

## บทที่ 3

### ทฤษฎีแบบจำลองระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท

#### 3.1 บทนำ

ในบทนี้เราจะอธิบายถึงแบบจำลองเบื้องต้นสำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท โดยจะเริ่มจากแบบจำลองระบบเบื้องต้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ที่เรียกว่าแบบจำลองช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน นอกจากนี้ยังจะได้ อธิบายถึงแบบจำลองแบบ “One-Ring” และแบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่ ถัดไปจะได้ อธิบายถึงผลสรุปของค่าความจุช่องสัญญาณที่ได้จากระบบพื้นฐานที่เรียกว่า ระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท (Single-Input Single-Output : SISO) ระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท (Single-Input Multiple-Outputs : SIMO) และระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท (Multiple-Input Single-Output : MISO) จากนั้นจะกล่าวถึงค่าความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท โดยจะพิจารณาในเงื่อนไขที่แตกต่างกันสองแบบ คือ กรณีที่ไม่ทราบข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานมีค่าเท่ากัน) และกรณีที่ทราบข้อมูลช่องสัญญาณภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานแบบวอเตอร์ฟิลลิ่ง) และในหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการอธิบายวิธีการวัดประสิทธิภาพระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

#### 3.2 แบบจำลองระบบเบื้องต้น

ระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทเป็นระบบที่มีการใช้งานสายอากาศแบบหลายองค์ประกอบในการรับส่งสัญญาณทั้งในภาคส่งและภาครับ โดยที่ จะมีส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แบ่งสัญญาณข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ เพื่อส่งไปยังระบบสายอากาศภาคส่งพร้อม ๆ กัน และสัญญาณที่ส่งในแต่ละสายอากาศ จะผ่านช่องสัญญาณไร้สายไปยังสายอากาศภาครับ จากนั้นจะต้องผ่านหน่วยประมวลผลข้อมูล เพื่อแยกสัญญาณข้อมูลแต่ละชุดที่ได้รับที่สายอากาศภาครับแต่ละตัว แล้วจึงทำการรวมข้อมูลที่ได้ออกมาที่ปลายทาง ซึ่งอาจเปรียบเทียบกับกับแบ่งข้อมูลออกเป็นหลาย ๆ เส้นทางแล้วส่งไปพร้อม ๆ กันในลักษณะการส่งข้อมูลแบบขนานในการสื่อสารข้อมูลด้วยสายนำสัญญาณนั่นเอง

สำหรับแบบจำลองของระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท ในงานวิจัยนี้ ก่อนที่จะนำไปพัฒนา เพื่อศึกษาผลจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต่อไป เราจะพิจารณาระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทที่มีผู้ใช้งานคนเดียวในย่านความถี่ที่เป็นแถบความถี่แคบ โดยให้จำนวนสายอากาศด้านส่งเป็น  $N_T$  และจำนวนสายอากาศด้านรับเป็น  $N_R$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 รวมทั้งสมมุติให้สายอากาศเป็นแบบไอโซทรอปิกโดยมีค่าเฉลี่ยของสายอากาศทั้งด้านรับ และด้านส่งเท่ากันในทุกทิศทาง ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของสัญญาณที่ได้รับที่สายอากาศภาครับ และสัญญาณที่ส่งออกที่สายอากาศภาคส่ง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\mathbf{y}$  แทนเวกเตอร์สัญญาณที่ภาครับขนาด  $N_R \times 1$

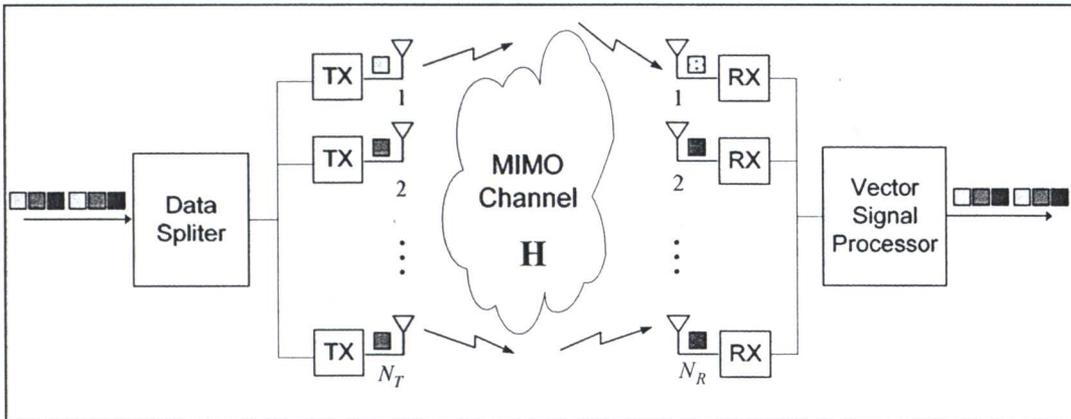
$\mathbf{x}$  แทนเวกเตอร์สัญญาณที่ภาคส่งขนาด  $N_T \times 1$

$\mathbf{n}$  แทนเวกเตอร์สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian noise) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma^2$

$\mathbf{H}$  แทนเวกเตอร์นอร์มอลไลซ์ (normalize) ของช่องสัญญาณที่มีขนาด  $N_R \times N_T$  เขียนแทนได้ดังนี้

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \cdots & h_{N_RN_T} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

โดยที่แต่ละองค์ประกอบ  $h_{mn}$  จะแสดงค่าอัตราขยายเชิงซ้อนระหว่างสายอากาศส่งตัวที่  $n$  กับสายอากาศภาครับตัวที่  $m$  ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมตริกซ์ช่องสัญญาณที่ได้จะสามารถเทียบเคียงกับแบบจำลองช่องสัญญาณแบบไม่มีความจำที่ได้อธิบายไปในบทที่ 2 ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำเอาทฤษฎีข่าวสารเกี่ยวกับแบบจำลองช่องสัญญาณ และค่าความจุช่องสัญญาณมาใช้กับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท

ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการอธิบายถึงแบบจำลองระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทที่สำคัญที่มีการศึกษากันในช่วงที่ผ่านมา โดยจะสามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็น แบบจำลองของช่องสัญญาณแบบต่าง ๆ ได้แก่ แบบจำลองช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน จากนั้นจะได้อธิบายถึงแบบจำลองแบบ “One-Ring” และแบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่ รวมทั้งการศึกษาเกี่ยวกับค่าความจุของแบบจำลองระบบพื้นฐานต่าง ๆ รวมทั้งค่าความจุของแบบจำลองระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทด้วย

### 3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ

ในการสื่อสารแบบไร้สาย สัญญาณที่ถูกส่งออกมาจะสมมติให้ได้รับหลังจากที่ผ่านกระบวนการของการแผ่กระจายคลื่น ซึ่งจะประกอบด้วยผลของการกระจัดกระจาย การสะท้อน การแทรกสอด และการหักเหที่เกิดขึ้นจากวัตถุที่ปรากฏในแต่ละเหตุการณ์ของการสื่อสาร ผลจากความหลากหลาย และความยากในการหาแบบจำลองช่องสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับสภาวะแต่ละชนิดได้ จึงได้นำเสนอแบบจำลองเบื้องต้นมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท ซึ่งจะได้อธิบายแบบจำลองช่องสัญญาณแบบต่าง ๆ ในรายละเอียดต่อไป

#### 3.3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน

สำหรับแบบจำลองช่องสัญญาณการเฟดแบบเลย์ลี (Rayleigh fading channel) ที่มีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน ถือเป็นแบบจำลองพื้นฐานที่ง่ายและใช้กันมากสำหรับแบบจำลองช่องสัญญาณ โดยที่แบบจำลองช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทที่เป็นช่องสัญญาณการเฟดแบบเลย์ลีที่มีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน

จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$h_{mn} = N(0,1/\sqrt{2}) + jN(0,1/\sqrt{2}) \quad (3.3)$$

โดยที่  $h_{mn}$  แทนค่าอัตราขยายเชิงซ้อนระหว่างสายอากาศภาคส่งตัวที่  $n$  กับสายอากาศภาครับตัวที่  $m$  ส่วน  $N(0,1/\sqrt{2})$  แทนการแจกแจงปกติที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น  $1/\sqrt{2}$

ในกรณีของช่องสัญญาณที่มีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน สายอากาศ จะถูกสมมติให้วางห่างจากกันอย่างน้อย  $0.5\lambda$  (Foschini and Gans, 1998) เพื่อที่จะสามารถแน่ใจได้ว่า จะไม่มีผลที่เกิดจากการมีมวลคลัมปลิง และผลกระทบจากความสัมพันธ์ในลักษณะสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (spatial correlation) โดยช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน สามารถเรียกเป็น ช่องสัญญาณขาว (white channel) แทนด้วยสัญลักษณ์  $H_w$  โดยที่คุณสมบัติของ  $H_w$  สามารถสรุปได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E\{[H_w]_{i,j}\} &= 0 \\ E\{|[H_w]_{i,j}|^2\} &= 1 \\ E\{[H_w]_{i,j}[H_w]_{m,n}^\dagger\} &= 0, \text{ ถ้า } i \neq m \text{ และ } j \neq n \end{aligned} \quad (3.4)$$

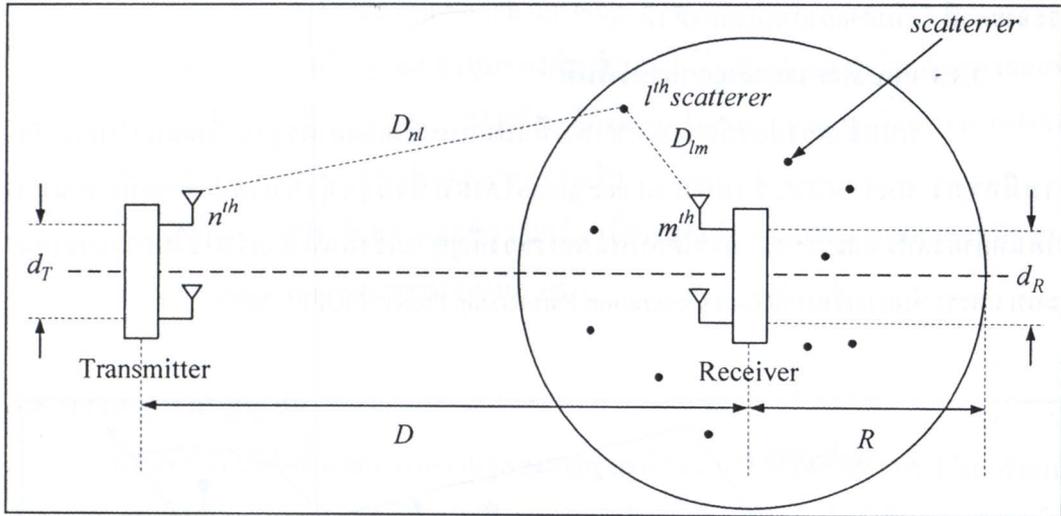
โดยที่  $E\{x\}$  แทนค่าความคาดหวังของ  $x$

$[\cdot]^\dagger$  แทนค่าคอนจูเกตทรานสโพสเชิงซ้อน (complex conjugate transpose)

### 3.3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ “One-Ring”

แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ “One-Ring” ได้มีการอธิบายไว้ในงานของ (Petrucci, Reed and Rappaport, 1996) โดยได้ถูกกล่าวถึงในงานวิจัยของ Shiu, Foschini, Gans and Kahn (2000) Svantesson and Ranheim (2001) และ Svantesson (2002) โดยสำหรับแบบจำลองนี้ จะสมมติให้สถานีภาคส่ง (Base Station : BS) มีการวางตัวของสายอากาศอยู่ในระนาบแนวตั้ง นั่นคือจะไม่เกิดการกระจัดกระจายของสัญญาณที่ด้านส่ง ในขณะที่สถานีภาครับ (Mobile Station : MS) จะถูกล้อมรอบด้วยวงกลมของการกระจัดกระจายที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป โดยที่วัตถุที่ทำให้เกิดการกระจัดกระจายของสัญญาณในวงกลมการกระจัดกระจายคลื่น กำหนดให้มีลักษณะที่ทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่นซ้ำโดยมีลักษณะการแผ่กระจายคลื่นในลักษณะรอบทิศทาง และทำให้เกิดการ

แผ่กระจายคลื่นสะท้อนกลับไปด้วยตรงถึงสายอากาศด้านรับ ทั้งนี้เราจะพิจารณาเฉพาะลำคลื่นที่เกิดการสะท้อนโดยวัตถุที่ทำให้เกิดการกระจัดกระจายของสัญญาณเพียงครั้งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ “One-Ring”

วัตถุที่ทำให้เกิดการกระจัดกระจายของคลื่นแทนด้วย  $L$  สมมุติให้มีการแจกแจงของตำแหน่งในลักษณะการแจกแจงแบบเอกรูปในแผ่นวงกลมรัศมี  $R$  ที่ล้อมรอบสายอากาศด้านรับไว้ โดยทั่วไปแล้วจะให้  $R$  มีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $D$  อย่างไรก็ตามทั้งรัศมีวงกลมการกระจัดกระจายและระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ จะสมมุติให้มีขนาดมากกว่าระยะห่างในการจัดวางสายอากาศภาคส่ง แทนด้วยสัญลักษณ์  $d_T$  และระยะห่างในการจัดวางสายอากาศภาครับมาก ๆ แทนด้วย  $d_R$  เราสามารถเขียนได้เป็น  $(D > R) \gg \max(d_R, d_T)$  (Patzold and Hogstad, 2004)

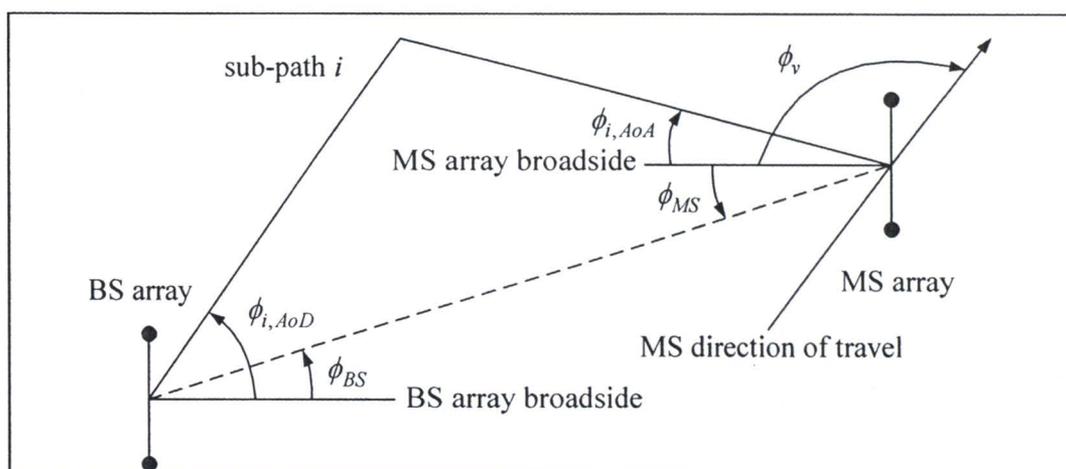
โดยอาศัยแบบจำลองดังกล่าว องค์ประกอบของเมทริกซ์ช่องสัญญาณ ในสมการ (3.2) สามารถหาได้โดย หากเราพิจารณาเพียงเส้นทางการส่งสัญญาณจากสายอากาศด้านส่งที่  $n$  ไปยังสายอากาศด้านรับตัวที่  $m$  ร่วมกับการสะท้อนที่วัตถุที่ก่อให้เกิดการกระจัดกระจายตัวที่  $l$  ดังนั้นอัตราขยายช่องสัญญาณที่  $h_{nm}$  สามารถหาได้จาก (Svantesson and Ranheim, 2001)

$$h_{nm} = \sqrt{\frac{1}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} (D_{nl} + D_{lm}) \right] \quad (3.5)$$

โดยที่  $\alpha_l$  แทนค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของวัตถุที่ก่อให้เกิดการกระจายตัวที่  $l$  โดยที่  $l = 1, 2, 3, \dots, L$  และมีค่าแบบจำลองเป็นค่าตัวแปรสุ่มเชิงซ้อนที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และค่าความแปรปรวนเป็นหนึ่ง ส่วน  $D_{lm}$  แทนระยะห่างระหว่างสายอากาศรับตัวที่  $m$  กับวัตถุที่ก่อให้เกิดการกระจายตัวที่  $l$  และ  $D_{nl}$  แทนระยะห่างระหว่างวัตถุที่ก่อให้เกิดการกระจายตัวที่  $l$  กับสายอากาศส่งตัวที่  $n$

### 3.3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่

แบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่ที่เป็นแบบจำลองมาตรฐานที่พัฒนาโดยความร่วมมือของ 3GPP-3GPP2 ร่วมกับ ad-hoc group (AHG) ซึ่งมีจุดมุ่งหมายสำคัญเพื่อพัฒนา กำหนดค่าตัวแปร และวิธีการ ภายใต้แบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่สำหรับการประเมินระบบ และระดับการเชื่อมต่อ (3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2007)



รูปที่ 3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่สำหรับระบบ MIMO ขนาด 2x2

แบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่ เป็นแบบจำลองที่พิจารณาค่าตัวแปรในระนาบสองมิติ โดยการพิจารณากลุ่มของวัตถุที่ก่อให้เกิดการกระจายจำนวน  $N$  กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มส่งผลกับเส้นทาง โดยมีเส้นทางย่อยที่ไม่สามารถทราบได้อยู่จำนวน  $M$  ในเส้นทางดังกล่าว จากนิยามของของแบบจำลองข้างต้น สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.3 โดยความหมายของมุมที่ปรากฏสามารถอธิบายได้ดังนี้

$\phi_{BS}$  มุมระหว่างแนวตั้งฉากการกระจายของสายอากาศของสถานีภาคส่ง เมื่อเทียบกับเส้นตรงที่ลากจากสถานีภาคส่งไปยังสถานีภาครับ



$\phi_{MS}$	มุมระหว่างแนวตั้งฉากการจัดวางสายอากาศของสถานีภาครับเมื่อเทียบกับเส้นตรงที่ลากจากสถานีภาคส่งไปยังสถานีภาครับ
$\phi_{i,AoD}$	ค่าสัมบูรณ์ของมุมของสัญญาณที่ส่งออก (AoD) สำหรับเส้นทางย่อยที่ $i^{th} = (1, 2, \dots, M)$ ที่สถานีภาคส่ง โดยเทียบกับแนวตั้งฉากของการจัดวางสายอากาศของสถานีภาคส่ง
$\phi_{i,AoA}$	ค่าสัมบูรณ์ของมุมของสัญญาณที่ได้รับ (AoA) สำหรับเส้นทางย่อยที่ $i^{th} = (1, 2, \dots, M)$ ที่สถานีภาครับ โดยเทียบกับแนวตั้งฉากของการจัดวางสายอากาศของสถานีภาครับ
$\phi_v$	มุมของเวกเตอร์ความเร็ว เมื่อเทียบกับแนวตั้งฉากของการจัดวางสายอากาศของสถานีภาครับ

### 3.4 ความจุช่องสัญญาณ

ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงค่าความจุช่องสัญญาณที่ได้จากระบบแบบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบซิงเกิลอินพุต-ซิงเกิลเอาต์พุต ระบบซิงเกิลอินพุต-มัลติเพิลเอาต์พุต ระบบมัลติเพิลอินพุต-ซิงเกิลเอาต์พุต ตลอดจนถึงระบบมัลติเพิลอินพุต-มัลติเพิลเอาต์พุต และจะได้อธิบายค่าความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุต-มัลติเพิลเอาต์พุต ในเงื่อนไขที่แตกต่างกันสองแบบ คือกรณีที่ไม่ทราบข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานมีค่าเท่ากัน) และ กรณีที่เราทราบข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานแบบวอเตอร์ฟอลล์)

ได้มีการริเริ่มในการคำนวณค่าความจุช่องสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณแบบ AWGN (Shannon, 1948) โดยการเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์ของช่องสัญญาณแบบ AWGN และจากการศึกษาของ Shannon (1948) ซึ่งได้อธิบายถึงที่มาในบทที่ผ่านมา จะพบว่า ค่าความจุช่องสัญญาณของช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN จะมีค่าเป็น

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad \text{บิตต่อวินาที} \quad (3.6)$$

- โดยที่  $B$  แทนความกว้างแถบความถี่
- $N_0$  แทนค่าความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน
- $P$  แทนค่าเฉลี่ยกำลังงาน

ต่อมามีการพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ ขึ้นเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของระบบการสื่อสารไร้สาย

เช่น การใช้ความถี่ซ้ำ (frequency reuse) และเทคนิคสายอากาศแบบหลายองค์ประกอบ เป็นต้น โดยเทคนิคสายอากาศแบบหลายองค์ประกอบ จะสามารถเพิ่มความจุช่องสัญญาณได้ โดยไม่ต้องใช้แถบความถี่เพิ่ม แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ในการติดตั้งสายอากาศ

เทคนิคสายอากาศแบบหลายองค์ประกอบ เริ่มแรกได้มีการใช้งานสายอากาศในลักษณะที่เรียกว่าระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท ต่อมามีการพัฒนาโดยใช้สายอากาศหลายตัวที่เรียกว่าระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท เช่นในการใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยให้สายอากาศด้านส่งมีตัวเดียว และให้มีสายอากาศด้านรับหลายตัว ในลักษณะที่เรียกว่า ไคเวอร์ซิตี (diversity) นอกจากนี้หากมีการเพิ่มจำนวนสายอากาศด้านส่งมากขึ้น แต่ใช้สายอากาศด้านรับตัวเดียว ก็จะเรียกว่าเป็นระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท

สำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท ได้ถูกพัฒนาต่อมา เนื่องจากเป็นระบบที่มีลักษณะการใช้งานโดยการใช้สายอากาศหลาย ๆ องค์ประกอบในทั้งภาคส่งและภาครับ ซึ่งได้ทำการแสดงให้เห็นว่า สามารถช่วยเพิ่มความจุช่องสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบหลายวิถี ระบบที่ทำงานโดยการอาศัยคุณสมบัติของมิติในช่องสัญญาณแบบหลายวิถี ซึ่งจะให้ผลของประสิทธิภาพของระบบที่เพิ่มขึ้นได้ ทั้งในส่วนของอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate : BER) และในส่วนของการส่งผ่านข้อมูล โดยการใช้ลักษณะไคเวอร์ซิตีเชิงพื้นที่ (spatial diversity) (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การทำงานที่เป็นระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท ระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท และระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท เป็นส่วนย่อย ที่เป็นกรณีพิเศษของระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทนั่นเอง ผลที่ได้จากระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท จะทำให้ความจุช่องสัญญาณที่ได้เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ตามจำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้น โดยอาศัยคุณสมบัติของการเฟดแบบหลายวิถีเป็นกุญแจสำคัญ

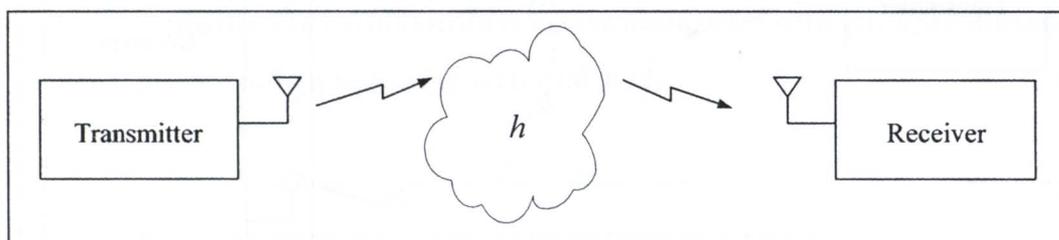
จากพื้นฐานการคำนวณค่าความจุช่องสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณแบบ AWGN ได้นำไปพิจารณาค่าความจุช่องสัญญาณ สำหรับระบบที่ใช้เทคนิคสายอากาศแบบหลายองค์ประกอบแบบต่าง ๆ โดยเราสามารถสรุปขอบเขตของค่าความจุของระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทเทียบกับค่าความจุของระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท ระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท และระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท โดยเราจะทำการให้นิยามคุณลักษณะของระบบไว้ดังนี้

- 1) ช่องสัญญาณเป็นแบบไม่มีความจำ นั่นหมายถึง แต่ละช่องสัญญาณมีความเป็นอิสระต่อกัน (Telatar, 1995)
- 2) เราจะพิจารณาเฉพาะค่าความจุระบบที่มีรูปแบบผู้ใช้งานคนเดียว และสัญญาณที่ด้านรับมีการรบกวนด้วยสัญญาณแบบ AWGN เพียงชนิดเดียว
- 3) การวิเคราะห์ค่าความจุอาศัยพื้นฐานของสภาวะที่เป็นแบบ quasi-static นั่นหมายความว่า ช่องสัญญาณ มีการคงตัวในคาบเวลาหนึ่ง และมีระยะเวลาที่นานพอที่ข้อมูลสามารถ

ที่จะส่งได้อย่างมีนัยสำคัญ (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003; Foschini and Gans, 1998)

### 3.4.1 ค่าความจุของระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท

สำหรับระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท เป็นระบบที่ประกอบด้วยสายอากาศภาครับ 1 องค์ประกอบ และสายอากาศภาคส่งจำนวน 1 องค์ประกอบ โดยมีอัตราขยายช่องสัญญาณระหว่างภาครับและภาคส่งแทนด้วย  $h$  ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท

ค่าความจุช่องสัญญาณสำหรับระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท สามารถหาได้ดังนี้ (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib A., 2003)

$$C_{SISO} = \log_2(1 + \rho|h|^2) \quad (3.7)$$

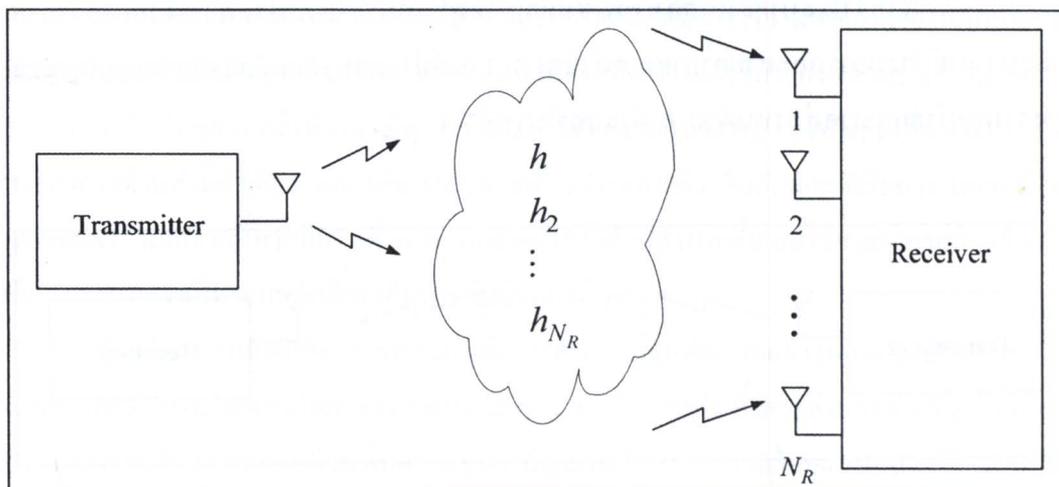
โดยที่  $\rho$  แทนค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR) ที่สายอากาศภาครับ และ  $h$  แทนนอร์มอลไลซ์อัตราขยายเชิงซ้อนของช่องสัญญาณ

### 3.4.2 ค่าความจุของระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเฟลเอาต์พุท และระบบมัลติเฟลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท

ค่าความจุช่องสัญญาณของระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเฟลเอาต์พุท สามารถหาได้ดังนี้ (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003)

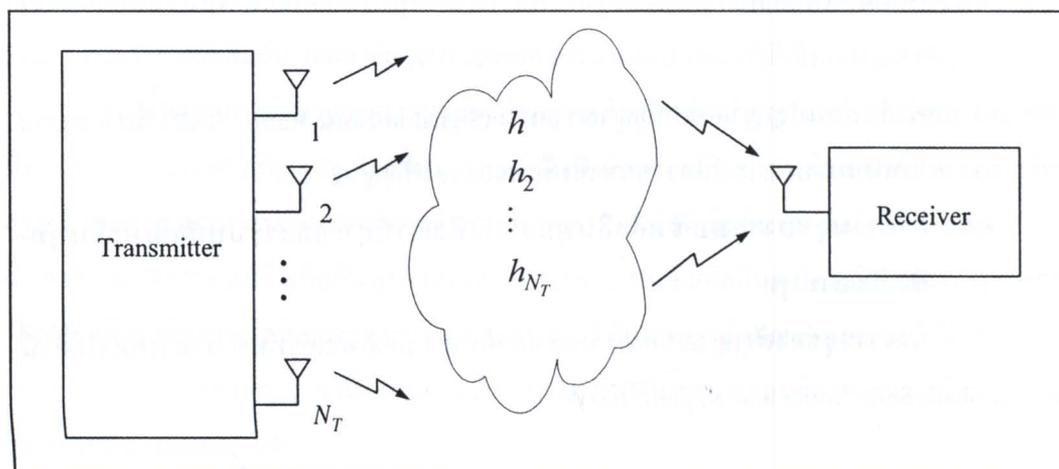
$$C_{SIMO} = \log_2 \left( 1 + \rho \cdot \sum_{m=1}^{N_R} |h_m|^2 \right) \quad (3.8)$$

โดยที่ จำนวนสายอากาศส่งมีค่าเป็น 1 จำนวนสายอากาศรับมีค่าเป็น  $N_R$  และ  $h_m$  แทน อัตราขยายของสายอากาศตัวที่  $m$  ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองช่องสัญญาณระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท

อย่างไรก็ตามสำหรับระบบที่มีจำนวนสายอากาศส่งเป็น  $N_T$  จำนวนสายอากาศรับเป็น 1 และ  $h_n$  แทนอัตราขยายของสายอากาศตัวที่  $n$  ดังแสดงในรูปที่ 3.6

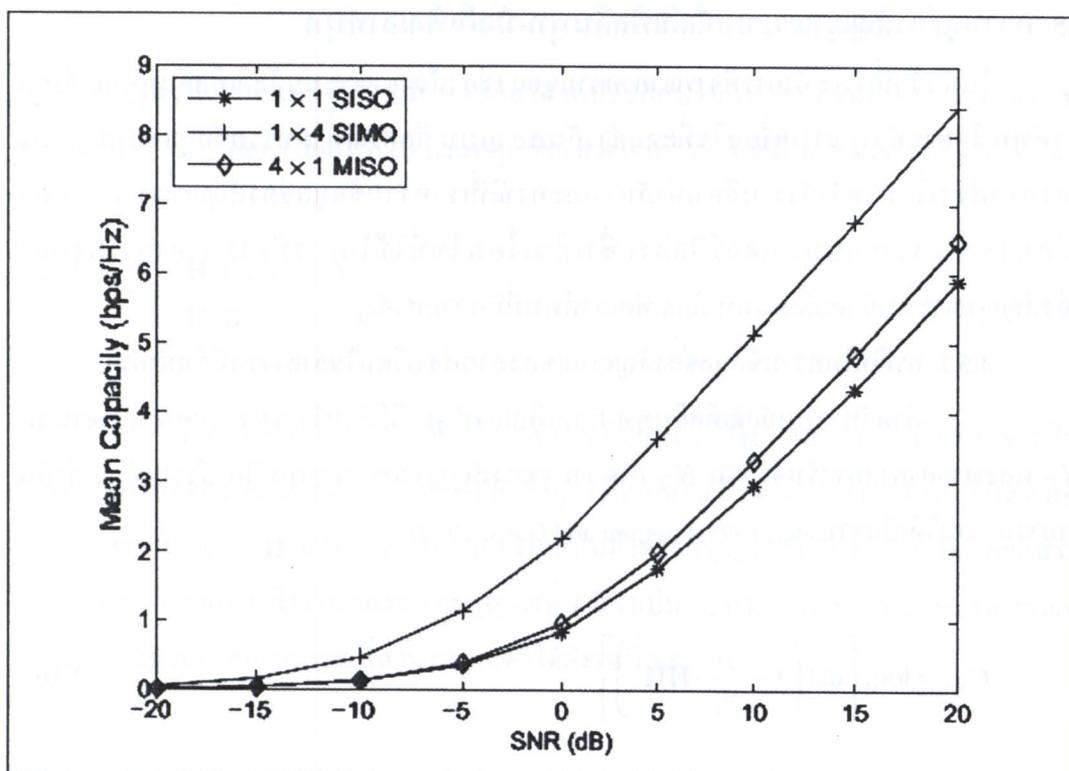


รูปที่ 3.6 แบบจำลองช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท

ค่าความจุช่องสัญญาณของระบบจะเรียกว่าระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท สามารถทำได้ดังนี้ (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003)

$$C_{MISO} = \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N_T} \cdot \sum_{n=1}^{N_T} |h_n|^2 \right) \quad (3.9)$$

โดยที่  $h_n$  แทนอัตราขยายของสายอากาศตัวที่  $n$  เพื่อให้แน่ใจว่ากำลังงานที่ส่งจากสายอากาศด้านส่งมีค่าเท่ากัน จึงต้องมีการทำนอร์มอลไลซ์ค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนด้วย  $N_T$



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนกับค่าความจุช่องสัญญาณของระบบ SISO SIMO และ MISO

ในรูปที่ 3.7 แสดงค่าความจุช่องสัญญาณระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท ระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท และระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบ

ค่าความจุช่องสัญญาณกับค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยใช้สมการ (3.7) ถึง (3.9) ซึ่งจากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท และระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุทสามารถปรับปรุงค่าความจุของระบบได้มากกว่าระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท โดยการใช้จำนวนสายอากาศที่มากกว่า อย่างไรก็ตามระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท และระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณมีความสัมพันธ์ในลักษณะเพิ่มขึ้นแบบลอการิทึม เมื่อเทียบกับจำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้น และหากเปรียบเทียบสมการ (3.8) กับสมการ (3.9) แล้ว จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าความจุของระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท มีค่ามากกว่าระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุทในกรณีเงื่อนไขที่ไม่มีข้อมูลของช่องสัญญาณที่ระบบภาคส่ง

### 3.5 ความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท

ในหัวข้อนี้เราจะทำการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท โดยจะพิจารณาในเงื่อนไขที่แตกต่างกันสองแบบ คือกรณีที่ไม่นำข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานมีค่าเท่ากัน) และกรณีที่นำข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานแบบวอเตอร์ฟิลลิ่ง) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาค่าความจุของช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุทที่มีความสำคัญ

#### 3.5.1 กรณีที่ไม่นำข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานมีค่าเท่ากัน)

สำหรับระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท ที่มีสำหรับสายอากาศภาคส่งจำนวน  $N_T$  และสายอากาศภาครับจำนวน  $N_R$  ค่าความจุช่องสัญญาณของระบบที่มีกำลังงานที่ส่งเท่ากันสามารถเขียนได้เป็น (Telatar, 1995; Foschini and Gans, 1998)

$$C_{EP} = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{N_T} \cdot \mathbf{H}\mathbf{H}^\dagger \right) \right] \quad (3.10)$$

โดยที่  $\det(\cdot)$  แทนการหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ (determinant) ของเมทริกซ์

$\mathbf{I}$  แทนเมทริกซ์หนึ่งหน่วยที่มีขนาด  $N_R \times N_T$

$\rho$  แทนค่าเฉลี่ยของสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ภาครับ

$\mathbf{H}^\dagger$  แทนคอนจูเกตทรานสโพสเชิงซ้อนของ  $\mathbf{H}$

ในการศึกษาคูณลักษณะของเมทริกซ์ช่องสัญญาณ  $\mathbf{H}$  เราสามารถอาศัยคุณสมบัติของการหาค่าซิงกูลาร์ดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition : SVD) ของ  $\mathbf{H}$  โดยการหา

ค่าทแยงมุมของ  $\mathbf{H}$  และหาค่าไอเกน (eigenvalues) โดยวิธีการขยายค่าซิงกูลาร์ดีคอมโพสิชัน สำหรับ  $\mathbf{H}$  ที่มีขนาด  $N_R \times N_T$  ใด ๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^\dagger \quad (3.11)$$

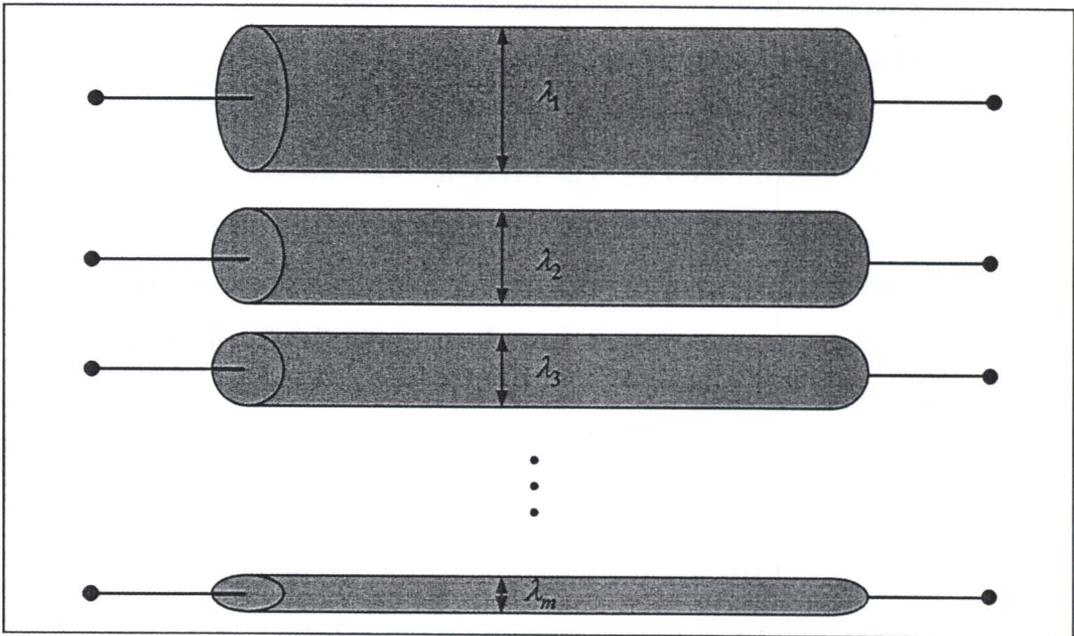
โดยที่  $\mathbf{U}$  เป็นยูนิแทรีเมทริกซ์ (unitary matrix) ขนาด  $N_R \times N_R$  และ  $\mathbf{V}$  เป็นยูนิแทรีเมทริกซ์ ขนาด  $N_T \times N_T$  นั้นหมายความว่า  $\mathbf{U}\mathbf{U}^\dagger = \mathbf{V}\mathbf{V}^\dagger = \mathbf{I}$  และ  $\mathbf{D}$  มีค่าไม่เป็นค่าลบ และมีองค์ประกอบในแนวทแยงมุมกำหนดได้ดังนี้

$$\mathbf{D} = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_m}, 0, \dots, 0) \quad (3.12)$$

โดยที่  $\text{diag}(\mathbf{A})$  คือเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าองค์ประกอบในแนวทแยงมุมของเวกเตอร์  $\mathbf{A}$  ส่วน  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  คือค่าไอเกนที่ไม่เท่ากับศูนย์ของเวกเตอร์  $\mathbf{W}$  โดยที่  $m = \max(N_R, N_T)$  และ

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{H}\mathbf{H}^\dagger, N_R \leq N_T \\ \mathbf{H}^\dagger\mathbf{H}, N_R > N_T \end{cases} \quad (3.13)$$

หากคอลัมน์ของ  $\mathbf{U}$  เป็นไอเกนเวกเตอร์ของ  $\mathbf{H}\mathbf{H}^\dagger$  และคอลัมน์ของ  $\mathbf{V}$  เป็นไอเกนเวกเตอร์ของ  $\mathbf{H}^\dagger\mathbf{H}$  (Telatar, 1995) ค่าซิงกูลาร์ดีคอมโพสิชันในสมการ (3.10) ที่แสดงค่าเมทริกซ์ช่องสัญญาณ  $\mathbf{H}$  สามารถหาค่าทแยงมุมเป็นค่าช่องสัญญาณย่อยที่ตั้งฉากกันโดยอิสระ และโดยที่อัตราขยายกำลังงานของช่องสัญญาณที่  $i$  มีค่าเป็น  $\lambda_i$  (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003) แล้ว สถานการณ์นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ช่องสัญญาณแบบไอเกน

ด้วยการแทนค่า  $\mathbf{H}$  ด้วย  $\mathbf{UDV}^\dagger$  ตามสมการ (3.11) และคุณสมบัติสมการ (3.1) ด้วย  $\mathbf{U}^\dagger$  เราสามารถเขียนสมการ (3.1) ได้ใหม่เป็น

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{D}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (3.14)$$

โดยที่  $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^\dagger \mathbf{y}$   $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{V}^\dagger \mathbf{x}$  และ  $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{U}^\dagger \mathbf{n}$

ในทำนองเดียวกันสมการ (3.10) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น (Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003)

$$C_{EP} = \sum_{i=1}^m \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N_T} \lambda_i \right) \quad (3.15)$$

โดยที่  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  คือค่าไอเกนที่ไม่เท่ากับศูนย์ของเวกเตอร์  $\mathbf{W}$  ที่ได้จากสมการ (3.12)

### 3.5.2 กรณีที่เราทราบข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง(เงื่อนไขกำลังงานแบบวอเตอร์ฟิลลิ่ง)

ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา หากเราไม่ทราบข้อมูลช่องสัญญาณที่ภาคส่ง จะทำให้เราไม่สามารถเข้าถึงช่องสัญญาณย่อย ๆ ได้ ซึ่งเงื่อนไขกรณีที่ทำให้กำลังงานมีค่าเท่ากันสำหรับทุกช่องสัญญาณจึงมีความเหมาะสมในกรณีนี้

แต่ในกรณีที่เราทราบข้อมูลของช่องสัญญาณ โดยสมบูรณ์แล้ว วิธีการภายใต้เงื่อนไขกำลังงานแบบวอเตอร์ฟิลลิ่ง จะช่วยปรับปรุงกำลังงานของสัญญาณที่ภาคส่งให้เหมาะสมได้ โดยที่ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการนี้ คือจะทำการแบ่งช่องสัญญาณที่มีกำลังงานไม่เหมาะสม โดยการลดกำลังงานในช่องสัญญาณที่มากไป เพื่อไปชดเชยให้กับช่องสัญญาณที่มีค่าต่ำเกินไป โดยผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงได้ดังนี้ (Telatar, 1995; Khalighi, Brossier, Jourdain and Raouf, 2001; Gesbert, Shafi, Shiu, Smith and Naguib, 2003)

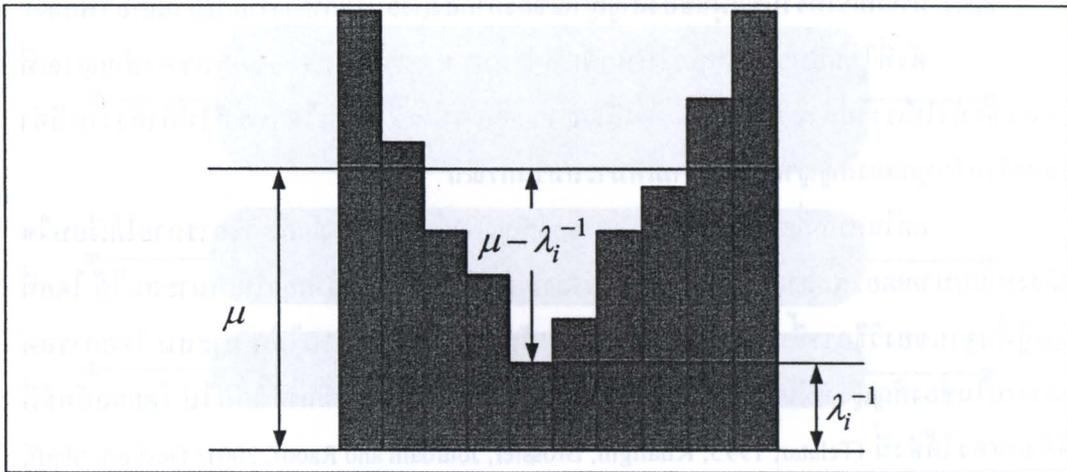
$$C_{WF} = \sum_{i=1}^m \log_2(\mu\lambda_i)^+ \quad (3.16)$$

โดยที่  $\mu$  คำนวณได้จากขั้นตอนวิธีวอเตอร์ฟิลลิ่ง (water-filling algorithm) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\rho = \sum_{i=1}^m (\mu - \lambda_i^{-1})^+ \quad (3.17)$$

ซึ่ง  $(.)^+$  หมายถึงค่าที่เป็นค่าบวกเท่านั้น และ  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  คือค่าไอเกนที่ไม่เท่ากับศูนย์ของเวกเตอร์  $\mathbf{W}$  โดยที่  $m = \max(N_R, N_T)$

หากเราเปรียบเทียบกับเงื่อนไขกรณีที่ทำให้กำลังงานมีค่าเท่ากันในสมการ (3.15) แล้วเงื่อนไขวอเตอร์ฟิลลิ่ง ในสมการ (3.16) จะมีข้อดีในส่วนที่ทำให้ค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่า โดยแนวคิดเงื่อนไขวอเตอร์ฟิลลิ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ช่องสัญญาณแบบวอเตอร์ฟิลลิ่ง

### 3.6 การวัดประสิทธิภาพระบบมัลติเพล็กซ์-มัลติเพล็กซ์

เนื่องจากช่องสัญญาณ  $H$  เป็นค่าสุ่ม ดังนั้นค่าความจุของช่องสัญญาณสำหรับระบบมัลติเพล็กซ์-มัลติเพล็กซ์ จึงเป็นค่าตัวแปรเชิงสุ่ม ค่าความจุช่องสัญญาณแบบเฟดดิ้ง สามารถกำหนดได้หลายวิธี ในทางปฏิบัติค่าความจุเฉลี่ย (mean capacity) และค่าความจุที่ไม่สามารถใช้ได้ (outage capacity) ถือเป็นค่าที่ใช้กันโดยทั่วไปในการวัดค่าเชิงสถิติ

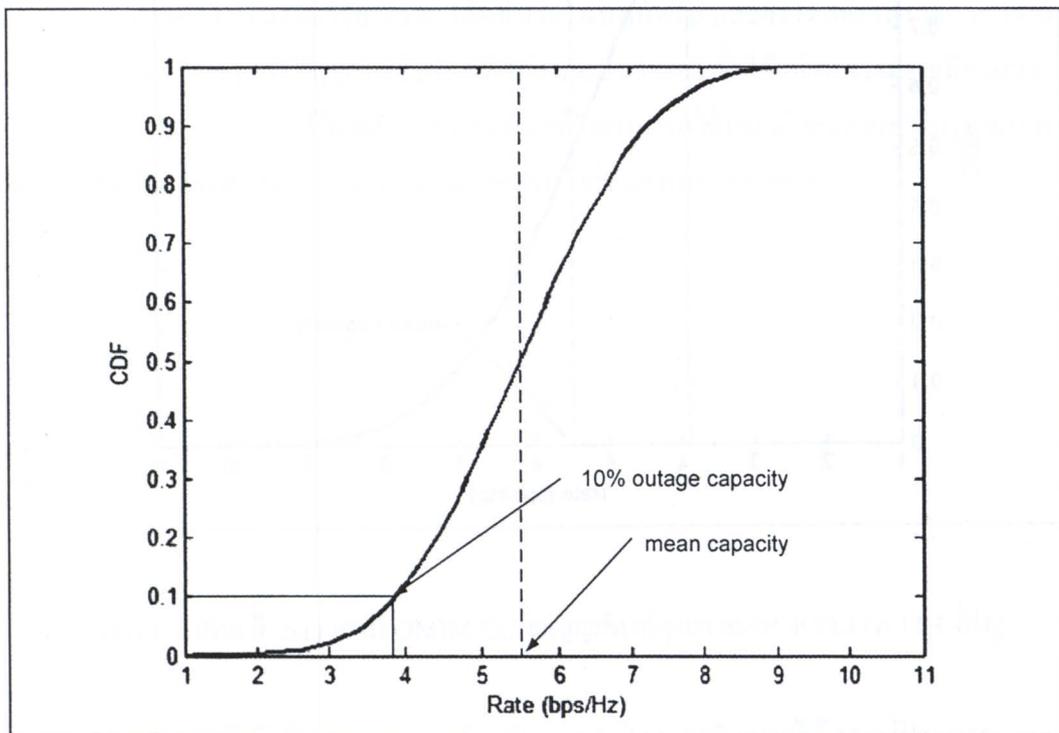
ค่าความจุเฉลี่ยของระบบมัลติเพล็กซ์-มัลติเพล็กซ์แทนด้วย  $\bar{C}$  โดยการรวบรวมค่าเฉลี่ยของอัตราการรับส่งข่าวสารบนช่องสัญญาณ  $H$  ที่พิจารณา โดยที่ค่าเฉลี่ย (Telatar, 1995) หาได้จาก

$$\bar{C} = E \left\{ \sum_{i=1}^m \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N_T} \lambda_i \right) \right\} \quad (3.18)$$

สำหรับค่าความจุที่ไม่สามารถใช้งานได้ จะกำหนดได้โดยระดับของเปอร์เซ็นต์ของระบบไม่สามารถใช้งานที่ค่าความจุช่องสัญญาณนั้นได้ โดยเราจะกำหนดระดับเปอร์เซ็นต์แทนด้วย  $q$  ค่าความจุที่ไม่สามารถใช้งานได้แทนด้วยสัญลักษณ์  $C_{out,q}$  โดยจะหมายถึงอัตราการรับส่งข่าวสารที่สามารถใช้งานได้ค่าเป็น  $(100 - q)$  เปอร์เซ็นต์ของช่องสัญญาณที่พิจารณาเขียนได้เป็น

$$P(C \leq C_{out,q}) = q\% \quad (3.19)$$

โดยรูปที่ 3.10 จะแสดงค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุต-มัลติเพิลเอาต์พุตที่มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ (bps/Hz) โดยที่มีจำนวนสายอากาศด้านส่งเป็น 2 และจำนวนสายอากาศด้านรับเป็น 2 โดยให้ค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเป็น 10 dB ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ทราบข้อมูลของช่องสัญญาณที่ภาคส่ง โดยจะเห็นว่าค่าความจุเฉลี่ยที่ได้มีค่าเป็น 5.5593 bps/Hz ขณะที่ค่าความจุที่ไม่สามารถใช้งานได้ที่ระดับ 10% มีค่าเป็น 3.896 bps/Hz



รูปที่ 3.10 ค่า CDF ของความจุช่องสัญญาณ 2x2 MIMO แบบ i.i.d. ที่ SNR = 10 dB

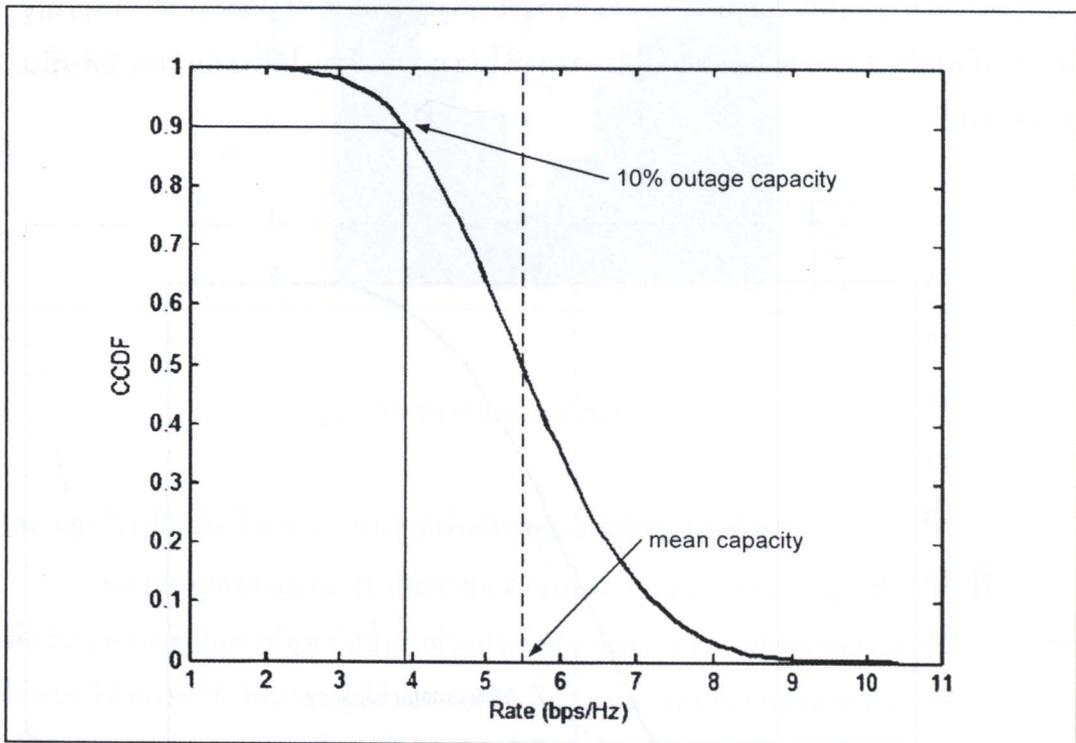
อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอค่าความจุช่องสัญญาณที่ได้จากการจำลองแบบใน

- รูปแบบที่เป็นค่าส่วนเติมเต็มของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Complementary Cumulative Distribution Functions : CCDF)

ค่าส่วนเติมเต็มของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจะสัมพันธ์กับค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมตามสมการ (3.20)

$$Q(x) = 1 - F(x) \quad (3.20)$$

โดยที่  $F(x)$  เป็นค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม และ  $Q(x)$  เป็นค่าส่วนเติมเต็มของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ค่า CCDF ของความจุช่องสัญญาณ 2x2 MIMO แบบ i.i.d. ที่ SNR = 10 dB

จากรูปที่ 3.11 ได้แสดงตัวอย่างค่าความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเฟลอินพุท-มัลติเฟลเอาต์พุท จะเห็นได้ว่าเป็นค่าของข้อมูลเดียวกันในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ค่า  $C_{out,0.1} = 3.896$  bps/Hz จะหมายถึงโอกาสที่ระบบจะมีค่าความจุช่องสัญญาณต่ำกว่า 3.896 bps/Hz มีอยู่ 10% หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือมีโอกาส 90% ที่ระบบจะมีค่าความจุช่องสัญญาณมากกว่าค่าตามแกนนอนคือ 3.896 bps/Hz และค่าความจุเฉลี่ยที่ได้มีค่าเป็น 5.5593 bps/Hz เช่นเดียวกับค่า CDF

### 3.7 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงแบบจำลองระบบมัลติเฟลอินพุท-มัลติเฟลเอาต์พุท โดยได้กล่าวถึงในรายละเอียดของแบบจำลองพื้นฐานต่าง ๆ ได้แก่ แบบจำลองช่องสัญญาณแบบมีความอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงเหมือนกัน แบบจำลอง “One-Ring” แบบจำลองช่องสัญญาณเชิงพื้นที่ และได้กล่าวถึงสมการในการคำนวณหาค่าความจุช่องสัญญาณระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท ระบบ

ซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท ระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท และได้ทำการเปรียบเทียบค่าความจุช่องสัญญาณที่ได้จากแบบจำลองของระบบซิงเกิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท ระบบซิงเกิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท ระบบมัลติเพิลอินพุท-ซิงเกิลเอาต์พุท รวมทั้งได้แสดงค่าแบบจำลองค่าความจุช่องสัญญาณระบบมัลติเพิลอินพุท-มัลติเพิลเอาต์พุท ในเงื่อนไขที่แตกต่างกันสองแบบ คือ กรณีที่ไม่ทราบข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานมีค่าเท่ากัน) และ กรณีที่เราทราบข้อมูลช่องสัญญาณของภาคส่ง (เงื่อนไขกำลังงานแบบวอเตอร์ฟิลลิ่ง) โดยทั้งแบบจำลองช่องสัญญาณและแบบจำลองความจุช่องสัญญาณทั้งหมดที่ได้กล่าวมานั้น จะเป็นกุญแจสำคัญที่จะได้นำมาพัฒนาต่อไปในงานวิจัย ซึ่งจะได้อธิบายในบทถัดไป และยังสามารถกล่าวถึงวิธีการวัดผลเปรียบเทียบค่าความจุช่องสัญญาณเชิงสถิติที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งได้แก่ ค่าความจุเฉลี่ย และค่าความจุที่ไม่สามารถใช้งานได้ โดยสำหรับค่าความจุที่ไม่สามารถใช้งานได้ จะแสดงค่าในรูปของ ค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม และ ค่าส่วนเติมเต็มของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม