PTEC
ELECTRICAL AND ELECTRONIC PRODUCTS TESTING CENTER

การประชุมเชิงปฏิบัติการ

เผยแพร่ความรู้และแลกเปลี่ยนความเห็นเกี่ยวกับการออกแบบและการทดสอบสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิตอล

หลักการพื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศรับสัญญาณฯ

วิทยากร

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ

ในการอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศทุกประเภท จำเป็นต้องทราบคำนิยามของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศได้อย่างเข้าใจ โดยพารามิเตอร์บางตัวจะมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน ซึ่งจะนำมาอธิบายอย่างสมบูรณ์เฉพาะพารามิเตอร์บางตัวที่จำเป็นเท่านั้น ได้แก่

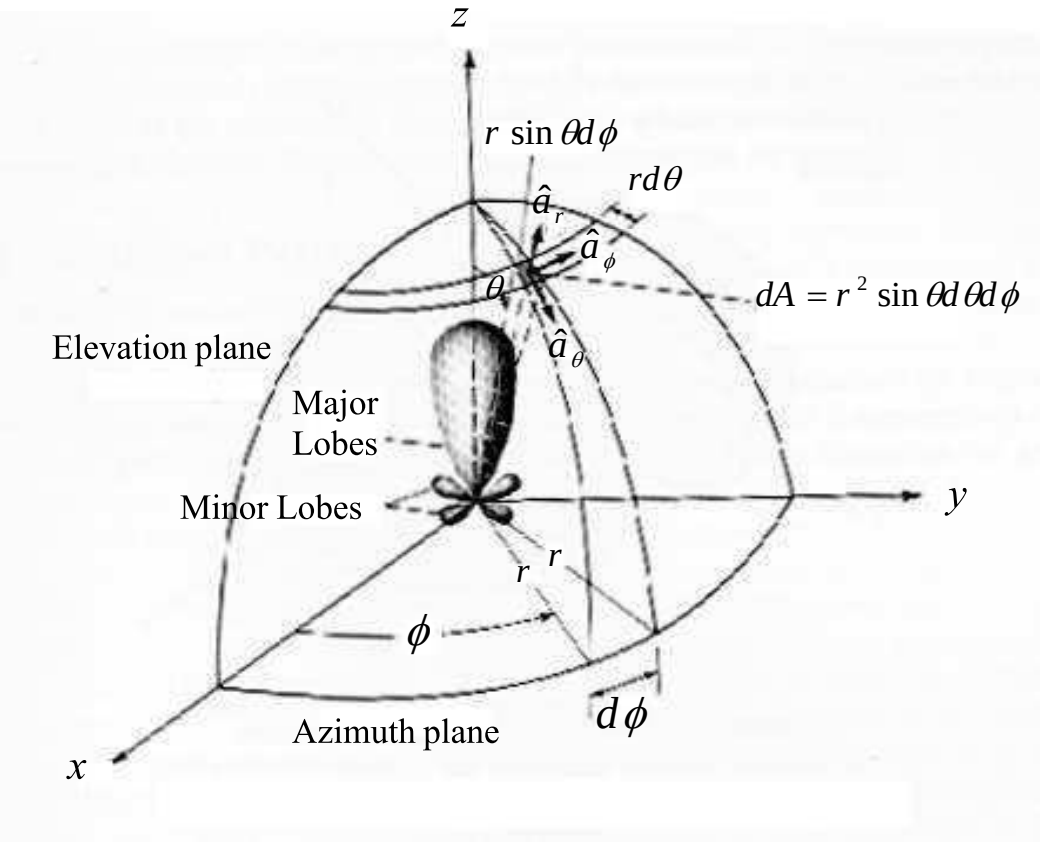
1. แบบรูปการแผ่กำลัง (Radiation Pattern/Antenna Pattern)
2. สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)
3. อัตราขยาย (Gain)
4. ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)

พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ

5. ความกว้างแถบ (Bandwidth)
6. การโพลาไรซ์/การแยกขั้วคลื่น (Polarization)
7. อิมพีแดนซ์อินพุต (Input Impedance)
8. ความยาวประสิทธิผลเชิงเวกเตอร์และพื้นที่สมมูลของสายอากาศ (Antenna Vector Effective Length and Equivalent Areas)

แบบรูปการแผ่กำลัง

การนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังของสายอากาศเชิงกราฟิกหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง (Space Coordinates)

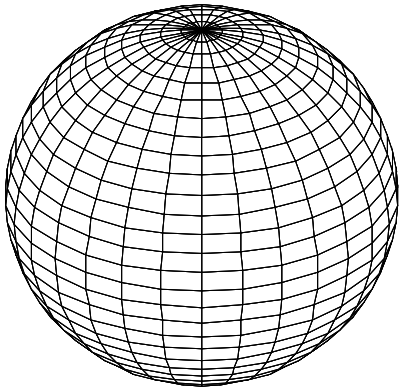


ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่คลื่นจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) และจะนำเสนอในลักษณะฟังก์ชันของพิกัดเชิงทิศทาง (Directional Coordinates) เสมอ

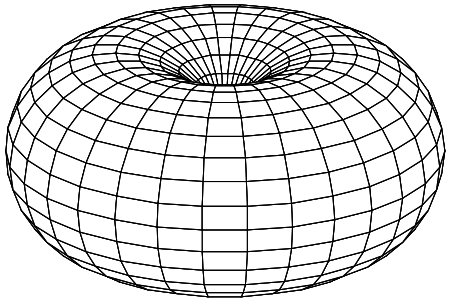
(ภาพจาก : Antenna Theory (3rd ed.) , C.A.Balanis)

แบบรูปการแผ่กำลัง

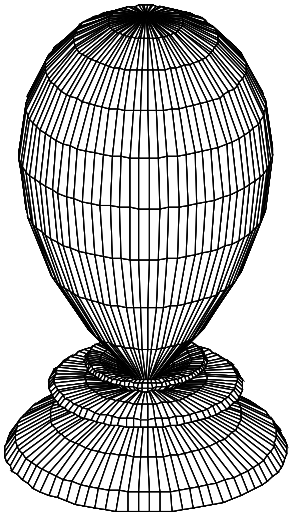
แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศมี 3 ลักษณะ



Isotropic Pattern

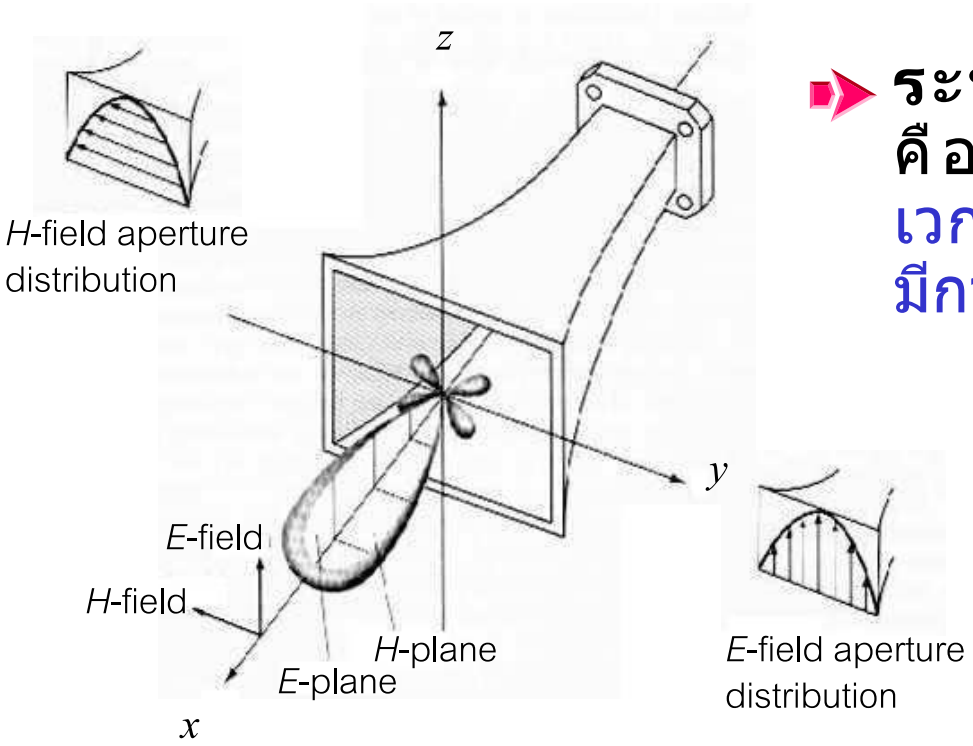


Omnidirectional Pattern



Directional Pattern

แบบรูปการแผ่กำลัง



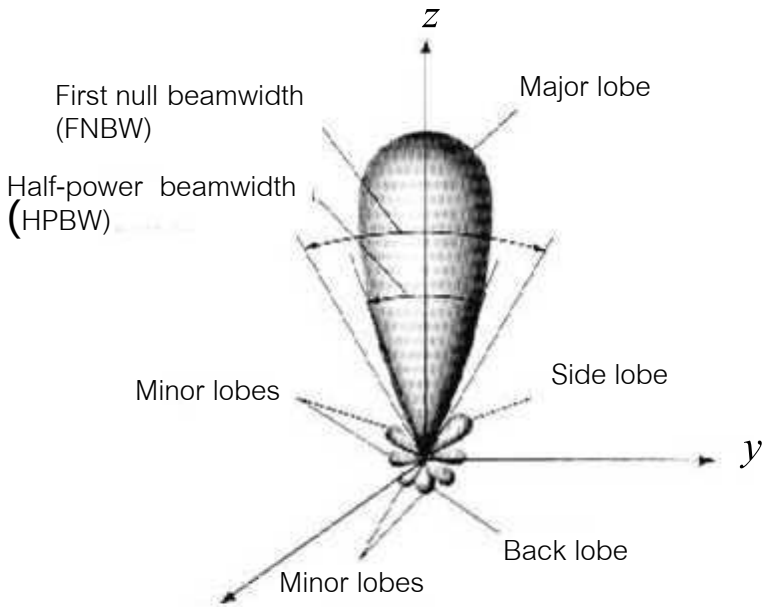
Principal Patterns

(ภาพจาก : Antenna Theory (3rd ed.) , C.A.Balanis)

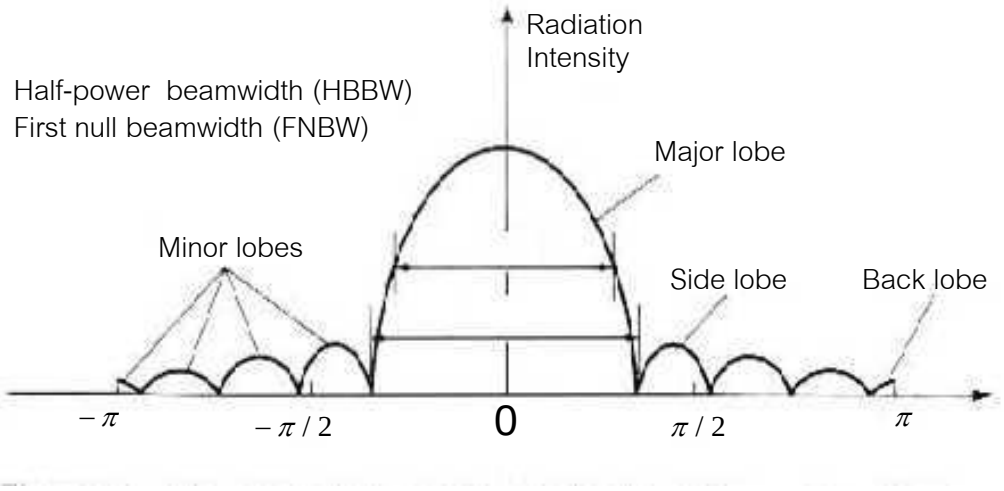
- **ระนาบสนามไฟฟ้า** (E-plane) คือ "ระนาบที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางที่มีการแผ่คลื่นสูงสุด"

- **ระนาบสนามแม่เหล็ก** (H-plane) คือ "ระนาบที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางที่มีการแผ่คลื่นสูงสุด"

แบบรูปการแผ่กำลัง



แสดงโหลบการแผ่กำลังและความกว้างลำของแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศ



ภาพพล็อตแบบลิเนียร์ของแบบรูปการแผ่กำลังและโหลบที่เกิดขึ้นและความกว้างลำของแบบรูปการแผ่กำลัง

(ภาพจาก : Antenna Theory (3rd ed.) , C.A.Balanis)

สภาพเจาะจงทิศทาง

สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ คือ อัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางนั้นๆ เทียบกับค่าความเข้มการแผ่พลังงานที่เฉลี่ยออกไปทุกทิศทาง โดยทั่วไปจะมีการกำหนดสภาพเจาะจงทิศทางในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานสูงสุดเสมอ

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

ถ้าไม่มีการกำหนดทิศทางให้ จะถือว่าทิศทางที่มีความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานสูงที่สุด คือสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum Directivity) ที่ต้องการหา นั่นคือ

$$D_{\max} = D_o = \frac{U_{\max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}}$$

สภาพเจาะจงทิศทาง

โดยที่ D คือ สภาพเจาะจงทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

D_o คือ สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (ไม่มีหน่วย)

U คือ ความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงาน มีหน่วยเป็น W/unit solid angle

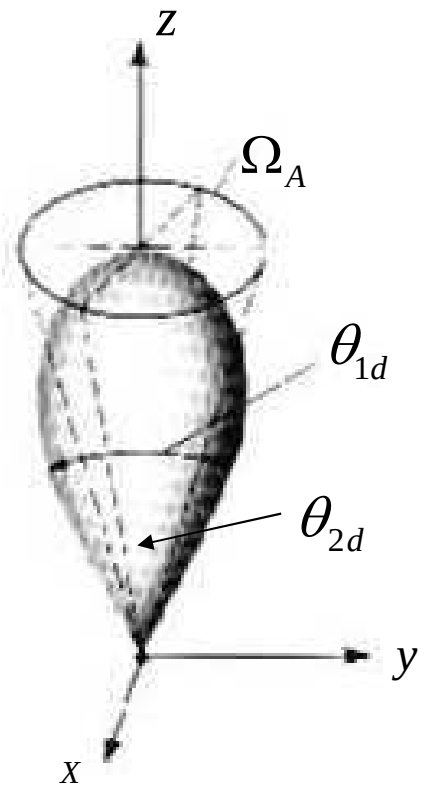
U_{max} คือ ความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุด มีหน่วยเป็น W/unit solid angle

U_o คือ ความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานของแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก มีหน่วยเป็น W/unit solid angle

P_{rad} คือ กำลังงานรวมของการแผ่กระจายกำลังงาน มีหน่วยเป็น W

"สำหรับแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก จะมีสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับหนึ่ง เนื่องจาก U, U_{max} *และ* U_o *ต่างก็มีค่าเท่ากัน"*

สภาพเจาะจงทิศทาง

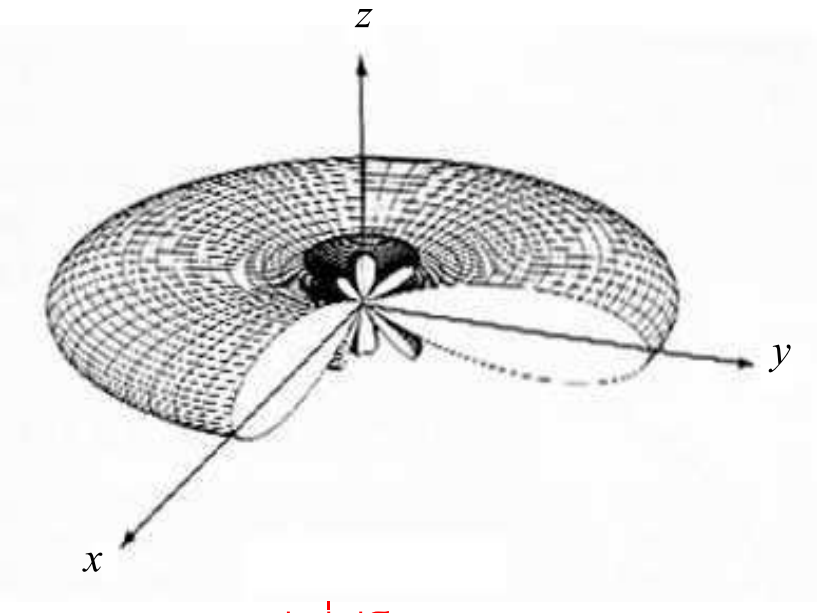


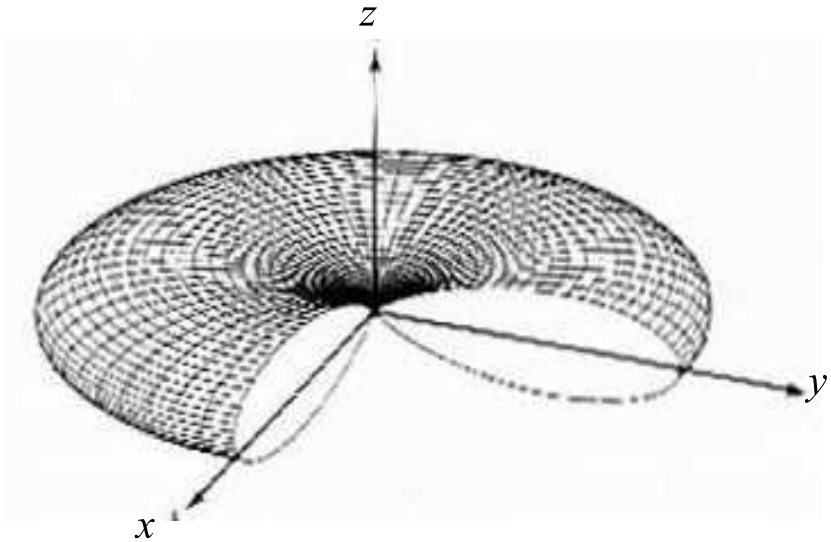
ในทางปฏิบัติมักใช้การคำนวณแบบประมาณการ ซึ่งสามารถหาผลเฉลยได้อย่างรวดเร็วและให้ค่าของผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าจริงที่คำนวณได้จากสมการทางทฤษฎี โดยคำนวณจากค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังทั้งสองระนาบที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal-plane HPBW) ของแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศที่วัดทดสอบมาได้ โดยใช้สมการ

$$D_0 \approx \frac{22{,}181\left(180/\pi\right)^2}{\Theta_{1d}^2 + \Theta_{2d}^2} = \frac{72{,}815}{\Theta_{1d}^2 + \Theta_{2d}^2}$$

(ภาพจาก : Antenna Theory (3rd ed.) , C.A.Balanis)

สภาพเจาะจงทิศทาง





กรณีที่มีโหลบย่อย

กรณีที่ไม่มีโหลบย่อย

$$D_0 = \frac{101}{\text{HPBW(degrees)} - 0.0027\left[\text{HPBW}\left(\text{degrees}\right)\right]^2}$$

$$D_0 = -172.4 + 191\sqrt{0.818 + 1/\text{HPBW}\left(\text{degrees}\right)}$$

(ภาพจาก : Antenna Theory (3rd ed.) , C.A.Balanis)

อัตราขยาย

อัตราขยายสัมบูรณ์ (Absolute Gain) ของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่กำลัง $U(\theta,\varphi)$ ที่แผ่ออกไปในทิศทางที่กำหนดให้ เทียบกับค่าความเข้มของกำลัง P_{in} ที่ป้อนให้กับสายอากาศ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

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

อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้เทียบกับอัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว

อัตราขยายกับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ คือ

$$G(\theta,\phi) = e_{cd} D(\theta,\phi)$$

หมายเหตุ e_{cd} คือ ประสิทธิภาพในการแผ่กำลังของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ซึ่งถูกกำหนดว่า เป็นอัตราขยายที่ไม่รวมค่าการสูญเสียซึ่งเกิดจากการไม่แมตช์ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance Mismatch) หรือการสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection Loss) และการไม่แมตช์จากการแยกขั้วคลื่น (Polarization Mismatch)

ในทางปฏิบัติสายอากาศจำนวนมากสามารถประมาณค่าอัตราขยายได้โดยใช้สูตร

$$G_0 \approx \frac{30,000}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}}$$

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) หมายถึง ในระนาบหนึ่งๆ ที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุด และมีมุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทางในที่ซึ่งความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานมีค่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดของมัน และคำว่า Beamwidth มักจะใช้อธิบายถึงความกว้างลำคลื่นที่มีค่า 3 dB เสมอ (3-dB Beamwidth)

ความกว้างแถบ

ความกว้างแถบ (Bandwidth) ของสายอากาศหมายถึง ช่วงของความถี่ที่ยังอยู่ภายในสภาวะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ดี สภาวะดังกล่าวพิจารณาจากคุณลักษณะบางตัวของสายอากาศและให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

- กรณี สายอากาศแถบกว้าง (Broadband Antenna) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศสามารถทำงานได้

  ตัวอย่าง ความกว้างแถบ 10 :1 แสดงว่าความถี่สูงสุดมีค่ามากกว่าความถี่ต่ำสุดอยู่ 10 เท่า

- กรณี สายอากาศแถบแคบ (Narrowband Antenna) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของ เปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่ (ความถี่สูงสุดลบต่ำสุด) เมื่อเทียบกับความถี่กลางของความกว้างแถบ

  ตัวอย่าง ความกว้างแถบ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้มีค่าเป็น 5% ของความถี่กลางของความกว้างแถบ

ความกว้างแถบ

เนื่องจากคุณลักษณะของสายอากาศ เช่น อิมพีแดนซ์อินพุต แบบรูป อัตราขยาย การแยกขั้วคลื่น ฯลฯ ที่ถูกใช้ในการพิจารณาความกว้างแถบ ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงหรือมีผลต่อความถี่เหมือนกัน จึงไม่มีการกำหนดคุณลักษณะโดยเฉพาะเพื่อนำมาหาความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศ ดังนั้นวิธีการกำหนดแถบความกว้าง จึงมักจะแบ่งตามกลุ่มของคุณลักษณะต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณา ได้แก่

- ความกว้างแถบจากแบบรูป (Pattern Bandwidth) เป็นความกว้างแถบที่พิจารณาจากผลที่เกิดจากแบบรูปการแผ่กำลัง เช่น อัตราขยาย ระดับของโหลบด้านข้าง ความกว้างลำคลื่น การแยกขั้วคลื่น และทิศทางของลำคลื่น เป็นต้น
- ความกว้างแถบจากค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance Bandwidth) เป็นความกว้างแถบที่พิจารณาจากผลที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่อินพุต เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S11) และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) เป็นต้น

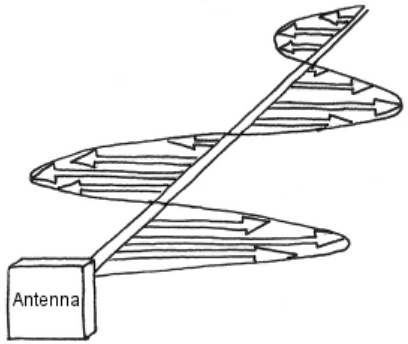
การโพลาไรซ์หรือการแยกขั้วคลื่น

"ในทางธรรมชาติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกจากสายอากาศของสถานีโทรทัศน์ไม่ว่าจะเป็นระบบแอนะล็อกหรือดิจิตอลก็ตาม หากต้องการให้เครื่องรับโทรทัศน์สามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด จะต้องให้โพลาไรซ์ของสายอากาศของเครื่องรับอยู่ในทิศทางเดียว กับโพลาไรซ์ของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศของสถานีส่ง"

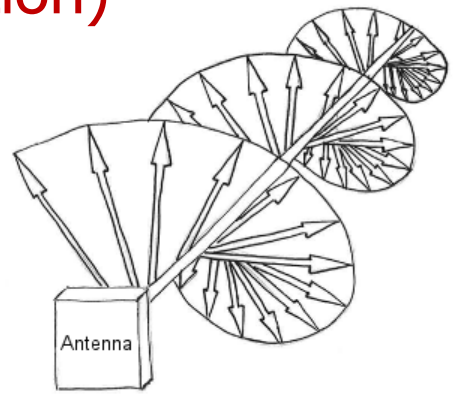
ปัจจุบันสถานีโทรทัศน์นิยมใช้สายอากาศที่มีโพลาไรซ์ของคลื่นเป็นแบบ

1. โพลาไรซ์แบบเส้นตรงในแนวนอน (Linearly Horizontal Polarization)***
2. โพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization)

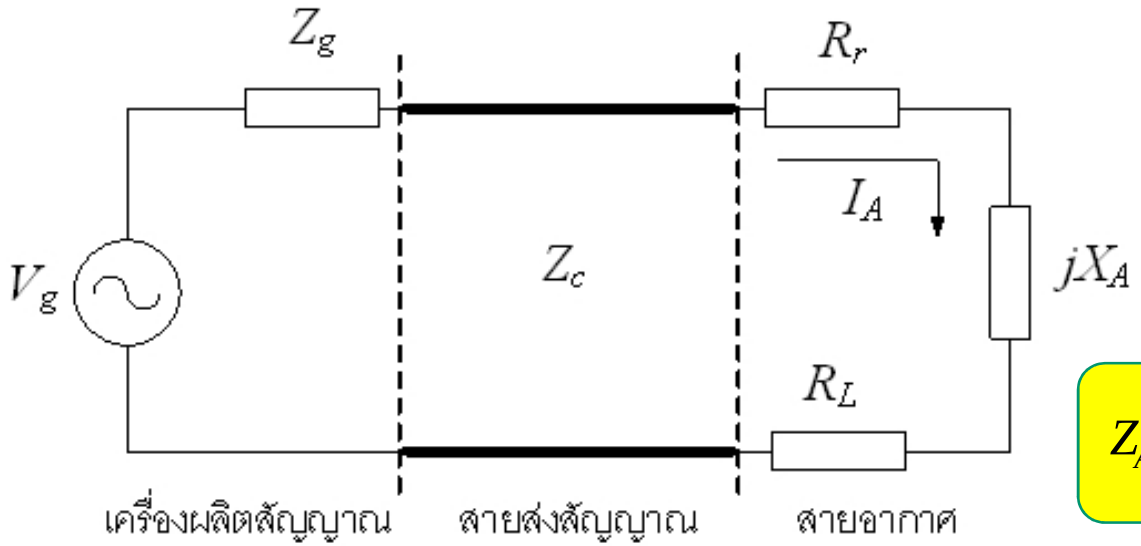
(1)



(2)



ค่าอิมพีแดนซ์อินพุต



$$Z_A = (R_r + R_L) + jX_A$$

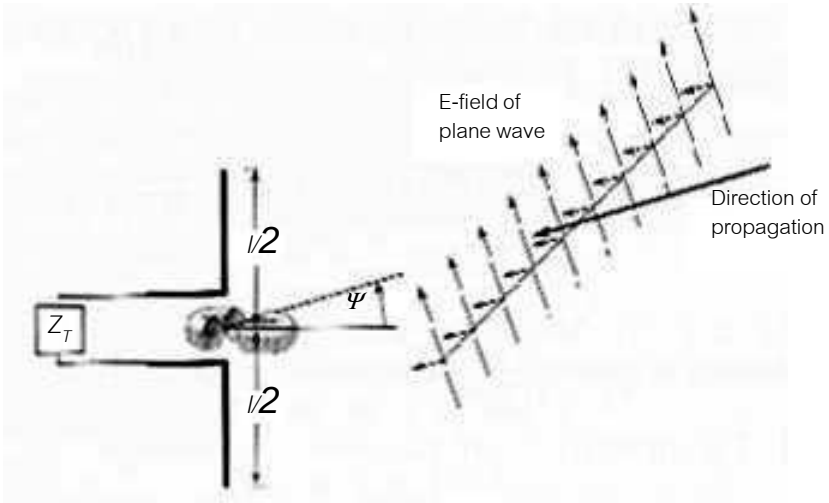
R_r คือ ความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation Resistance) ของสายอากาศ

R_L คือ ความต้านทานการสูญเสีย (Loss Resistance) ซึ่งเกิดจากค่าการสูญเสียของตัวนำและไดอิเล็กตริก

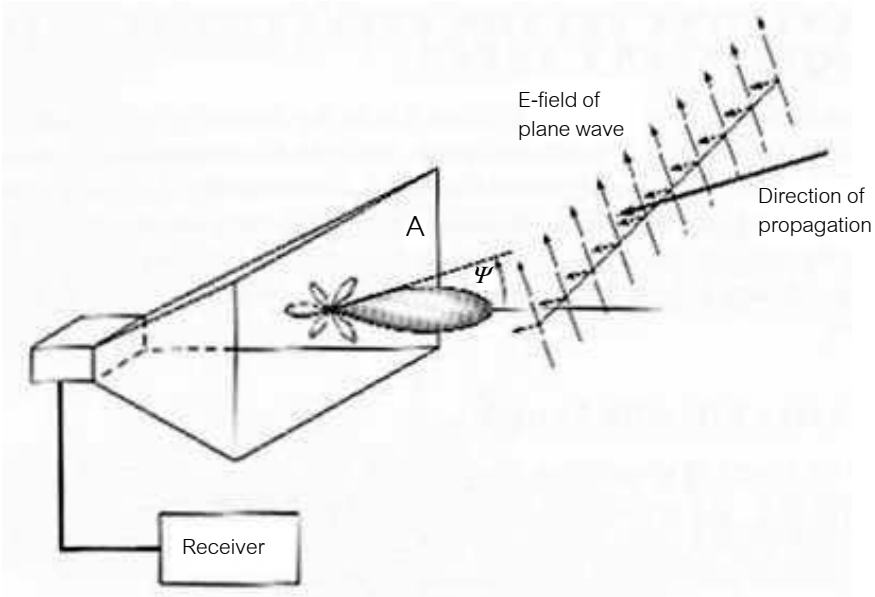
jX_A คือ รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของสายอากาศ

ความยาวประสิทธิผลเชิงเวกเตอร์และพื้นที่สมมูล

ค่าความยาวประสิทธิผลและค่าพื้นที่สมมูลย์ของสายอากาศ (Effective Length & Equivalent Area) ได้ถูกนำมาใช้อธิบายคุณลักษณะในการรับคลื่นของสายอากาศเมื่อมีคลื่นมาตกกระทบ



สายอากาศไดโพลในโหมดของการรับ



สายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ในโหมดของการรับ

(ภาพจาก : Antenna Theory (2nd ed.) , C.A.Balanis)

ความยาวประสิทธิผลเชิงเวกเตอร์และพื้นที่สมมูลย์

ค่าความยาวประสิทธิผล จะใช้ในการพิจารณาสายอากาศในโหมดของการส่งและการรับ และจะถูกใช้ประโยชน์โดยเฉพาะในการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันขณะวงจรเปิด V_{oc} ของสายอากาศภาครับ ความสัมพันธ์นี้แสดงได้ด้วยสมการ

$$V_{oc} = \mathbf{E}^{i} \cdot \ell_{e}$$

โดยที่ V_{oc} คือ ค่าแรงดันขณะวงจรเปิดที่ขั้วอินพุตของสายอากาศ

$\mathbf{E}^{i}$ คือ สนามไฟฟ้าที่พุ่งกระทบสายอากาศ

ℓ_{e} คือ ค่าความยาวประสิทธิผล

พื้นที่จับคลื่น (Capture Area) คือ พื้นที่สมมูลย์ของสายอากาศซึ่งเมื่อคูณด้วยค่าความหนาแน่นของกำลังงานที่พุ่งกระทบ จะเท่ากับกำลังงานรวมที่สายอากาศสามารถจับคลื่นเข้ามาได้ มีค่าเท่ากับ

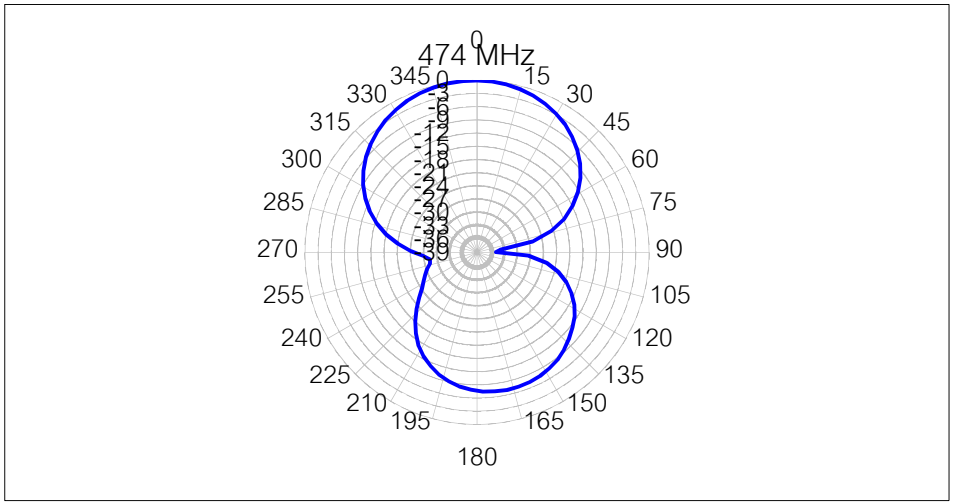
Capture Area = Effective Area + Scattering Area + Loss Area

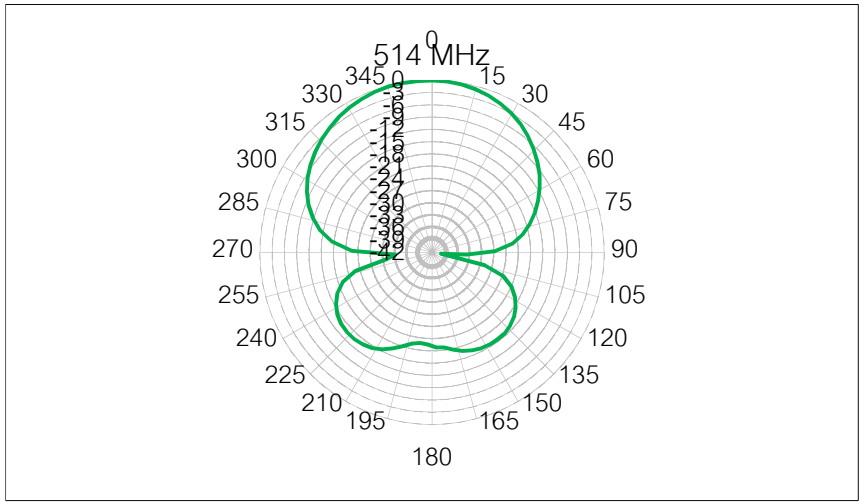
ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ

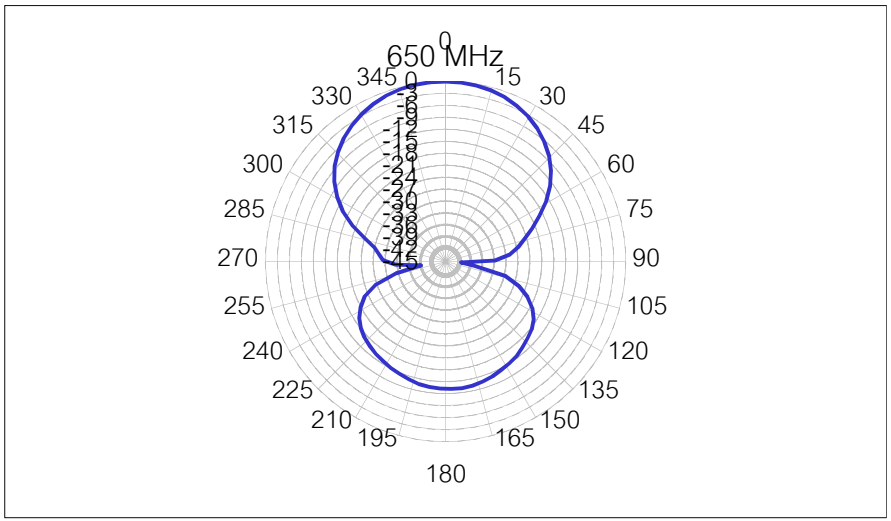
ลำดับ	สายอากาศยี่ห้อ/รุ่น	ความถี่ทดสอบ	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (dB)	มุมที่เกิดค่าสูงสุด (องศา)	อัตราส่วน F/B E-plane/H-plane (dB)
1	สายอากาศ A	474 MHz	5.12	0	7.40/4.76
		514 MHz	4.67	0	18.76/15.29
		650 MHz	7.10	0	13.12/10.70
		786 MHz	7.87	+15	10.77/8.67
2	สายอากาศ B	474 MHz	5.60	180	1.43/2.06
		514 MHz	5.84	+5	8.08/9.32
		650 MHz	7.73	0	15.17/12.04
		786 MHz	5.12	-10	10.31/9.87

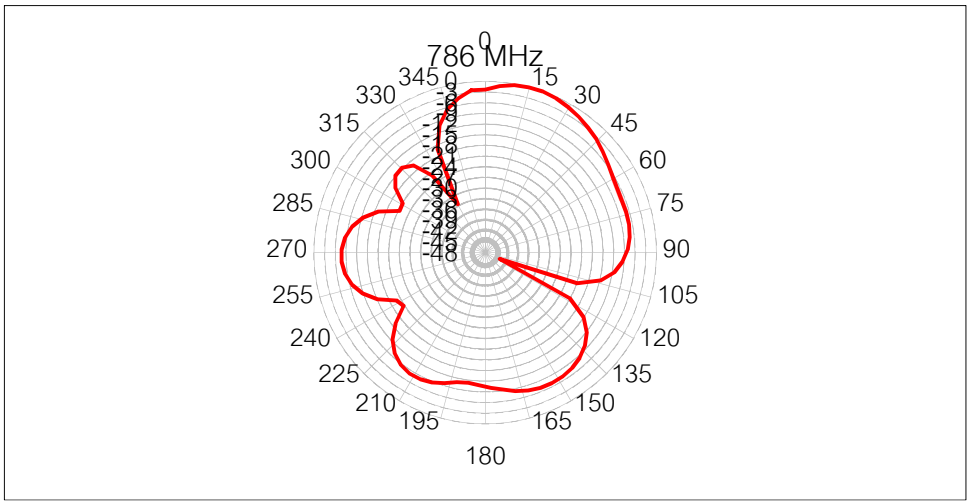
ผลการวัดทดสอบค่า Maximum Directivity และ F/B Ratio

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



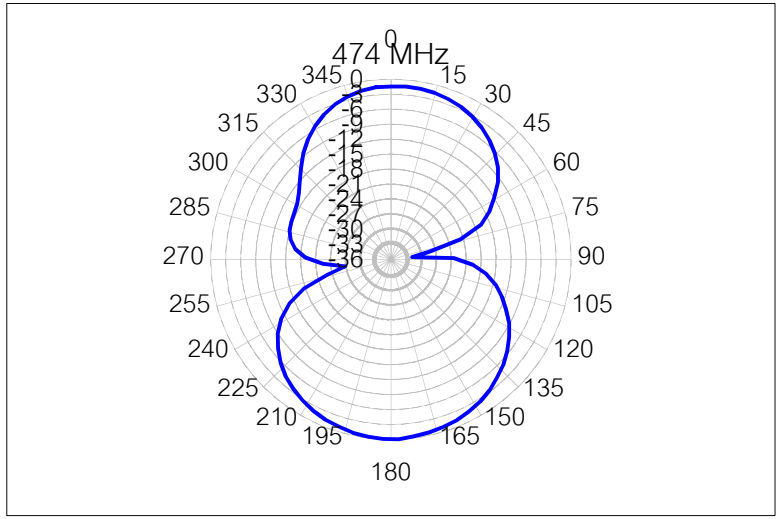


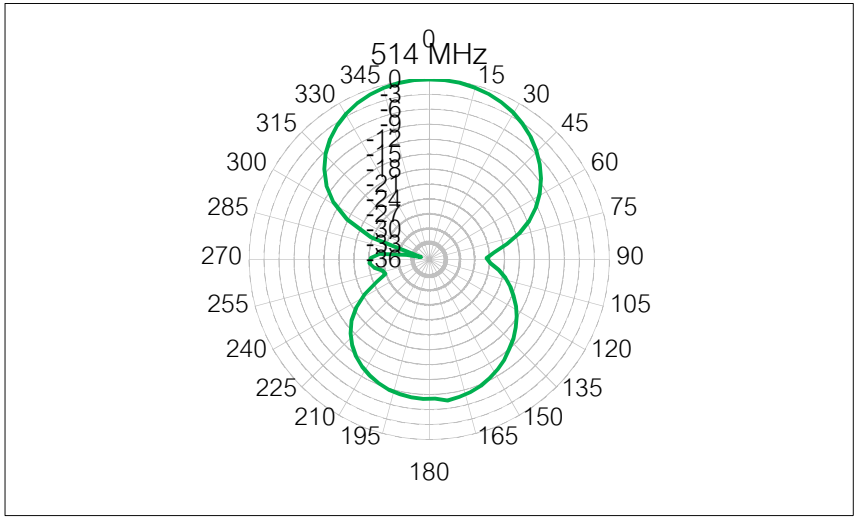


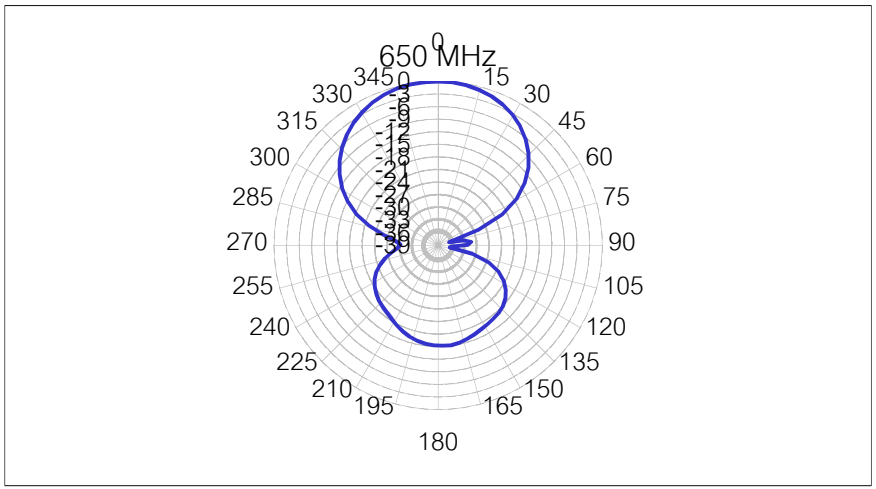


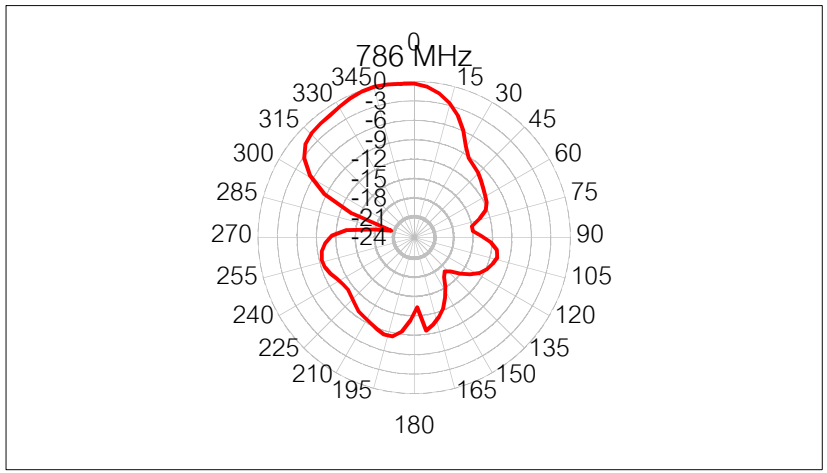
ผลการวัดทดสอบ Radiation Patterns ในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศ A

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



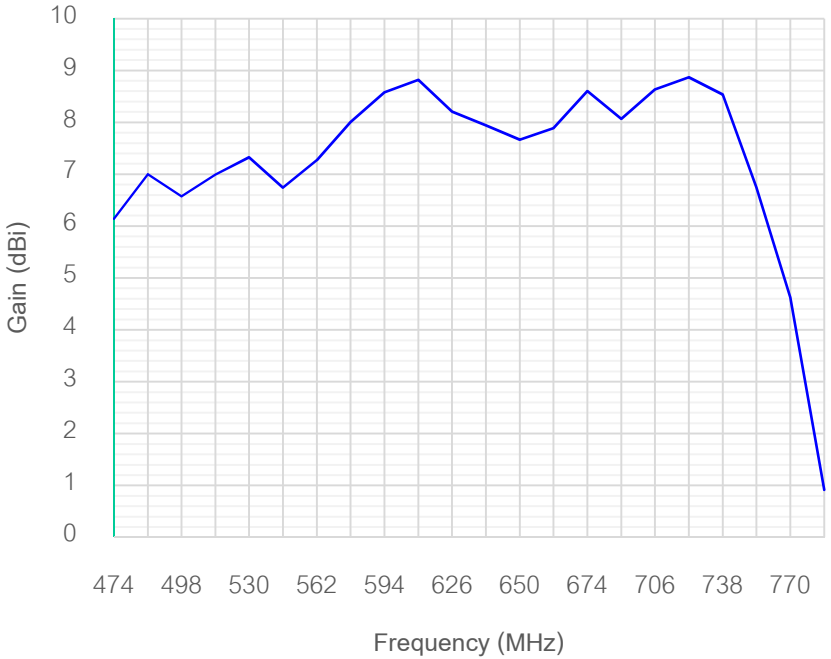




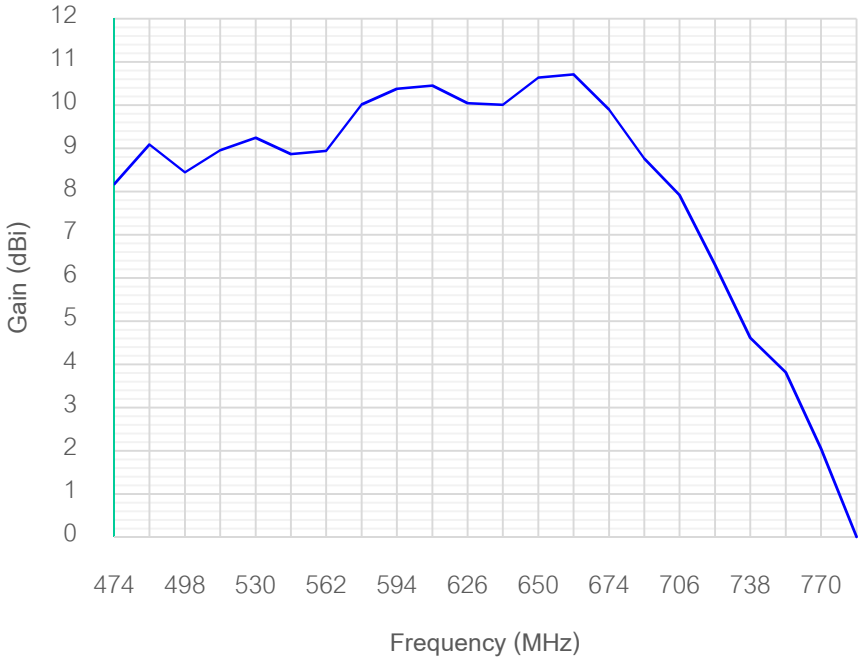


ผลการวัดทดสอบ Radiation Patterns ในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศ B

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



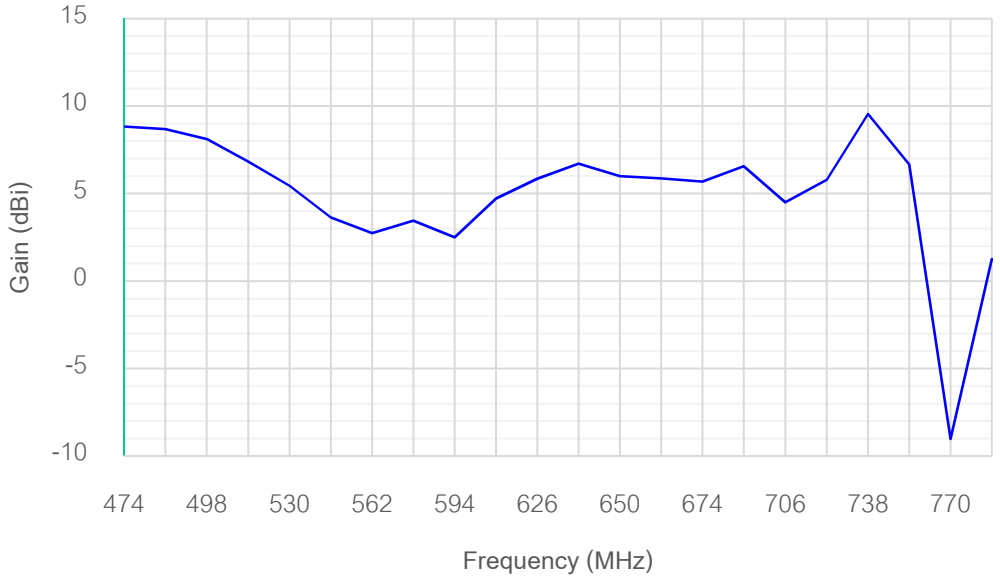
สายอากาศ C



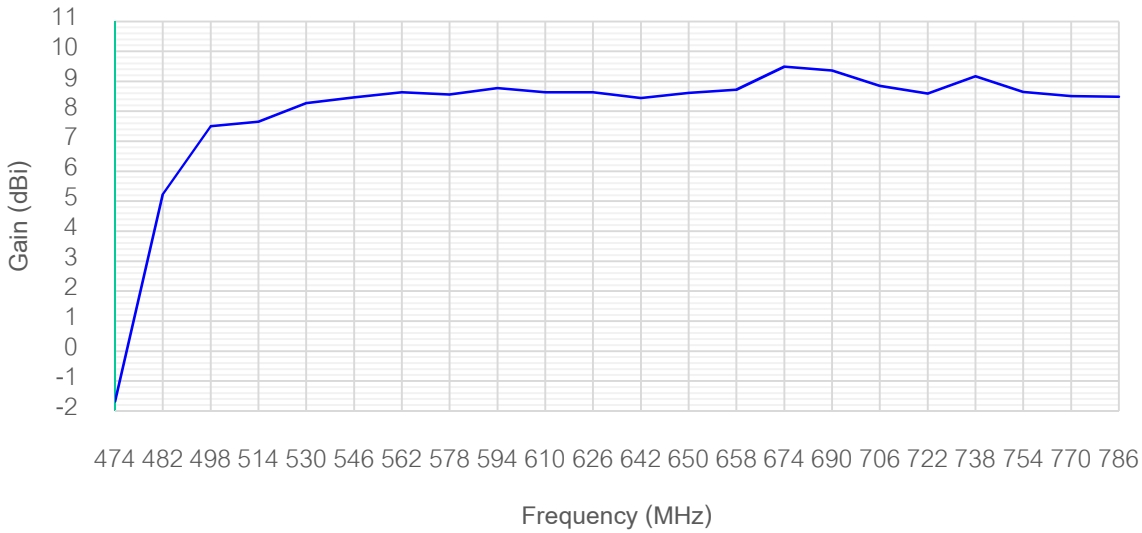
สายอากาศ D

ผลการวัดทดสอบ Antenna Gain ในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศตัวอย่าง

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



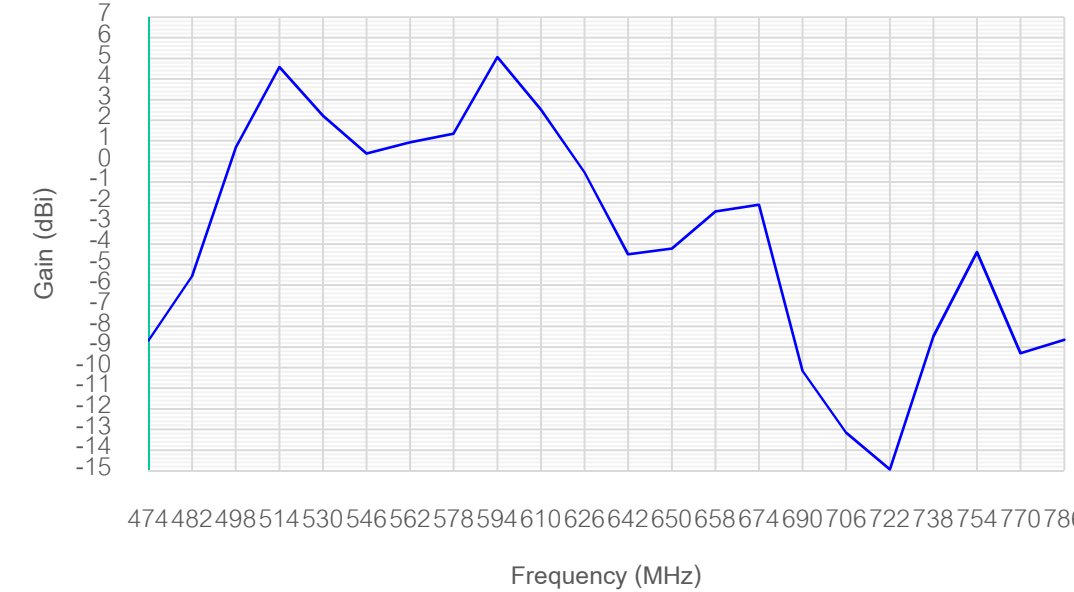
สายอากาศ E



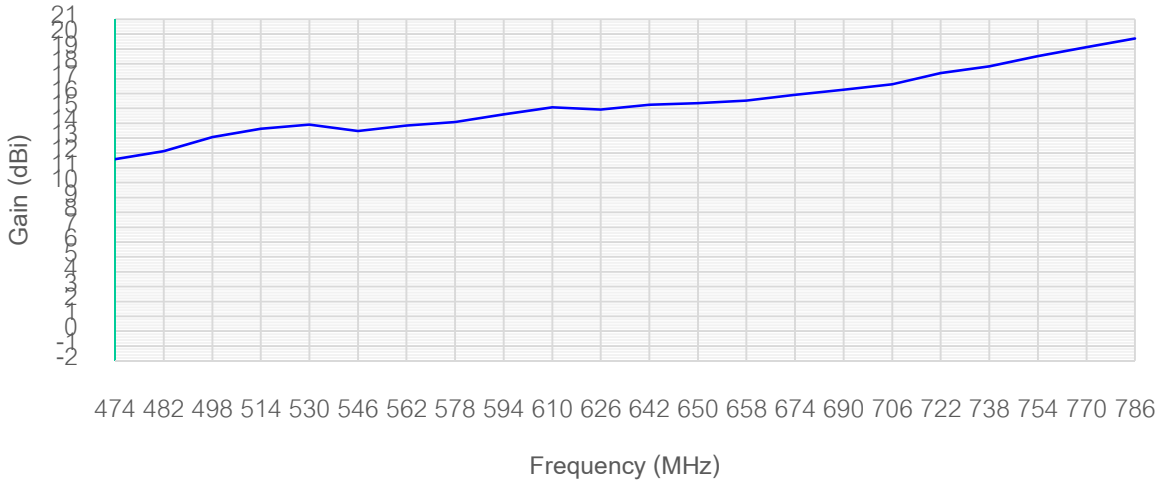
สายอากาศ F

ผลการวัดทดสอบ Antenna Gain ในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศตัวอย่าง

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



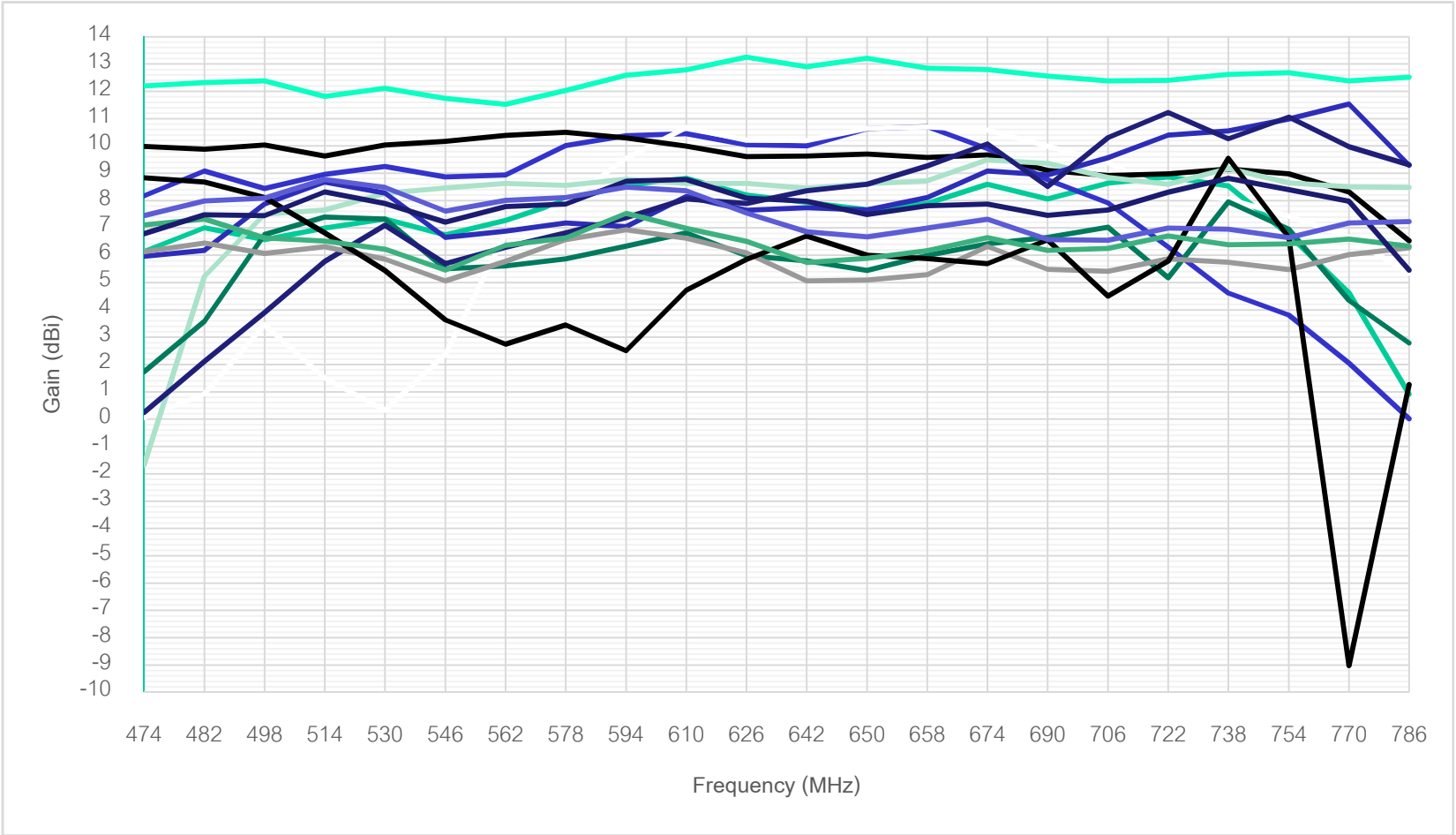
สายอากาศ G



สายอากาศ H

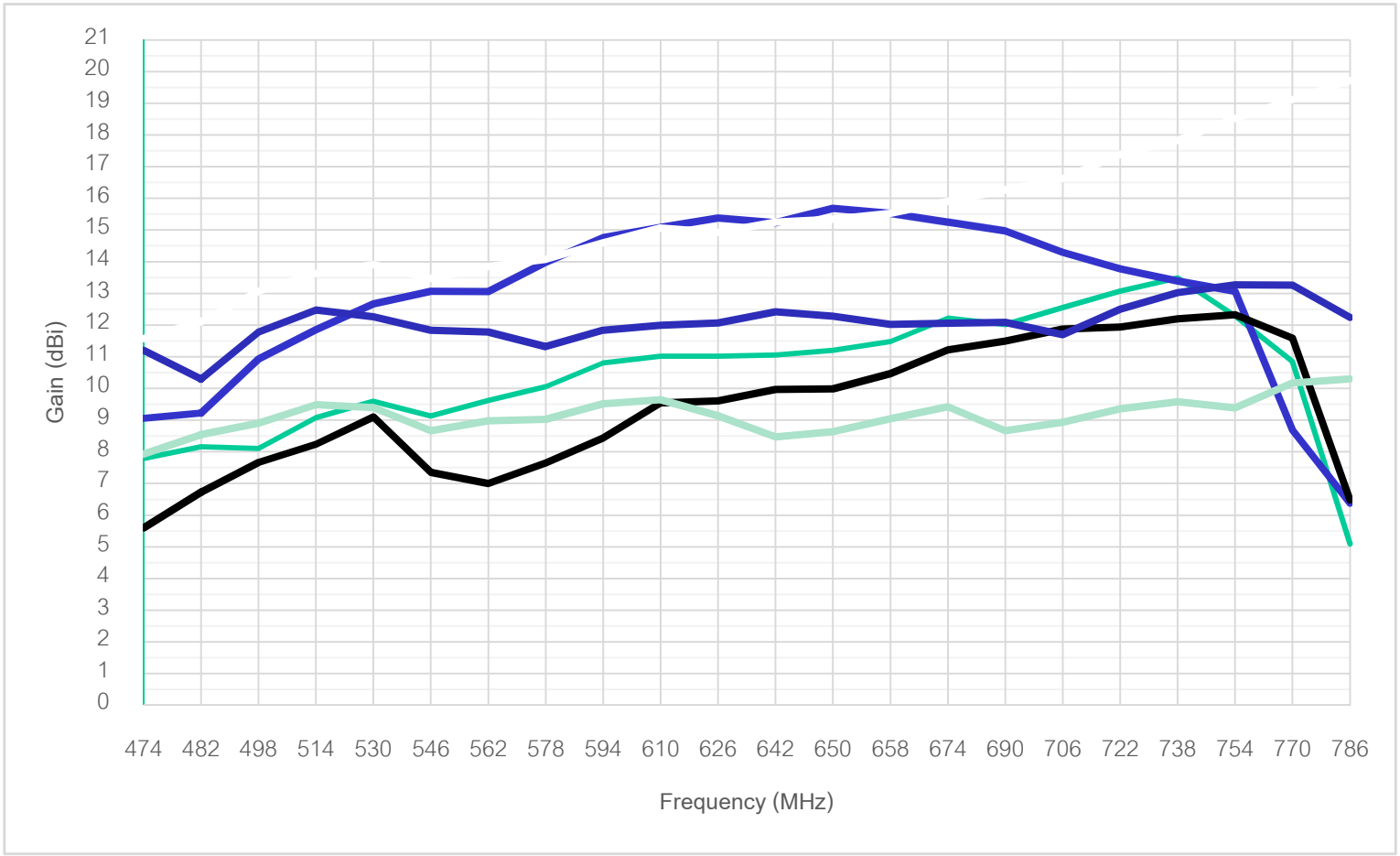
ผลการวัดทดสอบ Antenna Gain ในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศตัวอย่าง

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



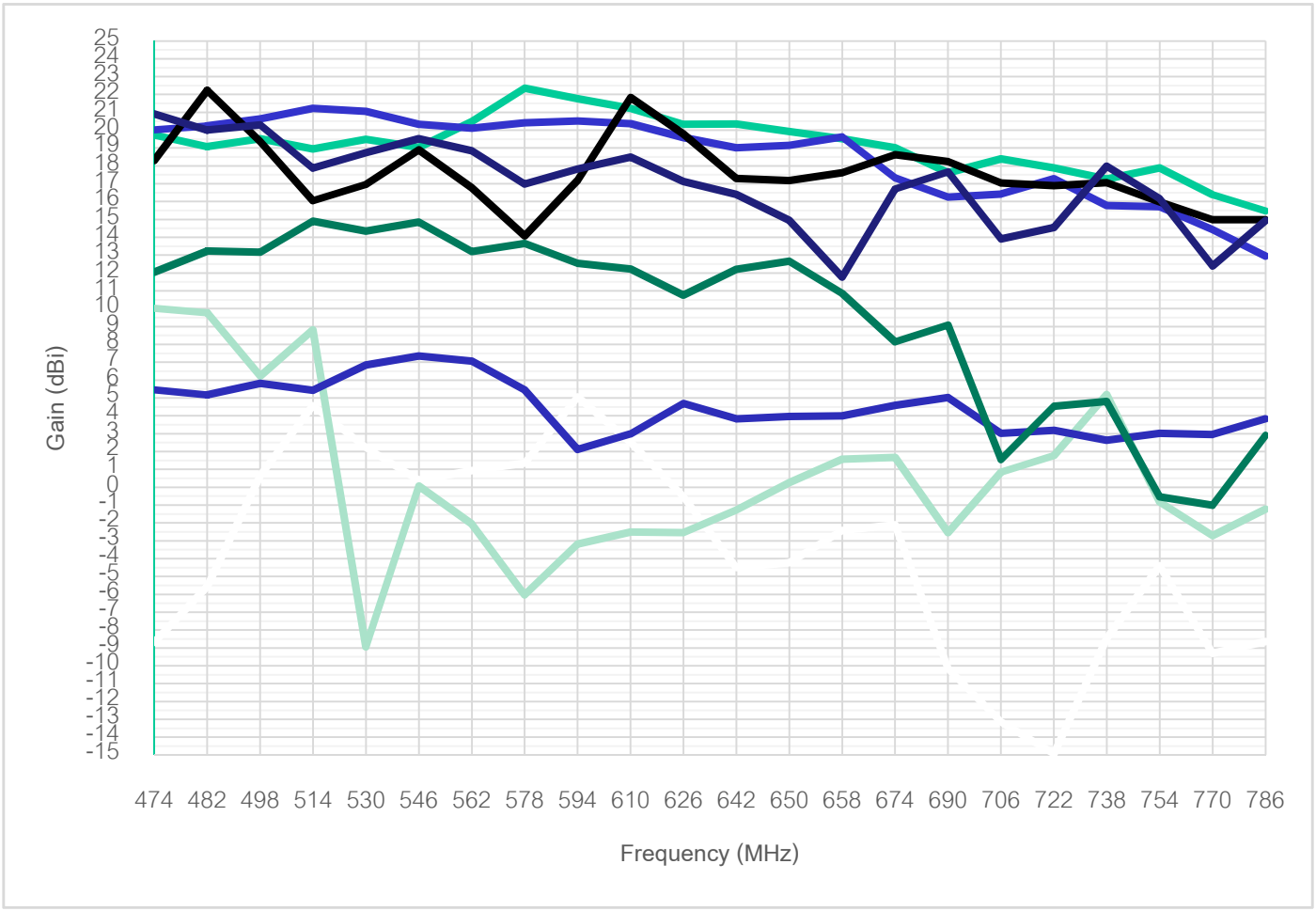
ผลการวัดทดสอบ Antenna Gain ในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศตัวอย่าง กลุ่ม 5E-9E

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



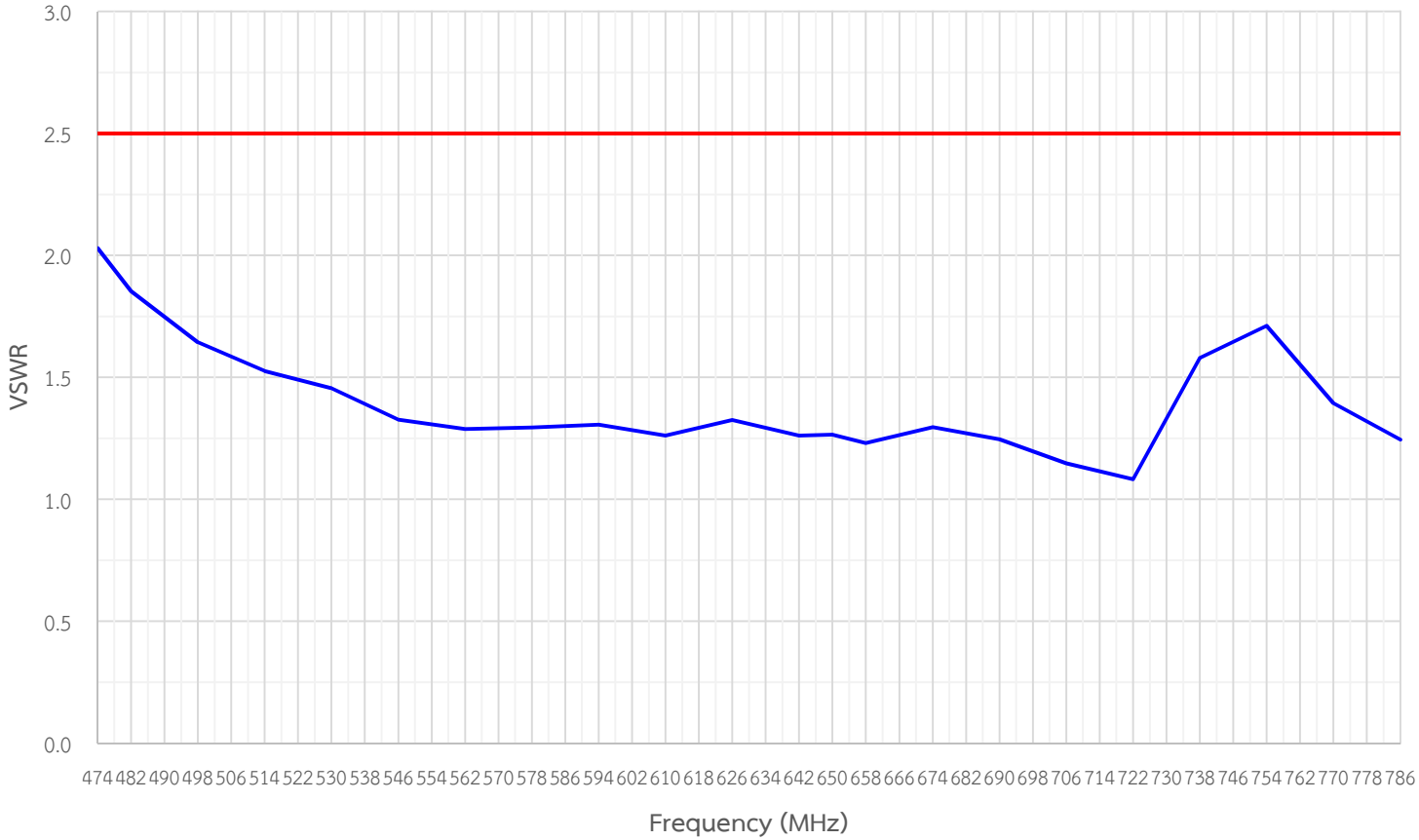
ผลการวัดทดสอบ Antenna Gain ในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศตัวอย่าง กลุ่ม 13E – 15 E

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



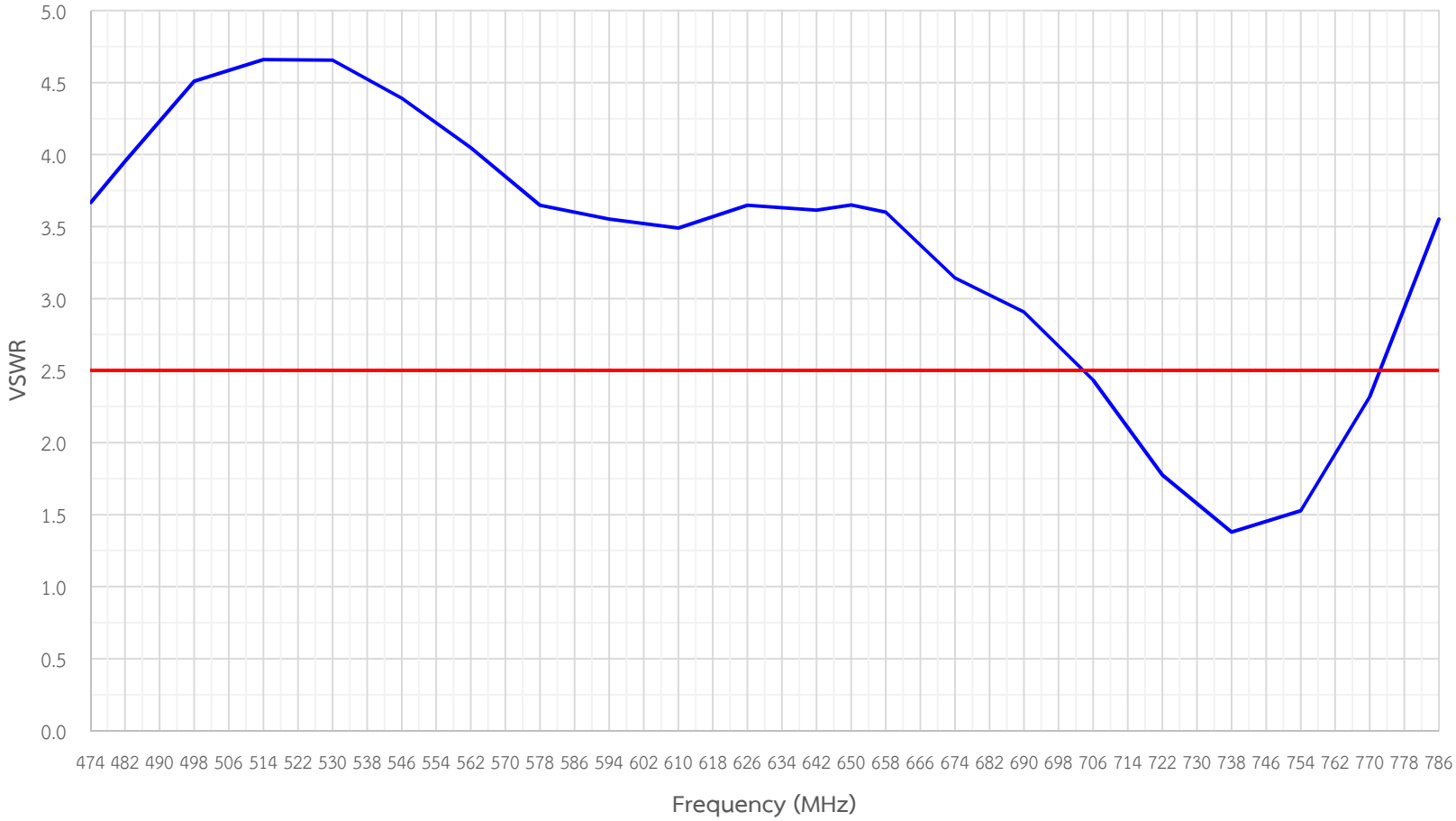
ผลการวัดทดสอบ Antenna Gain ในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศตัวอย่าง กลุ่ม Active Antennas

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



ผลการวัดทดสอบ VSWR ของสายอากาศ I

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ



ผลการวัดทดสอบ VSWR สายอากาศ J

ขอบคุณมากครับ
ที่ทุกท่านให้ความสนใจ

"ทำงานเพื่อตอบแทนคุณแผ่นดินและพระคุณครูบาอาจารย์"

E-mail: rangsan@sut.ac.th

ID-Line: rwongsan64

FB Group: Antenna KM (Knowledge Management)