

SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP ENTROPI CỰC ĐẠI NGHIÊN CỨU BIẾN THIÊN THỂ KỸ CHU KỲ NGẮN TRƯỜNG ĐỊA TỬ

LÊ NGỌC THANH, LÊ MINH TRIẾT

I. MỞ ĐẦU

Cho đến nay các kết quả thu được từ các công trình nghiên cứu phân tích phổ của trường địa từ cho thấy trong nhiều trường hợp ta không thể xác định được đỉnh phổ liên quan với một chu kỳ có ý nghĩa. Điều đó là do số liệu ghi ở các đài trạm quan trắc địa từ thường bao gồm cả phần từ trường có nguồn gốc bên trong và bên ngoài Trái Đất, khó tách ra một cách chính xác sự đóng góp của mỗi phần trường vào trường tổng cộng. Hơn thế nữa các nhà nghiên cứu lại sử dụng các dãy số liệu, phương pháp và thuật toán xử lý khác nhau.

Trước đây phương pháp Fourier thường được sử dụng để phân tích phổ giá trị trung bình năm các thành phần trường địa từ. Nhưng trong hơn hai thập kỷ qua một phương pháp ước lượng phổ khác được sử dụng phổ biến hơn trong nhiều lĩnh vực, kể cả trong nghiên cứu biến thiên thể kỹ (BTTK) chu kỳ ngắn trường địa từ, đó là phương pháp entropi cực đại (MEM). Phương pháp này có khả năng chỉ ra các chu kỳ chính xác khi dãy số liệu bị giới hạn. Hiện nay các thành phần trường địa từ mới được ghi tại các trạm quan trắc với khoảng thời gian tối đa là 100-130 năm, trong khi đó biến thiên từ đặc trưng lại có chu kỳ vào khoảng 60 năm, 30 năm, 20 năm và 11 năm [8].

Mục đích của bài báo này nhằm giới thiệu khái quát về phương pháp entropi cực đại và áp dụng phương pháp này để phân tích phổ giá trị trung bình năm của các thành phần trường địa từ ghi tại đài Chambon-la-Forêt.

II. PHƯƠNG PHÁP ENTROPI CỰC ĐẠI

Entropi là hàm trạng thái nhiệt động học dùng để đo mức độ hỗn loạn hoặc độ bất định trong trạng thái của một hệ. Hàm entropi của quá trình dùng có mật độ phổ $S(f)$ được xác định bởi:

$$H = \frac{1}{4f_N} \int_{-f_N}^{f_N} \log S(f) df \quad (1)$$

trong đó $f_N = (2\Delta t)^{-1}$ - tần số Nyquist, Δt - bước lấy mẫu theo thời gian

Để cực đại hoá hàm entropi ta sử dụng nhân số Lagrange $\lambda_k = -M \dots M$. Điều đó đưa đến việc giải bài toán biến phân mà nghiệm được tìm dưới dạng:

$$S(f) = \frac{P_{M+1}}{\left| 1 + \sum_{j=1}^M \gamma_j \exp(-i2\pi f_j \Delta t) \right|^2} \quad (2)$$

trong đó P_{M+1} - hằng số, γ_j - hệ số sai số tiên đoán. $S(f)$ xác định bởi công thức (2) là mật độ phổ ước lượng từ cực đại hoá hàm entropi.

Trong gần đúng bậc nhất dãy giá trị trung bình năm các thành phần trường địa từ được coi như một quá trình ngẫu nhiên tuyến tính dừng, nghĩa là giá trị trung bình và phương sai của dãy là độc lập đối với thời gian. Quá trình ngẫu nhiên tuyến tính dừng có thể biểu diễn bằng quá trình tự hồi quy bậc M hữu hạn cho bởi hệ thức:

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_M X_{t-M} + \alpha_t \quad (3)$$

trong đó $t = 1, 2, \dots, N$ với N - độ dài dãy số liệu, $\alpha_1, \dots, \alpha_M$ là hệ số tự hồi quy, α_t - dải tiếng ồn trắng có giá trị trung bình bằng không và phương sai σ_M^2 .

Thực hiện biến đổi Z cho cả hai vế của phương trình (3) ta được

$$X(Z) - X(Z) (\alpha_1 Z + \alpha_2 Z^2 + \dots + \alpha_M Z^M) = A(Z) \quad (4)$$

trong đó $Z = \exp(i2\pi f)$, $A(Z) = \sigma_M^2$. Từ đó suy ra :

$$|X(Z)|^2 = \frac{|A(Z)|^2}{|1 - (\alpha_1 Z + \alpha_2 Z^2 + \dots + \alpha_M Z^M)|^2} \quad (5)$$

Phương trình (5) là mật độ phổ của quá trình tự hồi quy (3) có thể viết dưới dạng :

$$S(f) = \frac{\sigma_M^2}{\left|1 - \sum_{k=1}^M \alpha_{Mk} \exp(-i2\pi fk)\right|^2} \quad (6)$$

So sánh (2) và (6) ta nhận thấy mật độ phổ năng lượng thu được từ cực đại hoá hàm entropi là tương đương với mật độ phổ năng lượng của một quá trình tự hồi quy tuyến tính, trong đó hệ số tự hồi quy α_k là hệ số bộ lọc sai số tiên đoán.

Để tính toán mật độ phổ bằng công thức (6) cần phải xác định hệ số α_{Mk} và bậc M của quá trình tự hồi quy. Hệ số này được xác định bằng hệ thức truy hồi Levinson :

$$\alpha_{Mk} = \alpha_{(M-1)k} - \alpha_{MM} \alpha_{(M-1)(M-k)}, \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, (M-1)$$

Từ (7) có thể xác định α_{Mk} khi biết hệ số $\alpha_{(M-1)k}$ và α_{MM} . Theo Burg, có thể xác định α_{MM} từ phương trình :

$$\frac{\partial S_M(\alpha_{MM})}{\partial \alpha_{MM}} = 0 \quad (8)$$

trong đó S_M là tổng bình phương dư của quá trình tự hồi quy bậc M.

Khi biết α_{MM} có thể xác định σ_M^2 bằng hệ thức truy hồi :

$$\sigma_M^2 = \sigma_{(M-1)}^2 (1 - |\alpha_{MM}|^2) \quad (9)$$

Việc xác định bậc M là một nhiệm vụ quan trọng trong MEM, nhưng đến nay vẫn chưa có phương pháp hiệu quả để xác định tham số này. Nếu chọn M quá nhỏ thì phổ sẽ rất trơn, còn M quá lớn thì phổ sẽ không ổn định. J.G. Berryman [1] đã đưa ra công thức thực nghiệm chung là :

$$M = \frac{2N}{\ln 2N} \quad (10)$$

Trong trường hợp áp dụng MEM để nghiên cứu BTTK chu kỳ ngắn trường địa từ, N.M. Rotanova [7] chứng minh rằng phổ ít bị biến dạng nhất khi M nằm trong khoảng $[N/3, N/2]$. Ngoài ra, còn cần phải tách xu hướng (trend) khỏi dãy số liệu. Công trình [7] cho rằng BTTK 60 năm ít bị biến dạng nhất khi khuynh hướng được mô tả bằng đa thức bậc $n \leq 2$.

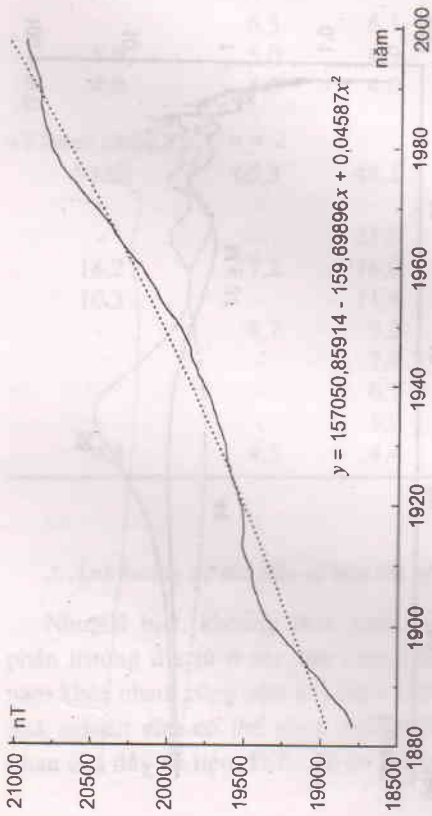
III. KẾT QUẢ ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP ENTROPI CỰC ĐẠI

Để minh họa phương pháp entropi cực đại trong phân tích phổ xác định các chu kỳ đặc trưng của BTTK chu kỳ ngắn trường địa từ, chúng tôi sử dụng giá trị trung bình năm của ba thành phần X, Y và Z ghi tại đài địa từ Chambon-la-Forêt (CH Pháp, 48°01' N, 02°16' E) từ năm 1883 đến 1998. Hình 1a-c biểu diễn giá trị trung bình năm của chúng và tương ứng là ba đường cong bậc hai làm khớp tốt nhất (best fitting curve) được xác định bằng phương pháp bình phương tối thiểu. Hình 2 biểu diễn các giá trị dư của ba thành phần. Thuật toán xác định phổ bằng phương pháp entropi cực đại được lập trình bằng ngôn ngữ Fortran.

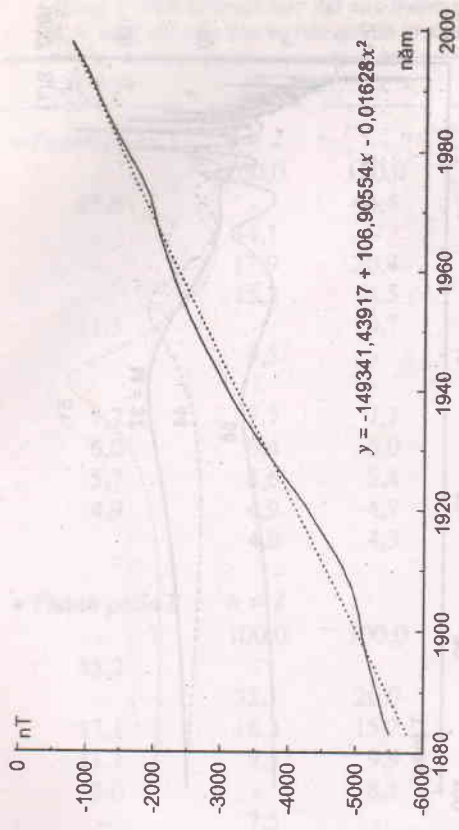
1. Ảnh hưởng của bậc tự hồi quy lên vị trí của đỉnh phổ

Để đánh giá ảnh hưởng của bậc tự hồi quy M trong phân tích phổ bằng MEM, chúng tôi tính toán mật độ phổ $S(f)$ cho giá trị dư của ba thành phần X, Y, Z phụ thuộc theo bậc M, trong đó chọn đa thức bậc hai để mô tả xu hướng của chúng. Hình 3a-c biểu diễn các đường cong $S(f)$ của ba thành phần với các chu kỳ đặc trưng của đỉnh phổ được trình bày trong bảng 1.

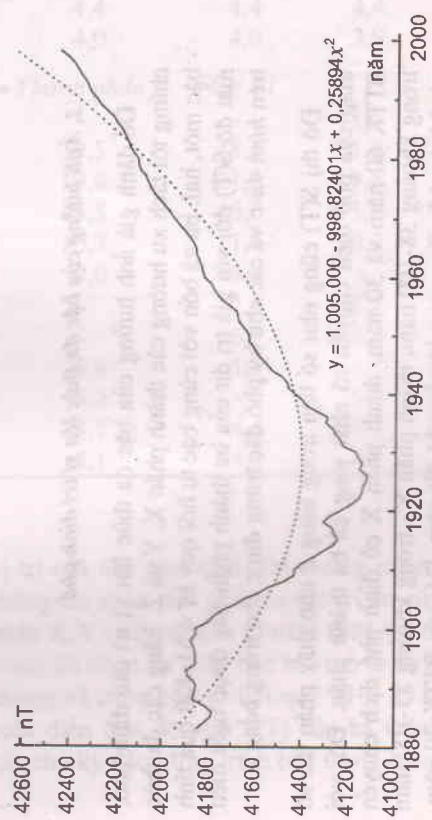
Số liệu trên bảng 1 cho thấy khi M thay đổi trong khoảng $[N/3, N/2]$ thì các đỉnh phổ tần số thấp dịch chuyển rõ nhất. Đối với BTTK 60 năm và 30 năm, trong thành phần X đỉnh phổ dịch chuyển trong khoảng 44-100 năm, thành phần Y - trong khoảng 49-100 năm và thành phần Z - trong khoảng 48-100 năm. Đối với BTTK 20 năm, thành phần X có đỉnh phổ dịch chuyển trong khoảng 17-24 năm, thành phần Y - trong khoảng 15-26 năm và thành phần Z - trong khoảng 16-22 năm. Đối với BTTK 11 năm và nhỏ hơn (phần tần số cao) số liệu trong bảng 1 cho thấy sự dịch chuyển của chúng là không đáng kể khi bậc tự hồi quy M thay đổi.



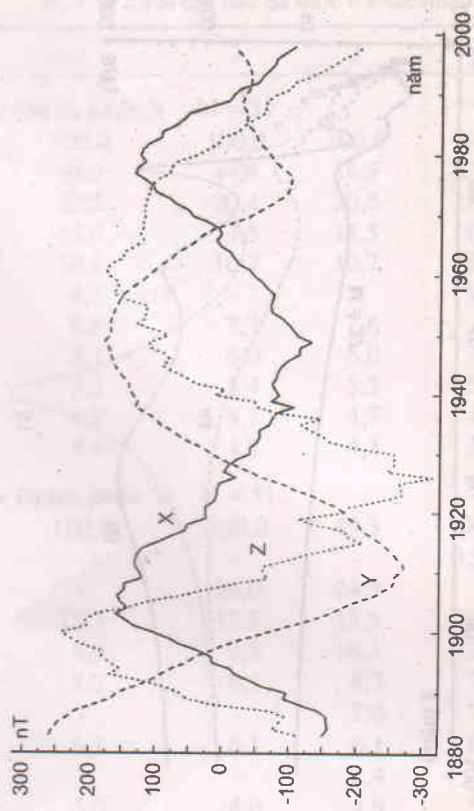
Hình 1a. Giá trị trung bình năm thành phần X ghi tại đài địa từ Chambon-la-Forêt từ 1883 đến 1998 và đường cong bậc hai làm khớp tốt nhất



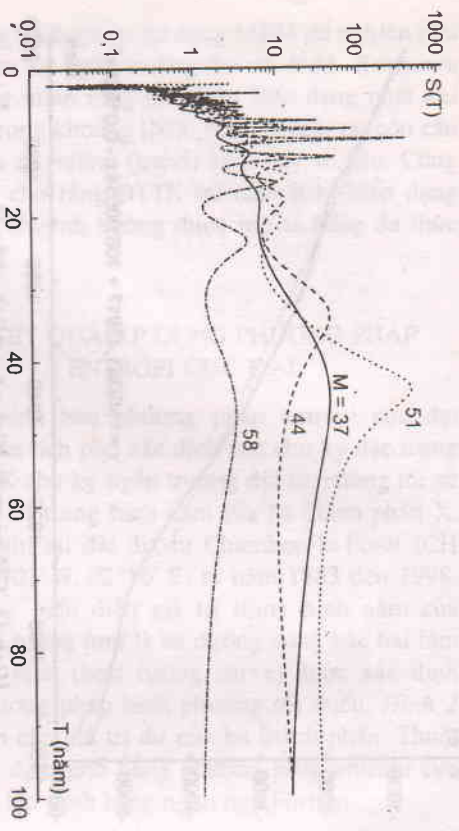
Hình 1b. Giá trị trung bình năm thành phần Y ghi tại đài địa từ Chambon-la-Forêt từ 1883 đến 1998 và đường cong bậc hai làm khớp tốt nhất



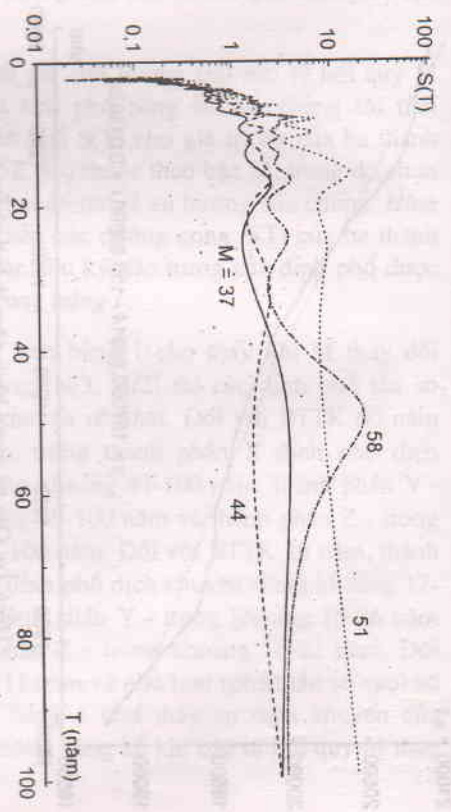
Hình 1c. Giá trị trung bình năm thành phần Z ghi tại đài địa từ Chambon-la-Forêt từ 1883 đến 1998 và đường cong bậc hai làm khớp tốt nhất



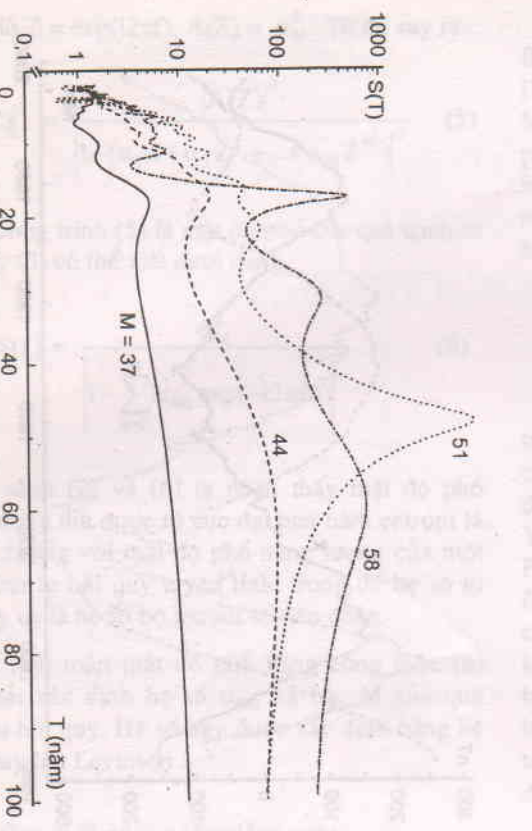
Hình 2. Giá trị dư của các thành phần X, Y và Z



Hình 3a. Phổ entropi cực đại của thành phần X với bậc tự hồi quy M khác nhau



Hình 3b. Phổ entropi cực đại của thành phần Y với bậc tự hồi quy M khác nhau



Hình 3c. Phổ entropi cực đại của thành phần Z với bậc tự hồi quy M khác nhau

2. Ảnh hưởng của bậc đa thức lên vị trí đỉnh phổ

Để đánh giá ảnh hưởng của bậc đa thức lên vị trí các đỉnh phổ, chúng tôi tách xu hướng các thành phần X, Y và Z bằng các đa thức bậc một, hai, ba và bốn với cùng bậc tự hồi quy $M = 51$. Kết quả tính mật độ (S(T)) đối với giá trị dư của ba thành phần này được biểu diễn trên hình 4a-c và các chu kỳ phổ đặc trưng được cho trong bảng 2.

Đồ thị (S(T)) cũng như số liệu trong bảng 2 cho thấy phần tần số thấp của phổ dịch chuyển rõ nhất trong cả ba thành phần. Đối với BTTK 60 năm và 30 năm, thành phần X có đỉnh phổ dịch chuyển trong khoảng 38-100 năm, thành phần Y - trong khoảng 33-100 năm và thành phần Z - trong khoảng 31-89 năm. Đối với BTTK 20 năm, các đỉnh phổ trong ba thành phần dịch chuyển tương đối không lớn, từ 18-26 năm. Đối với BTTK 11 năm và nhỏ hơn, sự dịch chuyển các đỉnh phổ gần như không có.

Bảng 1. Phổ entropi cực đại các thành phần X, Y và Z với các bậc tự hồi quy M khác nhau

M = 37	44	51	58
• Thành phần X <i>n = 2</i>			
-	100,0	100,0	-
45,6	-	44,4	47,6
-	34,1	-	-
-	17,9	20,4	23,6
-	15,2	14,5	15,5
11,5	-	10,7	12,1
-	9,5	-	9,7
-	-	-	8,2
7,7	7,7	7,7	7,1
6,0	6,4	6,0	6,2
5,7	5,6	5,4	5,1
4,9	4,9	4,7	4,7
-	4,0	4,3	3,9
• Thành phần Y <i>n = 2</i>			
-	100,0	100,0	-
55,2	-	-	49,6
-	32,1	26,0	-
17,1	16,3	15,7	16,6
11,1	9,5	9,9	10,5
8,0	-	8,1	8,8
-	7,5	-	7,8
-	-	-	6,8
-	6,3	6,1	6,2
5,0	5,0	4,9	5,0
4,0	4,0	4,0	4,0
• Thành phần Z <i>n = 2</i>			
100,0	65,3	48,1	59,5
-	-	-	31,2
-	-	21,8	-
18,2	17,2	16,0	17,4
10,3	-	11,4	11,0
-	8,7	9,3	8,9
-	-	7,9	-
-	-	6,7	6,3
-	-	5,9	5,5
4,3	4,3	4,4	4,9

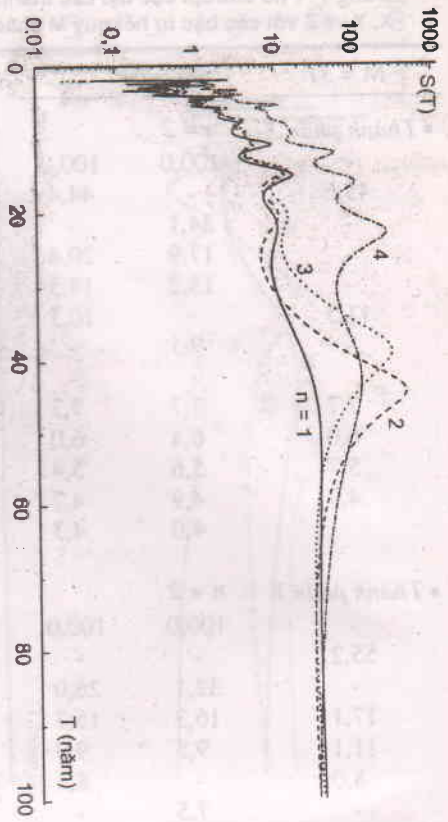
Bảng 2. Phổ entropi cực đại các thành phần X, Y và Z với các bậc đa thức n khác nhau

n = 1	2	3	4
• Thành phần X <i>M = 51</i>			
100,0	100,0	100,0	-
53,0	44,4	38,9	43,1
22,2	20,4	20,6	22,8
15,0	14,5	14,5	16,0
10,8	10,7	10,7	12,0
8,1	-	-	9,3
6,8	7,7	7,6	-
6,1	6,0	6,0	-
5,3	5,4	5,2	5,6
4,8	4,7	4,7	4,1
4,4	4,3	4,3	3,5
• Thành phần Y <i>M = 51</i>			
100,0	100,0	49,3	100,0
-	-	-	33,0
-	26,0	24,5	-
15,3	15,7	15,5	18,1
9,9	9,9	10,3	12,0
8,2	8,1	8,3	9,2
-	-	7,0	7,7
6,1	6,1	6,1	6,6
-	-	5,4	5,8
5,0	4,9	4,9	5,2
4,4	4,4	4,4	4,6
4,0	4,0	3,9	4,2
• Thành phần Z <i>M = 51</i>			
-	-	88,6	-
39,5	48,1	31,9	46,4
19,8	21,8	19,5	19,1
13,5	16,0	13,1	-
10,3	11,4	10,2	12,6
9,0	9,3	-	9,9
-	7,9	8,5	8,2
-	6,7	6,1	-
5,9	5,9	-	-
5,2	-	5,2	5,1
4,7	4,4	4,7	4,6
4,1	4,0	4,1	3,8

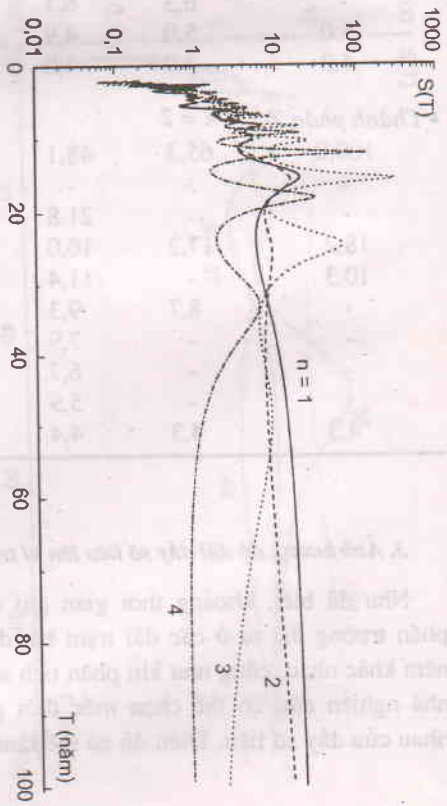
3. Ảnh hưởng độ dài dãy số liệu lên vị trí đỉnh phổ

Như đã biết, khoảng thời gian ghi các thành phần trường địa từ ở các đài trạm bắt đầu từ các năm khác nhau, cũng như khi phân tích số liệu các nhà nghiên cứu có thể chọn mốc thời gian khác nhau của dãy số liệu. Điều đó có thể làm thay đổi

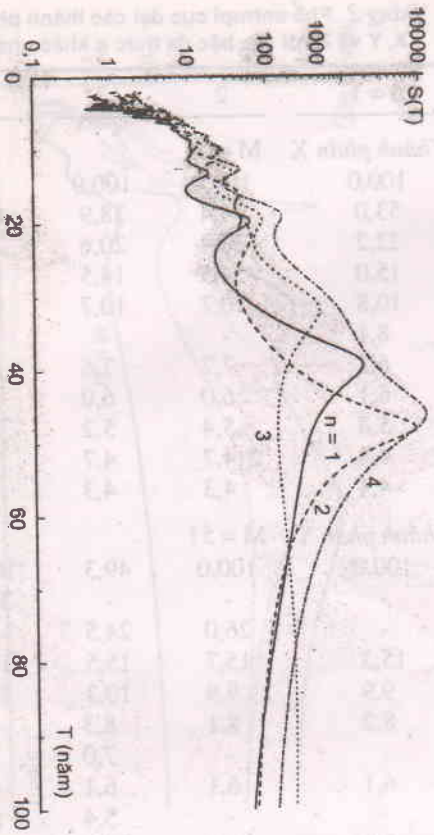
vị trí của các đỉnh phổ. Để chứng minh điều này, chúng tôi phân tích phổ các giá trị dư của ba thành phần X, Y và Z bắt đầu từ năm 1883, 1893 và 1903, trong đó chọn đa thức bậc hai mô tả xu hướng của chúng và cùng bậc tự hồi quy $M = 35$. Hình 5a-c biểu diễn mật độ phổ $S(T)$ của ba thành phần có các chu kỳ đặc trưng trình bày trong bảng 3.



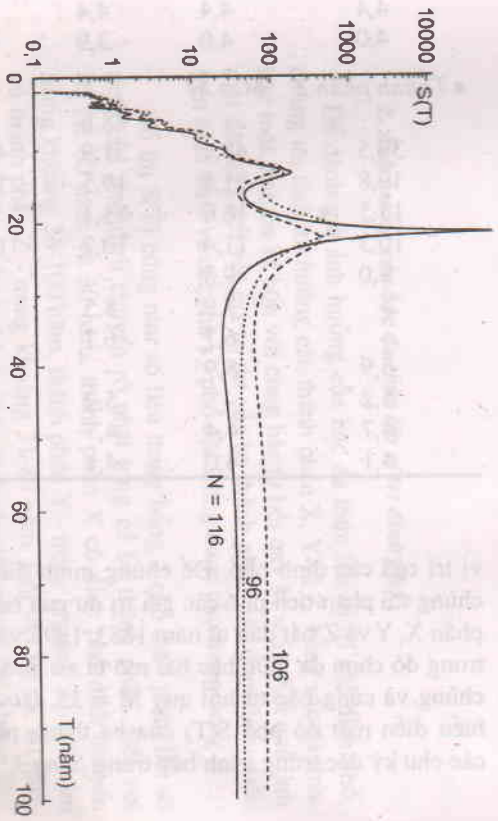
Hình 4a. Phổ entropi cực đại của thành phần X với các bậc đa thức n khác nhau



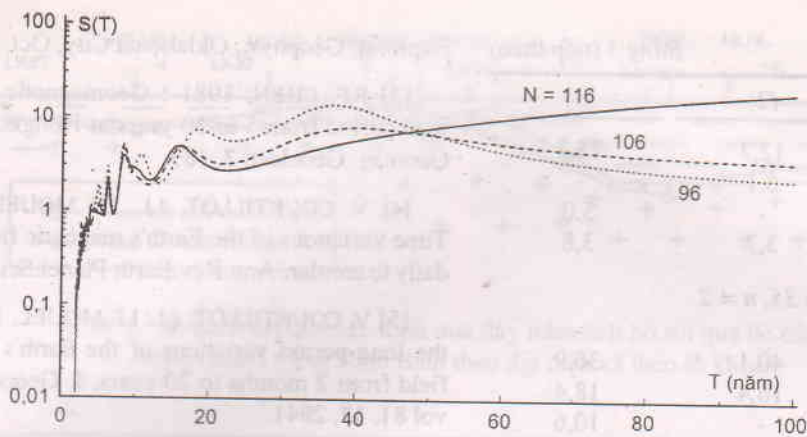
Hình 4b. Phổ entropi cực đại của thành phần Y với các bậc đa thức n khác nhau



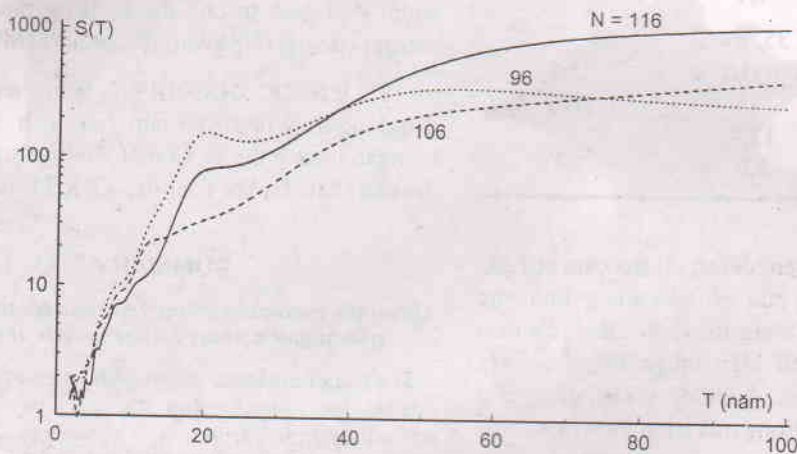
Hình 4c. Phổ entropi cực đại của thành phần Z với các bậc đa thức n khác nhau



Hình 5a. Phổ entropi cực đại của thành phần X trong các năm 1883-1998 ($N=116$), 1893-1998 ($N=106$) và 1903-1998 ($N=96$)



Hình 5b. Phổ entropi cực đại của thành phần Y trong các năm 1883-1998 (N=116), 1893-1998 (N=106) và 1903-1998 (N=96)



Hình 5c. Phổ entropi cực đại của thành phần Z trong các năm 1883-1998 (N=116), 1893-1998 (N=106) và 1903-1998 (N=96)

Số liệu trong bảng 3 cho thấy sự dịch chuyển rõ nhất các đỉnh phổ trong cả ba dãy số liệu chủ yếu xảy ra ở phần tần số thấp của phổ. Đối với các đỉnh phổ của BTTK 20 năm, 11 năm và nhỏ hơn, sự dịch chuyển của chúng là không đáng kể. Trong đó có các đỉnh phổ tương ứng với chu kỳ biến thiên trong khoảng 6-7 năm mà R.G. Currie đã phát hiện và cho rằng chúng có liên quan với kiểu dao động tự do của lớp biên nhân - Manti liên kết điện từ [6].

Các kết quả nhận được ở trên phù hợp với nhiều công trình khác đã được công bố trước đây, chẳng hạn như trong [3-8]. Việc áp dụng có hiệu quả phương pháp entropi cực đại đối với số liệu dài địa từ Chambon-la-Forêt cho phép chúng tôi áp dụng phương pháp này cho các số liệu dài trạm

trong nước. Tuy nhiên đến nay đây giá trị trung bình năm các thành phần trường địa từ ở các đài trạm nước ta có thời gian ghi chưa đủ dài, nhưng có thể tách được các đỉnh phổ chu kỳ ngắn hơn nhờ vào ưu điểm của phương pháp entropi cực đại.

Bảng 3. Phổ entropi cực đại các thành phần X, Y và Z trong các khoảng thời gian khác nhau

	Các năm		
	1883 -1998	1893 -1998	1903 -1998
	(1)	(2)	(3)

• Thành phần X $M = 35, n = 2$

68,6	68,8	-
21,5	22,4	20,9

Bảng 3 (tiếp theo)

(1)	(2)	(3)
13,3	12,7	13,2
6,2	6,1	-
5,0	-	5,0
-	3,7	3,8
• Thành phần Y $M = 35, n = 2$		
100,0	-	-
-	40,1	36,9
15,8	16,4	18,4
9,1	-	10,6
-	8,3	8,2
6,2	6,1	6,2
4,9	5,0	4,9
4,4	4,4	-
• Thành phần Z $M = 35, n = 2$		
100,0	100,0	55,7
18,8	-	20,1
-	12,4	-
4,1	3,6	3,3

Công trình thực hiện nhờ sự tài trợ kinh phí của chương trình nghiên cứu cơ bản trong lĩnh vực khoa học tự nhiên. Chúng tôi chân thành cảm ơn sự quan tâm tạo điều kiện thuận lợi của GsTs Nguyễn Thị Kim Thoa và những ý kiến đóng góp của Ts Lê Huy Minh trong quá trình thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J.G. BERRYMAN, 1978 : Choice of operator length for maximum entropy spectral analysis, Geophysics, 43, 7, 1384.
 [2] J. BURG, 1967 : Maximum entropy spectral analysis. Paper presented at 37th Meeting Soc.

Explorat. Geophys., Oklahoma City, Oct. 31.

[3] P.F. CHEN, 1981 : Geomagnetic variation with period from 5 to 30 years at Hongkong, J. [4] Geomag. Geoelect. 2, 189.
 [4] V. COURTILOT, J.L. LE MOUEL, 1988 : Time variations of the Earth's magnetic field: From daily to secular, Ann.Rev.Earth Planet.Sci., 18, 389.
 [5] V. COURTILOT, J.L. LE MOUEL, 1976 : On the long-period variations of the Earth's magnetic field from 2 months to 20 years, J. Geophys. Res., vol 81, 17, 2941.
 [6] R.G. CURRIE, 1973 : Geomagnetic line spectra - 2 to 7 years, Astrophys. Space Sci., 21, 425.
 [7] N.M. ROTANOVA, 1979 : Về phân tích phổ chuỗi thời gian trường địa từ bằng phương pháp entropi cực đại (Nga văn), Preprint, IZMIRAN.
 [8] LÊ NGỌC THANH, 1995. Phát triển lý thuyết dao động thủy từ xuyên tâm giải thích BTTK chu kỳ ngắn trường địa từ và một vài hiện tượng vật lý địa cầu khác. La Pts Toán-lý, TT KHTN&CNQG.

SUMMARY

Using the maximum entropy method for the study of geomagnetic short-period secular variation

The paper presents the maximum entropy method (MEM) for the studying the geomagnetic short-period secular variations. The MEM is applied to the annual mean values of the X,Y and Z components recorded at Chambon-la-Forêt Observatory. The obtained results form the basis for the spectral analysis of the annual mean values of the geomagnetic components recorded at observatories in Vietnam.

Ngày nhận bài : 29-12-1999

Phân viện Địa lý Tp HCM
 và Phân viện Vật lý Tp HCM