

Phần I:

Nguyên lý hoạt động của OFDM

3.1. Mở đầu

Do tính di động và tính tiện dụng mà các hệ thống truyền thông vô tuyến đã mang lại hiệu quả cao trong việc sử dụng, khai thác trao đổi thông tin cho người dùng. Kéo theo nhu cầu sử dụng, chiếm dụng tài nguyên vô tuyến ngày càng gia tăng nhanh chóng, vì thế ngày càng nhiều các nhà khai thác, công nghiệp viễn thông tập trung khai thác thế mạnh này ở nhiều hình thức khác. Kết quả đã mang lại nguồn thu và kích thích thúc đẩy tăng trưởng kinh tế đặc biệt trong xu thế hội nhập cạnh tranh. Theo đó, ngày càng xuất hiện nhiều hình thức dịch vụ, tính đa dạng của các công nghệ mới nhằm khai thác triệt để tài nguyên và đối phó hiệu quả những ảnh hưởng vốn có của môi trường vô tuyến, ví dụ như mạng không dây nội hạt (WLAN). Tuy nhiên với sự tăng trưởng theo hàm mũ của Internet đã đòi hỏi những phương pháp mới để có mạng không dây dung lượng lớn. Hệ thống di động thế hệ thứ ba, hệ thống truyền thông di động toàn cầu (UMTS) và CDMA2000 [1] hiện đang được triển khai tại nhiều quốc gia trên thế giới và bước đầu đạt được những thành công đáng kể. Bảng 1.1 sẽ liệt kê đặc tính của các dịch vụ mà UMTS hỗ trợ:

Bảng 1.1 Đặc tính dịch vụ của UMTS

<i>Dịch vụ</i>	<i>Tốc độ dữ liệu yêu cầu</i>	<i>Chất lượng dịch vụ yêu cầu</i>	<i>Yêu cầu tính thời gian thực</i>
<i>Bản tin ngắn (email, chat...)</i>	Thấp (1-10 kbps)	Cao	Không
<i>Thoại</i>	Thấp (4-20 kbps)	Thấp ($BER < 10^{-3}$)	Có
<i>Duyệt Web</i>	Khả biến (>10 kbps cho đến 100 kbps)	Cao ($BER < 10^{-9}$)	Thông thường là không
<i>Hội nghị truyền hình</i>	Cao (100 kbps-1 Mbps)	Trung bình	Có
<i>Camera theo dõi</i>	Trung bình (50-300 kbps)	Trung bình	Không
<i>Tiếng chất lượng cao</i>	Cao (100-300 kbps)	Trung bình	Có
<i>Truy nhập cơ sở dữ liệu</i>	Cao (> 30 kbps)	Rất cao	Không

Đối với những ứng dụng trong môi trường di động ô, thấy rõ trong tương lai gần một sự

hội tụ của công nghệ điện thoại di động, máy tính, truy cập Internet, và nhiều ứng dụng tiềm năng khác như video và audio chất lượng cao, với sự thêm vào khả năng gửi và nhận dữ liệu sử dụng máy tính xách tay và điện thoại di động. Khi đó chỉ với một chiếc điện thoại nhỏ bé người dùng có thể xem truyền hình theo yêu cầu (VOD), hội nghị truyền hình và nghe nhạc, xem film chất lượng cao trực tuyến..., nhưng tốc độ dữ liệu yêu cầu sẽ >30 Mbps. Với tốc độ cao như vậy thì các hệ thống di động thế hệ ba hiện nay chưa đáp ứng được. Vì thế yêu cầu được đặt ra là cải thiện nhiều hơn hiệu quả sử dụng phổ tần và tốc độ truyền dữ liệu của các hệ thống di động. Hiện nay các hệ thống WLAN, HiperLAN/2, IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, WiMax đã được triển khai thực tế và cung cấp tốc độ truyền dữ liệu rất cao. Điều đặc biệt là các hệ thống trên đều dựa trên cơ sở công nghệ OFDM. Bảng 1.2 dưới đây liệt kê các thông số đặc trưng của những hệ thống này:

Bảng 1.2 Tham số đặc trưng của các hệ thống sử dụng công nghệ OFDM

Tham số hệ thống	<i>DAB</i>	<i>DVB-T</i>	<i>IEEE 802.11</i>	<i>HiperLAN/2</i>
<i>Tần số sóng mang</i>	VHF	VHF và UHF	5 GHz	5 GHz
<i>Băng thông</i>	1.54 MHz	7-8 MHz	20 MHz	20 MHz
<i>Tốc độ truyền dữ liệu tối đa</i>	1.7 Mbps	31.7 Mbps	54 Mbps	54 Mbps
<i>Số lượng sóng mang con</i>	192-1536	1705-6817	52	52
<i>Kích thước FFT</i>	256-2048	2048-8196	64	64

Ta thấy ưu thế nổi bật của các hệ thống sử dụng công nghệ OFDM là thông lượng lớn, hiệu quả sử dụng phổ tần cao và đối phó hiệu quả những nhược điểm của môi trường vô tuyến (sẽ được đề cập ở phần sau).

Vì vậy, khi xét ở góc độ tài nguyên phổ tần hệ thống thông tin vô tuyến, do đặc điểm tài nguyên phổ tần hữu hạn cùng với môi trường truyền dẫn hớ dẫn đến hai vấn đề cần được giải quyết là: **(i)** giữa nhu cầu chiếm dụng tài nguyên ngày càng gia tăng và tài nguyên hữu hạn của hệ thống; **(ii)** chất lượng dịch vụ và ảnh hưởng lớn của môi trường truyền dẫn vô tuyến. OFDM một trong những giải pháp để giải quyết vấn đề này, hay nói cách khác OFDM là một giải pháp cho bài toán dung lượng và chất lượng, cụ thể là hiệu quả sử dụng phổ tần cao và đối phó ảnh hưởng của fading chọn lọc của kênh.

3.1.1. Những hạn chế của kỹ thuật hiện hành

❖ Kỹ thuật đơn sóng mang

Các kỹ thuật trải phổ được sử dụng trong các hệ thống thông tin di động thế hệ ba có khả năng chống lại pha đỉnh và nhiễu [2], song tồn tại những yêu cầu không thực hiện được chẳng hạn: nếu người dùng cần có tốc độ 20 Mbps ở giao diện vô tuyến và hệ số trải phổ là 128 (giá trị điển hình hiện nay), dẫn đến phải xử lý tốc độ 2,56 Gbps theo thời gian thực vì thế cần có độ rộng băng tần lớn không thực tế. Mặt khác, thấy rõ

✓ *Do tài nguyên phổ tần hạn hẹp, vì vậy cần phải sử dụng hiệu quả.*

- ✓ Do những khó khăn liên quan đến hiệu ứng gần xa và có sự tiêu thụ công suất lớn.

Ngoài ra, khả năng đối phó ảnh hưởng của fading và truyền sóng đa đường là kém đặc biệt trong trường hợp tốc độ bit rất cao. Ở các phương pháp điều chế truyền thống M-QAM, M-PSK..., khi tốc độ dữ liệu truyền cao thì kéo theo độ rộng ký hiệu sẽ giảm, đến một giá trị mà độ rộng ký hiệu < trải trễ cực đại của kênh, khi đó kênh sẽ là kênh lựa chọn tần số và gây ISI cho tín hiệu thu. Đây là một nhược điểm chính khiến các hệ thống sử dụng các phương pháp điều chế truyền thống không thể truyền dữ liệu tốc độ cao, hoặc giá thành rất cao đối với những dịch vụ yêu cầu tốc độ dữ liệu cao.

❖ Kỹ thuật OFDM

OFDM là một công nghệ cho phép tăng độ rộng ký hiệu truyền dẫn do đó dung sai đa đường lớn hơn rất nhiều so với các kỹ thuật đã sử dụng trước đây, cho phép khắc phục những nhược điểm căn bản của kỹ thuật đơn sóng mang.

3.1.2. Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao OFDM

Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao (OFDM) là một kỹ thuật điều chế có thể thay thế cho CDMA. OFDM có ưu điểm vượt trội so với những hệ thống CDMA và cung cấp phương pháp truy cập không dây cho hệ thống 4G.

Ý tưởng của OFDM là chia toàn bộ băng tần truyền dẫn thành nhiều sóng mang con trực giao nhau để truyền các tín hiệu trong các sóng mang con này song song. Theo đó, luồng dữ liệu tốc độ cao được chia thành nhiều luồng tốc độ thấp hơn làm cho chu kỳ ký hiệu tăng theo số sóng mang con.

❖ Ưu điểm

- ✓ OFDM là giải pháp phân tập tần số vì OFDM chia nhỏ băng tần kênh và tiến hành truyền dữ liệu độc lập trên các băng tần kênh con này.
- ✓ OFDM đạt hiệu quả sử dụng phổ tần cao, do sự chồng phổ tần giữa các băng con nhưng vẫn phân tách các kênh con nhờ tính trực giao của các thành phần sóng mang con.
- ✓ OFDM là ứng cử viên hứa hẹn cho truyền dẫn tốc độ cao trong môi trường di động. Sở dĩ OFDM làm được như vậy bởi vì, chu kỳ ký hiệu tăng cho dẫn đến khả năng đối phó trải trễ kênh vô tuyến (khắc phục ISI) và hiệu quả sử dụng phổ tần cao của công nghệ OFDM.
- ✓ OFDM cho phép giảm được ảnh hưởng của trễ đa đường và chuyển kênh pha đỉnh chọn lọc tần số thành kênh pha phẳng. Vì vậy, OFDM là giải pháp đối với tính chọn lọc tần số của kênh pha đỉnh. Ưu điểm cho phép cân bằng kênh dễ dàng.
- ✓ Do tính phân tập tần số, dẫn đến làm ngẫu nhiên hoá lỗi cụm (do pha đỉnh Rayleigh gây ra). Ưu điểm này rất có lợi khi kết hợp với mã hóa kênh (mã xoắn và mã Turbo).
- ✓ Tính khả thi của OFDM cao do ứng dụng triệt để công nghệ xử lý tín hiệu số và công nghệ vi mạch VLSI.

❖ **Nhược điểm**

- ✓ OFDM nhạy cảm với dịch Doppler cũng như lệch tần giữa các bộ dao động nội phát và thu. Tính trực giao của các sóng mang con rất nhạy cảm với kênh truyền có dịch Doppler lớn.
- ✓ Vấn đề đồng bộ thời gian. Tại máy thu khó quyết định thời điểm bắt đầu của ký hiệu FFT.

Ghép kênh theo tần số trực giao OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) là một phương pháp điều chế cho phép giảm thiểu méo tuyến tính do tính phân tán của kênh truyền dẫn vô tuyến gây ra. Nguyên lý của OFDM là phân chia toàn bộ băng thông cần truyền vào nhiều sóng mang con và truyền đồng thời trên các sóng mang này. Theo đó, luồng số tốc độ cao được chia thành nhiều luồng tốc độ thấp hơn. Vì thế có thể giảm ảnh hưởng của trễ đa đường và chuyển đổi kênh pha đỉnh chọn lọc thành kênh pha đỉnh phẳng. Như vậy OFDM là một giải pháp cho tính chọn lọc của các kênh pha đỉnh trong miền tần số. Việc chia tổng băng thông thành nhiều băng con với các sóng mang con dẫn đến giảm độ rộng băng con trong miền tần số đồng nghĩa với tăng độ dài ký hiệu. Số sóng mang con càng lớn thì độ dài ký hiệu càng lớn. Điều này có nghĩa là độ dài ký hiệu lớn hơn so với thời gian trải rộng trễ của kênh pha đỉnh phân tán theo thời gian, hay độ rộng băng tần tín hiệu nhỏ hơn độ rộng băng tần nhất quán của kênh.

Để được tường minh về các vấn đề trên phần trước hết, trình bày nguyên lý hoạt động của một hệ thống điều chế OFDM. Sau đó xét các thông số hiệu năng của nó. Cuối cùng xét ảnh hưởng của các thông số kênh truyền sóng lên dung lượng cũng như chất lượng truyền dẫn của hệ thống OFDM.

3.2. Nguyên lý hoạt động của OFDM

3.2.1. Tính trực giao của OFDM

❖ **Ý tưởng**

Ý tưởng OFDM là truyền dẫn song song (đồng thời) nhiều băng con chồng lấn nhau trên cùng một độ rộng băng tần cấp phát của hệ thống. Việc xếp chồng lấn các băng tần con trên toàn bộ băng tần được cấp phát dẫn đến không những đạt được hiệu quả sử dụng phổ tần cao mà còn có tác dụng phân tán lỗi cụm khi truyền qua kênh, nhờ tính phân tán lỗi mà khi được kết hợp với các kỹ thuật mã hoá kênh kiểm soát lỗi hiệu năng hệ thống được cải thiện đáng kể. So với hệ thống ghép kênh phân chia theo tần số FDM truyền thống thì, ở FDM cũng truyền theo cơ chế song song nhưng các băng con không những không được phép chồng lấn nhau mà còn phải dành khoảng băng tần bảo vệ (để giảm thiểu độ phức tạp bộ lọc thu) dẫn đến hiệu quả sử dụng phổ tần kém.

Vậy làm thế nào tách các băng con từ băng tổng chồng lấn hay nói cách khác sau khi được tách ra chúng không giao thoa với nhau trong các miền tần số (ICI) và giao thoa nhau trong miền thời gian (ISI). Câu trả lời và cũng là vấn đề mấu chốt của truyền dẫn OFDM là nhờ tính trực giao của các sóng mang con. Vì vậy ta kết luận rằng nhờ đảm bảo được tính trực giao của các sóng mang con cho phép truyền dẫn đồng thời nhiều băng tần con chồng lấn nhưng phía thu vẫn tách chúng ra được, đặc biệt là tính khả thi và kinh tế cao do sử dụng xử lý tín hiệu số và tận dụng tối đa ưu việt của VLSI.

Theo đó trước hết ta định nghĩa tính trực giao, sau đó ta áp dụng tính trực giao này vào hệ thống truyền dẫn OFDM hay nói cách khác sử dụng tính trực giao vào quá trình tạo và thu tín hiệu OFDM cũng như các điều kiện cần thiết để đảm bảo tính trực giao.

❖ Định nghĩa

Nếu ký hiệu các sóng mang con được dùng trong hệ thống OFDM là $s_i(t)$ & $s_j(t)$. Để đảm bảo tính trực giao cho OFDM, các hàm sin của sóng mang con phải thỏa mãn điều kiện sau

$$\frac{1}{T} \int_{t_s}^{t_s+T} s_i(t) \cdot s_j^*(t) dt = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (3.1)$$

Trong đó:

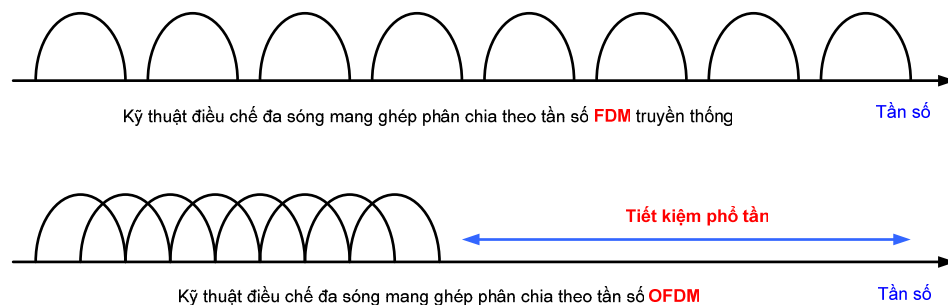
$$s_k(t) = \begin{cases} e^{(j2\pi k \Delta f t)}, & k = 1, 2, \dots, N \\ 0, & k \text{ khác} \end{cases} \quad (3.2)$$

$\Delta f = 1/T$ là khoảng cách tần số giữa hai sóng mang con, T là thời gian ký hiệu, N là số các sóng mang con và $N \cdot \Delta f$ là băng thông truyền dẫn và t_s là dịch thời gian.

❖ Minh họa

OFDM đạt tính trực giao trong miền tần số bằng cách phân phối mỗi tín hiệu thông tin riêng biệt vào các sóng mang con khác nhau. Các tín hiệu OFDM được tạo ra từ tổng của các hàm sin tương ứng với mỗi sóng mang. Tần số băng tần cơ sở của mỗi sóng mang con được chọn là một số nguyên lần tốc độ ký hiệu, kết quả là toàn bộ các sóng mang con sẽ có tần số là số nguyên lần của tốc độ ký hiệu. Do đó các sóng mang con trực giao nhau.

Hình 3.0 minh họa hiệu quả sử dụng phổ tần và tính trực giao của OFDM so với FDM.



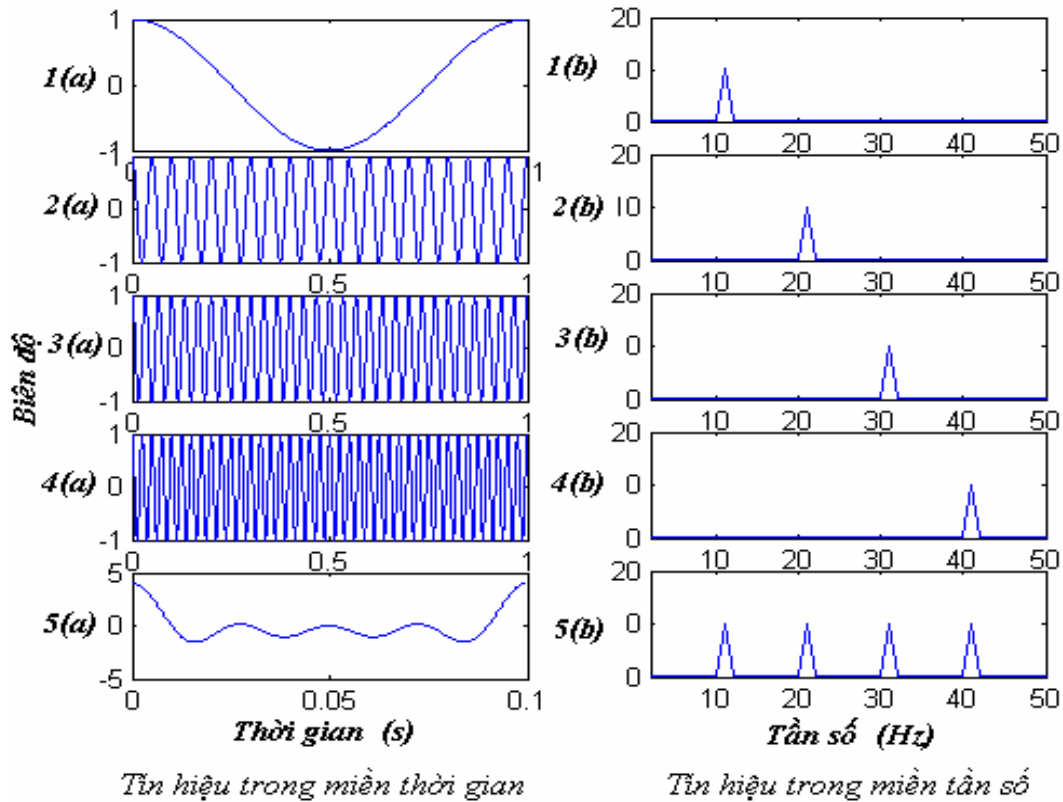
Hình 3.0. Hiệu quả sử dụng phổ tần giữa OFDM và FDM

Kiến trúc của một tín hiệu OFDM với 4 sóng mang con được cho ở Hình 3.1. Trong đó, (3.1.1a), (3.1.2a), (3.1.3a) và (3.1.4a) là các sóng mang con riêng lẻ có tần số tương ứng 10, 20, 30, và 40 Hz. Pha ban đầu của toàn bộ các sóng mang con này là 0. (3.1.5a) và (3.1.5b) là tín hiệu OFDM tổng hợp của 4 sóng mang con trong miền thời gian và miền tần số.

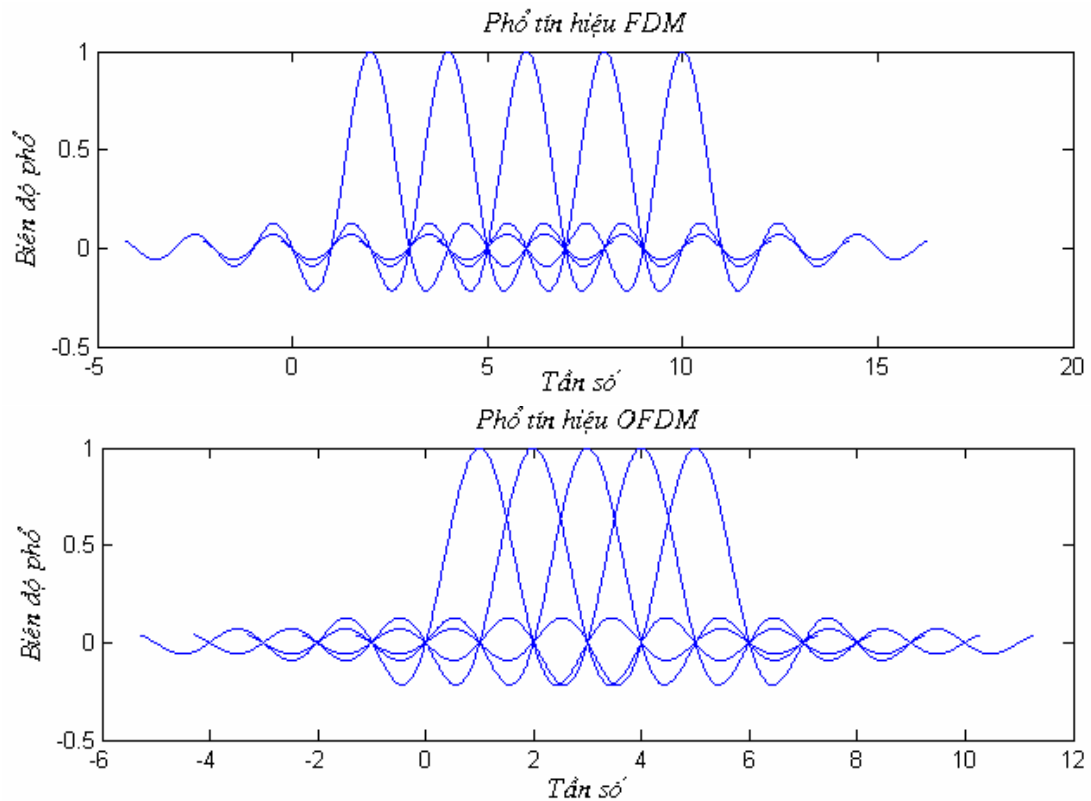
Tính trực giao trong miền tần số của tín hiệu OFDM được thể hiện một cách tường minh ở hình 3.2. Thấy rõ, trong miền tần số mỗi sóng mang con của OFDM có một đáp ứng

tần số dạng sinc. Tính trực giao được thể hiện là đỉnh của mỗi sóng mang con tương ứng với giá trị 0 của toàn bộ các sóng mang con khác. Hình 3.2 cho thấy với cùng độ rộng băng tần cấp phát cho hệ thống thì hiệu quả sử dụng phổ tần của OFDM tốt hơn so với cơ chế FDM truyền thống.

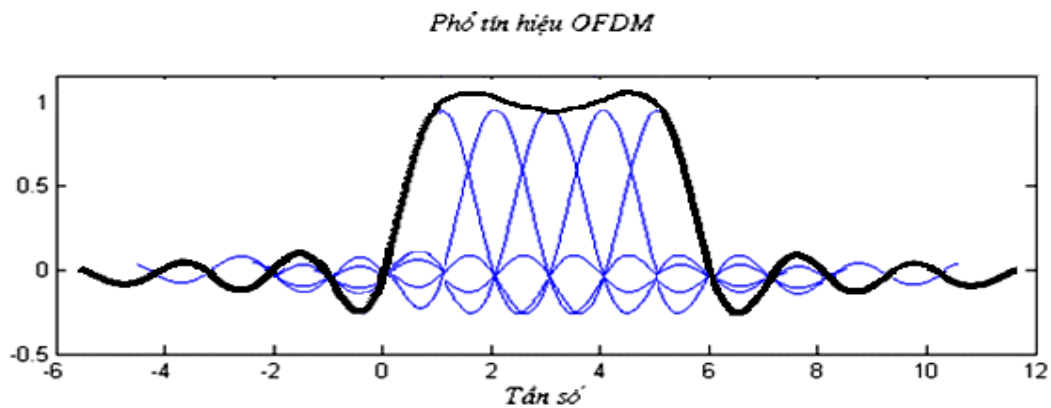
Đáp ứng tổng hợp 5 sóng mang con của một tín hiệu OFDM được minh họa ở đường màu đen đậm trên hình 3.3.



Hình 3.1 Tín hiệu OFDM trong miền thời gian và tần số



Hình 3.2 Phổ của tín hiệu OFDM bằng tần cơ sở 5 sóng mang, hiệu quả phổ tần của OFDM so với FDM



Hình 3.3 Phổ tổng hợp của tín hiệu OFDM trong băng tần cơ sở chứa 5 sóng mang con

3.2.2. Mô hình hệ thống truyền dẫn OFDM

3.2.2.1. Mô tả toán học tín hiệu OFDM

Tín hiệu OFDM phát trong băng tần cơ sở được xác định như sau:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_k(t - kT), \quad (3.3)$$

Trong đó $s_k(t - kT)$ là tín hiệu OFDM phát phức băng gốc thứ k được xác định như sau:

$$s_k(t - kt) = \begin{cases} w(t - kT) \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} x_{i,k} \exp \left[j2\pi \left(\frac{i}{T_{\text{FFT}}} \right) (t - kT) \right] & kT - T_{\text{win}} - T_G \leq t \leq kT + T_{\text{FFT}} + T_{\text{win}} \\ 0, & \text{Nếu khác} \end{cases} \quad (3.4)$$

Trong đó:

T	là độ dài ký hiệu OFDM
T_{FFT}	là thời gian FFT, phần hiệu dụng của ký hiệu OFDM
T_G	là thời gian bảo vệ, thời gian của tiền tố chu trình
T_{win}	là thời gian mở cửa tiền tố và hậu tố để tạo dạng phổ
$\Delta f = 1/T_{\text{FFT}}$	là phân cách tần số giữa hai sóng mang
N	là độ dài FFT, số điểm FFT
k	là chỉ số về ký hiệu được truyền
i	là chỉ số về sóng mang con, $i \in \{-N/2, -N/2+1, -1, 0, +1, \dots, N/2\}$.
$x_{i,k}$	là vector điểm chùm tín hiệu, là ký hiệu phức (số liệu, hoa tiêu, rỗng) được điều chế lên sóng mang con i của ký hiệu OFDM thứ k .

xung định dạng $w(t)$ được biểu diễn như sau:

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} [1 - \cos \pi(t + T_G)/T_{\text{win}}] & -T_{\text{win}} - T_G \leq t \leq -T_G \\ 1, & -T_G \leq t \leq T_{\text{FFT}} \\ \frac{1}{2} [1 - \cos \pi(t - T_{\text{FFT}})/T_{\text{win}}] & T_{\text{FFT}} \leq t \leq T_{\text{FFT}} + T_{\text{win}} \end{cases} \quad (3.5)$$

Phân tích (3.4) cho thấy, biểu thức này giống như biểu thức của chuỗi Fourier sau:

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(nf_0) e^{j2\pi n f_0 t} \quad (3.6)$$

trong đó các hệ số Fourier phức thể hiện các vector của chùm tín hiệu phức còn nf_0 thể hiện các sóng mang con i/T_{FFT} . Trong hệ thống số, dạng sóng này được tạo ra bằng phép biến đổi IFFT. Chùm số liệu $x_{i,k}$ là đầu vào IFFT và ký hiệu OFDM miền thời gian là đầu ra.

Tín hiệu đầu ra của bộ điều chế RF được xác định như sau:

$$s_{\text{RF}}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_{\text{RF},k}(t - kT) \quad (3.7)$$

trong đó $s_{RF,k}(t-kT)$ là tín hiệu OFDM RF thứ k được biểu diễn như sau:

$$s_{RF,k}(t-kT) = \begin{cases} \operatorname{Re} \left\{ w(t-kT) \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} x_{i,k} \exp \left[j2\pi \left(f_c + \frac{1}{T_{FFT}} \right) (t-kT) \right] \right\}, & kT - T_{win} - T_G \leq t \leq kT + T_{FFT} + T_{win} \\ 0, & \text{Nếu khác} \end{cases} \quad (3.8)$$

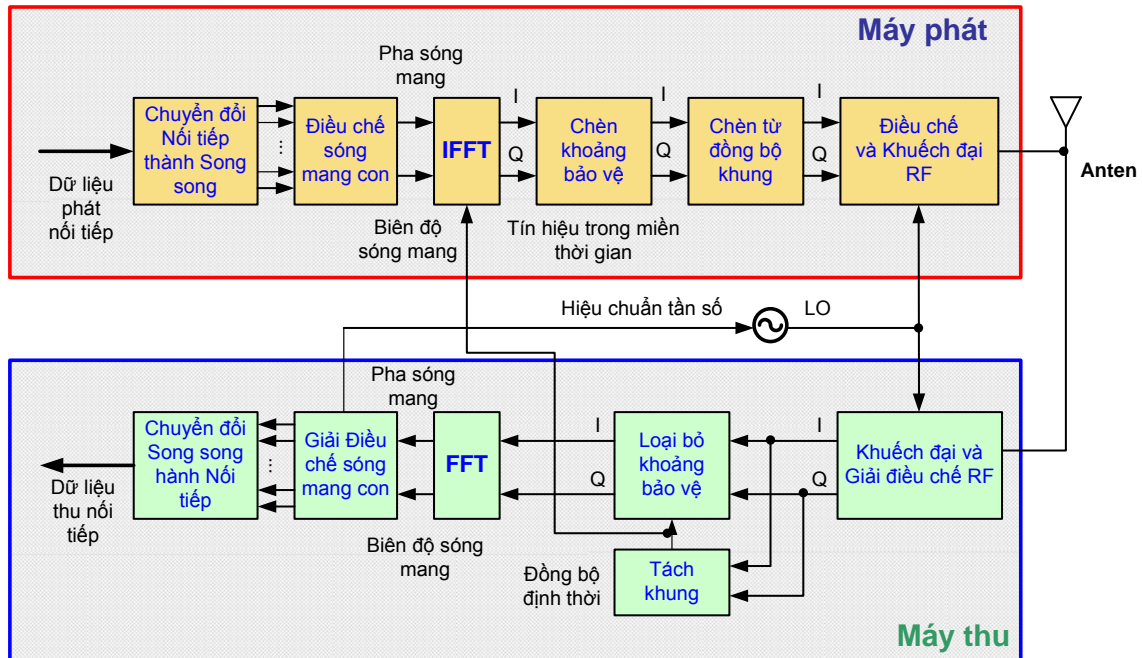
Trong đó f_c là tần số sóng mang RF.

3.2.2.2. Sơ đồ hệ thống truyền dẫn OFDM

Sơ đồ khối phát thu tín hiệu OFDM điển hình được cho ở hình 3.4. Dưới đây trình bày vắn tắt chức năng các khối.

Máy phát: Chuyển luồng dữ liệu số phát thành pha và biên độ sóng mang con. Các sóng mang con được lấy mẫu trong miền tần số, phổ của chúng là các điểm rời rạc. Sau đó sử dụng biến đổi IFFT chuyển phổ của các sóng mang con mang dữ liệu vào miền thời gian. Tín hiệu OFDM trong miền thời gian được trộn nâng tần lên tần số truyền dẫn vô tuyến RF.

Máy thu: Hoạt động ngược với phía phát. Theo đó trước hết, trộn hạ tần tín hiệu RF thành tín hiệu băng tần cơ sở, sau đó dùng FFT để phân tích tín hiệu vào miền tần số. Cuối cùng thông tin ở dạng biên độ và pha của các sóng mang con được giải điều chế thành các luồng số và chuyển trở lại thành dữ liệu số ban đầu.



Hình 3.4 Sơ đồ khối hệ thống truyền dẫn OFDM cơ bản

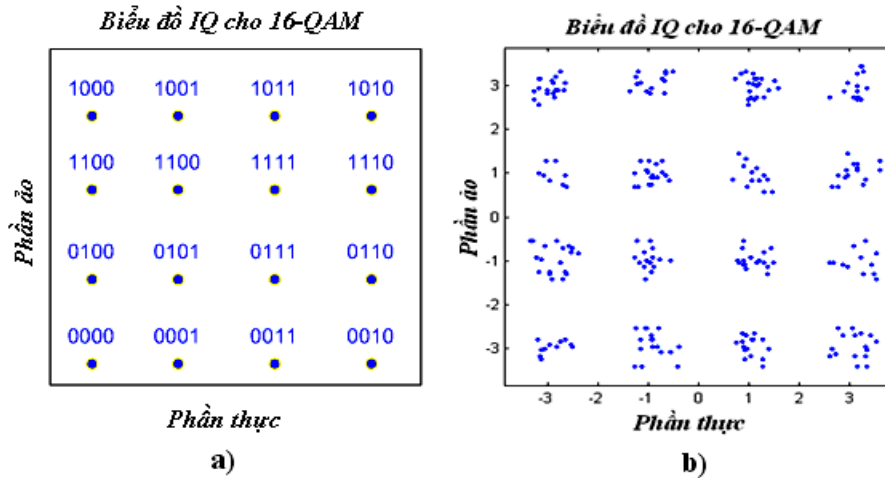
❖ Tầng chuyển đổi nối tiếp sang song song

Tầng này chuyển luồng bit đầu vào thành dữ liệu phát trong mỗi ký hiệu OFDM, thường mỗi ký hiệu phát gồm 40-4000 bit. Việc phân bổ dữ liệu phát vào mỗi ký hiệu phụ thuộc vào phương pháp điều chế được dùng và số lượng sóng mang con. Chẳng hạn, với 16-QAM thì mỗi sóng mang con mang 4 bit dữ liệu, nếu hệ thống truyền dẫn sử dụng 100 sóng mang con thì số lượng bit trên mỗi ký hiệu sẽ là 400. Tại phía thu chuyển ngược về luồng dữ liệu nối tiếp ban đầu. Tổng quát, các sóng mang con tải $\log_2 M$ bit, M là mức điều chế tương ứng với sóng mang con đó.

Do tính chất chọn lọc tần số của kênh pha định (pha định chọn lọc tần số) tác động lên một nhóm các sóng mang con làm chúng suy giảm nhanh chóng. Tại điểm đáp ứng kênh xấp xỉ '0', thông tin gửi trên sóng mang con gần điểm này sẽ bị tổn thất, hậu quả là gây cụm lỗi bit trong mỗi ký hiệu. Ta biết rằng, cơ chế FEC có hiệu quả cao khi các lỗi được phân tán (không tập chung hay cụm lỗi), vì vậy để cải thiện hiệu năng, đa phần hệ thống dùng ngẫu nhiên hoá như là một phần của chuyển đổi nối tiếp thành song song. Vấn đề này được thực hiện bằng cách ngẫu nhiên hoá việc phân bổ sóng mang con của mỗi một bit dữ liệu nối tiếp. Ngẫu nhiên hoá làm phân tán các cụm bit lỗi trong ký hiệu OFDM do đó sẽ tăng hiệu năng sửa lỗi của FEC.

❖ Tầng điều chế sóng mang con

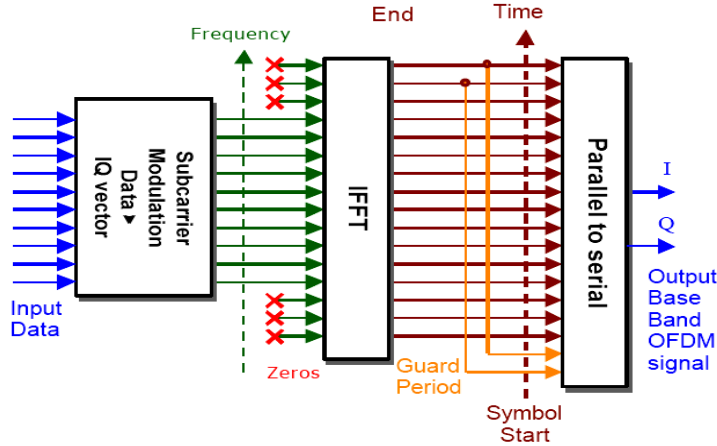
Tầng điều chế sóng mang con thực hiện phân bổ các bit dữ liệu người dùng lên các sóng mang con, bằng cách sử dụng một sơ đồ điều chế M-QAM. Với 16-QAM được cho ở hình 3.5, trong đó mỗi ký hiệu 16-QAM chứa 4 bit dữ liệu, mỗi tổ hợp 4 bit dữ liệu tương ứng với một vector IQ duy nhất.



Hình 3.5. Tín hiệu 16-QAM phát sử dụng mã hoá Gray, và tín hiệu 16-QAM truyền qua kênh AWGN, SNR = 18 dB, [sim_generate_qam.m]

Ảnh hưởng của tạp âm cộng lên tín hiệu 16-QAM phát (kênh AWGN) được cho ở hình 3.5 (b) với SNR thu = 18 dB.

❖ Tầng chuyển đổi từ miền tần số sang miền thời gian IFFT

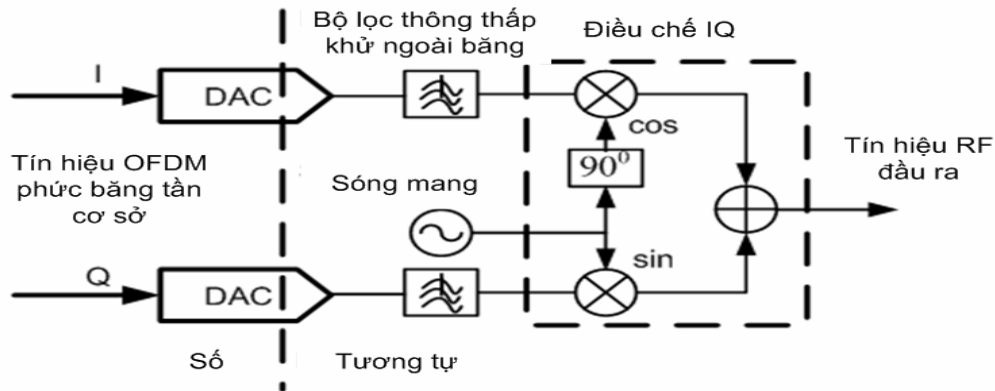


Hình 3.6. Tầng IFFT, tạo tín hiệu OFDM

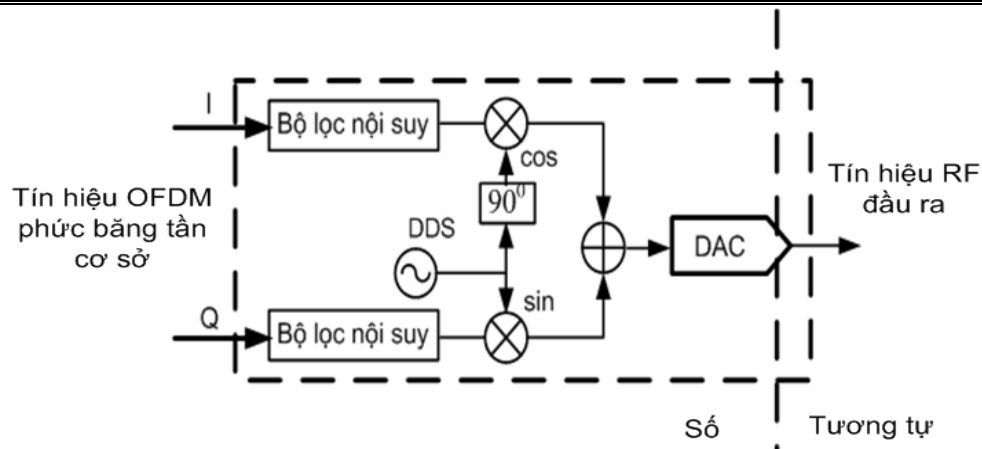
Sau tầng điều chế sóng mang con, tín hiệu OFDM có dạng là các mẫu tần số. Phép biến đổi IFFT chuyển tín hiệu OFDM trong miền tần số sang miền thời gian. Tương ứng với mỗi mẫu của tín hiệu OFDM trong miền thời gian (mỗi đầu ra của IFFT) chứa tất cả các mẫu trong miền tần số (đầu vào của IFFT). Hầu hết các sóng mang con đều mang dữ liệu. Các sóng mang con vùng ngoài không mang dữ liệu được đặt bằng 0.

❖ Tầng điều chế RF

Đầu ra của bộ điều chế OFDM là một tín hiệu *băng tần cơ sở*, tín hiệu này được trộn nâng tần lên tần số truyền dẫn vô tuyến RF. Có thể sử dụng một trong hai hai kỹ thuật điều chế sóng mang cao tần là: "tương tự" được cho ở hình 3.7 và "số" được cho ở hình 3.8. Tuy nhiên hiệu năng của điều chế số sẽ tốt hơn, do đồng bộ pha chính xác cho nên sẽ cải thiện quá trình ghép các kênh I và Q.

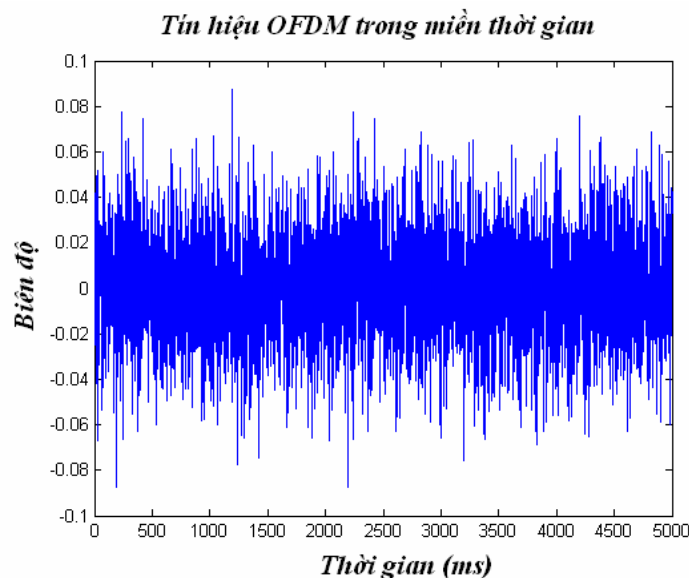


Hình 3.7 Điều chế cao tần tín hiệu OFDM băng tần cơ sở phức sử dụng kỹ thuật tương tự



Hình 3.8 Điều chế cao tần tín hiệu OFDM bằng tần cơ sở phức sử dụng kỹ thuật số

Hình 3.9 mô tả dạng sóng trong miền thời gian của một tín hiệu OFDM. Số lượng sóng mang = 500, kích thước FFT = 2000, khoảng thời gian bảo vệ = 500. Sóng mang điều chế cao tần có tần số $f_c = 10$ GHz.



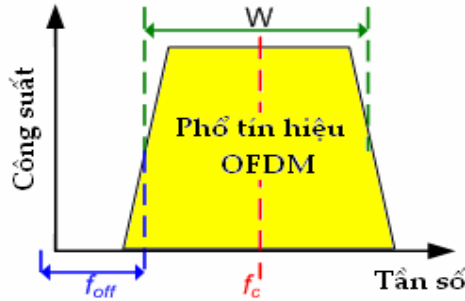
Hình 3.9. Dạng sóng tín hiệu OFDM trong miền thời gian

Hầu hết các ứng dụng vô tuyến, thì tín hiệu OFDM được tạo ra tại băng tần cơ sở sử dụng các mẫu phức, sau đó chuyển phổ tín hiệu băng tần cơ sở lên phổ RF bằng cách dùng một bộ điều chế IQ, như được cho ở hình 3.7 và hình 3.8. Bộ điều chế IQ sẽ dịch phổ tần tín hiệu OFDM từ băng tần cơ sở phức lên vùng tần số vô tuyến RF, và chuyển từ tín hiệu phức sang tín hiệu thực (lấy phần thực). Tín hiệu RF phát luôn là tín hiệu thực và nó chỉ biến đổi giá trị cường độ trường.

Một tín hiệu thực sẽ tương đương với một tín hiệu băng tần cơ sở phức có tần số trung tâm là 0 Hz trộn với tần số sóng mang ở bộ điều chế IQ.

$$f_c = \frac{W}{2} + f_{\text{off}} \quad (3.9)$$

Trong đó f_c là tần số sóng mang để dịch tín hiệu OFDM từ băng tần cơ sở phức lên tín hiệu OFDM cao tần thực, W là độ rộng băng tần tín hiệu và f_{off} là tần số dịch từ DC, xem hình 3.10. Trong các ứng dụng hữu tuyến như ADSL, hầu hết các sóng mang con đều có tổng độ dịch DC thấp hơn độ rộng băng tần tín hiệu. Điều này có ý nghĩa rằng có thể trực tiếp tạo tín hiệu thực bằng cách sử dụng tầng IFFT thay vì phải dùng bộ điều chế IQ để chuyển dịch tần số.

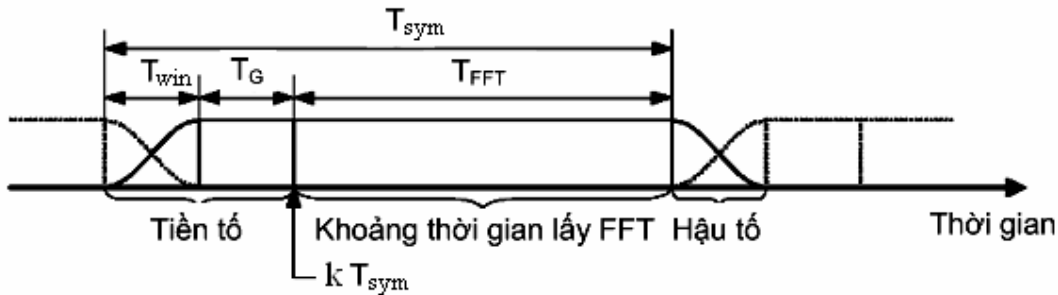


Hình 3.10 Tín hiệu OFDM dịch DC, W là băng tần tín hiệu, f_{off} tần số dịch từ DC, f_c là tần số trung tâm (sóng mang)

Để tạo ra một tín hiệu OFDM thực chỉ cần một nửa các sóng mang con sử dụng cho điều chế dữ liệu, mặt khác nửa gồm các lát tần số cao của IFFT sẽ có giá trị biên độ là liên hợp phức của nửa còn lại gồm các lát có tần số thấp hơn.

3.2.3. Các thông số đặc trưng và dung lượng hệ thống truyền dẫn OFDM

3.2.3.1. Cấu trúc tín hiệu OFDM



Hình 3.11 Cấu trúc tín hiệu OFDM

Hình 3.11 cho thấy cấu trúc của ký hiệu OFDM trong miền thời gian. T_{FFT} là thời gian thực hiện IFFT & FFT (phần hiệu dụng của ký hiệu OFDM), T_G là thời gian bảo vệ. Cũng thấy các thông số khác, T_{win} là thời gian cửa sổ. Thấy rõ quan hệ giữa các thông số là.

$$T_{\text{sym}} = T_{\text{FFT}} + T_G + T_{\text{win}} \quad (3.10)$$

Cửa sổ được đưa vào nhằm làm mịn biên độ chuyển về không tại các ranh giới ký hiệu, và để giảm tính nhạy cảm của dịch tần số. Loại cửa sổ được dùng phổ biến là loại cửa sổ cosine tăng được định nghĩa bởi.

$$w(t) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos\left(\pi + \frac{t\pi}{\beta T_{\text{sym}}}\right), & 0 \leq t \leq \beta T_{\text{sym}} \\ 1, & \beta T_{\text{sym}} \leq t \leq T_{\text{sym}} \\ 0.5 + 0.5 \cos\left((t - T_{\text{sym}})\frac{\pi}{\beta T_{\text{sym}}}\right), & T_{\text{sym}} \leq t \leq 1 + \beta T_{\text{sym}} \end{cases} \quad (3.11)$$

trong đó β là hệ số dốc của cosin tăng và khoảng thời gian ký hiệu T_{sym} , nó ngắn hơn toàn bộ khoảng thời gian của một ký hiệu vì ta cho phép các ký hiệu lân cận chồng lấn một phần trong vùng dốc (roll-off region).

Một ký hiệu OFDM bắt đầu tại thời điểm $t = t_k = kT_{\text{sym}}$ (bắt đầu của ký hiệu thứ k) được định nghĩa bởi các phương trình (3.12).

$$s_k(t) = \begin{cases} \text{Re}\left\{w(t-t_k) \sum_{i=-\frac{N_{\text{sub}}}{2}}^{\frac{N_{\text{sub}}}{2}-1} d_{i+N_{\text{sub}}\frac{k+1}{2}} e^{j2\pi\left(f_c - \frac{i-0.5}{T_{\text{sym}}}\right)(t-t_k-T_{\text{prefix}})}\right\}, & t_k \leq t \leq [t_k + T_{\text{sym}}(1+\beta)] \\ 0, & t < t_k \wedge t > [t_k + T_{\text{sym}}(1+\beta)] \end{cases} \quad (3.12)$$

trong đó $T_{\text{prefix}} = T_{\text{win}} + T_G$ được thấy trong hình 3.11.

3.2.3.2. Các thông số trong miền thời gian TD

Từ hình 3.11 có thể tách các thông số OFDM trong miền thời gian: chu kỳ ký hiệu T_{sym} , thời gian truyền hiệu quả hay thời gian FFT T_{FFT} , thời gian bảo vệ T_G , thời gian cửa sổ T_{win} . Trong mô phỏng chỉ thực hiện đối với T_{FFT} và chu kỳ ký hiệu chiếm đa phần thời gian. Nếu không tính đến thời gian cửa sổ, thì công thức (3.10) trở thành:

$$T_{\text{sym}} = T_{\text{FFT}} + T_G \quad (3.13)$$

Ngoài ra, xác định một thông số mới FSR (tỉ số giữa thời gian FFT và thời gian ký hiệu) được định nghĩa bởi.

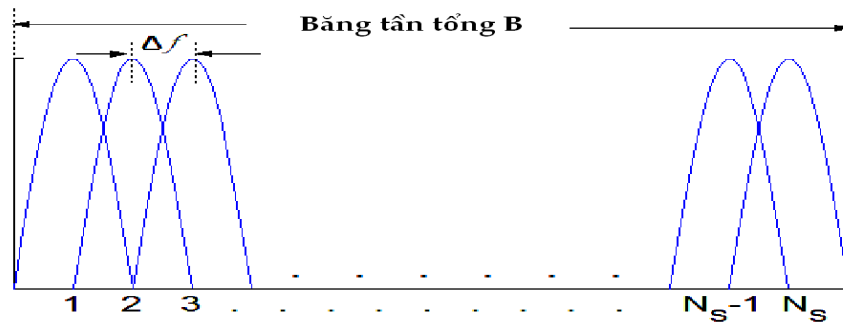
$$\text{FSR} = \frac{T_{\text{FFT}}}{T_{\text{sym}}} \quad (3.14)$$

Thông số này đánh giá hiệu quả tài nguyên được dùng trong miền thời gian và có thể được dùng để tính toán thông lượng (throughput).

3.2.3.3 Các thông số trong miền tần số FD

Hình 3.12 trình bày sắp xếp OFDM trong miền tần số. Có ba thông số chính (được cho trong bảng 3.1): toàn bộ độ rộng băng tần cho tất cả các sóng mang con B, độ rộng băng tần sóng mang con Δf , và số sóng mang con N_{sub} . Quan hệ giữa chúng là

$$B = N_{\text{sub}} \times \Delta f \quad (3.15)$$



Hình 3.12 Độ rộng băng tần hệ thống và độ rộng băng tần sóng mang con

Thực tế, độ rộng băng tần tổng khả dụng B là hạn chế trước khi thiết kế hệ thống. Vì vậy, đối với người thiết kế, các thông số OFDM trong miền tần số có thể được xác định là độ rộng băng tần sóng mang con Δf và số sóng mang con N_{sub} . Do độ rộng băng tần sóng mang con và số sóng mang con phụ thuộc nhau theo (3.15), nên chỉ cần gán giá trị cho một thông số là đủ. Nhưng cả hai đều được kiểm tra bằng cách dùng tiêu chuẩn chứa chúng. Nói cách khác, có hạn chế về độ rộng băng tần sóng mang con cũng như số sóng mang con. Tất cả nên được kiểm tra để thiết kế độ rộng băng tần sóng mang con và đối với số sóng mang con. Tuy nhiên do tính chọn lọc tần số của kênh, việc chọn số sóng mang con và cũng như độ rộng băng tần tổng phụ thuộc vào các tham số kênh thực tế.

3.2.3.4. Quan hệ giữa các thông số trong miền thời gian và miền tần số.

Thông số miền thời gian T_{FFT} và thông số miền tần số Δf có quan hệ với nhau (chúng là tỉ lệ nghịch của nhau). Vì vậy, chỉ cần thiết lập giá trị cho một thông số là đủ để thiết kế hệ thống. Từ bảng 3.1 cho thấy khi cho trước độ rộng băng tần tổng, cần phải gán các giá trị cho độ rộng băng tần sóng mang con (hoặc số sóng mang con) và thời gian bảo vệ cho một hệ thống OFDM. Theo đó, có thể tìm được các thông số khác, nghĩa là số sóng mang con (hay độ rộng băng tần sóng mang con), chu kỳ ký hiệu và FSR.

Bảng 3.1. Mối quan hệ giữa các tham số OFDM

Miền khảo sát	Tham số khảo sát	Mối quan hệ	Tham số dùng thiết kế
FD	$B, \Delta f, N_{\text{sub}}$	$B = N_{\text{sub}} \times \Delta f$	Δf hoặc N_{sub}
TD	$T_{\text{sym}}, T_{\text{FFT}}, \text{FSR}, T_G$	$T_{\text{sym}} = T_{\text{FFT}} + T_G$ $\text{FSR} = T_{\text{FFT}} / T_{\text{sym}}$ $T_{\text{FFT}} = \frac{1}{\Delta f}$	T_G

3.2.4. Dung lượng của hệ thống OFDM

Một trong các mục tiêu của điều chế thích ứng là cải thiện dung lượng. Vì thế trước hết cần nghiên cứu các thông số nào ảnh hưởng lên dung lượng. Trong phần này ta đề cập các thông số này và đưa ra công thức để xác định chúng.

Dung lượng kênh theo Shannon.

Dung lượng kênh phụ thuộc vào tỷ số tín hiệu trên tạp âm (SNR) và độ rộng băng thông của tín hiệu được xác định bằng công sau:

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \text{ [bps]}, \quad (3.16)$$

trong đó C là dung lượng kênh còn B là băng thông.

Để đạt được hiệu năng cao nhất, dùng phương pháp điều chế thích ứng, nội dung của phương pháp này là làm thay đổi các thông số của hệ thống theo trạng thái kênh sao cho đạt được dung lượng kênh tốt nhất nhưng vẫn đảm bảo chất lượng BER. Ví dụ M-QAM thích ứng là thay đổi số mức điều chế M theo trạng thái kênh sao cho đạt được dung lượng tốt nhất nhưng vẫn đảm bảo được chất lượng truyền dẫn BER. Với OFDM thích ứng, cần biết cách tính toán dung lượng kênh theo các thông số điều chế phù hợp với tình trạng kênh ở thời điểm xét. Dưới đây ta sẽ xét công thức để tính toán dung lượng kênh này.

Dung lượng kênh cho các hệ thống OFDM.

Thấy rõ, mức điều chế và tỷ lệ mã ảnh hưởng lên dung lượng. Trong các hệ thống OFDM, do truyền dẫn song song và thời gian mở rộng định kỳ nên có nhiều thông số quyết định dung lượng hơn.

Bắt đầu bằng việc xét cho trường hợp đơn giản với giả thiết là cấu hình các sóng mang con giống nhau, nghĩa là tất cả các sóng mang con đều có chung một cấu hình (điều chế, mã hóa, băng thông, công suất...). Khi này tốc độ bit tổng của hệ thống OFDM bằng:

$$R_{\text{tb}} = \frac{(\text{số bit/sóng mang con/ký hiệu}) \times \text{số sóng mang con}}{\text{thời gian ký hiệu}} \text{ [bps]}, \quad (3.17)$$

Nếu gọi R_c là tỷ lệ mã, M là mức điều chế, N_{sub} là số sóng mang con, T_{sym} là thời gian ký hiệu, B là độ rộng băng tần của tín hiệu thông tin hay số liệu, T_{FFT} là thời gian FFT, khoảng cách sóng mang con là $\Delta f = 1/T_{\text{FFT}}$ và FSR là tỷ số thời gian FFT và thời gian ký hiệu OFDM, tốc độ bit tổng được xác định như sau:

$$\begin{aligned} R_{tb} &= \frac{(R_c \log_2(M)) \times N_{sub}}{T_{sym}} \\ &= \frac{(R_c \log_2(M)) \times (B/\Delta f)}{T_{sym}} \\ &= (R_c \log_2(M)) \times B \times \frac{T_{FFT}}{T_{sym}} \\ &= (R_c \log_2(M)) \times B \times FSR, \end{aligned} \quad (3.18)$$

Từ công thức (3.18) cho thấy, đối với một sóng mang con hay một nhóm các sóng mang con, bốn thông số sau đây sẽ quyết định tốc độ bit: **(1)** tỷ lệ mã, **(2)** mức điều chế, **(3)** độ rộng băng; **(4)** FSR. Trong hệ thống OFDM ta có thể thay đổi các thông số này để đạt được tốc độ bit tốt nhất nhưng vẫn đảm bảo QoS cho hoàn cảnh cụ thể của kênh tại thời điểm xét.

3.2.5. Các nhân tố ảnh hưởng của kênh pha đình lên hiệu năng hệ thống truyền dẫn OFDM và các giải pháp khắc phục

3.2.5.1. ISI và giải khắc phục

❖ Nguyên nhân và ảnh hưởng của ISI

- Nguyên nhân do tính chọn lọc của kênh pha đình trong miền thời gian, tính phụ thuộc thời gian của kênh pha đình, tính bất ổn định của kênh gây ra giao thoa giữa các ký hiệu ISI truyền qua nó.
- Hậu quả ISI: làm cho máy thu quyết định ký hiệu sai, khó khăn trong việc khôi phục định thời

❖ Giải pháp khắc phục ảnh hưởng của ISI

• Chèn khoảng thời gian bảo vệ

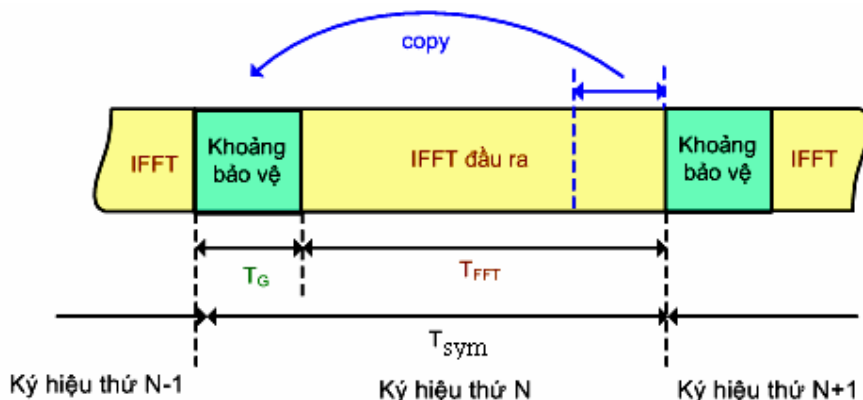
Nếu khoảng thời gian bảo vệ ký hiệu lớn hơn trải trễ cực đại của kênh pha đình thì khắc phục được ảnh hưởng của kênh

Thấy rõ, với cùng độ rộng băng tần hệ thống như nhau thì tốc độ ký hiệu OFDM thấp hơn nhiều so với sơ đồ truyền dẫn đơn sóng mang đồng nghĩa với thời gian của ký hiệu OFDM được tăng lên, vì vậy khả năng đối phó ISI (do kênh gây ra) tăng lên. Ngoài ra, để tăng dung sai đa đường, có thể mở rộng chiều dài ký hiệu OFDM, bằng cách thêm một khoảng thời gian bảo vệ vào phần đầu mỗi ký hiệu. Mặt khác, khoảng thời gian bảo vệ của tín hiệu OFDM cũng giúp chống lại lỗi dịch thời trong bộ thu.

Để tạo tính liên tục của tín hiệu OFDM khi thêm khoảng bảo vệ, thì khoảng bảo vệ trước mỗi ký hiệu OFDM được tạo ra theo cách copy phần cuối ký hiệu lên phần đầu của cùng ký hiệu. Sở dĩ có điều này bởi vì, trong phần dữ liệu của ký hiệu OFDM sẽ chứa toàn bộ chu kỳ của tất cả các sóng mang con, nên việc copy phần cuối ký hiệu lên phần đầu sẽ

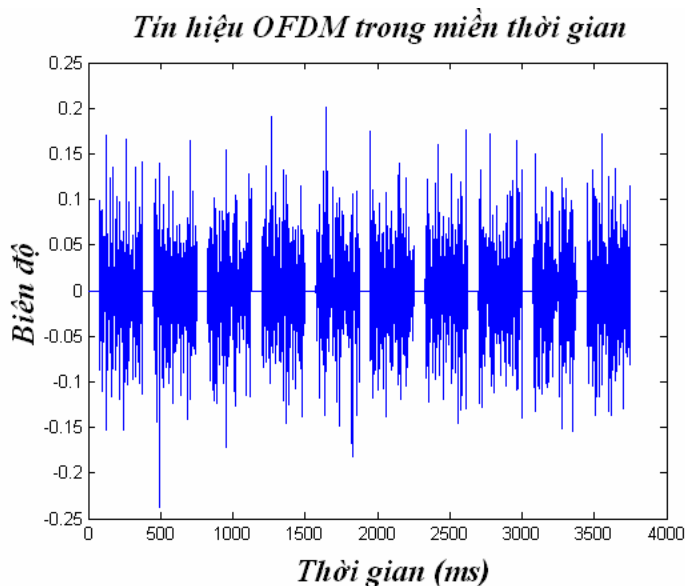
làm cho tín hiệu có tính liên tục mà không bị gián đoạn tại điểm nối. Hình 3.13 minh họa cách thêm khoảng bảo vệ.

Chiều dài tổng của ký hiệu là $T_{\text{sym}} = T_G + T_{\text{FFT}}$, trong đó T_{sym} là tổng chiều dài của ký hiệu, T_G là chiều dài của khoảng bảo vệ, và T_{FFT} là kích thước IFFT được sử dụng để tạo ra tín hiệu OFDM.



Hình 3.13. Chèn thời gian bảo vệ cho mỗi ký hiệu OFDM

Hình 3.14 là kết quả mô phỏng cấu trúc một tín hiệu OFDM trong miền thời gian, với kích thước FFT = 256, số lượng sóng mang = 100, độ dài khoảng bảo vệ = $T_{\text{FFT}}/4 = 64$. Đặc biệt là khoảng bảo vệ được thiết lập bằng các giá trị là '0'. Do đó dễ dàng thấy giữa các khối ký hiệu OFDM có sự phân tách nhau bởi một đoạn giá trị '0'.



Hình 3.14. Cấu trúc tín hiệu OFDM trong miền thời gian, [sim_ofdm_signal.m]

Hiệu quả sử dụng phổ tần cao của OFDM phụ thuộc hai khía cạnh chính: (1) do cơ chế truyền dẫn song song; (2) dùng thêm khoảng bảo vệ đã làm giảm đáng kể tốc độ ký hiệu OFDM. Điều này có ý nghĩa đặc biệt quan trọng khi truyền dẫn tín hiệu OFDM qua kênh vô tuyến và là một nhân tố chính để chống lại kênh pha đình lựa chọn tần số.

- **Tính hữu hiệu của khoảng thời gian bảo vệ**

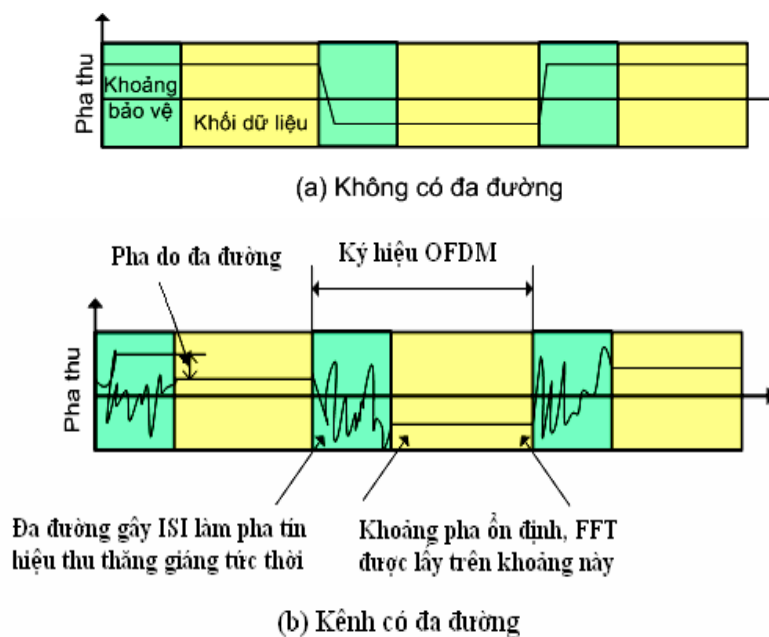
- ✓ **Chống lại lỗi dịch thời gian**

Lỗi dịch thời gian là lỗi do quyết định sai biên giới của ký hiệu thu, lỗi này làm tổn thất toàn bộ thông tin chứa trong ký hiệu bị quyết định sai biên giới.

Đối với một kênh lý tưởng không có trải trễ thì phía thu có thể xác định chính xác từng vị trí trong ký hiệu bao gồm luôn cả khoảng bảo vệ và vẫn lấy được số mẫu một cách chính xác mà không vượt quá đường biên ký hiệu. Trong môi trường đa đường thì ISI sẽ làm vị trí các ký hiệu bị xê dịch theo thời gian và chồng lấn lên nhau, làm phía thu quyết định sai biên giới ký hiệu. Tuy nhiên do ký hiệu OFDM có khoảng bảo vệ nên ISI chỉ làm giảm chiều dài của khoảng thời gian bảo vệ mà không ảnh hưởng đến phần dữ liệu cho nên sẽ hạn chế được lỗi dịch thời.

- ✓ **Đôi phó với ISI**

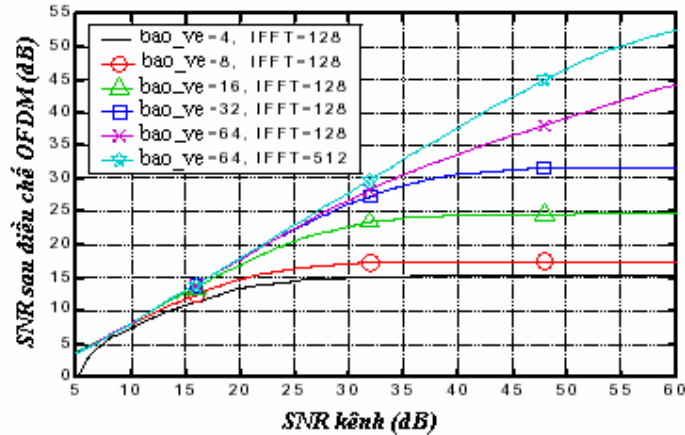
Việc thêm vào khoảng thời gian bảo vệ sẽ cho phép giảm thời gian biến động của tín hiệu. Để loại bỏ ảnh hưởng của ISI thì khoảng bảo vệ sẽ phải có độ dài lớn hơn trải trễ cực đại của kênh vô tuyến. Hình 3.15 mô tả ảnh hưởng của ISI lên ký hiệu thu trong môi trường đa đường, đồng thời cũng cho thấy hiệu quả của khoảng bảo vệ chống lại những tác động của môi trường đa đường này. Ví dụ này thể hiện pha tức thời của một sóng mang tại 3 ký hiệu.



Hình 3.15 Hiệu quả của khoảng bảo vệ chống lại ISI

Khoảng bảo vệ sẽ loại bỏ hầu hết ảnh hưởng của ISI. Tuy nhiên trong thực tế, các thành phần đa đường có xu hướng suy giảm chậm theo thời gian, hậu quả vẫn tồn tại một chút ISI thậm trí khi sử dụng khoảng thời gian bảo vệ dài. Hình 3.16 là kết quả mô phỏng thể hiện hiệu quả của khoảng bảo vệ chống lại ISI. Bảng tần kênh được giữ nguyên trong các lần mô phỏng. Mô phỏng thực hiện thay đổi giá trị chiều dài khoảng bảo vệ và kích thước FFT đối với tín hiệu OFDM, và so sánh SNR thu được ứng với mỗi lần thay đổi

hai thông số này. Kết quả cho thấy SNR tăng khi chiều dài khoảng bảo vệ cùng kích thước FFT tăng.



Hình 3.16 Hiệu quả của khoảng bảo vệ để loại bỏ ISI

3.2.5.2 Ảnh hưởng của ICI và giải pháp khắc phục

ICI là hiện tượng phổ biến trong các hệ thống đa sóng mang. Trong hệ thống OFDM, ICI còn được gọi là nhiễu giao thoa giữa các sóng mang con, là hiện tượng năng lượng phổ của các sóng mang con chồng lấn quá mức lên nhau làm phá vỡ tính trực giao của các sóng mang con.

❖ Nguyên nhân và ảnh hưởng của ICI

- ✓ ICI xảy ra do tính chọn lọc tần số của kênh pha đình (kênh pha đình chọn lọc tần số), nguyên nhân chính là hiện tượng dịch Doppler do tính di động của máy thu.
- ✓ Hậu quả là sẽ không phân biệt được ranh giới giữa các ký hiệu truyền trên các sóng mang con, dẫn đến phía thu sẽ quyết định sai ký hiệu mất tính trực giao.

❖ Giải pháp khắc phục

Có thể hạn chế ICI bằng cách chèn khoảng thời gian bảo vệ một cách **tuần hoàn**, và dùng bộ cân bằng kênh được hỗ trợ bởi hoa tiêu (PSAM). Các hoa tiêu giúp cho việc ước tính, cân bằng được thực hiện để bù ICI (chương 4 sẽ trình bày kỹ hơn về bộ cân bằng này).

❖ Phân tích ICI trong hệ thống OFDM

Biểu thức lý thuyết để tính phương sai ICI bằng cách mô hình ICI như là quá trình ngẫu nhiên Gauss. Sự xấp xỉ này là do lý thuyết giới hạn trung tâm và sẽ chính xác khi số sóng mang lớn. Phương sai nhiễu ICI được tính như sau:

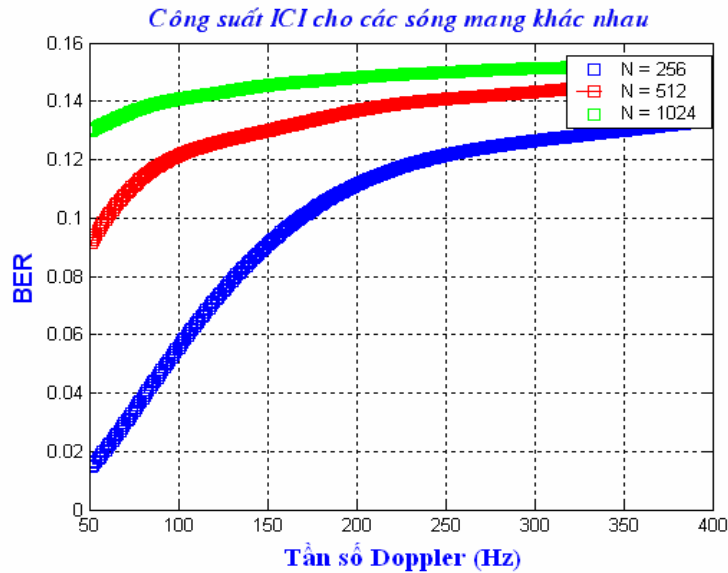
$$E\left[|c_i|^2\right] = E_s - \frac{E_s}{N_{\text{sub}}^2} \left\{ N_{\text{sub}} + 2 \sum_{i=1}^{N_{\text{sub}}-1} (N-i) J_0(2\pi f_d T_{\text{sym}} i) \right\} \quad (3.19)$$

trong đó c_i là ICI, E là năng lượng cho mỗi ký hiệu, N_{sub} là số sóng mang con, f_d là tần số Doppler, T_{sym} là độ rộng ký hiệu và J_0 là hàm Bessel loại một, bậc '0'. Lưu ý rằng phương sai ICI không phụ thuộc vào tín hiệu phát mà chỉ phụ thuộc vào điều kiện kênh

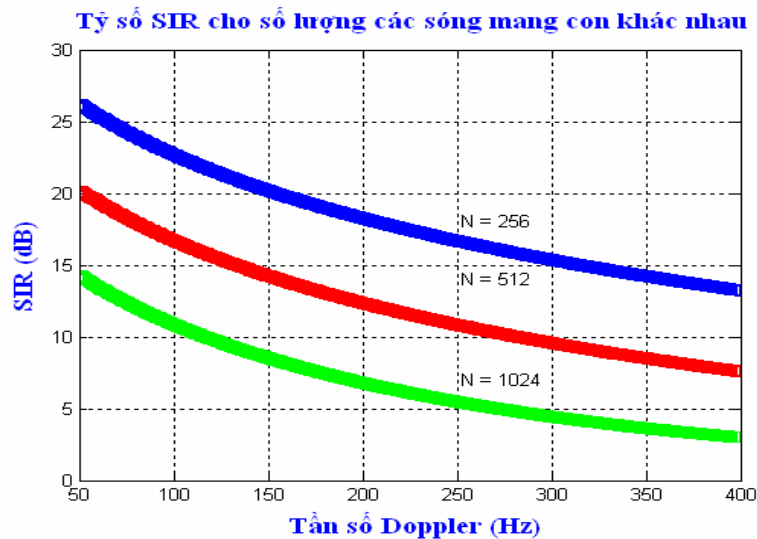
truyền. Tỷ số lỗi bit đối với PSK nhất quán trong kênh pha đình Rayleigh có thể tính như sau:

$$P_e = 1/4 \bar{\gamma}_b \quad (3.20)$$

Biết được công suất ICI từ biểu thức (3.19) ta có thể tính tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SIR). Giá trị SIR này được thay cho $\bar{\gamma}_b$ ở biểu thức trên để tính tỷ số lỗi bit. Hình 3.17 mô phỏng nhiễu nền do ICI đối với điều chế PSK với giá trị tần số Doppler tăng dần. Kết quả lý thuyết tìm được cũng phù hợp với kết quả mô phỏng trên. Hình 3.18 mô phỏng ảnh hưởng của ICI và sự giảm của SIR khi giá trị tần số Doppler tăng. Từ hình 3.17 và 3.18 cho thấy công suất ICI phụ thuộc vào số lượng sóng mang con. Khi càng tăng số lượng sóng mang con thì phương sai ICI càng tăng và SIR càng giảm.



Hình 3.17 Nhiễu nền do ICI đối với số sóng mang con khác nhau



Hình 3.18 Ảnh hưởng của ICI tới tỷ số tín hiệu trên nhiễu

Phụ lục 8B2: Thiết kế và mô phỏng tín hiệu OFDM.....

Công suất ICI được tính toán và biểu diễn theo hàm của sóng mang con thứ k. Do đó ở đầu ra của khối FFT, sóng mang con đầu ra thứ k được viết như sau.

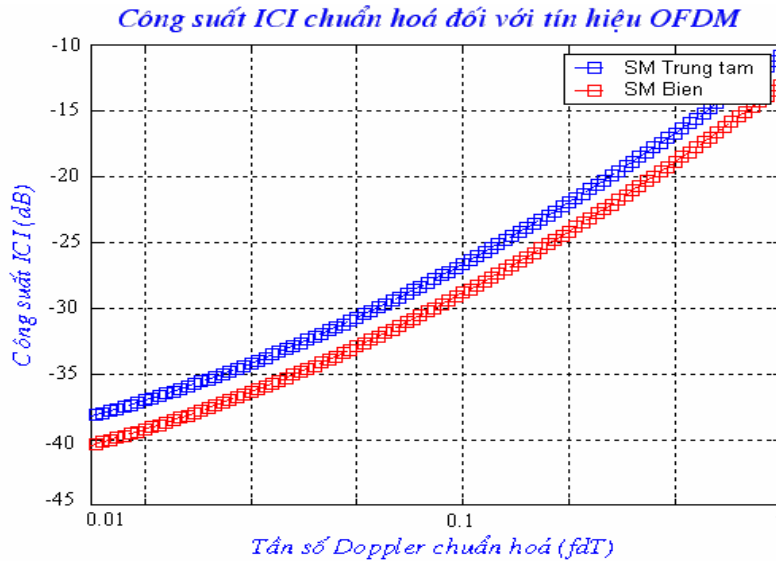
$$Y_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi nk/N} = d_k H_k + \alpha_k + n_k \quad (3.21)$$

Trong đó $y(n)$ là tín hiệu thu được, N là kích thước FFT, d_k là ký hiệu phát đi ban đầu, H_k là biến đổi Fourier của kênh ở sóng mang con thứ k, α_k là thành phần ICI do tính biến đổi thời gian của kênh và n_k là thành phần tạp âm ở sóng mang con thứ k. Trong kênh bất biến theo thời gian do tính trực giao của các sóng mang con nên α_k bằng không và $E\{|H_k|^2\} = 1$. Khi tần số Doppler chuẩn hoá cao thì thành phần ICI là khác không. Công suất ICI được tính và biểu diễn theo hàm của sóng mang con thứ k như sau:

$$E\{|\alpha_k|^2\} = \frac{1}{N_{\text{sub}}^2} \sum_{m=0, m \neq k}^{N_{\text{sub}}-1} \left(N_{\text{sub}}^2 + 2 \sum_{n=1}^{N_{\text{sub}}-1} (N_{\text{sub}} - n) J_0(2\pi f_d T_{\text{sym}} / N_{\text{sub}}) \cos(2\pi(m-k)/N_{\text{sub}}) \right) \quad (3.22)$$

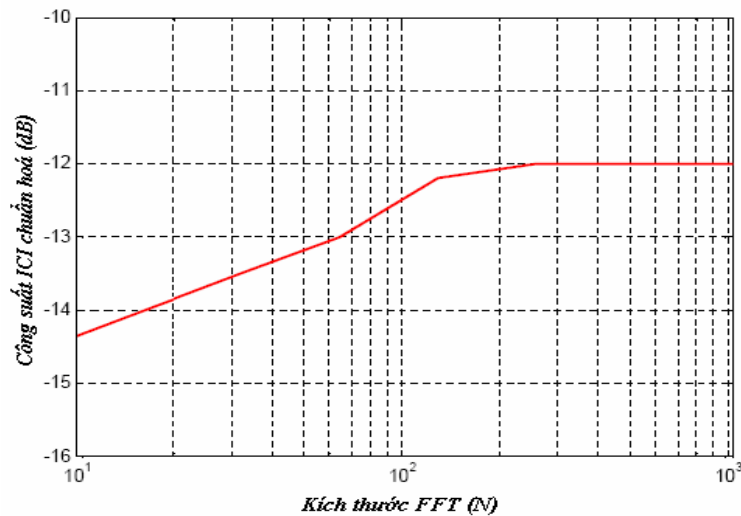
ở đây N_{sub} là số lượng sóng mang con và công suất ICI chuẩn hoá được biểu diễn như là $E\{|\alpha_k|^2\} / E\{|H_k|^2\}$ trong đó $E\{|H_k|^2\}$ được định nghĩa như sau:

$$E\{|H_k|^2\} = \frac{1}{N_{\text{sub}}^2} (N_{\text{sub}}^2 + \sum_{n=1}^{N_{\text{sub}}-1} (N_{\text{sub}} - n) J_0(2\pi f_d T_{\text{sym}} n / N_{\text{sub}})) \quad (3.23)$$



Hình 3.19 Công suất ICI chuẩn hoá đối với tín hiệu OFDM.
 $N=102, [\text{sim_var_ici_sm_tt_sm_b.m}]$

Hình 3.19 thể hiện ICI đối với mỗi sóng mang con là khác nhau. Sóng mang trung tâm sẽ có công suất ICI hơn các sóng mang biên. Từ hình vẽ 3.20 ta thấy khi kích thước FFT tăng lên thì công suất ICI cũng tăng lên nhanh chóng. Do đó tăng kích thước FFT mặc dù sẽ tăng chiều dài ký hiệu và tất nhiên sẽ giảm được ISI nhưng bù lại thì lại làm tăng ICI. Cho nên trong thực tế cần lựa chọn kích thước FFT hợp lý. Chương 5 sẽ giới thiệu kỹ hơn về tương quan giữa kích thước FFT và số lượng sóng mang con dùng để truyền dữ liệu.



Hình 3.20 Công suất ICI chuẩn hoá cho sóng mang con trung tâm ($fdT=0,2$), [sim_var_ici_vs_fft_size.m]

3.2.5.3 Cải thiện hiệu năng hệ thống truyền dẫn trên cơ sở kết hợp mã hoá Gray

❖ Các ảnh hưởng

Tạp âm tồn tại trong toàn bộ hệ thống truyền thông. Nguồn tạp âm chính là tạp âm nhiệt nền, tạp âm điện trong bộ khuếch đại phía thu. Ngoài ra tạp âm được tạo ra trong nội bộ hệ thống như ISI, ICI và IMD. Chúng làm giảm SNR và làm giảm hiệu quả phổ tần của hệ thống. Vì thế cần phải nghiên cứu ảnh hưởng của tạp âm đối với tỷ lệ lỗi truyền thông và hoà hợp giữa mức tạp âm và hiệu quả phổ tần.

Hầu hết tạp âm trong các hệ thống truyền thông vô tuyến đều được mô hình hoá AWGN. Tạp âm cùng với nhiễu gây ra nhờ điểm vector phát tới máy thu và quay pha các vector này, từ đó gây lỗi dữ liệu do quyết định sai vector thu.

❖ Giải pháp khắc phục

Một giải pháp là nếu tồn tại hai vector cạnh nhau chỉ khác nhau một bit thì khi quyết định sai chỉ xảy ra lỗi một bit, đây chính là phương pháp mã hoá Gray.

Mã hoá Gray: là một phương pháp mà các điểm IQ cạnh nhau trong chòm sao sẽ chỉ khác nhau một bit. Mã hoá Gray cho phép tối ưu tỷ số lỗi bit và giảm xác suất lỗi nhiều bit xuất hiện trong một ký hiệu đơn. Thường tiến hành mã hoá Gray khi điều chế M-QAM hay M-PSK [3].

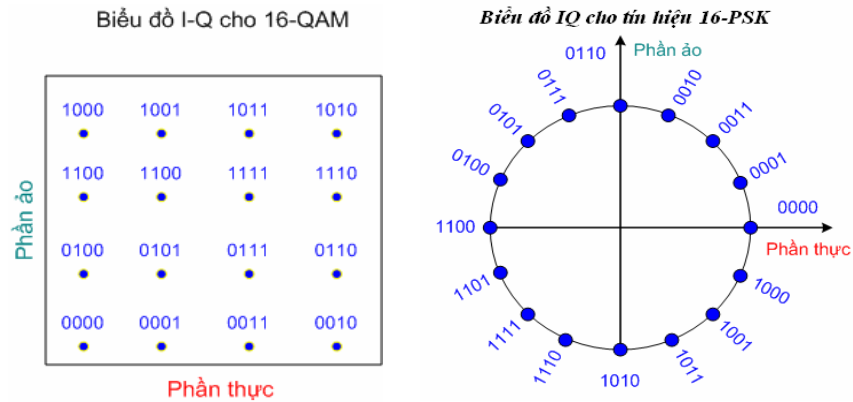
Phương trình (3.24) là chuỗi mã dưới dạng thập phân cho mã hoá Gray. Mã hoá Gray có thể sử dụng cho toàn bộ các sơ đồ điều chế PSK (QPSK, 8-PSK, 16-PSK,...) và QAM (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM,...). Đối với QAM thì mỗi trục sẽ được ghép riêng sử dụng mã hoá Gray.

$$\begin{aligned}
 G_1 &= \{0,1\} \\
 G_2 &= \{0,1,3,2\} \\
 G_3 &= \{0,1,3,2,6,7,5,4\} \\
 &\vdots \\
 G_{N+1} &= \{G_N(1,2,3,\dots,2^N), G_N(2^N,2^N-1,2^N-2,\dots,1)+2^N\}
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

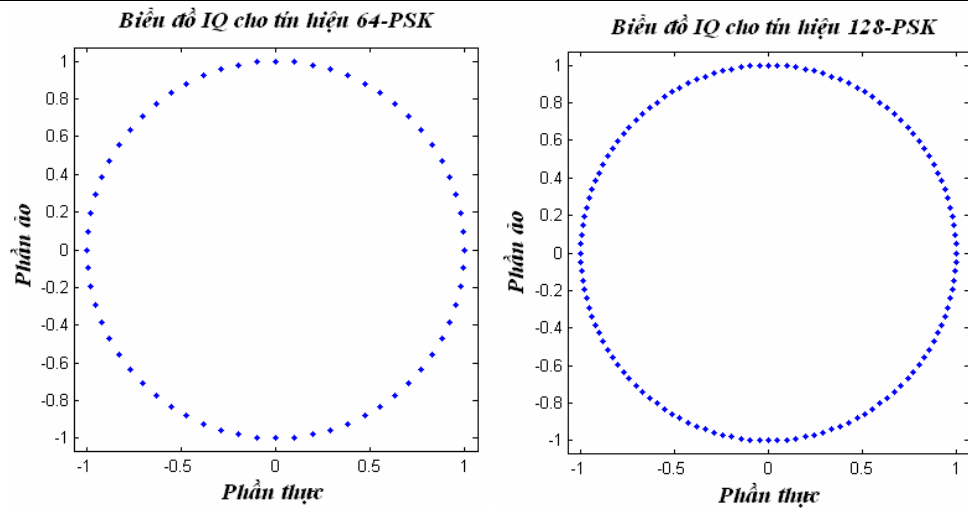
Bảng 3.2 Mã hoá Gray các bit nhị phân

Cơ số 10	Mã hóa Gray	Cơ số 10	Mã hóa Gray
0	0,0,0,0	8	1,1,0,0
1	0,0,0,1	9	1,1,0,1
2	0,0,1,1	10	1,1,1,1
3	0,0,1,0	11	1,1,1,0
4	0,1,1,0	12	1,0,1,0
5	0,1,1,1	13	1,0,1,1
6	0,1,0,1	14	1,0,0,1
7	0,1,0,0	15	1,0,0,0

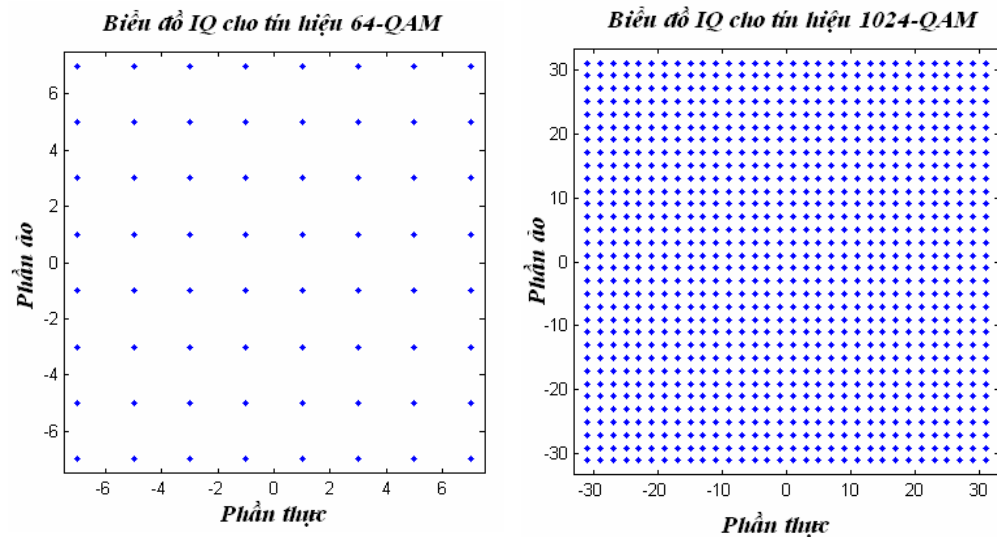
Sơ đồ điều chế tín hiệu 16-QAM và 16-PSK sử dụng mã hoá Gray, được cho trong hình 3.21. Hình 3.22, 3.23 minh họa sơ đồ IQ cho số trạng thái điều chế QAM và PSK khác nhau.



Hình 3.21 Sơ đồ IQ điều chế 16-QAM và 16-PSK sử dụng mã hoá Gray



Hình 3.22 Biểu đồ IQ cho tín hiệu 64-PSK và 128-PSK



Hình 3.23 Biểu đồ IQ cho tín hiệu 64 QAM và 1024-QAM

3.2,5.4 Giải pháp nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần của hệ thống truyền dẫn OFDM

❖ Nguyên nhân

Phổ tín hiệu OFDM là phổ tổng hợp của các thành phần tần số sóng mang con, mà phổ tần của các sóng mang con có dạng sinc. Do đó phổ tổng hợp của chúng sẽ có đường bao bên chiếm một lượng băng tần khá lớn. Các đường bao bên này chính là các thành phần tần số ngoài băng (aliasing).

❖ Biện pháp khắc phục

Tần số ngoài băng sẽ được loại bỏ khi dùng một bộ lọc băng thông, hoặc dùng khoảng bảo vệ cosin tăng.

3.2.5.4.1 Phương pháp dùng bộ lọc băng thông

Tín hiệu OFDM trước khi truyền được lọc bằng bộ lọc băng thông để chặn các thành phần tần số ngoài băng. Quá trình cắt của bộ lọc rất gọn, điều này cho phép phân chia các khối tín hiệu OFDM, mà các khối này được xếp rất gần nhau trong miền tần số, kết quả sẽ cải thiện hiệu quả phổ tần. Nhưng sự lọc rất khít này sẽ giảm SNR và phải quan tâm những ảnh hưởng của nó khi thiết kế một hệ thống OFDM.

Bộ lọc băng thông sẽ loại bỏ đường bao bên của phổ tín hiệu OFDM. Số lượng đường bao bên bị loại bỏ phụ thuộc vào hình dạng của bộ lọc (hình dạng cửa sổ lọc). Trong đồ án thường dùng cửa sổ Kaiser để chặn các thành phần tần số không mong muốn. Hàm cửa sổ Kaiser được định nghĩa:

$$W(n) = \begin{cases} \frac{I_0\left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}\right)}{I_0(\beta)} & |n| \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{khác} \end{cases} \quad (3.25)$$

Trong đó: $I_0(x)$ là hàm bessel loại một, bậc 0. β là tham số dùng để điều khiển dạng chóp hai phía cửa sổ, N là kích thước bộ lọc. Hàm bessel được xác định:

$$I_0(x) = 1 + \sum_{k=1}^L \left[\frac{\left(\frac{x}{2}\right)^k}{k!} \right]^2, \quad L < 25 \quad (3.26)$$

Tham số β được xác định dựa trên yêu cầu về độ suy giảm trong dải chắn:

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(\alpha - 8.7), & \alpha > 50 \\ 0.5842(\alpha - 21)^{0.4} + 0.07886(\alpha - 21), & 50 \geq \alpha \geq 21 \\ 0, & \alpha < 21 \end{cases} \quad (3.27)$$

Trong đó α là tham số xác định chiều cao đường bao bên (sidelobe) của bộ lọc FIR.

Tham số β tác động đến sự suy giảm đường bao bên của biến đổi FFT của bộ lọc. Khi β tăng thì biên độ đường bao bên sẽ giảm.

Hiệu năng của bộ lọc được xác định bởi ba tham số chính:

- *Biên độ đường bao bên β*
- *Độ rộng quá độ*
- *Số lượng nhánh*

Độ rộng quá độ được chuẩn hoá theo số lượng nhánh của bộ lọc như sau:

$$f_t = \frac{w_t}{N} f_s \quad (3.28)$$

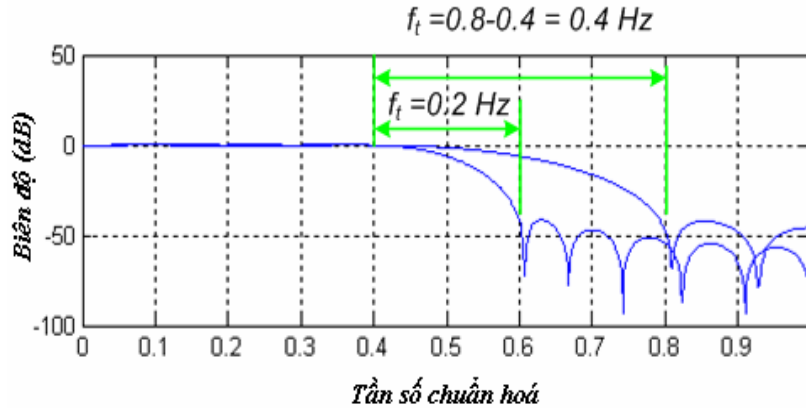
Trong đó w_t là độ rộng của hàm cửa sổ, N là số lượng nhánh bộ lọc, f_s là tốc độ lấy mẫu (Hz).

Số lượng nhánh của bộ lọc FIR được xác định theo công thức:

$$N_{\text{tap}} = \text{ceil}\left(\frac{w_t N_{\text{IFFT}}}{f_t}\right) \quad (3.29)$$

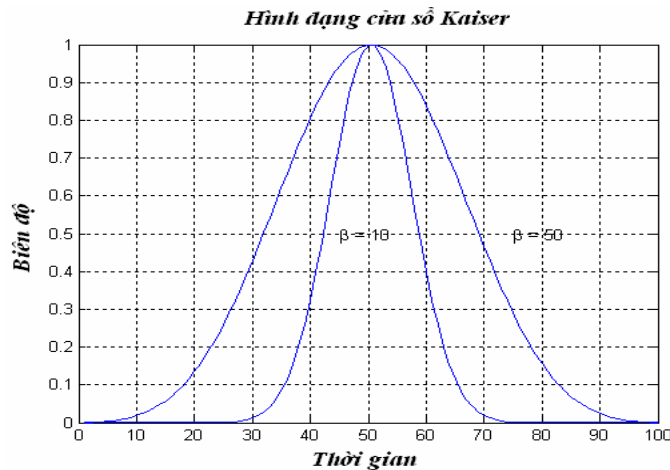
Trong đó: N_{IFFT} là số lượng điểm lấy FFT, hàm $\text{ceil}(x)$ xem mục 6.2.2

Hình 3.24 minh hoạ đặc tuyến của bộ lọc dùng cửa sổ Kaiser với các giá trị f_t khác nhau, ta thấy f_t càng nhỏ thì tác dụng cắt càng hiệu quả.



Hình 3.24 Đặc tuyến bộ lọc dùng cửa sổ Kaiser với $f_t = 0.2$ Hz, $f_t = 0.4$ Hz, $\beta = 3.4$

Hình 3.25 minh hoạ cấu trúc của một cửa sổ Kaiser với tham số $\beta = 10$, và $\beta = 50$. Ta thấy dạng cửa sổ Kaiser rất gọn do đó hiệu quả cắt gọn phổ tín hiệu sẽ rất cao, trong thực tế thường dùng cửa sổ Kaiser hoặc Hamming.



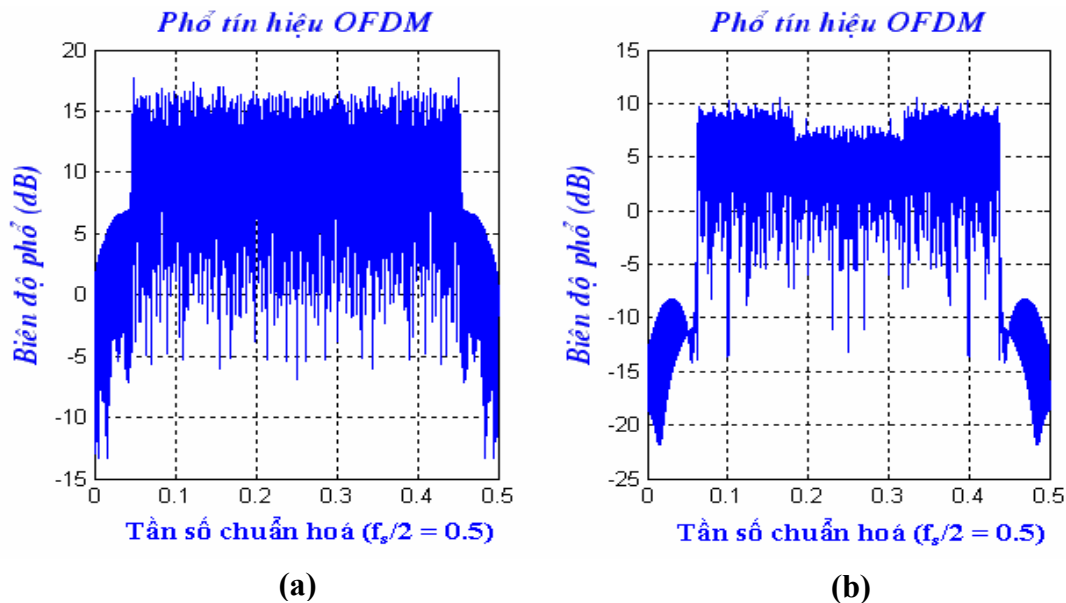
Hình 3.25 Cấu trúc của cửa sổ Kaiser với $\beta = 10$, và $\beta = 50$

Phổ rời rạc của tín hiệu OFDM trong miền thời gian được ước tính như sau:

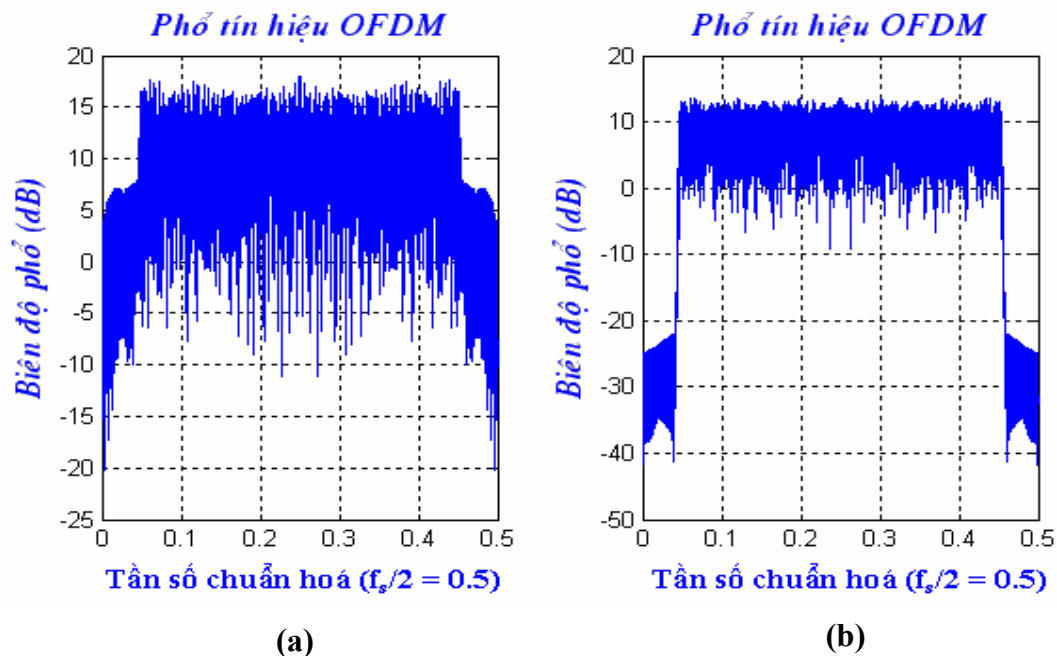
$$P(s) = 20 \log_{10}(|\text{FFT}(s(t).w(t))|) - 20 \log_{10}\left(\frac{N}{2}\right) + W_L \quad (3.20)$$

Trong đó $s(t)$ là tín hiệu OFDM trong miền thời gian, $w(t)$ là hàm cửa sổ sử dụng, W_L là giá trị suy giảm của hàm cửa sổ, N là số lượng mẫu trong $s(t)$, $P(s)$ là phổ công suất tính

theo dB. N = kích thước FFT + Kích thước khoảng bảo vệ. Hình 3.26 là phổ của tín hiệu OFDM với 52 sóng mang (chuẩn HiperLAN/2) và 1536 sóng mang (chuẩn DAB mode I).

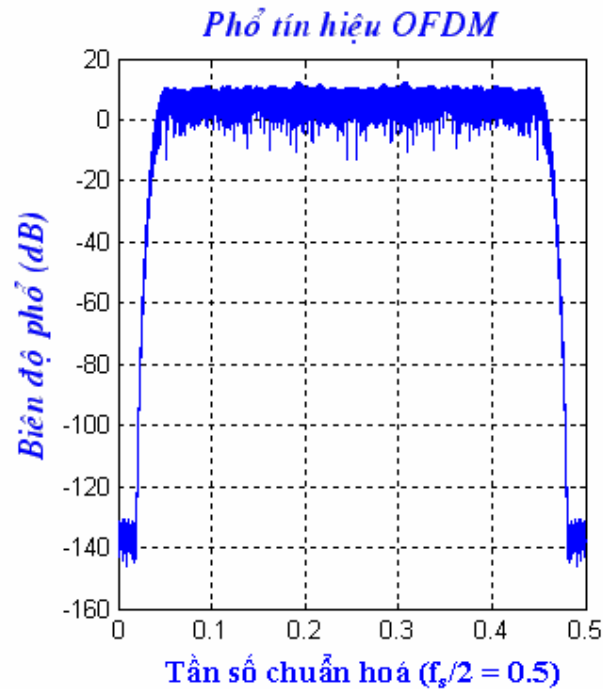


Hình 3.26 Phổ của tín hiệu OFDM 52 sóng mang (a) và 1536 sóng mang con (b), không dùng bộ lọc



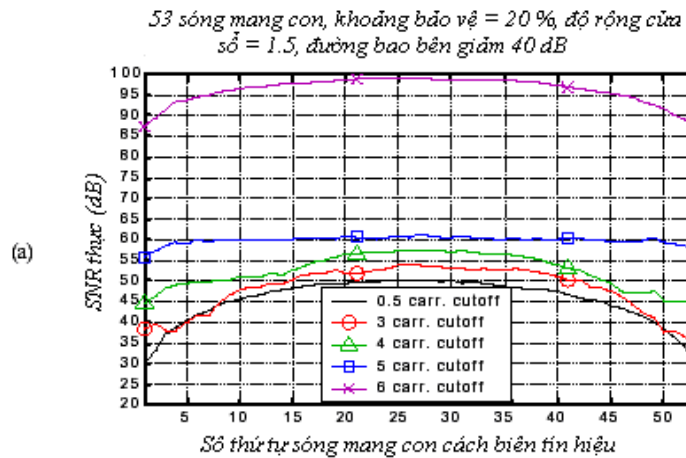
Hình 3.27 Phổ tín hiệu OFDM 52 sóng mang không dùng bộ lọc (a) và dùng bộ lọc với cửa sổ Kaiser với $\beta = 10$ (b)

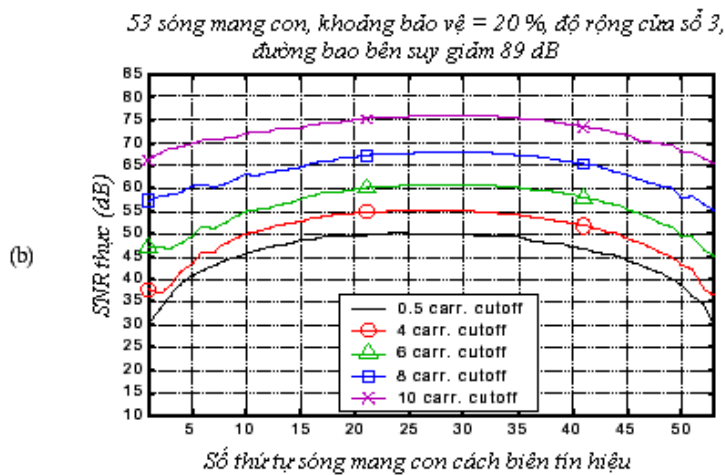
Bộ lọc loại bỏ hầu như toàn bộ các đường bao bên. Tuy nhiên nếu chọn giá trị độ rộng của cửa sổ quá nhỏ (cửa sổ quá hẹp) thì bộ lọc sẽ cắt đáng kể năng lượng của các sóng mang ngoài cùng và gây méo hình dạng phổ của chúng, đây là nguyên nhân gây ICI do dùng bộ lọc. Hình 3.28 là một trường hợp như vậy.



Hình 3.28 Phổ tín hiệu OFDM 52 sóng mang, dùng bộ lọc với cửa sổ Kaiser với $\beta = 50$, [sim_ofdm_spectrum.m]

Hình 3.29 chỉ ra hiệu năng của một hệ thống OFDM tương ứng theo chuẩn HiperLAN2 hay IEEE802.11a. Trong trường hợp này sử dụng 52 sóng mang con, và khoảng thời gian bảo vệ là 20% chiều dài ký hiệu. SNR thay đổi theo số lượng sóng mang con khi bộ lọc gây méo đáp ứng với hầu hết các sóng mang con rìa. Sơ đồ điều chế cao nhất được sử dụng trong hệ thống HiperLAN2 và IEEE802.11a là 64-QAM, và sơ đồ này yêu cầu SNR lớn hơn 26 dB. Chúng ta có thể thấy kết quả trong hình 3.29 khi SNR thực vượt quá 26 dB đối với toàn bộ các sóng mang thậm chí khi sử dụng bộ lọc băng thông rất sắc cạnh và đặc tuyến cắt trong phạm vi một nửa khoảng cách sóng mang con [8].





Hình 3.29 SNR của mỗi sóng mang con của tín hiệu OFDM khi sử dụng bộ lọc

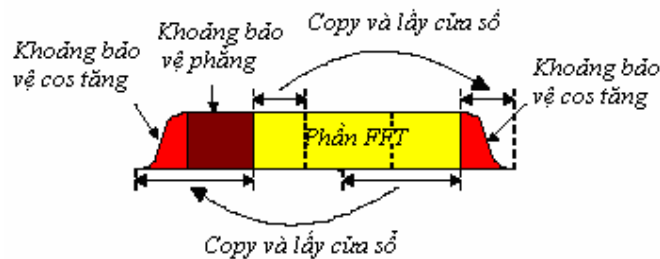
Trong đó: carr.cutoff, là độ rộng quá độ f_t của bộ lọc. Trong hình 3.29 (a) và 3.29 (b) thì f_t thay đổi từ 0.5 -10 khoảng cách sóng mang con.

Dựa trên kết quả trong hình 3.29 ta thấy khi độ rộng quá độ tăng thì SNR của tín hiệu sẽ giảm, đây cũng chính là một nhược điểm chính của bộ lọc băng thông. Cho nên ta cần dung hoà giữa đặc tuyến cắt của bộ lọc và SNR yêu cầu. Tuy nhiên bộ lọc băng thông có ưu điểm chính là cho phép loại bỏ đường bao bên của tín hiệu OFDM và giảm băng tần thực của hệ thống, điều này sẽ cải thiện hiệu quả phổ tần.

3.2.5.4.2 Phương pháp dùng khoảng bảo vệ cosin tăng

Một trong những phương pháp đơn giản nhất để loại bỏ đường bao bên của phổ tín hiệu OFDM là làm dốc khoảng bảo vệ, ép nhọn nó đến '0' trước ký hiệu tiếp theo. Sự ép nhọn khoảng chuyển giao giữa các ký hiệu sẽ giảm công suất đường bao bên.

Hình 3.30 minh hoạ cách tạo một ký hiệu OFDM dùng khoảng bảo vệ cosin tăng (RC). Khoảng bảo vệ này do được lấy cửa sổ với hình dạng một hàm cosin bình phương ($\cos(\theta)^2$) vì thế mà có tên là cosin tăng.

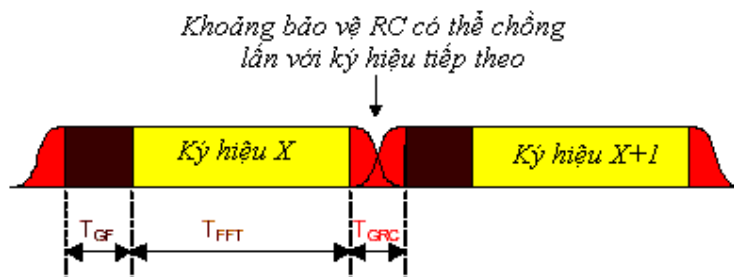


Hình 3.30 Cấu trúc của khoảng bảo vệ RC

Phần cosin tăng của khoảng bảo vệ có thể chồng lấn lên ký hiệu trước và sau vì phần này chỉ tạo ra sự bảo vệ nhỏ chống lại đa đường và lỗi định thời. Tính chất giảm dần đến '0' của RC làm ISI do nó gây ra sẽ rất thấp, mặt khác khoảng bảo vệ RC rất nhỏ và sẽ được bỏ qua tại phía thu.

Phụ lục 8B2: Thiết kế và mô phỏng tín hiệu OFDM.....

Tính chồng lấn giúp tạo khoảng bảo vệ RC hai phía ký hiệu mà không tăng thêm thời gian ký hiệu. Hình 3.31 thể hiện hai ký hiệu OFDM có khoảng bảo vệ RC chồng lấn.



Hình 3.31 Đường bao ký hiệu OFDM với một khoảng bảo vệ phẳng và một khoảng bảo vệ RC chồng lấn

Chiều dài khoảng bảo vệ RC được xác định theo phần trăm của phần phẳng của ký hiệu OFDM, đó là:

$$RC = 100 \frac{T_{GRC}}{T_{FFT} + T_{GF}} \% \quad (3.21)$$

Trong đó RC là phần trăm cosin tăng, T_{GRC} là chiều dài của khoảng bảo vệ RC, T_{FFT} là chiều dài của phần FFT của ký hiệu và T_{GF} là chiều dài của phần khoảng bảo vệ phẳng. Bảng 3.3 sẽ giới thiệu các tham số RC theo chuẩn IEEE 802.11a.

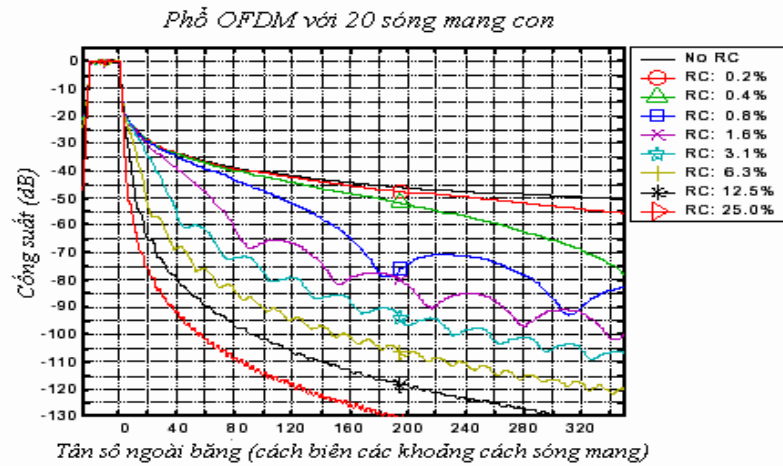
Bảng 3.3 Tham số khoảng bảo vệ RC của IEEE 802.11a

Tham số	Ký hiệu	Giá trị
Thời gian FFT	T_{FFT}	3.2 μs
Khoảng bảo vệ RC	T_{GRC}	100 ns
Khoảng bảo vệ tổng	$T_G = T_{GRC} + T_{GF}$	800 ns
Khoảng bảo vệ phẳng	$T_{GF} = T_G - T_{GRC}$	700 ns

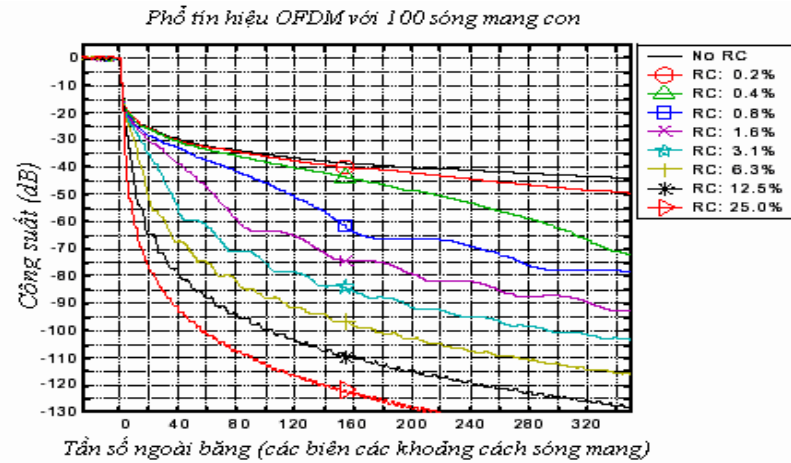
Từ bảng 3.2 ta tính được phần RC là:

$$RC = 100 \frac{100}{700 + 3200} = 2.56\%$$

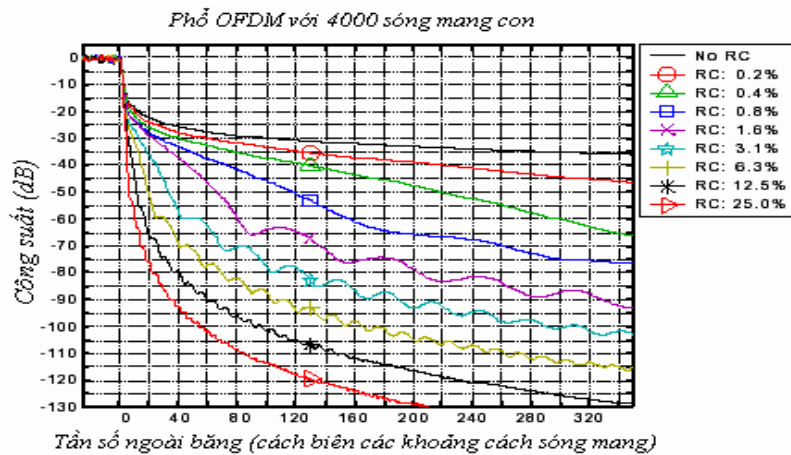
Ảnh hưởng của phần cosin tăng khi thêm vào ký hiệu OFDM được mô phỏng để xác định mức độ tần số ngoài băng. Hình 3.32, hình 3.33 và 3.34 minh họa phổ của tín hiệu OFDM với khoảng bảo vệ RC thay đổi [8].



Hình 3.32 Công suất đường bao bên của tín hiệu OFDM 20 sóng mang con, với chiều dài khoảng bảo vệ RC thay đổi



Hình 3.33 Công suất đường bao bên của tín hiệu OFDM 100 sóng mang con, với chiều dài khoảng bảo vệ RC thay đổi



Hình 3.34 Công suất đường bao bên của tín hiệu OFDM 4000 sóng mang con, với chiều dài khoảng bảo vệ RC thay đổi

Xuất hiện sự khác nhau giữa biên độ của các đường bao bên khi không dùng hoặc dùng một khoảng bảo vệ cosin tăng nhỏ. Mô phỏng cũng chỉ ra rằng số lượng sóng mang con tăng từ 20 (hình 3.32) đến 4000 (hình 3.34) thì biên độ của đường bao bên (cách biên phổ là 200 khoảng cách sóng mang con) sẽ tăng lên 8 dB.

Mặc dù khi RC tăng, tần số ngoài băng suy giảm nhiều tuy nhiên băng tần tín hiệu OFDM vẫn khá rộng: Theo HiperLAN/2, dùng 52 sóng mang con, khoảng cách sóng mang = 312.5 KHz. Do đó tại ngưỡng SNR = -40 dBc (công suất so sánh với công suất tín hiệu) đường bao bên sẽ cách biên phổ tín hiệu 30 khoảng cách sóng mang.

Vì vậy băng tần tổng của hệ thống sẽ là $(30 \times 2 + 52) \times 312.5 = 35$ MHz, mà băng tần hệ thống HiperLAN/2 chỉ có 20 MHz. Điều này cho thấy việc thêm vào khoảng bảo vệ RC là không đủ để giảm đường bao bên đáng kể vì thế cần phải dùng thêm bộ lọc băng thông.

3.3. Kết luận

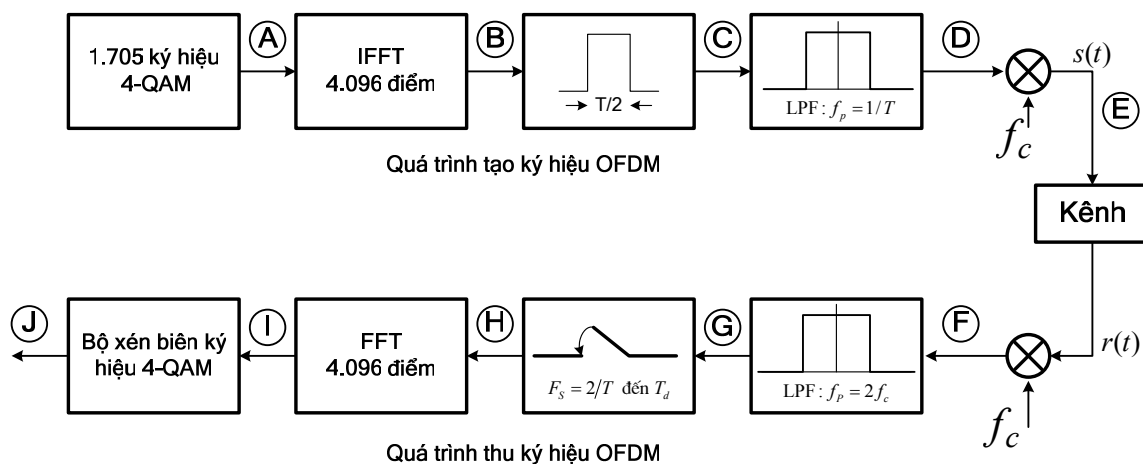
Trong phần này ta đã nghiên cứu nguyên lý hoạt động cơ bản của OFDM, phân tích các phần tử của mô hình và các thông số đặc trưng cùng dung lượng hệ thống OFDM, phân tích hiệu quả phổ tần vượt trội của OFDM, phân tích sự cần thiết của khoảng bảo vệ trong việc chống lại ISI do trải trễ đa đường của kênh, phân tích ảnh hưởng của ICI đến hiệu năng của hệ thống OFDM. Mặt khác, chứng minh hiệu quả sử dụng bộ lọc băng thông trong việc tiết kiệm phổ tần hệ thống, nghiên cứu hiệu năng của OFDM sử dụng các sơ đồ điều chế sóng mang con khác nhau M-PSK, M-QAM trong kênh AWGN và kênh pha đỉnh Rayleigh.

Phần II

Mô phỏng hệ thống OFDM điển hình

Bài toán:

Mô hình mô phỏng được cho ở **hình 3.35**. Khi này, ta mô phỏng tín hiệu OFDM có cấu trúc khung và đa khung. Theo đó, mỗi khung có độ lâu T_F gồm N_F ký hiệu OFDM, mỗi đa khung gồm M_F khung ($T_{MF} = M_F \times T_F$). Mỗi ký hiệu được tạo thành bởi một tập K (từ K_{\min} đến K_{\max}) sóng mang và được truyền trong khoảng thời gian T_S ; $T_S = T_U + \Delta$. Các thông số cụ thể được cho ở **bảng 3.4**. Lưu ý rằng, ở đây ta dùng $T_U = T_{FFT}$ và khoảng thời gian bảo vệ $\Delta = T_G$.



Hình 3.35 Mô hình mô phỏng quá trình tạo và thu tín hiệu OFDM

Bảng 3.4. Các tham số và các giá trị của chúng trong mô phỏng OFDM

Tham số	Giá trị			
Chu kỳ cơ bản T	$7/64 \mu s$			
Số sóng mang $K (K_{\min} \leq K \leq K_{\max})$	1705 ($K_{\min} = 0; K_{\max} = 1704$)			
Khoảng thời gian ký hiệu hữu hiệu $T_U = T_{FFT}$	$224 \mu s$			
Khoảng cách các sóng mang con $1/T_U$	4464 Hz			
Khoảng cách K_{\min} và $K_{\max}(K-1)/T_U$	7,61 MHz			
Khoảng thời gian bảo vệ được phép Δ/T_U	1/4	1/8	1/16	1/32

Phụ lục 8B2: Thiết kế và mô phỏng tín hiệu OFDM.....

Khoảng thời gian phần T_U	$2048 \times T = 224 \mu s$			
Khoảng thời gian bảo vệ $\Delta = T_G$	$512 \times T = 56 \mu s$	$256 \times T = 28 \mu s$	$128 \times T = 14 \mu s$	$512 \times T = 56 \mu s$
Khoảng thời gian ký hiệu $T_S = \Delta + T_U$	$2.560 \times T = 280 \mu s$	$2.304 \times T = 252 \mu s$	$1.176 \times T = 238 \mu s$	$2.112 \times T = 231 \mu s$

Mô tả toán học

Tín hiệu phát được mô tả bởi:

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{\ell=0}^{N_F-1} \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} C_{m,\ell,k} \psi_{m,\ell,k}(t) \right\} \quad (3.22)$$

trong đó

$$\psi_{m,\ell,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k'}{T_U}(t - \Delta - \ell T_S - N_F \cdot m \cdot T_S)} & , \quad (\ell + N_F \cdot m)T_S \leq t \leq (\ell + N_F \cdot m + 1)T_S \\ 0, & \text{khác} \end{cases} \quad (3.23)$$

k là chỉ số sóng mang

ℓ là chỉ số ký hiệu OFDM

m là số khung truyền dẫn

K là số sóng mang được truyền

T_S là khoảng thời gian của ký hiệu

T_U là nghịch đảo của khoảng cách giữa các sóng mang.

f_c là tần số trung tâm của sóng mang vô tuyến RF.

k' là chỉ số sóng mang tương ứng với tần số trung tâm nghĩa là

$$k' = k - \frac{K_{\max} + K_{\min}}{2}$$

$C_{m,\ell,k}$ là ký hiệu phức cho sóng mang k của ký hiệu dữ liệu thứ $\ell + 1$ trong khung thứ m .

Nếu xét (3.22) trong khoảng thời gian từ $t=0$ đến $t=T_S$ (tức là khảo sát trong một chu kỳ ký hiệu) thì (3.22) trở thành

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} C_{0,0,k} \cdot e^{j2\pi k'(t-\Delta)/T_U} \right\} \quad (3.24)$$

với

$$k' = k - \frac{K_{\max} + K_{\min}}{2}$$

Nếu thực hiện điều chế 4-QAM để chuyển tín hiệu băng tần cơ sở thành tín hiệu thông băng thì tín hiệu phát $s(t)$ tương ứng với các thành phần đồng pha $m_I(t)$ và vuông pha $m_Q(t)$ là

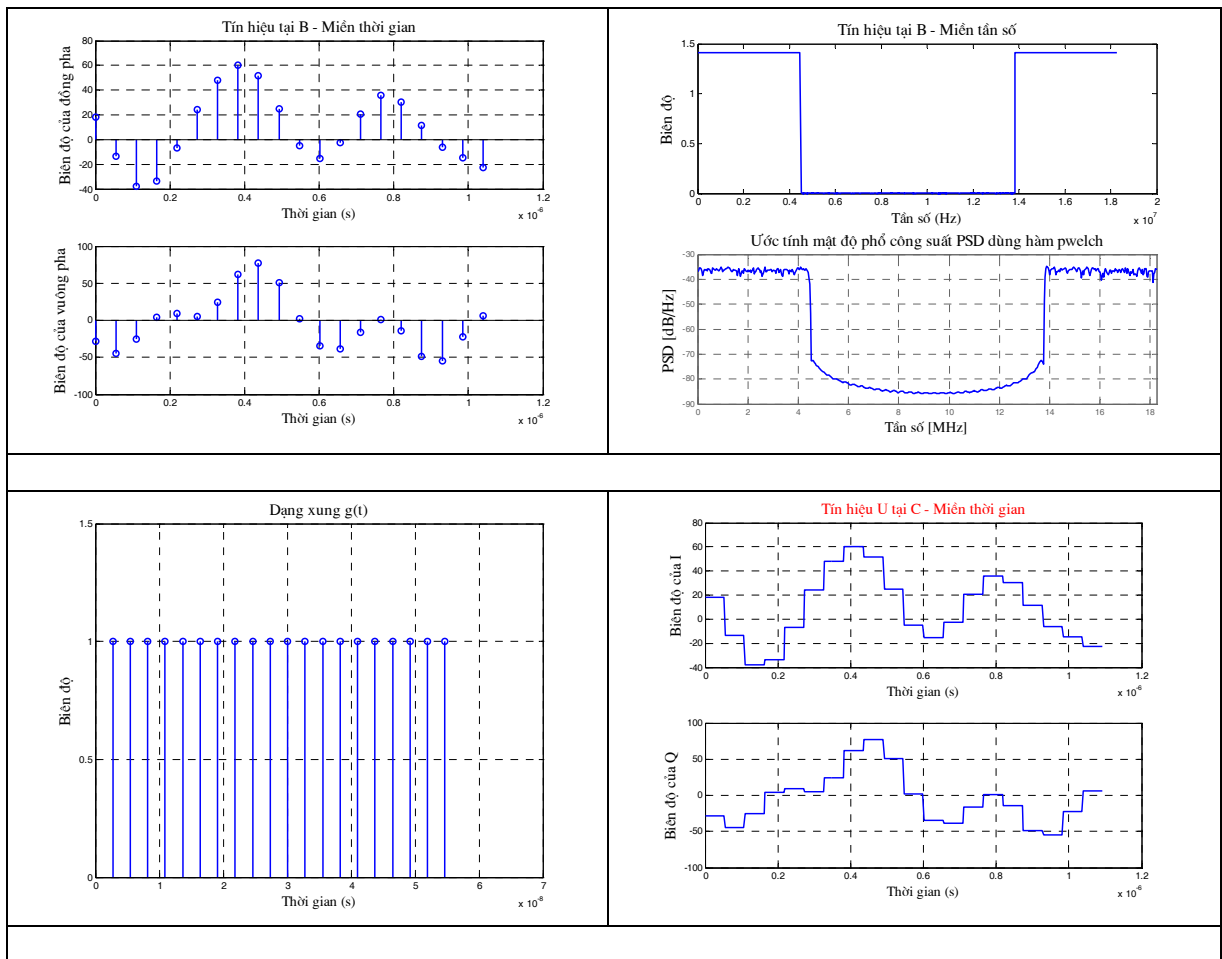
$$s(t) = m_I(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) + m_Q(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (3.25)$$

Khi này (3.24) được khai triển như sau

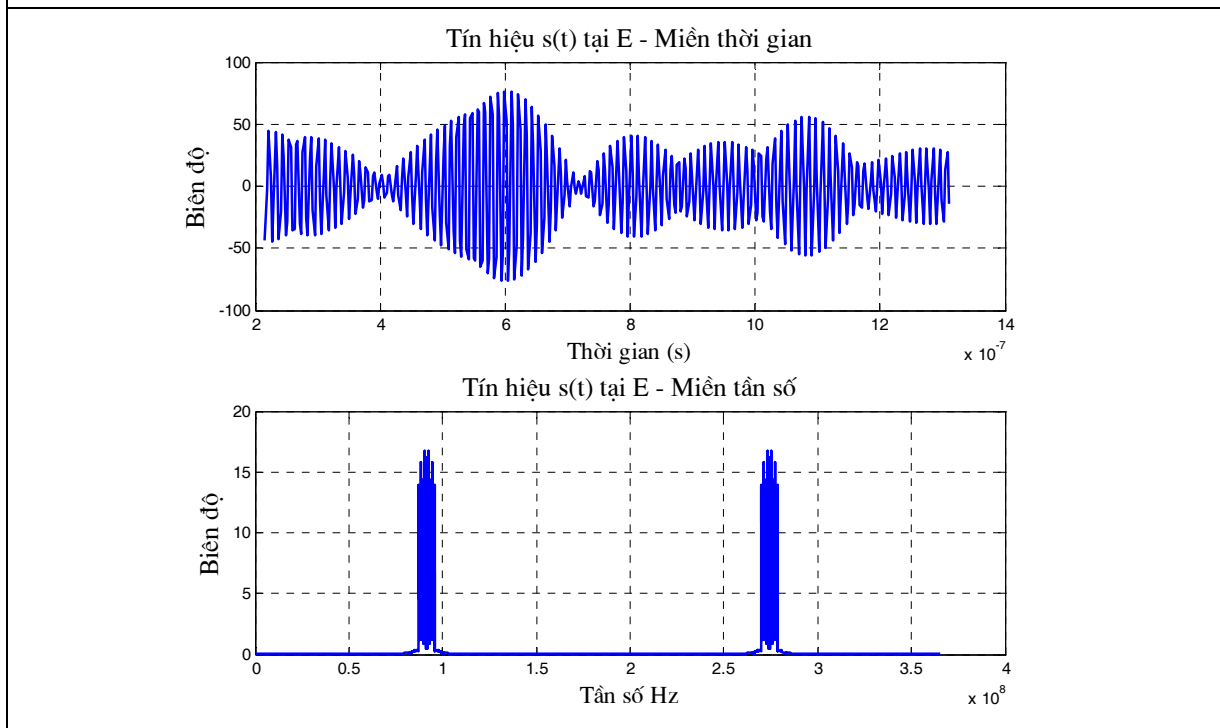
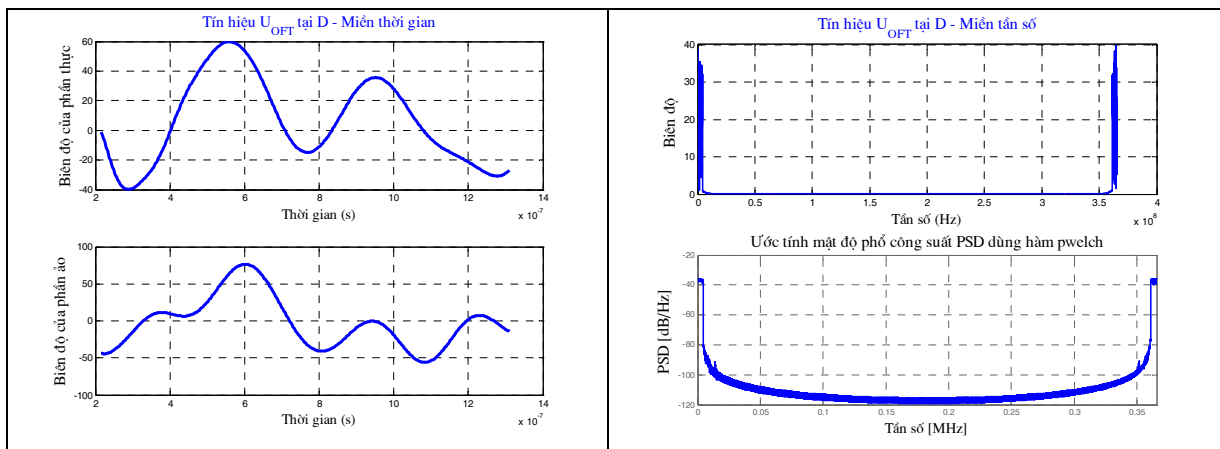
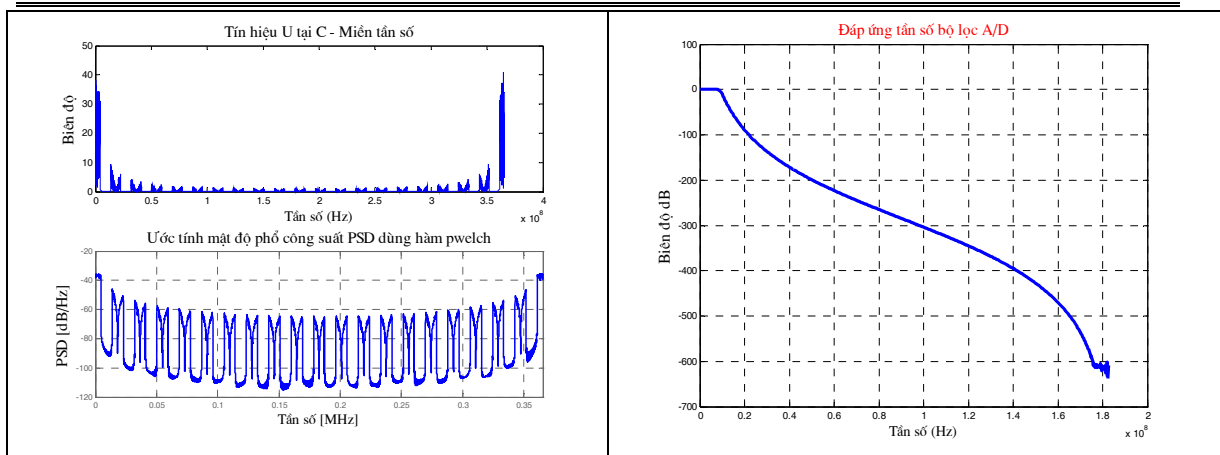
$$s(t) = \sum_{k=K_{min}}^{K_{max}} \text{Re}(C_{0,0,k}) \cdot \cos \left[2\pi \left(k - \frac{K_{max} + K_{min}}{2} \right) \frac{t - \frac{\Delta}{T_U}}{T_U} + f_c \right] - \sum_{k=K_{min}}^{K_{max}} \text{Im}(C_{0,0,k}) \cdot \sin \left[2\pi \left(k - \frac{K_{max} + K_{min}}{2} \right) \frac{t - \frac{\Delta}{T_U}}{T_U} + f_c \right] \quad (3.26)$$

Các kết quả mô phỏng

❖ Kết quả mô phỏng phản phát



Phụ lục 8B2: Thiết kế và mô phỏng tín hiệu OFDM.....



❖ Kết quả mô phỏng phần thu

