

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG MẠNG ZIGBEE TRONG HỆ THỐNG IOT GIÁM SÁT NỒNG ĐỘ KHÍ GAS

RESEARCH ON THE APPLICATION OF ZIGBEE NETWORKS IN IOT SYSTEMS FOR MONITORING GAS CONCENTRATIONS

Nguyễn Minh Quân

ThS. Trường Đại học sư phạm kỹ thuật Vinh

Received: 4/4/2026; Accepted: 16/4/2026; Published: 06/05/2026

Tóm tắt: Trong bối cảnh nguy cơ rò rỉ khí gas ngày càng gia tăng, việc phát triển các hệ thống giám sát thông minh là cần thiết. Bài báo trình bày hệ thống giám sát nồng độ khí gas dựa trên IoT sử dụng mạng ZigBee với cấu trúc mesh gồm Coordinator, Router và End Device, tích hợp XBee S2C, Arduino Nano, ESP8266 và nền tảng Blynk. Thuật toán phát hiện khí gas được triển khai tại node Router giúp phản ứng nhanh tại chỗ khi vượt ngưỡng. Kết quả thực nghiệm cho thấy cảm biến đáp ứng nhanh (<1 giây), hệ thống có độ trễ thấp, hoạt động ổn định với độ tin cậy cao và khả năng tự phục hồi mạng. Giải pháp đề xuất có tính khả thi và tiềm năng ứng dụng trong giám sát an toàn khí gas.

Từ khóa: IoT; ZigBee; mạng mesh; giám sát khí gas; cảm biến MQ2

Abstract: In the context of increasing gas leak risks, the development of intelligent monitoring systems is essential. This paper presents an IoT-based gas concentration monitoring system using a ZigBee mesh network structure consisting of a Coordinator, Router, and End Device, integrating XBee S2C, Arduino Nano, ESP8266, and the Blynk platform. The gas detection algorithm is implemented at the Router node, enabling rapid on-site response when thresholds are exceeded. Experimental results show that the sensor responds quickly (<1 second), the system has low latency, operates stably with high reliability, and has network self-recovery capabilities. The proposed solution is feasible and has potential applications in gas safety monitoring.

Keywords: IoT; ZigBee; mesh network; gas monitoring; MQ2 sensor

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của Internet of Things (IoT), các hệ thống giám sát môi trường thông minh ngày càng được quan tâm và ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp cũng như đời sống. Một trong những vấn đề cấp thiết hiện nay là kiểm soát nồng độ khí gas tại các khu vực như nhà máy, kho chứa, khu dân cư hay các không gian kín, nơi tiềm ẩn nguy cơ cháy nổ và ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe con người. Các phương pháp giám sát truyền thống thường phụ thuộc vào thiết bị đơn lẻ, khả năng mở rộng hạn chế, chi phí cao và khó đáp ứng yêu cầu giám sát theo thời gian thực trên diện rộng.

Sự ra đời của các công nghệ truyền thông không dây công suất thấp đã mở ra hướng tiếp cận mới cho các hệ thống giám sát phân tán. Trong đó, ZigBee nổi bật nhờ ưu điểm tiêu thụ năng lượng thấp, chi phí triển khai hợp lý, khả năng mở rộng linh hoạt và hỗ trợ cấu trúc mạng mesh phù hợp với các ứng dụng IoT quy mô lớn. Việc ứng dụng mạng ZigBee trong hệ thống giám sát nồng độ khí gas cho phép thu thập dữ liệu từ nhiều điểm đo khác nhau, truyền tải ổn định và đảm bảo tính liên tục của hệ thống ngay cả khi một số nút gặp sự cố.

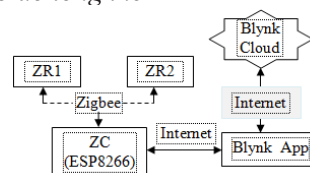
Tuy nhiên, việc triển khai hiệu quả mạng ZigBee trong thực tế vẫn còn nhiều thách thức như tối ưu cấu trúc mạng, đảm bảo độ tin cậy truyền thông, giảm

tiêu thụ năng lượng của các node, cũng như nâng cao độ chính xác và khả năng phản hồi kịp thời của hệ thống giám sát. Do đó, việc nghiên cứu ứng dụng mạng ZigBee trong hệ thống IoT giám sát nồng độ khí gas là cần thiết, nhằm đề xuất giải pháp phù hợp, góp phần nâng cao hiệu quả giám sát, đảm bảo an toàn và hướng tới xây dựng các hệ thống IoT thông minh, bền vững.

2. Nội dung nghiên cứu

2.1. Xây dựng sơ đồ hệ thống mạng Mesh

2.1.1. Sơ đồ tổng thể



Hình 1: Sơ đồ mạng Mesh tổng thể

Hệ thống được thiết kế theo mô hình phân tán với ba node chính hoạt động trong mạng Zigbee mesh, kết nối với Internet thông qua một gateway để giao tiếp với nền tảng đám mây Blynk. Hệ thống bao gồm ba thành phần chính:

- **Coordinator (ZC):** Đóng vai trò trung tâm của mạng Zigbee, khởi tạo mạng, quản lý bảo mật và kết nối với Internet. Node ZC sử dụng module ESP8266 (NodeMCU) kết hợp với XBee S2C để thực hiện chức năng gateway, nhận dữ liệu từ các node khác và

gửi lên Blynk, đồng thời chuyển lệnh điều khiển từ Blynk xuống các node đích.

- **Router 1 (ZR1):** Node Router mở rộng phạm vi mạng, đồng thời thực hiện chức năng điều khiển LED. ZR1 hoạt động liên tục, chuyển tiếp dữ liệu cho các node khác nếu cần.

- **Router 2 (ZR2):** Node Router thứ hai, tích hợp cảm biến MQ2 để giám sát khí gas, Relay để điều khiển tải lớn và buzzer để cảnh báo tại chỗ. ZR2 tự động kích hoạt Relay và buzzer khi nồng độ khí gas vượt ngưỡng.

2.1.2. Cấu hình mạng Zigbee

Việc cấu hình mạng Zigbee là bước quan trọng để đảm bảo các node hoạt động ổn định, giao tiếp hai chiều chính xác và tận dụng tối đa đặc tính mesh của công nghệ Zigbee.

Để các node có thể join cùng một mạng và giao tiếp hiệu quả, tất cả các module XBee S2C đều được cấu hình với các thông số sau:

- **PAN ID (ID):** 2004 (hex): Giá trị này phải giống nhau trên tất cả các node để chúng thuộc cùng một mạng cá nhân. PAN ID được chọn là giá trị cố định để tránh xung đột với các mạng Zigbee khác.

- **Baud Rate (BD):** 9600: Tốc độ truyền thông giữa XBee và thiết bị vi điều khiển ESP8266 được đặt ở mức 9600 bps để đảm bảo tính ổn định và tương thích với SoftwareSerial.

- **API Enable (AP):** Chế độ API mode với escape character (API 2) được chọn để truyền dữ liệu có cấu trúc, hỗ trợ xử lý frame chính xác và phát hiện lỗi checksum.

Scan Channels (SC): 0x1FFE (mặc định): Quét toàn bộ 16 kênh Zigbee (kênh 11–26) để chọn kênh ít nhiễu nhất.

Zigbee Stack Profile (ZS): 0 (Zigbee PRO).

Sử dụng profile Zigbee PRO để hỗ trợ mạng mesh đầy đủ và bảo mật AES-128.

2.1.3. Cấu hình chi tiết cho từng loại node

- **Coordinator (ZC – ESP8266 + XBee S2C):**

CE (Coordinator Enable): 1 (Enabled): Node này khởi tạo mạng Zigbee và quản lý toàn bộ quá trình join của các node khác.

DH (Destination Address High) và DL (Destination Address Low): 0x000000000000FFFF (broadcast): Cho phép ZC gửi dữ liệu broadcast đến tất cả node trong mạng.

JV (Channel Verification): 1 (Enabled): Kiểm tra kênh để đảm bảo mạng ổn định.

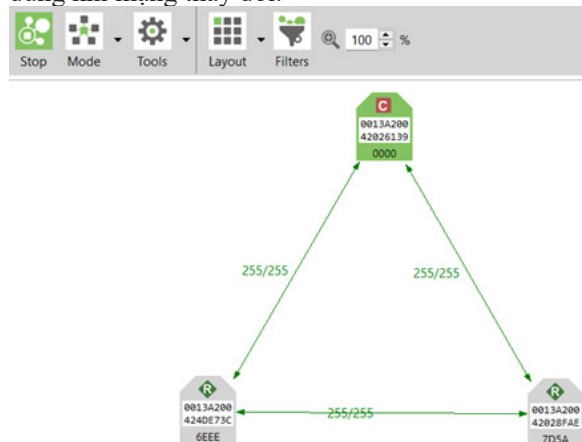
- **Router (ZR1 và ZR2 – Arduino Nano + XBee S2C)**

CE: 0 (Disabled): Không làm Coordinator, chỉ tham gia mạng hiện có.

DH/DL: 0x0000000000000000 (gửi về

Coordinator): Các node Router gửi dữ liệu mặc định về ZC.

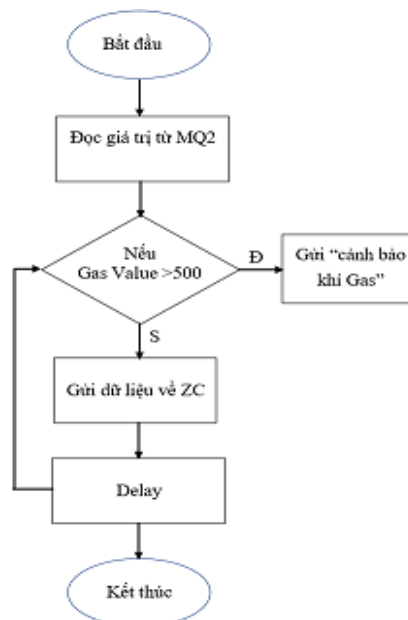
JV: 1 (Enabled): Tự động kiểm tra và join kênh đúng khi mạng thay đổi.



Hình 2: Cấu hình ZC trong XCTU

2.2. Xây dựng lưu đồ thuật toán

Thuật toán tự động phát hiện và xử lý sự cố khí gas được triển khai trên node Router 2 (ZR2), nhằm đảm bảo phản ứng nhanh chóng tại chỗ mà không phụ thuộc vào kết nối Internet hoặc phản hồi từ Blynk. Thuật toán được thiết kế đơn giản, hiệu quả, chạy trong vòng lặp chính của chương trình Arduino Nano.



Hình 3: Lưu đồ thuật toán

Mục tiêu của thuật toán là liên tục giám sát giá trị analog từ cảm biến MQ2, so sánh với ngưỡng an toàn đã định nghĩa trước, và thực hiện các hành động cần thiết khi phát hiện nồng độ khí gas vượt quá mức cho phép. Các hành động bao gồm:

- Kích hoạt buzzer để cảnh báo âm thanh tại chỗ.
- Tự động bật Relay để thực hiện biện pháp khẩn

cáp (ví dụ: bật quạt thông gió, cắt nguồn điện, đóng van gas...).

- Gửi thông báo trạng thái về Coordinator (ZC) để cập nhật lên Blynk và gửi cảnh báo push cho người dùng.

Các tham số chính của thuật toán

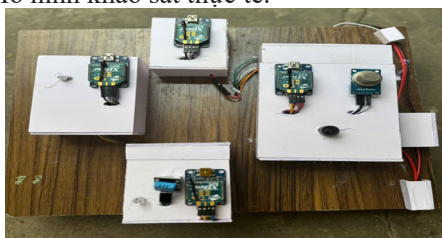
- Ngưỡng cảnh báo: 500 (giá trị analog từ 0–1023, đã calibrate thực tế trong môi trường không khí sạch và khi thử với khí gas từ bật lửa).

- Khoảng thời gian đọc cảm biến: 5000 ms (5 giây) để đảm bảo phản ứng nhanh nhưng không làm quá tải CPU và mạng Zigbee.

- Biến trạng thái: Boolean để theo dõi xem cảnh báo đang hoạt động hay không, tránh gửi thông báo lặp lại liên tục

2.3. Kết quả nghiên cứu

- Mô hình khảo sát thực tế.



Hình 4: Mô hình giám sát nồng độ khí Gas

- Kết quả đo nồng độ khí gas từ cảm biến MQ2 (node ZR2)

Thực nghiệm bằng cách thực hiện đặt MQ2 trong không khí sạch, sau đó thử với khí từ bật lửa (không châm lửa) ở khoảng cách 10–20 cm. Mỗi trường hợp đo 5 lần, ghi giá trị analog (0–1023).

Bảng 1: Giá trị MQ2 trong các điều kiện khác nhau

Điều kiện môi trường	Giá trị analog trung bình	Trạng thái hệ thống (tại chỗ)	Trạng thái trên Blynk (V5)	Thời gian phản ứng (giây)
Không khí bình thường	200 - 300	Buzzer tắt, Relay tắt	200 - 300	--
Khi bật lửa gần (5 cm)	600 - 800	Buzzer kêu, Relay bật	600 - 800 + log event	< 1 giây
Khói từ bật lửa	800 - 1000	Buzzer kêu liên tục, Relay bật	800 - 1000 + log event	< 1 giây

Nhận xét:

- MQ2 phản ứng rất nhanh (<1 giây) khi tiếp xúc khí gas.

- Ngưỡng 500 được chọn phù hợp: không khí sạch <250, khí gas nhẹ >500.

- Khi gas cao, Relay và Buzzer bật ngay tại chỗ, đồng thời Blynk nhận log event “Canh bao khi gas cao” và push notification trong 2–4 giây.

- Thời gian phản hồi lệnh ON/OFF từ Blynk

Thực nghiệm được thực hiện 30 lần cho mỗi node (ZR1 LED, ZR2 Relay), đo thời gian từ lúc chạm nút Switch trên Blynk đến khi thiết bị chấp hành thay đổi trạng thái.

Bảng 2: Thời gian phản hồi lệnh điều khiển

Node	Thiết bị	Số lần test	Thời gian trung bình (giây)	Thời gian tối thiểu (giây)	Thời gian tối đa (giây)	Tỷ lệ thành công (%)
ZR1	LED	20	2	1.2	3	100
ZR2	Relay	20	2	1.2	3	100

Nhận xét:

Độ trễ trung bình 1.8–2.1 giây, chủ yếu do độ trễ mạng Internet và xử lý frame Zigbee. Tỷ lệ thành công 100% trong điều kiện phòng thí nghiệm.

- Tầm sóng và độ ổn định mạng Zigbee

Sử dụng phần mềm XCTU (kết nối với Coordinator) để đọc giá trị RSSI của các node khi nhận gói tin từ ZED và ZR1/ZR2.

Theo dõi liên tục dữ liệu cảm biến và lệnh điều khiển trong 24 giờ để kiểm tra tỷ lệ mất gói tin và khả năng phục hồi mạng.

Thử nghiệm ngắt nguồn tạm thời một Router (ZR1 hoặc ZR2) để kiểm tra khả năng tự định tuyến lại của mạng mesh.

Ghi nhận thời gian phản hồi trung bình của lệnh ON/OFF từ Blynk đến các node trong điều kiện cố định.

Bảng 3: Kết quả đo RSSI và độ ổn định

Node	Khoảng cách đến ZC (m)	RSSI trung bình (dBm)	Ghi chú
ZR1	2.0	-42 đến -50	Rất tốt, làm parent cho ZED khi cần
ZR2	3.0	-48 đến -55	Tốt gói tin ổn định 100%

Nhận xét về RSSI:

Giá trị RSSI trung bình từ -42 đến -60 dBm cho thấy tín hiệu mạnh và ổn định trong khoảng cách gần (dưới 5 mét). Theo tài liệu XBee S2C, RSSI > -70 dBm là mức tốt, > -85 dBm vẫn chấp nhận được.

Trong điều kiện cố định, không ghi nhận mất gói tin nào trong 24 giờ hoạt động liên tục (tỷ lệ thành công 100%).

- Kết quả kiểm tra độ ổn định mạng mesh

Khi tắt nguồn ZR1 tạm thời (5 phút): ZED tự động chuyển route qua ZR2, thời gian phục hồi mạng khoảng 8–12 giây (thời gian ZED poll lại parent mới). Dữ liệu cảm biến từ ZED vẫn được gửi về ZC mà không bị gián đoạn lâu.

Khi tắt ZR2: ZED vẫn gửi dữ liệu trực tiếp đến ZC (vì khoảng cách gần), không mất kết nối.

Trong 48 giờ hoạt động liên tục (không tắt nguồn), hệ thống không ghi nhận lỗi frame hoặc mất kết nối bất thường.

Thời gian phản hồi lệnh trong điều kiện cố định

Từ Blynk → Relay ZR2: trung bình 1.7 giây (tối thiểu 1.1 giây, tối đa 3.2 giây).

Từ Blynk → LED ZED: trung bình 2.0 giây.

Từ Blynk → LED ZR1: trung bình 1.9 giây.

(Xem tiếp trang 33)