# สายอากาศแถวลำดับที่ปรับตัวได้ที่ใช้อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดและที่มอดุลัสขนาดคงที่

# Adaptive Array Antenna using LMS and CMA

เอกรัฐ บุญภูงา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของอัลกอริทึมปรับตัวที่ถูกใช้ในรูปแบบของสายอากาศปรับตัวในระบบการสื่อสารไร้สาย แบบจำลองหลายอินพุตหลายเอาต์พุตซึ่งทั่วไปแล้วได้ถูกใช้ในการจำลองระบบได้ถูกอธิบายด้วยสมการการปรับตัว อัลกอริทึมซึ่งได้แก่ อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (least mean square algorithm หรือ LMS) และ อัลกอริทึมมอดุลัสขนาดคงที่ (constant modulus algorithm หรือ CMA) ได้ถูกเลือกเพื่อใช้เป็นตัวแทนของอักกอริทึมแบบไม่ไบล์ดและไบล์ด ตามลำดับ นอกจากนี้จะทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมทั้ง 2 ซึ่งรวมทั้งการสร้างและการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมดังกล่าว

**คำสำคัญ :** สายอากาศแถวลำดับปรับตัว อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด อัลกอริทึมมอดุลัสขนาดคงที่

**Abstract**

In this article, we describe a basic concept of adaptive algorithms in the context of an adaptive array antenna in wireless communication systems. The multi-input multi-output model which is generally employed for simulations is described via update equations. The algorithms i.e. LMS and CMA algorithms are respectively chosen as examples of blind and non-blind algorithms. Moreover, we review a number of researches related to those algorithms including their implementation and applications.

**Keywords** : adaptive array antenna, LMS, CMA

## 1. บทนำ

การสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้นทุกขณะ เนื่องจากสามารถรองรับการใช้งานที่หลากหลาย ความต้องการที่จะติดต่อสื่อสารกันของมนุษย์มีมาอย่างยาวนาน ได้มีการพัฒนาวิธีการในการติดต่อสื่อสารกันมาตามลำดับ วิวัฒนาการของการสื่อสารโทรคมนาคมเริ่มต้นจากโทรศัพท์แบบมีสาย พัฒนาจนกลายมาเป็นการบริการผ่านเครือข่ายไร้สายจวบจวนทุกวันนี้ การสื่อสารไร้สายไม่เพียงแค่เป็นการสื่อสารด้วยการสนทนากันเท่านั้น แต่ยังเป็นการสื่อสารกันด้วยข้อมูล ภาพและวีดีทัศน์ดิจิทัล (digital video) เป็นต้น เมื่อมีจำนวนผู้ใช้มากขึ้นอย่างรวดเร็วจึงมีความพยายามจากนักวิจัยที่จะพัฒนาระบบการสื่อสารให้สามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้จำนวนมากรวมถึงรองรับอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงเพื่อสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยข้อจำกัดทางด้านต้นทุนของการเพิ่มช่องสัญญาณเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้จำนวนมากด้วยวิธีการขยายแบนด์วิดท์ (bandwidth) เมื่อไม่นานมานี้ วิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงที่จะใช้ในการแก้ปัญหาความจุของช่องสัญญาณคือการใช้สายอากาศฉลาดเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอด [1]

สายอากาศฉลาดเป็นการใช้สายอากาศแถวลำดับร่วมกับการประมวลผลสัญญาณเพื่อทำให้ผลตอบสนองความถี่ในแบบรูปการแผ่พลังงาน (pattern) ที่ดีที่สุดได้โดยอัตโนมัติ หลักการพื้นฐานของสายอากาศฉลาดสามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 1 ระบบสายอากาศฉลาดนั้นจะหาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อใช้ในการจัดลำคลื่นโดยใช้ข้อมูลต่างๆช่วยในการปรับตัว เช่น สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศแถวลำดับ สัญญาณอ้างอิง และทิศทางของผู้ใช้เป็นต้น ลำคลื่นหลักของระบบสายอากาศฉลาดจะชี้ไปยังทิศของผู้ใช้ที่ถูกกำหนดไว้ ขณะเดียวกันก็จะปรับแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นศูนย์ในทิศของสัญญาณแทรกสอด เราสามารถแบ่งสายอากาศฉลาดเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. วิธีการสวิตช์ลำคลื่น (switched beam approach) ประกอบด้วยการสวิตช์ลำคลื่นที่ถูกกำหนดทิศของลำคลื่นไว้แล้ว ใช้เพื่อให้ได้กำลังงานของสัญญาณรับสูงสุด วิธีนี้สามารถสร้างได้ง่ายเหมาะสำหรับใช้ในระบบเดิมที่ไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์หรือขั้นตอนใดๆมากมายนัก แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ก็มีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพที่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้จำกัดในด้านต่างๆ เช่น ทิศทางของสัญญาณแทรกสอด และจำนวนของสัญญาณแทรกสอด

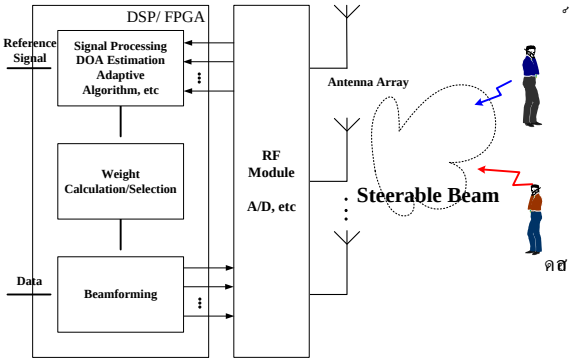
**2. วิธีแถวลำดับปรับเฟสพลวัต (dynamically phased array approach)**

ในวิธีการนี้ ขั้นแรกจะประมาณหาทิศทางของการเข้ามา (direction of arrival หรือ DOA) จากผู้ใช้ก่อนและหลังจากนั้นจะคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อการจัดลำคลื่นเพื่อให้ลำคลื่นหลักชี้ไปในทิศที่กำหนด วิธีการนี้เหมาะสำหรับใช้ในการจัดลำคลื่นของการเชื่อมโยงลง (downlink) ที่เป็นแบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (frequency division duplex หรือ FDD) และ การรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งเวลา (time division duplex หรือ TDD) แบบเร็ว เมื่อใช้วิธีแถวลำดับปรับเฟสพลวัตนี้จะทำให้ได้กำลังงานของสัญญาณรับสูงที่สุดโดยไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงช่วยในการประมวลผล แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะไม่เหมาะสำหรับสภาพแวดล้อมที่เป็นเซลล์ขนาดเล็กหรือไม่อยู่ในเส้นระดับสายตา (non-line-of-sight) สภาพแวดล้อมในลักษณะนี้เป็นสภาพแวดล้อมที่มีตัวกระจาย (scatterer) เป็นจำนวนมากอยู่ใกล้กับผู้ใช้และสถานีฐานซึ่งจะทำให้มุมตกกระทบกวาดกว้างขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถหา DOA ที่แน่นอนของผู้ใช้ได้

3. วิธีแถวลำดับปรับตัว (adaptive array approach) วิธีการนี้จะปรับแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณรับโดยใช้สัญญาณอ้างอิงช่วยในการประมวลผล สามารถเพิ่มการใช้อัลกอริทึมสำหรับการประมาณ DOA ของสัญญาณแทรกสอดได้ โดยจะปรับแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอด วิธีการนี้จะทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (signal-to-ratio หรือ SIR) เหมาะสมที่สุด และสามารถประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่เป็น non-line-of-sight ได้ เนื่องจากการปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมซึ่งจะลดสัญญาณแทรกสอดและเฟดดิงหลายวิถี (multipath fading) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะไม่เหมาะสำหรับการจัดลำคลื่นของการเชื่อมโยงลง แบบ FFD และ TDD แบบเร็ว เหมือนเช่นวิธีแถวลำดับปรับเฟสพลวัตเนื่องจากสัญญาณอ้างอิงซึ่งถูกรวมกับสัญญาณรับที่ภาครับนั้นจะไม่สามารถใช้สำหรับการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการจัดลำคลื่นในภาคส่งได้

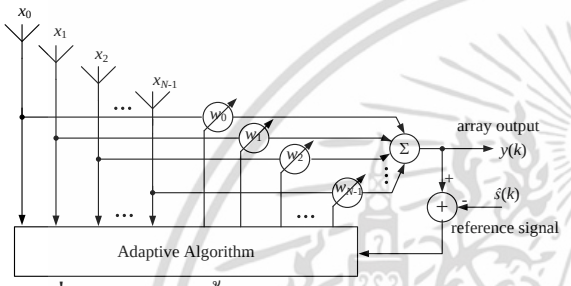
บทความนี้นำกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศปรับตัว โดยมุ่งเน้นอัลกอริทึม 2 ชนิดได้แก่ อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด และ อัลกอริทึมมอดุลัสขนาดคงที่ นอกจากนี้บทความยังจะเสนอการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแถวลำดับปรับตัวที่ใช้อัลกอทึมทั้ง 2 ชนิดนี้ โดยบางส่วนจะทบทวนงานวิจัยทางด้านการสร้างตัวประมวลผลของอัลกอริทึมทั้งสองเพิ่มเติมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 1**: โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศฉลาด

## 2. แบบจำลองสายอากาศปรับตัว




**รูปที่ 2:** โครงสร้างพื้นฐานสายอากาศแถวลำดับปรับตัว

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวซึ่งเป็นสายอากาศรับ ประกอบด้วยสายอากาศ $N$ องค์ประกอบ เมื่อใช้แบบจำลองสัญญาณหลายอินพุตหลายเอาต์พุตของการสื่อสารไร้สายและพิจารณาสัญญาณรับซึ่งเป็นเวกเตอร์สัญญาณรับเชิงซ้อน $\mathbf{x}(k) = [x_0(k), x_1(k),\ldots, x_{N-1}(k)]^T$ สามารถแทนด้วยสมการ

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{H}\mathbf{s}(k) + \boldsymbol{\eta}(k) \qquad (1)$$

เมื่อ $\mathbf{H} \in \Im^{N \times M}$ เป็นเมทริกซ์ผลตอบสนองของสายอากาศ $\mathbf{s}(k) = [s_0(k), s_1(k),\ldots, s_{M-1}(k)] \in \Im^M$ เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณส่งและ $\boldsymbol{\eta}(k) = [\eta_0(k), \eta_1(k),\ldots, \eta_{N-1}(k)] \in \Im^N$ เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณรบกวน จากรูป สัญญาณ $x_i(k)$ ที่รับได้จากสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก $w_i(k)$ และเอาต์พุต $y(k)$ ที่ได้จากสายอากาศปรับตัวเกิดจากการรวมกันของ $w_i(k)x_i(k)$ ดังแสดงในรูปแบบการคูณเวกเตอร์

$$y(k) = \mathbf{w}^H(k)\mathbf{x}(k), \qquad (2)$$

เมื่อ $\mathbf{w}(k) = [w_0(k), w_1(k),\ldots, w_{N-1}(k)]^T \in \Im^N$ และ $^H$ แทนเวกเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนัก และการสลับเปลี่ยนสังยุค (conjugate transpose) ตามลำดับ

## 3. อัลกอริทึมปรับตัว

ในทางปฏิบัติแล้วการหาค่าถ่วงน้ำหนักโดยการคำนวณหาค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์ (correlation matrix) และเมทริกซ์อัตสหสัมพันธ์ (autocorrelation matrix) เป็นเรื่องค่อนข้างยุ่งยาก ต้องเก็บข้อมูลหรือสัญญาณรับเป็นจำนวนมากและการคำนวณมีความซับซ้อนสูง ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วจึงนิยมใช้เทคนิคอื่นแทนในการหาค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อมาปรับสัญญาณรับให้ได้คุณภาพตามต้องการโดยอัตโนมัติซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่าอัลกอริทึมการปรับตัว การใช้อัลกอริทึมปรับตัวจะทำให้ความซับซ้อนในการคำนวณลดลง เช่น ความซับซ้อนของอัลกอริทึม LMS จะลดลงเหลือ $O(N)$ [1] คุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญของการใช้อัลกอริทึมคือเป็นระบบที่มีความสามารถในการติดตาม (Tracking) จึงเหมาะสำหรับสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยสามารถลู่เข้าหาคำตอบที่เป็นค่าเหมาะที่สุดในกลุ่มย่อยได้ (suboptimum) โดยส่วนมากแล้วการประมวลผลของอัลกอริทึมปรับตัวจะเป็นการดำเนินการทีละตัวอย่าง (sample-by-sample operation) สามารถสร้างตัวประมวลผลให้ทำงานในเวลาจริงได้ (real time)

อัลกอริทึมการปรับตัวแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ อัลกอริทึมไบล์ด (blind algorithm) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณอ้างอิงใดๆช่วยในการประมวลผล และอัลกอริทึมไม่ไบล์ด (non-blind algorithm) เป็นอัลกอริทึมจำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงช่วยในการปรับตัว บทความนี้จะอธิบายแต่ละอัลกอริทึมแต่ละชนิดโดยยกตัวอย่างอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยมมาอธิบาย

### 3.1 อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด หรือ LMS เป็นหนึ่งในอัลกอริทึมแบบ non-blind algorithm นำเสนอครั้งแรกโดย Bernard Widrow ในปี พ.ศ. 2509 [2] อัลกอริทึม LMS ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักโดยค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จะขึ้นอยู่กับสัญญาณรับและสัญญาณอ้างอิง อัลกอริทึม LMS ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการประมวลสัญญาณดิจิทัลแบบปรับตัว (adaptive digital signal processing) และสายอากาศแถวลำดับปรับตัว เนื่องจากความซับซ้อนของการคำนวณโดยใช้อัลกอริทึมนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำ สามารถสร้างตัวประมวลผลสัญญาณได้ง่าย สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณที่คุณภาพสูงขึ้นกล่าวคือเป็นสัญญาณที่มีส่วนประกอบของสัญญาณพึงประสงค์ในขณะที่ลดสัญญาณแทรกสอดลง

อัลกอริทึม LMS เป็นอัลกอริทึมชนิดหนึ่งในตระกูลของอัลกอริทึมการลดระดับเกรเดียนต์เฟ้นสุ่ม (Stochastic Gradient Descent หรือ SGD) โดยได้ถูกพัฒนาโดยใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์ (cost function) แบบค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด สมการการปรับตัวของเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของอัลกอริทึม LMS เมื่อตัดการคำนวณการคาดหมายออกจากอัลกอริทึม SCG จะเป็นดังสมการ

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu e_k x^*(k) \quad (3)$$

เมื่อ $e_k$ เป็นความผิดพลาดแสดงได้ดังสมการ

$$e_k = d_k - y_k \quad (4)$$

$k$ เป็นดัชนีเวลา (time index) $\mu$ เป็นค่าขนาดแบบขั้น (step-size) และ $d_k$ เป็นสัญญาณอ้างอิง

ค่า $\mu$ จะควบคุมคุณสมบัติการลู่เข้าของเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก สังเกตได้ว่าวิธีที่ใช้อัลกอริทึม LMS นี้จะปรับตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกปรับทุกครั้งที่มีการสุ่มข้อมูลเข้ามาจนกว่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักที่ได้จะลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (optimum solution) การปรับตัวอย่างต่อเนื่องนี้จะใช้ได้ดีสำหรับสภาพแวดล้อมที่อธิบายโดยหลักสถิติว่าเป็นสภาพแวดล้อมแบบคงที่เหมาะสำหรับ คุณสมบัติการลู่เข้าจะขึ้นอยู่เมทริกซ์สหสัมพันธ์ **R** เมื่อค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) มีค่าต่างกันมากๆ อัตราการลู่เข้าจะช้ามาก

หลังจากที่ Widrow ได้นำเสนอรายงานระบบการควบคุมตัวประมวลผลอาเรย์ซึ่งปรับตัวด้วยตัวเองในวงจรกรองที่ปรับตัวได้ (adaptive filter) [2] และต่อมาพัฒนามาเป็นอัลกอริทึม LMS [3] แล้วนั้น Griffithes [4] และ Frost [5] ก็ได้พัฒนาอัลกอริทึม LMS สำหรับสายอากาศปรับตัวต่อ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถเลือกรับสัญญาณในทิศที่พึงประสงค์ได้ในขณะที่ลดสัญญาณแทรกสอดจากทิศที่ไม่พึงประสงค์ได้

อัลกอริทึม LMS ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น กลายมาเป็นอัลกอริทึม N-LMS (normalized LMS) และได้ถูกนำไปพัฒนาการสร้างตัวประมวลผลสำหรับสายอากาศปรับตัว บทความ [6] ได้นำเสนอการสร้างไอซีแถวลำดับเกทที่โปรแกรมได้ ( field programmable gate array หรือ FPGA) สำหรับสายอากาศปรับตัวที่อัลกอริทึม LMS และ NLMS โดยบทความแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม LMS และ NLMS สามารถสร้างได้โดยใช้เลขคณิตจุดตรึง (fixed-point arithmetic) ถึงแม้การแทนค่าตัวเลขจะมีความละเอียดต่ำเมื่อเทียบกับเลขคณิตจุดลอยตัว (floating-point arithmetic) แต่อัลกอริทึมก็ยังสามารถทำงานได้โดยการเลือกค่าขนาดแบบขั้น $\mu$ ให้เหมาะสม

**3.2 อัลกอริทึมมอดุลัสขนาดคงที่**

อัลกอริทึมมอดุลัสขนาดคงที่ได้ถูกพัฒนาครั้งแรกในปี พ.ศ. 2523 โดย Godard เพื่อใช้สำหรับระบบปรับเท่า (equalization) ในระบบการสื่อสารดิจิทัล 2 มิติ [7] อัลกอริทึมนี้เป็นอัลกอริทึมการปรับตัวที่ไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงช่วยในการปรับตัว แต่ต้องใช้คุณสมบัติของสัญญาณส่งที่มีการมอดุลัสด้วยขนาดที่คงที่ เช่น การมอดุลัสแบบ FM หรือ QPSK เป็นต้น ถึงแม้ว่าในช่วงแรกอัลกอริทึม CMA จะถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับระบบปรับเท่า แต่หลังจากนั้นไม่นานได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสายอากาศปรับตัวอย่างแพร่หลาย [8]-[13] เอาต์พุตของระบบแถวลำดับปรับตัวที่ใช้อัลกอริทึม CMA เป็นไปตามสมการที่ (2) ดังระบบสายอากาศปรับตัวทั่วๆไป การพัฒนาหาสมการปรับตัวของอัลกอริทึม CMA เป็นไปในแนวทางเดียวกับอัลกอริทึม LMS สำหรับอัลกอริทึม CMA นั้น การปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักสามารถคำนวณโดยการใช้หลักการเวียนเกิด (recursive) ของเทคนิคการลดระดับขั้น (steepest-descent method) และเมื่อพิจารณาเป็นการประมาณขณะหนึ่ง (instantaneous estimate) ซึ่งเป็นการตัดการคำนวณการคาดหมายออกจากอัลกอริทึมจะได้สมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักแสดงดังสมการ

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \mu \mathbf{x}(k)\varepsilon^*(k) \quad (5)$$

เมื่อการประมาณความผิดพลาด $\varepsilon(k)$ แทนด้วยสมการ

$$\varepsilon(k) = (y(k)/\|y(k)\|) - y(k) \quad (6)$$

สังเกตว่าสมการปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของสมการ (5) คล้ายกับสมการที่ (3) ของ LMS ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบสำหรับอัลกอริทึม LMS จะสามารถใช้สำหรับอัลกอริทึม CMA ได้ ยกเว้นส่วนของสัญญาณอ้างอิง

ปัญหาที่สำคัญของการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม CMA ในระบบสายอากาศปรับตัวคือมีอัตราการลู่เข้าช้า ได้มีการนำเสนอว่าพฤติกรรมการลู่เข้าของอัลกอริทึม CMA จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นหลัก [14] บทความ [15] ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้คำตอบของอัลกอริทึมการอินเวอร์สเมทริกซ์เลือกตัวอย่าง (sample matrix inversion หรือ SMI) ไปช่วยในการเริ่มต้นกระบวนการปรับตัวของ CMA แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็ยังมีข้อเสียที่สำคัญคือ อัลกอริทึม SMI ทำให้ความซับซ้อนของการคำนวณสูงมากขึ้นและจำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงในการปรับตัว เมื่อเร็วๆนี้ ได้มีการนำเสนอวิธีการเริ่มต้นกระบวนการของสายอากาศปรับตัวที่ใช้อัลกอริทึม CMA โดยเพิ่มฮาร์ดแวร์ส่วนวงจรปรับเฟสความถี่สูง (RF phase shifter) [8] เพื่อปรับลำคลื่นหลักให้ชี้ไปยังทิศตกกระทบของสัญญาณพึงประสงค์ โดยสัญญาณที่รับได้จะมีส่วนประกอบของสัญญาณพึงประสงค์มากกว่าสัญญาณแทรกสอด ทำให้การใช้อัลกอริทึม CMA ในการปรับตัวเพื่อรับสัญญาณพึงประสงค์และลดสัญญาณแทรกสอดได้เร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้โอกาสในการเลือกรับสัญญาณพึงประสงค์ (ไม่รับสัญญาณแทรกสอด) มากขึ้น [14] และหลังจากนั้นไม่นานได้มีการนำเสนอใช้สายอากาศปรับตัวโดยใช้อัลกอริทึม CMA ร่วมกับอัลกอริทึมเปิดและปิด (on-off algorithm) สำหรับเครื่องอ่าน RFID คลื่นความถี่ไมโครเวฟ [9] อัลกอริทึมเปิดและปิดจะถูกใช้เพื่อประมวลผลสัญญาณดิจิทัลให้เปรียบเสมือนว่าลำคลื่นหลักของสายอากาศชี้ไปในทิศทางของสัญญาณพึงประสงค์ หลังจากนั้นอัลกอริทึม CMA จะถูกใช้เพื่อลดสัญญาณแทรกสอด ผลการทดลองในบทความ [9] ชี้ให้เห็นชัดว่าการใช้อัลกอริทึมเปิดและปิดช่วยในการปรับตัวของอัลกอริทึม CMA ไม่เพียงแต่ลดรายจ่ายของการใช้ฮาร์ดแวร์ความถี่สูงแล้วยังเพิ่มประสิทธิภาพการลู่เข้าของอัลกอริทึม CMA ได้

จากที่กล่าวข้างต้น ถึงแม้การประยุกต์ใช้ CMA จะยังคงมีปัญหาเรื่องการลู่เข้าอยู่บ้าง แต่ด้วยข้อดีของอัลกอริทึม CMA ที่มีความง่ายในการนำไปสร้างตัวประมวลผลกอปรกับไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงช่วยในการปรับตัว ดังนั้นจึงได้รับความนิยมมากในการนำไปสร้างตัวประมวลผลของสายอากาศปรับตัว ปี พ.ศ. 2538 ได้มีบทความ [10] นำเสนอการสร้างตัวประมวลผลของอัลกอริทึม CMA และต่อมาไม่นาน ปี พ.ศ. 2540 นักวิจัยคณะเดียวกันนี้ได้นำเสนอระบบสายอากาศการจัดลำคลื่นดิจิทัล (digital beam forming) โดยใช้อัลกอริทึม CMA สำหรับการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ [11] จะใช้ FPGA เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล การสร้างลำคลื่นหลายลำคลื่นจะสร้างโดยใช้ FFT ใน FPGA ก่อนการประมวลผลสัญญาณปรับตัว FPGA ที่ใช้สำหรับสร้างการประมวลผลดิจิทัลทั้งหมด จำนวน 10 ตัว สถาปัตยกรรมที่ใช้ในการออกแบบตัวประมวลผล CMA เป็นแบบการคูณและสะสม (multiply-and-accumulate หรือ MAC) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างนี้ไม่สนับสนุนการคำนวณด้วยความเร็วสูง สังเกตได้จากบทความดังกล่าวจะใช้ความถี่สัญญาณนาฬิกาที่เพียงแค่ 7.04 MHz และความถี่การชักตัวอย่าง (sampling frequency) 128 kHz ในทำนองเดียวกันบทความ [12] ซึ่งนำเสนอการสร้างฮาร์ดแวร์ของสายอากาศปรับตัวซึ่งใช้อัลกอริทึม CMA เพื่อชดเชย multipath fading ก็มีข้อจำกัดทางด้านความเร็วเช่นเดียวกัน โดยใช้ตัวประมวลผลเป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DSP จำนวน 4 ตัว บทความ [13] ได้ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานจริงของสายอากาศปรับตัวที่ใช้อัลกอริทึม CMA ในสภาพแวดล้อมจริง กลางเมืองโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น โดยมุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดบิต จากผลการวิเคราะห์ บทความนี้แสดงได้เห็นว่าอัลกอริทึม CMA สามารถใช้เพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณรับได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของสายอาศแถวลำดับปรับตัว โดยใช้อัลกอริทึม LMS และ CMA ในการอธิบาย บทความยังได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมทั้ง 2 ทั้งในมุมมองของพฤติกรรมการลู่เข้า การสร้างตัวประมวลผล และการนำไปใช้ในระบบ โดยชี้ให้เห็นว่าอัลกอริทึมทั้ง 2 ที่เป็นตัวแทนของอัลกอริทึมไบล์ดและไม่ไบล์ดที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสามารถใช้ในการเลือกรับสัญญาณพึงประสงค์ในขณะเดียวกันก็ลดสัญญาณแทรกสอดได้

## 5. เอกสารอ้างอิง


[1] J. Litva and T. K. Lo, Digital Beamforming in Wireless Communications, John Walker, USA:, 1996.

[2] B. Widrow, "Adaptive filters I: Fundamentals," Stanford Univ. Electronics Labs., Syst. Theory Lab., Center for Syst. Res., Rep. SU-SEL-66-126, Tech. Rep. 6764-6, Dec., 1966.

[3] B. Widrow, P. E. Mantey, L. J. Griffiths, and B. B. Goode, "Adaptive antenna systems," Proc. IEEE, vol. 55, pp. 2143-2159, Dec., 1967.

[4] L. J. Griffiths, "A simple adaptive algorithm for real-time processing in antenna arrays,'' Proc. IEEE, vol. 57, pp. 1696-1704,Oct., 1969.

[5] L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," Proc. IEEE, vol. 60, pp. 926-935, Aug., 1972.

[6] H. Oba, M. Kim, and H. Arai, "FPGA implementation of LMS and N-LMS Processor for Adaptive Array Applications," Proc. of International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications (ISPACS), Yonago, Japan, pp. 485 – 488, Dec.12-15, 2006.

[7] D.N. Godard, "Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems," IEEE Trans. Commun., vol. COM-28(11), pp. 1867-1875, Nov., 1980.

[8] A. Boonpoonga, P. Sirisuk, M. Chongcheawchamnan, S. Patisang, and M. Krairiksh, "Hardware-Assisted Initialization for CMA Adaptive Antenna," IET Microwaves, Antennas and Propagation Trans. 2008, Vol. 2, No. 4, pp. 303–311, June, 2008.

[9] T. Tantisopharak, A. Boonpoonga, C. Phongcharoenpanich, P. Sirisuk, and M. Krairiksh, "Adaptive Array Antenna Using On-Off and CMA Algorithms for Microwave RFID Readers," IEICE Trans. on Commun., vol. E94-B, No.5, May, 2011.

[10] T. Tanaka, R. Miura, I. Chiba, and Y. Karasawa, "An ASIC Implementation Scheme to Realize a Beam Space CMA Adaptive Array Antenna," IEICE Trans. Commun., vol. E78-B, no. 11, Nov., 1995.

[11] I Chiba, R Miura, T. Tanaka and Y. Karasawa, "Digital Beam Forming (DBF) Antenna System for Mobile Communications," IEEE AES Systems Magazine, pp. 31-41, Sept., 1997.

[12] T. Ohgane, T. Shimura, N. Matsuzawa ,and H. Sasaoka, "An Implementation of a CMA Adaptive Array for High Speed GMSK Transmission in Mobile Communications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 42, no. 3, pp. 282-288, Aug., 1993.

[13] T. Ohgane, N. Matsuzawa, T. Shimura, M. Mizuno, and H. Sasaoka, "BER Performance of CMA Adaptive Array for High-Speed GMSK Mobile Communication—A Description of Measurements in Central Tokyo," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 42, no. 4, pp.484-490, Nov., 1993.

[14] K. Takao and H. Matsuda, "The choice of the initial condition of CMA adaptive arrays," IEICE Trans. Commun., vol. E78-B, no. 11, pp. 1474-1479, Nov., 1995.

[15] R. Yonezawa and I. Chiba, "A Combination of Two Adaptive Algorithms SMI and CMA," IEICE Trans. Commun., vol.E84-B, no.7, pp. 1768-1773, July, 2001.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้