

บทที่ 1

บทนำ



### 1.1 ประวัติความเป็นมา

ในปัจจุบันนี้ แนวโน้มที่จะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการสื่อสารก็มีเพิ่มมากขึ้น แต่เดิมนั้นได้มีผู้พยายามค้นคว้าคลื่นความถี่วิทยุที่สูง ๆ มาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากความสะดวกในด้านการออกแบบวงจรและอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ เช่นเสาอากาศ เป็นต้น แต่การใช้คลื่นความถี่สูง ๆ นั้น มักมีปัญหาทางด้านการลดทอน (attenuation) ในตัวกลาง ซึ่งมีค่าแปรตามความถี่ กล่าวคือ เมื่อความถี่ยิ่งสูงมาก การลดทอนก็ยิ่งมีมากขึ้น ดังนั้นจึงมีผู้พยายามค้นคิดการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดคลื่นความถี่สูงกว่า DC เล็กน้อย เช่น ความถี่ ULF (ultra-low-frequency , 0.7-30 Hz) และความถี่ ELF (extremely-low-frequency, 30-3,000 Hz)<sup>(1)</sup> ด้วยเหตุผลที่ว่า การลดทอนในตัวกลางต่ำมาก ทั้งยังไม่ทำให้รูปแบบของคลื่นผิดเพี้ยนมากนัก<sup>(2)</sup>

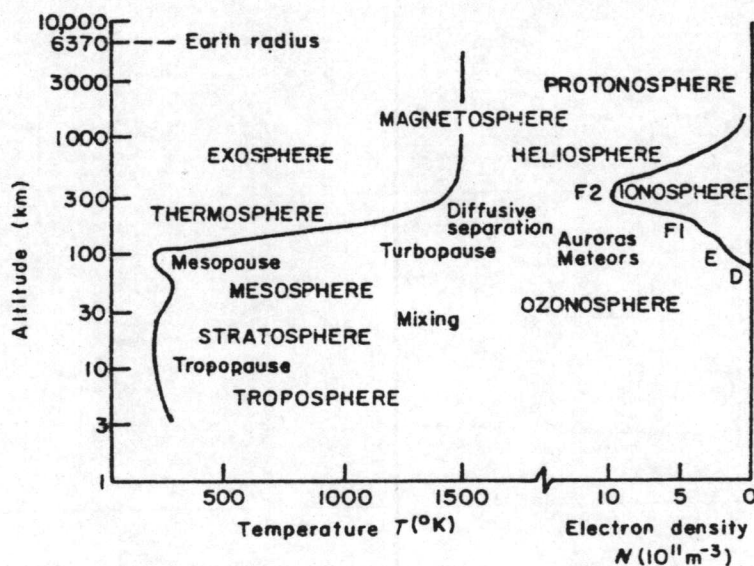
ในปี ค.ศ.1899 ที่ Colorado Springs , Nikola Tesla ได้เริ่มการสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการใช้เครื่องส่งที่มีการเกิดประกายไฟฟ้าในช่องว่าง 2-3 ปีต่อมาเขาก็ได้สร้างเครื่องส่งที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นที่ Long Island โดยหวังว่าจะสามารถส่งสัญญาณได้ถึงแหลม Corrush ในประเทศอังกฤษ และเขาได้เสนอแนะที่จะประยุกต์ระบบของเขาในการที่จะกระจายระบบกำลังส่งทั่วทุกแห่งในโลก แต่ผลสำเร็จของ Marconi ในปี ค.ศ.1901 ในการส่งคลื่นวิทยุที่ง่ายและสะดวกกว่า ทำให้โครงการของ Tesla ต้องล้มเลิกไป แต่อย่างไรก็ตามผลงานของ Tesla ก็มีส่วนอย่างยิ่งในการปรับปรุงการสื่อสารโดยใช้คลื่น ELF นอกจากนี้ Tesla ยังค้นพบอีกว่าโลกของเราจะมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ประมาณ 10 เฮิร์ตซ์ และในยุคของเขานั้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขนาด ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ ก็ได้ถูกนำมาดัดแปลงในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านตัวนำต่างๆ

### 1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของชั้นบรรยากาศ

ในการศึกษาการสื่อสารโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดคลื่นความถี่ ULF-ELF ดังกล่าว จำเป็นต้องศึกษาลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นตัวกลางชนิดแอนไอโซโทรปิก

และคลื่นรบกวนที่เกิดขึ้นในบรรยากาศดังกล่าว

ชั้นบรรยากาศของโลกชั้นต่ำสุดก็คือ โทรโพสเฟียร์ (troposphere) ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างพื้นโลกกับความสูงประมาณ 15 กิโลเมตร เหนือบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เริ่มที่ความสูงวัดจากพื้นโลกประมาณ 50 กิโลเมตรขึ้นไป ก็คือ บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ซึ่งเป็นบรรยากาศที่ก๊าซมีการแตกตัวเป็นไอออน และอิเล็กตรอนโดยผลจากรังสีในแสงอาทิตย์ ทำให้มีผลต่อการส่งผ่านคลื่นวิทยุ บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์นี้สามารถแบ่งออกได้ 4 ระดับ คือ ระดับ D ความสูงตั้งแต่ประมาณ 50 กิโลเมตร ถึงประมาณ 90 กิโลเมตร ระดับ E ความสูงตั้งแต่ประมาณ 90 กิโลเมตร ถึง 150 กิโลเมตร เหนือกว่าพื้นเป็นระดับ F ซึ่งแบ่งออกเป็นระดับ F<sub>1</sub> และ F<sub>2</sub> ชั้นบรรยากาศระหว่างโทรโพสเฟียร์ และไอโอโนสเฟียร์จะแบ่งออกเป็นสตราโทสเฟียร์ ซึ่งอยู่ระหว่างประมาณ 15 กิโลเมตร ถึง 50 กิโลเมตร และมีโซสเฟียร์ (mesosphere) ซึ่งอยู่ระหว่างประมาณ 50 กิโลเมตร ถึงประมาณ 80 กิโลเมตร คาบเกี่ยวกับบรรยากาศชั้น D ของไอโอโนสเฟียร์ดังแสดงในรูปที่ 1.1



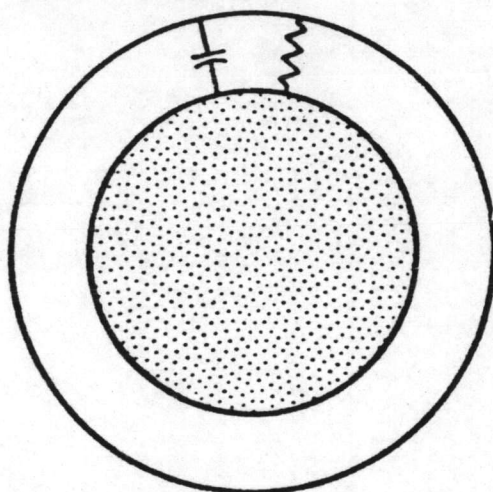
รูปที่ 1.1 ขอบเขตของชั้นบรรยากาศ แสดงชื่อต่าง ๆ ที่ใช้กัน ที่ความสูง อุณหภูมิ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (2)

ได้มีผู้ศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของชั้นบรรยากาศของโลกอยู่ 2 แบบ (3) กล่าวคือ

### 1.2.1 แบบจำลองแบบเก่า

แบบจำลองแบบเก่าได้อธิบายไว้ว่า ชั้นบรรยากาศรอบโลกนี้ทำหน้าที่คล้ายตัวเก็บ

ประจุทรงกลม ซึ่งประกอบด้วยผิวตัวนำทรงกลม 2 ผิวซ้อนกัน และค่าความนำไฟฟ้าของบรรยากาศเป็นเสมือนตัวนำที่ต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุทรงกลมดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 1.2 สภาพนำไฟฟ้าของบรรยากาศในแบบจำลองนี้เป็นแบบไอโซโทรปิก คือไม่แปรตามทิศทาง แบบจำลองแบบเก่านี้แม้จะเป็นวิธีการประมาณที่ดีของระบบโลก-ไอโอโนสเฟียร์ และมีประโยชน์ในการอธิบายปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าใต้บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ลงมา (ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์) แต่ไม่อาจจะอธิบายปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ให้ถูกต้องได้



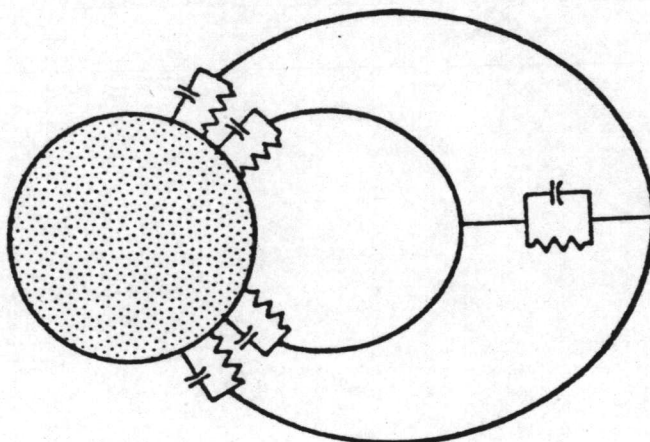
รูปที่ 1.2 แบบจำลองแบบ เก่าของชั้นบรรยากาศของโลกแสดงชั้นบรรยากาศของโลกทำหน้าที่คล้ายตัวเก็บประจุทรงกลม และตัวนำไฟฟ้า ต่อขนานกันระหว่างผิวตัวนำทรงกลม 2 ชั้นพร้อมกัน

### 1.2.2 แบบจำลองแบบใหม่

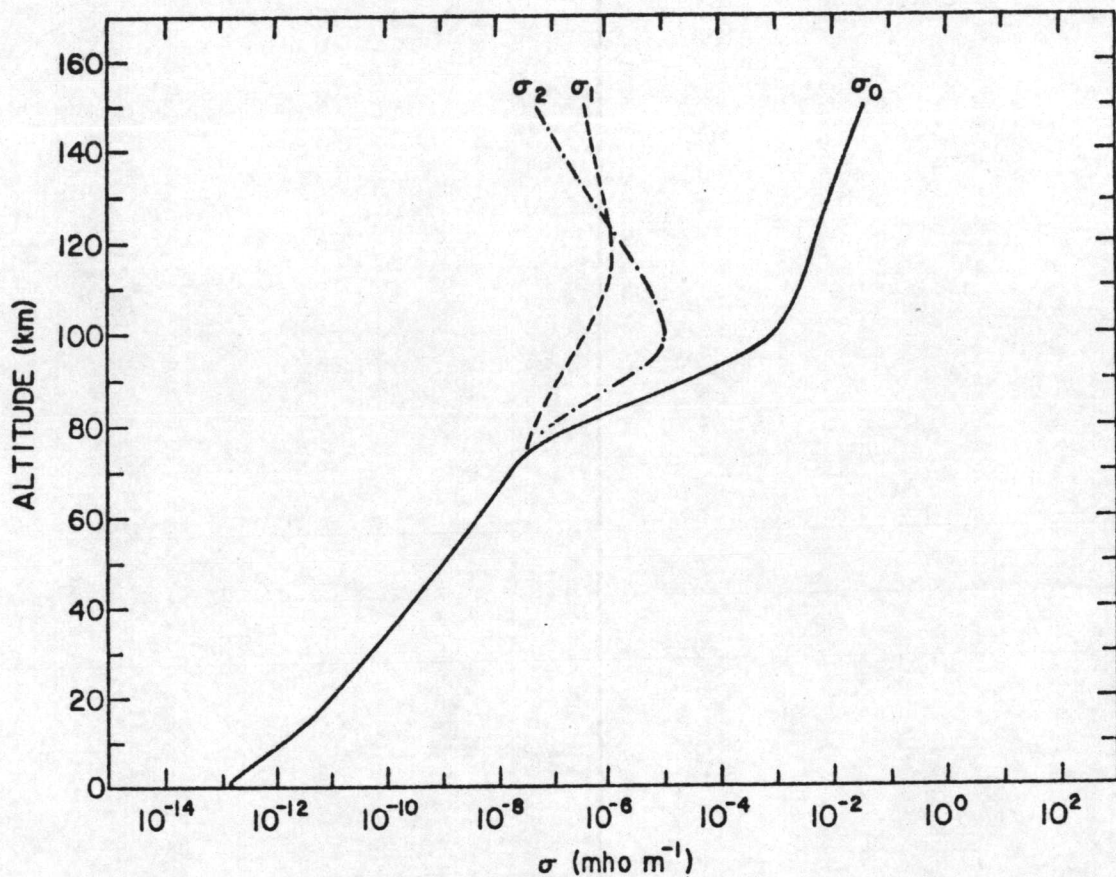
แบบจำลองแบบใหม่นี้คล้ายกับแบบจำลองแบบ เก่า แต่ต่างจาก เดิมตรงที่แบบจำลองนี้ไม่มีผิวตัวนำทรงกลมชั้นนอก และสภาพนำไฟฟ้าเป็นแบบแอนไอโซโทรปิกดังแสดงในรูป 1.3 เหตุผลก็คือว่าในชั้นบรรยากาศที่มีความสูงต่ำกว่าประมาณ 70 กิโลเมตร การชนระหว่างโมเลกุลของก๊าซ อิเล็กตรอน และไอออนในชั้นบรรยากาศดังกล่าวมีค่าสูงกว่า ความถี่การโคจรเป็นวงของอนุภาคเหล่านี้ในสนามแม่เหล็กโลก ดังนั้นผลของสนามแม่เหล็กโลกจึงยังไม่มีผลต่อค่าสภาพนำไฟฟ้ามากนัก และความนำไฟฟ้าในตัวกลางนี้สามารถประมาณว่าเป็นแบบไอโซโทรปิกได้ แต่พอความสูงของชั้นบรรยากาศสูงกว่าประมาณ 70 กิโลเมตรขึ้นไป อันเป็นที่ที่โมเลกุลของ ก๊าซ ไอออน และอิเล็กตรอน มีความถี่ในการชนกันต่ำ ผลของสนามแม่เหล็กโลก เริ่มมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้า ทำให้สภาพนำไฟฟ้าในตัวกลางนี้เป็นแบบ

แอนไอโซโทรปิก กล่าวคือ สภาพนำไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งเราเรียกว่า สภาพนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific conductivity)  $\sigma_0$  และสภาพนำไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งเรียกว่า สภาพนำไฟฟ้าพีเคอร์เซ็น (Pedersen conductivity)  $\sigma_1$  และ สภาพนำไฟฟ้าฮอลล์ (Hall conductivity)  $\sigma_2$  มีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ค่า  $\sigma_0$  จะมีค่ามากกว่าค่า  $\sigma_1$  และค่า  $\sigma_2$  หลาย ๆ เท่า ที่ความสูงประมาณ 150 กิโลเมตร ดังแสดงในรูป 1.4

กล่าวโดยสรุปแล้ว แบบจำลองแบบใหม่นี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าได้ละเอียดกว่าแบบจำลองแบบเก่า เราจะนำแบบจำลองดังกล่าวนี้มาใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งเราจะได้อีกต่อไป



รูปที่ 1.3 แบบจำลองแบบใหม่ของชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งเส้นแรงสนามแม่เหล็กโลกทำหน้าที่คล้ายตัวนำที่ดีในแมกนีโตสเฟียร์ (magnetosphere) โดยที่ความสูงจากผิวโลกประมาณ 70 กม. จะทำหน้าที่คล้ายกับแบบจำลองแบบเก่า



รูปที่ 1.4 แสดงค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ระยะความสูงต่าง ๆ กัน ความสูงต่ำกว่า 70 กม. จะแสดงคุณสมบัติไอโซโทรปิก และ ความสูงสูงกว่า 70 กม. จะแสดงคุณสมบัติแอนไอโซโทรปิก (3)

### 1.3 วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาคูสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทางคลื่นความถี่ ULF-ELF ในตัวกลางแอนไอโซโทรปิก ตัวกลางที่เราจะพิจารณาก็คือ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีผู้วิจัยค้นคว้ามาแล้ว ส่วนใหญ่ก็จะพิจารณาหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณที่สนามแม่เหล็กโลกทำมุมฉาก หรือเกือบตั้งฉากกับผิวโลก นั่นก็คือ บริเวณแถบขั้วโลกเท่านั้น แต่สำหรับบริเวณอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ขั้วโลก ซึ่งสนามแม่เหล็กโลกทำมุมเอียงกับผิวโลกนั้น ยังไม่ได้มีการค้นคว้าวิจัยกันมากนัก วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ก็เพื่อศึกษาคูสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ ULF-ELF ในบรรยากาศของโลกตรงบริเวณที่สนามแม่เหล็กโลกทำมุมเอียงกับพื้นโลกนี้เอง

ประโยชน์ที่จะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ อาจจะสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้คือ

### 1.3.1 ทางทฤษฎี

เราสามารถคำนวณหาณิพจน์ทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ ULF-ELF ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของคลื่นดังกล่าวนี้

### 1.3.2 ทางปฏิบัติ

เราสามารถนำผลจากทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้งานด้านวิจัยอื่น ๆ ได้ ดังเช่น

#### 1.3.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับ การสื่อสารใต้น้ำ (1), (2)

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดคลื่นความถี่ ULF-ELF มีการลดทอนในตัวกลางต่ำ ดังนั้น คลื่นที่ความถี่นี้จึงเหมาะสมกับการสื่อสารใต้น้ำ เช่น การสื่อสารระหว่างเรือดำน้ำกับเรือดำน้ำ หรือเรือดำน้ำกับชายฝั่ง ตัวอย่างของผู้ใช้คลื่น ULF-ELF ในการสื่อสารใต้น้ำ ได้แก่ กองทัพเรือสหรัฐฯ ซึ่งเห็นความสำคัญของการใช้คลื่นความถี่ดังกล่าว จึงลงทุนวิจัยการสื่อสารโดยใช้คลื่นประเภทนี้มากขึ้น

#### 1.3.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับคลื่นไฮโดรแมกเนติก (hydromagnetic waves) ในชั้นบรรยากาศของโลกส่วนที่เรียกว่า ไอโอโนสเฟียร์ (3), (4), (5), (6)

#### 1.3.2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารผ่านไอโอโนสเฟียร์ (3), (4), (5), (6)

งานวิจัยดังกล่าว คล้ายคลึงกับงานวิจัยใน 1.3.2.1 เพียงแต่ต่างกันที่ว่า การสื่อสารที่เป็นการสื่อสารระหว่างผิวโลกกับดาวเทียม ซึ่งเราจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติของคลื่นเพื่อเดินทางผ่านบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ว่า จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติมากหรือน้อยกับตัวกลาง ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแอนไอโซโทรปิก มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความสูง (หรืออีกนัยหนึ่ง ความหนาแน่นของอากาศ) และค่ามุมเทของสนามแม่เหล็กโลก

งานวิจัยที่ได้อ้างมาทั้งหมดนี้ ได้มีผู้ทำการค้นคว้าตั้งแต่ราวปี ค.ศ. 1956 (2)

ขั้นตอนต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัยในวิทยานิพนธ์ มีดังต่อไปนี้ :-

ในบทที่ 2 เราจะแสดงวิธีการคำนวณนิพจน์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอันดับศูนย์และอันดับหนึ่ง

โดยอาศัยแนวของ Fano et al (14) ผลรวมของค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวจะเป็นค่าประมาณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดความถี่ ULF-ELF ในบริเวณที่สนามแม่เหล็กโลกทำมุมเอียงกับผิวโลก

เราจะนำการวิเคราะห์เทนเซอร์ (tensor analysis) มาประยุกต์ และจะแสดงนิพจน์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอันดับศูนย์ และอันดับหนึ่ง ในบริเวณที่สนามแม่เหล็กโลกทำมุมตั้งฉากกับผิวโลกโดยใช้รูปแบบของนิพจน์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างจากผู้ทำวิจัยอื่น เช่น Dejnakarintara (4), (5), (6)

ในบทที่ 3 เราจะนำผลการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณที่สนามแม่เหล็กโลกทำมุมตั้งฉากกับผิวโลก มาคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณที่สนามแม่เหล็กโลกทำมุมเอียงเล็กน้อยกับพื้นผิวโลกโดยวิธีใช้พจน์รบกวน (perturbation)

ในบทที่ 4 เราจะแสดงตัวอย่างผลการคำนวณเป็นตัวเลขซึ่งเปรียบเทียบผลการคำนวณจากบทที่ 2 กับผลการคำนวณจากบทที่ 3

ในบทที่ 5 ซึ่งเป็นบทสุดท้าย จะมีการวิจารณ์วิธีการคำนวณที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และให้ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่ควรทำต่อไป และการสรุปผล

สำหรับค่าคงตัวต่าง ๆ ที่จะแสดงในบทต่อไปนี้ แต่ละตัวในแต่ละขั้นตอนจะไม่ใช้ค่าคงตัวค่าเดียว ค่าคงตัวต่าง ๆ จำเป็นต้องตรวจสอบจากตารางที่ได้กล่าวถึงเท่านั้น ส่วนสัญลักษณ์ของตัวแปรจะใช้เหมือนกันตลอด