

A. MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Nhiều công trình nghiên cứu về BICM-ID đều khẳng định rằng sơ đồ này phát huy hiệu quả cao trong hệ thống truyền tin trên kênh Gauss. Tuy nhiên hệ thống BICM-ID lại đòi hỏi điều chế đa mức, điều này làm hạn chế việc áp dụng trực tiếp mô hình BICM-ID cho ghi từ do tín hiệu đầu vào kênh ghi từ bị ràng buộc đầu vào nhị phân. Với mục đích ứng dụng các kỹ thuật mã hoá và xử lý tín hiệu rất thành công trong các hệ thống thông tin số cho các hệ thống ghi từ để nâng cao chất lượng ghi/đọc dữ liệu, tôi đã chọn đề tài nghiên cứu là: “ *Ứng dụng hệ thống điều chế mã có xáo trộn vị trí bit và giải mã lặ để nâng cao chất lượng ghi/đọc dữ liệu*”.

Luận án này đề xuất một phương án xây dựng bộ điều chế/giải điều chế đa chiều kết hợp với việc chọn các cặp mã hoá – ánh xạ tốt nhất để có thể ứng dụng hệ thống BICM-ID cho các hệ thống ghi từ.

2. Đối tượng nghiên cứu

Sơ đồ điều chế đa chiều xây dựng từ tập $\{\pm 1\}$, ánh xạ có xác suất lỗi bit đều, và hệ thống BICM-ID sử dụng các ánh xạ và bộ tín hiệu đa chiều

3. Phương pháp nghiên cứu

- Xây dựng mô hình toán học của hệ thống bằng giải tích;
- Phân tích chất lượng bằng giải tích kết hợp với mô phỏng máy tính

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

- Đề xuất tiêu chuẩn thiết kế các cặp mã hoá – ánh xạ tốt nhất cho sơ đồ BICM-ID với xáo trộn từng dòng bit.
- Đưa ra một phương pháp điều chế đa chiều, đa điểm tín hiệu để có

thể ứng dụng hệ thống BICM-ID cho các hệ thống ghi từ.

- Trình bày phương pháp và kết quả tìm kiếm các cặp mã hoá - ánh xạ tốt nhất cho hệ thống BICM-ID điều chế đa chiều.
- Đề xuất sử dụng hệ số chuẩn hoá SF cho hệ thống BICM-ID điều chế đa chiều.

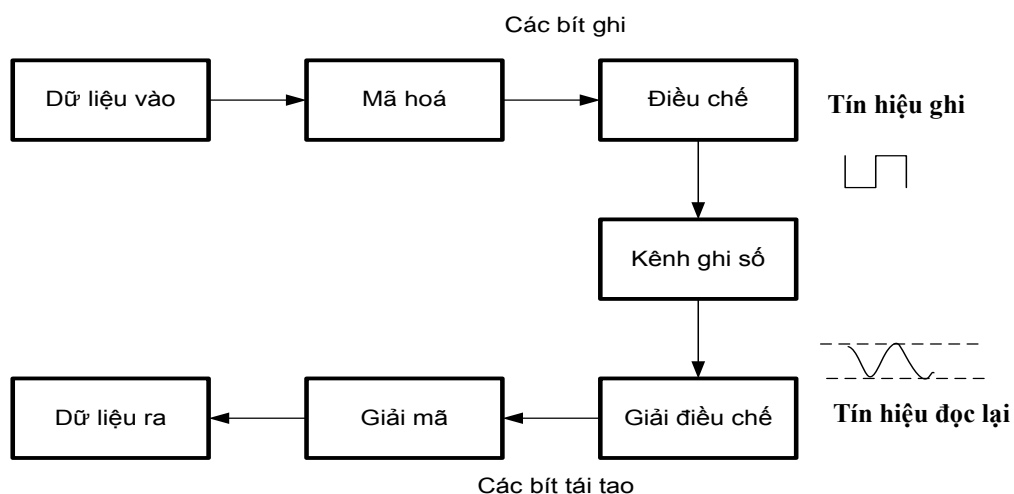
Bố cục của luận án: Luận án được chia thành 3 chương, 01 kết luận, danh mục tài liệu tham khảo và 01 phụ lục.

B. NỘI DUNG

Chương 1: CƠ SỞ LÝ THUYẾT CHO GHI TỪ

1.1 Hệ thống ghi từ

Sơ đồ khối một hệ thống ghi từ được trình bày trên Hình 1.1

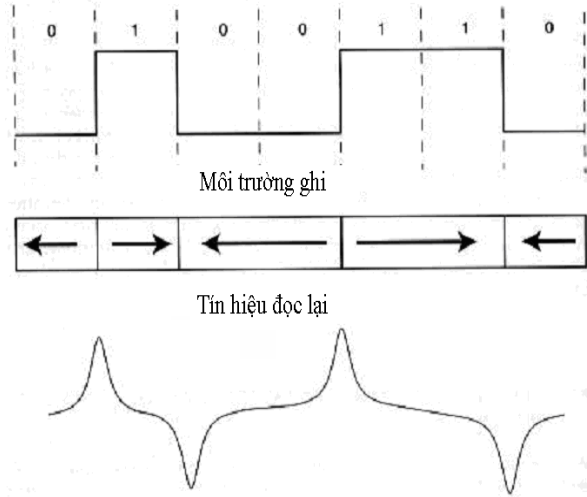


Hình 1.1 Sơ đồ khối hệ thống ghi từ

1.1.1 Nguyên lý ghi từ

Các số nhị phân được ghi trong mỗi rãnh bằng cách từ tính hoá các hạt hoặc miền từ tính theo một trong 2 hướng. Tín hiệu ghi là một dạng sóng hai mức, giả sử là +1 và -1, tồn tại trong các khoảng thời gian liên tục là T . Và trong dạng sóng này thì các chuyển đổi từ mức này sang mức khác sẽ chuyển tải thông tin số một cách hiệu quả, bởi vậy nó bị ràng buộc để xuất hiện tại các thời điểm bội số nguyên lần của thời gian

chu kỳ T . Hình 1.2 mô tả quá trình ghi và đọc lại tín hiệu với ghi từ theo phương ngang.



Hình 1.2: Quá trình ghi từ theo phương ngang

1.1.2 Mô hình kênh ghi

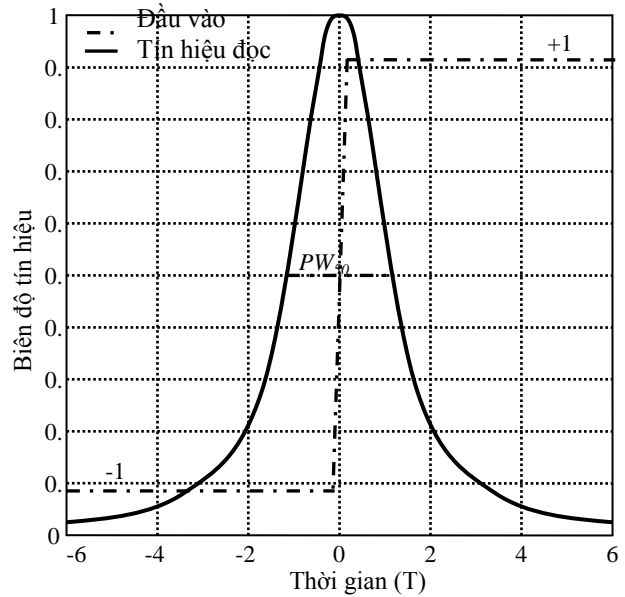
1.1.2.1 Đáp ứng xung kênh

Đối với hệ thống ghi từ theo phương ngang một mô hình được sử dụng thường xuyên đối với đáp ứng chuyển đổi $h(t)$ là hàm Lorentz.

$$h(t, w) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2t}{PW_{50}} \right)^2}. \quad (1.2)$$

Trong đó $w = PW_{50}$ là độ rộng xung tại một nửa biên độ đỉnh. PW_{50}/T là một đơn vị đo lường của mật độ ghi là, trong đó T là chu kỳ symbol, đây là tham số quan trọng nhất để mô tả kênh ghi từ. PW_{50}/T càng cao thì chu kỳ symbol càng ngắn do đó mật độ ghi từ càng cao. Đáp ứng bậc thang Lorentz với $PW_{50}/T=2$ được chỉ ra trong Hình 1.3.

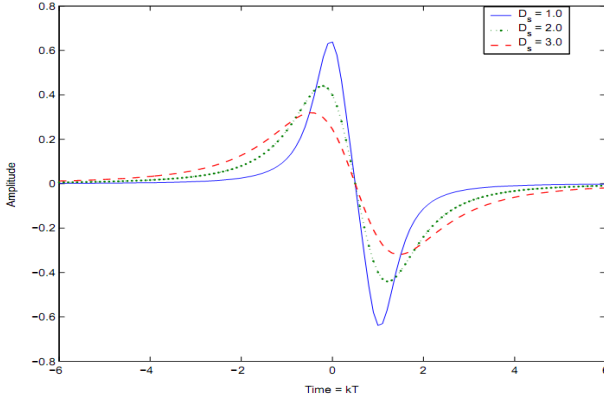
Đối với việc ghi theo phương đứng, các đáp ứng chuyển đổi được xác định bởi công thức (1.3):



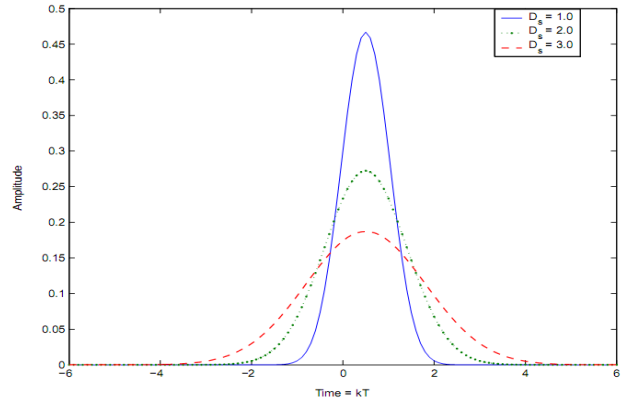
Hình 1.3: Đáp ứng bậc thang kênh Lorentz với $PW_{50}/T = 2$

$$h(t, w) = \operatorname{erf} \left(\frac{2\sqrt{\ln 2}}{PW_{50}} t \right), \quad (1.3)$$

1.1.2.2 ISI trong hệ thống ghi từ



Hình. 1.4. Đáp ứng chuyển đổi đổi với ghi từ theo phương ngang.



Hình. 1.5. Đáp ứng chuyển đổi đổi với ghi từ theo phương đứng.

Sự chồng lấn của các xung đọc liên kề là nguyên nhân gây ISI trong hệ thống ghi từ. Với một mật độ ghi $D_s = PW_{50}/T$ lớn hơn sẽ gây ra sự phân tán nhiều hơn của các xung đọc và do đó gây ra ISI lớn hơn trong hệ thống. Hình 1.4 và 1.5 cho thấy khi mật độ ghi tăng làm tăng sự phân tán của các đáp ứng xung và làm giảm cường độ tín hiệu đọc.

1.1.2.3 Mô hình tạp âm trong ghi từ

Tạp âm trong tín hiệu đọc của hệ thống ghi từ xuất hiện từ hai nguồn chính: tạp âm điện tử đến từ đầu đọc và bộ tiền khuếch đại; tạp âm môi trường tồn tại do lỗi của phương tiện ghi và do sự liên kết trong miền từ tính không hoàn hảo. Tạp âm điện tử chính là tạp âm Gauss trắng và có thể được mô hình hóa như là một thành phần thêm vào ở đầu ra của kênh ghi. Tạp âm môi trường cũng có thể được mô hình hóa như tạp âm Gauss trắng ở nguồn.

1.2 Lý thuyết Shannon cho các kênh bị ràng buộc

1.2.1 Các ràng buộc về điều chế

1.2.1.1 Các ràng buộc chiều dài dây dẫu lặp (RLL)

Để giảm ảnh hưởng của nhiễu xung thì các chuỗi đầu vào kênh bị ràng buộc ít nhất d các dấu giá trị 0 giữa các giá trị khác không liên tiếp. Để đảm bảo khôi phục đồng bộ thì yêu cầu các chuỗi có nhiều nhất k dấu giá trị 0 giữa các giá trị khác không liên tiếp.

1.2.1.2 Các ràng buộc cho kênh PRML

Thuộc tính này cho phép hạn chế chiều dài nhớ đường tách sóng và bởi vậy giảm độ trễ giải mã mà không chịu bất kỳ sự thiệt hại đáng kể nào trong việc đánh giá chuỗi được tạo ra.

1.2.1.3 Các ràng buộc phổ không

Là ràng buộc các chuỗi x đã ghi có phổ không tại một tần số đặc biệt f , tức là hàm mật độ phổ công suất trung bình của các chuỗi này có giá trị bằng 0 tại tần số đặc biệt đó.

1.2.2 Các kênh không nhiễu rời rạc

Shannon đã chứng minh rằng dung lượng C của một kênh đã bị hạn chế biểu diễn một giới hạn trên về tỷ lệ truyền tin có thể đạt được trên kênh này và việc truyền tin tin cậy tại các tỷ lệ bất kỳ nhỏ hơn dung lượng của kênh C về mặt lý thuyết là có thể đạt được.

1.3 Các kỹ thuật xử lý tín hiệu cho ghi từ

1.3.1 San bằng trong hệ thống ghi từ

San bằng tạo dạng kênh ghi cơ bản thành kênh có ràng buộc về ISI. Sau đó bộ tách sóng Viterbi được thực hiện tách sóng chuỗi hợp lí cực đại trên kênh có ràng buộc về ISI. Chất lượng xử lý tín hiệu lúc này phụ thuộc vào sự phù hợp giữa kênh ghi cơ bản và ISI mục tiêu được ràng buộc. Tuy nhiên san bằng tốt nhất và tách sóng chuỗi hợp lí cực đại

không đạt được giới hạn của bộ lọc phối hợp, để đạt được chất lượng tốt hơn thì phải kết hợp với mã hoá.

1.3.2 Mã hoá cho ghi từ

Mã hoá cung cấp khả năng sửa lỗi tại máy thu bằng cách thêm phần dư vào chuỗi dữ liệu sử dụng để đạt được sự phân tách chuỗi dữ liệu tốt hơn. Tuy nhiên khi mã hóa làm tăng mật độ ghi và điều này gây ra tăng ISI và làm suy giảm tỷ số SNR, do đó rất khó để áp dụng mã hoá cho ghi từ bởi vì tăng ích mã hoá cần phải đủ lớn để bù được các suy hao do tăng tỷ lệ mã.

1.3.3 Các bộ tách sóng cho các kênh không mã.

1.3.3.1 Tách sóng đỉnh

Bộ tách sóng đỉnh lấy vi phân tín hiệu đọc và xác định các khoảng thời gian mà trong khoảng thời gian đó xuất hiện việc đảo giá trị 0. Song song với việc đó, biên độ của mỗi điểm cực tương ứng trong tín hiệu đọc được so sánh với ngưỡng đặt trước và nếu không vượt qua ngưỡng này thì việc đảo giá trị 0 được bỏ qua, việc vượt ngưỡng chỉ ra là có một đỉnh.

1.3.3.2 San bằng đáp ứng xung một phần kết hợp với tách sóng chuỗi hợp lí cực đại (PRML)

Khác với phương pháp tách sóng đỉnh, phương pháp tách sóng PRML xây dựng lại dãy đã được ghi trên cơ sở các giá trị lấy mẫu của tín hiệu đọc được san bằng ổn định với các mẫu đo được tại các thời điểm $t = kT, (k > 0)$.

1.3.4 Dung lượng kênh ghi

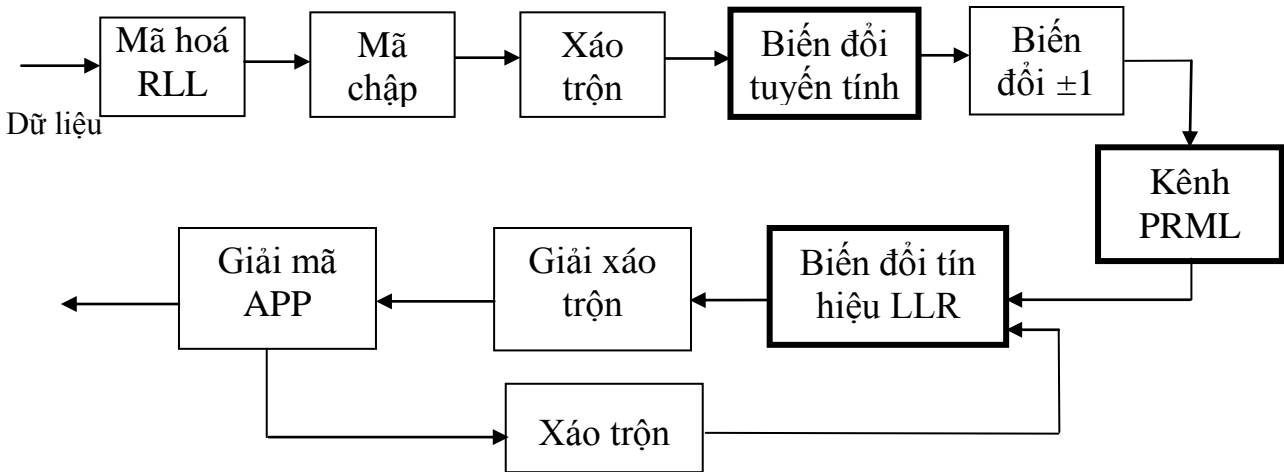
1.3.4.1 Các mô hình kênh liên tục theo thời gian

$$C_{av} = W \log \frac{P + N}{N} \text{ (bit/sec)} \quad (1.15)$$

1.3.4.2 Các mô hình kênh rời rạc theo thời gian

$$C_{av} = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \right) \text{ (bit/symbol)} \quad (1.16)$$

1.4 Sơ đồ khối hệ thống ghi từ



Hình 1.13: Sơ đồ ghi từ ứng dụng nguyên lý BICM-ID

Sơ đồ ghi từ mới được đề xuất trong luận án như trên Hình 1.13, việc ước lượng kênh được thực hiện trong mô hình kênh PRML, bởi vậy bộ mã hoá vòng ngoài, bộ xáo trộn bit và bộ điều chế có thể được tối ưu hoá, việc ước lượng kênh chỉ thực hiện một lần do đó độ phức tạp tính toán nhỏ hơn trong sơ đồ san bằng Turbo. Sơ đồ Hình 1.13 chỉ khác các sơ đồ ghi từ PRML đang sử dụng là có thêm một khối **Biến đổi tuyến tính** ở phần ghi, còn ở phần đọc thêm một khối **Biến đổi tín hiệu LLR**. Chính điều này cho phép áp dụng nguyên lý này cho tất cả các sơ đồ ghi từ theo mô hình kênh PRML mà không phải can thiệp vào phần cứng.

1.5 Đặt vấn đề nghiên cứu

Thứ nhất: Xác định một lớp các ánh xạ cho phép đơn giản hoá việc thiết kế và đánh giá hệ thống BICM-ID.

Thứ hai: Đề xuất một phương án áp dụng nguyên lý xử lý tín hiệu của sơ đồ BICM-ID cho ghi từ trên cơ sở coi véc-tơ của m dấu nhị phân $\{\pm 1\}$ liên tiếp như là một điểm trong tập tín hiệu đa chiều, đa điểm.

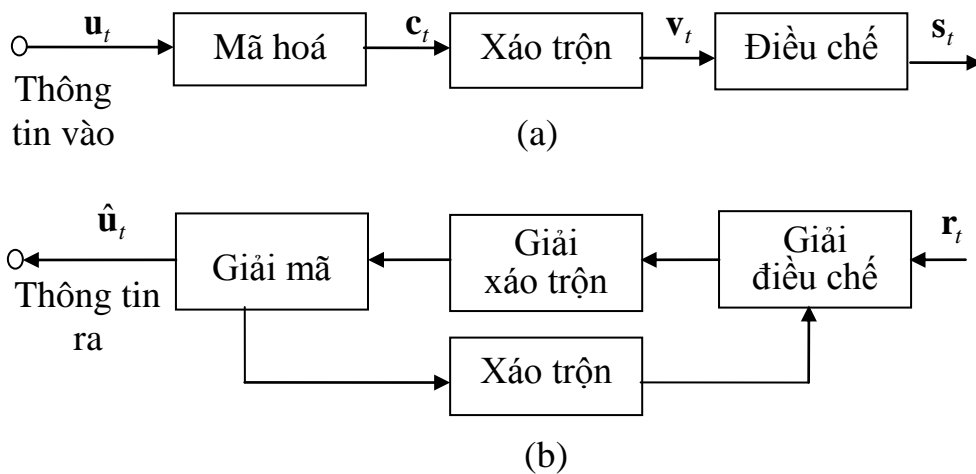
Thứ ba: Trình bày phương pháp và kết quả tìm kiếm vét cạn các cặp mã - ánh xạ tốt nhất cho sơ đồ BICM-ID điều chế đa chiều.

Thứ tư: Đề xuất sử dụng hệ số chuẩn hoá SF cho hệ thống BICM-ID điều chế đa chiều để giảm độ phức tạp tính toán của hệ thống.

Chương 2: HỆ THỐNG BICM-ID VÀ CÁC ÁNH XẠ NHẤT DẠNG HÌNH HỌC MỨC BIT BGU

2.1 Sơ đồ điều chế mã có xáo trộn bit và giải mã lặp (BICM-ID)

2.1.1 Giới thiệu chung



Hình 2.4: Sơ đồ khối hệ thống BICM-ID. Đầu phát (a) và đầu thu (b)

2.1.2 Các yếu tố ảnh hưởng tới chất lượng của hệ thống BICM-ID

Chất lượng của hệ thống BICM-ID phụ thuộc vào bộ mã chập, bộ xáo trộn bit, bộ tín hiệu và kỹ thuật ánh xạ từ chuỗi bit lên bộ tín hiệu. Các nghiên cứu trước đây cố gắng tìm ra mã chập, ánh xạ và bộ xáo trộn tốt nhất cho sơ đồ BICM-ID, trong bản Luận án này nghiên cứu chọn mã và bộ xáo trộn tối ưu theo bộ tín hiệu và bộ ánh xạ.

2.2 Các ánh xạ GU dùng trong hệ thống BICM-ID

2.2.1 Giới thiệu chung về ánh xạ nhất dạng hình học (GU)

Tính tuyến tính của các hệ thống mã kết hợp với tính đối xứng của các chòm sao tín hiệu là cơ sở để đưa ra khái niệm tính chất xác suất lỗi đều (UEP), từ đó cho phép phân tích và thiết kế các mã hệ thống đệ quy một cách đơn giản do chỉ cần khảo sát một chuỗi tín hiệu toàn 0 là đủ để đánh giá toàn bộ các phẩm chất của mã.

Trong mục này luận án sẽ giới thiệu khái niệm mới nhất dạng hình học mức bit BGU trên cơ sở dùng thuật toán giải mã lặp ID với giả thiết rằng có hồi tiếp hoàn hảo. Các ánh xạ BGU mới cho phép ước lượng và phân tích một cách đơn giản phẩm chất của hệ thống BICM-ID.

2.2.2 Các ánh xạ nhất dạng hình học mức bit BGU

Xét một tập hữu hạn $S = \{s_0, s_1, \dots, s_{M-1}\}$ gồm M điểm tín hiệu ($M = 2^m$). Giả sử rằng mọi điểm tín hiệu có xác suất truyền như nhau qua kênh Gauss (AWGN). Tỷ lệ lỗi dấu (SER) trung bình với giải mã hợp lý cực đại (ML) là: $P_e(S) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} P_e(s_i)$, trong đó xác suất lỗi dấu là $P_e(S)$, khi $s_T = s_i$ được truyền đi và thu được s_R , thì $P_e(s_i) = P[s_R \neq s_T / s_T = s_i]$.

Định nghĩa 1: Một tập tín hiệu S được gọi là thoả mãn tính chất xác suất lỗi đều nếu xác suất lỗi dấu SEP với giải mã dấu theo giải thuật ML không phụ thuộc vào tín hiệu đã phát đi, nghĩa là $P_e(s_i)$ như nhau với mọi $s_i \in S$.

Định nghĩa 2: Một phép gán nhãn nhị phân $\mu[S, m]$ cho chòm sao tín hiệu S được gọi là thoả mãn tính chất xác suất lỗi bit đều (UBEP) nếu xác suất lỗi bit với giải mã hợp lý cực đại ML không phụ thuộc vào

tín hiệu đã được truyền đi, tức là $P_b(s_T = s_i)$ giống nhau đối với mọi tín hiệu $s_i \in S$.

Định nghĩa 3: Cho $\mu_{[S,m]}$ là một phép gán nhãn nhị phân của chòm tín hiệu nhất dạng hình học S với nhóm sinh G_S . Ánh xạ μ có tính chất xác suất lỗi bit đều (UBEP) nếu thoả mãn điều kiện sau:

$$d_H(\mu(g_i), \mu(g_j)) = w_H(\mu(g_i^{-1} \cdot g_j)) \quad \forall g_i, g_j \in G_S$$

2.2.3 Đề xuất cấu trúc mới cho phép gán nhãn BGU

Một phép gán nhãn nhị phân $\mu_{[S,m]}$ cho một chòm sao tín hiệu S là một ánh xạ nhất dạng hình học mức bit theo nghĩa rộng (Wide-Sense BGU), nếu với mỗi $j \in \{1, \dots, m\}$ mà cự ly bit không phụ thuộc vào điểm tín hiệu, nghĩa là $d_E(s_i, j)$ như nhau với mọi tín hiệu s_i , hay $d_E(s_i, j) = d_E^j$.

Nhận xét 1: Theo giả thiết BGU và IF thì phẩm chất BER của hệ thống BICM-ID ở vùng sàn lỗi tương đương với phẩm chất của thuật toán giải mã hợp lí cực đại ML của thành phần mã hệ thống đệ quy trên kênh AWGN với điều chế BPSK có tỷ số tín trên tạp tương đương là:

$$\frac{E_b}{N_0^*} = \frac{1}{4RN_0} \sum_{j=1}^m (d_E^j)^2$$

Nhận xét 2: Tính tuyến tính của mã và phép gán nhãn BGU của chòm sao tín hiệu (theo *Định nghĩa 3*) khẳng định rằng hệ thống BICM-ID đang xét có tính chất xác suất lỗi bit đều (UBEP).

2.3 Xây dựng mã

2.3.1 Các cận trên và tiêu chí thiết kế

2.3.1.1 Cận trên xác suất lỗi bit của hệ thống BICM-ID với xáo trộn toàn bộ dòng bit

Với giả thiết hồi tiếp lý tưởng và ánh xạ BGU, xác suất lỗi bit của hệ thống có cận trên như sau:
$$P_b < \frac{1}{k} \frac{\partial T(D, I, L)}{\partial I} \Big|_{I=1, L=1} \quad (2.6)$$

trong đó D là biến hình thức:
$$D = \exp \left\{ -\frac{1}{4N_0} \sum_{j=1}^m (d_E^j)^2 \right\} \quad (2.7)$$

Giới hạn (2.6) thuộc một lớp được gọi là các đường cận trên của hàm truyền, như vậy có thể áp dụng các kỹ thuật làm chặt và tính toán bằng số. Mặt khác đường bao (2.7) chỉ khác với đường bao truyền thống Viterbi ở chỗ phải tính toán biến hình thức D , chính xác hơn là trong thành phần lũy thừa có tỉ số tín trên tạp (SNR).

Đồ thị mô tả trên Hình 2.8 thể hiện đường cận trên khi mô phỏng hệ thống BICM-ID với các mã hệ thống độ quy 4 trạng thái và 64 trạng thái. Các đường bao có biến điệu tương tự như các kết quả mô phỏng và tiệm cận tốt về BER ở các tỷ số tín trên tạp cao.

2.3.1.2 Cận trên xác suất lỗi bit của hệ thống BICM-ID với xáo trộn từng dòng bit

Xét ánh xạ 4-PSK, ta có $M=4$, $m=2$, sử dụng mã RSC tỷ lệ 1/2. Tại mỗi thời điểm t , ký hiệu c_t^s và c_t^p lần lượt là bit hệ thống và bit kiểm tra. Sẽ không mất đi tính tổng quát nếu ta gán bit hệ thống c_t^s có cự ly d_E^1 với bit kiểm tra c_t^p có cự ly bit là d_E^2 . Xét một sự kiện lỗi có độ dài L cùng với dãy bit nhị phân: $C_L = c_1^s c_1^p, c_2^s c_2^p, \dots, c_L^s c_L^p$

Ta có $W_H(C_L) = W_H(C_L^s) + W_H(C_L^p)$, trong đó C_L^s và C_L^p lần lượt là dãy bit tin và dãy bit kiểm tra. Khi truyền qua các kênh nhị phân tương đương, chuỗi sự kiện lỗi là bình phương cự ly Euclid đến nhánh mã toàn 0:

$$\begin{aligned}(d_L)^2 &= W_H(C_L^s)(d_E^1)^2 + W_H(C_L^p)(d_E^2)^2 \\ &= W_H(C_L) \frac{(d_E^1)^2 + (d_E^2)^2}{2} + \frac{[W_H(C_L^s) - W_H(C_L^p)][(d_E^1)^2 - (d_E^2)^2]}{2}\end{aligned}$$

Có thể thấy rằng trong biểu thức trên, số hạng thứ nhất là bình phương trung bình cự ly Euclid của các sự kiện lỗi khi sử dụng bộ xáo trộn tổng thể. Nếu bộ mã hoá phù hợp với ánh xạ của chòm sao tín hiệu thì số hạng thứ hai của biểu thức mang dấu dương và đó chính là tăng ích của hệ thống. Với giả thiết có hồi tiếp lý tưởng và ánh xạ BGU thì xác suất lỗi bit của hệ thống có cận trên xác định như sau:

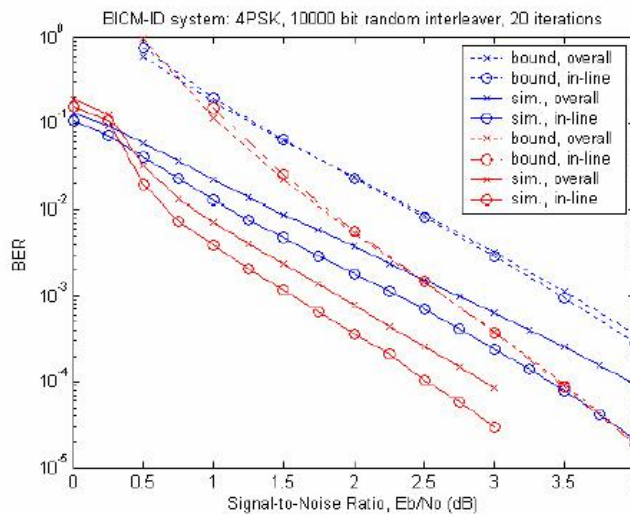
$$P_b < \sum_{L=L_{\min}}^{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} W_H(C_{L,i}^s) D^{W_H(C_{L,i}^s)(d_E^1)^2 + W_H(C_{L,i}^p)(d_E^2)^2} \quad (2.9)$$

trong đó N_L là số sự kiện lỗi kích thước L và $D = \exp\{-1/(2N_0)\}$.

2.3.1.3 Tiêu chí thiết kế

Tiêu chí thiết kế hệ thống BICM-ID là cực tiểu hoá vế phải của công thức (2.6) cho trường hợp xáo trộn toàn bộ dòng bit và vế phải công thức (2.9) cho trường hợp xáo trộn từng dòng bit.

2.3.2 Kết quả xây dựng mã



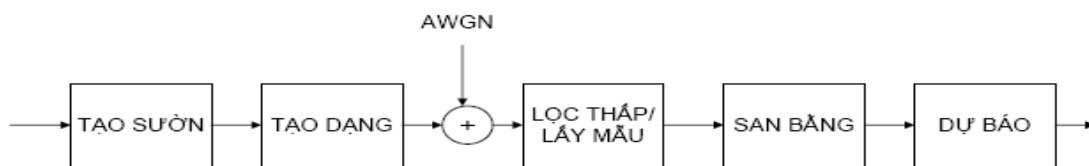
Hình 2.8 Các kết quả mô phỏng và đường cận trên xác suất lỗi bit
Màu xanh: Mã RSC [1,5/7]; Màu đỏ: Mã RSC [1,35/23]

Đường bao (2.9) đã được tính bằng số, việc tìm kiếm được thực hiện với ánh xạ SP-A và SP-B. Mã kênh tốt nhất tìm được cho hai ánh xạ này được so sánh với nhau để nhận được kết hợp tốt nhất giữa mã RSC và ánh xạ theo nghĩa cho giá trị đường bao thấp hơn (2.9). Với tín hiệu 4PSK có thể thấy rằng ánh xạ SP-A luôn luôn nâng cao chất lượng của hệ thống. Các kết quả mô phỏng thể hiện trên Hình 2.8.

Tóm lại: Kết quả chính của chương 2 là đã xác định được một lớp các ánh xạ cho phép đơn giản hoá việc phân tích và đánh giá hệ thống BICM-ID. Cận trên xác suất lỗi bit mới của hệ thống BICM-ID đã được đề xuất dựa trên cơ sở cụ li bit của bộ tín hiệu. Đề xuất một tiêu chuẩn thiết kế các cặp mã hoá - ánh xạ tốt nhất cho sơ đồ BICM-ID, cụ thể xét cho trường hợp mã chập RSC tỷ lệ 1/2 và bộ tín hiệu 4PSK. Có thể nhận thấy rằng sự kết hợp giữa bộ mã hoá với bộ ánh xạ đã mang lại hiệu quả tốt cho hệ thống BICM-ID với xáo trộn từng dòng.

Chương 3: ỨNG DỤNG NGUYÊN LÝ BICM-ID CHO GHI TỪ

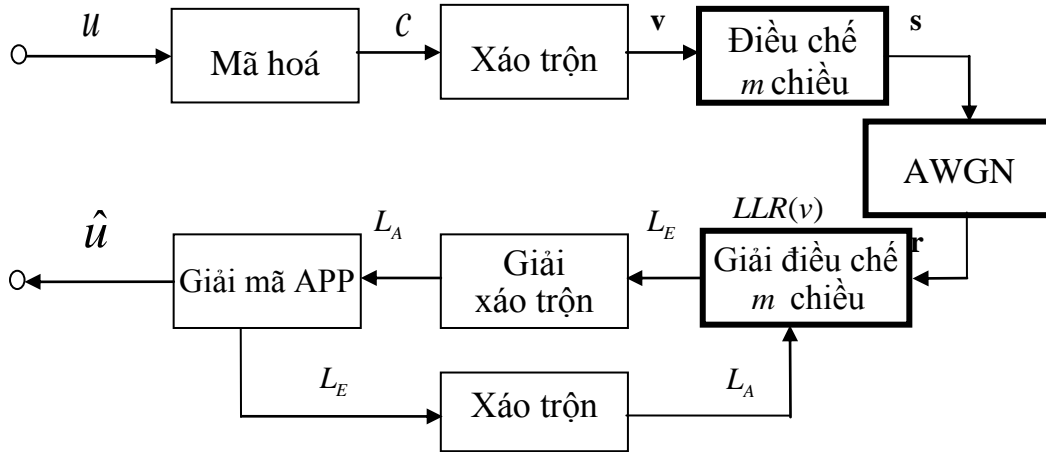
3.1 Mô hình hệ thống sử dụng BICM – ID cho kênh ghi từ



Hình 3. 1. Mô hình kênh ghi từ PRML

Hình 3.1 mô tả hệ thống xử lý hợp lý cực đại cho đáp ứng xung một phần (PRML) đối với cả ghi từ phương ngang và phương đứng. Đối với mô hình kênh ghi từ PRML trên Hình 3.1, khi chiều dài của bộ san bằng và dự báo đủ lớn thì nhiễu tổng cộng trên đầu ra của kênh ghi có thể làm gần đúng AWGN. Bởi vậy chúng ta có thể xem hệ thống ghi từ

bao gồm bộ mã hoá vòng ngoài RSC, bộ xáo trộn bit và bộ điều chế đa mức như là hệ thống BICM-ID với kênh AWGN ở phía thu sử dụng bộ giải mã lặp, giải điều chế lặp.



Hình 3.2 Sơ đồ khối hệ thống ghi từ tương đương hệ thống BICM-ID

Trong chương này mô hình kênh ghi từ PRML bị ảnh hưởng bởi ISI có thể coi tương đương như kênh AWGN, bởi vậy bộ mã hoá vòng ngoài, bộ xáo trộn bit và bộ điều chế có thể được tối ưu hoá, nói cách khác hệ thống BICM-ID sẽ cho BER thấp tại vùng sàn lỗi.

3.2 Ánh xạ lên tập tín hiệu đa chiều

Trước hết, xét ánh xạ SP của chòm sao tín hiệu m chiều tạo thành từ các véc-tơ $s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, $s_i = \pm 1$. Hình 3.3 cho thấy hai ma trận kích thước $m \times m$ tạo từ các phần tử của trường Ga-loa GF(2). Ma trận A là một ma trận đơn vị, còn ma trận B_{SP} là ma trận tam giác trên. Rất dễ thấy rằng các dòng của A , cũng như của B_{SP} , đều tạo thành cơ sở của không gian tuyến tính m chiều chứa toàn bộ các véc-tơ nhị phân dài m . Hơn nữa, B_{SP} là kết quả biến đổi tuyến tính của A . Nếu ta ký hiệu $\mathbf{a}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$ là véc-tơ tạo bởi hàng thứ i , $1 \leq i \leq m$, của ma trận A thì véc-tơ hàng thứ i , $1 \leq i \leq m$ của ma trận B_{SP} được tính như sau (phép cộng véc-tơ theo mô-đun 2 trong GF(2)):

$$\mathbf{b}_i = \sum_{k=i}^m \mathbf{a}_k \quad (3.7)$$

Định nghĩa phép ánh xạ $\mu_{SP} : \mathbf{c} \rightarrow \mathbf{s}$ như sau. Trước hết ta biểu diễn nhị phân $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ bởi một tổ hợp tuyến tính các véc-tơ hàng của

$$A: \quad \mathbf{c} = \sum_{i=1}^m c_i \mathbf{a}_i \quad (3.8)$$

Sử dụng một ánh xạ phụ 1:1 từ các véc-tơ dòng của A và các véc-tơ dòng của B_{SP} , cụ thể là $\mathbf{a}_j \rightarrow \mathbf{b}_j$, $1 \leq j \leq m$, ta có ánh xạ từ nhị phân \mathbf{c}

$$\text{vào véc-tơ điều chế} \quad \mathbf{d} = \sum_{i=1}^m c_i \mathbf{b}_i \quad (3.9)$$

Cuối cùng, véc-tơ tín hiệu tương ứng được xác định bằng

$$\mathbf{s} = (2\mathbf{d} - 1) \quad (3.10)$$

Chúng ta thấy rằng véc-tơ tín hiệu được hoàn toàn xác định bởi véc-tơ điều chế, nên phép ánh xạ được hoàn toàn xác định bởi (3.9). Nói cách khác, thực tế ta có phép ánh xạ $\mu_{SP} : \mathbf{c} \rightarrow \mathbf{d}$. Dựa vào tính tuyến tính của phép ánh xạ này, có thể chứng minh Bổ đề sau:

Bổ đề 1: Phép ánh xạ SP μ_{SP} được định nghĩa như trên đối với chòm sao tín hiệu m chiều tạo thành từ các véc-tơ $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, $s_i = \pm 1$ là ánh xạ có tính chất BGU với Hồ sơ cự ly bit bit là $DP(\mu_{SP}) = \{m, m-1, \dots, 1\}$.

Chứng minh: Xét vị trí bit i bất kỳ, $1 \leq i \leq m$. Giả sử \mathbf{s} và \mathbf{s}^\dagger là cặp tín hiệu tương ứng với cặp nhị phân \mathbf{c} và \mathbf{c}^\dagger , thỏa mãn $c_i \oplus c_i^\dagger = 1$ và $c_j \oplus c_j^\dagger = 0$ với mọi $j \neq i$. Theo (3.10), dễ thấy rằng $\|\mathbf{s} - \mathbf{s}^\dagger\|^2 = 4W_H(\mathbf{d} \oplus \mathbf{d}^\dagger)$,

với $W_H(\mathbf{x})$ là trọng số Hamming của véc-tơ nhị phân \mathbf{x} . Ta có $\mathbf{d} = \sum_{i=1}^m c_i \mathbf{b}_i$,

$\mathbf{d}^\dagger = \sum_{i=1}^m c_i^\dagger \mathbf{b}_i$ và $W_H(\mathbf{d} \oplus \mathbf{d}^\dagger) = W_H(\mathbf{b}_i) = m - i + 1$, đúng với i bất kỳ, $1 \leq i \leq m$, và

với tín hiệu \mathbf{s} bất kỳ. Đây là điều phải chứng minh.

Tương tự, xét B_{AG} là ma trận nhận được bằng cách biến đổi ma trận A như sau (xem Hình 3.3) $\mathbf{b}_i = \mathbf{1} \oplus \mathbf{a}_i$, $2 \leq i \leq m$ và $\mathbf{b}_1 = \mathbf{1} \oplus \mathbf{a}_1 \oplus \mathbf{a}_1 = \mathbf{1}$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad B_{SP} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad B_{AG} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Hình 3.3 Các ma trận dùng để định nghĩa ánh xạ SP và Phản Gray

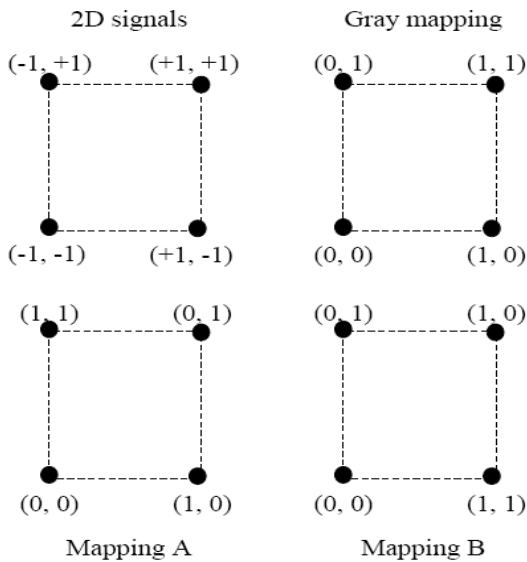
Định nghĩa phép ánh xạ $\mu_{AG} : c \rightarrow s$ từ nhãn nhị phân $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ vào tín hiệu s tính theo (3.10) với phép ánh xạ thực tế $\mu_{AG} : c \rightarrow d$ được xác định bởi:

$$d = \sum_{i=1}^m c_i b_i, \quad b_i \in B_{AG} \quad (3.11)$$

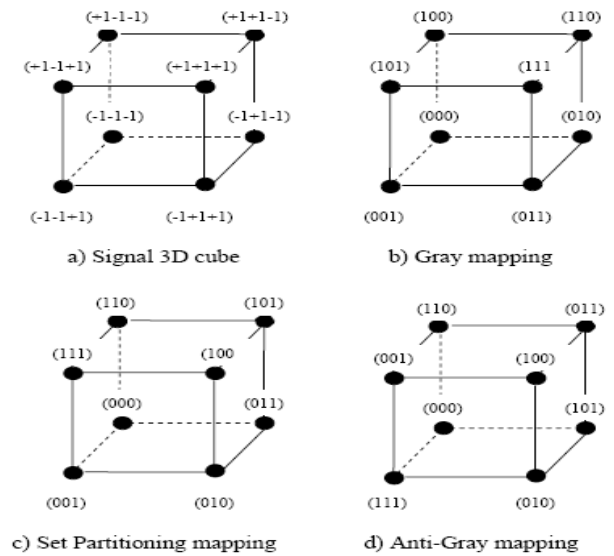
Sử dụng phương pháp như áp dụng với ánh xạ SP, ta chứng minh được Bổ đề sau.

Bổ đề 2: Phép ánh xạ Phản Gray μ_{AG} được định nghĩa như trên đối với chòm sao tín hiệu m chiều tạo thành từ các véc-tơ $s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, $s_i = \pm 1$ là ánh xạ có tính chất BGU với Hồ sơ cự ly bit bit là $DP(\mu_{AG}) = \{m, m-1, \dots, m-1\}$.

3.3 Tiêu chí thiết kế và xây dựng hệ thống



Hình 3.4 Các ánh xạ của tín hiệu 2D.



Hình 3.5 Các ánh xạ của tín hiệu 3D

Hình 3.4 mô tả một ví dụ về chòm sao tín hiệu 2D đối với $m=2$. Ngoài ánh xạ Gray, thì ánh xạ A và ánh xạ B là ánh xạ SP. Hai ánh xạ này có hồ sơ cự ly bit khác nhau, tức là $DP(A) = (4, 8)$ và $DP(B) = (8, 4)$. Mặc

dù hai ánh xạ này có cự ly bit trung bình giống nhau, tuy nhiên với xáo trộn từng dòng bit cho chất lượng khác nhau.

Hình 3.5 trình bày ví dụ chòm sao tín hiệu 3D đối với $m=3$. Ngoài ánh xạ Gray và ánh xạ SP ta sử dụng ánh xạ Anti-Gray.

Xét hệ thống BICM-ID sử dụng mã chập nhị phân tỷ lệ b/c truyền trên kênh AWGN với mật độ phổ công suất một phía N_0 . Xét một sự kiện lỗi có chiều dài L được liên kết với chuỗi nhị phân.

$C_L = c_1^1 c_1^2 \dots c_1^m, c_2^1 c_2^2 \dots c_2^m, \dots, c_L^1 c_L^2 \dots c_L^m$. Với $w_H(C_L)$ và $w_H(C_L^j)$ tương ứng là trọng số Hamming chuỗi thông tin và trọng số Hamming của chuỗi bit kiểm tra c_L^j . Trong trường hợp dán nhãn đều và hồi tiếp lý tưởng, tỷ lệ lỗi bit BER của hệ thống được giới hạn trên như sau:

$$P_b < \frac{1}{b} \sum_{L=L_{\min}}^{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} B_{L,i} D^{d_{eq}^2}. \quad (3.12)$$

Trong đó N_L là số lượng sự kiện lỗi có chiều dài L , $B_{L,i}$ là trọng số bit thông tin của sự kiện lỗi thứ i có chiều dài L , D là biến hình thức và $D = \exp\{-m/(4N_0)\}$. Bình phương cự ly Euclid tương đương d_{eq}^2 phụ thuộc vào loại xáo trộn vị trí bit được sử dụng. Với xáo trộn toàn bộ dòng bit:

$$d_{eq}^2 = W_H(C_L) \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m d_j^2 \right). \quad (3.13)$$

Với xáo trộn từng dòng bit: $d_{eq}^2 = \sum_{j=1}^m W_H(C_{L,i}^j) d_j^2$. (3.14)

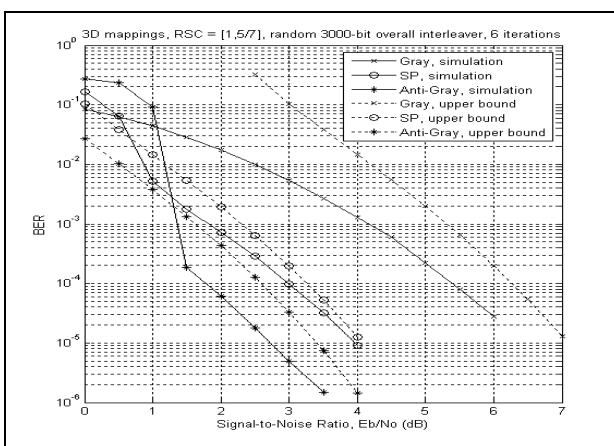
Tiêu chuẩn thiết kế hệ thống BICM-ID cho ghi từ là cực tiểu hoá vế phải của công thức (3.12). Nếu mã chập nhị phân phù hợp với việc dán nhãn chòm sao tín hiệu để cho d_{eq}^2 trong công thức (3.14) là lớn nhất đối với tất cả các sự kiện lỗi thì chúng ta có thể cực tiểu hoá vế phải của công thức (3.12).

Bởi vậy hệ thống BICM-ID với xáo trộn từng dòng sử dụng cho ghi từ, chúng ta xây dựng hệ thống với chòm sao tín hiệu 2D, 3D và 4D như sau. Với số trạng thái xác định, đầu tiên chúng ta chọn bộ mã hoá tốt nhất tỷ lệ 1/2 cho điều chế 2D và thực hiện Puncture để tạo ra mã tỷ lệ 2/3 và 3/4 cho điều chế 3D và 4D. Giá trị tính toán của (3.12) được sử dụng để ước lượng BER. Cấu hình của bộ mã hoá, ma trận Puncture và ánh xạ cho BER nhỏ nhất tại tỷ lệ SNR xác định được như ở bảng 3.4.

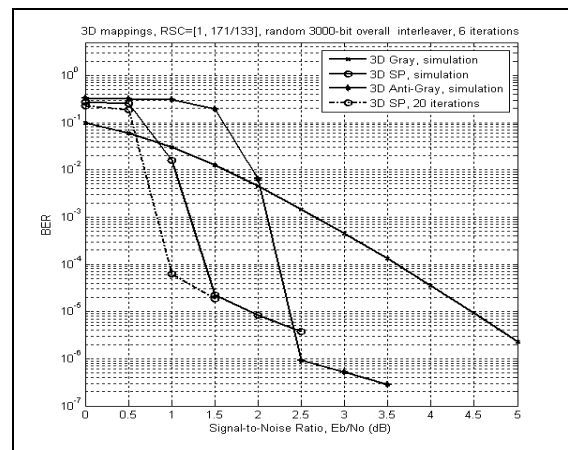
Bảng 3.4 Cấu hình hệ thống BICM-ID cho ghi từ

Số trạng thái	Rate-1/2 RSC codes		Rate-2/3 punctured codes		Rate-3/4 punctured codes	
	$G = [1, g_2 / g_1]$	Các ánh xạ	P	Các ánh xạ	P	Các ánh xạ
4	[1, 5/7]	2D, 3D, 4D (Gray, SP, Anti-Gray)	[1101]	3D (Gray, SP, Anti-Gray)	[101101]	4D (Gray, SP, Anti-Gray)
16	[1, 33/23]	2D, 3D, 4D (Gray, SP, Anti-Gray)	[1101]	3D (Gray, SP, Anti-Gray)	[011011]	4D (Gray, SP, Anti-Gray)
64	[1, 171/133]	2D, 3D, 4D (Gray, SP, Anti-Gray)	[1101]	3D (Gray, SP, Anti-Gray)	[100111]	4D (Gray, SP, Anti-Gray)

3.4 Phân tích kết quả mô phỏng



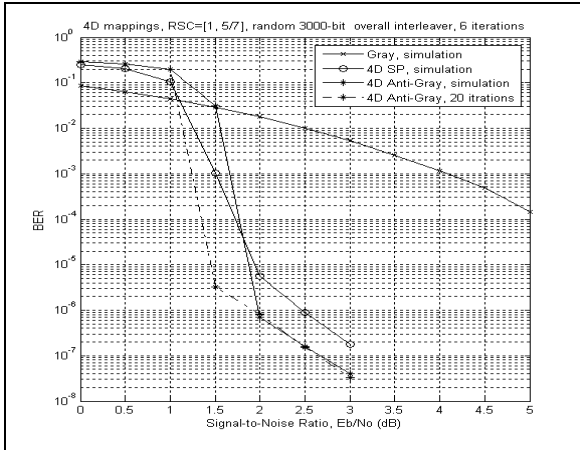
Hình 3.6 Mô phỏng 3D với mã RSC 4 trạng thái tỷ lệ 1/2



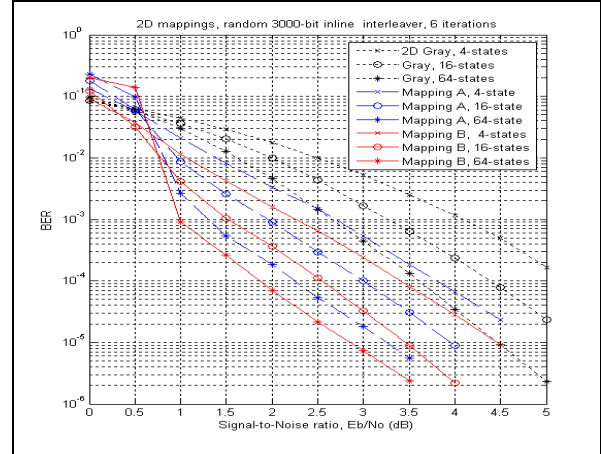
Hình 3.8 Mô phỏng 3D với mã RSC 64 trạng thái tỷ lệ 1/2

Hình 3.6, 3.8 chúng ta có thể khẳng định rằng các đường mô phỏng xác suất lỗi bit giống với các đường biên và nó tiệm cận với đường biên

khi tỷ số SNR lớn. Cả ánh xạ SP và ánh xạ Anti-Gray cho tăng ích mã hoá lớn so với ánh xạ Gray khoảng 2.5~3.0 dB. Từ Hình 3.8 chúng ta thấy hệ thống đạt tới vùng sàn lỗi nhanh hơn khi tăng số vòng lặp.

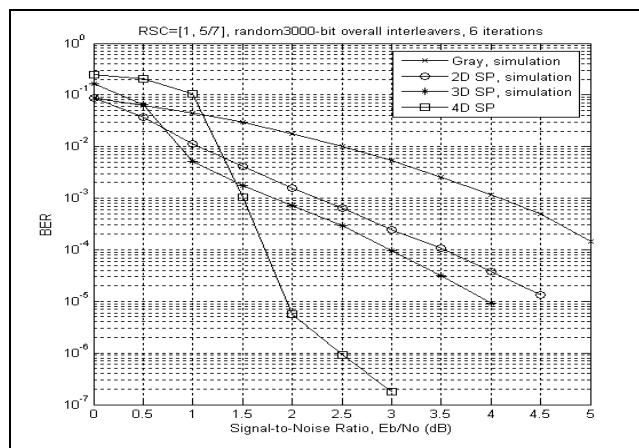


Hình 3.9 Mô phỏng 4D với mã RSC 4 trạng thái tỷ lệ 1/2



Hình 3.15 Mô phỏng 2D với mã RSC tỷ lệ 1/2

Kết quả trên Hình 3.9 tương đương như trường hợp điều chế 3D, chỉ khác là các đường cong BER trong trường hợp 4D thấp hơn trường hợp 3D ở vùng sàn lỗi. Tăng ích mã hoá của hệ thống điều chế 4D so với trường hợp điều chế truyền thống khoảng 3.5~4.0 dB.



Hình 3.19 Kết quả mô phỏng với mã RSC 4 trạng thái tỷ lệ 1/2 ,ánh xạ SP

Hình 3.15 trình bày kết quả mô phỏng với ánh xạ SP (ánh xạ A và ánh xạ B trong Hình 3.4) cho độ lợi mã hoá khoảng 1~2dB so với ánh xạ Gray. Tuy nhiên khi hệ thống BICM-ID sử dụng xáo trộn từng dòng bit, thì ánh xạ B cho kết quả tốt hơn ánh xạ A.

Hình 3.19 so sánh hiệu quả của chòm sao tín hiệu trong các không gian 1D (Gray), 2D, 3D, 4D sử dụng ánh xạ SP, từ kết quả này ta có thể nhận ra rằng tăng ích mã hoá tăng cùng với số chiều điều chế.

3.5 Phương pháp và kết quả tìm vết cận cặp máy mã – ánh xạ tốt nhất cho sơ đồ BICM_ID điều chế đa chiều.

Mục 3.2 đã chứng minh các ánh xạ SP và Phản Gray có tính chất BGU. Điều này tạo điều kiện cho phương pháp tìm vết cận cặp Máy mã - Ánh xạ như sẽ trình bày dưới đây. Kết quả tìm kiếm cho trường hợp điều chế 2D đã được tiến hành ở mục 2.3, vì vậy trong phần này luận án chỉ tiến hành tìm kiếm cho trường hợp 3D và 4D. Chương trình tìm kiếm được viết cho môi trường MATLAB và thực hiện các bước sau:

1. *Chuẩn bị các tham số:* Cho trước số chiều m (3D hoặc 4D), phép ánh xạ (SP hoặc Phản Gray), số trạng thái của máy mã (từ 4 đến 128), chiều dài của mẫu đột lỗ (là 4 cho 3D và 6 cho 4D), và giá trị SNR nằm trong vùng sàn lỗi (thông thường là 5dB).

2. *Ước lượng tỷ lệ lỗi bit:* Với mỗi máy mã, mỗi mẫu đột lỗ và Hồ sơ cụ ly bit, tính cận trên đối với xác suất lỗi bit tại giá trị SNR cho trước.

3. *Tìm vết cận:* Quét tất cả các máy mã có thể với số trạng thái cho trước, quét tất cả các mẫu đột lỗ có thể đối với tỷ lệ mã hóa tổng thể cho trước, quét tất cả các phương án xáo trộn các giá trị trong Hồ sơ khoảng cách để tìm cặp máy mã (bao gồm cả mẫu đột lỗ) - ánh xạ cho giá trị ước lượng tỷ lệ lỗi bit nhỏ nhất.

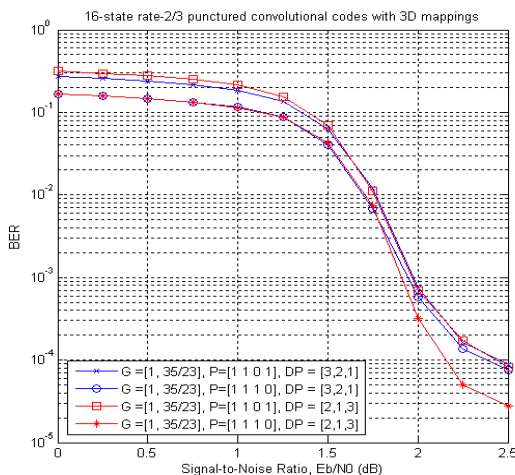
Kết quả tìm kiếm được ghi trong Bảng 3.5 và Bảng 3.6, tương ứng cho điều chế 3D và 4D. Trong các bảng này, $G=[1, g_2/g_1]$ là đa thức sinh của máy mã RSC, P là mẫu đột lỗ và DP là Hồ sơ cụ ly bit.

Bảng 3.5. Cặp máy mã - ánh xạ tốt nhất cho điều chế 3 chiều

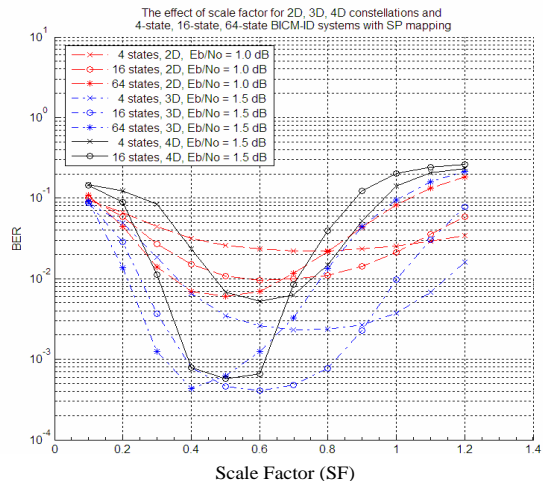
# states	Ánh xạ phân hoạch tập			Ánh xạ Anti-Gray		
	G	P	DP	G	P	DP
4	[1, 5/7]	[1 1 1 0]	{2,1,3}	[1, 5/7]	[1 1 1 0]	{3, 2, 2}
8	[1, 13/15]	[1 1 1 0]	{2,1,3}	[1, 13/15]	[1 1 1 0]	{3, 2, 2}
16	[1, 35/23]	[1 1 1 0]	{2,1,3}	[1, 33/31]	[1 1 1 0]	{2, 2, 3}
32	[1, 51/73]	[1 1 1 0]	{3,1,2}	[1, 51/73]	[1 1 1 0]	{3, 2, 2}
64	[1, 121/173]	[1 1 1 0]	{2,1,3}	[1, 135/163]	[1 1 1 0]	{2, 2, 3}
128	[1, 273/315]	[1 1 1 0]	{3,1,2}	[1, 225/373]	[1 1 1 0]	{3, 2, 2}

Bảng 3.6. Cặp máy mã – ánh xạ tốt nhất cho điều chế 4 chiều

# states	Ánh xạ phân hoạch tập			Ánh xạ Anti-Gray		
	G	P	DP	G	P	DP
4	[1, 5/7]	[1 1 0 1 1 0]	{2, 1, 3, 4}	[1, 5/7]	[1 1 0 1 1 0]	{3, 3, 3, 4}
8	[1, 17/15]	[1 1 1 0 1 0]	{2, 1, 3, 4}	[1, 15/17]	[1 1 0 1 1 0]	{3, 3, 3, 4}
16	[1, 23/31]	[1 1 1 0 1 0]	{3, 2, 1, 4}	[1, 25/31]	[1 1 1 0 1 0]	{3, 3, 4, 3}
32	[1, 53/75]	[1 1 1 0 1 0]	{2, 1, 3, 4}	[1, 43/65]	[1 1 1 0 1 0]	{3, 4, 3, 3}
64	[1, 147/131]	[1 1 1 0 1 0]	{3, 1, 4, 2}	[1, 135/163]	[1 1 1 0 1 0]	{3, 3, 3, 4}
128	[1, 221/323]	[1 1 1 0 1 0]	{2, 1, 3, 4}	[1, 361/323]	[1 1 1 0 1 0]	{3, 3, 4, 3}



Hình 3. 22: Hiệu quả của cặp Máy mã – Ánh xạ tốt nhất



Hình 3. 25: Kết quả mô phỏng SF từ 0÷1.2 cho các trường hợp điều chế đa chiều

Chúng ta tiến hành mô phỏng để minh chứng cho hiệu quả của việc tìm kiếm vét cạn cũng như hiệu quả của sơ đồ điều chế đa chiều với các ánh xạ mới được định nghĩa trong Luận án.

Hình 3.22 so sánh BER của cùng một máy mã RSC, nhưng với mẫu đột lỗ và Hồ sơ cự ly bit khác nhau. Máy mã chập được sử dụng để so sánh là máy mã RSC có đa thức sinh $G=[1,35/23]$. Trong số các máy

mã 16 trạng thái và tỷ lệ mã hóa $1/2$, máy mã này được coi là tốt nhất cho trường hợp truyền tin qua kênh AWGN điều chế BPSK. Khi sử dụng kỹ thuật đột lỗ, chúng ta tạo thành máy mã mới với tỷ lệ mã hóa $2/3$. Mẫu đột lỗ $P=[1101]$ cũng được coi là tốt nhất đối với máy mã $G=[1,35/23]$. Tuy nhiên, khi sử dụng trong sơ đồ BICM-ID hoán vị bit từng dòng với ánh xạ SP, chúng ta thấy rằng mẫu đột lỗ $P=[1110]$ kết hợp với biến thể (bằng hoán vị) của ánh xạ SP có Hồ sơ khoảng cách $DP=[2,1,3]$ cho sản lỗi thấp nhất. Điều này cho thấy hiệu quả của việc kết hợp tốt giữa máy mã với ánh xạ điều chế.

Nhận xét: Việc tìm mã được đơn giản hóa nhờ sử dụng khái niệm về phép ánh xạ có tính chất BGU mở rộng để xây dựng hai ánh xạ điển hình là ánh xạ SP và ánh xạ Phản Gray cho chòm sao tín hiệu 3D, 4D. Nhờ tính chất BGU, có thể dễ dàng tính cận trên đối với xác suất lỗi bit cho BER nhỏ nhất.

3.6 Giảm độ phức tạp trong giải điều chế - giải mã bằng hệ số SF

3.6.1 Đặt vấn đề

Trong sơ đồ BICM-ID sử dụng các ánh xạ thông thường với $SF=0.55$ đã cải thiện đáng kể chất lượng của thuật toán Max-Log-MAP, đặc biệt ở vùng thác lỗi. Để đánh giá ảnh hưởng của hệ số SF với điều chế đa chiều (2D, 3D, 4D) tới chất lượng giải mã bằng giải thuật Max-Log-MAP, luận án thực hiện mô phỏng với hệ số SF từ $0,1 \div 1,2$. Kết quả mô phỏng trên Hình 3.25 cho ta thấy với tất cả các trường hợp điều chế trong không gian đa chiều (2D, 3D, 4D), hệ số chuẩn hoá $SF=0,5 \div 0,7$ cho ta chất lượng hệ thống là tốt nhất.

3.6.2 Đánh giá hiệu quả của SF tới chất lượng giải mã Max – Log – MAP trong sơ đồ BICM – ID điều chế đa chiều cho kênh ghi từ

Qua phân tích các kết quả mô phỏng chúng ta nhận thấy đối với các loại mã khác nhau, khi sử dụng hệ số chuẩn hoá SF=0.55 đều cho chất lượng giải mã theo phương pháp Max-Log-MAP tốt hơn hẳn so với việc sử dụng hệ số SF=1, các kết quả này tiệm cận tới chất lượng giải mã theo phương pháp Log-MAP. Khi số trạng thái mã tăng lên thì chất lượng hệ thống cũng cải thiện rõ ràng hơn.

Tóm lại: Các kết quả chính của chương 3: Đề xuất coi khối tín hiệu m bit theo trục thời gian là một véc-tơ (điểm) tín hiệu trong không gian m chiều, biến điều chế hai điểm tín hiệu ± 1 thành điều chế đa điểm. Với $m=2,3,4$ chương 3 đã xây dựng hệ thống BICM-ID sử dụng các mã RSC 4, 16, 64 trạng thái và các ánh xạ Gray, SP, Anti-Gray cho chòm sao tín hiệu 2D, 3D và 4D. Kết quả mô phỏng đã chỉ ra rằng trường hợp điều chế 2D, 3D và 4D đã giới thiệu ở trên so với điều chế nhị phân bit-bit truyền thống độ lợi mã hoá khoảng 2.5~4 dB; Trình bày phương pháp và kết quả tìm kiếm máy mã - ánh xạ tốt nhất cho sơ đồ điều chế đa chiều cho ghi từ; Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng trong sơ đồ BICM-ID điều chế đa chiều (2D, 3D, 4D) cho ghi từ, có thể sử dụng hệ số chuẩn hoá SF để thay thuật toán Log-Map bằng thuật toán Max-Log-Map trong khi hệ thống không suy hao nhiều về phẩm chất.

KẾT LUẬN

A./ Những kết quả chính của Luận án

1. Luận án đã xác định một lớp các ánh xạ mới cho phép đơn giản hoá việc phân tích và đánh giá chất lượng của hệ thống BICM-ID. Các

cận trên xác suất lỗi bit mới cho hệ thống BICM-ID dựa trên cơ sở cự li bit của bộ tín hiệu đã được đề xuất cùng với các kết quả tìm kiếm mã tốt phù hợp với bộ hoán vị từng dòng bit với mã RSC tỷ lệ 1/2 và điều chế 4-PSK. Sự kết hợp giữa bộ mã hoá với bộ ánh xạ đã mang lại hiệu quả tốt cho hệ thống BICM-ID với cả hoán vị tổng thể và hoán vị từng dòng.

2. Luận án đề xuất một phương án để áp dụng nguyên lý xử lý tín hiệu của sơ đồ điều chế mã có hoán vị bit và giải mã lặp (BICM-ID) cho ghi từ trên cơ sở coi véc-tơ của m dấu nhị phân $\{\pm 1\}$ liên tiếp như là một điểm trong tập tín hiệu đa chiều. Kết quả xây dựng hệ thống với cả hoán vị tổng thể và hoán vị từng dòng bit và mô phỏng với $m=2, m=3$ và $m=4$ cho thấy phương pháp này đạt được tăng ích mã hóa từ (2.5÷4) dB so với các sơ đồ xử lý từng dấu thông thường trong khi tốc độ truyền dẫn không thay đổi. Trả giá là độ phức tạp ở hai khối trong sơ đồ hệ thống, đó là khối điều chế (*Biến đổi tuyến tính*) ở phía phát và khối giải điều chế mềm (*Biến đổi tín hiệu*) ở phía thu.

3. Luận án đã trình bày phương pháp và kết quả tìm kiếm cặp máy mã – ánh xạ tốt nhất cho hệ thống BICM-ID sử dụng tín hiệu nhị phân trong không gian đa chiều.

4. Để giảm độ phức tạp của sơ đồ BICM-ID điều chế đa chiều (2D, 3D, 4D) cho ghi từ, đề xuất áp dụng thuật toán Max-Log-Map cho giải mã SISO kết hợp với hệ số chuẩn hóa SF (như trong [1], [3]).

B./ Hướng nghiên cứu tiếp theo

1. So sánh hiệu quả của sơ đồ BICM-ID điều chế đa chiều với sơ đồ san bằng Turbo điều chế nhị phân.

2. Từng bước triển khai ứng dụng các kết quả nghiên cứu vào thực tế.