

# THUẬT TOÁN DÒ TÌM VỊ TRÍ MẶT TRỜI KHÔNG SỬ DỤNG CẢM BIẾN QUANG

Từ Viết Hoàng<sup>1\*</sup>, Hoàng Anh Dũng<sup>1</sup>, Trịnh Thị Hậu<sup>1</sup>, Đinh Khắc Long<sup>1</sup>, Phan Văn Hải<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ, email: tvhoang9@hou.edu.vn. ORCID: 0009-0003-8834-5328

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 15/01/2026

Ngày phản biện đánh giá: 17/03/2026

Ngày bài báo được duyệt đăng: 14/04/2026

DOI: 10.59266/houjs.2026.1161

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này trình bày một cách tiếp cận trong việc tối ưu hóa hiệu suất thu hoạch năng lượng mặt trời thông qua thuật toán dò tìm vị trí mặt trời vòng hở, hoàn toàn không phụ thuộc vào các cảm biến quang học truyền thống. Thách thức lớn nhất đối với các hệ thống bám hướng mặt trời (Solar Trackers) tại khu vực nhiệt đới như Việt Nam là sự thay đổi thất thường của thời tiết, mây che phủ và bụi bẩn tích lũy trên bề mặt cảm biến, dẫn đến sai số điều khiển và suy giảm hiệu suất đáng kể. Để khắc phục, bài báo đề xuất ứng dụng thuật toán của Michalsky (1988) (Michalsky, 1988) kết hợp với các hiệu chỉnh thiên văn chuyên sâu từ công trình của Jean Meeus để xác định tọa độ mặt trời với độ chính xác xấp xỉ  $0,01^\circ$ . Hệ thống được triển khai trên nền tảng vi điều khiển NodeMCU ESP8266, cho phép tính toán góc cao (Elevation) và góc phương vị (Azimuth) dựa trên kinh độ, vĩ độ và thời gian thực tại địa điểm lắp đặt. Dữ liệu thực nghiệm được đối chiếu trực tiếp với công cụ SunEarthTools cho thấy sự tương quan chặt chẽ với sai số không đáng kể. Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp một giải pháp công nghệ bền bỉ, ít bảo trì mà còn đặt nền móng cho việc tích hợp các hệ thống năng lượng tái tạo thông minh vào mạng lưới IOT trong tương lai.

**Từ khóa:** các thuật toán thiên văn, thuật toán Michalsky, vi điều khiển NodeMCU, bám hướng mặt trời

## I. Đặt vấn đề

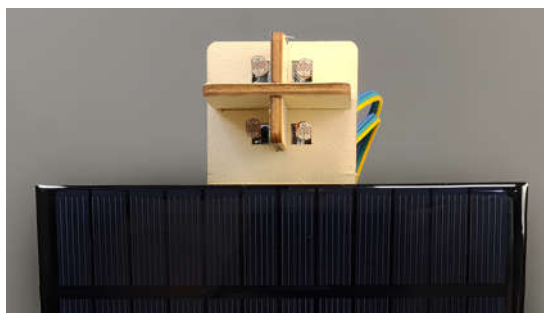
Sự chuyển dịch năng lượng từ các nguồn hóa thạch sang năng lượng tái tạo đang diễn ra mạnh mẽ trên quy mô toàn cầu nhằm đối phó với tình trạng biến đổi khí hậu và an ninh năng lượng. Tại Việt Nam, với đặc thù của một quốc gia nằm trong vùng nội chí tuyến bắc bán cầu, tiềm năng

năng lượng mặt trời là rất lớn với tổng số giờ nắng trung bình năm dao động từ 1400 đến 3000 giờ. Tuy nhiên, một trong những rào cản kỹ thuật chính làm hạn chế hiệu suất khai thác điện mặt trời là tính chất cố định của các giàn pin truyền thống. Hiệu suất của tấm pin quang điện đạt giá trị tối ưu khi và chỉ khi bề mặt tấm pin đón nhận tia bức xạ mặt trời theo phương vuông góc,

<sup>1</sup> Trường Đại học Mở Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

tuan theo định luật cosin của Lambert. Thực tế cho thấy, việc lắp đặt cố định khiến tấm pin chỉ đạt công suất đỉnh trong một khoảng thời gian rất ngắn quanh thời điểm cực đỉnh, trong khi phần lớn năng lượng vào buổi sáng sớm và chiều muộn bị lãng phí do góc tới quá lớn.

Để giải quyết vấn đề này, các hệ thống bám hướng mặt trời đã được phát triển nhằm điều chỉnh linh hoạt vị trí tấm pin theo quỹ đạo chuyển động của mặt trời. Về mặt phân loại, các hệ thống được chia thành hai trường phái điều khiển chính: hệ thống vòng kín và hệ thống vòng hở. Hệ thống vòng kín sử dụng các cảm biến quang học, phổ biến nhất là quang trở, để so sánh cường độ ánh sáng từ các hướng khác nhau và phản hồi về bộ điều khiển để xoay động cơ. Mặc dù phương pháp này có ưu điểm là phản ứng trực tiếp với nguồn sáng mạnh nhất trong điều kiện lý tưởng, nhưng nó bộc lộ những nhược điểm cố hữu khi vận hành ngoài thực địa. Tại các khu vực đô thị như Hà Nội, sự tích tụ của bụi mịn, ô nhiễm không khí và mây che phủ thường xuyên làm sai lệch tín hiệu của cảm biến. Hơn nữa, hiện tượng dò theo nguồn sáng khi mây trôi qua hoặc phản xạ từ các tòa nhà lân cận khiến động cơ phải hoạt động liên tục, gây tiêu tốn năng lượng tự dùng và giảm tuổi thọ cơ khí của hệ thống (Kinsler, 2020).



Hình 1. Cảm biến hướng sáng sử dụng quang trở để định vị nguồn sáng

Trong bối cảnh đó, phương pháp điều khiển vòng hở dựa trên thuật toán thiên văn học nổi lên như một giải pháp thay thế ưu việt và bền bỉ. Thay vì xác định vị trí mặt trời qua cảm biến, hệ thống này sử dụng các mô hình toán học để tính toán chính xác vị trí hình học của mặt trời trên thiên cầu tại bất kỳ thời điểm và tọa độ nào trên Trái đất. Các thuật toán này không bị ảnh hưởng bởi mây mù, bụi bẩn hay các vật cản che khuất ánh sáng tạm thời, đảm bảo tấm pin luôn hướng về vị trí mặt trời ngay cả khi nó bị che khuất. Trong số các nghiên cứu về thuật toán thiên văn, công trình của Joseph J. Michalsky (1988) (Michalsky, 1988) được đánh giá cao nhờ sự đơn giản trong triển khai trên các hệ thống nhúng mà vẫn duy trì được độ chính xác trong ngưỡng  $0,01^\circ$  cho đến năm 2050. Để nâng cao hơn nữa độ tin cậy, các phương trình bổ sung từ Jean Meeus trong cuốn “Astronomical Algorithms” cung cấp những hiệu chỉnh quan trọng về khúc xạ khí quyển và nhiễu loạn quỹ đạo, giúp mô phỏng chuyển động mặt trời sát với thực tế nhất.

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm hỗ trợ xây dựng một hệ thống dò tìm vị trí mặt trời thông minh sử dụng thuật toán Michalsky-Meeus triển khai trên vi điều khiển NodeMCU ESP8266. Hệ thống tích hợp module thời gian thực DS3231 hoặc kết nối mạng internet để đảm bảo tính đồng bộ thời gian tuyệt đối, vốn là yếu tố tiên quyết trong các tính toán thiên văn. Bài báo sẽ trình bày chi tiết từ cơ sở lý thuyết toán học đến quy trình thực nghiệm và đối chiếu kết quả với dữ liệu từ SunEarthTools tại khu vực Hà Nội vào tháng 03 năm 2025. Mục tiêu của nghiên cứu là cung cấp một giải pháp điều khiển hiệu quả, bền bỉ và có khả năng tích hợp cao vào các hệ thống quản lý năng lượng thông minh, góp phần thúc đẩy sự phát triển của năng lượng sạch tại Việt Nam.

## II. Cơ sở lý thuyết

### 2.1. Động lực học hệ Mặt trời và các hệ tọa độ thiên văn

Để xây dựng một thuật toán dò tìm vị trí mặt trời chính xác, việc hiểu rõ các chuyển động tương đối giữa trái đất và mặt trời là vô cùng cần thiết. Trái đất thực hiện hai chuyển động chính ảnh hưởng trực tiếp đến vị trí quan sát mặt trời: chuyển động tự quay quanh trục và chuyển động quay quanh mặt trời trên mặt phẳng hoàng đạo. Trục quay của trái đất nghiêng một góc xấp xỉ  $23,44^\circ$  so với pháp tuyến của mặt phẳng hoàng đạo. Độ nghiêng này, cùng với hình dạng quỹ đạo elip của Trái đất, tạo ra sự thay đổi độ lệch của Mặt trời ( $\delta$ ) trong dải từ  $-23,44^\circ$  vào ngày đông chí đến  $+23,44^\circ$  vào ngày hạ chí.

Vị trí của mặt trời được xác định thông qua ba hệ tọa độ chính, mỗi hệ đóng một vai trò trong quy trình tính toán chuyển tiếp:

Hệ tọa độ hoàng đạo: Sử dụng kinh độ hoàng đạo ( $\lambda$ ) và vĩ độ hoàng đạo ( $\beta$ ) để xác định vị trí mặt trời trong mặt phẳng quỹ đạo. Đối với mặt trời, vĩ độ hoàng đạo thường được coi là bằng 0.

$$Julian\ Day = [365,25(Y + 4716)] + [30,6001(M + 1)] + D + \frac{UT}{24} - 1524,5 \quad (1)$$

Trong đó Y, M, D là năm, tháng, ngày. Nếu  $M \leq 2$ , ta gán  $Y = Y - 1$  và  $M = M + 12$ . Đối với các thuật toán hiện đại, thời điểm tham chiếu J2000,0 (JD 2451545,0) thường được chọn làm mốc gốc.

### 2.3. Phân tích chi tiết thuật toán Joseph J. Michalsky (1988)

Thuật toán Michalsky (1988) được thiết kế để cung cấp một phương pháp xấp xỉ nhanh nhưng vẫn đạt độ chính xác  $0,01^\circ$ . Quy trình được thực hiện qua các bước toán học logic sau:

Hệ tọa độ xích đạo: Chuyển đổi từ tọa độ hoàng đạo sang hệ tọa độ gắn với trục quay của Trái đất, bao gồm xích kinh ( $\alpha$ ) và độ lệch ( $\delta$ ). Đây là bước đệm quan trọng để liên kết vị trí thiên thể với thời gian Sidereal.

Hệ tọa độ chân trời: Là hệ tọa độ thực tế tại điểm quan sát, bao gồm góc cao ( $e$ ) và góc phương vị ( $A$ ). Góc cao là góc giữa hướng nhìn mặt trời và mặt phẳng chân trời địa phương, trong khi góc phương vị xác định hướng của mặt trời so với các cực bắc hoặc nam.

### 2.2. Khái niệm thời gian trong thiên văn học và ngày Julian

Trong tính toán thiên văn, việc sử dụng các đơn vị thời gian thông thường (năm, tháng, ngày) là không đủ vì độ dài các tháng không đồng nhất và sự tồn tại của năm nhuận. Thay vào đó, thuật toán sử dụng ngày Julian, một hệ đếm ngày liên tục bắt đầu từ trưa ngày 1 tháng 1 năm 4713 trước công nguyên. Việc chuyển đổi từ lịch Gregorian sang ngày Julian (Rodriguez-Sotelo và cộng sự, 2022) là bước đầu tiên trong mọi thuật toán định vị thiên thể.

Công thức tính ngày Julian cho một thời điểm bất kỳ trong lịch Gregorian (từ năm 1900 đến 2100) được Jean Meeus trình bày như sau:

#### 2.3.1. Tính toán tọa độ hoàng đạo trung bình

Đầu tiên, ta xác định thời gian (số ngày kể từ kỷ nguyên J2000.0):

$$n = JD - 2451545,0 \quad (2)$$

Kinh độ trung bình của Mặt trời ( $L$ ) và cận điểm trung bình ( $g$ ) được tính bằng các hàm bậc nhất theo  $n$  (đơn vị độ):

$$L = 280,460 + 0,9856474n \quad (3)$$

$$g = 357,528 + 0,9856003n \quad (4)$$

Cần chuẩn hóa các góc này về dải  $[0^\circ, 360^\circ]$  bằng toán tử modulo.

### 2.3.2. Kinh độ hoàng đạo thực và độ nghiêng hoàng đạo

Do quỹ đạo Trái đất là elip, vận tốc góc của nó không hằng số. Phương trình tâm được sử dụng để tìm kinh độ hoàng đạo thực ( $\lambda$ ):

$$\lambda = L + 1,915 \sin(g) + 0,020 \sin(2g) \quad (5)$$

Độ nghiêng của trục Trái đất so với mặt phẳng hoàng đạo ( $\varepsilon$ ) cũng thay đổi rất chậm theo thời gian do hiện tượng chương động (nutation) và tiến động (precession):

$$\varepsilon = 23,439 - 0,0000004n \quad (6)$$

### 2.3.3. Xác định tọa độ xích đạo

Sử dụng các công thức lượng giác cầu để chuyển đổi  $\lambda$  và  $\varepsilon$  sang xích kinh ( $\alpha$ ) và độ lệch ( $\delta$ ):

$$\tan(\alpha) = \cos(\varepsilon) \tan(\lambda) \quad (7)$$

### 2.3.4. Thời gian Sidereal và góc giờ

Để liên kết vị trí mặt trời trên thiên cầu với vị trí của người quan sát trên trái đất, ta cần tính thời gian trung bình sidereal tại Greenwich (GMST):

$$\sin(\delta) = \sin(\varepsilon) \sin(\lambda) \quad (8)$$

Thời gian Sidereal địa phương (LMST) phụ thuộc vào kinh độ ( $\phi$ ) của người quan sát (dương nếu ở phía đông):

$$GMST = 6,697375 + 0,0657098242n + \text{hour\_UT} \quad (9)$$

Góc giờ (Hour Angle - H), đại diện cho khoảng cách góc của mặt trời so với kinh tuyến địa phương:

$$LMST = GMST + \frac{\phi}{15} \quad (10)$$

Giá trị H thường được chuẩn hóa về dải  $[-12\text{h}, 12\text{h}]$  hoặc  $[-\pi, \pi]$  radian.

## 2.4. Hiệu chỉnh theo Jean Meeus và khúc xạ khí quyển

Jean Meeus trong cuốn "Astronomical Algorithms" đã cung cấp

các phương pháp tinh chỉnh độ chính xác vượt xa mô hình Michalsky cơ bản. Một trong những đóng góp quan trọng nhất đối với kỹ thuật năng lượng mặt trời là mô hình khúc xạ khí quyển.

### 2.4.1. Khúc xạ khí quyển

Tầng khí quyển trái đất làm bẻ cong tia sáng mặt trời, khiến người quan sát thấy mặt trời cao hơn vị trí thực tế của nó (Theraja & Theraja, 2005). Hiệu ứng này đạt cực đại tại đường chân trời (khoảng  $34'$  hoặc  $0,57^\circ$ ) và giảm dần về 0 tại thiên đỉnh. Theo Meeus, nếu góc cao tính toán được là  $e_{\text{calc}}$  (độ), giá trị hiệu chỉnh khúc xạ (phút góc) được tính như sau:

$$H = LMST - \alpha \quad (11)$$

Góc cao biểu kiến cuối cùng sẽ là:

$$R = 1,02 / \tan \left( e_{\text{calc}} + \frac{10,3}{e_{\text{calc}} + 5,11} \right) \quad (12)$$

Hiệu chỉnh này đặc biệt quan trọng cho việc xác định chính xác thời điểm bình minh và hoàng hôn (thường được định nghĩa khi tâm Mặt trời ở góc  $-0,833^\circ$  để bù đắp cho khúc xạ và bán kính đĩa mặt trời).

### 2.4.2. Phương trình thời gian

Sự sai lệch giữa thời gian mặt trời thực và thời gian đồng hồ được gọi là phương trình thời gian ( $\Delta$ ). SunEarthTools sử dụng biểu thức xấp xỉ sau để hỗ trợ tính toán thời điểm Solar Noon:

$$e = e_{\text{calc}} + \frac{R}{60} \quad (13)$$

Trong đó n là ngày thứ mấy trong năm.

## 2.5. So sánh các phương pháp dò tìm vị trí Mặt trời

Để làm rõ sự cần thiết của thuật toán không cảm biến, Bảng 2 so sánh các đặc tính giữa hai phương pháp chính:

Bảng 2. So sánh hiệu năng giữa hệ thống bám hướng vòng kín và vòng hở

| Đặc điểm            | Hệ thống dựa trên cảm biến (vòng kín)   | Hệ thống dựa trên thuật toán (vòng hở)      |
|---------------------|---|---|
| Độ tin cậy          | Nhạy cảm với bụi, mây và vật cản        | Không bị ảnh hưởng bởi môi trường           |
| Chi phí bảo trì     | Cao (cần vệ sinh cảm biến định kỳ)      | Thấp (chỉ kiểm tra cơ khí)                  |
| Độ chính xác        | Cao trong điều kiện nắng gắt            | Cao và ổn định mọi lúc ( $\pm 0,01^\circ$ ) |
| Độ phức tạp         | Thấp (sử dụng mạch so sánh đơn giản)    | Cao (đòi hỏi xử lý toán học)                |
| Tiêu thụ năng lượng | Động cơ chạy liên tục nếu có nhiều sáng | Động cơ chạy theo bước tính toán            |

### III. Phương pháp, vật liệu nghiên cứu

#### 3.1. Thiết kế phần cứng hệ thống

Hệ thống được thiết kế tập trung vào tính nhỏ gọn, tiêu thụ năng lượng thấp và độ bền cao trong môi trường ngoài trời. Các thành phần vật liệu chính bao gồm :

##### 3.1.1. Khối xử lý trung tâm

Lõi của hệ thống là module NodeMCU dựa trên chip ESP8266. Lựa chọn này được đưa ra dựa trên các phân tích sau:

Hiệu suất: CPU 32-bit tốc độ 80MHz (có thể tăng lên 160MHz) hỗ trợ tốt các thư viện toán học dấu phẩy động cần thiết cho thuật toán Michalsky-Meeus.

Kết nối: Tích hợp wi-fi cho phép đồng bộ thời gian từ máy chủ NTP (Network Time Protocol) và gửi dữ liệu giám sát lên mạng lưới IOT (Thingspeak hoặc Blynk). Đồng thời xác định vị trí thông qua mạng lưới wifi.

Chi phí: Giá thành thấp, phù hợp cho việc triển khai đại trà tại các hộ gia đình hoặc trang trại nông nghiệp.

##### 3.1.2. Cơ cấu chấp hành và tấm pin thử nghiệm

Hệ thống điều khiển hai trục sử dụng hai động cơ servo có mô-men xoắn lớn (Aliprantis & Wasynczuk, 2022). Động cơ trục ngang cho phép xoay từ hướng đông sang tây ( $0^\circ$  đến  $180^\circ$  hoặc  $270^\circ$ ), trong khi động cơ trục dọc điều chỉnh góc

ngiên từ  $0^\circ$  đến  $90^\circ$ ) (IEEE, 2017). Đối tượng bám hướng là một tấm pin mặt trời đơn tinh thể công suất tối thiểu 1W dùng cho mục đích thực nghiệm đo lường.

Ngoài ra sử dụng 1 hệ thống khác không có động cơ và chỉ có góc cố định ở  $12^\circ$  dốc nghiêng theo mái.

#### 3.2. Xây dựng chương trình điều khiển và triển khai thuật toán

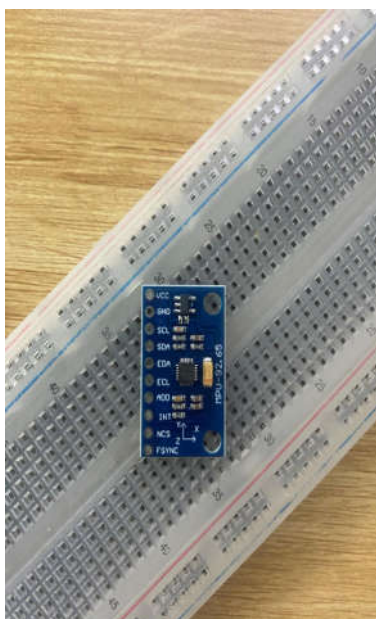
Chương trình được viết trên môi trường Arduino IDE bằng ngôn ngữ C++. Quy trình xử lý của firmware được thiết kế theo các module chức năng sau :

Khi hệ thống khởi động, NodeMCU kiểm tra và kết nối wi-fi để xác định thời gian và vị trí theo kinh độ và vĩ độ

Tính toán thiên văn. Đây là nơi triển khai toàn bộ các phương trình Michalsky-Meeus đã nêu ở mục II. Để đảm bảo độ chính xác trên MCU NodeMCU, các biến số được khai báo kiểu double (64-bit) thay vì float (32-bit). Các hằng số thiên văn được nạp đầy đủ chữ số thập phân để giảm thiểu sai số lũy tiến trong các phép nhân ma trận và hàm lượng giác.

Module điều khiển chuyển động. Thay vì cập nhật góc liên tục (gây rung lắc và mòn cơ khí), nghiên cứu đề xuất và đưa ra chiến lược di chuyển cân bằng giữa giảm hao mòn động cơ và độ chính xác. Thuật toán tính toán vị trí Mặt trời sau mỗi 10 giây, nhưng chỉ ra lệnh cho động cơ xoay khi sự thay đổi góc lớn hơn ngưỡng

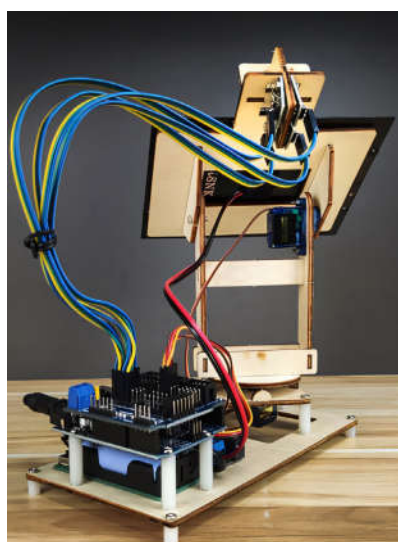
cho phép (ví dụ  $1^\circ$ ). Sử dụng cảm biến đo góc nhằm xác định góc lấy năng lượng chuẩn xác sử dụng MPU 6500.



Hình 2. Cảm biến góc nghiêng MPU6500

Bảng 3. Thông số kỹ thuật các thành phần trong hệ thống thực nghiệm

| Thành phần             | Đặc tính kỹ thuật               | Ghi chú  |
|------------------------|---------------------------------|--|
| MCU                    | ESP8266 (NodeMCU)               | Tần số 160 MHz   |
| RTC                    | DS3231 hoặc NTP (internet)      | Giao tiếp I2C  |
| Định vị / xác định góc | Wifi / Internet đi cùng MPU6500 | Sử dụng định vị wifi hoặc module GPS, cảm biến góc giao tiếp I2C |
| Cảm biến dòng/áp       | INA3221 3 kênh đo               | Giám sát công suất   |
| Chuyển động / tĩnh     | Servo hoặc gá góc cố định       |  |



Hình 3. Bộ điều khiển hướng theo mặt trời sử dụng servo



Hình 4. Bộ thu thập dữ liệu để so sánh ngoài trời

### 3.3. Thiết lập thực nghiệm và thu thập dữ liệu

Thực nghiệm được tiến hành tại quận Hoàng Mai, Hà Nội (vĩ độ:  $21,0285^\circ$  N , kinh độ:  $105.8542^\circ$  E) trong thời gian từ ngày 01/03/2025 đến ngày 31/03/2025.

Dữ liệu thu thập bao gồm:

1. Thời gian thực từ internet.
2. Góc cao (e) và góc phương vị (A) tính toán bởi thuật toán trên NodeMCU (Zirka và cộng sự, 2025)
3. Góc cao và góc phương vị tham chiếu trích xuất từ SunEarthTools.com cho cùng thời điểm và tọa độ.
4. Điện áp và dòng điện đầu ra của tấm pin (đo qua module INA3221) để đánh giá hiệu quả.

#### IV. Kết quả và thảo luận

Kết quả tính toán từ thuật toán Michalsky-Meeus trên NodeMCU được đối chiếu với dữ liệu từ SunEarthTools.

*Bảng 4. Đối chiếu kết quả tính toán và dữ liệu tham chiếu SunEarthTools (SET) tại Hà Nội*

| Giờ (GMT+7) | Góc cao (Thuật toán) | Góc cao (SET) | Sai số (e) | Góc phương vị (Thuật toán) | Góc phương vị (SET) | Sai số (A) |
|-------------|----------------------|---------------|------------|----------------------------|---------------------|------------|
| 07:00       | 10,14°               | 10,12°        | +0,02°     | 98,43°                     | 98,40°              | +0,03°     |
| 09:00       | 35,63°               | 35,60°        | +0,03°     | 112,18°                    | 112,15°             | +0,03°     |
| 11:00       | 58,34°               | 58,35°        | -0,01°     | 142,74°                    | 142,70°             | +0,04°     |
| 12:00       | 64,55°               | 64,56°        | -0,01°     | 177,05°                    | 177,00°             | +0,05°     |
| 13:00       | 64,13°               | 64,15°        | -0,02°     | 205,34°                    | 205,38°             | -0,04°     |
| 15:00       | 44,26°               | 44,23°        | +0,03°     | 245,18°                    | 245,20°             | -0,02°     |
| 17:00       | 18,45°               | 18,47°        | -0,02°     | 262,88°                    | 262,90°             | -0,02°     |

Phân tích bảng 4 cho thấy sai số trung bình của thuật toán duy trì ổn định ở mức dưới 0,05°. Sai lệch này hoàn toàn nằm trong ngưỡng cho phép đối với các hệ thống pin mặt trời PV thông thường, vốn có góc chấp nhận khá rộng. Thậm chí, độ chính xác này còn tiệm cận yêu cầu của các hệ thống tập trung năng lượng vốn đòi hỏi sai số dưới 0,1°.

Một điểm đáng lưu ý là sai số có xu hướng tăng nhẹ vào thời điểm chính trưa (12h00) (Kallaste và cộng sự, 2026). Điều này có thể giải thích do sự thay đổi cực nhanh của góc phương vị khi mặt trời đi qua thiên đỉnh, nơi mà các phép xấp xỉ lượng giác cầu trở nên nhạy cảm hơn với các lỗi làm tròn số. Tuy nhiên, việc sử dụng hiệu chỉnh khúc xạ khí quyển từ Jean Meeus đã giúp duy trì độ chính xác cao vào sáng sớm và chiều muộn, thời điểm mà các thuật toán vòng hở đơn giản thường gặp sai số lớn.

#### V. Kết luận

Nghiên cứu đã thực hiện thành công việc thiết kế, xây dựng và đánh giá thuật toán dò tìm vị trí mặt trời không sử dụng cảm biến trên nền tảng vi điều khiển

com. Bảng 4 trình bày số liệu chi tiết cho ngày 15 tháng 03 năm 2025 tại Hà Nội, thời điểm gần ngày xuân phân khi quỹ đạo mặt trời thay đổi mạnh.

NodeMCU. Thông qua việc tích hợp tri thức từ thuật toán Joseph J. Michalsky (1988) (Michalsky, 1988) và các hiệu chỉnh thiên văn của Jean Meeus, hệ thống đã chứng minh được khả năng xác định tọa độ mặt trời với độ chính xác cao ( $\pm 0,05^\circ$ ), hoàn toàn miễn nhiễm với các tác động tiêu cực của môi trường như bụi bẩn, sương mù và mây che phủ.

Việc loại bỏ các cảm biến quang học truyền thống không chỉ làm giảm độ phức tạp của phần cứng mà còn nâng cao đáng kể tính bền bỉ và độ tin cậy của hệ thống trong điều kiện khí hậu nhiệt đới khắc nghiệt tại Việt Nam. Hệ thống sử dụng RTC DS3231 đảm bảo dữ liệu thời gian ổn định và chính xác, trong khi NodeMCU ESP8266 cung cấp khả năng xử lý mạnh mẽ cùng kết nối IOT linh hoạt cho việc giám sát từ xa.

Kết quả thực nghiệm tại Hà Nội vào tháng 3 năm 2025 khẳng định tính đúng đắn của mô hình toán học và hiệu quả của chiến lược điều khiển vòng hở. Nghiên cứu này đóng góp một giải pháp kỹ thuật cụ thể, khả thi và kinh tế cho các trạm điện mặt trời thông minh (Zirka và cộng sự,

2025) đồng thời mở ra hướng phát triển cho việc tích hợp trí tuệ nhân tạo để dự báo mây và tối ưu hóa năng lượng trên quy mô lưới điện siêu nhỏ. Việc áp dụng rộng rãi các thuật toán thiên văn trong bám hướng mặt trời sẽ là bước tiến quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng tái tạo, góp phần vào mục tiêu phát triển bền vững của quốc gia.

#### Tài liệu tham khảo:

- Aliprantis, D., & Wasynczuk, O. (2022). *Electric machines: Theory and analysis using the finite element method*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108529280>
- IEEE Power & Energy Society. (2017). *IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators (IEEE Std 112-2017)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8283286>
- Kallaste, A., Vaimann, T., Rassõlkin, A., & Janson, K. (2026). *Fundamentals of electrical machines* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003404088>
- Kinsler, P. (2020). Faraday's law and magnetic induction: Cause and effect, experiment and theory. *Physics*, 2(2), 150-163. <https://doi.org/10.3390/physics2020009>
- Meeus, J. (1998). *Astronomical algorithms* (2nd ed.). Willmann-Bell.
- Michalsky, J. J. (1988). The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050). *Solar Energy*, 40(3), 227-235. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90045-X)
- Rodriguez-Sotelo, I., Ruiz-Robles, D., Raygoza-Panduro, J. J., & Morales-Hernandez, L. A. (2022). Power losses models for magnetic cores: A review. *Micromachines*, 13(3), 418. <https://doi.org/10.3390/mi13030418>
- Theraja, B. L., & Theraja, A. K. (2005). *A textbook of electrical technology: Vol. II. AC & DC machines* (23rd rev. ed.). S. Chand Publishing.
- Zirka, S., Albert, D., & Fröhlich, A. (2025). Accurate no-load behavior prediction of large five-legged transformers using topological transient models. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-09-2024-0391>

# OPTICAL-SENSORLESS SUN POSITION TRACKING ALGORITHM

Tu Viet Hoang<sup>1</sup>, Hoang Anh Dung<sup>1</sup>, Trinh Thi Hau<sup>1</sup>, Dinh Khac Long<sup>1</sup>, Phan Van Hai<sup>1</sup>

**Abstract:** *This study presents a comprehensive approach to optimizing solar energy harvesting efficiency through an open-loop sun tracking algorithm, entirely independent of traditional optical sensors. The primary challenge for solar tracking systems in tropical regions like Vietnam is the erratic weather, cloud cover, and dust accumulation on sensor surfaces, which can lead to control errors and significant performance degradation. To overcome these issues, the paper proposes the application of Joseph J. Michalsky's (1988) (Michalsky, 1988) algorithm, combined with in-depth astronomical corrections from Jean Meeus's work, to determine solar coordinates with an accuracy of approximately  $0.01^\circ$ . The system is implemented on the NodeMCU ESP8266 microcontroller, allowing the calculation of Elevation and Azimuth angles based on longitude, latitude, and real-time data at the installation site. Experimental data, when directly compared with the SunEarthTools utility, show a strong correlation with negligible error. The research results not only provide a durable, low-maintenance technological solution but also lay the foundation for integrating smart renewable energy systems into the future IoT network.*

**Keywords:** *astronomical algorithms, Michalsky algorithms, NodeMCU, solar tracking*

---

<sup>1</sup> Hanoi Open University, Hanoi, Vietnam