

Chương 1

VAI TRÒ CỦA MÔ PHỎNG

1.1. Mở đầu

Mức độ phức tạp của các hệ thống truyền thông hiện đại là động lực để sử dụng mô phỏng. Tính phức tạp là do: (i) Cấu trúc phức tạp của hệ thống thông tin hiện đại; (ii) Môi trường trong đó các hệ thống này được triển khai. Yêu cầu các hệ thống truyền thông hiện đại hoạt động tốc độ cao với độ rộng băng tần hạn chế, công suất hạn chế. Các yêu cầu đối lập này dẫn đến định dạng xung, điều chế phức tạp cùng với mã hoá kiểm soát lỗi và tăng mức độ xử lý tín hiệu ở máy thu; (iii) Các yêu cầu về đồng bộ cũng trở nên chặt chẽ hơn tại tốc độ cao dẫn đến máy thu trở nên phức tạp hơn. Trong khi việc phân tích các hệ thống truyền thông tuyến tính làm việc trong môi trường kênh AWGN là đơn giản, thì hầu hết các hệ thống hiện đại làm việc trong các môi trường khắc nghiệt hơn. Các hệ thống nhiều chặng cần có các bộ khuếch đại *phi tuyến*. Các hệ thống vô tuyến tế bào thường làm việc trong môi trường nhiễu nghiêm trọng cùng với các ảnh hưởng của che chắn và đa đường gây thăng giáng tín hiệu thu. Vì vậy, các hệ thống phức tạp và các yêu cầu đối nghịch nhau dẫn đến bài toán thiết kế và phân tích không còn khả thi với các kỹ thuật truyền thống.

Sự phát triển của các máy tính số về khả năng xử lý, giá thành, tính thân thiện sử dụng... làm cho việc phân tích, thiết kế được trợ giúp bởi máy tính là rất hữu hiệu. Phát triển các gói phần mềm cho các hệ thống truyền thông hay viễn thông đã thúc đẩy việc sử dụng mô phỏng trong lĩnh vực này. Theo đó, gia tăng tính phức tạp của hệ thống đồng nghĩa với gia tăng mức độ tính toán. Trong nhiều trường hợp, khả năng tính toán phù hợp trực tiếp dẫn đến nhiều cấu trúc xử lý tín hiệu phức tạp mà tạo thành các khối chức năng của các hệ thống truyền thông hiện đại.

Tăng trưởng công nghệ máy tính cũng đồng nghĩa với tăng trưởng nhanh về lý thuyết mô phỏng. Kết quả, cần có các công cụ và các phương pháp luận để ứng dụng thành công mô phỏng cho các bài toán phân tích và thiết kế.

Động cơ thúc đẩy quan trọng dẫn đến dùng mô phỏng: (i) Là công cụ quý giá mang lại sự hiểu biết sâu sắc tính cách hệ thống; (ii) Triển khai mô phỏng phù hợp giống như thực thi một phòng thí nghiệm hệ thống; (iii) Dễ dàng đo kiểm tại các điểm khác nhau của hệ thống; (iv) Dễ dàng quản lý kiểm soát việc nghiên cứu tham số, vì các giá trị tham số như: độ rộng băng bộ lọc, SNR có thể bị thay đổi và sẽ ảnh hưởng lên hiệu năng hệ thống một cách nhanh chóng và quan sát được; (v) Dễ dàng tạo ra các dạng sóng trong miền thời gian và miền tần số như: phổ tín hiệu, biểu đồ mắt, hình sao tín hiệu cũng như các hiển thị khác; (vi) Dễ dàng so sánh và đánh giá các kết quả.

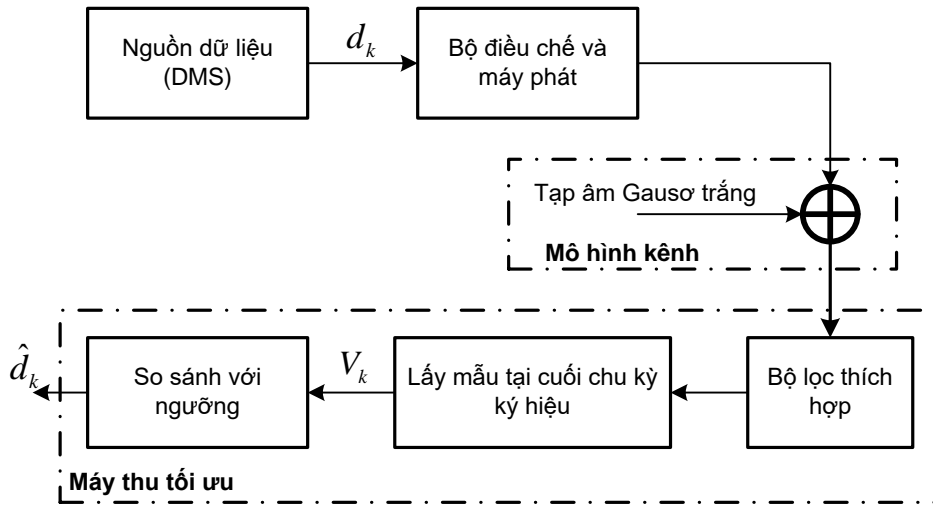
1.2. Minh họa mức độ phức tạp

Mức độ phức tạp của hệ thống truyền thông thay đổi rất rộng. Để được tường minh, ta xét ba hệ thống truyền thông với mức độ phức tạp tăng dần. Ta sẽ thấy rõ, hệ thống đầu tiên

không cần thiết mô phỏng; hệ thống thứ hai việc mô phỏng không nhất thiết phải có nhưng nếu có là hữu hiệu; hệ thống thứ ba, cần thiết phải thực hiện mô phỏng để kiểm soát quản lý nghiên cứu hiệu năng một cách chi tiết.

1.2.1. Hệ thống để xử lý theo phép giải tích

Một hệ thống truyền thông đơn giản nhất được minh họa ở hình 1.1.



Hình 1.1: Hệ thống truyền thông xử lý được theo phép giải tích

Nguồn dữ liệu (DMS): Khối nguồn dữ liệu tạo ra chuỗi các ký hiệu rời rạc d_k , được coi là các phần tử từ một thư viện ký hiệu hữu hạn. Chẳng hạn, với hệ thống truyền thông nhị phân gồm hai ký hiệu $\{0, 1\}$. Ngoài ra, nguồn được coi là *không nhớ* nghĩa là ký hiệu thứ k được tạo ra từ nguồn độc lập với tất cả các ký hiệu khác được tạo ra từ nguồn đó. Nguồn dữ liệu thỏa mãn hai tính chất này được gọi là nguồn không nhớ rời rạc DMS.

Bộ điều chế và máy phát: Vai trò của bộ điều chế là sắp xếp các ký hiệu nguồn thành các dạng sóng, mỗi dạng sóng thể hiện cho mỗi ký hiệu nguồn. Chẳng hạn, hệ thống truyền thông nhị phân có hai dạng sóng có thể được tạo ra từ bộ điều chế $\{s_1(t), s_2(t)\}$. Trường hợp này, máy phát được giả định chỉ khuếch đại tín hiệu đầu ra bộ điều chế sao cho các tín hiệu từ bộ điều chế được phát xạ với năng lượng mong muốn trên bit.

Mô hình kênh: Ở dạng tổng quát, việc mô hình hóa chính xác kênh vô tuyến là phần khó nhất của hệ thống. Tuy nhiên, ở đây ta đơn giản hóa, kênh chỉ là cộng tạp âm vào tín hiệu truyền qua nó. Tạp âm này cũng được giả thiết rằng có mật độ phổ công suất PSD không đổi trên toàn bộ dải tần. Tạp âm thỏa mãn tính chất PSD không đổi được coi là tạp âm *trắng*. Biên độ tạp âm cũng được giả định là có hàm mật độ xác suất phân bố *Gausơ*. Kênh trong đó tạp âm là phân bố Gausơ, trắng, cộng được gọi là kênh AWGN. Nói cách khác kênh AWGN là kênh thỏa mã ba tính chất đề cập trên.

Máy thu tối ưu: Chức năng của máy thu là quan trắc tín hiệu vào, từ quan trắc này tạo ra một ước tính \hat{d}_k của tín hiệu dữ liệu gốc d_k . Máy thu được minh họa ở hình 1.1 được xem là

máy thu tối ưu vì việc thực hiện ước tính ký hiệu làm giảm thiểu xác suất lỗi P_E . Thấy rõ từ lý thuyết truyền thông số cơ bản, máy thu tối ưu cho hệ thống được mô tả ở trên (tín hiệu nhị phân trong môi trường kênh AWGN) gồm một bộ lọc thích hợp (hoặc máy thu tương quan) thực hiện quan trắc tín hiệu trong một chu kỳ ký hiệu. Đầu ra bộ lọc thích hợp được lấy mẫu tại thời điểm cuối của chu kỳ ký hiệu để tạo ra giá trị V_k . V_k là một biến ngẫu nhiên (vì kênh tác động vào tín hiệu truyền qua nó ở dạng toán tử cộng, phân bố Gauss, mọi tần số) và được so sánh với ngưỡng T . Nếu $V_k > T$, thì quyết định là ký hiệu 1, ngược lại quyết định là ký hiệu 0.

Ta coi hệ thống này là hệ thống xử lý được theo phép giải tích vì theo lý thuyết truyền thông cơ bản, việc phân tích hệ thống được thực hiện dễ dàng. Chẳng hạn, xác suất lỗi được tìm thấy là:

$$P_E = Q\left(\sqrt{k \frac{E_s}{N_0}}\right) \quad (1.1)$$

Trong đó E_s thể hiện năng lượng trung bình được tính toán trong chu kỳ ký hiệu tương ứng với tập các dạng sóng $\{s_1(t), s_2(t)\}$, và N_0 là mật độ phổ công suất một phía của tạp âm kênh cộng. Tham số k được xác định bởi tương quan của các dạng sóng $\{s_1(t), s_2(t)\}$. Ví dụ: với truyền dẫn FSK, thì dạng sóng $\{s_1(t), s_2(t)\}$ là các hình **sin** có tần số khác nhau và công suất bằng nhau. Giả sử tần số được chọn chính xác thì các tín hiệu này không tương quan nhau và $k = 1$. Đối với PSK, thì các tín hiệu được dùng để truyền dẫn dữ liệu được coi là hình sin có tần số và công suất bằng nhau nhưng các pha ban đầu khác nhau. Nếu sự khác nhau về pha là π radian sao cho $s_2(t) = -s_1(t)$ thì các tín hiệu đối tượng tương quan và $k = 2$.

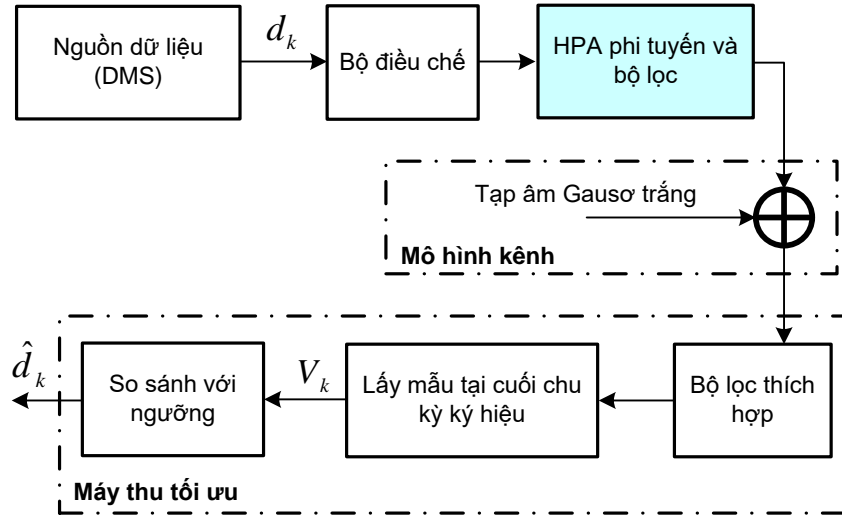
Hiệu năng hệ thống: Dễ dàng xác định được hiệu năng của hệ thống được cho ở hình 1.1 bằng các kỹ thuật phân tích truyền thống. Vì vậy, ta có thể phân loại hệ thống thuộc loại hệ thống xử lý được theo phép giải tích. *Tại sao hệ thống này xử lý được theo phép giải tích?* Vì 03 lý do cơ bản sau: (i) Kênh AWGN và máy thu tuyến tính. Theo đó, vì tạp âm là Gauss và bộ lọc thích hợp là hệ thống tuyến tính, nên giá trị quyết định V_k là một biến ngẫu nhiên Gauss vì vậy ta có thể tính BER theo phép giải tích là một hàm của các tham số bộ lọc máy thu, việc xác định các giá trị của các tham số này dẫn đến BER cực tiểu. Nhiều nhân tố dẫn đến hệ thống được cho ở hình 1.1 là hệ thống xử lý được theo phép giải tích. Các nhân tố này gắn liền việc đơn giản hoá trong quá trình lập mô hình hệ thống (do các giả định hay điều kiện xét...); (ii) Nguồn dữ liệu là không nhớ (thực tế nó có thể là đúng hoặc không đúng); (iii) Giả thiết việc đồng bộ ký hiệu chính xác vì vậy biết chính xác thời điểm bắt đầu và kết thúc của các ký hiệu dữ liệu. Giả định này cho phép giá trị quyết định V_k được trích ra một cách chính xác.

Vậy mô phỏng có quan trọng trong hệ thống xử lý được theo phép giải tích không? Câu trả lời là có. Vì hệ thống được cho ở hình 1.1 sẽ là một khối cơ bản của hệ thống phức tạp hơn. Mã chương trình mô phỏng có thể được phát triển, nâng cấp cho hệ thống phức tạp hơn. Thành quả mô phỏng dễ dàng được thừa nhận vì việc phân tích hệ thống đó là dễ hiểu. Tại đây, theo yêu cầu của hệ thống trong điều kiện nghiên cứu cụ thể, để mô hình hóa hệ thống một cách chính xác cần phải biến đổi các khối nguồn dữ liệu, bộ điều chế, kênh, máy thu cho phù hợp.

Ngoài ra, các phân hệ (hệ thống con) khác khi cần có thể được đưa thêm vào mô hình mô phỏng đó. Do tiếp tục nhiệm vụ phát triển mô hình mô phỏng từ hệ thống đó, nên có thể tin tưởng rằng điểm bắt đầu là đúng.

1.2.2. Hệ thống khó xử lý theo phép giải tích

Xét hệ thống ở mức độ phức tạp hơn. Theo đó, ta mở rộng mức độ phức tạp hệ thống hình 1.1 thành hệ thống được cho ở hình 1.2 bằng cách thêm khối khuếch đại công suất cao phi tuyến HPA và bộ lọc ở máy phát.



Hình 1.2: Hệ thống truyền thông khó xử lý theo phép giải tích

Bộ khuếch đại phi tuyến: Hiệu quả công suất của các bộ khuếch đại phi tuyến cao hơn nhiều so với bộ khuếch đại tuyến tính vì vậy thường được dùng trong môi trường công suất bị hạn chế như: các ứng dụng không gian vũ trụ, các hệ thống thông tin di động ở đó công suất pin phải được duy trì. Do tính phi tuyến gây ra méo điều chế ký sinh và tạo hài. Hậu quả làm nở rộng phổ tín hiệu vào trong khi đó bộ khuếch đại tuyến tính bảo tồn phổ tín hiệu vào. Bộ lọc làm giảm bớt hài và méo điều chế ký sinh (do tính phi tuyến gây ra) nhưng lại gây ra *tán thời* tín hiệu. Theo đó, tín hiệu được lọc này không còn bị giới hạn về thời gian so với chu kỳ ký hiệu nữa, dẫn đến giao thoa giữa các ký hiệu ISI.

Hiệu năng BER hệ thống: Hậu quả của ISI làm cho xác suất lỗi của ký hiệu thứ i phụ thuộc vào một hoặc nhiều ký hiệu trước đó. Số lượng các ký hiệu trước đó phải được tính đến trong quá trình giải điều chế ký hiệu thứ i này (lưu ý tính có nhớ của hệ thống). Cũng vậy, nếu xác suất lỗi ký hiệu thứ i phụ thuộc vào k ký hiệu trước đó thì ta tính đại lượng:

$$\Pr\{E_i | d_{i-1} d_{i-2} \dots d_{i-k}\}$$

Trường hợp nhị phân, có 2^k chuỗi khác nhau có độ dài k . Nếu xác suất xuất hiện mỗi ký hiệu dữ liệu $\{0,1\}$ bằng nhau thì xác suất lỗi của ký hiệu thứ i là:

$$P_E = \frac{1}{2^k} \sum_{d_{i-1}=0}^1 \sum_{d_{i-2}=0}^1 \dots \sum_{d_{i-k}=0}^1 \Pr\{E_i | d_{i-1} d_{i-2} \dots d_{i-k}\} \quad (1.2)$$

Nói cách khác, cần phải tính 2^k xác suất lỗi khác nhau, với mỗi xác suất lỗi phụ thuộc vào một trong 2^k chuỗi độ dài k trước đó và lấy trung bình k kết quả. Vì kênh được giả định là kênh AWGN, nên mỗi xác suất lỗi trong 2^k xác suất lỗi này là một hàm Q Gausơ. Tuy dễ hiểu, nhưng khó tính toán đối số của mỗi hàm Q vì vậy thường dùng mô phỏng.

Hệ thống được minh họa ở hình 1.2 có tính chất quan trọng là dễ phân tích. Lưu ý rằng hệ thống là tuyến tính do kênh AWGN (hệ thống là tuyến tính được xét từ điểm tap âm được phun vào tới điểm xuất hiện V_k). Vì vậy, con số thống kê V_k thường có dạng:

$$V_k = S_k + I_k + N_k \quad (1.3)$$

Trong đó I_k , S_k là thành phần do giao thoa giữa các ký hiệu và tín hiệu mang tin, và N_k là thành phần do tạp âm kênh. Vì vậy, nếu tạp âm kênh là Gausơ thì N_k là biến ngẫu nhiên Gausơ (lưu ý chuyển đổi tuyến tính của biến ngẫu nhiên Gausơ). Ngoài ra, V_k là biến ngẫu nhiên Gausơ có cùng phương sai với N_k nhưng giá trị trung bình là $S_k + I_k$ (cả hai đều là tất định). Có thể dễ dàng tìm được giá trị trung bình của V_k . Phương sai của V_k được xác định từ mật độ phổ công suất của kênh tạp âm và độ rộng băng thông tạp âm tương đương. Biết hàm mật độ xác suất pdf của V_k , dễ dàng tìm được xác suất lỗi. Tóm lại, dễ dàng tìm được hàm mật độ xác suất pdf của V_k ngay cả khi hệ thống là phi tuyến vì tạp âm không qua phần tử phi tuyến của hệ thống (chỉ có HPA là phi tuyến và tap âm do kênh).

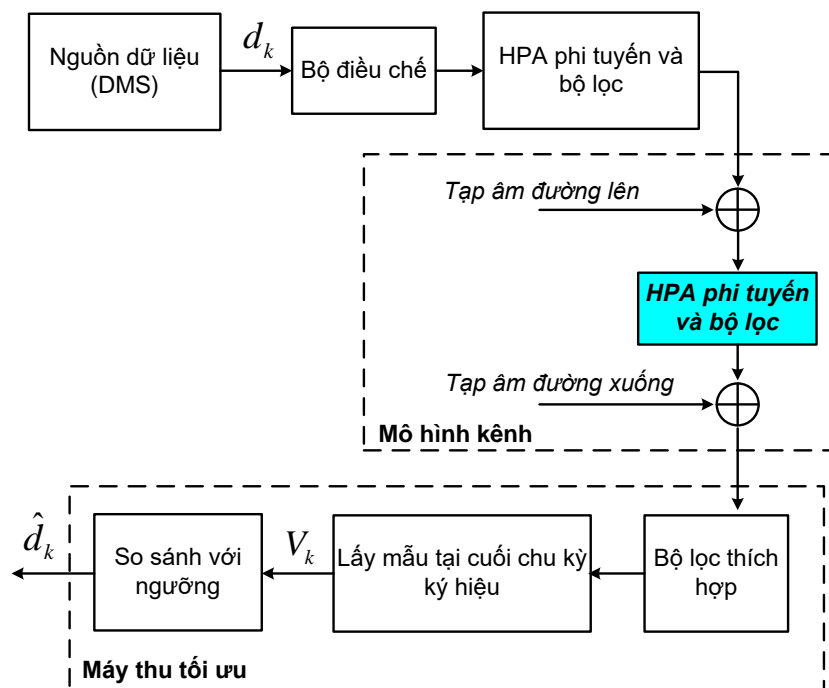
Trường hợp cụ thể này, do tạp âm chỉ đi qua phần tuyến tính của hệ thống, nên có ảnh hưởng quan trọng đến phương pháp luận mô phỏng. Vì tạp âm không qua phần tử phi tuyến, nên nhanh chóng xác định được trung bình của V_k bằng mô phỏng phi tạp âm. Phương sai của V_k có thể xác định theo phép giải tích, kết quả là biết được pdf của V_k và dễ dàng xác định được xác suất lỗi. Các khái niệm này được kết hợp trong kỹ thuật mô phỏng một cách nhanh chóng và đơn giản. Kết quả là phương pháp bán giải tích (nghĩa là việc phân tích và mô phỏng được kết hợp với nhau), dẫn đến mô phỏng rất nhanh, vì vậy sẽ là công cụ rất quan trọng và là chủ đề của các chương sau.

1.2.3. Hệ thống không thể xử lý theo phép giải tích

Hệ thống được minh họa ở hình 1.3 được coi là hệ thống không thể xử lý theo phép giải tích, là mô hình đơn giản của hệ thống thông tin vệ tinh hai chặng. Bộ phát đáp vệ tinh được mô hình hóa như là bộ khuếch đại công suất cao HPA phi tuyến và bộ lọc thực hiện khử méo hài ngoài băng do tính phi tuyến của HPA gây ra. So sánh hình 1.2 và hình 1.3, chúng khá giống nhau. Trường hợp này, mô hình kênh vệ tinh bao gồm hai nguồn tạp âm (tạp âm đường lên và tạp âm đường xuống). *Vấn đề* là tạp âm ở máy thu gồm tạp âm đường xuống, và tạp âm đường lên đi qua bộ HPA *phi tuyến*. Thậm chí coi rằng cả tạp âm đường lên và đường xuống đều là phân bố Gausơ, nhưng vẫn rất khó xác định hàm pdf của tạp âm máy thu. Từ hình vẽ cho thấy, dễ dàng mô hình hóa tạp âm đường xuống vì nó chỉ qua phần *tuyến tính* của hệ thống

nhưng tạp âm đường lên rất khó xác định vì nó phải qua HPA *phi tuyến*. Dù là tạp âm đường lên là phân bố Gausơ nhưng pdf của nó tại đầu vào máy thu không còn là phân bố Gausơ nữa. Theo đó, việc xác định pdf của V_k là rất khó. Vì vậy, mô phỏng là công cụ thiết yếu cho các loại hệ thống này.

Phạm vi các hệ thống được xét trong phần này là rất hẹp. Các hệ thống được chọn chỉ nhằm mục đích minh họa: tăng mức độ phức tạp dẫn đến mô phỏng. Rất nhiều hệ thống hiện nay thuộc loại hệ thống không thể xử lý được bằng giải tích. Ví dụ các hệ thống thông tin di động làm việc trong môi trường đa đường và nhiễu cao. Việc mô phỏng luôn cần thiết để phân tích chi tiết các hệ thống như vậy.



Hình 1.3: Hệ thống truyền thông không thể xử lý theo phép giải tích

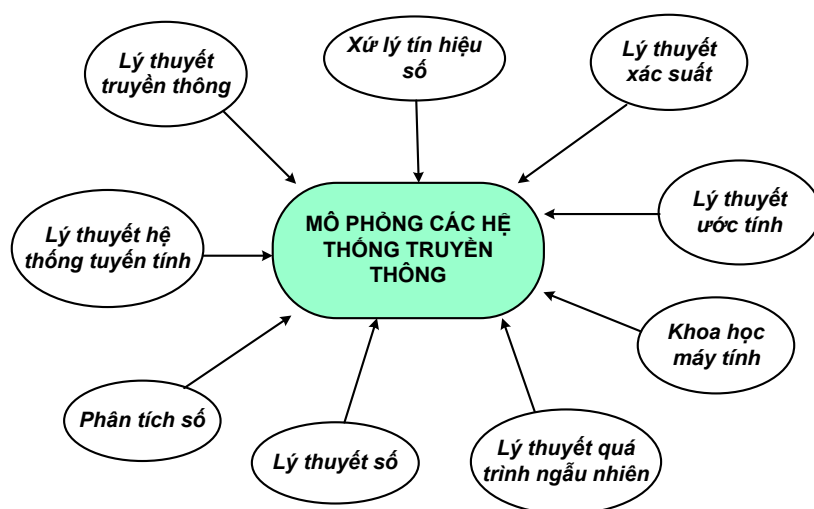
1.3. Các mặt đa kỷ luật của mô phỏng

Trước những năm 1970 bài toán mô phỏng thường được giải quyết theo cách thiên về dạng đặc biệt. Phương pháp luận để phát triển mô phỏng và các nguồn lỗi xuất hiện trong mọi chương trình mô phỏng không được hiểu một cách đầy đủ. Hơn 20 năm qua, cộng đồng nghiên cứu đã tạo ra một khối lượng lớn kiến thức, tạo ra phương pháp luận để phát triển mô phỏng cũng như việc thống nhất về lý thuyết để giải quyết nhiều vấn đề nảy sinh trong quá trình triển khai chương trình mô phỏng. Theo đó, việc dùng mô phỏng như là công cụ giải tích cần thiết để hiểu và hiểu sâu sắc nhằm triển khai mô phỏng khả tin. Cần phải xây dựng khối lượng lớn kiến thức tích hợp từ nhiều tài liệu trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Mặc dù chưa được thấu đáo nhưng 09 lĩnh vực nghiên cứu quan trọng ảnh hưởng đến quá trình nghiên cứu về mô phỏng

được mô tả ở hình 1.4. Ta xét ngắn gọn 09 lĩnh vực này nhằm rõ hơn về mối quan hệ của chúng với khoa học mô phỏng.

Các khái niệm về *lý thuyết hệ thống tuyến tính* cho ta các kỹ thuật để xác định các quan hệ vào/ra của hệ thống tuyến tính, cho phép trình bày mô hình hệ thống trong miền thời gian ở dạng hàm đáp ứng xung kim hệ thống và miền tần số ở dạng hàm truyền đạt hệ thống cũng như việc xây dựng nền tảng cho nhiều vấn đề.

Hiển nhiên, kiến thức *lý thuyết truyền thông* là rất quan trọng. Cấu trúc hệ thống, đặc tính hoạt động của các phân hệ (bộ giải điều chế, bộ cân bằng, chi tiết hóa các mô hình kênh...) phải được hiểu rõ trước khi triển khai mô phỏng. Khi sử dụng mô phỏng để xác định các giá trị của tham số hệ thống, cần phải lưu ý đến dải giá trị của nó có ý nghĩa thực tế trước khi triển khai mô phỏng. Cần phải có những hiểu biết sâu sắc về tính cách hệ thống để đảm bảo hoạt động mô phỏng chính xác và kết quả hợp lý.



Hình 1.4: Các lĩnh vực ảnh hưởng lên nghiên cứu mô phỏng các hệ thống truyền thông

Các công cụ của *xử lý tín hiệu số* (DSP) được dùng để triển khai các giải thuật, từ đó xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống truyền thông. Mô hình mô phỏng này thường bao gồm một số phép lấy xấp xỉ rời rạc của các phần tử hệ thống liên tục, cần có kiến thức về xử lý tín hiệu số để hiểu và đánh giá bản chất của các phép lấy xấp xỉ này. Thực tế, mỗi khối chức năng trong mô hình mô phỏng là một hoạt động DSP, vì vậy các công cụ của DSP cho ta các kỹ thuật thực hiện mô phỏng.

Giải tích số có quan hệ chặt chẽ với DSP, nhưng lưu ý tách biệt vì nó là phần kiến thức cũ hơn. Nhiều kỹ thuật kinh điển như tích phân số, nội suy đa thức, phù hợp hóa đồ thị đều có nguồn gốc trong giải tích số.

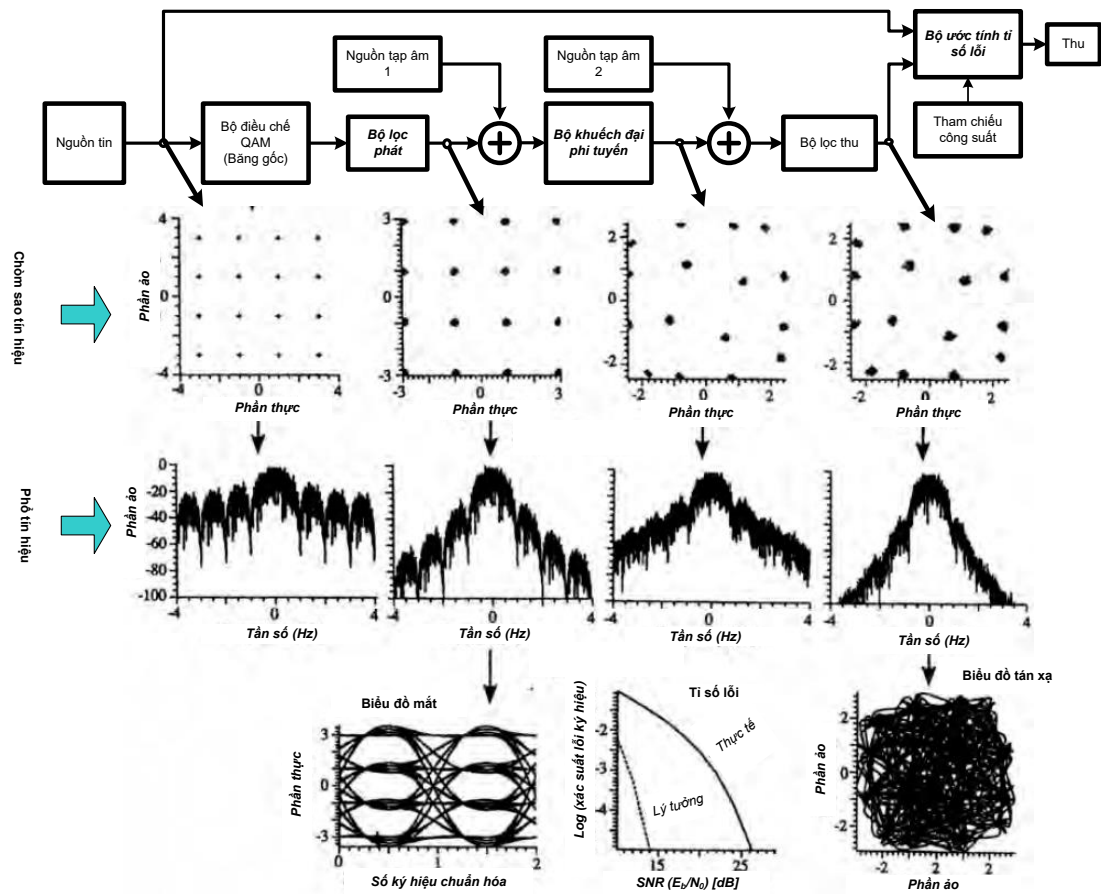
Các khái niệm về *xác suất* cũng là nền tảng căn bản cho nghiên cứu. Việc đánh giá hiệu năng hệ thống truyền thông thường được biểu diễn trong các thuật ngữ xác suất. Chẳng hạn: khi đề cập xác suất lỗi bit hay xác suất lỗi ký hiệu trong hệ thống truyền thông số; khi xét bài toán đồng bộ, ta quan tâm xác suất lỗi pha vượt quá một mức cho trước. Lý thuyết xác suất cơ

bản cho ta khái niệm về biến ngẫu nhiên và hàm mật độ xác suất. Kiến thức về hàm mật độ xác suất cơ bản cho phép ta tính toán các đại lượng như đã đề cập phần trên. Phần sau ta sẽ trình bày rõ, kết quả của nhiều mô phỏng (được gọi là các mô phỏng ngẫu nhiên (stochastic)) là biến ngẫu nhiên điển hình và phương sai của nó thường đánh giá tính hữu hiệu và tính chính xác thống kê của mô phỏng.

Trong nhiều trường hợp, dạng sóng tín hiệu và tạp âm được xử lý bởi mô phỏng được coi là các hàm mẫu của một quá trình ngẫu nhiên. Việc triển khai các thuật toán để tạo dạng sóng có các thuộc tính thống kê phù hợp cần có kiến thức quá trình ngẫu nhiên cơ bản, nó đặc biệt có ý nghĩa khi triển khai các mô hình mô phỏng kênh. Lý thuyết quá trình ngẫu nhiên cho ta các công cụ để mô tả các quá trình này trong miền thời gian (ví dụ hàm tự tương quan), và trong miền tần số (ví dụ mật độ phổ công suất). Ta cũng đề cập nhiều ứng dụng khác của lý thuyết quá trình ngẫu nhiên.

Cần hiểu sơ lược khái niệm *lý thuyết số*, nó cho ta các công cụ để triển khai các bộ tạo số ngẫu nhiên. Các bộ tạo số ngẫu nhiên này là các khối cơ bản của bộ tạo dạng sóng để biểu diễn các chuỗi số, dạng sóng tạp âm, pha đỉnh tín hiệu, nhiễu ngẫu nhiên...

Khái niệm cơ bản về *khoa học máy tính* cũng sẽ hữu hiệu. Ví dụ: độ dài từ mã, khuôn dạng từ mã được dùng để biểu diễn các mẫu tín hiệu, sẽ ảnh hưởng đến tính chính xác của mô phỏng. Việc chọn ngôn ngữ cũng quan trọng khi triển khai các bộ mô phỏng thương mại. Bộ nhớ khả dụng, tổ chức nhớ sẽ ảnh hưởng cách thức dữ liệu và lệnh được qua các phần của mô phỏng. Các yêu cầu về đồ họa và dung lượng sẽ xác định dạng sóng được hiển thị như thế nào và sẽ ảnh hưởng quá trình truyền tải mã chương trình mô phỏng từ máy tính này đến máy tính khác.



Hình 1.5: Minh họa mô phỏng mức dạng sóng cho một hệ thống truyền thông điển hình

Các công cụ và các khái niệm về lý thuyết ước tính cho phép định lượng tính hiệu quả của kết quả mô phỏng. Kết quả mô phỏng ngẫu nhiên là một biến ngẫu nhiên. Mỗi khi thực hiện mô phỏng sẽ tạo ra một giá trị của biến ngẫu nhiên đó (lưu ý: biến ngẫu nhiên giá trị thực là một hàm của giá trị thực), biến ngẫu nhiên này tạo thành bộ ước tính cho đại lượng cần được ước tính. Một cách điển hình, tất cả các giá trị được tạo ra bởi bản sao của mô phỏng sẽ khác nhau. Việc mô phỏng là hữu hiệu nhất khi bộ ước tính (nó được tạo ra bởi mô phỏng) là không chệch và kiên định. Ước tính không chệch là ước tính trong đó giá trị trung bình của ước tính là một đại lượng đo (đại lượng đo kiểm thực tế). Đây là cách nói khác về việc trung bình hóa các ước tính được tạo ra bởi mô phỏng là chính xác. Rõ ràng đây là một thuộc tính mong muốn. Ước tính kiên định là ước tính mà phương sai của nó giảm khi thời gian mô phỏng tăng. Nói cách khác, nếu thực hiện đo 100 lần độc lập về độ cao của một người và lấy trung bình kết quả, ta mong đợi kết quả chính xác hơn so với trường hợp đo một lần. Tổng quát, lý thuyết ước tính cho ta các công cụ giải tích cần thiết để đánh giá mức độ khả tin của các kết quả mô phỏng.

Tóm tắt ước tính tỉ số lỗi thông qua mô phỏng bao gồm các bước cơ bản sau:

- Tạo các giá trị mẫu của quá trình đầu vào (dạng sóng).
- Xử lý các mẫu thông qua mô hình và tạo các mẫu đầu ra.

- Ước tính tỉ số lỗi bằng cách so sánh các giá trị được mô phỏng của chuỗi đầu vào và dạng sóng đầu ra.

Một minh họa cho mô phỏng mức dạng sóng được cho ở hình 1.5, giúp trực quan hóa các tín hiệu được mô phỏng tại các điểm đặc trưng của hệ thống.

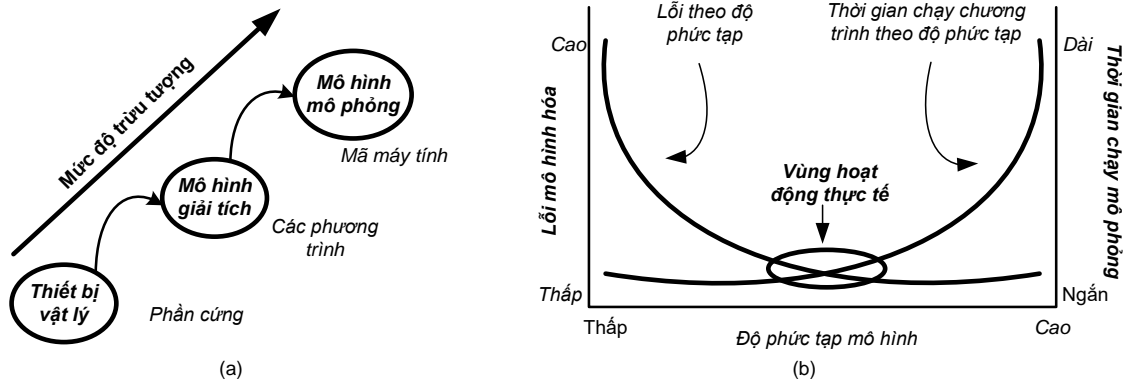
Các vấn đề được tóm lược ở trên không có hàm ý làm cho việc nghiên cứu mô phỏng trở nên nặng nề mà đơn giản chỉ để thấy rằng việc mô phỏng là một lĩnh vực nghiên cứu chính đáng. Nó cuốn hút các lĩnh vực khác.

1.4. Các mô hình

Bước đầu tiên trong quá trình triển khai mô phỏng hệ thống truyền thông là triển khai mô hình mô phỏng cho hệ thống đó hay lập mô hình. Ta làm quen với mô hình và nên hiểu rằng mô hình mô tả quan hệ vào/ra của thiết bị hay hệ thống vật lý. Cụ thể, các mô hình được biểu diễn ở dạng toán học. *Nghệ thuật* lập mô hình là triển khai các mô hình tính cách (ta dùng thuật ngữ này vì mô hình đó bắt giữ tính cách của thiết bị trong điều kiện cụ thể), đủ mức độ chi tiết để duy trì các nét đặc trưng chủ yếu của hệ thống và không quá phức tạp sao cho mức độ chi phí tài nguyên tính toán hợp lý. Vì vậy, cần phải dung hòa các tiêu chí đối lập như độ chính xác, mức độ phức tạp, yêu cầu tính toán.

Cần phải nghiên cứu hai loại mô hình đó là: ***mô hình giải tích và mô hình mô phỏng***. Cả hai đều là sự trừu tượng hóa của thiết bị vật lý hoặc hệ thống như được minh họa ở hình 1.6(a). Thiết bị trong hình 1.6(a) có thể chỉ là một mạch điện tử hay phân hệ như vòng khóa pha PLL... Bước đầu tiên và bước quan trọng nhất trong quá trình lập mô hình là nhận biết các thuộc tính và các đặc tính hoạt động của thiết bị sẽ được trình bày trong mô hình. Việc nhận biết các tính năng cốt lõi này thường cần có các phán đoán thiết kế đáng kể và luôn luôn cần phải có hiểu biết thấu đáo về ứng dụng mà mô hình đó sẽ được triển khai. Mức độ chính xác cần thiết của bất kỳ mô phỏng hay phân tích toán học nào dựa trên mô hình đó đều bị hạn chế bởi tính chính xác của mô hình. Một khi các vấn đề này được giải quyết, thì ta triển khai mô hình giải tích để nắm giữ các tính năng cốt lõi của thiết bị vật lý. Một cách điển hình, mô hình giải tích có dạng phương trình hoặc hệ phương trình để xác định quan hệ vào/ra của thiết bị. Các phương trình này chỉ là sự mô tả từng phần của thiết bị được mô hình hóa vì chỉ có một khía cạnh nào đó của thiết bị được mô hình hóa. Ngoài ra, các phương trình định nghĩa cho thiết bị đó chỉ chính xác trong một phạm vi giới hạn của điện áp, dòng điện hay tần số. Mô hình mô phỏng thường là một tập hợp các giải thuật nhằm tìm nghiệm số của các phương trình (các phương trình này đang định nghĩa mô hình giải tích đó). Các kỹ thuật phân tích số và xử lý tín hiệu số là các công cụ để triển khai các giải thuật này.

Thấy rõ từ hình 1.6(a), mức độ trừu tượng tăng dần từ thiết bị qua mô hình giải tích cuối cùng là mô hình mô phỏng. Việc tăng mức độ trừu tượng là do giả định và xấp xỉ hóa trong quá trình di chuyển từ thiết bị vật lý - mô hình giải tích - mô hình mô phỏng.



Hình 1.6: (a) Các thiết bị và các mô hình; (b) Các ảnh hưởng của tính phức tạp mô hình

Trong nghiên cứu ta thường gặp phải các mô hình có các mức độ trừu tượng khác nhau. Ví dụ: ta sẽ thấy rằng, các kênh có thể được mô hình hóa bằng giải pháp mức dạng sóng trong đó các giá trị mẫu của các dạng sóng được xử lý bởi mô hình đó. Mặt khác, các kênh có thể được trình bày bởi một quá trình Markov rời rạc dựa trên các ký hiệu chứ không phải dựa trên các mẫu của các dạng sóng. Ngoài ra, các mô hình Markov thường lôi cuốn bộ điều chế, máy phát, máy thu vào kênh. Các mô hình này khá trừu tượng và khó khăn khi tham số hóa một cách chính xác nhưng một khi tìm được thì mang lại các mô phỏng hiệu quả cao và thực hiện nhanh. Tính hiệu quả này là lý do chính dẫn đến mô hình hóa ở mức trừu tượng hơn.

Hình 1.6(b) thấy rõ hơn về quá trình mô hình hóa. Trực quan mà nói, thuộc tính mong muốn của mô phỏng là thực hiện mã mô phỏng nhanh. Các mô hình đơn giản thực hiện nhanh hơn các mô hình phức tạp vì cần ít đường nối đến mã máy tính hơn mỗi khi mô hình được thể hiện bởi mô phỏng đó. Tuy nhiên, các mô hình đơn giản không đặc trưng hóa hết được các thuộc tính quan trọng của thiết bị dẫn đến các kết quả không chính xác, khi này cần có các mô hình phức tạp hơn song lại tăng thời gian mô phỏng.

1.5. Mô phỏng tất định và mô phỏng ngẫu nhiên

Tồn tại hai loại mô phỏng cơ bản là mô phỏng tất định và mô phỏng ngẫu nhiên.

Mô phỏng tất định: Loại này hầu như quen thuộc với ta. Ví dụ mô phỏng mạch điện tử cố định, trong đó quan tâm đáp ứng cho tín hiệu vào tất định cụ thể. Triển khai chương trình phần mềm để biểu diễn thành phần mạch và tín hiệu vào. Mô phỏng tạo ra dòng điện, điện áp tương ứng trên mỗi nhánh, và thường được biểu diễn ở dạng sóng. Cần phải quy định khoảng thời gian biểu diễn dạng sóng trước khi mô phỏng. *Do tính bất biến của mạch và tính tất định của tín hiệu vào nên các kết quả mô phỏng như nhau sau mỗi lần mô phỏng.* Ngoài ra, nhận được cùng dạng sóng nếu xử lý mạng bằng các kỹ thuật truyền thống. Mô phỏng sẽ tiết kiệm thời gian và tránh những lỗi toán học do tính toán dài dòng.

Mô phỏng ngẫu nhiên: Giả sử đưa vào mạng là dạng sóng ngẫu nhiên (hàm mẫu của quá trình ngẫu nhiên). Một cách tương đương, mô hình hệ thống cần có trở kháng của điện trở là một biến ngẫu nhiên được xác định bởi hàm mật độ xác suất cụ thể. Kết quả mô phỏng sẽ

không còn là dạng sóng tắt định nữa, và các mẫu của dạng sóng này sẽ tạo ra một tập các biến ngẫu nhiên. Những mô phỏng trong đó xuất hiện các đại lượng ngẫu nhiên được quy vào mô phỏng ngẫu nhiên.

Ví dụ: Giả sử điện áp $e(t)$ trên một phần tử mạch và thực hiện mô phỏng tạo ra giá trị của $e(t)$ tại thời điểm 1 ms , nghĩa là muốn có $e(0,001)$. Trong mô phỏng tắt định thì $e(0,001)$ là cố định và mỗi lần mô phỏng hay mỗi khi dùng kỹ thuật phân tích truyền thống đều cho cùng kết quả. Trong mô phỏng ngẫu nhiên thì $e(0,001)$ là một biến ngẫu nhiên và mỗi lần mô phỏng là một kết quả khác.

Ví dụ: Hệ thống truyền thông số trong đó tín hiệu thu gồm tín hiệu phát cộng với tạp âm ngẫu nhiên. Giả sử phải tính xác suất lỗi ký hiệu tại đầu ra máy thu. Thấy rõ, nếu truyền tín hiệu BPSK trong môi trường kênh AWGN thì xác suất lỗi ký hiệu là:

$$P_E = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (1.4)$$

Trong đó E_b là năng lượng ký hiệu, N_0 là mật độ phổ công suất tạp âm một phía và $Q(\cdot)$ là hàm Q của Gauss được định nghĩa là:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (1.5)$$

Lưu ý rằng P_E là một số chứ không phải là một biến ngẫu nhiên, mặc dù đầu vào máy thu là một đại lượng ngẫu nhiên. Số P_E là một trung bình trên vô hạn các thử nghiệm, mỗi thử nghiệm là một ký hiệu được qua hệ thống và quan sát kết quả. Tất nhiên kết quả là một quyết định đúng hoặc một lỗi được quan sát tại đầu ra máy thu. Đối với các quá trình ergodic có thể xác định xác suất lỗi theo hai cách: (i) Quan sát một bit đang được phát và tính P_E là *trung bình toàn bộ* trong đó ta có toàn bộ vô hạn các dạng sóng tạp âm có cùng các đặc tính thống kê; (ii) Xác định P_E là trung bình theo thời gian bằng cách phát nhiều vô hạn ký hiệu nhị phân và dùng *một hàm mẫu tạp âm*. Vấn đề then chốt là tính P_E dùng vô hạn ký hiệu phát. Nếu thay vì xác định P_E dựa vào vô hạn ký hiệu phát, ta *ước tính* P_E sử dụng hữu hạn ký hiệu nhị phân phát thì ta sẽ thấy rằng việc ước tính P_E thực ra là một biến ngẫu nhiên, vì mỗi hàm mẫu trong khoảng thời gian hữu hạn sẽ tạo ra một giá trị khác (hy vọng không quá khác) đối với xác suất lỗi. Điều này sẽ được sáng tỏ trong phần sau khi ta xét kỹ thuật Monte Carlo.

Cần lưu ý rằng: Trường hợp tắt định, mô phỏng tắt định và phân tích dẫn đến một con số. Mỗi khi thực hiện phân tích và mô phỏng sẽ nhận được cùng giá trị. Trường hợp ngẫu nhiên, các mô phỏng ngẫu nhiên dẫn đến các biến ngẫu nhiên và tính cách thống kê của các biến ngẫu nhiên này là rất quan trọng trong việc xác định chất lượng các kết quả mô phỏng.

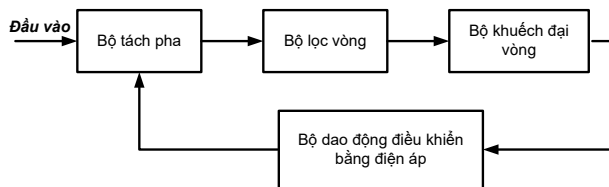
1.5.1. Minh họa mô phỏng tắt định

Mặc dù mục đích chính là trình bày và khám phá các kỹ thuật được sử dụng trong mô phỏng ngẫu nhiên nhưng cần lưu ý rằng mô phỏng tắt định đầy đủ là những công cụ quan trọng

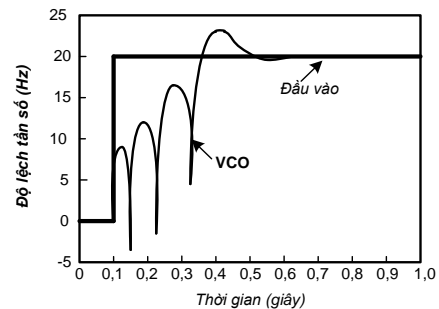
để hiểu biết sâu sắc tính cách hoạt động của các hệ thống truyền thông. Mô phỏng để xác định dạng sóng tại các điểm quan tâm trong hệ thống. Các tham số hệ thống có thể bị thay đổi và dễ dàng khảo sát các ảnh hưởng. Có thể dùng các mô hình rất đơn giản mà vẫn có được các kết quả quan trọng.

Như ví dụ đơn giản: Xét vòng khóa pha PLL được dùng trong quá trình đồng bộ và giải điều chế được minh họa ở hình 1.7, nó khá đơn giản. Tuy nhiên, do các đặc tính *phi tuyến* của bộ tách pha nên việc phân tích vòng khóa pha trong *chế độ bắt* là khá phức tạp. Trường hợp đơn giản, tham số hiệu năng quan trọng của PLL là thời gian cần thiết để bắt được tín hiệu khi cho trước các tham số của PLL và các đặc tính kỹ thuật của tín hiệu vào. Để giải bài toán này theo cách giải tích, phải có nghiệm phương trình vi phân *phi tuyến*. Theo đó, cần chuyển hướng sang mô phỏng.

Giả sử PLL được thiết kế với tần số tự nhiên (*natural frequency*) là 5 Hz, và hệ số tắt dần (*damping factor*) theo thời gian là 0,707. Cũng coi rằng PLL đang hoạt động ở *chế độ khóa* và tần số đầu vào thay đổi tức thì 20 Hz tại $t = 0,1s$. Khi tỉ số giữa thay đổi bước nhảy tần số đầu vào với tần số tự nhiên của PLL là lớn, thì PLL sẽ mất khóa pha và phải bắt lại tín hiệu vào. Do tính cách phi tuyến của vòng dẫn đến hiện tượng gọi là "*trượt chu kỳ - cycle slipping*", và thời gian bắt giữ sẽ phụ thuộc nhiều vào số chu kỳ bị trượt trong quá trình bắt giữ.



Hình 1.7: Mô hình vòng khóa pha PLL



Hình 1.8: Tính cách bắt của vòng khóa pha PLL

Kết quả của một mô phỏng đơn giản được minh họa ở hình 1.8, trong đó bước nhảy tần số đầu vào xảy ra tại $t = 0,1s$. Ta thấy rằng PLL trượt 3 chu kỳ và sau đó bắt lại tại $t \approx 0,6s$. Mô phỏng là hoàn toàn tắt định, và thực hiện nhiều lần mô phỏng sử dụng cùng các tham số của PLL và mô hình tín hiệu sẽ nhận được kết quả như nhau. Bài toán này sẽ được khai thác sâu hơn ở chương sau để nghiên cứu các kỹ thuật triển khai các mô phỏng hệ thống mà không phải chịu sự phức tạp do các dao động ngẫu nhiên.

1.5.2. Minh họa mô phỏng ngẫu nhiên

Tại đây ta xét một tình huống hoàn toàn khác. Xét hệ thống truyền thông số đơn giản được minh họa ở hình 1.1, và giả sử ta muốn tìm BER. Kỹ thuật mô phỏng cơ bản nhất để xác định phép đo hiệu năng quan trọng BER này là cho nhiều ký hiệu số qua hệ thống và đếm lỗi

tại đầu ra máy thu, được gọi là kỹ thuật Monte Carlo. Nếu N ký hiệu được xử lý bởi hệ thống và quan trắc được N_e lỗi tại đầu ra máy thu thì ước tính Monte Carlo của xác suất lỗi là

$$\hat{P}_E = \frac{N_e}{N} \quad (1.6)$$

Được biết là BER dựa trên N ký hiệu, và giá trị của BER tạo ra ước tính xác suất lỗi ký hiệu, sử dụng *định nghĩa tần xuất tương đối của xác suất*, ta có

$$P_E = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_e}{N} \quad (1.7)$$

Vì mô phỏng chỉ xử lý hữu hạn các ký hiệu nên xác suất lỗi ký hiệu chỉ được lấy xấp xỉ.

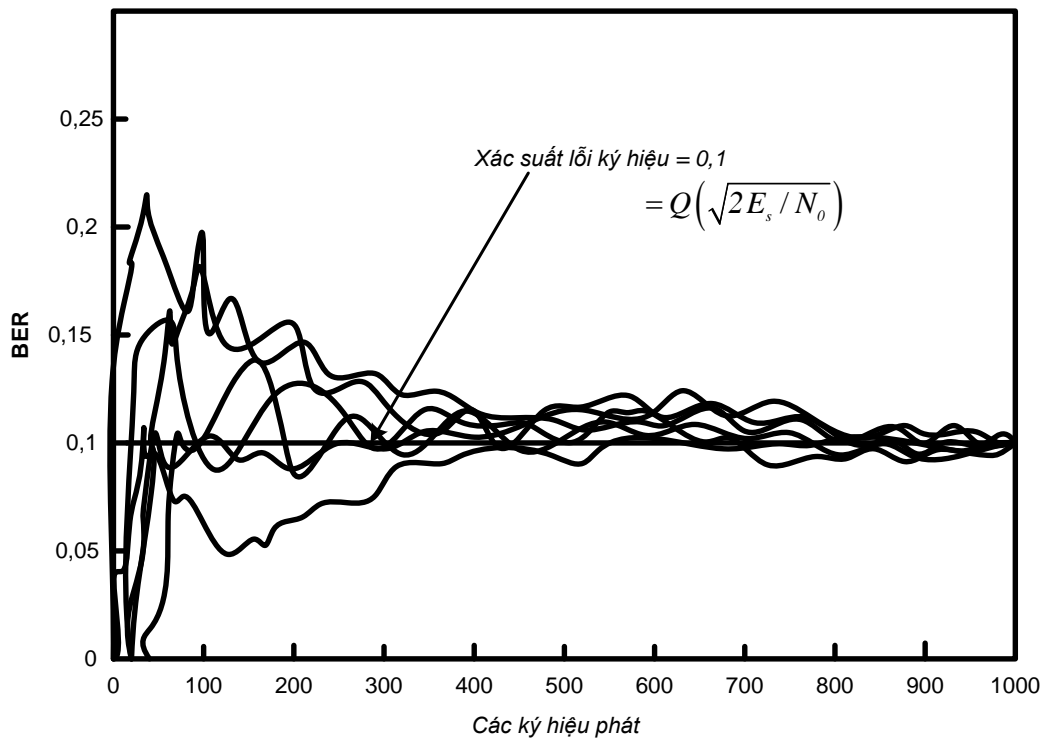
Bảng 1.1: So sánh sự khác nhau giữa BER và xác suất lỗi P_E

Tỉ số lỗi bit BER	Xác suất lỗi bit P_E
BER dựa vào việc thực hiện K lần thí nghiệm, mỗi lần truyền qua kênh N ký hiệu, mỗi lần đếm được N_e lỗi trong số N ký hiệu được phát, giá trị của N_e tại mỗi lần trong số K lần thực hiện thí nghiệm thường khác nhau (do tính ngẫu nhiên của kênh gây ra). Hay nói cách khác, tái tạo lại thí nghiệm ngẫu nhiên bằng cách phát N ký hiệu qua kênh tạp âm (ngẫu nhiên) K lần, thường nhận được K kết quả đếm lỗi N_e khác nhau.	Xác suất lỗi bit là dựa trên việc truyền vô hạn các ký hiệu qua hệ thống $P_E = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_e}{N}$
Phát hữu hạn các ký hiệu qua hệ thống (N hữu hạn)	Phát vô hạn các ký hiệu qua hệ thống ($N \rightarrow \infty$)
\Rightarrow Tỉ số lỗi bit BER là một biến ngẫu nhiên (ngẫu nhiên là do giá trị N_e tại mỗi lần đếm lỗi khác nhau). Tỉ số lỗi bit: $BER = \hat{P}_E = \frac{N_e}{N} = \frac{\text{Số ký hiệu bị lỗi}}{\text{Số ký hiệu được phát}}$ là một tỉ số.	\Rightarrow Xác suất lỗi bit P_E là một con số (tất định), ví dụ hệ thống BPSK $P_E = Q(\sqrt{2E_b/N_0})$. Tất cả đều là tất định.
BER là một ước tính của xác suất lỗi bit	

Vì các thuật ngữ *tỉ số lỗi bit* BER và *xác suất lỗi bit* thường lấy trung bình cùng một sự kiện nên dễ gây nhầm lẫn giữa chúng. Tuy nhiên, thực tế chúng khá khác nhau bởi lẽ: (i) *Tỉ số lỗi bit* BER là một ước tính của xác suất lỗi bit. Nên nhớ rằng "*tỷ số*" được tạo ra là một phân số (ví dụ số km/giờ). BER là một *tỷ số* (N_e lỗi/ N ký hiệu phát). Tái tạo lại thí nghiệm ngẫu nhiên bằng cách phát N ký hiệu qua kênh tạp âm (ngẫu nhiên) K lần, thường nhận được K kết quả đếm lỗi N_e khác nhau; (ii) *Xác suất lỗi bit* là dựa trên việc truyền vô hạn các ký hiệu qua hệ thống. Xác suất lỗi bit là một con số chứ không phải là biến ngẫu nhiên. Ví dụ xác suất lỗi bit đối với hệ thống BPSK trong kênh AWGN là $P_E = Q(\sqrt{2E_b/N_0})$, trong đó E_b là năng lượng trên bit và N_0 là mật độ phổ công suất một phía của tạp âm kênh. Con số này giữ cố định miễn là E_b và N_0 được giữ không đổi. Sự khác nhau cơ bản giữa tỉ số lỗi bit BER và xác suất lỗi bit P_E được cho ở bảng 1.1

Giả sử ta thực hiện $K = 7$ lần mô phỏng Monte Carlo độc lập của một hệ thống truyền thông BPSK trong đó ta đã điều chỉnh E_b/N_0 sao cho xác suất lỗi ký hiệu là 0,1. Mỗi mô phỏng dựa vào phát đi $N = 1000$ ký hiệu. Kết quả của việc tái tạo lại thí nghiệm ngẫu nhiên về việc

cho 1000 ký hiệu qua kênh ngẫu nhiên 7 lần được cho trong hình 1.9. Tính ngẫu nhiên là hiển nhiên mà BER dựa trên bất kỳ số truyền dẫn $N \leq 1000$ tạo ra dải các kết quả. Tổng quát, hiện tượng trải rộng kết quả này liên quan với phương sai của ước tính và để các kết quả mô phỏng là hữu hiệu thì sự trải rộng nên là nhỏ. Lưu ý rằng các kết quả được cho ở hình 1.9 có phương sai nhỏ hơn khi N lớn hơn. Đây là tính cách điển hình đối với bộ ước tính được triển khai chính xác. Cũng cần lưu ý rằng, khi N lớn thì các kết quả co về xác suất đúng và ta có xu hướng tin rằng, khi mô phỏng được triển khai đúng, thì bộ ước tính \hat{P}_E sẽ hội tụ về xác suất lỗi P_E phù hợp với định nghĩa tần suất tương đối của xác suất. Đây cũng là đặc trưng của các bộ ước tính được triển khai chính xác. Hai điều kiện mong muốn này là các khái niệm được định rõ trong lý thuyết ước tính. Nếu phương sai của ước tính dần tới 0 khi N lớn tùy ý thì ta nói rằng ước tính là **kiên định**. Cũng vậy, nếu $E\{\hat{P}_E\} = P_E$ thì ta nói rằng ước tính là **không chệch**. Ta sẽ đề cập nhiều về các tính chất của các bộ ước tính ở các chương sau, và ta cũng sẽ học cách để triển khai mô phỏng dựa trên hình 1.9.



Hình 1.9: Các kết quả mô phỏng Monte Carlo

1.6. Vai trò của mô phỏng

Mô phỏng được sử dụng rộng rãi trong nhiều giai đoạn của quá trình thiết kế và triển khai hệ thống truyền thông hiện đại. Mô phỏng *không những* chủ yếu được sử dụng để *ước lượng* hiệu năng và nghiên cứu dung hoà trong thiết kế (tối ưu tham số) *mà còn* được dùng để *thiết lập* các thủ tục kiểm tra và kiểm chuẩn, các dự đoán tuổi thọ cũng như nghiên cứu tính bất

thường sau khi hệ thống được triển khai trong thực tế. Cả phương pháp luận mô phỏng và mô hình mô phỏng đều được sử dụng để biểu diễn hệ thống phụ thuộc vào các giai đoạn khác nhau của quá trình thiết kế, thực thi và vòng đời của hệ thống. Phương pháp luận mô phỏng cũng sẽ được kiểm soát hoặc định hướng bởi trình tự thiết kế tổng thể. Ta minh họa trình tự thiết kế và sử dụng mô phỏng trong các giai đoạn thiết kế khác nhau và vòng đời của hệ thống truyền thông.

Quá trình thiết kế một hệ thống truyền thông phức tạp được thực hiện từ "*đỉnh xuống*", ngược lại thực thi phần cứng thường từ đáy lên. Theo đó, khi thiết kế hệ thống ta bắt đầu tại mức hệ thống (mức trừu tượng cao nhất) và hoàn thiện chi tiết thiết kế từ mức hệ thống, xuống mức hệ thống con và cuối cùng là mức thành phần. Sau đó đạt tới mức đáy mà ở đó tính chi tiết của bộ phận thiết bị thành phần được nhận dạng. Vì vậy, trình tự xây dựng một hệ thống gồm: (i) Tạo ra các thành phần; (ii) Hợp các thành phần thành hệ thống con; (iii) Xây dựng hệ thống tổng thể từ các hệ thống con; (iv) Triển khai mô phỏng theo giải pháp từ đỉnh xuống. Ta bắt đầu bằng việc mô phỏng mức hệ thống có mức trừu tượng cao tăng dần tính chi tiết, các mô phỏng các hệ thống con và các thành phần. Do thực thi khởi đầu nên các đặc tính đo của các thành phần và các phân hệ được chứa trong mô hình mô phỏng.

Tại đây ta mô tả các giai đoạn khác nhau của quá trình thiết kế và cách sử dụng các mô phỏng trong các giai đoạn khác nhau của quá trình thiết kế.

1.6.1. Quá trình đặc tả kỹ thuật mức hệ thống và độ dự trữ tuyến

Quá trình thiết kế một hệ thống truyền thông bắt đầu bằng việc trình bày, phân tích các yêu cầu người dùng và hiệu năng mong muốn gồm: thông lượng, tỷ số lỗi, xác suất ngừng hoạt động, hạn chế băng thông, công suất, trọng lượng, phức tạp/chi phí, kênh trên đó hệ thống hoạt động, và tuổi thọ trung bình của hệ thống. Trên cơ sở những yêu cầu của người dùng, "*kỹ sư hệ thống*" xuất phát từ khái niệm ban đầu về hệ thống như: sơ đồ điều chế, kỹ thuật mã hoá, cân bằng nếu cần... Tập giá trị tham số gọi là các *chỉ tiêu kỹ thuật mức A* như các mức công suất, băng thông, chỉ số điều chế cũng được thiết lập trong giai đoạn khởi đầu của quá trình thiết kế.

Mục đích toàn diện tại điểm này là: (i) xác định cấu hình hệ thống; (ii) các giá trị của tham số (sẽ đáp ứng các mục đích hiệu năng và thoả mãn những ràng buộc thiết kế). Thấy rõ, hiệu năng hệ thống là một hàm của SNR (trung đương E_b/N_0) và méo tổng do tất cả các thành phần trong tuyến truyền thông. SNR được thiết lập thông qua một quá trình gọi là *dự trữ tuyến*, là phần tính toán mạnh nhất đưa vào bản mô tả các nhân tố như: công suất phát, hệ số khuếch đại ăng ten, suy hao đường truyền, khuếch đại công suất, hệ số tạp âm của bộ khuếch đại và bộ lọc. Trong khi dự trữ tuyến không phải là đại lượng chính trong mô phỏng, nhưng nó thiết lập một dải các giá trị SNR hoặc E_b/N_0 trên đó phải được mô phỏng để ước tính hiệu năng.

Vì không thể xây dựng các thành phần lý tưởng nên việc thực thi các thành phần thực tế như bộ khuếch đại và bộ lọc sẽ tạo ra tính không lý tưởng. Dẫn đến méo tín hiệu, sẽ ảnh hưởng lên hiệu năng hệ thống. Chúng phải được tính đến trong dự trữ tuyến bằng cách tính toán hiệu năng của hệ thống theo các thành phần lý tưởng, sau đó cộng với "*tổn thất thực thi*". Tổn thất thực thi đánh giá sự tăng E_b/N_0 để vượt qua ảnh hưởng của méo do các thành phần không lý

tương gây ra. Đôi khi tồn thất thực thi được xem là các tham số truyền thông hoặc tham số méo. Lưu ý rằng một số tham số như băng thông bộ lọc ảnh hưởng lên công suất tạp âm tại các điểm khác nhau trong hệ thống và sẽ lần lượt ảnh hưởng lên độ dự trữ và méo.

Người thiết kế hệ thống bắt đầu bằng cấu hình khởi đầu cho hệ thống, các chỉ tiêu kỹ thuật mức A và độ dự trữ tuyến. Dự trữ tuyến thường được biểu diễn ở dạng bảng tính và dòng cuối cùng trong dự trữ tuyến là E_b/N_0 mạng tại điểm tới hạn trong hệ thống sau khi tất cả các tồn thất thực thi được tính đến. "*Điểm tới hạn*" này thường là đầu vào máy thu. Dự trữ tuyến được gọi là "*kín*" hay "*cân bằng*" nếu tuyến có E_b/N_0 đủ lớn với hệ số dự phòng an toàn để tạo hiệu năng hệ thống chấp nhận được. Tồn tại nhiều phép đo hiệu năng hệ thống chẳng hạn: (i) ở hệ thống tương tự thường dùng lỗi trung bình bình phương MSE; (ii) ở hệ thống số, phép đo hiệu năng điển hình là tỷ số lỗi bit BER. Tại điểm này, số đo hiệu năng được tính toán từ các công thức xấp xỉ và chưa được mô phỏng. Vì tất cả những tồn thất thực thi đã được tính đến trong E_b/N_0 mạng nên có thể tính BER theo công thức hệ thống lý tưởng.

Nếu độ dự trữ tuyến *không kín* hay *không cân bằng* thì các chỉ tiêu kỹ thuật mức A, các tồn thất thực thi và thậm chí cấu hình hệ thống bị thay đổi và độ dự trữ tuyến được tính toán lại. Ví dụ băng thông của bộ lọc có thể thay đổi, kích thước ăng ten có thể tăng và đặc tính kỹ thuật hệ số tạp âm của bộ khuếch đại có thể thấp hơn. Quá trình này xảy ra liên tục cho đến khi độ dự trữ tuyến được cân bằng với hệ số dự trữ thích hợp.

Trên cơ sở cấu hình hệ thống khởi đầu, các đặc tính kỹ thuật mức A và độ dự trữ tuyến, khi này được coi là kín, cho phép xây dựng mô hình mô phỏng để kiểm tra độ dự trữ tuyến và *tinh chỉnh* thiết kế. Có thể ước tính chính xác các phép đo hiệu năng và kiểm tra suy thoái hiệu năng do thực thi không lý tưởng thông qua các mô phỏng chi tiết. Nếu những phân bổ trong độ dự trữ tuyến được kiểm tra thông qua mô phỏng và độ dự trữ tuyến vẫn được kín thì quá trình thiết kế chuyển sang giai đoạn kế tiếp mà ở đó chứa thiết kế chi tiết, thực thi các hệ thống con và các thành phần. Nếu độ dự trữ tuyến *không kín* thì một số phân bổ méo, cấu hình hệ thống và đặc tính kỹ thuật mức A có thể bị thay đổi.

Giai đoạn đầu của thiết kế liên quan "*nghệ thuật*" và thuộc về người có kinh nghiệm trong thiết kế hệ thống truyền thông. Hầu hết các trường hợp thiết kế ban đầu dựa vào những thiết kế trước với những sửa đổi nhỏ.

1.6.2. Thực thi và kiểm tra các thành phần then chốt

Thiết kế một hệ thống truyền thông mới sẽ luôn chứa một số thuật toán xử lý tín hiệu mới và các công nghệ phần cứng (phần mềm) mới. Bất kỳ công nghệ mới luôn có rủi ro hoặc không chắc chắn về hiệu năng. Nếu công nghệ mới có một phần tử tới hạn thì trước hết thành phần đó phải được xây dựng và kiểm tra trong các điều kiện thực tế nhằm kiểm tra hiệu năng và giảm thiểu rủi ro. Vì chỉ vài thành phần then chốt được xây dựng tại giai đoạn đầu của tiến trình thiết kế nên không thể kiểm tra toàn bộ hệ thống phần cứng. Trong tình huống này, mô phỏng tạo ra môi trường kiểm tra tuyệt vời và sử dụng mô phỏng ít tốn kém hơn nhiều so với

dùng phần cứng để *nguyên mẫu hóa* toàn bộ hệ thống. Tất cả các thành phần và tín hiệu được mô phỏng với các đặc tính đo phải được đưa vào mô hình mô phỏng. Ví dụ, nếu thành phần sẽ được kiểm tra là bộ khuếch đại mới, thì các đặc tính hàm truyền đạt AM-AM và AM-PM của nó được đo và các đặc tính này được đưa vào mô hình phi tuyến cho bộ khuếch đại đó. Sau đó mô phỏng toàn bộ hệ thống để kiểm tra hiệu năng và độ dự trữ tuyến. Một lần nữa nếu đưa các đặc tính đo vào mô phỏng cho thấy méo tốt hơn mong đợi thì lưu lại ở đâu đó trong hệ thống.

Nếu độ dự trữ tuyến kín thì việc triển khai phần cứng đi đến thành phần tới hạn kế tiếp. Nếu không thì thiết kế lại thành phần, xây dựng lại và kiểm tra lại hoặc độ dự trữ tuyến được sửa đổi để tính đến suy thoái phụ do thành phần (ngoài những gì đã được phân bổ trong độ dự trữ tuyến cho thành phần đó). Quy trình này được lặp lại đối với các thành phần then chốt khác.

1.6.3. Hoàn thiện nguyên mẫu phần cứng và phê chuẩn mô hình mô phỏng

Như thủ tục đã được mô tả, nguyên mẫu phần cứng của toàn bộ hệ thống bắt đầu xuất hiện cùng với mô hình mô phỏng kèm theo. Tại đây, mô hình mô phỏng bao hàm các đặc tính đo cho hầu hết các thành phần trong hệ thống. Nhiều số đo hiệu năng cho toàn hệ thống được thực hiện trên nguyên mẫu phần cứng này. Các mô phỏng song song cũng được kiểm soát. Có thể so sánh các đặc tính hiệu năng đo với các kết quả mô phỏng và ngược lại. Mô phỏng tạo ra những điểm chuẩn để kiểm tra và kết quả kiểm tra sẽ phê chuẩn mô phỏng. Kết quả cuối cùng của quá trình thiết kế này là nguyên mẫu hoàn chỉnh của hệ thống, cho ta cơ sở để triển khai phiên bản sản phẩm của hệ thống. Ngoài ra, một khi có mô hình mô phỏng được phê chuẩn, có thể dự đoán tuổi thọ với mức tin tưởng cao.

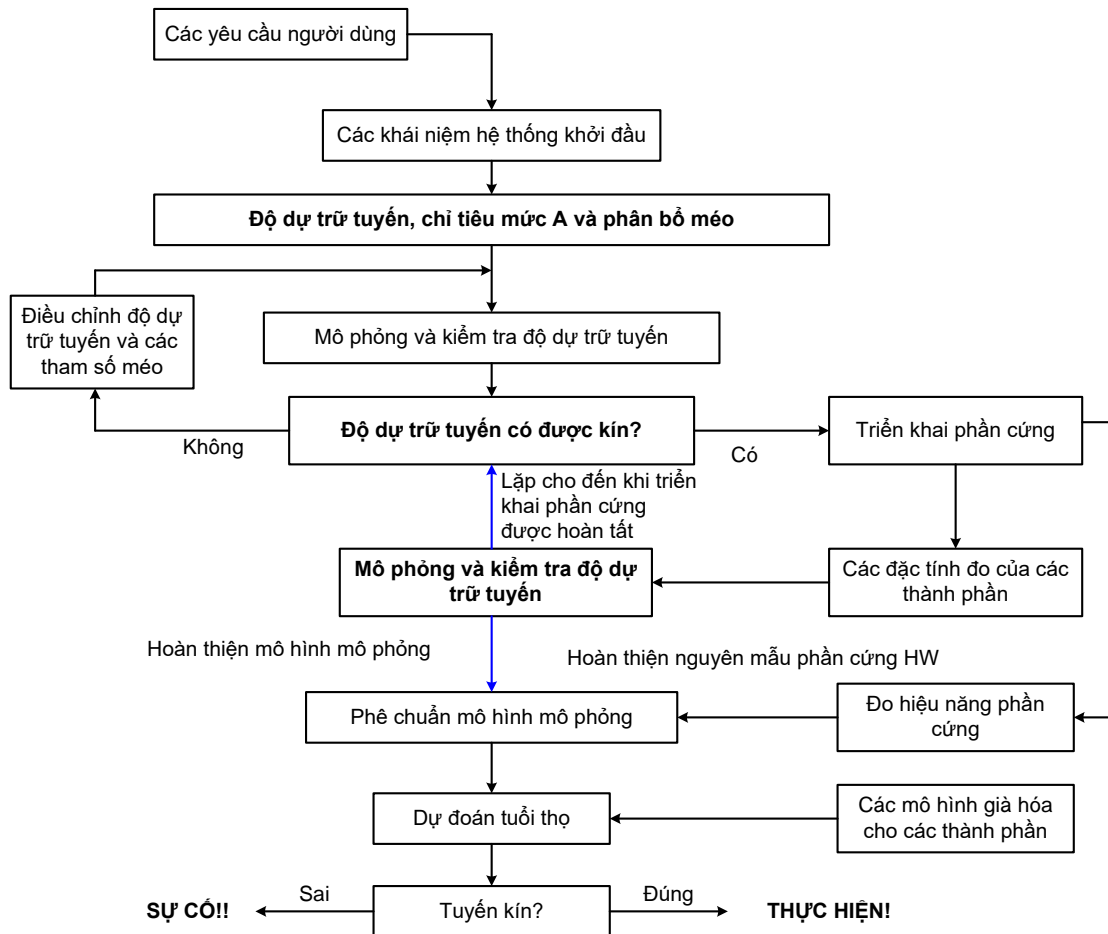
1.6.4. Dự đoán tuổi thọ

Trong khi quy trình trên dẫn đến thiết kế đảm bảo mức hiệu năng cho trước khi triển khai hệ thống thì một yêu cầu quan trọng nữa phải được đáp ứng cho hầu hết các hệ thống, là hiệu năng tuổi thọ. Nhiều hệ thống truyền thông như vệ tinh truyền thông, hệ thống cáp biển được mong đợi phải có tuổi thọ dài (thường khoảng 10 năm hoặc hơn) trong khoảng thời gian này hiệu năng phải được đảm bảo. Tất nhiên, không thể kiểm tra vòng đời thực tế dựa trên nguyên mẫu phần cứng. Trong khi các thủ tục kiểm tra vòng đời tăng tốc đã được triển khai, thực tế thường dùng mô phỏng như giải pháp bổ sung để kiểm tra vòng đời tăng tốc.

Các dự đoán hiệu năng tuổi thọ dùng mô phỏng bằng các mô hình già hóa cho các thành phần chính của hệ thống. Nếu ta có mô hình mô phỏng đã được phê chuẩn cho toàn bộ hệ thống tại lúc bắt đầu vòng đời và cũng có những mô hình tính cách tốt của các thành phần như hàm tuổi thì các mô hình già hóa có thể được thay thế trong mô hình bắt đầu vòng đời để đạt được các số đo hiệu năng tuổi thọ cho hệ thống.

Nếu hiệu năng dự đoán tuổi thọ là thoả đáng và dự trữ tuyến cuối đời là kín với hệ số dự phòng thoả đáng thì việc thiết kế và thực thi hệ thống là hoàn thiện. Ngược lại quá trình phải lặp lại cho đến khi đạt được hội tụ.

Tóm tắt các bước then chốt trong trình tự thiết kế và vai trò của mô phỏng trong thiết kế các hệ thống truyền thông được minh họa ở hình 1.10.



Hình 1.10: Trình tự thiết kế và vai trò mô phỏng

1.7. Gói phần mềm để mô phỏng và khuyến nghị

Gói phần mềm để mô phỏng

Trong những thập kỷ qua nhiều gói phần mềm đã được triển khai và đang được sử dụng rộng rãi để mô phỏng các hệ thống truyền thông ở mức dạng sóng. Các thành phần cốt yếu của cấu trúc khung mô phỏng cho các hệ thống truyền thông gồm: (i) bộ xây dựng mô hình; (ii) thư viện mô hình; (iii) nhân mô phỏng; (iv) bộ hậu xử lý.

Bất kể dùng gói mô phỏng nào đi nữa, bước đầu tiên trong mô phỏng hệ thống truyền thông gồm: (i) xây dựng các mô hình mô phỏng cho các phân hệ khác nhau; (ii) cấu hình hóa các phân hệ thành một mô phỏng hệ thống đầu cuối - đầu cuối. Các mô hình mô phỏng có thể được xây dựng bằng ngôn ngữ lập trình mục đích chung và viết mã thích hợp hoặc sử dụng bộ xây dựng mô hình đồ họa. Với bộ xây dựng đồ họa, triển khai các mô hình mô phỏng cho các phân hệ và cho toàn hệ thống truyền thông các khối cơ bản có sẵn từ các thư viện mô hình. Các

biểu tượng biểu diễn các khối chức năng như các nguồn tin, bộ mã hoá, bộ điều chế, bộ ghép/phân kênh, các mô hình kênh, tạp âm và nguồn nhiễu, bộ lọc, bộ giải điều chế, bộ giải mã được chọn từ các thư viện mô hình. Kết nối các biểu tượng này sẽ tạo mô hình mô phỏng ở dạng sơ đồ khối phân cấp. Diễn hình như Simulink trong Matlab là gói mô phỏng tương đối đơn giản sử dụng giải pháp bộ xây dựng mô hình đồ họa.

Các mô hình được xây dựng hoặc từ đỉnh xuống hoặc từ đáy lên trong đó xây dựng từ đỉnh xuống là thích hợp cho thiết kế hệ thống và giải pháp từ đáy lên là sự lựa chọn của thiết kế phần cứng. Tại "*mức lá*" là mức nhỏ nhất trong phân cấp, các mô hình có thể có một số biểu diễn trong phạm vi từ các thường trình con dấu phẩy động hoặc các thủ tục trong ngôn ngữ lập trình như FORTRAN, C, C++ tới thực hiện mức bit của các mô hình hệ thống con trong VHDL.

Giải pháp thay thế dùng trình soạn thảo sơ đồ khối đồ họa để xây dựng mô hình là dùng ngôn ngữ trung gian như ngôn ngữ lệnh Matlab. Việc tạo những mô phỏng để định hướng triển khai các hệ thống truyền thông phức tạp và tốn kém phù hợp với giải pháp sơ đồ khối và các bộ xây dựng mô hình đồ họa. Bởi lẽ giải pháp sơ đồ khối là một trình bày mang tính bản chất của các hệ thống truyền thông và tạo môi trường sử dụng thân thiện cho kỹ sư hệ thống.

Mở rộng nỗ lực xây dựng mô hình mô phỏng được quy vào tính khả dụng của các thư viện mô hình. Nhiều gói mô phỏng thương mại cho các hệ thống truyền thông khả dụng ngày nay có các thư viện mô hình mở rộng khả dụng.

Sau khi mô hình mô phỏng được triển khai thì các *tham số mô phỏng* (như: tốc độ lấy mẫu, các con số gốc của bộ tạo số ngẫu nhiên và thời gian mô phỏng) và các *tham số thiết kế* (như: độ rộng băng tần bộ lọc, tỉ lệ mã, SNR) phải được định rõ. Sau đó thực hiện mô phỏng. Liên kết tất cả các mô hình với nhau sẽ tạo mã khả thi (có khả năng thực hiện mô phỏng), bắt đầu mô phỏng, lưu các giá trị mẫu của các dạng sóng được tạo bởi mô phỏng và giám sát tiến trình mô phỏng là các hàm thường được thực hiện bởi nhân mô phỏng/bộ quản lý.

Sau khi hoàn tất mô phỏng, tính các phép đo hiệu năng như BER, SNR từ các dạng sóng mô phỏng, sử dụng các "*bộ hậu xử lý*" để trực quan hóa kết quả mô phỏng là hàm của các tham số thiết kế. Cho phép khảo sát phổ, dạng sóng, biểu đồ tán xạ, biểu đồ mắt theo các tham số đặc trưng của mô hình mô phỏng một cách chi tiết, trực quan và gỡ rối mô phỏng.

Nhờ khả năng đồ họa tương tác hỗ trợ đắc lực cho phân tích, thiết kế, nâng cấp, mở rộng mô hình mô phỏng cũng như so sánh đánh giá hiệu năng giữa chúng.

Các cốt lõi mô phỏng tạo ra các kỹ thuật lấy mẫu và mô phỏng khác nhau, chúng thường được phân loại là điều khiển thời gian (lấy mẫu một tốc độ, lấy mẫu đa tốc độ hoặc lấy mẫu tốc độ khả biến), điều khiển luồng, điều khiển sự kiện hoặc kết hợp.

Trường hợp đơn giản nhất là mô phỏng điều khiển thời gian, khi này có một đồng hồ mô phỏng và mỗi khối chức năng trong mô hình mô phỏng được thực hiện tại mỗi "*tick*" của đồng hồ mô phỏng. Sau đó đồng hồ mô phỏng được nhip lên một chu kỳ lấy mẫu (chu kỳ đồng hồ bằng chu kỳ lấy mẫu). Tất cả các khối chức năng trong mô hình được kích hoạt tại mỗi chu kỳ đồng hồ vì vậy mỗi mô hình có thể cập nhật trạng thái ứng với giá trị mới của đồng hồ mô phỏng. Mô phỏng loại này được xây dựng ở dạng vòng "*do*" hoặc vòng "*for*" trong đó tại mỗi nhip của đồng hồ mô phỏng chỉ số vòng lặp được tăng lên một đơn vị.

Trường hợp mô phỏng điều khiển sự kiện, đặt trước đồng hồ một lượng nào đó cho thời gian biểu của sự kiện tiếp theo và mỗi khối chức năng cập nhật trạng thái ứng với giá trị của thời điểm mô phỏng mới. Một cách điển hình, chỉ vài khối cần được kích hoạt để cập nhật trạng riêng và không cần xử lý trong khoảng thời gian "*liên kết sự kiện*". Mô phỏng các hệ thống hàng đợi thường triển khai theo cách này.

Các mô phỏng điều khiển sự kiện và mô phỏng kích thước bước khả biến có hiệu quả tính toán cao hơn mô phỏng điều khiển thời gian. Tuy nhiên, trong một số trường hợp cần phải nội suy và lấy mẫu lại và chúng chứa thông tin mào đầu liên quan tới lập lịch. Mô phỏng các hệ thống truyền thông thường dùng nhất là mô phỏng điều khiển thời gian với lấy mẫu đơn tốc hoặc đa tốc độ. Lấy mẫu đa tốc để mô phỏng tín hiệu hệ thống có băng thông thay đổi rộng, điển hình là hệ thống trải phổ, ở đó ta sử dụng lấy mẫu đa tốc độ nhằm giảm thiểu thời gian mô phỏng.

Các thuật toán xử lý tín hiệu số đóng vai trò quan trọng trong mô phỏng và thực thi hệ thống truyền thông. Vì vậy, cần quan tâm độ rộng bit, chia sẻ tài nguyên trong mô hình mô phỏng và cứng hóa mô hình mô phỏng. Khi thực thi phần cứng bằng cách sử dụng các ngôn ngữ mô tả phần cứng như VHDL để tạo ra giao diện giữa cơ cấu mô phỏng mức hệ thống và các công cụ thiết kế phần cứng. Khi mềm hóa phân hệ, cơ cấu mô phỏng có thể biên dịch thuật toán mô phỏng vào mã ngôn ngữ Assembly cho bộ xử lý DSP đích. Những liên kết để thực thi này đang ngày càng quan trọng hơn bao giờ hết khi mà càng nhiều hàm trong các máy thu truyền thông được thực hiện trong phần cứng số hoặc như phần mềm nhúng.

Khuyến nghị

Ta không nên nghĩ mô phỏng là sự thay thế phân tích hoặc các phép đo phần cứng truyền thống. Mô phỏng chỉ hữu hiệu nhất khi được sử dụng với mục đích phân tích và đo. Bằng cách thực hiện mô phỏng nhiều lần cho phép phát hiện các tham số tới hạn và đơn giản hóa hệ thống. Khi đơn giản hóa cần phải có phân tích bổ sung.

Cần có mức độ phân tích nhất định để giải các bài toán mức hệ thống. Ví dụ: phải hiểu rõ tính phụ thuộc cơ bản của các tham số hiệu năng như BER, lỗi trung bình quân phương MSE tại đầu ra bộ giải điều chế hoặc SNR tại đầu vào máy thu; các tham số hệ thống như công suất phát và băng thông, dạng điều chế hoặc tỷ lệ mã để đảm bảo hệ thống đang hoạt động đúng và các kết quả mô phỏng là hợp lý. Nói cách khác khi các tham số thay đổi trong mô phỏng, ta phải đảm bảo rằng các kết quả quan sát về những thay đổi này là hợp lý và kiên định theo lý thuyết đã biết. Những "*kiểm tra khôn khéo*" là quan trọng để phê chuẩn mô phỏng và luôn cần có các nỗ lực phân tích nhất định.

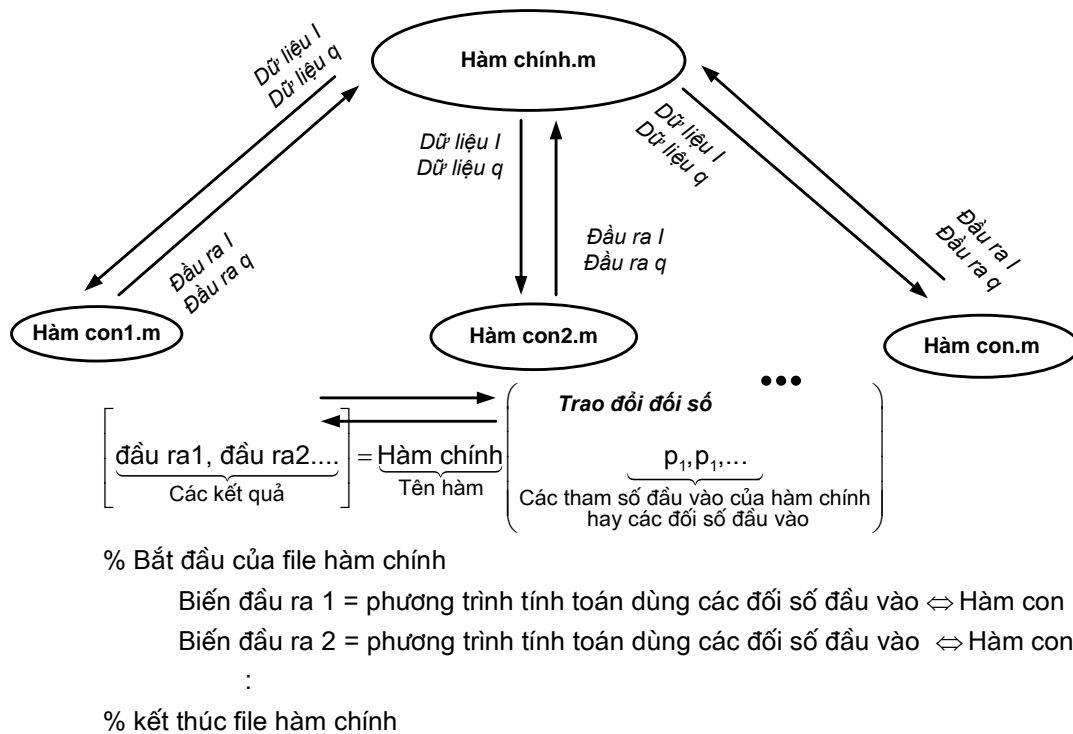
1.8. Sử dụng Matlab

Matlab sẽ được sử dụng để giải thích các khái niệm, giải quyết các vấn đề và thực hiện các mô phỏng mẫu. Một số lý do cho sự lựa chọn Matlab:

Thứ nhất, Matlab là ngôn ngữ lập trình bậc cao, ngôn ngữ kỹ thuật, ngôn ngữ chuyên gia có thư viện toán cực mạnh, giao diện đồ họa phong phú, khả năng thích ứng các ngôn ngữ khác, cho phép tạo giao diện người dùng tiện lợi. Đặc biệt cho phép ứng dụng kết nối điều khiển thiết bị phần cứng, thực tế rất nhiều các hãng sản xuất thiết bị viễn thông như: hãng sản

xuất thiết bị đo Agilent Technology (được tách ra từ HP), hãng Motorola... ở đó việc thiết kế, sản xuất thiết bị hệ thống trên cơ sở phân lớp công đoạn sản xuất chẳng hạn: Xét hệ thống theo quan điểm chức năng, sau khi công thức hoá các khối chức năng, xây dựng quan hệ hàm biến cho các khối chức năng, đánh giá khối chức năng theo các tiêu chí đặc thù (các thông số tối ưu hoá, các tiêu chuẩn đánh giá), mô phỏng khối chức năng trong nhiều miền tín hiệu (miền tần số, miền thời gian, miền Z...) thông qua các biểu đồ, đồ thị... Tiếp theo là công đoạn thiết kế các mạch điện cụ thể cho các khối chức năng, trong công đoạn này tính liên kết của Matlab được thể hiện cực mạnh ở đây, Matlab cho phép liên kết với các chương trình thiết kế mạch điện chuyên dụng như CircuitMaker.... Cuối cùng sản xuất thiết bị viễn thông trong dây chuyền sản xuất, các thiết bị được đánh giá thông qua tín hiệu phản hồi trở về Matlab cứ như thế cho đến khi đạt được chất lượng mong muốn. Matlab có ưu việt nổi trội là khả năng mô phỏng hệ thống động, cho phép thể hiện tín hiệu và hệ thống trong nhiều miền xét (miền thời gian, miền tần số, miền Z...). Hơn nữa, tính cô đọng (nhiều thuật toán phức tạp được trình bày bằng rất ít dòng lệnh của mã), sự hỗ trợ của đồ họa, tính modul...

Thứ hai, Matlab được dùng rộng rãi trong các chương trình đào tạo kỹ sư, hầu hết các sinh viên thực sự đã có các tài nguyên cần thiết để thực hiện chương trình Matlab. Với những chương trình Matlab có tính dung hòa giữa khối lượng tính toán lớn và thời gian cần thiết để chạy chương trình phù hợp, thì nó cần phải dùng một ngôn ngữ biên dịch như C hoặc C++. Đặc biệt có ý nghĩa khi dùng các mô phỏng Monte Carlo để ước tính BER tại SNR lớn, vì khi đó phải xử lý nhiều ký hiệu qua kênh để đạt được bộ ước tính BER chất lượng (ước tính không chệch và kiên định). Tuy nhiên, Matlab là một công cụ cực mạnh trong tình huống này, vì mô phỏng nguyên mẫu được triển khai trong Matlab để thiết kế và kiểm chứng các giải thuật xử lý tín hiệu DSP riêng cũng như mô phỏng toàn diện. Mã chương trình Matlab kết quả có thể ánh xạ vào mã chương trình C hoặc C++ nhằm thực hiện hiệu quả hơn và kết quả đạt được so sánh với các kết quả thực hiện bằng Matlab. Dùng Matlab để nguyên mẫu hóa cho phép nhận biết các lỗi khái niệm một cách nhanh chóng, làm tăng tốc phát triển phần mềm cuối cùng.



Hình 1.11: Minh họa tính phân lớp hàm - Quan hệ giữa các file hàm chính và hàm con

Thứ ba, với mục đích làm sáng tỏ các giải thuật được dùng trong quá trình mô hình hóa và mô phỏng hệ thống cũng như việc đánh giá kết quả mô phỏng, vì vậy sẽ tập trung khai thác thư viện toán của Matlab, hay nói cách khác sử dụng các hàm cơ bản có trong thư viện, khai thác tối đa khả năng phân lớp hàm của Matlab để viết chương trình mô phỏng. Theo đó, các chương trình mô phỏng được thực hiện trên thuật toán sử dụng ngôn ngữ lập trình Matlab, chúng được viết dưới dạng các file.m. Trong một chừng mực nhất định, điều này được minh họa ở hình 1.11. Khả năng phân lớp này rất phù hợp với tính phân lớp của mô hình mô phỏng. Lưu ý rằng ta có thể dùng biến toàn cục. SIMULINK mặc dù được thiết kế cho mô phỏng, nhưng không được đề cập ở đây vì nó không phù hợp để trình bày tính chi tiết của các thuật toán trong các chương trình mô phỏng cũng như phương pháp luận để triển khai mã chương trình.

Cuối cùng là, Matlab được sử dụng rộng rãi trong cộng đồng thiết kế kỹ thuật. Matlab kết hợp khả năng tính toán tuyệt vời với khả năng đồ họa thân thiện. Matlab chứa đựng một thư viện phong phú các hàm tiền lập trình (các file.m) để: tạo, phân tích, xử lý và hiển thị tín hiệu. Các thư viện bổ sung (các hộp công cụ) cho phép bổ sung vào thư viện Matlab cơ bản các file.m để định rõ các lĩnh vực ứng dụng. Cho phép người dùng Matlab dễ dàng tạo ra file.m mới phục vụ ứng dụng riêng. Ngoài ra mã chương trình Matlab rất súc tích, ngắn gọn, làm cho nó có khả năng biểu diễn các thuật toán xử lý tín hiệu phức tạp chỉ vài dòng mã.

Có lẽ vì thế mà hầu hết các trường Đại học, các Viện nghiên cứu lớn đều chọn Matlab để phục công tác đào tạo, nghiên cứu phát triển, đặc biệt thực thi hoá kết quả công trình nghiên cứu vào thực tế.

Vì mục đích trình bày phương pháp luận mô phỏng, thực thi mô phỏng trong thiết kế một cách cơ bản và dễ hiểu nhất có thể cũng như giới hạn khôn khổ cuốn sách, nên các hệ thống được xét để làm ví dụ minh họa mới chỉ dừng ở mức đơn giản ở dạng riêng biệt đơn giản trong nhiều giả định lý tưởng. Tất cả đều thuộc loại không thích ứng, vì vậy từ góc độ sử dụng tài nguyên là không hiệu quả. Như một minh họa đơn giản nhất: do tính cách thay đổi ngẫu nhiên theo thời gian của môi trường truyền làm tín hiệu thu bị thăng giáng ngẫu nhiên, vì thế trong thiết kế để đảm bảo chất lượng BER ta thường phải đưa thêm độ dự trữ pha đỉnh hoặc dùng sơ đồ điều chế BPSK (hiệu năng thông lượng thấp)... cho trường hợp kịch bản kênh tồi, nhưng tồn tại rất nhiều thời điểm kịch bản kênh tốt, khi này có thể dùng các sơ đồ điều chế 4-QAM, 16-QAM,... nhưng vẫn đảm bảo được chất lượng BER, vì vậy ta đã không khai thác triệt để tài nguyên dung lượng hệ thống. Nhiều chương trình mô phỏng được viết trên Matlab, được trình bày trong phần văn bản, việc quyết định đưa mã chương trình Matlab vào trong nội dung cuốn sách với mục đích: (i) làm sáng tỏ việc sử dụng phương pháp luận để triển khai mô phỏng cũng như minh họa các thuật toán xử lý tín hiệu số DSP quan trọng; (ii) nhiều đoạn mã chương trình Matlab trong các ví dụ sẽ hỗ trợ mở rộng triển khai mô hình và mô phỏng riêng của bạn đọc. Tuy nhiên, để không làm gián đoạn tính liên tục của cuốn sách, chỉ có những chương trình ngắn (dài không quá một trang văn bản) thực hiện: định nghĩa các thông số đặc trưng, liên kết các chương trình con (ở dạng file.m), các đặc trưng vào ra của, các kết quả mô phỏng được trình bày. Với những chương trình quá dài, để phù hợp với một trang văn bản chương trình được liên kết phù hợp và được lưu trên đĩa CD-ROM.