

Chương 14

MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG KÊNH DẠNG SÓNG

14.1 Mở đầu

Từ quan điểm thiết kế và phân tích hiệu năng hệ thống, nếu dung hòa giữa tính phức tạp của hệ thống truyền thông với khả năng xử lý, giá thành của máy tính, thì bài toán thiết kế dựa vào mô phỏng là các công cụ khả thực xuyên suốt công nghiệp truyền thông và ngày càng phổ biến hơn. Thông qua việc dùng mô phỏng, cho phép nghiên cứu các đặc trưng hoạt động của hệ thống phức tạp hơn, thực tế hơn so với những hệ thống không dựa trên mô phỏng bởi lẽ ở các hệ thống không dựa vào mô phỏng tính phức tạp bị hạn chế để đảm bảo việc phân tích có thể kiểm soát được. Mô phỏng cho phép thay đổi một cách dễ dàng các thông số hệ thống và nhanh chóng đánh giá được các ảnh hưởng của việc thay đổi đó ở dạng hiển thị trực quan và tương tác của các kết quả mô phỏng. Ngoài ra, hiểu các kỹ thuật mô phỏng sẽ hỗ trợ cho chương trình nghiên cứu của bạn đọc đang làm việc trong lĩnh vực truyền thông.

Trong chương này, ta tập trung vào việc mô hình hóa và mô phỏng kênh dạng sóng nhằm lột tả hoạt động và ảnh hưởng của nó ở dạng các tham số đặc trưng. Các tham số này sẽ làm đầu vào cho các giải thuật thích ứng, làm cơ sở để thiết kế các hệ thống thông minh cho các nghiên cứu của ta sau này.

Điều gì gây khó khăn việc thiết kế các kênh truyền thông như kênh vô tuyến di động, gây ra nhiễu mức độ nhiễu, méo và tạp âm. Kênh vô tuyến di động cũng là kênh thay đổi theo thời gian và chịu ảnh hưởng của pha đỉnh. Ngoài ra, một số kênh thay đổi đến mức khó đặc trưng hóa chúng được. Hơn nữa, các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ sau phải được thiết kế để hoạt động trên các kênh vô tuyến toàn cầu với tính đa dạng của môi trường từ khu vực thành phố đến các địa hình đồi núi, trong các điều kiện thời tiết khác nhau. Giải pháp xây dựng các nguyên mẫu cho hệ thống đã được đề xuất và trường kiểm tra nguyên mẫu tại nhiều vùng trên toàn cầu, nhưng rất tốn kém và sẽ không khả thi ở các giai đoạn đầu của quá trình thiết kế hệ thống. Giải pháp có tính khả thi cao là tạo ra các mô hình thích hợp cho kênh và dựa vào *thiết kế khởi đầu* trên các mô hình này.

Nếu có thể, cho trước các mô hình kênh truyền thông là mô hình thống kê hoặc tất định, thì ít nhất ở các giai đoạn đầu của quá trình thiết kế hệ thống sử dụng các giải pháp phân tích để ước lượng hiệu năng. Ví dụ, nếu coi "*pha đỉnh*" trong kênh có hàm mật độ xác suất biên độ phân bố Rayleigh và tạp âm là Gausơ cộng, thì xác suất lỗi đối với hệ thống truyền thông nhị phân làm việc trên kênh này được biểu diễn là:

$$P_e = 1/2\overline{\gamma_b} \quad (14.1)$$

Trong đó $\overline{\gamma_b}$ là giá trị "*trung bình*" của SNR tại đầu vào máy thu. Biểu thức này được dùng để xác định nhiều tham số như công suất máy phát để đảm bảo xác suất lỗi cho trước.

Tuy nhiên, khi xây dựng hệ thống thực tế, những hạn chế về tính khả thi phải được xét đến như bộ lọc không lý tưởng, bộ khuếch đại phi tuyến. Các ảnh hưởng này rất khó để đặc trưng hóa chúng theo cách phân tích và hầu hết phải dùng đến mô phỏng hoặc kết hợp mô phỏng với phân tích giải tích. Vì vậy, lập mô hình và mô phỏng đóng vai trò trung tâm trong thiết kế các hệ thống truyền thông. Hai chủ đề bao trùm trong chương này là: phương pháp luận và giải pháp mô phỏng cho các kênh truyền thông vô tuyến.

Tài liệu về đo đặc di động và các kênh vô tuyến khác rất phong phú và thay đổi. Với mục đích mô phỏng, ta thường dựa vào các mô hình thống kê được rút ra từ đo đặc. Một số ví dụ về các mô hình được dùng để thiết kế và ước lượng hiệu năng các hệ thống truyền thông di động thế hệ thứ 2 và 3 được trình bày trong chương này.

14.1.1. Các mô hình kênh truyền thông

Trong khi “kênh” truyền thông biểu diễn môi trường vật lý giữa máy phát và máy thu, thì “mô hình kênh” trình bày quan hệ vào/ra của kênh ở dạng toán học hoặc thuật toán. Mô hình này có thể được rút ra từ đo đặc hoặc dựa trên lý thuyết truyền lan vật lý. Các mô hình dựa trên đo đặc dẫn đến việc đặc trưng hóa theo kinh nghiệm cho kênh trong miền tần số hoặc thời gian, và bao hàm các mô tả thống kê dưới dạng các biến ngẫu nhiên hoặc quá trình ngẫu nhiên. Các tham số của các phân bố cơ bản và các mật độ phổ công suất thường được ước tính từ số liệu đo. Trong khi các mô hình dựa trên đo đặc vẫn có tin tưởng cao về tính hợp lệ và thường là những mô hình hữu dụng nhất để thiết kế thành công, thì thường tỏ ra khó dùng và khó tổng quát hóa trừ phi phép đo mở rộng được tập hợp trên các môi trường phù hợp. Ví dụ, rất khó sử dụng các kết quả đo từ một vùng thành phố này để đặc tính hóa mô hình cho vùng thành phố khác trừ khi một lượng lớn dữ liệu được tập hợp rộng về không gian và đa dạng về địa hình, và cần có lý thuyết cơ bản đủ mạnh để giải thích ngoại suy mô hình đó cho vị trí mới.

Việc triển khai mô hình toán cho truyền lan tín hiệu cần có hiểu biết sâu về các hiện tượng vật lý cơ bản. Ví dụ: để mô hình hóa cho kênh vô tuyến tầng điện ly, phải hiểu rõ truyền lan sóng vô tuyến. Tương tự, phải có hiểu biết căn bản về kiến thức quang học mới triển khai được các mô hình cho các sợi quang đơn mode và đa mode.

Một trong những thách thức khi lập mô hình kênh là chuyển mô hình truyền lan vật lý chi tiết thành dạng phù hợp để mô phỏng. Từ viễn cảnh vật lý, các mô hình toán có thể quá chi tiết hoặc có thể không ở dạng phù hợp để mô phỏng. Ví dụ, mô hình toán cho kênh vô tuyến có thể có dạng phương trình Maxwell. Mô hình này phải được đơn giản và được chuyển sang dạng thuận tiện như: hàm truyền đạt hoặc đáp ứng xung kim trước khi mô phỏng. May thay, có phần dễ dàng hơn so với việc rút ra các mô hình vật lý cơ bản và định rõ các tham số của những mô hình này. Một khi rút ra được mô hình vật lý và định rõ các giá trị tham số, việc chuyển mô hình vật lý sang mô hình mô phỏng (thuật toán) thường dễ dàng.

14.1.2. Mô phỏng các kênh truyền thông

Các kênh truyền thông vật lý như: cáp đồng, ống dẫn sóng, không gian tự do và sợi quang thường thể hiện tính tuyến tính. Một số kênh như kênh vô tuyến di động, tỏ ra vừa có tính tuyến tính vừa có tính thay đổi ngẫu nhiên theo thời gian LTV. Mô hình mô phỏng cho những kênh này thuộc một trong hai loại sau:

1. Mô hình hàm truyền đạt cho kênh bất biến theo thời gian. Ví dụ: cáp đồng, cáp quang và không gian tự do. Khi này, ta coi kênh có bản chất tĩnh (nghĩa là, kênh có đáp ứng xung kim bất biến theo thời gian) tạo ra một đáp ứng tần số cụ thể bởi lẽ trễ không đổi trong kênh. Hàm truyền đạt của kênh bất biến theo thời gian là “*phẳng*” nếu đặt vào kênh một tín hiệu có độ rộng băng thông, thì đáp ứng của kênh lên tín hiệu đó là không đổi. Kênh được gọi là “*chọn lọc tần số*” nếu tín hiệu vào có một độ rộng băng thông mà trên đó tác động của kênh với các mức độ khác nhau tại các tần số khác nhau trong độ rộng băng tín hiệu hay nói cách khác đáp ứng tần số của kênh trong vùng tần số tín hiệu là thay đổi.

2. Mô hình đường trễ rẽ nhánh TDL cho kênh thay đổi theo thời gian. Một ví dụ quan trọng là kênh vô tuyến di động. Với mô hình kênh này, kênh thường được coi là thay đổi theo thời gian. Nếu như kênh thay đổi trong khoảng thời gian nhỏ nhất của tín hiệu đặt vào, thì kênh được gọi là “*pha đỉnh nhanh*”. Nếu như kênh vẫn không đổi trong nhiều ký hiệu liên tiếp của nguồn tín hiệu đặt vào, thì kênh được gọi là kênh “*pha đỉnh chậm*” và khi này được coi như loại (1).

Các mô hình hàm truyền đạt có thể được mô phỏng trong miền thời gian hoặc miền tần số sử dụng bộ lọc đáp ứng xung kim hữu hạn (FIR) hoặc đáp ứng xung kim vô hạn (IIR). Các mô hình kinh nghiệm ở dạng: đáp ứng được đo hoặc đáp ứng xung kim được tổng hợp hoặc đáp ứng tần số thường được mô phỏng bằng cách dùng kỹ thuật FIR. Biểu thức giải tích cho hàm truyền đạt là dễ dàng hơn để mô phỏng sử dụng kỹ thuật IIR. Các bộ lọc IIR và FIR đã được thảo luận chi tiết trong chương 5.

Các mô hình mô phỏng cho các kênh (pha đỉnh) thay đổi ngẫu nhiên theo thời gian dạng mô hình đường trễ rẽ nhánh TDL có các độ lợi nhánh và các trễ là các quá trình ngẫu nhiên. Nếu biết trước mô hình quá trình ngẫu nhiên cho các thay đổi theo thời gian cơ bản (pha đỉnh), thì có thể rút ra được các thuộc tính của quá trình độ lợi nhánh và được mô phỏng bằng các kỹ thuật được đề cập ở chương 13. Nếu kênh được giả định là kênh thay đổi *chậm* theo thời gian sao cho các điều kiện kênh không thay đổi trên nhiều ký hiệu phát, thì ta có thể dùng chụp ảnh (nghĩa là, đáp ứng xung kim tĩnh) của kênh để mô phỏng. Điều này có thể được lặp khi các điều kiện kênh thay đổi. Bằng cách lặp các mô phỏng cho nhiều điều kiện kênh, ta có thể suy ra hiệu năng hệ thống trong các chu kỳ thời gian dài dùng các phép đo hiệu năng như xác suất ngừng hoạt động như đã được đề cập ở chương 11.

14.1.3 Mô hình kênh rời rạc

Trọng tâm của chương này là các mô hình kênh dạng sóng để trình bày tương tác vật lý giữa dạng sóng tín hiệu phát và kênh. Các mô hình kênh dạng sóng được lấy mẫu tại tần số lấy mẫu phù hợp. Các mẫu được xử lý thông qua mô hình mô phỏng. Kỹ thuật khác thường hiệu

quả hơn cho vài ứng dụng là biểu diễn kênh bằng một số hữu hạn các trạng thái. Tiến triển theo thời gian, trạng thái kênh thay đổi theo tập xác suất chuyển dịch, thì có thể định nghĩa kênh bởi một chuỗi Markov. Mô hình kênh kết quả hầu như có dạng mô hình Markov ẩn (HMM). Giả sử HMM được xây dựng chính xác, thì việc mô phỏng dựa trên HMM cho phép đặc tính hóa chính xác hiệu năng hệ thống truyền thông với hiệu quả tính toán cao. Các mô hình kênh rời rạc và các HMM là chủ đề của chương 15.

14.1.4 Phương pháp luận mô phỏng hiệu năng hệ thống truyền thông

Mô phỏng hiệu năng hệ thống truyền thông hoạt động trên kênh bất biến theo thời gian là khá đơn giản. Khi này, kênh được coi là một khối tuyến tính bất biến LTIV. Mặt khác, kênh thay đổi theo thời gian yêu cầu phải xét cụ thể. Phương pháp luận được dùng phụ thuộc vào mục đích mô phỏng và phụ thuộc vào kênh thuộc loại thay đổi *nhANH* hay *chậm* theo tín hiệu và các phân hệ đang được mô phỏng. Nhân tố quan trọng khác là quan hệ giữa độ rộng băng thông của tín hiệu và độ rộng băng thông của kênh. Mức độ phức tạp của mô hình kênh là hàm của các đặc tính thời gian và các đặc tính tần số của cả nguồn tín hiệu và kênh.

Nét đặc thù của chương

Phần đầu được dành để triển khai mô hình cho kênh truyền thông, bắt đầu bằng các mô hình hàm truyền đạt đơn giản cho kênh "*ống dẫn*" hoặc "*kim loại*". Kênh này bao gồm cáp xoắn, cáp, ống dẫn sóng và cáp quang, là các kênh tuyến tính bất biến theo thời gian LTIV vì vậy mô hình đáp ứng xung kim tính và hàm truyền đạt là đủ. Sau đó, ta xét các mô hình kênh cho kênh vô tuyến không gian tự do, là tuyến tính nhưng có thể thay đổi theo thời gian.

Phần sau đề cập việc mô phỏng các kênh truyền thông, nhấn mạnh việc thực thi các mô hình đường trễ rẽ nhánh TDL cho các kênh thay đổi theo thời gian một cách ngẫu nhiên. Triển khai ba mô hình đường trễ rẽ nhánh TDL khác nhau theo mức độ tăng dần về mức độ phức tạp và dung lượng.

Kết thúc chương là mô tả phương pháp luận để mô phỏng hiệu năng các hệ thống truyền thông hoạt động trên các kênh pha đỉnh. Qua chương này, các kênh truyền thông mặt đất và di động sẽ được nhấn mạnh, bởi lẽ những kênh này thể hiện phần lớn các thách thức trong quá trình mô hình hóa và mô phỏng kênh, và cũng là nguyên nhân của sự quan tâm cao trong truyền thông vô tuyến.

14.2. Kênh hữu tuyến và ống dẫn sóng

Các hệ thống truyền thông điện dùng nhiều loại dây dẫn khác nhau như cáp xoắn đôi, cáp đồng trục. Các kênh này được đặc trưng bởi mô hình mạch điện RLC và đặc tính truyền đạt vào/ra được mô hình hoá bằng hàm truyền đạt. Dùng hàm truyền đạt khi lập mô hình mô phỏng. Dễ dàng đo đáp ứng tần số với sự thay đổi độ dài cáp và rút ra mô hình hàm truyền đạt dựa trên kết quả đo. Có thể cần có mạng cáp lớn để định nghĩa kênh bằng cách dùng một số biến ngẫu nhiên để đặc trưng hóa các tham số hàm truyền đạt hay đáp ứng xung *tinh*. Khi này, kênh được xem là bất biến theo thời gian, vì vậy không cần đến mô hình kênh thay đổi theo thời gian.

Cáp sợi quang và ống dẫn sóng thuộc loại phương tiện truyền sóng có hướng. Khi các mode truyền lan thay đổi, các kênh này có thể được mô hình hóa là các hệ thống tuyến tính bất biến và được đặc trưng bởi các hàm truyền đạt.

Các hệ thống truyền thông sóng ánh sáng có hướng dùng sợi quang, trong khi đó các hệ thống truyền thông quang không gian tự do truyền ánh sáng qua khí quyển. Hầu hết các hệ thống truyền thông sóng ánh sáng dùng cáp sợi quang đơn mode hoặc đa mode làm kênh truyền, có một nguồn số liệu nhị phân, một máy thu để tạo ra một quyết định dựa trên năng lượng thu trong khoảng thời gian mỗi bit.

Ngoài việc gây suy hao xung truyền dẫn, sợi quang còn gây méo hay dẫn rộng các xung phát. Tồn tại hai cơ chế méo: tán sắc và tán sắc liên mode. Tán sắc là hậu quả của sự khác nhau về vận tốc truyền lan của các thành phần phổ được truyền. Tán liên mode được thấy trong sợi đa mode và tổng hợp từ một số lượng lớn các đường truyền lan dọc theo sợi và đến đầu vào bộ tách sóng với các trễ khác nhau. Đây là hiệu ứng đa đường. Những mối nối và khớp nối trong một mạng cáp quang gây ra phản xạ mà có thể được xem là tán liên mode phụ. Mô hình kênh đa đường được trình bày sơ bộ ở chương 4, sẽ được nghiên cứu kỹ hơn trong phần 14.4. Phần 14.4 nhấn mạnh kênh vô tuyến pha đỉnh, vì vậy nội dung được trình bày ở đây có khả năng áp dụng cho nhiều loại kênh gồm cả cáp kim loại và cáp sợi quang.

Quan hệ vào/ra của một sợi quang được mô tả bởi hàm truyền đạt tương đương thông thấp:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\lambda).G(f).H_{im}(\lambda).H_c(\lambda, f)d\lambda \quad (14.2)$$

Trong đó phổ nguồn tín hiệu $S(\lambda)$ là một hàm của bước sóng λ , $G(\lambda)$ là độ lợi chọn lọc tần số của sợi, $H_{im}(\lambda)$ là tán liên mode và $H_c(\lambda, f)$ là tán sắc.

Tán liên mode là:

$$H_{im}(f) = \frac{1}{\sigma_{im}\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\sigma_{im}^2(2\pi f)^2/2\right) - j2\pi f t_d} \quad (14.3)$$

Trong đó σ_{im} là độ rộng đáp ứng xung **rms** và t_d là trễ thời gian của sợi.

Tán sắc màu là:

$$H_c(\lambda, f) = e^{-j2\pi f \ell T(\lambda)} \quad (14.4)$$

Trong đó ℓ là độ dài sợi quang và $T(\lambda)$ là trễ nhóm của sợi quang.

Tìm được tập các thông số: phổ nguồn $S(\lambda)$, các đặc tính phân tán $T(\lambda)$, suy hao $L(\lambda)$ từ nhà sản xuất nguồn quang và sợi quang, được dùng để tính hàm truyền đạt bằng cách thay chúng vào (14.2) và lấy tích phân số tại các tần số f khác nhau. Dùng một số phép lấy xấp xỉ cho $T(\lambda)$ và $S(\lambda)$ để đơn giản quá trình tính toán hàm truyền đạt. Ví dụ, nguồn phổ lý tưởng có thể được coi là xung tần số. Xấp xỉ Gausơ có trung bình λ_0 có thể được dùng cho hầu hết nguồn thực tế. Hàm trễ nhóm thường được lấy xấp xỉ bởi một hàm bậc hai $\lambda - \lambda_0$. Một khi

ước lượng tích phân (14.2), kết quả được lưu trữ ở dạng bảng, việc mô phỏng cho kênh này được thực hiện bằng cách sử dụng FIR.

Mô hình được cho ở (14.2) là mô hình hàm truyền đặt vào/ra công suất cho sợi quang, là hợp lý để sử dụng trong các hệ thống truyền thông sóng ánh sáng tách sóng trực tiếp trong đó nguồn phổ rất hẹp so với độ rộng băng thông điều chế. Đối với các hệ thống băng rộng và các hệ thống thông tin quang coherent thì mô hình không hợp lệ.

14.3. Kênh vô tuyến

Các kênh vô tuyến đã được sử dụng từ rất sớm cho các hệ thống truyền thông đường dài, bắt đầu từ thử nghiệm của Marconi trong điện báo vô tuyến. Truyền lan sóng vô tuyến qua khí quyển gồm cả tầng điện ly - kéo dài vài trăm km trên bề mặt trái đất là một hiện tượng rất phức tạp. Truyền lan qua khí quyển phụ thuộc vào rất nhiều nhân tố như tần số, độ rộng băng tần tín hiệu, kiểu ăng ten, địa thế giữa ăng ten phát và ăng ten thu (nông thôn, thành phố, trong nhà, ngoài trời, v.v...) và các điều kiện thời tiết (khí quyển, mưa, sương mù, v.v...). Các nhà khoa học về khí quyển đã có cố gắng đáng kể để hiểu và triển khai các mô hình nhằm mô tả quá trình truyền lan sóng vô tuyến qua khí quyển. Ngoài ra, rất nhiều chương trình đo đạc đã thu được các dữ liệu truyền dẫn thực nghiệm từ tần số cao HF tới sóng viba. Tất cả những nỗ lực đó đã cho ta cách để mô hình hoá quá trình truyền lan sóng vô tuyến qua khí quyển và cách sử dụng những mô hình đó để phân tích, thiết kế và mô phỏng các hệ thống truyền thông hiện đại. Những tài liệu về mô hình hoá kênh vô tuyến rất phong phú và mọi nỗ lực để tóm tắt chúng trong vài trang giấy là không đủ. Tuy nhiên, cố gắng trình bày một vài giải pháp để mô hình hoá và mô phỏng các hệ thống truyền thông.

Từ quan điểm thiết kế hệ truyền thông, ta phân các mô hình truyền lan thành hai loại sau: (i) *mô hình ảnh hưởng phạm vi rộng* (được dùng để tính toán tổn hao truyền sóng); (ii) *mô hình ảnh hưởng phạm vi hẹp* (được dùng để mô hình hoá méo thông tin do hiệu ứng đa đường, hoặc do sự thay đổi ngẫu nhiên đặc tính truyền lan của kênh). Trong khi, loại 1 được dùng để thiết lập độ dự trữ công suất tuyến và phân tích vùng phủ sóng trong giai đoạn thiết kế khởi đầu, thì loại thứ hai được dùng để thiết kế chi tiết cho hệ thống. Ta sẽ tập trung vào loại mô hình thứ hai với mục đích nhấn mạnh các giải pháp để mô phỏng hiệu quả.

Ta bắt đầu bằng các mô hình kênh với một kênh "gần như" là không gian tự do để khảo sát vùng truyền lan sóng giữa ăng ten phát/thu là hoàn toàn tự do (không xảy ra các hiện tượng hấp thụ hoặc phản xạ sóng vô tuyến RF). Khi này, coi khí quyển là môi trường hoàn toàn đồng nhất, không hấp thụ.

Trong mô hình được lý tưởng hóa này, kênh chỉ làm suy hao tín hiệu và không gây méo dạng sóng. Suy hao được tính theo *mô hình truyền lan không gian tự do* được định nghĩa là:

$$L_f = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (14.5)$$

Trong đó λ là bước sóng của tín hiệu phát, d là khoảng cách ăng ten phát/thu vô hướng. Khuếch đại ăng ten phát và ăng ten thu được dùng để tính toán công suất thu thực tế.

Vì đa số các kênh thực tế trong đó tín hiệu truyền lan qua khí quyển và gần mặt đất, nên giả định kênh truyền lan không gian tự do không còn phù hợp nữa. Ảnh hưởng đầu tiên phải xét đến là khí quyển, nó gây ra hấp thụ, khúc xạ và tán xạ. Với băng hẹp, hấp thụ do khí quyển dẫn đến suy hao phụ. Tuy nhiên, với băng rộng tổn hao lại phụ thuộc vào tần số và thường được mô hình hóa bởi một hàm truyền đạt. Hiệu ứng *lọc* này được xét bất biến theo thời gian hoặc ít nhất là *tĩnh* (vì kênh thay đổi rất chậm so với tín hiệu). Một hiện tượng thuộc khí quyển khác nữa là méo pha do tầng điện ly, có thể được mô hình hóa bởi một đáp ứng pha thay đổi chậm theo thời gian hoặc bất biến theo thời gian. Một số ví dụ về các mô hình hàm truyền đạt được dùng để đặc tính hóa các loại kênh khí quyển cụ thể được mô tả dưới đây.

Các ảnh hưởng của khí quyển khác, mặt đất, những vật thể có trên mặt đất gần với đường truyền sóng thường tạo ra truyền dẫn đa đường. *Truyền dẫn đa đường là tín hiệu đến qua nhiều đường phản xạ và/hoặc khúc xạ từ máy phát đến máy thu.* Các ảnh hưởng này có thể thay đổi theo thời gian (do sự thay đổi trong các điều kiện khí quyển hoặc sự chuyển động tương đối của ăng ten phát và ăng ten thu như trong thông tin di động). Thuật ngữ *tia lửa* được bắt nguồn từ thiên văn học vô tuyến, được sử dụng để mô tả tính thay đổi theo thời gian trong các đặc tính kênh do các thay đổi về vật lý trong môi trường truyền lan như các thay đổi mật độ điện tử trong tầng điện ly gây phản xạ sóng vô tuyến tần số cao. Thuật ngữ pha đỉnh đa đường được dùng trong truyền thông di động để mô tả các thay đổi trong các điều kiện kênh và trong các đặc tính tín hiệu thu. Phần cuối của chương sẽ xét các mô hình kênh pha đỉnh đa đường.

14.3.1. Kênh tầng đối lưu

Truyền thông tầng đối lưu (không phải điện ly) sử dụng băng tần VHF (30 đến 300 MHz) và UHF (300 MHz tới 3 GHz) để truyền tin trên cự ly vài nghìn km. Trong những băng tần này, oxy và hơi nước có trong khí quyển sẽ hấp thụ năng lượng RF. Tổn hao do hấp thụ phụ thuộc vào tần số của sóng RF cũng như điều kiện khí quyển, độ ẩm thực tế. Tập các đặc tính điển hình về tổn hao truyền lan do sự hấp thụ khí quyển thường được thấy ở nhiều tài liệu.

Các đặc tính hấp thụ mang tính chọn lọc tần số của khí quyển có thể được xấp xỉ bằng một hàm truyền đạt ở dạng:

$$H(f) = H_0 e^{j0,02096 f [10^6 + N(f)] \ell} \quad (14.6)$$

Trong đó $N(f)$ là khúc xạ phức của khí quyển và được cho bởi:

$$N(f) = N_0 + D(f) + jN''(f) \quad (14.7)$$

Trong đó các biểu thức (14.6) và (14.7) thì H_0 là hằng số, N_0 là khúc xạ phụ thuộc tần số, $D(f)$ là hấp thụ khúc xạ, $N''(f)$ là sự hấp thụ, ℓ là khoảng cách (km). Các tham số này phụ thuộc vào tần số và các điều kiện khí quyển như nhiệt độ, áp suất, độ ẩm. Các giá trị điển hình thường được trình bày ở dạng bảng dữ liệu.

Một khi biết trước các điều kiện khí quyển và độ rộng băng tần của tín hiệu, thì có thể tính được hàm truyền đạt theo thực nghiệm tại các giá trị tần số khác nhau theo (14.6) và

(14.7). Có thể tìm được hàm truyền đạt tương đương thông thấp bằng cách dịch tần số và dùng kỹ thuật FIR để mô phỏng mô hình kênh này.

14.3.2. Ảnh hưởng của mưa lên kênh vô tuyến

Mưa có ảnh hưởng đáng kể lên truyền lan sóng viba tại các tần số cao (lớn hơn 10 GHz). Nhiều kỹ thuật đã được đề xuất trong các tài liệu để mô hình hoá các ảnh hưởng của mưa. Suy hao do mưa rào là một hàm của tốc độ mưa và tần số. Khi tốc độ mưa, tần số tín hiệu càng lớn thì suy hao càng lớn. Theo đó, suy hao tăng khi tốc độ mưa và tần số tăng. Ngoài ra, xuất hiện các đỉnh cộng hưởng trong đặc tính suy hao. Các đỉnh cộng hưởng thường xảy ra tại 22 GHz và 60 GHz. Đỉnh tại 22 GHz xảy ra do hơi nước và đỉnh tại 60 GHz xảy ra do các phân tử oxy.

Suy hao do mưa rào thường được tính toán cho các vị trí địa lý cụ thể sử dụng tính thống kê về tỉ lệ mưa vùng đó. Với thông tin vệ tinh, tổn hao được tính toán là một hàm của góc ngẩng ăng ten trạm mặt đất (theo chiều ngang) và tần số. Độ ngẩng càng thấp có nghĩa là có nhiều nước mưa hơn và tổn hao càng cao. Ảnh hưởng của mưa rào được tính toán cụ thể với xác suất ngừng hoạt động cho trước, là phân số của thời gian mà BER của tuyến vượt giá trị ngưỡng (thường là 10^{-3} cho thông tin thoại và 10^{-6} cho các tuyến số liệu).

Với các độ rộng băng thông (dải thông) tương đối nhỏ, các ảnh hưởng của mưa có thể được tính đến bằng cách đưa thêm thành phần tổn hao phụ vào mô hình kênh. Tuy nhiên, khi dải thông của tín hiệu lớn, sẽ thay đổi suy hao trên băng thông và cần có một mô hình kiểu hàm truyền đạt. Đáp ứng biên độ của hàm truyền đạt có một độ nghiêng tuyến tính (trên đồ chia theo log (dB)) và đáp ứng pha được coi là tuyến tính.

Các kênh truyền lan không gian tự do ở tần số cao sử dụng ăng ten tính hướng cao, có đặc tính phân cực cụ thể. Khi bước sóng (tương ứng tần số sóng mang) lớn hơn rất nhiều so với kích thước phân tử khí quyển và khi không có các vật cản vật lý đối với đa đường, thì có thể sử dụng phân cực ăng ten để cách ly (phân lập) các kênh. Trong các hệ thống truyền thông sử dụng nhiều phân cực trực giao cho các tín hiệu khác nhau, thì phải xét đến hiệu ứng khử cực của mưa. Khử phân cực có nghĩa là năng lượng trong một phân cực rò ra hoặc kết hợp (kết hợp với năng lượng trong sự phân cực trực giao). Điều này gây ra xuyên âm.

Nếu có hai tín hiệu được truyền trên phân cực trực giao là:

$$\tilde{s}_i(t) = A_i(t)e^{j\phi_i(t)}, \quad i = 1, 2 \quad (14.8)$$

Thì mô hình đơn giản nhất cho hai tín hiệu thu với khử phân cực là:

$$\begin{aligned} \tilde{r}_1(t) &= \alpha_{11}\tilde{s}_1(t) + \alpha_{12}\tilde{s}_2(t) \\ \tilde{r}_2(t) &= \alpha_{21}\tilde{s}_1(t) + \alpha_{22}\tilde{s}_2(t) \end{aligned} \quad (14.9)$$

Trong đó tỉ số $20\log\left(\frac{\alpha_{11}}{\alpha_{21}}\right)$ là số đo nhiễu phân cực chéo (XPI) lên tín hiệu 1 từ tín hiệu 2. Trong khi rất nhiều phép lấy xấp xỉ khả dụng trong tài liệu để phân tích ảnh hưởng của XPI lên hệ thống số hoặc tương tự, thì cần thiết phải tăng cường mô phỏng khi hệ thống lệch khỏi hệ thống lý tưởng.

14.4. Kênh pha đỉnh đa đường

14.4.1. Giới thiệu

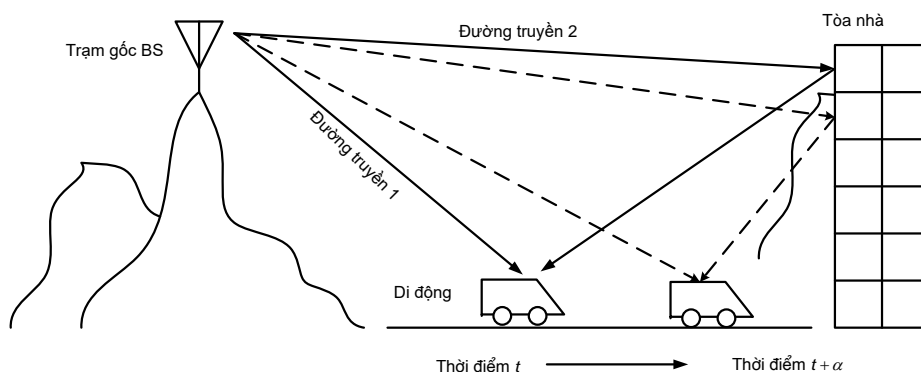
Ta mô hình hóa và mô phỏng hiện tượng đa đường và tính chuyển động được quy vào pha đỉnh, là hai hiện tượng ảnh hưởng nghiêm trọng nhất lên hiệu năng. Bất kỳ kênh truyền thông vô tuyến nào cũng có nhiều hơn một đường truyền giữa ăng ten phát và ăng ten thu. Truyền sóng đa đường có thể do phản xạ hoặc khúc xạ khí quyển hoặc do phản xạ từ các toà nhà hay các vật thể khác. Pha đỉnh đa đường có thể xảy ra ở tất cả các hệ thống truyền thông vô tuyến. Các hiệu ứng này lần đầu tiên được quan sát và phân tích cho các hệ thống tán xạ đối lưu HF những năm 1950 và 1960. Các quan tâm hiện nay là vấn đề mô hình hóa và mô phỏng cho pha đỉnh đa đường trong hệ thống vô tuyến trong nhà và di động ở dải tần số 1–60 GHz. Mặc dù cơ chế pha đỉnh là khác nhau nhưng các khái niệm về mô hình hóa, phân tích, mô phỏng là giống nhau.

14.4.2. Kênh pha đỉnh đa đường điển hình

Để minh họa giải pháp cơ bản cho việc lập mô hình kênh pha đỉnh, ta xét một kênh truyền thông di động có hai đường (tia) riêng biệt từ máy di động tới một trạm gốc cố định được minh họa ở hình 14.1a. Mặc dù hình 14.1a có hai đường nhưng dễ dàng tổng quát hoá cho N đường. Trường hợp N đường đầu ra kênh (tín hiệu vào máy thu di động) là:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t)x(t - \tau_n(t)) \quad (14.10)$$

Trong đó $a_n(t)$, $\tau_n(t)$ là suy hao và trễ truyền dẫn của thành phần đa đường thứ n. Lưu ý rằng, trễ và suy hao là hàm của thời gian để chỉ ra rằng khi ô tô di chuyển, thì trễ và suy hao cũng như nhiều thành phần đa đường thay đổi là một hàm của thời gian. Tín hiệu tổng tại máy thu là tổng của một lượng lớn các thành phần tán xạ. Những thành phần này cùng với các pha ngẫu nhiên và do đó đường bao phức kết quả có thể được mô hình hoá là một quá trình Gauss phức theo định lý giới hạn trung tâm. Sự di động trong khoảng cách nhỏ là bội của $\frac{1}{2}$ (khoảng 15 cm tại 1 GHz) làm thay đổi pha đáng kể của các thành phần tán xạ trong một tia, và làm cho các thành phần đó cộng với nhau tại một vị trí và loại trừ nhau ở vị trí lân cận. Điều này dẫn đến công suất/biên độ tín hiệu thu thay đổi nhanh được gọi là *pha đỉnh nhanh* hay *pha đỉnh phạm vi hẹp*.



Hình 14.1a: Minh họa kênh pha đỉnh đa đường

Cần lưu ý rằng, pha đỉnh phạm vi hẹp do các thay đổi pha gây ra chứ không phải là do suy hao, vì thay đổi các độ dài đường truyền một khoảng nhỏ trên các khoảng cách nhỏ. Mặt khác, nếu MS di chuyển trên khoảng cách lớn và chiều dài đường truyền tăng từ 1 lên 2 km, thì cường độ tín hiệu thu sẽ bị suy giảm vì suy hao thay đổi đáng kể. Tính di chuyển trên khoảng cách lớn ($\gg \lambda$) và sự thay đổi đặc điểm địa hình, sẽ ảnh hưởng tới suy hao và công suất thu thay đổi chậm. Hiện tượng này được gọi là *pha đỉnh chậm* hay *pha đỉnh phạm vi rộng*, và được mô hình hóa riêng biệt được thảo luận trong phần tiếp theo của chương này.

Ta đã thấy đường bao phức của đầu vào máy thu từ số lượng lớn các thành phần tán xạ là một quá trình Gauss phức. Khi này, quá trình ngẫu nhiên có giá trị trung bình không và độ lớn của quá trình là phân bố Rayleigh. Nếu tồn tại thành phần đi thẳng LOS thì quá trình trở thành quá trình Ricean. Ảnh hưởng của quá trình này sẽ được giải thích trong ví dụ 14.1.

Trong phạm vi nhất định, định nghĩa về pha đỉnh nhanh và chậm có thể nhận thấy được. Tuy nhiên, khi nói về pha đỉnh nhanh và chậm, ta thường nghĩ về tốc độ ký hiệu cơ bản. Cụ thể, kênh pha đỉnh chậm được định nghĩa là kênh trong đó mức tín hiệu thu về cơ bản là không đổi trong nhiều ký hiệu hoặc khung dữ liệu. Pha đỉnh nhanh có nghĩa là cường độ trường tín hiệu thu thay đổi đáng kể trong các khoảng thời gian ký hiệu. Vì thế, định nghĩa về pha đỉnh nhanh và chậm phụ thuộc vào tốc độ ký hiệu.

Tại đây, ta xác định đường bao phức của tín hiệu thu.

Giả sử đầu vào kênh truyền sóng là tín hiệu điều chế dạng:

$$x(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi(t)) \quad (14.11)$$

Vì thực hiện mô phỏng dạng sóng bằng cách sử dụng các tín hiệu đường bao phức, nên ta phải xác định đường bao phức cho cả $x(t)$ và $y(t)$ là $\tilde{x}(t)$ và $\tilde{y}(t)$ từ đó rút ra $\tilde{h}(t, \tau)$.

Đường bao phức của tín hiệu phát $\tilde{x}(t)$: Bằng cách kiểm tra (14.11) ta có:

$$\tilde{x}(t) = A(t) \cdot e^{j\phi(t)} \quad (14.12)$$

Đường bao phức của tín hiệu thu $\tilde{y}(t)$: Được xác định như sau

Thay (14.11) vào (14.10) ta có tín hiệu thu $y(t)$:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) \cdot A(t - \tau_n(t)) \cdot \cos[2\pi f_c(t - \tau_n(t)) + \phi(t - \tau_n(t))] \quad (14.13)$$

Có thể viết là:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) \cdot A(t - \tau_n(t)) \cdot \text{Re} \left\{ e^{j\phi(t - \tau_n(t))} e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (14.14)$$

Vì $a_n(t)$ và $A(t)$ đều là giá trị thực, nên (14.4) được viết là:

$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N a_n(t) \cdot A(t - \tau_n(t)) \cdot e^{j\phi(t - \tau_n(t))} e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (14.15)$$

Từ (14.12) ta có:

$$A(t - \tau_n(t)) \cdot e^{j\phi(t - \tau_n(t))} = \tilde{x}(t - \tau_n(t)) \quad (14.16)$$

Vì thế:

$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N \underbrace{a_n(t) \cdot e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)}}_{\tilde{a}_n(t)} \cdot \tilde{x}(t - \tau_n(t)) \cdot e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (14.17)$$

Suy hao đường truyền phức được định nghĩa là:

$$\tilde{a}_n(t) = a_n(t) \cdot e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \quad (14.18)$$

Vì vậy:

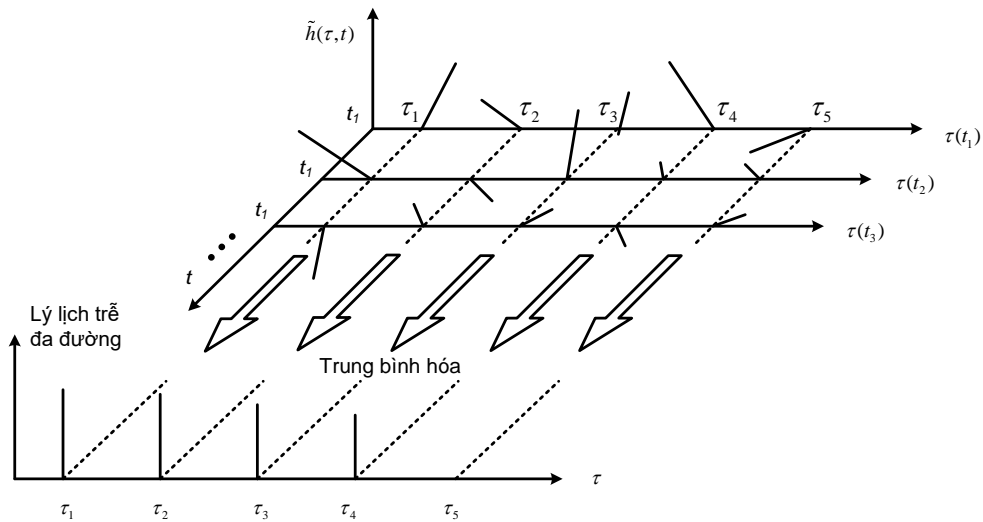
$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n(t) \cdot \tilde{x}(t - \tau_n(t)) \cdot e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (14.19)$$

Vì vậy, đường bao phức của tín hiệu thu $y(t)$ là:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n(t) \cdot \tilde{x}(t - \tau_n(t)) \quad (14.20)$$

Rút ra đáp ứng xung kim của kênh $\tilde{h}(\tau, t)$: Quan hệ vào/ra của kênh được định nghĩa bởi (14.20) tương ứng một hệ thống tuyến tính thay đổi theo thời gian LTV có đáp ứng xung kim là:

$$\tilde{h}(\tau, t) = \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n(t) \cdot \delta(t - \tau_n(t)) \quad (14.21)$$



Hình 14.1b: Minh họa đáp ứng xung kim của kênh và lý lịch trễ đa đường

Trong (14.21), $\tilde{h}(\tau, t)$ là đáp ứng xung của kênh đo được tại thời điểm t với giả thiết rằng xung kim được đặt vào kênh tại thời điểm $t - \tau$. Theo đó, τ trình bày cho thời gian trôi qua hoặc trễ truyền lan. Hình 14.1b minh họa đáp ứng xung kim của kênh $\tilde{h}(\tau, t)$ và lý lịch trễ đa đường.

Trường hợp đặc biệt: Trường hợp không di chuyển hoặc không có sự thay đổi trong môi trường truyền dẫn, thì quan hệ vào/ra là bất biến theo thời gian mặc dù đa đường vẫn xuất hiện. Khi này, trễ truyền dẫn tương ứng với đường truyền thứ n và suy hao đường truyền đó là không đổi $\tilde{a}_n(t) = \tilde{a}_n$ & $\tau_n(t) = \tau_n$ (kênh cố định):

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=l}^N \tilde{a}_n \tilde{x}(t - \tau_n) \quad (14.22)$$

Biểu diễn kênh trong các miền thời gian và tần số như sau:

$$\tilde{h}(\tau) = \sum_{n=l}^N \tilde{a}_n \delta(t - \tau_n) \quad (14.23)$$

$$H(f) = \sum_{n=l}^N \tilde{a}_n e^{-j2\pi f \tau_n} \quad (14.24)$$

Thấy rõ, trường hợp kênh bất biến theo thời gian LTIV, kênh chỉ thực hiện như một bộ lọc đối với tín hiệu phát.

Ví dụ 14.1: Ta mô phỏng hiệu năng BER hệ thống QPSK hoạt động trong môi trường kênh đa đường 3 tia cố định với AWGN và so sánh hiệu năng BER với chính hệ thống đó nhưng hoạt động trên kênh AWGN lý tưởng (không có đa đường). Để đơn giản mô hình mô phỏng, ta giả sử như sau:

1. Kênh có 3 đường (tia) gồm có: 1 đường đi thẳng LOS không bị pha đỉnh và 2 thành phần Rayleigh. Các mức công suất thu liên quan tới mỗi đường và các trễ *chênh lệch* giữa ba đường là các tham số mô phỏng.
2. Pha đỉnh Rayleigh trong kênh chỉ ảnh hưởng lên *biên độ* của tín hiệu phát. Pha tức thời không bị ảnh hưởng.
3. Suy hao của mỗi thành phần đa đường là không đổi trên mỗi khoảng thời gian ký hiệu và có các giá trị độc lập trên các khoảng liên kề (không yêu cầu phải định dạng phổ Doppler).
4. Không sử dụng bộ lọc phát và mô hình máy thu là máy thu kết xuất và tích hợp lý tưởng.

Với các giả định trên thì, tín hiệu thu cho ví dụ này được viết là:

$$\tilde{y}(t) = \underbrace{a_0 \tilde{x}(t)}_{LOS} + \underbrace{a_1 R_1 \tilde{x}(t)}_{Rayleigh} + \underbrace{a_2 R_2 \tilde{x}(t - \tau)}_{Rayleigh \text{ bị trễ}} \quad (14.25)$$

Trong đó R_1 và R_2 là hai biến ngẫu nhiên Rayleigh độc lập thể hiện cho suy hao của hai đường Rayleigh và τ là trễ *tương đối* giữa hai thành phần Rayleigh. Biến đổi Fourier của (14.25) là:

$$\tilde{Y}(f) = a_0 \tilde{X}(f) + a_1 R_1 \tilde{X}(f) + a_2 R_2 \tilde{X}(f) e^{-j2\pi f \tau} \quad (14.26)$$

Dẫn đến hàm truyền đạt kênh là:

$$\tilde{H}(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = a_0 + a_1 R_1 + a_2 R_2 e^{-j2\pi f \tau} \quad (14.27)$$

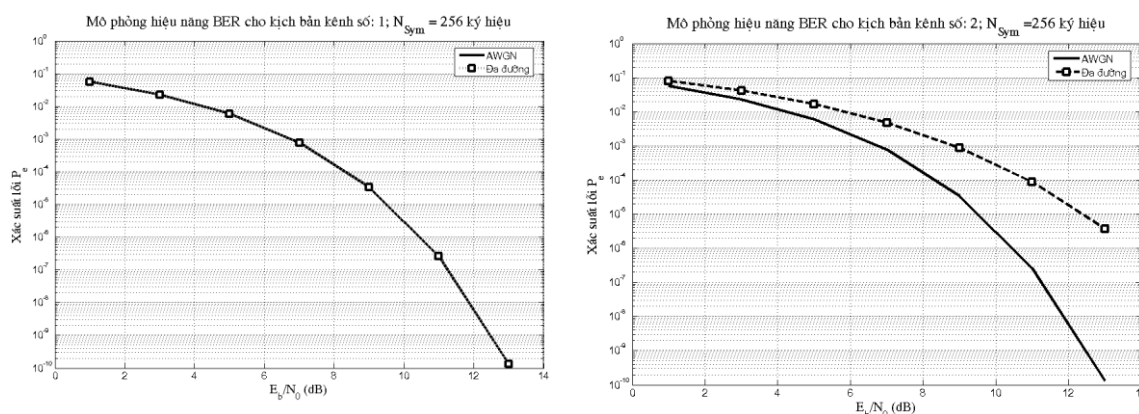
Rõ ràng, nếu tích $f\tau$ không thể bỏ qua so với độ rộng băng tần của tín hiệu, thì kênh là kênh chọn lọc tần số, dẫn đến trải rộng trễ và ISI. Các giá trị của a_0 , a_1 , a_2 xác định các mức công suất tương đối P_0 , P_1 và P_2 của ba thành phần đa đường.

Mô phỏng được thực hiện cho một trong sáu tập giá trị tham số được cho ở bảng 14.1. Với mỗi kịch bản kênh, BER được ước lượng dùng ước tính bán phân tích. Trong bảng 14.1, trễ được biểu diễn theo chu kỳ lấy mẫu. Vì tần số lấy mẫu mô phỏng là 16 mẫu trên ký hiệu, nên $\tau = 8$ tương đương với trễ là một nửa chu kỳ lấy mẫu. (Mã chương trình Matlab được cho ở **NVD14_threeray.m** trong Phụ lục 14A)

Bảng 14.1: Các kịch bản kênh để minh họa cho pha đỉnh

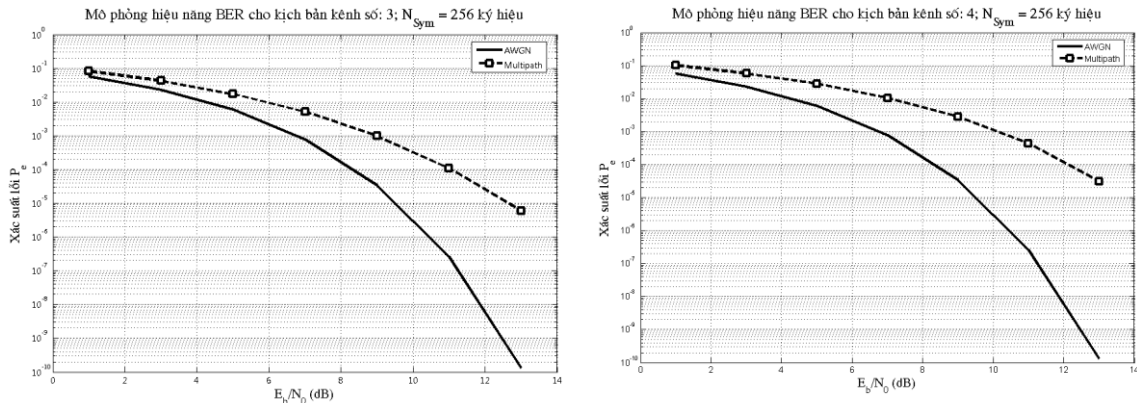
Kịch bản kênh số	P_0	P_1	P_2	τ (mẫu)	Chú thích
1	1,0	0	0	0	Dùng để phê chuẩn (kênh lý tưởng AWGN)
2	1,0	0,2	0	0	Pha đỉnh phẳng Ricean
3	1,0	0	0,2	0	Pha đỉnh phẳng Ricean
4	1,0	0	0,2	8	Pha đỉnh chọn lọc tần số Ricean
5	0	1,0	0,2	0	Pha đỉnh phẳng Rayleigh
6	0	1,0	0,2	8	Pha đỉnh chọn lọc tần số Rayleigh

Kết quả mô phỏng đối với kịch bản kênh số 1 và 2 được minh họa ở hình 14.2. Trong kịch bản số 1, chỉ có một thành phần đi thẳng LOS mà không có đa đường, dẫn đến ước tính BER bán phân tích cho hệ thống QPSK hoạt động trong môi trường kênh AWGN. Việc mô phỏng này nhằm để kiểm tra phương pháp luận mô phỏng và tạo ra các *kết quả ranh giới* biểu diễn cho một hệ thống QPSK lý tưởng. Vì mục đích so sánh, nên kết quả này được hiển thị cùng với kết quả BER của 5 kịch bản kênh còn lại. Bảng 14.1 cho thấy, kịch bản 2 là kịch bản số 1 thêm một thành phần pha đỉnh Rayleigh. Việc thêm vào này có thể đáp ứng với kênh pha đỉnh Ricean. Vì $\tau = 0$, nên kịch bản kênh số 2 là pha đỉnh phẳng (không chọn lọc tần số). Thấy rõ, BER tăng lên so với kịch bản kênh số 1 (trường hợp kênh lý tưởng).



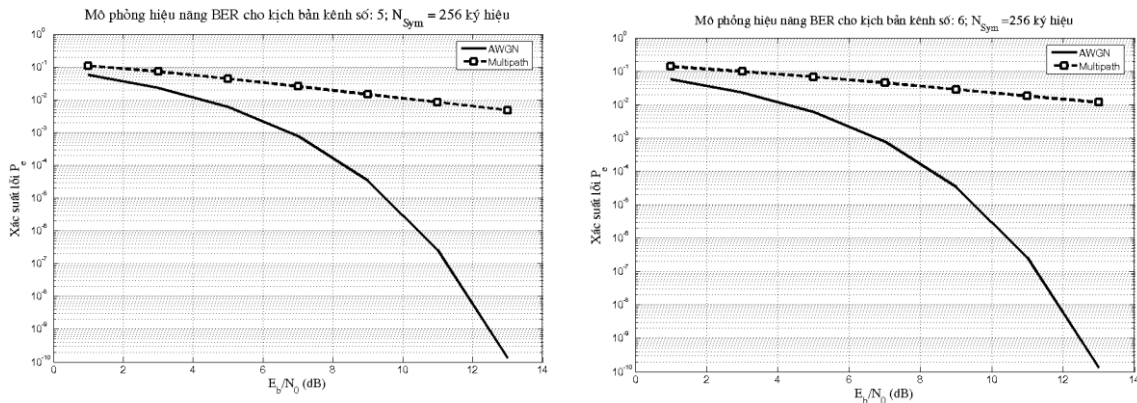
Hình 14.2: Kịch bản kênh số 1 (trái) và kịch bản kênh số 2 (phải) minh họa chạy hiệu chuẩn và pha đỉnh phẳng Ricean.

Kết quả mô phỏng cho kịch bản kênh số 3 và 4 được minh họa ở hình 14.3. Kịch bản kênh số 3 về cơ bản tương đương kịch bản kênh số 2. Sự khác nhau nhỏ là do quá trình pha đỉnh khác với quá trình pha đỉnh được dùng ở kịch bản kênh số 2 do sự khởi tạo khác nhau của bộ tạo số ngẫu nhiên cơ bản. Kịch bản kênh số 4 giống với kịch bản kênh số 3 ngoại trừ là pha đỉnh bây giờ là chọn lọc tần số. Lưu ý hiệu năng hệ thống bị suy giảm hơn.



Hình 14.3: Lớp 3 (bảng bên trái) và lớp 4 (bảng bên phải) minh họa pha đỉnh nền Ricean và pha đỉnh chọn lọc tần số

Kết quả mô phỏng cho kịch bản kênh số 5 và 6 được cho ở hình 14.4. Lưu ý rằng, cả hai kịch bản kênh này đều không có thành phần đi thẳng. Sự so sánh kết quả kịch bản số 5 với 4 kết quả trước cho thấy: kể cả với kịch bản pha đỉnh phẳng (bên trái), hiệu năng đều xấu hơn so với trường hợp có thành phần đi thẳng LOS. Kịch bản kênh số 6 tương tự với kịch bản kênh số 5 ngoại trừ là pha đỉnh bây giờ là chọn lọc tần số. Lưu ý rằng hiệu năng hệ thống bị suy thoái hơn. Các kênh Ricean và Rayleigh sẽ được khai thác sâu hơn trong các phần tiếp theo.



Hình 14.4: Kịch bản kênh số 5 (trái) và số 6 (phải) minh họa pha đỉnh chọn lọc tần số và pha đỉnh phẳng Rayleigh

14.4.3. Đa đường khuếch tán và đa đường rời rạc

Nhiều thành phần đa đường sẽ thay đổi phụ thuộc vào loại kênh. Trong các tuyến truyền thông viba sử dụng ăng ten tính hướng cao (búp sóng hẹp), số lượng các thành phần đa đường sẽ nhỏ, ngược lại ở hệ thống thông tin di động vùng thành phố sử dụng các ăng ten vô hướng

do phản xạ từ các toà nhà, nên tạo ra rất nhiều thành phần đa đường. Tương tự xảy ra đối với truyền thông tin vô tuyến trong nhà, ở đó các tín hiệu có thể bung ra khỏi tường, nội thất và các bề mặt khác.

Tồn tại một số trạng thái giống như các kênh tán xạ tầng đối lưu, hoặc các kênh vô tuyến di động, ở đó phù hợp để nhìn nhận tín hiệu thu gồm sự liên tục các thành phần đa đường chứ không phải là tập hợp các thành phần rời rạc. Trạng thái này được gọi là *đa đường khuếch tán*. Ta sẽ thấy rằng: kênh đa đường khuếch tán có thể được xấp xỉ bằng (phiên bản được lấy mẫu của) kênh đa đường rời rạc cho mục đích mô phỏng.

14.5. Mô hình hoá kênh pha đỉnh đa đường

Tài liệu gần đây về các hệ thống truyền thông gồm rất nhiều bài báo đề cập vấn đề mô hình hoá và phân tích kênh pha đỉnh đa đường, đặc biệt là các kênh di động ngoài trời và vô tuyến trong nhà. Trong khi việc xét lại đầy đủ là ngoài phạm vi của chương này, nhưng ta cũng xét ngắn gọn về mô hình hoá kênh vô tuyến di động ngoài trời để triển khai các kỹ thuật mô phỏng. Các kỹ thuật mô hình hóa và mô phỏng này có thể áp dụng cho các kênh pha đỉnh đa đường khác.

Mô hình hoá một kênh di động ngoài trời thường được tiến hành hai bước, nó biểu diễn các ảnh hưởng phạm vi hẹp và phạm vi rộng của pha đỉnh và đa đường. Như đã đề cập, pha đỉnh phạm vi rộng thể hiện cho suy hao hoặc tổn hao đường truyền trên một vùng rộng và hiện tượng này do sự nhô lên của các đặc điểm địa hình như đồi núi, toà nhà, v.v... giữa máy phát và máy thu. Máy thu thường bị ẩn hoặc bị che chắn do các đặc điểm địa hình, tính thống kê của pha đỉnh phạm vi rộng tạo ra cách thức tính toán công suất tín hiệu thu hay tổn hao đường truyền là *hàm của khoảng cách*. Pha đỉnh phạm vi hẹp liên quan với tính *thay đổi động* về biên độ và pha của tín hiệu thu, là kết quả của các thay đổi rất nhỏ trong phân tách không gian giữa máy phát và máy thu.

Ba cơ chế ảnh hưởng lên chất lượng tín hiệu thu trong một kênh di động: *phản xạ, khúc xạ và tán xạ*. *Phản xạ* xảy ra khi sóng vô tuyến đập phải một bề mặt lớn và phẳng (như bề mặt nước hoặc bề mặt kim loại lớn). *Nhiều xạ* xảy ra tại nơi có sự cản trở trên đường vô tuyến giữa máy phát và máy thu gây ra một sóng vô tuyến thứ cấp tạo ra sự cản trở sau đó. Điều này được gọi là che chắn (*shadowing*) và giải thích cho sóng vô tuyến vẫn đến được ăng ten thu mặc dù không tồn tại đường nhìn thẳng LOS giữa máy phát và máy thu. *Tán xạ*: kết quả từ các bề mặt gồ ghề mà có kích thước là bội số của bước sóng, làm cho năng lượng bị phản xạ đó tán xạ ra mọi hướng.

Trong khi lý thuyết trường điện từ đưa ra các mô hình rất phức tạp cho những hiện tượng này, thì ta có thể sử dụng các mô hình thống kê đơn giản hơn cho quan hệ vào/ra cho kênh di động. Cụ thể, có thể mô hình hóa đáp ứng tương đương thông thấp của một kênh vô tuyến di động bởi đáp ứng xung kim phức dạng:

$$\tilde{h}(\tau, t) = \underbrace{\left\{ \left[\frac{k}{d^n} g_{sh}(p(t)) \right]^{1/2} \right\}}_{\text{Pha đỉnh phạm vi rộng}} \cdot \underbrace{\tilde{c}(\tau, p(t))}_{\text{Pha đỉnh phạm vi hẹp}}, \quad d > 1 \text{ km} \quad (14.28)$$

Trong đó thành phần trong ngoặc kép mô hình hóa cho pha đỉnh phạm vi rộng, $\tilde{c}(\tau, p(t))$ giải thích cho pha đỉnh phạm vi hẹp là một hàm của vị trí của $p(t)$ tại thời điểm t . Hằng số $K = -10 \lg(k)$ là tổn hao trung điểm dB tại khoảng cách 1 km. Vì khoảng cách tham chiếu là 1 km, nên (14.28) chỉ hợp lệ khi $d > 1$ km. Điển hình, K là bậc của 87 dB tại 900 MHz, d là khoảng cách giữa máy phát và máy thu (đơn vị m) và số mũ tổn hao đường truyền n có giá trị là 2 đối với không gian tự do (hầu hết các kênh di động có giá trị trong khoảng 2 đến 4, các giá trị lớn hơn áp dụng cho các đường truyền bị che khuất). Thừa số $g_{sh}(p(t))$ giải thích cho hiện tượng che chắn do các toà nhà, những che khuất khác tại vị trí $p(t)$ cho trước, và $G = 10 \log_{10} [g_{sh}(p(t))]$ thường được mô hình hóa là một biến Gausơ có trung bình 0 dB, và độ lệch chuẩn từ 6 đến 12 dB phụ thuộc vào môi trường (mô hình này được gọi là mô hình che chắn loga). Thực tế thường biểu diễn tổn hao đường truyền [số hạng trong dấu ngoặc móc trong (14.28)] là:

$$L(d)_{dB} = L(1 \text{ km})_{dB} + 10.n.\log(d) + X_{\sigma} \quad (14.29)$$

Trong đó X_{σ} là biến Gausơ trung bình không với độ lệch chuẩn từ 6 đến 12 dB.

Trong biểu thức (14.28), $\tilde{c}(\tau, p(t))$ trình bày đáp ứng xung kim tương đương thông thấp phức của kênh tại vị trí $p(t)$, đa đường địa phương và pha đỉnh do dịch chuyển không gian nhỏ xung quanh vị trí định vị $p(t)$. Tổn hao truyền sóng liên quan với pha đỉnh phạm vi rộng được biểu diễn bởi thành phần trong dấu ngoặc ở (14.28) như pha đỉnh do che chắn, các thay đổi rất chậm là một hàm của thời gian tại tốc độ di chuyển chuẩn hóa so với tốc độ thay đổi của $\tilde{c}(\tau, p(t))$. Vì vậy, suy hao kênh do pha đỉnh phạm vi rộng và che chắn có thể được xem là không đổi trong một vùng nhỏ, và ảnh hưởng phạm vi rộng lên hiệu năng hệ thống được phản ánh trong tín hiệu thu *trung bình*. Tính cách động của các phân hệ máy thu như các vòng bám và các bộ cân bằng, cũng như tỉ số lỗi bit trong hệ thống sẽ bị ảnh hưởng nhiều bởi tính cách phạm vi hẹp mà được mô hình hóa bởi $\tilde{c}(\tau, p(t))$. Vì vậy nhiều cố gắng nỗ lực trong việc lập mô hình và mô phỏng các kênh vô tuyến di động tập trung vào $\tilde{c}(\tau, p(t))$. Dưới đây, ta sử dụng ký hiệu $\tilde{c}(\tau, t)$ thay cho $\tilde{c}(\tau, p(t))$.

14.6. Mô hình quá trình ngẫu nhiên

Rất nhiều mô hình được đề xuất để đặc tính hóa các kênh pha đỉnh đa đường, và hầu hết đều dùng các mô hình quá trình ngẫu nhiên để đặc tính hóa pha đỉnh. Hai lớp mô hình để mô tả đa đường: (i) mô hình đa đường rời rạc (hữu hạn các thành phần đa đường); (ii) mô hình đa đường khuếch tán (tính liên tục các thành phần đa đường). Trong truyền thông vô tuyến di động, mô hình đầu tiên thường được dùng để mô phỏng mức dạng sóng cho các kênh vô tuyến di động, trong khi đó mô hình thứ hai được dùng cho các kênh tán xạ tầng đối lưu với điều chế

bằng hợp. Trong cả hai trường hợp này, kênh được mô hình là một hệ thống tuyến tính thay đổi theo thời gian LTV, đầu ra của kênh gồm tổng của N phiên bản đầu vào bị trễ và suy hao. Vì vậy:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \cdot \tilde{x}(t - \tau_k(t)) \quad (14.30)$$

Đáp ứng xung kim $\tilde{c}(\tau, t)$ là:

$$\tilde{c}(\tau, t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \cdot \delta(\tau - \tau_k(t)) \quad (14.31)$$

Trong đó $N(t)$ là số lượng thành phần đa đường và $\tilde{a}_k(t)$ và $\tau_k(t)$ là suy hao phức và trễ của đa đường thứ k tại thời điểm t .

Như đã đề cập ở trên, một kênh đa đường có thể không thay đổi theo thời gian. Tuy nhiên, tất cả các kênh thực tế đều được đặc tính hóa là thay đổi theo thời gian. Tính thay đổi theo thời gian vì hai lý do

1. *Môi trường thay đổi mặc dù máy phát và máy thu cố định; chẳng hạn sự thay đổi của tầng điện ly, sự di chuyển của các bộ tán xạ và phản xạ...*

2. *Tính di động của máy phát và máy thu mặc dù môi trường cố định. Do đó, ở các kênh pha đình thực tế thì N , a_k , và τ_k đều có thể thay đổi ngẫu nhiên theo thời gian. Ví dụ minh họa được cho ở hình 14.5a.*

Tín hiệu thu thay đổi ngẫu nhiên do pha đình có thể được mô hình bằng cách coi $\tilde{c}(\tau, t)$ là một quá trình ngẫu nhiên theo t . Nếu tín hiệu thu là tổng của một số lượng lớn các thành phần tán xạ trong mỗi đường truyền, thì theo định lý giới hạn trung tâm dẫn đến một mô hình trong đó $\tilde{c}(\tau, t)$ có thể được trình bày là một quá trình Gauss phức theo t . Tại bất kỳ thời điểm t , hàm mật độ xác suất của phần thực và phần ảo đều là Gauss. Mô hình này cho thấy rằng với mỗi τ hoặc τ_k , tia được tạo nên từ một số lượng lớn các thành phần không thể phân giải được. Vì vậy, $\tilde{c}(\tau, t)$ và $\tilde{a}_k(t)$ đều là quá trình Gauss phức theo t .

Nếu $\tilde{c}(\tau, t)$ có trung bình không, thì đường bao $R = |\tilde{c}(\tau, t)|$ có hàm mật độ xác suất Rayleigh dạng:

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r > 0 \quad (14.32)$$

Trong đó σ^2 là phương sai của các phần thực và phần ảo của $\tilde{c}(\tau, t)$.

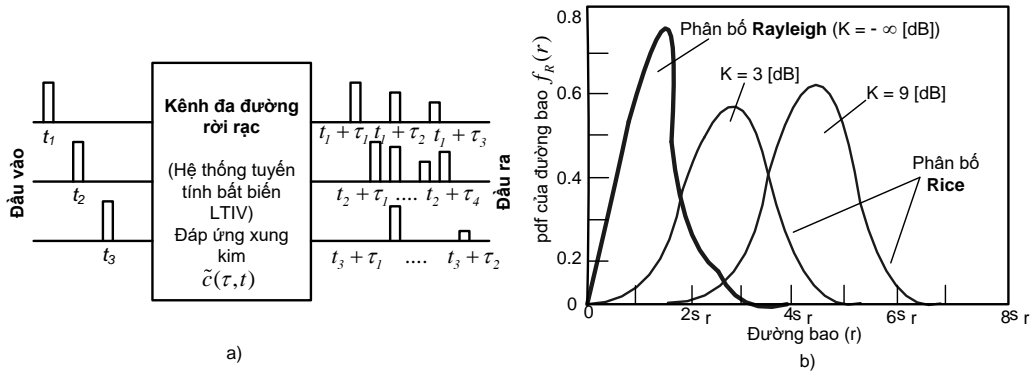
Nếu $\tilde{c}(\tau, t)$ có trung bình khác không (thể hiện sự tồn tại một đường truyền đi thẳng LOS), thì $R = |\tilde{c}(\tau, t)|$ có hàm mật độ xác suất phân bố Rice dạng:

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \cdot e^{-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}}, \quad r > 0 \quad (14.33)$$

Trong đó A là trung bình khác không của $\tilde{c}(\tau, t)$ và $I_0(z)$ là hàm Bessel cải tiến được định nghĩa bởi:

$$I_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{z \cdot \cos(u)} du \quad (14.34)$$

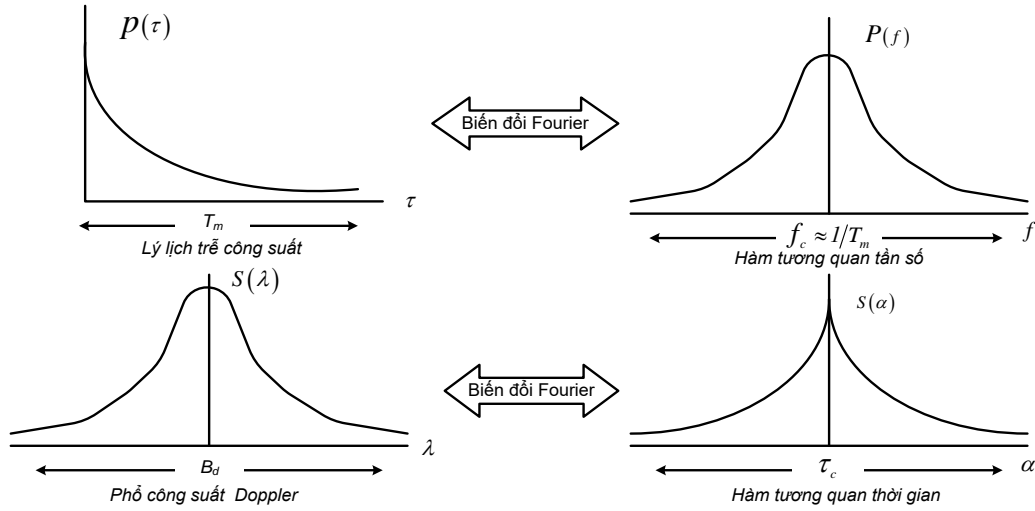
Tỉ lệ $K = \frac{A^2}{\sigma^2}$ được gọi là hệ số Rice thể hiện cho công suất tương đối trong các thành phần pha định và không pha định. Khi $K \gg 1$ biểu thị pha định ít nghiêm trọng và khi $K \ll 1$ biểu thị pha định nghiêm trọng, khi $K = 0$ trở về kênh pha định Rayleigh. Hình 14.5b minh họa phân bố Rayleigh và Rice



Hình 14.5: a) Minh họa kênh pha định đa đường rời rạc

b) Minh họa phân bố Rayleigh và Rice

Kênh được gọi là kênh pha định Rayleigh hay kênh pha định Rice phụ thuộc vào hàm mật độ xác suất pdf của $R = |\tilde{c}(\tau, t)|$. Các phân bố khác cho $|\tilde{c}(\tau, t)|$ như: Nakagami và Weibul cũng có thể có xảy ra. Hàm mật độ xác suất tổng quát mô tả thống kê đường bao cho số lượng hữu hạn các thành phần phản chiếu, cùng với các đa đường khuếch tán gần đây được phát triển. Trong các kết quả này, thì pha định Rayleigh và Rice là các trường hợp đặc biệt. Đối với kênh đa đường rời rạc, thì hàm mật độ xác suất pdf này ứng dụng cho $|\tilde{a}_k(t)|$. Trong khi pdf của $|\tilde{c}(\tau, t)|$ mô tả giá trị tức thời của đáp ứng xung kim phức, thì tính thay đổi theo thời gian được mô hình hóa bởi hoặc hàm tự tương quan hoặc hàm mật độ phổ công suất của quá trình ngẫu nhiên đó theo thời gian t . Dưới đây ta mô tả các mô hình này.



Hình 14.6: Quan hệ giữa các phần khác nhau của hàm tán xạ

14.6.1 Mô hình hóa tính thay đổi theo thời gian trong đáp ứng kênh

Bản chất thay đổi theo thời gian của các kênh được mô hình hóa bằng cách coi $\tilde{c}(\tau, t)$ là một quá trình ngẫu nhiên dừng nghĩa rộng WSS theo t có hàm tự tương quan:

$$R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau_1, \tau_2, \alpha) = E\{\tilde{c}^*(\tau_1, t) \cdot \tilde{c}(\tau_2, t + \alpha)\} \quad (14.35)$$

Hầu hết các kênh đa đường, dịch pha và suy hao tương ứng với các trễ (nghĩa là các đường truyền) được giả định là không tương quan. Giả định tán xạ không tương quan US này dẫn đến:

$$R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau_1, \tau_2, \alpha) = R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau_1, \alpha) \cdot \delta(\tau_1 - \tau_2) \quad (14.36)$$

Trong phương trình (14.6) bao gồm các giả định dừng nghĩa rộng WSS và tán xạ không tương quan US và thường được coi là mô hình WSSUS cho pha định và được đề xuất bởi Bello. Hàm tự tương quan này được ký hiệu là $R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha)$ và được cho bởi:

$$R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha) = E\{\tilde{c}^*(\tau, t) \cdot \tilde{c}(\tau, t + \alpha)\} \quad (14.37)$$

Bằng cách biến đổi Fourier hàm tự tương quan ta được mô hình trong miền tần số cho pha định dưới dạng mật độ phổ công suất là:

$$S(\tau, \lambda) = F\{R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha)\} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha) e^{-j2\pi\lambda\alpha} d\alpha \quad (14.38)$$

Đại lượng $S(\tau, \lambda)$ được gọi là **hàm tán xạ** của kênh, là hàm của hai biến (biến miền thời gian-trễ và biến miền tần số-biến tần số doppler). Hàm tán xạ cho ta phép đo công suất đầu ra trung bình của kênh là một hàm của trễ và tần số doppler

Từ hàm tán xạ, ta có thể tìm được các thông số quan trọng của kênh, ảnh hưởng lên hiệu năng hệ của thống truyền thông làm việc trên kênh đó. Ta bắt đầu bằng lý lịch "cường độ đa đường" được định nghĩa là:

$$p(\tau) = R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, 0) = E\left\{\left|\tilde{c}(\tau, t)\right|^2\right\} \quad (14.39)$$

Thể hiện cho công suất thu trung bình là một hàm của trễ τ . Phương trình (14.39) thường được gọi là lý lịch trễ công suất (*power-delay profile*). Thấy rõ, $p(\tau)$ quan hệ với hàm tán xạ qua:

$$p(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, \lambda) d\lambda \quad (14.40)$$

Một hàm hữu hiệu khác để đặc trưng hóa pha đỉnh là phổ công suất Doppler được rút ra từ hàm tán xạ theo:

$$S_d(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, \lambda) d\tau \quad (14.41)$$

Các quan hệ giữa các hàm này được cho ở hình 14.6.

Lý lịch cường độ đa đường thường được đo bằng cách dò kênh theo dạng sóng RF bằng rộng trong đó tín hiệu điều chế là chuỗi PN tốc độ cao. Có thể tìm công suất theo lý lịch trễ bằng cách lấy tương quan đầu ra máy thu với các phiên bản bị trễ của chuỗi PN, và đo giá trị trung bình đầu ra bộ lấy tương quan. Nơi, các phép đo cho các ứng dụng vô tuyến di động với một trạm BS cố định và người dùng di động được xét, thì lý lịch trễ công suất được đo trong các gia số khoảng cách ngắn của phân số bước sóng. Sau đó, lý lịch công suất đó được trung bình hóa trên (10 đến 20) bước sóng để lấy trung bình các ảnh hưởng của kênh pha đỉnh Rayleigh. Các phép đo tương quan được thực hiện như một hàm của vị trí, nghĩa là hàm tự tương quan không gian có thể được chuyển thành hàm tương quan thời gian bằng cách lưu ý rằng $\Delta X = v \cdot \Delta t$, trong đó ΔX là sự di chuyển không gian gia tăng của di động và v là tốc độ. Vì vậy, có thể tìm được phổ Doppler bằng cách chuyển hàm tương quan thời gian đối với bất kỳ tốc độ xe cộ.

14.6.2. Các tham số quan trọng

Hàm tán xạ, lý lịch cường độ đa đường và phổ doppler mô tả chi tiết các khía cạnh khác nhau của kênh pha đỉnh. Tuy nhiên, hai tham số quan trọng nhất để mô phỏng kênh pha đỉnh là trải rộng đa đường và độ rộng băng tần Doppler.

Trải rộng đa đường

Các bộ biểu thị quan trọng về tính nghiêm trọng của các ảnh hưởng đa đường là trải trễ cực đại và trải trễ trung bình quan phương **rms**. Trải trễ cực đại là giá trị trễ T_{\max} tại đó công suất thu $p(\tau)$ là rất nhỏ và trải trễ trễ rms σ_τ được định nghĩa là:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\langle \tau^2 \rangle - \langle \tau \rangle^2} \quad (14.42)$$

Trong đó $\langle x \rangle$ ký hiệu cho giá trị trung bình theo thời gian của x và:

$$\langle \tau^k \rangle = \frac{\int \tau^k p(\tau) d\tau}{\int p(\tau) d\tau} \quad (14.43)$$

Kênh chọn lọc tần số

Khi trải trễ là bậc (nghĩa là lớn hơn) khoảng thời gian của một ký hiệu thì các thành phần đa đường bị trễ sẽ đến trong các khoảng thời gian ký hiệu khác và gây ra giao thoa giữa các ký hiệu ISI làm ảnh hưởng hiệu năng BER hệ thống. Điều này tương đương với hàm truyền đạt thay đổi theo thời gian của kênh có độ rộng băng thông nhỏ hơn độ rộng băng tần của tín hiệu. Khi này, kênh thực hiện như một bộ lọc giới hạn băng tần và được gọi là kênh chọn lọc tần số.

$$T_{\max} \gg T_s \quad \text{hoặc} \quad \sigma_T > 0,1T_s \quad (14.44)$$

Quan hệ vào/ra là tích chập:

$$\tilde{y}(t) = \tilde{c}(\tau, t) \otimes \tilde{x}(t) \quad (14.45)$$

Trong đó \otimes ký hiệu phép tích chập. Trong khi trải trễ (cực đại hoặc rms) ảnh hưởng lớn lên hiệu năng hệ thống, thì có thể thấy rằng hiệu năng hệ thống không quá nhạy cảm với dạng của lý lịch cường độ đa đường. Dạng được giả định phổ biến nhất của $p(\tau)$ là đều và số mũ.

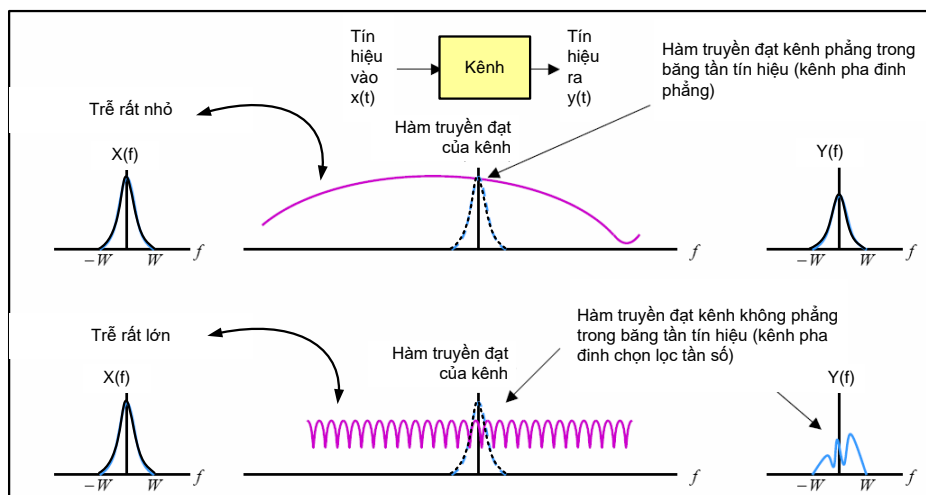
Kênh không chọn lọc tần số

Đối với kênh không chọn lọc tần số, thì trải trễ cực đại T_{\max} nhỏ hơn nhiều so với khoảng thời gian ký hiệu T_s (nghĩa là $T_{\max} \ll T_s$).

$$T_{\max} \ll T_s \quad \text{hoặc} \quad \sigma_T < 0,1T_s \quad (14.46)$$

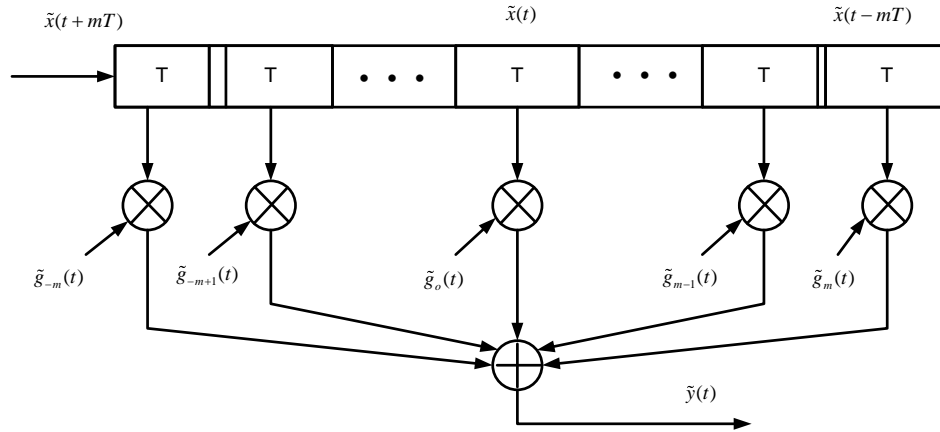
Khi này, tất cả các thành phần đa đường bị trễ đến máy thu trong phần nhỏ thời gian một ký hiệu và kênh có thể được mô hình hóa bằng một tia, và quan hệ vào/ra được biểu diễn là một phép nhân. Nói cách khác:

$$\tilde{y}(t) = \tilde{a}(t) \times \tilde{x}(t) \quad (14.47)$$



Hình 14.7a: Minh họa khái niệm kênh pha đình phẳng và chọn lọc tần số

Hình 14.7(a) Minh họa khái niệm kênh pha đỉnh chọn lọc tần số và kênh pha đỉnh không chọn lọc tần số (kênh pha đỉnh phẳng).



Hình 14.7(b): Mô hình TDL cho kênh đa đường khuếch tán với $g_n(t) = T \cdot \tilde{c}(nT, t)$

Độ rộng băng tần Doppler

Độ rộng băng tần Doppler (hoặc trải rộng doppler) B_d là độ rộng băng tần của phổ Doppler được định nghĩa bởi (14.41), và là bộ biểu thị mức độ thay đổi các đặc tính kênh (pha đỉnh) là một hàm của thời gian. Nếu B_d là bậc của độ rộng băng tần của tín hiệu, thì các đặc tính kênh thay đổi (pha đỉnh) tại một tốc độ có thể so sánh được với tốc độ ký hiệu và kênh được gọi là pha đỉnh nhanh. Ngược lại được gọi là pha đỉnh chậm. Vì vậy:

$$\begin{aligned} B_d \ll B_s &\approx \frac{1}{T_s}, & \text{Kênh pha đỉnh chậm} \\ B_d \gg B_s &\approx \frac{1}{T_s}, & \text{Kênh pha đỉnh nhanh} \end{aligned} \quad (14.48)$$

Nếu kênh là kênh pha đỉnh chậm, thì có thể dùng giải pháp chớp ảnh để mô phỏng kênh khi ước tính hiệu năng. Ngược lại, các thay đổi động trong các điều kiện kênh phải được mô phỏng một cách rõ ràng.

14.7 Phương pháp luận mô phỏng

Ta xét mô phỏng các kênh pha đỉnh đa đường. Ta giả thiết rằng, mô hình được xét hoặc là mô hình kênh đa đường khuếch tán hoặc là mô hình kênh đa đường rời rạc và chúng đều là tán xạ không tương quan dừng nghĩa rộng WSSUS. Cũng giả thiết rằng, biết trước các phân bố, lý lịch trễ và phổ Doppler. Hơn nữa, ta cho rằng pha đỉnh là Rayleigh hoặc Ricean, nhấn mạnh vào pha đỉnh Rayleigh vì có thể tìm được mô hình Ricean từ mô hình Rayleigh bằng cách xét trung bình khác không. Ta bắt đầu bằng kênh đa đường khuếch tán.

14.7.1 Mô phỏng kênh pha đỉnh đa đường khuếch tán

Kênh đa đỉnh đa đường khuếch tán là một hệ thống tuyến tính thay đổi theo thời gian LTV được đặc trưng hóa bởi đáp ứng xung kim thay đổi theo thời gian $t \tilde{c}(\tau, t)$ liên tục chứ

không phải là rời rạc. Mô hình mô phỏng cho hệ thống LTV được rút ra ở chương 13 và ở đây ta chỉ nhắc lại các bước cần thiết. Vì giả định đầu vào thông thấp của kênh được hạn chế bằng thông là B ($B \approx r$ cho trường hợp băng thông, r là tốc độ ký hiệu), nên ta có thể biểu diễn đầu vào thông thấp theo các giá trị mẫu của nó dùng tốc độ lấy mẫu nhỏ nhất là r mẫu trên giây như:

$$\tilde{x}(t - \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \quad (14.49)$$

Trong đó $T = 1/r$ là thời gian giữa hai mẫu.

Thế $\tilde{x}(t - \tau)$ vào tích chập.

$$\tilde{y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \tilde{x}(t - \tau) d\tau \quad (14.50)$$

Ta được:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau \end{aligned} \quad (14.51)$$

Vì vậy:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \tilde{g}_n(t) \quad (14.52)$$

Trong đó:

$$\tilde{g}_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau \quad (14.53)$$

Các mô hình mô phỏng cho các kênh pha đỉnh đa đường khuếch tán được rút ra từ (14.52) sử dụng hai phép lấy xấp xỉ. Cắt xén tổng trong (14.52) sao cho chỉ còn các thành phần trong khoảng $|n| < m$ và lấy xấp xỉ tích phân trong (14.53) là:

$$\tilde{g}_n(t) \approx T \tilde{c}(nT, t) \quad (14.54)$$

Dẫn đến dạng tính toán hiệu quả:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \tilde{g}_n(t) \approx \sum_{n=-m}^m \tilde{x}(t - nT) \tilde{g}_n(t) \approx T \sum_{n=-m}^m \tilde{x}(t - nT) \tilde{c}(nT, t) \quad (14.55)$$

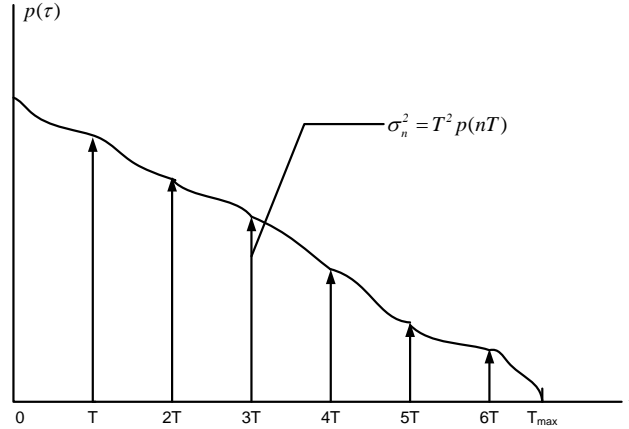
Thực thi hóa phương trình (14.55) bằng cách sử dụng đường trễ rẽ nhánh được ở hình 14.7(b).

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \tilde{g}_n(t) \approx \sum_{n=-m}^m \tilde{x}(t - nT) \tilde{g}_n(t) \approx T \sum_{n=-m}^m \tilde{x}(t - nT) \tilde{c}(nT, t)$$

Đối với kênh pha đỉnh Rayleigh, các quá trình độ lợi nhánh $g_n(t) \approx T \tilde{c}(nT, t)$ là các quá trình Gauss phức trung bình không. Chúng sẽ không tương quan do giả định WSSUS. Mật độ phổ công suất của mỗi quá trình độ lợi nhánh được định rõ bởi phổ Doppler và phương sai σ_n^2 của quá trình độ lợi nhánh thứ n được cho bởi:

$$E\left\{\left|\tilde{g}_n(t)\right|^2\right\} \approx \sigma_n^2 = T^2 E\left\{\left|\tilde{c}(nT, t)\right|^2\right\} = T^2 p(nT) \quad (14.56)$$

Và tìm được từ các giá trị mẫu của lý lịch cường độ đa đường $p(\tau)$, một ví dụ được cho ở hình 14.8 có tổng số nhánh là T_{\max}/T .



Hình 14.8: Các giá trị mẫu của lý lịch trễ công suất

Các trường hợp đặc biệt

Nếu là kênh bất biến theo thời gian, thì $\tilde{c}(\tau, t) = \tilde{c}(\tau)$ và các độ lợi nhánh trở thành hằng số, vì vậy:

$$\tilde{g}_x(t) = \tilde{g}_n \approx T \cdot \tilde{c}(nT) \quad (14.57)$$

Nói cách khác, các độ lợi nhánh là các giá trị mẫu của đáp ứng xung kim của hệ thống tuyến tính bất biến LTIV, và mô hình đường trễ rẽ nhánh rút gọn thành bộ lọc FIR thực hiện tích chập trong miền thời gian.

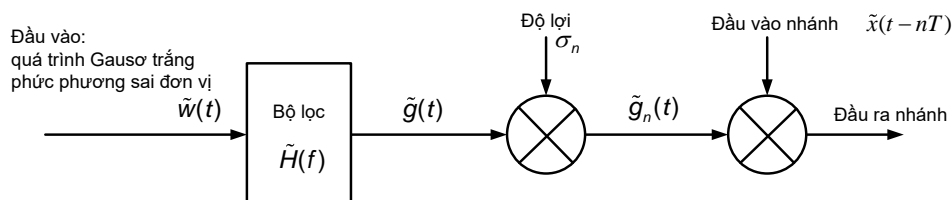
Nếu là kênh không chọn lọc tần số, thì chỉ có một nhánh trong mô hình đó và $\tilde{y}(t) = \tilde{x}(t) \cdot \tilde{g}(t)$, trong đó $\tilde{g}(t)$ hoặc là một quá trình Rayleigh hoặc là một quá trình Ricean.

Lấy mẫu

Một khía cạnh quan trọng khác của mô hình đường trễ rẽ nhánh TDL đáng lưu ý là tỉ lệ lấy mẫu để mô phỏng. Mô hình TDL được cho ở hình 14.8 được rút ra với đầu vào/ra $\tilde{x}(t)/\tilde{y}(t)$ thời gian liên tục. Tuy nhiên, trong mô phỏng ta sử dụng các giá trị mẫu của các đầu vào/ra tương ứng $\tilde{x}(t)/\tilde{y}(t)$, thường lấy mẫu tại tốc độ (8 đến 32) lần độ rộng băng tần, trong đó độ rộng băng tần phải tính đến ảnh hưởng trải rộng do bản chất thay đổi theo thời gian của hệ thống như được đề cập ở chương 13. Lưu ý rằng, tốc độ Nyquist là $2B$, $B = r/2$ đã được sử dụng để rút ra mô hình TDL, và khoảng cách nhánh là $T = 1/r$ sẽ lớn hơn rất nhiều so với thời gian lấy mẫu dạng sóng vào/ra T_s . Tất nhiên, ta có thể rút ra mô hình TDL có khoảng cách nhánh nhỏ hơn (nghĩa là nhiều mẫu/ký hiệu hơn) nhưng không hiệu quả tính toán và không cần thiết cải thiện độ chính xác của mô phỏng.

Tạo các quá trình độ lợi nhánh

Các quá trình độ lợi nhánh là các quá trình ngẫu dừng có các hàm mật độ xác suất Gausơ và các hàm mật độ phổ công suất tùy ý. Mô hình đơn giản nhất cho các quá trình độ lợi nhánh là coi chúng là các quá trình Gausơ trung bình không, phức, không tương quan có các phương sai khác nhau nhưng các mật độ phổ công suất đồng nhất. Khi này, các quá trình độ lợi nhánh có thể được tạo ra bằng lọc các quá trình Gausơ trắng như cho ở hình 14.9.



Hình 14.9: Tạo quá trình độ lợi nhánh thứ n

Hàm truyền đặt bộ lọc được chọn sao cho nó tạo ra mật độ phổ công suất doppler mong muốn. Nói cách khác, $H(f)$ được chọn sao cho:

$$S_{\tilde{g}\tilde{g}}(f) = S_d(f) = S_{\tilde{w}\tilde{w}}(f) \cdot |\tilde{H}(f)|^2 = |\tilde{H}(f)|^2 \quad (14.58)$$

Trong đó $S_{\tilde{w}\tilde{w}}(f)$ là mật độ phổ công suất của quá trình tạp âm trắng đầu vào, được đặt bằng 1 và $S_{\tilde{g}\tilde{g}}(f)$ là mật độ phổ công suất cụ thể của các quá trình độ lợi nhánh. Độ lợi của bộ lọc được chọn sao cho $\tilde{g}(t)$ có công suất chuẩn hóa là 1. Độ lợi tĩnh σ_n trong hình 14.9 giải thích các mức công suất hay phương sai khác nhau cho các nhánh khác nhau. Nếu mật độ phổ công suất của các độ lợi nhánh là khác nhau, thì ta sẽ dùng các bộ lọc khác nhau cho các nhánh khác nhau.

Các lý lịch trễ công suất và các mật độ phổ công suất Doppler

Như đã đề cập ở trên, hiệu năng BER của hệ thống nhạy cảm với các giá trị trải trễ cực đại và rms hơn so với dạng của lý lịch trễ công suất. Theo đó, ta dùng các lý lịch đơn giản như dạng đồng đều hoặc mũ để mô phỏng. Các lý lịch trễ được chuẩn hóa để có diện tích đơn vị (nghĩa là, công suất tổng được chuẩn hóa, hoặc diện tích dưới lý lịch trễ công suất trung bình cục bộ được đặt bằng 1). Vì vậy:

$$\int_0^{T_m} p(\tau) d\tau = 1 \quad (14.59)$$

Các trải trễ rms điển hình được cho ở bảng 14.2.

Bảng 14.2: Các trải trễ rms điển hình

Kiểu tuyến	Khoảng cách tuyến	Trải trễ rms
Tán xạ đối lưu	100 km	ms (10^{-3})
Di động ngoài trời	1 km	μs (10^{-6})

Trong nhà	10 m	ns (10^{-9})
-----------	------	------------------

Các mô hình được sử dụng phổ biến nhất cho các mật độ phổ công suất Doppler đối với các ứng dụng di động coi rằng có nhiều thành phần đa đường, mỗi thành phần có các trễ khác nhau và tất cả các thành phần đều có cùng phổ Doppler. Thực tế, mỗi thành phần đa đường (tia) tạo ra một số lượng lớn thành phần đa đường không thể phân giải được cùng lúc, có góc tới phân bố đều tại ăng ten thu. Mô hình kênh này được sử dụng bởi Jakes và một số khác ở phòng thí nghiệm Bell để rút ra mô hình kênh vô tuyến di động toàn diện đầu tiên cho các hiệu ứng Doppler và các hiệu ứng pha đỉnh biên độ. Phổ Doppler Jake kinh điển có dạng, đã được mô phỏng khởi đầu trong chương 7 (xem ví dụ 7.11):

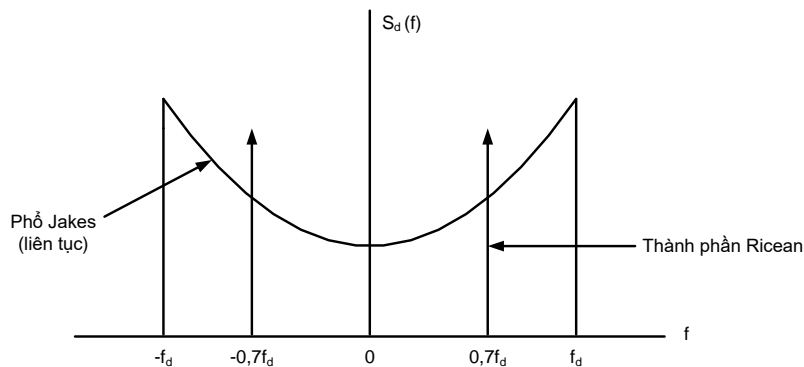
$$S_d(f) = S_{\tilde{g}_n \tilde{g}_n}(f) = \frac{K}{\sqrt{1 - (f/f_d)^2}}, \quad -f_d \leq f \leq f_d \quad (14.60)$$

Trong đó $f_d = v/\lambda$ là dịch doppler cực đại, v là vận tốc xe cộ m/s, λ là bước sóng của sóng mang. Trong khi phổ Doppler được định nghĩa bởi (14.60) là phù hợp cho môi trường tán xạ dày đặc như các khu vực thành phố, thì “phổ Ricean” được khuyến nghị cho môi trường nông thôn ở đó có một thành phần đi thẳng trực tiếp LOS mạnh vì vậy pha đỉnh Ricean. Phổ Doppler Ricean có dạng:

$$S_d(f) = S_{\tilde{g}_n \tilde{g}_n}(f) = \frac{0,41}{\sqrt{1 - (f/f_d)^2}} + 0,91\delta(f \pm 0,7f_d), \quad -f_d \leq f \leq f_d \quad (14.61)$$

Được thấy ở hình 14.10. Các dạng phổ khác được dùng cho mật độ phổ công suất Doppler bao gồm Gauss và đều. Các độ rộng băng tần Doppler điển hình trong các ứng dụng di động ở 1GHz sẽ nằm trong khoảng từ 10 đến 200 Hz.

Có nhiều cách thực hiện lọc định dạng phổ Doppler để tạo các quá trình độ lợi nhánh trong mô hình TDL cho kênh khi dùng mô hình Jakes. Bộ lọc FIR trong miền thời gian là phổ biến nhất vì mật độ phổ công suất Doppler không dễ dàng thực thi ở dạng đệ quy. Tạo phổ Jakes dùng các kỹ thuật lọc FIR đã được minh họa trong chương 7.



Hình 14.10: Minh họa các mật độ phổ công suất doppler

Cần lưu ý rằng, khi tạo các quá trình độ lợi nhánh, độ rộng băng tần của các quá trình độ lợi nhánh cho các kênh thay đổi chậm theo thời gian sẽ rất nhỏ so với độ rộng băng tần của tín hiệu đi qua chúng. Khi này, ta nên thiết kế bộ lọc độ lợi nhánh và được thực hiện tại tốc độ lấy mẫu thấp hơn. Có thể dùng nội suy tại đầu ra của bộ lọc để tạo các mẫu dày đặc hơn ở tốc độ phù hợp với tốc độ lấy mẫu tín hiệu đến nhánh đó. Thiết kế bộ lọc tại tốc độ cao hơn sẽ dẫn đến không hiệu quả tính toán và các vấn đề ổn định.

Mô hình độ lợi nhánh tương quan

Việc lấy xấp xỉ các quá trình độ lợi nhánh được cho ở các biểu thức (14.53) và (14.54) bởi:

$$\tilde{g}_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau \approx T \tilde{C}(nT, t) \quad (14.62)$$

Dẫn đến các hàm độ lợi nhánh không tương quan. Không lấy xấp xỉ, thì các hàm độ lợi nhánh sẽ *tương quan*. Thấy rõ, tương quan giữa $g_n(t)$ và $g_m(t)$ được cho bởi:

$$\begin{aligned} R_{m,n}(\eta) &= E\{g_m^*(t)g_n(t+\eta)\} \\ &= \int R_{cc}(\tau, \eta) \sin C(2B\tau - m) \sin C(2B\tau - n) d\tau \end{aligned} \quad (14.63)$$

Trong đó $T = 1/2B$ là khoảng cách nhánh.

Việc tạo một tập các quá trình ngẫu nhiên tương quan có các hàm mật độ phổ công suất tùy ý là rất khó khăn. Việc lấy xấp xỉ làm đơn giản bài toán một chút, tạo ra giả định hợp lý để tất cả các hàm độ lợi nhánh có cùng mật độ phổ công suất. Vì vậy, ta giả thiết rằng:

$$S(\tau, \lambda) = m(\tau)S_d(\lambda) \quad (14.64)$$

Trong đó $S(\tau, \lambda)$ là hàm tán xạ, $m(\tau)$ là lý lịch công suất trễ chuẩn hóa và $S_d(\lambda)$ là phổ Doppler.

14.7.2. Mô phỏng kênh pha đỉnh đa đường rời rạc

So sánh với mô hình đa đường *khuếch tán* thì việc mô phỏng các mô hình đa đường rời rạc là dễ hiểu hơn, ít nhất là khái niệm. Ta phải luôn nhớ vì tính cách động của kênh theo cả thời gian và không gian, nên cần phải cẩn thận để tránh chồng phổ. Quan hệ vào/ra của mô hình kênh rời rạc được cho bởi:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \tilde{x}(t - \tau_k(t)) \quad (14.65)$$

Trong đó $\tilde{a}_k(t)$ là suy hao đường dẫn phức như đã thảo luận trong phần 14.4. Trong (14.65), coi rằng số lượng các thành phần đa đường và cấu trúc trễ sẽ thay đổi chậm so với các thay đổi trong $\tilde{a}_k(t)$. Vì vậy, trễ $\tau_k(t)$ có thể coi là không đổi trong khoảng thời gian mô phỏng và phương trình trên được viết như sau:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \cdot \tilde{x}(t - \tau_k) \quad (14.66)$$

Và được thực thi dưới dạng sơ đồ khối như được cho ở hình 14.11.

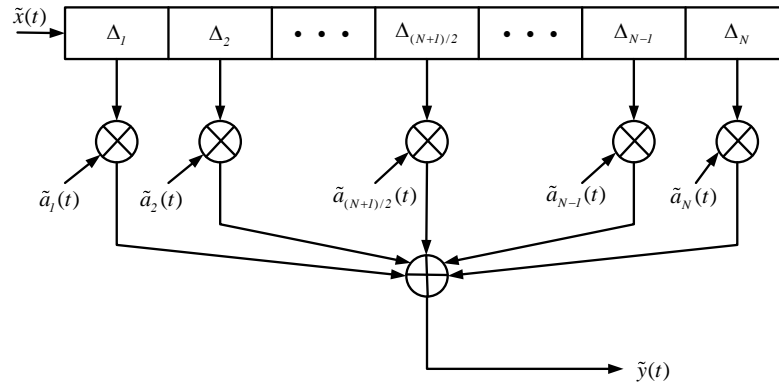
Để minh họa giải pháp cơ bản nhằm mô phỏng các mô hình kênh rời rạc, ta coi mô hình được định rõ dưới dạng các phân bố xác suất cho N thành phần trễ, và suy hao phức như một hàm của trễ. Trình bày (chớp ảnh) của kênh như sau:

1. Lấy ra một con số ngẫu nhiên N để có được số lượng trễ.
2. Rút ra một tập N số ngẫu nhiên từ phân bố cho các giá trị trễ.
3. Lấy ra một tập N suy hao dựa trên các giá trị trễ.

Tập $3N$ số ngẫu nhiên này thể hiện một chớp ảnh của kênh, được thực thi như được cho ở hình 14.11. Trong hình 14.11, trễ khởi đầu $\Delta_1 = \tau_1$. Các trễ còn lại Δ_n , $2 \leq n \leq N$ là các trễ vi sai, được định nghĩa bởi:

$$\Delta_n = \tau_n - \tau_{n-1}, \quad 2 \leq n \leq N \quad (14.67)$$

Trong khi việc thực thi được cho ở hình 14.11 là khá dễ hiểu, thì nó nảy sinh vấn đề khi các trễ chỉ lệch thời gian rất nhỏ. Vì tất cả sẽ được lấy mẫu, các khoảng cách nhánh (nghĩa là, hiệu số trễ $\tau_n - \tau_{n-1}$) phải được biểu diễn theo số nguyên lần chu kỳ lấy mẫu trong mô phỏng. Vì vậy, thời gian lấy mẫu phải rất nhỏ, nhỏ hơn hiệu số trễ nhỏ nhất, dẫn đến tốc độ lấy mẫu quá mức và gánh nặng tính toán là không chấp nhận được. Ta có thể tránh vấn đề này bằng cách triển khai mô hình TDL với khoảng cách nhánh cách đều theo giải pháp được sử dụng trong mô phỏng cho các kênh đa đường khuếch tán ở phần 14.7.1.



Hình 14.11: Mô hình TDL trễ khả biến cho các kênh đa đường rời rạc

Mô hình TDL cách đều cho các kênh pha định đa đường rời rạc

Các độ lợi nhánh của mô hình TDL cách đều được cho trong (14.53) là:

$$\tilde{g}_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau \quad (14.68)$$

Thế đáp ứng xung kim của kênh đa đường rời rạc, được cho bởi:

$$\tilde{c}(\tau, t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \cdot \delta(t - \tau_k) \quad (14.69)$$

Vào phương trình 14.68, ta được các độ lợi nhánh là:

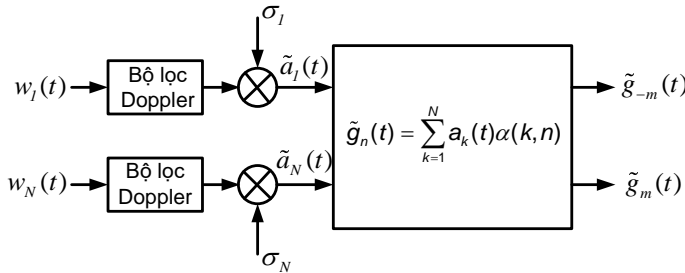
$$\tilde{g}_n(t) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \cdot \sin c\left(\frac{\tau_k}{T} - n\right) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \cdot \alpha(k, n) \quad (14.70)$$

Trong (14.70):

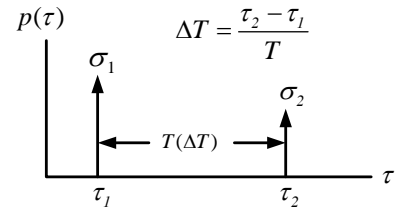
$$\alpha(k, n) = \sin c\left(\frac{\tau_k}{T} - n\right) \quad (14.71)$$

Lưu ý rằng đường bao của $\alpha(k, n)$ giảm khi $|n|$ tăng. Vì vậy, số lượng nhánh có thể được cắt gọn trong khoảng $|n| \leq m$, trong đó m được chọn để thỏa mãn $m \gg T_{\max} T$. Với trường hợp, trải trễ cực đại T_{\max} không vượt quá 3 hoặc 4 lần ký hiệu, thì số lượng nhánh cần thiết không lớn hơn 20 ($-m < n < m, m = 10$). Tại đây, mô hình có dạng như đã được rút ra cho mô hình đa đường khuếch tán được minh họa ở hình 14.7.

Quá trình tạo các độ lợi nhánh được minh họa ở hình 14.12. Lưu ý rằng, việc tạo các quá trình độ lợi nhánh cho mô hình đa đường rời rạc là dễ hiểu so với việc tạo quá trình độ lợi nhánh cho trường hợp khuếch tán. Ta bắt đầu với tập N quá trình tạp âm trắng Gauss phức trung bình không độc lập thống kê, chúng được lọc để tạo phổ Doppler phù hợp. Sau đó, được lấy tỉ lệ để tạo lý lịch công suất mong muốn và cuối cùng được chuyển đổi theo (14.70) để tạo các quá trình độ lợi nhánh (Lưu ý rằng chỉ có hai trong số N đường truyền được thấy trong hình 14.12).



Hình 14.12: Tạo các quá trình độ lợi nhánh



Hình 14.13: Mô hình hai tia đơn giản $\Delta\tau$ được chuẩn hóa

Để minh họa quá trình tính toán các hàm độ lợi nhánh, ta giả thiết:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_2 - \tau_1}{T} = 0,5 \quad (14.72)$$

Trong trường hợp này, tìm được các hàm độ lợi nhánh bằng cách lọc hai quá trình tạp âm Gauss trắng không tương quan sau đó biến đổi chúng thành các quá trình độ lợi nhánh theo (14.70) như sau:

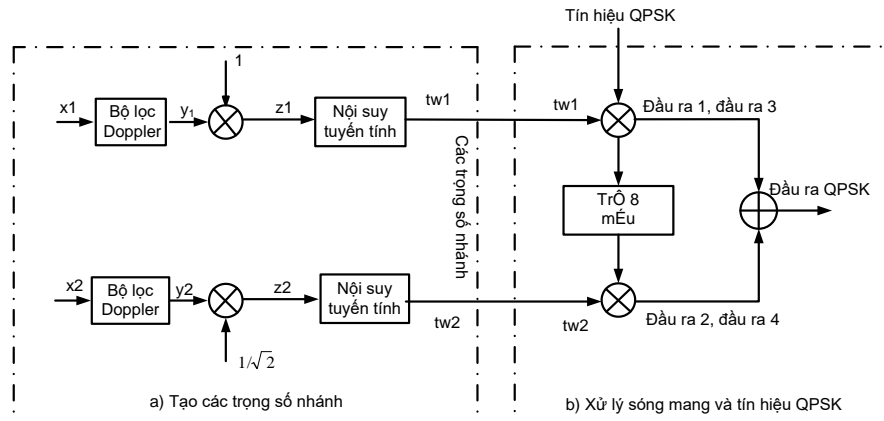
$$\begin{bmatrix} \tilde{g}_{-4}(t) \\ \tilde{g}_{-3}(t) \\ \tilde{g}_{-2}(t) \\ \tilde{g}_{-1}(t) \\ \tilde{g}_0(t) \\ \tilde{g}_1(t) \\ \tilde{g}_2(t) \\ \tilde{g}_3(t) \\ \tilde{g}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin c(0,0+4) & \sin c(0,5+3) \\ \sin c(0,0+3) & \sin c(0,5+3) \\ \sin c(0,0+2) & \sin c(0,5+2) \\ \sin c(0,0+1) & \sin c(0,5+1) \\ \sin c(0,0) & \sin c(0,5) \\ \sin c(0,0-1) & \sin c(0,5-1) \\ \sin c(0,0-2) & \sin c(0,5-2) \\ \sin c(0,0-3) & \sin c(0,5-3) \\ \sin c(0,0-4) & \sin c(0,5-4) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tilde{a}_1(t) \\ \tilde{a}_2(t) \end{bmatrix} \quad (14.73)$$

Nó là:

$$\begin{bmatrix} \tilde{g}_{-4}(t) \\ \tilde{g}_{-3}(t) \\ \tilde{g}_{-2}(t) \\ \tilde{g}_{-1}(t) \\ \tilde{g}_0(t) \\ \tilde{g}_1(t) \\ \tilde{g}_2(t) \\ \tilde{g}_3(t) \\ \tilde{g}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 & 0,0707 \\ 0,0 & -0,0910 \\ 0,0 & 0,1273 \\ 0,0 & -0,2122 \\ 1,0 & 0,6366 \\ 0,0 & 0,6366 \\ 0,0 & -0,2122 \\ 0,0 & 0,1273 \\ 0,0 & -0,0909 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tilde{a}_1(t) \\ \tilde{a}_2(t) \end{bmatrix} \quad (14.74)$$

Trong đó \tilde{a}_1 và \tilde{a}_2 được định nghĩa trong hình 14.12. Phương trình trên cho thấy các hệ số của phép biến đổi chỉ là 9 nhánh. Ta thấy rằng những hệ số này sẽ là không đáng kể với độ lợi nhánh bậc cao hơn và kết quả là chúng có thể được bỏ qua. Vì thế, mô hình TDL có thể rút gọn lại 9 nhánh.

Thường dùng mô hình hai tia để dự đoán hiệu năng sơ bộ cho các kênh pha đỉnh. Xét lý lịch trễ công suất được minh họa ở hình 14.13. Có thể dựa đoán hiệu năng tham số bằng cách thay đổi tỉ lệ của trải trễ chuẩn hóa $\Delta\tau = (\tau_2 - \tau_1)/T$, T là khoảng thời gian ký hiệu và tỉ lệ công suất tương đối trong hai đường $(\sigma_1/\sigma_2)^2$. Nếu $\Delta\tau \ll 0,1$ thì có thể kết hợp hai đường lại thành một và mô hình có thể được coi là *không chọn lọc tần số*. Nếu $\Delta\tau > 0,1$ thì sẽ có ISI đáng kể trong kênh và kênh được coi là *chọn lọc tần số*.

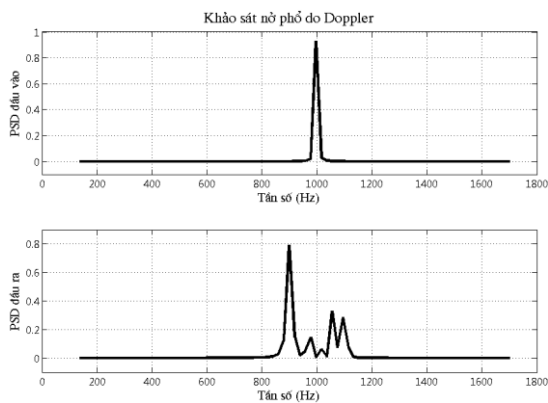


Hình 14.14: Các sơ đồ khối của các hệ thống mô phỏng

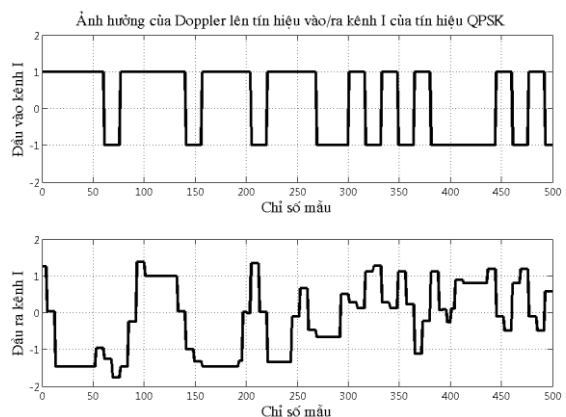
Ví dụ 14.2: Trong ví dụ này, ta xét ảnh hưởng pha đình do Doppler lên truyền dẫn tín hiệu QPSK trên kênh đa đường rời rạc. Sơ đồ khối được cho ở hình 14.14. Việc tạo các trọng số nhánh được cho ở hình 14.14(a). Thực thi bộ lọc doppler bằng cách dùng mô hình Jakes được định nghĩa bởi biểu thức (14.60) với $K = 1$ và $f_d = 100$ Hz. Các quá trình độ lợi nhánh là không tương quan nhau và Gauss. Khoảng cách nhánh dựa vào độ rộng băng tần 20 kHz (độ rộng băng tần tương đương thông thấp là 10 kHz). Các trọng số nhánh được ký hiệu là $tw1$ và $tw2$. Tín hiệu phức được nhân với các trọng số nhánh phức. Cả tín hiệu QPSK phức và sóng mang phức được sử dụng làm các đầu vào. Sóng mang được định nghĩa bởi:

$$c(t) = e^{j2\pi(1000)t} \quad (14.75)$$

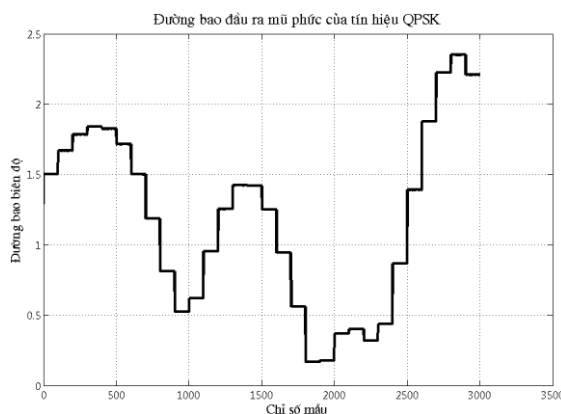
Trễ của 8 mẫu tương đương với một nửa của thời gian ký hiệu. Chi tiết thêm được cho ở trong mã chương trình Matlab **NVD14_jakes.m** ở phụ lục 14A.



Hình 14.15: Mật độ phổ công suất đầu vào (trên) và đầu ra (dưới)



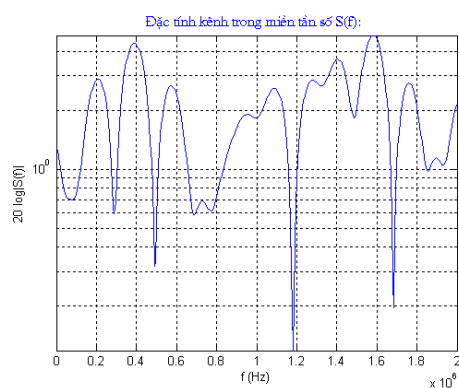
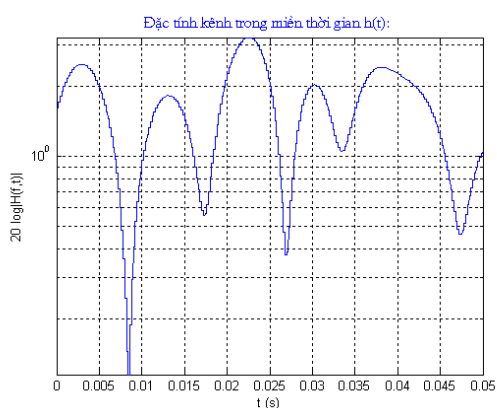
Hình 14.16: Đầu vào và đầu ra QPSK kênh đồng pha

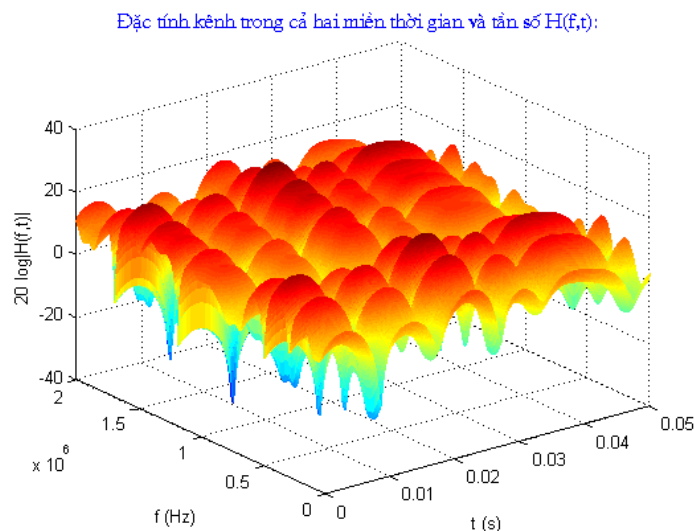


Hình 14.17a: Đường bao của đầu ra số mũ phức

Độ dài mô phỏng được xác định từ số lần xét. Để quan trắc phổ đầu vào/ra cho trường hợp số mũ phức, cần có 10 đến 20 chu kỳ của số mũ phức. Tại cùng thời điểm, để bắt giữ được các ảnh hưởng của kênh thay đổi theo thời gian, ta cần phải mô phỏng quá trình pha định trong khoảng thời gian (5 đến 10) lần nghịch đảo của độ rộng băng tần Doppler. Hai vấn đề này dẫn đến thời gian mô phỏng là 1/20 giây hoặc 8,000 mẫu.

Chạy chương trình Matlab **NVD14_jakes.m** được cho ở phụ lục 14A nhận được các kết quả trong hình 14.15, 14.16 và 14.17. Các tín hiệu sóng mang đầu vào/ra được cho ở hình 14.15. Đầu vào (trên) là tín hiệu tại 1000 Hz, đầu ra (dưới) minh họa dẫn phổ do Doppler. Đầu vào/ra kênh đồng pha được minh họa ở hình 14.16. Tín hiệu đầu vào (trên) có hai mức như mong đợi. Tín hiệu đầu ra (dưới) có nhiều hơn hai mức vì giao thoa giữa các ký hiệu ISI. Đường bao của tín hiệu đầu ra QPSK được minh họa trên hình 14.17(a). Đặc tính kênh trong các miền thời gian và tần số được minh họa ở hình 14.17(b).





Hình 14.17(b): Minh họa đặc tính kênh trong các miền thời gian và tần số

14.7.3. Các mô hình kênh pha đỉnh đa đường rời rạc điển hình

Phần này, trình bày các ví dụ mô hình đa đường rời rạc để mô phỏng hiệu năng các hệ thống truyền thông vô tuyến.

Mô hình đầu tiên, được gọi là mô hình Rummmler cho các tuyến vi ba mặt đất giữa các tháp ăng ten cố định. Đây là kênh vô tuyến tầm nhìn thẳng LOS có rất ít thành phần đa đường vì sử dụng ăng ten tính hướng cao, và các thuộc tính bắt đầu của kênh tăng đối lưu được dùng bởi vì ba LOS. ăng ten càng lớn thì càng ít thành phần đa đường vì khi ăng ten lớn có nghĩa là trường nhìn thấy của ăng ten được giới hạn bởi các góc tới rất nhỏ. Ngoài ra, vì ăng ten là cố định, nên các thay đổi theo thời gian trong đặc tính kênh chỉ do các thay đổi điều kiện khí hậu gây ra. Các thay đổi này có thể coi là rất chậm khi so với các độ rộng băng tần. Vì vậy, mô hình Rummmler là mô hình đa đường với pha đỉnh *rất chậm*.

Mô hình thứ hai, là các kênh vô tuyến di động. Các kênh này có nhiều thành phần đa đường do sử dụng các ăng ten vô hướng, nó bắt nhiều phản xạ với các bề truyền sóng thay đổi lớn, đặc biệt trong các vùng thành phố. Chúng phải chịu pha đỉnh nhanh hơn, do số lượng lớn các thành phần đa đường phải chịu dịch pha sóng mang lớn trên các thay đổi khoảng cách nhỏ vì vậy có thể kết hợp mạnh hoặc yếu trên các khoảng cách nhỏ.

Mô hình Rummmler cho các kênh vi ba mặt đất LOS

Một trong các mô hình được dùng rộng rãi nhất cho các tuyến vi ba mặt đất hoạt động trên dải tần số 4-6 GHz giữa các tháp cố định, được triển khai bởi Rummmler. Mô hình này dựa trên một tập các giả định và các số liệu đo đạc được sử dụng để đạt được các giá trị bằng số của các tham số mô hình. Cho trước địa hình của tuyến và các tham số ăng ten, Rummmler đưa ra giả thiết một mô hình 3 tia dạng:

$$y(t) = x(t) + \alpha \cdot x(t - \tau_1) + \beta \cdot x(t - \tau_2) \quad (14.76)$$

Trong đó $x(t)$ và $y(t)$ là các đầu vào/ra thông dải tương ứng. Ở dạng đường bao phức, mô hình đó có dạng:

$$\tilde{y}(t) = \tilde{x}(t) + \alpha e^{-j2\pi f_c \tau_1} \tilde{x}(t - \tau_1) + \beta e^{-j2\pi f_c \tau_2} \tilde{x}(t - \tau_2) \quad (14.77)$$

Và hàm truyền đạt tương đương thông thấp của kênh Rummmler được cho bởi:

$$H(f) = 1 + \alpha e^{-j2\pi(f_c - f)\tau_1} + \beta e^{-j2\pi(f_c - f)\tau_2} \quad (14.78)$$

Đơn giản hóa đầu tiên của mô hình dựa trên giả thiết, trên độ rộng băng tần xét, thì $(f_c - f)\tau_1 \ll 1$, vì vậy $\exp(-j2\pi(f_c - f)\tau_1) \approx 1$ và:

$$H(f) \approx 1 + \alpha + \beta e^{-j2\pi(f_c - f)\tau_2} \quad (14.79)$$

Đơn giản hóa tiếp theo là giả sử rằng tần số “hình V”, trong đó độ lớn của đáp ứng là cực tiểu tại $f_c + f_0$ trong trường hợp thông băng và tại f_0 trong mô hình thông thấp, vì vậy dạng cuối cùng của hàm truyền đạt tương đương thông thấp được viết là:

$$H(f) \approx a [1 - b \cdot e^{-j2\pi(f_0 - f)\tau_2}] \quad (14.80)$$

Trong đó $a = 1 + \alpha$ là toàn bộ suy hao, $b = -\beta/(1 + \alpha)$ là tham số định dạng. Giá trị của tham số số trễ τ_2 được chọn để phù hợp với số liệu đo, có giá trị $\tau_2 = \tau = 6.3ns$. Lưu ý rằng, đây là trễ nhỏ.

Đáp ứng biên độ của mô hình Rummmler là:

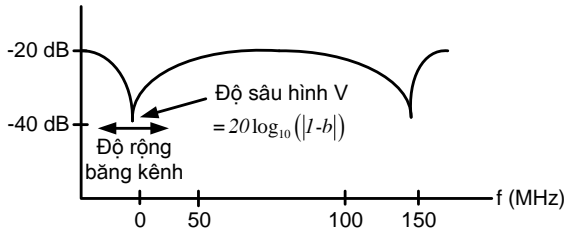
$$|H(f)|^2 = a^2 [1 + b^2 - 2b \cdot \cos(2\pi(f - f_0)\tau)] \quad (14.81)$$

Và một ví dụ của đáp ứng độ lớn được cho ở hình 14.18.

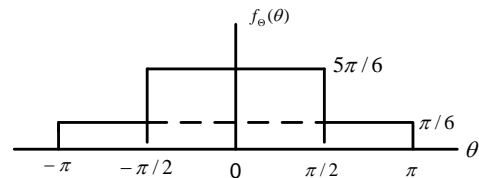
Các tham số a và b được chuẩn hóa và được biểu diễn đơn vị dB như minh họa trong bảng 14.3. Phân tích dữ liệu kênh nhận được các phân bố mũ cho B_1 và B_2 có giá trị trung bình là 3,8 dB. Tương tự như vậy, A_1 và A_2 là Gausơ với độ lệch chuẩn là 5 dB. Các trung bình là:

$$\mu = 24,6 \cdot \left(\frac{B^4 + 500}{B^4 + 800} \right)$$

Trong đó $B = B_1$ đối với A_1 và $B = B_2$ đối với A_2 . Hàm mật độ xác suất của $\theta = 2\pi f_0 \tau$ được cho ở hình 14.19.



Hình 14.18: Minh họa đáp ứng biên độ của kênh Rummmler



Hình 14.19: Hàm mật độ xác suất của θ

Bảng 14.3: Các tham số của mô hình Rummmler

Trường hợp pha cực tiểu ($b < 1$)	Trường hợp pha không cực tiểu ($b > 1$)
$A_1 = 20\log_{10}(a)$	$A_2 = -20\log_{10}(ab)$
$B_1 = 20\log_{10}(1-b)$	$B_2 = 20\log_{10}(1 - 1/b)$

Để mô phỏng chớp ảnh của kênh Rummmler, ta rút ra một tập các số ngẫu nhiên dưới đây.

1. Lấy ra một số U phân bố đều trong $[0,1]$. Nếu $U > 0,5$, thì coi là pha tối thiểu. Nếu $U < 0,5$, thì coi pha là không tối thiểu. (các thăng giáng pha tối thiểu và pha không tối thiểu được coi là đồng khả năng).

2. Rút ra một số ngẫu nhiên phân bố theo luật số mũ cho B_1 hoặc B_2 .

3. Rút ra một số ngẫu nhiên Gauss cho A_1 hoặc A_2 sử dụng giá trị của B_1 hoặc B_2 .

4. Rút ra một số ngẫu nhiên cho θ và một tập tần số hình V tại $f_0 = \theta / 2\pi\tau$, $\tau = 6.3ns$.

Các tham số này định nghĩa một chớp ảnh của kênh Rummmler. Vì kênh được coi là thay đổi rất chậm so với tốc độ ký hiệu, nên chuỗi các chớp ảnh của kênh là đầy đủ để ước lượng hiệu năng sử dụng mô phỏng Monte Carlo cho mỗi chớp ảnh được tạo ra bởi mô hình đó.

Lưu ý rằng: Các chương trình mô phỏng cho các kênh này được cho bởi **NVD14MFC1.m** và **NVD14MFC2.m** có trong phụ lục 14A.

Các mô hình cho các kênh di động

Các mô hình rời rạc được dùng rộng rãi cho các kênh vô tuyến trong nhà và ngoài trời. Nhiều mô hình được dựa trên các số liệu được tập hợp trên phạm vi rộng môi trường truyền sóng. Một số lượng lớn mô hình toán học và mô hình được đề xuất gần đây, các nhà thiết kế hệ thống phải đối mặt với vấn đề chọn một tập trình bày các mô hình kênh để thể hiện các kênh, hệ thống hoạt động thỏa đáng. May thay, một vài hướng dẫn về việc chọn mô hình được cung cấp bởi nhóm các tiêu chuẩn quốc tế, định rõ một tập kênh “*miêu tả*” để phân tích và mô phỏng hiệu năng của các loại hệ thống truyền thông khác nhau. Dưới đây trình bày hai trường hợp điển hình.

Các mô hình kênh rời rạc cho các ứng dụng GSM

Hệ thống thông tin di động toàn cầu GSM là một tiêu chuẩn để truyền thông di động trong băng tần từ (1 đến 2) GHz và sử dụng các kênh tần số vô tuyến RF 200 KHz để truyền thông, ghép kênh phân chia theo thời gian. Thời gian ký hiệu trong GSM là vài μs .

Các mô hình GSM được khuyến nghị là các mô hình rời rạc gồm 12 tia (đường) và được định rõ cho ba kịch bản khác nhau: *nông thôn*, *đồi núi* và *thành thị*. Với mỗi kịch bản, định rõ hai mô hình. Ngoài các mô hình 12 tia, tập các mô hình đơn giản hơn có 6 tia (đường) cũng được định nghĩa. Các mô hình 12 tia và 6 tia cho các vùng thành thị được cho ở bảng 14.4 và bảng 14.5. Ngoài ra, cũng có một mô hình cụ thể để kiểm tra hiệu năng bộ cân bằng Viterbi

được dùng trong các hệ thống GSM và được cho trong bảng 14.6. Tất cả các công suất tương đối đơn vị dB và (1) và (2) định rõ hai mô hình tương đương.

Bảng 14.4: Lý lịch điển hình cho các vùng thành thị (mô hình 12 tia)

Tia	Thời gian tương đối giây	Thời gian tương đối giây	Công suất trung bình dB	Công suất trung bình dB	Phổ Doppler
	(1)	(2)	(1)	(2)	
1	0,0	0,0	-4,0	-4,0	Jakes
2	0,1	0,2	-3,0	-3,0	Jakes
3	0,3	0,4	0,0	0,0	Jakes
4	0,5	0,6	-2,6	-2,0	Jakes
5	0,8	0,8	-3,0	-3,0	Jakes
6	1,1	1,2	-5,0	-5,0	Jakes
7	1,3	1,4	-7,0	-7,0	Jakes
8	1,7	1,8	-5,0	-5,0	Jakes
9	2,3	2,4	-6,5	-6,0	Jakes
10	3,1	3,0	-8,6	-9,0	Jakes
11	3,2	3,2	-11,0	-11,0	Jakes
12	5,0	5,0	-10,0	-10,0	Jakes

Bảng 14.5: Lý lịch được rút gọn cho các khu vực thành thị (mô hình 6 tia)

Tia	Thời gian tương đối giây	Thời gian tương đối giây	Công suất trung bình dB	Công suất trung bình dB	Phổ Doppler
	(1)	(2)	(1)	(2)	
1	0,0s	0,0s	-3,0	-3,0	Jakes
2	0,2	0,2	0,5	0,0	Jakes
3	0,5	0,6	-2,0	-2,0	Jakes
4	1,6	1,6	-6,0	-6,0	Jakes
5	2,3	2,4	-8,0	-8,0	Jakes
6	5,0	5,0	-10,0	-10,0	Jakes

Cần lưu ý rằng thời gian ký hiệu trong hệ thống là vài μs và một vài trề vi phân là $0.1\mu s$ nghĩa là nên dùng tốc độ lấy mẫu là 10M mẫu/giây để biểu diễn các trề nhỏ này. Một giải pháp khác, như đã được phác thảo trong phần trước, sử dụng TDL khoảng cách nhánh một ký hiệu (các hàm độ lợi nhánh tương quan) để giảm tải tính toán.

Bảng 14.6: Lý lịch để kiểm tra cân bằng

Tia	Thời gian tương đối	Công suất trung bình	Phổ doppler
1	0,0s	0,0dB	Jakes
2	3,2	0,0	Jakes
3	6,4	0,0	Jakes
4	9,6	0,0	Jakes

5	12,8	0,0	Jakes
6	16,0	0,0	Jakes

Các mô hình rời rạc cho các ứng dụng PCS

Đối với các hệ thống truyền thông PCS hoạt động trong băng tần 2GHz, các tiêu chuẩn vừa được chấp thuận trên một tập các mô hình rời rạc cho các môi trường điển hình. Các mô hình này được tóm tắt trong các bảng 14.7, 14.8, 14.9. Đối với mô hình được cho ở bảng 14.7, các cường độ tia $E\{|a|^2\}$ được cho ở bảng 14.8.

Bảng 14.7: Các tham số cho một mô hình ngoài trời 3 tia cho PCS

Môi trường	τ_1 (ns)	τ_2 (ns)	τ_3 (ns)	Doppler	Độ rộng băng tần Doppler
Đi bộ	0	1,500	14,500	Phẳng	12 Hz
Mạch vòng vô tuyến	0	1,500	14,500	Gausơ	12 Hz
Xe cộ	0	1,500	15,500	Jakes	180 Hz

Bảng 14.8: Cường độ tia

Tia	Công suất (dB)
1	0
2	-3
3	-6

Bảng 14.9: Các tham số của mô hình trong nhà PCS

Môi trường	Khoảng cách nhánh	Số nhánh	Phổ Doppler	Độ rộng băng tần Doppler
Nhà riêng	50 (ns)	2	Gausơ	3 Hz
Cơ quan	50	4	Gausơ	3
Thương mại	50	12	Phẳng	30

Nên lưu ý rằng, các hiệu số trễ là 50 ns (mô hình trong nhà) là rất nhỏ so với thời gian ký hiệu của các hệ thống PCS được đề xuất. Vì vậy, hoặc nên coi pha đỉnh là không chọn lọc tần số hoặc nên dùng mô hình TDL hạn chế băng tần có khoảng cách nhánh 1 ký hiệu cho mô phỏng.

Các mô hình kênh đa đường rời rạc cho các hệ thống CDMA băng rộng 3G

Hệ thống 3G sử dụng CDMA băng rộng hoạt động quanh 2 GHz. Các ví dụ về các mô hình kênh rời rạc được đề xuất cho các hệ thống 3G được cho ở bảng 14.10 (Trường hợp 1: trong nhà, Trường hợp 2: Trong nhà hoặc đi bộ, Trường hợp 3: xe cộ).

Bảng 14.10: Các tham số cho kênh W-CDMA 3G

Trường hợp 1 (3 km/h)	Trường hợp 2 (3 km/h)	Trường hợp 3 (120 km/h)
-----------------------	-----------------------	-------------------------

Trễ (ns)	Công suất (dB)	Trễ (ns)	Công suất (dB)	Trễ (ns)	Công suất (dB)
0	0,0	0	0,0	0	0,0
244	-9,6	244	-12,5	244	-2,4
488	-35,5	488	-24,7	488	-6,5
				732	-9,4
				936	-12,7
				1220	-13,3
				1708	-15,4
				1953	-25,4

14.7.4. Mô hình cho kênh vô tuyến trong nhà

Các đặc tính pha đỉnh của các kênh vô tuyến trong nhà rất khác so với các kênh xe cộ do sự khác nhau về môi trường vật lý (kích thước, vật liệu, v.v...) và cơ chế truyền lan. Môi trường xe cộ ngoài trời được đặc tính hóa bởi các tế bào rộng (vài km) và ít thành phần đa đường hơn. Mặt khác, các môi trường trong nhà được đặc trưng hóa bởi các kích thước nhỏ hơn (vài chục m) và nhiều thành phần đa đường hơn vì nhiều phản xạ từ tường, bàn và các bề mặt khác. Một vài mô hình thống kê cho kênh trong nhà được rút ra từ đo đạc, các mô hình trong nhà có thể được phân loại như các mô hình đa đường rời rạc dày đặc có trễ trễ rms trong khoảng 30 đến 300 ns với mỗi thành phần có các thống kê đường bao Ricean. Chỉ số tổn hao đường điển hình thay đổi từ 1,8 đến 4. Các kỹ thuật mô phỏng cho kênh trong nhà tương tự như các kênh đa đường khác. Tuy nhiên, gặp phải hiệu số trễ nhỏ trong môi trường trong nhà có thể cần phải chuyển các mô hình TDL khoảng các không đồng đều thành mô hình TDL khoảng cách đồng đều như đã đề cập ở phần 14.7.2.