

การวิเคราะห์ค่าความจุช่องสัญญาณในการส่งแบบ MIMO

ผ่านวิธีการจัดสรรกำลัง

Analysis of Channel Capacity for MIMO

Through Power Allocation Scheme

จินห์วรา ธีรณัฐวิทยาการ สุวิพล สิริชีวะภาค

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความจุช่องสัญญาณในระบบการส่งแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (MIMO :Multiple Input Multiple Output) ผ่านวิธีการจัดสรรกำลัง โดยในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ระบบ MIMO มีการใช้สายอากาศจำนวน 4 อันที่ด้านรับและด้านส่งหรือ 4x4 MIMO ซึ่งถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความเร็วในการส่งข้อมูลต่อย่านความถี่ใช้งาน โดยการใช้และไม่ใช้ไดเวอร์ซิตีโพลาไรเซชัน ซึ่งในการทดลองนี้จะให้ความสนใจในผลประโยชน์ที่จะได้รับการรวมกันของสองเทคนิค คือ ไดเวอร์ซิตีเชิงพื้นที่ (Spatial Diversity) และไดเวอร์ซิตีโพลาไรเซชัน (Polarization Diversity) นอกจากนี้ยังได้พิจารณาในกรณีที่สามารรู้หรือไม่รู้ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ (Channel State Information : CSI) ที่ด้านส่งเพื่อที่จะแสดงค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ในบริเวณที่ความสัมพันธ์เชิงระยะทาง (Spatial Correlation) มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ทั้งยังได้ศึกษาสมการของ Cumulative Distribution Function (CDF) ของข้อมูลที่สัมพันธ์กัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาวิธีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับตัวกลางเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูล

คำสำคัญ : การสื่อสารแบบหลายทางเข้า-หลายทางออก, ความจุของช่องสัญญาณ, ไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาไรเซชันและเชิงพื้นที่, ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ

Abstract

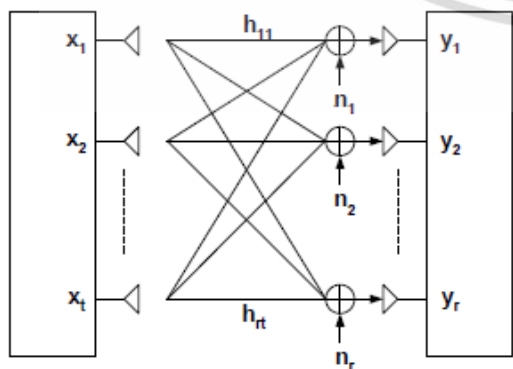
This paper presents analysis of channel capacity for MIMO (Multiple Input Multiple Output) system through power allocation scheme. In this simulation, we use of 4x4 multiple-input multiple-output (MIMO) antenna arrays for improving the mutual information with and without polarization diversity. We are into the benefits offered by a combination of spatial and polarization diversity techniques. In this paper, we study in case of the channel state information (CSI) is known or unknown to transmitter for low signal to noise ratios (SNR) in the performance of low and high spatial correlation. The cumulative distribution function (CDF) is studied. Besides, we also investigate the impact of cross polarization discrimination (XPD) on the average mutual information of MIMO systems.

Keywords : Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), Channel Capacity, Spatial And Polarization Diversity, Channel State Information

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในระบบสื่อสารไร้สายยุคใหม่นั้นมีความต้องการความเร็วในการรับส่งข้อมูลและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น เทคโนโลยีระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก (MIMO : Multiple Input Multiple Output) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีอาร์เรย์สายอากาศ (Antenna Array) ซึ่งเป็นระบบสื่อสารที่ใช้สายอากาศหลายตัวที่ด้านรับและด้านส่ง เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการส่งข้อมูลต่อย่านความถี่ใช้งาน (Capacity) ของระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออกกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (SISO : Single Input Single Output) ประสิทธิภาพที่ได้จะเพิ่มมากขึ้นเท่ากับจำนวนสายอากาศที่ใช้ส่ง เสาอากาศที่มากกว่าจะรับสัญญาณได้มากกว่า และสามารถแก้ไขในเรื่องจุดอับของสัญญาณได้ เมื่อใช้เสาอากาศหลายๆอัน หากมีเสาอากาศใด เสาอากาศหนึ่งอยู่ในจุดอับสัญญาณ ก็ยังใช้เสาอากาศอื่นส่งสัญญาณได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าเทคโนโลยีระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ และความเร็วในการสื่อสาร แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่อีกมากมาย เช่น ตัวกลางและการออกแบบเสาอากาศ ตัวกลางในที่นี้จะสอดคล้องโดยตรงกับช่องทางการสื่อสาร (Transmission Channel) ถ้าช่องทางไหนมีสัญญาณกวนเข้ามา ผลที่ได้ก็คือจะทำให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลและความน่าเชื่อถือลดลง ดังนั้นถ้าตัวส่งสามารถรู้ได้ถึงสถานะของช่องทางการสื่อสาร (Channel State Information : CSI) ตัวส่งก็สามารถใช้พลังงานในการส่งข้อมูลได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 1 MIMO Channel

สำหรับระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้า หลายทางออก จะให้สมรรถนะความจุช่องสัญญาณสูงสุด และช่องสัญญาณในการส่งที่นำเชื่อถือภายใต้เงื่อนไขช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายสัญญาณมากพอ (Rich Scattering) สำหรับการใช้ไดเวอร์ซิตีเชิงพื้นที่ (Spatial Diversity) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกจำกัดกำลังสัญญาณ, แบนวิดท์ และมีความซับซ้อน ถูกแสดงโดย Foschini และ Gans [1] และ Telatar [2] ค่าความจุช่องสัญญาณสามารถเพิ่มขึ้นเกือบจะเป็นเชิงเส้น (Linearly) ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มีค่าสูงสุด และช่องสัญญาณที่ไม่สหสัมพันธ์กัน (Uncorrelated Channel) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทาง (Spatial Correlation) [3], [4] ระหว่างการส่งและรับสัญญาณที่เสาอากาศที่ต่างกัน ผลกระทบของค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Impact) จะขึ้นอยู่กับช่องว่างขององค์ประกอบของเสาอากาศ (Antenna Element Spacing) และการแผ่กระจายของมุมของการมาถึง (The Angles Of Arrival : AOA) และมุมของการจากไป (The Angles Of Departure : AOD) ค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทางที่มีค่าสูงจะทำให้ค่าความจุช่องสัญญาณของระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออกลดลงอย่างรวดเร็ว เพื่อที่จะลดผลกระทบของค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทาง ดังนั้น เทคนิคต่างๆ ที่ใช้จะแสดงอยู่ในกราฟ ยกตัวอย่าง เช่น เทคนิคไดเวอร์ซิตีโพลาริเซชัน สามารถใช้เสาอากาศกับโพลาริเซชันที่ออร์โธกอนัลกัน แต่โชคไม่ดีที่มันมีโพลาริเซชันแค่สองทิศทางเท่านั้น นอกจากนี้ ค่าความจุของระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออกสามารถเพิ่มขึ้น โดยการจัดหาวิธีจัดสรรกำลังที่ดีที่สุด (Optimal Power Allocation) ตลอดเสาอากาศที่ส่งผ่าน เมื่อด้านส่งรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณซึ่งปกติเรียกว่าวิธีการวอร์เตอร์ฟิลลิงค์ (Water Filling : WF) [5] ภายใต้ข้อจำกัดที่ว่ากำลังการส่งทั้งหมดจะต้องถูกรักษาให้คงที่ในระหว่างการสื่อสาร, ช่องสัญญาณย่อยที่มีคุณภาพสูงจะได้รับกำลังการส่งมากกว่า ในขณะที่ช่องสัญญาณย่อยที่มีคุณภาพต่ำจะยังคงมีกำลังการส่งที่น้อยหรือไม่มีกำลังการส่งเลย ในบทความนี้ หัวข้อหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ การศึกษาอัตราขยายความจุ(Capacity Gain) ของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้า หลายทางออก เมื่อด้านส่งและด้านรับที่ใช้ ไม่เพียงแต่ไดเวอร์ซิตีเชิงพื้นที่แต่ยังรวมถึงไดเวอร์ซิตีโพลาไรเซชัน (Polarization Diversity) นอกจากนี้วิธีการกวาดเตอร์ฟิวลิงค์ (WF) จะถูกใช้เพื่อการกระจายกำลังการส่งที่ดีที่สุด (Optimize Power Distribution) ที่ด้านส่งเพื่อปรับปรุงค่าความจุช่องสัญญาณของระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์ค่าความจุ (Capacity Analysis)

ในส่วนนี้ได้กำหนดให้สัญญาณรบกวนมีการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian Distribution) ดังนั้น ค่าการกระจายที่ดีที่สุดของสัญญาณอินพุต (Input Signal) คือ เกาส์เซียนสำหรับข้อมูลที่ร่วมกันมากที่สุด (Maximizing The Mutual Information: MI) ข้อมูลที่ร่วมกันจะแสดงได้ ดังนี้ [2]

$$MI = \log_2 \det \left(I_{N_R} + H \phi H^H (K_n)^{-1} \right) \quad (1)$$

โดยที่

$\phi = E \left(x x^H \right)$ คือ เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมเชิงพื้นที่ (The Spatial Covariance Matrix) ของเวกเตอร์อินพุต x ภายใต้เงื่อนไขการจำกัดกำลังการส่ง

$tr(\phi) = P_t$ และ K_n คือ เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของเวกเตอร์สัญญาณรบกวน n

N_R คือ จำนวนของเสาอากาศที่ด้านรับ

I_{N_R} คือ ข้อมูลข่าวสารร่วมกัน (Mutual Information) ของจำนวนของเสาอากาศที่ด้านรับ (N_R)

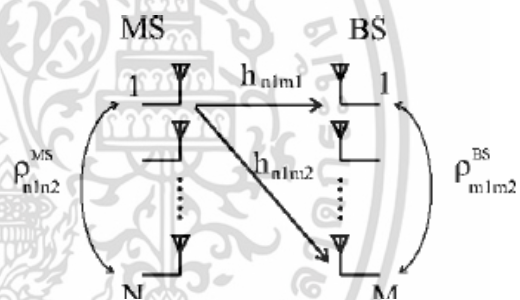
2.2 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทาง (Spatial Correlation) ในช่องสัญญาณ MIMO

ความน่าสนใจของการใช้ระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก คือ การสร้างช่องสัญญาณย่อยคู่ขนานเพื่อจะเพิ่มความจุของการเชื่อมต่อสื่อสาร จากทฤษฎีที่ได้ศึกษา [6] พบว่า ค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทาง (Spatial Correlation) ที่ต่ำภายใต้สถานะ Indoor Picocell ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับค่าความจุช่องสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ การประเมินค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทาง (Spatial Correlation) ที่มีอยู่ระหว่างหลาหลายของค้ประกอบของอาร์เรย์เสาอากาศ (Antenna Array) สำหรับวิธีการแบบ Picocell ข้อมูลตรงช่วงแถบความถี่แคบเชิงซ้อน (The Complex Narrowband Information) หาได้จากการวัดระดับเสียงของช่องสัญญาณ (Channel Sounding Measurement) ดังเช่น

$$h_{mn}(t) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L h_{mn}(t, \tau_l) \quad (2)$$

ซึ่ง $h_{mn}(t)$ คือ การวัดระดับเสียงของช่องสัญญาณ โดยที่ L คือ ความยาวของการวัดการตอบสนองอิมพัลส์เชิงซ้อน (Complex Impulse Response) ที่ร่วมกันกับ $h_{mn}(t, \tau_l)$ การประวิงเวลา (Delay) τ_l ระหว่างเสาอากาศ m th ที่ BS (Base station) และเสาอากาศ n th ที่ MS (mobile station)



รูปที่ 2 แสดง Spatial Correlation สำหรับ MIMO

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงระยะทาง (The Spatial Correlation Efficient) ρ_{m1m2}^{BS} และ ρ_{n1n2}^{MS} ในรูปที่ 2 ได้อธิบายที่ BS และ MS ตามลำดับ

$$\rho_{m1m2}^{BS} = \left\langle |h_{nm1}|^2, |h_{nm2}|^2 \right\rangle \quad (2)$$

$$\rho_{n1n2}^{MS} = \left\langle |h_{nm1}|^2, |h_{nm2}|^2 \right\rangle \quad (3)$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์เชิงระยะทาง (The Spatial Correlation Efficient) มีค่าเท่ากับ

$$\rho = \langle a, b \rangle = \frac{E[ab] - E[a]E[b]}{\sqrt{(E[a^2] - E[a]^2)(E[b^2] - E[b]^2)}} \quad (4)$$

โดยที่ $E[.]$ แสดงถึง ค่าคาดหวัง

2.3 Signal to Noise ratio

ในการทดลองนี้กำหนดให้การส่งข้อมูลแต่ละครั้ง เป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นแก่กัน จากสมการของ Cumulative Distribution Function (CDF) ของอัตราส่วน กำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal To Noise: SNR) γ สำหรับ MIMO บนช่องสัญญาณรีเลย์ จะได้

$$F_\gamma(\gamma) = 1 + \frac{2e^{-\frac{\gamma}{\gamma_2}}}{(N_d - 1)! \gamma_2^{N_d - 1}} \sum_{k=1}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_d - 1} C_{N_s}^k C_{N_d - 1}^j (-1)^k \gamma^{N_d - j - 1} e^{\frac{k\gamma}{\gamma_1}} \times \left(\frac{k\gamma_2 \hat{\gamma}}{\gamma_1} \right)^{j+1} K_{j+1} \left(2 \sqrt{\frac{k\hat{\gamma}}{\gamma_1 \gamma_2}} \right) \quad (5)$$

เมื่อ $\hat{\gamma} = \gamma^2 + \gamma\tau$, $C_N^n = \frac{N!}{(N-n)!n!}$ และ $K_n(x)$ โดยที่ n เป็นลำดับของเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel Function) จากสมการของ CDF จะสามารถหาค่าของ Probability Density Function (PDF) ได้

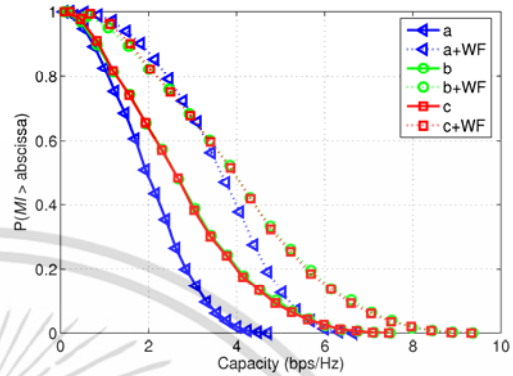
$$F_\gamma(\gamma) = 1 + \frac{2e^{-\frac{\gamma}{\gamma_2}}}{(N_d - 1)! \gamma_2^{N_d - 1}} \sum_{k=1}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_d - 1} C_{N_s}^k C_{N_d - 1}^j (-1)^k \gamma^{N_d - j - 1} e^{\frac{k\gamma}{\gamma_1}} \times \left(\frac{k\gamma_2 \hat{\gamma}}{\gamma_1} \right)^{j+1} \left[\left(\frac{N_d - j - 1}{\gamma} - \frac{k}{\gamma_1} - \frac{1}{\gamma_2} \right) K_{j+1} \left(2 \sqrt{\frac{k\hat{\gamma}}{\gamma_1 \gamma_2}} \right) - \sqrt{\frac{k}{\gamma_1 \gamma_2 \hat{\gamma}}} (2\gamma + \tau) K_{j+1} \left(2 \sqrt{\frac{k\hat{\gamma}}{\gamma_1 \gamma_2}} \right) \right] \quad (6)$$

3. การทดลองและผลการทดลอง

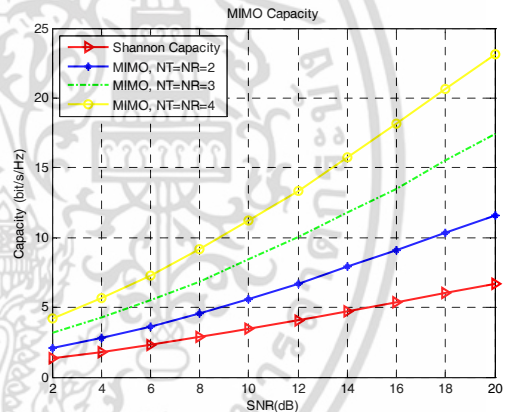
ในส่วนนี้จะแสดงองค์ประกอบของอารีย์ สายอากาศที่เป็นเชิงเส้น 3 รูปแบบ (คือ a, b และ c) ที่ได้ทดลองบนระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออกแบบ 4x4 ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดง Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) ของข้อมูลที่รวมกันมากที่สุดที่ด้านรับและด้านส่ง ที่ 10 AS (Abscissa) ซึ่งเกินกว่าค่าความจุที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า แสดงว่าความจุของสัญญาณของระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออกสำหรับอัตราส่วนกำลัง สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR) ที่ 3 dB จะเกิดขึ้นเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ค่าสหสัมพันธ์เชิงระยะทางมีค่ามากที่สุดระหว่าง สายอากาศ เมื่อได้เปรียบเทียบสมรรถนะที่ใช้และไม่ใช้ วิธีการวอเตอร์ฟอลลิงค์ ทำให้สามารถปรับปรุงอัตราขยาย (Gain) ให้ดีขึ้นประมาณ 1bps/HZ.



รูปที่ 3 แสดง CCDF ของ MI แบบที่มีและไม่มีค่า power allocation for 4x4 MIMO antenna arrays



รูปที่ 4 แสดง MIMO Capacity

จากกราฟในรูปที่ 4 เป็นการแสดงค่าความจุของช่องสัญญาณ ของระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออกที่มีเสาอากาศ ด้านรับ และด้านส่ง ขนาด 2x2 , เสาอากาศด้านรับ และ ด้านส่ง ขนาด 3x3 และ เสาอากาศด้านรับ และด้านส่ง ขนาด 4x4 จะเห็นว่าค่า SNR มีค่ามากขึ้น ค่าความจุก็จะเพิ่มขึ้นตาม จำนวนเสาอากาศ แสดงว่า ประสิทธิภาพของระบบก็จะดีขึ้น ด้วย

4. สรุปผลการทดลอง

ในบทความนี้ได้นำเสนอรูปแบบของความแตกต่างของ องค์ประกอบของอารีย์เสาอากาศสำหรับการสื่อสารไร้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารแบบหลายทางเข้า หลายทางออก นอกจากนี้ยังได้แสดงการความได้เปรียบของการใช้วิธีอเทอร์พวลิงค์ที่สามารถจัดหาวิธีจัดสรรกำลังที่ดีที่สุดที่ด้านส่ง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. J.Foschini and M.J. Gans, "On limits of Wireless communications in a fading Environment when using multiple antennas," Wireless Personal Commun, vol.6, No.3., pp.311-335, Mar., 1998.
- [2] E.Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," European Trans. Telecommun, Vol. 10, No.6., pp.585-595, Nov.-Dec., 1999.
- [3] J.P. Kermaol et al. , " Experimental Investigation of correlation properties of MIMO radiochannels for indoor picocell scenarios," Proc. 52nd IEEE VTS Fall VTC 2000, vol. 1, pp. 14-21, Sept., 2000.
- [4] D. Shiu, G.J. Foschini, M. J. Gans, and J.M. Kahn , " Fading correlation and its effect on the Capacity of multi-element antenna systems," IEEE Trans. Commu, vol. 48, No.3., pp.502-513, Mar., 2000.
- [5] F.R. Farrokhi et al., "Link- Optimal space-time Processing with multiple transmit and receive antennas," Communications Letters, Vol.5, pp.85-87, Mar., 2001.
- [6] K. I. Pedersen, J.B. Andersen, J.P. Kermaol, and P.Mogensen, "A Stochastic Multiple-Input-Multiple-Output Radio Channel Model for Evaluation of Space Time coding Algorithms," Accepted for IEEE Vehicular Technology Conference VTC 2000 Fall, Boston, USA, 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้