

Nâng cao khả năng mã hóa dữ liệu cho thẻ tag RFID không chip bằng các bộ tần số cộng hưởng tham chiếu

Lê Công Cường^{1*}, Đào Trung Kiên², Nguyễn Thanh Hường¹, Phạm Thị Ngọc Yến¹

¹Viện MICA & Khoa Tự động hóa, Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội
²Viện MICA & Khoa Kỹ thuật truyền thông, Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Corresponding author E-mail: cuong.lecong@hust.edu.vn

Abstract

This paper proposes a new frequency data encoding method, applicable to chipless RFID tags, allowing for N resonant elements that each of them has a fundamental resonant frequency and M shifted resonance frequencies around can encode $\sum_{k=0}^N C_{N \times M}^k \times 2^{N-k}$ data codes, much larger than the number of data codes encrypted by the FSC method of $(M+2)^N$. To do this, the authors have also researched and solved thoroughly to design of passive structures which can resonate at predetermined desired frequencies with errors within allowable limits by applying the Particle Swarm Optimization algorithm (PSO) to find the optimal parameters. This result has overcome one of the biggest limitations of chipless RFID tags which is data encoding capacity while not increasing the size or complicating the structure of the tag.

Keywords: Chipless RFID, frequency data encoding, particle swarm optimization

Từ viết tắt

RFID	Radio Frequency Identification
OOK	On/Off Keying
PSO	Particle Swarm Optimization
GA	Genetic Algorithm
ACO	Ant Colony Optimization
UWB	Ultra-Wideband
FSC	Frequency Shift Code

Tóm tắt

Bài báo đề xuất một phương pháp mã hóa dữ liệu tần số mới, áp dụng cho thẻ tag RFID không chip, cho phép với N phần tử cộng hưởng mà mỗi phần tử có một tần số cộng hưởng cơ bản và M số tần số cộng hưởng dịch xung quanh tần số cơ bản đó có thể mã hóa được $\sum_{k=0}^N C_{N \times M}^k \times 2^{N-k}$ mã dữ liệu, lớn hơn nhiều so với số lượng mã dữ liệu mã hóa theo phương pháp FSC là $(M+2)^N$. Để thực hiện được điều này tác giả đã nghiên cứu và giải quyết triệt để việc thiết kế các cấu trúc thụ động có thể cộng hưởng ở các bộ tần số mong muốn định trước, với sai số trong giới hạn cho phép bằng cách vận dụng thuật toán tối ưu bầy đàn PSO để tìm kiếm thông số tối ưu. Kết quả này đã giải quyết được một trong những hạn chế lớn nhất của công nghệ thẻ tag RFID không chip đó là khả năng mã hóa dữ liệu, đồng thời không làm tăng kích thước hay làm phức tạp hóa cấu trúc của thẻ tag.

1. Đặt vấn đề

Công nghệ RFID không chip được quan tâm nghiên cứu rất nhiều trong những năm gần đây [1], với việc không sử dụng chip (IC) để lưu trữ dữ liệu và điều chế tín hiệu thì công nghệ này hứa hẹn sẽ giảm giá thành của thẻ tag, vì chip là thành phần đắt nhất trên thẻ tag RFID

truyền thống. Giá của chip là nguyên nhân chính dẫn đến việc định danh bằng công nghệ RFID chưa trở nên phổ biến, dù công nghệ này có nhiều ưu điểm vượt trội so với công nghệ định danh bằng barcode hay mã QR như: Khả năng định danh không cần thẳng hàng, đọc được nhiều mã dữ liệu trong một lần quét, dữ liệu mã hóa có tính bảo mật cao. Ngoài ra, việc loại bỏ đi thành phần chip và thay thế bằng các phần tử thụ động để mã hóa dữ liệu không chỉ giúp cho thẻ tag RFID không chip rẻ hơn mà còn bền hơn, chế tạo dễ dàng hơn. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của công nghệ này là khả năng mã hóa dữ liệu thấp với đơn vị tính chỉ là bit trong khi với công nghệ RFID truyền thống thì số dữ liệu mã hóa có thể được tính với đơn vị kilobyte. Do vậy nâng cao khả năng mã hóa cho thẻ tag RFID không chip là một vấn đề quan trọng cần phải được nghiên cứu và giải quyết.

Thẻ tag RFID không chip mã hóa dữ liệu bằng cách phân tích đặc tính của tín hiệu phản hồi về đầu đọc trong miền thời gian [2][3] hoặc trong miền tần số [4][5]. Đối với miền thời gian, nguyên lý mã hóa cơ bản là sử dụng các phần tử thụ động có kích thước khác nhau nhằm tạo ra độ trễ tín hiệu phản hồi khác nhau và sử dụng thời gian trễ này để quy định dữ liệu mã hóa. Tuy nhiên để tạo ra được một độ trễ đủ phân biệt cho nhiều mã dữ liệu thì cần thay đổi kích thước của phần tử thụ động đủ lớn, dẫn đến kích thước của thẻ tag có thể tăng đến mức không còn phù hợp với ứng dụng trong thực tế, do vậy nguyên lý này có khả năng mã hóa dữ liệu không cao. Còn đối với miền tần số, các phần tử cộng hưởng ở các tần số khác nhau sẽ được sử dụng để mã hóa dữ liệu, với tần số cộng hưởng cao đồng nghĩa với bước sóng ngắn (đơn vị mm) cho phép tạo ra các thẻ tag với kích thước nhỏ, hay khả năng mã hóa của loại thẻ tag theo nguyên lý này cao hơn và thực tế hiện nay có nhiều nghiên cứu theo hướng tần số hơn là thời gian [6][7].

Để đánh giá khả năng mã hóa của một thiết kế thẻ tag RFID không chip cụ thể trong miền tần số, một hệ số được thành lập theo công thức (1) [8][9].

$$A = \frac{D}{S \times B} \quad (1)$$

Trong đó:

- A là khả năng mã hóa,
- D là số bit có thể mã hóa được,
- S là diện tích của cấu trúc thẻ tag,
- B là dải tần số làm việc.

Khả năng mã hóa có giá trị càng cao thể hiện số bit dữ liệu mã hóa được càng lớn, kích thước của cấu trúc càng nhỏ và dải tần số làm việc của cấu trúc càng hẹp. Kết quả nghiên cứu hiện tại cho cấu trúc thẻ tag có khả năng mã tốt nhất mã hóa 20 bit hoạt động trong dải tần số từ 3GHz đến 8GHz và diện tích 12x12 (mm²) có hệ số A bằng 3.03 [10]. Trong điều kiện thực tế, khi kích thước và dải tần số làm việc là giới hạn thì tăng số bit là phương án khả thi nhất để nâng cao khả năng mã hóa, việc tăng số bit này có hai hướng tiếp cận:

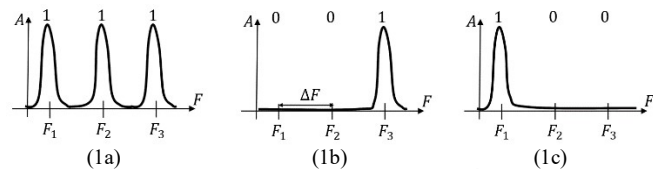
Hướng thứ nhất: Đề xuất phương pháp mã hóa dữ liệu mới, cho phép mã hóa được nhiều dữ liệu hơn cho cùng một cấu trúc thẻ tag.

Hướng thứ hai: Tăng số phần tử cộng hưởng trên cấu trúc để tăng số bit mã hóa. Tuy nhiên hướng này sẽ chịu sự ràng buộc về mức độ hở cảm giữa các phần tử cộng hưởng cạnh nhau làm dịch tần số cộng hưởng ban đầu.

Bài báo sẽ tiếp cận theo cả hai hướng trên để giải quyết vấn đề đặt ra.

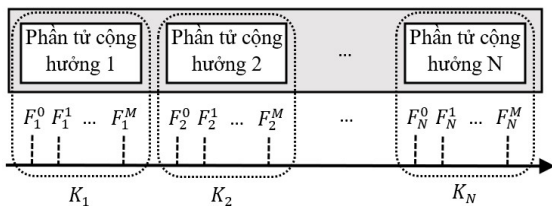
2. Phương pháp mã hóa dữ liệu bằng các bộ tần số cộng hưởng tham chiếu

Đối với công nghệ RFID không chip trong miền tần số thì phương pháp mã hóa cơ bản là phương pháp OOK mà ở đó mỗi bit tương ứng với một tần số cộng hưởng được định trước. Bằng cách xác định có tồn tại hoặc không tồn tại tần số cộng hưởng định trước trên tín hiệu phản hồi về đầu đọc, giá trị bit tương ứng của dữ liệu mã hóa sẽ là 1 hoặc 0 [11]. Ví dụ đáp ứng tần số của thẻ tag 3 bit với F_1, F_2, F_3 là các tần số cộng hưởng định trước được thể hiện ở Hình 1 trong đó ΔF là khoảng cách giữa hai tần số cộng hưởng liên tiếp. Tín hiệu ở Hình 1a thể hiện xảy ra cộng hưởng ở cả ba tần số nên dữ liệu mã hóa sẽ là 111, phân tích tương tự thì tín hiệu ở Hình 1b mã hóa dữ liệu 001 và Hình 1c mã hóa dữ liệu 100.



Hình 1: Mã hóa dữ liệu theo phương pháp OOK cho cấu trúc mã hóa 3 bit

Theo phương pháp mã hóa này, mỗi tần số cộng hưởng được tạo ra bởi một phần tử cộng hưởng và số phần tử cộng hưởng cũng chính là số bit mã hóa của cấu trúc. Như vậy, giả sử có N phần tử cộng hưởng thì số bit mã hóa theo phương pháp OOK là N và số dữ liệu mã hóa được là 2^N . Khi tăng số phần tử cộng hưởng trên cấu trúc sẽ tăng số bit mã hóa, tuy nhiên chưa xét đến ảnh hưởng của hở cảm làm sai lệch tần số, thì việc này làm tăng kích thước của thẻ tag nên khả năng mã hóa theo công thức (1) không tăng.



Hình 2: Mã hóa dữ liệu theo phương pháp FSC

Một phương pháp nâng cao khả năng mã hóa phổ biến được mô tả ở Hình 2, theo đó mỗi phần tử cộng hưởng có thể được điều chỉnh thông số thiết kế để có thể tạo ra nhiều tần số cộng hưởng khác nhau,

nhưng không được trùng với các tần số cộng hưởng của các phần tử khác, và khi đó với N phần tử cộng hưởng mà mỗi phần tử có thể cộng hưởng thêm M tần số dịch bên cạnh tần số cộng hưởng cơ bản thì số trường hợp tần số của cấu trúc thẻ tag, cũng là số dữ liệu mã hóa được không chỉ là 2^N mà là $(M + 2)^N$ trường hợp. Như vậy phương pháp này giúp cho số lượng dữ liệu mã hóa được tăng lên, và số bit tương đối được tính bằng $\log_2(M + 2)^N$. Phương pháp mã hóa này được gọi là FSC và đã áp dụng để thiết kế một số cấu trúc mã hóa được công bố trong các bài báo [20]-[28].

Nguyên tắc để xác định dữ liệu mã hóa của phương pháp FSC cũng giống với phương pháp OOK tức là hệ thống đọc cần phải biết trước các tần số có thể xảy ra cộng hưởng, chính là $N \times (M + 1)$ tần số F_i^j ở Hình 2, để đối chiếu với các tần số cộng hưởng cụ thể của một cấu trúc mã hóa, từ đó xác định dữ liệu mã hóa tần số tương ứng của cấu trúc thẻ tag mã hóa đó. Yêu cầu đặt ra đối với việc thiết kế cấu trúc mã hóa khi tích hợp các phần tử cộng hưởng đó là các tần số cộng hưởng riêng của mỗi phần tử không bị sai lệch do ảnh hưởng hở cảm từ các phần tử khác trên cấu trúc. Theo phương pháp FSC này, mỗi phần tử trên cấu trúc chỉ cộng hưởng tại một trong $M + 1$ tần số chứ không phải là toàn bộ $N \times (M + 1)$ xác định trước đó, do vậy tổng số trường hợp dữ liệu mã hóa tần số chưa phải là tối đa.

Để có số trường hợp mã hóa tần số lớn hơn phương pháp FSC, bài báo đề xuất một phương pháp mã hóa dữ liệu mới, với giả thiết các phần tử có thể cộng hưởng với mọi tần số F_i^j thuộc bộ tần số xác định trước. Trong đó, phương pháp này sử dụng các tần số cộng hưởng cơ bản để mã hóa giá trị bit 0, 1 giống với phương pháp OOK để thuận lợi cho việc gán nhãn dữ liệu cho các cấu trúc thẻ tag, đồng thời quy định $N \times M$ tần số còn lại là bộ tần số tham chiếu của cấu trúc mã hóa. Một cấu trúc mã hóa có thể cộng hưởng tại k tần số thuộc bộ tần số tham chiếu đã nêu với k thuộc khoảng giá trị từ 0 đến N . Các tần số cơ bản còn lại $(N - k)$ theo đúng thứ tự, sẽ được kiểm tra xem có xảy ra cộng hưởng hay không để quy định bit dữ liệu là 1 hoặc 0. Như vậy, áp dụng cho trường hợp N phần tử cộng hưởng đã nêu thì số bộ tần số tham chiếu có thể lựa chọn là tổng số tổ hợp từ 0 đến N của $N \times M$ tần số dịch. Một bộ tần số tham chiếu có thể kết hợp với các trường hợp cộng hưởng tại các tần số cộng hưởng cơ bản còn lại của các phần tử còn lại để tạo ra các bộ tần số cộng hưởng mã hóa. Từ các phân tích đó để đến công thức tính tổng số mã dữ liệu theo phương pháp mã hóa đề xuất này là:

$$\sum_{k=0}^N C_{N \times M}^k \times 2^{N-k} \quad (2)$$

Quá trình xác định dữ liệu của một cấu trúc thẻ tag mã hóa theo phương pháp này được thực hiện thông qua hai bước.

Bước 1: Xác định bộ tần số cộng hưởng tham chiếu mà cấu trúc sử dụng với giá trị các tần số và số tần số tham chiếu k cụ thể.

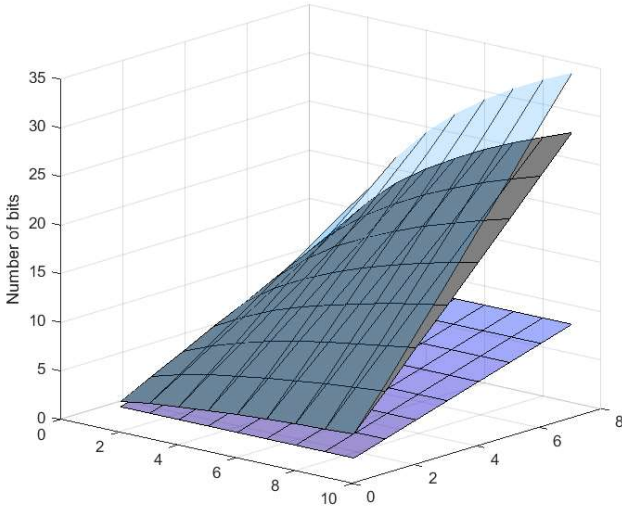
Bước 2: Xác định các tần số cộng hưởng cơ bản mà cấu trúc xây ra cộng hưởng, đối chiếu với $N - k$ tần số cộng hưởng cơ bản còn lại theo đúng thứ tự để quy định giá trị bit 1 hoặc 0.

Tham số		Số mã dữ liệu mã hóa		Số bit tương đối	
N	M	Mã hóa FCS	Mã hóa đề xuất	Mã hóa FSC	Mã hóa đề xuất
5	2	1,024	1,704	10.00	10.73
	3	3,125	8,665	11.61	13.08
6	4	46,656	283,548	15.51	18.11
	5	117,649	1,028,871	16.84	19.97
7	6	2,097,152	41,982,060	21.00	25.32
	7	4,782,969	123,526,440	22.19	26.88
8	8	100,000,000	6,041,100,000	26.58	32.49
	9	214,358,881	15,671,000,000	27.68	33.87

Bảng 1: Bảng so sánh hai phương pháp mã hóa dữ liệu

Để so sánh khả năng mã hóa giữa phương pháp đề xuất và phương pháp FSC, Bảng 1 thể hiện số lượng dữ liệu mã hóa với một số trường hợp của số phần tử cộng hưởng N và số tần số cộng hưởng dịch xung quanh tần số cộng hưởng cơ bản M . Ở trường hợp cặp giá trị (N, M) bé nhất là $(5, 2)$ thì độ chênh lệch về số dữ liệu mã hóa được không lớn nhưng khi tăng giá trị cặp thông số này lên thì độ chênh lệch giữa số dữ liệu mã hóa được giữa hai phương pháp tăng nhanh, cụ thể ở trường hợp (N, M) có giá trị là $(8, 9)$ thì số mã của phương pháp đề xuất lớn hơn 73 lần.

Bên cạnh số lượng dữ liệu mã hóa thì số bit tương đối được tính bằng logarit cơ số 2 của số mã dữ liệu cũng được thể hiện trong bảng, đây là tham số quan trọng để đánh giá khả năng mã hóa của một thiết kế cấu trúc thẻ tag theo công thức (1), do vậy cần được phân tích và đánh giá chi tiết.



Hình 3: Mặt phẳng giá trị số bit của các phương pháp mã hóa

Để thực hiện điều này, bề mặt giá trị số bit của các phương pháp mã hóa được biểu diễn ở Hình 3, trong đó, mặt phẳng thấp nhất là mặt phẳng số bit mã hóa theo phương pháp OOK truyền thống, chính bằng số phần tử cộng hưởng N . Bề mặt ở giữa là số bit mã hóa theo phương pháp FSC, nhận thấy bề mặt này cao hơn và có xu hướng mở rộng mạnh so với mặt phẳng của phương pháp mã hóa truyền thống khi tăng giá trị tham số N và M . Bề mặt cao nhất, và bao trùm các bề mặt còn lại với mọi điểm là bề mặt giá trị số bit của phương pháp đề xuất, thể hiện giá trị số bit lớn nhất hay khả năng mã hóa cao nhất. Phương pháp đề xuất vẫn sử dụng cùng một tập hợp các tần số cộng hưởng, cùng số phần tử cộng hưởng như phương pháp FSC nhưng đạt được hiệu quả mã hóa lớn nhất.

Áp dụng phương pháp mã hóa dữ liệu đề xuất cho một số bài báo sử dụng phương pháp mã hóa FSC thể hiện ở Bảng 2. Ta có số bit theo phương pháp mã hóa đề xuất lớn hơn kết quả số bit mà kết quả bài báo công bố.

Bài báo	Năm	Dải tần số (GHz)	Số phần tử	Số tần số cộng hưởng	Số bit	Số bit đề xuất
[20]	2012	3.1÷10.6	3	80	19	21.1
[21]	2019	4÷9	6	4	12	15.81
[22]	2019	4.2÷8.3	12	8	31.26	47.23
[23]	2020	6÷9	7	3	11.9	15.1
[24]	2017	2.78÷3.85	2	12	7.17	8.12
[25]	2016	17÷27	2	4	4	4.95
[26]	2015	3.1÷10.6	6	60	28.52	41.30
[27]	2019	1.7÷4.7	7	8	21	26.88
[28]	2022	2÷6	8	9	20.7	32.49

Bảng 2: Số bit mã hóa theo phương pháp đề xuất

Cũng theo nội dung của các bài báo này, một vấn đề lớn chưa được giải quyết đó là độ dịch tần số không bằng nhau giữa các tần số cộng

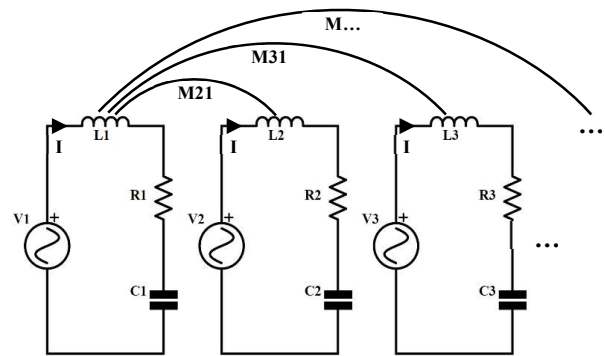
hưởng, nguyên nhân là do tác động của hiện tượng hở cảm giữa các phần tử cộng hưởng là khác nhau khi cấu trúc thay đổi số phần tử cộng hưởng hoặc phần tử thay đổi thông số thiết kế để thay đổi tần số cộng hưởng. Nếu độ dịch tần số do hở cảm gây ra này vượt quá giới hạn cho phép so với tần số cộng hưởng đặt ra ban đầu của mỗi phần tử, thì mã hóa dữ liệu không còn đảm bảo độ tin cậy. Do vậy để đảm bảo tính khả thi của phương pháp mã hóa FSC cũng như phương pháp mã hóa đề xuất thì cần phải xử lý được ảnh hưởng của hiện tượng hở cảm này để cố định chính xác các tần số xảy ra cộng hưởng dùng để mã hóa. Vấn đề này được giải quyết trong Chương 3.

3. Phương pháp thiết kế sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn

3.1. Ảnh hưởng của hiện tượng hở cảm đối với cấu trúc mã hóa tần số

Theo phân tích về các phương pháp mã hóa đã trình bày ở Chương 2, để tăng khả năng mã hóa cần phải tăng số phần tử cộng hưởng hoặc tăng số tần số cộng hưởng định trước để tăng số bit mã hóa. Tuy nhiên vấn đề gặp phải khi thực hiện việc này là khoảng cách vật lý giữa các phần tử cộng hưởng trên cấu trúc thẻ tag giảm xuống, bên cạnh đó là chênh lệch tần số cộng hưởng ΔF cũng bị thu hẹp, làm cho ảnh hưởng của hiện tượng hở cảm giữa các phần tử cộng hưởng càng lớn, dẫn đến làm sai lệch tần số cộng hưởng định trước và do vậy làm sai dữ liệu mã hóa.

Hiện tượng hở cảm giữa các phần tử cộng hưởng cạnh nhau trên cấu trúc được mô tả ở Hình 4, với mô hình hóa mỗi phần tử là một mạch dao động LRC [13] có nguồn áp sinh ra bởi cường độ điện trường bức xạ tới thẻ tag, và mỗi mạch cộng hưởng tại một tần số xác định thể hiện bởi độ lớn giá trị dòng điện thay trong mạch thay đổi theo tần số. Và do sự thay đổi dòng điện đi qua cuộn dây ở mỗi mạch, làm thay đổi lượng từ thông đi qua các cuộn dây bên cạnh và đây chính là hiện tượng hở cảm giữa các phần tử cộng hưởng. Khi N phần tử này đặt gần nhau thì cuộn dây trên mỗi phần tử sẽ chịu ảnh hưởng của hiện tượng hở cảm từ $N-1$ cuộn dây còn lại, làm cho điện cảm của cuộn dây trong mạch thay đổi, dẫn đến dòng điện trong mạch sẽ thay đổi theo đồng nghĩa với việc làm thay đổi tần số cộng hưởng của mạch.



Hình 4: Hiện tượng hở cảm lẫn nhau giữa các phần tử cộng hưởng

Giá trị hở cảm giữa hai cuộn dây cạnh nhau được tính theo công thức Neumann [15]

$$M_{ij} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \iint_{l_i, l_j} \frac{dl_i dl_j}{|r_{ij}|} \quad (3)$$

Trong đó:

- M_{ij} là hở cảm giữa cuộn dây thứ i và cuộn dây thứ j
- r_{ij} là khoảng cách giữa hai cuộn dây
- dl_i, dl_j là vi phân chiều dài cuộn dây

- μ_0 là hệ số từ thẩm của môi trường

Như vậy, từ yêu cầu mã hóa các dữ liệu khác nhau, cần phải xác định bộ tần số và các phần tử cộng hưởng tương ứng tham gia vào cấu trúc thẻ tag, sau đó xác định ảnh hưởng hồ cảm tác động lên một phần tử từ các phần tử cộng hưởng còn lại. Từ đây, việc tính toán tham số thiết kế của các phần tử cộng hưởng cần được thực hiện lại để có thể đạt được cộng hưởng tại các tần số cộng hưởng định trước tương ứng với dữ liệu cần mã hóa. Việc tính toán chính xác tổng hồ cảm cho mỗi phần tử là khó khăn không chỉ do sự phức tạp về lý thuyết trường điện từ mà còn khó có thể mô hình hóa chính xác môi trường mà cấu trúc thẻ tag làm việc, cũng như mạch điện tương đương của các phần tử cộng hưởng với các giá trị R, L, C chính xác. Thực tế là trên mặt phẳng dẫn của vật liệu nền cao tần, có nhiều dạng thiết kế phần tử cộng hưởng thụ động đã được đề xuất để áp dụng cho cấu trúc mã hóa RFID không chip như: Thiết kế khe cộng hưởng có dạng chữ I [4], chữ L [5], chữ U [14], thiết kế dạng đường tải hình tròn [6],... Nhưng chưa có đề xuất nào phân tích lý thuyết để tính toán chính xác thông số mô hình mạch tương đương của các dạng phần tử cộng hưởng đó, cũng như mô hình hồ cảm giữa chúng để từ đó tính toán ra thông số chính xác của phần tử nhằm loại bỏ hoàn toàn ảnh hưởng của hồ cảm. Hiện nay các nghiên cứu chủ yếu tiếp cận theo hướng khảo sát thay đổi hình dạng của các phần tử cộng hưởng, hoặc thêm các phần tử cách ly, triệt tiêu sóng điện từ giữa các phần tử, hoặc sử dụng các loại vật liệu nền đặc biệt để giảm sự ảnh hưởng hồ cảm này [16] [17].

Như vậy, hiện tượng hồ cảm giữa các phần tử cộng hưởng là một vấn đề không thể tránh khỏi khi mã hóa dữ liệu trong miền tần số có nhiều hơn một tần số cộng hưởng. Vấn đề này ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy của dữ liệu mã hóa và các thiết kế hiện nay chưa có phương án tính toán lý thuyết để xử lý triệt để. Do vậy để giải quyết vấn đề này cần phải có một hướng tiếp cận mới. Với nhận định là nếu khó khăn trong việc mô hình hóa lý thuyết chính xác cho mỗi loại thiết kế phần tử cộng hưởng và hồ cảm dưới dạng các phương trình điện từ thì sẽ khó để tìm được nghiệm chính xác theo phương pháp toán học thông thường, mà phải tìm kiếm nghiệm tối ưu dựa trên đánh giá kết quả đầu ra tương ứng với các trường hợp thay đổi của đầu vào. Tức là thay đổi thông số thiết kế của các phần tử sau đó đánh giá sự thay đổi của các tần số cộng hưởng do hồ cảm bằng một thuật toán tối ưu, từ đó đề xuất ra được thông số thiết kế phù hợp của cấu trúc. Đây chính là việc giải bài toán tối ưu bằng phương pháp dựa trên kinh nghiệm mà đã được nghiên cứu tổng quát hóa thành các phương pháp nổi tiếng như: Thuật toán di truyền (GA), tối ưu đàn kiến (ACO), tối ưu bầy đàn (PSO) [18],... Dựa trên những đánh giá về khả năng tối ưu toàn cục, mức độ phức tạp cũng như thời gian thực thi tối ưu của từng phương pháp, bài báo đề xuất sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn để tìm kiếm thông số thiết kế mới cho các phần tử cộng hưởng, phù hợp với ảnh hưởng của hiện tượng hồ cảm để thiết kế mới đó có xảy ra cộng hưởng tại các tần số định trước trong giới hạn sai số cho phép, thỏa mãn điều kiện của dữ liệu mã hóa đặt ra.

3.2. Áp dụng thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) để thiết kế

Ý tưởng của thuật toán tối ưu PSO đó là tạo ra tập hợp các phần tử ngẫu nhiên (“bầy đàn”) sau đó tạo ra tập hợp phần tử mới dựa trên phần tử tối ưu nhất hiện tại của phần tử đó và của cả “bầy đàn” theo một tiêu chí đặt ra ban đầu và lặp lại quá trình này cho đến khi tìm được một tập hợp phần tử thuộc giới hạn tối ưu mong muốn. Phương pháp này không yêu cầu mô tả toán học chính xác đối tượng cần tối ưu, nhưng vẫn có khả năng tìm kiếm được kết quả trong một vùng khả dụng của đối tượng, do vậy nó phù hợp với việc tìm kiếm thông số thiết kế tối ưu cho các phần tử cộng hưởng khi có ảnh hưởng của các hồ cảm xung quanh để đạt được tần số cộng hưởng mong muốn. Mỗi một phần tử thứ i ở lần tạo thứ k của “bầy đàn” được đặc trưng bởi hai thông số là vị trí x_i^k và vận tốc v_i^k . Trong đó x_i^k là bộ tham số thiết kế tối ưu cần tìm kiếm, v_i^k là đại lượng phụ thuộc vào vị trí

hiện tại, vị trí tốt nhất của phần tử thứ i và phần tử tốt nhất trong “bầy đàn” được cập nhật theo công thức 4a và v_i^k được sử dụng để cập nhật vị trí cho phần tử tiếp theo với công thức 4b

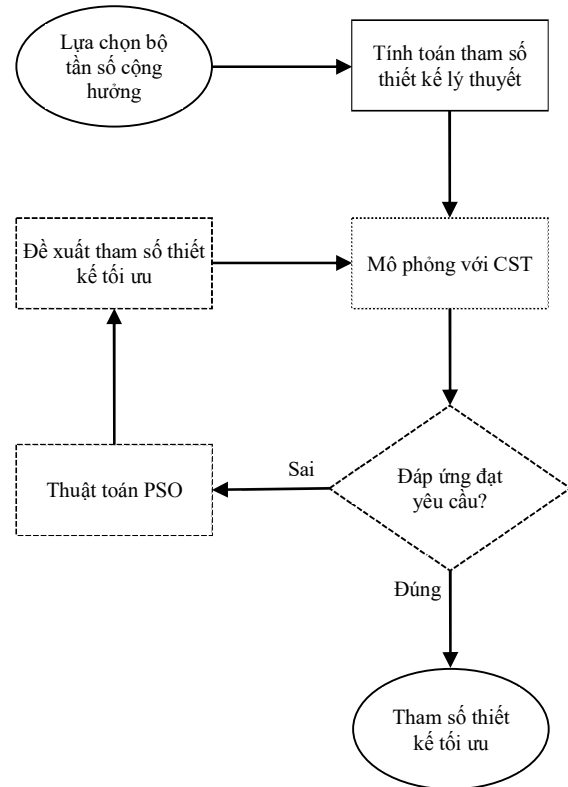
$$v_i^{k+1} = \omega \times v_i^k + c_1 \times r_1 \times (P_{best} - x_i^k) + c_2 \times r_2 \times (G_{best} - x_i^k) \quad (4a)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (4b)$$

Trong đó:

- x_i^{k+1} là vị trí của phần tử thứ i lần tạo thứ $k + 1$
- v_i^{k+1} là vận tốc cá thể thứ i lần tạo thứ $k + 1$
- P_{best} là vị trí tốt nhất của phần tử thứ i
- G_{best} là vị trí tốt nhất trong bầy đàn
- ω là hệ số quán tính
- c_1, c_2 là các hệ số gia tốc, nhận giá trị từ 1.5 đến 2.5
- r_1, r_2 Là các số ngẫu nhiên nhận giá trị trong khoảng [0,1]

Thuật toán PSO được triển khai lập trình bằng phần mềm Matlab, và phần mềm CST Studio Suite được sử dụng để mô phỏng cấu trúc. Lưu đồ thực hiện phương pháp thiết kế này được đề xuất ở Hình 5



Hình 5: Lưu đồ phương pháp thiết kế sử dụng thuật toán PSO

Theo lưu đồ, bước đầu tiên là lựa chọn bộ tần số cộng hưởng định trước tương ứng với dữ liệu cần mã hóa, sau đó tính toán tham số thiết kế lý thuyết cho dạng phần tử cộng hưởng cụ thể được lựa chọn, tiếp theo là quá trình tìm kiếm tham số thiết kế tối ưu thông qua ba bước lặp cơ bản là: Mô phỏng - Đánh giá - Đề xuất. Trong đó thuật toán PSO gọi tự động phần mềm CST để mô phỏng, trả về kết quả để đánh giá sau đó đề xuất tham số thiết kế cho vòng lặp tiếp theo.

Điều kiện để kết thúc quá trình tìm kiếm tham số thiết kế tối ưu đó là đạt được điều kiện về giá trị của hàm mục tiêu mong muốn. Việc đề xuất được một hàm mục tiêu phù hợp, đảm bảo được kết quả sau khi tối ưu thỏa mãn được yêu cầu đặt ra là rất quan trọng. Trong bài toán tối ưu này giá trị hàm mục tiêu phải thể hiện được độ sai lệch của các tần số cộng hưởng so với bộ tần số được lựa chọn ban đầu.

Ngoài ra để rút ngắn thời gian hội tụ, hàm mục tiêu cần phải có bậc lớn và có các trọng số thể hiện được mức độ ảnh hưởng của hiện tượng hở cảm tại từng tần số cộng hưởng, chính là các độ sai lệch ban đầu so với bộ tần số cộng hưởng lựa chọn của cấu trúc chưa tối ưu. Từ các phân tích đó, biểu thức hàm mục tiêu tổng quát với giá trị mong muốn càng nhỏ càng tốt, được đề xuất như sau:

$$f_o = \sum_{i=1}^N |\delta_i| \times (f_i - F_i)^4 \quad (5)$$

Trong đó:

- N là số tần số cộng hưởng lựa chọn,
- F_i là các tần số cộng hưởng lựa chọn,
- δ_i là độ lệch ban đầu của tần số cộng hưởng thứ i ,
- f_i là tần số cộng hưởng thứ i của cấu trúc.

4. Thiết kế và mô phỏng

Với phương pháp tìm kiếm thông số thiết kế tối ưu, loại bỏ ảnh hưởng của hiện tượng hở cảm bằng cách áp dụng thuật toán tối ưu PSO đề xuất, có thể lựa chọn phần tử cộng hưởng đơn giản để hạn chế số biến thiết kế cần tối ưu, đồng thời tăng khả năng tích hợp số phần tử trên một cấu trúc mã hóa. Từ phân tích đó nhóm tác giả lựa chọn thiết kế một cấu trúc thẻ tag sử dụng phần tử cộng hưởng đơn giản, có dạng khe chữ I được khắc trên bề mặt vật liệu dẫn. Việc lựa chọn số lượng phần tử cộng hưởng cần đủ lớn để không làm mất đi tính tổng quát của phương pháp thiết kế, đồng thời đủ nhỏ để thời gian cho ra kết quả tối ưu nhanh, do vậy lựa chọn 5 phần tử cho thiết kế này. Dải tần số hoạt động được chọn trong khoảng từ 6GHz đến 8GHz thuộc trung tâm của dải tần UWB với lần lượt các tần số cộng hưởng cơ bản là: [6.3, 6.6, 6.9, 7.2, 7.5] GHz. Lý do lựa chọn độ chênh lệch giữa hai tần số cộng hưởng cơ bản là 0.3GHz vì đây là bước tần số đủ nhỏ để không làm chênh lệch bước sóng lớn dẫn đến kích thước thẻ tag tăng không phù hợp với ứng dụng thực tế, đồng thời đủ lớn cho việc mở rộng các tần số cộng hưởng xung quanh. Độ chênh lệch giữa hai tần số cộng hưởng liên tiếp ΔF được chọn là 0.1GHz, cho phép tồn tại hai tần số cộng hưởng dịch xung quanh tần số cộng hưởng cơ bản. Bộ tham số mã hóa (N, M) theo Bảng 1 của thiết kế này là (5,2), và bộ tần số cộng hưởng xác định trước là 15 tần số gồm:

[6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 7.0, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6] GHz.

Vấn đề cần giải quyết là thiết kế được các cấu trúc cộng hưởng tại các tần số cơ bản, và tần số dịch định trước với sai số cho phép là $\pm \Delta F/2 = \pm 0.05$ GHz.

Thông số chiều dài của một phần tử cộng hưởng dạng khe chữ I có tần số cộng hưởng là F_r được tính gần đúng từ các công thức sau: [19]

$$L_r = \frac{c \times B}{2 \times F_r} \times \left[\frac{A}{B} - \ln \left(\frac{F_r \times h}{c} \right) \right] \quad (6)$$

$$A = 1.045 - 0.365 \times \ln \varepsilon_r + \frac{6.3 \times d/h \times \varepsilon_r^{0.945}}{238.64 + 100 \times d/h} \quad (6a)$$

$$B = 0.148 - \frac{8.81 \times (\varepsilon_r + 0.95)}{100 \times \varepsilon_r} \quad (6b)$$

Trong đó:

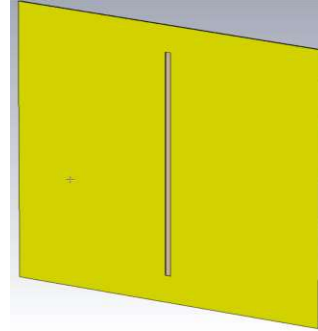
- c là số vận tốc ánh sáng trong không khí,
- λ là bước sóng của tần số cộng hưởng,
- L_r là chiều dài của phần tử cộng hưởng,
- d là chiều dài của phần tử cộng hưởng,
- h là độ dày của vật liệu nền.

Điều kiện áp dụng công thức là:

$$2.2 \leq \varepsilon_r \leq 3.8, \quad 0.006 \leq h/\lambda \leq 0.06, \quad 0.0015 \leq d/\lambda \leq 0.075 \quad (7)$$

Để thỏa mã điều kiện (7), vật liệu nền cho thẻ tag được chọn là Polyimide, có hằng số điện môi $\varepsilon_r = 3.5$, hệ số tổn hao $\tan \delta = 0.0027$, chiều rộng slot $d = 0.5$ mm, chiều dày $h = 0.1$ mm và độ dày lớp đồng theo chuẩn phổ biến là 0.089 mm. Vật liệu này còn có một số ưu điểm như: giá rẻ, phổ biến, có tính dẻo và bền với nhiệt độ. Với dải tần số làm việc từ 6GHz đến 8GHz, có bước sóng $\lambda = c/f < 50$ mm cho phép lựa chọn kích thước của cấu trúc thẻ tag là 30×30 mm² để thỏa mãn mỗi chiều lớn hơn một nửa bước sóng, đồng thời diện tích cần nhỏ để giúp nâng cao khả năng mã hóa theo công thức (1).

Cấu trúc cộng hưởng với một phần tử cộng hưởng được thiết kế và mô phỏng bằng phần mềm CST như Hình 6.



Hình 6: Cấu trúc thẻ tag với bộ cộng hưởng khe dạng chữ I

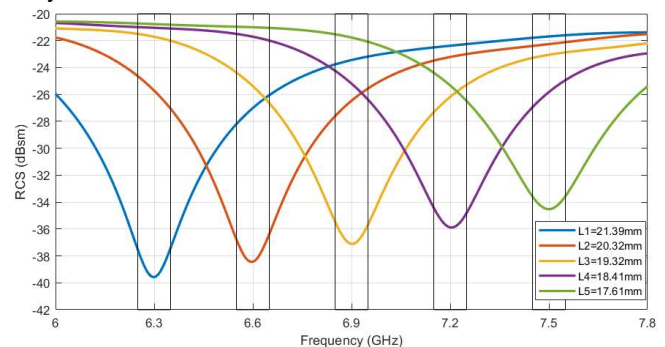
Thiết kế này ứng với cấu trúc mã hóa dữ liệu cộng hưởng tại một tần số xác định. Thông tin mã hóa trong trường hợp này được xác định như sau: Nếu tần số cộng hưởng là một tần số cơ bản thì số tần số tham chiếu k bằng 0 và dữ liệu bit trong trường hợp này bao gồm một bit 1 và bốn bit 0, vị trí của bit 1 phụ thuộc cấu trúc mã hóa xảy ra cộng hưởng tại tần số cộng hưởng cơ bản nào. Còn nếu tần số cộng hưởng là một tần số tham chiếu thì số bit dữ liệu là bốn bit 0, và căn cứ vào giá trị cụ thể của tần số tham chiếu xảy ra cộng hưởng để mã hóa dữ liệu.

Bằng tính toán lý thuyết, mô phỏng và hiệu chỉnh thông số chiều dài cho phần tử cộng hưởng của năm cấu trúc thẻ tag chỉ có một phần tử để đạt được năm tần số cộng hưởng cơ bản tương ứng, ta có bảng thông số chiều dài được thể hiện Bảng 3.

Các tần số cộng hưởng (GHz)	6.3	6.6	6.9	7.2	7.5
Chiều dài phần tử cộng hưởng (mm)	21.39	20.32	19.32	18.41	17.61

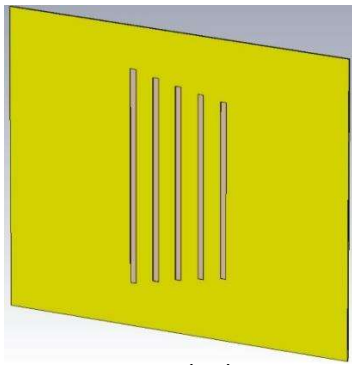
Bảng 3: Bảng thông số chiều dài của các phần tử cộng hưởng dạng chữ I

Đáp ứng tần số của năm cấu trúc cộng hưởng được thể hiện trên cùng một đồ thị ở Hình 7. Có thể thấy tần số cộng hưởng tương ứng của mỗi cấu trúc đã đúng với tần số cơ bản trong giới hạn sai số cho phép là ± 0.05 GHz, như vậy năm cấu trúc thẻ tag này đã thỏa mãn mã hóa dữ liệu theo tần số đặt ra. Lưu ý với trường hợp mã hóa một tần số này thì chỉ có một phần tử cộng hưởng do vậy không có ảnh hưởng của yếu tố hở cảm.



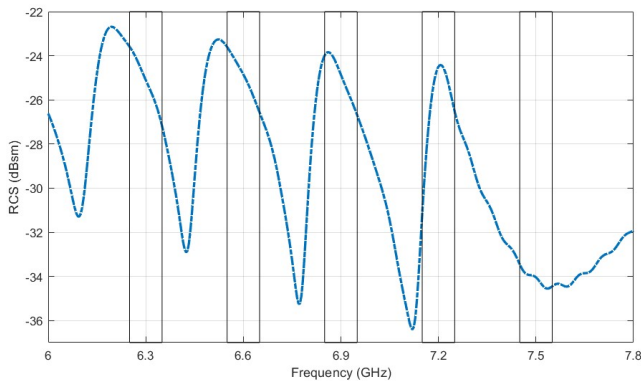
Hình 7: Đáp ứng tần số của năm cấu trúc cộng hưởng

Trường hợp mã hóa dữ liệu tiếp theo là thiết kế một cấu trúc mã hóa cộng hưởng tại năm tần số cơ bản, do vậy năm phần tử cộng hưởng với thông số thiết kế ở Bảng 2 được tích hợp vào cấu trúc thẻ tag. Với trường hợp này, dữ liệu mã hóa bit tương ứng năm bit 1 và không có tần số tham chiếu. Do cấu trúc có năm phần tử cộng hưởng nên sẽ có ảnh hưởng của hiện tượng hồ cảm tác động lên một phần tử từ bốn phần tử còn lại, và vì vậy khoảng cách giữa hai phần tử liên tiếp được chọn cần phải đủ xa để giảm thiểu ảnh hưởng của hiện tượng hồ cảm nhưng cũng phải đủ nhỏ để năm phần tử không chiếm quá nhiều diện tích của cấu trúc thẻ tag để phục vụ cho việc mở rộng số phần tử trong tương lai. Từ phân tích này, khoảng cách 2.0mm được lựa chọn để có độ lớn gấp bốn lần chiều rộng của một phần tử (xem Hình 8)



Hình 8: Cấu trúc cộng hưởng tại năm tần số cộng hưởng cơ bản

Kết quả đáp ứng tần số của cấu trúc thẻ hiện ở Hình 9. Có thể nhận thấy các phần tử cộng hưởng có tần số thấp chịu ảnh hưởng của hiện tượng hồ cảm lớn hơn, và bốn tần số cộng hưởng đầu xảy ra không thuộc giới hạn sai số cho phép, điều này làm cho mã hóa dữ liệu theo các tần số cơ bản không còn đúng nữa. Như vậy với cùng một thông số thiết kế phần tử cộng hưởng, đáp ứng tần số cộng hưởng đối với cấu trúc có một phần tử và cấu trúc có năm phần tử là khác nhau. Đây chính là kết quả của hiện tượng hồ cảm giữa các phần tử cộng hưởng trên cấu trúc gây ra.

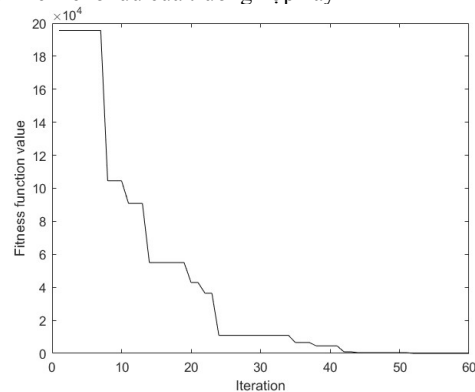


Hình 9: Đáp ứng tần số của cấu trúc năm phần tử cộng hưởng

Trong trường hợp này, để đạt được các tần số cộng hưởng mong muốn, thiết kế tối ưu đề xuất theo lưu đồ ở Hình 5 được sử dụng để xác định lại thông số thiết kế của các phần tử cộng hưởng, cụ thể là chiều dài và khoảng cách giữa các phần tử vì chiều dài tác động trực tiếp đến tần số cộng hưởng theo công thức (6) và khoảng cách thay đổi ảnh hưởng của hiện tượng hồ cảm. Các nghiệm tối ưu cần tìm kiếm đối với trường hợp này là năm độ sai lệch chiều dài của năm phần tử cộng hưởng so chiều dài ban đầu được thiết kế theo Bảng 2, và bốn độ sai lệch khoảng cách so với khoảng cách lựa chọn ban đầu là 2.0mm. Khoảng thay đổi của nghiệm sai lệch chiều dài được xác định bằng độ chênh lệch chiều dài ban đầu của phần tử thứ nhất và phần tử thứ năm, khoảng thay đổi của nghiệm sai lệch khoảng cách là [-1.0, 2.0] để đảm bảo các phần tử không bị chồng lấn lên nhau trên cấu trúc thẻ tag. Hàm mục tiêu lựa chọn theo hàm mục tiêu tổng quát đề xuất ở biểu thức (5), ngoài ra quá trình tối ưu cần đánh giá

thêm độ chênh lệch biên độ giữa hai điểm cực trị liên tiếp, vì chênh lệch này càng lớn thì hệ thống đọc càng dễ phân biệt tần số cộng hưởng để xác định dữ liệu được mã hóa.

Thời gian hội tụ của thuật toán tối ưu bầy đàn ngoài phụ thuộc vào tính đúng đắn của hàm mục tiêu còn phụ thuộc vào chất lượng của các phần tử khởi tạo trong “bầy đàn”. Chất lượng của phần tử ở đây được hiểu là sai lệch so với giá trị tối ưu toàn cục, và theo nguyên lý mà thuật toán tối ưu bầy đàn PSO đề xuất thì sai lệch này là ngẫu nhiên, do các phần tử khởi tạo là ngẫu nhiên trong khoảng giới hạn thay đổi của tham số. Như vậy, nếu áp dụng đúng với nguyên lý này thì sẽ cần số phần tử khởi tạo và số vòng lặp lớn mới tìm ra được kết quả. Tuy nhiên, trong bài toán tối ưu thiết kế này, chất lượng của các phần tử khởi tạo có thể được nâng cao bằng cách sử dụng các phần tử chính là các bộ thông số thiết kế theo lý thuyết và các bộ thông số đã được tối ưu cho từng phần tử ở Bảng 3. Do vậy chỉ cần bộ 40 phần tử khởi tạo của “bầy đàn” và sau 60 lần lặp độ hội tụ của giá trị hàm mục tiêu tiến về giá trị nhỏ nhất như Hình 10. Nhận thấy giá trị hàm mục tiêu thay đổi rất ít ở khoảng 20 vòng lặp cuối, thể hiện trạng thái tối ưu đã tiến đến giá trị tối ưu nhất, đồng nghĩa với việc đạt được thông số thiết kế tối ưu của trường hợp này.



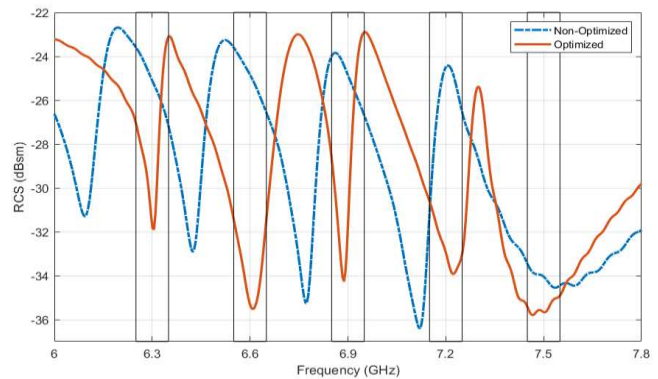
Hình 10: Trạng thái hội tụ của giá trị hàm mục tiêu

Thông số thiết kế tối ưu tương ứng bao gồm chiều dài, khoảng cách giữa các phần tử cộng hưởng và độ sai lệch điều chỉnh so với thông số thiết kế ban đầu được thể hiện ở Bảng 4

Bộ tần số cộng hưởng (GHz)	6.3	6.6	6.9	7.2	7.5
Chiều dài phần tử cộng hưởng (mm)	20.55	19.80	17.43	18.72	18.04
Khoảng cách giữa các phần tử (mm)	1.13	1.00	1.04	1.25	
Sai lệch chiều dài điều chỉnh (mm)	-0.84	-0.52	-1.89	+0.31	+0.43
Sai lệch khoảng cách điều chỉnh (mm)	-0.87	-1	-0.96	-0.75	

Bảng 4: Bảng thông số thiết kế tối ưu của cấu trúc cộng hưởng

Đáp ứng tần số cấu trúc đã tối ưu (nét liền) so với cấu trúc ban đầu (nét đứt) được thể hiện ở Hình 11. Dễ thấy các tần số cộng hưởng của cấu trúc tối ưu đã thuộc giới hạn cộng hưởng $\pm 0.05\text{GHz}$ xung quanh tần số cộng hưởng cơ bản đặt ra, loại bỏ được ảnh hưởng của hiện tượng hồ cảm làm sai lệch tần số cộng hưởng, và vì vậy kết quả này đã khẳng định tính đúng đắn của phương pháp thiết kế đề xuất.



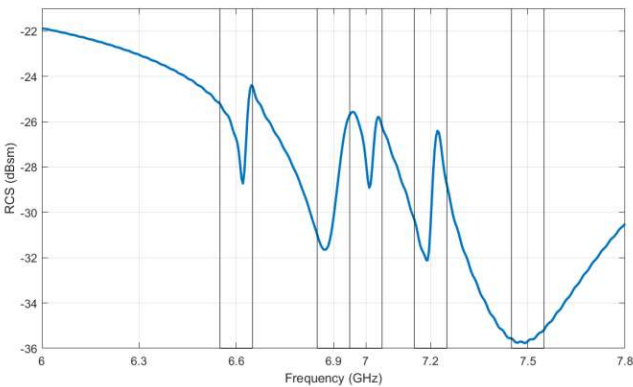
Hình 11: Đáp ứng tần số của cấu trúc tối ưu theo các tần số cơ bản

Để thực hiện hết các trường hợp của phương pháp mã hóa tần số bằng các bộ tần số cộng hưởng tham chiếu đề xuất, cần thiết kế thêm trường hợp cấu trúc mã hóa dữ liệu sử dụng các tần số cộng hưởng dịch xung quanh tần số cộng hưởng cơ bản. Bộ tần số được chọn để mã hóa trong trường hợp này là [6.6, 6.9, 7.0, 7.2, 7.5] GHz, trong đó cấu trúc sẽ cộng hưởng tại một tần số dịch là 7.0GHz được sử dụng làm tần số tham chiếu, và bốn tần số cơ bản còn lại theo thứ tự là [6.6, 6.9, 7.2, 7.5] GHz để mã hóa bốn bit 1. Cấu trúc mã hóa này yêu cầu cộng hưởng chính xác tại tất cả năm tần số trên nhằm tăng độ khó của việc xử lý ảnh hưởng của hiện tượng hở cảm giữa năm phần tử. Áp dụng phương pháp tìm kiếm thông số thiết kế tối ưu theo lưu đồ đề xuất, thu được kết quả tham số thiết kế cho cấu trúc mã hóa dữ liệu cần tìm thể hiện ở Bảng 5.

Bộ tần số cộng hưởng (GHz)	6.6	6.9	7.0	7.2	7.5
Chiều dài phần tử cộng hưởng (mm)	18.97	19.31	17.67	18.01	18.14
Khoảng cách giữa các phần tử (mm)	1.00	1.02	1.00	1.01	

Bảng 5: Bảng thông số thiết kế tối ưu cho tần số dịch 7.0GHz

Hình 12 thể hiện đáp ứng tần số của cấu trúc thẻ tag mã hóa với các tần số lựa chọn, được thiết kế tối ưu bằng phương pháp đề xuất. Ta thấy các tần số cộng hưởng đúng với các bộ tần số đặt ra trong giới hạn sai số cho phép, khẳng định phương pháp thiết kế đề xuất có thể tạo ra các cấu trúc thẻ tag đạt được cộng hưởng tại các tần số mong muốn, đáp ứng được hoàn toàn phương pháp mã hóa để dữ liệu bằng các bộ tần số cộng hưởng tham chiếu.



Hình 12: Đáp ứng tần số của cấu trúc tối ưu có tần số tham chiếu 7.0GHz

5. Kết luận

Từ các kết quả đạt được đã chứng minh phương pháp thiết kế thẻ tag RFID không chip mã hóa dữ liệu bằng các tần số cộng hưởng sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn mà bài báo đề xuất có thể đạt được cộng hưởng ở các bộ tần số mong muốn định trước trong một giới hạn sai số cho phép. Phương pháp thiết kế này đã giải quyết được triệt để ảnh hưởng của hiện tượng hở cảm giữa các phần tử cộng hưởng, thỏa mãn điều kiện áp dụng phương pháp mã hóa dữ liệu bằng các bộ tần số cộng hưởng tham chiếu, cho phép mã hóa với số dữ liệu lớn hơn nhiều so với phương pháp mã hóa FSC thông thường. Bên cạnh đó, phương pháp này không yêu cầu tăng số phần tử cộng hưởng để tăng số dữ liệu mã hóa, do vậy không làm tăng độ phức tạp cũng như kích thước của cấu trúc thẻ tag, giúp dễ dàng cho việc chế tạo.

Ưu điểm quan trọng nữa mà kết quả bài báo mang lại là có thể áp dụng các phương pháp đề xuất để áp dụng thiết kế và mã hóa dữ liệu cho nhiều dạng phần tử cộng hưởng mà không phụ thuộc vào vấn đề có mô hình hóa được phần tử cộng hưởng đó bằng biểu thức toán học hay không. Ngoài ra phương pháp thiết kế đề xuất cho phép sử dụng vật liệu nền rẻ tiền như: polyimide, plastic, giấy, ... để chế tạo cấu trúc thẻ tag mà vẫn đạt được đáp ứng tần số mã hóa mong muốn, vì vậy việc hiện thực hóa việc thay thế mã vạch barcode bằng mã RFID không chip in được là hoàn toàn khả thi trong tương lai gần.

Tài liệu tham khảo

- [1] Sharma, Mohammad Hashmi, "Advances in the Design Techniques and Applications of Chipless RFIDs," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 79264–79277, May 2021.
- [2] M. Pöpperl, A. Parr, C. Mandel, R. Jakoby, and M. Vossiek, "Potential and practical limits of time-domain reflectometry chipless RFID," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, no. 9, pp. 2968–2976, Sep. 2016.
- [3] C. Herrojo, J. Mata-Contreras, F. Paredes, A. Nunez, E. Ramon, and F. Martin, "Near-field chipless-RFID system with erasable/programmable 40-bit tags inkjet printed on paper substrates," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 28, no. 3, pp. 272–274, Mar. 2018.
- [4] M. A. Islam and N. C. Karmakar, "Real-world implementation challenges of a novel dual-polarized compact printable chipless RFID tag," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 63, no. 12, pp. 4581–4591, Dec. 2015.
- [5] V. Sharma, S. Malhotra, and M. Hashmi, "Slot resonator based novel orientation independent chipless RFID tag configurations," *IEEE Sensors J.*, vol. 19, no. 13, pp. 5153–5160, Jul. 2019.
- [6] C. Herrojo, J. Mata-Contreras, A. Nunez, F. Paredes, E. Ramon, and F. Martin, "Near-field chipless-RFID system with high data capacity for security and authentication applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 65, no. 12, pp. 5298–5308, Dec. 2017.
- [7] L. M. Arjomandi, G. Khadka, Z. Xiong, and N. C. Karmakar, "Document verification: A cloud-based computing pattern recognition approach to chipless RFID," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78007–78015, 2018.
- [8] M. Svanda, M. Polivka, J. Havlicek, J. Machac, and D. H. Werner, "Platform tolerant, high encoding capacity dipole array-plate chip-less RFID tags," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 138707–138720, 2019.
- [9] Wazie M. Abdulkawi, Abdel-Fattah A. Sheta, "K-State Resonators for High-Coding-Capacity Chipless RFID Applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 185868–185878, Dec. 2019.
- [10] W. M. Abdulkawi, A.-F. A. Sheta, K. Issa, and S. A. Alshebeili, "Compact printable inverted-M shaped chipless RFID tag using dual-polarized excitation," *Electronics*, vol. 8, no. 5, p. 580, 2019, doi: 10.3390/electronics8050580.
- [11] A. Vena, E. Perret, and S. Tedjini, "Chipless RFID Based on RF Encoding Particle," *New York, NY, USA: Elsevier*, 2016.
- [12] M. P. Jayakrishnan, Arnaud Vena, Brice Sorli, Etienne Perret "Solid-State Conductive-Bridging Reconfigurable RF-Encoding Particle for Chipless RFID Applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* vol. 28, 2018
- [13] J. Machac, A. Boussada, M. Svanda, J. Havlicek, and M. Polivka, "Influence of Mutual Coupling on Stability of RCS Response in Chipless RFID," *Technologies*, vol. 6, no. 3, p. 67, 2018
- [14] M. Polivka, J. Havlicek, M. Svanda, and J. Machac, "Improvement in robustness and recognizability of RCS response of U-shaped strip-based chipless RFID tags," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 2000–2003, 2016.
- [15] Jackson, J.D. "Classical Electrodynamics, 3rd ed"; *John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA*, 1999.
- [16] Jan Machac, Amine Boussada, Milan Svanda, Jaroslav Havlicek and Milan Polivka, "Influence of Mutual Coupling on Stability of RCS Response in Chipless RFID," *Technologies*, 2018, 6(3), 67;
- [17] Machac, J.; Polivka, M.; Svanda, M.; Havlicek, J. "Reducing Mutual Coupling in Chipless RFID Tags Composed of U-Folded Dipole Scatterers." *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2016, 58, 2723–2725.
- [18] J. Kennedy, and R.C. Eberhart. "Particle swarm optimization." *In Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, pages 1942–1948, Nov. 1995.
- [19] T. Dissanayake and K. P. Esselle, "Prediction of the notch frequency of slot loaded printed UWB antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 11, pp. 3320–3325, Nov. 2007.
- [20] Arnaud Vena, Etienne Perret, Smail Tedjini "High-Capacity Chipless RFID Tag Insensitive to the Polarization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, Issue: 10, October 2012

- [21] Wazie M. Abdulkawi and Abdel-Fattah A. Sheta "Four-State Coupled-Line Resonator for Chipless RFID Tags Application," *Electronics*, May 2019
- [22] Wazie M. Abdulkawi, Abdel-Fattah A. Sheta "K-State Resonators for High-Coding-Capacity Chipless RFID Applications." *IEEE Access* Vol. 7, December 2019
- [23] Wazie M. Abdulkawi, Abdel-Fattah A. Sheta "Chipless RFID Sensors Based on Multistate Coupled Line Resonators," *Sensors and Actuators A: Physical* Volume 309, 1 July 2020
- [24] M. Sumi, A. Pradeep, B. Paul, S. Mridula, "High Security Chipless RFID Tags Using Frequency Shift Coding Technique," *Computer Science Radioengineering* September 2017
- [25] O. Necibi, S. Naoui, A. Gharsallah "Design of a Chipless RFID TAG based on the frequency shift technique for K band," *International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing*, March 2016
- [26] Munawar M. Khan, Farooq A. Tahir, M. F. Farooqui, Atif Shamim, Hammad M. Cheema "3.56 bits/cm² Compact Inkjet Printed and Application Specific Chipless RFID Tag," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, October 2015
- [27] Yen-Sheng Chen, Tong-Yang Jiang, Fei-Peng Lai "Automatic Topology Generation of 21-Bit Chipless Radiofrequency Identification Tags Using a Non-Iterative Technique," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 18, Issue: 2, February 2019
- [28] Jia-Wen Hsu, Fei-Peng Lai; Yen-Sheng Chen "System Development of Calibration-Free 20.7-Bit Chipless RFID Without Iterative Optimization of Tag Configurations," *IEEE Access*, September 2022