



ESTIMATION OF TRANSMISSION RANGE OF A DUAL-HOP LoRa NETWORK UNDER INTERFERENCE EFFECTS

Co Nhu Van*, Do Viet Ha, Nguyen Thanh Hai

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 27/11/2020

Revised: 28/01/2021

Accepted: 17/02/2021

Published online: 15/04/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.3>

* *Corresponding author*

Email: vancn@utc.edu.vn; Tel: 0987959637

Abstract. LoRaWan (long range wide area network) has been rapidly developed and implemented in recent years. By providing outstanding advantages such as low cost, low power consumption, high reliability, large number of connected devices, and wide coverage, LoRaWan is especially suitable for IoT (Internet-of-things) applications. This paper focuses on estimating the maximal transmission range and relay location of a dual-hop LoRa network. Unlike other studies that only consider the path-loss and AWGN in the range estimation, this work takes into account the effects of both co-SF (Spreading Factor) and inter-SF interference when evaluating the system performance. The SNRs (Signal-to-Noise Ratio) and SIRs (Signal-to-Interference Ratio) of each transmission hop are derived by using Rayleigh fading channel model that represents the path-loss, shadowing effect, and multipath fading. The maximal transmission range and the relay location are estimated in order to meet the SIR and SNR threshold requirements of LoRa networks. The numerical results of this paper can be used as a guideline for planning and designing LoRa networks.

Keywords: Dual-hop LoRa, SIR, co-SF, inter-SF.

©2021 University of Transport and Communications



ƯỚC LƯỢNG CỰ LY TRUYỀN DẪN TRONG MẠNG LoRa HAI CHẶNG DƯỚI ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỀU GIỮA CÁC THIẾT BỊ ĐẦU CUỐI

Cồ Như Văn*, Đỗ Việt Hà, Nguyễn Thanh Hải

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 27/11/2020

Ngày nhận bài sửa: 28/01/2021

Ngày chấp nhận đăng: 17/02/2021

Ngày xuất bản Online: 15/04/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.3>

* Tác giả liên hệ

Email: vancn@utc.edu.vn; Tel: 0987959637

Tóm tắt. Mạng diện rộng công suất thấp truyền cự ly dài LoRaWan (long range wide area networks) được triển khai và phát triển nhanh chóng trong những năm gần đây. Với các ưu điểm nổi bật như giá thành thấp, tiết kiệm năng lượng, độ tin cậy cao, số lượng các thiết bị kết nối đến mạng lớn và phạm vi mạng rộng, LoRaWan đặc biệt phù hợp cho các ứng dụng IoT (Internet-of-things). Bài báo thực hiện ước lượng khoảng cách truyền dẫn lớn nhất và vị trí đặt trạm lặp của mạng LoRa hai chặng. Không giống như các nghiên cứu khác chỉ xét đến suy hao và nhiễu tạp âm khi ước lượng cự ly truyền, bài báo phân tích các loại nhiễu trong mạng LoRa gồm nhiễu giữa các thiết bị trong cùng một vùng SF (Spreading Factor) và giữa các vùng SF khác nhau đều được tính đến khi đánh giá chất lượng hệ thống. Các chỉ tiêu kỹ thuật của mạng gồm tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu SNR (Signal-to-Noise Ratio) và SIR (Signal-to-Interference Ratio) được tính toán dùng mô hình kênh Rayleigh có xét đến suy hao truyền dẫn, hiệu ứng che khuất và hiệu ứng đa đường. Dựa vào ngưỡng yêu cầu của các chỉ số này trong quy hoạch mạng LoRa, cự ly truyền tối đa và vị trí trạm lặp được tính toán. Kết quả của bài báo có thể được áp dụng trong quy hoạch và thiết kế mạng LoRa.

Từ khóa: Mạng LoRa hai chặng, SIR, nhiễu nội vùng, nhiễu liên vùng.

©2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, IoT (Internet-of-things) được triển khai trong nhiều lĩnh vực và phát triển rất nhanh chóng. Các ứng dụng IoT đòi hỏi mạng có giá thành thấp, tiết kiệm năng

lượng, có độ tin cậy cao, số lượng các thiết bị kết nối đến mạng và phạm vi mạng tăng lên. Hiện nay, các công nghệ có khả năng hỗ trợ cho các ứng dụng IoT gồm Zigbee, Bluetooth và Wifi cho cự ly ngắn, các mạng di động tế bào (3G, LTE, 5G) cho cự ly truyền dài. Để đáp ứng yêu cầu hiệu quả công suất như các công nghệ tầm ngắn cũng như đáp ứng cự ly truyền dài như mạng di động, công nghệ mạng diện rộng công suất thấp LPWAN (*low-power wide-area networks*) đang là điểm sáng cho các ứng dụng IoT do có khả năng kết nối cự ly xa với tốc độ không lớn [1]. Có nhiều công nghệ LPWAN được nghiên cứu như LoRa, Sigfox, NB-IoT... nhưng LoRaWAN (truyền dẫn cự ly dài) là công nghệ được nghiên cứu và ứng dụng nhiều hơn cả [2].

Một trong những thông số quan trọng để tối ưu chỉ tiêu chất lượng mạng trước khi triển khai trong thực tế chính là dự đoán được phạm vi phủ sóng của mạng [2]. Các thông số quan trọng trong tính toán cự ly truyền của mạng LoRa gồm [1]: *i*) suy hao đường truyền phụ thuộc vào cự ly, dải tần và các điều kiện địa hình, môi trường truyền sóng, *ii*) co-SF nhiều giữa các kênh truyền trong cùng một vùng SF (Spreading Factor) sẽ hạn chế tầm truyền nếu mật độ đầu cuối mạng (ED) triển khai cao dẫn đến tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu SIR giảm dưới ngưỡng cho phép, *iii*) nhiễu giữa các ED trong các vùng SF khác nhau (inter-SF) do tính trực giao không hoàn hảo giữa các SF mà đa phần các nghiên cứu bỏ qua [3, 4] trong khi nghiên cứu trong [5] cho thấy nhiễu inter-SF ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng đường truyền, đặc biệt khi nguồn nhiễu ở gần máy thu.

Các nghiên cứu về phạm vi phủ sóng của mạng LoRa gần đây đa phần được xét cho cấu hình mạng một chặng, nghĩa là chỉ có 1 chặng kết nối giữa đầu cuối LoRa và Gateway [2, 6, 7, 8, 9]. Bên cạnh đó, mặc dù nhiễu co-SF và inter-SF đã được phân tích trong các nghiên cứu về đánh giá chỉ tiêu chất lượng mạng LoRa một chặng [1] và hai chặng có trạm lặp [10] nhưng chưa được áp dụng trong các nghiên cứu tính toán cự ly truyền dẫn. Ứng dụng ước lượng cự ly truyền trong [6] áp dụng cho mạng LoRa một chặng với các thông số đầu vào gồm tần số sóng mang, hệ số suy hao, hệ số SF và nhiễu nền AWGN [6]. Tuy nhiên cự ly truyền dẫn này không được xem xét trong một mạng LoRa cấu hình cụ thể với phân bố các vùng SF khác nhau và ảnh hưởng của các ED trong mạng. Trong [9, 11] mô hình suy hao và chỉ số SNR được xem xét để tính toán cự ly truyền dẫn của mạng LoRa trong điều kiện truyền dẫn trong rừng khác nhau. Suy hao được mô hình hóa và đo đạc xác nhận tham số cho các môi trường truyền dẫn khác nhau để tính toán quỹ công suất và cự ly truyền của mạng LoRa [2, 8]. Như vậy chỉ số SIR và nhiễu nhiễu co-SF và inter-SF không được tính đến trong các nghiên cứu này khi tính toán cự ly truyền.

Bài báo tập trung giải quyết bài toán ước lượng cự ly truyền tối đa và vị trí trạm lặp cho mạng LoRa với nhiều thiết bị đầu cuối. Nhiễu giữa các ED trong cùng SF và giữa các SF được xem xét đầy đủ trong phân tích tính toán các chỉ tiêu chất lượng hệ thống. Mô hình kênh pha đỉnh Rayleigh được dùng để tính các tham số của mạng gồm SNR và SIR. Từ các điều kiện ngưỡng SNR và SIR của các ED trong mạng LoRa, cự ly truyền giữa ED xa mạng nhất tới Gateway được tính toán với cấu hình mạng LoRa hai chặng có sử dụng trạm lặp. Các kết quả khảo sát cho thấy nếu xét đến nhiễu co-SF và inter-SF nghĩa là dùng tham số ngưỡng SIR để tính toán cự ly truyền sẽ ảnh hưởng đáng kể đến cự ly truyền của mạng.

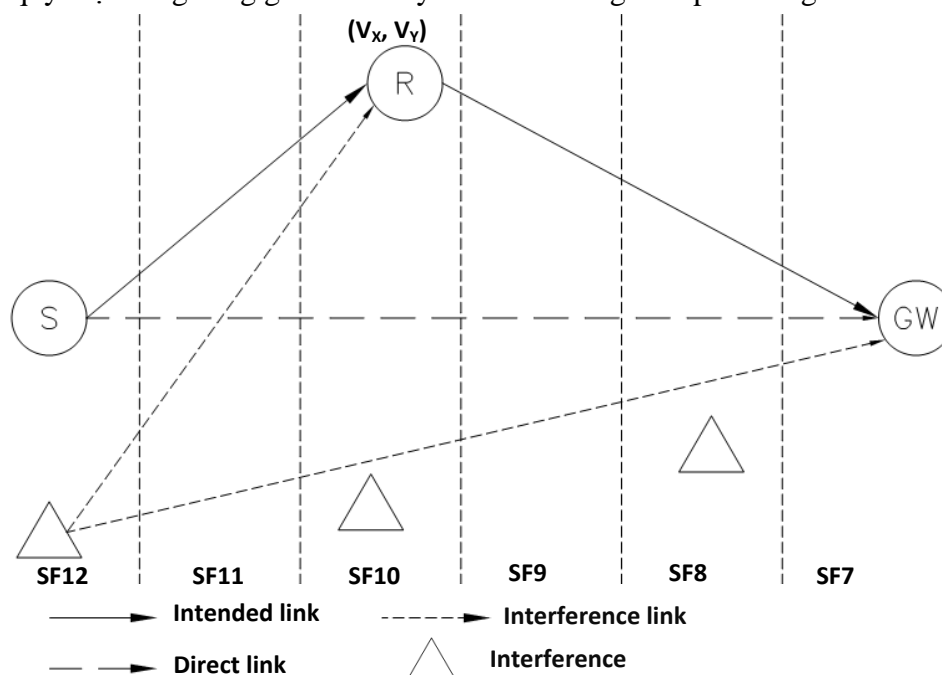
Cấu trúc phần còn lại của bài báo gồm: Mô hình hệ thống mạng LoRa hai chặng được khảo sát từ đó đưa ra công thức tính các chỉ số SIR và SNR của mỗi chặng được trình bày trong phần

2. Phần 3 đề xuất các thuật toán tính toán cự ly truyền dẫn tối đa của mạng khi có và không có trạm lặp. Phần 4 là các kết quả và đánh giá. Kết luận của bài được trình bày trong phần 5.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

2.1. Kiến trúc mạng

Xét mạng LoRa đường lên như Hình 1 [10], trong đó S là thiết bị đầu cuối xa nhất kết nối đến Gateway G thông qua trạm lặp R. Trong mạng LoRa, tùy thuộc vào khoảng cách từ thiết bị đầu cuối đến Gateway mà chọn các thông số như hệ số SF, công suất phát để đảm bảo kết nối giữa các ED ở các vị trí khác nhau. Xét mạng LoRa được chia thành 6 vùng không trùng lặp có phạm vi như nhau SF k với $k \in \{7, \dots, 12\}$. Mỗi vùng được ấn định công suất phát và hệ số SF theo quy luật vùng càng gần Gateway thì SF và công suất phát càng nhỏ.



Hình 1. Mạng LoRa đường lên.

Ngoài các thành phần S, R và G, mạng còn gồm N các thiết bị đầu cuối ($N = \sum_{k=7}^{12} N_k$) với N_k là số lượng các đầu cuối đóng vai trò nhiễu trong vùng SF k . Giả thiết vị trí của trạm lặp R $V_R = (v_x, v_y)$ đặt tại vị trí SF o với $o \in \{7, \dots, 12\}$ và có thể thay đổi. Giả thiết G được cố định và S là điểm xa nhất kết nối đến G với cự ly R và có hệ số SF12 như trên Hình 1.

2.2. Tín hiệu và kênh truyền

Để ước lượng cự ly truyền đảm bảo các chỉ tiêu kỹ thuật của mạng LoRa, ta phân tích tín hiệu từ thiết bị đầu cuối xa nhất S đến Gateway dưới tác động của cả nhiễu bên trong chính SF (gọi là co-SF) và nhiễu giữa các vùng SF (inter-SF). Tín hiệu từ S đến G được phân làm hai chặng, chặng thứ nhất là tín hiệu từ S đến R, tín hiệu thu được tại R được tính theo công thức [1,

10]:

$$y_R = \sqrt{P_S} l(d_{s,R}) h_{s,R} x_S + \sum_{k=7}^{12} \sum_{i=1}^{N_k} \chi_{i,R}^k \sqrt{P_k} l(d_{i,R}) h_{i,R}^k x_{i,R}^k + n_R \quad (1)$$

trong đó $h_{s,R}$, $h_{i,R}^k$ là hệ số fading nhanh không bao gồm suy hao theo khoảng cách từ S và từ nhiễu của ED trong miền SFk đến trạm lặp R tuân theo phân bố Rayleigh, nghĩa là $E[|h|^2] = 1$. Hàm suy hao theo khoảng cách $l(d_{s,R})$, $l(d_{i,R})$ với $d_{x,y}$ là khoảng cách Euclidean từ X đến Y. Theo [1], suy hao $l(d_{x,y}) = \kappa [\max(d_{x,y}, d_c)]^{-\eta}$ với η là hệ số mũ suy hao đường truyền, $d_c > 0$ là khoảng cách tối thiểu để tránh trường hợp $l(d_{x,y})$ tiến tới vô cùng (nghĩa là $d_{x,y} \rightarrow 0$), $\kappa = (\lambda_c / 4\pi)^2$ với λ_c là bước sóng của sóng mang. x_S , $x_{i,R}^k$ là các tín hiệu được điều chế CSS (*chirp spread spectrum*) của S và các nguồn nhiễu i của vùng SFk được giả thiết có công suất đơn vị, nghĩa là $E[|x_S|^2] = E[|x_{i,R}^k|^2] = 1$. Hàm kích hoạt $\chi_{i,R}^k = \{0,1\}$ của nguồn nhiễu ED thứ i trong miền SFk và tuân theo phân bố Bernoulli với xác suất $P_A^k = \frac{L_{pac}}{R_b^k T_{in}}$; $R_b^k = SF_k \cdot CR \cdot BW / (2^{SF_k})$ là tốc độ bit của ED trong vùng SFk như trong Bảng I. Các ký hiệu L_{pac} , T_{in} , CR và BW lần lượt là chiều dài gói dữ liệu, thời gian trung bình giữa 2 gói đến, tỷ lệ mã hóa và băng thông truyền dẫn. P_S, P_k là công suất phát của S và của các ED trong vùng SFk tuân theo Bảng I. Ký hiệu n_R là nhiễu tại trạm lặp.

Cần chú ý rằng trong công thức (1), số hạng $\sum_{k=7}^{12} \sum_{i=1}^{N_k} \chi_{i,R}^k \sqrt{P_k} l(d_{i,R}) h_{i,R}^k x_{i,R}^k$ thể hiện cả nhiễu trong cùng một SF (co-SF) và giữa các SF khác nhau (inter-SF).

Bảng 1. Đặc tính mạng LoRa ở BW= 250 kHz và CR=4.5.

SF	Tốc độ bit [kbps]	q_o [dBm]	P_{tx} [dBm]	Vùng cự ly (Network Zone)
7	10.9	-6	2	$0 \rightarrow R/6$
8	6.25	-9	5	$R/6 \rightarrow 2R/6$
9	3.52	-12	8	$2R/6 \rightarrow 3R/6$
10	1.96	-15	11	$3R/6 \rightarrow 4R/6$
11	1.1	-17.7	14	$4R/6 \rightarrow 5R/6$
12	0.6	-20	17	$5R/6 \rightarrow 6R/6$

Chặng thứ 2 là tín hiệu truyền từ trạm lặp R đến G, tín hiệu thu được tại Gateway được tính như sau:

$$y_G = \sqrt{P_R} l(d_{R,G}) h_{R,G} x_R + \sum_{k=7}^{12} \sum_{i=0}^{N_k} \chi_{i,G}^k \sqrt{P_k} l(d_{i,G}) h_{i,G}^k x_{i,G}^k + n_G \quad (2)$$

với $P_R = P_o, o \in \{7, \dots, 12\}$ là công suất phát của trạm lặp R, giá trị của P_o được cho trong bảng 1; $h_{R,G}, h_{i,G}^k$ là hệ số fading nhanh từ R và từ nguồn nhiễu thứ i của SF k đến Gateway; $x_R, x_{i,G}^k$ là tín hiệu giải điều chế của S tại R và tín hiệu của ED thứ i trong miền SF k ; n_G là nhiễu AWGN tại G; $\chi_{i,G}^k$ là hàm kích hoạt.

Từ phân tích tín hiệu trong mạng LoRa ta tính được các chỉ số SNR của tín hiệu truyền từ X đến Y theo công thức

$$\text{SNR}_{XY} = \frac{P_X l(d_{X,Y}) |h_{X,Y}|^2}{\sigma_Y^2} \quad (3)$$

trong đó P_X là công suất phát của nút X; σ_Y^2 là nhiễu tại máy thu Y, $l(d_{X,Y})$ là suy hao và $|h_{X,Y}|^2$ là độ lợi kênh truyền từ X đến Y.

Hệ số SIR của các gói gửi từ nút X của vùng SF $o, o \in \{7, \dots, 12\}$ đến nút Y chịu ảnh hưởng các nhiễu từ SF $k, k \in \{7, \dots, 12\}$ được tính như sau:

$$\text{SIR}_{XY} = \frac{P_X l(d_{X,Y}) |h_{X,Y}|^2}{\sum_{i=1}^{N_k^o} P_k l(d_{i,Y}) |h_{i,Y}|^2} \quad (4)$$

với $N_k^o = \lceil p_A^k N_k \rceil$ là số lượng ED kích hoạt trong vùng SF k ; $P_k, l(d_{i,Y}), |h_{i,Y}|^2$ lần lượt là công suất phát, hệ số suy hao và độ lợi kênh truyền của nguồn nhiễu ED thứ i từ SF k đến máy thu Y.

Trong phần 3, khoảng cách truyền dẫn từ S đến G và vị trí trạm lặp sẽ được tính toán dựa trên điều kiện ngưỡng của các chỉ số SNR và SIR.

3. TÍNH CỤ LY TRUYỀN VÀ VỊ TRÍ TRẠM LẶP

Trong mạng LoRa, một gói hoạt động trong vùng SF $o, o \in \{7, \dots, 12\}$ được xem là giải mã chính xác nếu thỏa mãn đồng thời hai điều kiện sau:

- i) SNR lớn hơn giá trị ngưỡng q_o với q_o cho trên bảng 1.
- ii) SIR của các gói khác nhau từ cùng một SF hoặc từ các SF khác phải lớn hơn giá trị ngưỡng $\Delta_{o,k}$ (dB) với $o, k \in \{7, \dots, 12\}$ [12]. Giá trị $\Delta_{o,k}$ là phần tử thuộc hàng o và cột k được lấy trong ma trận sau:

$$\Delta_{[dB]} = \begin{matrix} & SF_7 & SF_8 & SF_9 & SF_{10} & SF_{11} & SF_{12} \\ \begin{matrix} SF_7 \\ SF_8 \\ SF_9 \\ SF_{10} \\ SF_{11} \\ SF_{12} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & -8 & -9 & -9 & -9 & -9 \\ -11 & 1 & -11 & -12 & -13 & -13 \\ -15 & -13 & 1 & -13 & -14 & -15 \\ -19 & -18 & -17 & 1 & -17 & -18 \\ -22 & -22 & -21 & -20 & 1 & -20 \\ -25 & -25 & -25 & -24 & -23 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

3.1. Tính cự ly truyền tối đa khi có trạm lặp

Để tính cự ly truyền tối đa khi có trạm lặp thì vị trí trạm lặp, S và G phải thỏa mãn các điều kiện sau:

- Điều kiện đảm bảo SNR ngưỡng

$$\text{SNR}_{S,R} \geq q_{S,R} \text{ và } \text{SNR}_{R,G} \geq q_o \quad (6)$$

do S luôn ở vị trí xa nhất của mạng nên $q_{S,R}$ luôn là q_{12} , vị trí R đang xét có thể thay đổi ở một trong các vùng SF đặt nên q_o thay đổi.

- Điều kiện đảm bảo ngưỡng SIR
- ✓ Ngưỡng SIR do nhiễu trong cùng SF co-SF

$$\text{SIR}_{S,R}^{co-SF} \geq \Delta_{S,R}^{co-SF} \text{ và } \text{SIR}_{R,G}^{co-SF} \geq \Delta_{R,G}^{co-SF} \quad (7)$$

SIR của 2 chặng đều phải lớn hơn ngưỡng, giá trị $\Delta_{X,Y}^{co-SF}$, $X \in \{S, R\}$, $Y \in \{R, G\}$ tùy thuộc vào vùng gói dữ liệu được gửi đi; hơn nữa $\Delta_{X,Y}^{co-SF}$ cũng là thành phần đường chéo trong ma trận Δ . Ví dụ nếu gói gửi từ S ở vùng SF12 thì $\Delta_{S,R}^{co-SF} = \Delta_{12,12}$, tương tự với chặng thứ hai có $\Delta_{R,G}^{co-SF} = \Delta_{o,o}$ với $o \in \{7, K, 12\}$.

- ✓ Ngưỡng SIR do nhiễu từ các SF khác inter-SF

$$\text{SIR}_{S,R}^{inter-SF} \geq \Delta_{S,R}^{inter-SF} \text{ và } \text{SIR}_{R,G}^{inter-SF} \geq \Delta_{R,G}^{inter-SF} \quad (8)$$

các giá trị $\Delta_{X,Y}^{inter-SF}$ tùy thuộc vào SF của gói muốn nhận và gói nhiễu, ta có $\Delta_{S,R}^{inter-SF} = \Delta_{12,k}$, $k \in \{7, \dots, 11\}$ và $\Delta_{R,G}^{inter-SF} = \Delta_{o,k}$, $k \neq o$; $o, k \in \{7, \dots, 12\}$

- ✓ Ngưỡng SIR do cả nhiễu co-SF khác inter-SF

$$\text{SIR}_{S,R}^{both} \geq \Delta_{S,R}^{both} \text{ và } \text{SIR}_{R,G}^{both} \geq \Delta_{R,G}^{both} \quad (9)$$

các giá trị SIR cần đảm bảo cả ngưỡng co-SF và inter-SF từ S đến R và từ R đến G, các giá trị ngưỡng $\Delta_{S,R}^{both} = \Delta_{12,k}$, $k \in \{7, \dots, 12\}$ và $\Delta_{R,G}^{inter-SF} = \Delta_{o,k}$, $k \in \{7, \dots, 12\}$

Chương trình *findDmaxWithRelay* thực hiện tìm cự ly truyền tối đa $D_{SG(\max)}$ giữa S và G và vị trí trạm lặp tương ứng $x_{R_k(\max)}$ được mô tả theo đoạn mã giả dưới đây với các tham số được mô tả trong Bảng 2.

Bảng 2. Tham số trong chương trình findDmaxWithRelay.

Ký hiệu tham số	Ý nghĩa
x_{R_k}	Vị trí trạm lặp với k chạy để $x_{R_k} \in [d_c, x_{R(\max)}]$
d_c, Δ_{x_R} và $\Delta_{D_{SG}}$	Lần lượt là vị trí ngắn nhất, bước tăng của x_R và D_{SG} trong vòng for
$D_{SG,k(\max)}$	Cự ly truyền tối đa tại vị trí trạm lặp x_{R_k}
$D_{SG(\max)}$	Cự ly truyền lớn nhất trong các $D_{SG,k(\max)}$ và vị trí trạm lặp tương ứng $x_{R_k(\max)}$

PROCEDURE *findDmaxWithRelay*

Begin

$x_R = d_c; \Delta_{x_R} = 200m; \Delta_{D_{SG}} = 200m; D_{SG(x_R)\max} = 10x_R;$

$D_{SG} = [];$ % ma trận rỗng

for $x_{R_k} = d_c$ **to** $x_{R(\max)}$

$D_{SG,k} = [];$ % ma trận rỗng

for $D_{SG(x_{R_k})_m} = d_c$ **to** $D_{SG(x_R)\max}$

if ($SNR_{S,R} \geq q_{S,R}$ and $SNR_{R,G} \geq q_o$ and $SIR_{S,R}^{both} \geq \Delta_{S,R}^{both}$ and $SIR_{R,G}^{both} \geq \Delta_{R,G}^{both}$)

$D_{SG_k,m} = D_{SG(x_{R_k})_m};$

else if

$D_{SG_k,m} = 0;$

endif

$D_{SG,k} = [D_{SG,k}, D_{SG,k,m}];$ % ghép ma trận

endfor

$D_{SG,k(\max)} = \max(D_{SG_k});$ % cự ly lớn nhất với vị trí trạm lặp x_{R_k}

$D_{SG} = [D_{SG}, D_{SG,k(\max)}];$ % ghép ma trận

endfor

$D_{SG(\max)} = \max(D_{SG});$

end

3.2. Tính vị trí trạm lặp để đảm bảo cự ly truyền nhất định

Để quy hoạch mạng thuận tiện hơn, bài báo xây dựng chương trình *findRelayLocation* thực hiện các vị trí đặt trạm lặp với một cự ly truyền xác định D_{SG} , tập kết quả trả về là các vị trí trạm lặp x_R thỏa mãn các điều kiện về SNR và SIR như trong công thức (7) và (9). Thuật toán như sau:

PROCEDURE *findRelayLocation*

Begin

$\Delta_{x_R} = 200m; x_{R(\max)} = D_{SG} - d_c$

$x_R = [];$ % ma trận rỗng

for $x_{R_k} = d_c$ **to** $x_{R(\max)}$

if ($SNR_{S,R} \geq q_{S,R}$ and $SNR_{R,G} \geq q_o$ and $SIR_{S,R}^{both} \geq \Delta_{S,R}^{both}$ and $SIR_{R,G}^{both} \geq \Delta_{R,G}^{both}$)

$x_R = [x_R, x_{R_k}]$; % ghép ma trận

endif

endfor

End

3.3. Tính cự ly truyền tối đa khi không có trạm lặp

Để so sánh hiệu quả của việc sử dụng trạm lặp trong việc mở rộng phạm vi truyền của mạng LoRa phần này sẽ tính cự ly truyền tối đa khi không dùng trạm lặp. Cự ly truyền tối đa khi không có trạm lặp $D_{SG(\max)}$ là cự ly lớn nhất mà tại đó thỏa mãn các điều kiện sau:

- Điều kiện đảm bảo SNR ngưỡng:

$$\text{SNR}_{S,G} \geq q_{S,G} \quad (10)$$

do S luôn ở vị trí xa nhất của mạng nên $q_{S,G}$ luôn là q_{12} .

- Điều kiện đảm bảo ngưỡng SIR cho cả nhiễu co-SF và inter-SF:

$$\text{SIR}_{S,G}^{\text{both}} \geq \Delta_{S,G}^{\text{both}} \quad (11)$$

với $\Delta_{S,G}^{\text{both}} = \Delta_{12,k}, k \in \{7, \dots, 12\}$

Chương trình *findDmaxWithoutRelay* thực hiện tìm $D_{SG(\max)}$ được mô tả theo đoạn mã giả dưới đây với d_c là cự ly tối thiểu xét, Δ_{SG} là bước tăng dần D_{SG} khi thỏa mãn các điều kiện về SNR và SIR, cờ *flag*=0 khi các điều kiện SNR và SIR không còn thỏa mãn và cự ly đã đạt tối đa.

PROCEDURE *findDmaxWithoutRelay*

Begin

$D_{SG} = d_c$; *flag* = 1; $\Delta_{SG} = 200m$;

while (*flag*)

if ($\text{SNR}_{S,G} \geq q_{S,G}$ and $\text{SIR}_{S,G}^{\text{both}} \geq \Delta_{S,G}^{\text{both}}$) **then**

$D_{SG} = D_{SG} + \Delta_{SG}$;

else

$D_{SG(\max)} = D_{SG}$; *flag* = 0;

end if

end while

End

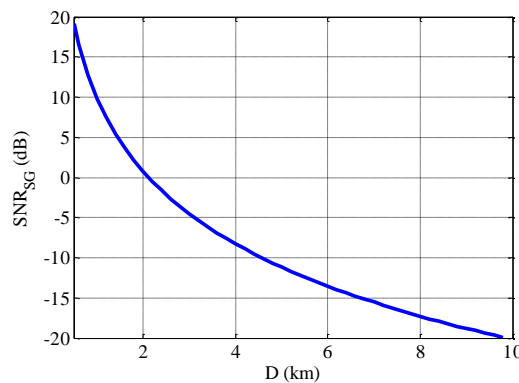
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Phần này đưa ra các kết quả mô phỏng tính toán cự ly truyền tối đa và vị trí trạm lặp cho mạng LoRa với mô hình mạng như hình 1 và kịch bản có trạm lặp và không có trạm lặp thông qua mô phỏng Monte Carlo. Các thông số mô phỏng được thực hiện với $BW = 250$ KHz, $\eta = 3$, $f_c = 868$ MHz, $L_{pac} = 10$ byte, $T_{in} = 60s$, $ED = 10^3$ và $CR = 4/5$.

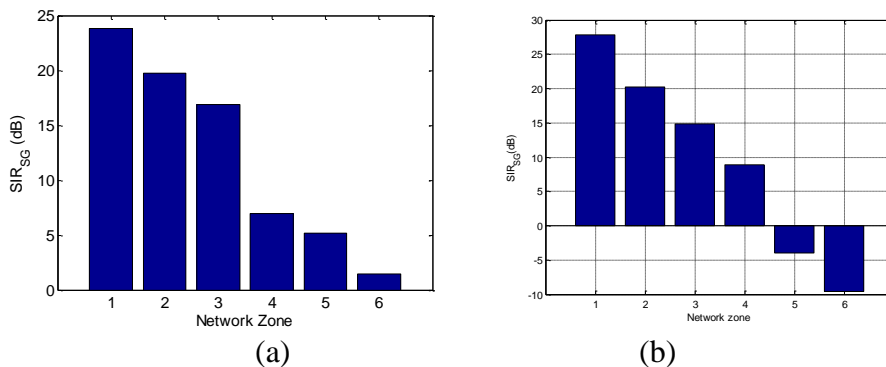
Hình 2 thể hiện kết quả khảo sát SNR giữa S và G khi không sử dụng trạm lặp. Căn cứ vào kết quả trên ta thấy nếu không xét đến nhiễu SIR mà chỉ xét đến điều kiện SNR thì cự ly tối đa đạt được giữa S và G là 9.8 km. Để xét ảnh hưởng của SIR lên cự ly truyền tối đa, chạy chương trình *findDmaxWithoutRelay* đề xuất trong phần 3.3 cho kết quả cự ly truyền tối đa đạt được là

8.2 km. Để minh họa cho kết quả, hình 3(a) trình bày kết quả SIR_{SG} khi cự ly truyền là 8.2 km, ta nhận thấy SIR_{SG} đảm bảo điều kiện ngưỡng SIR như thể hiện trong ma trận công thức (5). Với cự ly truyền 8.4 km vượt quá cự ly truyền tối đa đạt được, điều kiện ngưỡng SIR này không được đảm bảo thể hiện ở vùng (zone) 6 có $SIR_{SG} = -10 \text{ dB} < 1 \text{ dB}$ theo giá trị ngưỡng như kết quả thể hiện trên hình 3 (b).

Nếu xét đến điều kiện SIR thì cự ly tối đa đạt được là 8.2 km, thấp hơn đáng kể so với chỉ xét chỉ tiêu SNR. Như vậy khi tăng cự ly vượt quá 8.2 km, điều kiện về ngưỡng SIR trong công thức (11) sẽ không được đảm bảo. Kết quả trên Hình 3 (b) của SIR cho thấy khi tăng cự ly lên 8.4 km sẽ dẫn đến điều kiện về ngưỡng SIR $SIR_{S,G}^{both} \geq \Delta_{12,12}^{both} = 1\text{dB}$ trong miền SF12 (nghĩa là vùng cự ly 5R/6 \rightarrow R xa Gateway nhất) không được đảm bảo. Lý do là do suy hao truyền dẫn tăng khi tăng cự ly truyền dẫn đến công suất tín hiệu nhận được tại G giảm, làm giảm tỷ lệ SIR như công thức (4).



Hình 2. SNR giữa S và G theo cự ly truyền.

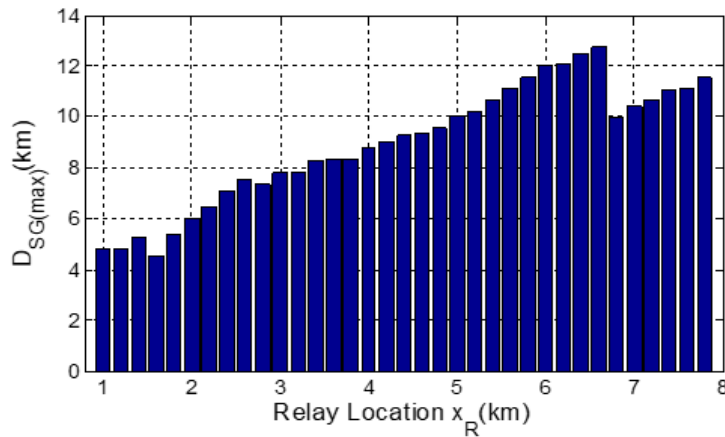


Hình 3. (a) Kết quả SIR tại cự ly truyền tối đa 8.2 km.
(b) Kết quả SIR tại cự ly 8.4km (xa hơn cự ly truyền tối đa).

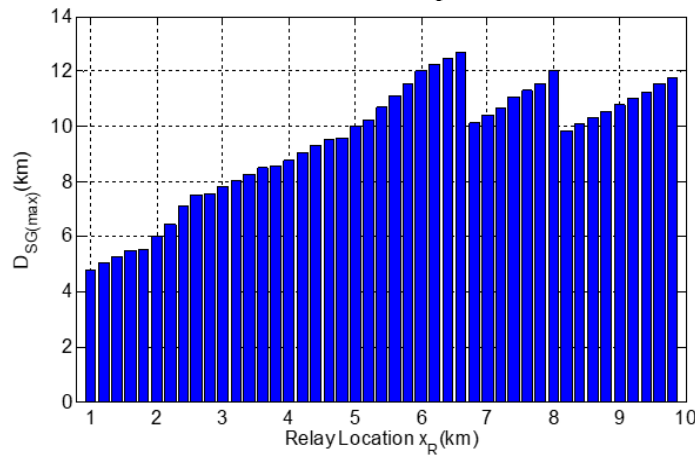
Hình 4 là kết quả tính cự ly truyền dẫn tối đa với các vị trí trạm lặp có thể đặt để thỏa mãn cả điều kiện và SIR và SNR trong công thức (6) và (9). Theo kết quả cự ly truyền tối đa đạt được khi không có trạm lặp là 8.2 km thì vị trí của trạm lặp không thể đặt xa hơn 8.2 km. Đó đó, hình 4 chỉ khảo sát với vị trí trạm lặp nhỏ hơn 8.2km. Thuật toán trong phần 3.1 sẽ tìm tất cả các cự ly truyền tối đa ứng với các vị trí trạm lặp trong khoảng 8.2 km. Từ kết quả cho thấy cự ly tối đa của mạng LoRa đạt 12.72 km tại vị trí trạm lặp $x_R = 6.6$ km. Kết quả này tăng lên đáng kể so với cự ly 8.2 km không dùng trạm lặp. Tại vị trí $x_R = 7$ km, khi ta khảo sát đến

$D_{SG} > 10$ km thì điều kiện ngưỡng (cho chặng RG, lúc này có $d_{RG} > 3$ km) không thỏa mãn nữa nên cự ly truyền lớn nhất D_{SG} là 10 km. Cần lưu ý rằng tại bất kỳ khoảng cách nào thì mô hình mạng vẫn tuân theo hình 1, nên các kết quả không chỉ xét đến cự ly mà còn xét đến vị trí trạm lặp đang thuộc SF nào ứng với cự ly đó như trong bảng 1. Vị trí của trạm lặp càng gần G thì công suất phát càng thấp và mức ngưỡng q_0 càng cao. Phân tích cụ thể hơn kết quả trên Hình 4 ta nhận thấy, khi tăng vị trí đặt trạm lặp quá xa S (nghĩa là $x_R > 6.6$ km) thì suy hao truyền dẫn từ S đến R sẽ lớn làm giảm công suất tín hiệu hiệu có ích dẫn đến ảnh hưởng của co-SF và inter-SF nghiêm trọng hơn nên giảm cự ly truyền tối đa đạt được, và khi $x_R > 7.8$ km thì điều kiện ngưỡng SIR không còn thỏa mãn.

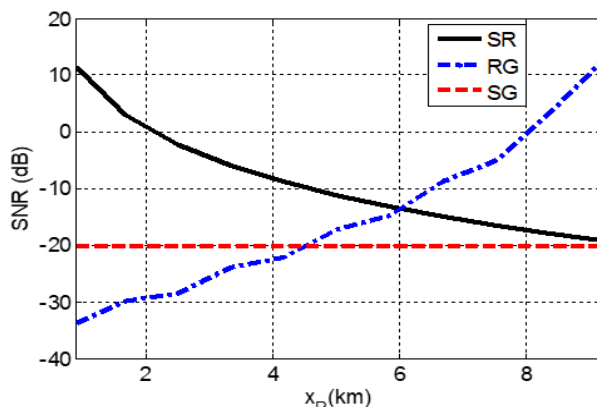
Để làm rõ ảnh hưởng của nhiều co-SF và inter-SF, Hình 5 là kết quả cự ly truyền tối đa nếu chỉ xét điều kiện về SNR như trong công thức (6), nghĩa là không xét đến nhiều co-SF và inter-SF. Kết quả cho thấy nhiều co-SF và inter-SF không gây ảnh hưởng nhiều đến cự ly truyền tối đa nhưng ảnh hưởng đến vị trí đặt trạm lặp do khi tăng vị trí đặt trạm lặp quá xa S thì suy hao truyền dẫn từ S đến R lớn làm giảm công suất thu được tại R dẫn đến ảnh hưởng của co-SF và inter-SF nghiêm trọng hơn. Nếu chỉ xét đến điều kiện ngưỡng SNR, có thể đặt vị trí trạm lặp lên tới 9.8 km so với 7.8 km khi xét đến ảnh hưởng của cả nhiều co-SF và inter-SF.



Hình 4. Cự ly truyền dẫn tối đa với các vị trí đặt trạm lặp khác nhau xét cả điều kiện SIR và SNR.



Hình 5. Cự ly truyền dẫn tối đa với các vị trí đặt trạm lặp khác nhau chỉ xét điều kiện ngưỡng SNR.



Hình 6. Kết quả SNR với các vị trí đặt trạm lặp khác nhau ở cự ly truyền 10 km.

Hình 6 là kết quả SNR với các vị trí đặt trạm lặp khác nhau ở cự ly truyền 10 km. Để đảm bảo điều kiện ngưỡng SNR trong (6) thì vị trí trạm lặp có thể đặt trong khoảng từ 5 km đến 9.8km. Tuy nhiên, nếu xét đến điều kiện SIR trong công thức (6) thì vị trí trạm lặp có thể đặt trong khoảng từ 5 km đến 6.17 km so với S. Tương tự, áp dụng với cự ly truyền 12 km thì vị trí trạm lặp có thể đặt ở vị trí từ 6 km đến 8 km so với S.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã sử dụng cấu hình mạng LoRa gồm 6 vùng SFk và mô hình kênh truyền Rayleigh để phân tích tín hiệu cũng như tính toán các chỉ số chất lượng hệ thống gồm SNR, SIR. Căn cứ vào các điều kiện ngưỡng SNR và SIR của mạng LoRa xét trong cùng một vùng SF (co-SF) và giữa các vùng SF (inter-SF), cự ly truyền dẫn tối đa và vị trí trạm lặp được tính toán. Các kết quả cho thấy việc đặt thêm trạm lặp ở vị trí phù hợp có thể mở rộng phạm vi truyền của mạng LoRa. Các kết quả và thuật toán đề xuất trong bài báo có thể áp dụng trong quá trình quy hoạch và thiết kế mạng LoRa ban đầu trước khi triển khai thực tế.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2020-DT-004.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Công ty cổ phần thiết bị quan trắc địa kỹ thuật và môi trường Việt Nam đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Mahmood et al., Scalability Analysis of a LoRa Network Under Imperfect Orthogonality, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15 (2019) 1425-1436. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2864681>
- [2]. R. El Chall, S. Lahoud, M. El Helou, LoRaWAN Network: Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon, IEEE Internet of Things Journal, 6 (2019) 2366-2378. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2906838>
- [3]. O. Georgiou, U. Raza, Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?, IEEE Wireless Communications Letters, 6 (2017) 162-165. <https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2647247>
- [4]. D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, Mathematical model of LoRaWAN channel access with capture

- effect, 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2017, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292748>
- [5]. D. Croce et al., Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance, IEEE Communications Letters, 22 (2018) 796-799. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2797057>
- [6]. L.-C. Hwang et al., A bridge between the smart grid and the Internet of Things: Theoretical and practical roles of LoRa, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 113 (2019) 971-981. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.06.001>
- [7]. H. Lee, K. Ke, Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 67 (2018) 2177-2187. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2814082>
- [8]. J. Petajarvi et al., On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology, 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), 2015, pp. 55-59. <https://doi.org/10.1109/ITST.2015.7377400>
- [9]. P. A. Campos et al., Evaluation of LoRaWAN Transmission Range for Wireless Sensor Networks in Riparian Forests, 22nd International ACM Conference on Modeling, 2019, pp. 199-206. <https://doi.org/10.1145/3345768.3355934>
- [10]. T. H. Nguyen et al., Performance Analysis and Optimization of the Coverage Probability in Dual Hop LoRa Networks With Different Fading Channels, IEEE Access, 8 (2020) 107087-107102. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000600>
- [11]. L. Parri et al., Offshore LoRaWAN Networking: Transmission Performances Analysis Under Different Environmental Conditions, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Early Access, 2020, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3031193>
- [12]. A. Hoeller et al., Analysis and Performance Optimization of LoRa Networks With Time and Antenna Diversity, IEEE Access, 6 (2018) 32820-32829. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839064>