

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ



LÝ QUỐC ANH

**ỨNG DỤNG LÝ THUYẾT MẠNG BỐN CỰC ĐỂ
PHÂN TÍCH VÀ TỔNG HỢP HỆ THỐNG TRUYỀN
DỮ LIỆU**

**Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử
Mã số: 62.52.70.01**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2010

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ**

Người hướng dẫn khoa học:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp nhà nước họp tại: Học viện Tài chính
vào hồi giờ ngày tháng năm 2010

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia
- Học viện kỹ thuật quân sự

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

1. Đỗ Huy Giác, Lý Quốc Anh. (2004), “Ma trận tán xạ S của mạch khuếch đại Transistor”, *tạp chí KHKT Học viện KTQS*, (Số 108), trang 74-79.
2. Đỗ Huy Giác, Trịnh Đình Cường, Lý Quốc Anh. (2005), “Không gian năng lượng sóng trạng thái tín hiệu của mạch tuyến tính và ứng dụng để phân tích và tổng hợp hệ thống truyền và xử lý tín hiệu”, *tạp chí KHKT Học viện KTQS*, (Số 113), trang 119-124.
3. Đỗ Huy Giác, Lý Quốc Anh, Nguyễn Xuân Khoa, Nguyễn Diệu Linh, Ngô Thành Dũng. (2006), “Tổng hợp các mạch không tổn hao”, *tạp chí KHKT Học viện KTQS*, (Số 114), trang 88-95.

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết và mục tiêu nghiên cứu của luận án

Hiện nay, hệ thống truyền tín hiệu đang được ứng dụng rộng rãi nhằm mục đích phục vụ cuộc sống của con người. Các công nghệ cao về mạch điện tử ngày càng được áp dụng nhiều trong kỹ thuật truyền dẫn tín hiệu.

Tuy nhiên, việc ứng dụng các phần tử tổ hợp, các khối chức năng □ đòi hỏi sự nghiên cứu các thuật toán và phương pháp thích hợp để phân tích, đánh giá và tổng hợp chúng. Các phương pháp phân tích và tổng hợp mạch kinh điển được xây dựng khi các mạch điện (các khối chức năng của hệ thống truyền tín hiệu) được xây dựng từ các phần tử đơn lẻ (các transistor, đèn điện tử, các phần tử R,L,C) và các thuật toán phân tích, tổng hợp mạch đều dựa trên mô hình vật lý tương đương. Với các phần tử tổ hợp cao, việc xây dựng sơ đồ vật lý tương đương là rất phức tạp, độ chính xác kém và nhiều khi không thực hiện được.

2. Đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu

Với đối tượng nghiên cứu là phân tích và tổng hợp hệ thống truyền tín hiệu, luận án tập trung nghiên cứu đề xuất phương pháp cấu trúc để phân tích và tổng hợp hệ thống truyền tín hiệu với ý tưởng biểu diễn hệ thống truyền tín hiệu theo các khối chức năng được đặc trưng bởi các tham số riêng (dựa trên mô hình và lý thuyết M4C). Phương pháp cấu trúc không quan tâm đến phần tử mạch hoặc sự tích hợp bên trong của các khối chức năng mà chỉ quan tâm đến đầu vào và đầu ra (giống như cấu trúc hộp đen) của các khối chức năng và cách ghép nối chúng trong hệ thống.

3. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

- Ứng dụng một phương pháp mới để phân tích và tổng hợp hệ thống truyền tín hiệu là phương pháp cấu trúc, các khối chức năng được biểu diễn đặc trưng bởi M2C và M4C.

- Đưa ra phương pháp xác định các phần tử ma trận truyền đạt [A] của các mạch phối hợp không tổn hao theo tổng trở phụ tải và tổng trở vào cho trước. Đồng thời đưa ra phương pháp tổng hợp các mạch phối hợp theo ma trận truyền đạt [A] đã biết cũng như tối ưu hoá đặc tính phối hợp của hệ thống trong dải tần Δf lân cận tần số trung tâm của tín hiệu.

4. Cấu trúc của luận án

Luận án gồm : Mở đầu, bốn chương thuyết minh, kết luận, kiến nghị, 3 công trình do tác giả công bố có liên quan tới luận án và 63 tài liệu tham khảo.

5. Các đóng góp mới của luận án

Luận án trình bày phương pháp xác định đặc tính kỹ thuật của các M4C thành phần trong hệ thống truyền tín hiệu. Phân tích bộ khuếch đại transistor trong dải sóng siêu cao tần trên mô hình M2C và M4C; Đưa ra cách xác định hệ số truyền đạt và điều kiện làm việc ổn định của mạch khuếch đại bán dẫn làm việc ở dải sóng siêu cao tần thông qua ma trận tán xạ S. Nội dung được phản ánh trong bài báo “Ma trận tán xạ S của mạch khuếch đại Transistor”, tạp chí KHKT Học viện KTQS, Số 108, trang 74-79 và bài báo “Không gian năng lượng sóng trạng thái tín hiệu của mạch tuyến tính và ứng dụng để phân tích và tổng hợp hệ thống truyền và xử lý tín hiệu”, tạp chí KHKT Học viện KTQS, Số 113, trang 119-124.

Luận án cũng đưa ra phân tích kết cấu tương đương của M4C, tổng hợp các mạch phối hợp không tổn hao và phương pháp xác định ma trận truyền đạt [A] của các mạch phối hợp, xác định các tham số vật lý của các mạch phối hợp, thực hành tính toán các tham số thực của hệ thống để khẳng định tính đúng đắn của phương pháp. Nội dung được phản ánh trong bài

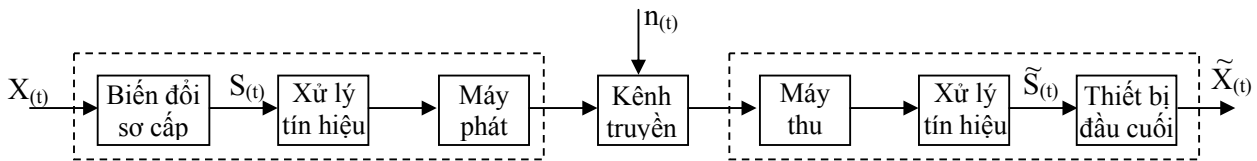
báo “Tổng hợp các mạch không tổn hao”, tạp chí KHKT Học viện KTQS, Số 114, trang 88-95.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG TRUYỀN TÍN HIỆU

1.1. Vai trò và nhiệm vụ của hệ thống truyền tín hiệu

Hệ thống truyền tín hiệu đóng một vai trò quan trọng, là nhân tố chủ yếu góp phần thúc đẩy việc ứng dụng những thành tựu và tiến bộ về khoa học công nghệ phục vụ đời sống và xã hội loài người, là đối tượng nghiên cứu của các nhà khoa học thuộc lĩnh vực điện tử, công nghệ thông tin và nhiều lĩnh vực khác.

Hình 1.1 chỉ ra sơ đồ khối tổng quát của một hệ thống truyền tín hiệu.



Hình 1.1. Sơ đồ khối của hệ thống truyền tín hiệu

1.2. Phân tích và tổng hợp mạch tuyến tính

Trong thực tế, việc phân tích và tổng hợp các mạch điện đều được thực hiện trên mô hình lý tưởng là sơ đồ mạch. Các hệ thống thường được biểu diễn thông qua mô hình thay thế.

1.3. Các phương pháp kinh điển để phân tích và tổng hợp hệ thống.

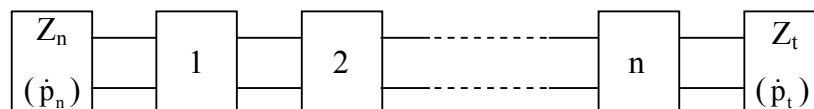
Với phương pháp phân tích kinh điển còn mặt hạn chế là chưa có tính tổng quát, chất lượng của các thuật toán chỉ được xét trong một số tình trạng mạng xác định mà chưa quan tâm đến việc thích ứng tham số nguồn với tình trạng mạng. Mục đích của Đề tài là đưa lên tính tổng quát đối với bất kỳ mạch điện nào và có thể áp dụng cho nhiều bài toán khác nhau.

Tổng hợp hệ thống: Xây dựng các mạch cụ thể theo thuật toán, chỉ tiêu đã cho. Đối với phương tổng hợp kinh điển trước kia có nhiều mạch khác

nhau có thể thoả mãn cùng thuật toán, vấn đề tổng hợp hệ thống vẫn diễn ra với các phân tử một cách riêng lẻ, rời rạc. Phương pháp cấu trúc không quan tâm đến phân tử mạch hoặc sự tích hợp bên trong của các khối chức năng mà chỉ quan tâm đến đầu vào và đầu ra (giống như cấu trúc hộp đen) của các khối chức năng và cách ghép nối chúng trong hệ thống.

1.4. Phương pháp cấu trúc áp dụng lý thuyết M4C để phân tích và tổng hợp hệ thống truyền tín hiệu .

Để giải bài toán phối hợp ta mô tả hệ thống truyền tín hiệu bằng mô hình tổng quát (Hình 1.2), hệ thống gồm các M2C và M4C mắc liên thông với nhau:



Hình 1.2. Mô hình tổng quát của hệ thống truyền tín hiệu

Trong hình trên, các M2C là nguồn tín hiệu và phụ tải, còn các M4C là các khối chức năng trong hệ thống truyền tín hiệu (các bộ suy giảm, các bộ khuếch đại, các bộ quay pha), hoặc các mạch phối hợp. Các M4C được đặc trưng bởi các ma trận tham số riêng của nó. Ta có thể phân tích phân tích của hệ thống truyền tín hiệu cũng như tổng hợp hệ thống truyền tín hiệu theo một hoặc một số chỉ tiêu cho trước trên cơ sở lý thuyết M4C.

1.5. Kết luận chương 1

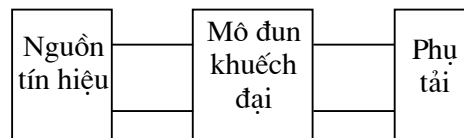
Bài toán phân tích và tổng hợp mạch điện là một trong những bài toán cơ bản khi phân tích và tổng hợp thiết bị điện tử nói riêng hay hệ thống truyền tín hiệu nói chung; chính vì thế, nó được nhiều tác giả xem xét, giải quyết và trở thành bài toán kinh điển. Tuy nhiên, tất cả các phương pháp giải bài toán phân tích và tổng hợp mạch điện đều dựa trên mô hình vật lý tương đương (mô hình vật lý tương đương của phân tử và của mạch). Phân tích và tổng hợp mạch dựa trên mô hình vật lý tương đương có ưu điểm là biết rõ

quá trình vật lý xảy ra trong từng phần hoặc trong một phần thậm chí trên mỗi phần tử của mạch. Ngày nay, với các tiến bộ trong lĩnh vực công nghệ điện tử đã đưa vào sử dụng các linh kiện mới như bán dẫn trường làm việc ở chế độ tần số cao, công suất lớn; đặc biệt các phần tử tổ hợp cao và việc chế tạo các thiết bị theo hướng mô đun hoá thì việc phân tích mạch trên sơ đồ vật lý tương đương là rất phức tạp và trong nhiều trường hợp không thực hiện được. Trong nội dung chương 1, NCS đưa ra việc thực hiện phân tích và tổng hợp mạch trên một mô hình mới là mô hình mạng nhiều cực, coi mạch điện là sự ghép nối của mạng nhiều cực hay của các phần tử nhiều cực và việc phân tích được dựa trên cơ sở lý thuyết mạng nhiều cực mà cụ thể là M4C. Đây cũng có thể xem là một ý mới của luận án.

CHƯƠNG 2: ỨNG DỤNG MÔ HÌNH VÀ LÝ THUYẾT M4C ĐỂ PHÂN TÍCH HỆ THỐNG TRUYỀN TÍN HIỆU

2.1. Sơ đồ cấu trúc của bộ khuếch đại Transistor trong dải siêu cao tần

Mô hình bộ khuếch đại được mô tả như trên Hình 2-1. Các M2C đặc trưng cho nguồn tín hiệu vào phụ tải, còn M4C đặc trưng cho mô đun khuếch đại (bao gồm transistor và các phần tử xác định chế độ làm việc của transistor).



2.1.1. Bộ khuếch đại có nguồn tín hiệu và tải hoà hợp

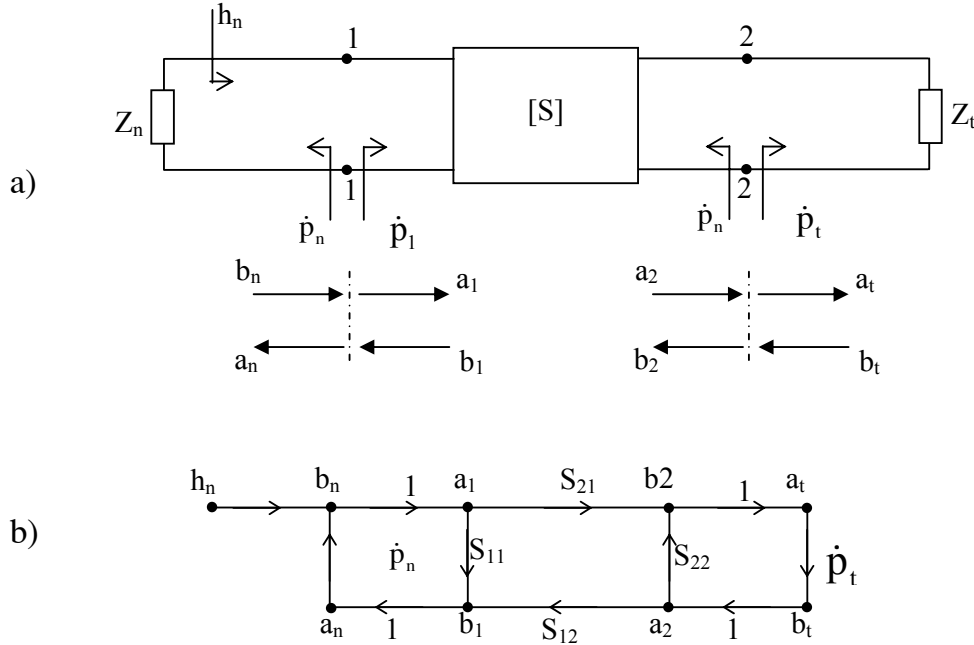
Trong trường hợp xét ta có tổng trở trong các nguồn Z_n bằng tổng trở phụ Z_t và bằng trở kháng sóng ρ của đoạn dây nối nguồn tín hiệu và tải với đầu vào và đầu ra của mô đun khuếch đại ($Z_n = Z_t = \rho$).

2.1.2. Bộ khuếch đại có nguồn và phụ tải bất kỳ

Trong dải sóng siêu cao tần, nguồn tín hiệu được mô tả dưới dạng một M2C với hệ số phản xạ phức p_n và một máy phát sóng tín hiệu phát về

phía phụ tải một sóng với biên độ h_n , còn phụ tải được đặc trưng bởi hệ số phản xạ phức \dot{p}_t .

Mô đun khuếch đại trong chế độ khuếch đại tuyến tính (tín hiệu vào nhỏ) được mô tả bằng M4C với ma trận tán xạ [S].



Hình 2.6. Sơ đồ tương đương của bộ khuếch đại và graph định hướng với [S]

2.2 Xác định các tham số cơ bản của bộ khuếch đại transistor trong dải sóng siêu cao tần

Hệ số ổn định và hệ số khuếch đại công suất trong cả dải tần công tác là các tham số cơ bản của bộ khuếch đại transistor trong dải sóng siêu cao tần.

2.2.1 Xác định hệ số phản xạ của bộ khuếch đại

$$\dot{p}_1 = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2 \neq 0}; \quad \dot{p}_2 = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1 \neq 0};$$

$$\dot{p}_1 = \frac{b_1}{a_1} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\dot{p}_t}{1 - S_{22}\dot{p}_t} \quad (2.12)$$

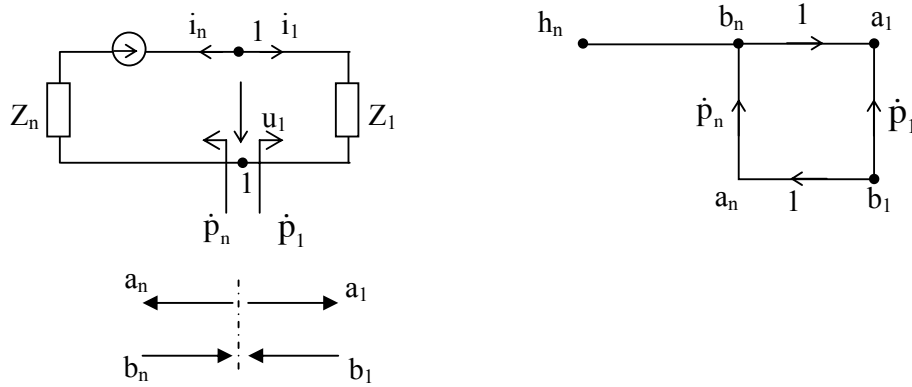
$$\dot{p}_2 = \frac{b_2}{a_2} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\dot{p}_n}{1 - S_{11}\dot{p}_n} \quad (2.13)$$

Bộ khuếch đại chỉ làm việc ổn định khi mô đun của hệ số khuếch đại trên đầu vào và trên đầu ra nhỏ thua 1:

$$|p_1| < 1; |p_2| < 1 \quad (2.14)$$

Từ các điều kiện cho phép xác định được hệ số phản xạ của nguồn và tải tương đương để bộ khuếch đại làm việc ổn định.

2.2.2. Xác định hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại

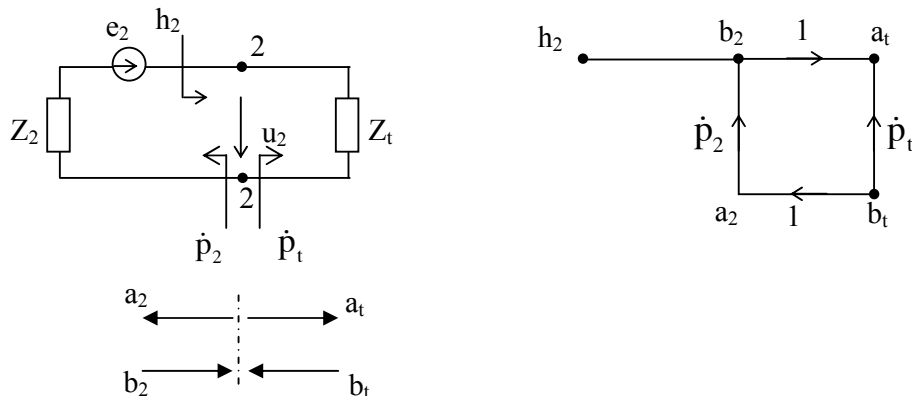


Hình 2.7. Sơ đồ thay thế tương đương của bộ khuếch đại (P_1)

$K_{p\alpha}$ là hệ số truyền công suất từ nguồn tín hiệu tới đầu vào khuếch đại.

$$K_{p\alpha} = \frac{(1 - |p_n|^2)(1 - |p_1|^2)}{|1 - p_n p_1|^2} = \frac{|Z_n + Z_n^*| |Z_1 + Z_1^*|}{|Z_n + Z_1^*|^2} \quad (2.23)$$

Để xét quan hệ năng lượng trên đầu ra mô đun khuếch đại, ta thay thế bộ khuếch đại bằng sơ đồ tương đương Hình 2.8.



Hình 2.8. Sơ đồ tương đương bộ khuếch đại (P_2)

$K_{p\beta}$, \dot{p}_β - là hệ số truyền công suất hay hệ số không phối hợp trên đầu ra của mô đun khuếch đại tương ứng:

$$K_{p\beta} = \frac{(1 - |\dot{p}_2|^2)(1 - |\dot{p}_t|^2)}{|1 - \dot{p}_2 \dot{p}_t|^2} \quad (2.33)$$

$$p_\beta = \frac{\dot{p}_2 - \dot{p}_t^*}{1 - \dot{p}_2 \dot{p}_t} \quad e^{j\beta} = \frac{Z_2 - Z_t^*}{Z_2 + Z_t^*} \quad (2.34)$$

Ở đây K_p là hệ số khuếch đại công suất của bộ khuếch đại.

$$K_p = \frac{(1 - |\dot{p}_0|^2) |S_{21}|^2 (1 - |\dot{p}_t|^2)}{(1 - \dot{p}_n S_{11})^2 |1 - \dot{p}_2 \dot{p}_t|^2} \quad (2.35)$$

Hay

$$K_p = \frac{\left((1 - |\dot{p}_n|^2) |S_{21}|^2 (1 - |\dot{p}_t|^2) \right)}{(1 - \dot{p}_n \dot{p}_1)^2 |1 - S_{22} \dot{p}_t|^2} \quad (2.36)$$

2.2.3. Phối hợp bộ khuếch đại đảm bảo hệ số khuếch đại công suất đạt giá trị lớn nhất

Từ lý thuyết của bài toán tổng hợp mạch điện tuyến tính trong dải sóng siêu cao tần, để thực hiện các mạch phối hợp trên đầu ra và đầu vào của mô đun khuếch đại cần biết hệ số phản xạ, hay tổng trở trên đầu vào của nó:

$$K_p = K_{p\alpha} K_{p_0} K_{p\beta} \quad (2.38)$$

ở đây $K_{p\alpha}$ và $K_{p\beta}$ là hệ số truyền công suất của mạch vào và mạch ra.

$K_{p_0} = |S_{21}|^2$ là hệ số công suất của bộ khuếch đại transistor đơn hướng được phối hợp đồng thời theo đầu vào và đầu ra:

$$K_{p\alpha} = \frac{(1 - |\dot{p}_n|^2)(1 - |S_{11}|^2)}{|1 - \dot{p}_n S_{11}|^2} \quad (2.39)$$

$$K_{p_0} = |S_{210}| = \frac{|S_{21}|^2}{(1-|S_{11}|^2)(1-|S_{22}|^2)} \quad (2.40)$$

$$K_{p_\beta} = \frac{(1-|S_{22}|^2)(1-|\dot{p}_t|^2)}{|1-\dot{p}_t S_{22}|^2} \quad (2.41)$$

$$K = \frac{1-|S_{11}|^2-|S_{22}|^2+|\Delta_s|^2}{2|S_{12}S_{21}|^2} \quad (2.54)$$

K được gọi là hệ số ổn định của mô đun khuếch đại.

Nếu $K > 1$ thì mô đun khuếch đại có thể phối hợp đồng thời theo đầu vào và đầu ra. Giá trị $K = 1$ là điều kiện biên, còn khi $K < 1$ transistor không thể phối hợp đồng thời theo đầu vào và đầu ra.

2.3. Ma trận tán xạ của bộ khuếch đại $[\tilde{S}]$

Để đưa ra ma trận tán xạ $[\tilde{S}]$ của bộ khuếch đại, trong bộ khuếch đại ta thực hiện thay thế tương đương các M2C nguồn và tải với các hệ số phản xạ p_n , p_t dưới dạng kết nối M2C hoà hợp của hệ số phản xạ $p_{n0} = 0$, $p_{t0} = 0$ và M4C không tổn hao với ma trận tán xạ $[S_n]$, $[S_t]$

$$[S_n] = \begin{bmatrix} -\dot{p}_n^* e^{j2\varphi} & e^{j\varphi} \sqrt{1-|\dot{p}_n|^2} \\ e^{j\varphi} \sqrt{1-|\dot{p}_n|^2} & \dot{p}_n \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

$$[S_t] = \begin{bmatrix} \dot{p}_t & e^{j\psi} \sqrt{1-|\dot{p}_t|^2} \\ e^{j\psi} \sqrt{1-|\dot{p}_t|^2} & -\dot{p}_t^x e^{j2\psi} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

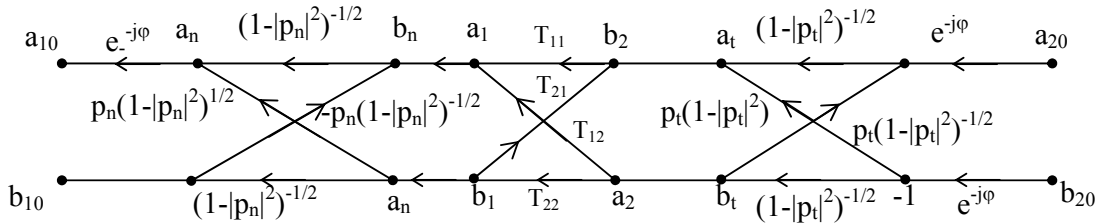
Trong trường hợp ta xét, ma trận tán xạ $[\tilde{S}]$ là ma trận tán xạ của M4C gồm 3 M4C thành phần với các ma trận tán xạ $[S_n]$, $[S]$, $[S_t]$ mắc liên thông.

Ma trận $\left[\tilde{S} \right]$ hoàn toàn đặc trưng cho đặc tính của bộ khuếch đại khi tính đến ảnh hưởng của nguồn tín hiệu và phụ tải.

$$K_p = \frac{|b_{20}|^2}{|a_{10}|^2} = \left| \tilde{S}_{21} \right|^2 = \frac{(1 - |\dot{p}_n|^2)(1 - |\dot{p}_t|^2) |S_{21}|^2}{|(1 - \dot{p}_n S_{11})(1 - \dot{p}_t S_{22}) - S_{12} S_{21} \dot{p}_n \dot{p}_t|^2} \quad (2.68)$$

2.4. Ma trận truyền sóng của bộ khuếch đại transistor

Trong nhiều trường hợp khi phân tích đặc tính của bộ khuếch đại transistor trong dải sóng siêu cao tần sẽ đơn giản hơn khi sử dụng ma trận truyền sóng của bộ khuếch đại $\left[\tilde{T} \right]$.



Hình 2.13. Grap định hướng của sơ đồ với ma trận truyền sóng $\left[\tilde{T} \right]$

Khi đó ma trận truyền sóng $\left[\tilde{T} \right]$ của bộ khuếch đại bằng tích của ba ma trận truyền sóng thành phần:

$$\left[\tilde{T} \right] = \left[T_n \right] \left[T \right] \left[T_t \right] = \begin{vmatrix} \tilde{T}_{11} & \tilde{T}_{12} \\ \tilde{T}_{21} & \tilde{T}_{22} \end{vmatrix} \quad (2.72)$$

2.5. Kết luận chương 2

Như đã chỉ ra ở chương 1, một cách tổng quát có thể xem hệ thống truyền tín hiệu là sự ghép nối liên thông giữa M4C và M2C (các M4C là các khối chức năng của hệ còn các M2C là nguồn tín hiệu và phụ tải); các M4C ghép liên thông với nhau lại được thay thế bằng tương đương bằng 1 M4C. Trên cơ sở đó, nội dung chương 2 đã tập trung xác định các tham số làm việc của mạch chức năng điển hình, đó là mạch khuếch đại transistor ở dải sóng siêu cao tần trên cơ sở lý thuyết M4C.

- Xác định điều kiện làm việc ổn định của bộ khuếch đại theo các tham số của ma trận tán xạ $[S]$ của transistor. Điều kiện ổn định được xác định bởi biểu thức:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta_s|^2}{2|S_{12}S_{21}|^2} \quad (2.85)$$

- Khi $K > 1$ thì mô đun khuếch đại có thể phối hợp đồng thời theo đầu vào và đầu ra (đảm bảo hệ số khuếch đại công suất của bộ khuếch đại là lớn nhất).
- Khi $K = 1$ là điều kiện biên; còn khi $K < 1$, để đảm bảo bộ khuếch đại làm việc ổn định thì khi đó không thể phối hợp mô đun khuếch đại theo điều kiện $K_p = K_{pmax}$ mà cần phải có các mạch phụ để mạch khuếch đại transistor làm việc ổn định.

- Xác định hệ số khuếch đại của mạch khuếch đại thông qua các phần tử của ma trận tán xạ của mô đun khuếch đại và tham số của nguồn tín hiệu và phụ tải:

$$K_p = \frac{(1 - |\dot{p}_n|^2)(1 - |\dot{p}_t|^2)|S_{21}|^2}{|(1 - \dot{p}_n S_{11})(1 - \dot{p}_t S_{22}) - S_{12}S_{21}\dot{p}_n\dot{p}_t|^2} \quad (2.86)$$

- Nếu biến đổi mạch khuếch đại gồm nguồn tín hiệu, mạch vào, mô đun khuếch đại, mạch ra, phụ tải và M4C tương đương có nguồn và tải hoà hợp, M4C tương đương được đặc trưng bởi ma trận tán xạ $[\tilde{S}]$ hay ma trận truyền sóng $[\tilde{T}]$:

$$[\tilde{S}] = \begin{bmatrix} \tilde{S}_{11} & \tilde{S}_{12} \\ \tilde{S}_{21} & \tilde{S}_{22} \end{bmatrix}, \quad [\tilde{T}] = \begin{bmatrix} \tilde{T}_{11} & \tilde{T}_{12} \\ \tilde{T}_{21} & \tilde{T}_{22} \end{bmatrix}.$$

thì tính chất và tham số của mạch khuếch đại hoàn toàn được xác định bởi các phần tử của ma trận $[\tilde{S}]$ hay ma trận $[\tilde{T}]$. Ví dụ: $\tilde{S}_{11}, \tilde{S}_{22}$ là các hệ số phản xạ trên đầu vào và đầu ra; khi mạch khuếch đại được phối hợp đồng thời theo đầu vào và đầu ra, lúc đó ma trận tán xạ $[\tilde{S}]$ hay ma trận truyền sóng $[\tilde{T}]$ là các ma trận chéo, từ đó cho phép xác định ma trận sóng của các mạch phối hợp khi tính toán thiết kế mạch.

CHƯƠNG 3: ỨNG DỤNG MÔ HÌNH VÀ LÝ THUYẾT M4C ĐỂ TỔNG HỢP HỆ THỐNG TRUYỀN TÍN HIỆU

Phương pháp cấu trúc phân tích và tổng hợp hệ thống truyền tín hiệu mô tả hệ thống truyền tín hiệu bằng mô hình tổng quát vẽ gồm các M2C và các M4C mắc liên thông với nhau.

3.1. Phối hợp giữa các M2C

3.1.1 Kết cấu tương đương của M2C nguồn và phụ tải:

Có thể chỉ ra rằng M2C đã cho tương đương với việc nối nối M2C hoà hợp với hệ số phản xạ $\tilde{p} = 0$ và M4C không tổn hao với ma trận tán xạ $[s]$,

Ta xác định được ma trận tham số $[a]$ của M4C không tổn hao tương ứng:

$$[A_n] = \frac{1}{\sqrt{\rho R_n}} \begin{bmatrix} \dot{p} \cos(\theta_1 + \varphi) & jZ_n \sin(\alpha_1 - \theta_1 - \varphi) \\ -j\sin(\theta_1 + \varphi) & Z_n \cos(\alpha_1 - \theta_1 - \varphi) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[A_t] = \frac{1}{\sqrt{p R_t}} \begin{bmatrix} Z_t \cos(\alpha_2 - \theta_2 - \psi) & jZ_n \sin(\alpha_1 - \theta_1 - \varphi) \\ j\rho \sin(\theta_2 + \psi) & \dot{p} \cos(\theta_2 + \psi) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

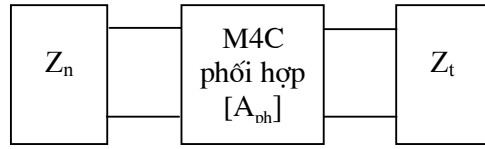
Trong đó: $\theta_1 = \arctg \frac{X_n}{p + R_n}$; $\theta_2 = \arctg \frac{X_t}{p + R_t}$

3.1.2. Phối hợp giữa các M2C tuyến tính.

Giả sử cần xác định ma trận tham số $[A]$ của M4C phối hợp để phối hợp giữa nguồn tín hiệu có tổng trở phức:

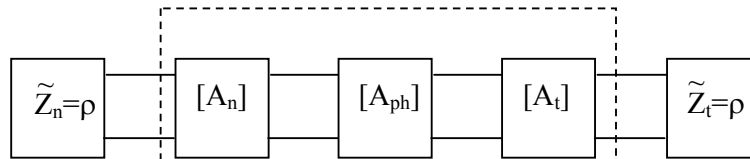
$Z_n = z_n e^{a_1} = R_n + jX_n$ với phụ tải $Z_t = z_t e^{a_2} = R_t + jX_t$ sao cho công suất

tác dụng truyền từ nguồn tín hiệu đến phụ tải đạt giá trị cực đại $P_t = P_{t_{\max}}$



Hình 3.6. M4C phối hợp

Thiết lập M2C nguồn và phụ tải dưới dạng nối các M2C hoà hợp có tổng trở phức $\tilde{Z}_n = \tilde{Z}_t = \rho$ và các M4C không tổn hao có các ma trận truyền đạt $[A_n], [A_t]$.



Hình 3.7. M2C nguồn và phụ tải nối M4C không tổn hao

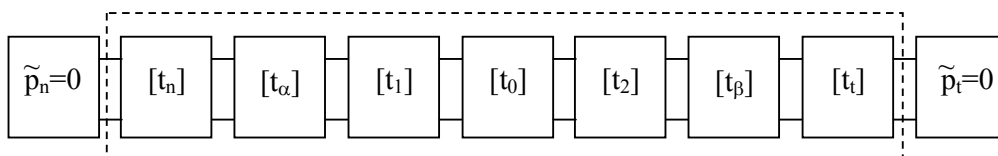
Gọi $[\tilde{a}]$ là ma trận truyền đạt của M4C được tạo thành từ ba M4C mắc liên thông với nhau, ta có : $[\tilde{A}] = [A_n][A_{ph}][A_t]$

$$[A_{ph}] = \frac{1}{\sqrt{\rho R_t}} \begin{bmatrix} Z_n \cos(\theta_1 + \theta_2 - \alpha_1 + \varphi) & jZ_n Z_t \sin(\alpha_1 + \alpha_2 - \theta_1 - \theta_2 - \varphi) \\ -j\rho \sin(\theta_1 + \theta_2 + \varphi) & Z_t \cos(\alpha_2 - \theta_1 - \theta_2 - \varphi) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Trong các biểu thức trên, φ là tham số pha tùy ý ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$).

3.2. Phối hợp giữa M4C với M2C nguồn và phụ tải.

Ta thiết lập M2C nguồn và phụ tải dưới dạng nối các M2C hoà hợp với các hệ số phản xạ $\tilde{P}_n = \tilde{P}_t = 0$ và các M4C không tổn hao với các ma trận truyền sóng $[t_n], [t_t]$ có kết cấu tương ứng còn M4C dưới dạng ghép liên thông giữa ba M4C với các ma trận truyền sóng $[t_1], [t_0], [t_2]$.



Hình 3.8. Phối hợp M4C với M2C nguồn và phụ tải.

Xác định được ma trận truyền sóng $[t_\alpha]$ và $[t_\beta]$ của các mạng phối hợp trên đầu vào và đầu ra của M4C $[t]$, đảm bảo phối hợp hoàn toàn M4C $[t]$ theo cả đầu vào và đầu ra:

$$[t_\alpha] = [[t_1][t_n]]^{-1} \quad (3.25)$$

$$[t_\beta] = [[t_1][t_2]]^{-1} \quad (3.26)$$

Thiết lập biểu thức của ma trận $[t_1], [t_n], [t_t], [t_2]$

Sau khi tính toán ta nhận được:

$$[t_\alpha] = \frac{1}{\sqrt{(1-|\dot{p}_{n0}|^2)(1-|\dot{p}_n|^2)}} \begin{bmatrix} e^{-j\varphi} - \dot{p}_n \dot{p}_{n0}^* e^{j\varphi} & \dot{p}_n e^{j\varphi} - \dot{p}_{n0} e^{-j\varphi} \\ \dot{p}_n^* e^{-j\varphi} - \dot{p}_{n0}^* e^{j\varphi} & e^{j\varphi} - \dot{p}_n \dot{p}_{n0} e^{-j\varphi} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$[t_\beta] = \frac{1}{\sqrt{(1-|\dot{p}_{t0}|^2)(1-|\dot{p}_t|^2)}} \begin{bmatrix} e^{-j\psi} - \dot{p}_t \dot{p}_{t0}^* e^{j\psi} & \dot{p}_{t0} e^{j\psi} - \dot{p}_t^* e^{-j\psi} \\ \dot{p}_{t0}^* e^{-j\psi} - \dot{p}_t^* e^{j\psi} & e^{j\psi} - \dot{p}_t \dot{p}_{t0} e^{-j\psi} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Trong các biểu thức trên, các tham số pha φ, ψ có thể chọn tùy ý $0 \leq \varphi, \psi \leq 2\pi$.

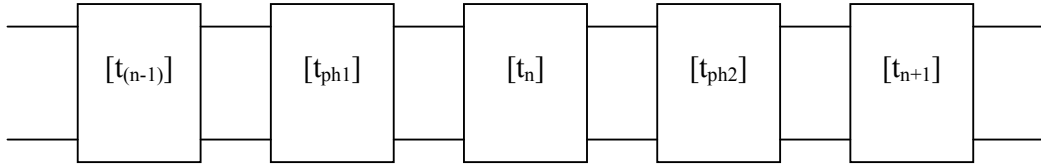
Ta xác định được ma trận tham số $[A_\alpha]$ và $[A_\beta]$ của M4C phối hợp tương ứng trên đầu vào và đầu ra của các M4C:

$$[A_\alpha] = \begin{bmatrix} H[\cos(\gamma + \varphi) + |\dot{p}_n| \cos(\gamma + \theta_1 + \varphi)] & jH_1[\sin(\alpha - \varphi) + |\dot{p}_n| \sin(\alpha - \varphi - \theta_1)] \\ -j[\sin(\gamma + \varphi) - |\dot{p}_n| \sin(\gamma + \theta_1 + \varphi)] & H_1[\cos(\alpha - \varphi) + |\dot{p}_n| \cos(\alpha - \varphi - \theta_1)] \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$[A_\beta] = \begin{bmatrix} Q[\cos(v - \psi) - |\dot{p}_t| \cos(v - \theta_2 - \psi)] & jQ[\sin(v - \psi) + |\dot{p}_t| \sin(v - \theta_2 - \psi)] \\ -jQ_1[\sin(\varepsilon + \psi) - |\dot{p}_t| \sin(\varepsilon + \theta_2 + \psi)] & Q_1[\cos(\varepsilon + \psi) + |\dot{p}_t| \cos(\varepsilon + \theta_2 + \psi)] \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

3.3. Phối hợp giữa các M4C

Giả sử cần phối hợp giữa M4C (n) với M4C (n-1) và M4C (n+1). Trong đó $[t_{ph1}]$ là M4C phối hợp giữa đầu ra M4C (n-1) với đầu vào M4C (n), $[t_{ph2}]$ là M4C phối hợp giữa đầu ra M4C (n) với đầu vào M4C (n+1). Ta có sơ đồ sau:



Hình 3.9. M4C phối hợp giữa M4C (n) với M4C (n-1) và M4C (n+1)

Ta thiết lập các M4C $[t_n]$, $[t_{n-1}]$, $[t_{n+1}]$ dưới dạng các M4C mắc liên thông với nhau như sau:

M4C $[t_n]$ gồm 3 M4C $[t_{1n}]$, $[t_{0n}]$, $[t_{2n}]$ mắc liên thông với nhau

M4C $[t_{n-1}]$ gồm 3 M4C $[t_{1(n-1)}]$, $[t_{0(n-1)}]$, $[t_{2(n-1)}]$ mắc liên thông với nhau
M4C $[t_{n+1}]$ gồm 3 M4C $[t_{1(n+1)}]$, $[t_{0(n+1)}]$, $[t_{2(n+1)}]$ mắc liên thông với nhau, M4C $[t_n]$ được phối hợp hoàn toàn theo đầu vào và đầu ra khi thỏa mãn điều kiện:

$$[t_{2(n-1)}][t_{ph1}][t_{1n}] = E \quad (3.33)$$

$$[t_{2n}][t_{ph2}][t_{1(n+1)}] = E \quad (3.34)$$

3.4. Tổng hợp các mạch phối hợp không tổn hao

Trên quan điểm lý thuyết M4C (M4C), các mạch phối hợp biến đổi tổng trở phụ tải Z_t thành tổng trở đầu vào có giá trị Z_v cho trước để đưa ra phương pháp xác định ma trận truyền đạt $[A]$ của các mạch phối hợp theo các giá trị của tổng trở phụ tải Z_t và tổng trở Z_{v0} cho trước.

3.4.1. Xác định ma trận truyền đạt $[A]$ của các mạch phối hợp

Giả sử cần xác định ma trận truyền đạt $[A]$ của mạch phối hợp để phối hợp giữa tổng trở phụ tải $Z_t = R_t + jX_t$ với tổng trở trong của nguồn tín hiệu $Z_n = R_n + jX_n$.

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{Atg\varphi}{R_n - R_t} & j \left[\frac{A(X_n - X_t)}{R_n - R_t} + B \right] tg\varphi \\ jtg\varphi & \frac{Atg\varphi}{R_n - R_t} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Thực hiện đặt $a_{12} = \operatorname{tg}\varphi = m$ thì sau khi thực hiện các biểu thức tương tự như trên, ta sẽ nhận được ma trận truyền đạt $[A]$ của mạch phối hợp đối xứng.

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{A \operatorname{tg}\varphi}{R_t |Z_n|^2 - R_n |Z_t|^2} & j \operatorname{tg}\varphi \\ \frac{j(R_n - R_t) \operatorname{tg}\varphi}{R_t |Z_n|^2 - R_n |Z_t|^2} & \frac{A \operatorname{tg}\varphi}{R_t |Z_n|^2 - R_n |Z_t|^2} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Sử dụng ma trận truyền đạt (3.12) thuận tiện khi tổng hợp các mạch phối hợp Hình T; còn ma trận truyền đạt - khi tổng hợp các mạch phối hợp Hình II.

Trong trường hợp mạch phối hợp là M4C bất kỳ (không đối xứng). Khi đó ma trận truyền đạt $[A]$ của mạch phối hợp có kết cấu:

$$[A] = \begin{bmatrix} -X_n \operatorname{tg}\varphi + R_n \sqrt{\frac{1}{R_n R_t} - \operatorname{tg}^2\varphi} & jA \sqrt{\frac{1}{R_n R_t} - \operatorname{tg}^2\varphi} - B \\ j \operatorname{tg}\varphi & X_t \operatorname{tg}\varphi + R_t \sqrt{\frac{1}{R_n R_t} - \operatorname{tg}^2\varphi} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Tương tự, sẽ xác định được kết cấu của ma trận truyền đạt của mạch phối hợp khi đặt $A_{12} = \operatorname{tg}\varphi = m$

3.4.2. Xác định các tham số vật lý của các mạch phối hợp

Khi chọn mạch phối hợp là M4C đối xứng Hình T, đối chiếu ma trận truyền đạt $[A]$ của mạch phối hợp với ma trận truyền đạt $[A]$ để xác định các tham số vật lý.

3.5. Kết luận chương 3

Kết quả chính đã thu được trong chương này là:

- Bằng việc phân tích và đưa ra cấu trúc tương đương của các M2C và M4C đã xác định ma trận của các mạch phối hợp để phối hợp giữa nguồn tín hiệu với M4C, giữa M4C và M4C và giữa đầu ra M4C với phụ tải, đảm bảo hệ thống truyền tín hiệu làm việc ổn định với hệ số khuếch đại lớn nhất cho phép. So với phương pháp kinh điển, phương pháp cấu trúc trình bày

trong luận án có ưu điểm là sự phối hợp được thực hiện đồng thời theo cả đầu vào và đầu ra, phối hợp các M4C có thể xác định các tham số riêng bằng thực nghiệm (đo đạc).

- Trong ma trận tham số riêng của mạch phối hợp là tồn tại tham số pha φ tùy ý ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$). Thay đổi tham số pha φ sẽ thay đổi tính chất hoặc tham số vật lý của mạch phối hợp từ đó dẫn tới thay đổi đặc tính truyền đạt cũng như các tham số khác của hệ thống.

- Đưa ra phương pháp tổng hợp các mạch theo ma trận tham số riêng đã biết. Phương pháp tổng hợp khá đơn giản, tuy nhiên phương pháp tổng hợp chỉ hạn chế với các mạch phối hợp 3 phần tử (mạch hình T và hình Π); song điều này phù hợp thực tế vì trong dải siêu cao tần, các nhà thiết kế mong muốn các phần tử mạch phối hợp càng ít càng tốt. Mặt khác cũng chỉ ra rằng, để tối ưu đặc tính truyền đạt của hệ thống truyền tín hiệu thì các phần tử của mạch phối hợp $n \geq 3$. Hơn nữa phương pháp tổng hợp 3 phần tử đã trình bày trong luận án; biết trước kết cấu của mạch thay đổi đặc tính truyền đạt chỉ cần thay đổi giá trị hoặc tính chất các phần tử, điều này dễ dàng thực hiện được trong thực tế.

CHƯƠNG 4 : MÔ PHỎNG TÍNH TOÁN PHÂN TÍCH VÀ TỔNG HỢP HỆ THỐNG TRUYỀN TÍN HIỆU .

4.1. Không gian năng lượng sóng trạng thái tín hiệu của mạch điện tuyến tính.

Trong M2C đã xem xét không gian năng lượng trạng thái tín hiệu của mạch điện tuyến tính, trong đó điện áp U_k , dòng điện i trên các cực của M2C là tọa độ của các véc tơ trạng thái tín hiệu \vec{v} . Song ở dải sóng siêu cao tần, quá trình truyền tín hiệu là quá trình truyền sóng

4.1.1. Đặc tính metric và các toán tử tuyến tính trong không gian sóng trạng thái tín hiệu của mạch điện tuyến tính.

Trong không gian sóng trạng thái tín hiệu ma trận Gram-ma J có kết cấu:

$$J = \begin{bmatrix} (\vec{e}_a, \vec{e}_a) & (\vec{e}_a, \vec{e}_b) \\ (\vec{e}_b, \vec{e}_a) & (\vec{e}_b, \vec{e}_b) \end{bmatrix}$$

Giả sử đặc tính của M4C được đặc trưng bởi ma trận truyền sóng chuẩn hoá t thiết lập mối liên hệ giữa sóng tới và sóng phản xạ trên đầu vào và đầu ra của M4C.

$$C_1 = tC_2 \quad (4.10)$$

ở đây $C_1 = [a_1 b_1]^T$; $C_2 = [b_2 a_2]^T$... các véc tơ ma trận cột của sóng tới và sóng phản xạ trên đầu vào và đầu ra của M4C.

$$[t] = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix}.$$

công suất tác dụng trên đầu vào P_1 và trên đầu ra P_2 của M4C được xác định bởi các biểu thức:

$$\begin{aligned} P_1 &= C_2^+ t^+ j t C_2 \\ P_2 &= C_1^+ (t j t^+)^{-1} C_1 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Trên quan điểm toán học, ma trận truyền sóng $[T]$ của M4C không tổn hao thực hiện phép biến đổi tọa độ của véc tơ trong không gian năng lượng trạng thái tín hiệu, không làm thay đổi độ dài véc tơ.

4.1.2. Điều kiện cực đại của hệ số truyền công suất của M4C tuyến tính bất kỳ.

Nếu trong không gian sóng năng lượng trạng thái tín hiệu, ta thực hiện các phép biến đổi mà không làm thay đổi độ dài véc tơ thì các giá trị riêng của ma trận đặc trưng là không thay đổi.

4.2. Mô phỏng tính toán tối ưu đặc tính truyền đạt của hệ thống truyền tín hiệu

4.2.1. Mô hình bài toán

Luận án trình bày kết quả nghiên cứu nghiên cứu ứng dụng lý thuyết M4C để giải bài toán tối ưu đặc tính truyền đạt của hệ thống truyền tín hiệu trong dải tần số Δf . Các ví dụ tính bằng số trong phần này được so sánh với phương pháp giải tích để đánh giá độ tin cậy của thuật toán cũng như chương trình tính toán hệ số truyền đạt công suất đã được mô tả trong luận án.

4.2.2. Thuật toán

Tính toán theo các tham số và biểu diễn đặc tính theo đồ thị, từ đó phân tích đánh giá đặc tính năng lượng tối ưu:

Xác định ma trận truyền đạt $[A]$ của mạch phối hợp để phối hợp giữa tổng trở phụ tải $Z_t = R_t + jX_t$ với tổng trở trong của nguồn tín hiệu $Z_n = R_n + jX_n$. Ta sử dụng tổng hợp các mạch phối hợp Hình T

Cho tham số pha φ biến thiên ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) sẽ làm thay đổi đặc tính truyền đạt của hệ thống truyền tín hiệu trong dải tần Δf trong vùng tần số lân cận tần số trung tâm f_0 của tín hiệu, sử dụng chương trình máy tính mô phỏng K_p trong dải tần Δf .

$$K_p = \frac{4R_e Z_n R_e Z_t}{|A_{11} Z_n + A_{12} + A_{21} Z_n Z_t + A_{22} Z_t|^2} \quad (4.17)$$

4.2.3. Chương trình bằng ngôn ngữ matlab

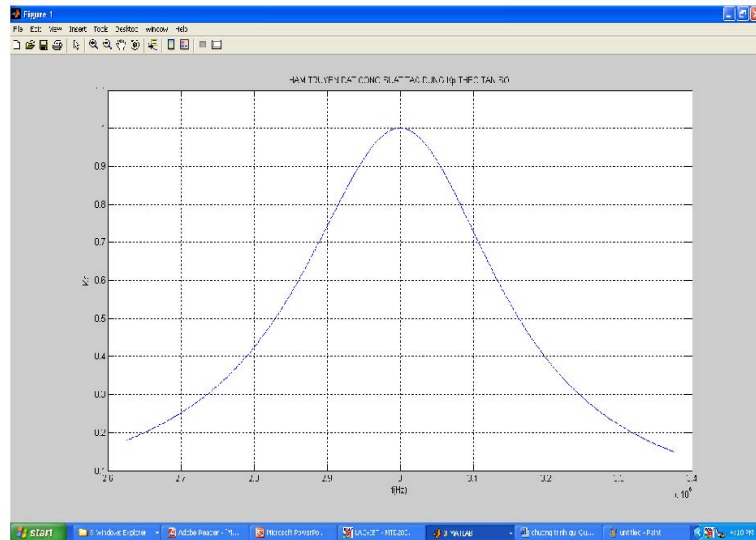
Chương trình được thực hiện ở phần phụ lục

4.2.4. Đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa K_p và tần số f

Kết quả chạy chương trình mô phỏng, ta thu được đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa hệ số truyền công suất K_p và tần số f hoặc ω ($\omega = 2\pi f$).

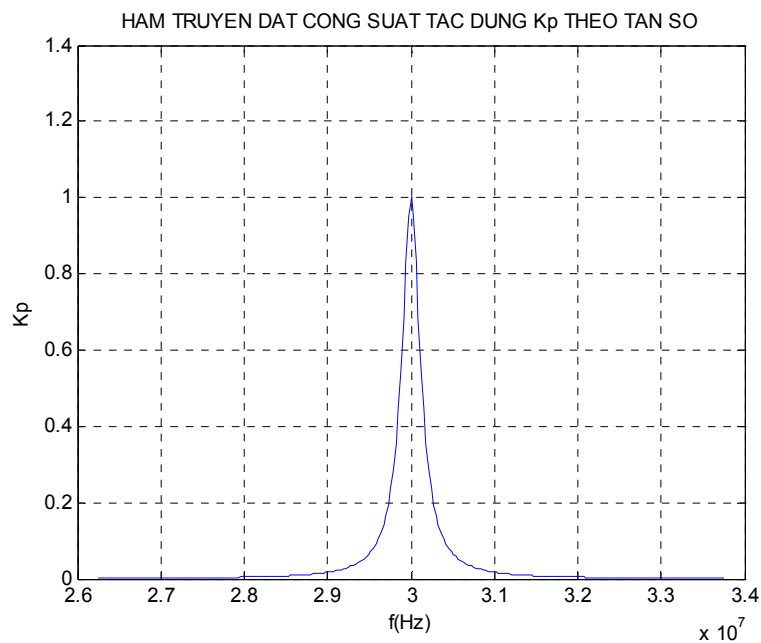
$$f_0 = 3 \cdot 10^6;$$

$$\text{phido} = 60;$$

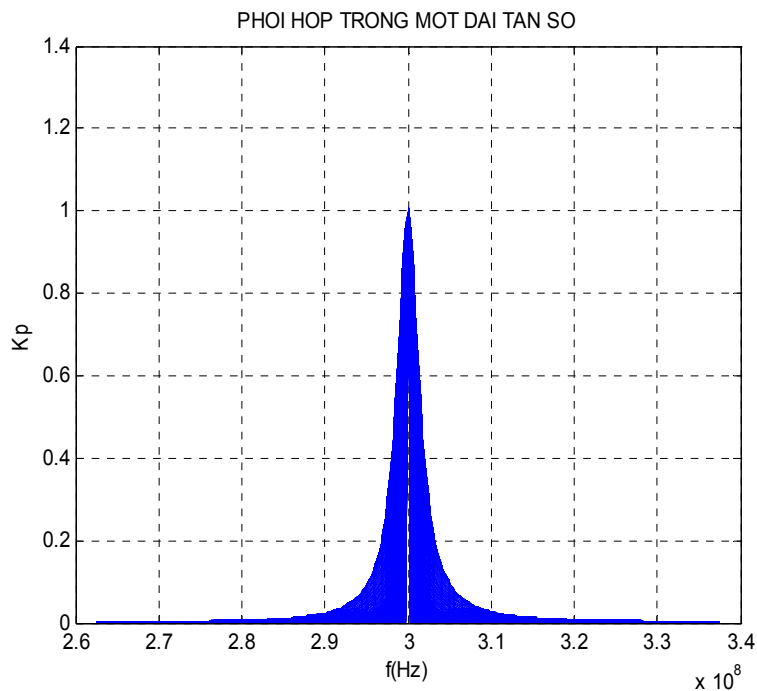
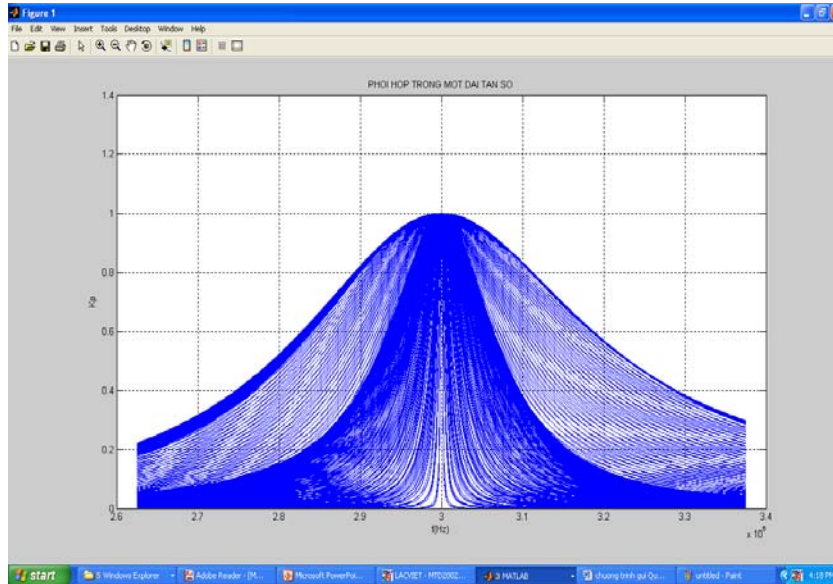


$$f_0 = 3 \cdot 10^7;$$

$$\text{phido} = 30$$



Phổ tần khi phi thay đổi từ $0^0 - 360^0$, $f_0=3 \cdot 10^7$;
 $f_0=3 \cdot 10^8$



Nhận xét đồ thị: Khi φ thay đổi trong khoảng $0 \leq \varphi \leq 360^0$ thì đặc tính hàm truyền đạt K_p thay đổi nhưng tại tần số luân việc f_0 (ví dụ trong bài

toán cụ thể ta đã xét $f_0 = 30M_z = 3.10^7 \text{ Hz}$) thì $K_p = 1$ tức là đã tối ưu đặc tính truyền đạt của hệ thống truyền tín hiệu trong dải tần số Δf .

Tham số pha φ biến thiên ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) sẽ làm thay đổi đặc tính truyền đạt của hệ thống truyền tín hiệu trong dải tần Δf trong vùng tần số lân cận tần số trung tâm f_0 của tín hiệu. Đặc tính tần thay đổi thông qua việc chọn tham số pha φ và dựa vào đó có thể đưa ra giải pháp chống nhiễu cho hệ thống truyền tín hiệu trong dải tần số Δf .

4.3. Kết luận chương 4

Kết quả chính được trình bày trong chương này là:

NCS đã đưa ra ứng dụng thực tế của phương pháp cấu trúc trong hệ thống truyền tín hiệu là ứng dụng không gian năng lượng sóng trạng thái tín hiệu của mạch điện tuyến tính để phân tích và tổng hợp hệ thống truyền tín hiệu. Trên quan điểm toán học, ma trận truyền sóng $[t]$ của M4C không tổn hao thực hiện phép biến đổi tọa độ của véc tơ trong không gian năng lượng trạng thái tín hiệu không làm thay đổi độ dài véc tơ.

NCS cũng trình bày kết quả nghiên cứu ứng dụng phương pháp cấu trúc để giải bài toán toán tối ưu đặc tính truyền đạt của hệ thống truyền tín hiệu trong dải tần số Δf . Tham số pha φ biến thiên ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) sẽ làm thay đổi đặc tính truyền đạt của hệ thống truyền tín hiệu trong dải tần Δf trong vùng tần số lân cận tần số trung tâm f_0 của tín hiệu. Đặc tính tần thay đổi thông qua việc chọn tham số pha φ và dựa vào đó có thể đưa ra giải pháp chống nhiễu cho hệ thống truyền tín hiệu trong dải tần số Δf .

Qua một số thí dụ mô phỏng đã chứng minh rằng khi thay đổi tham số pha φ có thể thay đổi dải thông của hệ thống. NCS đã viết chương trình tự động tính toán các mạch cần tổng hợp, đây cũng là điểm đạt được và là điểm mới của luận án.

KẾT LUẬN

Từ các kết quả đã nhận được trong luận án, có thể rút ra các kết luận sau:

1. Trên cơ sở coi mỗi mạch chức năng (các khối chức năng) trong hệ thống truyền tín hiệu là các M4C, còn hệ thống truyền tín hiệu là sự ghép nối liên thông giữa các M4C cho phép xác định được các tham số hay các đặc tính cơ bản của mạch và của hệ thống. Đưa ra cách xác định hệ số truyền đạt và điều kiện làm việc ổn định của mạch khuếch đại bán dẫn làm việc ở dải sóng siêu cao tần thông qua ma trận tán xạ S.

2. Trên cơ sở coi dòng điện, điện áp (hay sóng tới, sóng phản xạ) trên các cặp cực của M4C như là các thành phần của các véc tơ trong không gian năng lượng trạng thái tín hiệu, cho phép ứng dụng lý thuyết không gian tuyến tính để giải bài toán phân tích và tổng hợp mạch; đưa bài toán phối hợp hệ thống truyền tín hiệu về bài toán tổng quát phối hợp giữa các M2C và M4C và phối hợp giữa các M4C, đồng thời đã đưa bài toán xác định điều kiện truyền tải công suất tác dụng cực đại về bài toán xác định giá trị riêng của ma trận đặc trưng của hệ. Từ đây cho phép xác định điều kiện phối hợp đồng thời các M4C theo cả đầu vào và đầu ra cũng như xác định được ma trận tham số riêng của các mạch phối hợp.

3. Đưa ra phương pháp tổng hợp các mạch phối hợp (xác định các tham số vật lý của mạch phối hợp) theo ma trận tham số riêng đã biết. Cũng cần nhấn mạnh rằng trong ma trận tham số riêng của mạch phối hợp tồn tại tham số pha φ tùy ý ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$), thay đổi giá trị của tham số pha φ sẽ làm thay đổi giá trị cũng như tính chất của các phần tử dẫn tới thay đổi đặc tính truyền đạt của hệ và cho phép tối ưu hoá đặc tính truyền đạt của hệ thống trong dải tần Δf lân cận tần số trung tâm của tín hiệu (không thay đổi kết cấu cũng như số phần tử của mạch). Việc xác định mạch phối hợp tối

ưu có thể được thực hiện nhanh chóng và dễ dàng nhờ sự trợ giúp của máy tính.

4. Trong luận án đã viết chương trình tự động hoá quá trình giải bài toán phối hợp giữa các M2C và M4C cũng như xác định các mạch phối hợp tối ưu. Thực hành tính toán các tham số thực của hệ thống để khẳng định tính đúng đắn của phương pháp tính. Bằng thí dụ mô phỏng cho một số trường hợp cụ thể chứng minh cho tính đúng đắn của lý thuyết đã đưa ra rằng: Với kết cấu của mạch phối hợp không thay đổi nhưng thay đổi giá trị hoặc tính chất vật lý của các phần tử mạch phối hợp bằng cách thay đổi tham số pha φ có thể thay đổi tỉ số $\frac{\Delta f_{\max}}{\Delta f_{\min}}$ đến vài chục lần (Δf là độ rộng của dải phối hợp).