

บทที่ 5

ผลการจำลองแบบและการวัดผล

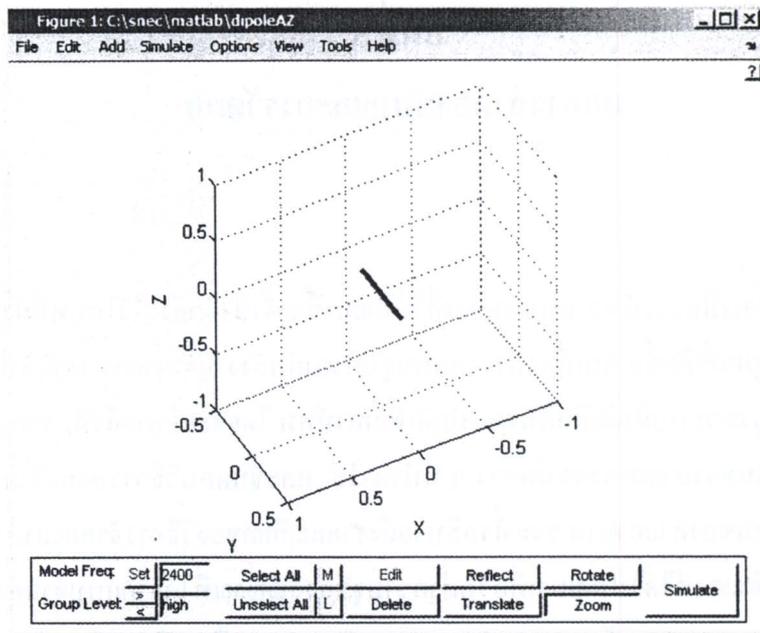
5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเอาแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา ทำการจำลองแบบเพื่อดูผลที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศชนิดต่าง ๆ กับความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพล็กซ์-มัลติเพล็กซ์ โดยจะอธิบายถึงที่มาของข้อมูลแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้ และขั้นตอนวิธีการทำออร์มอลไลซ์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ รวมทั้งอธิบายถึงรายละเอียดของวิธีการจำลองแบบ จากนั้นจะเป็นการนำแบบจำลองที่ได้ไปพัฒนาเพื่อวัดค่าความจุช่องสัญญาณที่ได้จากแบบจำลองโดยการใส่เครื่องมือวัดในสภาวะแวดล้อมภายนอกและภายในอาคารเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองแบบ และการวัดผล

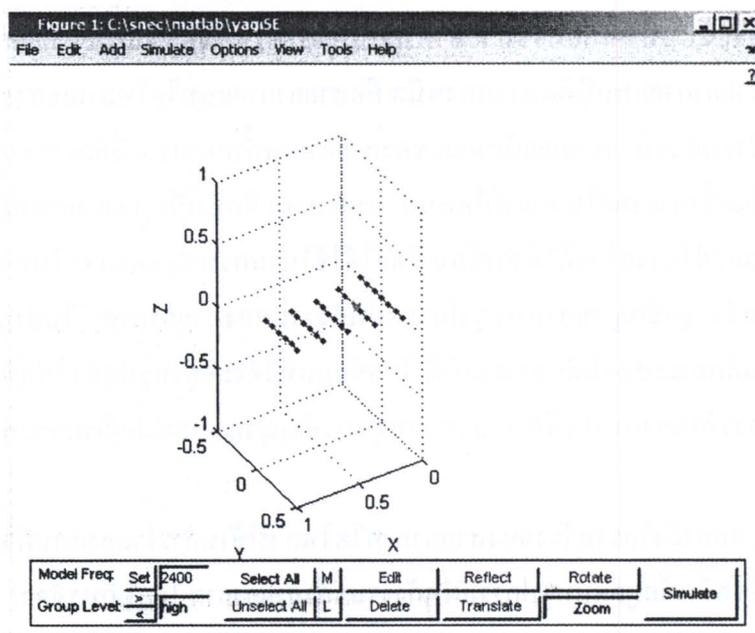
5.2 ข้อมูลแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศ

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแบบไอโซทรอปิก เป็นสายอากาศอ้างอิง โดยเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบมีทิศทางสองชนิด คือสายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศแบบยาแกวค้ำห้อยประกอบ เนื่องจากคุณลักษณะของสายอากาศทั้งสองแบบ มีอัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่นครั้งกำลังอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างเหมาะสม อีกทั้งเป็นสายอากาศที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง และมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน โดยได้ใช้โปรแกรม SuperNEC ในการจำลองผลสายอากาศ เพื่อสร้างชุดข้อมูลของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ในย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ทั้งในลักษณะสองมิติและสามมิติ โดยข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของไฟล์ข้อมูล ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการจำลองแบบ เพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพล็กซ์-มัลติเพล็กซ์ต่อไป

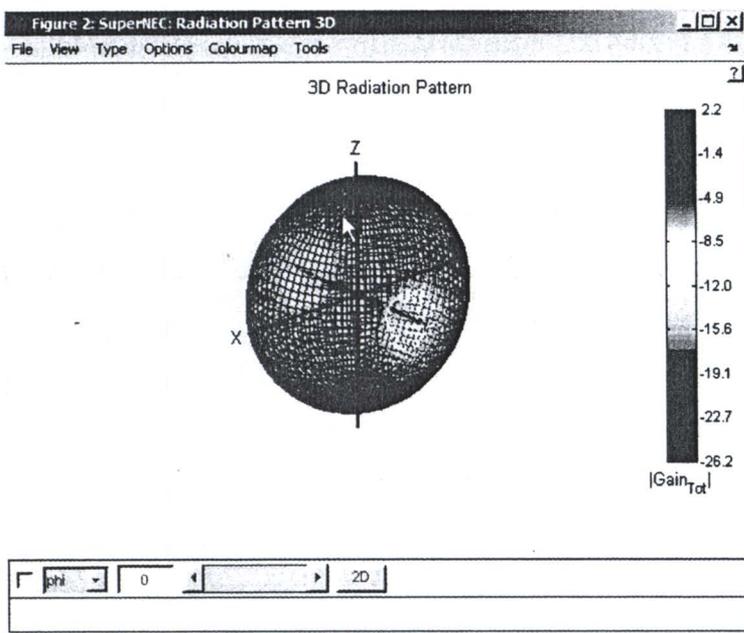
รูปที่ 5.1 แสดงถึงโครงสร้างของสายอากาศไดโพล ที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC เพื่อใช้สร้างข้อมูลแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ โดยให้การจัดวางสายอากาศวางอยู่ในระนาบแนวนอน และทำนองเดียวกันสำหรับสายอากาศแบบยาแกวค้ำห้อยประกอบ สามารถสร้างโครงสร้างสายอากาศโดยให้วางในระนาบแนวนอนเช่นเดียวกันกับสายอากาศไดโพล ดังรูปที่ 5.2 โดยหลังจากทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC แล้ว จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในลักษณะสามมิติ ซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 5.3 สำหรับสายอากาศไดโพล และในรูปที่ 5.4 สำหรับสายอากาศแบบยาแกวค้ำห้อยประกอบ



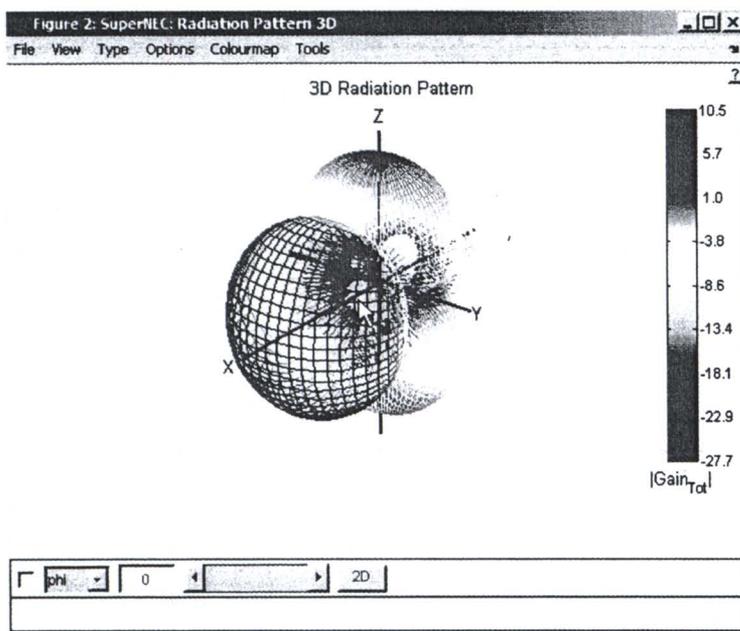
รูปที่ 5.1 โครงสร้างสายอากาศไดโพลจากโปรแกรม SuperNEC



รูปที่ 5.2 โครงสร้างสายอากาศยาคูตะห้ำองค้ประกอบจากโปรแกรม SuperNEC



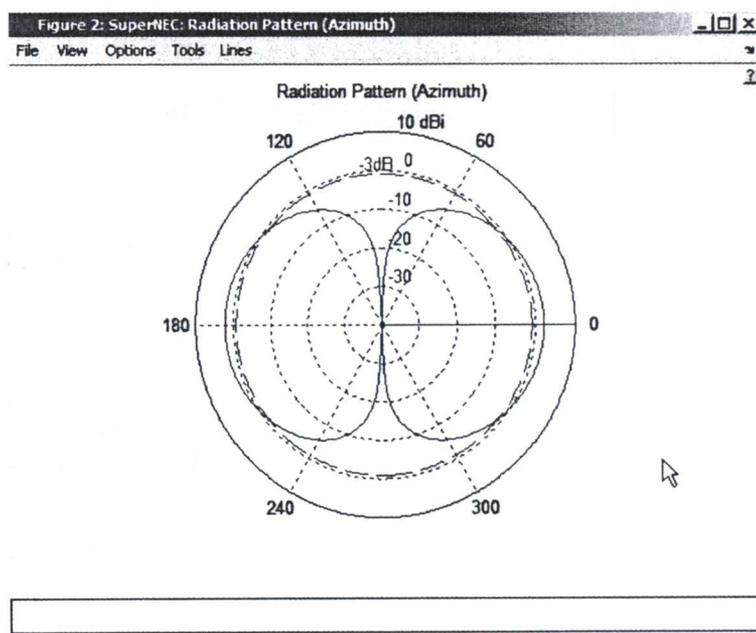
รูปที่ 5.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบไดโพล



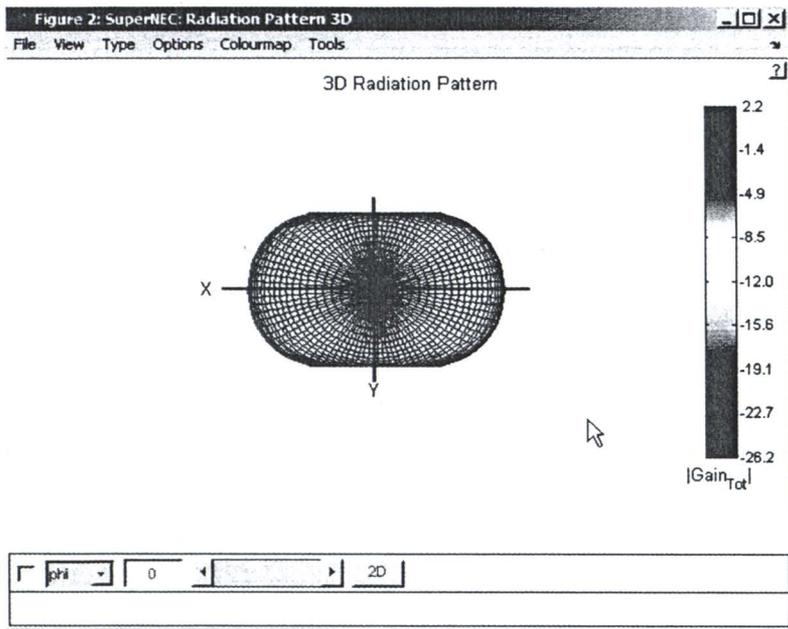
รูปที่ 5.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบยาคิอุดะห้วงค้ำประกอบ

โดยข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC จะให้ข้อมูลแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งในลักษณะสองมิติ และสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6 สำหรับสายอากาศไดโพล และในรูปที่ 5.7 และ 5.8 สำหรับสายอากาศยาคิวคระห้วงค์ประกอบตามลำดับ โดยข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของไฟล์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในลักษณะแฉกข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 5.9

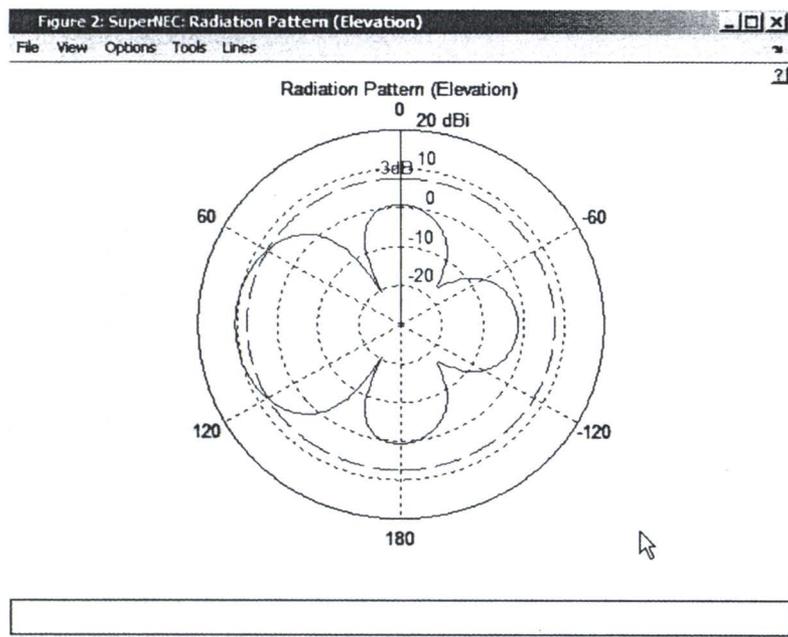
เมื่อได้ข้อมูลแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้จากการจำลองแบบแล้ว ก่อนนำมาใช้ในการจำลองแบบแบบจำลองระบบมัลติเฟลอินพุท-มัลติเฟลเอาต์พุท เนื่องจากอัตราขยายของสายอากาศแต่ละชนิดจะมีค่าที่แตกต่างกัน จึงต้องมีการทำให้เป็นค่านอร์มอลไลซ์ก่อน เพื่อที่จะสามารถนำผลที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับสายอากาศแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกันได้ จึงต้องทำการคำนวณและแปลงค่าที่ได้จากโปรแกรม SuperNEC โดยอาศัยการเปรียบเทียบสายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศแบบยาคิวคระห้วงค์ประกอบ กับสายอากาศแบบไอโซทรอปิก ให้เป็นค่าที่เป็นค่านอร์มอลไลซ์ แล้วเก็บลงไฟล์ข้อมูลใหม่ จากนั้นจึงนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการทำการจำลองแบบต่อไป



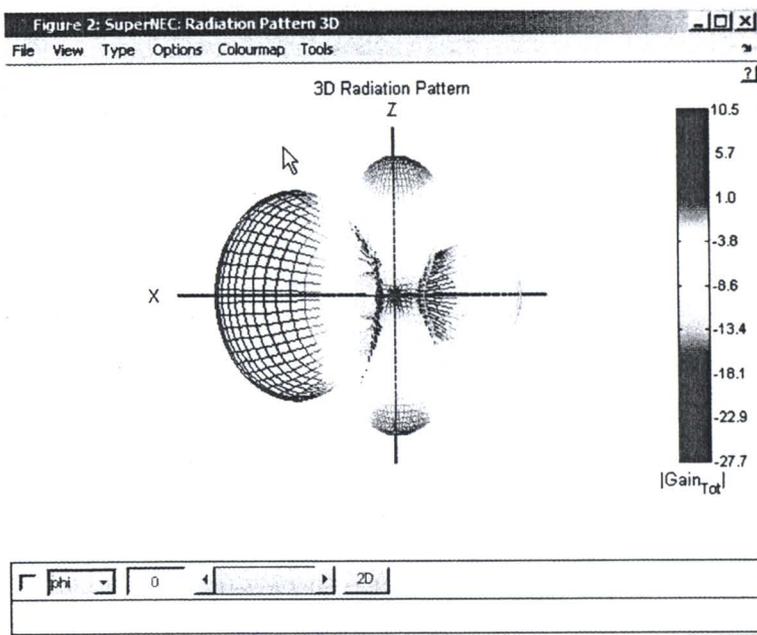
รูปที่ 5.5 แบบรูปการแผ่พลังงานสองมิติของสายอากาศแบบไดโพล



รูปที่ 5.6 แบบรูปการแผ่พลังงานสามมิติของสายอากาศแบบไดโพล



รูปที่ 5.7 แบบรูปการแผ่พลังงานสองมิติของสายอากาศแบบขาคีอูคะห้วงค์ประกอบ



รูปที่ 5.8 แบบรูปการแผ่พลังงานสามมิติของสายอากาศแบบขาคีอูคระห้ำองค้ประกอบ

View dipoleAZ.out

File Edit View Help

--- RADIATION PATTERNS ---

-- ANGLES -- - POWER GAINS - --- POLARIZATION --- --- E(THETA) --- --- E(PHI) ---

THETA PHI VERT. HOR. TOTAL AXIAL TILT SENSE MAGNITUDE PHASE MAGNITUDE

PHASE

DEGREES DEGREES DB DB DB RATIO DEG. VOLTS/M DEGREES VOLTS/M

THETA DEGREES	PHI DEGREES	VERT. DB	HOR. DB	TOTAL DB	AXIAL RATIO	TILT DEG.	SENSE	E(THETA) VOLTS/M	PHASE DEGREES	E(PHI) VOLTS/M
0.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
1.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
2.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
3.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
4.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
5.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
6.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
7.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
8.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
9.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
10.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
11.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
12.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
13.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
14.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
15.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
16.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
17.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
18.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
19.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
20.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001
21.00	0.00	-999.99	2.15	2.15	0.00000	-90.00	LINEAR	0.0000E+000	0.00	6.6998E-001

8,025,330 bytes

Windows text

รูปที่ 5.9 ข้อมูลแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

สำหรับการทำให้เป็นค่านอร์มอลไลซ์ จะพิจารณาโดยทำการเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบไอโซทรอปิกซึ่งจะได้ค่าตัวแปรนอร์มอลไลซ์ Z_x สำหรับสายอากาศแต่ละชนิด ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ (5.1) สำหรับแบบจำลองแบบสองมิติ

$$Z_x = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} |G(\phi)|_{\text{Directional}}^2 d\phi}{\int_{-\pi}^{\pi} |G(\phi)|_{\text{Isotropic}}^2 d\phi} \quad (5.1ก)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} |G(\phi)|_{\text{Normalize}}^2 d\phi = \frac{1}{Z_x} \int_{-\pi}^{\pi} |G(\phi)|_{\text{Directional}}^2 d\phi \quad (5.1ข)$$

$$G(\phi)_{\text{Normalize}} = \frac{G(\phi)_{\text{Directional}}}{\sqrt{Z_x}} \quad (5.1ค)$$

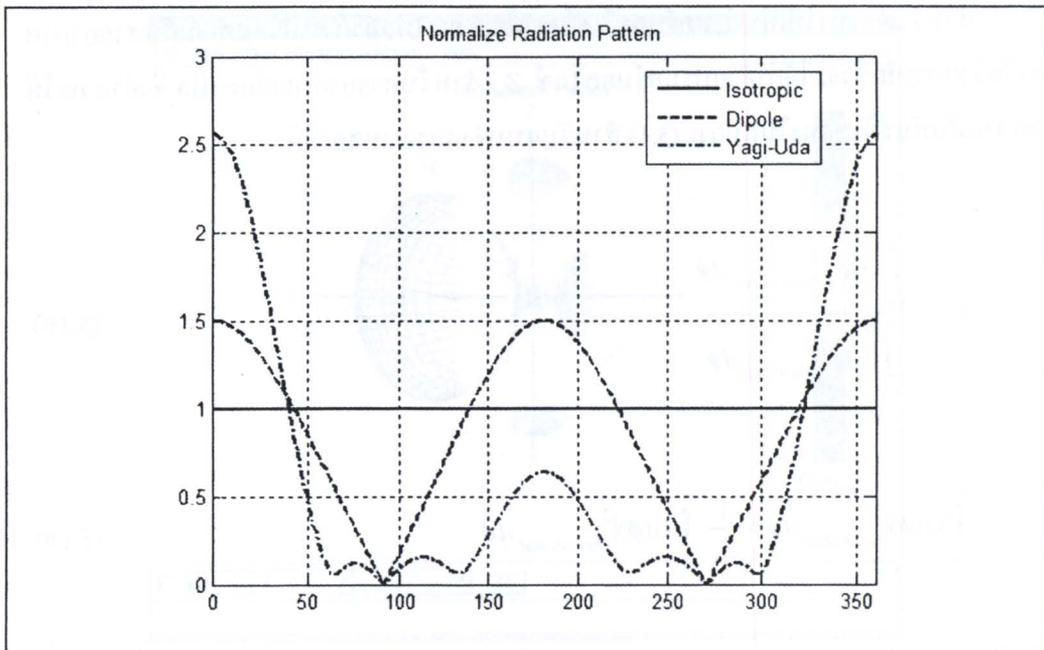
และสำหรับแบบจำลองแบบสามมิติ ดังสมการ (5.2)

$$Z_X = \frac{\int_0^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |G(\theta, \phi)|_{\text{Directional}}^2 d\phi d\theta}{\int_0^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |G(\theta, \phi)|_{\text{Isotropic}}^2 d\phi d\theta} \quad (5.2ก)$$

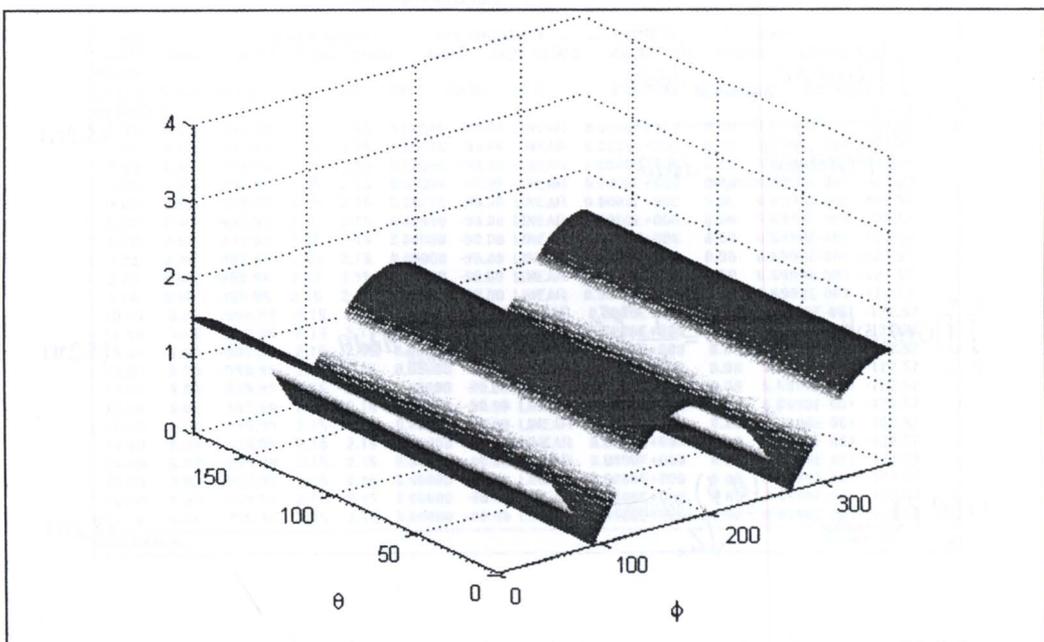
$$\int_0^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |G(\theta, \phi)|_{\text{Normalize}}^2 d\phi d\theta = \frac{1}{Z_X} \int_0^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |G(\theta, \phi)|_{\text{Directional}}^2 d\phi d\theta \quad (5.2ข)$$

$$G(\theta, \phi)_{\text{Normalize}} = \frac{G(\theta, \phi)_{\text{Directional}}}{\sqrt{Z_X}} \quad (5.2ค)$$

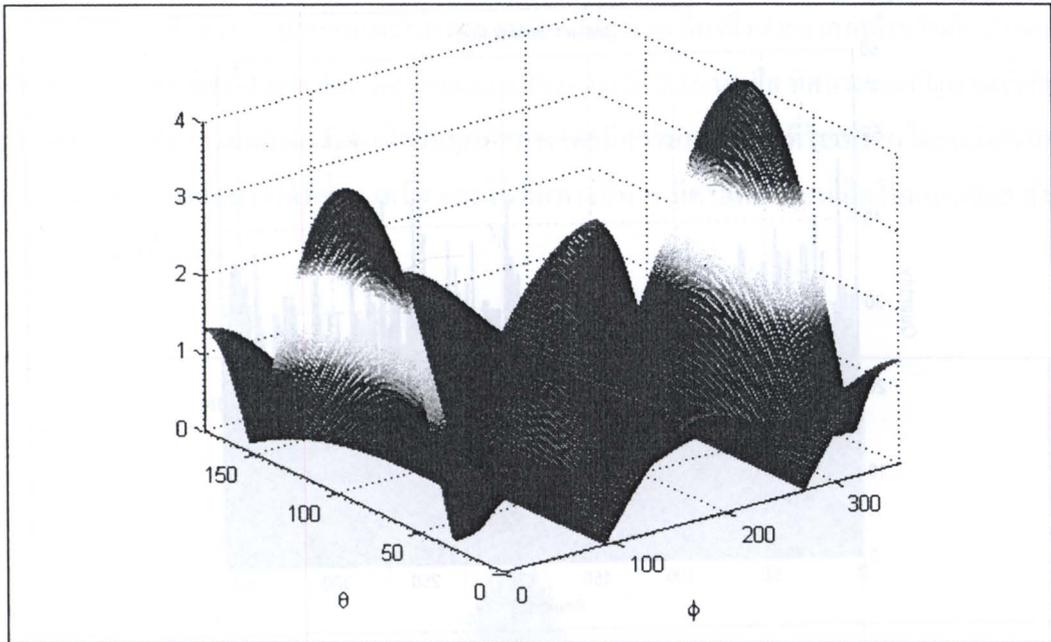
หลังได้อัตราขยายที่ให้เป็นค่านอร์มอลไลซ์แล้ว จึงนำอัตราขยายสายอากาศที่ได้ไปใช้แทนค่าในการจำลองแบบต่อไป เราสามารถนำมาแสดงค่าเป็นกราฟแบบเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 5.10 สำหรับแบบจำลองแบบสองมิติ และในรูปที่ 5.11 และ 5.12 สำหรับแบบจำลองแบบสามมิติ



รูปที่ 5.10 แบบรูปการแผ่พลังงานสองมิติแบบนอร์มอลไลซ์สำหรับสายอากาศแบบไดโพล และยาจิกูดะห้วงค์ประกอบ



รูปที่ 5.11 แบบรูปการแผ่พลังงานสามมิติแบบนอร์มอลไลซ์ สำหรับสายอากาศไดโพล



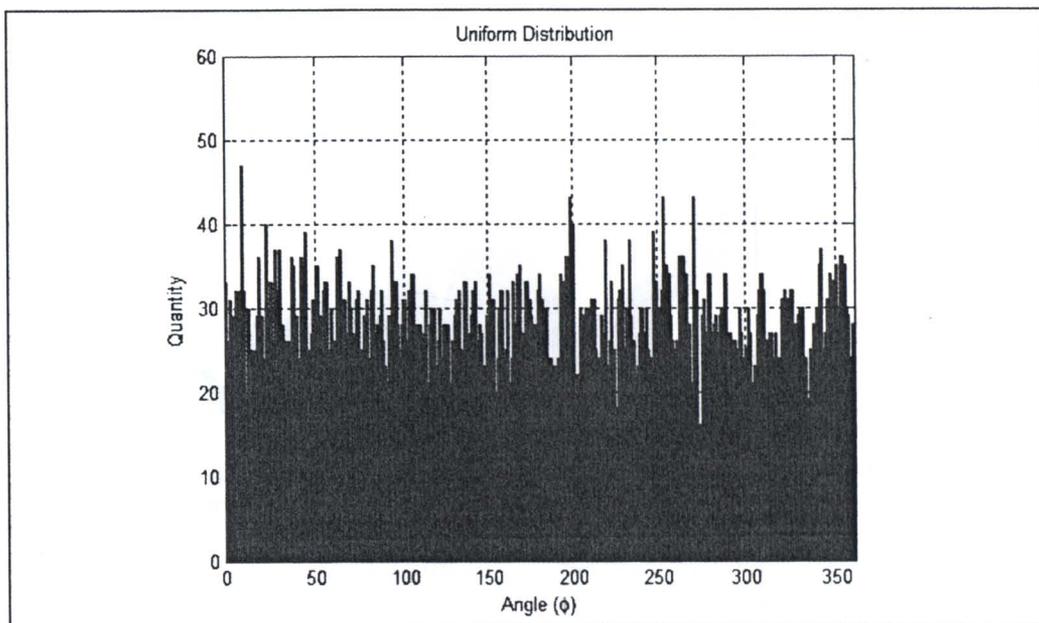
รูปที่ 5.12 แบบรูปการแผ่พลังงานสามมิติแบบนอร์มอลไลซ์สำหรับสายอากาศยาคิวค๊ะ
ห้องค์ประกอบ

5.3 ผลการจำลองแบบโดยพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

ในการจำลองแบบเพื่อพิจารณาผลที่เกิดจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่มีต่อค่าความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพล็กซ์-มัลติเพล็กซ์ ในงานวิจัยนี้จะอาศัยวิธีการจำลองแบบด้วยวิธีการมอนติ คาร์โล ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ค่าตัวแปรสุ่มร่วมกับการหาค่าเชิงสถิติเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ สำหรับในงานวิจัยนี้จะอาศัยแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ผ่านมา เพื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้นกับค่าความจุช่องสัญญาณ โดยอาศัยการหาค่าส่วนเติมเต็มของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ซึ่งจะพิจารณาทั้งในลักษณะสองมิติและสามมิติ

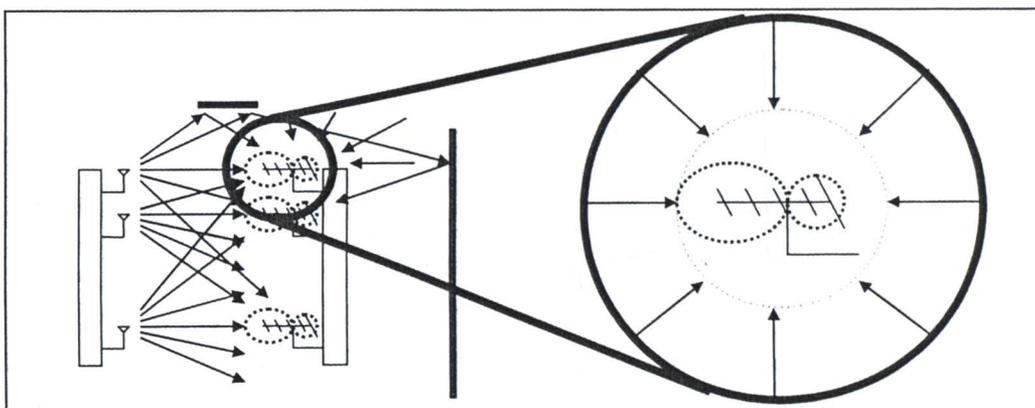
5.3.1 ผลการจำลองแบบสำหรับแบบจำลองแบบสองมิติ

ในการจำลองแบบสำหรับแบบจำลองที่เป็นสองมิติ ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากสายอากาศสองชนิดคือ สายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศยาคิวค๊ะห้องค์ประกอบ นำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบไอโซทรอปิก ซึ่งเป็นสายอากาศเชิงอุดมคติที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในทุกทิศทาง โดยทำการพิจารณาทิศทางของคลื่นที่เข้ามาที่สายอากาศเฉพาะในระนาบแนวนอน โดยให้การกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศด้านรับมีการแจกแจงแบบเอกรูปดังแสดงในรูปที่ 5.13



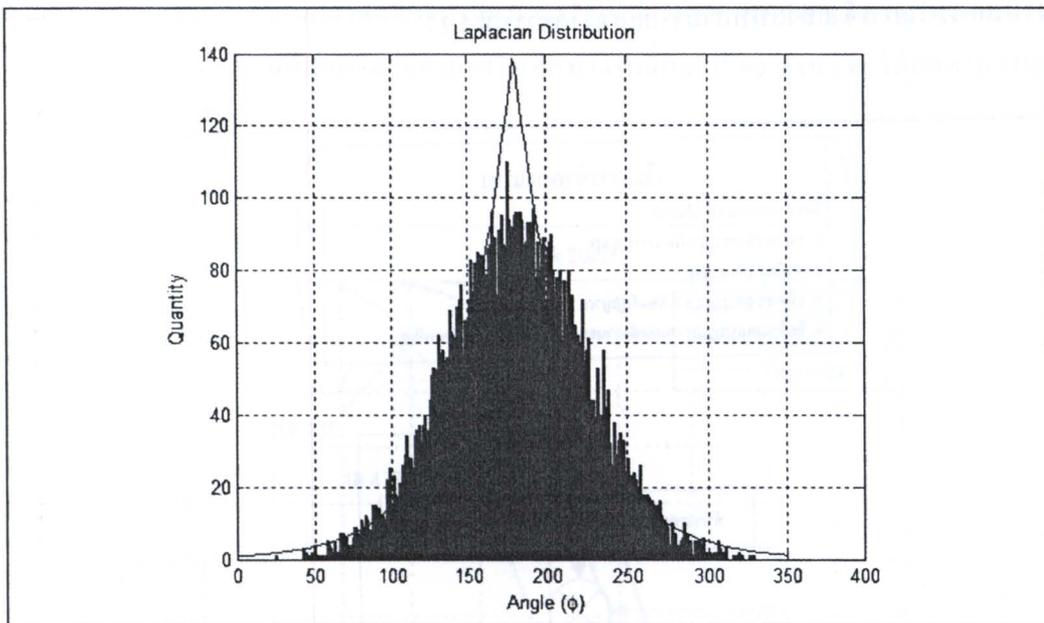
รูปที่ 5.13 การกระจายของสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป

ซึ่งเราสามารถอธิบายลักษณะการกระจายของสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบเอกรูปที่ มาถึงสายอากาศด้านรับได้ คือในกรณีที่การกระจายของสัญญาณที่มาจากสายอากาศรับมี ลักษณะการกระจายของสัญญาณมีการแจกแจงแบบเอกรูปจะหมายถึงทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา ที่สายอากาศรับมีการกระจายไปในทุกทิศทางโดยมีความหนาแน่นที่เท่ากันในทุกทิศทาง หรือ โอกาสของทิศทางที่สัญญาณจะเข้ามาที่สายอากาศรับมีค่าเท่ากันในทุกทิศทางดังรูปที่ 5.14

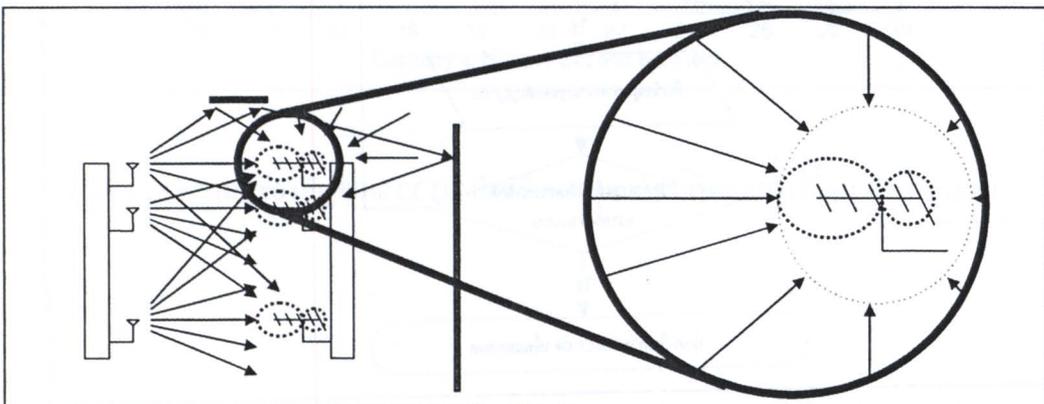


รูปที่ 5.14 การกระจายทิศทางของสัญญาณที่สายอากาศภาครับที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป

สำหรับกรณีที่มีลักษณะการกระจายของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศด้านรับมีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน (Laplacian distribution) แสดงดังรูปที่ 5.15 นั่นคือ ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศภาครับมีการกระจายไปในทุกทิศทางโดยมีความหนาแน่นที่ไม่เท่ากัน โดยจะมีความหนาแน่นมากในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และในทิศทางอื่น ๆ มีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังอธิบายในรูปที่ 5.16

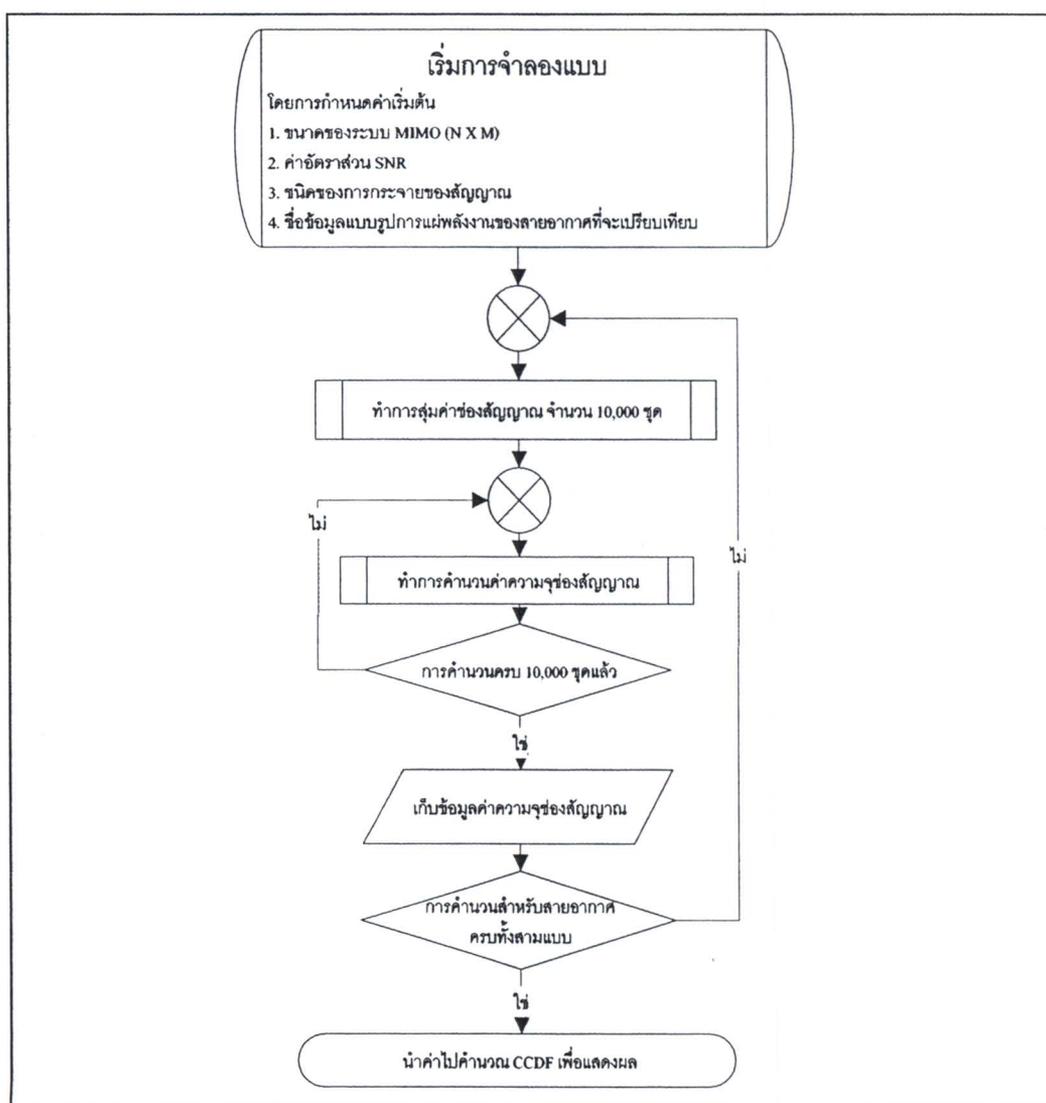


รูปที่ 5.15 การกระจายของสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน



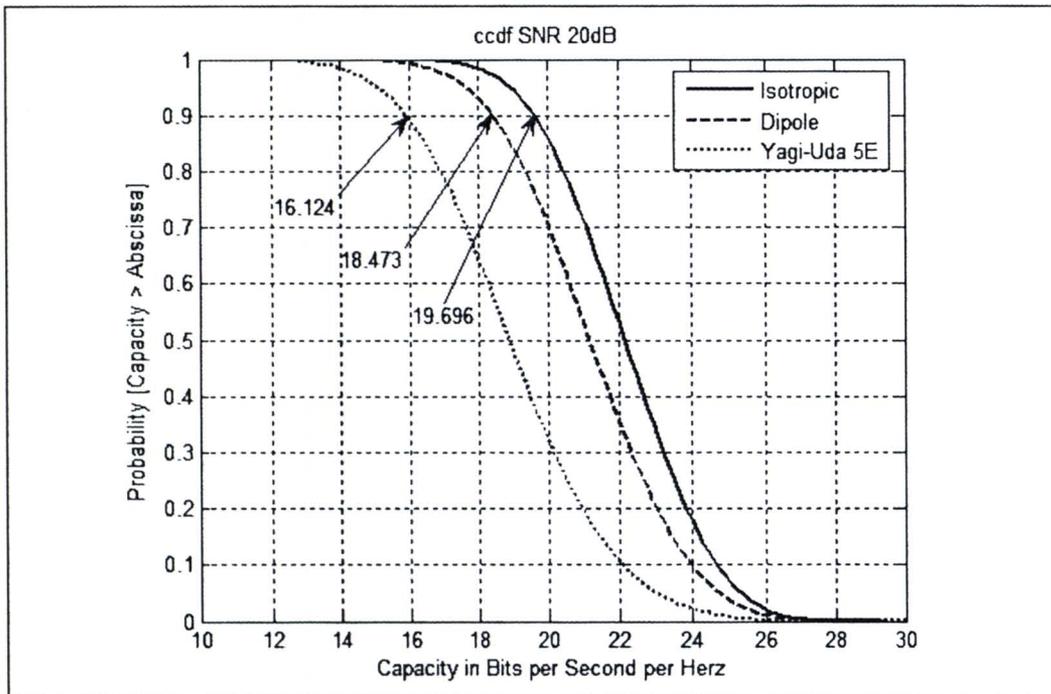
รูปที่ 5.16 การกระจายทิศทางของสัญญาณที่สายอากาศภาครับที่มีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน

ในการจำลองแบบจะให้มุมที่มีความหนาแน่นสูงสุดอยู่ในทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศ และทำการสุ่มค่าอัตราขยายช่องสัญญาณเพื่อนำไปคูณกับค่าอัตราขยายสายอากาศ โดยทำการสุ่มค่ามุมของคลื่นที่เข้ามาที่สายอากาศให้มีการแจกแจงแบบเอกรูป จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาความจุช่องสัญญาณที่ได้จากสมการ (4.9) จำนวน 10,000 ค่า และเมื่อได้ค่าความจุช่องสัญญาณทั้งหมดแล้ว จึงทำการคำนวณค่าความจุช่องสัญญาณให้เป็นค่าที่อยู่ในรูปของค่า CCDF และดำเนินการแบบเดียวกันสำหรับกรณีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน โดยโครงสร้างของโปรแกรมในการจำลองแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17

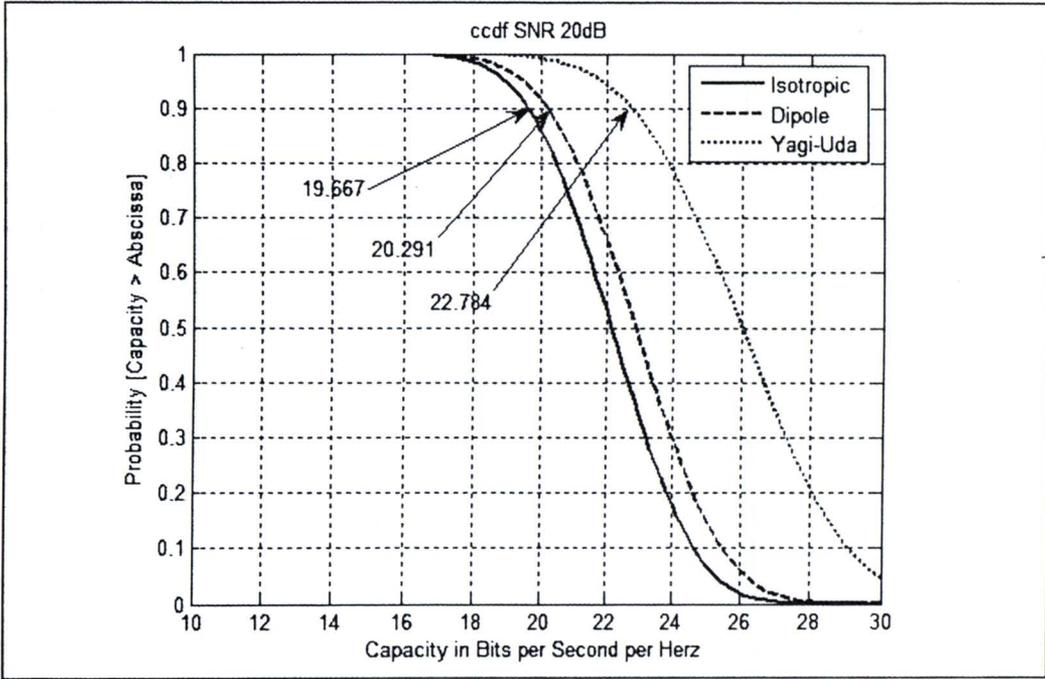


รูปที่ 5.17 ขั้นตอนการจำลองแบบสำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสองมิติ

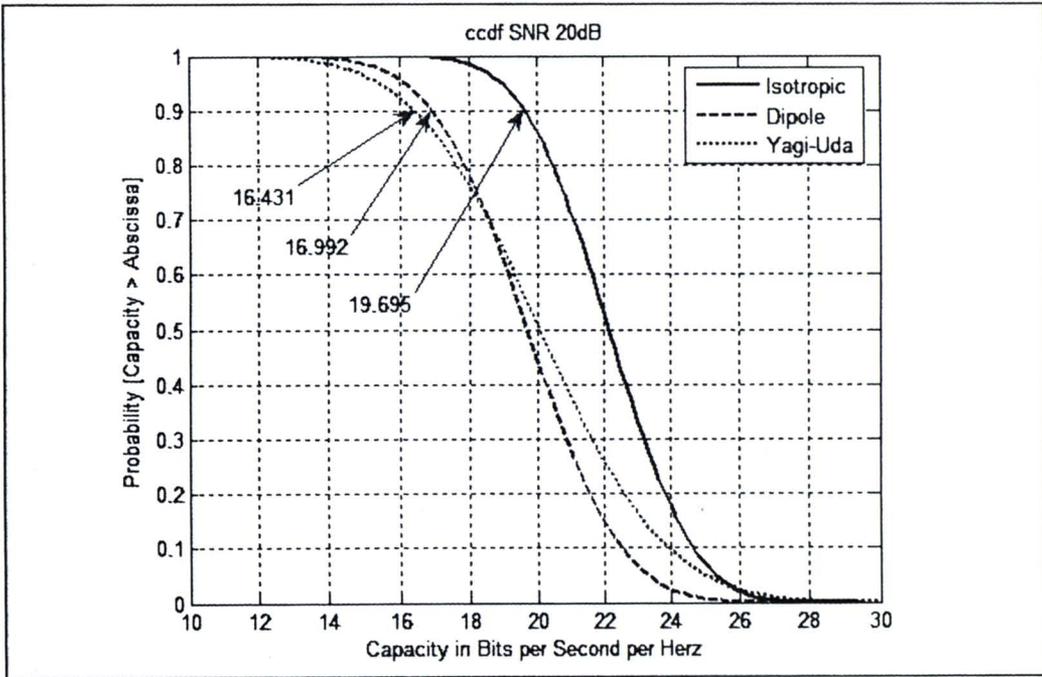
สำหรับผลการจำลองแบบที่ได้จะทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่าความจุของสัญญาณ โดยจะพิจารณาจากความจุของสัญญาณที่ให้ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 90% ซึ่งที่ระดับความน่าจะเป็น 90% นี้จะบอกถึงความน่าจะเป็นที่ไม่เกิดขึ้นเป็น 10% แทนได้ด้วยสัญลักษณ์ $C_{out,0.1}$ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับสายอากาศไดโพลและสายอากาศยาคิอุดาแบบห้าองค์ประกอบได้แสดงผลเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 5.18 สำหรับกรณีที่มีการกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศมีการแจกแจงแบบเอกรูป และในรูปที่ 5.19 สำหรับกรณีที่มีการกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศมีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน และถ้าเราให้การกระจายของสัญญาณมีการเบี่ยงเบนไปหรือการตั้งค่าลำคลื่นหลักของสายอากาศในทิศทางที่เอียงไป 60 องศา จะได้ผลค่าความจุของสัญญาณดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.18 ความจุของสัญญาณ CCDF สำหรับการแจกแจงแบบเอกรูปที่มุม $\theta = 90$, $\phi = 0$



รูปที่ 5.19 ความจุช่องสัญญาณ CCDF สำหรับการแจกแจงแบบลาปลาเซียนที่มุม $\theta = 90, \phi = 0$



รูปที่ 5.20 ความจุช่องสัญญาณ CCDF สำหรับการแจกแจงแบบลาปลาเซียนที่มุม $\theta = 90, \phi = 60$

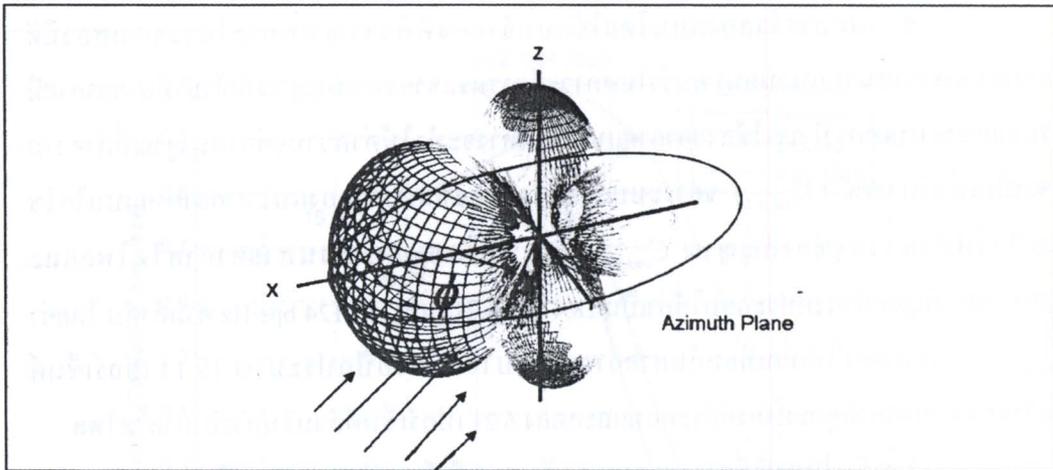
จากผลการจำลองแบบโดยใช้แบบจำลองที่พิจารณาเฉพาะในระนาบสองมิติ (พิจารณาเฉพาะระนาบแนวนอน) พบว่าในสภาวะที่การกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศมีการแจกแจงแบบเอกรูป การใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณที่ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 90% ($C_{out,0.1}$) ของระบบลดลง โดยผลจากการจำลองแบบสายอากาศแบบไอโซทรอปิกให้ค่าความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ เป็น 19.696 bps/Hz ส่วนสายอากาศไดโพลและสายอากาศยาคิอูคะห้วงค์ประกอบให้ค่าเป็น 18.473 bps/Hz และ 16.124 bps/Hz ตามลำดับ โดยค่า $C_{out,0.1}$ ที่ได้จะลดลงไปเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบไอโซทรอปิกประมาณ 18.14 เเปอร์เซ็นต์สำหรับสายอากาศยาคิอูคะห้วงค์ประกอบและลดลง 6.21 เเปอร์เซ็นต์สำหรับสายอากาศไดโพล

สำหรับในกรณีที่มีการกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศ มีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน การใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจะทำให้ค่าความจุของระบบเพิ่มขึ้น โดยต้องมีการตั้งทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศให้ตรงกันด้วย ซึ่งผลจากการจำลองแบบพบว่าค่าความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ สำหรับสายอากาศแบบไอโซทรอปิก มีค่าเป็น 19.667 bps/Hz ส่วนสายอากาศไดโพลและสายอากาศยาคิอูคะห้วงค์ประกอบให้ค่าเป็น 20.291 bps/Hz และ 22.784 bps/Hz ตามลำดับ โดยค่า $C_{out,0.1}$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบไอโซทรอปิกประมาณ 15.85 เเปอร์เซ็นต์สำหรับสายอากาศยาคิอูคะห้วงค์ประกอบ และเพิ่มขึ้น 3.17 เเปอร์เซ็นต์สำหรับสายอากาศไดโพล

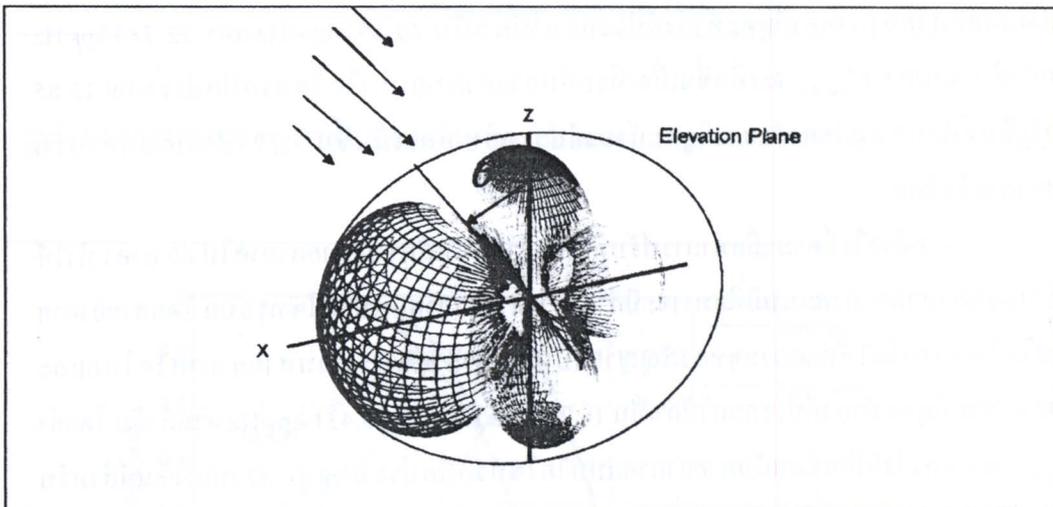
อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการปรับทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศไป 60 องศา ทำให้ค่าความจุของสายอากาศแบบมีทิศทางจะมีค่าต่ำกว่าสายอากาศแบบไอโซทรอปิก โดยสายอากาศแบบไอโซทรอปิกให้ค่าความจุช่องสัญญาณเป็น 19.695 bps/Hz ส่วนสายอากาศไดโพลและสายอากาศยาคิอูคะห้วงค์ประกอบให้ค่าเป็น 16.992 bps/Hz และ 16.431 bps/Hz ตามลำดับ โดยค่า $C_{out,0.1}$ จะลดลงไปเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบไอโซทรอปิกประมาณ 16.57 เเปอร์เซ็นต์สำหรับสายอากาศยาคิอูคะห้วงค์ประกอบ และลดลง 13.52 เเปอร์เซ็นต์สำหรับสายอากาศไดโพล

5.3.2 ผลการจำลองแบบสำหรับแบบจำลองแบบสามมิติ

ในหัวข้อนี้จะศึกษาการนำแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติมาพิจารณาร่วมกับแบบจำลองช่องสัญญาณระบบมัลติเพล็กซ์-มัลติเพล็กซ์ โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบด้วยแบบจำลองที่เป็นสามมิติที่ได้จากสายอากาศสองชนิดคือ สายอากาศแบบไดโพลและสายอากาศยาคิอูคะห้วงค์ประกอบ กับสายอากาศแบบไอโซทรอปิกซึ่งเป็นสายอากาศเชิงอุดมคติที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานรอบตัวในทุกทิศทาง โดยทำการพิจารณาทิศทางของคลื่นที่เข้ามาที่สายอากาศทั้งในระนาบแนวนอนและระนาบแนวตั้ง ดังแสดงรูปที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ

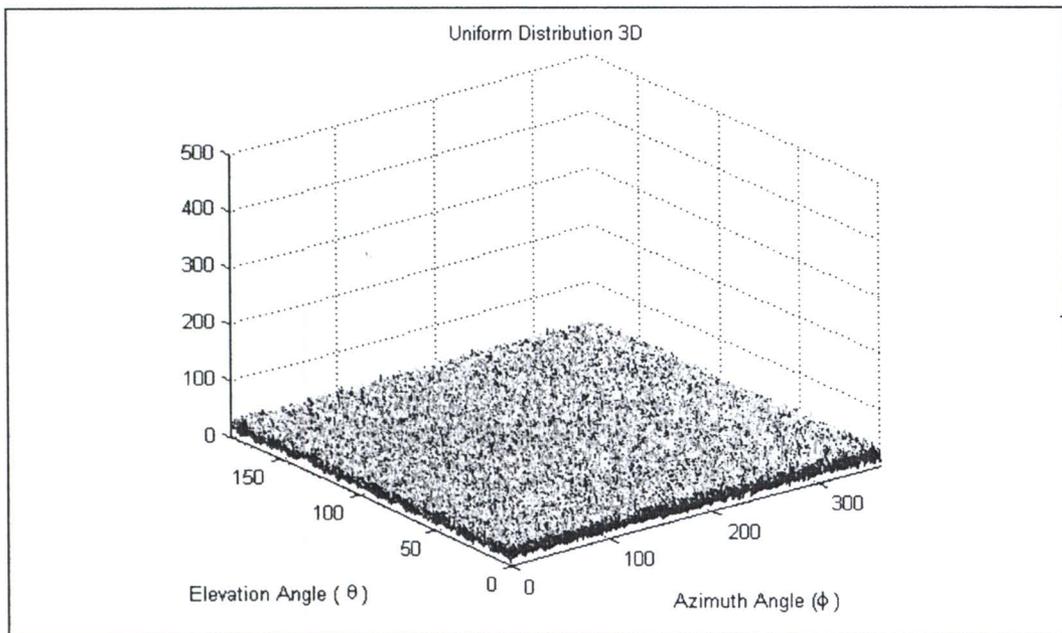


รูปที่ 5.21 ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศในระนาบแนวนอน

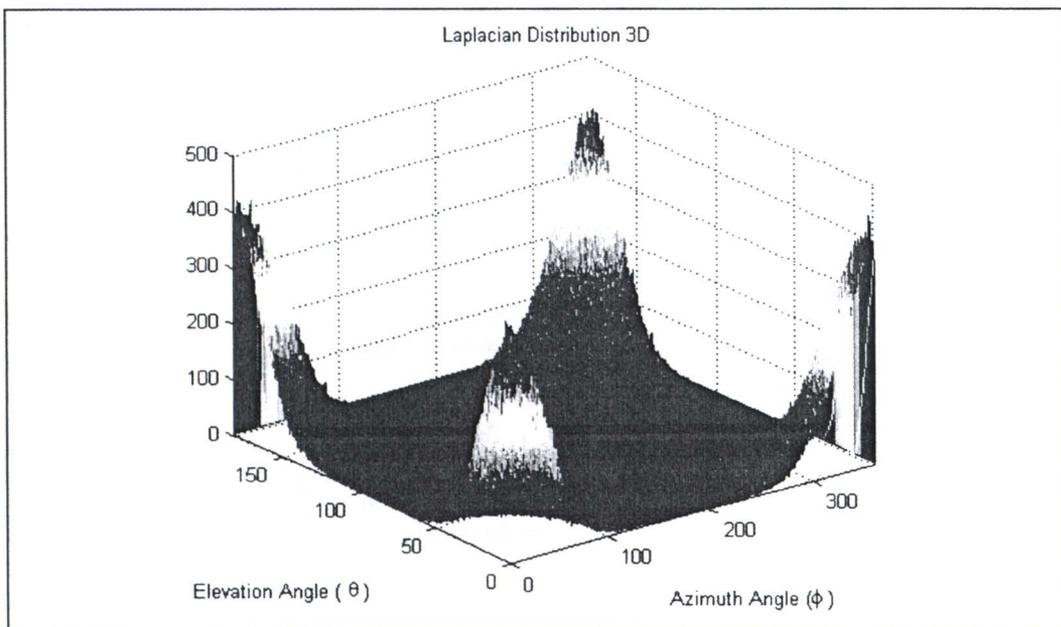


รูปที่ 5.22 ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศในระนาบแนวตั้ง

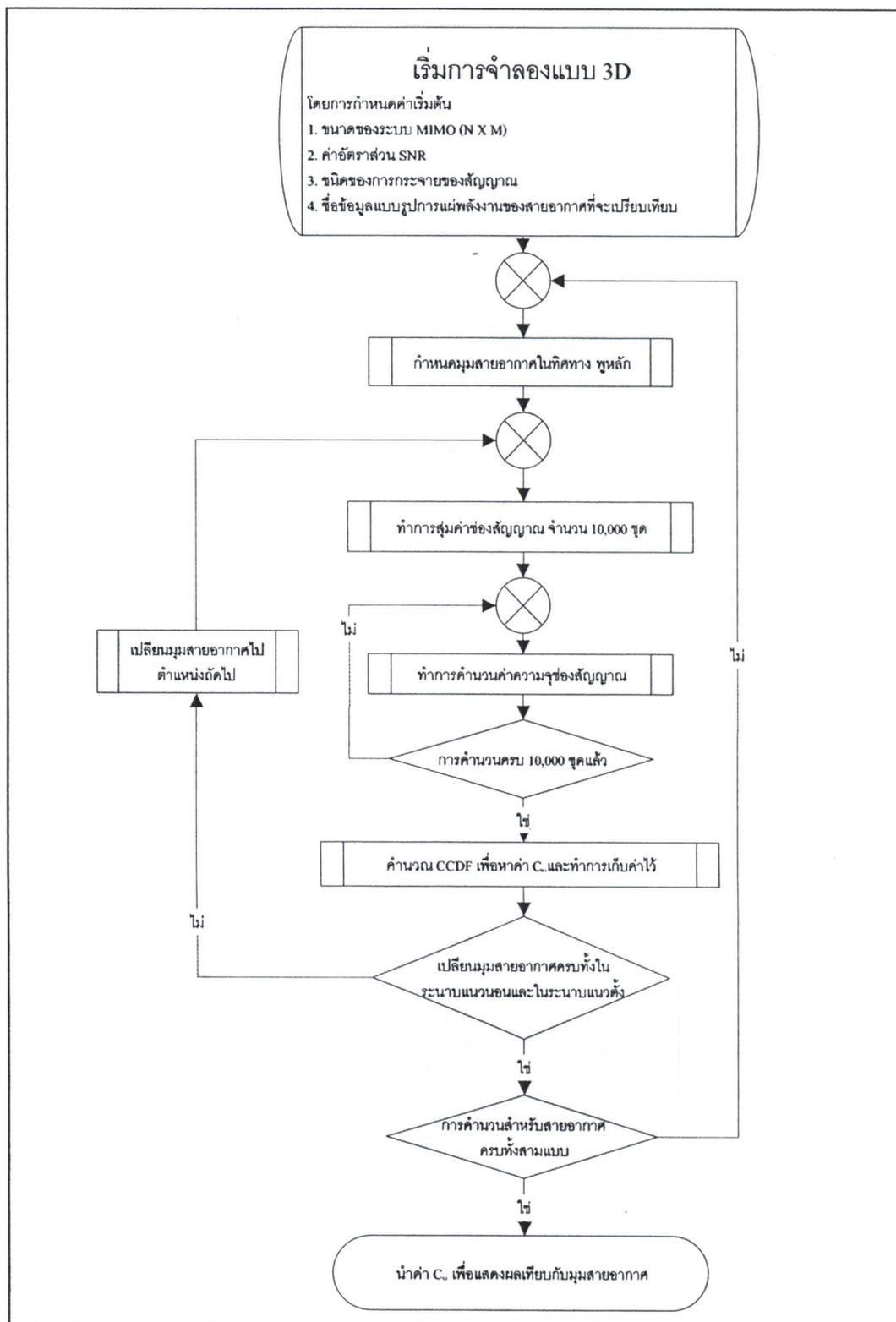
กำหนดให้ทิศทางของสัญญาณที่สายอากาศด้านรับมีการกระจายทั้งในระนาบแนวนอนและระนาบแนวตั้ง โดยการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงสามมิติ แบบลาปลาเชียนสามมิติ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 และ 5.24 ตามลำดับ โดยรูปที่ 5.24 จะแสดงการกระจายแบบลาปลาเชียนซึ่งมีความหนาแน่นการกระจายสูงสุดอยู่ที่มุม $\theta = 0, \phi = 0$



รูปที่ 5.23 การกระจายของสัญญาณที่ด้านรับแบบสามมิติที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป

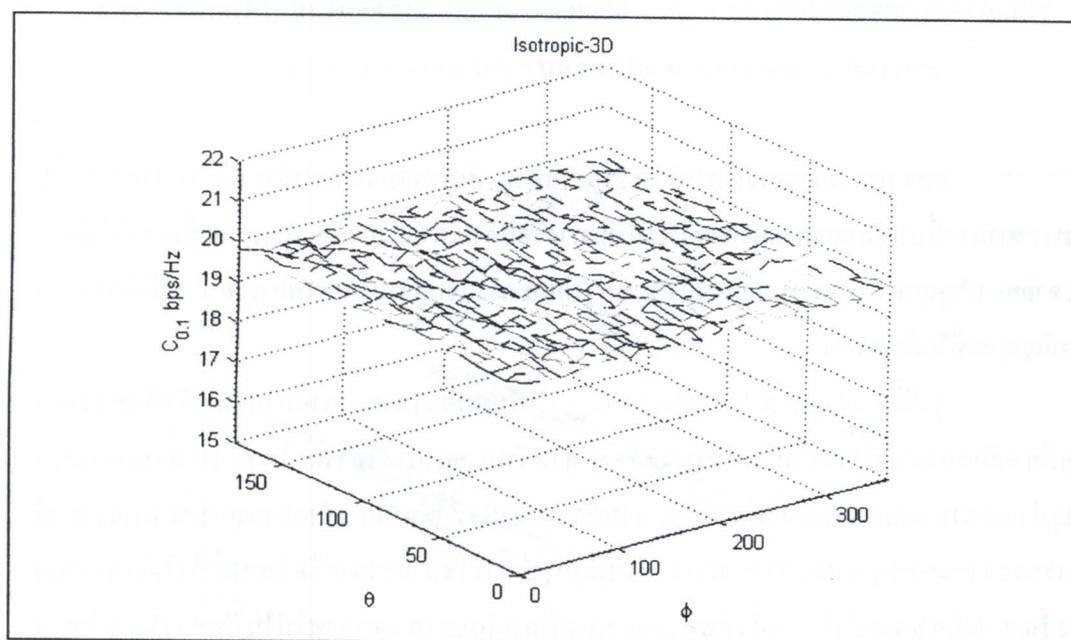


รูปที่ 5.24 การกระจายของสัญญาณที่ด้านรับแบบสามมิติที่มีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน

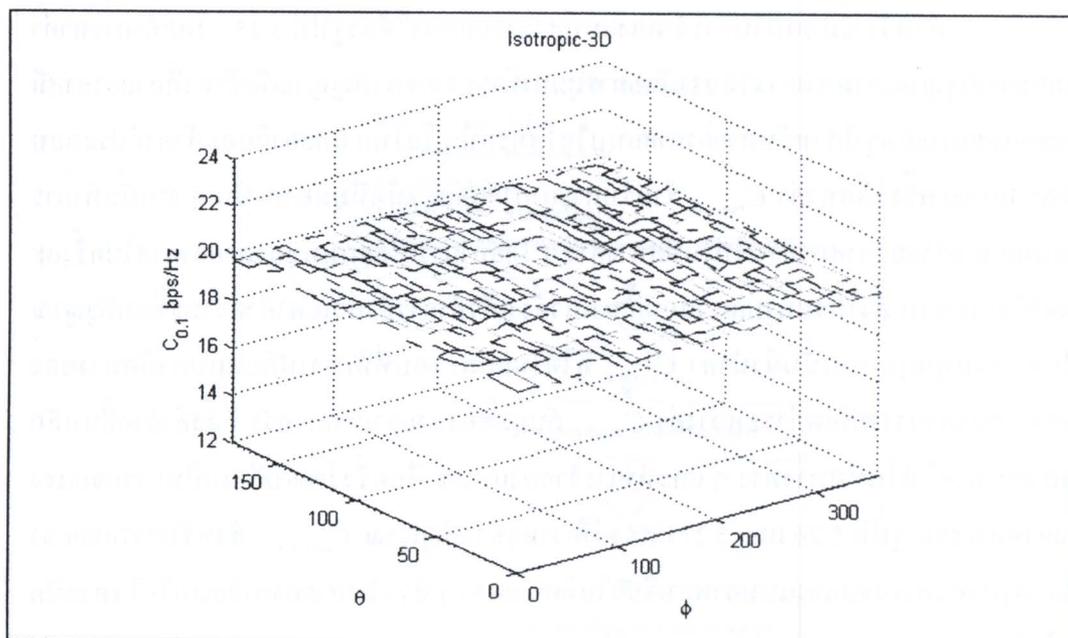


รูปที่ 5.25 ขั้นตอนการจำลองแบบสำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสามมิติ

สำหรับขั้นตอนในการจำลองแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.25 โดยทำการหาค่าความจุช่องสัญญาณตามสมการ (4.13) โดยการสุ่มการกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศมีการแจกแจงแบบเอกรูปสำหรับสายอากาศแบบไอโซทรอปิก ไดโพล และยาคิอุตะห้วงค์ประกอบชนิดละ 10,000 ครั้ง เพื่อหาค่า $C_{out,0.1}$ สำหรับสายอากาศแต่ละชนิดที่มุมมองสายนั้น ๆ จากนั้นทำการเปลี่ยนมุมของสายอากาศภาครับไปในทิศทางต่าง ๆ โดยทำการเปลี่ยนมุมของสายอากาศไปครั้งละ 5 องศาทีละระนาบ ทั้งในระนาบแนวนอนและแนวตั้ง แล้วทำการคำนวณหาความจุช่องสัญญาณเข้าไปจนครบทุกมุม จากนั้นจึงนำค่า $C_{out,0.1}$ ที่ได้ในแต่ละรอบที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสายอากาศมาทำการพล็อตค่าระหว่างค่า $C_{out,0.1}$ กับมุมของสายอากาศภาครับที่ตั้งค่าลำคลื่นหลักของสายอากาศไปในทิศทางต่าง ๆ และทำการจำลองแบบซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนเป็นการแจกแจงแบบลาปลาเซียน รูปที่ 5.26 และ 5.27 แสดงค่าความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ สำหรับการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบลาปลาเซียนในทิศทางต่าง ๆ สำหรับสายอากาศแบบไอโซทรอปิกตามลำดับ



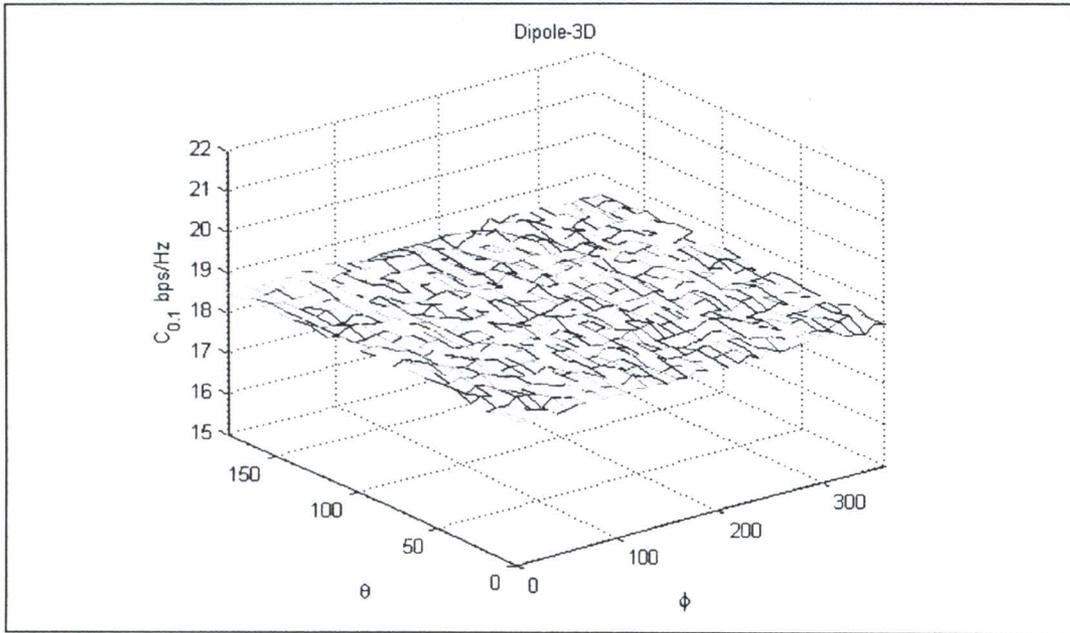
รูปที่ 5.26 ความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ของสายอากาศแบบไอโซทรอปิกในทิศทางต่าง ๆ สำหรับการแจกแจงแบบเอกรูป



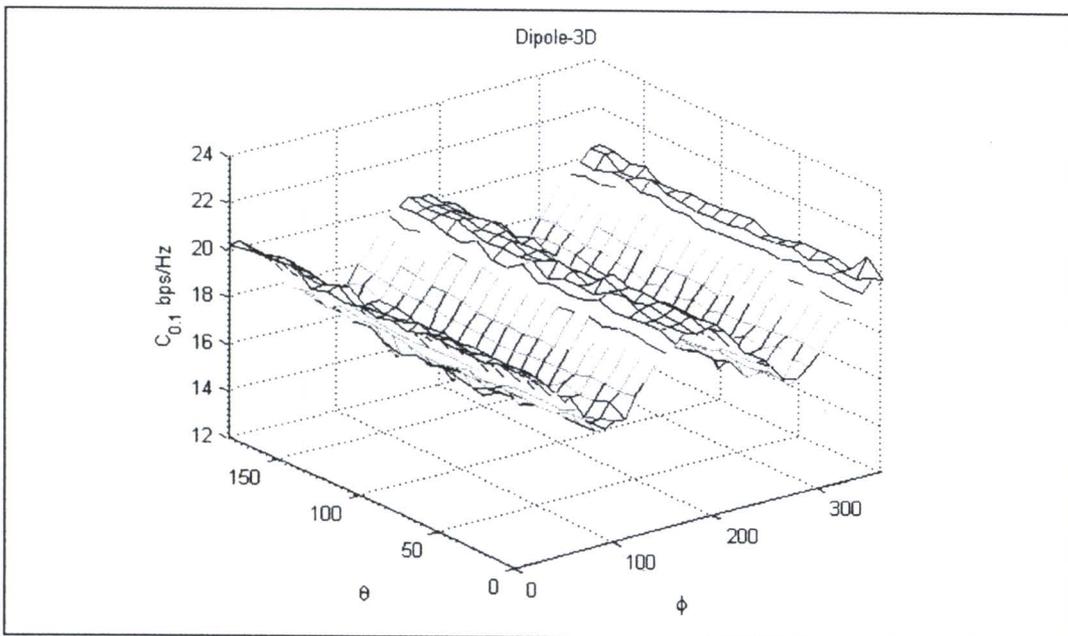
รูปที่ 5.27 ความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ของสายอากาศแบบไอโซทรอปิกในทิศทางต่าง ๆ สำหรับการแจกแจงแบบลาปลาเซียน

ผลจากการจำลองแบบสำหรับสายอากาศแบบไอโซทรอปิก พบว่า ไม่ว่าจะตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศไปในทิศทางใดก็ตาม ค่าความจุช่องสัญญาณทั้งกรณีที่มีการกระจายของสัญญาณแบบการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบลาปลาเซียน จะมีค่าความจุช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน

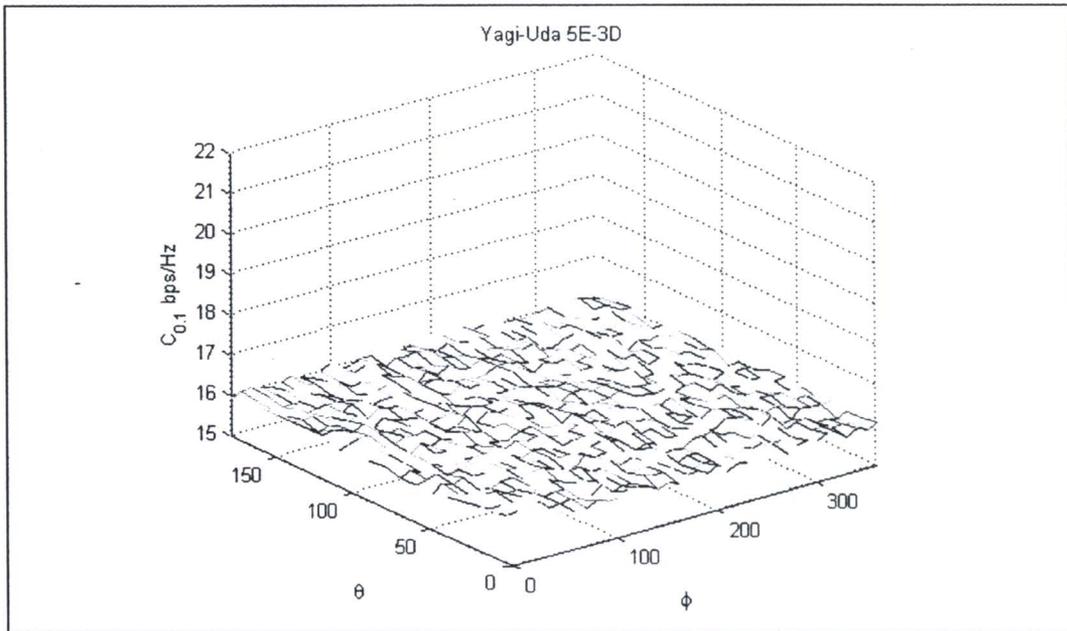
รูปที่ 5.28 และ 5.29 แสดงค่า $C_{out,0.1}$ กับมุมของสายอากาศภาครับที่ตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศไปในทิศทางต่าง ๆ สำหรับสายอากาศไดโพล โดยมีการแจกแจงแบบเอกรูป และการแจกแจงแบบลาปลาเซียน ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบนั้น พบว่า กรณีที่มีการกระจายของสัญญาณมีการแจกแจงแบบเอกรูป การใช้สายอากาศไดโพลจะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณมีค่าลดลง ไม่ว่าจะตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศไปในทิศทางใด ๆ ก็ตาม แต่สำหรับกรณีที่มีการกระจายของสัญญาณมีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน พบว่า หากตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศไปในทิศทางที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดในที่ทิศทางที่เป็นพูหลักของสายอากาศ หรือที่มุม $\phi = 0$ องศา และ 180 องศา แต่หากทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศไม่เหมาะสมแล้วก็จะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณลดลง



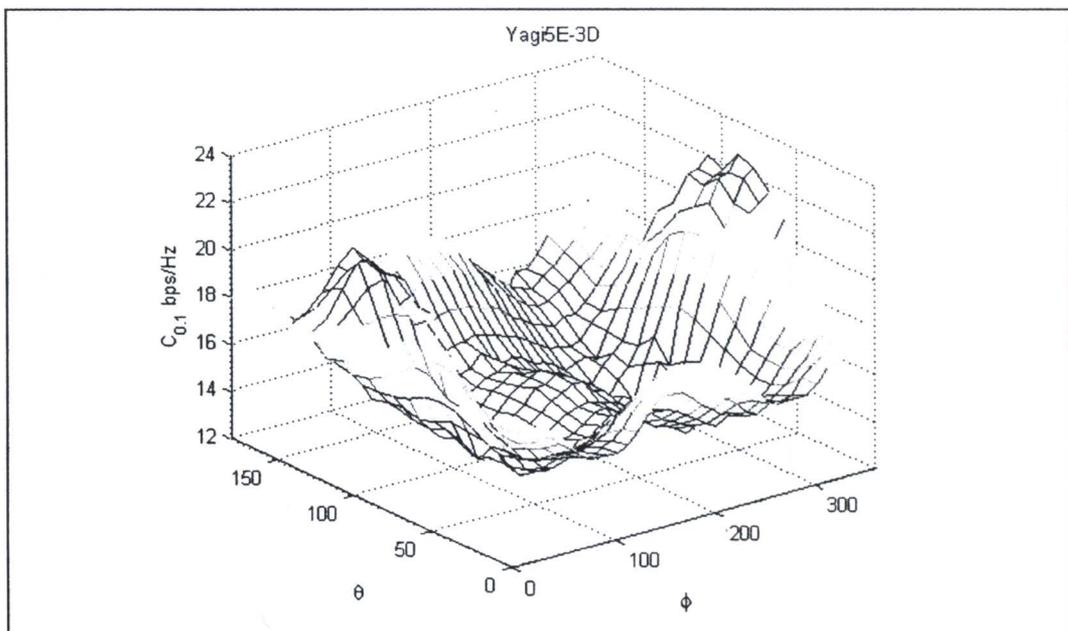
รูปที่ 5.28 ความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ของสายอากาศแบบไดโพลในทิศทางต่างๆ สำหรับการแจกแจงแบบเอกรูป



รูปที่ 5.29 ความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ของสายอากาศแบบไดโพลในทิศทางต่างๆ สำหรับการแจกแจงแบบลาปลาเซียน



รูปที่ 5.30 ความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ของสายอากาศแบบยาคิอุตะห้วงค์ประกอบ
ในทิศทางต่าง ๆ สำหรับการแจกแจงแบบเอกรูป



รูปที่ 5.31 ความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ของสายอากาศแบบยาคิอุตะห้วงค์ประกอบ
ในทิศทางต่าง ๆ สำหรับการแจกแจงแบบลาปลาเซียน

รูปที่ 5.30 และ 5.31 แสดงค่า $C_{out,0.1}$ กับมุมของสายอากาศภาครับที่ตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศไปในทิศทางต่าง ๆ สำหรับสายอากาศแบบยาคิวค้ำห้อยห้อยประกอบโดยมีการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบลาปลาเซียน ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบนั้นพบว่า กรณีที่การกระจายของสัญญาณมีการแจกแจงแบบเอกรูปนั้น สายอากาศยาคิวค้ำห้อยประกอบจะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณมีค่าลดลงไม่ว่าจะตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศไปในทิศทางใด ๆ ก็ตาม แต่สำหรับกรณีที่การกระจายของสัญญาณมีการแจกแจงแบบลาปลาเซียนจะพบว่าหากตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศไปในทิศทางที่เหมาะสมแล้วค่าความจุช่องสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดในที่ทิศทางที่เป็นพูหลักของสายอากาศ หรือที่มุม $\theta = 90, \phi = 0$ องศา แต่หากทิศทางสายอากาศไม่เหมาะสมแล้วก็จะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณลดลงเช่นกัน

สำหรับค่าความจุช่องสัญญาณที่ได้จากการจำลองแบบสามารถหาค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าความจุเฉลี่ย และค่าความเบี่ยงเบนของค่าความจุช่องสัญญาณที่ได้จากการจำลองแบบ สรุปค่าได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ที่ได้จากการจำลองแบบ สำหรับการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบลาปลาเซียน เมื่อใช้สายอากาศชนิดต่าง ๆ

ชนิดของการแจกแจง	ชนิดของสายอากาศ	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
การแจกแจงแบบเอกรูป	ไอโซทรอปิก	19.6955	19.8320	19.5510	0.0532
	ไดโพล	18.4991	18.6830	18.3590	0.0576
	ยาคิวค้ำห้อยประกอบ	16.0130	16.1860	15.8120	0.0686
การแจกแจงแบบลาปลาเซียน	ไอโซทรอปิก	19.6972	19.8270	19.5620	0.0510
	ไดโพล	18.4912	20.8190	15.7070	1.2836
	ยาคิวค้ำห้อยประกอบ	16.1139	22.6890	12.3650	2.1226

สำหรับในกรณีที่การกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศ มีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน การใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณของระบบเพิ่มขึ้น แต่ต้องมีการตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศให้ถูกต้องด้วย และถ้าพิจารณาผลสรุปที่ได้

ดังแสดงในตารางที่ 5.1 จะเห็นว่า การใช้สายอากาศแบบมีทิศทางนั้น จะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณโดยเฉลี่ยลดลงจากการใช้สายอากาศแบบไอโซทรอปิกไม่มากนัก แต่เมื่อตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศให้ถูกต้องแล้ว จะทำให้ได้ค่าความจุที่สูงกว่าการใช้สายอากาศแบบไอโซทรอปิก จึงทำให้การเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากสามารถเพิ่มค่าความจุช่องสัญญาณได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ต้องพิจารณาในสภาวะแวดล้อมที่การกระจายของสัญญาณมีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน ซึ่งเป็นการแจกแจงในสภาวะที่เป็นภายนอกอาคาร หรือมีการสะท้อนในทิศทางด้านข้างและด้านหลังน้อยกว่าสัญญาณที่เข้ามาที่ด้านหน้า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในสภาวะการใช้งานจริง สายอากาศแบบมีทิศทางมักมีอัตราขยายสายอากาศที่สูงกว่าสายอากาศแบบไอโซทรอปิก แต่ในสภาวะการจำลองแบบที่ได้ศึกษานั้น ได้ลดทอนปัจจัยของอัตราขยายของสายอากาศออกโดยทำการนอร์มอลไลซ์ จึงทำให้ค่าความจุที่ได้มีลักษณะที่เป็นดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น หากเราพิจารณาค่าความจุช่องสัญญาณโดยไม่ทำการนอร์มอลไลซ์ของสายอากาศแบบมีทิศทางที่มีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศแบบไอโซทรอปิกในทิศทางที่เป็นลำคลื่นหลักของสายอากาศ ทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบมีค่าสูงขึ้น และจะส่งผลให้ค่าความจุช่องสัญญาณที่ได้มีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน

5.4 การวัดผลแบบจำลอง

ในส่วนนี้จะเป็นการนำผลที่ได้จากแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด โดยอาศัยชุดเครื่องมือวัดและทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นในการใช้งานจริงกับผลที่ได้จากแบบจำลองระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท ที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนา โดยการพิจารณาวัดผลเปรียบเทียบในสองลักษณะ คือ เปรียบเทียบผลที่ได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นการใช้งานภายในอาคาร และการใช้งานภายนอกอาคาร

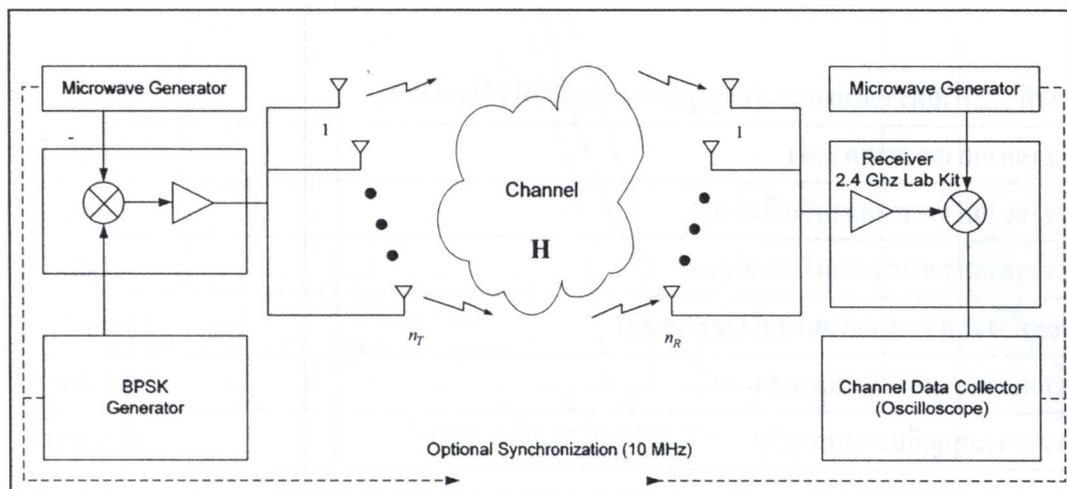
5.4.1 การวัดผลแบบจำลองในสภาวะภายในและภายนอกอาคาร

ในการวัดผลความจุช่องสัญญาณ จะเป็นการวัดค่าสัญญาณโดยทำการส่งสัญญาณในรูปแบบ BPSK ผ่านสัญญาณพาห้ที่ความถี่ 2.4 GHz ไปยังสายอากาศภาคส่งที่เป็นสายอากาศแบบไดโพล และทำการวัดค่าโดยอาศัยค่าขนาดและมุมของสัญญาณที่ภาครับดังกล่าว

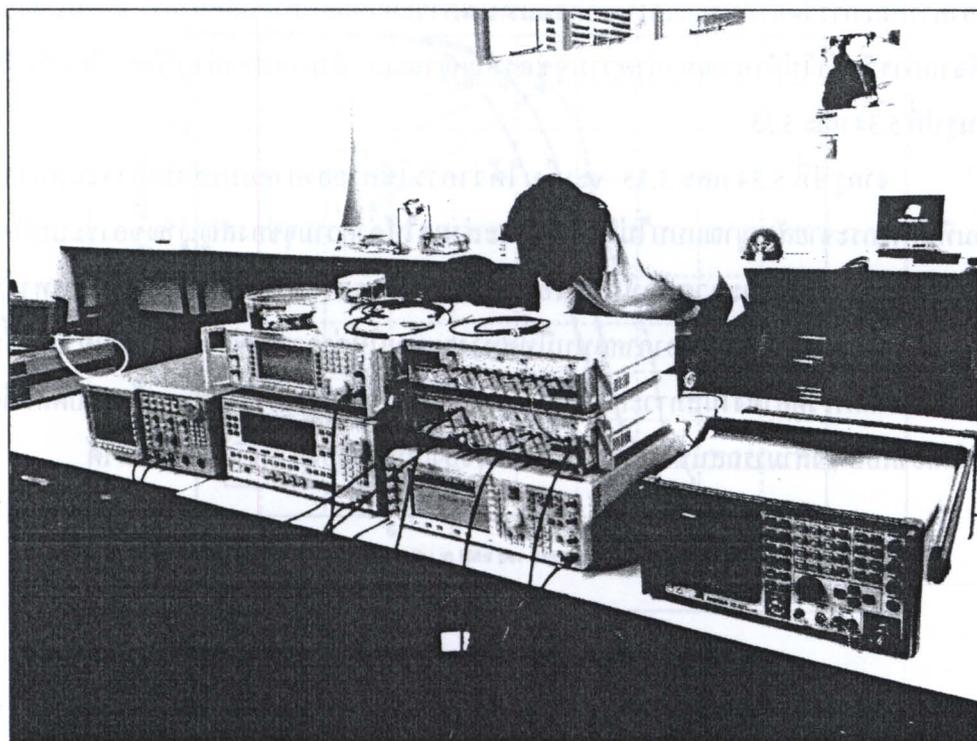
$$y(t) = i(t) + jq(t) \quad (5.1)$$

โดยจะทำการวัดค่าที่ภาครับเปรียบเทียบกับ ระหว่างจากสายอากาศแบบโมโนโพลและสายอากาศแบบยาคิอุระ โดยการเชื่อมต่อระบบภาครับและภาคส่งและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าดัง

แสดงในรูปที่ 5.32 สำหรับรูปที่ 5.33 จะเป็นการวัดวางเครื่องมือวัดสำหรับการวัดค่าในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร



รูปที่ 5.32 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อระบบที่ใช้ในการวัดค่าสัญญาณ



รูปที่ 5.33 ชุดอุปกรณ์วัดค่าของสัญญาณ

ผลการวัดค่าที่ได้จากระบบจะนำไปใช้แทนค่าในแบบจำลองเพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณด้วยโปรแกรม เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองแบบ โดยมีการชดเชยค่าความสูญเสียของระบบดังแสดงในตารางที่ 5.2 และทำการแสดงค่าให้อยู่ในรูปแบบ CCDF ต่อไป

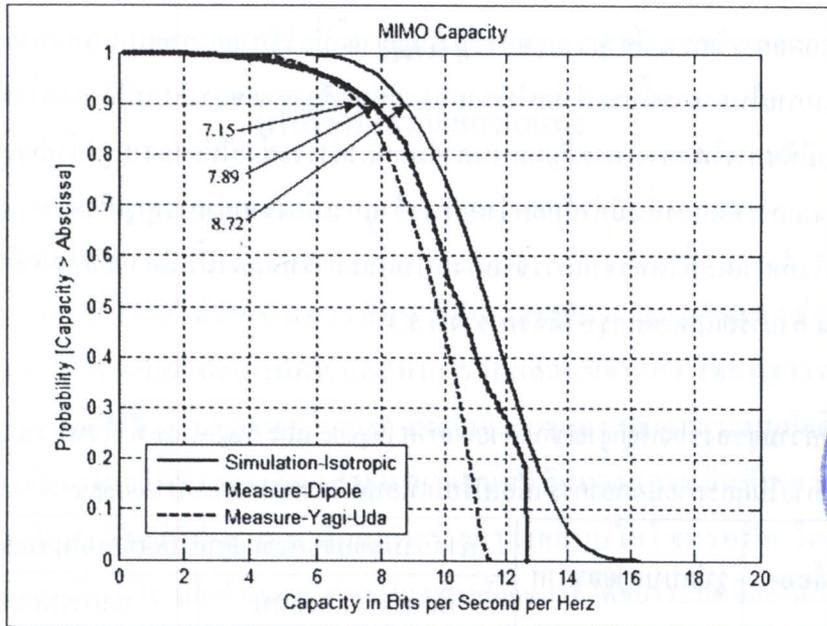
ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราขยายและความสูญเสียของระบบที่ใช้ในการวัด

อัตราขยายสายอากาศภาคส่ง	3 dB
อัตราขยายสายอากาศภาครับ(ไดโพล)	3 dB
อัตราขยายสายอากาศภาครับ(ยาგიודะ)	7 dB
ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ	3.5 เมตร
อัตราความสูญเสียระบบภาคส่ง	-1.1 dB
อัตราความสูญเสียระบบภาครับ	-3.5 dB

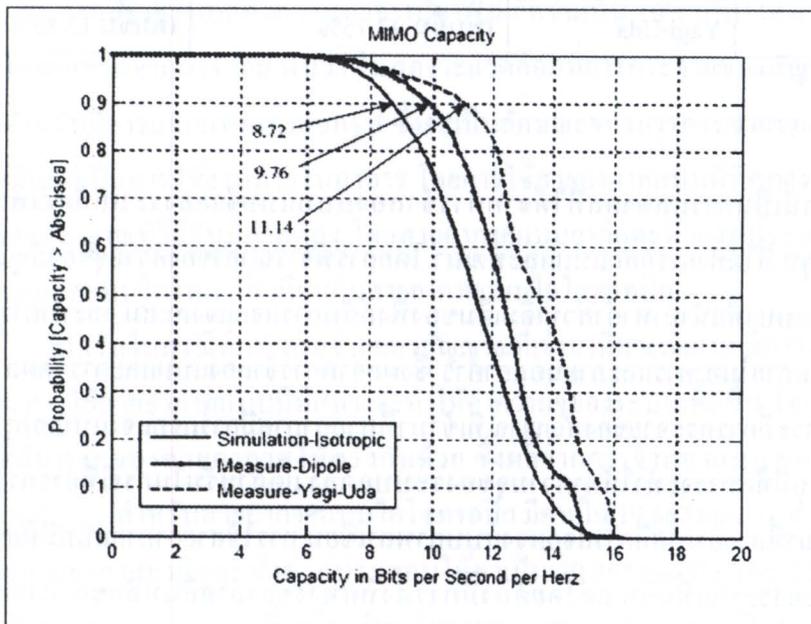
5.4.2 ผลการวัดและค่าความจุช่องสัญญาณในสภาวะภายในและภายนอกอาคาร

จากผลการวัดที่ได้โดยทำการวัดค่าภายในห้องปฏิบัติการแทนสภาวะแวดล้อมภายในอาคารและการวัดค่าที่บริเวณลานจอดรถแทนสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากการวัดค่าไปคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณและนำมาแสดงค่าเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 5.34 และ 5.35

จากรูปที่ 5.34 และ 5.35 จะเห็นได้ว่าการใช้สายอากาศแบบมีทิศทางในสภาวะแวดล้อมที่มีการกระจายสัญญาณแบบไม่มีทิศทาง จะส่งผลให้ค่าความจุช่องสัญญาณของระบบมีค่าลดลง และสำหรับในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารที่มีการกระจายสัญญาณไปในทิศทางที่สายอากาศภาคส่งอยู่นั้น การใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจะช่วยให้ค่าความจุช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดค่าทั้งในสภาวะแวดล้อมทั้งภายในและภายนอกอาคารสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ ซึ่งสามารถสนับสนุนความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 5.34 ความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศแบบต่าง ๆ



รูปที่ 5.35 ความจุช่องสัญญาณ $C_{out,0.1}$ ในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศแบบต่าง ๆ

โดยจากผลการวิเคราะห์ค่าความจุของช่องสัญญาณเมื่อใช้สายอากาศแบบมีทิศทาง สำหรับสถานะแวดล้อมภายในอาคารนั้นจะส่งผลให้ค่าความจุของช่องสัญญาณของระบบมีค่าลดลง แต่การใช้สายอากาศแบบมีทิศทางในสถานะแวดล้อมภายนอกอาคารจะช่วยให้ค่าความจุของช่องสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นได้ โดยผลการทดลองนั้นมีค่าน้อยกว่าผลการจำลองเนื่องจากค่าการสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ แย่งไร้ก็ตามผลที่ได้ทั้งจากการจำลองแบบและการทดลองนั้นมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน สามารถแสดงผลสรุปได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าความจุของช่องสัญญาณของสายอากาศ Dipole และ Yagi-Uda ทั้งในสถานะแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบ Isotropic

สภาพแวดล้อม	รูปแบบสายอากาศ	ค่าความจุของช่องสัญญาณเมื่อเทียบกับ Isotropic	
		ผลการจำลองแบบ	ผลการทดลอง
ภายในอาคาร (Indoor)	Dipole	ลดลง 9.25%	ลดลง 6.21%
	Yagi-Uda	ลดลง 18.00%	ลดลง 18.14%
ภายนอกอาคาร (Outdoor)	Dipole	เพิ่มขึ้น 11.93%	เพิ่มขึ้น 3.17%
	Yagi-Uda	เพิ่มขึ้น 27.75%	เพิ่มขึ้น 15.83%

5.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงผลที่ได้จากการจำลองแบบแบบจำลองระบบมัลติเฟลอินพุท-มัลติเฟลเอาต์พุท ที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนา โดยการพิจารณาค่าของความจุของช่องสัญญาณที่ได้จากการจำลองแบบ เพื่อนำมาหาค่าส่วนเติมเต็มของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม และทำการวัดผลในสถานะแวดล้อมภายในอาคารและภายนอกอาคาร ซึ่งผลจากการจำลองแบบและการวัดผล แสดงให้เห็นว่า ในสถานะที่การกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศมีการแจกแจงแบบเอกรูป การใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจะทำให้ค่าความจุของระบบลดลง แต่สำหรับในกรณีที่มีการกระจายของสัญญาณที่เข้ามาที่สายอากาศมีการแจกแจงแบบลาปลาเซียน การใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจะทำให้ค่าความจุของระบบเพิ่มขึ้น แต่โดยต้องมีการตั้งทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศให้ถูกต้องด้วย