

Thiết kế anten chấn tử ở tần số 5 GHz

Đỗ Hải Sơn
Lý thuyết và Kỹ thuật Anten

Oct 19, 2021

Tóm tắt nội dung

Ngày nay, anten chấn tử vẫn được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng về truyền thông không dây do tính đơn giản và hiệu quả mà nó mang lại. Trong báo cáo này, tôi sẽ trình bày các lý thuyết, hiểu biết chung về anten chấn tử ở hai chiều dài khác nhau là Hertzian và nửa bước sóng. Tiếp theo, tôi sẽ trình bày phương pháp thiết kế hai loại chấn tử này và thực nghiệm kết quả trên phần mềm CST. Phần cuối của báo cáo sẽ là kết luận, so sánh và thảo luận về kết quả thu được.

1 Giới thiệu

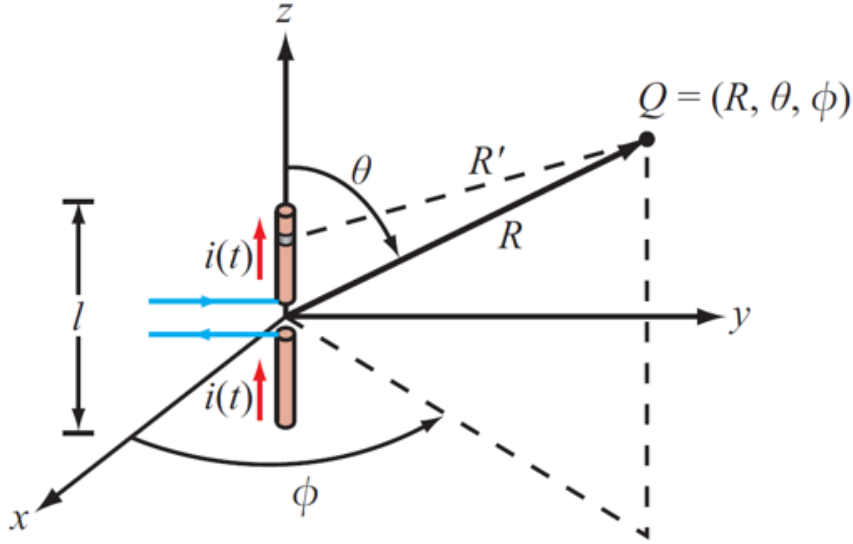
Anten là một linh kiện điện tử có thể bức xạ hoặc thu nhận sóng điện từ. Nó đóng vai trò quan trọng trong tất cả các hệ truyền thông không dây ngày nay. Có nhiều loại anten: anten lưỡng cực, anten mảng, anten đẳng hướng, anten định hướng, ... Trong số đó, anten chấn tử là loại anten đơn giản nhất được làm từ dây song song đối xứng. Chúng ta có thể phân loại anten chấn tử theo độ dài của chấn tử (l) tính theo bước sóng (λ) như sau:

- Chấn tử Hertzian ($l < \lambda/50$)
- Chấn tử kích thước nhỏ ($\lambda/50 < l < \lambda/10$)
- Chấn tử chiều dài nửa bước sóng ($l = \lambda/2$)
- Chấn tử không đối xứng ($l = \lambda/4$)
- Các loại chấn tử có kích thước khác.

Trong báo cáo này, tôi sẽ xem xét hai loại anten chấn tử là chấn tử Hertzian và chấn tử nửa bước sóng.

1.1 Chấn tử Hertzian

Chấn tử Hertzian là một dây dẫn thẳng, mảnh có chiều dài rất ngắn so với bước sóng ($l < \lambda/50$), khi đó dòng điện phân bố trên anten được coi là đồng đều. Hình 1 trình bày một mô hình anten chấn tử Hertzian trong hệ tọa độ trục.



Hình 1: Mô hình anten chấn tử Hertzian

Dòng điện trên chấn tử sẽ có dạng sau:

$$i(t) = I_0 \cos \omega t = \Re [I_0 e^{j\omega t}] \quad (1)$$

thành phần biên độ của dòng điện được gọi là phasor:

$$\tilde{I} = I_0 \quad (2)$$

Để xem xét tính chất của một anten, ta quan tâm đến giản đồ bức xạ của anten đó. Vậy để phân tích điện từ trường tại một điểm $Q(R, \theta, \phi)$ của anten chấn tử Hertzian, ta chia chấn tử thành các đoạn rất nhỏ dz . Ta có mật độ dòng trên đoạn dz là:

$$\tilde{J} = \hat{z} \frac{I_0}{s} \quad (3)$$

và thể tích của đoạn dz sẽ là:

$$dV' = s dz \quad (4)$$

Từ đó, “Magnetic Vector Potential” tại một điểm $Q(R, \theta, \phi)$ gây ra bởi dz là:

$$\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{R}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\nu'} \frac{\tilde{\mathbf{J}} e^{-jkR'}}{R'} d\nu' \quad (5)$$

lấy tích phân trên toàn chấn tử và sử dụng giả thiết $R' \simeq R$, ta sẽ thu được:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{R}) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} \int_{-l/2}^{l/2} \hat{z} \frac{I_0}{s} s dz \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} \int_{-l/2}^{l/2} \hat{z} I_0 dz \\ &= \hat{z} \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 l \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

chuyển đổi \hat{z} sang hệ tọa độ cầu:

$$\hat{z} = \hat{\mathbf{R}} \cos \theta - \hat{\theta} \sin \theta \quad (7)$$

thay (7) vào (6), ta thu được:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{A}} &= (\hat{\mathbf{R}} \cos \theta - \hat{\boldsymbol{\theta}} \sin \theta) \frac{\mu_0 I_0 l}{4\pi} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \\ &= \hat{\mathbf{R}} \tilde{A}_R + \hat{\boldsymbol{\theta}} \tilde{A}_\theta + \hat{\boldsymbol{\phi}} \tilde{A}_\phi\end{aligned}\quad (8)$$

với

$$\begin{aligned}\tilde{A}_R &= \frac{\mu_0 I_0 l}{4\pi} \cos \theta \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \\ \tilde{A}_\theta &= -\frac{\mu_0 I_0 l}{4\pi} \sin \theta \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \\ \tilde{A}_\phi &= 0\end{aligned}\quad (9)$$

Từ “Magnetic Vector Potential”, ta có thể thu được vector điện và từ trường E và H như sau:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{H}} &= \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \tilde{\mathbf{A}}, \\ \tilde{\mathbf{E}} &= \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \times \tilde{\mathbf{H}}\end{aligned}\quad (10)$$

kết quả sau khi giải hệ phương trình Maxwell, ta thu được:

$$\begin{aligned}\tilde{H}_\phi &= \frac{I_0 l k^2}{4\pi} e^{-jkR} \left[\frac{j}{kR} + \frac{1}{(kR)^2} \right] \sin \theta \\ \tilde{E}_R &= \frac{2I_0 l k^2}{4\pi} \eta_0 e^{-jkR} \left[\frac{1}{(kR)^2} - \frac{j}{(kR)^3} \right] \cos \theta \\ \tilde{E}_\theta &= \frac{I_0 l k^2}{4\pi} \eta_0 e^{-jkR} \left[\frac{j}{kR} + \frac{1}{(kR)^2} - \frac{j}{(kR)^3} \right] \sin \theta\end{aligned}\quad (11)$$

với $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \cong 120\pi(\Omega)$ là trở kháng trong không gian tự do (free-space). Tuy nhiên, trong các bài toán thực tế, ta thường quan tâm đến trường xa của anten (far field), khi đó $R \gg \lambda$, nên $kR = 2\pi R/\lambda \gg 1$, do đó $1/(kR)^2 \rightarrow 0$ và $1/(kR)^3 \rightarrow 0$. Nên ta có thể sắp sỉ các giá trị trong phương trình (11) dưới dạng:

$$\begin{aligned}\tilde{H}_\phi &= \frac{\tilde{E}_\theta}{\eta_0} \quad (\text{A/m}) \\ \tilde{E}_R &= 0 \\ \tilde{E}_\theta &= \frac{jI_0 l k \eta_0}{4\pi} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \sin \theta \quad (\text{V/m})\end{aligned}\quad (12)$$

Sau khi đã có được giá trị của các vector điện, từ trường E và H , ta có thể tính được mật độ công suất của anten:

$$\begin{aligned}\mathbf{S}_{\text{av}} &= \frac{1}{2} \Re \left(\tilde{\mathbf{E}} \times \tilde{\mathbf{H}}^* \right) \quad (\text{W/m}^2) \\ &= \hat{\mathbf{R}} S(R, \theta)\end{aligned}\quad (13)$$

trong đó,

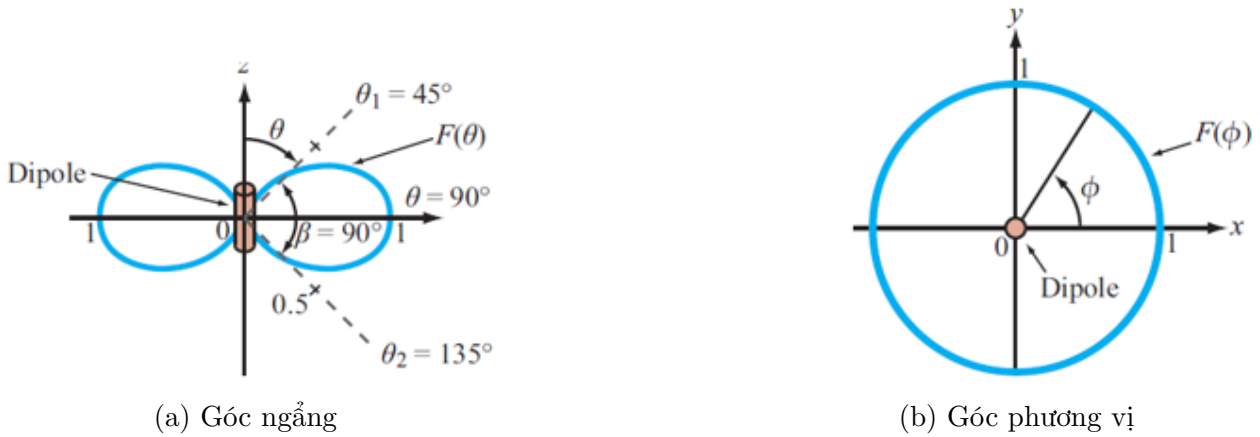
$$\begin{aligned}S(R, \theta) &= \left(\frac{\eta_0 k^2 I_0^2 l^2}{32\pi^2 R^2} \right) \sin^2 \theta \\ &= S_0 \sin^2 \theta \quad (\text{W/m}^2)\end{aligned}\quad (14)$$

Ta có thể chuẩn hóa cường độ bức xạ bằng cách xét tỷ lệ giữa mật độ công suất bức xạ tại hướng được xét với mật độ công suất bức xạ cực đại, hình minh họa cường độ bức xạ của một anten Hertzian ở cả mặt phẳng θ và ϕ được biểu diễn như hình 2:

$$F(\theta, \phi) = \frac{S(R, \theta, \phi)}{S_{\max}} = \sin^2 \theta \quad (15)$$

với S_{\max} được tính như sau:

$$\begin{aligned} S_{\max} = S_0 &= \frac{\eta_0 k^2 I_0^2 l^2}{32\pi^2 R^2} \\ &= \frac{15\pi I_0^2}{R^2} \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \text{ (W/m}^2\text{)} \end{aligned} \quad (16)$$



Hình 2: Giảm đồ bức xạ trong mặt phẳng θ và ϕ

Ngoài giảm đồ bức xạ như tính toán phía trên, độ định hướng và hiệu suất bức xạ cũng là điểm then chốt để đánh giá chất lượng của một anten định hướng. Với anten chất tử Hertzian, ta có độ định hướng là tỷ lệ giữa cường độ bức xạ chuẩn hóa cực đại (tương ứng giá trị 1) với giá trị trung bình của $F(\theta, \phi)$ theo tất cả các hướng:

$$\begin{aligned} D &= \frac{F_{\max}}{F_{\text{av}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} F(\theta, \phi) d\Omega} \\ &= \frac{4\pi}{\Omega_p} \end{aligned} \quad (17)$$

với

$$\Omega_p = \frac{P_{\text{rad}}}{R^2 S_{\max}} \quad (18)$$

trong đó P_{rad} là công suất bức xạ từ anten qua một đơn vị góc khối (bằng r^2). Hiệu suất bức xạ của một anten được tính như sau:

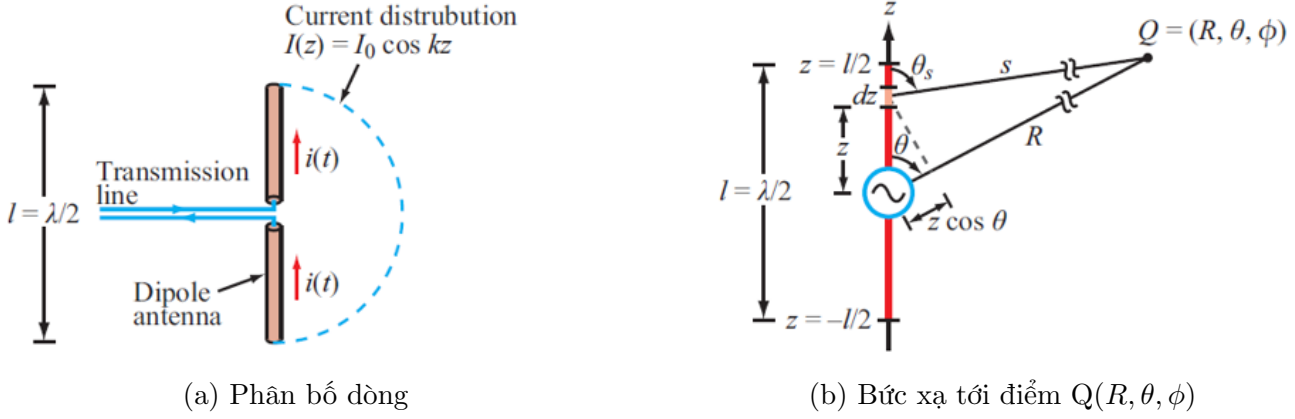
$$\xi = \frac{P_{\text{rad}}}{P_t} \quad (19)$$

từ đó, ta có độ tăng ích của anten:

$$G = \frac{4\pi R^2 S_{\max}}{P_t}, \quad G = \xi D \quad (20)$$

1.2 Chấn tử nửa sóng

Ngày nay, khi tần số sóng mang tăng lên các dải UHF, SHF và EHF, kích thước của các anten có thể ngày càng nhỏ đi, do độ dài bước sóng giảm nên kích thước của anten nửa sóng không quá cồng kềnh như các dải tần VHF trở xuống. Anten chấn tử nửa sóng ngày càng được sử dụng nhiều trong các trạm cơ sở của 3G, 4G và cao hơn. Hình 3 dưới đây mô tả một hình anten chấn tử nửa sóng với độ dài ($l = \lambda/2$).



Hình 3: Mô hình anten chấn tử nửa sóng

Khác với anten chấn tử Hertzian khi phân bố dòng đồng đều là I_0 do độ dài chấn tử rất ngắn. Với anten chấn tử nửa sóng, phân bố dòng của anten sẽ phụ thuộc cả vào vị trí (k):

$$i(t) = I_0 \cos \omega t \cos kz = \Re [I_0 \cos kz e^{j\omega t}] \quad (21)$$

phasor tương ứng của dòng sẽ là:

$$\tilde{I}(z) = I_0 \cos kz, \quad -\lambda/4 \leq z \leq \lambda/4 \quad (22)$$

Tương tự như anten chấn tử Hertzian, ta vẫn chia anten chấn tử nửa sóng thành các đoạn rất ngắn (dz). Điện trường, và từ trường (E, H) tại một điểm $Q(R, \theta, \phi)$ gây ra bởi dz là:

$$\begin{aligned} d\tilde{E}_\theta(z) &= \frac{jk\eta_0}{4\pi} \tilde{I}(z) dz \left(\frac{e^{-jks}}{s} \right) \sin \theta_s \\ d\tilde{H}_\phi(z) &= \frac{d\tilde{E}_\theta(z)}{\eta_0} \end{aligned} \quad (23)$$

tích phân điện, từ trường trên toàn bộ chấn tử ta có:

$$\tilde{E}_\theta = \int_{z=-\lambda/4}^{\lambda/4} d\tilde{E}_\theta \quad s \simeq R - z \cos \theta \quad (24)$$

kết quả cuối cùng thu được:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_\theta &= j60I_0 \left\{ \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \right\} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \\ \tilde{H}_\phi &= \frac{\tilde{E}_\theta}{\eta_0} \end{aligned} \quad (25)$$

Cường độ bức xạ của anten chấn tử nửa sóng có thể được chuẩn hóa với:

$$F(\theta, \phi) = \frac{S(R, \theta)}{S_{\max}} \quad (26)$$

với $S(R, \theta)$ và S_{\max} :

$$\begin{aligned} S(R, \theta) &= \frac{|\tilde{E}_\theta|^2}{2\eta_0} \\ &= \frac{15I_0^2}{\pi R^2} \left\{ \frac{\cos^2[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin^2 \theta} \right\} \\ &= S_0 \left\{ \frac{\cos^2[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin^2 \theta} \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} S_{\max} &= S_0 \\ &= \frac{15I_0^2}{\pi R^2} \end{aligned} \quad (28)$$

Thay (27) và (28) và (26), ta được cường độ bức xạ chuẩn hóa của anten chấn tử nửa sóng là:

$$F(\theta) = \frac{S(R, \theta)}{S_0} = \left\{ \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \right\}^2 \quad (29)$$

Độ định hướng của anten chấn tử nửa sóng được tính như sau:

$$D = \frac{4\pi R^2 S_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (30)$$

với

$$\begin{aligned} P_{\text{rad}} &= R^2 \iint_{4\pi} S(R, \theta) d\Omega \\ &= \frac{15I_0^2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left\{ \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \right\}^2 \sin \theta d\theta d\phi \\ P_{\text{rad}} &= 36.6I_0^2 \quad (\text{W}) \end{aligned} \quad (31)$$

thay (31) vào (30), ta có:

$$D = \frac{4\pi R^2 S_{\max}}{P_{\text{rad}}} = \frac{4\pi R^2}{36.6I_0^2} \left(\frac{15I_0^2}{\pi R^2} \right) = 1.64 = 2.15 \text{ dB} \quad (32)$$

Từ P_{rad} , ta cũng có thể tính được điện trở bức xạ:

$$R_{\text{rad}} = \frac{2P_{\text{rad}}}{I_0^2} = \frac{2 \times 36.6I_0^2}{I_0^2} \simeq 73\Omega \quad (33)$$

1.3 Nhận xét

- Với dipole Hertzian có điện trở bức xạ cỡ 0.1Ω , điện trở tổn hao 0.04Ω , hiệu suất 69%; Dipole nửa sóng có điện trở bức xạ 73Ω , điện trở tổn hao 1.8Ω , hiệu suất 98%. Với $R_{\text{loss}} \ll R_{\text{rad}}$ thì $Z_{\text{in}} \simeq R_{\text{rad}} + jX_{\text{in}}$.
- X_{in} là đại lượng phụ thuộc vào l/λ . X_{in} giảm từ 42Ω với $l/\lambda = 0.5$ xuống 0 với $l/\lambda = 0.48$, \rightarrow Không cần sử dụng mạch phối hợp trở kháng khi chấn tử nửa sóng được nối với đường truyền 75Ω .

2 Phương pháp và thông số mô phỏng CST

Khi mô phỏng một anten chấn tử trên phần mềm CST, các thông số chính cần đưa vào mô phỏng bao gồm: tần số làm việc, trong báo cáo này, tôi chọn tần số hoạt động của anten ở 5 GHz; từ tần số làm việc, ta có độ dài bước sóng:

$$\lambda = \frac{1}{f} = \frac{1}{5 * 10^9} \approx 59.96 \text{ mm} \quad (34)$$

Độ dài anten như nhận xét trong phần 1.3 sẽ cần điều chỉnh phù hợp với loại anten mô phỏng, ví dụ như trong bảng 1, tôi cho độ dài anten của chấn tử Hertzian chạy tử x-x, và chấn tử nửa sóng chạy từ $0.47\lambda \rightarrow 0.48\lambda$. Tham khảo thông số trong bài [1], tôi lần lượt chọn khoảng cách giữa 2 chấn tử của anten là $g = \frac{L}{200}$ và bán kính của chấn tử là $R = \frac{L}{1000}$. Vật liệu chế tạo anten là đồng để đơn giản hóa cho việc thực thi. Có thể nhận thấy, việc thay đổi độ dài anten sẽ trực tiếp thay đổi các thông số khác như khoảng cách và bán kính của 2 chấn tử. Đây là quá trình tuning trong thiết kế anten và không có tài liệu nào miêu tả chi tiết, tóm lại, thông số mô phỏng như trong bảng 1.

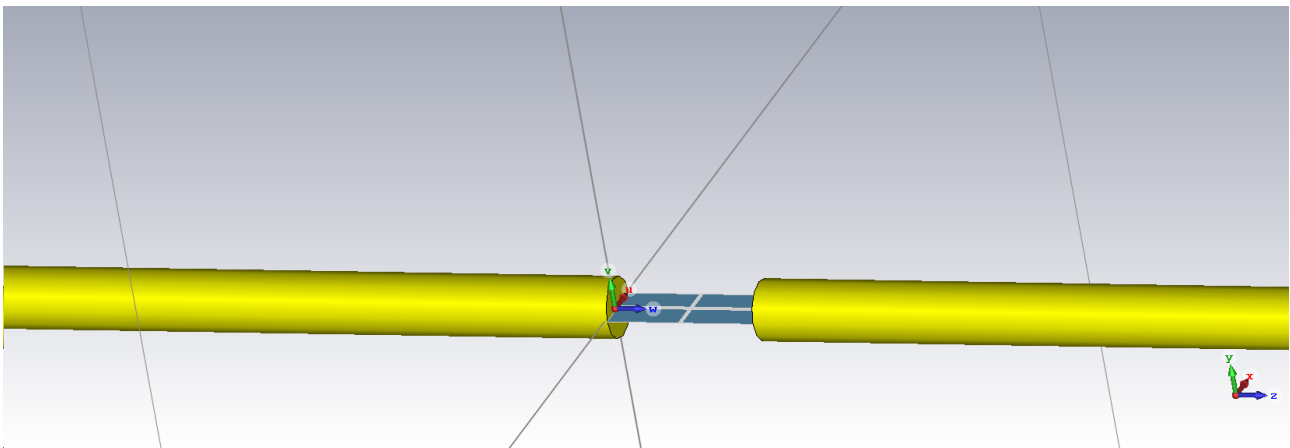
Bảng 1: Thông số mô phỏng CST

Tham số	Giá trị cho anten chấn tử Hertzian	Giá trị cho anten chấn tử nửa sóng
Tần số làm việc (f)	5 GHz	5 GHz
Độ dài bước sóng (λ)	$\frac{1}{f} = 59.96 \text{ mm}$	$\frac{1}{f} = 59.96 \text{ mm}$
Độ dài anten (L)	$0.02\lambda \text{ mm}$	$0.47\lambda \leq L \leq 0.48\lambda \text{ mm}$
Khoảng cách giữa 2 chấn tử (g)	$g = \frac{L}{200} \text{ mm}$	$g = \frac{L}{200} \text{ mm}$
Bán kính anten (R)	$R = \frac{L}{1000} \text{ mm}$	$R = \frac{L}{1000} \text{ mm}$
Trở kháng lối vào (Z_{in})	75Ω	75Ω
Vật liệu anten	Cooper (annealed)	Cooper (annealed)

3 Kết quả mô phỏng

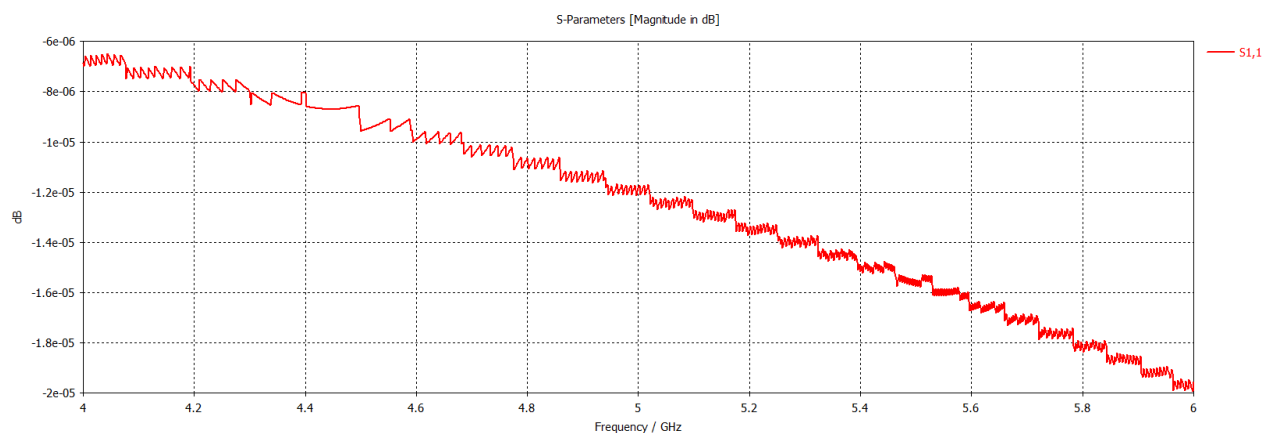
3.1 Chấn tử Hertzian

Mô phỏng anten chấn tử trên CST theo hướng dẫn tại [2], kết quả thu được như trên hình 3.

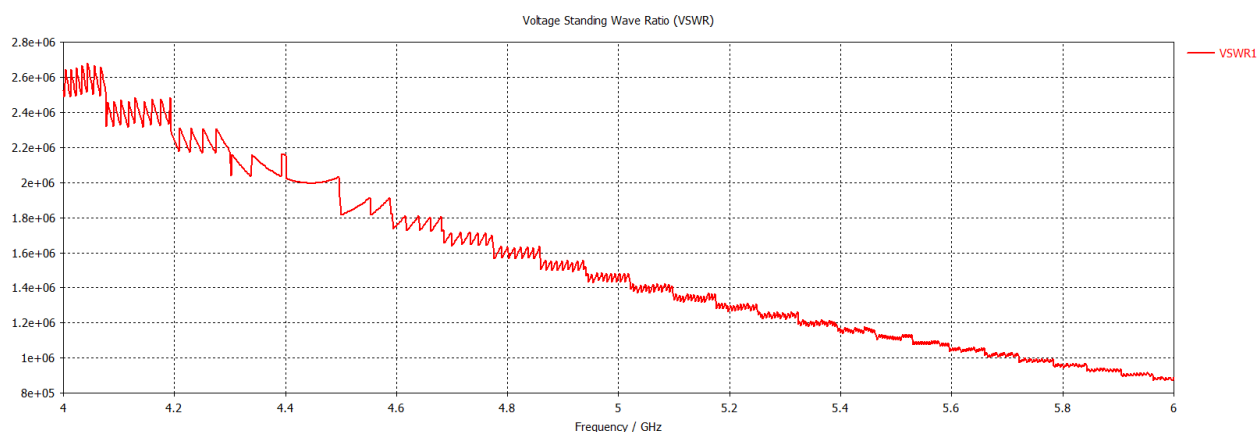


Hình 4: Mô phỏng chấn tử nửa sóng trên CST

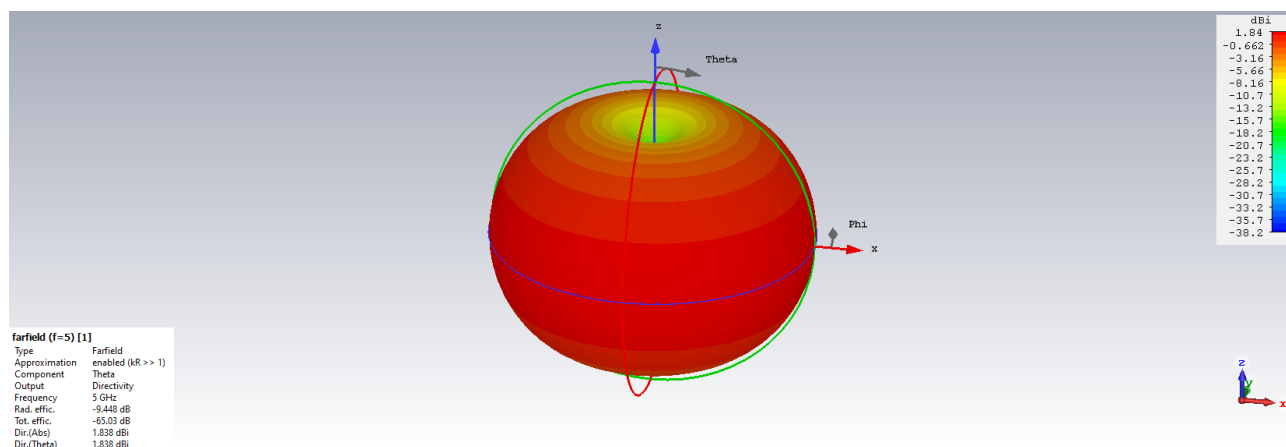
Tuy nhiên, quá trình chạy mô phỏng anten chấn tử Hertzian rất lâu so với chấn tử nửa bước sóng, nên theo như bảng 1, tôi đã không thể cho L chạy ở các giá trị khác nhau để thu được kết quả tốt nhất. Do đó, tôi sẽ chỉ chạy kết quả cho một trường hợp tại $L = \lambda/50$ để có sự so sánh với kết quả của anten chấn tử nửa sóng ở phần tiếp theo.



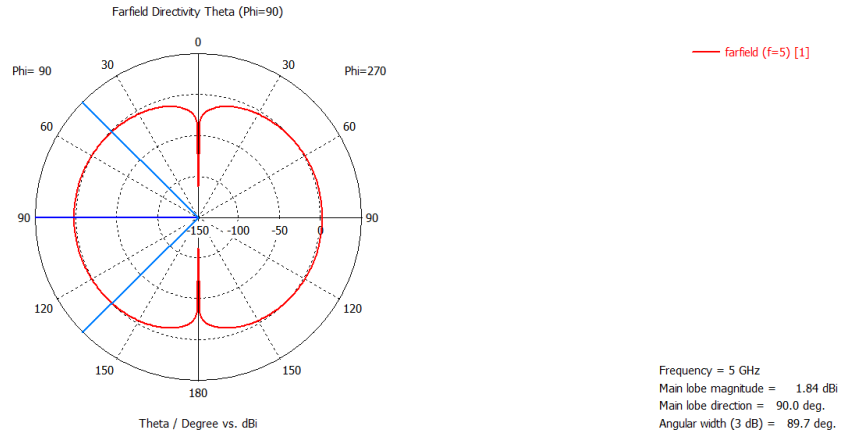
Hình 5: Hệ số phản xạ $S_{1,1} = -1.188 \times 10^{-5}$ dB



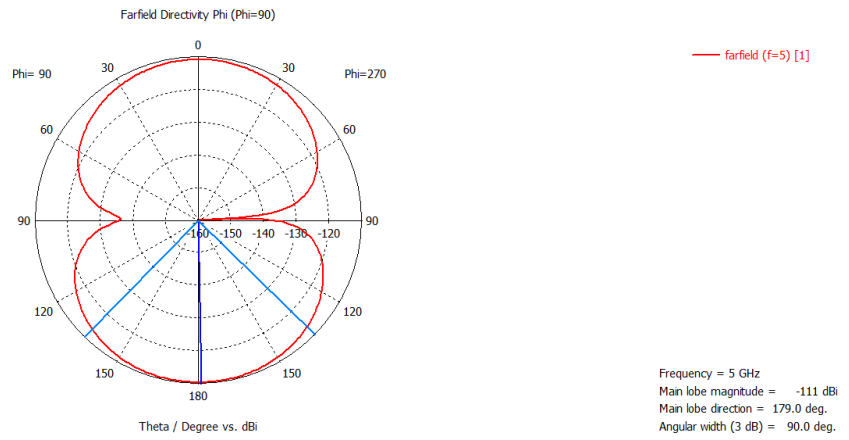
Hình 6: Hệ số sóng đứng $VSWR = 1.45 \times 10^6$



Hình 7: Giản đồ bức xạ 3D của anten



Hình 8: Biểu đồ bức xạ theo θ

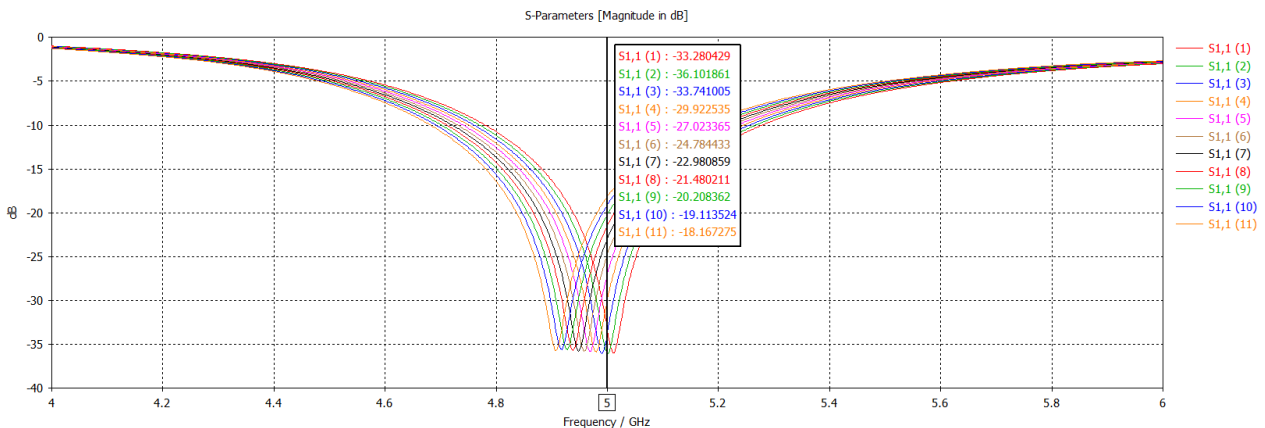


Hình 9: Biểu đồ bức xạ theo ϕ

3.2 Chấn tử nửa sóng

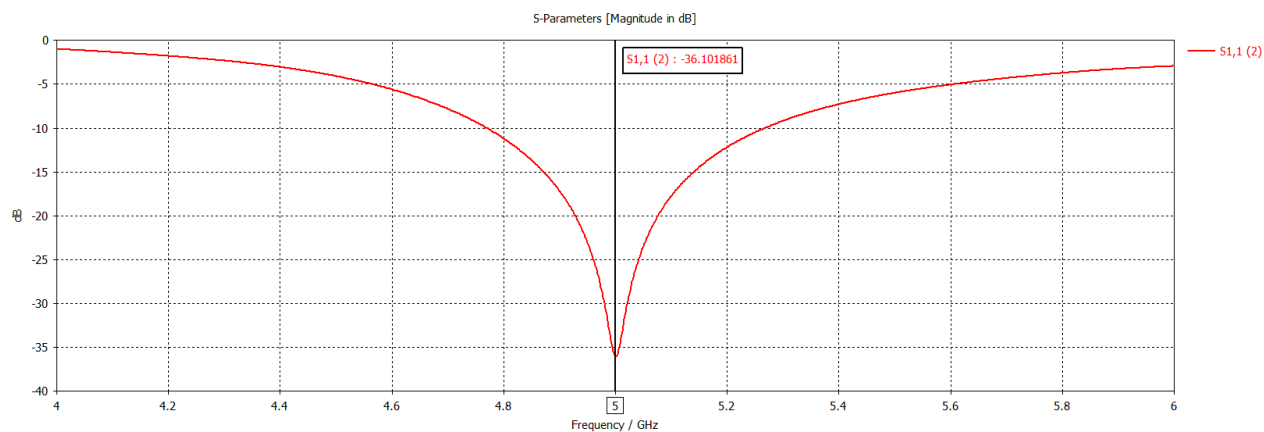
Hình mô phỏng anten chấn tử nửa bước sóng trên CST vẫn như trên hình 3 và chỉ thay đổi độ dài của anten. Tương tự như chấn tử Hertzian, tôi cũng thay đổi L để tìm được giá trị $S_{1,1}$ tối ưu cho tần số làm việc 5 GHz mong muốn.

Như đã đề cập trong bảng 1, tôi sẽ cho biến L chạy từ 0.47λ đến 0.48λ với khoảng cách 0.01λ . Kết quả mô phỏng hệ số phản xạ $S_{1,1}$ thu được như trên hình 10.

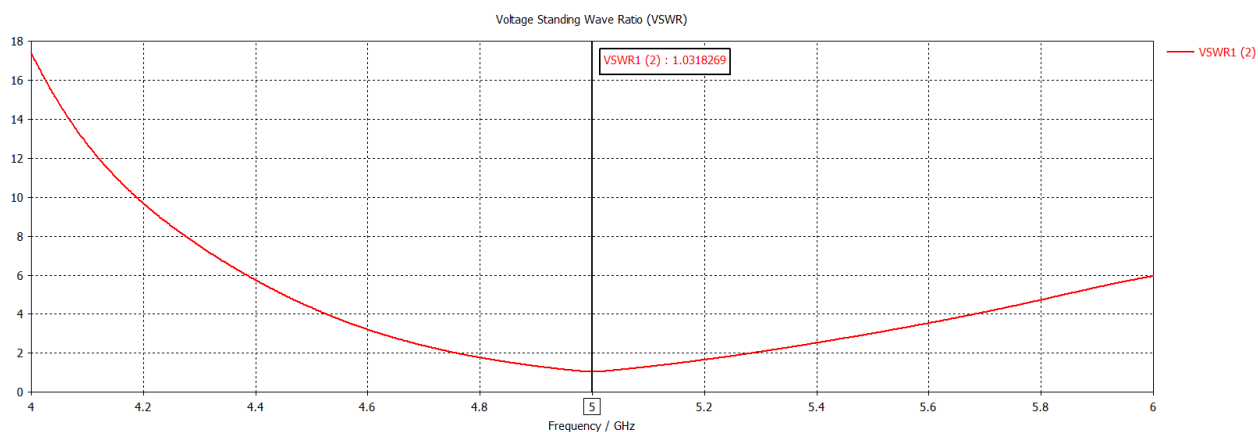


Hình 10: Hệ số phản xạ $S_{1,1}$ tương ứng với các L khác nhau

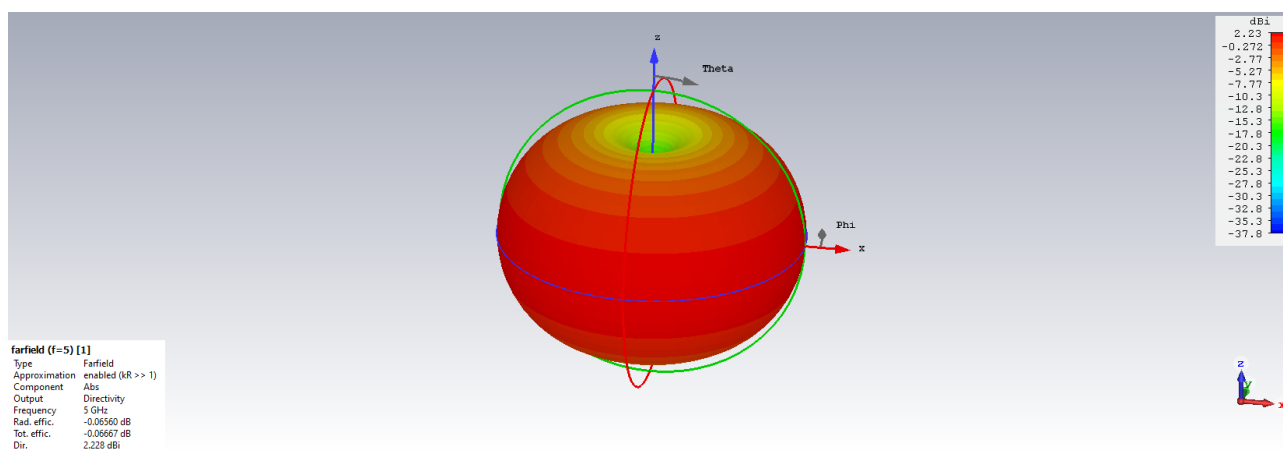
Để dàng nhận thấy, tần số cộng hưởng 5 GHz đạt được tại $S_{1,1}$ (2) trên phần mềm CST tương ứng với $L = 0.471\lambda$. Các kết quả chi tiết khi mô phỏng với tham số này như sau:



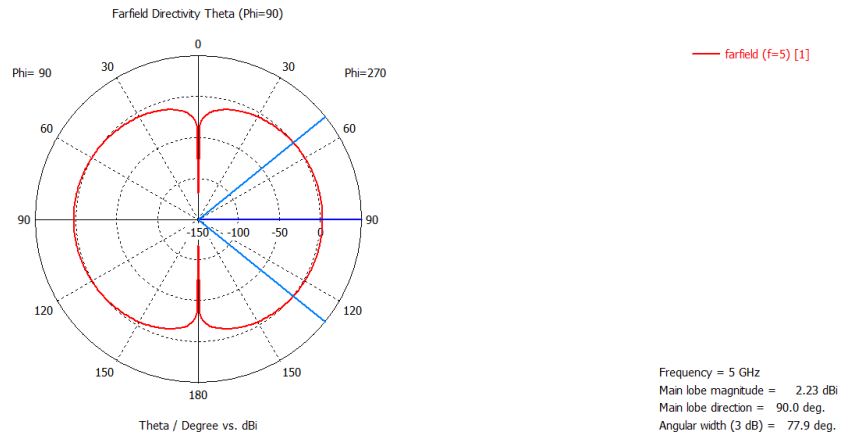
Hình 11: Hệ số phản xạ $S_{1,1} = -36.1$ dB



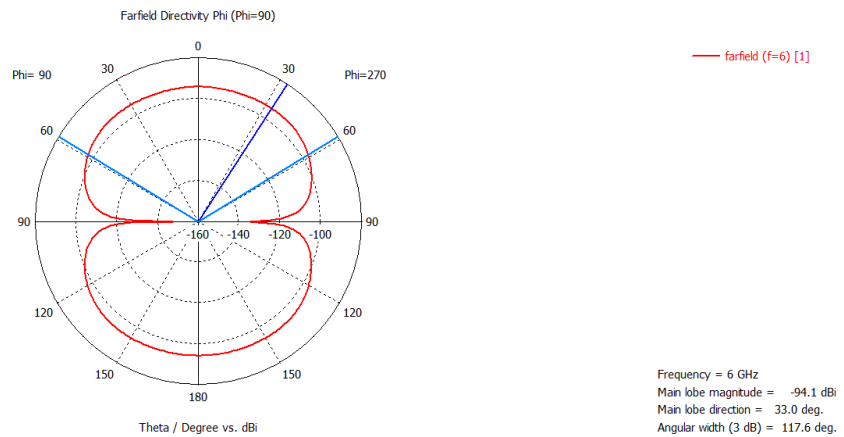
Hình 12: Hệ số sóng đứng $VSWR = 1.031829$



Hình 13: Biểu đồ bức xạ 3D của anten



Hình 14: Biểu đồ bức xạ theo θ



Hình 15: Biểu đồ bức xạ theo ϕ

3.3 Đánh giá và so sánh kết quả mô phỏng

- Mô phỏng anten Hertzian không hoạt động, cần thêm sửa đổi.
- Mô phỏng anten nửa sóng:
 - S1,1 -36 dB ở mức tốt
 - Hệ số sóng đứng 1.03 là tốt
 - Điện trở phản xạ: -0.0656 dB
 - Tổng phản xạ: -0.06667 dB
 - Độ định hướng so với anten isotropic: 2.228 dBi

4 Kết luận

Trong báo cáo này, tôi đã đưa ra những thông tin cơ bản nhất về anten chấn tử 2 loại Hertzian và nửa bước sóng. Lý thuyết được thực nghiệm ngay bằng việc mô phỏng trên phần mềm CST thông qua một anten có tần số làm việc 5 GHz. Kết quả mô phỏng đã cho ra đúng tần số cộng hưởng ở anten nửa sóng, tuy nhiên kết quả là chưa thể giải thích ở anten chấn tử Hertzian. Trong báo cáo còn thiếu sót trong việc mô phỏng chấn tử Hertzian và sẽ được hoàn thành trong tương lai.

Tài liệu

- [1] Zulkefli NI, Joret A, Dahlan SH, et al., “Dipole antenna design as hyperthermia applicator using CST microwave studio,” in *Int J Biosen Bioelectron*, vol. 7, no. 2, pp. 36–39, 2021.
- [2] CST Tutorial: Design of a Half-wave Dipole.
Online: <https://www.youtube.com/watch?v=hiU5YpIdUaY>