting technologies - An ideal combination*. Paper presented at the Communication Systems (ICCS), 2010 IEEE International Conference on.
- Ju, H., & Zhang, R. (2014a). Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(1), 418-428. doi:10.1109/TWC.2013.112513.130760
- Ju, H., & Zhang, R. (2014b, December). *User cooperation in wireless powered communication networks*. Paper presented at the 2014 IEEE Global Communications Conference.
- Krikidis, I., Timotheou, S., Nikolaou, S., Zheng, G., Ng, D. W. K., & Schober, R. (2014). Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(11), 104-110. doi:10.1109/MCOM.2014.6957150
- Liu, L., Zhang, R., & Chua, K. C. (2013). Wireless Information and Power Transfer: A Dynamic Power Splitting Approach. *IEEE Transactions on Communications*, 61(9), 3990-4001. doi:10.1109/TCOMM.2013.071813.130105
- Mahfoudi, H., Tellache, M., & Takhedmit, H. (2016, April). *A wideband fractal rectana for energy harvesting applications*. Paper presented at the 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).
- Mangu, B., & Fernandes, B. G. (2012, October). *Efficiency improvement of solar-wind based dual-input Cuk-SEPIC converter for telecom power supply*. Paper presented at the IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.

- Mitcheson, P. D. (2015, June). *Alternative power sources for miniature and micro devices*. Paper presented at the 2015 Transducers - 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS).
- Shi, Q., Liu, L., Xu, W., & Zhang, R. (2014). Joint Transmit Beamforming and Receive Power Splitting for MISO SWIPT Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(6), 3269-3280. doi:10.1109/TWC.2014.041714.131688
- Shinohara, N. (2011). Power without wires. *IEEE Microwave Magazine*, 12(7), S64-S73. doi:10.1109/MMM.2011.942732
- Theeuwes, J. A. C., Visser, H. J., Beurden, M. C. v., & Doodeman, G. J. N. (2007, October). *Efficient, Compact, Wireless Battery Design*. Paper presented at the Wireless Technologies, 2007 European Conference on.
- Young-Ho, S., & Kai, C. (2002). A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(7), 1784-1789. doi:10.1109/TMTT.2002.800430
- Young, D. J. (2010, September). *An RF-powered wireless multi-channel implantable bio-sensing microsystem*. Paper presented at the 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology.
- Zhang, C., Zhao, H., Li, W., Zheng, K., & Yang, J. (2014, September). *Energy efficiency optimization of simultaneous wireless information and power transfer system with power splitting receiver*. Paper presented at the 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC).
- Zhang, R., & Ho, C. K. (2011, December). *MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*. Paper presented at the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE.
- Zhang, R., & Ho, C. K. (2013). MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12. doi:10.1109/twc.2013.031813.120224
- Zhou, X., Zhang, R., & Ho, C. K. (2013). Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff. *IEEE Transactions on Communications*, 61(11), 4754-4767. doi:10.1109/TCOMM.2013.13.120855