

การศึกษาประสิทธิภาพของเสาสัญญาณเครือข่ายไร้สาย

A Study on Efficiency of Wireless LAN Antenna Variations

ณัฐชามณู ศรีจำเริญรัตน์

สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

กายรัฐ เจริญราษฎร์*

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Natchamol Srichumroenrattana

Department of Business Computer, Faculty of Management Science,

Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000

Kairat Jaroenrat*

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen,

Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายทำให้ผู้คนสามารถเข้าถึงเครือข่ายคอมพิวเตอร์ได้ง่ายขึ้น แต่ผู้ใช้ส่วนใหญ่มักจะประสบกับปัญหาเสาสัญญาณที่รับ-ส่งสัญญาณได้ระยะทางไม่ไกลมากพอ หรือความเข้มของสัญญาณไม่แรงพอ อีกทั้งเสาสัญญาณที่ให้ความแรงและได้ระยะทางมากก็มีราคาแพง จากปัญหาดังกล่าว ทางคณะผู้วิจัยจึงศึกษาประสิทธิภาพเสาสัญญาณแบบกระจายสัญญาณรอบทิศทาง (omni-directional) เพื่อเป็นข้อมูลแก่ผู้ใช้ได้ทราบถึงหลักการทำงาน โครงสร้าง และการออกแบบเสาสัญญาณให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือดีกว่าเสาสัญญาณที่มากับอุปกรณ์กระจายสัญญาณไร้สาย (access point) จากวัสดุที่หาได้ง่าย และสามารถนำมาประดิษฐ์ได้เอง ซึ่งจากผลการทดสอบประสิทธิภาพของผู้วิจัย พบว่าขดลวดและการซ้อนเสาสัญญาณในแนวตั้ง (vertical stacking) ช่วยเพิ่มความแรงและระยะทางในการรับส่งสัญญาณได้ดีกว่าการเพิ่มความยาวทางกายภาพ โดยขนาดของขดลวดจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเป็น 6 มิลลิเมตร และขนาดหน้าตัดของลวดที่ใช้ทำเสาสัญญาณให้มีประสิทธิภาพที่สุดคือ 1.5 ตารางมิลลิเมตร

คำสำคัญ : เสาสัญญาณ; omni-directional; ความแรงของสัญญาณ

*ผู้รับผิดชอบบทความ : kairat.j@ku.ac.th

Abstract

Today, the wireless communications enable people to access computer networks more easily. But, most users are often faced with the problem of antennas used to receive-transmission distance isn't far enough or the intensity of the signal isn't strong enough and the antenna that gives strength signal and long transmission distance is expensive. From such problems, we have study on efficiency omni-directional antenna for the user to know which structure and design of the antenna effectively close to the commercial antenna from the inexpensive material which is easy to find and can be fabricated by themselves. The results of our experiment show that coil and vertical stacking improves strength and distance signal transmission over an increase in physical length. The size of the coil is the best effective diameter of the coil is 6 mm. And a cross section of the wire used to make antennas for the best performance is 1.5 square millimeters.

Keywords: antenna; omni-directional; signal strength

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้เป็นยุคของการติดต่อสื่อสารเทคโนโลยีต่าง ๆ เป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำเนินธุรกิจและการใช้ชีวิตประจำวัน การติดต่อข้อมูลแบบทั้งแบบมีสายและไร้สายด้วยอุปกรณ์โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ และคอมพิวเตอร์แบบพกพา ทำให้ผู้คนสามารถเข้าถึงเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้สะดวกขึ้น ซึ่งการเข้าถึงเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่พบเห็นได้มากในปัจจุบันคงหนีไม่พ้นการเชื่อมต่อแบบไร้สายที่มีความสะดวก แต่ผู้ใช้ส่วนใหญ่มักจะประสบกับปัญหาเสาสัญญาณที่มีอยู่นั้นใช้รับ-ส่งสัญญาณได้ระยะทางไม่ไกลมากพอ หรือความเข้มของสัญญาณไม่แรงพอ

ผู้วิจัยจึงศึกษาประสิทธิภาพเสาสัญญาณแบบ omni-directional รูปแบบต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นตามหลักทฤษฎีต่าง ๆ ให้ใช้งานได้ที่ความถี่ 2.4-2.5 GHz เทียบกับเสาสัญญาณมาตรฐาน เพื่อเป็นข้อมูลแก่ผู้ใช้ได้ทราบถึงหลักการทำงาน โครงสร้าง และการออกแบบเสาสัญญาณที่ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือดีกว่า และสามารถนำมาประดิษฐ์ได้เอง

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเสาสัญญาณเครือข่ายไร้สายชนิด omni-directional ที่ใช้งานที่ความถี่ 2.4-2.5 GHz

2.2 เพื่อศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้เสาสัญญาณ

2.3 เพื่อทดลองหาผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาสัญญาณรูปแบบต่าง ๆ

2.4 เพื่อหารูปแบบของเสาสัญญาณเครือข่ายไร้สายที่มีประสิทธิภาพสูง และจัดทำขึ้นได้เองจากวัสดุที่หาได้ง่าย

3. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

3.1 เสาสัญญาณ

ผู้วิจัยเลือกวิจัยเสาสัญญาณ (antenna) แบบ omni-directional [1] เพราะเป็นเสาสัญญาณที่ใช้กันเป็นส่วนใหญ่ แพร่กระจายคลื่นสัญญาณรอบทิศทาง 360 องศา และสามารถจัดทำเองได้ง่ายกว่าเสาสัญญาณชนิดอื่น โดยตัวเสามีลักษณะภายนอกเป็น

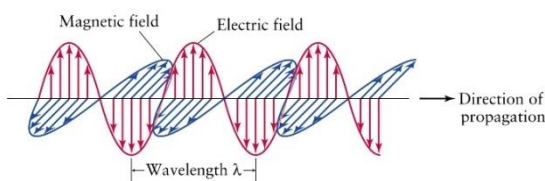
แท่งตรง ดังตัวอย่างในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เสาสัญญาณแบบ omni-directional

3.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic disturbance) [2] โดยการทำให้นามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกัน และอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่อาศัยตัวกลาง จึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้



รูปที่ 2 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

(ที่มา : <https://nniwat.files.wordpress.com/>)

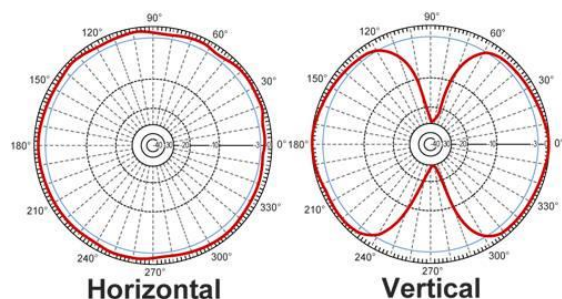
3.3 หลักการทำงานของเสาสัญญาณ

ระบบส่งสัญญาณวิทยุ [3] เสาสัญญาณมีหน้าที่หลักในการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสู่

อากาศ การแพร่กระจายคลื่นจะเกิดขึ้น เมื่อมีการป้อนสัญญาณซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามายังเสาสัญญาณทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบวก และลบบนพื้นผิวของเสาสัญญาณ และเนื่องจาก สัญญาณที่ป้อนให้เสาสัญญาณเป็นคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับประจุไฟฟ้าจึงถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ บนเสาสัญญาณ กลับไปกลับมา ตามความถี่ของสัญญาณจากเครื่องส่ง จนเกิดการแพร่กระจายคลื่นออกมา

3.4 รูปแบบการส่งสัญญาณของเสาสัญญาณแบบ omni-directional

เสาสัญญาณแบบนี้มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นคล้ายรูปโดนัท [4] หากมองจากด้านข้าง (vertical) ก็จะเห็นคล้ายรูปโดนัทผ่าครึ่ง แต่ถ้ามองจากด้านบน (horizontal) จะเห็นว่าเป็นรูปทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบการส่งสัญญาณของเสาสัญญาณแบบ omni-directional

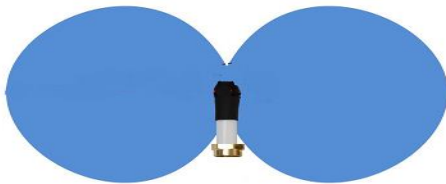
(ที่มา : <http://store.netgate.com>)

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นกับความยาวของเสาสัญญาณ

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (radiation pattern) [3] ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปแบบของเสาสัญญาณเป็นหลัก โดยรูปที่ 4 แสดงถึงปัจจัยของความยาวเสาสัญญาณกับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นโดยเสาสัญญาณแบบครึ่งความยาวคลื่นตามรูป (ก) จะมีมุม

แพร่กระจายคลื่นในแนวตั้งมากกว่าเสาสัญญาณแบบ
หนึ่งความยาวคลื่นตามรูป (ข) สังเกตได้จากค่าองศา
ของความกว้างลำคลื่นที่มากกว่า แต่เสาสัญญาณแบบ

หนึ่งความยาวคลื่นสามารถส่งสัญญาณได้ในรัศมีที่ไกล
กว่าและครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่า



(ก) เสาสัญญาณความยาว $\lambda/2$



(ข) เสาสัญญาณความยาว λ

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการแพร่กระจายคลื่นกับความยาวเสาสัญญาณ

3.6 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำของ ขดลวด [5]

3.6.1 จำนวนรอบของขดลวด

ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบของ
ขดลวดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 สนามแม่เหล็กที่เกิด
จากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะเกิดขึ้น
มาก จากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากตัดกับ
ขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย
ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ
จำนวนรอบของขดลวด

3.6.2 เส้นรอบวงของขดลวด

ถ้าเส้นรอบวงของขดลวดเพิ่มขึ้น ดัง
แสดงในรูปที่ 6 จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีจำนวนมาก
ขึ้นด้วย และการมีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า
ความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ
จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเส้นรอบวงของขดลวด

3.6.3 ความห่างของขดลวด

ถ้าทำให้ขดลวดจำนวน 4 รอบ ขยาย
พื้นที่ออก (นั่นคือความห่างของขดลวดเพิ่มขึ้น) ดัง
แสดงในรูปที่ 7 ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจาก
ขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลง ดังนั้นค่าความ
เหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความห่างของขดลวด

less inductance



more inductance



รูปที่ 5 ตัวอย่างการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด

less inductance



more inductance



รูปที่ 6 ตัวอย่างการเพิ่มเส้นรอบวงของขดลวด

less inductance



more inductance



รูปที่ 7 ตัวอย่างการเพิ่มความห่างขดลวด

3.6.4 วัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวด (μ)

ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ [6] เป็นตัว
เหนี่ยวนำที่พันลอยไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ ตัวเหนี่ยวนำ
ประเภทนี้นิยมนำไปใช้งานที่มีความถี่สูง ๆ หรือความถี่
วิทยุ ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีค่า

ความเหนี่ยวนำต่ำ เพราะแกนไม่สามารถช่วยเสริมค่าความเหนี่ยวนำได้ การจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นต้องใช้จำนวนรอบในการพันขดลวดเพิ่มขึ้น

3.7 ความยาวคลื่นในอากาศ

ความยาวคลื่น (λ) [1] คือระยะทางระหว่างส่วนที่ซ้ำกันของคลื่น ความยาวคลื่นสัมพันธ์แบบผกผันกับความถี่ของคลื่นนั้น โดยความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับความเร็วของคลื่นนั้นๆ ทหารด้วยความถี่ ถ้าพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ ความเร็ว นั่นก็คือความเร็วแสง ความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนได้ดัง

สมการ $\lambda = \frac{c}{f}$ (1) เมื่อ λ = ความยาวคลื่นในอากาศ, c = ความเร็วแสงในอากาศ ซึ่งมีค่า 299,792.458 กิโลเมตรต่อวินาที และ f = ความถี่ของคลื่น

ตารางที่ 1 ค่า K และ ratio ของ $\frac{\lambda}{d}$ ซึ่งใช้ทองแดงเป็นเสาสัญญาณ

Ratio ของ $\frac{\lambda}{d}$	K	Ratio ของ $\frac{\lambda}{d}$	K
30	0.95	400	0.97
40	0.955	500	0.971
50	0.958	750	0.972
75	0.96	1,000	0.973
100	0.968	2,000	0.975
200	0.968	5,000	0.977
300	0.969	10,000	0.98

3.8 ความยาวคลื่นในวัตถุ

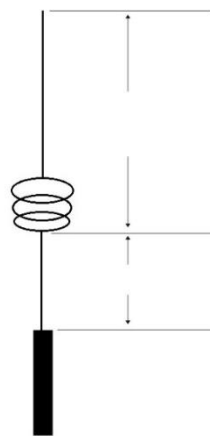
เสาสัญญาณจะต้องตัดให้มีความยาวเหมาะสมต่อความถี่ที่ใช้งาน ความยาวคลื่นในวัตถุ [7] มีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นในอากาศอยู่เล็กน้อย ช่วงคลื่นที่วิ่งผ่านวัตถุนั้นไม่ได้มีความยาวเท่ากับช่วงคลื่นที่กระจายไปในอากาศ คือ มีช่วงคลื่นที่สั้นกว่า ดังจะเห็น

ได้จากสมการ $\lambda_2 = \frac{c}{f} \times K$ (2) เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ, λ_2 คือ ความยาวคลื่นในวัตถุ และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ โดย K คือ velocity factor ขึ้นอยู่กับ ratio ของ $\frac{\lambda}{d}$

ตารางที่ 1 แสดงค่า K ที่หาได้จาก Ratio ของ $\frac{\lambda}{d}$ ซึ่งใช้ทองแดงเป็นวัสดุ โดย λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ

3.9 โครงสร้างเสาสัญญาณ

การออกแบบเสาสัญญาณจะยึดโครงสร้างของเสาสัญญาณ [8] ตามรูปที่ 8 เป็นหลัก มีความยาวจากโคนถึงใต้ขดลวดเป็น $\frac{\lambda_2}{4}$ และจากใต้ขดลวดถึงปลายเสามีความยาวเป็น $\frac{\lambda_2}{2}$ โดยมีความยาวทั้งหมดจากโคนถึงปลายเสาเป็น $\frac{3\lambda_2}{4}$



รูปที่ 8 โครงสร้างเสาสัญญาณ

3.10 การคำนวณความเหนี่ยวนำในขดลวด

สมการคำนวณความเหนี่ยวนำในขดลวด [9] หาได้จากสมการ $L = \frac{a^2 + N^2}{(18a) + (40l)}$ (3) เมื่อ L คือ ความเหนี่ยวนำ (μH), N คือ จำนวนรอบของขดลวด, l

คือ ความยาวของขดลวด (นิ้ว) และ α คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของขดลวด (นิ้ว) ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดนี้ มีผลต่อค่าความแรงของสัญญาณ

3.11 การซ้อนกันแนวตั้งและแนวนอน (vertical and horizontal stacking)

การซ้อนกัน [10] หมายถึงการติดตั้งเสาสัญญาณมากกว่า 2 อัน ในทิศทางเดียวกัน วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราขยายและทิศทางที่ชัดเจนขึ้น ทำให้ทิศทางแนวนอนมีอัตราขยายมากขึ้น และมีอัตราขยายน้อยลงในแนวตั้ง การซ้อนกันมักจะซ้อนให้ความยาวทั้งหมดของเสาเป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\lambda_2}{2}$ คือ $\frac{\lambda_2}{2}, \frac{3\lambda_2}{2}, \frac{5\lambda_2}{2}, \frac{7\lambda_2}{2}, \dots$ เพื่อให้เกิดกระแสสูงสุด

3.12 Received signal strength indication (RSSI)

RSSI [1] คือค่าที่ใช้บอกความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับในเทอมของพลังงานมีหน่วยเป็น dBm (decibels milliwatt) โดยค่า RSSI จะแปรผันตรงกับความแรงของสัญญาณ ถ้ามีค่ามากแสดงว่าสัญญาณที่ได้รับมีความแรงสูง นั่นคือ ตัวส่งและตัวรับอยู่ใกล้กัน และในทางกลับกันหากมีค่าน้อยแสดงว่าสัญญาณที่ได้รับมีความแรงต่ำ ซึ่งตัวส่งและตัวรับอยู่ไกลกัน

3.13 การสูญเสียสัญญาณ [11]

3.13.1 การลดทอนสัญญาณ

การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ ค่าความแรงของสัญญาณจะลดทอนเป็นส่วนกลับกับระยะทางทำให้ค่าความแรงของสัญญาณที่ระยะทางห่างออกไปจากเสาสัญญาณมีความแรงลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการวัดค่าการลดทอนสัญญาณนิยมวัดในหน่วยเดซิเบล (dB) โดยจะหาได้จากสมการ $FSPL = 10 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2$ (4) [11] เมื่อ FSPL (free space

path loss) คือ การสูญเสียในอากาศ (dB), d คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (เมตร), f คือ ความถี่ของคลื่น = 2.4 GHz และ c คือ ความเร็วแสงในอากาศ (เมตร/วินาที)

3.13.2 การดูดกลืนสัญญาณ

อนุภาคที่มีการดูดกลืนสัญญาณมากที่สุด ได้แก่ ออกซิเจนและไอน้ำในอากาศ การดูดกลืนคลื่นของอากาศยังขึ้นอยู่กับย่านความถี่ โดยออกซิเจนสามารถดูดกลืนได้ดีที่สุดที่ความถี่ประมาณ 60 GHz ส่วนการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของไอน้ำ จะเริ่มมีการดูดกลืนตั้งแต่ความถี่ 10 GHz เป็นต้นไป และดูดกลืนมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่ที่ความถี่ต่ำกว่า 10 GHz การดูดกลืนคลื่นในอากาศยังคงมีดูดกลืนในปริมาณน้อย จึงไม่ส่งผลต่อการสื่อสารที่ใช้คลื่นความถี่ต่ำกว่า 10 GHz มากนัก

3.14 ความต้านทานจากขดลวด

ความต้านทานจากขดลวด [12] สามารถคำนวณได้จากสมการ $X = 2\pi fL$ (5) เมื่อ X คือ ความต้านทานจากขดลวด (Ω), f คือความถี่ของคลื่น = 2.4 GHz, L คือความเหนี่ยวนำ (μH)

3.15 ความต้านทานรวม

ความต้านทานรวม [13] สามารถคำนวณได้จากสมการ $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ (6) เมื่อ Z คือความต้านทานรวม (Ω), R คือความต้านทานของลวดทองแดง (Ω), X คือความต้านทานจากขดลวด (Ω)

4. รายละเอียดและการออกแบบเสาสัญญาณรูปแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทดสอบเสาสัญญาณแบบ omni-directional รูปแบบต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน โดยเริ่มจากเสาสัญญาณมาตรฐานที่หาซื้อได้ทั่วไป (เสาสัญญาณ A) จากนั้นจัดทำเสาสัญญาณที่มีรูปแบบเดียวกับเสาสัญญาณมาตรฐานโดยใช้ลวดทองแดงจาก

สายไฟบ้าน (เสาสัญญาณ B) เพื่อหาผลลัพธ์ว่าการจัดทำเสาสัญญาณขึ้นมาเอง ด้วยลวดทองแดงนี้จะมีประสิทธิภาพแตกต่างจากเสาสัญญาณมาตรฐานอย่างไร จากนั้นผู้วิจัยได้จัดทำเสาสัญญาณแบบเส้นตรงไม่มีขด (เสาสัญญาณ C และเสาสัญญาณ D) เพื่อพิสูจน์ว่าขดลวดในเสาสัญญาณและความยาวของเสามีผลต่อประสิทธิภาพอย่างไร สุดท้ายผู้วิจัยได้จัดทำเสาสัญญาณแบบที่มีการแปรผันลักษณะของขดลวดแบบต่าง ๆ (เสาสัญญาณ E ถึงเสาสัญญาณ P) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาสัญญาณที่มีลักษณะของขดลวดที่แตกต่างกัน โดยเสาสัญญาณต่าง ๆ ในการวิจัย มีลักษณะดังต่อไปนี้

4.1 เสาสัญญาณ A

เสาสัญญาณมาตรฐานที่หาซื้อได้ทั่วไป ทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.38 มิลลิเมตร ความยาววัดจากต้นถึงปลาย 9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1 ช่วง ตำแหน่งขดอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร ($\lambda_2/4$) มีจำนวนรอบของขดลวด 3.5 รอบ มีความยาวของขดลวดเท่ากับ 1 เซนติเมตร มีความห่างระหว่างขด 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 9

4.2 เสาสัญญาณ B

เสาสัญญาณที่ออกแบบให้เหมือนเสาสัญญาณ B โดยใช้วัสดุเป็นลวดทองแดงจัดทำโครงสร้างเสาสัญญาณตามรูปที่ 10 ความยาววัดจากต้นถึงปลาย 9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1 ช่วง ตำแหน่งขดอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร ($\lambda_2/4$) มีจำนวนรอบของขดลวด 3.5 รอบ มีความยาวของขดลวดเท่ากับ 1 เซนติเมตร มีความห่างระหว่างขด 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 6 มิลลิเมตร ใช้วัสดุลวดทองแดง (สายไฟบ้านหน้าตัดขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่าน

ศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-Type Female Panel Mount- 4 Holds

4.3 เสาสัญญาณ C

เสาสัญญาณที่ความยาวเท่ากับเสาสัญญาณ B ที่ยังไม่มีการขด โดยตัวเสามีความยาวตั้งแต่ต้นถึงปลายเท่ากับ 12.775 เซนติเมตร โดยวัสดุที่ใช้คือลวดทองแดง (สายไฟบ้านหน้าตัดขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds ดังรูปที่ 11

4.4 เสาสัญญาณ D

เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้เสาสัญญาณ C เป็นแนวคิดในการออกแบบ โดยตัวเสามีความยาวเป็น 2 เท่าของเสาสัญญาณ C เท่ากับ 25.55 เซนติเมตร โดยวัสดุที่ใช้คือ ลวดทองแดง (สายไฟบ้านหน้าตัดขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds ดังรูปที่ 12

4.5 เสาสัญญาณ E

เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้โครงสร้างเสาสัญญาณตามรูปที่ 13 ความยาววัดจากต้นถึงปลาย 9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1 ช่วง ตำแหน่งขดอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร ($\lambda_2/4$) มีจำนวนรอบของขดลวด 7 รอบ มีความยาวของขดลวดเท่ากับ 2 เซนติเมตร มีความห่างระหว่างขด 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 6 มิลลิเมตร ใช้วัสดุลวดทองแดง (สายไฟบ้านหน้าตัดขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds

4.6 เสาสัญญาณ F

เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้โครงสร้างเสาสัญญาณตามรูปที่ 14 ความยาววัดจากต้นถึงปลาย

9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1 ช่วง ตำแหน่งขดอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร ($\lambda_2/4$) มีจำนวนรอบของขดลวด 3.5 รอบ มีความยาวของขดลวดเท่ากับ 1 เซนติเมตร มีความห่างระหว่างขด 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 10 มิลลิเมตร ใช้วัสดุลวดทองแดง (สายไฟฟ้าบ้านหน้าตัด ขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds

4.7 เสาสัญญาณ G

เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้โครงสร้างเสาสัญญาณตามรูปที่ 15 ความยาววัดจากต้นถึงปลาย 9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1 ช่วง ตำแหน่งขดอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร ($\lambda_2/4$) มีจำนวนรอบของขดลวด 3.5 รอบ มีความยาวของขดลวดเท่ากับ 2 เซนติเมตร มีความห่างระหว่างขด 6 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 6 มิลลิเมตร ใช้วัสดุลวดทองแดง (สายไฟฟ้าบ้านหน้าตัด ขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds

4.8 เสาสัญญาณ H

เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้โครงสร้างเสาสัญญาณตามรูปที่ 16 และปัจจัยที่มีผลต่อความเหนียวนำสองอย่างเข้าด้วยกัน โดยทำการเพิ่มเส้นรอบวงของขดลวดและจำนวนรอบของขดลวด เป็นแนวคิดในการออกแบบ ความยาววัดจากต้นถึงปลาย 9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1 ช่วง ตำแหน่งขดอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร ($\lambda_2/4$) มีจำนวนรอบของขดลวด 7 รอบ มีความยาวของขดลวดเท่ากับ 2 เซนติเมตร มีความห่างระหว่างขด 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 10 มิลลิเมตร ใช้วัสดุลวดทองแดง (สายไฟฟ้าบ้านหน้าตัด

ขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds

4.9 เสาสัญญาณ I

เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้แนวคิดการซ้อนกันแนวตั้ง (vertical stacking) โดยใช้เสาสัญญาณ B มาต่อขึ้นอีก 1 อัน โดยความยาวเสาโดยรวมจากต้นถึงปลาย 18.15 เซนติเมตร $3\lambda_2/4$ โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 2 ช่วง ขดแรกอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร ($\lambda_2/4$) ขดที่ 2 อยู่ห่างจากโคนเสา 12.1 เซนติเมตร มีจำนวนรอบของขดลวด 3.5 รอบ มีความยาวแต่ละขดเป็น 1 เซนติเมตร มีความห่างระหว่างขด 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 6 มิลลิเมตร ใช้วัสดุ ลวดทองแดง (สายไฟฟ้าบ้านหน้าตัดขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds ดังรูปที่ 17

4.10 เสาสัญญาณ J

เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้โครงสร้างเสาสัญญาณตามรูปที่ 18 ความยาววัดจากต้นถึงปลาย 9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1 ช่วง ตำแหน่งขดอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร ($\lambda_2/4$) มีจำนวนรอบของขดลวด 10.5 รอบ มีความยาวของขดลวดเท่ากับ 3 เซนติเมตร มีความห่างระหว่างขด 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 6 มิลลิเมตร ใช้วัสดุลวดทองแดง (สายไฟฟ้าบ้านหน้าตัด ขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds

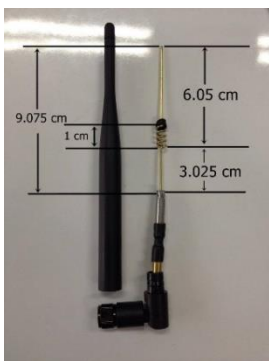
4.11 เสาสัญญาณ K

เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้โครงสร้างเสาสัญญาณตามรูปที่ 19 ความยาววัดจากต้นถึงปลาย 9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1

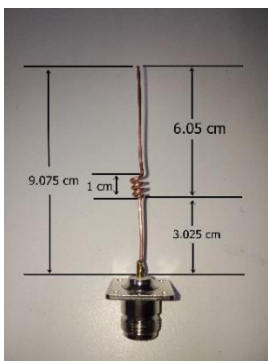
4.12 សោត័ស្ត្រាណ L

4.13 សោត័ស្ត្រណ៍ M

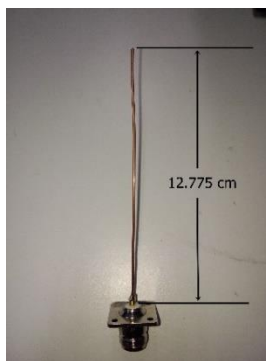
เสาสัญญาณที่ออกแบบโดยใช้โครงสร้าง
เสาสัญญาณตามรูปที่ 24 ความยาววัดจากต้นถึงปลาย
9.075 เซนติเมตร ($3\lambda_2/4$) โดยที่ตัวเสาจะมีการขด 1
ช่วง ตำแหน่งขดอยู่ห่างจากโคนเสา 3.025 เซนติเมตร
($\lambda_2/4$) มีจำนวนรอบของขดลวด 7 รอบ มีความยาว
ของขดลวดเท่ากับ 2 เซนติเมตร มีความห่างระหว่าง
ขด 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของขด 6 มิลลิ
เมตร ใช้สัลดลวดทองแดง (สายไฟบ้านหน้าตัดขนาด 1



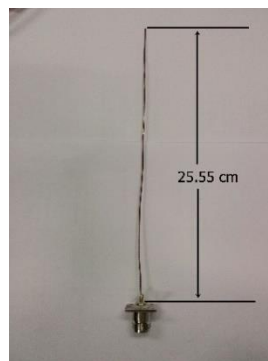
รูปที่ 9 เสาสัญญาณ A



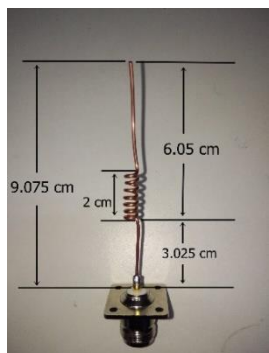
รูปที่ 10 เสาสัญญาณ B



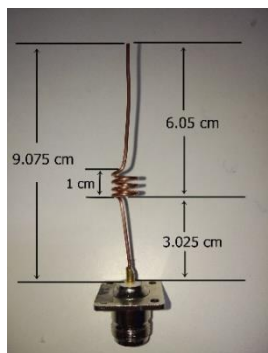
รูปที่ 11 เสาสัญญาณ C



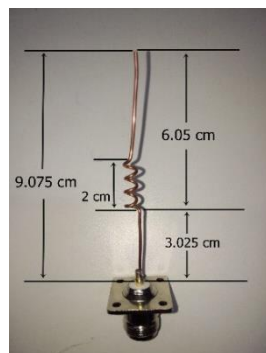
รูปที่ 12 เสาสัญญาณ D



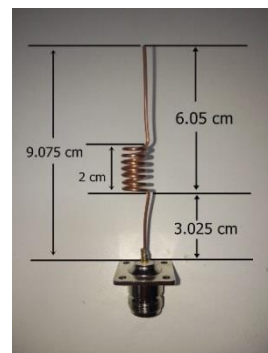
รูปที่ 13 เสาสัญญาณ E



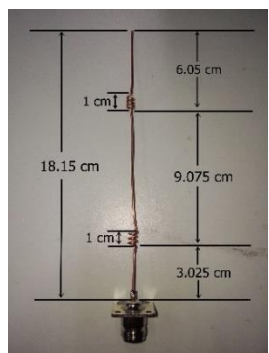
รูปที่ 14 เสาสัญญาณ F



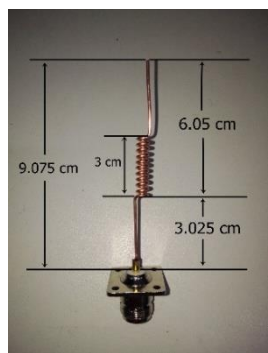
รูปที่ 15 เสาสัญญาณ G



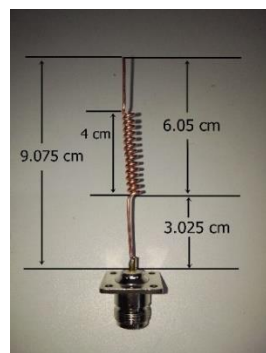
รูปที่ 16 เสาสัญญาณ H



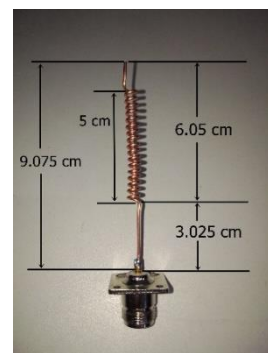
รูปที่ 17 เสาสัญญาณ I



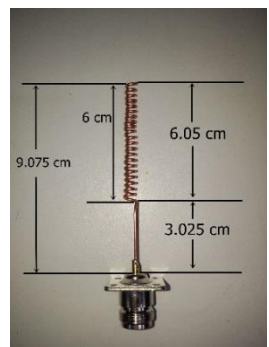
รูปที่ 18 เสาสัญญาณ J



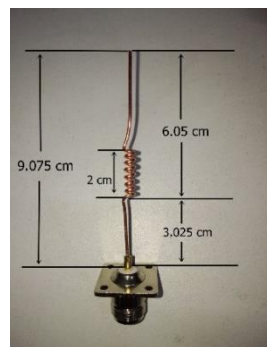
รูปที่ 19 เสาสัญญาณ K



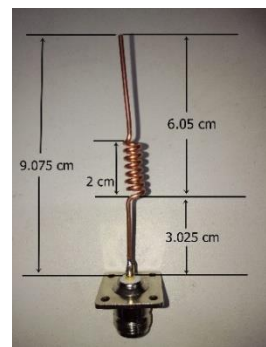
รูปที่ 20 เสาสัญญาณ L



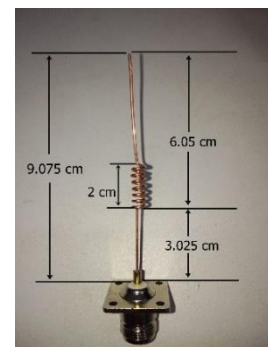
รูปที่ 21 เสาสัญญาณ M



รูปที่ 22 เสาสัญญาณ N



รูปที่ 23 เสาสัญญาณ O



รูปที่ 24 เสาสัญญาณ P

ตารางมิลลิเมตร) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.13 มิลลิเมตร บัดกรีเข้ากับข้อต่อ N-type female panel mount-4 holds

5. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

5.1 ผลการวิจัย

ตารางที่ 2 แสดงผลการวัดค่าความแรงของสัญญาณเฉลี่ยของเสาสัญญาณ A ถึง เสาสัญญาณ P ภายใต้สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิและช่วงเวลาวัด

ใกล้เคียงกัน โดยวัดค่าความแรงของสัญญาณด้วยโปรแกรม Insider และหาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบซ้ำจำนวน 10 ครั้ง โดยถ้ามีค่าความแรงของสัญญาณมากหมายถึงสามารถรับสัญญาณได้ดี ส่วนตารางที่ 3 แสดงค่าการลดทอนของคลื่นสัญญาณความถี่ 2.4 GHz ในอากาศที่ระยะทางต่าง ๆ ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ (4) และตารางที่ 4 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของเสาสัญญาณของเสาสัญญาณแต่ละแบบ ที่คำนวณมาจากสมการที่ (3)

ตารางที่ 2 ค่าความแรงของสัญญาณที่ระยะทางต่าง ๆ

ระยะทาง (เมตร)	ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยจากการวัดค่า 10 ครั้ง (dBm)															
	เสา A	เสา B	เสา C	เสา D	เสา E	เสา F	เสา G	เสา H	เสา I	เสา J	เสา K	เสา L	เสา M	เสา N	เสา O	เสา P
0	-25	-26	-32.7	-31.9	-27.5	-26.3	-30.6	-26.7	-38.8	-26.9	-25.9	-26.7	-25	-26.4	-25.6	-32.2
10	-50	-59.7	-68.1	-60.6	-50.6	-52.6	-58.7	-57.7	-51.6	-52.4	-51.8	-52.6	-53.4	-58.5	-50	-64.5
20	-55.3	-61.6	-73.3	-67.8	-53.7	-59.3	-64.8	-59.1	-59.6	-54.4	-56.8	-58.9	-59.3	-59.5	-53.5	-68.7
30	-60	-65.2	-80.4	-68	-59.1	-60.9	-67.3	-65.9	-61.5	-60.6	-59.7	-61.1	-62.2	-68.8	-59	-72.8
40	-65.4	-68.4	-85.8	-71.7	-60.3	-66.9	-72.8	-68.1	-62.8	-62.1	-60.4	-60.8	-62.6	-70	-62.4	-73.5
50	-65.9	-70.1	-87.1	-74.2	-62.5	-69.4	-74.6	-68.3	-64.1	-62.2	-64	-63.9	-63.7	-74.2	-69.9	-73.6
100	-71.1	-74	-90.2	-80.6	-65	-70.3	-81.6	-74.4	-69.5	-64.3	-65.8	-66.1	-67.3	-76	-71.4	-78.9
200	-76.1	-81.8	-	-86.1	-71.6	-72.6	-	-81.9	-77.9	-73.7	-80	-81.2	-80.9	-85.9	-81.2	-83.7
300	-80.5	-83.6	-	-	-77.2	-77.8	-	-82.6	-79.4	-79	-80.7	-82.3	-82.4	-87.3	-83.9	-85.6
400	-91.1	-89.2	-	-	-79.7	-79.9	-	-86.5	-81.6	-79.7	-81.2	-83.6	-84.1	-	-85.9	-
500	-	-	-	-	-81.4	-83	-	-87	-82	-81.2	-84.1	-85	-85.1	-	-88.6	-
600	-	-	-	-	-83.6	-86.3	-	-87.1	-83	-83.9	-85	-88.2	-87.4	-	-	-
700	-	-	-	-	-	-	-	-	-86.9	-	-	-	-	-	-	-
800	-	-	-	-	-	-	-	-	-90.2	-	-	-	-	-	-	-
900	-	-	-	-	-	-	-	-	-91.1	-	-	-	-	-	-	-

5.2 การวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองในตารางที่ 2 จะเห็นว่าเสาสัญญาณ A และ B มีความแรงของสัญญาณและรับสัญญาณได้ระยะทางใกล้เคียงกัน เนื่องจากเสาสัญญาณ B นั้นมีการออกแบบที่เหมือนกับเสาสัญญาณ

A แต่ต่างกันที่วัสดุเปลี่ยนจากทองเหลืองเป็นทองแดง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทองเหลืองและทองแดงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เมื่อออกแบบเสาสัญญาณให้ออกมาในรูปแบบเดียวกันจะทำให้ได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นยังเห็นว่าเสาสัญญาณ B มี

ความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าและรับสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าเสาสัญญาณ C เพราะที่ความยาวลดเท่ากันระหว่างเสาสัญญาณ B กับ C เสา B นั้นมีการขดลวดซึ่งเป็นการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ ส่วนเสาสัญญาณ D มีความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าและรับสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าเสาสัญญาณ C เพราะเสาสัญญาณ D มีความยาวทางกายภาพของเสาที่มากกว่าจากทฤษฎีข้อที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นกับเสาสัญญาณ ยิ่งมีความยาวทางกายภาพมากขึ้น จะทำให้ส่งสัญญาณในแนวนอนได้ไกลขึ้น แต่ทิศทางในแนวตั้งแคบลง และเสาสัญญาณ B มีความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าและรับสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าเสาสัญญาณ D จึงได้ว่าการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำจะทำให้รับสัญญาณได้ดีกว่าการเพิ่มความยาวทางกายภาพ

ตารางที่ 3 ค่าการลดทอนของสัญญาณในอากาศ

ระยะทาง (เมตร)	การลดทอนสัญญาณ (dB)
10	60.05
20	66.07
30	69.59
40	72.09
50	74.03
100	80.05
200	86.07
300	89.59
400	92.09
500	94.03
600	95.61
700	96.95
800	98.11
900	99.13

ตารางที่ 4 ค่าความเหนี่ยวนำของเสาสัญญาณ

เสาสัญญาณ	ความเหนี่ยวนำ L(uH)
เสาสัญญาณ N	0.009
เสาสัญญาณ G	0.019
เสาสัญญาณ A	0.034
เสาสัญญาณ B	0.034
เสาสัญญาณ I	0.068
เสาสัญญาณ E	0.076
เสาสัญญาณ O	0.076
เสาสัญญาณ P	0.076
เสาสัญญาณ F	0.083
เสาสัญญาณ J	0.119
เสาสัญญาณ K	0.163
เสาสัญญาณ H	0.197
เสาสัญญาณ L	0.206
เสาสัญญาณ M	0.249

ส่วนผลการทดลองของเสาสัญญาณ E และ F พบว่ามีความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าและรับสัญญาณได้ไกลกว่าเสาสัญญาณ B เพราะเสาสัญญาณ E มีจำนวนรอบในการขดที่มากกว่า ส่วนเสาสัญญาณ F มีเส้นรอบวงของขดลวดใหญ่กว่า จากทฤษฎีข้อที่ 3.6.1 จำนวนรอบของขดลวด และทฤษฎีข้อที่ 3.6.2 เส้นรอบวงของขดลวด การเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดและการเพิ่มความใหญ่ของขดลวดเป็นการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ จึงทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลขึ้น ส่วนเสาสัญญาณ G มีความแรงของสัญญาณน้อยที่สุดเพราะจากทฤษฎีข้อที่ 3.6.3 ความห่างของขดลวด ถ้าทำให้ระยะห่างระหว่างขดเพิ่มขึ้น ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลง ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าน้อย การรับสัญญาณจึงได้ระยะทางน้อยลงตามไปด้วย

ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเสาสัญญาณ E, J, K, L, และ M มีความแรงของสัญญาณและรับสัญญาณได้ไกลกว่าเสาสัญญาณ B โดยเสาสัญญาณ E, J, K, L, และ M ได้แนวคิดมาจากการทฤษฎี 2.6.1 จำนวนรอบของขดลวด โดยเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดที่ละ 3.5 รอบดังนี้ เสา E 7 รอบ, เสา J 10.5 รอบ, เสา K 14 รอบ, เสา L 17.5 รอบ, และเสา M 21 รอบ โดยเสา E, J, K, L, และ M แม้จะมีการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดตามลำดับ แต่การเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำจะช่วยเพิ่มระยะทางในการรับสัญญาณได้ไกลสูงสุดที่ระยะทาง 600 เมตร ซึ่งเป็นระยะทางสูงสุดที่ความยาวของเสาสัญญาณจะรับสัญญาณได้ จึงได้ว่าจำนวนรอบที่ดีที่สุดของขดลวดคือ 7 รอบ นอกจากนั้นยังพบว่าเสาสัญญาณ E มีความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าเสาสัญญาณ H และรับสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าเสาสัญญาณ N โดยได้แนวคิดมาจากการเพิ่มขนาดเส้นรอบวงของขดลวด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นรอบวงขดลวดที่ดีที่สุดคือ 6 มิลลิเมตร ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเป็น 1 เซนติเมตร (เสาสัญญาณ H) และลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหลือ 2 มิลลิเมตร (เสาสัญญาณ N) จากขนาดเดิม 6 มิลลิเมตร (เสาสัญญาณ E) เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่ดีที่สุด ซึ่งผลทดลองแสดงให้เห็นว่าหากเพิ่มหรือลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด จาก 6 มิลลิเมตร จะทำให้ค่าความแรงของสัญญาณและระยะทางที่รับสัญญาณได้ลดลง จึงได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ดีที่สุดของขดลวดคือ 6 มิลลิเมตร

นอกจากนี้ยังพบว่าเสาสัญญาณ E มีความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าเสาสัญญาณ O และรับสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าเสาสัญญาณ P โดยได้แนวคิดมาจากการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด และการเพิ่มความใหญ่ของขดลวด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า

จำนวนรอบที่ดีที่สุดของขดลวดคือ 7 รอบ และขนาดเส้นรอบวงที่ดีที่สุดของขดลวดคือ 6 มิลลิเมตร ผู้วิจัยจึงทำการหาขนาดของลวด โดยการเพิ่มขนาดหน้าตัดของลวดเป็น 2.5 ตารางมิลลิเมตร (เสาสัญญาณ O) และลดขนาดหน้าตัดของขดลวดเป็น 1 ตารางมิลลิเมตร (เสาสัญญาณ P) จากขนาดเดิมหน้าตัด 1.5 ตารางมิลลิเมตร เพื่อหาขนาดของลวดที่ดีที่สุด ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มหรือลดขนาดหน้าตัดของลวดจะทำให้ค่าความแรงของสัญญาณและระยะทางที่รับสัญญาณได้ลดลง จึงได้ว่าขนาดหน้าตัดของลวดที่ดีที่สุดคือ หน้าตัด 1.5 ตารางมิลลิเมตร

ท้ายที่สุดผู้วิจัยได้พบว่าเสาสัญญาณ I มีความแรงของสัญญาณที่ดีที่สุดและรับสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าเสาสัญญาณ B และ H เพราะเสาสัญญาณ I ใช้เทคนิคการซ้อนกันในแนวตั้งโดยการเพิ่มเสาสัญญาณ B ขึ้นไปอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งการซ้อนกันนี้ทำเพื่อเพิ่มการส่งสัญญาณของเสาสัญญาณให้มากขึ้น โดยการซ้อนกันจะซ้อนให้ความยาวทั้งเสาเป็นจำนวนคี่ของ $\lambda/2$ คือ $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, 7\lambda/2, \dots$ ซึ่งเสาสัญญาณ I มีความยาวทั้งเสาเป็น $3\lambda/2$ แต่หากทำการซ้อนขึ้นไปอีกจะทำให้ความต้านทานของเสามากเกินไป ทั้งนี้แม้พบว่าเสาสัญญาณ I สามารถรับส่งสัญญาณได้ระยะไกลที่สุดแต่ไม่ได้มีสัญญาณแรงที่สุดในช่วงระยะไม่เกิน 500 เมตร ผู้วิจัยพบว่าในช่วงระยะทางใกล้ ๆ ไม่เกิน 30 เมตร เสาสัญญาณ O จะให้สัญญาณแรงที่สุด ส่วนในระยะ 40-500 เมตร เสาสัญญาณ E และ J จะให้สัญญาณแรงที่สุด

6. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพเสาสัญญาณของเครือข่ายไร้สาย และเป็นการเปรียบเทียบด้านความแรงของสัญญาณและระยะทางที่รับส่งได้จากเสาสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้ได้เสาสัญญาณ

ของเครือข่ายไร้สายที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือมากกว่าเสาสัญญาณมาตรฐาน โดยจากการทดลองพบว่าเสาสัญญาณ I ที่ใช้หลักการซ้อนกันในแนวตั้งมีประสิทธิภาพด้านระยะทางไกลที่สุด ด้วยรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในแนวตั้งถูกบีบให้แคบลงเพื่อให้คลื่นส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลมากขึ้น ส่วนการมีขดลวดช่วยให้มีความแรงของสัญญาณดีกว่าและรับสัญญาณได้ไกลกว่าการเพิ่มความยาวทางกายภาพ ดังผลของเสาสัญญาณ O ที่ให้สัญญาณแรงที่สุดที่ระยะทางไม่เกิน 30 เมตร และเสาสัญญาณ E และ J ที่ให้สัญญาณแรงที่สุดในช่วง 40-500 เมตร ค่าความเหนี่ยวนำที่มากขึ้นจากการมีขดลวดส่งผลให้ค่าความแรงของสัญญาณและระยะทางที่รับส่งสัญญาณได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเหนี่ยวนำมากขึ้นไปเรื่อย ๆ ความแรงของสัญญาณกลับลดลง เพราะค่าความเหนี่ยวนำที่มากขึ้นต้องแลกมาด้วยความต้านทานของเสาสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งทำให้ค่าความแรงของสัญญาณลดลงโดยค่าความเหนี่ยวนำจากการทดลองที่ทำให้ได้ระยะทางไกลที่สุด โดยความยาวทั้งเสาเป็น $3\lambda/4$ คือ $0.068 \mu\text{H}$ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่มากกว่านี้จะทำให้ได้ระยะทางลดลง และที่ความเหนี่ยวนำที่เท่ากัน แต่ขนาดของเส้นลวดไม่เท่ากัน ก็ส่งผลให้ค่าความแรงของสัญญาณและระยะทางที่รับสัญญาณได้ไม่เท่ากัน ซึ่งจากการทดลองพื้นที่หน้าตัดเส้นลวดที่ทำให้ค่าความแรงของสัญญาณและระยะทางที่รับสัญญาณได้ดีที่สุดคือ 1.5 ตารางมิลลิเมตร

7. รายการอ้างอิง

[1] กษมา ดาริการันท์ และกายรัฐ เจริญราษฎร์, 2556, การศึกษาประสิทธิภาพเสาอากาศของเครือข่ายแลนไร้สาย, การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม.

- [2] โมไนย์ ไกรฤกษ์, 2554, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า : ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- [3] รณชัย พงศ์รเสรี, พื้นฐานสายอากาศวิทยุเพื่อการสื่อสาร (Fundamental of Radio Antenna), แหล่งที่มา : http://thaitelecom.km.org/TTE/topic/attach/Fundamental_of_Radio_Antenna/index.php, 27 มกราคม 2558.
- [4] อำนาจ มิ่งมงคล และอรรณพ ชันธิกุล, 2547, ทฤษฎีเสาเบื้องต้น, ออกแบบและติดตั้งเครือข่าย Wireless LAN, อินโฟเพรส, นนทบุรี, 412 น.
- [5] นครินทร์ หุ่นทอง, ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ, แหล่งที่มา : [http://eakza.iqetweb.com/articles/585909/การพันขดลวดเพื่อให้ได้ค่า%20L\(ตัวเหนี่ยวนำ\).html](http://eakza.iqetweb.com/articles/585909/การพันขดลวดเพื่อให้ได้ค่า%20L(ตัวเหนี่ยวนำ).html), 17 มีนาคม 2558.
- [6] Laplante, P.A., 1999, Comprehensive Dictionary of Electrical Engineering, Springer.
- [7] เฉลิม ภัทรโกศล, ความยาวที่แท้จริง (Physical length) ของสายอากาศแบบ Half-wave dipole, แหล่งที่มา : http://www.prd.go.th/ewt_dl_link.php?nid=24901&filename=expert, 27 มกราคม 2558.
- [8] Choudhury, S.H., Momtaz, I. and Matin, A., 2010, Analytical Deduction of the Salient Properties of a Half Wavelength J-pole Antenna, Department of Electrical and Electronic Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology.
- [9] Meserve, M.E., 2558, Air-Core Inductor

- Design, Available Source: http://www.k7mem.com/Electronic_Notebook/inductors/coildsgn.html, January 27, 2015.
- [10] วรวิทย์ ศรีทอง, การซ้อนกันแนวตั้งและแนวนอน (Vertical and Horizontal Stacking), แหล่งที่มา : http://www.hs8jyx.com/file/hs2vll_antenna_radio.pdf, 27 มกราคม 2558.
- [11] Saunders, S.R. and Arago'n-Zavala, A., 2007, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- [12] Rosenberg, P., 2011, Audel Questions and Answers for Electrician's Examinations, 15th Ed., John Wiley & Sons.
- [13] อติชาติ บัวนกียาพันธุ์, ขดลวดตัวนำในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ, แหล่งที่มา : <http://www.rmutphysics.com/CHARUD/scibook/alternate%20current1/index/index6.htm>, 20 พฤษภาคม 2558.