Truyền đa kênh cho định tuyến phân cụm trong mạng cảm biến không dây

Multichanel Communication for Cluster-based Routing in Wireless Sensor Networks

Ngô Quỳnh Thu

Abstract: *Because of limited power size and processing capability of sensor nodes, Wireless Sensor Networks require special routing mechanisms, for example cluster-based and event-drivent routing protocol [1]. These routing schemes are energy efficient, load balanced and reliable but most of them can not provide end-to-end delay requirement for real-time applications, such as tracking or healthcare. In this paper, we propose a new multichannel communication scheme for cluster-based and event-drivent routing protocol, called mMRC (Multichannel Cluster-based Routing Scheme) in order to improve end-to-end delay, throughput received at the Base Station of network for real-time applications. Our first performance result by using OMNET++ shows that mMRC achieves better energy efficiency, bandwidth, delay… compared to ARPEES and OEDSR.*

Keywords*: multichannel, cluster-based routing, wireless sensor networks*

I. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, mạng cảm biến không dây được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Mạng này được tạo nên bởi các nút cảm biến có kích thước nhỏ và khả năng xử lý hạn chế, được phân bố trên một vùng địa lý rộng và kết nối với nhau thông qua môi trường vô tuyến. Vì vậy mạng này đòi hỏi phải có những giao thức định tuyến riêng thoả mãn các đặc điểm: tiết kiệm năng lượng, cân bằng tải, ổn định… để giúp kéo dài thời gian sống của mạng. Có rất nhiều các nghiên cứu tập trung vào các giao thức định tuyến để giải quyết các thách thức nêu trên, điển hình là *định tuyến phân cụm.* Phương pháp này phân chia mạng lớn thành các cụm, mỗi cụm được đại diện bởi một cụm trưởng để chịu trách nhiệm xử lỹ dữ liệu nhận được trong cụm và truyền về trạm gốc (điển hình là LEACH [2]). So với định tuyến phẳng, các phương pháp định tuyến phân cụm có nhiều ưu điểm hơn vì giúp giảm các bản tin điều khiển, tiết kiệm đồng thời cân bằng năng lượng, qua đó giúp tăng thời gian sống của mạng.

Các phương pháp định tuyến phân cụm, lại có thể được chia thành *định tuyến phân cụm liên tục* và *theo sự kiện*. Trong các phương pháp *định tuyến phân cụm liên tục*, dữ liệu cảm biến được liên tục gửi về trạm gốc trong khi các phương pháp *định tuyến phân cụm theo sự kiện* chỉ gửi dữ liệu khi có sự kiện xuất hiện, do đó tiêu hao năng lượng ít hơn. Ví dụ điển hình của các giao thức phân cụm theo sự kiện là ARPEES [1], EMRP [3], OEDSR [4] và HPEQ [5]. Tuy nhiên nhược điểm quan trọng của các giao thức này là chúng chưa quan tâm đến các yêu cầu về trễ đầu cuối của các ứng dụng (giám sát bắt mục tiêu, y tế). Ngoài ra việc phân chia dữ liệu từ nhiều nút cảm biến truyền về trạm gốc theo nhiều đường trên nhiều tần số (hay còn gọi là truyền đa kênh) có thể giúp việc phân chia tải tốt hơn và do đó có thể giảm trễ đầu cuối. Hiện nay, các thế hệ cảm biến mới đã được hỗ trợ tính năng truyền đa kênh này, cụ thể Nordic NrF950 radio [6] và CC2420 radio [7] đã có thể truyền trên *16* tần số khác nhau. Cần phải nói thêm rằng, tuy có thể truyền trên nhiều tần số, nhưng tại một thời điểm các nút cảm biến thông thường chỉ truyền được trên một tần số nhất định (*bán song công*) mà thôi.

Nói một cách khác, kết hợp định tuyến phân cụm theo sự kiện với truyền đa kênh hứa hẹn sẽ mang lại các ưu điểm như là tiết kiệm năng lượng, tin cậy, cân bằng tải, và giảm trễ đầu cuối… cho mạng cảm biến không dây. Trong bài báo này, tôi đề xuất một phương thức truyền đa kênh cho định tuyến phân cụm theo sự kiện, gọi là phương pháp mMRC (Multichannel Cluster-based Routing scheme) và thực hiện đánh giá hiệu năng của phương thức mới này thông qua mô phỏng đồng thời so sánh với các giao thức định tuyến phân cụm theo sự kiện ARPEES và OEDSR. Kết quả ban đầu cho thấy, hiệu năng của mMRC cao hơn các giao thức định tuyến phân cụm tương ứng như là ARPEES và OEDSR thể hiện ở các thông số năng lượng, thông lượng, độ tin cậy…

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: phần II sẽ trình bày về các thách thức khi thiết kế giao thức định tuyến phân cụm kết hợp với đa kênh. Phần III mô tả mô hình truyền thông được sử dụng khi thiết kế mMRC. Phần IV mô tả chi tiết hoạt động của mMRC. Phần V đánh giá hiệu năng của giao thức này bằng công cụ OMNET++ [18]. Phần cuối đưa ra một số nhận xét và các hướng phát triển tương lai.

II. THÁCH THỨC CỦA BÀI TOÁN TRUYỀN ĐA KÊNH NÓI CHUNG

Trong mạng cảm biến không dây, vì môi trường truyền dẫn là không dây nên khi truyền đa kênh thì vấn đề quan trọng nhất cần phải giải quyết là *chồng kênh* và *xung đột*. Thách thức tiếp theo là các nút cảm biến thường chỉ làm việc ở chế độ *bán song công* (tức là tại một thời điểm chỉ có thể nhận hoặc gửi dữ liệu trên một kênh hay một tần số nhất định) nên các giải pháp đa kênh muốn các nút cảm biến truyền dữ liệu thành công trên nhiều tần số khác nhau sẽ gặp rất nhiều khó khăn. Quan trọng nhất, các giao thức đa kênh phải tìm được đường để truyền dữ liệu về đích (*định tuyến*) trên nhiều chặng, tại mỗi chặng nút gửi và nút nhận phải nằm trên cùng một tần số (*cấp phát kênh*). Trong trường hợp các mạng cảm biến có kích thước lớn đến hàng nghìn nút, bài toán định tuyến và cấp phát kênh trong truyền đa kênh cũng sẽ trở nên rất phức tạp. Để giải quyết những thách thức trên, có thể có những giải pháp như sau cho truyền đa kênh:

- *Chồng kênh* và *xung đột*: Trong môi trường truyền dẫn không dây, khi nhiều nút cảm biến cùng muốn truy cập vào đường truyền không dây sẽ xảy ra xung đột. Hơn thế nữa, khi nhiều nút cùng muốn truyền trên những kênh có tần số khác nhau, chắc chắn sẽ xảy ra hiện tượng giao thoa giữa các tần số gần nhau. Nếu hiện tượng chồng kênh và xung đột này không được giải quyết một cách hợp lý, việc thu nhận dữ liệu ở trạm gốc một cách chính xác sẽ không thực hiện được. Để giải quyết bài toán xung đột, chúng ta có thể lựa chọn các phương pháp đa truy cập TDMA, FDMA, CSMA/CA… cho các giao thức đa kênh. Để giảm thiểu giao thoa do chồng kênh, các giao thức đa kênh phải được thiết kế để các kênh dữ liệu gần nhau sử dụng những tần số cách xa nhau, hoặc sử dụng các tần số trực giao. Tuy nhiên số lượng các tần số trực giao là hạn chế nên việc chỉ sử dụng các kênh trực giao không thể tận dụng tần số một cách hiệu quả.

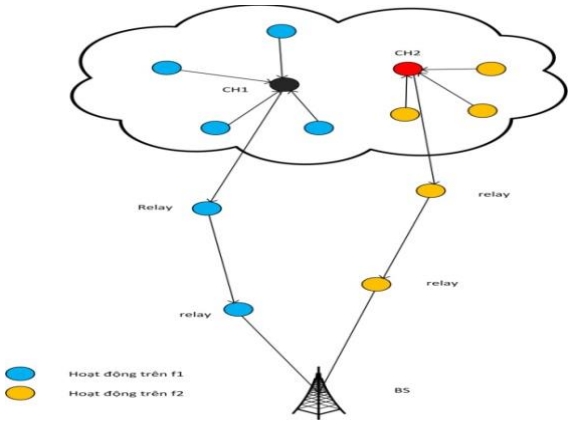
- Do tính chất thường chỉ làm việc được ở chế độ *bán song công*, tức là tại một thời điểm một nút cảm biến chỉ có thể làm việc trên một tần số nhất định ở trạng thái hoặc gửi hoặc nhận dữ liệu. Để truyền trên nhiều tần số khác nhau, các nút phải thực hiện chuyển đổi động giữa các tần số (*chuyển kênh*) nhưng vẫn phải đảm bảo yêu cầu nút gửi và nút nhận cùng nằm trên một tần số tại cùng một thời điểm (*cấp phát kênh*) thì mới truyền dữ liệu thành công được. Truyền đa kênh do vậy phải phối hợp *chuyển kênh* nhịp nhàng giữa các nút cảm biến nhưng khi số lượng tần số và kích thước của mạng tăng lên, vấn đề cấp phát kênh giữa các nút của mạng sẽ trở nên phức tạp hơn và cần phải được thiết kế một cách chi tiết.

- Cuối cùng, do các mạng cảm biến có cấu hình lớn có thể chứa đến hàng ngàn nút nên phải lựa chọn các giải pháp định tuyến thích hợp cho truyền đa kênh để giúp tìm đường về trạm gốc. Có rất nhiều các giải pháp định tuyến khác nhau, quan trọng là *định tuyến*

phân cụm. Phương pháp này phân chia mạng lớn thành các cụm, mỗi cụm được đại diện bởi một cụm trưởng để chịu trách nhiệm xử lý dữ liệu nhận được trong cụm và truyền về trạm gốc. Các phương pháp định tuyến phân cụm, lại có thể được chia thành *định tuyến phân cụm liên tục* và *theo sự kiện*. Trong các phương pháp *định tuyến phân cụm liên tục*, dữ liệu cảm biến được liên tục được gửi về trạm gốc trong khi các phương pháp *định tuyến phân cụm theo sự kiện* chỉ gửi dữ liệu chỉ khi có sự kiện xuất hiện, do đó càng giúp tiết kiệm được năng lượng trong mạng. Tuỳ thuộc vào từng trường hợp cụ thể, các giải pháp truyền đa kênh có thể lựa chọn phương pháp định tuyến phù hợp nhất.

Các giao thức truyền đa kênh áp dụng trong mạng cảm biến không dây đã thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học từ lâu. Trong số các giao thức truyền đa kênh này, có một số giao thức chỉ thực hiện phối hợp kênh và đa truy cập chứ không giải quyết bài toán định tuyến [8-10]. Có một số các giao thức khác đưa vào giải quyết cả bài toán định tuyến khi truyền đa kênh, cụ thể là các giao thức [11-16]… Trong số các giao thức định tuyến kết hợp với truyền đa kênh này, có một số giao thức thực hiện định tuyến phân cụm như là real-time MAC protocol [11], Multichannel clustering [12], eTMCP [17]. Cụ thể hơn nữa real-time MAC [11] đưa ra một giao thức truyền đa kênh trong thời gian thực trong đó định tuyến được thực hiện bằng cách phân chia toàn bộ mạng thành các tế bào hay các cụm, mỗi cụm được cấp một tần số cố định. Tác giả đánh giá hiệu năng của giao thức này thông qua phân tích toán học và mô phỏng bằng công cụ NS-2. Kết quả của hai phương pháp cho thấy giao thức này có thể cung cấp mức trễ thấp và thông lượng đạt được lớn ở điều kiện tải đầu vào là cao. Nhược điểm của giao thức này là quá trình định tuyến về đích chưa được giải thích rõ ràng. Ở [12] giao thức Multichannel Clustering cũng chia mạng thành các cụm dựa trên độ lớn của dữ liệu cảm biến được trong cụm và các cụm cũng được cấp các tần số cố định. Khác với [11], giao thức này không chú trọng cung cấp độ trễ thấp mà ưu tiên tăng thời gian sống và hiệu suất sử dụng kênh truyền. Phương pháp đánh giá hiệu năng sử dụng là mô phỏng chứ không sử dụng mô hình toán học. eTMCP [17] là một trong số ít các giao thức truyền đa kênh được triển khai trên hệ thống thật và việc cấp phát kênh cho các cụm được thực hiện dựa vào thuyết điều khiển. Kết quả đánh giá hiệu năng trên hệ thống thật và mô phỏng cho thấy eTMCP đạt được băng thông lớn, giảm trễ chuyển kênh và giảm tắc nghẽn. Nhược điểm lớn nhất của eTMCP là chưa quan tâm đến năng lượng tiêu hao của mạng và trễ.

Sau khi xem xét các phương pháp đa kênh kết hợp với định tuyến phân cụm, tôi nhận thấy *chưa có giải pháp đa kênh nào thực hiện định tuyến phân cụm theo sự kiện để tận dụng các ưu điểm của nó*. Trong khuôn khổ bài báo này, tôi đề xuất một giải pháp truyền đa kênh có tên là mMRC (Multichannel Cluster-based Routing Scheme) dựa trên phương thức định tuyến phân cụm để tận dụng các ưu điểm của nó như là tiết kiệm năng lượng và thực hiện được trên các mạng kích thước lớn. Cụ thể hơn nữa, khi có sự kiện xẩy ra, các nút tham gia sự kiện được chia thành *m* cụm nhỏ, mỗi cụm có một cụm trưởng (Cluster Head – CH) chịu trách nhiệm thu thập và tổng hợp dữ liệu. *m* CH này sẽ tiến hành tìm đường và dữ liệu được truyền song song trên *m* tần số về đích. Việc thành lập cụm và tìm đường được thực hiện trên tần số f_0, còn *m* đường truyền dữ liệu trên *m* tần số từ $f_1, f_2 \dots, f_m$. Để giải quyết bài toán chồng kênh giữa các tuyến đường song song này, mMRC sẽ chỉ sử dụng các tần số trực giao vì hiện nay nhiều nút cảm biến đã có thể sử dụng đến *16* tần số trực giao trên dải tần *2.4GHz*. Để giải quyết bài toán xung đột, tôi sử dụng phương pháp đa truy cập CSMA/CA và phương pháp TDMA. Việc phối hợp kênh giữa các tần số này (một tần số quảng bá và *m* tần số truyền dữ liệu) để đảm bảo tính chất bán song công của các nút cảm biến sẽ được mô tả chi tiết trong phần IV.



Hình 1. *Minh hoạ hoạt động của mMRC với m=2*

III. MÔ HÌNH NĂNG LƯỢNG

Mô hình mạng cảm biến không dây được nghiên cứu trong đề tài cơ bản có các đặc tính như sau:

- Các nút cảm biến (đồng đều, cùng mức năng lượng) và trạm gốc là cố định và được phân bố tương đối đồng đều trên một diện tích xác định.
- Trạm gốc có năng lượng không giới hạn và có khả năng liên lạc tới tất cả các nút trong mạng cảm biến do đó coi như mọi nút cảm biến trong mạng đều có thông tin về vị trí của trạm gốc để phục vụ cho việc định tuyến.
- Một frame được định nghĩa là một vòng truyền dữ liệu về cụm trưởng và được đóng gói thành một gói tin.
- Một round được định nghĩa là *n* lần truyền frame từ nhóm trưởng về trạm gốc. Một sự kiện trong mô phỏng thường được quy định bao gồm *m* round và trong mỗi round lại truyền *n* frame.

Để phân tích quá trình truyền nhận chúng ta sử dụng các điều kiện giống như giao thức LEACH [15] với mô hình tín hiệu đơn giản bậc nhất. Ở đây ký hiệu *k* là số lượng bit của *1* gói tin, $E_{Tx\text{-}elec} = E_{Rx\text{-}elec} = kE_{elec}$ là lượng năng lượng yêu cầu trên thiết bị dùng cho việc truyền nhận dữ liệu với E_{elec} là năng lượng truyền nhận một bit dữ liệu, E_{amp} là năng lượng khuếch đại truyền dẫn. Chi phí truyền tải thông điệp độ dài *k*-bit giữa *2* nút bất kì qua khoảng cách *d* được tính bởi biểu thức:

$$E_{Tx}(k,d) = E_{Tc-elec}(k) + E_{amp}(k,d) \qquad (1)$$

Trong đó E_{amp} biến thiên theo khoảng cách *d*. $E_{amp} = E_{fs}$ trong mô hình không gian tự do khi $d<d_o$ và $E_{amp} = E_{mp}$ trong mô hình đa đường khi $d \geq d_o$.d_o là khoảng cách không đổi phụ thuộc vào môi trường. Biểu thức trên có thể biến đổi thành:

$$E_{Tx}(k,d) = \begin{cases} kE_{elec} + kE_{fs}d^2 & d < d_0 \\ kE_{elec} + kE_{fs}d^4 & d > d_0 \end{cases} \qquad (2)$$

Để nhận được bản tin độ dài *k* bit, *1* nút cần dùng:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rc-elec}(k) = kE_{elec} \qquad (3)$$

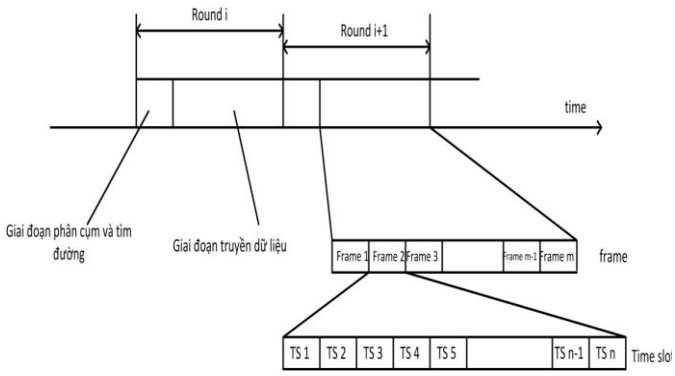
Lượng năng lượng còn lại của mỗi nút sau một phiên trao đổi dữ liệu được tính toán như sau:

$$E_{Res} = E_{initial} - (E_{Tx} + E_{Rx}) \qquad (4)$$

Lưu ý rằng mô hình năng lượng như đã mô tả ở trên chưa tính toán đến suy hao kênh truyền do sử dụng fading. Việc sử dụng mô hình suy hao cho kênh truyền có tính toán đến fading là yếu tố quan trọng trong truyền đa kênh và sẽ được cố gắng thực hiện trong hướng nghiên cứu tiếp theo.

IV. mMRC

Ở đây giả sử các sự kiện xảy ra rời rạc. Sau giai đoạn khởi tạo, hoạt động theo dõi một sự kiện được chia thành các round, mỗi round bao gồm các giai đoạn: giai đoạn phân cụm và tìm đường, giai đoạn truyền dữ liệu. Các cảm biến hoạt động trên dải tần *2.4GHz* có *16* kênh tần số trực giao (đã được định nghĩa theo chuẩn 80215.4 [19] ở lớp vật lý). Một kênh tần số ký hiệu f_0 được dành riêng để hỗ trợ quảng bá, các tần số còn lại ký hiệu là $f_1, \ldots, f_4$ được cấp cho hoạt động của giao thức. Lý do của việc lựa chọn 4 tần số này là vì mMRC là thuật toán theo hướng sự kiện, tức là chỉ khi sự kiện xuất hiện thì mới thành lập các cụm, lựa chọn cụm trưởng và truyền dữ liệu về trạm gốc. Các sự kiện này có tính chất không thường xuyên và nếu xảy ra chỉ trong một phần của mạng cảm biến không dây chứ không phải xảy ra trên toàn bộ mạng. Do đó số lượng nút cảm biến bị đánh thức không nhiều và số cụm tạo ra cũng không nhiềunên 4 tần số là đủ. Để có thể thu được dữ liệu trên *m* đường từ *m* CH gửi về, trạm gốc cần phải được trang bị các giao diện đa kênh (*multiple radio interface*).



Hình 2. *Sơ đồ thời gian hoạt động của giao thức*

A. Giai đoạn khởi tạo mạng: Tại thời điểm bắt đầu, BS quảng bá thông tin của nó để các nút có thể xác định được vị trí BS và khoảng cách của nó đến BS. Sau đó các nút quảng bá bản tin$INFOmsg\{id, d(i,BS), E_{res}(i)\}$ trên tần số f_0 cho các nút hàng xóm để xây dựng bảng định tuyến. Khi nút *i* nhận được bản tin *INFOmsg* từ một nút *j* nào đó, nếu khoảng cách đến BS của nút *j* lớn hơn nút *i* thì nút *j* sẽ bị bỏ qua. Nếu khoảng cách đến BS trong bản tin của nút *j* nhỏ hơn khoảng cách đến BS của nút *i* thì nút *i* sẽ tính hàm chuyển tiếp $F_{relay}(j)$ của nút *j* như sau:

$$F_{relay}(j) = \frac{MAXE}{E(j)} + \frac{d(j,BS)}{d(i,j)} \quad (5)$$

$minF_{relay}(j) \xrightarrow{5} RoutingTable$

Trong đó *MAXE* là hằng số và là năng lượng tham chiếu, *E(j)* là năng lượng của nút *j* và *d(j,BS)* là khoảng cách từ *j* đến BS và *d(i,j)* là khoảng cách từ *i* đến *j*. Dựa vào hàm chuyển tiếp này, nút *j* có năng lượng đủ lớn và khoảng cách từ *j* tới BS đủ nhỏ và khoảng cách từ *i* tới *j* đủ lớn sẽ được lựa chọn làm nút chuyển tiếp. Sau đó, mỗi nút cảm biến lưu lại một *bảng định tuyến* có chứa tối đa *5* nút có hàm chuyển tiếp nhỏ nhất để phục vụ cho quá trình tìm đường sau này. Mục đích của bảng định tuyến này giúp giảm việc quảng bá thường xuyên để lấy thông tin trong quá trình tìm đường. Tuy nhiên thông tin của nó có thể không thực sự chính xác tại thời điểm tìm đường nên bảng định tuyến cần phải được cập nhật khi có thay đổi lớn. Kích thước của bảng định tuyến được lựa chọn là *5* nút vì nếu danh sách này quá lớn thì sẽ chứa các nút không tối ưu, nếu quá nhỏ thì tính cân bằng năng lượng kém và nút có thể không chọn được nút chuyển tiếp khi các ứng cử viên bận.

B. Giai đoạn phân cụm và tìm đường: Mục đích của giai đoạn này là từ *n* nút cảm biến cảm nhận được sự kiện cần phải chọn ra *m* CH, sau đó chia *n* nút thành *m* cụm con và chọn các tần số tương ứng với các cụm con này. Sau đó, các CH tiến hành tìm đường về BS để truyền trên *m* tần số. Ở giai đoạn này tôi thực hiện truy cập vào môi trường truyền dẫn theo hai phương pháp CSMA/CA và TDMA trong đó TDMA được sử dụng khi thu thập dữ liệu từ một số xác định các nút trong cụm về CH còn CSMA/CA được sử dụng trong các quá trình còn lại.

Bước 1 - Phân cụm, bầu CH và chọn tần số. Ban đầu các nút ở trạng thái ngủ. Nếu có sự kiện, nút *i* cảm nhận được và chuyển sang trạng thái hoạt động và quảng bá bản tin $REQClustermsg\{id, E_{res}(i)\}$ trên tần số f_0 cho các nút hàng xóm đồng thời thiết lập một bộ đếm timeout. Khi nhận được bản tin này, thông tin về các nút tham gia sự kiện được lưu lại. Khi hết thời gian timeout, mỗi nút chọn ra *m* CH có$E_{res}(i)$ lớn nhất với *m* được tính toán như biểu thức (6):

$$m = \begin{cases} 1 \text{ nếu } 0 < n \le 4 \\ mod(n/4) + 1 \text{ nếu } 5 \le n < 12 \\ 4 \text{ nếu } n \ge 12 \end{cases} \quad (6)$$

Công thức trên giúp tính toán để cân bằng giữa số lượng CH và số lượng thành viên trong mỗi cụm dựa trên *n* nút cảm biến được sự kiện. Nói một cách khác, nó giúp hạn chế được số lượng CH. Điều này là cần thiết vì khi số lượng CH lớn thì lượng thành viên trong mỗi cụm nhỏ, do đó thời gian để các thành viên gửi dữ liệu cảm biến về CH nhỏ hơn do được thực hiện song song trong các cụm trên các tần số khác nhau. Tuy nhiên khi số lượng CH quá lớn thì sẽ cần nhiều đường về BS, điều này có thể dẫn đến việc không thể tìm được đường về BS do các nút chuyển tiếp đã bận. Cụ thể hơn nữa, công thức (6) có ý nghĩa khi số nút bị đánh thức vượt quá 12 thì sẽ có 4 cụm với 4 CH được

bầu còn khi số nút bị đánh thức không vượt quá 4 thì chỉ có một CH được bầu. Các trường hợp còn lại sẽ tương ứng với 2 hoặc 3 cụm được hình thành. Công thức này sẽ giúp tạo ra không quá nhiều cũng không quá ít cụm, mỗi cụm không chứa quá ít nút (vì khi trong cụm có quá ít nút thì sẽ rất khó bầu ra các cụm trưởng).

Sau khi đã chọn được *m* CH, các nút tham gia sự kiện chạy một giải thuật phân tán để chia các nút tham gia sự kiện thành *m* cụm đều nhau sao cho số thành viên của các cụm hơn kém nhau không quá một. Cụ thể như sau: tại mỗi nút, thông tin các nút tham gia sự kiện được sắp xếp theo thứ tự giảm dần của năng lượng và được chia đều cho mỗi CH. Sau khi chạy thuật toán này, các CH sẽ biết được các thành viên trong cụm của nó và các thành viên chọn được CH cho mình. Với các nút là CH, CH có *id* lớn hơn sẽ được ưu tiên chọn tần số trước ví dụ CH_i chọn tần số f_i nhưng vẫn chưa chuyển hẳn sang mà vẫn nằm ở tần số f_0 để tìm đường về BS.

Bước 2 - Quá trình tìm đường về BS và quảng bá lịch TDMA: Sau khi phân cụm và chọn tần số xong, CH_i tìm trong bảng định tuyến của nó nút *j* có hàm chuyển tiếp nhỏ nhất và gửi bản tin $RTSmsg\{id, f_i\}$ cho nút này trên tần số f_0 chứa thông tin về tần số f_i mà CH đã chọn. Sau đó CH chuyển sang tần số f_i để chờ nhận bản tin $CTSmsg\{id, E_{res}(j)$ chứa thông tin về nút *j* này, cụ thể như sau:

- Nếu nhận được *CTSmsg*, CH chọn nút *j* đó là nút chuyển tiếp để truyền dữ liệu về BS, cập nhật thông tin của nút trong bảng định tuyến theo thông tin nút đó gửi về trừ đi một lượng trung bình tiêu hao của một nút trong một round. Sau đó CH tính toán lịch TDMA và quảng bá TDMA cho các thành viên của cụm trên tần số đã chọn và chuyển sang giai đoạn tiếp theo. Lưu ý rằng các thành viên của cụm đã chuyển từ tần số f_0 sang tần số f_i trong phần trên.
- Nếu sau một khoảng thời gian CH không nhận được *CTSmsg*, CH sẽ cập nhật lại bảng định tuyến sao cho nút *j* trở thành nút chiếm vị trí cuối cùng, tránh cho việc *j* lại được chọn trong lần tìm nút chuyển tiếp tiếp theo. Sau đó chuyển sang tần số f_0 để gửi *RTSmsg* cho nút tiếp theo trong bảng. Nếu năng lượng trong bảng định tuyến của một nút nhỏ hơn *0* thì nút bị loại ra khỏi bảng định tuyến. Nếu duyệt hết bảng định tuyến mà không tìm được nút thì coi như không tìm được đường về BS.
- Các thành viên trong cụm nhận được TDMA thì chuyển sang giai đoạn tiếp theo. Ở đây lịch TDMA được sử dụng vì các số lượng các thành viên là cố định, việc lập lịch giúp quá trình truy cập môi trường không bị xung đột. Sau đó nút chuyển tiếp tiếp tục tìm nút chuyển tiếp tiếp theo trên f_0 cho đến khi về đến BS. Sau khi chọn được nút chuyển tiếp tiếp theo, nó chuyển sang tần số đã chọn và chờ chuyển tiếp dữ liệu về BS. Nếu nút đang bận tham gia phiên truyền khác thì nó không làm gì cả. Tại các round tiếp theo do đã phân thành cụm con nên quá trình quảng bá chọn CH chỉ diễn ra trong nội bộ cụm con. Khi đó mỗi cụm con chọn ra một CH. Do chỉ quảng bá trong cụm con nên số lượng gói tin quảng bá giảm dẫn đến năng lượng tiêu hao giảm.

Quá trình tìm nút chuyển tiếp chỉ thực hiện trong bảng định tuyến giúp giảm số lượng gói tin điều khiển khi tìm nút chuyển tiếp, qua đó giúp tiết kiệm năng lượng cũng như thời gian tìm đường, trong khi vẫn đảm bảo tìm được đường tối ưu về BS. Do thông tin về năng lượng lưu trong bảng định tuyến là cục bộ thiếu chính xác tại thời điểm chọn nút chuyển tiếp nên có thể dẫn đến việc cân bằng năng lượng không tốt, vì thế cần có cơ chế cập nhật lại bảng định tuyến (được mô tả trong bước *4* của giai đoạn truyền dữ liệu).Sau giai đoạn này các nút được chia thành *m* cụm hoạt động trên *m* tần số khác nhau từ f_1 đến f_m mỗi cụm có đường riêng về BS. Các cụm và tuyến đường hoạt động trên tần số khác nhau cho phép hoạt động thu thập dữ liệu và truyền dữ liệu xảy ra song song giữa các cụm con.

C. Giai đoạn truyền dữ liệu: Các thành viên gửi dữ liệu về CH theo phương pháp đa truy cập TDMA,

sau đó CH tổng hợp dữ liệu, tạo bản tin *DataToBS* gửi cho nút chuyển tiếp và các nút chuyển tiếp tiếp tục truyền dữ liệu về BS và cập nhật lại trạng thái mạng sau mỗi round.

Bước 1: Gửi dữ liệu về CH. Các thành viên trong cụm đã được lập lịch TDMA đợi đến khe thời gian của mình để truyền dữ liệu cảm biến được về CH trên tần sốf_i. Mỗi round sẽ gồm 12 lần truyền dữ liệu về CH.

Bước 2: CH tổng hợp dữ liệu và gửi cho nút chuyển tiếp. Do các nút cảm biến khá gần nhau nên khả năng thông tin về sự kiện được gửi về CH có trùng lặp là rất lớn, vì thế CH có thể thực hiện tổng hợp dữ liệu, giảm bớt dư thừa để tiết kiệm năng lượng. Sau khi nhận được dữ liệu do các thành viên gửi về, CH tổng hợp dữ liệu, tạo gói tin *DataToBSmsg* với kích thước tối đa *128* bytes gửi cho nút chuyển tiếp đã chọn. Các CH sử dụng CSMA/CA để truy cập môi trường để tránh xung đột và giao thoa. Mỗi round sẽ có *12* gói tin được gửi về BS.

Bước 3: Nút chuyển tiếp tiếp tục chuyển gói tin về BS. Khi nhận được gói tin *DataToBSmsg*, nút chuyển tiếp sử dụng CSMA/CA để chuyển tiếp cho nút chuyển tiếp tiếp theo cho đến khi về đến BS.

Bước 4: Cập nhật trạng thái mạng. Quá trình này giúp cập nhật thông tin trong bảng định tuyến khi có một nút nào đó bị loại ra khỏi bảng, việc này vừa giúp bổ sung nút mới vào bảng định tuyến, vừa giúp cân năng lượng bằng tốt hơn khi năng lượng của các nút đã xuống khá thấp. Quá trình này cũng được thực hiện thông qua phương pháp đa truy cập CSMA/CA. Cuối mỗi round, CH và nút chuyển tiếp kiểm tra số nút trong bảng định tuyến. Nếu số nút trong bảng định tuyến có thay đổi trong quá trình tìm đường và gửi dữ liệu thì nút cần thực hiện cập nhật lại bảng định tuyến. Quá trình cập nhật thực hiện bằng việc nút *i* quảng bá bản tin $REQRelaymsg\{id, d(i,BS)\}$. Nếu nhận được, các nút *j* có khoảng cách đến BS nhỏ hơn nút *i* sẽ trả lời bằng bản tin $REPRelaymsg\{id,\ d(j,BS),\ E_{res}(j)\}$. Khi nhận được bản tin này, nút *i* sẽ tính hàm chuyển tiếp và cập nhật lại bảng định tuyến. Sau mỗi round các nút sẽ kiểm tra lại năng lượng của mình. Nếu năng lượng này nhỏ hơn mức năng lượng trung bình tiêu hao khi tham gia một sự kiện thì nút quảng bá bản tin *RemoveMemsg* cho các nút hàng xóm. Các nút hàng xóm nhận được sẽ coi như nút này đã chết và loại nó ra khỏi bảng định tuyến và thực hiện cập nhật bảng định tuyến. Các nút chuyển sang round mới cho đến khi hết sự kiện.

IV. ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

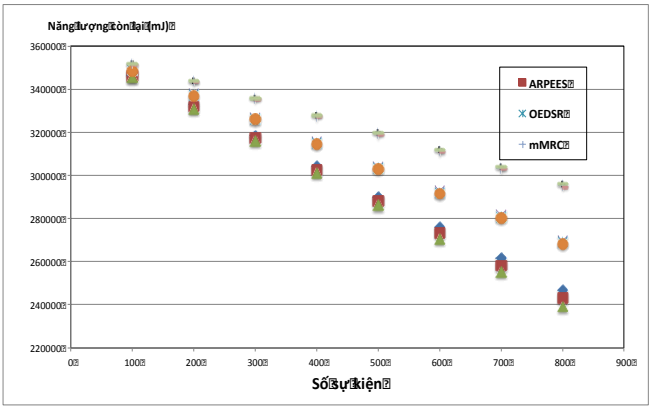
Giao thức đa kênh đề xuất ở trên được cài đặt thử nghiệm với bộ công cụ mô phỏng OMNeT++ [18] cùng với ARPEES và OEDSR. Trong các mô phỏng được thực hiện, mỗi nút có mức năng lượng ban đầu là *1J* và trong quá trình hoạt động của mạng không có sự can thiệp để tiếp thêm năng lượng [1,4]. Gói tin được gửi coi như không có lỗi. Mô hình mô phỏng thực hiện là triển khai *360* nút cảm biến trên diện tích (*600 x 600)*m^2. Mỗi sự kiện được coi như việc phải truyền một lượng dữ liệu cố định là *72* gói tin *128bytes* về BS [1,4,19]. Giới hạn truyền của bộ thu phát là *150m* và giới hạn cảm biến của nút là *60m* [6,7]. Năng lượng tiêu hao trung bình của một nút trong một round là *1mJ*. Giao thức CSMA/CA thực hiện là phiển bản CSMA/CA không chia khe và không có ACK [19].Hiệu năng của các giao thức mMRC, ARPEES, OEDSR được đánh giá thông qua *tổng năng lượng của mạng* (là tổng số năng lượng còn lại trên tất cả các nút của mạng sau mỗi số sự kiện) qua các sự kiện, *trạng thái năng lượng* của các nút tại một thời điểm nào đó, *số nút cảm biến còn hoạt động* qua các sự kiện, *thông lượng của mạng* (*TP=8*72*128/AvgDelay* với *AvgDelay* là thời gian trung bình xảy ra sự kiện), *thời gian thành lập cụm* và tìm đường (được tính từ khi bắt đầu xảy ra sự kiện đến khi tìm được về BS), *độ tranh chấp môi trường* (sau mỗi lần tối đa 5 lần backoff mà vẫn không truy cập kênh truyền thành công, gói tin sẽ được coi như là bị lỗi tranh chấp môi trường). Thông số mô phỏng được miêu tả trong Bảng 1.

Hiệu năng của các giao thức mMRC, ARPEES, OEDSR được đánh giá thông qua *tổng năng lượng của mạng* qua các sự kiện, *trạng thái năng lượng* của các nút tại một thời điểm nào đó, *số nút cảm biến còn hoạt*

động qua các sự kiện, *thông lượng của mạng*, *thời gian thành lập cụm* và tìm đường, *độ tranh chấp môi trường*. Thông số mô phỏng được miêu tả trong Bảng 1.

Bảng 1. *Tham số mô phỏng*

Tên tham số	Giá trị
Năng lượng khởi tạo	1 Joule
Kích thước gói tin dữ liệu	128 byte
Kích thước gói tin điều khiển	25 byte
E_{elec}	50 nJ/bit
aMaxBE	5
macMinBe	3
Băng thông	250kbps
Thời gian một ký tự	0.000016s
Giới hạn cảm biến	60m
aMaxBE	5
Vị trí trạm gốc	(300,610)
MAXE	1,5J



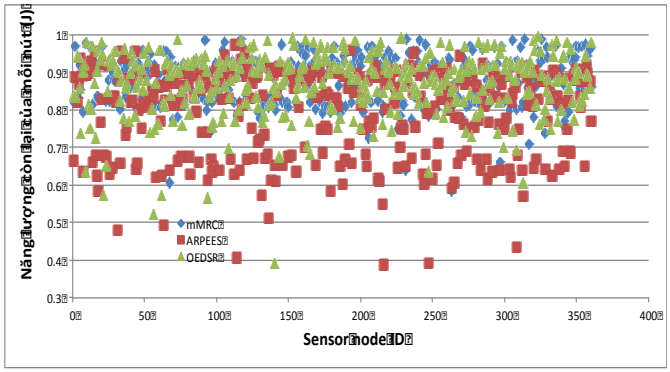
Hình 3. *Tổng năng lượng còn lại của toàn mạng*

A. Hiệu quả sử dụng năng lượng: Trong Hình 3, tôi thực hiện mô phỏng 10 lần, sau đó tính giá trị trung bình của tổng năng lượng theo sự kiện của cả 3 giao thức mMRC, ARPEES và OEDSR, đồng thời đánh giá khoảng tin cậy (*confidence interval*) của tổng năng lượng còn lại này với xác suất tin cậy là 95%. Hình 3 cho thấy, giao thức mới mMRC sử dụng năng lượng hiệu quả hơn do năng lượng còn lại của mMRC vượt trội so với ARPEES và OEDSR.

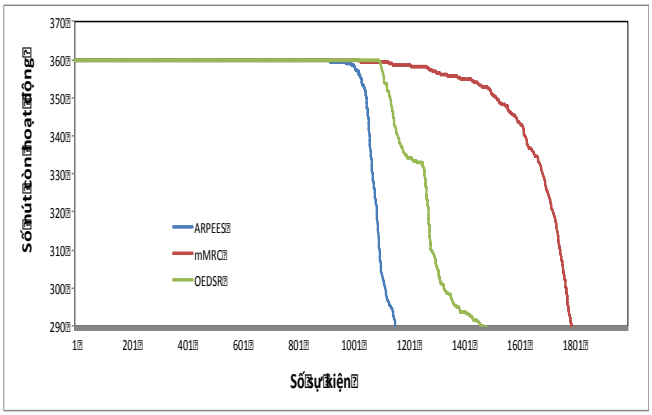
Ban đầu năng lượng của mMRC là nhỏ hơn do phải tính toán khi thực hiện khởi tạo bảng định tuyến, nhưng sau quá trình hoạt động mMRC cho thấy có tính tiết kiệm năng lượng tốt hơn. Sau *800* sự kiện năng lượng còn lại của mMRC là khoảng *295J* trong khi ARPEES chỉ là *243J* và OEDSR là *268J*. Kết quả này là do mMRC thực hiện chia cụm con, do đó sẽ chia nhỏ miền quảng bá và hạn chế số bản tin điều khiển khi tìm đường về BS do thực hiện lưu thông tin nút chuyển tiếp trong bảng định tuyến. Sau 800 sự kiện, khoảng biến thiên tổng năng lượng còn lại (J) của mMRC với độ tin cậy 95% là (294, 296), của OEDSR là (268, 269.7) và của ARPEES là (239.4, 246.7).

B. Cân bằng năng lượng: Bên cạnh yếu tố tiết kiệm năng lượng, cần phải quan tâm đến cả sự cân bằng năng lượng tiêu hao giữa các nút vì khi năng lượng tiêu hao được chia đều sẽ giúp tăng tuổi thọmạng và độ ổn định của mạng. Hình 4 ghi lại năng lượng còn lại của các nút mạng sau *400* sự kiện.

Đồ thị cho thấy năng lượng của mMRC cân bằng hơn so với OEDSR và ARPEES. Kết quả này là do mMRC thực hiện chọn lại CH sau mỗi round và tải được phân phối trên nhiều đường khác nhau để truyền về BS. Với OEDSR, CH chỉ chọn một lần trong một sự kiện và dùng một tuyến đường chung trên một tần số để truyền tất cả dữ liệu BS còn ở ARPEES, các nút ở gần BS phải tham gia vào hầu hết hoạt động quảng bá để tìm đường nên tiêu hao năng lượng nhanh hơn. Những đặc điểm này của ARPEES và OEDSR làm năng lượng tiêu hao được cân bằng không tốt so với mMRC.



Hình 4. *Năng lượng còn lại của các nút*

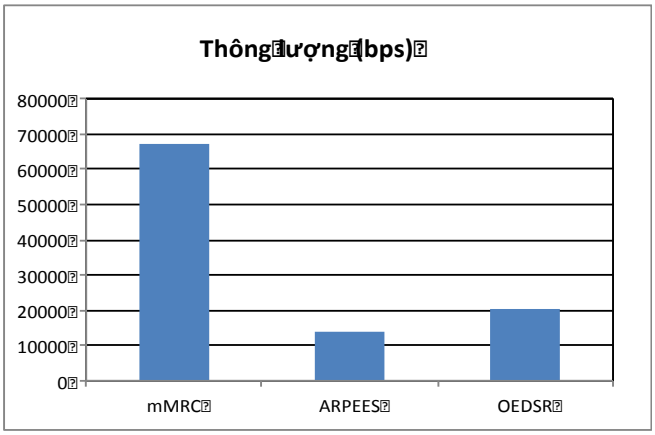


Hình 5. *Thời gian sống của mạng*

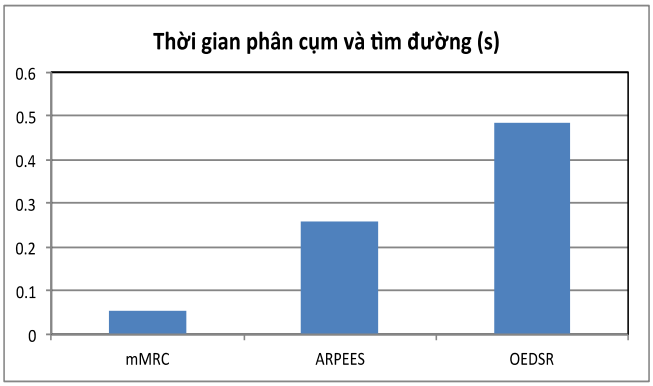
C. Tuổi thọ mạng: Tiếp theo, tôi sẽ xem xét một tham số rất quan trọng đó là tuổi thọ của mạng. Trong quá trình mô phỏng, mạng được xem là còn hoạt động khi còn *290* trên tổng *360* nút còn hoạt động. Một nút được coi là không còn hoạt động khi năng lượng của nó nhỏ hơn *0.005J*.

Hình 5 là đồ thị số nút cảm biến còn hoạt động sau *1800* sự kiện và trong hình này, nút đầu tiên chết của mMRC là tại sự kiện thứ *1130* trong khi với ARPEES nút đầu tiên chết là sau *980* sự kiện và OEDSR là sau *1107* sự kiện. Ta cũng thấy rằng khi số nút còn hoạt động của ARPEES và OEDSR giảm đáng kể thì với mMRC số nút hoạt động vẫn ở mức cao và có độ ổn định hơn. Sở dĩ như vậy là do mMRC tiết kiệm năng lượng hơn và cân bằng tốt năng lượng tiêu hao của các nút. Một thông số quan trọng nữa để đánh giá thời gian sống của mạng là tổng số sự kiện mạng thực hiện được. Từ hình trên, ARPEES và OEDSR đạt được tổng số sự kiện tương ứng là *1160* và *1463* sự kiện trong khi mMRC là *1796* sự kiện. Rõ ràng số sự kiện của mMRC lớn hơn cả ARPEES và OEDSR.

D. Thông lượng và thời gian truyền: Lợi ích quan trọng nhất của phương pháp đa kênh là để tăng thông lượng nhận được ở BS. Thông lượng được tính là tổng số dữ liệu nhận được chia cho khoảng thời gian và được miêu tả trong Hình 6. Qua đó ta thấy rằng, mMRC đạt được thông lượng cao hơn ARPEES và OEDSR. Điều này có thể được giải thích thông qua đặc điểm của phương pháp đa kênh: mMRC truyền dữ liệu về BS bằng *m* đường và trên *m* tần số khác nhau còn ARPEES và OEDSR chỉ thực hiện trên một tần số mà thôi. Cụ thể hơn nữa, ta xem xét thời gian trung bình của giai đoạn hình thành cụm và tìm đường của cả ba giao thức mMRC, ARPEES và OEDSR (Hình 7 và Hình 8).



Hình 6 . *Thông lượng của mạng*

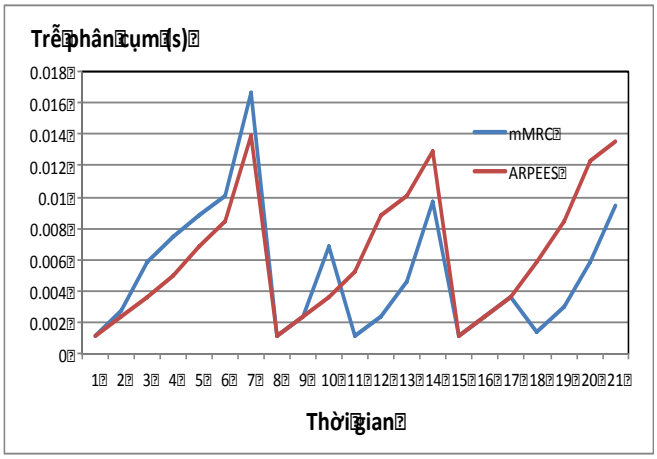


Hình 7. *Thời gian giai đoạn phân cụm và tìm đường*

Từ kết quả thu được chúng ta thấy, tổng thời gian trung bình của hai giai đoạn của mMRC nhỏ hơn rất nhiều so với ARPEES và OEDSR. Ta thấy rằng thời gian phân cụm gồm thời gian các nút quảng bá thông tin và thời gian timeout để nhận gói tin. Quá trình này giống nhau với cả ba giao thức nên thời gian phân cụm là giống nhau. Do đó nguyên nhân của sự khác biệt về thời gian ở hình vẽ trên xảy ra chủ yếu ở giai đoạn tìm đường.

Cụ thể hơn, mMRC lưu trữ thông tin các nút chuyển tiếp bằng bảng định tuyến nên không cần quảng bá để tìm nút chuyển tiếp, giúp quá trình tìm

đường xảy ra nhanh chóng. ARPEES và OEDSR phải thực hiện quảng bá và nhận thông tin từ hàng xóm để tìm đường nên tốn nhiều thời gian hơn. Ngoài ra so với ARPEES, việc mMRC chia thành nhiều *m* cụm nhỏ hoạt động *m* trên tần số khác nhau cũng làm giảm thời gian thực hiện phân lại cụm trong mỗi cụm con. Hình 8 so sánh trễ phân cụm của một sự kiện của hai giao thức mMRC và ARPEES:



Hình 8. *Trễ phân cụm của một sự kiện*

E. Mức độ tranh chấp kênh truyền: mMRC sử dụng hai phương pháp đa truy cập tránh tranh chấp kênh truyền khác nhau:

- Trong giai đoạn thu thập dữ liệu từ các nút thành viên trong cụm về cụm trưởng, phương pháp đa truy cập là TDMA. Đây là phương pháp giúp giảm xung đột hiệu quả, tuy nhiên có nhược điểm làm tăng trễ và cần phải biết trước số lượng nút trong cụm là bao nhiêu.

- Trong giai đoạn tìm đường về đích, các cụm trưởng lựa chọn nút chuyển tiếp trong bảng định tuyến và truyền dữ liệu cho nút chuyển tiếp đó qua phương pháp đa truy cập CSMA/CA. Việc lưu giữ danh sách các nút chuyển tiếp trong bảng định tuyến sẽ làm giảm số nút tham gia vào quá trình truyền trong giai đoạn đa truy cập, và do đó giảm xác suất xung đột. Ngoài ra, quá trình tìm đường từ các cụm trưởng về đích được thực hiện trên các tần số trực giao với nhau nên giữa các đường sẽ tránh được xung đột và giao thoa.

Cuối cùng tôi thực hiện đánh giá mức độ tranh chấp kênh truyền thông qua tỉ lệ gói tin bị CSMA/CA loại bỏ do thực hiện truy cập môi trường thất bại. Kết quả ở Bảng 2 phản ánh đúng mức độ tranh chấp môi trường của các giao thức. Từ đó có thể thấy rằng mMRC sử dụng nhiều tần số lên mức độ tranh chấp thấp hơn, ARPEES do thực hiện chọn lại CH nhiều lần làm tăng tranh chấp môi trường so với OEDSR chỉ chọn CH một lần nên mức độ tranh chấp cao hơn ARPEES.

Bảng 2. *Tỉ lệ mất gói*

	mMRC	***ARPEES***	***OEDSR***
Tỉ lệ lỗi	**0,59%**	**1,51%**	**0,92%**

V. KẾT LUẬN

Bài báo đã giới thiệu một phương pháp truyền đa kênh cho định tuyến phân cụm theo sự kiện với mục đích giảm nhiễu và tranh chấp môi trường, tiết kiệm năng lượng, cân bằng năng lượng tiêu hao, giảm trễ và tăng thông lượng gửi về đích. Thông qua mô phỏng, kết quả đã thể hiện rằng mMRC tiêu hao ít năng lượng hơn và đạt được tính cân bằng tốt hơn, do đó tăng tuổi thọ mạng so với ARPEES và OEDSR, làm giảm đáng kể thời gian truyền thông tin về đích và tăng thông lượng của mạng. Nhược điểm của mMRC so với hai giao thức còn lại là khó triển khai hơn trong thực tế vì việc truyền dữ liệu trên nhiều tuyến đường song song về đích ở nhiều tần số khác nhau sẽ khó cài đặt hơn là việc truyền dữ liệu trên một đường một tần số về đích. Đây cũng là nhược điểm chung của các giao thức truyền đa kênh. Khi kích thước và số nút mạng tăng lên, quá trình tìm đường về đích, cấp phát tần số, chuyển tần số sẽ trở nên phức tạp hơn. Hơn nữa, khi số nút mạng tăng lên sẽ làm trễ quá trình truy cập kênh truyền theo phương pháp CSMA/CA và TDMA tăng lên. Ngoài ra, hiệu năng mMRC phụ thuộc rất nhiều vào kích thước sự kiện xảy ra. Trong giả thiết của bài báo, sự kiện mang tính chất nhỏ lẻ rời rạc nhưng nếu các sự kiện xuất hiện dù rời rạc ở phạm vi rộng, quá trình tìm đường, cấp phát kênh và chuyển kênh từ *m* cụm trưởng về đích cũng sẽ trở nên phức tạp hơn.

Trong thời gian tới, tôi sẽ tiếp tục phát triển mMRC cho trường hợp có nhiều sự kiện để giao thức có thể thích nghi tốt hơn trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] VINH TRAN QUANG and TAKUMI MIYOSHI, *"Adaptive Routing Protocol with Energy Efficiency and Event Clustering for Wireless Sensor Networks"*, IEICE Trans. Commun., Vol.E91–B, No.9, pp 323-333, 2008,.

[2] W.R. HEINZELMAN, A. CHANDRAKASAN, AND H. BALAKRISHNAN, *"Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks",* in IEEE Computer Society Proc. of the Thirty Third Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00), Washington, DC, USA, vol. 8, pp. 8020, Jan. 2000.

[3] T. TRAN VINH, T. NGO-QUYNH, M. BANH, *"Energy Mesh Routing Protocol for Wireless Sensor Networks"* in Proc. of Advanced Technologies for Communications (ATC 2012), pp. 260-270, Oct. 2002.

[4] SIBILA RATNARAJ, SARANGAPANI JAGANNATHAN, AND VITTAL RAO, *"OEDSR: Optimized Energy-Delay Sub-network Routing in Wireless Sensor Network"*, 2006.

[5] AZZEDINE BOUKERCHE, RICHARD WERNER N. PAZZI, REGINA B. ARAUJO2,*"HPEQ - A Hierarchical Periodic, Event-driven and Query-based Wireless Sensor Network Protocol",* in Proc. Of IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary (LCN'05), 2005.

[6] nordic semi-conductors, nrf905 multiband transceiver, http://ww.nordicsemi.com.

[7] Cc2420 sing-chip 2.4Ghz IEEE 802.15.4 compliant and zigbee ready rf transceiver, http://ti.com/lit/gpn/cc2420.

[8] K.R. CHOWDHURY, N. NANDIRAJU, D. CAVALCANTI, D.P. AGRAWAL, *"Cmac-G a multi-channel energy efficient mac for wireless sensor networks"*, in Proc. of IEEE Wireless Comminication and Networking Conference (WCNC), pp. 1172–1177, 2006.

[9] M. RAMAKRISHNAN, P.V. RANJAN, *"Multi channel mac for wireless sensor networks"*, International Journal of Computer Networks and Communications 1, pp. 47–54, 2009.

[10] M. RAMAKRISHNAN, P.V. RANJAN, "*Multi channel mac implementation for wireless sensor networks"*, in Proc. of International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, ACT'09, pp. 809–813, 2009.

[11] M. CACCAMO, L. ZHANG, S. LUI, G. BUTTAZZO, *"An implicit prioritized access protocol for wireless sensor networks"*, in Proc. of the 23rd IEEE Real-Time Systems Symposium, pp. 39–48, 2002,

[12] A. GUPTA, C. GUI, P. MOHAPATRA, *Exploiting multi-channel clustering for power efficiency in sensor networks*, in Proc. Of Comsware 2006: First International Conference on Communication System Software and Middleware, pp. 1–10,2006,.

[13] Y. WU, J. STANKOVIC, T. HE, S. LIN, *Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks*, in Proc. of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications INFOCOM, pp. 1193–1201, 2008.

[14] G. ZHOU, C. HUANG, T. YAN, T. HE, J. STANKOVIC, T. ABDELZAHER, *MMSN: Multi-frequency media access control for wireless sensor networks*, in Proc of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications, pp. 1–13, 2006.

[15] O.D. INCEL, S. DULMAN, P. JANSEN, *Multi-channel support for dense wireless sensor networking*, in Proc. of the First European Conference on Smart Sensing and Context, EuroSSC 2006, Enschede, the Netherlands, Lecture Notes in Computer Science, vol. 4272, Springer, Berlin, pp. 1–14, 2006.

[16] S. MASTOOREH, S. HAMED, K. ANTONIS, *HYMAC: Hybrid tdma/fdma medium access control protocol for wireless sensor networks*, in Proc. Of PIMRC 2007, 18th IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium, pp. 1–5, 2007.

[17] H. LE, D. HENRIKSSON, T. ABDELZAHER, *A practical multi-channel media access control protocol for wireless sensor networks*, in Proc. of the 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, pp. 70–81, 2008.

[18] OMNeT++, version 4.2, a discrete event simulation system, http://www.omnetpp.org.

[19] LATRÉ, BENOÎT, ET AL, *Throughput and delay analysis of unslotted IEEE 802.15. 4*,Journal of Networks1.1 pp. 20-28, 2006.

Ngày nhận bài: 21/3/2015

SƠ LƯỢC VỀ TÁC GIẢ

NGÔ QUỲNH THU



Sinh ngày 4/3/1974 tại Hà nội.

Tốt nghiệp ĐH tại Khoa Điện tử Viễn thông Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 1995; thạc sỹ năm 1996 tại Viện Quốc gia Viễn thông Evry, Cộng hoà Pháp. Nhận bằng tiến sỹ năm 2003 tại trường Đại học Kỹ thuật Berlin, Cộng hoà Liên bang Đức.

Hiện đang giảng dạy tại Viện Công nghệ Thông tin và Truyền thông, Trường ĐH Bách khoa Hà nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: Mạng cảm biến không dây và các ứng dụng.

Tel: 0912528824.

E mail: thunq@soict.hust.edu.vn