

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

PHẠM NGỌC CHUNG

**NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG NHIỆT CỦA VỆ TINH NHỎ
TRÊN QUỸ ĐẠO THÁP CHỊU TÁC DỤNG
CỦA MÔI TRƯỜNG NHIỆT VŨ TRỤ**

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KỸ THUẬT CƠ KHÍ VÀ CƠ KỸ THUẬT**

Hà Nội – 2019

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ -
Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học 1: GS. TSKH. Nguyễn Đông Anh

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. Đinh Văn Mạnh

Phản biện 1: GS.TS. Trần Ích Thịnh

Phản biện 2: GS.TS. Nguyễn Thái Chung

Phản biện 3: PGS.TS. Đào Như Mai

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp Học viện,
hợp tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và
Công nghệ Việt Nam vào hồi, ngày tháng năm 2019

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Bài toán ứng xử phi tuyến của các hệ động lực là vấn đề được quan tâm nghiên cứu rộng rãi từ cộng đồng các nhà khoa học và kỹ thuật trên thế giới trong nhiều thập kỷ vừa qua. Trong lĩnh vực công nghệ không gian, bài toán phân tích nhiệt vệ tinh là một trong những bài toán phức tạp nhưng lại có vai trò quan trọng bởi vì nó liên quan đến sự hoạt động của các thiết bị vệ tinh trên quỹ đạo. Người ta có thể tiếp cận giải bài toán phân tích nhiệt vệ tinh thông qua các công cụ tính toán số được đóng gói trong các phần mềm chuyên biệt. Tuy nhiên nhược điểm của cách tiếp cận này là khối lượng tính toán lớn và mất nhiều tài nguyên máy tính. Khi thay đổi các thông số thiết kế, quá trình tính có thể đòi hỏi phải thực hiện lại từ đầu, dẫn đến sự “đắt đỏ” về chi phí thời gian tính toán. Hệ quả là có thể giảm hiệu suất công việc ở mức độ nào đó. Trong nhiều tình huống, người ta chỉ ra rằng phương pháp giải tích có thể chiếm ưu thế về sự tiện lợi và thời gian tính toán, vì nó có thể ước lượng nhanh đáp ứng nhiệt của một thành phần vệ tinh nào đó với độ chính xác nhất định. Tuy nhiên, lĩnh vực phân tích nhiệt cho vệ tinh là lĩnh vực khá đặc thù, hiện nay có rất ít các công cụ giải tích hiệu quả để giải quyết bài toán này vì có sự xuất hiện của số hạng phi tuyến bậc bốn liên quan đến bức xạ nhiệt, vốn gây khó khăn trong các tính toán giải tích. Vì những lý do cơ bản ở trên mà tác giả đã chọn tên đề tài của luận án tiến sĩ “*Nghiên cứu đáp ứng nhiệt của vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp chịu tác dụng của môi trường nhiệt vũ trụ*” bằng việc đề xuất một công cụ giải tích hiệu quả là sử dụng phương pháp tuyến tính hóa tương

đương theo tiêu chuẩn đối ngẫu mới được phát triển gần đây cho các hệ động lực phi tuyến.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- Xây dựng các mô hình nhiệt một nút, hai nút và nhiều nút với các mô hình tải nhiệt khác nhau tác động lên vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp của Trái đất.

- Tìm được nghiệm dưới dạng giải tích của các phương trình cân bằng nhiệt của vệ tinh bằng phương pháp tuyến tính hóa tương đương theo tiêu chuẩn đối ngẫu.

- Nghiên cứu và phân tích được số ứng xử định tính của nhiệt độ vệ tinh trong các mô hình nhiệt.

3. Phạm vi nghiên cứu

Luận án giới hạn trong phạm vi nghiên cứu các vệ tinh cỡ nhỏ hoạt động ở quỹ đạo thấp của Trái đất; mô hình nghiên cứu giới hạn ở một nút, hai nút, sáu nút và tám nút.

4. Phương pháp nghiên cứu của đề tài

Luận án sử dụng các phương pháp giải tích kết hợp với các phương pháp số, cụ thể:

- Sử dụng các phương pháp tuyến tính hóa tương đương, phương pháp xấp xỉ theo Grande để tìm đáp ứng của một số mô hình nhiệt;

- Sử dụng phương pháp Runge-Kutta 4 giải số phương trình vi phân cân bằng nhiệt làm cơ sở để đánh giá độ chính xác của phương pháp giải tích. Sử dụng phương pháp Newton-Raphson giải hệ đại số phi tuyến thu được trong quá trình tuyến tính hóa phương trình cân bằng nhiệt.

4. Bố cục của luận án

Luận án gồm phần Mở đầu; các Chương 1, 2, 3 và 4; phần Kết luận; Danh mục các công trình nghiên cứu của tác giả liên quan đến nội dung luận án, và Tài liệu tham khảo.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ BÀI TOÁN PHÂN TÍCH NHIỆT VỆ TINH

- Chương 1 trình bày các vấn đề tổng quan về vệ tinh và tình hình nghiên cứu của bài toán phân tích nhiệt cho vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp của Trái đất.

- Ở quỹ đạo thấp, vệ tinh chịu tác động của ba nguồn nhiệt chính bao gồm: bức xạ mặt trời trực tiếp, bức xạ albedo và bức xạ hồng ngoại của Trái đất. Trong luận án, các tải này được thiết lập dưới dạng các biểu thức giải tích, và chúng có thể được xử lý dễ dàng cho các tính toán kỹ thuật.

- Tác giả trình bày quá trình xây dựng mô hình nhiệt cho vệ tinh nhỏ dựa trên phương pháp tham số phân bố để thu được hệ phương trình vi phân phi tuyến cho cân bằng nhiệt của các nút. Để đi đến phương trình cân bằng nhiệt, tác giả diễn giải cụ thể các biểu thức và ý nghĩa vật lý cho các nút nhiệt, các tính chất nhiệt tương ứng liên quan đến bài toán phân tích nhiệt vệ tinh (chẳng hạn nhiệt dung, hệ số dẫn nhiệt, hệ số bức xạ...). Đối với vệ tinh chuyển động trên quỹ đạo thấp của Trái đất, quá trình truyền nhiệt giữa các nút thông qua hai hình thức truyền nhiệt chủ yếu là dẫn nhiệt và bức xạ nhiệt (quá trình đối lưu nhiệt được xem là không đáng kể).

CHƯƠNG 2

PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG NHIỆT CỦA VỆ TINH NHỎ

TRÊN QUỸ ĐẠO THẤP DỰA TRÊN MÔ HÌNH NHIỆT MỘT NÚT

2.1. Đặt vấn đề

Phân tích nhiệt cho vệ tinh là vấn đề quan trọng vì nó liên quan đến sự hoạt động của các thiết bị vệ tinh khi chuyển động trên quỹ đạo. Đối với vệ tinh cỡ nhỏ, vấn đề phân tích nhiệt có thể đưa về mô hình nhiệt với một số nút nhất định. Trong chương này mô hình nhiệt

một nút được xem xét. Ý nghĩa của mô hình nhiệt một nút là ở chỗ: (i) đây là mô hình đơn giản có thể giúp tính toán một cách sơ bộ nhiệt độ của vệ tinh, hoặc nhiệt độ của một thành phần hay thiết bị nào đó; (ii) từ tính toán này giúp các nhà thiết kế giảm “chi phí” tính toán trong giai đoạn tiền thiết kế của vệ tinh, nhất là vấn đề ước lượng nhiệt với các đầu vào nhiệt giả định trong phòng thí nghiệm gần sát với đầu vào nhiệt trên quỹ đạo thấp của Trái đất.

Đối với mô hình một nút, coi vệ tinh là một vật thể đơn nhất trao đổi nhiệt với môi trường không gian. Hình thức trao đổi nhiệt là vệ tinh hấp thụ nhiệt từ môi trường và bức xạ nhiệt ra ngoài không gian xung quanh nó. Theo nguyên lý cân bằng nhiệt động ta thu được phương trình cân bằng nhiệt cho vệ tinh cho mô hình một nút:

$$CT = -A_{sc} \varepsilon \sigma T^4 + Q_s f_s(vt) + Q_a f_a(vt) + Q_e, \quad (2.1)$$

trong đó C là nhiệt dung, $T = T(t)$ là nhiệt độ nút phụ thuộc thời gian, A_{sc} là diện tích của bề mặt ngoài vệ tinh, ε là hệ số phát xạ bề mặt vệ tinh, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ WK}^{-4} \text{ m}^{-2}$ là hệ số Stefan-Boltzmann; thành phần $Q_s f_s(vt) + Q_a f_a(vt) + Q_e$ là tải nhiệt đầu vào, gồm nhiệt bức xạ Mặt trời $Q_s f_s(vt)$, nhiệt albedo Trái đất $Q_a f_a(vt)$, nhiệt hồng ngoại Q_e mà vệ tinh nhận được do Trái đất phát ra.

2.2. Tải nhiệt đầu vào

- *Bức xạ mặt trời*: Lượng nhiệt mặt trời mà vệ tinh nhận được là một hàm có giá trị không đổi và khác không khi vệ tinh nằm trong vùng sáng, nhưng có giá trị bằng không khi vệ tinh nằm trong vùng bóng tối, tức là:

$$Q_{sol} = Q_s f_s(vt) = G_s A_{sp} \alpha_s f_s(vt), \quad (2.2)$$

trong đó hàm $f_s(vt)$ là hàm mô tả sự biến đổi ngày-đêm của bức xạ mặt trời. Hàm $f_s(vt)$ có dạng sóng vuông với $f_s(vt) = 1$ nếu vt

thuộc vào miền $[0, \mu\pi] \cup [(1-\mu/2)2\pi, 2\pi]$ và $f_s(vt) = 0$ nếu vt thuộc miền $(\mu\pi, (1-\mu/2)2\pi)$ trong một chu kỳ quỹ đạo. Ở đây $\mu = P_{il} / P_{orb}$ là tỷ số giữa thời gian chiếu sáng $P_{il}(s)$ và chu kỳ quỹ đạo $P_{orb}(s)$.

- *Bức xạ albedo của Trái đất*: Khi mặt trời chiếu sáng xuống bề mặt Trái đất, một phần năng lượng bị bề mặt Trái đất hấp thụ, còn phần kia bị phản chiếu trở lại không gian. Phần phản chiếu sẽ tác động trực tiếp đến vệ tinh được gọi là bức xạ albedo trái đất. Tải nhiệt albedo mà vệ tinh hấp thụ được tính như sau:

$$Q_{alb} = Q_a f_a(vt) = a_e G_s A_{sc} F_{se} \alpha_s f_a(vt), \quad (2.3)$$

trong đó a_e là hệ số albedo, A_{sc} là diện tích của cả vệ tinh, F_{se} là hệ số quan sát Trái đất khi nhìn từ vệ tinh; $f_a(vt)$ là hàm số biểu diễn sự thay đổi ngày-đêm của tải nhiệt albedo với $f_a(vt) = \cos(vt)$ nếu vt thuộc miền $[0, \pi/2] \cup [3\pi/2, 2\pi]$ và $f_a(vt) = 0$ nếu vt thuộc miền $(\pi/2, 3\pi/2)$.

- *Bức xạ hồng ngoại*: Bức xạ hồng ngoại mà vệ tinh nhận được từ Trái đất là:

$$Q_e = \varepsilon A_{sc} F_{se} \sigma T_e^4, \quad (2.4)$$

trong đó T_e là nhiệt độ vật thể đen tương đương của Trái đất.

Ta đưa vào các đại lượng không thứ nguyên sau:

$$\tau = vt, \quad \theta = T(t)/\beta, \quad \gamma_1 = Q_s/\nu\beta C, \quad \gamma_2 = Q_a/\nu\beta C, \quad \gamma_3 = Q_e/\nu\beta C \quad (2.5)$$

trong đó

$$\nu = 2\pi/P_{orb}, \quad \beta = (\nu C/A_{sc} \varepsilon \sigma)^{1/3}. \quad (2.6)$$

Sử dụng (2.5), phương trình (2.1) đưa về dạng không thứ nguyên sau:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\theta^4 + \gamma_1 f_s(\tau) + \gamma_2 f_a(\tau) + \gamma_3. \quad (2.7)$$

Trong chương này, tác giả sẽ đề xuất một cách tiếp cận mới để tìm nghiệm xấp xỉ của (2.7) dựa trên tiêu chuẩn đối ngẫu của phương

pháp tuyến tính hóa tương đương được đề xuất gần đây trong dao động phi tuyến ngẫu nhiên. Ý tưởng chính của phương pháp là thay thế hệ phi tuyến gốc chịu kích động ngoài là hàm tiềm định (hoặc ngẫu nhiên) bởi một hệ tuyến tính hóa trong khi đó vẫn giữ nguyên kích động ngoài; các hệ số tuyến tính hóa sẽ được tìm từ tiêu chuẩn đối ngẫu đề xuất cho bài toán phân tích nhiệt vệ tinh.

2.3. Phương pháp tuyến tính hóa tương đương theo tiêu chuẩn đối ngẫu

Ta xét hệ có phương trình vi phân sau:

$$\frac{d\theta}{d\tau} + f(\theta) = \xi(\tau), \quad (2.8)$$

trong đó $f(\theta)$ là hàm phi tuyến của đối số θ , $\xi(\tau)$ là tải ngoài có thể là hàm tiềm định hoặc ngẫu nhiên. Phương trình gốc (2.8) được tuyến tính hóa để trở thành dạng sau

$$\frac{d\theta}{d\tau} + a\theta + b = \xi(\tau), \quad (2.9)$$

trong đó hai hệ số tuyến tính hóa a, b được tìm theo một tiêu chuẩn cụ thể của phương pháp tuyến tính hóa tương đương.

Trong nghiên cứu bài toán phân tích nhiệt vệ tinh của luận án, tiêu chuẩn đối ngẫu thu được đưa hai bước thay thế:

- *Bước thứ nhất*: hàm phi tuyến $f(\theta)$ biểu diễn số hạng bức xạ nhiệt được thay thế bởi hàm tuyến tính hóa $a\theta + b$, với a, b là các hệ số tuyến tính hóa.

- *Bước thứ hai*: hàm tuyến tính hóa $a\theta + b$ thu được từ bước thứ nhất, được thay thế bởi một hàm phi tuyến khác có dạng $\lambda f(\theta)$ và được xem như cùng lớp với hàm gốc $f(\theta)$ với hệ số tỷ lệ λ , trong đó các hệ số tuyến tính hóa a, b và λ được tìm từ tiêu chuẩn sau đây:

$$J = (1 - \rho) \left\langle (f(\theta) - a\theta - b)^2 \right\rangle + \rho \left\langle (a\theta + b - \lambda f(\theta))^2 \right\rangle \rightarrow \min_{a, b, \lambda}, \quad (2.10)$$

trong đó hệ số ρ nhận hai giá trị là 0 hoặc 1/2. Từ (2.10) ta thấy rằng khi $\rho=0$ ta thu được tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình của phương pháp tuyến tính hóa tương đương thông thường. Khi $\rho=1/2$ ta thu được tiêu chuẩn đối ngẫu như được đề xuất trong công trình của Nguyễn Đông Anh và đồng nghiệp năm 2012. Về mặt hình thức, tiêu chuẩn (2.10) biểu diễn cả tiêu chuẩn đối ngẫu và tiêu chuẩn thông thường của phương pháp tuyến tính hóa tương đương trong dạng kết hợp ứng với từng giá trị của ρ .

Tiêu chuẩn (2.10) dẫn đến hệ phương trình sau để xác định các ẩn a, b và λ

$$\frac{\partial J}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial \lambda} = 0. \quad (2.11)$$

Phương trình (2.11) cho ta kết quả hệ số tuyến tính hóa a, b :

$$a = \frac{1-\rho}{1-\rho\Phi} \frac{\langle \theta f(\theta) \rangle - \langle \theta \rangle \langle f(\theta) \rangle}{\langle \theta^2 \rangle - \langle \theta \rangle^2}, \quad b = \frac{1-\rho}{1-\rho\Phi} \frac{\langle \theta^2 \rangle \langle f(\theta) \rangle - \langle \theta \rangle \langle \theta f(\theta) \rangle}{\langle \theta^2 \rangle - \langle \theta \rangle^2} \quad (2.12)$$

và cho hệ số lượt về λ :

$$\lambda = \frac{1-\rho}{1-\rho\Phi} \left[\frac{\langle \theta f(\theta) \rangle (\langle \theta f(\theta) \rangle - \langle \theta \rangle \langle f(\theta) \rangle)}{\langle f^2(\theta) \rangle (\langle \theta^2 \rangle - \langle \theta \rangle^2)} + \frac{\langle f(\theta) \rangle (\langle \theta^2 \rangle \langle f(\theta) \rangle - \langle \theta \rangle \langle \theta f(\theta) \rangle)}{\langle f^2(\theta) \rangle (\langle \theta^2 \rangle - \langle \theta \rangle^2)} \right] \quad (2.13)$$

trong đó ký hiệu

$$\Phi = \frac{(\langle \theta \rangle \langle f(\theta) \rangle - \langle \theta f(\theta) \rangle)^2}{(\langle \theta^2 \rangle - \langle \theta \rangle^2) \langle f^2(\theta) \rangle} + \frac{\langle f(\theta) \rangle^2}{\langle f^2(\theta) \rangle}. \quad (2.14)$$

Trong khuôn khổ phương trình cân bằng nhiệt (2.1), hàm $f(\theta)$ có dạng $f(\theta) = \theta^4$. Trong phần tới ta sẽ tìm đáp ứng xấp xỉ của (2.1) sử dụng kết quả tổng quát (2.12-2.14).

2.4. Nghiệm xấp xỉ cho phương trình cân bằng nhiệt một nút

Ta thấy rằng hai hàm đầu vào $f_s(\tau)$, $f_a(\tau)$ được xác định bởi (2.2) và (2.3) là hai hàm tuần hoàn, nên chúng có thể được khai triển dưới dạng chuỗi Fourier

$$f_s(\tau) = \mu + \frac{2}{\pi} \sin \mu\pi \cos \tau + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \sin k\mu\pi \cos k\tau, \quad (2.15)$$

$$f_a(\tau) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cos \tau - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\pi(4k^2-1)} \cos(2k\tau + k\pi). \quad (2.16)$$

Các số hạng của chuỗi (2.15) và (2.16) có xu hướng dần tới 0 khi chỉ số k dần tới vô cùng. Do đó, để đơn giản, trong các tính toán sau đây, ta sẽ chỉ giữ lại xấp xỉ bậc nhất trong mỗi chuỗi. Do đó, phương trình (2.7) có thể được viết lại như sau:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\theta^4 + P + H \cos \tau, \quad (2.17)$$

trong đó

$$P = \mu\gamma_1 + \frac{1}{\pi}\gamma_2 + \gamma_3, \quad H = \frac{2}{\pi}\gamma_1 \sin \mu\pi + \frac{1}{2}\gamma_2. \quad (2.18)$$

Nghiệm của phương trình (2.9) ứng với $\xi(\tau) = P + H \cos \tau$ có dạng sau:

$$\theta(\tau) = R + A \cos \tau + B \sin \tau, \quad (2.19)$$

trong đó R , A , B được xác định bằng cách thay (2.19) vào phương trình (2.9) và cân bằng các hệ số của số hạng điều hòa tương ứng:

$$R = \frac{P-b}{a}, \quad A = \frac{a}{1+a^2}H, \quad B = \frac{1}{1+a^2}H. \quad (2.20)$$

Thay $f(\theta) = \theta^4$ vào phương trình (2.12-2.14), sau một số tính toán liên quan đến đáp ứng trung bình ta thu được hệ phương trình đại số phi tuyến cho các hệ số tuyến tính hóa a và b như sau:

$$a = \frac{1-\rho}{1-\rho\Phi} \frac{P-b}{a} \left[4 \left(\frac{P-b}{a} \right)^2 + \frac{3H^2}{1+a^2} \right], b = \frac{1-\rho}{1-\rho\Phi} \left[-3 \left(\frac{P-b}{a} \right)^4 + \frac{3}{8} \frac{H^4}{(1+a^2)^2} \right], \quad (2.21)$$

trong đó Φ được xác định từ

$$\Phi = \frac{R^8 + 14R^6(A^2 + B^2) + \frac{87}{4}R^4(A^2 + B^2)^2 + \frac{27}{4}R^2(A^2 + B^2)^3 + \frac{9}{64}(A^2 + B^2)^4}{R^8 + 14R^6(A^2 + B^2) + \frac{105}{4}R^4(A^2 + B^2)^2 + \frac{35}{4}R^2(A^2 + B^2)^3 + \frac{35}{128}(A^2 + B^2)^4}. \quad (2.22)$$

Vì hệ (2.21) là hệ đại số phi tuyến dạng khép kín của hệ số tuyến tính hóa a , b , ta có thể giải hệ này bằng phương pháp lặp Newton-Raphson để thu được a , b ; sau đó sử dụng (2.20) ta thu được nghiệm xấp xỉ (2.19) của hệ (2.7). Chú ý rằng hệ số tuyến tính hóa thông thường và đối ngẫu thu được từ (2.21) tương ứng bằng cách cho $\rho=0$ và $1/2$.

Nghiệm theo cách tiếp cận của Grande ở trạng thái bình ổn η_s :

$$\eta_s(\tau) = \frac{H}{1+16\bar{\theta}^6} (4\bar{\theta}^3 \cos \tau + \sin \tau). \quad (2.23)$$

Biên độ dao động nhiệt χ_G của $\theta(\tau)$ thu được từ kỹ thuật tuyến tính hóa sử dụng giả thiết của Grande (2.23) và χ_{DC} thu được từ nghiệm (2.21) của tiêu chuẩn đối ngẫu (2.10) là

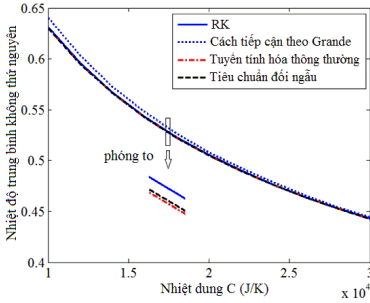
$$\chi_G = \frac{H}{\sqrt{1+16\bar{\theta}^6}}, \quad \chi_{DC} = \frac{H}{\sqrt{1+a^2}}. \quad (2.24-2.25)$$

Trong phần sau, ta sẽ thảo luận về kết quả đáp của ứng nhiệt $\theta(\tau)$ thu được bởi tuyến tính hóa đối ngẫu, tuyến tính hóa thông thường, tuyến tính hóa dựa trên giả thiết của Grande và nghiệm số thu được từ phương pháp Runge-Kutta bậc 4.

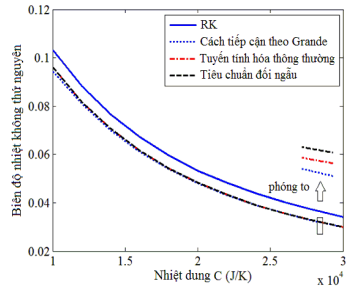
2.5. Phân tích nhiệt cho mô hình một nút

Kết quả trên Hình 2.1 và 2.2 đã chỉ ra rằng, các đáp ứng nhiệt thu được từ phương pháp tuyến tính hóa tương đương và cách tiếp

cận tuyến tính hóa của Grande là khá gần với kết quả thu được từ phương pháp Runge-Kutta 4. Lấy tham chiếu là đáp ứng nhiệt thu được bởi phương pháp Runge-Kutta 4, có thể thấy rằng tiêu chuẩn đối ngẫu của phương pháp tuyến tính hóa tương đương cho sai số nhỏ hơn so với các phương pháp khác khi tính chất phi tuyến của hệ tăng lên, tức là khi nhiệt dung biến đổi trong khoảng $[1.0, 3.0] \times 10^4$ (JK^{-1}).



Hình 2.1. Nhiệt độ trung bình không thứ nguyên với các phương pháp khác nhau



Hình 2.2. Biên độ nhiệt không thứ nguyên với các phương pháp khác nhau

Bảng 2.1. Nhiệt độ trung bình không thứ nguyên với các giá trị nhiệt dung C khác nhau

C	$\langle \theta \rangle_{RK}$	$\langle \theta \rangle_G$	Sai số (%)	$\langle \theta \rangle_{CL}$	Sai số (%)	$\langle \theta \rangle_{DC}$	Sai số (%)
10000	0.6313	0.640598492	1.4702	0.629860124	0.2307	0.630153556	0.1842
12000	0.5957	0.602826261	1.1923	0.594551363	0.1967	0.594743420	0.1645
14000	0.5671	0.572633257	0.9714	0.566148522	0.1720	0.566276351	0.1495
16000	0.5434	0.547704006	0.7988	0.542538575	0.1519	0.542623672	0.1362
18000	0.5231	0.526617245	0.6640	0.522439261	0.1347	0.522499387	0.1232
20000	0.5056	0.508443360	0.5581	0.505016142	0.1197	0.505058661	0.1113
22000	0.4902	0.492543983	0.4742	0.489696381	0.1066	0.489727041	0.1004
24000	0.4765	0.478463520	0.4071	0.476069908	0.0953	0.476092423	0.0905
26000	0.4642	0.465866479	0.3526	0.463833290	0.0853	0.463850105	0.0817
28000	0.4531	0.454499317	0.3081	0.452755823	0.0767	0.452768580	0.0739
30000	0.4430	0.444166187	0.2712	0.442658334	0.0692	0.442668151	0.0669

Quan sát **Bảng 2.1** ta thấy trong khoảng nhiệt dung C được xét, sai số lớn nhất của tiêu chuẩn đối ngẫu và thông thường tương ứng là 0.1842% và 0.2307%, trong khi sai số lớn nhất của cách tiếp cận của Grande là khoảng 1.4702%.

2.6. Kết luận chương 2

Chương này tác giả đã đề xuất sử dụng phương pháp tuyến tính hóa tương đương để tìm nghiệm xấp xỉ của bài toán phân tích nhiệt của vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp của Trái đất. Tiêu chuẩn thông thường và tiêu chuẩn đối ngẫu của phương pháp tuyến tính hóa tương đương được phát triển cho hệ một nút đơn giản của nhiệt vệ tinh. Theo đó ta thu được một hệ phương trình đại số phi tuyến dạng khép kín cho các hệ số tuyến tính hóa. Hệ này được giải bằng phương pháp lặp. Kết quả mô phỏng số đã chỉ ra độ chính xác đáng tin cậy của phương pháp tuyến tính hóa. Quan sát thấy rằng đáp ứng nhiệt thu được từ phương pháp tuyến tính hóa tương đương và cách tiếp cận dựa trên giả thiết của Grande là khá gần với các kết quả thu được từ phương pháp Runge-Kutta. Hơn nữa, tiêu chuẩn đối ngẫu của phương pháp tuyến tính hóa tương đương cho sai số nhỏ hơn so với các phương pháp khác khi tính chất phi tuyến của hệ tăng lên, tức là khi nhiệt dung biến đổi trong khoảng $[1.0, 3.0] \times 10^4$ (JK^{-1}).

Kết quả Chương 2 được công bố trong hai bài báo [1] và [7] trong *Danh mục các công trình đã công bố liên quan đến luận án của tác giả*.

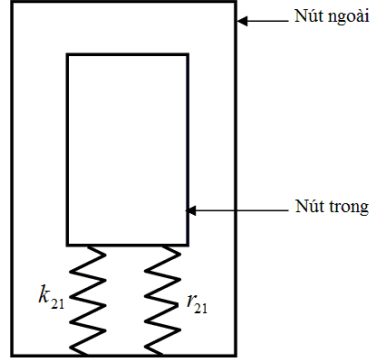
CHƯƠNG 3

PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG NHIỆT CỦA VỆ TINH NHỎ TRÊN QUỸ ĐẠO THẤP DỰA TRÊN MÔ HÌNH HAI NÚT

3.1. Đặt vấn đề

Để mô tả đầy đủ hơn đáng điệu nhiệt của vệ tinh bao gồm cả phân hệ nào đó bên trong nó, người ta đưa ra mô hình nhiều nút.

Trong chương này, tác giả nghiên cứu mô hình hai nút cho một vệ tinh cỡ nhỏ có *chuyển động xoay quay trục của nó*. Một nút mô tả nhiệt độ vỏ ngoài của vệ tinh, nút còn lại mô tả nhiệt độ của thiết bị bên trong vệ tinh. Sự tương tác nhiệt giữa hai nút có thể được mô hình hóa đơn giản dưới dạng hệ hai bậc tự do, trong đó liên kết giữa chúng có thể coi như các liên kết đàn hồi



Hình 3.1. Mô hình hệ hai nút

tuyến tính đối với dạng thức dẫn nhiệt và đàn hồi phi tuyến đối với bức xạ nhiệt như minh họa trong [Hình 3.1](#).

Gọi C_1 và C_2 tương ứng là nhiệt dung của nút ngoài và nút trong. Phương trình cân bằng nhiệt cho mô hình hai nút có dạng sau

$$\begin{aligned} C_1 \dot{T}_1 &= k_{21}(T_2 - T_1) + r_{21}(T_2^4 - T_1^4) - A_{sc} \varepsilon \sigma T_1^4 + Q_s f_s(\nu t) + Q_a f_a(\nu t) + Q_e, \\ C_2 \dot{T}_2 &= -k_{21}(T_2 - T_1) - r_{21}(T_2^4 - T_1^4) + Q_{d2}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

trong đó $Q_s f_s(\nu t)$, $Q_a f_a(\nu t)$, Q_e lần lượt là nhiệt bức xạ mặt trời, nhiệt albedo và nhiệt hồng ngoại Trái đất tác động lên nút ngoài. Còn Q_{d2} là hao tán nhiệt nút trong, được giả sử là ở mức hằng số.

Phương trình cân bằng nhiệt (3.1) có thể được chuyển sang dạng không thứ nguyên sau đây:

$$\begin{aligned} c \frac{d\theta_1}{d\tau} &= k(\theta_2 - \theta_1) + r(\theta_2^4 - \theta_1^4) - \theta_1^4 + \gamma_1 f_s(\tau) + \gamma_2 f_a(\tau) + \gamma_3, \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} &= -k(\theta_2 - \theta_1) - r(\theta_2^4 - \theta_1^4) + \gamma_4, \end{aligned} \quad (3.2)$$

trong đó $\theta_1 = \theta_1(\tau)$, $\theta_2 = \theta_2(\tau)$ là các hàm nhiệt độ không thứ nguyên của thời gian không thứ nguyên τ , và được xác định bởi

$$\begin{aligned} \theta_1 &= T_1(t)/\beta, \quad \theta_2 = T_2(t)/\beta, \quad \beta = [C_2\nu/(A_{sc}\varepsilon\sigma)]^{1/3}, \quad \tau = \nu t, \\ \nu &= 2\pi/P_{orb}, \quad c = C_1/C_2, \quad k = k_{21}/\nu C_2, \quad r = r_{21}\beta^3/\nu C_2, \\ \gamma_1 &= Q_s/(\beta C_2\nu), \quad \gamma_2 = Q_a/(\beta C_2\nu), \quad \gamma_3 = Q_e/(\beta C_2\nu), \\ \gamma_4 &= Q_{d2}/(\beta C_2\nu). \end{aligned} \quad (3.3)$$

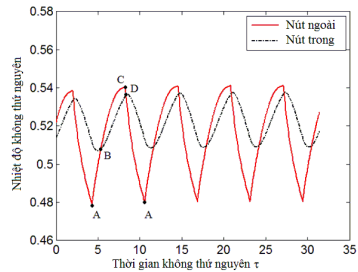
Tác giả sẽ mở rộng tiêu chuẩn đối ngẫu đã phát triển ở Chương 2 cho mô hình hai nút (3.2) để tìm nghiệm xấp xỉ của hệ nhiệt vệ tinh.

3.2. Mở rộng tiêu chuẩn đối ngẫu cho mô hình nhiệt hai nút của vệ tinh

Với cách tiếp cận tuyến tính hóa tương đương, để quá trình tuyến tính hóa được đơn giản, tác giả tiến hành một kỹ thuật tiền xử lý trong việc tách các số hạng liên kết bức xạ nhiệt cho hệ phi tuyến gốc (3.2) để đưa về hệ tương đương trong đó mỗi phương trình chỉ chứa một số hạng phi tuyến. Dựa trên tiêu chuẩn đối ngẫu tương tự như Chương 2 [xem (2.10)], tác giả cũng nhận được hệ đại số phi tuyến dạng đóng cho các hệ số tuyến tính hóa và hệ này được giải lặp theo phương pháp Newton-Raphson. Sau khi tìm được các hệ số tuyến tính hóa, ta sẽ thu được đáp ứng nhiệt xấp xỉ của các nút [2].

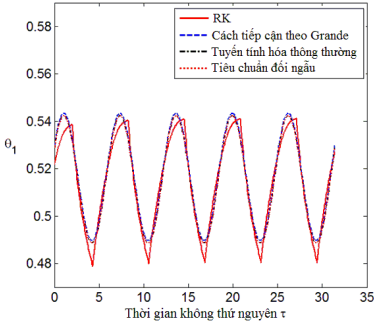
3.3. Phân tích nhiệt cho mô hình hai nút

Trong Hình 3.2, tính toán nhiệt độ được thực hiện cho hệ phi tuyến (3.2) sử dụng phương pháp Runge-Kutta bậc 4 tương ứng với 5 chu kỳ quỹ đạo. Một số các điểm đặc trưng như A, B, C và D của quỹ đạo của vệ tinh được chỉ ra trong Hình 3.2. Điểm

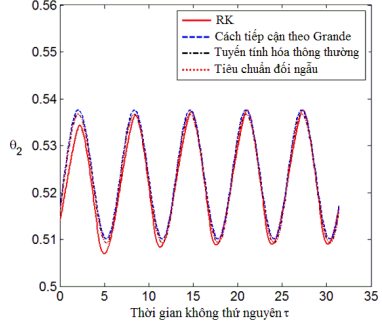


Hình 3.2. Nhiệt độ không thứ nguyên của nút ngoài và nút trong theo thời gian không thứ nguyên

A là điểm mặt trời mọc, còn C là điểm mặt trời lặn. Hai điểm B và D là giao điểm giữa hai đường cong nhiệt của nút ngoài và nút trong.

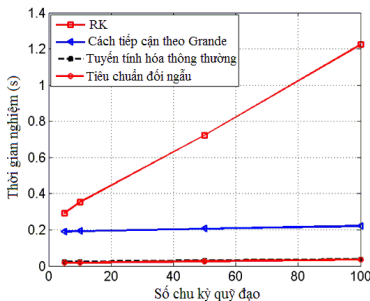


Hình 3.3. Diễn tiến nhiệt độ không thứ nguyên của nút ngoài theo các phương pháp khác nhau



Hình 3.4. Diễn tiến nhiệt độ không thứ nguyên của nút trong theo các phương pháp khác nhau

Hình 3.3 và 3.4 chỉ ra rằng diễn tiến nhiệt độ theo thời gian thu được từ các phương pháp xấp xỉ (cách tiếp cận Grande, tuyến tính hóa thông thường và đối ngẫu) là khá gần với các kết quả thu được từ cách giải sử dụng phương pháp Runge-Kutta.



Hình 3.5. So sánh thời gian nghiệm của các phương pháp thông qua số chu kỳ quỹ đạo

Để đánh giá tính hiệu quả của phương pháp tuyến tính hóa tương đương, ta thể hiện thời gian nghiệm tính toán cho các phương pháp khác nhau như trong Hình 3.5. Với tham chiếu là thời gian nghiệm của phương pháp đối ngẫu, quan sát thấy rằng thời gian tính toán của phương pháp Runge-Kutta là khá

lớn khi so sánh với các phương pháp khác.

Bảng 3.1. Nhiệt độ trung bình không thứ nguyên của nút ngoài với các giá trị nhiệt dung C_2 khác nhau ($\langle \theta \rangle_{RK}$: Phương pháp Runge–Kutta; $\langle \theta \rangle_G$: cách tiếp cận Grande; $\langle \theta \rangle_{CL}$: Tuyến tính hóa thông thường; $\langle \theta \rangle_{DC}$: Tuyến tính hóa đối ngẫu)

C	$\langle \theta \rangle_{RK}$	$\langle \theta \rangle_G$	Sai số (%)	$\langle \theta \rangle_{CL}$	Sai số (%)	$\langle \theta \rangle_{DC}$	Sai số (%)
10000	0.6443	0.650838235	1.0079	0.649431902	0.7896	0.649437815	0.7906
12000	0.6062	0.612462262	1.0307	0.611174293	0.8183	0.611179566	0.8191
14000	0.5757	0.581786667	1.0558	0.580583551	0.8469	0.580588397	0.8477
16000	0.5505	0.556458963	1.0810	0.555319285	0.8740	0.555323833	0.8748
18000	0.5291	0.535035168	1.1050	0.533944706	0.8989	0.533949036	0.8997
20000	0.5108	0.516570807	1.1274	0.515519787	0.9216	0.515523953	0.9225
22000	0.4947	0.500417309	1.1480	0.499398797	0.9422	0.499402835	0.9430
24000	0.4805	0.486111797	1.1669	0.485120729	0.9607	0.485124665	0.9615
26000	0.4677	0.473313417	1.1841	0.472345996	0.9773	0.472349847	0.9782
28000	0.4562	0.461764572	1.1999	0.460817880	0.9924	0.460821660	0.9932
30000	0.4458	0.451266287	1.2143	0.450338031	1.0061	0.450341749	1.0069

Bảng 3.2. Biên độ nhiệt không thứ nguyên của nút ngoài χ với các giá trị nhiệt dung C_2 khác nhau

C	χ_{RK}	χ_G	Sai số (%)	χ_{CL}	Sai số (%)	χ_{DC}	Sai số (%)
10000	0.0403	0.034924080	13.5187	0.034944460	13.4683	0.034944517	13.4681
12000	0.0373	0.032419844	13.2054	0.032439890	13.1517	0.032439941	13.1516
14000	0.0350	0.030537221	12.8108	0.030557158	12.7538	0.030557205	12.7537
16000	0.0331	0.029065587	12.3818	0.029085496	12.3218	0.029085539	12.3216
18000	0.0316	0.027877097	11.9483	0.027896997	11.8854	0.027897039	11.8853
20000	0.0303	0.026890788	11.5275	0.026910674	11.4620	0.026910713	11.4619
22000	0.0293	0.026053514	11.1286	0.026073369	11.0609	0.026073407	11.0607
24000	0.0283	0.025329259	10.7559	0.025349065	10.6861	0.025349102	10.6859
26000	0.0275	0.024692897	10.4104	0.024712637	10.3388	0.024712674	10.3387
28000	0.0268	0.024126433	10.0919	0.024146094	10.0187	0.024146129	10.0185
30000	0.0261	0.023616661	9.7989	0.023636230	9.7242	0.023636265	9.7241

Dữ liệu tính toán cho các đặc trưng đáp ứng nhiệt khi nhiệt dung thay đổi được trình bày trong [Bảng 3.1](#) và [3.2](#). Với nhiệt độ trung bình không thứ nguyên của nút ngoài, [Bảng 3.1](#) cho thấy rằng sai số

của các phương pháp xấp xỉ khi so sánh với phương pháp Runge-Kutta là khá nhỏ. Phương pháp tuyến tính hóa tương đương cho sai số nhỏ hơn cách tiếp cận của Grande. Cũng quan sát [Bảng 3.2](#) thấy rằng tiêu chuẩn đối ngẫu cho sai số nhỏ hơn các phương pháp còn lại.

3.4. Kết luận Chương 3

Trong chương này tác giả luận án đã trình bày việc mở rộng phương pháp tuyến tính hóa tương đương tiêu chuẩn đối ngẫu để tìm các nghiệm xấp xỉ của mô hình nhiệt hai nút của vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp của Trái đất. Hai đặc trưng quan trọng cần để đánh giá các giới hạn nhiệt của vệ tinh trong suốt quá trình chuyển động của nó trên quỹ đạo là nhiệt độ trung bình và biên độ nhiệt. Để thu được những đại lượng này, một hệ khép kín của các hệ số tuyến tính hóa tương đương được thiết lập dựa trên tiêu chuẩn đối ngẫu được đề xuất, và sau đó được giải bằng phương pháp lặp Newton-Raphson. Các kết quả chính của Chương 3 có thể được tóm tắt như sau:

- Diễn tiến nhiệt độ theo thời gian thu được từ các phương pháp xấp xỉ (cách tiếp cận dựa trên giả thiết Grande, tuyến tính hóa thông thường và đối ngẫu) là khá gần với các kết quả thu được từ cách giải sử dụng phương pháp Runge-Kutta.

- Tính hiệu quả về thời gian nghiệm của tiêu chuẩn đối ngẫu được đánh giá trong không khổ mô hình hai nút của phân tích nhiệt vệ tinh.

- Trong khoảng nhiệt dung được xét từ 10000 đến 30000 JK⁻¹, sai số thu được từ tiêu chuẩn đối ngẫu đề xuất cho nhiệt độ trung bình và biên độ nhiệt là nhỏ hơn so với các kết quả thu được từ cách tiếp cận Grande

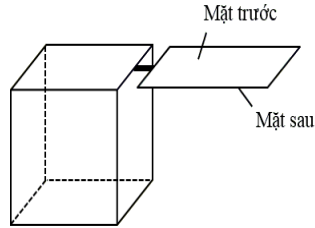
Kết quả của Chương 3 được công bố trong 03 bài báo [2], [5] và [6] trong *Danh mục các công trình đã công bố liên quan đến luận án của tác giả*.

CHƯƠNG 4

TÍNH TOÁN ĐÁP ỨNG NHIỆT CHO VỆ TINH NHỎ TRÊN QUỸ ĐẠO THẤP SỬ DỤNG MÔ HÌNH NHIỀU NÚT

4.1. Phân tích nhiệt cho cánh vệ tinh

Trong số các nhiệm vụ của bài toán điều khiển nhiệt, các đặc trưng nhiệt cho cánh vệ tinh là rất quan trọng bởi vì cánh vệ tinh cung cấp nguồn năng lượng chính cho hoạt động của hầu hết các thiết bị



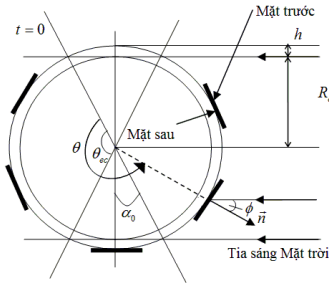
Hình 4.1. Mô hình của cánh vệ tinh

liên quan. Cánh vệ tinh gồm hai mặt: mặt chứa các tấm pin năng lượng mặt trời của cánh là mặt trước, mặt còn lại là mặt sau. Hệ số hấp thụ của mặt trước $\alpha_1 = 0.69$, còn hệ số phát xạ là $\varepsilon_1 = 0.82$. Mặt sau được sơn bởi lớp vật liệu với hệ số hấp thụ $\alpha_2 = 0.265$, hệ số phát xạ $\varepsilon_2 = 0.872$. Sau đây ta tính toán nhiệt cho kết cấu cánh của vệ tinh dựa trên mô hình hai nút nhiệt đặc trưng cho mặt trước và mặt sau. Mô hình hình học của cánh có thể xem minh họa trên [Hình 4.1](#) (xem [4]).

Ta sẽ tính toán đáp ứng nhiệt của cánh trong hai kịch bản:

Kịch bản 1: Vệ tinh luôn duy trì tư thế nhìn Trái đất (mặt sau của cánh luôn hướng về tâm Trái đất) trong suốt thời gian nó chuyển động trên quỹ đạo ([Hình 4.2](#)).

Kịch bản 2: Trong miền sáng, tư thế của vệ tinh được điều khiển sao cho mặt trước (chứa pin năng lượng) của cánh luôn hướng về phía mặt trời và vuông góc với tia sáng mặt trời; trong miền tối, mặt sau luôn hướng về tâm trái đất ([Hình 4.3](#)).



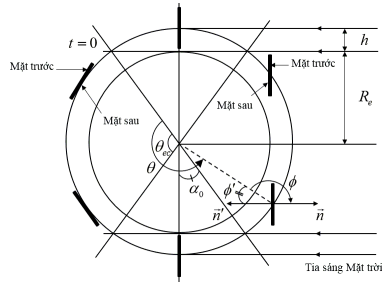
Hình 4.2. Quỹ đạo và tư thế của vệ tinh trong kích bản 1 (chỉ minh họa cho cánh vệ tinh)

Ta minh họa tính toán trong trường hợp kích bản 1 [Các chi tiết tính toán cho kích bản 2 có thể xem trong bản đầy đủ của luận án]. Trong kích bản này ta thu được đáp ứng nhiệt của mặt trước và sau của cánh được trình bày trong Hình 4.4. Ta thấy rằng đáp ứng nhiệt của chúng gần như tuần hoàn ở trạng thái bình ổn.

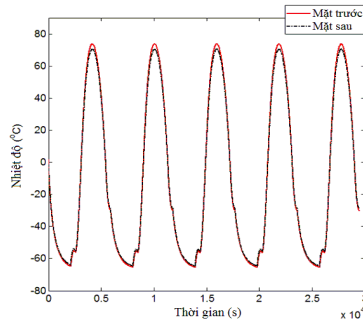
Trong kích bản này giá trị nhiệt độ của mặt trước khá gần với các giá trị nhiệt độ của mặt sau. Điều này là do cánh vệ tinh là một cấu trúc tấm mỏng, sự chênh lệch nhiệt độ giữa các bề mặt đối diện là khá nhỏ.

4.2. Phân tích nhiệt cho vệ tinh hình hộp chữ nhật

Ta xét một vệ tinh có kích thước $L \times W \times H = 0.5 \times 0.5 \times 0.5 (m^3)$, độ dày $\delta = 0.02 (m)$ (Hình 4.5), làm từ các tấm sandwich có mật độ khối lượng là $\rho = 158.90 (kgm^{-3})$, nhiệt dung riêng $C_p = 883.70$

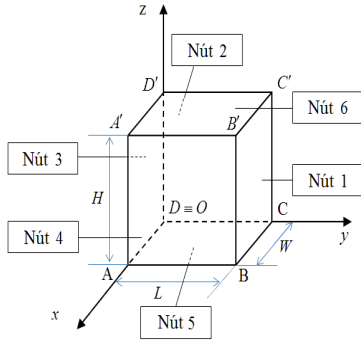


Hình 4.3. Quỹ đạo và tư thế của vệ tinh trong kích bản 2 (chỉ minh họa cho cánh)

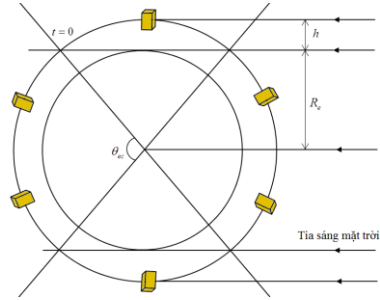


Hình 4.4. Đồ thị nhiệt độ của các mặt trước và mặt sau của cánh vệ tinh trong kích bản 1

($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), độ dẫn nhiệt vật liệu $\lambda = 5.39$ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), hệ số phát xạ bề mặt $\varepsilon = 0.82$, hệ số hấp thụ $\alpha = 0.65$.



Hình 4.5. Một mô hình của vệ tinh hình hộp



Hình 4.6. Tư thế “hướng vào tâm Trái đất” của vệ tinh trong kịch bản CC

Các mặt được đánh chỉ số 1, 2, 3, 4, 5, 6 như chỉ ra trong [Hình 4.5](#).

Sau đây ta sẽ xác định đáp ứng nhiệt của các nút nhiệt trong hai kịch bản quỹ đạo đặc biệt khi góc quỹ đạo $\beta = 0^0$ [mặt phẳng quỹ đạo song song với tia sáng mặt trời] và $\beta = 90^0$ [mặt phẳng quỹ đạo vuông góc với tia sáng mặt trời]. Hai kịch bản này thường được sử dụng để phân tích nhiệt vệ tinh và được gọi tương ứng là kịch bản “Cold-Case - CC” và “Hot-Case - HC”. Trong phần tới ta sẽ phân tích đáp ứng nhiệt của các kết cấu vệ tinh trong các kịch bản quỹ đạo này.

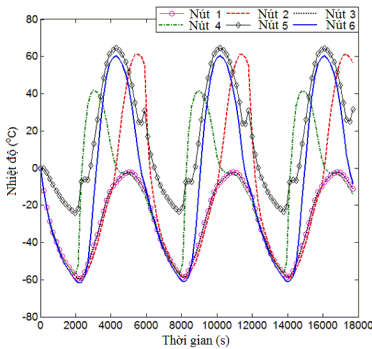
4.2.1. Kịch bản Cold-Case (CC)

Trong kịch bản CC, quỹ đạo của vệ tinh được giả sử là đồng bộ hóa mặt trời, mặt phẳng quỹ đạo song song với các tia mặt trời. Với mục đích mô phỏng, ta giả sử rằng đáy vệ tinh (nút 5) luôn luôn ở tư thế “hướng vào tâm Trái đất”.

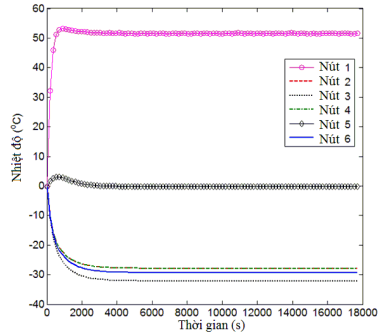
Bảng 4.1. Thứ tự các nút trong tính toán nhiệt của mô hình sáu nút

Nút 1	Nút 2	Nút 3	Nút 4	Nút 5	Nút 6
+Y	-X	-Y	+X	-Z	+Z

Thứ tự các nút trong tính toán nhiệt được chỉ ra trong **Bảng 4.1**. Chúng ta có thể thấy chỉ có bốn mặt nhận được tải nhiệt từ môi trường không gian là các mặt +X, -X, +Z, -Z; hai mặt còn lại là +Y và -Y, lượng nhiệt nhận được coi như bằng không. Kết quả phân tích nhiệt vệ tinh trên từng mặt được trình bày trên **Hình 4.7**.



Hình 4.7. Diễn tiến nhiệt độ của sáu nút của vệ tinh trong kịch bản CC



Hình 4.8. Diễn tiến nhiệt độ của sáu nút theo thời gian trong kịch bản HC

4.2.2. Kịch bản Hot-Case

Trong kịch bản HC này, vệ tinh có mặt +Y (nút 1) luôn vuông góc với tia sáng mặt trời. Ứng xử nhiệt của các nút được cho trên **Hình 4.8**. Vì nguồn nhiệt tác động không đổi lên vệ tinh nên sau một khoảng thời gian, nhiệt độ các nút sẽ đi vào trạng thái dừng và có giá trị hằng số. Nhiệt độ cao nhất nằm ở bề mặt +Y (nút 1), nhiệt độ thấp nhất nằm ở bề mặt -Y (nút 3).

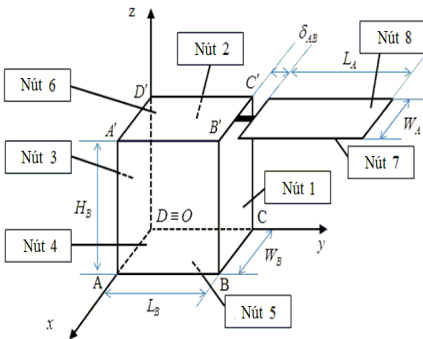
4.3. Phân tích nhiệt cho vệ tinh hình hộp chữ nhật có gắn thêm cánh

Sử dụng phương pháp tham số phân bố một vệ tinh hình hộp chữ nhật có gắn thêm cánh có thể được mô hình nhiệt tám nút: sáu nút cho các mặt của thân và hai nút cho mặt trước và mặt sau của cánh (được đánh số như trong Hình 4.9). Đây là một mô hình đơn giản và sẽ là cơ sở cho mô hình vệ tinh phức tạp hơn.

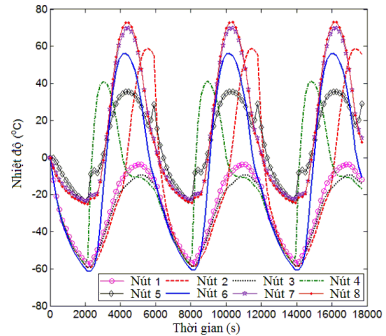
Trong luận án, tác giả tính toán tải nhiệt tác động lên các nút và phân tích đáp ứng nhiệt của các nút trong ba kịch bản quỹ đạo: Cold-Case, Hot-Case 1 (Hot-Case đối với thân vệ tinh), Hot-Case 2 (Hot-Case đối với cánh vệ tinh). Thứ tự các nút trong tính toán nhiệt được chỉ ra trong Bảng 4.2.

Bảng 4.2. Thứ tự các nút trong tính toán nhiệt trong mô hình tám nút

Nút 1	Nút 2	Nút 3	Nút 4	Nút 5	Nút 6	Nút 7	Nút 8
+Y	-X	-Y	+X	-Z	+Z	Mặt sau	Mặt trước



Hình 4.9. Một mô hình của vệ tinh hình hộp chữ nhật có gắn thêm cánh



Hình 4.10. Diễn tiến nhiệt độ của các nút theo thời gian trong kịch bản CC

Ta minh họa tính toán trong kịch bản Cold-Case. Nhiệt độ ước lượng của các nút theo thời gian nhận được khi ta giải số phương

trình cân bằng nhiệt cho các nút (xem [Hình 4.10](#)). Kết quả dự đoán chỉ ra rằng nhiệt độ của các nút thỏa mãn khoảng yêu cầu nhiệt độ của chúng. Trong kịch bản này, ảnh hưởng của các tính chất vật liệu như tính hấp thụ và độ phát xạ đối với đáp ứng nhiệt của các nút cũng được tác giả khảo sát, nghiên cứu ([xem chi tiết trong \[3\]](#)).

4.4. Kết luận Chương 4

Trong Chương 4 này, tác giả đã nghiên cứu một số mô hình nhiệt của kết cấu vệ tinh và thu được một số các kết quả sau:

- Một số mô hình tải nhiệt từ môi trường không gian được thiết lập trong khuôn khổ quỹ đạo thấp của Trái đất.

- Các mô hình đơn giản (mô hình hai nút cho cánh vệ tinh, mô hình sáu nút cho vệ tinh hình hộp, mô hình tám nút cho vệ tinh hình hộp có gắn một cánh) được thiết lập dựa trên kích thước hình học và tính chất vật liệu của vệ tinh.

- Sự biến đổi nhiệt độ theo thời gian của các nút thu được bằng phương pháp Runge-Kutta bậc 4 khi giải các phương trình cân bằng nhiệt.

- Thông tin về nhiệt độ cực đại và nhiệt độ cực tiểu của các nút cho thấy nhiệt độ ước lượng của vệ tinh thu được từ các phân tích số nằm trong giới hạn nhiệt cho phép của vệ tinh. Điều này cho thấy mức độ tin cậy của mô hình nhiệt và mô hình tải nhiệt của vệ tinh đã xây dựng. Độ tin cậy của kết quả sẽ tăng lên khi ta xây dựng các mô hình chi tiết và đầy đủ hơn.

Kết quả Chương 4 được công bố trong 03 công trình [3], [4] và [8] trong *Danh mục các công trình đã công bố liên quan đến luận án của tác giả*.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án này trình bày một số kết quả nghiên cứu của tác giả về bài toán phân tích nhiệt của vệ tinh dựa trên các mô hình nhiệt một nút, hai nút và nhiều nút. Với mô hình một và hai nút, tác giả đã áp dụng các phương pháp giải tích gồm phương pháp tuyến tính hóa tương đương và phương pháp tuyến tính hóa theo Grande để tìm nghiệm xấp xỉ của các mô hình nhiệt; sau đó nghiên cứu một số ứng xử định tính của nghiệm phụ thuộc vào các tham số hệ. Với mô hình nhiều nút, tác giả đã sử dụng phương pháp số Runge-Kutta bậc 4 để tính toán nghiệm và khảo sát các đặc trưng cơ bản của nhiệt độ các nút trong mô hình nhiệt ứng với các kịch bản quỹ đạo khác nhau và chỉ ra sự phù hợp của nhiệt độ dự báo nằm trong miền nhiệt độ giới hạn cho phép của các thành phần vệ tinh.

Những đóng góp mới của luận án

Luận án đã đạt được một số kết quả mới sau đây:

- Tác giả đã lần đầu tiên áp dụng kỹ thuật tuyến tính hóa tương đương sử dụng các tiêu chuẩn khác nhau gồm tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình và tiêu chuẩn đối ngẫu để tìm đáp ứng nhiệt xấp xỉ của vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp của Trái đất. Tiêu chuẩn đối ngẫu thu được từ tổ hợp của hai bước thay thế (thay thế thông thường và thay thế đối ngẫu). Kết quả cho thấy phương pháp tuyến tính hóa tương đương là những công cụ giải tích hiệu quả, tin cậy có thể áp dụng tốt trong bài toán phân tích nhiệt cho vệ tinh.

- Tác giả đã xây dựng phương pháp tìm nghiệm giải tích cho mô hình một nút và hai nút dựa trên tiêu chuẩn đối ngẫu đề nghị trong khuôn khổ bài toán phi tuyến của phương trình cân bằng nhiệt của vệ tinh.

- Kết quả số cho phân tích đáp ứng nhiệt chỉ ra rằng phương pháp tuyến tính hóa tương đương theo tiêu chuẩn đối ngẫu có độ chính xác cao hơn so với kết quả thu được từ phương pháp tuyến tính hóa theo Grande.

- Đã xây dựng và phát triển được mô hình nhiệt nhiều nút và mô hình tải nhiệt tương ứng cho vệ tinh nhỏ ở quỹ đạo thấp quanh Trái đất. Kết quả phân tích nhiệt là cơ sở phục vụ thiết kế nhiệt cho các mô hình nhiệt vệ tinh phức tạp hơn.

Một số vấn đề có thể tiếp tục mở rộng nghiên cứu

- Phát triển và mở rộng phương pháp tuyến tính hóa tương đương theo tiêu chuẩn đối ngẫu để nghiên cứu đáp ứng nhiệt cho vệ tinh với tải nhiệt ngoài có yếu tố nhiễu ngẫu nhiên.

- Phát triển các mô hình nhiệt vệ tinh bao gồm các mô hình hình học, mô hình vật liệu, các mô hình tải nhiệt, hướng tới xây dựng một phân mềm chuyên dụng cho phân tích kết cấu nhiệt vệ tinh.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN CỦA TÁC GIẢ

1. Nguyen Dong Anh, Nguyen Nhu Hieu, Pham Ngoc Chung, Nguyen Tay Anh (2016), Thermal radiation analysis for small satellites with single-node model using techniques of equivalent linearization, *Applied Thermal Engineering*, 94, pp. 607-614. ([Tập chí SCI-E](#))
2. Pham Ngoc Chung, Nguyen Nhu Hieu, Nguyen Dong Anh, Dinh Van Manh (2017), Extension of dual equivalent linearization to nonlinear analysis of thermal behavior of a two-node model for small satellites in Low Earth Orbit, *International Journal of Mechanical Sciences*, 133, pp. 513–523. ([Tập chí SCI](#))
3. Pham Ngoc Chung, Nguyen Dong Anh, Nguyen Nhu Hieu (2017), Nonlinear analysis of thermal behavior for a small satellite in Low Earth Orbit using many-node model, *Journal of Science and Technology Development*, Vietnam National University-HCM City, 20, pp. 66-76 (ISSN 1859-0128). ([Tập chí Quốc gia](#))
4. Pham Ngoc Chung, Nguyen Nhu Hieu, Nguyen Dong Anh (2016), Thermal radiation analysis for solar arrays of a small satellite in Low Earth Orbit, *The 4th international Conference on Engineering Mechanic and Automation (ICEMA4)*, pp. 146-153.
5. Nguyen Dong Anh, Nguyen Nhu Hieu, Pham Ngoc Chung (2013), Analysis of thermal responses for a satellite with two-node model using the equivalent linearization technique, *International Conference on Space, Aeronautical, and Navigational Electronics*, Vol. 113(335), pp. 109-114.
6. Nguyễn Như Hiếu, Nguyễn Đông Anh, Phạm Ngọc Chung (2014), Phương pháp giải tích trong bài toán mô hình nhiệt hai nút của vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp, *Hội thảo khoa học “Nghiên cứu và ứng dụng công nghệ vũ trụ”*, Hà Nội, 2014, Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, ISBN:978-604-913-305-3, tr. 469-479.
7. Phạm Ngọc Chung, Nguyễn Đông Anh, Nguyễn Như Hiếu, Phan Thị Trà My (2015), Nghiên cứu giải tích ứng xử nhiệt của vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp dựa theo mô hình một nút, *Tuyển tập Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc*, Đà Nẵng, 8/2015, tr. 11-18.
8. Nguyễn Như Hiếu, Vũ Lâm Đông, Nguyễn Đông Anh, Nguyễn Đình Kiên, Phạm Ngọc Chung (2015), Phân tích dao động, độ bền, ổn định và nhiệt của kết cấu vệ tinh nhỏ trên quỹ đạo thấp của trái đất, *Chương trình khoa học công nghệ vũ trụ (2012-2015)*, tr. 71-104, ISBS:978-604-913-498-2.