

XÁC ĐỊNH ĐIỆN TRƯỜNG KHÍ QUYỂN BẰNG SÓNG ĐIỆN TỪ PHÁT RA TỪ CƠN MƯA HẠT VẬT CHẤT

Trịnh Thị Ngọc Gia^{1*}, Nguyễn Thị Kim Ngọc², Trương Đỗ Anh Kha¹ và Lê Thị Như Ý¹

¹Khoa Sư phạm, Trường Đại học Cần Thơ

²Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Trịnh Thị Ngọc Gia (email: tngia@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 23/01/2021

Ngày nhận bài sửa: 16/03/2021

Ngày duyệt đăng: 25/06/2021

Title:

Determination of atmospheric electric field by using radio emission from air showers

Từ khóa:

Bức xạ điện từ, cơn mưa hạt vật chất, điện trường khí quyển

Keywords:

Air showers, atmospheric electric field, radio emission

ABSTRACT

Measurements of radio emission from extensive air showers during thunderstorm conditions are presents in this paper. Both intensity and polarization footprints of these events are very different from those measured during fair weather. A fitting procedure and analyzed eleven air showers have been carried out. In order to reconstruct these showers, atmospheric electric fields in thunderclouds generally are composed of at least three layers. It was found that the electric fields extracted from these events have some similar characteristics. Large horizontal components of the electric fields are observed in the middle and the top layers. The height of the bottom layer depends on the season.

TÓM TẮT

Bức xạ vô tuyến phát ra từ cơn mưa hạt trong điều kiện giông bão được trình bày trong bài báo này. Đồ thị cường độ bức xạ và đồ thị phân cực của các cơn mưa hạt trong điều kiện thời tiết giông bão rất khác so với đồ thị tương ứng của cơn mưa hạt được thu trong điều kiện thời tiết bình thường. Bằng phương pháp tối ưu hóa, nghiên cứu chỉ ra rằng điện trường khí quyển mà các cơn mưa hạt trong điều kiện giông bão đi qua thường có cấu trúc ba lớp. Thành phần nằm ngang của điện trường thường có giá trị khá lớn ở lớp giữa và lớp trên cùng. Độ cao của lớp dưới cùng thay đổi theo mùa.

1. GIỚI THIỆU

Sét là một hiện tượng nguy hiểm nhưng những hiểu biết về nó còn nhiều hạn chế (Dwyer & Uman, 2014). Những nguyên tắc cơ bản của quá trình hình thành và lan truyền của sét vẫn là vấn đề còn mập mờ và gây nhiều tranh cãi. Cơ chế hình thành và lan truyền của sét phụ thuộc rất nhiều vào điện trường không khí trong các đám mây giông bão. Tuy nhiên, những hiểu biết về điện trường không khí trong các đám mây giông bão còn rất hạn chế (Marshall et al., 1995; Hill et al., 2002). Chính vì thế, những kiến thức về điện trường không khí trong các đám mây

đóng vai trò rất quan trọng trong việc nghiên cứu quá trình hình thành và phát triển của sét. Hơn thế nữa, các điện trường mạnh vẫn có thể được tìm thấy trong các đám mây thông thường không gây ra sét. Những đám mây này có thể rất nguy hiểm vì máy bay có thể kích hoạt và tạo nên sét khi bay vào những đám mây có điện trường mạnh này (Merceret et al., 2008). Phương pháp đo điện trường bằng kính khí cầu và máy bay (Jones et al., 1993) đã có những đóng góp hết sức quan trọng. Tuy nhiên, những phép đo này bị giới hạn bởi sự nhiễu loạn dữ dội của các đám mây giông bão. Ngoài ra, những

phép đo này chỉ đo được một phần nhỏ điện trường xuất hiện trong các đám mây giông bão.

Một phương pháp mới, sử dụng bức xạ điện từ phát ra từ mưa hạt vật chất để xác định điện trường mạnh trong các đám mây đã được giới thiệu (Schellart et al., 2015). Các dòng hạt vũ trụ mang năng lượng cao khi đi vào bầu khí quyển của Trái đất sẽ va chạm với các phân tử khí và tạo ra các dòng hạt thứ cấp gọi là cơn mưa hạt vật chất. Trong cơn mưa hạt vật chất có rất nhiều các hạt mang điện như electron và positron. Các hạt mang điện này có khả năng bức xạ điện từ. Các bức xạ này được đo bằng hệ thống antenna đặt trên mặt đất. Trong điều kiện thời tiết giông bão, cường độ điện trường không khí tăng lên rất lớn làm thay đổi các bức xạ điện từ này. Do đó, các bức xạ điện từ phát ra từ cơn mưa hạt trong điều kiện giông bão có thể được sử dụng để xác định điện trường khí quyển. Phương pháp này có ưu điểm là không bị giới hạn bởi sự nhiễu loạn dữ dội của gió.

2. CƠ CHẾ BỨC XẠ ĐIỆN TỪ PHÁT RA TỪ CƠN MƯA HẠT VẬT CHẤT

2.1. Cơ chế bức xạ điện từ phát ra từ cơn mưa hạt vật chất trong điều kiện thời tiết bình thường

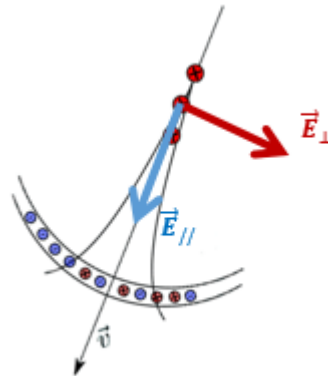
Thành phần chính của bức xạ điện từ phát ra từ cơn mưa hạt vật chất trong điều kiện thời tiết thường được gây ra bởi từ trường Trái đất. Do tác dụng của từ trường Trái Đất, các electron và positron trong cơn mưa hạt vật chất chịu tác dụng của lực Lorentz sẽ được gia tốc theo hai hướng ngược chiều nhau. Từ đó, các hạt này tạo ra một dòng điện có phương vuông góc với phương chuyển động của cơn mưa và hướng theo chiều của lực Lorentz. Khi cơn mưa hạt vật chất phát triển, dòng điện này thay đổi theo độ cao, phát ra bức xạ điện từ. Bức xạ điện từ này phân cực tuyến tính theo chiều của lực Lorentz.

Ngoài ra, còn một cơ chế phát xạ thứ cấp nữa. Khi cơn mưa hạt vật chất lan truyền trong bầu khí quyển và di chuyển xuống mặt đất, nó cũng phát triển một lượng dư thừa các điện tích âm mà cụ thể là dư thừa electron. Sự dư thừa này được hình thành từ các electron bị loại ra khỏi các phân tử khí quyển bởi sự tương tác với các hạt trong cơn mưa hạt vật chất, để lại các ion tích điện dương phía sau. Lượng điện tích âm dư thừa nào cũng thay đổi theo độ cao và bức xạ ra sóng điện từ. Bức xạ này cũng phân cực tuyến tính nhưng phân cực xuyên tâm, với tâm nằm trên trục của cơn mưa hạt. Do đó, dựa vào sự phân cực, người ta có thể phân biệt được thành phần bức xạ này với thành phần bức xạ từ dòng điện. Bức xạ

nhận được ở mặt đất là sự tổng hợp của hai thành phần bức xạ nêu trên.

2.2. Cơ chế bức xạ điện từ phát ra từ cơn mưa hạt vật chất trong điều kiện thời tiết có giông bão

Trong điều kiện thời tiết giông bão, sự phát xạ vô tuyến từ cơn mưa hạt vật chất bị ảnh hưởng bởi điện trường khí quyển. Trong điều kiện thời tiết giông bão, các cơn mưa hạt phát triển ở vùng có điện trường khí quyển mạnh. Do đó, ngoài lực Lorentz, các electron và positron sẽ chịu thêm tác dụng của lực điện. Ngay cả khi sấm sét chưa được hình thành, cường độ điện trường vào khoảng 10 kV/m, lực điện vẫn lớn hơn lực Lorentz. Dựa vào tác dụng của điện trường lên cơn mưa hạt vật chất, ta có thể phân tích điện trường thành hai thành phần: thành phần vuông góc với trục cơn mưa hạt \vec{E}_\perp và thành phần song song với nó \vec{E}_\parallel như được minh họa ở Hình 1. Hai thành phần này ảnh hưởng đến sự phân bố các hạt tích điện theo những cách khác nhau (Scholten et al., 2019).



Hình 1. Hình minh họa phương, chiều của hai thành phần điện trường \vec{E}_\perp và \vec{E}_\parallel

Thành phần vuông góc \vec{E}_\perp không làm thay đổi số lượng electron và positron, nhưng làm thay đổi lực tổng hợp \vec{F} nằm ngang tác dụng lên các hạt: $\vec{F} = q(\vec{E}_\perp + \vec{v} \times \vec{B})$, với \vec{v} là vận tốc của cơn mưa hạt và \vec{B} và từ trường Trái đất. Hợp lực này làm thay đổi hướng và cường độ của dòng điện ngang. Do đó, nó làm thay đổi sự phân cực và cường độ của bức xạ điện từ phát ra từ dòng điện ngang. Trong khi đó, \vec{E}_\parallel có thể tăng hoặc giảm vận tốc của electron hoặc positron trong cơn mưa hạt vật chất tùy thuộc vào hướng của điện trường, và do đó số lượng các hạt tăng lên. Tuy nhiên, \vec{E}_\parallel có ảnh hưởng rất nhỏ trong khoảng tần số từ 30 MHz – 80 MHz của bức xạ được

tạo ra. Do tác dụng của thành phần \vec{E}_{\parallel} không đáng kể nên tác dụng của thành phần này không được khảo sát trong bài viết.

3. THU THẬP VÀ PHÂN TÍCH DỮ LIỆU

3.1. Thu thập dữ liệu

Dữ liệu về bức xạ điện từ từ cơn mưa hạt vật chất trong điều kiện giông bão được thu thập từ hệ thống antenna tần số thấp được đặt tại thành phố Drenthe, Hà Lan (van Haarlem et al., 2013). Các antenna thu tín hiệu trong khoảng tần số từ 30 MHz – 80 MHz. Các antenna được nhóm thành từng trạm antenna. Mỗi trạm có 48 antenna và có tổng cộng 6 trạm tập trung thành một lõi có đường kính khoảng 320 m. Với mục đích thu các tín hiệu từ cơn mưa hạt, các antenna được trang bị bộ đệm vòng có khả năng thu tín hiệu trong vòng 5 giây với bước nhảy là 5 nano giây. Ngoài ra, còn có hệ thống các máy đếm hạt để xác định các hạt từ cơn mưa hạt vật chất, từ đó, có thể xác định được năng lượng của cơn mưa hạt. Trục của cơn mưa hạt vật chất cũng được xác định dựa vào thời gian thu tín hiệu bức xạ ở tất cả các antenna. Đối với từng tín hiệu ở mỗi antenna, tham số Stokes bao gồm I, Q, U và V sẽ được tính theo biểu thức

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (|e_{i,v \times B}|^2 + |e_{i,v \times (v \times B)}|^2),$$

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (|e_{i,v \times B}|^2 - |e_{i,v \times (v \times B)}|^2),$$

$$U + iV = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (e_{i,v \times B} e_{i,v \times (v \times B)}^*).$$

$e_i = S_i + i\hat{S}_i$ là tín hiệu được biểu diễn dưới dạng phức, trong đó \hat{S}_i là biến đổi Fourier của S_i . Tham số Stokes I cho biết cường độ bức xạ. Tham số Stokes Q và tham số Stokes U được sử dụng để xác định góc phân cực tuyến tính theo biểu thức:

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right)$$

và Stokes V cho biết độ phân cực tròn.

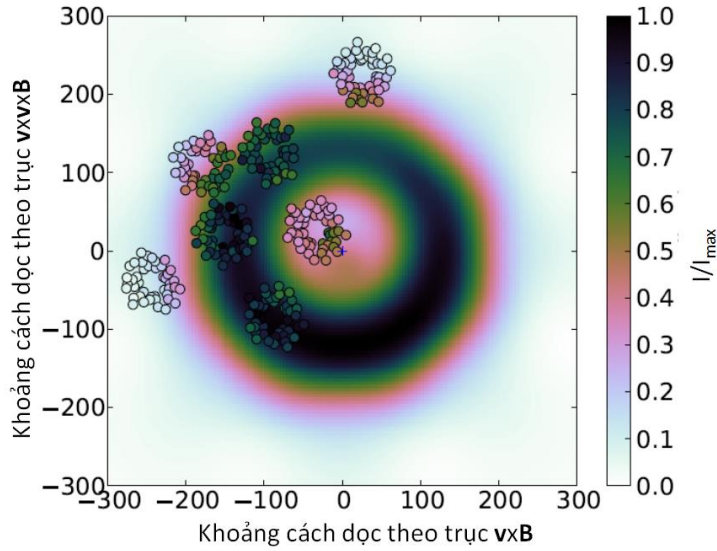
Trong khoảng thời gian 5 năm từ 2011 đến 2015, có tổng cộng 11 bức xạ điện từ từ cơn mưa hạt vật chất được thu thập số liệu. Các dữ liệu này rất khác so với dữ liệu thu thập trong điều kiện thời tiết bình thường.

3.2. Phân tích dữ liệu

Để xác định điện trường khí quyển từ bức xạ vô tuyến phát ra từ cơn mưa hạt, ta giải một bài toán ngược. Dữ liệu đầu vào chính là bức xạ điện từ phát ra từ cơn mưa hạt (được biểu diễn dưới dạng tham số Stokes) khi đi qua một điện trường được tham số hóa. Các tham số của điện trường được điều chỉnh sao cho bức xạ điện từ được tính toán trùng khớp nhất với bức xạ điện từ thu được từ thực nghiệm. Cấu trúc điện trường cho kết quả phù hợp với thực nghiệm nhất chính là dữ liệu đầu ra. Đó chính là cấu trúc điện trường trong các đám mây mà cơn mưa hạt đã đi qua. Vì đám mây trong điều kiện giông bão thường có ba tầng nên cấu trúc điện trường ba tầng được sử dụng. Chúng ta sử dụng mô hình tính toán bức xạ điện từ từ dòng điện sinh ra từ các hạt và mật độ điện tích trong cơn mưa hạt. MGMR3D có thể tính toán bức xạ điện từ của một cơn mưa hạt chỉ trong vài chục giây nên nó có thể được sử dụng trong bài toán tối ưu nhiều tham số. Các tham số của cấu trúc điện trường ba tầng sẽ được thay đổi để tối ưu hóa đại lượng χ^2 có biểu thức

$$\chi^2 = \sum_{\text{tổng số anten}} \sum_{S=1}^{Q,U,V} \left(\frac{S_{ant} - S_{cal}(x_{ant} - x_0, y_{ant} - y_0)}{\sigma_{ant}^S} \right)^2.$$

Trong đó, S_{ant} là tham số Stokes tương ứng ở vị trí antenna (x_{ant}, y_{ant}) với sai số σ_{ant}^S và S_{cal} là tham số Stokes tương ứng được tính toán bằng MGMR3D. Gốc của cơn mưa hạt ở tại vị trí (x_0, y_0) .

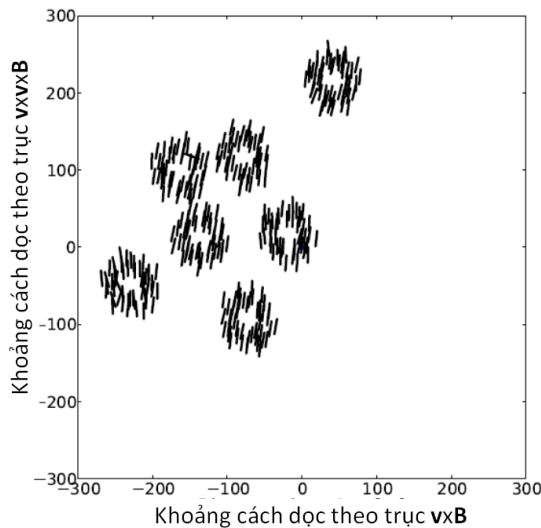


Hình 2. Đồ thị cường độ bức xạ phát ra từ một cơn mưa hạt vật chất

Vòng tròn nhỏ: cường độ thu được từ thực nghiệm. Nền: cường độ thu được từ mô phỏng MGMR3D.

Đồ thị cường độ bức xạ và đồ thị phân cực của một cơn mưa hạt vật chất được biểu diễn ở Hình 2 và Hình 3. Đồ thị cường độ bức xạ biểu diễn ở Hình 2 thể hiện cấu trúc hình vòng tròn có tâm nằm ngay gốc tọa độ. Cường độ bức xạ đạt cực đại ở vành đai bán kính 100-120 m kể từ gốc tọa độ. Mặt khác, đồ thị phân cực (Hình 3) cho thấy các bức xạ thu được ở tất cả các antenna đều phân cực theo một hướng nhất định, nhưng không phải là hướng của lực Lorentz. Kết quả chạy mô phỏng MGMR3D cho thấy để thu được đồ thị cường độ bức xạ và đồ thị

phân cực như trên, cấu trúc điện trường khí quyển gồm có hai lớp. Điện trường ở hai lớp này có hướng sao cho lực tổng hợp tác dụng lên các điện tích hướng theo hai hướng ngược chiều nhau. Kết quả là bức xạ phát ra từ hai tầng của khí quyển sẽ triệt tiêu nhau một phần và hình thành nên cấu trúc vòng ở đồ thị bức xạ điện từ. Mặt khác, do hợp lực ở hai tầng của khí quyển ngược chiều nhau nên bức xạ điện từ tại tất cả các vị trí của antenna cũng phân cực theo một hướng xác định. Đó chính là hướng của hợp lực ở tầng có bức xạ lớn hơn.



Hình 3. Đồ thị sự phân bố phương phân cực của bức xạ điện từ phát ra từ cơn mưa hạt thu được từ hệ thống antenna của LOFAR

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Sự phân bố điện tích trong các đám mây

Kết quả tối ưu hóa các tham số về độ cao của điện trường có cấu trúc ba lớp đối với mười một cơn mưa hạt vật chất bằng việc sử dụng mô phỏng MGMR3D được thể hiện trong Bảng 1. Kết quả đạt được về độ cao của các tầng và điện trường khí quyển ở mỗi tầng có thể được sử dụng để phân tích về sự phân bố điện tích trong các đám mây cũng như về điện trường khí quyển.

Bảng 1. Phân bố độ cao của các lớp điện trường trong 11 cơn mưa hạt từ 2011 – 2015 tại Drenthe, Hà Lan

Số thứ tự	Thời điểm thu số liệu	h_1 [km]	h_2 [km]	h_3 [km]	h_0 [km]	h_{-10} [km]
1	Mùa đông	7,6	3,3	1,6	0,7	2,3
2	Mùa đông	0,2	-	1,9	0,7	2,3
3	Mùa đông	7,9	5,0	2,3	0,7	2,3
4	Mùa hè	10,1	7,4	3,0	1,5	3,4
5	Mùa hè	7,2	5,6	3,2	3,6	5,6
6	Mùa hè	7,8	-	3,7	2,5	4,2
7	Mùa hè	7,3	3,6	1,7	2,5	4,2
8	Mùa hè	8,0	6,9	2,7	2,5	4,2
9	Mùa đông	8,0	5,0	2,0	0,8	2,2
10	Mùa hè	7,6	4,9	3,6	3,8	5,7
11	Mùa hè	6,3	4,5	3,3	2,5	4,2

Đối với các cơn mưa hạt mùa hè, ba cơn mưa hạt 5, 10 và 11 đi qua đám mây có ba lớp điện tích trong ứng: lớp điện tích dương, lớp điện tích âm chính và một lớp điện tích dương phía bên dưới. Ba cơn mưa hạt khác 6, 7, và 8 đi qua cùng một trận giông bão trong thời gian 36 phút. Như được thể hiện trên Bảng 1, h_3 ở cơn mưa số 7 thì thấp hơn rất nhiều so với hai cơn mưa còn lại. Điều này có thể được giải thích là do cơn mưa số 7 đi qua một vùng điện tích rất nhỏ. Cơn mưa số 6 và số 7 đi tới từ hai hướng khác nhau nên cấu trúc của phần đám mây mà nó đi qua có thể không giống nhau. Mặt khác, cơn mưa số 7 và số 8 cách nhau 26 phút, thời gian này đủ dài để cấu trúc của đám mây thay đổi do sự phát triển của trận giông bão. Đây cũng có thể là nguyên nhân tại sao lớp điện tích dương rất nhỏ ở cơn mưa số 7 không được tìm thấy ở cơn mưa số 6 và số 8. Lớp điện tích âm chính của đám mây mà ba cơn mưa này đi qua có độ cao từ 2,7 km đến 3,7 km như được thể hiện trong Bảng 1. Hai cột cuối của Bảng 1 thể hiện độ cao mà tại đó nhiệt độ là 0°C và -10°C . Dựa vào đây ta thấy đối với hầu hết các cơn mưa hạt vào mùa

hè, độ cao của lớp điện tích dương phía dưới trùng với độ cao có nhiệt độ 0°C .

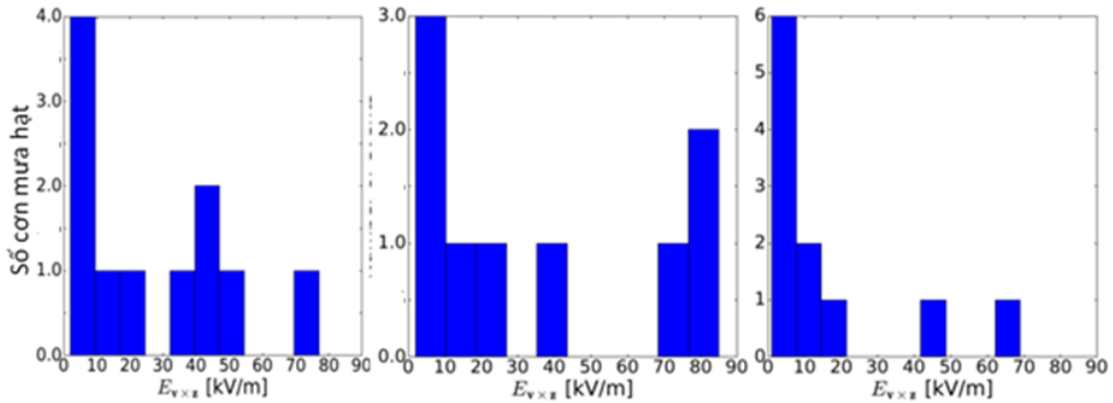
Vì các độ cao h_1 , h_2 và h_3 là các độ cao mà tại đó điện trường thay đổi nên chúng tương ứng với các độ cao của các lớp điện tích trong các đám mây giông bão. Như được thể hiện ở Bảng 1, kết quả cho thấy độ cao của lớp điện tích gần mặt đất nhất ở các cơn mưa hạt vật chất mùa hè cao hơn so với độ cao tương ứng ở cơn mưa hạt vật chất mùa đông. Nguyên nhân là do sự chênh lệch nhiệt độ giữa mùa hè và mùa đông ở Hà Lan.

hè, độ cao của lớp điện tích dương phía dưới trùng với độ cao có nhiệt độ 0°C .

Ngược lại, đối với các cơn mưa hạt mùa đông, lớp điện tích thấp nhất trong đám mây mà chúng đi qua cao hơn ít nhất là 1 km so với độ cao có nhiệt độ 0°C . Điều này có thể là do vào mùa đông, độ cao có nhiệt độ 0°C ở rất gần mặt đất nên cơ chế hình thành các lớp điện tích trong đám mây giông bão rất khác so với mùa hè khi mà độ cao có nhiệt độ 0°C ở xa mặt đất hơn.

4.2. Điện trường khí quyển

Bằng cách sử dụng bức xạ điện từ phát ra từ cơn mưa hạt, chúng ta có thể xác định được thành phần \vec{E}_{\perp} . Đối với thành phần song song với nó \vec{E}_{\parallel} , chúng ta không thể xác định được do tác dụng của nó đối với bức xạ điện từ trong khoảng tần số mà ta khảo sát là rất nhỏ. Vì vậy, ta không thể xác định được thành phần tổng hợp của điện trường khí quyển. Tuy nhiên, chúng ta có thể xác định được thành phần điện trường theo phương nằm ngang $\vec{E}_{v \times z}$. Thành phần này được biểu diễn trong Hình 4.



Hình 4. Thành phần điện trường theo phương ngang

Trái: Tầng trên, giữa: tầng giữa, phải: tầng dưới

Kết quả từ tất cả các cơn mưa hạt cho thấy điện trường theo phương ngang có giá trị khá lớn, thường tập trung ở các lớp ở tầng cao như được thể hiện trong Hình 4. Thành phần nằm ngang của điện trường là do các lớp điện tích trong đám mây không phân bố theo phương ngang hoàn toàn. Vì lớp điện tích ở mặt đất hình thành là do lớp điện tích thấp nhất và Hà Lan có địa hình phẳng, không có đồi núi nên thành phần điện trường nằm ngang đo được giữa mặt đất và lớp điện tích thấp nhất là rất nhỏ.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, bức xạ điện từ phát ra từ cơn mưa hạt vật chất trong điều kiện giông bão đã được sử dụng để xác định điện trường của khí quyển. Từ đó, sự phân bố điện tích trong đám mây mà cơn mưa hạt vật chất đi qua được chỉ ra. Kết quả phân tích dữ liệu cho thấy thành phần điện trường nằm ngang so với mặt đất có giá trị khá lớn và sự phân bố điện tích trong đám mây thay đổi theo điều kiện thời tiết.

LỜI CẢM ƠN

Đề tài nghiên cứu này được hỗ trợ tài chính từ trường Đại học Cần Thơ với mã số đề tài là T2020-95.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Dwyer, J. R., & Uman, M. A. (2014). The physics of lightning. *Physics Reports*, 534(4), 147 – 241.
 van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., Heald, G., McKean, J. P., Hessels, J. W., ... &

Reitsma, J. (2013). LOFAR: The low-frequency array. *Astronomy & astrophysics*, 556, A2.

Hill, J. D., Uman, M. A., Jordan, D. M., Dwyer, J. R., & Rassoul, H. (2012). Chaotic dart leaders in triggered lightning: Electric fields, Xrays, and source locations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D3).

Jones, J. J., Winn, W. P., & Han, F. (1993). Electric field measurements with an airplane: Problems caused by emitted charge. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D3), 5235–5244.

Marshall, T. C., Rison, W., Rust, W. D., Stolzenburg, M., Willett, J. C., & Winn, W. P. (1995). Rocket and balloon observations of electric field in two thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D10), 20815–20828.

Merceret, F. J., Ward, J. G., Mach, D. M., Bateman, M. G., & Dye, J. E. (2008). On the magnitude of the electric field near thunderstorm-associated clouds. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 240–248.

Schellart, P., Trinh, T. N. G., Buitink, S., Corstanje, A., Enriquez, J. E., Falcke, H., ... & Zarka, P. (2015). Probing atmospheric electric fields in thunderstorms through radio emission from cosmic-ray-induced air showers. *Physical review letters*, 114(16), 165001.

Scholten, O., Trinh, T. N. G., Vries, K. D. de, & Hare, B. M. (2018). Analytic calculation of radio emission from parametrized extensive air showers: A tool to extract shower parameters. *Physics Review D*, 97(2), 023005–023019.