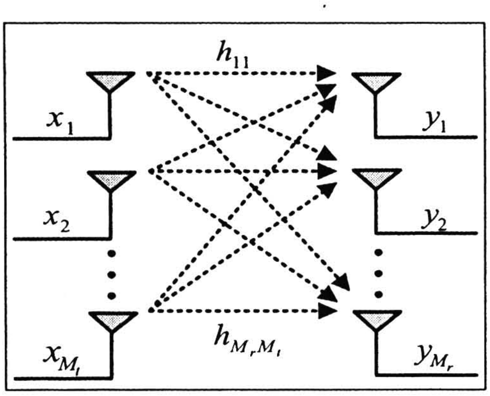
บทที่ 2 ความจุช่องสัญญาณในระบบไมโมที่ใช้การประมวลผลแถวลำดับ

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีความจุช่องสัญญาณ โดยพิจารณาระบบที่มีสายอากาศส่งและรับมากกว่า 1 ต้น ซึ่งเป็นระบบที่เรียกโดยทั่วไปว่าระบบไมโม (MIMO) การที่มีจำนวนสายอากาศมากกว่า 1 ต้น จะสามารถให้อัตราการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นโดยการมัลติเพลกซ์ (Multiplexing) หรือพัฒนาคุณลักษณะด้วยไดเวอร์ซิตี (Diversity) ในระบบนี้สายอากาศส่งและรับช่วยในการเพิ่มอัตราขยายไดเวอร์ซิตี การมัลติเพลกซ์จะส่งเสริมในด้านโครงสร้างของอัตราขยายของช่องสัญญาณ ซึ่งจะมีความเป็นอิสระในแต่ละทิศทางการเดินทางของคลื่น โดยมีผู้ที่เริ่มใช้ระบบนี้ได้แก่ Winters, Foschini, Gans, and Telater ซึ่งในระบบนี้เราจะตรวจสอบความแตกต่างการใช้สายอากาศหลาย ๆ ต้นเพื่อหาคุณลักษณะที่ดีของระบบ โดยพิจารณาช่องสัญญาณที่เกิดในหลาย ๆ แบบ

ก่อนเข้าสู่เนื้อหาของบทนี้ ขอทำความเข้าใจเรื่องการประมวลผลแถวลำดับว่าเป็นการประมวลผลตามวิธีปกติของระบบไมโม ซึ่งไม่ต้องเขียนบอกว่าเป็นการประมวลผลแถวลำดับก็จะได้ความหมายที่เข้าใจตรงกันว่าเป็นการพิจารณาแถวลำดับไม่ใช่เชิงมุม ดังนั้นเพื่อความกะทัดรัด การอ้างอิงในบทนี้จึงไม่ใช้คำว่าการประมวลผลแถวลำดับต่อท้ายระบบไมโม



รูปที่ 2-1 การรับส่งข้อมูลในระบบไมโม

2.2 ระบบไมโมที่เป็นแถบความถี่แคบ (NARROWBAND MIMO MODEL)

ในหัวข้อนี้จะพิจาณาช่องสัญญาณระบบไมโมที่เป็นแถบแคบ ใช้กับการสื่อสารจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งมี $\boldsymbol{M_t}$ คือ จำนวนสายอากาศส่ง และ $\boldsymbol{M_r}$ คือ จำนวนสายอากาศรับ แสดงดังรูปที่ 2-1 ระบบนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{M_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r1} & \cdots & h_{M_rM_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{M_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{M_r} \end{bmatrix} \tag{2-1}$$

หรือทั่วไปเขียนเป็น $\boldsymbol{y} = \mathbf{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}$ เมื่อ $\boldsymbol{n}$ คือ เวกเตอร์สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ภาครับ ส่วน $\mathbf{H}$ คือ เมตริกซ์ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบ สมมติให้ช่องสัญญาณมีแถบความถี่ $\boldsymbol{B}$ และสัญญาณรบกวนแบบเกาส์มีค่าเฉลี่ยศูนย์ สัมพันธ์กับเมตริกซ์ $\boldsymbol{\sigma^2 I_{M_r}}$ โดย $\boldsymbol{\sigma^2} \triangleq \mathbf{E}[\boldsymbol{n_i}^2] = \frac{N_0}{2}$ และมีกำลังคงที่ $\boldsymbol{P}$ โดยสมมติให้กำลังสัญญาณรบกวน $\boldsymbol{\sigma^2}$ และ $\boldsymbol{P/\sigma^2 = \rho}$ คือ อัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน จะต้องเป็นไปตาม

$$\sum_{i=1}^{M_t} \mathbf{E}[x_i x_i^*] = \rho \tag{2-2}$$

* แสดงถึงการสังยุคเชิงซ้อน

2.3 การแยกช่องสัญญาณแบบขนานในระบบไมโม

เมื่อมีจำนวนสายอากาศส่งและรับมากกว่า 1 ต้น การทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า การมัลติเพลกซ์อัตราขยาย สามารถแยกช่องสัญญาณได้เป็นค่าคงที่ แทนด้วย $\boldsymbol{R}$ โดยจะมีความเป็นอิสระของข้อมูลและช่องสัญญาณ ซึ่งเมื่อเราใช้สายอากาศส่งและรับมากกว่า 1 ต้น แล้วจะให้อัตราเร็วของข้อมูลที่เพิ่มขึ้นด้วย

พิจารณาระบบไมโมที่มี $\mathbf{H}$ คือ ช่องสัญญาณ

$\boldsymbol{M_t}$ คือ สายอากาศส่ง

$\boldsymbol{M_r}$ คือ สายอากาศรับ

$\boldsymbol{R_{\mathrm{H}}}$ คือ ลำดับชั้นของช่องสัญญาณ $(\boldsymbol{R_{\mathrm{H}}} \leq \mathbf{min}\,(\boldsymbol{M_t}, \boldsymbol{M_r}))$

เราสามารถแยกช่องสัญญาณ $\mathbf{H}$ โดยการวิเคราะห์ค่าเฉพาะตัวจาก

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^{H} \tag{2-3}$$

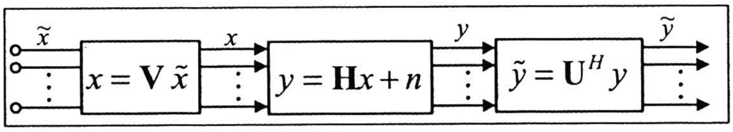
โดย $\mathbf{U}$ คือ เมทริกซ์ยูนิแทรีขนาด $M_t \times M_t$

$\mathbf{V}$ คือ เมทริกซ์ยูนิแทรีขนาด $M_r \times M_r$

Σ คือ เมตริกซ์เฉียง (Diagonal Matrix) ที่สมาชิกไม่มีค่าติดลบขนาด $M_r \times M_t$

และ H คือ การทรานสโพสคอนจูเกต

จากสมการ (2-3) เป็นวิธีการของเอสวีดี (Singular Value Decomposition: SVD) เมื่อ diag(A) เป็นเวคเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าในแกนทแยงมุมของเมทริกซ์ A และ $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ คือค่าไอเกน (Eigen values) λ_i จะได้ว่า $\Sigma = diag(\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_m}, 0, \dots, 0)$

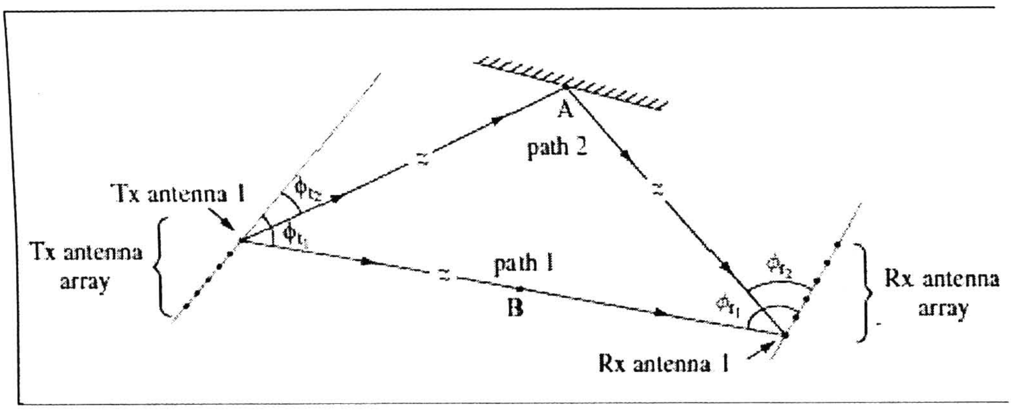


รูปที่ 2-2 การเข้ารหัสที่ภาคส่งและและสัญญาณที่รับได้

จากรูปที่ 2-2 สามารถพิจารณาได้ว่า

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= \mathbf{U}^{H}(\mathbf{H}x + n) = \mathbf{U}^{H}(\mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^{H}x + n) \\ &= \mathbf{U}^{H}(\mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^{H}\mathbf{V}\tilde{x} + n) \\ &= \mathbf{U}^{H}\mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^{H}\mathbf{V}\tilde{x} + \mathbf{U}^{H}n \\ \therefore\ \tilde{y} &= \Sigma\tilde{x} + \tilde{n} \end{aligned} \tag{2-4}$$

ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า การประมวลผลช่องสัญญาณโดเมนแถวลำดับ (Array Processing)



รูปที่ 2-3 แสดงการเดินทางของคลื่นในแต่ละทิศทางของระบบไมโม

จากรูปที่ *2*-3 แสดงการเดินทางของคลื่นในแต่ละทิศทาง เมื่อมีการรับรู้สถานะช่องสัญญาณ โดยมีอัตราการลดทอนที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทาง แทนด้วย $\boldsymbol{a_i}$ มุมส่ง แทนด้วย $\boldsymbol{\phi_{ti}(\Omega_{ti} = \cos\phi_{ti})}$ และมุมรับ แทนด้วย $\boldsymbol{\phi_{ri}(\Omega_{ri} = \cos\phi_{ri})}$ ดังนั้นช่องสัญญาณ หาได้จาก

$$\mathbf{H} = \sum_i a_i^b \mathbf{e}_r(\Omega_{ri})\, \mathbf{e}_t(\Omega_{ti})^H \tag{2-5}$$

โดย

$$a_i^b = a_i\sqrt{M_t M_r}\exp\left(\frac{-j2\pi d_i}{\lambda_c}\right) \tag{2-6}$$

$$\mathbf{e}_t(\Omega_{ti}) = \frac{1}{\sqrt{M_t}}\begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j(2\pi\Delta_t\Omega_{ti})] \\ \vdots \\ \exp[-j(M_t-1)(2\pi\Delta_t\Omega_{ti})] \end{bmatrix} \tag{2-7}$$

$$\mathbf{e}_r(\Omega_{ri}) = \frac{1}{\sqrt{M_r}}\begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j(2\pi\Delta_r\Omega_{ri})] \\ \vdots \\ \exp[-j(M_r-1)(2\pi\Delta_r\Omega_{ri})] \end{bmatrix} \tag{2-8}$$

โดยที่

$\boldsymbol{d_i}$ คือ ระยะทางระหว่างภาคส่งๆไปยังภาครับในแต่ละทิศการเดินทางของคลื่น ส่วน $\mathbf{e}_t(\Omega_{ti})$ และ $\mathbf{e}_r(\Omega_{ri})$ คือ เวกเตอร์ใช้แทนการกระจายตัวในแต่ละทิศทาง $\boldsymbol{\Omega}$

$\boldsymbol{\lambda_c}$ คือ ความยาวคลื่นของความถี่กลาง

$\boldsymbol{\Delta_t}$ และ $\boldsymbol{\Delta_r}$ คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่นอร์แมลไลซ์

2.4 ความจุช่องสัญญาณในระบบไมโม (MIMO CHANNEL CAPACITY)

หัวข้อนี้เสนอความจุช่องสัญญาณโดยทฤษฎีของ Shannon ซึ่งจะให้อัตราการส่งข้อมูลสูงสุด ภายใต้ช่องสัญญาณที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดน้อย ความจุช่องสัญญาณเทียบกับปริมาณที่สูญเสียอธิบายโดยอัตราเร็วการส่งข้อมูล ได้จากการส่งผ่านช่องสัญญาณซึ่งมีความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดไม่เป็นศูนย์ ความจุช่องสัญญาณอยู่ภายใต้การรับรู้สถานะช่องสัญญาณ รวมถึงอัตราขยายช่องสัญญาณทั้งภาคส่งและภาครับ ในส่วนแรกจะอธิบายถึงความจุช่องสัญญาณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ความแตกต่างในการสมมติช่องสัญญาณที่รับรู้ได้

2.4.1 ช่องสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Static channel)

ความจุช่องสัญญาณในระบบไมโมสามารถกระจายได้จากสูตรของช่องสัญญาณในระบบที่มีสายอากาศส่งและรับภาคละ 1 ต้น โดยกำหนดให้มีการรับรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาครับ ช่องสัญญาณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถรับได้ที่ระยะใกล้ ๆ ภายใต้การสมมติความจุช่องสัญญาณในเทอมของข้อมูลร่วมกันระหว่างช่องสัญญาณที่ส่งจากภาคส่งไปยังภาครับ ขณะที่

$$\boldsymbol{C = \max_{p(x)}\ I(X;Y) = \max_{p(x)}[\mathrm{H}(Y) - \mathrm{H}(Y|X)]} \tag{2-9}$$

สำหรับ $\mathbf{H}(\boldsymbol{Y})$ และ $\mathbf{H}(\boldsymbol{Y}|\boldsymbol{X})$ อยู่ภายใต้ $\boldsymbol{y}$ โดยที่ $\mathbf{H}(\boldsymbol{Y}|\boldsymbol{X}) = \mathbf{H}(\boldsymbol{n})$ เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นโดยสัญญาณรบกวน $\boldsymbol{n}$ นี้ มีความเป็นอิสระจากอินพุตที่ส่งเข้ามา

กำหนดความสัมพันธ์ของเมตริกซ์ $\boldsymbol{R_x}$ อยู่บนอินพุตเวกเตอร์ $\boldsymbol{x}$ และ $\boldsymbol{R_y}$ อยู่บนเอาท์พุตเวกเตอร์ $\boldsymbol{y}$ จะได้

$$\boldsymbol{R_y = \mathrm{E}[yy^H] = \mathrm{H}R_x\mathrm{H}^H + \mathrm{I}_{M_r}} \tag{2-10}$$

เมื่อ $$I(X;Y) = B\log_2 \det[\mathbf{I}_{M_r} + \mathbf{H}R_x\mathbf{H}^H] \qquad (2\text{-}11)$$

ดังนั้นความจุช่องสัญญาณหาได้จาก การแทน (2-11) ลงใน (2-9) จะได้

$$C = \max_{R_x:Tr(R_x)=\rho} B\log_2 \det[\mathbf{I}_{M_r} + \mathbf{H}R_x\mathbf{H}^H] \qquad (2\text{-}12)$$

โดย $Tr(R_x)$ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน

1. การรับรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่งโดยวิธีวอเทอร์ฟิวลิงค์ (Channel known at transmitter: Water filling)

เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณ มีการรับรู้สถานะช่องสัญญาณทั้งภาครับและภาคส่ง โดยเฉพาะความจุช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับการรวมกันในแต่ละช่องสัญญาณ แทน (2-3) ลงใน (2-12) จะได้

$$C = \max_{\rho_i:\sum_i \rho_i \le \rho} \sum_{i=1}^{R_{\mathrm{H}}} B\log_2(1 + {\sigma_i}^2 \rho_i) \qquad (2\text{-}13)$$

โดย R_{H} คือ จำนวนค่าเฉพาะตัวที่ไม่ใช่ศูนย์

ในสมการ (2-13) แสดงให้เห็นในเทอมของการจัดสรร P_i ในแต่ละช่องสัญญาณ จะได้

$$C = \max_{P_i:\sum_i P_i \le P} \sum_{i=1}^{R_{\mathrm{H}}} B\log_2\left(1 + \frac{{\sigma_i}^2 P_i}{\sigma^2}\right) = \max_{P_i:\sum_i P_i \le P} \sum_{i=1}^{R_{\mathrm{H}}} B\log_2\left(1 + \frac{P_i\gamma_i}{P}\right) \qquad (2\text{-}14)$$

เมื่อ $\gamma_i = {\sigma_i}^2 P/\sigma^2$ คือ อัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในแต่ละช่องสัญญาณ แสดงให้เห็นว่า เมื่อ γ_i มีค่าสูง ๆ ความจุช่องสัญญาณที่รับได้ก็จะสูงตามไปด้วย เมื่อใช้การจัดสรรด้วยวิธีการวอเทอร์ฟิวลิงค์จะได้

$$\frac{P_i}{P} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_i} & \gamma_i \ge \gamma_0 \\ 0 & \gamma_i < \gamma_0 \end{cases} \qquad (2\text{-}15)$$

และความจุช่องสัญญาณ

$$C = \sum_{i=\gamma_i \geq \gamma_0} B \log_2 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right) \tag{2-16}$$

2. การไม่รู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่ง:การจัดสรรกำลังที่สม่ำเสมอ (Channel unknown at transmitter: uniform power allocation)

เมื่อรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาครับแต่ไม่รู้ที่ภาคส่ง ข้อมูลที่ภาคส่งไม่สามารถจัดสรรข้อมูลได้ โดยให้ความสัมพันธ์เป็นเมตริกซ์ $R_x(\rho/M_t)I_{M_t}$ ภายใต้การสมมติให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าไปมีค่ามากที่สุด จะได้ข้อมูลร่วมกัน คือ

$$I(x;y) = B \log_2 \det \left[\mathbf{I}_{M_r} + \frac{\rho}{M_t}\mathbf{H}\mathbf{H}^H\right] \tag{2-17}$$

เมื่อใช้ SVD เทคนิคในโปรแกรมแมทแลปหาช่องสัญญาณ **H** แล้วจะได้ข้อมูลเป็น

$$I(x;y) = \sum_{i=1}^{R_{\mathrm{H}}} B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i}{M_t}\right) \tag{2-18}$$

โดยที่ $\gamma_i = \sigma_i^2 \rho = \sigma_i^2 P/\sigma^2$ ข้อมูลที่ใช้ร่วมกันของระบบไมโมใน (2-18) อยู่ภายใต้เมตริกซ์ช่องสัญญาณ **H** ซึ่งในทางปฏิบัติจะได้ค่าเฉพาะตัว $\{\sigma_i\}$. ในช่องสัญญาณแบบราบ ภาคส่งสามารถส่งด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับค่าเฉลี่ยข้อมูลที่ใช้ร่วมกันและมีความถูกต้องด้วย แต่ช่องสัญญาณคงที่ ภาคส่งไม่สามารถรับรู้สถานะช่องสัญญาณ และไม่รู้อัตราการส่งข้อมูลทำให้ความจุช่องสัญญาณที่ไม่สามารถรับได้ P_{out} ต้องมีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วการส่งผ่าน R โดยข้อมูลที่ใช้ร่วมกันต้องมีค่าน้อยกว่า R จะได้ว่า

$$P_{out} = p\left(\mathrm{H}: B \log_2 \det \left[\mathbf{I}_{M_r} + \frac{\rho}{M_t}\mathbf{H}\mathbf{H}^H\right] < R\right) \tag{2-19}$$

เราสามารถหาการกระจายค่ารากของสมการที่มีลักษณะเฉพาะของ $\mathbf{HH}^H$ การกระจายค่านี้ใช้วิธีการของ SVD จากเหตุผลที่ว่าจำนวนสายอากาศที่เพิ่มขึ้นทั้งภาครับและภาคส่งมีผลทำให้ความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นแบบจำนวนเชิงเส้น

2.4.2 ช่องสัญญาณที่มีการจางหาย (Fading channel)

หัวข้อนี้สมมติให้อัตราขยายของช่องสัญญาณได้จากช่องสัญญาณราบเรียบ แทนด้วย $\boldsymbol{h_{ij}}$ ในกรณีที่ช่องสัญญาณเป็นแบบคงที่ ความจุช่องสัญญาณจะขึ้นอยู่กับการรับรู้สถานะช่องสัญญาณทั้งภาครับและภาคส่ง ซึ่งมีความสมบูรณ์แบบมากจึงได้ความจุช่องสัญญาณเท่ากับค่าเฉลี่ยช่องสัญญาณภายใต้การจัดสรรกำลังสูงสุด

1. การรับรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่งโดยวิธีวอเทอร์ฟิวลิงค์ (Channel known at transmitter: water filling)

การรับรู้สถานะช่องสัญญาณที่ภาคส่งจะมีการส่งผ่านในแต่ละช่องสัญญาณ โดยค่ากำลังสูงสุดที่จัดสรรและค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณนี้เรียกว่าความจุช่องสัญญาณแบบเออร์กอร์ดิก มีค่าเฉลี่ยกำลังคงที่ในแต่ละพอร์ตแทนด้วย $\overline{\boldsymbol{P}}$ ดังนั้นจะได้ความจุช่องสัญญาณ

$$\begin{aligned} \boldsymbol{C} &= \mathbf{E_H}\left[\max_{\boldsymbol{R_x}:\boldsymbol{Tr}(\boldsymbol{R_x})=\boldsymbol{\rho}} \boldsymbol{B}\log_2 \det\left[\mathbf{I}_{\boldsymbol{M_r}} + \mathbf{H}\boldsymbol{R_x}\mathbf{H}^{\boldsymbol{H}}\right]\right] \\ &= \mathbf{E_H}\left[\max_{\boldsymbol{P_i}:\sum_i \boldsymbol{P_i}\le\overline{\boldsymbol{P}}} \sum_i \boldsymbol{B}\log_2\left(1+\frac{\boldsymbol{P_i\gamma_i}}{\overline{\boldsymbol{P}}}\right)\right] \end{aligned} \tag{2-20}$$

โดย $\boldsymbol{\gamma_i = \sigma_i{}^2\overline{P}/\sigma^2}$

2. เมื่อไม่รู้ช่องสัญญาณที่ภาคส่ง : ความจุช่องสัญญาณแบบเออร์กอร์ดิกและความจุช่องสัญญาณแบบขาดหาย (Channel unknown at transmitter: Ergodic capacity and capacity with outage)

พิจารณาเวลาแปรผันตามช่องสัญญาณ โดยมีการสุ่มใช้ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้น มีการรับรู้สถานะข้อมูลที่ภาครับแต่ไม่รู้ที่ภาคส่ง หาความจุช่องสัญญาณ ได้จาก

$$\boldsymbol{C} = \max_{\boldsymbol{R_x}:\boldsymbol{Tr}(\boldsymbol{R_x})=\boldsymbol{\rho}} \mathbf{E_H}\left[\boldsymbol{B}\log_2\det\left[\mathbf{I}_{\boldsymbol{M_r}} + \mathbf{H}\boldsymbol{R_x}\mathbf{H}^{\boldsymbol{H}}\right]\right] \tag{2-21}$$

โดยความจุช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนสายอากาศที่มีค่าน้อยสุดของภาคส่งหรือภาครับ $M = min\ (M_t, M_r)$

3. เมื่อไม่รู้ช่องสัญญาณที่ภาคส่งหรือภาครับ (No CSI at transmitter or receiver)

ความจุช่องสัญญาณจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเชิงเส้นเช่นเดียวกับเมื่อรับรู้สถานะช่องสัญญาณ แต่จะให้ความจุช่องสัญญาณที่น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามความจุช่องสัญญาณจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณที่เปลี่ยนไป ซึ่งการหาช่องสัญญาณในแต่ละวิธีจะมีวิธีการที่แตกต่างกันออกไป

2.4.3 ความจุช่องสัญญาณที่เกิดจากการประมวลผลแถวลำดับ

เมื่อไม่มีรับรู้ข้อมูลที่ภาคส่ง ความจุช่องสัญญาณในระบบไมโมที่ใช้การประมวลผลเมนแถวลำดับแสดงได้ดังนี้

$$C = \log_2 \det\left(\mathrm{I}_{M_r} + \frac{P_t}{P_N M_t}\mathrm{H}\mathrm{H}^H\right) \tag{2-22}$$

โดยที่ (2-22) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาทีต่อเฮิรตซ์ เมื่อ I_{N_r} คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ ขนาด $M_r{\times}M_r$ H คือ ช่องสัญญาณ ขนาด $M_r{\times}M_t$ H^H คือ การทรานสโพสคอนจุเกตของเมทริกซ์ช่องสัญญาณ H และ $\frac{P_t}{P_N}$ คือ อัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน

2.5 กล่าวท้ายบท

สำหรับเนื้อในบทนี้ได้อธิบายถึงช่องสัญญาณระบบไมโมที่เป็นแถบแคบ โดยใช้เทคนิคการประมวลผลแถวลำดับ เทคนิคการประมวลผลแถวลำดับเป็นเทคนิคขั้นพื้นฐานสำหรับการหาความจุช่องสัญญาณในระบบไมโม เพื่อให้ได้ความจุช่องสัญญาณที่มากกว่าเดิมงานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบการประมวลผลเชิงมุมกับการประมวลผลแถวลำดับ สิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือวิธีการประมวลผลเชิงมุมที่เสนอนี้ไม่ต้องการข้อมูลจากช่องสัญญาณป้อนกลับมาที่ภาคส่ง ดังนั้นทั้งภาครับและส่งสามารถดำเนินการ

อย่างอิสระและรวดเร็ว โดยบทต่อไปจะเสนอเทคนิคการประมวลผลเชิงมุมรวมถึงการประยุกต์ใช้การประมวลผลเชิงมุมในทางปฏิบัติ โดยนำบัทเลอร์ เมทริกซ์ มาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลเชิงมุม