



## **Chương 7. Các phương pháp đo các thành phần trường từ quả đất**

### *Tôn Tích Ái*

*Địa từ và thăm dò từ.* NXB Đại học quốc gia Hà Nội 2006.

*Từ khoá:* Địa từ và thăm dò từ, Trường từ, Hiệu ứng trường từ, Palet Micôp, Bản mỏng năm ngang.

---

*Tài liệu trong Thư viện điện tử ĐH Khoa học Tự nhiên có thể được sử dụng cho mục đích học tập và nghiên cứu cá nhân. Nghiêm cấm mọi hình thức sao chép, in ấn phục vụ các mục đích khác nếu không được sự chấp thuận của nhà xuất bản và tác giả.*

---

## **Mục lục**

<b>Chương 7</b>	<b>Các phương pháp đo các thành phần trường từ quả đất .....</b>	<b>2</b>
7.1	Phương pháp tương tác từ .....	2
7.2	Phương pháp cảm ứng điện từ .....	8
7.3	Từ kế hạt nhân và từ kế lượng tử .....	10
7.4	Phương pháp đo đạc và xây dựng các bản đồ từ .....	12
7.4.1	Phương pháp đo từ hàng không .....	13
7.4.2	Phương pháp đo từ mặt đất .....	18

## Chương 7

# Các phương pháp đo các thành phần trường từ quả đất

Từ nhiều thế kỷ trước người ta đã tiến hành đo các yếu tố trường từ của quả đất.

Số trị và dấu của độ từ thiên  $D$  được xác định theo hiệu số giữa các phương vị thiên văn và phương vị từ của một vật thể xác định tại mỗi một điểm. Trong trắc địa, phương vị thiên văn được xác định theo các phương pháp đã có sẵn, còn phương vị từ được xác định bằng các dụng cụ đo từ.

Để đo giá trị tuyệt đối thành phần nằm ngang trường từ quả đất ( $H$ ) người ta thường dùng hoặc têđôlit từ nhằm xác định chu kỳ dao động của nam châm đồng thời với việc xác định góc lệch của một nam châm khác, hoặc dùng các từ kế thạch anh Lacua (QMH).

Để đo độ từ khuynh người ta dùng các máy đo độ nghiêng theo phương pháp cảm ứng hoặc dùng kim nam châm.

Hiện nay để đo giá trị tuyệt đối của vectơ cường độ trường từ của quả đất người ta dùng các từ kế hạt nhân. Các từ kế này ngày càng được sử dụng nhiều trong các lĩnh vực khác nhau. Ta hãy lần lượt xét đến một số nguyên lý đo từ được sử dụng từ trước đến nay, tuy rằng ngày nay các máy hiện đại đã dần dần thay thế các máy từ làm việc theo các nguyên lý cổ điển.

### 7.1 Phương pháp tương tác từ

Trong lịch sử phát triển phương pháp đo từ, các máy được chế tạo theo phương hướng này được phổ cập hơn cả. Các nam châm vĩnh cửu được bố trí dao động tự do xung quanh một trục nằm ngang. Mặt phẳng dao động là mặt phẳng thẳng đứng. Trục quay thường là một dao thạch anh hoặc một dây kim loại hay thạch anh đặt trong mặt phẳng nằm ngang. Mômen quay được tạo ra do sự tương tác giữa trường từ của nam châm và trường từ của quả đất, được cân bằng với mômen trọng lực của nam châm hay mômen xoắn của sợi dây treo nam châm trên đó.

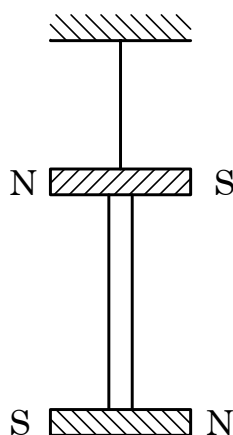
Khi nam châm được đặt ở vị trí nằm ngang, thành phần thẳng đứng của trường từ trái đất tạo nên mômen quay lớn nhất. Nam châm ở tư thế này được sử dụng trong các từ kế đo thành phần thẳng đứng. Ngược lại, nếu nam châm được đặt ở vị trí thẳng đứng thì mômen quay chủ yếu do thành phần nằm ngang của trường từ quả đất tạo ra và nam châm dạng này được sử dụng trong các từ kế đo thành phần nằm ngang.

Trong cả hai trường hợp trên, độ lệch của nam châm so với trục ngang hoặc trục thẳng đứng được dùng để biểu thị cường độ trường từ tại điểm đó. Nhờ một hệ thống quang học, góc lệch đó hoặc được phản ánh trên thang đo tuyến tính (từ kế M-2 của Liên Xô cũ) hoặc được bù trừ bằng trường từ của một nam châm khác (từ kế M-27). Trong trường hợp sau, trường từ của nam châm bù đóng vai trò đại lượng so sánh và được khắc độ trên một nút xoắn, dùng thay đổi vị trí của nam châm bù để điều chỉnh trường bù. Trong một số máy người

ta còn treo nam châm trên một sợi dây thẳng đứng (M-14 F). Nam châm dao động trong mặt phẳng nằm ngang, mômen quay của nó trong trường hợp này được cân bằng với mômen xoắn của dây treo.

Để đo cường độ trường từ người ta còn sử dụng hệ thống các nam châm dao động, gồm hai hoặc nhiều nam châm vĩnh cửu. Hệ thống này được gọi là hệ thống từ phiếm định. Hệ thống các nam châm phiếm định này thường có trong các từ kế có độ nhạy cao được dùng để xác định tính chất từ của đất đá (từ kế MA. 21).

Hệ thống từ phiếm định đơn giản nhất gồm hai nam châm có mômen từ bằng nhau và được kẹp chặt trên khung treo (Hình 7.1). Trục của hai nam châm đó ngược chiều nhau và cùng nằm trong một mặt phẳng.

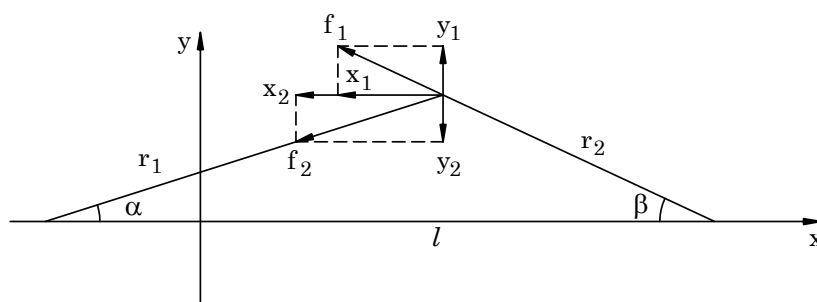


**Hình 7.1**

Hệ thống phiếm định

Với sự bố trí như vậy trường của các nam châm bù trừ lẫn nhau và hệ thống được định hướng theo tác dụng của mômen xoắn của dây treo. Điều này xảy ra trong trường hợp hệ thống được đặt trong trường từ đồng nhất. Nếu trường bên ngoài không đồng nhất thì trường của các thanh nam châm không bù trừ nhau hoàn toàn, lập tức trạng thái thăng bằng ban đầu sẽ bị huỷ bỏ và hệ thống quay về vị trí khác.

Góc quay này phụ thuộc vào mức độ bất đồng nhất của trường từ bên ngoài và mômen xoắn của dây treo.



**Hình 7.2**

### Trường từ của một nam châm

Hệ thống từ phiếm định có đặc điểm đo ổn định khi trường ngoài biến đổi đồng nhất, vì vậy thường được sử dụng trong các máy đo từ tính của mẫu nhằm loại trừ ảnh hưởng biến thiên trường từ của quả đất và các trường từ biến đổi ngoại lai khác. Ta hãy xét nguyên lý làm việc của các từ kế loại này.

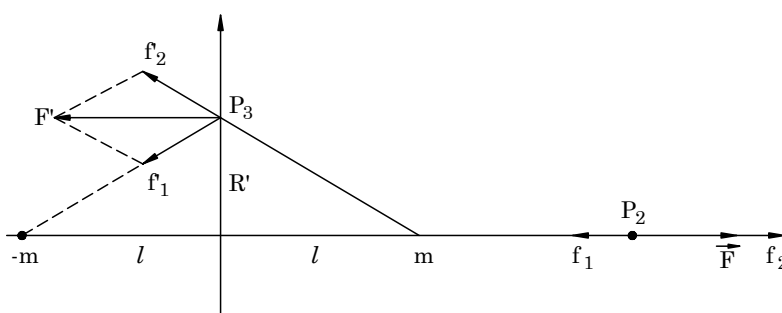
Giả sử, có một thanh nam châm với từ khối trên các cực là  $+m$  và  $-m$  (Hình 7.2), ta hãy khảo sát trường từ do nam châm đó gây nên tại các điểm khác nhau trong mặt phẳng chứa nam châm đó. Ta chọn hệ thống tọa độ  $x, y$  có trục hoành  $x$  trùng với trục từ của nam châm. Tại điểm  $P(x, y)$  lực từ gây nên do mỗi cực của nam châm sẽ là:

$$f_1 = \frac{\mu_0 m}{4\pi r_1^2}$$

và

$$f_2 = -\frac{\mu_0 m}{4\pi r_2^2} \quad (7.1)$$

Phân chia các lực  $f_1$  và  $f_2$  thành các lực thành phần theo các trục  $x, y$



**Hình 7.3**

Lực từ của nam châm tại điểm trên trục từ của nó

$$\begin{aligned} x_1 &= f_1 \cos \beta & x_2 &= f_2 \cos \alpha \\ y_1 &= f_1 \sin \beta & y_2 &= f_2 \sin \alpha \end{aligned}$$

Thành phần  $X = x_1 + x_2$  bằng:

$$X = -\frac{m(x-l)}{[(x-l)^2 + y^2]^{3/2}} - \frac{m(x+l)}{[(x+l)^2 + y^2]^{3/2}} \quad (7.2)$$

Trong trường hợp điểm quan sát nằm trên trục từ tại  $P_2$  (Hình 7.3) từ công thức (7.2) ta có:

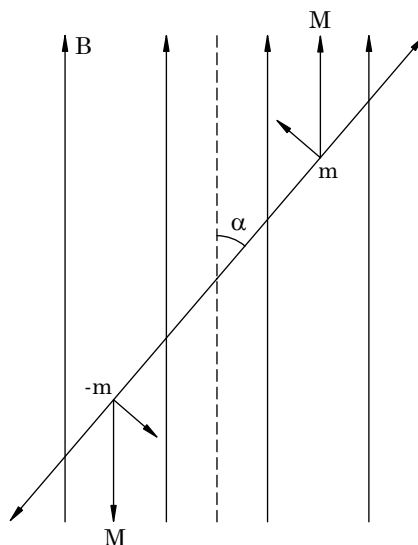
$$F = X = \frac{\mu_0 M}{2\pi R^3} \left(1 - \frac{l^2}{R^2}\right)^{-2} \quad (7.3)$$

với  $M = 2lm$ ,  $R$  là khoảng cách từ điểm  $P_2$  đến tâm nam châm.

Khai triển biểu thức (7.3) thành chuỗi ta có:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M}{R^3} \left( 1 + \frac{2l^2}{R^2} + \frac{3l^4}{R^4} + \dots \right) \quad (7.4)$$

Nếu  $l \ll R$  ta có thể viết (7.4) dưới dạng gần đúng:



**Hình 7.4**

Nam châm trong trường từ đồng nhất

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M}{R^3} \quad (7.5)$$

Nếu điểm quan sát  $P_3$  nằm trên trục tung  $y$ , thì cũng từ biểu thức (7.2) ta có:

$$F' = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{ml}{(l^2 + y^2)^{3/2}} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left( 1 - \frac{3}{2} \frac{l^2}{R^2} + \frac{15}{8} \frac{l^4}{R^4} - \dots \right)$$

Khi  $l \ll R$  ta có:

$$F' = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R^3} \quad (7.6)$$

Các công thức (7.2), (7.5), (7.6) được dùng để tính trường từ  $B$  của các nam châm có trong các máy đo từ.

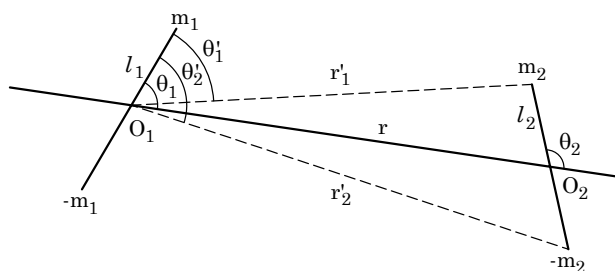
Khi nam châm được đặt trong trường từ đồng nhất với cảm ứng từ  $B$  thì sự tương tác giữa nam châm với trường từ sẽ gây nên một ngẫu lực. Dưới tác dụng của ngẫu lực đó nam châm tự quay quanh trục của mình và định hướng theo phương trường từ ngoài. Mômen quay của nó có độ lớn bằng:

$$P = 2ml \sin\alpha \quad B = MB \sin\alpha \quad (7.7)$$

Trong trường hợp trường từ bên ngoài không đồng nhất. Các thành phần lực không bằng nhau, nên ngoài chuyển động quay các lực từ còn gây nên chuyển động tịnh tiến và nam châm sẽ bị xô dịch vị trí trong trường từ.

Ta hãy chuyển sang xét một trường hợp khác phức tạp hơn, khảo sát sự tác dụng giữa hai nam châm cơ bản đặt cạnh nhau.

Giả sử, hai nam châm có mômen từ  $M_1$  và  $M_2$  được đặt trong mặt phẳng với các đặc trưng hình học như trong hình 7.5.



**Hình 7.5**

Tương tác giữa hai nam châm

Ta hãy khảo sát các lực tác dụng giữa chúng với nhau.

Trước hết xét lực tác dụng của trường từ nam châm thứ nhất lên nam châm thứ hai.

Thế tương tác từ của nam châm thứ nhất tại điểm  $+m_2$  sẽ là:

$$U_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M_1 \cos \theta_1'}{r_1'^2} m_2 = V_1 m_2 \quad (7.8)$$

trong đó

$$V_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M_1 \cos \theta_1'}{r_1'^2} \text{ là thế từ tương tác đơn vị, tương tự thế từ tương tác tại điểm } -m_2 \text{ là}$$

$U_2$  bằng:

$$U_2 = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M_1 \cos \theta_1'}{r_2'^2} m_2 = V_2 m_2 \quad (7.9)$$

Thế từ tổng cộng của nam châm thứ hai sẽ là:

$$U = U_1 - U_2 = m_2 (V_1 - V_2) \quad (7.10)$$

Nếu gọi thế từ tại  $O_2$  là  $V$ , thì

$$V_1 = V + \frac{\partial V}{\partial l} l_1$$

$$V_2 = V + \frac{\partial V}{\partial l} l_2$$

với

$$V = \frac{M_1 \cos \theta_1}{l^2}$$

và từ (7.10) thế từ tổng cộng  $U$  của nam châm thứ hai là:

$$U = M_2 \frac{\partial V}{\partial l_2} \quad (7.11)$$

Sau khi lấy vi phân ta nhận được biểu thức của thế từ nam châm thứ hai đặt trong trường từ của nam châm thứ nhất.

$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M_1 M_2}{r^3} (\sin \theta_1 \sin \theta_2 - 2 \cos \theta_1 \cos \theta_2) \quad (7.12)$$

Tương tự ta có thể nhận được biểu thức biểu diễn thế từ của nam châm thứ nhất đặt trong trường từ của nam châm thứ hai.

Khi nam châm thứ hai đặt ở vị trí tự do trong trường từ của nam châm thứ nhất, thế từ tương tác (7.12) đã tạo cho nó một lực chuyển động trong không gian. Thế năng tương tác từ này sẽ sinh ra công và theo định luật bảo toàn năng lượng ta có:

$$dU(x_1, x_2, x_3) = -dA(x_1, x_2, x_3) \quad (7.13)$$

Trong đó, A là công để hoàn thành sự dịch chuyển nam châm thứ hai trong trường từ của nam châm thứ nhất trên quãng đường  $\Delta L(x_1, x_2, x_3)$ . Từ (7.13) ta có:

$$\frac{\partial U}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial U}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial U}{\partial x_3} dx_3 = -[F_{x_1} dx_1 + F_{x_2} dx_2 + F_{x_3} dx_3] \quad (7.14)$$

trong đó

$$F_{x_1} = \frac{\partial U}{\partial x_1}; F_{x_2} = \frac{\partial U}{\partial x_2}; F_{x_3} = \frac{\partial U}{\partial x_3} \quad (7.15)$$

Nếu sự biến đổi thế năng tương tác từ chỉ để sinh công quay nam châm thứ hai quanh trục của nó thì khi lấy đạo hàm theo góc ta có mômen quay:

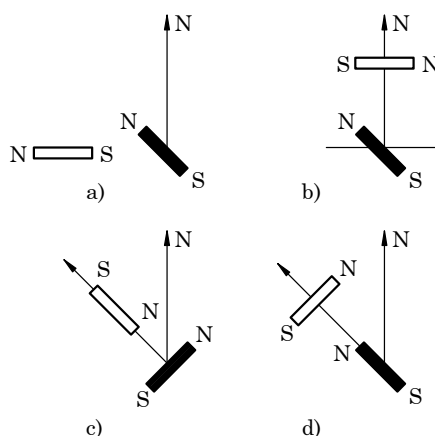
$$P = -\frac{\partial U}{\partial \theta} \quad (7.16)$$

Trong lý thuyết máy đo thành phần nằm ngang, người ta quan sát sự tương tác giữa hai nam châm đặt trong mặt phẳng nằm ngang và cùng chịu sự tác dụng của trường từ quả đất; nam châm thứ nhất được đặt cố định còn nam châm thứ hai có thể quay tự do xung quanh trục của nó. Người ta phân biệt bốn trường hợp (vị trí) sau đây:

1. Vị trí Gauss thứ nhất là trường hợp khi nam châm cố định đặt thẳng góc với kinh tuyến từ và nằm trên đường đi qua tâm của nam châm giao động (Hình 7.6.a). Trong trường hợp này từ (7.12)

$$P = \frac{\partial U}{\partial \theta_2} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2M_1 M_2}{r^3} \cos \theta_1 \quad (7.17)$$

2. Vị trí Gauss thứ hai là trường hợp khi nam châm cố định đặt thẳng góc với kinh tuyến từ (Hình 7.6.b).



**Hình 7.6**

a. Vị trí Gauss 1 b. Vị trí Gauss 2.c.  
Vị trí Lamon 1 d. Vị trí Lamon 2

Trong trường hợp này

$$P = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M_1 M_2}{r^3} \cos \theta_2 \quad (7.18)$$

3. Vị trí Lamon thứ nhất là trường hợp khi hai nam châm đặt thẳng góc với nhau. Tâm của nam châm dao động nằm trên đường kéo dài của nam châm thứ nhất. Trong trường hợp này ta có (Hình 7.6.c):

$$P = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2M_1 M_2}{r^3} \quad (7.19)$$

4. Vị trí Lamon thứ hai là trường hợp khi nam châm cố định đặt thẳng góc với nam châm dao động. Tâm của nam châm cố định nằm trên đường kéo dài của trục nam châm dao động (Hình 7.6.d). Trong trường hợp này:

$$P = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M_1 M_2}{r^3} \quad (7.20)$$

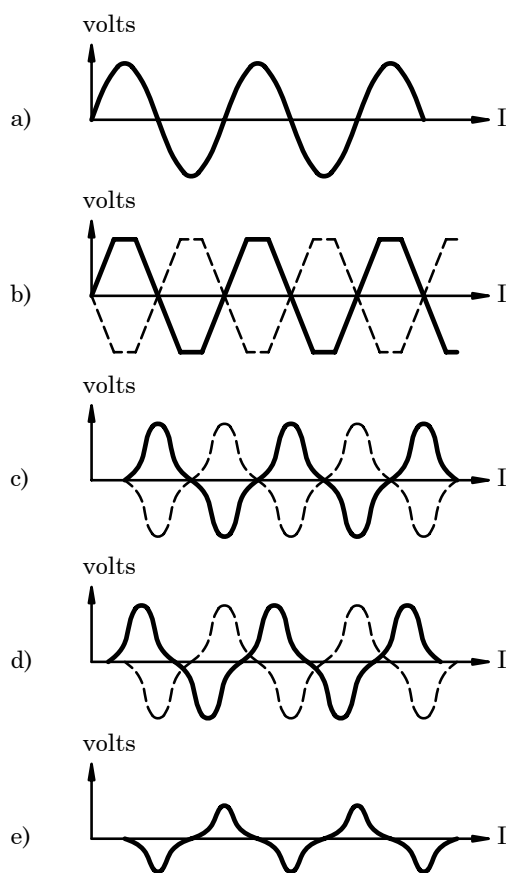
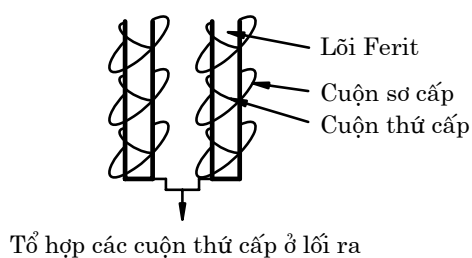
## 7.2 Phương pháp cảm ứng điện từ

Nguyên tắc cảm ứng điện từ được sử dụng đầu tiên trong các máy đo từ hàng không, trong một số máy đo từ tính và đo carota từ (đo từ cảm trong lỗ khoan).

Để đo cường độ trường, bộ phận cảm ứng được chế tạo dưới dạng một cuộn cảm. Khi quay trong trường từ, trong cuộn dây xuất hiện dòng cảm ứng có cường độ tỷ lệ với trường từ bên ngoài. Các từ kế làm việc theo nguyên tắc này được dùng để đo tương đối trường từ của quả đất, đồng thời các phép đo lại phụ thuộc vào sự định hướng của ống dây trong từ trường cần đo. Tính định hướng cuộn dây trong từ trường cần đo là một trong những nhược điểm nhưng đồng thời lại là một ưu điểm của từ kế làm việc theo nguyên tắc này. Với các từ kế loại này qua các góc định hướng khác nhau ta có thể đo được hoặc thành phần thẳng đứng hoặc thành phần nằm ngang. Trong quá trình minh giải số liệu các thành phần này dễ được phân tích hơn. Sự định hướng được thực hiện bằng cách đặt cuộn cảm có lõi sắt từ dọc theo hướng



của trường từ cần đo. Các quan sát được thực hiện bằng cách đo tổng các dòng điện thứ cấp trong các cuộn thứ cấp (Hình 7.7). Các cuộn thứ cấp này hoàn toàn giống nhau nhưng được cuốn ngược chiều nhau sao cho các dòng thứ cấp trong chúng ngược pha nhau, do đó



**Hình 7.7**

Nguyên tắc hoạt động của từ kế cảm ứng điện từ

Các đường đậm nét và chấm chấm thuộc về giá trị lõi ra của hai cuộn thứ cấp sức điện động ở lõi ra bù trừ nhau và bằng không. Sức điện động tổng ở lõi ra tỷ lệ với trường từ không đổi của quả đất và được đo liên tục, và đó cũng chính là đại lượng cần đo. Thật vậy, nếu như không có trường không đổi của quả đất cần đo, thì từ hai cuộn dây thứ cấp, sức điện động cảm ứng bằng không, ngược lại khi có mặt trường từ không đổi cần đo, thì do hiện tượng lệch pha, hiện tượng đối xứng bị phá vỡ, suất điện động tổng trở nên khác không, và giá trị càng lớn nếu như sự lệch pha càng lớn, tức là từ trường cần đo càng lớn. Các từ kế loại này thông thường có độ nhạy  $1nT$ , mặc dầu trong một số trường hợp đặc biệt độ nhạy có thể

đạt được đến 0,1nT. Trong các từ kế hàng không loại này nếu định hướng được chính xác các sensor dọc theo trường từ cần đo thì ta có thể đo được giá trị tuyệt đối của trường từ.

### 7.3 Từ kế hạt nhân và từ kế lượng tử

Trong những năm gần đây, trong công nghệ chế tạo các máy từ hiện đại, các loại từ kế làm làm việc theo nguyên lý mới được sản xuất ồ ạt và dần dần thay thế các từ kế làm việc theo nguyên lý cũ. Các từ kế này làm việc theo các hiệu ứng vật lý Larmo và Zeeman. Đó là các từ kế hạt nhân và lượng tử.

Nguyên lý đo dựa trên một biểu thức đơn giản giữa cảm ứng từ B và vận tốc góc Larmo của proton hay của electron có mômen cơ p và mômen từ  $\mu$ :

$$\omega = g_p B_0 \quad (7.21)$$

trong đó  $g_p$  được gọi là hệ số từ cơ của các hạt

Đối với êlêctron:

$$g_e = \frac{\mu_0}{p_e} = \frac{e}{2m_e} \quad (7.22)$$

Đối với prôtôn:

$$g_p = \frac{\mu_p}{p_p} = \frac{e}{2m_p} \beta \quad (7.23)$$

trong đó  $\beta$  là một hệ số hằng số nào đó. Hệ số từ cơ của điện tử có thể tính được, nhưng hệ số từ cơ của prôtôn lại phải đo trực tiếp vì  $\beta$  không liên hệ gì với các hằng số đã được biết trước.

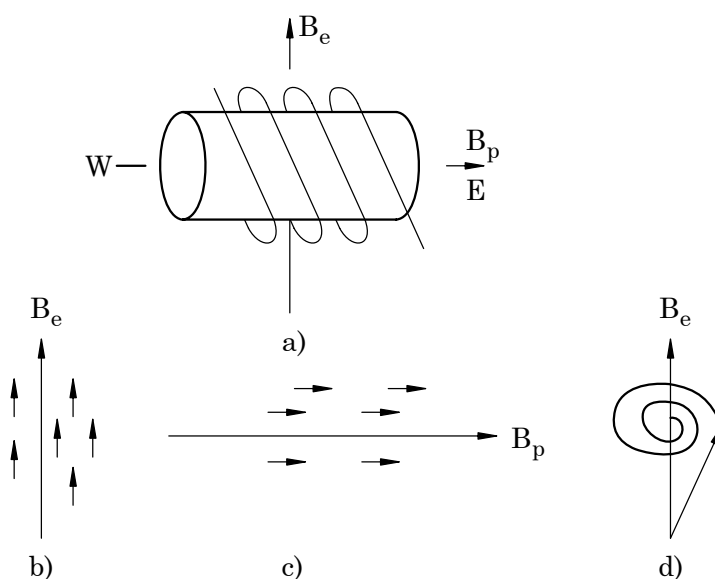
Công thức (7.21) chứng tỏ rằng khi đã xác định được  $g_p$ , ta có thể xác định được B nếu như đo được tần số tuế sai Larmo  $\omega$ . Muốn vậy cần phải tạo ra những thiết bị tiếp nhận tần số tuế sai rồi sau đó chuyển vào khung dao động tần số của thiết bị đo.

Vì  $g_p$  là hằng số vũ trụ không phụ thuộc vào các điều kiện bên ngoài như nhiệt độ, áp suất v.v... nên việc đo  $\omega$  sẽ không gặp phải các sai số đó. Vấn đề là phải gạt bỏ các sai số hệ thống của các dụng cụ đo.

Hiện nay quốc tế thừa nhận:

$$g_p = 2,67513 \cdot 10^4 \text{ Oe}^{-1} \text{ s}^{-1} = 2,67513 \text{ T}^{-1} \text{ s}^{-1}.$$

Dựa trên công thức (7.21) người ta đã chế tạo ra các từ kế cộng hưởng từ prôtôn để đo từ trường của quả đất. Các từ kế loại này đo tần số tuế sai của prôtôn trong môi trường giàu hydrô. Trước khi có chuyển động tuế sai các mômen từ của prôtôn được định hướng bằng từ trường mạnh có hướng tạo thành một góc khá lớn đối với trường từ cần đo. Trường định hướng này do một cuộn dây quấn quanh hộp đựng chất lỏng giàu hydrô tạo ra (Hình7.8). Sau khi ngắt trường từ định hướng, các prôtôn chuyển động tuế sai xung quanh trường từ cần đo và sau đó trở về định hướng như trước khi có trường định hướng tác dụng.



**Hình 7.8**

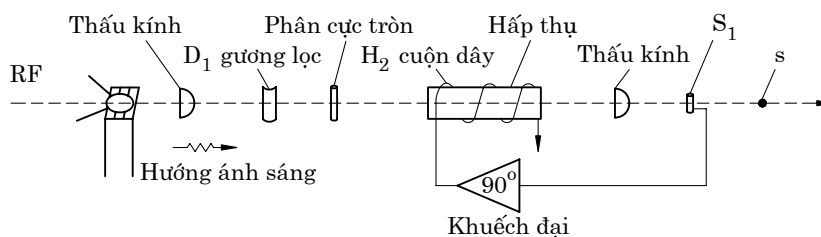
Nguyên tắc làm việc của từ kế prôtôn

- Sensor với trường từ quả đất cần đo.
- Sự định hướng của các prôtôn trong trường từ quả đất.
- Sự định hướng của prôtôn khi có trường từ phân cực.
- Chuyển động tuế sai của các prôtôn xung quanh trường từ của quả đất khi trường từ phân cực bị ngắt

Từ kế prôtôn có nhiều ưu điểm nhưng đồng thời cũng có nhược điểm chính: Đo đặc trường từ không được thực hiện liên tục. Trong trường hợp này cần phải có thời gian để định hướng các prôtôn theo hướng trường phân cực và cần thời gian để đo tần số tuế sai. Giảm các khoảng thời gian đó sẽ dẫn đến sự sụt giảm độ nhạy của từ kế. Nhược điểm này cần phải được khắc phục một cách nghiêm túc khi tiến hành đo từ hàng không hoặc đo từ trên các phương tiện chuyển động.

Loại từ kế mới nhất được chế tạo dựa trên hiệu ứng Zeeman quen thuộc trong lý thuyết vật lý hạt nhân. Từ kế hơi kiềm, có độ chính xác cùng cỡ hoặc lớn hơn từ kế hạt nhân, lần đầu tiên được đặt trên máy bay để đo trường từ toàn phần của quả đất. Từ kế loại này làm việc theo nguyên lý bơm quang học. Dưới tác động của trường từ ngoài các mức năng lượng nguyên tử của khí và hơi được tách ra nhiều mức phụ. Sự thay đổi tần số phát xạ hay hấp thụ khi êlêctron chuyển từ mức phụ này sang mức phụ khác được xác định bằng công thức:

$$\Delta f = \frac{\mu_B}{h} \frac{B}{\mu_0} \quad (7.24)$$



**Hình 7.9**

Nguyên lý hoạt động của từ kế lượng tử

trong đó

$\mu_B$  là manhêton Bo

$h$  là hằng số Plank

$B$  là cảm ứng từ.

Nếu đồng thời cùng với trường từ ổn định  $B$  ta cho tác dụng trường biến thiên  $B_v$  có phương vuông góc với phương  $B$  thì xảy ra hiện tượng cộng hưởng di chuyển mức phụ. Hiện tượng này lần đầu tiên được Bel và Blum phát hiện được trong môi trường hơi kim loại kiềm và được ứng dụng trong loại từ kế mang tên là từ kế lượng tử. Nguyên tắc làm việc của từ kế này như sau:

Một tia sáng phân cực tròn xuất phát từ hơi kim loại kiềm đi qua một bình chứa chính hơi kim loại đó. Bình được đặt trong trường từ cần đo  $B$ . Ánh sáng phân cực kích thích các hơi chuyển từ trạng thái năng lượng thấp sang trạng thái cao hơn (Hình 7.9) và ánh sáng bị hấp thụ. Kết quả là các nguyên tử trở nên bị nhiễm từ, bị phân rã đến trạng thái năng lượng không còn khả năng hấp thụ ánh sáng nữa. Bình khí lúc này trở nên trong suốt ánh sáng xuất phát từ nguồn trở nên cực đại. Nếu lúc này ta cho một trường từ biến thiên có phương thẳng góc với trường từ cần đo tác dụng vào thì các điện tử lại chuyển từ trạng thái năng lượng cao đến trạng thái thấp và bình khí kim loại lại trở nên hấp thụ ánh sáng. Năng lượng cần thiết để chuyển bình khí từ trạng thái trong suốt sang trạng thái hấp thụ ánh sáng là hàm số của trường từ cần đo. Như vậy trường từ được đo bằng cách thay đổi tần số trường biến thiên và bằng cách ghi giá trị tần số tại thời điểm mà bình khí trở nên hấp thụ ánh sáng. Từ kế loại này có độ nhạy cao hơn từ kế cộng hưởng từ hạt nhân. Tuy nhiên một nhược điểm lớn của từ kế loại này là nguyên lý bơm quang học không hoạt động khi trục của dụng cụ song song hoặc thẳng góc với trường từ cần đo. Nhược điểm này sẽ được khắc phục nếu như bộ phận cảm nhận từ có nhiều sensor hoạt động.

## 7.4 Phương pháp đo đặc và xây dựng các bản đồ từ

Các đo đặc từ phục vụ cho các mục đích khác nhau có thể được thực hiện trên mặt đất, trên các tàu biển hoặc bằng máy bay.

Trong thăm dò từ người ta thường đo cảm ứng từ  $B$  bằng phương pháp tương đối, và ngày nay với sự ra đời của các từ kế hạt nhân, trên diện rộng người ta có thể đo từ toàn phần. Việc đo đặc có thể được tiến hành theo diện tích hoặc theo tuyến tùy thuộc vào yêu cầu giải quyết nhiệm vụ đặt ra.

**Bảng 7.1.** Các thông số đo từ theo các tỷ lệ khác nhau

Tỷ lệ	Khoảng cách các tuyến (m)	Khoảng cách các điểm (m)	Sai số giới hạn của điểm vật lý so với mạng lưới trắc địa (m)	Độ lệch giới hạn của tuyến đo so với tuyến đã vạch cho 1 km (m)
1:50.000	500	50	120	10
1:25.000	250	25	60	10
1:10.000	100	20	25	3
1:5.000	50	10	12	3
1:2.000	20	5	5	1
1:1.000	10	2-5	2,5	1

Trong trường hợp đo theo diện tích, các điểm đo được phân đều trên toàn diện tích nghiên cứu theo các lộ trình, mạng lưới ô vuông hoặc chữ nhật. Khi đo theo tuyến các điểm đo có thể được bố trí linh động trên các tuyến được chọn. Do vậy, các kết quả đo cũng được xây dựng dưới dạng các bản đồ phủ toàn diện tích hoặc theo các tuyến dưới dạng đồ thị.

Mức độ chi tiết được khống chế bởi tỷ lệ của bản đồ đo. Các tỷ lệ này có thể bé, trung bình hoặc lớn. Tương ứng với các loại tỷ lệ, khoảng cách giữa các tuyến và các điểm đo được trình bày trong bảng 7.1. Các tỷ lệ từ 1:1.000.000 đến 1:100.000 thuộc loại bé và trung bình được sử dụng với mục đích nghiên cứu địa chất khu vực: Phân vùng kiến tạo, khoanh vùng triển vọng khoáng sản. Hiện nay việc đo từ theo các tỷ lệ bản đồ loại này chủ yếu được tiến hành từ trên máy bay.

Các tỷ lệ từ 1:50.000 đến 1:1.000 thuộc loại tỷ lệ lớn thường được sử dụng với nhiều mục đích khác nhau. Trong tìm kiếm người ta thường chọn các tỷ lệ 1:50.000 đến 1:10.000 với nhiệm vụ vẽ bản đồ địa chất tỷ lệ lớn. Trên các bản đồ này, trường từ có thể phản ánh các đới tiếp xúc, các đứt gãy kiến tạo, các khối macma thành phần mafic và siêu mafic, các thân quặng sắt từ có quy mô đáng kể. Các tỷ lệ 1:1.000 và lớn hơn được sử dụng trong cả bước thăm dò với mục đích khoanh vẽ các thân quặng, xác định hình dáng kích thước và vị trí không gian của các thân quặng đó, làm cơ sở cho việc bố trí các công trình khoan đào. Các đo đạc tỷ lệ này cũng thường được dùng mới mục đích nghiên cứu môi trường.

Ngoài các loại tỷ lệ trên, để phục vụ cho những mục đích nghiên cứu riêng người ta còn sử dụng các tỷ lệ cực lớn: 1:500; 1:200 hoặc lớn hơn. Các đo đạc theo tỷ lệ này được tiến hành trên mặt đất (đo micrô từ) hoặc đo dọc thành lỗ khoan.

Khi chọn tỷ lệ khảo sát người ta thường xuất phát từ nhiệm vụ nghiên cứu đề ra và từ đó quyết định độ chính xác cùng mức độ chi tiết cần đạt tới. Trên cơ sở đó, xác định máy đo và phương pháp đo thích hợp.

#### 7.4.1 Phương pháp đo từ hàng không

Đo từ hàng không thường được kết hợp với các phương pháp đo phóng xạ và điện hàng không.

Do việc đo từ hàng không có năng suất cao và có thể được tiến hành trên các vùng rừng núi rậm rạp, đồng lầy, sông, biển nên nó thường được sử dụng trong khảo sát với tỷ lệ đo đạc bé hoặc trung bình. Trong những trường hợp đó hiệu quả kinh tế mang lại sẽ lớn hơn nhiều so

với đo trên mặt đất. Ở các tỷ lệ 1:10.000 và lớn hơn phương pháp đo từ hàng không không được hoặc ít được sử dụng do nhiều hạn chế về phương pháp (độ cao, tốc độ bay,...).

Việc khảo sát từ hàng không được tiến hành theo một mạng lưới tuyến ở các độ cao xác định. Giá trị trường được ghi liên tục trên các băng từ, đĩa CD... theo tuyến bay. Hiện nay các phép ghi tương tự đã được thay thế bằng các phép ghi số.

Trước đây với các loại từ kế cảm ứng điện từ người ta thường đo số gia trường toàn phần  $\Delta T$ . Các giá trị được so về một điểm chuẩn. Nếu các giá trị đo được liên hệ với một điểm đã biết trước giá trị tuyệt đối thì ta có thể loại bỏ trường bình thường để tính giá trị dị thường  $\Delta T$ . Với việc xuất hiện từ kế prôtôn và từ kế lượng tử, các phép đo tuyệt đối trường T được thực hiện rộng rãi. Các máy này đo được môđun trường toàn phần T, nhờ vậy lượng thông tin thu thập được tăng lên nhiều.

### 1. Độ cao và tốc độ bay.

Do việc đo đạc được tiến hành trên máy bay ở các độ cao và tốc độ bay lớn, các máy đo có quán tính khác nhau và các yếu tố gây nên dị thường từ lại có giới hạn về kích thước và độ sâu, cho nên việc chọn chế độ khảo sát phải dựa trên quan hệ giữa các đại lượng vừa được nêu.

Các đối tượng cần nghiên cứu tạo nên các dị thường tương ứng với kích thước và độ sâu thể nằm của chúng. Kích thước đối tượng càng lớn thì diện tích dị thường do chúng gây ra càng rộng và do đó khoảng cách giữa các tuyến bay khảo sát có thể thưa. Cảm ứng từ B tỷ lệ nghịch với khoảng cách từ điểm quan sát tới các đối tượng gây dị thường theo các bậc khác nhau tùy thuộc vào hình dạng của các vật thể gây dị thường. Vì vậy khi vật thể nằm càng sâu, độ cao bay càng lớn thì biên độ dị thường càng bé.

Khả năng phát hiện dị thường lại phụ thuộc vào độ chính xác quan sát bao gồm độ nhạy của máy và hệ các phương pháp đo. Đối tượng nghiên cứu có từ tính càng lớn thì cường độ trường càng lớn, độ cao bay có thể cao hơn và mạng lưới bay có thể thưa hơn...

Như vậy để chọn các thông số bay hợp với các yêu cầu thực tế, người ta thường giải các bài toán thuận theo các giả định địa chất - địa vật lý đã biết trước đối với vùng khảo sát. Nói chung chế độ quan sát phải đảm bảo bắt gặp dị thường trên ba tuyến với biên độ ba lần lớn hơn sai số quy định. Sự lựa chọn đó có thể được kiểm tra bằng thực nghiệm.

Vận tốc bay lớn và quán tính của máy đo cao có thể dẫn đến sự sai lệch về các số liệu thu được về độ lớn cũng như vị trí. Sự sai lệch này (S) phụ thuộc vào hằng số thời gian ( $\tau$ ) của máy đo, độ cao bay (h) và vận tốc bay (v) theo quy luật:

$$S = \frac{\tau v}{h}$$

Từ biểu thức này ta thấy sự lựa chọn tốc độ và độ cao bay ràng buộc lẫn nhau ngoài ý muốn chủ quan. Các từ kế prôtôn cần có khoảng thời gian nghỉ, khoảng thời gian này tùy thuộc vào trình độ kỹ thuật của từng hãng chế tạo. Tốc độ của các máy bay cánh quạt thường từ 100 km/h đến 300 km/h. Các máy bay trực thăng có khả năng giảm tốc độ nhỏ hơn nhưng ngược lại lại cho giá thành khảo sát cao. Độ cao bay không thể chọn tùy ý. Nó phụ thuộc vào kích thước, độ sâu và độ lớn của trường từ B của đối tượng nghiên cứu, vào mức độ chi tiết và độ nhạy của máy ghi. Nếu vật gây dị thường có kích thước bé nằm sâu và từ tính yếu thì việc quan sát cần phải được tiến hành ở độ cao thấp với độ chính xác cao và ngược lại. Ngoài ra độ cao bay còn bị khống chế bởi điều kiện an toàn. Trong trường hợp bay kết hợp với đo cường

độ phóng xạ thì độ cao khảo sát theo quy định phải nhỏ hơn 100 m để đảm bảo thu nhận được trường gama.

## 2. Chọn tuyến bay, hướng dẫn đường bay và liên hệ tuyến bay với địa hình

Người ta phân tuyến bay đo ra thành các loại: tuyến chuẩn (kiểm tra), tuyến thường, tuyến liên kết và các tuyến phụ trợ.

Tuyến kiểm tra gồm một hoặc vài tuyến dài khoảng 20 km, chọn trong vùng trường ổn định trên đường bay đến vùng khảo sát. Chúng phục vụ mục đích kiểm tra máy trước và sau mỗi chuyến bay. Trong trường hợp trong vùng có các điểm đo tuyệt đối trên mặt đất, các tuyến kiểm tra được chọn cắt qua các điểm đó.

Tuyến thường là các tuyến khảo sát trên diện tích được chọn cắt thẳng góc với phương chủ đạo của các cấu trúc địa chất trong vùng. Các tuyến này được bố trí song song với nhau có khoảng cách phụ thuộc vào tỷ lệ khảo sát. Trên các tuyến thường độ cao bay cũng cần được ổn định. Trường hợp gặp địa hình núi cao người ta cho phép sử dụng các tuyến bay theo đường đồng mức hoặc bay trượt theo mặt địa hình. Nói chung khoảng cách giữa các tuyến được xác định bởi độ cao của máy bay, nhưng chính độ cao bay lại được chọn theo độ sâu thể nằm của các vật thể gây nên dị thường cần nghiên cứu. Để theo dõi được các dị thường ta cần phải quan sát được sự thay đổi dị thường từ khoảng  $-\frac{H_{Tm}}{2}$  đến  $\frac{H_{Tm}}{2}$ .

Như vậy đối với dị thường dạng nam châm một cực như hình trụ thẳng đứng, các lớp thẳng đứng có độ sâu lớn khoảng cách  $-\frac{H_{Tm}}{2}$  đến  $\frac{H_{Tm}}{2}$  bằng hai lần độ sâu cực trên của sơ đồ nam châm.

Với các vật thể dạng cầu, hình trụ tròn nằm ngang khoảng cách này khoảng 0,8 độ sâu đến tâm hình cầu hoặc tâm hình trụ.

Đối với các đá có chiều sâu mặt dưới giới hạn, tức là trường hợp khoảng cách giữa các cực của chúng giới hạn thì khoảng cách  $-\frac{H_{Tm}}{2}$  đến  $\frac{H_{Tm}}{2}$  vào khoảng giữa 0,8 đến 2,0 lần độ sâu đến cực trên. Vì vậy trong thực tế độ cao bay thường được chọn lớn hơn độ sâu đến cực. Trong trường hợp đó để có thể theo dõi được các dị thường khoảng cách giữa các tuyến không lớn hơn hai lần độ cao bay.

Tuy nhiên độ sâu của các vật thể gây dị thường trong vùng cần nghiên cứu nói chung không được biết trước mà thông thường được giả định theo các tài liệu địa chất địa vật lý có sẵn trong vùng.

Tuyến liên kết là tuyến móc nối các số liệu trên các tuyến thường. Chúng cắt ngang các tuyến thường và lập thành một mạng lưới liên kết. Người ta thường tiến hành bay lặp nhiều lần trên các tuyến liên kết, đồng thời các tuyến này được liên kết chính xác với các mốc địa hình. Phụ thuộc vào độ rộng của diện tích khảo sát, các tuyến liên kết được bố trí linh động với khoảng cách 20-50 km trong vùng trường tương đối ổn định.

Các tuyến phụ trợ phục vụ cho nhiều mục đích khác nhau. Khi phát hiện được các dị thường các tuyến đó được dùng trong bay chi tiết để nghiên cứu dị thường. Các tuyến phụ trợ cũng được dùng để kiểm tra và chuẩn máy định kỳ.

Để xác định đường cong ảnh hưởng phương vị người ta chọn một điểm mốc cố định trong vùng trường ổn định. Các tuyến này có hình hoa thị gồm 8 - 12 tuyến cắt qua điểm mốc đó.

Ngoài ra, trước khi lập phương án tổ chức bay trên mỗi vùng, người ta còn tổ chức các chuyến bay thám thính ở các độ cao lớn với mục đích quan sát địa hình và chọn lựa chế độ bay.

Công tác trắc địa giữ một vai trò quan trọng trong thăm dò từ hàng không, bao gồm các khâu kỹ thuật dẫn đường và xác định tuyến bay trên bản đồ địa hình.

Các tuyến bay thực tế không bao giờ giữ chính xác theo tuyến quy định, nhất là trong điều kiện bay ở độ cao bé. Độ sai lệch giới hạn được quy định theo từng loại tỷ lệ khảo sát, thường không quá 1/4 khoảng cách giữa các tuyến. Các chỉ tiêu không chế sai số được quy định trong bảng 7.2.

**Bảng 7.2** Các chỉ tiêu trắc địa trong đo từ hàng không

Tỷ lệ khảo sát	Khoảng cách đánh dấu vị trí máy bay (km)	Sai số vị trí máy bay tối đa (m)	Độ lệch tuyến bay thực tế tối đa (m)	Sai số liên hệ tuyến trên bản đồ
1:1000000	40	1000 -2000	2000 – 4000	-
1:500 000	30	500– 1000	1000 – 2000	-
1:200 000	25	200 – 400	400 – 800	-
1:100 000	20	100 – 200	200 – 400	200 – 300
1: 50 000	15	50–100	100 – 200	100 – 200
1: 25 000	10	25 – 50	50 – 100	50 – 100

Để phục vụ cho việc dẫn đường và thành lập các bản đồ, đồ thị địa vật lý người ta phải sử dụng đến các bản đồ địa hình quốc gia. Bản đồ địa hình phải có tỷ lệ lớn hơn hoặc bằng tỷ lệ khảo sát của phương án. Các tuyến bay được kẻ trên bản đồ địa hình có đánh dấu các mốc dự kiến. Hoa tiêu có nhiệm vụ dẫn đường bay không chệch quá mức quy định.

Việc kiểm tra vị trí đường bay được tiến hành bằng phương pháp chụp ảnh địa hình hoặc bằng vô tuyến định vị. Những năm gần đây, vô tuyến định vị được sử dụng rộng rãi trong thăm dò từ hàng không với các hệ thống đo góc, hệ thống đo khoảng cách hoặc hệ thống hỗn hợp.

Trong hệ thống đo góc, người ta xác định hướng từ điểm cần xác định tọa độ đến đài phát với một số hướng chuẩn. Với hệ thống đo khoảng cách người ta xác định được khoảng cách tới một đài phát hay hiệu khoảng cách giữa điểm cần xác định tọa độ đến hai đài phát. Hệ thống hỗn hợp cho phép xác định cả hai đại lượng vừa nói.

Nguyên tắc hoạt động của máy vô tuyến định vị như sau: Người ta sử dụng ba trạm thu phát vô tuyến, một đặt trên máy bay có tọa độ di động, hai được đặt trên mặt đất tại các vị trí đã xác định được tọa độ. Từ máy bay các tín hiệu có tần số xác định được phát đi. Các trạm thu trên mặt đất sau khi nhận được tín hiệu đó lập tức phát đi các tín hiệu của mình tới trạm thu đặt trên máy bay. Đo thời gian sóng đi và về hoặc hiệu số pha giữa sóng đi và sóng về ta có thể xác định được khoảng cách từ máy bay đến trạm trên mặt đất và từ đó là tọa độ của máy bay.



Thiết bị hiện đại được thiết kế dựa trên hiệu ứng Doppler về sự phụ thuộc tần số vào tốc độ bay:

$$F_0 = \frac{2f_s}{c} V_g \cos \gamma$$

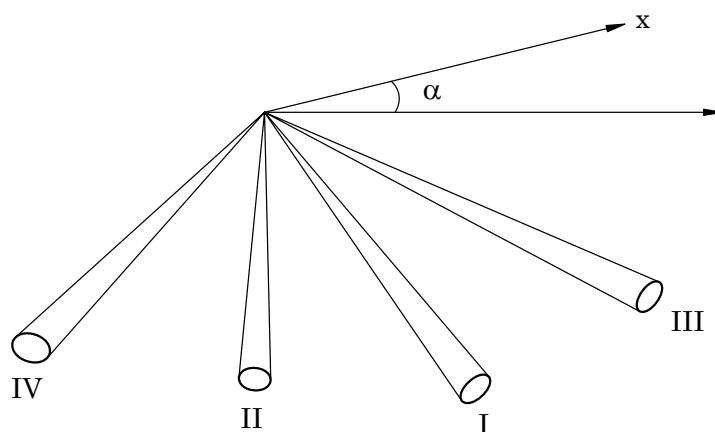
với:

$f_s$  là tần số sóng phát từ máy bay.

$c$  vận tốc ánh sáng.

$\gamma$  góc nghiêng của chùm sóng phát từ máy bay với phương thẳng đứng.

$V_g$  tốc độ của máy bay.



**Hình 7.10**

Sơ đồ bố trí hệ thống vô tuyến định vị

Hệ thống Doppler được đặt trên máy bay phát bốn chùm sóng radar theo các phương nhất định và thu lại sau khi được phản xạ từ mặt đất. Biết góc lệch của đường bay và tốc độ bay ta có thể xác định được tuyến bay thực tế. Để xác định góc lệch, hệ thống được thiết kế có hiệu tần số giữa các cặp chùm sóng tương ứng (I,II) và (III,IV) (Hình 7.10) bằng không khi ăng ten trùng với tuyến bay. Nếu lệch hướng thì mô tơ tự ngẫu sẽ quay ăng ten về hướng tuyến lý thuyết và góc lệch cần biết sẽ là góc giữa trục ăng ten và trục máy bay. Khoảng cách  $\Delta S$  giữa máy bay và điểm gốc sẽ là tích số giữa tốc độ với thời gian bay.

Hệ thống Doppler hiện đại có thiết bị máy tính điện tử cho phép xác định vị trí máy bay tại mỗi thời điểm và trở lại định hướng máy bay theo hướng cần thiết sau khi đã xác định được tuyến bay thực tế. Hoa tiêu chỉ cần giữ đồng hồ chỉ thị ở một vị trí cố định.

Hệ thống Doppler đảm bảo sai số xác định khoảng cách không quá  $\pm 0,2\%$  và xác định góc  $\pm 0,2^\circ$ .

Việc sử dụng vô tuyến định vị để xác định tuyến bay tuy có nhiều ưu việt song lại gặp sai số lớn trong điều kiện địa hình phức tạp. Trong trường hợp này có thể dùng phương pháp chụp ảnh. Trong phương pháp này, các mốc đánh dấu được chụp lại một vài “pô” chòm lên nhau. Việc chụp ảnh liên tục hoặc chụp phủ diện tích được tiến hành dọc theo tuyến chuẩn hoặc trên các dị thường. Tỷ lệ ảnh phải xấp xỉ bản đồ bay để tiện xác định vị trí các mốc trên bản đồ địa hình. Để chọn máy ảnh thích hợp người ta sử dụng công thức:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{h}$$

trong đó:

f - tiêu cự của máy ảnh

h - độ cao bay

m - là mẫu số của tỷ lệ bản đồ.

### 3. Hiệu chỉnh và thành lập các đồ thị, bản đồ

Trong khảo sát từ hàng không số gia trường từ, hoặc trường từ toàn phần được ghi liên tục hoặc ghi ngắt quãng với khoảng thời gian ngắn và đều. Các giá trị đo được cần được chuyển về đơn vị nT và được gắn với các vị trí tương ứng trên tuyến bay. Các số liệu cần được hiệu chỉnh cho hiện tượng dịch chuyển điểm không (nếu đo tương đối bằng các từ kế cảm ứng điện từ), ảnh hưởng phương vị, ảnh hưởng biến thiên ngày đêm, gradient trường bình thường. Do máy bay chịu sự từ hoá bởi thành phần trường dọc theo thân nên tùy thuộc vào hướng bay mà các thành phần này có những giá trị khác nhau tùy theo hướng bay. Gần đây người ta đã thiết kế các máy bay tự bù ảnh hưởng của phương vị.

Việc hiệu chỉnh biến thiên ngày đêm và gradient trường từ bình thường được tiến hành theo số liệu của các trạm địa từ và bản đồ trường từ bình thường quy về niên đại khảo sát.

Các giá trị T đo được được sử dụng để thành lập các bản đồ từ, đồng thời người ta cũng thành lập bản đồ  $\Delta T_0$ . Các giá trị  $\Delta T$  được tính theo công thức sau:

$$\Delta T = |T| - |T_0|$$

với  $T_0$  là giá trị trường từ bình thường lấy từ bản đồ trường từ bình thường.

Các số liệu  $\Delta T$  được xây dựng trên các bản đồ, đồ thị và các bản đồ đẳng trị theo tỷ lệ khảo sát. Tỷ lệ trường trên bản đồ, đồ thị có thể được chọn tùy ý với yêu cầu bản vẽ có độ phân giải cao. Khoảng cách giữa các đường đẳng trị (tiết diện của các đường đẳng trị) thường được chọn bằng ba lần sai số khảo sát.

Để đánh giá sai số khảo sát ta sử dụng các số liệu trên các đo lặp trên một hoặc nhiều đoạn tuyến, hoặc tại các điểm giao cắt giữa các tuyến thường và tuyến chuẩn. Sai số bình phương trung bình được tính theo công thức:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{2n}}$$

với:

$\delta$  là hiệu số giá trị đo lần thứ nhất và lần hai giá trị trường từ.

n là số điểm được sử dụng để tính sai số.

### 7.4.2 Phương pháp đo từ mặt đất

Mặc dù phương pháp từ hàng không có nhiều ưu việt, nhưng nó vẫn không thay thế được công việc đo từ trên mặt đất. Phương pháp đo từ trên mặt đất cho phép nghiên cứu một cách tỷ mỉ đối tượng gây từ với độ chính xác cao.

Các tỷ lệ thường dùng là 1:50.000, 1:25.000, 1:10.000, 1:5.000 và 1:2.000, tùy thuộc vào yêu cầu mức độ chi tiết của khảo sát. Mạng lưới tuyến có thể chọn là ô vuông hay chữ nhật tùy thuộc vào đối tượng nghiên cứu có dạng đẳng thước hay có dạng của một vật thể hai

chiều. Các tuyến có phương thẳng góc với đường phương giả định (trục dị thường), được vạch theo các dụng cụ trắc địa.

Trong trường hợp khảo sát ở những vùng hiểm trở với tỷ lệ bé, người ta có thể sử dụng các lộ trình đo dọc theo suối, đường mòn, đê đập theo phương pháp xác định vị trí điểm đo bằng các công cụ trắc địa thô sơ.

Các kết quả đo thực địa được biểu diễn dưới dạng đồ thị hay các bản đồ đẳng trị theo tỷ lệ tương ứng với tỷ lệ khảo sát.

Khi minh giải địa chất các dị thường từ, người nghiên cứu cần phải tính đến các số liệu địa chất và các số liệu địa vật lý khác có sẵn trong vùng. Tuy nhiên cần phải nhớ rằng không được dùng các số liệu địa chất, địa vật lý có sẵn để khẳng định các kết quả minh giải mà chúng chỉ được dùng để phát hiện thêm các kết luận mới bổ sung hoặc chính xác thêm các số liệu đã có.