

Chương 2

PHƯƠNG PHÁP LUẬN MÔ PHỎNG

2.1. Mở đầu

Mô phỏng đóng vai trò quan trọng trong thiết kế hệ thống truyền thông, được dùng để thiết kế chi tiết các phần tử và ước lượng hiệu năng mức hệ thống. Chương này sẽ trình bày phương pháp luận cơ bản để triển khai mô phỏng, và chi tiết hóa quá trình lập mô hình và mô phỏng cũng như vấn đề định lượng và định tính của mô phỏng. Một cách trình bày khác, mô phỏng vừa có *tính nghệ thuật* vừa có *tính khoa học*.

Tồn tại một số bước tạo và thực thi mô hình mô phỏng trên cơ sở lý thuyết, vì vậy có bản chất định lượng chẳng hạn: mô hình hóa các phần tử hệ thống riêng biệt và tạo các số ngẫu nhiên. Mặt khác, nhiều bước trong mô phỏng bao gồm các giải pháp và các xem xét mà không thể xác định số lượng rõ ràng, là bản chất khám phá. Chúng được gộp lại một cách khá lỏng lẻo, được coi là "*Phương pháp luận*" mô phỏng. Điểm nhấn của chương này là phương pháp luận hay "*Tính nghệ thuật*" của mô phỏng, đặc biệt ý nghĩa khi ước lượng hiệu năng ở mức hệ thống. "*Tính khoa học*" của mô phỏng bàn về khía cạnh định lượng của việc mô hình hóa, ước tính,.. sẽ được giải quyết trong các chương sau. Các phần định tính và định lượng không hẳn tách rời nhau mà quan hệ khá mật thiết với nhau. Tất cả các bước trong mô phỏng bao gồm mô hình hóa các thành phần cụ thể và một số "*phương pháp luận*". Hơn nữa việc thực hiện mô phỏng cần đến một tập các thuật toán.

Với mục đích trình bày và thảo luận: Chương này sẽ đề cập 2 chủ đề, các mặt *định tính* và *định lượng* của mô phỏng như thể chúng tách rời nhau. Tuy nhiên, việc nghiên cứu chúng có tính hỗ trợ nhau. Vì vậy, ta nên đọc chương này trước khi tiếp các chương sau. Chương này có tính logic và lý luận cao.

Bài toán mô phỏng đơn giản nhất thường gồm 4 bước cơ bản sau:

- Ánh xạ bài toán đã cho thành mô hình mô phỏng.
- Phân giải bài toán tổng thể thành một tập các bài toán nhỏ hơn.
- Chọn tập các kỹ thuật mô hình hóa, mô phỏng, ước tính phù hợp và áp dụng chúng để giải quyết các bài toán nhỏ của chúng.
- Kết hợp các kết quả của các bài toán con nhằm tạo ra nghiệm cho bài toán tổng thể.

Thông thường các kỹ thuật cụ thể để giải quyết các bài toán con (bước thứ 3) được định nghĩa rõ ràng và nghiêm ngặt, là thuật toán (bản chất định lượng). *Ví dụ:* kỹ thuật để mô phỏng bộ lọc tuyến tính được biểu diễn bởi hàm truyền đạt sử dụng phương pháp FIR, là tổng chấp hoàn toàn xác định. Mặt khác, "*phương pháp luận*" toàn diện được sử dụng để ánh xạ bài toán thiết kế hoặc ước tính hiệu năng thành mô hình mô phỏng phù hợp và lựa chọn tập các kỹ thuật

kiên định, tương thích để áp dụng vào mô hình đó, sẽ cần phải có các thủ thuật khám phá và những "mánh khoé nghề nghiệp".

Mục đích cơ bản của hệ thống truyền thông là xử lý dạng sóng và ký hiệu, vì vậy mô phỏng hệ thống truyền thông là tìm cách **phỏng tạo** quá trình này bằng cách tạo và xử lý các giá trị mẫu của những dạng sóng này. Theo đó cần phải: (i) mô hình hóa các hoạt động xử lý tín hiệu (được thực hiện bởi các khối chức năng trong hệ thống); (ii) tạo các dạng sóng đầu vào để thâm nhập vào các điểm khác nhau của hệ thống; (iii) điều khiển các mô hình bằng các dạng sóng đầu vào phù hợp để tạo các dạng sóng đầu ra (là đầu vào của khối chức năng khác); (iv) phân tích những dạng sóng này để tối ưu các tham số thiết kế, hoặc để đạt được các phép đo hiệu năng.

Để minh họa các khía cạnh của phương pháp luận, ta sử dụng hệ thống truyền thông số làm việc trên kênh truyền thông di động "thay đổi theo thời gian". Kênh này gây *méo tuyến tính*, có thể giảm thiểu méo này bằng bộ cân bằng trong máy thu. Các giải pháp thiết kế chi tiết bộ cân bằng sẽ được dùng để minh họa một số khía cạnh của phương pháp luận. Thuộc tính thay đổi theo thời gian của kênh (do tính di động) làm cho tín hiệu thu thay đổi ngẫu nhiên, và là hàm của thời gian. Thay đổi ngẫu nhiên trong tín hiệu thu gọi là pha đình. Khi công suất tín hiệu thu dưới mức ngưỡng, thì hiệu năng của hệ thống được đánh giá bởi xác suất lỗi không chấp nhận được và hệ thống sẽ thông báo là không phục vụ. *Xác suất ngừng hoạt động* của hệ thống được định nghĩa là phần trăm thời gian mà hệ thống truyền thông "không khả dụng" (do điều kiện kênh tồi gây ra tỷ số lỗi vượt quá giá trị ngưỡng quy định). Để ước tính xác suất ngừng hoạt động cần phải mô phỏng hệ thống dưới nhiều điều kiện kênh (kịch bản kênh), là một nhiệm vụ cần nhiều tính toán. Theo đó, ta sẽ thảo luận các phương pháp giảm thiểu tính toán trong mô phỏng. Muốn vậy, ta tiến hành ba bước cơ bản sau:

Trước hết, là lập mô hình và xác định tham số. Giải pháp tổng thể để mô phỏng mức dạng sóng hệ thống truyền thông khá dễ hiểu. Ta bắt đầu bằng việc mô tả phân chia hệ thống để mô phỏng hệ thống ở dạng sơ đồ khối, trong đó mỗi khối chức năng thực hiện một hoạt động xử lý tín hiệu cụ thể. Mô hình mô phỏng cho mỗi khối chức năng được chọn từ thư viện các mô hình khả dụng, và tạo mô hình sơ đồ khối bằng cách kết nối tập các khối được chọn. Trước khi thực hiện mô phỏng, cần phải xác định rõ các giá trị cụ thể hoặc khoảng các giá trị được phép cho các tham số của mỗi khối (chẳng hạn như băng thông của bộ lọc). Đơn giản hóa sơ đồ khối đến mức có thể và chia nhỏ nếu cần thiết. Việc ánh xạ bài toán thiết kế và/hoặc ước tính hiệu năng thành mô hình mô phỏng là một trong những bước khó nhất trong phương pháp luận. Thời gian mô phỏng và độ chính xác của kết quả mô phỏng phụ thuộc vào cách thực hiện điều này.

Sau đó, là thực hiện mô phỏng. Thực hiện mô phỏng bao gồm tạo các giá trị mẫu của tất cả các dạng sóng đầu vào hoặc tác nhân kích thích điều khiển mô hình mô phỏng. Các tín hiệu, tạp âm, nhiễu được biểu diễn bởi các quá trình ngẫu nhiên, và sử dụng các bộ tạo số ngẫu nhiên để tạo các giá trị mẫu của các quá trình ngẫu nhiên. Trong mô phỏng, các đầu ra của các bộ tạo số ngẫu nhiên được đưa vào các khối để: (i) *điều khiển* mô hình mô phỏng; (ii) *tạo* các giá trị mẫu tại các đầu ra của các khối chức năng. Một số mẫu đầu ra được ghi lại và được phân tích trong khi đang thực hiện mô phỏng hoặc tại thời điểm kết thúc mô phỏng, *ước tính* các

phép đo hiệu năng như: tỉ số tín hiệu trên tạp âm SNR, sai số trung bình bình phương MSE, xác suất lỗi.

Cuối cùng, là xác định tính hợp lệ. Cũng là bước rất quan trọng trong mô phỏng, ta xác định tính hợp lý của các kết quả mô phỏng bằng cách dùng các xấp xỉ giải tích, các giới hạn hoặc các kết quả đo khả dụng. Các kết quả đo cụ thể chỉ khả dụng đối với thời điểm kết thúc chu kỳ thiết kế sau khi nguyên mẫu được xây dựng. Thậm chí, khi hệ thống nguyên mẫu là khả dụng nhưng chỉ thực hiện hữu hạn các phép đo. Bản chất tốn kém của đo kiểm là nhân tố chính dẫn đến thực hiện mô phỏng. Tuy nhiên, một khi tính hợp lý (phê chuẩn) trái ngược với các kết quả đo, khi này ta dùng phương pháp luận để: (i) kiểm tra lại các mô hình; (ii) thiết lập tính khả tin của các kết quả mô phỏng.

Hệ thống truyền thông thực tế luôn quá phức tạp để mô hình hóa và mô phỏng cho dù tài nguyên tính toán khả dụng không giới hạn đi chăng nữa. Vì vậy, cần phải dùng nhiều kỹ thuật để giảm toàn bộ tính phức tạp của bài toán mô phỏng thành một bài toán trong phạm vi kiểm soát của: tài nguyên máy tính khả dụng, thời gian khả dụng, độ chính xác mong muốn. Các kỹ thuật, *kỹ năng nghề nghiệp*, được coi là phương pháp luận và được mô tả trong các phần sau ở dạng các ví dụ minh họa.

Sẽ được thấy rõ, dù điều khiển thời gian hay điều khiển sự kiện, mô phỏng phải được tổ chức và triển khai phù hợp nếu muốn có được kết quả khả tin và khả kiểm. Các khái niệm được trình bày có tính định hướng nghiên cứu cho các chương sau. Cấu trúc của mô phỏng thường phản ánh giải pháp được dùng để thiết kế hệ thống thực tế. Tuy nhiên, nhiều khéo léo nghề nghiệp sẽ được thảo luận, có thể ứng dụng vào mô phỏng để đảm bảo các kết quả mô phỏng phản ánh chính xác hoạt động của hệ thống theo thiết kế hoặc ước lượng.

2.2. Các mặt của phương pháp luận

Giải pháp toàn diện hay phương pháp luận để giải quyết bài toán thiết kế hoặc ước tính hiệu năng phụ thuộc vào bản chất bài toán cụ thể. Trong khi khó để trình bày phương pháp luận như tập các quy tắc hay thuật toán độc lập thì tồn tại một số khía cạnh chung của phương pháp luận có thể áp dụng cho nhiều bài toán mô phỏng khác nhau. Trước hết, ta mô tả chúng và sau đó trình bày tập các phương pháp cụ thể để giải quyết tập các bài toán riêng biệt.

2.2.1. Ánh xạ bài toán thành mô hình mô phỏng

Điểm bắt đầu của mô phỏng là trình bày tường minh bài toán và mục đích của mô phỏng. Để minh họa các mặt khác nhau của phương pháp luận, ta dùng hệ thống thông tin di động làm ví dụ và xét 2 vấn đề sau:

- **Thiết kế bộ cân bằng:** Xác định số nhánh, khoảng cách nhánh và số bit được sử dụng để thực hiện các phép toán số học trong bộ cân bằng máy thu.

- **Ước lượng hiệu năng hệ thống:** Xác định E_b/N_0 cần thiết để duy trì hiệu năng có thể chấp nhận được (mô tả chi tiết hơn về hệ thống và các đặc tính kỹ thuật hiệu năng của nó được đề cập ở phần sau của chương).

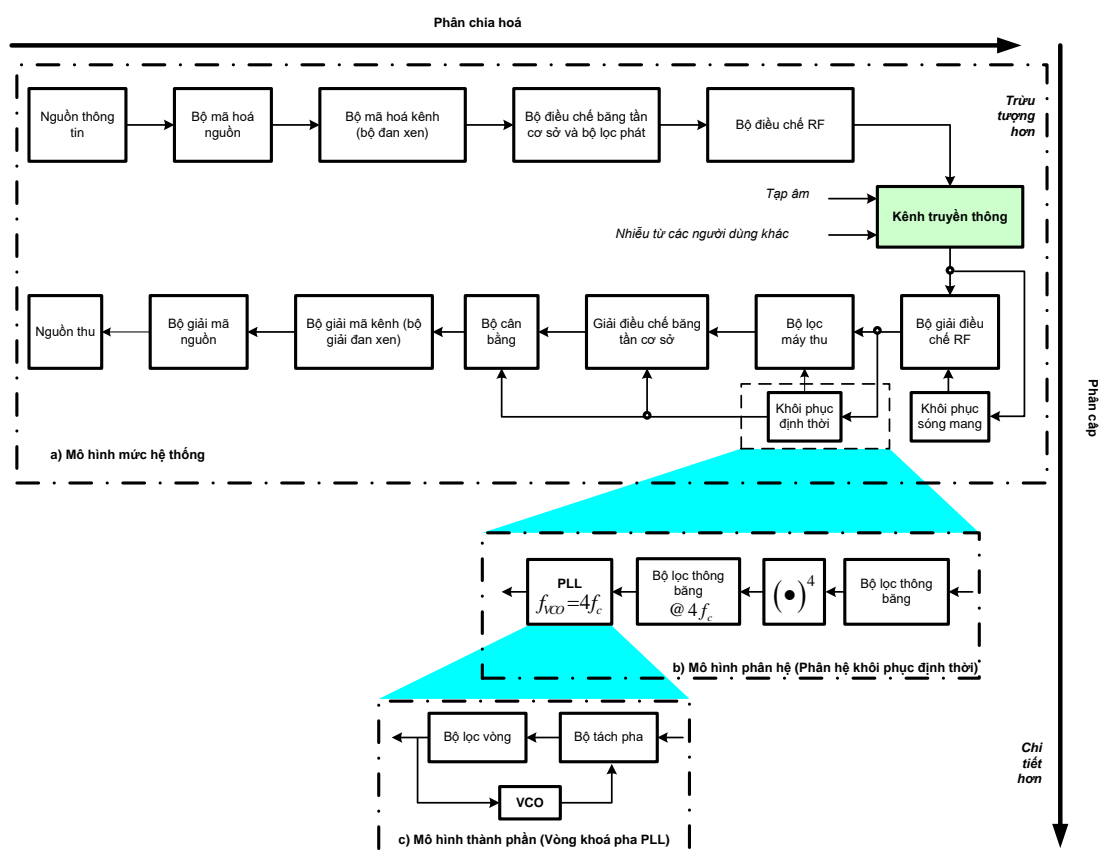
Bài toán thứ nhất bàn về thiết kế chi tiết một thành phần máy thu, bài toán thứ hai thuộc về ước tính hiệu năng mức hệ thống. Hai bài toán này cần có: các giải pháp ở dạng một phần của hệ thống để lập mô hình, mức độ chi tiết của mô hình, kỹ thuật lập mô hình, kỹ thuật mô phỏng, thủ tục ước tính. Ngoài ra, bài toán thứ nhất được giải quyết trước khi tiến tới bài toán thứ hai.

Dù ta đang giải quyết bài toán thiết kế chi tiết hay ước tính hiệu năng mức hệ thống thì điểm bắt đầu luôn là sơ đồ khối chi tiết, trình bày phần hệ thống cần được mô phỏng. Trình bày sơ đồ khối khởi đầu thường chi tiết hơn mức cần thiết. Tuy nhiên, là thói quen và hữu hiệu vì tại điểm bắt đầu bao gồm "mọi thứ mà ta có thể nghĩ về" sơ đồ khối toàn diện khởi đầu.

Mô hình mô phỏng cuối cùng được tạo ra từ sơ đồ khối khởi đầu được đơn giản hóa. Ứng dụng ba lớp kỹ thuật sau để tạo lập mô hình mô phỏng:

- Trình bày phân cấp
- Phân chia hóa và điều kiện hóa
- Đơn giản hoá (xấp xỉ, giả định).

Trình bày phân cấp



Hình 2.1: Minh họa quá trình mô hình hóa hệ thống

Phân cấp là giải pháp thường dùng để giảm tính phức tạp trong mô hình hóa, thiết kế phần mềm và các ứng dụng khác. Trong viễn cảnh hệ thống truyền thông, phân cấp được sử dụng để: (i) quản lý và giảm tính phức tạp của mô hình mô phỏng; (ii) giảm tải tính toán trong quá trình mô phỏng mô hình. Trình bày phân cấp được thực hiện trong các "lớp" khác nhau bắt đầu từ mô hình mức "hệ thống" và qua các lớp phân hệ, lớp thành phần và lớp vật lý. Minh họa các "lớp" cho một hệ thống truyền thông cụ thể được cho ở hình 2.1. Số các lớp, thuật ngữ được sử dụng để định nghĩa một lớp cho trước là không duy nhất. Số lượng lớp trong hệ thống có thể là tùy ý, những gì được thấy là phân hệ trong một viễn cảnh được xét là một hệ thống trong viễn cảnh khác. Tuy nhiên, ta dùng thuật ngữ hệ thống để nói về toàn bộ thực thể quan tâm. Ở dạng phân cứng, hệ thống thường được xem là những gì chứa trong giá, tủ và hộp. Hệ thống chứa các phân hệ (thường được thực thi tại mức bo mạch).

Trong trình bày phân cấp hoặc lập mô hình hệ thống, các khối ở các lớp thấp hơn trong phân cấp sẽ chi tiết hơn, ngược lại các khối tại các lớp cao hơn trừu tượng hơn và thuộc về chức năng tổng thể của khối. Phân giải thành các lớp thấp hơn cho đến khi không thể. Mức thấp nhất thường dựa trên các thành phần như điện trở, tụ điện và vi mạch.

Trong toàn cảnh hệ thống truyền thông, mô hình mức hệ thống được cho ở hình 2.1(a) gồm các khối chức năng như: nguồn thông tin, bộ mã hoá, bộ giải mã, bộ điều chế, bộ giải điều chế, bộ lọc và kênh. Mỗi khối chức năng là một phân hệ và được phân giải (khai triển sâu hơn) để được chi tiết hơn. Ví dụ phân hệ khôi phục định thời được phân tích thành: hai bộ lọc thông băng, bộ phi tuyến bậc 4 và vòng khoá pha PLL như ở hình 2.1(b). Phân tích hơn nữa nhận được mô hình mức "thành phần". Ví dụ, bộ lọc thông băng được cho ở hình 2.1(b) có thể là bộ lọc tương tự, bộ lọc siêu cao hay bộ lọc số. Trường hợp bộ lọc tương tự, có thể khai triển thành các mô hình mức "mạch điện". Trường hợp bộ lọc số, việc phân tích sẽ đi xuống mức bit như các bộ cộng, bộ nhân, bộ tích lũy. Dưới lớp này chứa các transistor và các cổng logic cụ thể. Tuy nhiên, trong viễn cảnh mô phỏng mức dạng sóng ta rất hiếm khi đi xuống mức chi tiết này. Mô hình lớp "thành phần" cho PLL được minh họa ở hình 2.1(c).

Ba lý do chính để dùng khái niệm phân cấp là: (i) Quản lý tính phức tạp của mô hình mô phỏng; (ii) Giảm tải tính toán khi mô phỏng mô hình. Tổng quát, nên thực hiện mô phỏng ở mức trừu tượng cao nhất có thể, phù hợp với mục đích mô phỏng bởi lẽ mức trừu tượng càng cao thì càng ít tham số hơn và mô phỏng hiệu quả hơn. Chẳng hạn khi thiết kế bộ cân bằng, nó được mô phỏng ở mức bit, trong khi đó kênh được mô phỏng ở mức trừu tượng hơn nhiều (dùng hàm truyền đạt để biểu diễn kênh). Tương tự, bộ lọc băng tần cơ sở số trong máy thu không nhất thiết phải mô phỏng ở mức bit nếu mục đích của mô phỏng là ước lượng hiệu năng hệ thống. Tất nhiên, cách thực thi bộ lọc sẽ không ảnh hưởng đến hiệu năng của toàn bộ hệ thống miễn là duy trì hàm truyền đạt của bộ lọc; (iii) Liên quan đến phê chuẩn mô hình, ngoài việc giảm tính phức tạp, thời gian mô phỏng, các mô hình mức cao hơn sẽ có ít tham số hơn và cũng có thể dễ phê chuẩn hơn. Càng ít tham số hơn thì càng ít phép đo để đặc tính hóa mô hình hơn. Ví dụ mô hình mức mạch điện của bộ lọc Butterworth chứa nhiều giá trị thành phần hơn. Tuy nhiên, hàm truyền đạt mức cao của cùng bộ lọc Butterworth được đặc trưng chỉ bởi 2 tham

số (bậc và băng thông), chúng đều dễ đo. Hơn nữa, khi mô hình mô phỏng ở mức trừu tượng cao hơn, thì sự phê chuẩn của các kết quả mô phỏng là đơn giản hơn, cần ít phép đo hơn.

Tại mức hệ thống, mô phỏng được thực hiện ở mức trừu tượng cao nhất sử dụng các mô hình "*tính cách*" (các hàm truyền đạt) chứ không phải là các mô hình vật lý. Dạng chức năng của mô hình tính cách thường được giả định hoặc từ các phép đo. Ví dụ, bộ lọc số có thể được mô phỏng tại mức bit và bộ lọc tương tự có thể được mô phỏng tại mức mạch. Mô hình mức cao hơn cho cả hai bộ lọc có thể được rút ra từ các mô phỏng mức bit hoặc mức mạch ở dạng hàm truyền đạt. Chỉ khi dùng mô hình bộ lọc ở mức cao hơn (là mô hình hàm truyền đạt) mang lại hiệu quả tính toán cao. Tính chi tiết của mô hình mức thấp hơn (dù là bộ lọc tương tự hay bộ lọc số) đều bị ẩn hoàn toàn từ lớp cao hơn. Giải pháp tạo mô hình mức cao hơn này từ các tính chi tiết của mô hình mức thấp hơn, và thay thế ngược lại tại mức cao hơn được gọi là "*chú giải ngược*".

Trong giai đoạn đầu của chu kỳ thiết kế, hàm truyền đạt bộ lọc được giả định hoặc "*định rõ*" và nhận được đặc điểm hàm truyền đạt sau khi thiết kế và mô phỏng. Ở chu kỳ thiết kế sau, một khi bộ lọc được xây dựng, thì hàm truyền đạt của nó được đo và được dùng trong các mô phỏng mức cao hơn. Ngoài ra, phân cấp cũng làm giảm toàn bộ tính phức tạp mô hình và tải tính toán kết quả.

Cũng như quá trình mô hình hoá, việc thiết kế hệ thống truyền thông thực tế cũng theo thứ tự từ đỉnh qua các lớp. Trong quá trình thiết kế, các đặc tính kỹ thuật đi xuống qua các lớp của phân cấp và việc đặc trưng hóa (được đo hoặc được mô phỏng ở mức thấp hơn) theo dự phòng qua các lớp của phân cấp. Trong một số ứng dụng, có thể phải sử dụng các mức chi tiết khác nhau. Ví dụ khi thiết kế bộ cân bằng cần phải ước tính xác suất lỗi hệ thống là hàm của số bit được sử dụng cho bộ cân bằng. Trường hợp tất cả các phần của hệ thống quanh bộ cân bằng sẽ được mô phỏng tại mức trừu tượng rất cao trong khi chính bộ cân bằng được mô phỏng chi tiết hơn nhiều sử dụng một bộ mô phỏng khác. Giải pháp này thường gọi là "*đồng mô phỏng*".

Phân chia hóa và điều kiện hóa

Phân chia hóa: Phân chia hóa bài toán phức tạp thành một tập các bài toán nhưng độc lập nhau, được giải quyết riêng biệt và kết hợp các nghiệm, là một kỹ thuật hữu hiệu khác làm giảm tính phức tạp và tải tính toán. Trong khi phân cấp bàn về mức độ trừu tượng thì phân chia hóa cũng bàn về tính trừu tượng nhưng ở các khía cạnh khác của bài toán đó là: mô phỏng riêng biệt và kết hợp các kết quả. Vì vậy, phân chia hóa cho phép quan sát và kiểm tra sơ đồ khối theo "*chiều ngang*" trong khi phân cấp cho phép xét theo "*chiều đứng*". Trong viễn cảnh được cho ở hình 2.1 có thể tách biệt phần đồng bộ hóa, mã hoá ra khỏi bài toán và mô phỏng chúng riêng biệt.

Điều kiện hóa: Điều kiện hóa là một kỹ thuật khác rất giống với phân chia hóa, đơn giản ta cố định điều kiện hay trạng thái của một phần hệ thống và mô phỏng phần còn lại của hệ thống dưới các giá trị khác nhau của các biến điều kiện hay trạng thái. Mô phỏng riêng cho

phần hệ thống được điều kiện hóa và các kết quả đạt được trong phần đầu được lấy trung bình theo phân bố của biến điều kiện đạt được trong phần thứ hai. Quá trình này được minh họa tốt nhất bằng một ví dụ.

Giả sử ta muốn ước tính xác suất lỗi hệ thống được cho ở hình 2.1 khi đồng bộ hóa (khôi phục sóng mang và định thời) không lý tưởng. Ta sử dụng phân chia hóa và điều kiện hóa để đơn giản hóa bài toán bằng cách ước tính xác suất lỗi có điều kiện trong hệ thống với các giá trị khác nhau của lỗi pha sóng mang và định thời, sau đó mô phỏng hệ thống đồng bộ để đạt được phân bố của các lỗi định thời. Sau đó lấy trung bình xác suất lỗi có điều kiện theo phân bố lỗi định thời và lỗi pha. Những gì ta đang làm ở đây là phép toán trong thống kê liên quan các giá trị kỳ vọng có điều kiện. Tổng quát:

$$\begin{aligned} E_{XY} \{g(X, Y)\} &= \iint g(x, y) f_{XY}(x, y) dx dy \\ &= \int \underbrace{\left\{ \int g(x, y) f_{X|Y}(x|y) dx \right\}}_{\text{Kỳ vọng có điều kiện}} f_Y(y) dy \end{aligned} \quad (2.1)$$

Ở dạng kỳ vọng toán học có điều kiện là:

$$E_{XY} \{g(X, Y)\} = E_Y \left\{ \underbrace{E_{X|Y} [g(X, Y)]}_{\text{Kỳ vọng có điều kiện}} \right\} \quad (2.2)$$

Trở lại ví dụ, xác định BER khi có lỗi định thời và lỗi pha, áp dụng nguyên lý này ta có:

$$\hat{P}_E = \iint \hat{P}_r\{\text{lỗi} | \tau, \theta\} \hat{f}_{T\Theta}(\tau, \theta) d\tau d\theta \quad (2.3)$$

Trong đó $\{\hat{P}_r\{\text{lỗi} | \tau, \theta\}$ là ước tính xác suất lỗi có điều kiện dựa trên mô phỏng với giả thiết có lỗi pha θ và lỗi định thời τ . Kết quả của trung bình hóa \hat{P}_E là xác suất không điều kiện (toàn bộ) của lỗi, $\hat{f}_{T\Theta}(\tau, \theta)$ là phân bố được ước tính (mô phỏng) của lỗi pha và lỗi định thời được tạo ra bởi hệ thống đồng bộ. Chú ý rằng hệ thống đồng bộ được mô phỏng bởi chính nó, các kết quả được lấy trung bình. Điều này dẫn đến mô phỏng hai hệ thống đơn giản hơn và thời gian mô phỏng ít hơn.

Nếu coi rằng các hệ thống khôi phục pha và định thời tạo ra các lỗi định thời và các lỗi pha *độc lập* thì các phần này có thể được phân chia hóa và được mô phỏng riêng biệt để đạt được các ước tính phân bố của lỗi định thời $\hat{f}_T(\tau)$ và lỗi pha $\hat{f}_\Theta(\theta)$. Nhận được phân bố đồng thời của lỗi pha và lỗi định thời là:

$$\hat{f}_{T\Theta}(\tau, \theta) = \hat{f}_T(\tau) \hat{f}_\Theta(\theta) \quad (2.4)$$

sau đó thay vào (2.3) để lấy trung bình.

Cần chú ý rằng, phân chia hóa bàn về việc phân tách bài toán, và điều kiện hóa định hướng phân chia hóa và quan trọng hơn là giúp tích hợp các kết quả. Giả định độc lập, phù hợp cũng hỗ trợ trong quan hệ hóa các kết quả. Phần sau sẽ là trường hợp các phần mô phỏng tạo ra hiện tượng độc lập thống kê và các quá trình cần được kết hợp.

Đơn giản hóa và xấp xỉ hóa

Tại điểm bắt đầu mô hình sơ đồ khối ban đầu thường được chi tiết hóa tới mức có thể. Tính phức tạp của mô hình tổng thể và các mô hình phân hệ được giảm bằng việc loại bỏ các khối ít ảnh hưởng lên bài toán, xấp xỉ hóa và đơn giản hoá bằng cách kết hợp các khối.

Ví dụ về cách rút gọn sơ đồ khối, xét bài toán ước tính hiệu năng mức hệ thống. Nếu coi kênh là kênh thay đổi rất chậm theo thời gian và hệ thống đang hoạt động tại SNR cao thì có thể cho rằng các lỗi đồng bộ sẽ rất nhỏ và vì vậy có thể bỏ qua ảnh hưởng của đồng bộ trong quá trình ước tính hiệu năng. Khi này không cần mô phỏng các phần khôi phục định thời và khôi phục sóng mang và có thể xoá bỏ ra khỏi sơ đồ khối.

Mở rộng việc dùng xấp xỉ hóa và giả định để đơn giản mô hình mô phỏng. Giả định và xấp xỉ hóa được sử dụng phổ biến nhất bao gồm việc tuyến tính hóa và bất biến hóa theo thời gian. Hầu hết các hệ thống thực tế, khi được quan trắc trong thời gian dài và trên dải tín hiệu đầu vào thay đổi rộng, có thể biểu lộ tính phi tuyến và thay đổi theo thời gian nhưng chúng có thể được xấp xỉ tốt bởi các mô hình tuyến tính và bất biến theo thời gian trong các khoảng thời gian ngắn và các mức tín hiệu thấp.

Bất biến theo thời gian ngụ ý rằng trong khoảng thời gian mô phỏng, các đặc tính của tín hiệu và các thành phần hệ thống đang được mô phỏng là không thay đổi. Thực tế, khái niệm bất biến theo thời gian là tương đối. Nếu tham số hệ thống thay đổi chậm thì có thể coi một số tính huống là cố định trong khoảng thời gian mô phỏng. Chẳng hạn, xét bài toán ước tính BER trên kênh vô tuyến trong đó các ăng ten phát và thu là dừng. Nếu: (i) những thay đổi trong đặc tính kênh là do thay đổi điều kiện khí quyển; (ii) tốc độ ký hiệu truyền dẫn là vài triệu ký hiệu trên giây thì có thể coi kênh là "tựa tĩnh". Điều đó nói rằng kênh vẫn duy trì cùng một điều kiện trong khi vài trăm triệu ký hiệu đi qua nó và đặc biệt có ý nghĩa khi xác định xác suất lỗi tức thời trong điều kiện kênh cho trước. Nếu BER được ước tính là khoảng 10^{-3} thì chỉ cần mô phỏng vài nghìn ký hiệu để ước tính BER. Điều này thể hiện khoảng thời gian mô phỏng là vài ms trong khi hằng số thời gian của kênh là khoảng vài phút vì vậy nó là hợp lý để coi kênh là tĩnh trong khoảng thời gian mô phỏng. Việc lấy xấp xỉ tựa tĩnh có vai trò rất quan trọng để đơn giản hoá các mô hình mô phỏng.

Giả định tựa tĩnh và đơn giản hoá có thể được áp dụng cho hệ thống bất kỳ trong đó tồn tại hiện tượng và các quá trình có các độ rộng băng khác nhau đáng kể. Khi này, có thể mô phỏng các ảnh hưởng của quá trình thay đổi nhanh hơn trong khi đó vẫn đang coi quá trình chậm trong trạng thái cố định. Vì vậy, có thể coi giả định tựa tĩnh là yêu cầu để phân chia hóa và điều kiện hóa.

Tương tự, ta sử dụng các phép xấp xỉ tuyến tính cho các thành phần phi tuyến. Tổng quát, việc phân tích các mô hình phi tuyến là rất phức tạp nhưng với mô phỏng có phần dễ

dàng hơn nhưng chúng vẫn đặt ra vài vấn đề. Mỗi khi có thể ta nên cố gắng lấy xấp xỉ thuộc tính của các thành phần này bằng các mô hình tuyến tính.

Cuối cùng, ta sử dụng nhiều nguyên lý hệ thống tuyến tính để đơn giản hóa sơ đồ khối. Ta có thể kết hợp vài khối nối tiếp và song song thành một khối bằng cách nhân hoặc cộng các hàm truyền đạt. Trường hợp các khối tuyến tính bất biến cho phép thay đổi thứ tự các khối để đơn giản mô hình đơn. Các loại đơn giản đặc biệt có ý nghĩa khi mô phỏng ước tính hiệu năng bởi lẽ: (i) các mô phỏng ước tính hiệu năng thường rất lâu; (ii) khác với trường hợp mô phỏng được dùng để hỗ trợ thiết kế chi tiết, ta không quan tâm quan sát tiến hóa và tiến trình của dạng sóng qua mỗi khối chức năng mà chỉ quan tâm so sánh các dạng sóng vào/ra và đếm các lỗi. Theo đó, các dạng sóng trung gian rất ít được quan tâm hoặc sử dụng. Vì vậy, có thể rút gọn toàn bộ hệ thống còn rất ít khối dẫn đến giảm đáng kể thời gian mô phỏng. Nếu các khối có cùng mức độ phức tạp thì kết hợp hàm truyền đạt của n khối sẽ dẫn tới tiết kiệm tính toán khoảng n lần.

2.2.2. Mô hình hóa các khối chức năng

Vai trò của mỗi khối chức năng trong hệ thống truyền thông là thực hiện chức năng xử lý tín hiệu cụ thể, vì vậy mô hình mô phỏng sẽ phản ánh chức năng này với các mức trừu tượng thay đổi. Bất chấp tính chi tiết cục bộ, mô hình mô phỏng tiếp nhận chuỗi mẫu dạng sóng đầu vào theo trình tự thời gian và tạo ra tập các mẫu đầu ra cũng theo trình tự thời gian ứng với đặc tính truyền đạt cụ thể. Một số lựa chọn và xem xét phải tính đến khi xây dựng mô hình và ta mô tả một số vấn đề phương pháp luận liên quan đến việc mô hình hoá trong các phần sau.

Mô hình mô phỏng của phân hệ hoặc thành phần (khối) là biến đổi của dạng:

$$\{y[k], y[k-1], \dots, y[k-m]\} = F\{x[k-j], x[k-j-1], \dots, x[k-j-n]; k; p_1, p_2, \dots, p_q\} \quad (2.5)$$

Trong đó $x[k]$ biểu diễn các mẫu đầu vào, $y[k]$ biểu diễn các mẫu đầu ra, p_1, p_2, \dots, p_q biểu diễn các tham số của khối và $k = m, 2m, 3m, \dots$ là chỉ số thời gian. Mô hình sử dụng n mẫu đầu vào để tạo m mẫu đầu ra trên “*dẫn chứng*” của mô hình theo biến đổi F , sẽ được định nghĩa theo: các mẫu đầu vào, các tham số của khối, chỉ số thời gian k . Nếu biến đổi F không phụ thuộc vào chỉ số k thì mô hình là bất biến theo thời gian. Nếu $m > 0$ thì mô hình được xét là mô hình vào/ra khối và khi $m = 0$ ta có mô hình từng mẫu. Nếu $n = 0$ thì mô hình không nhớ.

Khi xây dựng mô hình cho khối chức năng và thực hiện mô phỏng phải xét đến nhiều nhân tố. Những nhân tố này liên quan với nhau thậm chí chúng xuất hiện bất kỳ.

Biểu diễn tương đương thông thấp

Các hệ thống truyền thông chứa thành phần và tín hiệu có bản chất thông dải hoặc thông thấp. Từ viễn cảnh mô phỏng, nhận được các thuận lợi tính toán nếu biểu diễn tất cả tín hiệu và phần tử hệ thống ở dạng tương đương thông thấp phức. Với tín hiệu và hệ thống tuyến tính, tương đương thông thấp có được bằng cách dịch phổ thông băng từ tần số sóng mang về tần số $f = 0$ và mô hình tuyến tính của khối có thể được thực hiện bằng cách sử dụng biểu diễn tương

đương thông thấp của các tín hiệu đầu vào/ra và biến đổi tín hiệu, được chi tiết hóa ở chương 4.

Tương đương thông thấp của tín hiệu tất định đạt được qua chuyển dịch phổ tần của nó, trong khi đó đối với tín hiệu ngẫu nhiên thực hiện dịch mật độ phổ công suất. Nếu phổ thông băng không đối xứng qua các sóng mang thì biểu diễn tương đương thông thấp trong miền thời gian là giá trị phức. Hơn nữa, khi này các thành phần của quá trình ngẫu nhiên tương đương thông thấp sẽ được tương quan nhau.

Đối với loại hệ thống phi tuyến cũng có thể sử dụng biểu diễn tương đương thông thấp. Chi tiết hóa mô hình tương đương thông thấp cho hệ thống phi tuyến được mô tả ở chương 12.

Lấy mẫu

Một khi tín hiệu và hệ thống là thông thấp (trong trường hợp thông băng của chúng được biểu diễn bởi tương đương thông thấp) thì chúng có thể được lấy mẫu và biểu diễn bởi các mẫu cách đều nhau. Trường hợp thông thấp lý tưởng, tốc độ lấy mẫu nhỏ nhất phải gấp hai lần độ rộng băng tần của tín hiệu. Tuy nhiên, thực tế các hàm tần số có thể không được giới hạn độ rộng băng thì tốc độ lấy mẫu thường lấy là 8 đến 16 lần độ rộng băng tần. Trường hợp các hệ thống số thì tốc độ lấy mẫu thường chọn là 8 đến 16 lần tốc độ ký hiệu. Các nhân tố như lỗi chồng phổ, méo tần số khi thực thi bộ lọc và nở rộng băng thông do tính phi tuyến đều phải được tính đến khi chọn tốc độ lấy mẫu. Có thể giảm thiểu các ảnh hưởng này bằng cách tăng tốc độ lấy mẫu nhưng lại làm tăng tải tính toán (thời gian mô phỏng lâu hơn) vì vậy cần phải dung hoà độ chính xác và thời gian mô phỏng. Lấy mẫu đa tốc độ, kích thước bước khả biến... là các kỹ thuật được áp dụng để giảm tải tính toán.

Mô hình tuyến tính và phi tuyến

Trong khi hầu hết các khối là tuyến tính thì một phần đáng kể của hệ thống cần phải xử lý phi tuyến. Tồn tại một số xử lý phi tuyến là chủ ý và không chủ ý. Minh chứng cho loại chủ ý như: các bộ cân bằng hồi tiếp quyết định, tính phi tuyến trong các phân hệ đồng bộ... Với loại không chủ ý như: tính cách phi tuyến của các bộ khuếch đại.

Như xấp xỉ đầu tiên, có thể mô hình hóa hầu hết tính phi tuyến là có các ảnh hưởng tuyến tính lên các tín hiệu truyền thông, đặc biệt nếu tín hiệu là tín hiệu đường bao không đổi. Tuy nhiên, trong các hệ thống đa sóng mang hoặc trong các hệ thống đơn sóng mang với điều chế biên độ cầu phương bậc cao (M-QAM) thì tính cách phi tuyến không chủ ý có ảnh hưởng đáng kể lên hiệu năng hệ thống và vì vậy cần phải xét các mô hình mô phỏng phi tuyến. May thay, hầu hết tính cách phi tuyến này đều có thể được mô hình hóa một cách hiệu quả bằng cách sử dụng biểu diễn tương đương thông thấp phức.

Tồn tại nhiều giải pháp để mô hình hóa các hệ thống có tính phi tuyến. Chúng gồm, các phương pháp phi tuyến chuỗi lũy thừa không nhớ, các mô hình phi tuyến chọn lọc tần số có nhớ và các phương trình vi phân phi tuyến. Tổng quát, việc phân tích toán học các hệ thống phi tuyến và ước lượng các ảnh hưởng của tính phi tuyến là khó. Tuy nhiên, dùng mô phỏng thì đơn giản hơn ngay cả với các mô hình phi tuyến chọn lọc tần số.

Các mô hình phi tuyến được phân thành hai loại chính: (i) các mô hình khối vào-ra; (ii) các phương trình vi phân phi tuyến. Tập các mô hình thứ nhất thường dựa vào các phép đo trong khi đó lớp các mô hình thứ hai thường được rút ra từ việc mô hình hóa tính cách vật lý của thiết bị. Các giải pháp của các mô hình phương trình vi phân phi tuyến được thực hiện bằng cách sử dụng các mô hình tích phân bước thời gian khả biến (có hiệu quả tính toán nhất mặc dù chúng có thể mất nhiều thời gian thiết lập hơn). Cũng có thể phân giải một phân hệ phi tuyến vào dạng sơ đồ khối và mô phỏng dạng sơ đồ khối bằng cách sử dụng các khối cơ bản sẵn có trong thư viện mô phỏng. Giải pháp này mặc dù dễ thiết lập hơn nhưng sẽ không là giải pháp hiệu quả tính toán cao nhất.

Một nhân tố quan trọng phải được xét đến khi mô phỏng các phần tử phi tuyến là tính phi tuyến gây ra dẫn rộng độ rộng băng tần (nở phổ) vì vậy tốc độ lấy mẫu phải được chọn đủ lớn để bắt giữ các ảnh hưởng của sự nở rộng độ rộng băng tần.

Bất biến theo thời gian

Như đã được trình bày, tất cả các hệ thống, các thành phần và các quá trình sẽ biểu lộ tính cách thay đổi theo thời gian khi quan sát trong khoảng thời gian dài. Việc sử dụng hay không sử dụng mô hình thay đổi theo thời gian được định hướng bởi một số nhân tố. Xét ba trường hợp sau:

Trường hợp thứ 1: Trong nhiều ứng dụng như mô hình hóa và mô phỏng sợi quang, các đặc tính sợi quang có thể thay đổi rất ít trên tuổi thọ của hệ thống truyền thông và vì vậy chọn mô hình bất biến theo thời gian.

Trường hợp thứ 2: Tính cách thay đổi theo thời gian có thể đáng kể nhưng tốc độ thay đổi của chúng rất thấp so với độ rộng băng thông của các phần bất biến theo thời gian của hệ thống. Khi này, lấy *xấp xỉ tựa tĩnh* là hợp lệ, thực hiện mô phỏng bằng cách sử dụng những chớp ảnh cố định của các phần thay đổi theo thời gian, sau đó lấy trung bình các kết quả (nghĩa là, phân chia hóa và trung bình hóa). Trong hai trường hợp này, phép đo hiệu năng là một số trung bình hóa dài hạn chứ không phải là tính cách động.

Trường hợp thứ 3: Đôi khi được chứng thực là mô phỏng *động* các thay đổi theo thời gian, được dùng khi những biến đổi theo thời gian là “*nhANH*” và hiệu năng của hệ thống dựa vào tính cách nhất thời hay động của hệ thống. Trường hợp điển hình là việc bắt và bám tính cách nhất thời của phân hệ đồng bộ làm việc trong môi trường kênh pha đỉnh nhANH. Mô hình mô phỏng cho trường hợp này sẽ là mô hình đường trễ rẽ nhánh có các hệ số khuếch đại nhánh thay đổi theo thời gian, thường được mô hình hóa là các quá trình ngẫu nhiên được lọc.

Trong khi khá dễ dàng rút ra và thực thi mô hình mô phỏng đường trễ rẽ nhánh cho các hệ thống thay đổi theo thời gian thì hai nhân tố phải được tính đến là: (i) do tính thay đổi theo thời gian gây ra hiện tượng nở phổ tần đáng kể, hậu quả là phải lấy mẫu cao hơn; (ii) không được thay đổi thứ tự các khối có tính thay đổi theo thời gian bởi lẽ không tồn tại tính chất giao hoán đối với các hệ thống thay đổi theo thời gian.

Tính nhớ

Nếu đầu ra tức thời $y[k]$ của một phần tử phụ thuộc vào đầu vào tức thời $x[k]$ thì phần tử đó là không nhớ; ngược lại là có nhớ. Các bộ lọc, do có tính cách chọn lọc tần số nên thuộc loại có nhớ (lưu ý, tính cách chọn lọc tần số là đồng nghĩa với tính có nhớ). Ngoài ra, một số loại phi tuyến có nhớ và tồn tại nhiều mô hình khả dụng để mô phỏng chúng. Đặc biệt cẩn thận khi thực hiện các mô hình có nhớ theo lưu giữ các trạng thái nội tại của mô hình sao cho mô hình có thể trở lại. Ví dụ khi dùng mô hình bộ lọc tổng quát cho một vài trường hợp trong sơ đồ khối thì trạng thái bên trong của mỗi trường hợp của bộ lọc phải được lưu giữ riêng biệt sao cho khi mô hình bộ lọc được dùng đến vài lần trong quá trình mô phỏng nó luôn được đi vào trạng thái nguyên vẹn trước đó.

Mô phỏng trong miền thời gian và miền tần số

Có thể mô hình hóa và mô phỏng quan hệ vào/ra của các khối chức năng trong miền thời gian hoặc miền tần số. Gánh nặng tính toán của 2 giải pháp cho các khối tuyến tính thường là tương đương, miền phù hợp để thực thi phụ thuộc vào miền mà các đặc tính kỹ thuật được cung cấp khởi đầu, chẳng hạn nếu bộ lọc được xác định theo đáp ứng tần số thì nên chọn miền tần số. Trường hợp phi tuyến, các đặc tính kỹ thuật và việc thực hiện đa phần được thực hiện trong miền thời gian.

Trong khi việc thực hiện mô hình có thể trong cả miền thời gian và tần số thì thực tế thường dùng các mẫu trong miền thời gian để biểu diễn tín hiệu vào/ra. Các mô hình trong miền tần số, ví dụ như dùng FFT để mô phỏng các bộ lọc cần phải lưu đệm nội bộ các mẫu đầu vào miền thời gian, lấy biến đổi vectơ đầu vào đã được lưu trong bộ đệm theo cách xử lý trong miền tần số, FFT ngược, và lưu đệm tại đầu ra. Phải lưu đệm bởi lẽ thực hiện biến đổi là hoạt động xử lý khối dựa trên tập các mẫu chứ không phải là xử lý theo từng mẫu. Trong quá trình mô phỏng, các mẫu đầu vào và đầu ra có thể xuất/nhập bộ đệm theo từng mẫu tại một thời điểm hoặc theo các khối N mẫu.

Xử lý khối

Một mô hình có thể tiếp nhận và xử lý một mẫu tại một thời điểm hoặc một khối N mẫu miền thời gian trên một lần cần đến. Hiệu quả tính toán của 2 phương pháp sẽ phụ thuộc vào tính phức tạp và phân mào đầu liên quan với lần gọi của mô hình. Nếu mô hình có số các trạng thái nội bộ và các tham số là nhỏ hoặc nếu thông tin mào đầu để gọi (hay làm xuất hiện) mô hình là nhỏ so với các tính toán được thực hiện bên trong mô hình, thì việc gọi (làm xuất hiện) mô hình trên cơ sở từng mẫu là thuận tiện và hiệu quả. Khi thông tin mào đầu để gọi mô hình là lớn thì việc sử dụng khối hoặc giải pháp xử lý vectơ có (mô hình được gọi bằng một vectơ đầu vào kích cỡ N) cho ta hiệu quả tính toán cao.

Xử lý khối dẫn đến phải lưu đệm và giao diện tốt với các khối trước và theo khối. Xử lý khối gây trễ $N \cdot T_s$ giây, bởi lẽ đầu ra không thể được tính toán cho đến khi tập hợp được toàn bộ N mẫu đầu vào và được chuyển vào mô hình. Kể cả mô hình vào/ra khối trong vòng hồi tiếp sẽ tạo ra các kết quả sai do trễ xử lý lớn. Ngoài ra, nếu mô hình xử lý khối được trộn lẫn với mô hình phi tuyến thì nên trở lại phương pháp xử lý theo từng mẫu đối với phần tử phi tuyến tính, vì gây nghẽn đầu vào và xử lý trên cơ sở từng khối dùng nguyên lý xếp chồng, xếp chồng

không được áp dụng cho phần tử phi tuyến. Ví dụ tình huống này xảy ra khi tính phi tuyến xuất hiện giữa hai bộ lọc FFT kiểu phát sinh và chồng chập. Bộ lọc FFT phát sinh và chồng chập dựa vào nguyên lý tuyến tính. Kỹ thuật tính toán đáp ứng bộ lọc cho các khối không chồng chập của các mẫu đầu vào và cộng các đáp ứng tại đầu ra. Với phần tử phi tuyến sau bộ lọc, phương pháp xử lý khối không thể thực hiện được cho phần tử phi tuyến bởi lẽ xếp chồng không áp dụng được đối với tính phi tuyến. Để xử lý chính xác thực hiện theo trình tự sau: (i) đáp ứng ra do mỗi khối của các mẫu đầu vào phải được cộng tại đầu ra của bộ lọc đầu tiên; (ii) mô hình phi tuyến xử lý đầu ra đã cộng của bộ lọc đầu tiên trên cơ sở từng mẫu; (iii) đầu ra của phần tử phi tuyến được xử lý bởi bộ lọc thứ hai sử dụng chồng chập và phương pháp cộng của xử lý khối. Chi tiết hóa cho bài toàn này được xét ở chương 12.

Một yếu tố khác phải tính đến khi bàn về xử lý khối là lập lịch. Nếu các mô hình khác nhau trong hệ thống sử dụng các kích thước khối vào/ra khác nhau thì khung mô phỏng nên có khả năng lập lịch thứ tự và tần suất gọi (gọi các phân hệ) phù hợp.

Xử lý kích thước bước khả biến

Xử lý đa tốc độ được sử dụng trong mô phỏng nếu mô hình hệ thống chứa các quá trình và hiện tượng có băng thông khác nhau lớn. Với lấy mẫu đa tốc độ, mỗi tín hiệu được lấy mẫu và được xử lý tại tốc độ phù hợp với băng thông của nó, dẫn đến cải thiện đáng kể hiệu quả tính toán. Khi sử dụng lấy mẫu đa tốc độ, cần đến nội suy để giao tiếp các luồng mẫu với các tốc độ lấy mẫu khác nhau.

Xử lý kích thước bước khả biến cũng thường được sử dụng để cải thiện hiệu quả tính toán. Giải pháp này thường được sử dụng trong các trường trình tích phân số để giải các phương trình vi phân tuyến tính và phi tuyến. Nếu các phương trình vi phân cơ bản và các nghiệm của chúng được giải chính xác thì giải pháp này sẽ giảm đáng kể tải tính toán. Khi dùng kích thước bước khả biến trong mô hình thì đầu ra phải được lưu đệm và được lấy mẫu lại nếu các khối sau sử dụng kích thước bước không đổi.

Tham số hóa

Một trong những lý do cơ bản sử dụng mô phỏng là tối ưu hóa thiết kế, trong hầu hết các trường hợp làm giảm việc tìm kiếm giá trị tối ưu của các tham số tới hạn như băng thông của bộ lọc thu, điểm hoạt động của bộ khuếch đại và số mức lượng tử được sử dụng trong máy thu. Muốn vậy, các mô hình phải được tham số hóa một cách phù hợp và các tham số thiết kế chủ đạo nên được thể hiện ra ngoài; nghĩa là các mô hình nên có “*điều chỉnh ngoài*” để điều chỉnh tham số thiết kế một cách lặp trong quá trình mô phỏng. Phải tính đến số lượng tham số cần phải có đối với một mình cho trước. Tổng quát, nên nhỏ nhất có thể, vì hệ thống truyền thông phức tạp cần có nhiều thành phần. Nếu mỗi thành phần có nhiều tham số phụ thì toàn bộ không gian tham số sẽ rất lớn. Khi này sẽ rất khó để tối ưu thiết kế dùng mô phỏng. Theo đó, khi số lượng các tham số càng ít thì việc đo các giá trị tham số và phê chuẩn càng dễ dàng hơn.

Giao tiếp giữa các khối chức năng

Cùng với giải pháp mô hình hóa và mô phỏng được sử dụng cho mỗi thành phần phụ thuộc vào bản chất của thành phần sẽ được mô hình hóa và mô phỏng, cũng cần phải tính đến

giao tiếp giữa các khối chức năng. Vì sơ đồ khối hệ thống gồm một tập các khối được kết nối với nhau, phải đảm bảo tính kiên định và tính tương thích cho cả cơ cấu mô phỏng và/hoặc người dùng. Sẽ dễ dàng hơn nếu các mô hình của các khối riêng biệt được xây dựng có các giao diện được định nghĩa và dẫn chứng rõ ràng. Một số lý giải cho sự không phù hợp gồm: các miền xử lý khác nhau, các loại tín hiệu, kích thước khối, kích thước bước, lấy mẫu đa tốc độ, đặc tính kỹ thuật các tham số không kiên định trong các khối khác nhau và nhiều lý do khác đã được sơ qua ở các phần trước.

Nhiều khó khăn khi mô phỏng mô hình phức tạp mức hệ thống xuất phát từ sự không phù hợp này. Vì vậy cần phải cẩn thận khi công thức hóa mô hình mô phỏng tổng thể, lựa chọn các khối riêng biệt và các tham số của chúng trong viễn cảnh không chỉ đối với các mô hình riêng biệt mà còn đối với mô hình chung tổng thể.

2.2.3. Mô hình hóa và mô phỏng quá trình ngẫu nhiên

Giả sử có một mô hình hệ thống với mức trừu tượng cao nhất và tính phức tạp thấp nhất, quan tâm các mặt của phương pháp luận, ứng dụng vào việc mô hình hóa và tạo các dạng sóng đầu vào (tín hiệu, tạp âm và nhiễu) điều khiển mô hình mô phỏng. Vì mục đích cơ bản của mô phỏng mức dạng sóng là *phỏng tạo* các dạng sóng trong hệ thống và tính toán một số *phép đo* dạng sóng một cách trung thực, muốn vậy trước hết cần phải lập mô hình và mô phỏng các dạng sóng đầu vào hoặc tác nhân kích thích.

Trong hệ thống truyền thông, dạng sóng mang thông tin, tạp âm và nhiễu mang bản chất ngẫu nhiên và được mô hình hóa bằng các quá trình ngẫu nhiên. Dừng là giả định đa năng nhất vì nó có thể được biện minh trong nhiều trường hợp dựa vào bản chất của tín hiệu hoặc chuỗi đang được mô hình.

Các quá trình ngẫu nhiên dừng được đặc trưng hóa bởi các phân bố xác suất nhiều chiều, khó để xác định, và ở dạng tổng quát rất khó tạo các giá trị mẫu của một quá trình dừng có phân bố n chiều bất kỳ. Ngoại trừ quá trình Gauss dừng, hoàn toàn được xác định bởi phân bố bậc 2 (các tham số của nó là hàm tự tương quan và trung bình). Đối với các quá trình không Gauss, thực tế giới hạn các đặc tính kỹ thuật thành các phân bố bậc 2.

Các giá trị mẫu của các quá trình ngẫu nhiên được dùng để điều khiển mô phỏng là các chuỗi các số ngẫu nhiên được tạo ra bởi các bộ tạo số ngẫu nhiên. Các thuật toán để tạo các chuỗi ngẫu nhiên với phân bố bất kỳ (bậc một và bậc hai) và các hàm tương quan thường được thấy trong các chương sau. Dưới đây đề cập một số mặt của phương pháp luận để lập mô hình và tạo các giá trị lấy mẫu của quá trình ngẫu nhiên.

Xấp xỉ Gauss

Xấp xỉ Gauss bởi định lý giới hạn trung tâm, nếu có các biến ngẫu nhiên X_i là độc lập, thì $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ tiến dần tới phân bố Gauss khi n lớn. Vì vậy tạp âm ăng ten thu, được đóng góp bởi một số lượng lớn các nguồn, có thể được xấp xỉ bởi quá trình Gauss. Tương tự nhiều từ một số lượng lớn người dùng cũng có thể được xấp xỉ bởi quá trình Gauss

và vì vậy không nhất thiết tạo các tín hiệu riêng biệt từ một số lượng lớn người dùng và lấy tổng chúng lại.

Biểu diễn quá trình tương đương

Khái niệm thứ hai bàn về quan điểm biểu diễn quá trình tương đương, được phát biểu như sau: Giả sử cho một quá trình ngẫu nhiên $X(t)$ đi qua n khối và xuất hiện tại đầu ra của khối thứ n là một quá trình $Y(t)$. Nếu bằng một số phương tiện (thông qua phân tích vùng, hoặc xấp xỉ hóa, hoặc bằng chính mô phỏng), có thể suy ra các đặc tính của quá trình $Y(t)$ thì toàn bộ quá trình xử lý sau đó (sau khối thứ n) ta có thể đơn giản hoá bằng cách chỉ cần tìm một chuỗi (biểu diễn các giá trị mẫu của $Y(t)$) vì vậy bỏ qua việc tạo và xử lý các giá trị mẫu của $X(t)$ thông qua n khối. Khi $X(t)$ là Gausơ và các khối là *tuyến tính* thì có thể chỉ ra rằng $Y(t)$ cũng là Gausơ. Các tham số của quá trình $Y(t)$ được rút ra từ phân tích hoặc mô phỏng $X(t)$ qua n khối. Đáng tiếc, sẽ khó rút ra các đặc tính của $Y(t)$ theo phép giải tích khi $X(t)$ là bất kỳ và các khối là phi tuyến. Khi này, có thể dùng mô phỏng để ước tính các thuộc tính của $Y(t)$ và có thể dùng các thuộc tính được ước tính này để tạo quá trình tương đương.

Giải pháp này được dùng để biểu diễn tạp âm pha trong các hệ thống truyền thông cũng như Jitter pha và định thời do các phân hệ đồng bộ tạo ra. Giả định được dùng phổ biến nhất ở đây là quá trình Gausơ *dùng*. Đối với các quá trình tạp âm lối vào thì mật độ phổ công suất PSD được giả định là trắng. Với các quá trình khác thì PSD được giả sử là dạng kín cho trước như tỉ số đa thức theo f^2 , trong trường hợp này quá trình có thể được tạo ra bằng cách lọc quá trình Gausơ trắng bằng bộ lọc có hàm truyền đạt. Trường hợp các hàm PSD bất kỳ, chẳng hạn như trường hợp PSD Doppler của các kênh pha định, ta có thể *hoặc* xấp xỉ hóa phổ bằng tỉ số đa thức theo f^2 và áp dụng phương pháp thừa số hóa phổ để có được hàm truyền đạt của bộ lọc hoặc làm phù hợp mô hình trung bình di chuyển tự hồi quy ARMA trực tiếp theo PSD để đạt được các hệ số của bộ lọc đệ quy mà sẽ tạo ra PSD mong muốn.

Các quá trình phi Gausơ với PSD bất kỳ là khó để tổng hợp và mô phỏng hơn. Một phương pháp xử lý trường hợp này mặc dù rất khó áp dụng song có thể được thấy trong chương 7.

Các quá trình nhanh và chậm

Tồn tại khá nhiều hiện tượng ngẫu nhiên có băng thông hay “*các hằng số thời gian*” khác nhau nhiều. Nếu băng thông của quá trình này khác nhiều so với băng thông của quá trình khác thì nên dùng một trong hai giải pháp sau để giảm thời gian mô phỏng:

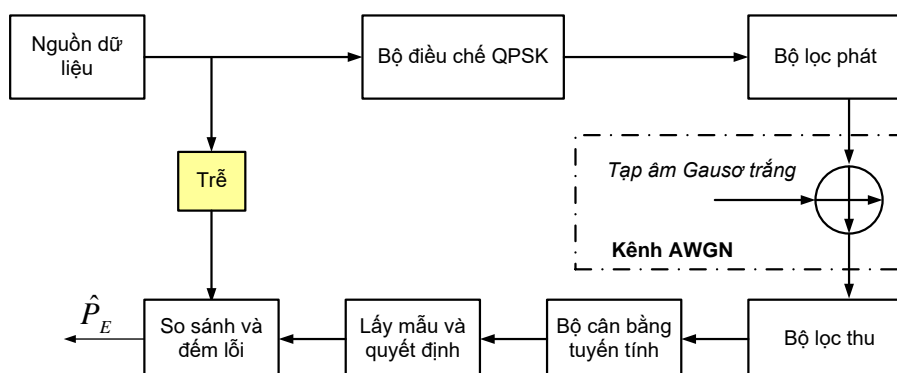
Giải pháp thứ nhất: Bài toán nên được phân chia hóa và điều kiện hóa thành quá trình chậm và thực hiện mô phỏng riêng biệt theo giá trị của quá trình chậm nếu có thể trong khi đó phân chia hóa hệ thống bàn về việc mô phỏng quá trình nhanh hơn. Theo đó, trong quá trình mô phỏng không cần phải tạo các giá trị mẫu của quá trình chậm bởi lẽ giá trị của nó thay đổi rất ít trong khoảng thời gian của số lượng lớn các mẫu của quá trình nhanh. Giải pháp này thường được sử dụng để mô phỏng hiệu năng của các hệ thống truyền thông đang hoạt động trên các kênh pha định chậm.

Giải pháp thứ hai: Lấy mẫu đa tốc độ, các quá trình được lấy mẫu tại các tốc độ khác nhau phù hợp với các băng thông của chúng sao cho số các mẫu được tạo ra trong khoảng thời gian mô phỏng là tỉ lệ nghịch với các băng thông của các quá trình tương ứng. Nếu cần có thể dùng phép nội suy và giảm mẫu để trộn các tín hiệu này với nhau tại một số điểm trong hệ thống.

2.3. Ước tính hiệu năng

Một trong những mục đích chính của mô phỏng là *ước tính* hiệu năng. Đối với hệ thống truyền thông tương tự, phép đo hiệu năng cơ bản là tỷ số tín hiệu trên tạp âm đầu ra SNR_0 . Với hệ thống truyền thông số, phép đo hiệu năng là tỉ số lỗi bit BER hoặc tỉ số lỗi khung FER. Tỉ số tín hiệu trên tạp âm SNR cũng là phép đo hiệu năng thứ cấp trong các hệ thống truyền thông số (vì BER là một hàm đơn trị của SNR). Dùng kỹ thuật Monte Carlo để ước tính phép đo hiệu năng. Để minh họa các mặt của phương pháp luận cho mô phỏng Monte Carlo và ước tính hiệu năng, ta xét bài toán ước tính xác suất lỗi trong các hệ thống truyền thông số. Mô hình mô phỏng được cho ở hình 2.2. Lưu ý rằng, mô hình mô phỏng khi này là mô hình đơn giản của hệ thống được cho ở hình 2.1. Một số khối như đồng bộ và mã hoá được loại bỏ. Đồng bộ được coi là lý tưởng hoặc những ảnh hưởng của đồng bộ được xử lý thông qua việc điều kiện hóa và phân chia hóa như đã được giải thích trong phần trước. Mã hoá cũng được loại bỏ vì trọng tâm là tính toán xác suất lỗi không mã hoá trong hệ thống; các ảnh hưởng của việc mã hoá được xử lý riêng biệt trong chương 8. Ngoài ra, kênh được giả định là thay đổi *chậm* hoặc *tĩnh*, và các trọng số bộ cân bằng là “*ổn định*” sau khi chúng hội tụ tới các giá trị có trạng thái ổn định.

Hiệu năng BER được mô phỏng bằng việc đưa chuỗi bit ngẫu nhiên vào bộ điều chế, qua các khối chức năng của mô hình được cho ở hình 2.2, sau đó được so sánh và đếm lỗi để xác định BER. Lưu ý rằng vì mục đích mô phỏng xác định BER không mã hóa kiểm soát lỗi nên không cần đến nguồn dữ liệu thực tế, bộ giải mã hoá nguồn, bộ mã hoá kiểm soát lỗi, bộ đan xen (vì ảnh hưởng của những khối này là tạo ra chuỗi nhị phân ngẫu nhiên). Việc đơn giản hóa này phải được thực hiện trước khi mô phỏng ước tính hiệu năng. Động cơ chủ yếu để đơn giản hoá là giảm thời gian mô phỏng. Vì vậy, chỉ các thành phần có ảnh hưởng đáng kể lên hiệu năng được chứa trong sơ đồ khối.



Hình 2.2: Mô hình mô phỏng để xác định BER

BER được xác định theo phương pháp Monte Carlo, BER không thể là tất định mà đúng hơn là được ước tính bằng cách cho N ký hiệu qua hệ thống và đếm lỗi. Giả sử rằng đếm được N_e lỗi trong số N ký hiệu đi qua hệ thống thì BER là:

$$\hat{P}_E = \frac{N_e}{N} \quad (2.6)$$

Là một ước tính của xác suất lỗi.

$$P_E = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_e}{N} \quad (2.7)$$

Tổng quát, ước tính Monte Carlo không bị lệch. Khi các giá trị của N nhỏ dẫn đến các ước tính lỗi có phương sai lớn (khi phương sai của ước tính lớn thì ước tính kém chính xác), và khi các giá trị của N là lớn cho ta các ước tính lỗi có phương sai nhỏ. Ước tính \hat{P}_E hội tụ về P_E (giá trị đúng của xác suất lỗi) khi $N \rightarrow \infty$, vì vậy thực tế thường dùng N lớn nhất có thể (cần sự dung hòa các tham số đối nghịch: thời gian mô phỏng và tính chính xác của kết quả mô phỏng). Chương sau sẽ đề cập các kỹ thuật làm giảm phương sai của ước tính lỗi cho giá trị N cố định. Các kỹ thuật giảm phương sai, cần có sự kết hợp giữa phân tích và mô phỏng, và phải được áp dụng cẩn thận. Theo đó, cần có kiến thức khá sâu về lý thuyết ước tính.

Cần đặc biệt lưu ý hai khối chức năng ở hình 2.2 là những khối “trễ” và “so sánh và đếm lỗi”. Đối với: (i) Khối “so sánh và đếm lỗi” có chức năng rõ ràng là so sánh các ký hiệu thu với các ký hiệu dữ liệu gốc sau đó đếm số lỗi N_e ; (ii) Khối “trễ” xác định thời gian trễ của toàn bộ các phần tử của hệ thống để việc so sánh đếm lỗi được chính xác. Cần lưu ý rằng việc xác định trễ là khó và phải được thực hiện cẩn thận (bởi lẽ tính ngẫu nhiên của các phần tử trong hệ thống). Có thể được giải thích sơ bộ như sau: Một số khối chức năng có đáp ứng pha khác không, vì vậy tín hiệu đi qua những khối chức năng này bị trễ thời gian. Kết quả là tín hiệu tại đầu ra của khối nguồn dữ liệu phải được trễ sao cho ký hiệu tại đầu ra của máy thu so sánh được với ký hiệu tương ứng tại đầu ra của nguồn dữ liệu. Việc xác định lượng trễ này phải được thực hiện cẩn thận. Nếu không chính xác thì ước tính BER sẽ bị lệch, ước tính BER sẽ vượt quá xác suất lỗi đúng. Việc xác định giá trị trễ thích hợp là phần quan trọng của quy trình hiệu chuẩn. Hiệu chuẩn mô phỏng là một thủ tục để đảm bảo các mức tín hiệu, các mức tạp âm, các độ trễ và các thuộc tính quan trọng khác trong mô phỏng hệ thống phù hợp với các thuộc tính tương ứng của hệ thống đang được mô phỏng. Chi tiết hóa cho bài toán này được đề cập ở chương 10, ở đó sẽ bàn về kỹ thuật mô phỏng Monte Carlo sâu hơn.

Khối trễ được thực thi là đường trễ chiều dài khả biến. Chiều dài đối với một ứng dụng cụ thể được chọn để nhận được sự đồng chỉnh phù hợp giữa ký hiệu được giải điều chế (tại đầu ra máy thu) với ký hiệu phát (tại đầu ra nguồn dữ liệu). Độ trễ thường được lượng tử thành một số nguyên lần chu kỳ lấy mẫu. Để điều khiển tốt về độ trễ cần có chu kỳ lấy mẫu rất ngắn, (tần số lấy mẫu rất lớn) trong mô phỏng. Việc tăng tần số lấy mẫu làm tăng thời gian mô phỏng.

Cần phải nghiên cứu bài toán tối thiểu thời gian chạy mô phỏng nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác, đây là vấn đề có *tính nghệ thuật* của mô phỏng.