



บทที่ 2

## ฟ้าผ่าและเครื่องนับฟ้าผ่า

### 2.1 การเกิดฟ้าผ่าในธรรมชาติ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ อันเป็นผลของการคายประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ซึ่งเป็นไปตามหลักการดีสชาร์จเบรกดาวน์ในก๊าซเพียงแต่ดีสชาร์จของฟ้าผ่าเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องมีอิเล็กโตรดการสะสมของประจุที่มีชีวิตต่างกัน เป็นผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุเหล่านั้น ถ้าประจุสะสมรวมกันมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเกินค่าวิกฤตความคงทนของอากาศต่อแรงดันไฟฟ้าก็จะเกิดการดีสชาร์จของประจุขึ้น อันเป็นจุดเริ่มต้นของการนำไปสู่การเกิด ดีสชาร์จเบรกดาวน์ขึ้น ดีสชาร์จอาจเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆ หรือระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกซึ่งเรียกว่า ฟ้าผ่า[1]



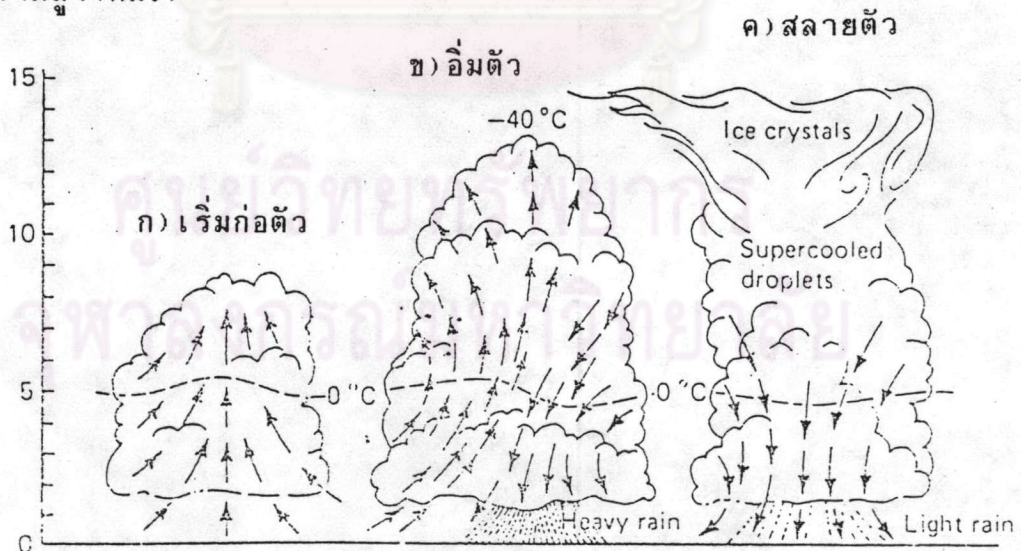
รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายการเกิดดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าเคลื่อนตัวสู่พื้นโลก[18]



กล่าวโดยสรุปคือ ในก้อนเมฆจะต้องมีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่มากพอจึงสามารถทำให้เกิดการปล่อยประจุในก้อนเมฆออกไปยังก้อนเมฆอื่น หรือพื้นโลก หรือปล่อยประจุในก้อนเมฆเอง ก้อนเมฆที่สามารถทำให้เกิดฟ้าผ่าได้นี้เรียกว่า เมฆฝนฟ้าคะนอง โดยมากเกิดขึ้นในขณะมีพายุอย่างรุนแรง

การเกิดเมฆฝนและสะสมประจุไฟฟ้านั้นสามารถเกิดขึ้นได้ในบริเวณต่างๆ ทั่วโลก เริ่มจากบริเวณผิวโลกที่ได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ทำให้อากาศบริเวณนั้นขยายตัวลอยขึ้นสูง อากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้นนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของขบวนการเกิดเมฆฝนและสะสมประจุไฟฟ้า ดังนั้นเมฆฝนในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรจะเกิดขึ้นได้มากกว่าบริเวณขั้วโลก เนื่องจากได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์มากกว่านั่นเอง ปกติจะเริ่มเกิดในบริเวณรอยต่อของอากาศ เช่น บริเวณมหาสมุทรกับพื้นดิน หรือบริเวณภูเขาสูงกับพื้นราบ ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอากาศได้มาก เวลาที่ใช้ก่อตัวเมฆฝนและสะสมประจุไปจนถึงการดีสชาร์จ เบรกดาว์น สลายตัวหมดไปประมาณ 30 นาที ถึง 2 ชั่วโมง บางครั้งความปั่นป่วนของพายุฝนฟ้าคะนองจากมหาสมุทรอาจมีติดต่อกันมากกว่า 48 ชั่วโมง ก้อนเมฆคือ กลุ่มละอองไอน้ำที่เกิดจากการกลั่นตัวของอากาศร้อนจับตัวกับฝุ่นละอองในอากาศ การก่อตัวของก้อนเมฆจะมีขนาดใหญ่ขึ้นทั้งด้านความสูงและขนาดความกว้าง ดังแสดงในรูป 2.2

ความสูง(กม.)

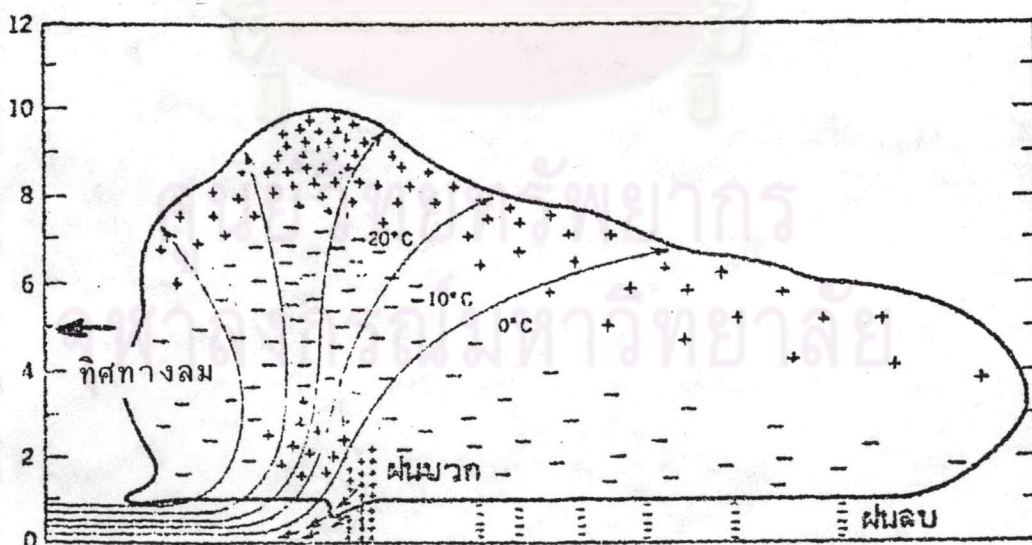


รูปที่ 2.2 แสดงการก่อตัวของก้อนเมฆ[19]



ในปี ค.ศ. 1937 ซิมป์สันและสคราส[3] ได้ทดลองวัดประจุไฟฟ้าที่กระจายอยู่ในเมฆฝนฟ้าคะนอง โดยการปล่อยบอลลูนพร้อมเครื่องวัดประจุเข้าไปในก้อนเมฆ พบว่าประจุที่อยู่ในก้อนเมฆส่วนใหญ่เป็นประจุลบและมีประจุบวกอยู่ตอนบน แต่บางครั้งก็พบประจุบวกปรากฏอยู่บริเวณฐานตอนล่างของก้อนเมฆด้วย ในรูปที่ 2.3 แสดงการกระจายประจุและลักษณะการสะสมประจุไฟฟ้าในเมฆฝนฟ้าคะนอง ซิมป์สันและสคราส ได้ให้ข้อสรุปในการทดลองและกลายเป็นทฤษฎีการสะสมประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆฝนฟ้าคะนองดังนี้กลุ่มไอน้ำขณะลอยตัวขึ้นสูงพบความเย็นในบรรยากาศจึงมีการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำมากขึ้น จนในที่สุดกลายเป็นน้ำแข็งก้อนโตมีน้ำหนักมากขึ้นและพยายามตกกลับมายังพื้นโลกเสียดสีกับอากาศรอบข้างเกิดการแยกประจุไฟฟ้าขึ้น อากาศรอบข้างจะเป็นประจุบวกเคลื่อนที่ขึ้นส่วนก้อนน้ำแข็งจะมีประจุลบเคลื่อนที่ลงจนกลั่นตัวเป็นหยดน้ำมีขนาดโตมากกว่า 5 มิลลิเมตร ปะทะกับอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้นกระแทกให้หยดน้ำกลายเป็นละอองน้ำเล็กๆ เกิดการแยกประจุอีกครั้ง โดยอากาศจะเป็นประจุลบส่วนละอองน้ำจะเป็นประจุบวกเคลื่อนที่ลงเป็นน้ำฝน บางส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะถูกพัดกลับขึ้นไปเริ่มต้นกระบวนการสะสมประจุใหม่ เราจึงพบว่าฝนที่ตกลงมามีประจุเป็นบวก ประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆส่วนใหญ่เป็นประจุลบ มีประจุบวกอยู่ตอนบน

ความสูง(กม.)



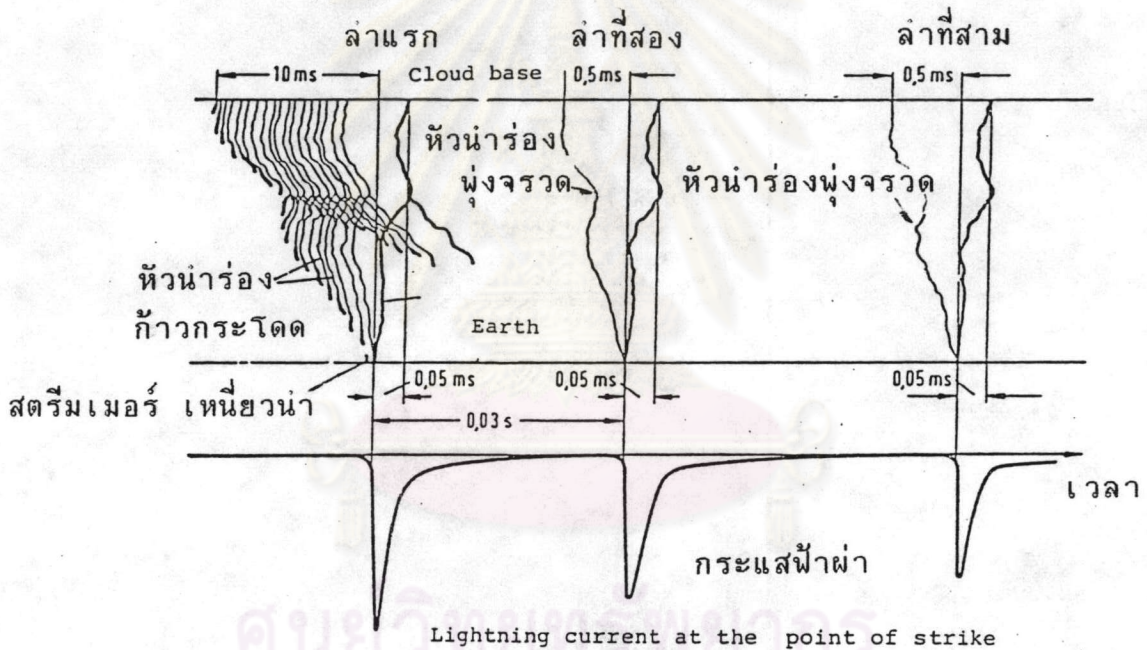
รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายและสะสมประจุไฟฟ้าในเมฆฝนฟ้าคะนอง[1]



จากทฤษฎีของซิมป์สัน ก้อนเมฆที่สามารถสะสมประจุไฟฟ้าเป็นเมฆฝนฟ้าคะนอง เกิดฟ้าผ่าได้จะมี ความสูงและขนาดใหญ่มาก ปกติฐานของก้อนเมฆสูงประมาณ 4 กิโลเมตร และตอนบนมีความสูงตั้งแต่ 9 ถึง 20 กิโลเมตร จากระดับน้ำทะเล ส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมีขนาดตั้งแต่ 3 ถึง 50 กิโลเมตร[3]

2.1.1 ฟ้าผ่าพื้นโลก หลังจากการทดลองของ เบนจามิน แฟรงกลิน ในปี ค.ศ.1751[3] ทำให้การค้นคว้าทดลองเกี่ยวกับฟ้าผ่าพื้นโลกก้าวหน้าไปอย่างมากเช่น การถ่ายภาพฟ้าผ่าด้วยฟิล์มหมึก การวัดกระแสฟ้าผ่า และการวัดสนามไฟฟ้า เป็นต้น ดังในรูปที่ 2.4 แสดงภาพฟ้าผ่าบันทึกด้วยฟิล์มหมึก มีลำดับการเกิดจากซ้ายไปขวา

เกิดฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ



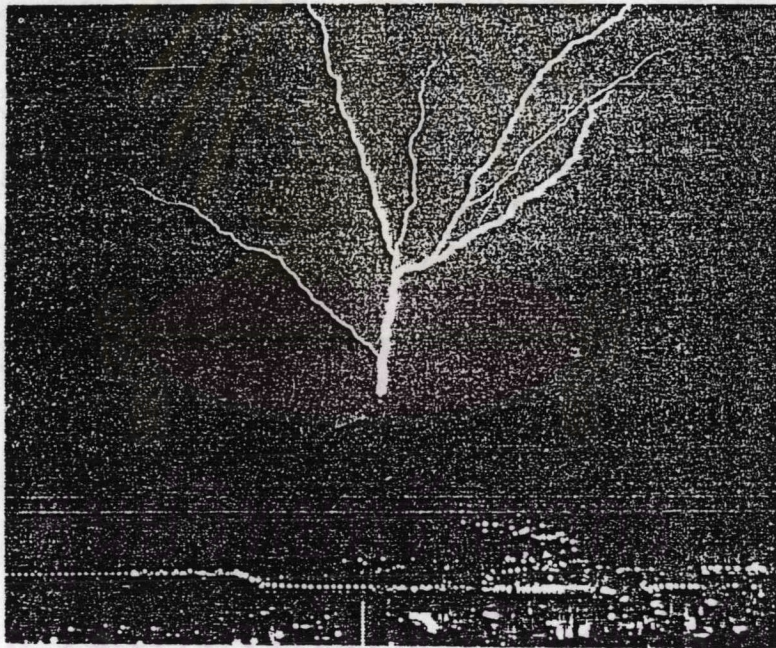
รูปที่ 2.4 แสดงถึงการเกิดฟ้าผ่าลงสู่ดินซึ่งบันทึกจากกล้องถ่ายภาพฟิล์มเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา[3]

ส่วนหน้าที่ทำให้เกิดกระแสฟ้าผ่าเรียก หัวนํ้าร่องฟ้าผ่า แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- 1) หัวนํ้าร่องฟ้าผ่ากระโดด กระจายทางเป็นแขนงลงสู่พื้นโลกซึ่งขยายตัวออกไปในทางที่อากาศแตกตัวได้ง่าย มีลักษณะคืบหน้าเป็นจังหวะก้าว แบ่งได้เป็น ลีดเดอร์บวกและลีดเดอร์ลบ เรียกตามประจุของหัวนํ้าร่อง
- 2) หัวนํ้าร่องพุ่งจรวด เป็นส่วนนำของลำฟ้าผ่าซ้ำ วิ่งตามแนวฟ้าผ่าเดิม ไม่มีแขนง ประจุกิ่งเป็นแบบต่อเนื่องด้วยความรวดเร็ว



เมื่อหัวนําร่องก้าวกระโดดวิ่งลงมาใกล้พื้นโลกก้าวสุดท้าย ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่พื้นโลกมีค่าสูง เหนียวน่าให้เกิดสตรีมเมอร์ประจูดตรงกันข้ามวิ่งจากพื้นโลกเข้าบรรจบกับหัวนําร่อง ฉะนั้นก้อนเมฆจะคายประจุลงสู่พื้นโลกตามแนวหัวนําร่องเกิดกระแสฟ้าผ่า จะทำให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเรียกว่า ล่าฟ้าผ่าย้อนกลับ การเกิดฟ้าผ่านี้เรียกว่า ฟ้าผ่าลง ซึ่งอาจมีกระแสฟ้าผ่าเกิดขึ้นซ้ำแนวเดิมหลายล่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีจำนวน 3 ล่า จะเห็นได้ว่าส่วนที่ทำให้เกิดกระแสฟ้าผ่าสู่ดินอย่างมาก คือ ล่าฟ้าผ่าย้อนกลับ ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญของฟ้าผ่าสู่ดิน แต่ต้องอาศัยหัวนําร่องฟ้าผ่าตั้งได้กล่าวมาแล้ว ฟ้าผ่าพื้นโลกแบบล่าเดี่ยวส่วนมากเกิดจาก ฟ้าผ่าขึ้น โดยหัวนําร่องเริ่มต้นจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆเช่น จากยอดเสาหรือหอคอยสูงๆ ตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไปหรือสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนยอดเขาสูงเป็นต้น



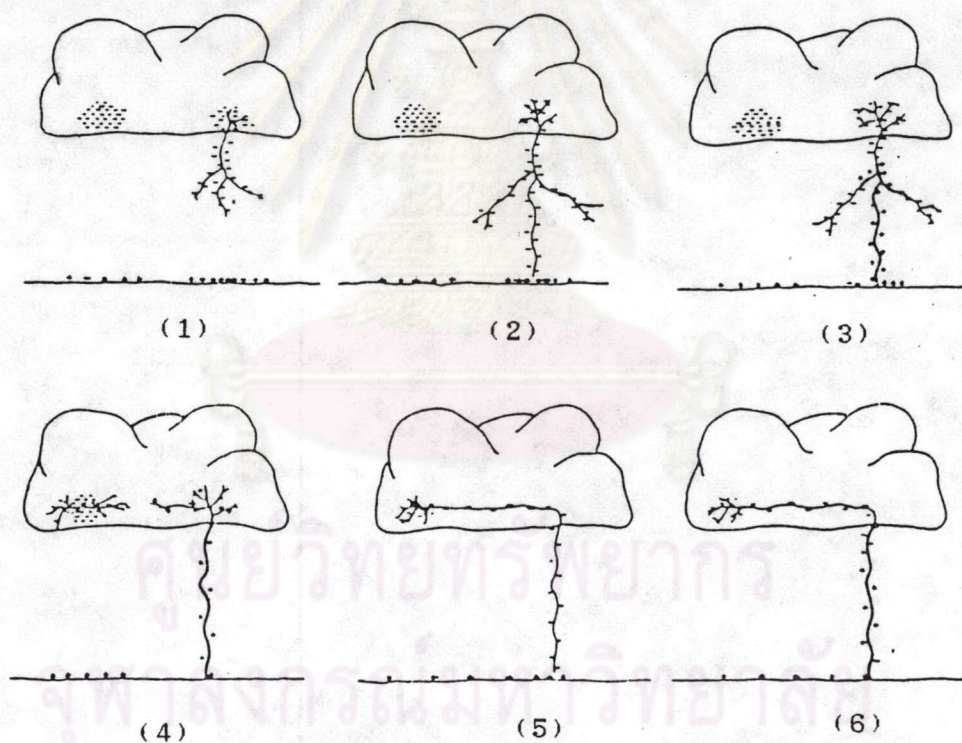
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายฟ้าผ่าขึ้น[18]



ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าซ้ำหลายล่ำอาจอธิบายได้ว่า ก้อนเมฆมีสภาพไม่นำไฟฟ้า หลังจากกลุ่มประจุแรกคายประจุไปหมดแล้วก็จะทำให้เกิด สตรีมเมอร์ ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเกิดดีสชาร์จลงสู่พื้นโลกตามแนวฟ้าผ่าล่ำแรก ซึ่งอากาศยังไม่คืนสภาพเป็นฉนวน จึงทำให้ประจุในก้อนเมฆจากกลุ่มอื่นดีสชาร์จได้ง่ายตามแนวนี้ การนับฟ้าผ่า จึงแบ่งได้เป็น

- 1) นับจำนวนฟ้าผ่า
- 2) นับจำนวนล่ำฟ้าผ่าย้อนกลับ

เครื่องนับฟ้าผ่าสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ เป็นแบบนับจำนวนฟ้าผ่า โดยนับล่ำฟ้าผ่าแรก ดังนั้นในวงจรเครื่องนับฟ้าผ่าจะต้องมีวงจรหน่วงเวลาเพื่อตัดล่ำฟ้าผ่าซ้ำอื่นๆ ออกไปซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของวงจรต่อไป

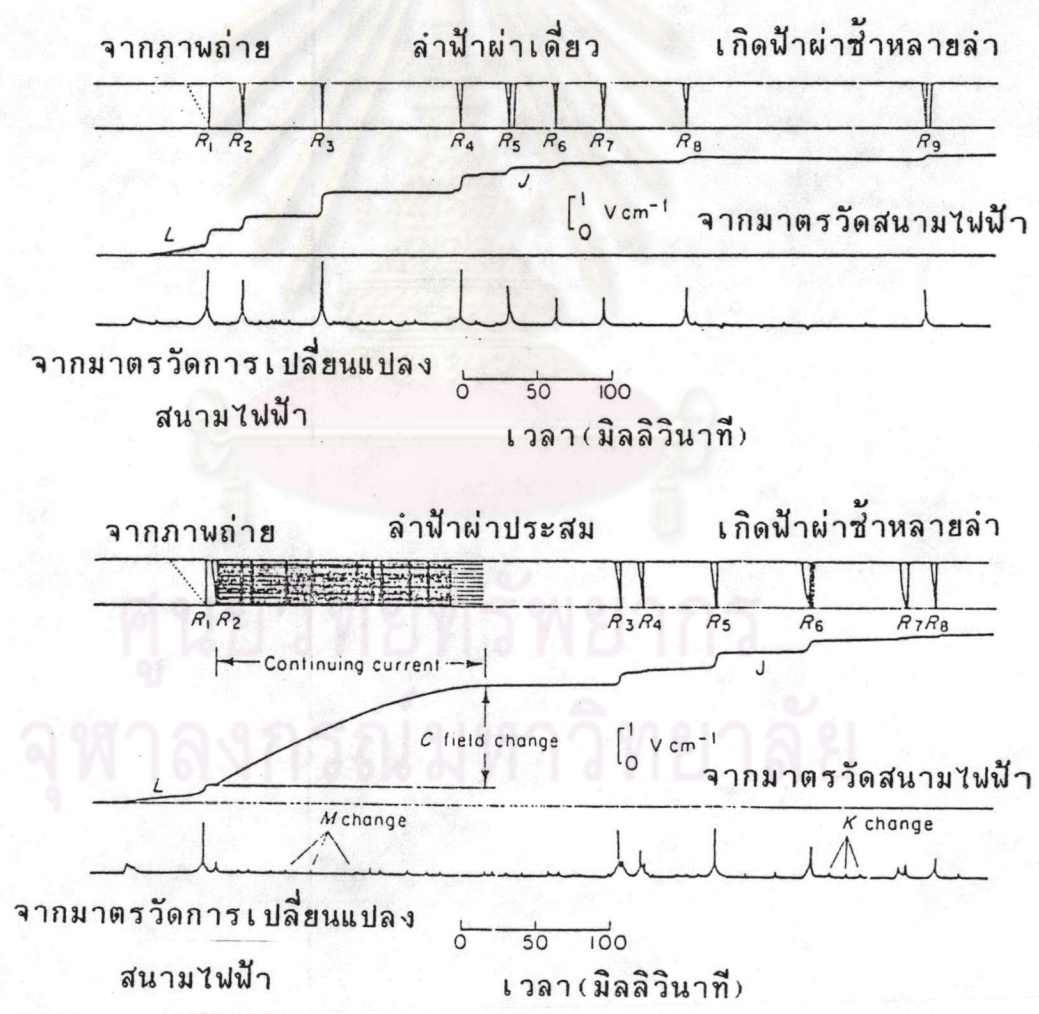


รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการดีสชาร์จของประจุในก้อนเมฆ ทำให้เกิดฟ้าผ่าซ้ำ [20]



กิตาจาวาและคณะ ได้ศึกษาฟ้าผ่าพื้นโลก โดยใช้ภาพถ่ายเปรียบเทียบกับสนามไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1962[3] ได้แบ่งลักษณะของฟ้าผ่าพื้นโลกออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) ล่าฟ้าผ่าเดี่ยว เกิดจากกลุ่มประจุเดี่ยวๆ สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงน้อย เกิดแสงวาบทันทีทันใด
- 2) ล่าฟ้าผ่าประสม เกิดจากกลุ่มประจุ หลายกลุ่มพร้อมกัน สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เกิดแสงวาบให้เห็นยาวนานกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นฟ้าผ่าพื้นโลกชนิดผ่าเดี่ยวและผ่าประสม เปรียบเทียบภาพถ่ายฟ้าผ่ากับการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 ฟ้าผ่าพื้นโลกช่วงที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดและมีค่าสูง คือช่วงล่าฟ้าผ่าย้อนกลับ[3]



ผลการวัดจากมาตรวัดสนามไฟฟ้าคือ การวัดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด ทำได้โดยการออกแบบวงจรหนึ่งแรงดันของวงจรสายอากาศให้มีค่าสูง (กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.1) ค่าแรงดันที่ได้จากการวัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ ซึ่งสัมพันธ์กับวงจรหนึ่งส่วนผลการวัดจากมาตรวัดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าคือ การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้า ค่าแรงดันที่ได้จากวงจรวัดจะเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการออกแบบวงจรหนึ่งแรงดันของวงจรสายอากาศให้มีค่าต่ำ การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าจากมาตรวัดและภาพถ่ายการเกิดฟ้าผ่าดังแสดงในรูปที่ 2.7 เกิดที่เวลาเดียวกัน ทำให้สามารถเปรียบเทียบการเกิดฟ้าผ่ากับการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าได้ ซึ่งมีส่วนประกอบการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าคือ

- 1) การเปลี่ยนแปลงแอล : เกิดเนื่องจาก หัวนำร่องก้าวกระโดด สังเกตเห็นได้ชัดเจนจากมาตรวัดสนามไฟฟ้า แต่มีขนาดไม่มาก
- 2) การเปลี่ยนแปลงอาร์ : เกิดเนื่องจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับ
- 3) การเปลี่ยนแปลงเอ็ม : เป็นพัลส์เล็กๆสั้นๆ มีเฉพาะในฟ้าผ่าประสม เกิดเนื่องจากประจุหลายกลุ่มในก้อนเมฆ
- 4) การเปลี่ยนแปลงเค : เป็นพัลส์เล็กๆสั้นๆเกิดขึ้นระหว่างลำฟ้าผ่า เนื่องจากกลุ่มประจุในอากาศ หรือก้อนเมฆรอบลำฟ้าผ่าคืนสภาพฉนวน
- 5) การเปลี่ยนแปลงเจ : คือการเปลี่ยนแปลงเค ซึ่งสังเกตเห็นได้จากมาตรวัดสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากเป็นช่วงก่อนเกิด สตรีมเมอร์ ทำให้เกิดฟ้าผ่าซ้ำ ไม่มีกระแสลำฟ้าผ่า มีแต่เฉพาะกระแสช่วงคืนสภาพฉนวนคือการเปลี่ยนแปลงเค นั้นเอง
- 6) การเปลี่ยนแปลงซี : สังเกตเห็นได้จากมาตรวัดสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกัน มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเนื่องจากฟ้าผ่าประสมจากกลุ่มประจุหลายกลุ่ม

ที่น่าสังเกตคือ เครื่องนับฟ้าผ่าทั่วไป ออกแบบสร้างให้เริ่มทำงานในช่วงการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือส่วนลำฟ้าผ่าย้อนกลับ พลังงานสนามไฟฟ้าอยู่ในช่วงความถี่ 3 ถึง 30 กิโลเฮิรตซ์ [3]



เครื่องนับฟ้าผ่าสู่ดินแบบซีเกอร์ 500 เฮิร์ตซ์ ตามแนวความคิดของ  
ปีแอร์ส กำหนดให้ทำงานในย่านความถี่ 125-2000 เฮิร์ตซ์ ด้วยเหตุผล คือ

1) ฟ้าผ่าสู่ดิน มีความเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในช่วง ความถี่ 3  
ถึง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังกล่าว จึงออกแบบเครื่องนับฟ้าผ่าสู่ดิน ให้ทำงานใน  
ย่านความถี่ที่ต่ำ แต่ให้สูงกว่าความถี่ไฟสลับที่ใช้งานในปัจจุบัน เพื่อป้องกันการ  
รบกวนจากไฟสลับ

2) ความถี่ทำงานในย่าน 125-2000 เฮิร์ตซ์ เป็นความเปลี่ยนแปลง  
แปลงสนามไฟฟ้าสถิตย์มีขนาดเปลี่ยนแปลงผกผันกับระยะห่างกำลังสาม ทำให้  
การกำหนดรัศมีทำงานของเครื่องนับ มีการนับที่ถูกต้องตามจริงมากกว่าให้  
เครื่องนับทำงานในย่านความถี่สนามไฟฟ้าแพร่กระจาย ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง  
สนามไฟฟ้าตามระยะห่างกำลังหนึ่ง

2.1.2 ฟ้าผ่าก้อนเมฆ การศึกษาเรื่องฟ้าผ่าส่วนใหญ่แล้วศึกษาเรื่อง  
ฟ้าผ่าพื้นโลกมากกว่าฟ้าผ่าก้อนเมฆ เนื่องจากฟ้าผ่าพื้นโลกสามารถทำอันตราย  
และสร้างความเสียหายแก่สิ่งมีชีวิตและทรัพย์สินบนพื้นโลกอย่างมาก การศึกษา  
ฟ้าผ่าด้วยวิธีถ่ายภาพ รวมถึงการวัดสนามไฟฟ้าภายในก้อนเมฆทำได้ยาก ที่ทำ  
ได้คือพยายามวัดสนามไฟฟ้าบนภาคพื้นดินเพื่อคาดคะเนการกระจายประจุไฟฟ้า  
ในก้อนเมฆเท่านั้น ซึ่งพอสรุปได้ว่าประจุไฟฟ้าบวกและลบในก้อนเมฆ มีจำนวน  
ไม่เท่ากันเสมอไป และไม่ได้อยู่ในแนวตั้งตรง ฟ้าผ่าก้อนเมฆสามารถจำแนก  
ออกได้เป็นฟ้าผ่าในก้อนเมฆ, ฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆและฟ้าผ่าอากาศ ทั้งหมดมีลักษณะ  
การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าคล้ายกัน[3]

ลักษณะการเกิดฟ้าผ่าก้อนเมฆจะแตกต่างจากฟ้าผ่าพื้นโลกเนื่องจาก  
ส่วนนำไม่ได้เป็นช่วงกาว แต่จะเป็นสตรีมเมอร์และ ไม่มีช่วงลำฟ้าผ่าย้อนกลับ  
แต่จะเป็นช่วง รัศมีของประจุในก้อนเมฆเรียก การเปลี่ยนแปลงเค แต่การ  
เปลี่ยนแปลงเค สามารถกระตุ้นเครื่องนับฟ้าผ่าทำงานได้เช่นเดียวกัน

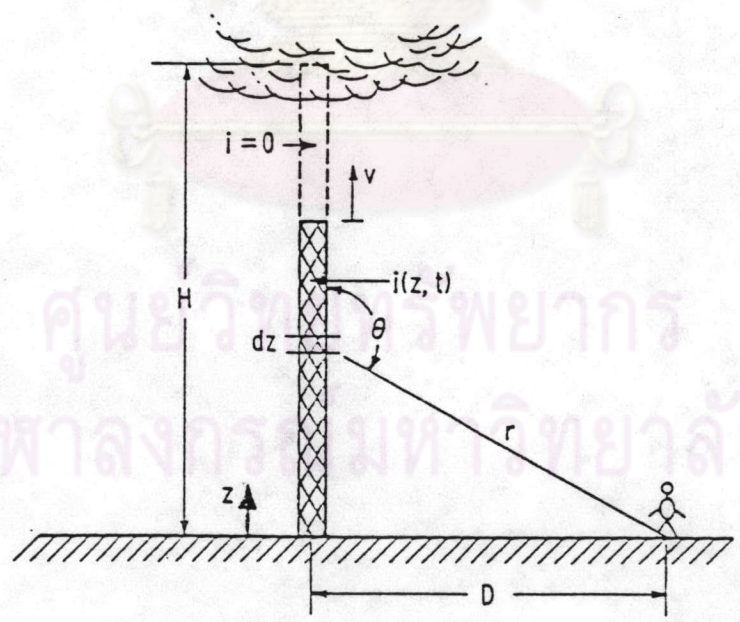
## 2.2 การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงเค

สนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ หมายถึง ความเครียดซึ่งเกิดแรงกระทำกับ  
ประจุทดสอบที่อยู่ในบริเวณนั้น และรวมถึงความเครียดซึ่งเกิดจากประจุไฟฟ้ามี  
การเคลื่อนที่เป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและมีสนามไฟฟ้ากระจายออกมา ถ้า  
ประจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปในรูปของลำฟ้าผ่า สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว  
ขนาดความเปลี่ยนแปลงจะแปรตามเวลาและระยะห่าง ดังสมการที่ 2.1[21]



$$\begin{aligned}
 E(D, t) = & \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \left[ \int_0^H \int_0^t \frac{(2 - 3 \sin^2 \theta)}{r^3} \cdot i\left(z, \tau - \frac{r}{c}\right) d\tau dz \right. \\
 & + \int_0^H \frac{(2 - 3 \sin^2 \theta)}{cr^2} i\left(z, t - \frac{r}{c}\right) dz \\
 & \left. - \int_0^H \frac{\sin^2 \theta}{c^2 r} \frac{\partial i\left[z, t - \frac{r}{c}\right]}{\partial t} dz \right] \dots\dots\dots (2.1)
 \end{aligned}$$

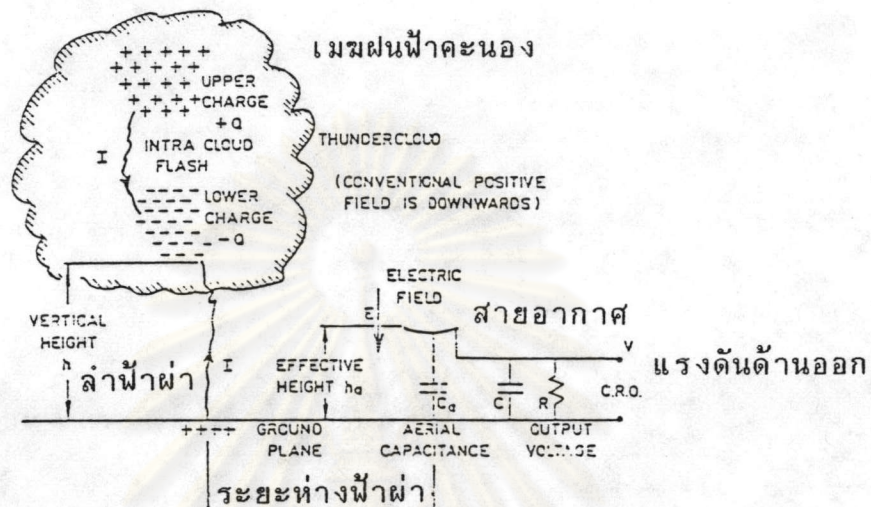
- ประกอบด้วย
- เทอมที่ 1 สนามไฟฟ้าสถิตย์
  - เทอมที่ 2 สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
  - เทอมที่ 3 สนามไฟฟ้าแพร่กระจาย



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบทางเรขาคณิตใช้คำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าของลำฟ้าผ่านย้อนกลับ [21]

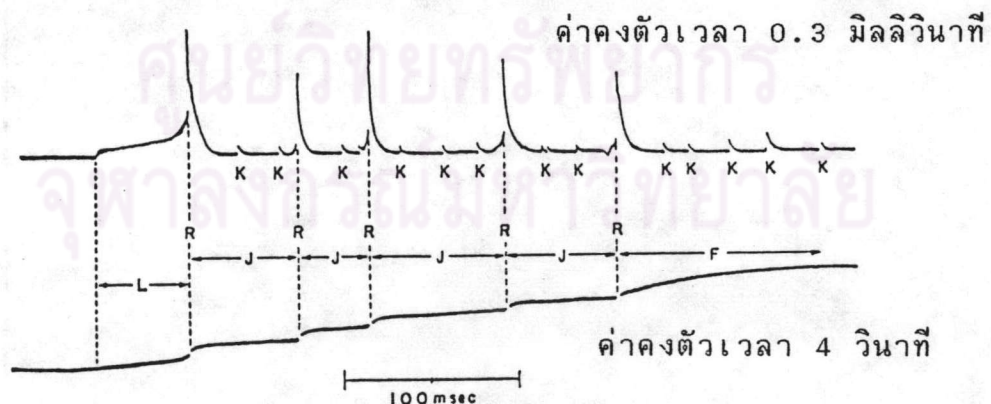


2.2.1 การใช้สายอากาศวัดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า แรงดันจาก  
 วงจรสายอากาศขึ้นกับคุณสมบัติของ สายอากาศ และเวลาตอบสนองสัญญาณฟ้า  
 ผ่าของวงจรหน่วงแรงดัน (RC)



รูปที่ 2.9 แสดงการวัดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่า [22]

โดย C ทำหน้าที่แบ่งแรงดัน ซึ่งรวมค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ และตัว  
 กับดักแรงดันเกิน ใช้กำหนดค่าแรงดันตอบสนอง R ทำหน้าที่หน่วงแรงดันตอบ  
 สอนองสัญญาณการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า ผลการวัดสนามไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่า  
 ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลการวัดสนามไฟฟ้าของฟ้าผ่าสู่ดินใช้วงจรสายอากาศ  
 มีค่าคงตัวเวลา 0.3 มิลลิวินาที และ 4 วินาที ตามลำดับ [23]



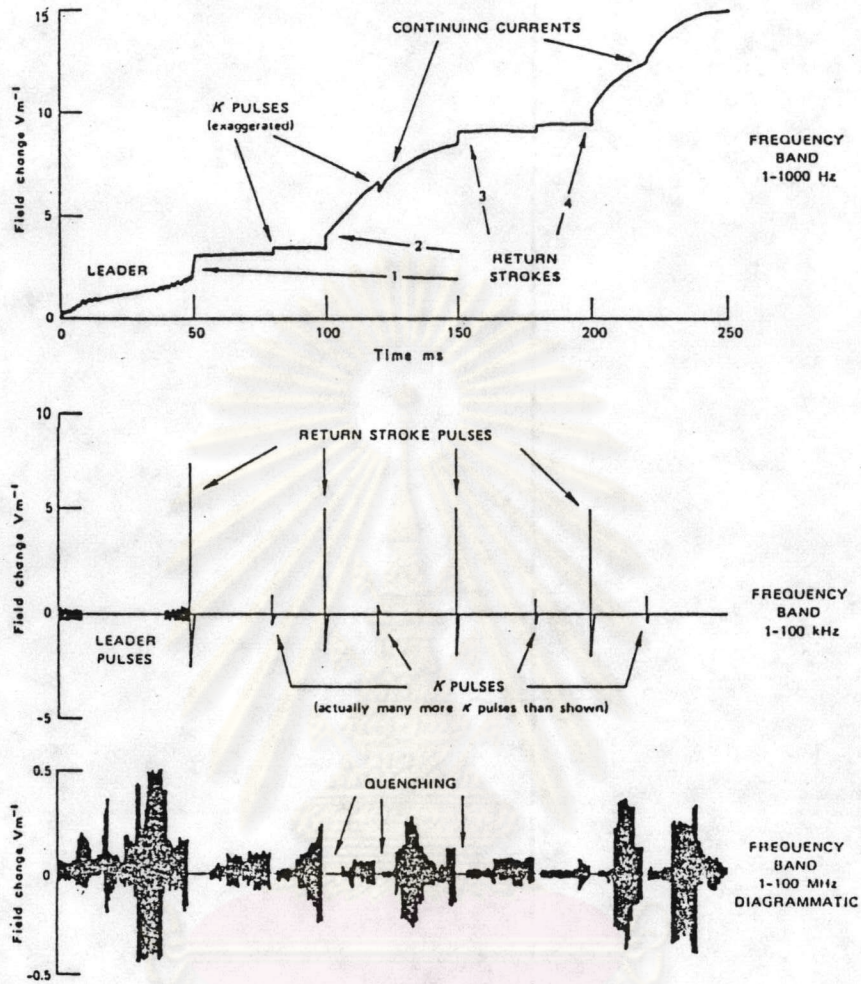
## 2.2.2 การเปลี่ยนแปลงเค ในฟ้าผ่าก้อนเมฆ ปี ค.ศ.1955-56

กิตาจาวาและโกบายาซี ทดลองวัดสนามไฟฟ้าพบการเปลี่ยนแปลงเค ในฟ้าผ่าพื้นโลก และปี ค.ศ.1958 พบในฟ้าผ่าก้อนเมฆด้วย เมื่อวิเคราะห์ความถี่พบว่ามีส่วนประกอบความถี่การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า ใกล้เคียงกับลำฟ้าผ่าสู่ดิน ซึ่งใช้กระตุ้นการทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่า และในปี ค.ศ.1960 กิตาจาวาและบรูค[23] ได้วัดขนาดความเปลี่ยนแปลงเค ทั้งในฟ้าผ่าสู่ดินและฟ้าผ่าก้อนเมฆ พบว่ามีขนาดน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดจกลำฟ้าผ่าย้อนกลับเฉลี่ยประมาณ 10 เท่า ดังนั้นฟ้าผ่าก้อนเมฆซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเค มากๆ และเกิดขึ้นใกล้บริเวณที่ติดตั้งเครื่องนับฟ้าผ่า การเปลี่ยนแปลงเค จะกระตุ้นให้เครื่องนับทำงานอย่างหลีกเลียงไม่ได้ การออกแบบเครื่องนับฟ้าผ่าให้นับฟ้าผ่าพื้นโลกเพียงอย่างเดียวจึงเป็นการยากมาก เพราะจะมีฟ้าผ่าในก้อนเมฆไปกระตุ้นเครื่องนับให้ทำงานด้วยอย่างแน่นอน เพื่อให้ได้ข้อมูลฟ้าผ่าพื้นโลกจากเครื่องนับฟ้าผ่าที่ถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงคือ ให้มีฟ้าผ่าก้อนเมฆปนเข้ามาน้อยที่สุดนั้น ต้องอาศัยความสามารถในการแยกแยะฟ้าผ่าก้อนเมฆ และรัศมีทำงานยังผลฟ้าผ่าสู่ดินของเครื่องนับฟ้าผ่าเป็นสำคัญ

จากสมการ(2.1) แทนการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่าสู่ดินในช่วงลำฟ้าผ่าย้อนกลับ ส่วนในรูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของฟ้าผ่าสู่ดินที่ระยะห่างประมาณ 50 กิโลเมตร มีการเปลี่ยนแปลงเค เกิดในระหว่างการเปลี่ยนแปลงอาร์ การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่าในก้อนเมฆ จะคล้ายกับในรูปที่ 2.11 เพียงแต่ไม่มีผลของช่วงลำฟ้าผ่าย้อนกลับจึงมีเฉพาะช่วงการเปลี่ยนแปลงเค แบ่งการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ได้เป็น

1) 1-1000 เฮิรตซ์ มีส่วนประกอบเป็นสนามไฟฟ้าสถิตย์ขนาดความเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะห่างกำลังสาม ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเกิดจกลำฟ้าผ่าย้อนกลับและการเปลี่ยนแปลงเค





รูปที่ 2.11 แสดงขนาดความเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของฟ้าผ่าสู่ดิน ที่ระยะห่างประมาณ 50 กิโลเมตร[3]

- 2) 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าแพร่กระจาย เห็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากฟ้าผ่าย้อนกลับ และการเปลี่ยนแปลงเค อย่างชัดเจน พลังงานส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 3-30 กิโลเฮิร์ตซ์
- 3) 1-100 เมกะเฮิร์ตซ์ สัญญาณที่วัดได้เป็นพัลส์เล็กๆ ติดต่อกัน หายไปในช่วงฟ้าผ่าย้อนกลับและการเปลี่ยนแปลงเค แต่จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากก่อนเกิดฟ้าผ่าย้อนกลับและการเปลี่ยนแปลงเค

2.2.3 เปรียบเทียบฟ้าผ่าพื้นโลกและฟ้าผ่าก้อนเมฆ ยูแมนทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างฟ้าผ่าสู่ดิน และฟ้าผ่าก้อนเมฆ ซึ่งแมนแลน ได้ทดลองไว้ในปี ค.ศ.1958,1963[24] ดังแสดงในรูปที่ 2.12



แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอาร์ ช่วงลำฟ้าผ่าย้อนกลับมีผลตอบสนองลดลง เมื่อวงจรหนึ่งแรงดันของวงจรสายอากาศถูกปรับให้ตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้น เมื่อทำการวัดขนาดความเปลี่ยนแปลงอาร์ เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเค ของฟ้าผ่าในก้อนเมฆ พบว่าที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ มีความแตกต่างประมาณ 40 เท่า เมื่อปรับให้วงจรหนึ่งตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้นอีก ขนาดความแตกต่างจะลดลงจนเท่ากันที่ความถี่ประมาณ 100 กิโลเฮิรตซ์ และการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของฟ้าผ่าพื้นโลกและฟ้าผ่าในก้อนเมฆ จะคล้ายกันที่ความถี่สูงกว่า 1 เมกะเฮิรตซ์ สรุปได้ว่าการกำหนดให้เครื่องนับฟ้าผ่ามีผลตอบสนองการทำงานในช่วงความถี่ 3 ถึง 30 กิโลเฮิรตซ์ ทำให้สามารถแยกแยะฟ้าผ่าก้อนเมฆได้ดีที่สุด



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างประมาณ 20 กิโลเมตร เปรียบเทียบความถี่ตอบสนองของวงจรสายอากาศ โดยไม่ได้กำหนดมาตราส่วนไว้[24]

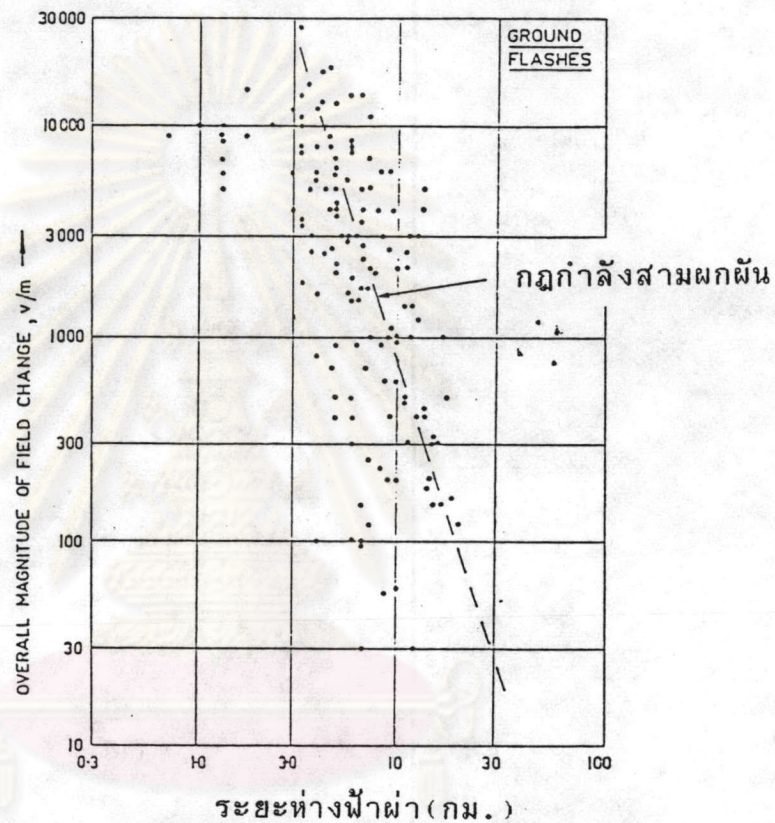
#### 2.2.4 การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเทียบกับระยะห่าง

จากการสังเกตของ แมคเคอร์ส[22] ในปี ค.ศ.1968 พบการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของฟ้าผ่าสู่ดินเทียบกับระยะห่างช่วง 3 ถึง 20 กิโลเมตร เขียนบน



สเกลได้เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะห่างกำลังสาม ยกเว้นในระยะต่ำกว่า 3 กิโลเมตร การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของฟ้าผ่าก้อนเมฆคล้ายกับฟ้าผ่าสู่ดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ส่วนการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเทียบกับระยะไกลกว่า 20 กิโลเมตร มีลักษณะแตกต่างจากกฎกำลังสาม ผกผัน

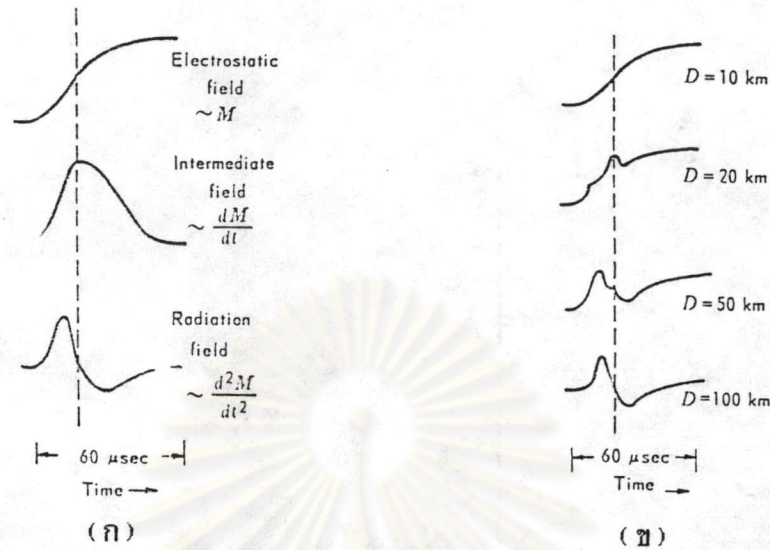
#### การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของฟ้าผ่าสู่ดิน ที่ระยะห่าง 3-20 กิโลเมตร [22]

เมื่อพิจารณาส่วนประกอบของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของ ล่าฟ้าผ่า ย้อนกลับเทียบกับระยะห่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ที่ระยะห่าง 10 กิโลเมตร สนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าสถิตย์ และระยะห่างมากกว่า 100 กิโลเมตร สนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าแพร่กระจาย [24] นำการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเทียบกับระยะห่างมาพิจารณาร่วมกับการเปลี่ยนแปลงเค ในฟ้าผ่าก้อนเมฆ เราจะเห็นได้ว่าการกำหนดให้เครื่องนับฟ้าผ่าทำงานในย่านความถี่ต่ำกว่า 50 กิโลเฮิรตซ์ มีรัศมีทำงานน้อยกว่า 50 กิโลเมตร จะทำให้เครื่องนับฟ้าผ่าทำงานได้ดีที่สุด





รูปที่ 2.14 (ก) องค์ประกอบการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเนื่องจาก  
 ล่าฟ้าผ่าย้อนกลับ (ข) การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่วัดได้  
 ตามสมการ 2.1 ที่ระยะห่างต่างๆกัน [24]

หลักการพื้นฐานสำหรับเครื่องนับฟ้าผ่าซีเกอร์ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ อาศัย  
 ขนาดความเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าความไวการทำงานของเครื่อง  
 นับฟ้าผ่าคือ 20 โวลต์/เมตร มีรัศมีทำงานไกลสุดไม่เกิน 50 กิโลเมตร มีข้อ  
 ดีคือฟ้าผ่าในระยะ 10 ถึง 50 กิโลเมตร สามารถแยกความเปลี่ยนแปลงเค  
 ออกอย่างชัดเจนโดยวงจรกรองความถี่ดังแสดงการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 2.12  
 และระยะใกล้กว่า 10 กิโลเมตร ส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า  
 สถิตย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเค ลดลงอย่างรวดเร็ว ตามการเปลี่ยนแปลงผกผัน  
 กับระยะห่างยกกำลังสาม ฟ้าผ่าก้อนเมฆซึ่งมีพลังงานต่ำจึงถูกกำจัดออกไปโดย  
 การตั้งความไวการทำงานของเครื่องนับให้ต่ำ คือตอบสนองการเปลี่ยนแปลง  
 สนามไฟฟ้าสูงถึง 20 โวลต์/เมตร มากกว่าเครื่องนับแบบซีเกอร์ 500 เฮิร์ตซ์  
 ประมาณ 4 เท่า ฟ้าผ่าก้อนเมฆและสัญญาณรบกวนต่างๆไป จึงสามารถแยกแยะ  
 ออกได้ เครื่องนับฟ้าผ่ามาตรฐานซีเกอร์ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จึงเหมาะสำหรับนับ  
 ฟ้าผ่าในย่านที่มีอัตราส่วนความหนาแน่นฟ้าผ่าก้อนเมฆต่อฟ้าผ่าสู่ดินสูงๆ เช่นใน  
 เขตโซนร้อนและใกล้โซนร้อน เนื่องจากสามารถแยกแยะฟ้าผ่าก้อนเมฆได้ดี  
 และมีรัศมีทำงานยังผลต่ำ ทำการทดสอบคุณลักษณะการใช้งานของเครื่องนับ  
 ฟ้าผ่าได้ง่าย ควรติดตั้งคู่กับเครื่องนับฟ้าผ่าแบบซีเกอร์ 500 เฮิร์ตซ์ เพื่อใช้  
 สำหรับปรับแต่งการทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่าแบบซีเกอร์ 500 เฮิร์ตซ์







เส้นขอบเขตหมายถึง สถานที่ที่มีจำนวนวันได้ยินเสียงฟ้าร้องเฉลี่ยแต่ละปีเท่ากัน บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรมีจำนวน ชั้นเดอร์ สตอร์มเดย์ สูงกว่าบริเวณอื่น ประเทศไทยมีจำนวนเฉลี่ย 60 ถึง 80 วัน และบริเวณภาคใต้สูงถึงประมาณ 100 วัน การได้ยินเสียงฟ้าร้องและเกิดฟ้าผ่าลงดิน เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปี แต่เกิดซ้ำกันในแต่ละสุริยะวัฏจักรคือทุก 11 ปี ข้อมูลฟ้าผ่าจากเครื่องบินฟ้าผ่าสู่ดินหรือเครื่องบินฟ้าผ่ารวม บอกถึงจำนวนฟ้าผ่าจริงในบริเวณซึ่งติดตั้ง เครื่องนับนั้น การนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์เพื่อออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าจึงใกล้เคียงมากกว่าใช้ชั้นเดอร์ สตอร์มเดย์และจากการสังเกตพบว่าจำนวนฟ้าผ่าที่เทียบกับ ชั้นเดอร์ สตอร์มเดย์เป็นตัวเลขไม่แน่นอน[3, 4, 7, 13, 26] ดังแสดงใน ตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.16

2.3.1 สถานที่ ที่ฟ้าชอบผ่า ความหนาแน่นฟ้าผ่าสู่ดินเป็นตัวประกอบ ในการพิจารณาความบ่อยครั้งของการเกิดฟ้าผ่าสามารถสังเกตได้โดยตรงจาก เครื่องนับฟ้าผ่า เมื่อกำหนดให้

$N_g$  = ความหนาแน่นฟ้าผ่าสู่ดิน

$K_g$  = จำนวนฟ้าผ่าสู่ดิน

$R_g$  = รัศมีทำงานยังผลฟ้าผ่าสู่ดิน

$T_d$  = จำนวนชั้นเดอร์ สตอร์มเดย์เฉลี่ยในแต่ละปี

$$N_g = K_g / (T_d \cdot R_g^2) \dots \dots \dots (2.2)$$

หรือประมาณได้จากจำนวนวันของชั้นเดอร์ สตอร์มเดย์[13, 26]

$$N_g = 0.023 (T_d^{1.3}) \dots \dots \dots (2.3)$$

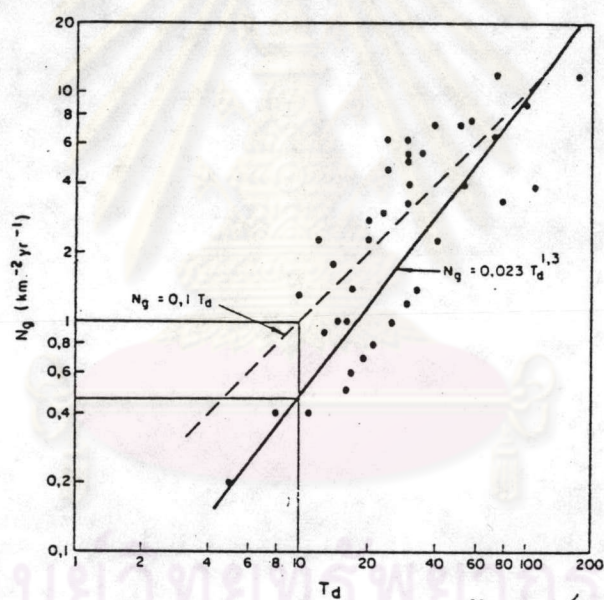
เมื่อทดสอบการคำนวณกับเครื่องบินฟ้าผ่าผลที่ได้ค่อนข้างกระจาย สรุปได้ว่า จำนวนชั้นเดอร์ สตอร์มเดย์ไม่สามารถใช้บอกความหนาแน่นฟ้าผ่าสู่ดินให้ได้ค่าแน่นอนดังแสดงในตารางที่ 2.1 แต่ผลการคำนวณในสมการที่ 2.3 ใกล้เคียงกับข้อมูลฟ้าผ่าอื่นๆ ทั่วโลกดังแสดงในรูปที่ 2.16[26]



ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลความหนาแน่นฟ้าผ่าสู่ดินจากเครื่องนับฟ้าผ่า  
เปรียบเทียบกับค่าความถี่  $T_d$  เดียวกันจากรูปที่ 2.16 [26]

$T_d$	$N_g = 0.023(T_d^{1.3})$	$N_g$ จากเครื่องนับ
60	4.7/Km <sup>2</sup>	1.8 - 12/Km <sup>2</sup>
80	6.9/Km <sup>2</sup>	3 - 17/Km <sup>2</sup>
100	9.2/Km <sup>2</sup>	4 - 20/Km <sup>2</sup>

ความหนาแน่นฟ้าผ่าสู่ดิน



ธันเดอร์ สเตอร์ม เดย์

รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างธันเดอร์ สเตอร์ม เดย์กับสมการ  
ความหนาแน่นฟ้าผ่าสู่ดินสำหรับสถานที่ต่างๆทั่วโลกเทียบกับสมการที่ 2.3 [26]

หรือประมาณจากภูมิประเทศตามเส้นรุ้งดังสมการที่ 2.4 ทราบว่าบริเวณขั้ว  
โลกมีจำนวนฟ้าผ้าน้อยสุดและเพิ่มมากที่สุดบริเวณเส้นศูนย์สูตร สัดส่วนฟ้าผ่าก่อน  
เมฆต่อฟ้าผ่าสู่ดินจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย วิธีนี้เป็นการประมาณอย่างหยาบ [3]

$$N_g = [0.1 + (0.35 \sin \theta)] \cdot [(0.40 \pm 0.20) T_d] \dots (2.4)$$

$\theta$  = ตำแหน่งเส้นรุ้งเป็นองศา



เนื่องจากจำนวนฟ้าผ่ายังขึ้นอยู่กับฤดูกาลต่างๆด้วย แมคเคอร์ส สังเกตเทียบ กับปริมาณน้ำฝนในแต่ละเดือนดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำฝน(mm)และจำนวนการเกิดฟ้าผ่าสู่ดิน  
เฉลี่ยในปี ค.ศ.1958-60 ที่ออสเตรเลีย[3]

Annual variation in the occurrence of lightning and rainfall, Brisbane; visual observations (mean values for all recorded thunderstorms, 1958-68)

	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	March	April	May	June
Thunderdays per month	0.3	0.4	0.6	2.4	4.4	5.1	2.7	3.2	1.7	0.6	0.3	0.2
Thunderstorms per thunderday	1	1	1	1.12	1.05	1.08	1.15	1.1	1.06	1	1	1
Flashes per thunderstorm	5	36	73	250	267	300	233	120	70	47	71	27
Flashes per month	2	15	44	675	1,235	1,645	725	418	126	28	21	5
Rainfall (mm) per month	49	30	45	77	92	136	142	183	147	77	57	56

2.3.2 การเก็บข้อมูลฟ้าผ่าสู่ดินด้วยเครื่องนับฟ้าผ่า จำนวนตัวเลข จากเครื่องนับฟ้าผ่า เรานำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นการเกิดฟ้าผ่าสู่ดินและ สร้างเส้นขอบเขตแสดงความหนาแน่นการเกิดฟ้าผ่าสู่ดิน ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติ เครื่องนับฟ้าผ่าคือ

1) ตัวปรับค่าการนับเนื่องจากฟ้าผ่าก้อนเมฆ วัตถุประสงค์หลักของการใช้เครื่องนับฟ้าผ่าคือ ใช้นับจำนวนการเกิดฟ้าผ่าพื้นโลกต่อพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร(100 หรือ 1,000 ตารางกิโลเมตร) ตามเวลาที่กำหนด จำนวนการนับจะใกล้เคียงกับจำนวนที่เกิดฟ้าผ่าจริง โดยทั่วไปกำหนดความหนาแน่นการเกิดฟ้าผ่าได้จาก

$$Ng = K \cdot Yg / (T \cdot Rg^2) \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้

- K คือจำนวนตัวเลขจากเครื่องนับฟ้าผ่า
- Yg คือตัวปรับค่าการนับ
- Ng คือความหนาแน่นฟ้าผ่าพื้นโลก
- Nc คือความหนาแน่นฟ้าผ่าก้อนเมฆ
- Rg คือรัศมีทำงานยังผลฟ้าผ่าพื้นโลก
- Rc คือรัศมียังทำงานผลฟ้าผ่าก้อนเมฆ
- EF คือจำนวนฟ้าผ่าสู่ดินที่เครื่องนับฟ้าผ่าทำงาน



แต่เนื่องจากมีฟ้าผ่าก้อนเมฆปนเข้ามาประมาณ 5 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศที่ติดตั้งเครื่องนับและคุณสมบัติของเครื่องนับเองจึงต้องใช้ตัวประกอบปรับค่าการนับจากเครื่องนับฟ้าผ่า  $Y_g$  มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ แสดงว่าเครื่องนับฟ้าผ่าไม่สามารถแยกแยะฟ้าผ่าก้อนเมฆออกได้ 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.5 ถึง 2.8

$$K = (\mathcal{T} \cdot R_g^2 \cdot N_g) + (\mathcal{T} \cdot R_c^2 \cdot N_c) \dots \dots \dots (2.6)$$

$$N_g = K / [\mathcal{T} \cdot \{R_g^2 + (N_c/N_g) \cdot R_c^2\}]$$

$$N_g = K / [\mathcal{T} \cdot R_g^2 \cdot \{1 + (N_c/N_g) \cdot (R_c/R_g)^2\}] \dots \dots \dots (2.7)$$

จากสมการที่ 2.5 และ 2.7 จะได้

$$Y_g = 1 / [1 + (N_c/N_g) \cdot (R_c/R_g)^2] \dots \dots \dots (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 ค่า  $Y_g$  สมมุติมีค่าใกล้เคียง 1 มากๆ หมายความว่าฟ้าผ่าก้อนเมฆปนเข้ามาน้อย ลักษณะการเกิดฟ้าผ่าในธรรมชาติใกล้เขตโซนร้อนและเขตโซนร้อนจะมีอัตราส่วน  $N_c/N_g$  สูง [3] ในกรณีเครื่องนับฟ้าผ่าแบบซีเกอร์ 500 เฮิร์ตซ์นั้น  $R_c/R_g$  มีค่าสูงทำให้มีฟ้าผ่าก้อนเมฆปนเข้ามามากกว่า อาจทำให้ไม่สามารถหาค่า  $Y_g$  ได้ [9] ในทางปฏิบัติค่า  $R_c/R_g$  และค่า  $N_c/N_g$  สังเกตและทดสอบหาค่าที่แน่นอนได้ยากมาก เนื่องจากมีการแปรเปลี่ยนค่าไปตามลักษณะของพายุฝนฟ้าคะนอง และรัศมีฟ้าผ่าก้อนเมฆไม่สัมพันธ์กับรัศมีฟ้าผ่าสู่ดิน การหาค่าอัตราส่วนในรัศมีเดียวกันจึงทำได้ยาก จากประสบการณ์และข้อมูลฟ้าผ่าที่ผ่านมา แอนเดอสันและคณะ [9, 12, 13, 26] ได้แนะนำวิธีการต่างๆ ดังนี้ ตัวปรับค่าการนับ ( $Y_g$ ) คืออัตราส่วนของฟ้าผ่าพื้นโลกที่ทำให้เครื่องนับทำงานกับค่าตัวเลขจากเครื่องนับทั้งหมด โดยใช้กล้องถ่ายภาพฟ้าผ่าพื้นโลกเฉพาะที่เครื่องนับทำงานหารด้วยตัวเลขจากเครื่องนับทั้งหมด การถ่ายภาพฟ้าผ่าก้อนเมฆบางครั้งไม่เห็นภาพ เนื่องจากเกิดในก้อนเมฆ

$$Y_g = EF/K \dots \dots \dots (2.9)$$

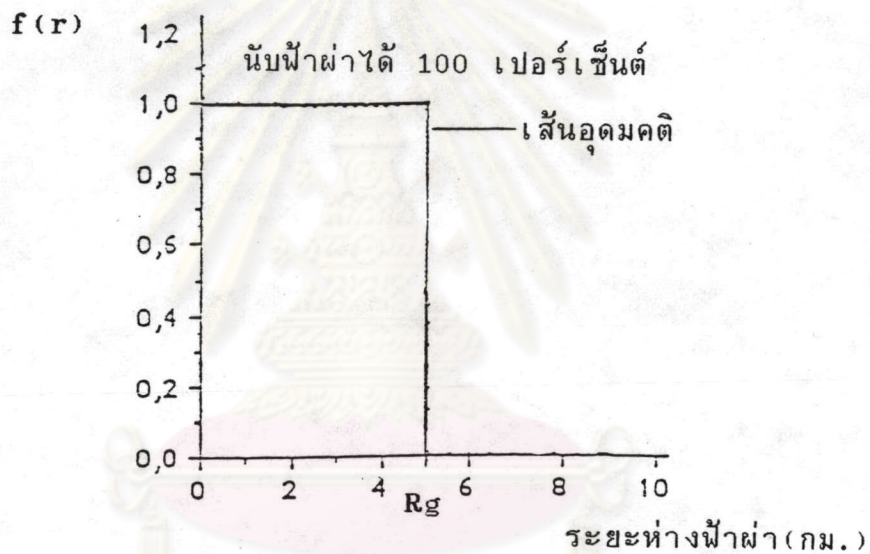
เพื่อความสะดวกในการใช้งานควรกำหนดค่า  $Y_g = 0.95$  ตามคำแนะนำการใช้เครื่องนับฟ้าผ่าของซีเกอร์ ซึ่งกล่าวว่ามีค่าผิดพลาดจากค่าที่กำหนดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์



เราสามารถทดสอบค่า  $Y_g$  โดยวิธีการสังเกตโดยตรงจากเครื่องนับฟ้าผ่า เพื่อเทียบกับมาตรฐานซีเกอร์ ควรทดสอบไปพร้อมกับ การทดสอบหาค่ารัศมีทำงานยังผล ซึ่งสถาบันวิจัยฟ้าผ่าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีโครงการศึกษาวิจัยเรื่องนี้อยู่ ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องทดสอบคุณสมบัติของเครื่องนับเมื่อเริ่มติดตั้งใช้งานเพื่อต้องการทราบว่า มีฟ้าผ่าก่อนเมฆปนเข้ามาด้วยประมาณเท่าใด

2) รัศมีทำงานยังผล ค่าจำกัดความของรัศมีทำงานยังผลฟ้าผ่าสู่ดินของเครื่องนับฟ้าผ่าคือระยะซึ่งเครื่องนับ นับฟ้าผ่าสู่ดินได้เท่ากับจำนวนเกิดฟ้าผ่าจริงโดยใช้เวลาดังเกตุนานพอควร[4]

ความน่าจะทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่า



รูปที่ 2.17 แสดงการทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่าในอุดมคติ  
มีรัศมีทำงานคือ  $R_g$  กิโลเมตร

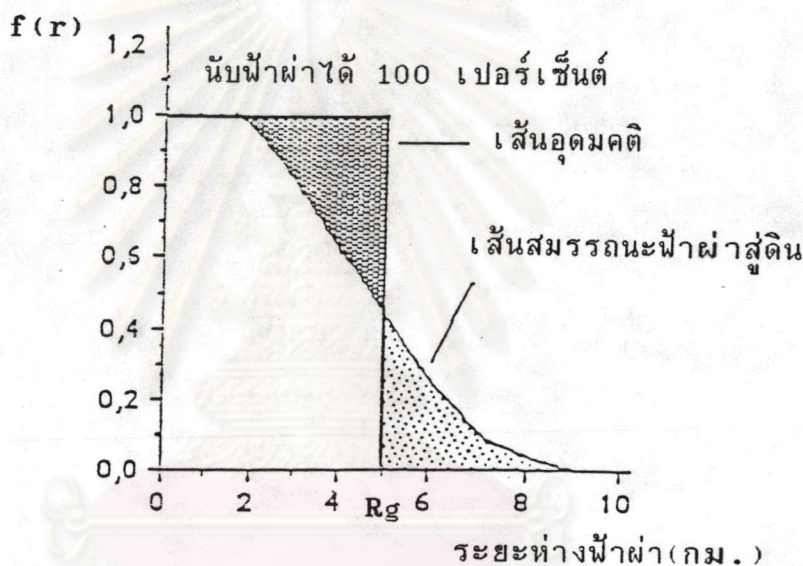
เมื่อนำเครื่องนับไปใช้ในธรรมชาติ พบว่ามีฟ้าผ่าก่อนเมฆปนเข้ามาบางส่วน ดังได้กล่าวมาแล้ว และเรายังทราบว่ากระแสฟ้าผ่าเนื่องจากลำฟ้าผ่าย้อนกลับ แต่ครั้งมีค่ามากน้อยไม่เท่ากันเช่น ในอังกฤษมี โมเมนต์ไฟฟ้า\* ระหว่าง 20

\* โมเมนต์ไฟฟ้าคือ กลุ่มประจุไฟฟ้าบวกและลบในก้อนเมฆ การเปลี่ยนแปลง โมเมนต์ไฟฟ้าหมายถึง การถ่ายเทประจุไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุ หรือทำให้ประจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ไฟฟ้าในก้อนเมฆนั่นเอง[3, pp.198]



ถึง 160 คูลอมป์.กิโลเมตร ส่วนในเม็กซิโกมี โทเมนต์ไฟฟ้าระหว่าง 5 ถึง 40 คูลอมป์.กิโลเมตร ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าต่างกันถึง 8 เท่า การทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่าบางครั้งไม่นับฟ้าผ่าในรัศมี บางครั้งนับฟ้าผ่านอกวงรัศมีกำหนด  $R_g[5]$  ดังนั้นรัศมีที่ทำงานยังผลของเครื่องนับฟ้าผ่าจึงคิดจากความน่าจะเป็นที่ทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่า โดยเก็บสถิติการเกิดฟ้าผ่าพื้นโลก และการทำงานของเครื่องนับดังแสดงในรูปที่ 2.18

ความน่าจะเป็นที่ทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่า



รูปที่ 2.18 แสดงเส้นการทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่าในอุดมคติและเครื่องนับฟ้าผ่าจริง

สมมุติ  $N_g$  มีค่าสม่ำเสมอในพื้นที่ ที่พิจารณา

$$N_g = K_g / (\pi \cdot R_g^2) \dots \dots \dots (2.10)$$

เมื่อกำหนดให้

- $r$  คือระยะห่างเป็นกิโลเมตร
- $f(r)$  คือเส้นโค้งสมรรถนะฟ้าผ่าสู่ดินแปรตามระยะห่าง
- $K_g$  คือฟ้าผ่าพื้นโลกที่เครื่องนับทำงาน เป็นพื้นที่ใต้เส้นโค้งสมรรถนะฟ้าผ่าสู่ดิน



$N_g$  คือความหนาแน่นฟ้าผ่าพื้นโลก  
 $R_g$  คือรัศมียังผลของเครื่องนับ

ในพื้นที่วงแหวนกว้าง  $dr$  จะเกิดฟ้าผ่าพื้นโลก  $dKg = 2\pi r \cdot dr \cdot N_g$   
 เครื่องนับอาจนับฟ้าผ่าพื้นโลกได้เป็น

$$Kg = \int_0^\infty N_g \cdot f(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \dots\dots\dots (2.11)$$

จากสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$R_g = (Kg / \pi N_g)^{1/2}$$

$$= (2 \cdot \int_0^\infty f(r) \cdot r \cdot dr)^{1/2} \dots\dots\dots (2.12)$$

เส้นโค้งสมรรถนะฟ้าผ่าสู่ดิน เป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $f(r)$  และ  $r$  สามารถหาได้จากการสังเกตโดยตรง ทางเดินของจุดคือความน่าจะทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่า ณ.จุดนั้น ใช้คำนวณหารัศมียังผลฟ้าผ่าสู่ดินตามสมการที่ 2.12 ในทางปฏิบัติค่ารัศมีทำงานของเครื่องนับไกลไม่เกิน 60 กิโลเมตร เราจึงเก็บข้อมูลเฉพาะในช่วงนี้ การทดสอบหารัศมีทำงานยังผลฟ้าผ่าก่อนเมฆ  $R_c$  ทำได้ในทำนองเดียวกัน จากประสบการณ์และข้อมูลฟ้าผ่าที่ผ่านมา แอนเดอสันและคณะ [9, 12, 13, 26] ได้แนะนำวิธีการง่ายๆดังนี้ รัศมีทำงานยังผล คือระยะห่างไกลสุดที่เครื่องนับสามารถนับได้ถึง 40 เพอร์เซ็นต์ของจำนวนฟ้าผ่าทั้งหมดที่เกิดขึ้นในบริเวณระยะห่างนั้น ในรูปที่ 2.18 คือจุดซึ่งเส้นอุดมคติตัดกับเส้นโค้งสมรรถนะฟ้าผ่าสู่ดิน มี  $f(r) = 0.4$  นั้นเอง

เครื่องนับฟ้าผ่าซึ่งออกแบบสร้างตามมาตรฐานซีเกอร์ เมื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานจะได้เส้นโค้ง มีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งใน รูปที่ 2.18 สำหรับประเทศไทย การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ไฟฟ้าอาจแตกต่างจากส่วนอื่นๆ การทดสอบเครื่องนับฟ้าผ่าที่สร้างเพื่อเขียนเส้นสมรรถนะการทำงานฟ้าผ่าสู่ดิน และใช้คำนวณหารัศมีทำงานยังผล จึงเป็นวัตถุประสงค์หนึ่งสำหรับการวิจัย

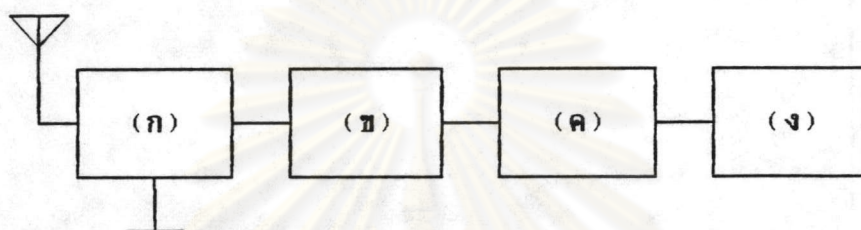
### 2.4 เครื่องนับฟ้าผ่า

เทคนิคในการตรวจจับนับฟ้าผ่า อาศัยการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าสถิตย์, สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าแพร่กระจาย ซึ่งกระจายออกโดยรอบลำฟ้าผ่า และอาจใช้อุปกรณ์ทางแสงและเสียง ตรวจจับฟ้าผ่าได้เช่นเดียวกัน



อย่างไรก็ตาม จำนวนฟ้าผ่าที่นับได้จะแตกต่างกันไปสำหรับเครื่องมือแต่ละชนิด ทำให้ไม่สามารถกำหนดค่าที่แน่นอนถูกต้องได้ ทำให้ยากแก่การเปรียบเทียบผลของการนับกับข้อมูลทางธรรมชาติ[27] ดังนั้นการให้เครื่องนับฟ้าผ่าแบบซีเกอร์ใช้เป็นมาตรฐานในการนับฟ้าผ่าทุกที่ทุกแห่ง จึงได้ถูกกำหนดขึ้น

2.4.1 การทำงานพื้นฐาน การทำงานของเครื่องนับฟ้าผ่าแบบทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.19



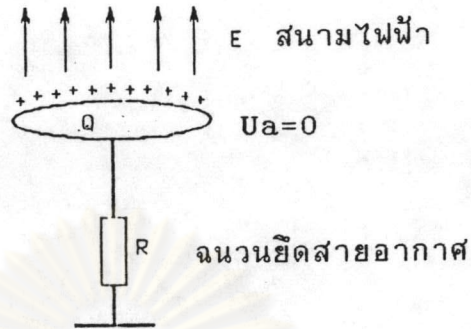
- ก) วงจรกรองผ่านความถี่แถบกว้าง
- ข) วงจรตั้งความไวการทำงาน
- ค) วงจรหน่วงเวลากำหนดอัตราการนับ
- ง) วงจรการนับและตัวนับจำนวน

รูปที่ 2.19 องค์ประกอบวงจรเครื่องนับฟ้าผ่าแยกเป็นส่วนๆ

เมื่อเกิดการปล่อยประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ เกิดกระแสฟ้าผ่าจะทำให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปอย่างทันทีทันใดแผ่กระจายไปโดยรอบลำฟ้าผ่า สามารถรับได้โดยสายอากาศ เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่วงจรกรองผ่านความถี่ซึ่งยอมให้แรงดันความถี่ที่กำหนดตามมาตรฐานผ่านไปได้ เช่น แรงดันความถี่เนื่องจากฟ้าผ่าลงสู่ดินตามมาตรฐานซีเกอร์ 10 กิโลเฮิรตซ์ กำหนดอยู่ในช่วง 2 ถึง 50 กิโลเฮิรตซ์เป็นต้น แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรกรองผ่านความถี่หากมีค่าสูงกว่าแรงดันที่กำหนดโดยวงจรตั้งความไวตอบสนองสัญญาณฟ้าผ่า เครื่องนับก็จะทำงานนับการเกิดฟ้าผ่านั้น และกระตุ้นให้วงจรหน่วงเวลาเริ่มทำงานหยุดการนับประมาณ 1 วินาที เนื่องจากฟ้าผ่าแต่ละครั้งอาจใช้เวลาถึง 1 วินาทีได้

2.4.2 การเกิดศักย์ไฟฟ้าในสายอากาศและการตอบสนองแรงดัน  
 ปีสเลอร์[15] ได้อธิบายศักย์ไฟฟ้าในสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21 สายอากาศทำด้วยโลหะแผ่นกลมจับยึดสูงจากพื้นด้วยฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทาน  $R$  และวางอยู่ในสนามไฟฟ้า  $E$  จะมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวตัวนำสายอากาศ

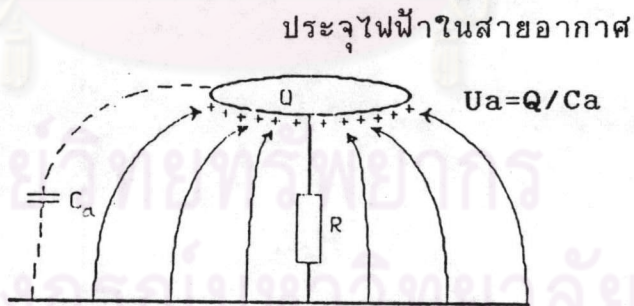




รูปที่ 2.20 แสดงสายอากาศวางในสนามไฟฟ้า[15]

เมื่อสนามไฟฟ้าถูกทำให้หมดไปอย่างรวดเร็วมีประจุไฟฟ้าเหลือค้างอยู่บนสายอากาศ เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า  $U_a$  ขึ้น เขียนในรูปค่าความจุไฟฟ้าของสายอากาศ  $C_a$  ได้เป็น

$$U_a = Q/C_a \dots\dots\dots (2.13)$$



รูปที่ 2.21 แสดงประจุเหลือค้างบนสายอากาศ เกิดศักย์ไฟฟ้า  $U_a$  ขึ้นที่[15]

เมื่อกำหนดให้

$U_a$  คือแรงดันตกคร่อมความต้านทาน  $R$

$h$  คือค่าความสูงประสิทธิผลของสายอากาศ

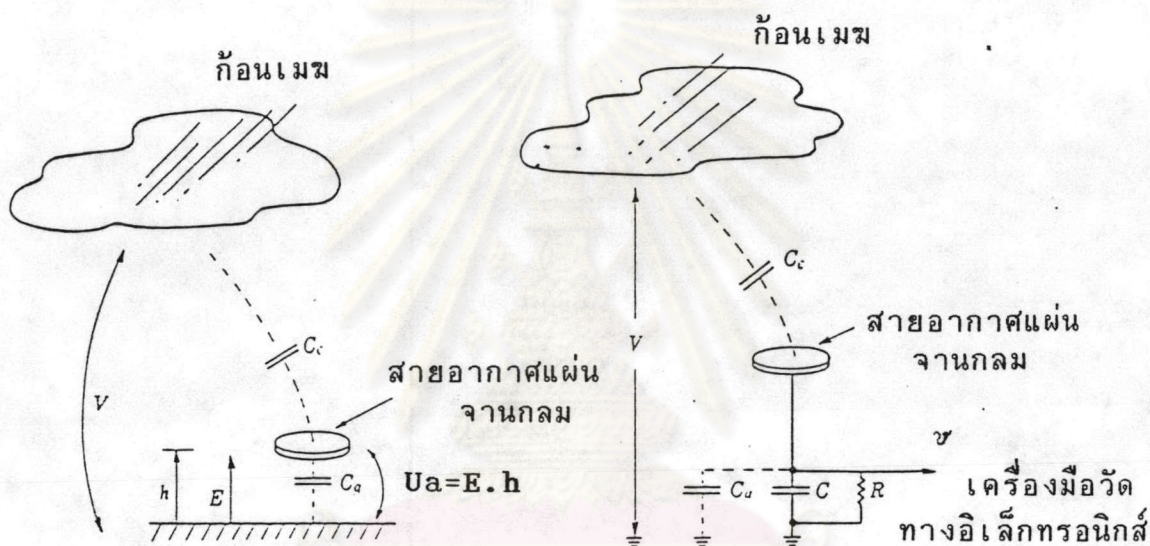


อาจเขียนความสัมพันธ์ในรูปของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า  $E$  ได้เป็น

$$U_a = E \cdot h \dots\dots\dots (2.14)$$

แรงดันตกคร่อมความต้านทานนี้ มีค่าลดลงตามเวลาขึ้นอยู่กับเวลาคงตัว  $R \cdot C_a$  ของวงจรสายอากาศ แบ่งการพิจารณาได้ดังนี้

1) วงจรสมมูลสายอากาศและวงจรหนึ่งวงแรงดัน\*



(ก) แรงดันเหนี่ยวนำในสายอากาศ      (ข) แรงดันต้านออกของวงจรหนึ่งวง

รูปที่ 2.22 แสดงแรงดันเหนี่ยวนำในสายอากาศและวงจรสายอากาศ[24]

เมื่อกำหนดให้

- $V$  คือความต่างศักย์ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก
- $U_a$  คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสายอากาศ
- $C_c$  คือค่าความจุสเตรย์ระหว่างก้อนเมฆกับสายอากาศ
- $C_a$  คือค่าความจุสเตรย์ระหว่างสายอากาศกับพื้นโลก
- $I$  คือแรงดันต้านออก

และความต้านทานสายอากาศมีค่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้

\* อ่านเพิ่มเติมได้จากหนังสือวิศวกรรมสายอากาศเช่น[35]



จากสายอากาศในรูป (ก)

$$U_a = V \cdot C_c / (C_a + C_c) \dots\dots\dots (2.15)$$

จากวงจรสายอากาศในรูป (ข)

$v$  จะมีค่าต่ำกว่า  $U_a$  เนื่องจากวงจร RC ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศจะโหลดสายอากาศ และสมมติค่า  $R$  ที่ใช้มีค่าสูงมากจนเราสามารถคิดเฉพาะ  $C$  ได้  $C$  จะต่อขนานกับ  $C_a$  ดังนั้น

$$v = V \cdot C_c / (C_a + C_c + C) \dots\dots\dots (2.16)$$

จากสมการที่ 2.15 และ 2.16 ทำค่า  $V$  ให้หมดไปจะได้

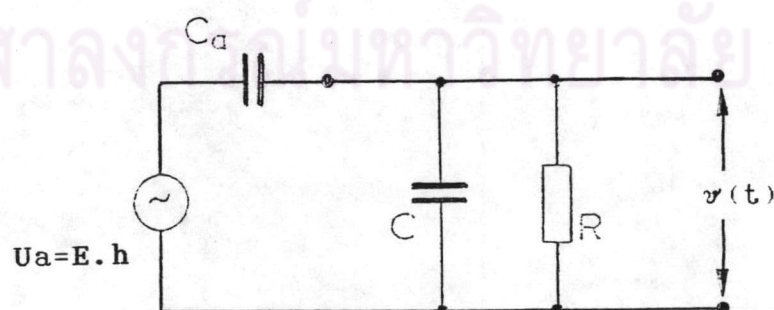
$$v = U_a \cdot (C_c + C_a) / (C_a + C_c + C)$$

$C_a \gg C_c$  ดังนั้นเราประมาณได้ว่า

$$v = U_a \cdot C_a / (C_a + C) \dots\dots\dots (2.17)$$

เขียนสมการอีกรูปหนึ่งได้สมการที่ 2.18 และวงจรสมมูลในรูปที่ 2.23

$$v = E \cdot h \cdot C_a / (C_a + C) \dots\dots\dots (2.18)$$



รูปที่ 2.23 แสดงวงจรสมมูลของสายอากาศ



2) การคำนวณผลตอบสนองแรงดันของวงจรห้วง RC

การคำนวณผลตอบสนองแรงดันของวงจรสมมูลในรูปที่ 2.23 กำหนดให้  $U_a$  เป็นแรงดันรูปคลื่นขั้นบันได ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่า มีดังนี้ จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.23

$$U_a(s) = U_a/s$$

$$Z_a(s) = 1/(C_a+s)$$

$$Z(s) = R/(1+CRs)$$

แรงดันด้านนอก  $v(t) = U_a(t) \cdot Z/(Z_a+Z)$

แทนค่า ให้อยู่ในมิติลาปลาซ

$$v(s) = U_a(s) \cdot Z(s) / [Z_a(s) + Z(s)]$$

$$= [U_a/s] \cdot [R/(1+CRs)] \cdot [1/\{1/Cs + R/(1+CRs)\}]$$

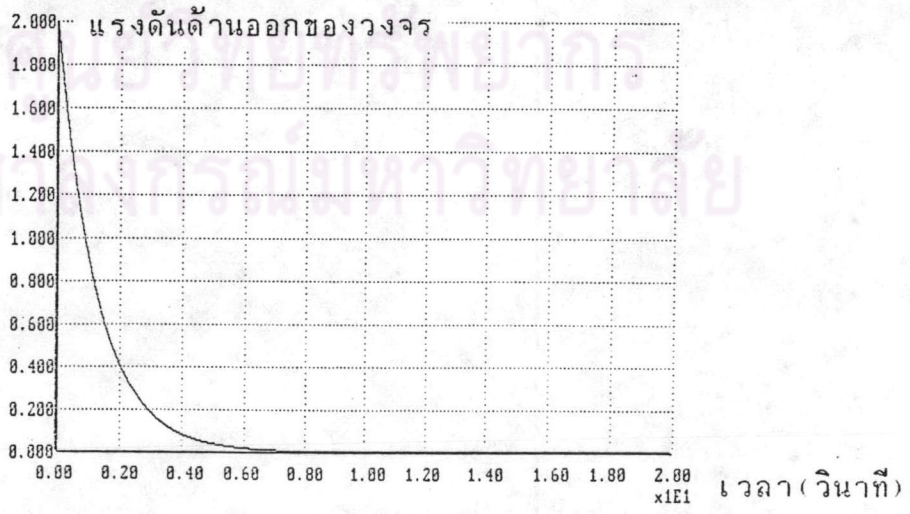
$$= U_a \cdot [C_a/(C_a+C)] \cdot [1/\{s + 1/[R \cdot (C_a+C)]\}]$$

$$= U_a \cdot [C_a/(C_a+C)] \cdot [1/(s+B)]$$

กำหนดให้  $B = 1/[R \cdot (C_a+C)]$  และแปลงกลับให้อยู่ในมิติเวลา

$$v(t) = U_a \cdot [C_a/(C_a+C)] \cdot e^{-Bt} \dots\dots\dots (2.19)$$

ตัวอย่างเช่น สายอากาศมีค่าความจุไฟฟ้า  $C_a=250$  พิโคฟารัด ความสูงประสิทธิภาพ 5 เมตร ความจุไฟฟ้า  $C=1.25$  ไมโครฟารัด และความต้านทาน  $R=1$  เมกะโอห์ม คำนวณผลตอบสนองแรงดันโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า เล็ก 5.0[28] ดังแสดงในรูปที่ 2.24



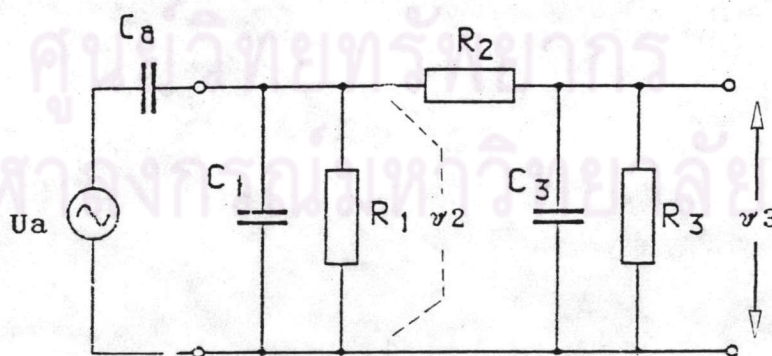
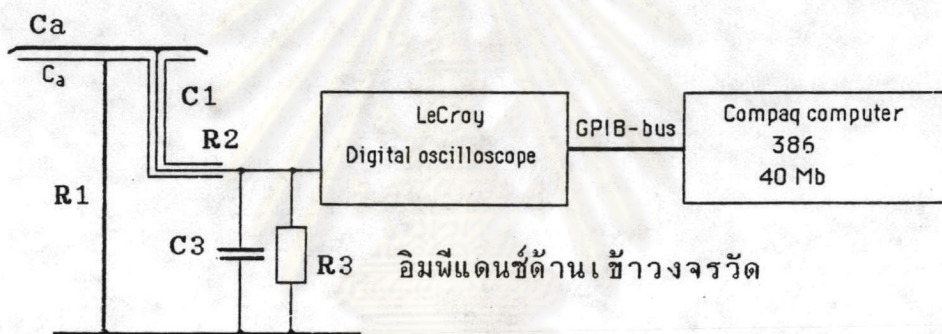
รูปที่ 2.24 แสดงผลตอบสนองแรงดันของวงจรสายอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าแบบขั้นบันได[28]



สรุปได้ว่า เวลาตอบสนองแรงดันต่อการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของวงจรสายอากาศขึ้นอยู่กับค่า  $B = 1/[R \cdot (C_a + C)]$  ค่าความต้านทาน  $R$  ทำหน้าที่หน่วงแรงดัน และขนาดแรงดันด้านออกขึ้นอยู่กับค่า  $U_a$  และอัตราส่วน  $C_a / (C_a + C)$

3) การคำนวณผลตอบสนองความถี่ต่ำและสูง ในทางอุดมคติ ผลตอบสนองความถี่ผ่านสูงของสายอากาศไม่มีขีดจำกัด ผลตอบสนองความถี่ต่ำถูกจำกัดโดยค่าความต้านทานจนวนฮิดสายอากาศ

Measuring setup for radiation pulses from lightnings



รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างการใช้งานสายอากาศวัดค่าความเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและแสดงวงจรสมมูลวงจรวัด



เมื่อกำหนดให้

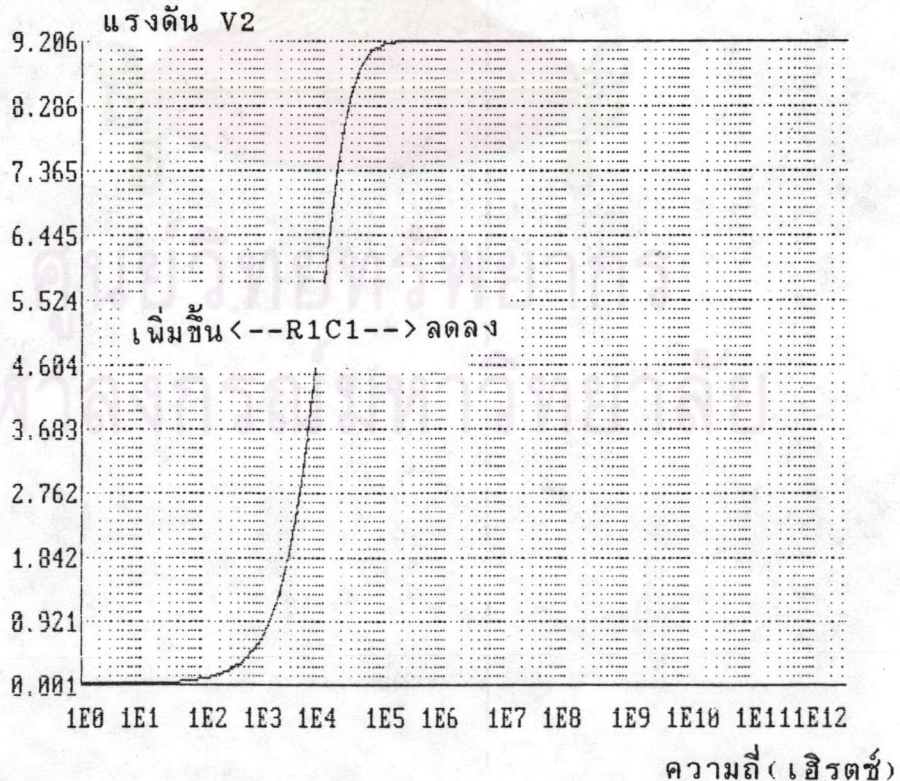
- Ua คือแรงดันเหนี่ยวนำในสายอากาศ
- Ca คือค่าความจุไฟฟ้าสายอากาศ
- C1 คือค่าความจุไฟฟ้ากับดักแรงดันเกิน
- R1 คือค่าความต้านทานจนวนขิตสายอากาศ
- R2 คือค่าความต้านทานสายนำสัญญาณ
- C3 คือค่าความจุไฟฟ้าสายนำสัญญาณและเครื่องวัด
- R3 คือค่าความต้านทานของเครื่องวัด

x2.x3 คือแรงดันด้านออก

พิจารณาวงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 2.25 แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

(1) วงจรผ่านสูง ประกอบด้วย Ca, C1 และ R1 ผลตอบสนองความถี่ต่ำคำนวณโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า เล็ก 5.0[28] ดังแสดงในรูปที่ 2.26

```
LEC>list
R1      2      0      1.960E+05ohm
CA      1      2      5.800E-11farad
C1      2      0      5.000E-12farad
UC      1      0      AC      1.000E+01Volt      Rs=0.000E+00
LEC>plot
#Curves      [1..2] = 1 >
Curve#1 Variable=      V2 >
```

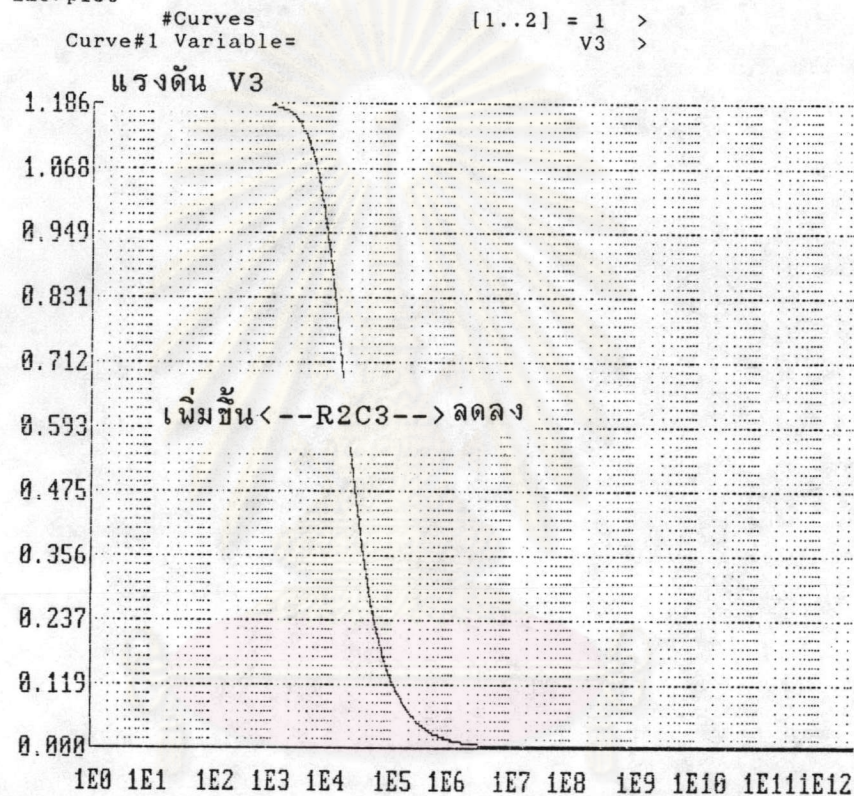


รูปที่ 2.26 ผลตอบสนองความถี่ผ่านสูงของสายอากาศ[28]



(2) วงจรผ่านต่ำ ประกอบด้วย R2, C3 และ R3 ผลตอบ  
สนองความถี่สูง คำนวณโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า เล็ก 5.0[28]  
ดังแสดงในรูปที่ 2.27

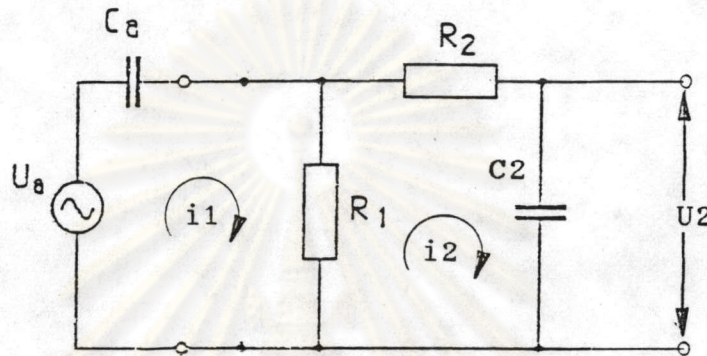
```
LEC>list
R2      2      3      1.300E+05ohm
R3      3      0      1.750E+04ohm
C3      3      0      1.000E-09farad
V2      2      0      AC      1.000E+01Volt  Rs=0.000E+00
LEC>plot
```



รูปที่ 2.27 ผลตอบสนองความถี่ผ่านต่ำของสายนำสัญญาณ[28]



2.4.3 วงจรกรองความถี่ ส่วนมากใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟ ประกอบด้วยตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุไฟฟ้าเนื่องจากออกแบบสร้างได้ง่าย และทำให้ทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง ค่าความจุไฟฟ้าของสายอากาศ  $C_a$  เป็นส่วนหนึ่งของวงจรกรองด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.28 แยกเป็นวงจรผ่านสูงและผ่านต่ำประกอบเป็นวงจรผ่านแถบ[29]



รูปที่ 2.28 แสดงวงจรกรองผ่านแถบพื้นฐานประกอบด้วยวงจรกรองผ่านสูง( $C_a.R_1$ ) และวงจรกรองผ่านต่ำ( $C_2.R_2$ ) [29]

1) คำนวณผลตอบสนองแรงดันแปรตามความถี่ด้านเข้า

$$[(1/j\omega C_a)+R_1].i_1 - R_1.i_2 = U_a \dots\dots\dots(2.20)$$

$$R_1.i_1 - [R_1+R_2+(1/j\omega C_2)].i_2 = 0 \dots\dots\dots(2.21)$$

$$(1/j\omega C_2).i_2 = U_2 \dots\dots\dots(2.22)$$

จากสมการ (2.20), (2.21) และ (2.22)

ได้ค่าแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าเป็นเลขเชิงซ้อนเนื่องจากองค์ประกอบวงจรเป็นค่าความจุไฟฟ้าและตัวต้านทาน มีพารามิเตอร์ด้านออก 2 ตัวคือขนาดแรงดันและมุมต่างเฟส

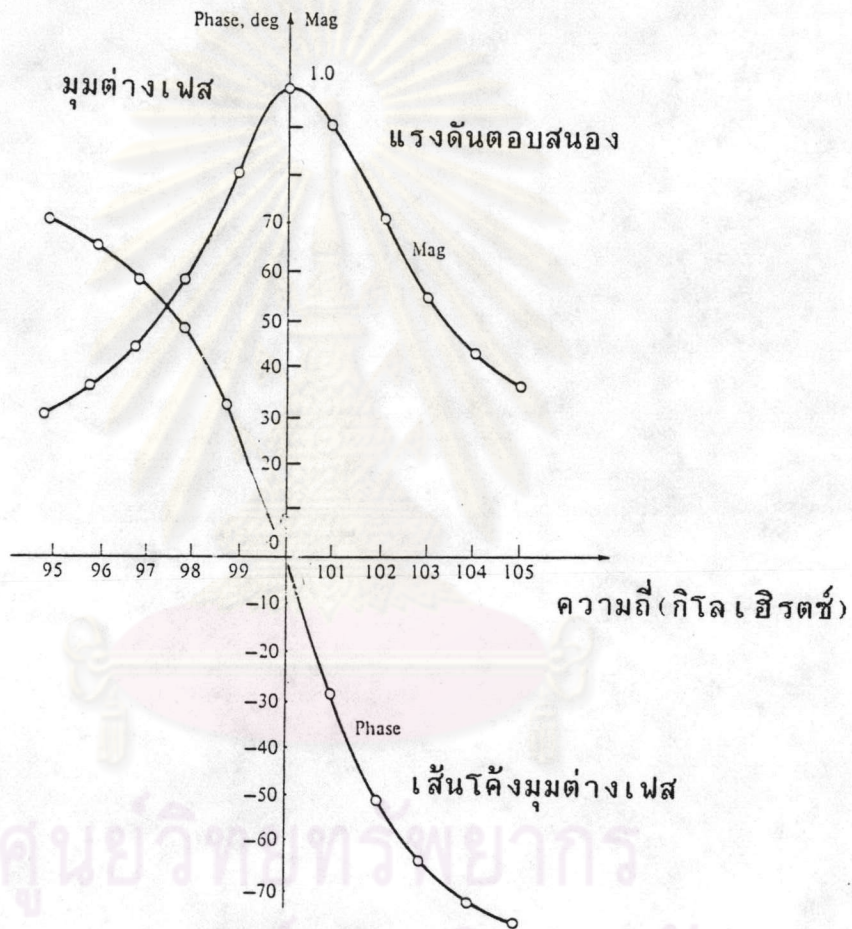
$$\begin{aligned} U_2/U_a &= (1/j\omega C_2) \cdot 1/\{(1/j\omega C_a+R_1) \cdot (1-R_2/R_1+1/j\omega C_2 R_1)-R_1\} \\ &= \omega C_a R_1 / [\omega (C_a R_1 + C_2 R_1 + C_2 R_2) + j(\omega^2 C_a R_1 C_2 R_2 - 1)] \\ &= \omega T_1 / [\omega (T_1 + C_2 R_1 + T_2) + j(\omega^2 T_1 T_2 - 1)] \dots\dots\dots(2.23) \end{aligned}$$



กำหนดให้  $T1 = Ca.R1$

$T2 = C2.R2$

ผลตอบสนองความถี่คลื่นไซน์ของวงจรกรองผ่านแถบมีขนาดมากที่สุดที่ความถี่กลาง และมีมุมต่างเฟสเป็น 0 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงผลตอบสนองแรงดันและมุมต่างเฟสของความถี่คลื่นไซน์ [30]

แรงดันตอบสนองสูงสุดที่ความถี่กลาง ( $\omega_0$ ) มีมุมเฟสเป็นศูนย์ คือทำส่วนที่เป็นเลขเชิงซ้อนให้หมดไป ดังนั้นเกิดความถี่กลางที่  $\omega^2 T1T2 - 1 = 0$  แทนค่า  $\omega$  ด้วย  $\omega_0$

ความถี่กลางคือ  $\omega_0^2 = 1/T1T2$   
 $\omega_0 = [1/(T1T2)]^{1/2}$



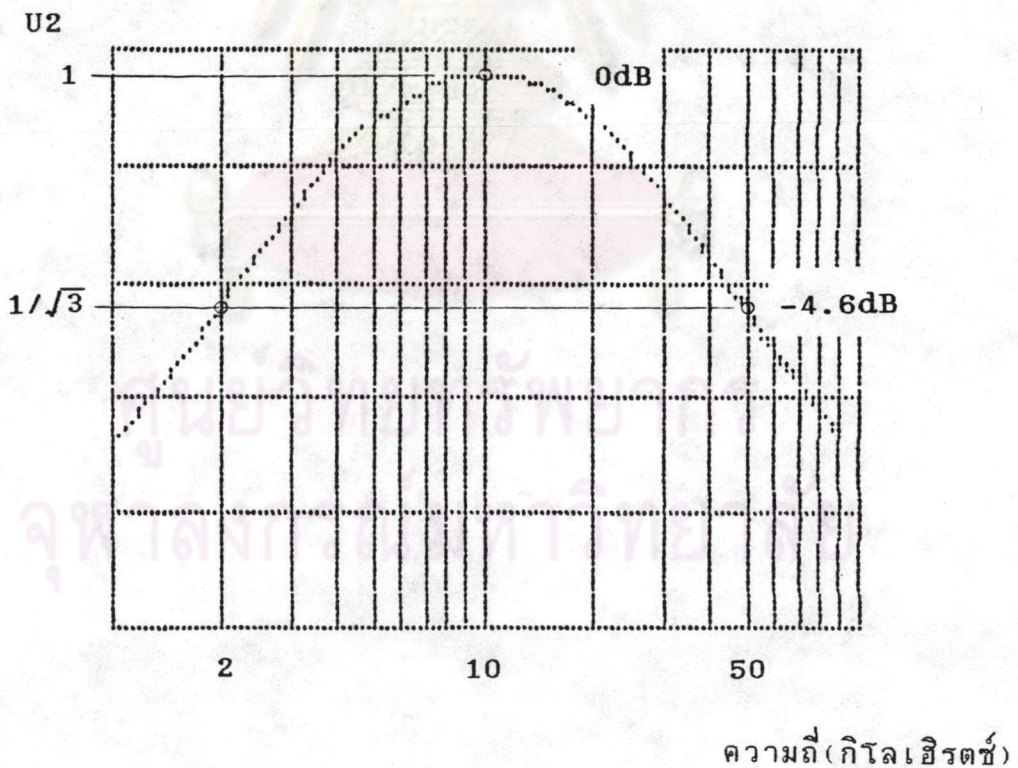
จากสมการที่ 2.23

$$\left| \frac{U_2}{U_a} \right|_{\omega=\omega_0} = 1 / (1 + C_2/C_a + T_2/T_1) = 1/D_o \dots\dots\dots (2.24)$$

$$D_o = (1 + C_2/C_a + T_2/T_1) \dots\dots\dots (2.25)$$

2) คำนวณแบนด์วิดท์ จากข้อกำหนดมาตรฐานที่เกรตติ้งแสดง  
 ในรูปที่ 2.30 ที่ความถี่ตัดสูงและตัดต่ำ จะลดทอนแรงดันลงเป็น -4.6 dB  
 หรือประมาณ  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  เท่าของค่าสูงสุดที่ความถี่กลาง [12, 29] ดังนั้นแรงดันตอบ  
 สอนงที่ความถี่ตัดเรานำไปใช้คำนวณหาแบนด์วิดท์ของวงจรกรองได้

แรงดันตอบสนอง



รูปที่ 2.30 แสดงผลตอบสนองความถี่คลื่นไซน์ของวงจรกรองผ่านแถบ  
 ตามมาตรฐานซีเกร 10 กิโลเฮิรตซ์ [28]



$$\left| \frac{U_2}{U_a} \right| = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot D_o}$$

$\omega = \omega_h = \omega_l$

$$= \left| \frac{\omega T_1}{\omega (T_1 + C_3 R_1 + T_2) + j \left[ \omega^2 T_1 T_2 - 1 \right]} \right|$$

$$= \frac{\omega T_1}{\sqrt{\omega^2 (T_1 + C_3 R_1 + T_2)^2 + \left[ \omega^2 T_1 T_2 - 1 \right]^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\left[ 1 + \frac{C_3}{C_a} + \frac{T_2}{T_1} \right]^2 + \frac{1}{\omega^2 T_1^2} \left[ \omega^2 T_1 T_2 - 1 \right]^2}}$$

แทนค่า

$$T_1 \cdot T_2 = \frac{1}{\omega_o^2}$$

$$Q = \omega_o^2 T_1^2 = \frac{T_1}{T_2}$$

$$X = \frac{\omega}{\omega_o}$$

$$D_o = \left[ 1 + \frac{C_3}{C_a} + \frac{T_2}{T_1} \right] = \left[ 1 + \frac{C_3}{C_a} + \frac{1}{Q} \right]$$



$$\frac{1}{\sqrt{3 \cdot D_o}} = \frac{1}{\sqrt{D_o^2 + \frac{1}{Q^2 X^2} [X^2 - 1]^2}}$$

$$X^2 \pm \sqrt{2 \cdot D_o \cdot Q \cdot X - 1} = 0$$

$$X = \pm \frac{D_o \cdot Q}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{D_o^2 \cdot Q^2}{2} + 1}$$

พจน์ที่ 2 มีค่ามากกว่าพจน์ที่ 1 แน่นนอน  
ดังนั้น

$$X_h = \frac{\omega_h}{\omega_o}, \quad \frac{\omega_h}{\omega_o} = + \frac{D_o \cdot Q}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{D_o^2 \cdot Q^2}{2} + 1}$$

$$X_l = \frac{\omega_l}{\omega_o}, \quad \frac{\omega_l}{\omega_o} = - \frac{D_o \cdot Q}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{D_o^2 \cdot Q^2}{2} + 1}$$



แบนด์วิดท์

$$\omega_h - \omega_l = \sqrt{2 \cdot \omega_o \cdot D_o \cdot Q}$$

$$f_h - f_l = \sqrt{2 \cdot D_o \cdot Q \cdot f_o} \dots\dots\dots(2.27)$$

3) การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบพื้นฐาน

ตัวอย่างการออกแบบตามกำหนดมาตรฐานที่เกอ 10 กิโลเฮิรตซ์

ความถี่กลาง	10 กิโลเฮิรตซ์
ความถี่ตัดสูง	50 กิโลเฮิรตซ์
ความถี่ตัดต่ำ	2 กิโลเฮิรตซ์
ศักดาไฟฟ้าในสายอากาศ	42.43 โวลต์
แรงดันต้านออก	1.438 โวลต์
ค่าความจุไฟฟ้าสายอากาศ	57 พิโคฟารัด

$$C_a = 57 \cdot 10^{-12} \text{ F. } U_a = 42.43 \text{ V. } U_2 = 1.438 \text{ V.}$$

$$f_h = 50 \text{ KHz. } f_l = 2 \text{ KHz. } f_o = 10 \text{ KHz.}$$

$$\omega_o = 2\pi f_o = 10 \text{ RAD.}$$

พิจารณา

$$f_h - f_l = \sqrt{2 \cdot D_o \cdot Q \cdot f_o}$$

$$Q \cdot D_o = \frac{f_h - f_l}{\sqrt{2 \cdot f_o}}$$

$$Q = \frac{3.394}{D_o} \dots\dots\dots(2.28)$$

$$\frac{C_3}{C_a} = D_o - 1 - \frac{T_2}{T_1} = D_o - 1 - \frac{1}{2Q}$$

$$\frac{C_3}{C_a} = \left[ D_o - 1 - \frac{\frac{2}{D_o}}{3.394} \right] \dots\dots\dots(2.29)$$

$D_o$  มีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 10.4 สมการจึงเป็นจริง จากข้อกำหนดมาตรฐานซีเกอร์ มีค่า

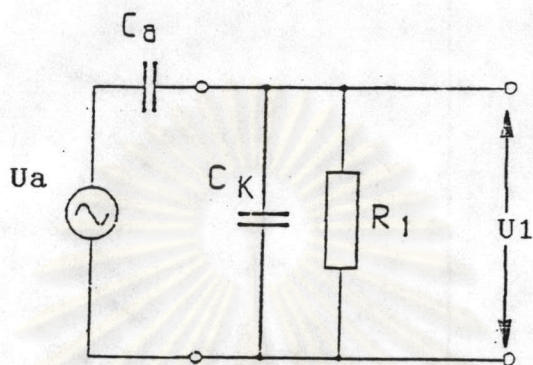
$$\begin{aligned} \frac{U_a}{U_2} &= \frac{42.43}{1.438} \\ &= 29.506 \end{aligned}$$

ศักดาไฟฟ้าในสายอากาศแนวตั้ง ( $U_a$ ) มีค่าสูง จำเป็นต้องเพิ่มตัวเก็บประจุ  $C_k$  เพื่อลดแรงดันต้านเข้าของวงจร ในกรณีนี้สามารถเลือกใช้สายอากาศซึ่งให้ศักดาไฟฟ้าต่ำได้ เช่น สายอากาศแบบแผ่นโลหะกลม เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

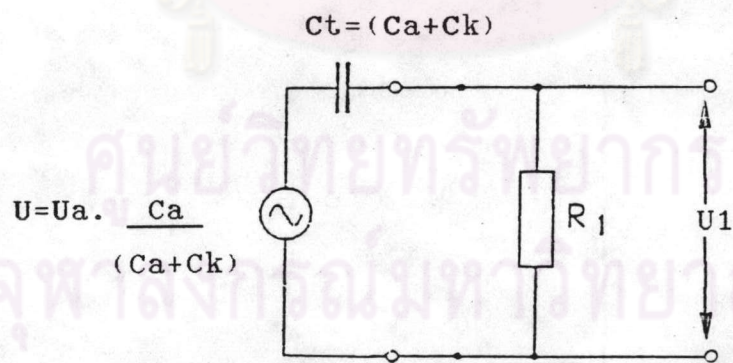


เพื่อแสดงให้เห็นความสำคัญของค่าความจุไฟฟ้า  $C_k$  ต่อวงจรของ  
 พิจารณาแรงดันตกคร่อม  $R_1$



รูปที่ 2.31 แสดงภาพแรงดันตกคร่อม  $R_1$

$C_k$  คือค่าความจุไฟฟ้าลดแรงดันคิดรวมค่าความจุไฟฟ้าสายนำสัญญาณและ  
 ตัวกับดักแรงดันเกิน



รูปที่ 2.32 แสดงวงจรซึ่งให้แรงดันด้านนอกเท่ากับในรูปที่ 2.31

จากรูปที่ 2.31

$$U_1 = U_a \frac{j\omega C_a R_1}{1 + j\omega (C_k R_1 + C_a R_1)} \dots\dots\dots (2.30)$$

จากรูปที่ 2.32

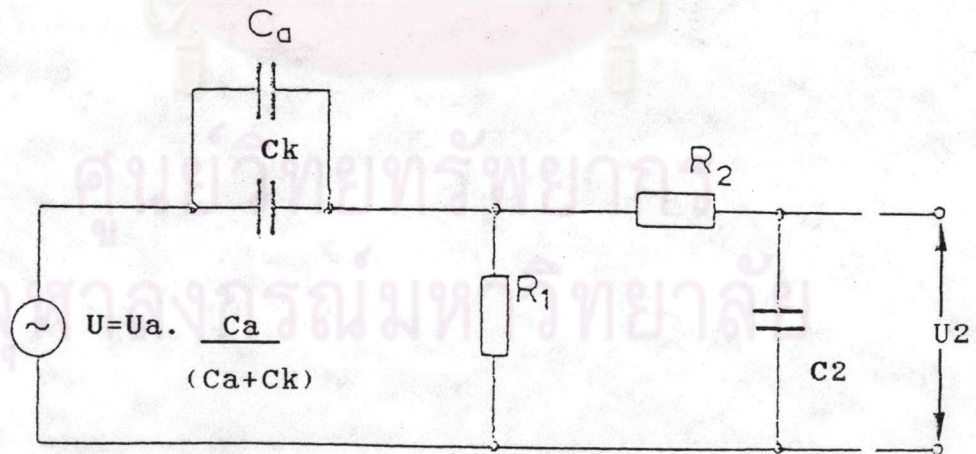
$$\begin{aligned}
 U_1 &= U \frac{j\omega C_t R_1}{1 + j\omega C_t R_1} \\
 &= U \frac{C_a}{C_a} \frac{j\omega C_t R_1}{1 + j\omega C_t R_1} \\
 &= U \frac{C_t}{C_a} \frac{j\omega C_a R_1}{1 + j\omega C_t R_1} \dots\dots\dots(2.31)
 \end{aligned}$$

เมื่อต้องการให้สมการที่ (2.30) = สมการที่ (2.31)

$$U = U_a \frac{C_a}{C_t} \dots\dots\dots(2.32)$$

$$C_t = (C_k + C_a)$$

เขียนวงจรสมมูลเพื่อปรับปรุงแรงดันด้านเข้าได้ดังในรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 แสดงวงจรสมมูลเพื่อปรับปรุงแรงดันด้านเข้าวงจรในรูปที่ 2.28

จะเห็นได้ว่า  $C_k$  มีผลต่อแรงดันด้านเข้าของวงจร และ  $C_k$  เป็นส่วนหนึ่งของวงจรกรองจึงมีผลต่อความถี่กลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.33



จากวงจรสมมูล แรงดันด้านเข้า คือ U

$$\frac{U_2}{U} = \frac{1}{D_o} \dots\dots\dots(2.33)$$

(2.32) X (2.33)

$$\frac{C_a}{C_t} = \frac{U_2}{U_a} D_o$$

$$\frac{C_t}{C_a} D_o = \frac{U_a}{U_2} = 29.506 \dots\dots(2.34)$$

นั่นคืออัตราส่วน Ct/Ca มีค่าระหว่าง 2.8 ถึง 21  
 สมการเริ่มต้นการออกแบบตามมาตรฐานซีเกอร์ คือสมการที่ (2.34)  
 ทดลองเลือก

$$\frac{C_t}{C_a} = 3.509$$

จากการคำนวณได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$D_o = 8.409$$

$$Q = 0.404$$

$$\frac{C_3}{C_t} = 1.271$$

$$C_3 = 254.2 \cdot 10^{-12} \text{ F.}$$

$$T_1 = 6.424 \cdot 10^{-6}$$

$$T_2 = 3.942 \cdot 10^{-5}$$

ศูนย์วิทยุโทรพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\omega_0 = 6.283 \cdot 10^4 \text{ RAD.}$$

$$C_a = 57 \cdot 10^{-12} \text{ F.}$$

$$C_k = 180 \cdot 10^{-12} \text{ F.}$$

$$R_1 = 32.12 \cdot 10^3 \ \Omega$$

$$R_2 = 155 \cdot 10^3 \ \Omega$$

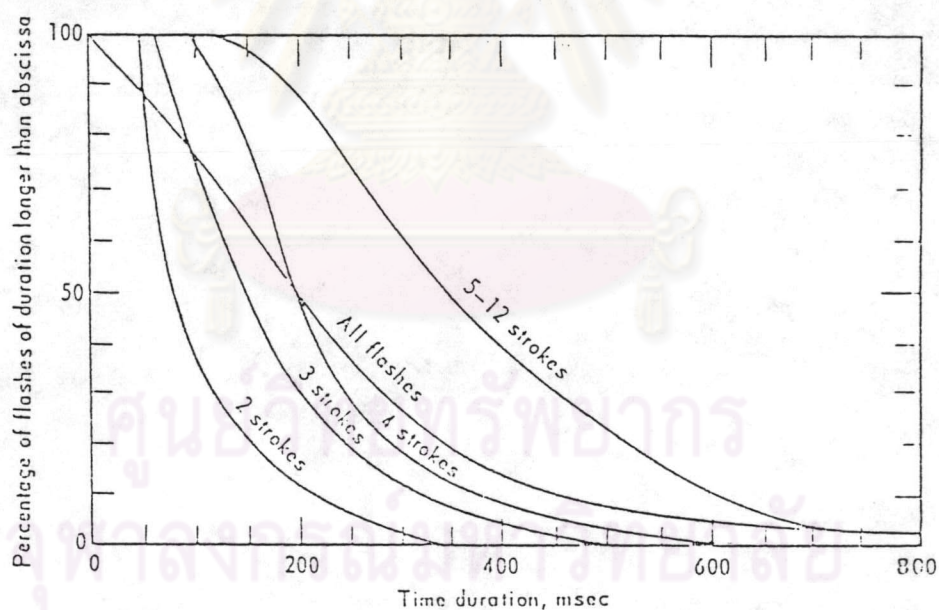
$$U_a = 42.43 \text{ V.}$$

$$U = 12.092 \text{ V.}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



2.4.4 วงจรหน่วงเวลา แอนเดอ์สันและคณะ[26] ได้แสดง ข้อมูลฟ้าผ่าบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร มีระยะเวลาประมาณ 1000 มิลลิวินาที ส่วนในสวีตเซอร์แลนด์ มีระยะเวลาประมาณ 500 มิลลิวินาที ในรูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่ฟ้าผ่าประมาณ 500 มิลลิวินาทีขึ้นไป มีได้ถึงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของข้อมูลฟ้าผ่าทั้งหมดในบางส่วนของโลก การกำหนดให้ วงจรหน่วงเวลาในเครื่องนับฟ้าผ่าทำงานเพื่อกำจัดลำฟ้าผ่าอื่นๆ จึงขึ้นอยู่กับ ระยะเวลาในการผ่าของฟ้าผ่าแต่ละครั้ง จากข้อมูลสถิติ และเพื่อให้เครื่องนับ สามารถทำงานได้เป็นมาตรฐานเช่นเดียวกับ วงจรเครื่องนับฟ้าผ่าแบบซีเกอร์ จึงกำหนดวงจรหน่วงเวลาไว้ประมาณ 1 วินาที ปีสเลอร์[30] สรุปว่าจำนวน ฟ้าผ่าที่มีระยะเวลายาวนานกว่า 1 วินาที ทำให้เครื่องนับจำนวน 2 ครั้ง มี จำนวนน้อยมาก และมีจำนวนใกล้เคียงกับจำนวนฟ้าผ่า ที่มีระยะเวลาสั้นกว่า 1 วินาที และเกิดซ้ำแต่เครื่องนับจำนวนเป็นครั้งเดียว การเก็บข้อมูลฟ้าผ่าจึง สามารถที่กลบจำนวนการนับฟ้าผ่าเหล่านี้ได้



รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะและระยะเวลาของฟ้าผ่าสู่ดิน[24,26]