

CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ OFDM & BICM-ID THEORETICAL - BASED FOR OFDM & BICM-ID

ThS. PHẠM TRỌNG TÀI
Phòng Thanh tra & ĐBCL, Trường ĐHHH

Tóm tắt

Bài báo đề cập đến cơ sở lý thuyết về OFDM và bộ mã BICM-ID. Đây là hướng đi mới nhằm nâng cao chất lượng hệ thống OFDM bằng việc sử dụng bộ mã BICM-ID, một hệ thống có nhiều triển vọng trong hệ thống thông tin không dây thế hệ mới.

Abstract

In order to improve the performance of OFDM's system, the most promising candidate to 4G Wireless Communication system, the article analyses the performance, designs and appraises the quality of the OFDM system with BICM-ID (Bit-Interleaved Coded Modulation With Iterative Decoding).

1. Đặt vấn đề

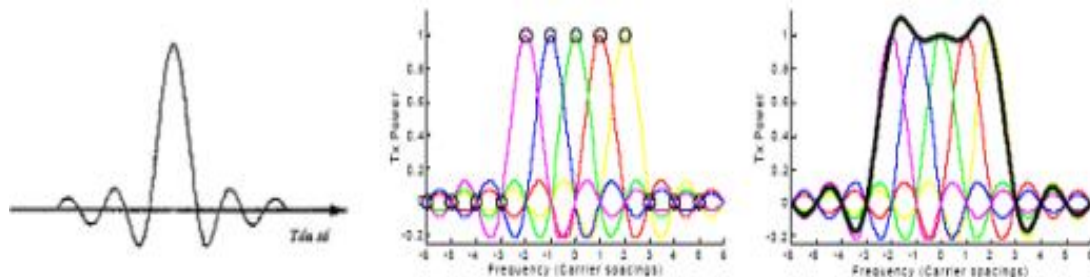
Trong những năm gần đây, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple) không ngừng được nghiên cứu và mở rộng phạm vi ứng dụng bởi những ưu điểm của nó trong tiết kiệm băng tần và khả năng chống lại pha đình chọn lọc theo tần số cũng như xuyên nhiễu băng hẹp. Trong thực tiễn, việc xây dựng một hệ thống OFDM ít phức tạp hơn so với một hệ thống đơn sóng mang dùng bộ san bằng, gần đây OFDM đã được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống thông tin thế hệ mới. Trong một số điều kiện cụ thể, có thể tăng dung lượng đáng kể cho hệ thống OFDM bằng cách làm thích nghi tốc độ dữ liệu trên mỗi sóng mang tùy theo SNR của sóng mang đó nhằm khai thác tối đa dung lượng của hệ thống OFDM trên các kênh pha đình băng hẹp. Đến nay các nghiên cứu về OFDM thích nghi (AOFDM) được tiến hành theo các hướng: điều chế đa mức trên các băng con; thay đổi thích nghi các tham số OFDM; mã *turbo* cho OFDM. Sau mã Turbo, mã BICM-ID được đề xuất nghiên cứu từ những năm 1990 bởi nhóm nghiên cứu X.Li và Ritcey là bộ mã tốt cho truyền dẫn trên kênh đa đường, do thừa hưởng ưu điểm của các mã xoắn cơ sở, tăng ích xáo trộn bit, giải mã lặp và phương pháp ánh xạ tín hiệu điều chế.

Với ý nghĩa thực tiễn rất hữu hiệu của hệ thống OFDM trong hệ thống thông tin mới tác giả muốn phân tích cơ sở lý thuyết để thiết lập một hệ thống OFDM sử dụng bộ mã BICM-ID làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo.

2. Cơ sở lý thuyết về OFDM & BICM-ID

2.1. Cơ sở lý thuyết về OFDM

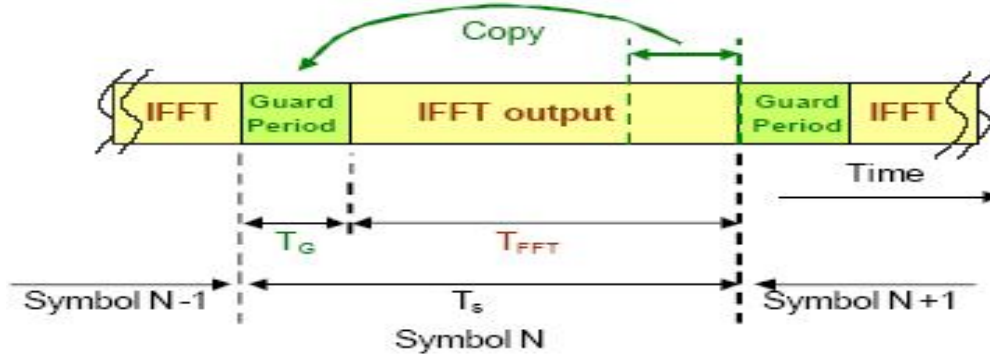
Xét về bản chất, OFDM là một trường hợp đặc biệt của phương thức phát đa sóng mang theo nguyên lý chia dòng dữ liệu tốc độ cao thành các dòng dữ liệu tốc độ thấp hơn và phát đồng thời trên một số các sóng mang được phân bổ trực giao nhau. Phổ của tín hiệu OFDM được mô tả ở hình 1.



Hình 1. Phổ của một sóng mang OFDM con và của tín hiệu OFDM.

Hình 1 cho thấy do tính trực giao, các sóng mang con không bị xuyên nhiễu bởi các sóng mang con khác. Với kỹ thuật đa sóng mang dựa trên FFT và IFFT, ghép kênh phân chia theo tần số đạt được hiệu quả không phải bằng việc lọc giải thông mà bằng việc xử lý băng gốc.

Nhờ thực hiện biến đổi chuỗi dữ liệu từ nối tiếp sang song song nên thời gian *symbol* tăng lên. Do đó sự phân tán theo thời gian gây bởi trải trễ do truyền dẫn đa đường giảm. Mặt khác, do chu kỳ phòng vệ CP được chèn vào giữa các *symbol* OFDM nên xuyên nhiễu giữa các *symbol* (ISI) hầu như bị loại trừ hoàn toàn (hình 2).

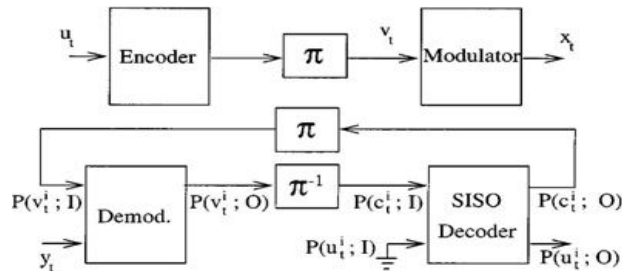


Hình 2. Khoảng phòng vệ được chèn vào giữa các *Symbol* OFDM.

Trong khoảng phòng vệ, *symbol* OFDM được kéo dài theo chu kỳ để tránh xuyên nhiễu giữa các sóng mang (ICI). Trong hệ thống đơn sóng mang, pha đỉnh hoặc xuyên nhiễu đơn sẽ có tác động tới toàn bộ dữ liệu truyền trên kênh. Cũng trong điều kiện đó, do việc truyền dẫn được thực hiện trên nhiều sóng mang trực giao nhau nên chỉ một phần dữ liệu của hệ thống OFDM bị ảnh hưởng. Phần dữ liệu sai sẽ được sửa bằng các mã sửa lỗi thích hợp. Vì vậy chất lượng của hệ thống OFDM phụ thuộc rất nhiều vào khả năng chống nhiễu của các bộ mã sửa lỗi. Vì thế các bộ mã sử dụng cho hệ thống OFDM liên tục được nghiên cứu và cải tiến.

2.2. Cơ sở lý thuyết BICM-ID

Theo lý thuyết mã hoá, chất lượng của các mã khối có thể tăng lên nhờ việc tăng chiều dài từ mã. Với mã xoắn, chất lượng giải mã liên quan đến chiều dài của bộ mã. Việc tăng chiều dài ràng buộc có thể cải thiện BER đáng kể, nhưng giá phải trả là sự phức tạp của bộ giải mã hợp lệ cực đại ML (*Maximum-Likelihood*) tăng theo hàm mũ. Các mã Turbo được đề xuất gần đây đã giải quyết được vấn đề trên, trong đó 2 hoặc nhiều bộ mã xoắn có độ dài bộ nhớ ngắn được liên kết song song hoặc nối tiếp. Nhờ xáo trộn ngẫu nhiên, hiệu quả sửa lỗi đạt được không chỉ nhờ ràng buộc trên các chuyển dịch lưới thành phần mà còn nhờ tác dụng của giải mã lặp. Do phương pháp giải mã dùng cho các mã liên kết khó thực hiện nên phương pháp giải mã lặp sử dụng xác suất hậu nghiệm cực đại MAP (*Maximum A Posteriori Probability*) cho mỗi bộ giải mã riêng được sử dụng nhằm tiệm cận dung lượng kênh. Với các mã thành phần đơn giản, mã Turbo đạt được hiệu quả tốt như các bộ mã có chiều dài lớn. Một giải pháp đơn giản hơn là sử dụng giải mã lặp với mã hoá liên kết, xáo trộn từng bit kết hợp với các bộ điều chế bậc cao. Khác với mã Turbo, giải pháp này chỉ sử dụng 1 bộ mã hoá và giải mã. Do đó, độ phức tạp của máy thu giảm đáng kể. Nhìn thoáng qua, sơ đồ khối của nó không khác nhiều với TCM (*Trellis Coded Modulation*) có xáo trộn *symbol* truyền thống được đề xuất bởi *Ungerboeck*. Sơ đồ này được đề xuất bởi *Zehavi* nhằm cải thiện chất lượng của TCM trên các kênh pha đỉnh *Rayleigh* và được gọi là BICM. Tuy nhiên giá phải trả là cự ly *Euclid* tự do FED (*Free-squared Euclidean Distance*) giảm, dẫn đến sự suy giảm chất lượng khi truyền qua các kênh *Gauss* không pha đỉnh. *X.Li* và *A.Chindapol* đã chứng tỏ rằng BICM, phương pháp làm hiệu quả bằng thông trên kênh pha đỉnh, có được kết quả tốt cả trên kênh *Gauss* và kênh pha đỉnh nhờ giải mã lặp ID. Bộ mã này được gọi là BICM-ID, nhằm tối đa hoá lợi ích của ID, với điểm mấu chốt là thay đổi ánh xạ Gray trong bộ tạo mã BICM của *Zehavi*.



Hình 3. Sơ đồ bộ mã hoá và giải mã BICM.

Do đó, độ phức tạp của máy thu giảm đáng kể. Nhìn thoáng qua, sơ đồ khối của nó không khác nhiều với TCM (*Trellis Coded Modulation*) có xáo trộn *symbol* truyền thống được đề xuất bởi *Ungerboeck*. Sơ đồ này được đề xuất bởi *Zehavi* nhằm cải thiện chất lượng của TCM trên các kênh pha đỉnh *Rayleigh* và được gọi là BICM. Tuy nhiên giá phải trả là cự ly *Euclid* tự do FED (*Free-squared Euclidean Distance*) giảm, dẫn đến sự suy giảm chất lượng khi truyền qua các kênh *Gauss* không pha đỉnh. *X.Li* và *A.Chindapol* đã chứng tỏ rằng BICM, phương pháp làm hiệu quả bằng thông trên kênh pha đỉnh, có được kết quả tốt cả trên kênh *Gauss* và kênh pha đỉnh nhờ giải mã lặp ID. Bộ mã này được gọi là BICM-ID, nhằm tối đa hoá lợi ích của ID, với điểm mấu chốt là thay đổi ánh xạ Gray trong bộ tạo mã BICM của *Zehavi*.

a) Bộ mã BICM truyền thống

Bộ tạo mã BICM truyền thống được mô tả tại hình 3 bao gồm bộ mã hoá, bộ xáo trộn bit và bộ điều chế không nhớ. Bộ xáo trộn bit giả ngẫu nhiên có tác dụng hoán vị các bit nhị phân đầu ra của bộ mã hoá, thay cho các bộ xáo trộn *symbol* truyền thống.

Xét cụ thể cho bộ điều chế 8-PSK, nếu ký hiệu hai bit đầu vào của bộ mã hoá tại thời điểm t là $u_t = [u_t^1, u_t^2]$ và 3 bit tương ứng đầu ra của nó (một *symbol* mã) là $c_t = [c_t^1, c_t^2, c_t^3]$, trong đó u_t^i, c_t^i là các bit thứ i . Sau khi được xáo trộn, mỗi nhóm 3 bit nhị phân $v_t = [v_t^1, v_t^2, v_t^3]$ đầu ra bộ xáo trộn được nhóm với nhau thành một nhóm và được ánh xạ tới 1 *symbol* trên kênh phức x_t được chọn từ tập tín hiệu X bởi một phép gán nhãn μ .

$$x_t = \mu(v_t), x_t \in \mathcal{X}$$

Với tập tín hiệu 8PSK $\mathcal{X} = (e^{jl2\pi/8}, l = 0, 1, \dots, 7)$. Với tách sóng tương quan, tín hiệu bằng gốc rời rạc theo thời gian nhận được là: $y_t = \rho_t \sqrt{E_s} x_t + z_t$

Trong đó ρ_t là hệ số pha đỉnh, E_s là năng lượng *symbol* và z_t là nhiễu AWGN phức có mật độ phổ đơn biên là N_0 . Với kênh AWGN thì $\rho_t = 1$. Với kênh pha đỉnh *Rayleigh* không chọn lọc theo tần số thì ρ_t là phân bố *Rayleigh* với $E(\rho_t^2) = 1$. Ở đây, chúng ta giả sử rằng thông tin về kênh là hoàn hảo tức ρ_t được dự đoán một cách đầy đủ tại máy thu.

b) Giải mã BICM truyền thống

Do xáo trộn bit, giải mã BICM cần có giải mã từng chặng và giải mã xoắn, do đó nó quá phức tạp cho ứng dụng trong thực tế. *Zehavi* đã đề xuất một phương pháp cận tối ưu sử dụng 2 bước tách biệt: Tạo *metric* bit và giải mã *Viterbi*. Từ mỗi tín hiệu nhận được y_b , sáu *metric* bit được tạo ra, sử dụng quy luật ML. Với 3 bit nhị phân và các *symbol* 8PSK:

$$\lambda(v_t^i = b) = \log P(y_t | v_t^i = b) \approx \log \sum_{x \in \mathcal{X}_b^i} P(y_t | x) \quad i = 1, 2, 3; b = 0, 1 \quad (*)$$

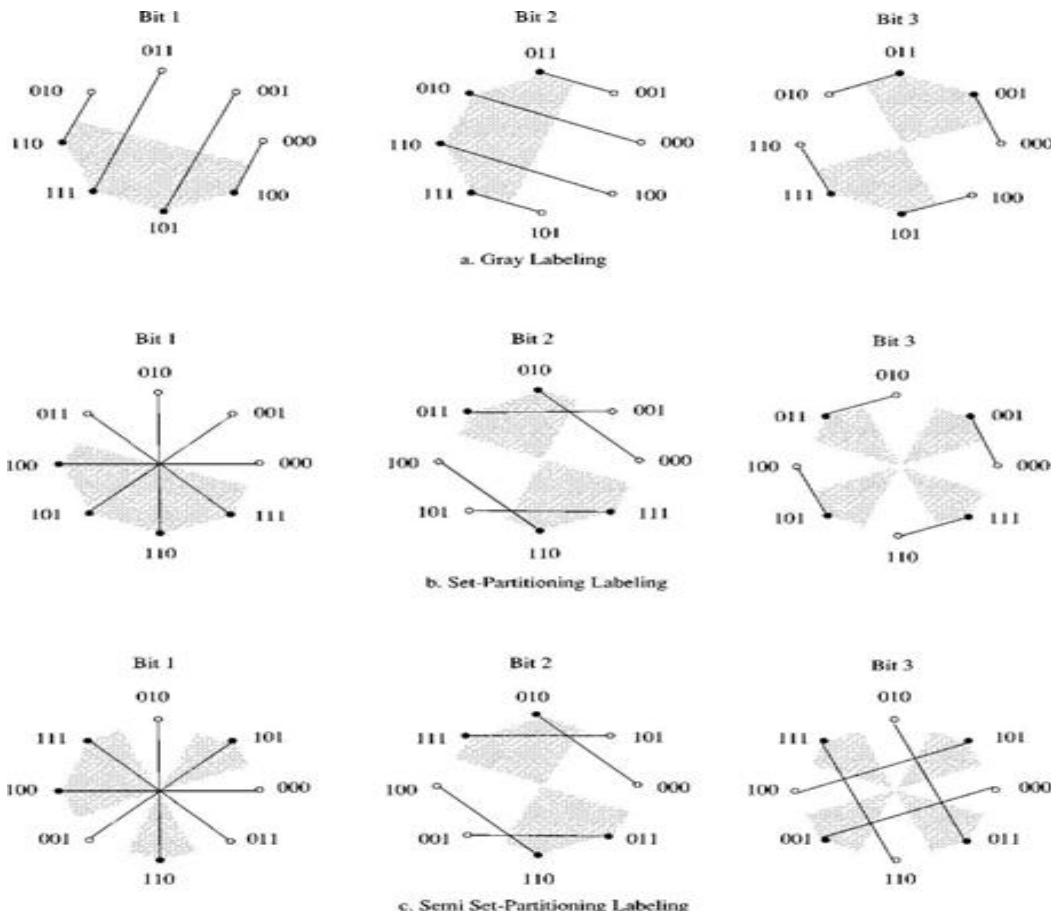
Trong đó các tập con của tín hiệu $\mathcal{X}_b^i = \{\mu([v^1, v^2, v^3] | v^i = b)\}$. Ký hiệu \approx biểu thị sự thay thế tương đương. Với 8PSK, kích thước của mỗi tập con $x_b^1 = 4$. Trong thực tế, phép tính tổng *log* trong (*) được tính bằng xấp xỉ $\log \sum_i a_i \approx \max_i \log a_i$ hay bằng tra bảng nếu cần chính xác hơn. Cuối cùng, $\log(y_t, x)$ được thay bằng khoảng cách *Euclid* bình phương $\|y_t - \rho_t x\|^2$.

c) Sự suy giảm chất lượng của BICM trên kênh Gauss

Mặc dù BICM có chất lượng tốt trên các kênh pha đỉnh nhờ độ lợi của phân tập, một điều không ngờ của BICM là sự suy giảm chất lượng trên kênh *Gauss* do điều chế ngẫu nhiên gây ra bởi xáo trộn bit. Nhờ xáo trộn bit và giải mã tựa tối ưu, *symbol* có thể tạo ra từ bất kỳ điểm tín hiệu nào trên trong vùng lân cận của *constellation* trên hình 4.

Khoảng cách *Euclid* tự do FED của BICM được xác định là $d_E^2 = d_H d_0^2$, với d_H là khoảng cách *Hamming* tự do của mỗi mã và d_0 là khoảng cách *Euclid* nhỏ nhất giữa các điểm trong tập tín hiệu điều chế. Với điều chế 8 PSK, $d_0 = 2\sqrt{E_s} \sin(\Pi/8)$ với E_s là năng lượng của 1 *symbol* kênh.

Nói chung, FED của BICM nhỏ hơn vài dB so với TCM tương ứng. Do đó BICM truyền thống kém hiệu quả hơn so với TCM trên kênh *Gauss*.



Hình 4. Các sơ đồ ánh xạ khác nhau.

d) BCM-ID

Việc xáo trộn bit liên kết các bit đã mã hoá ban đầu ở xa nhau về cùng *symbol* kênh. Với xáo trộn lý tưởng, các bit mã hoá tạo ra một *symbol* kênh độc lập, do đó sự phản hồi từ các vùng dữ liệu mạnh (ít bị ảnh hưởng của nhiễu kênh) có thể loại bỏ sự tranh chấp trong điều chế bậc cao và cải thiện việc giải mã tại các vùng dữ liệu yếu (bị ảnh hưởng lớn của nhiễu kênh). Với thông tin đầy đủ của 2 bit trong một *symbol* kênh có được nhờ giải mã hồi tiếp, điều chế 8PSK tiến tới điều chế nhị phân cho mỗi vị trí bit. Do đó khoảng cách giữa các điểm tín hiệu trên *constellation* tăng lên đáng kể.

Tuy nhiên, nếu phản hồi chứa lỗi, chúng ta sẽ nhận được một *constellation* nhị phân sai. Do đó, điều quan trọng là cần giảm ảnh hưởng của các lỗi phản hồi và kiểm soát được việc truyền lỗi. Điều này phải được tính đến khi thiết kế hệ thống với việc phản hồi quyết định mềm và các bộ xáo trộn được thiết kế tốt. Mặc dù phức tạp hơn so với phản hồi quyết định cứng, nhưng phản hồi mềm là mấu chốt để nhận được các tăng ích vốn có BCM trong việc giảm truyền lỗi.

e) Giải mã lập sử dụng phản hồi mềm

Giải mã lập cho điều chế mã đa mức cũng đã được nghiên cứu bởi Seshadri và Sunderberg. Woerz và Hagenauer đã sử dụng độ tin cậy của các kết quả giải mã để điều khiển phản hồi.

Như đã chỉ ra trên hình 3, máy thu sử dụng phương pháp lập cận tối ưu thông qua tối ưu từng phần riêng biệt, chứ không tách rời giải điều chế với giải mã xoắn. Xác suất hậu nghiệm cho các bit mã hoá có thể tính bằng.

$$P(v_i^j = b|y_i) \approx \sum_{x_i \in \mathcal{X}_b^i} P(x_i|y_i) \approx \sum_{x_i \in \mathcal{X}_b^i} P(y_i|x_i) \quad (**)$$

Ban đầu, giả sử xác suất tiên nghiệm $P(x_i)$ là như nhau đối với mọi x_i . Sau đó, khối SISO được dùng để giải mã xoắn và tạo ra các xác suất bit hậu nghiệm cho các bit thông tin và các bit mã hoá. Theo Benedetto, ta ký hiệu xác suất tiên nghiệm là $P(q;I)$ và xác suất hậu nghiệm là $P(q;O)$ của biến ngẫu nhiên q . Ban đầu không có $P(u_i^i;I)$; và nó cũng không được dùng trong toàn bộ quá trình giải mã. Thêm vào đó, $P(u_i^i;O)$ và $P(c_i^i;O)$; là thông tin ngoại lai (còn được gọi là thông tin ngoài hay thông tin thêm vào).

Trong chặng thứ 2, $P(c_i^i;O)$ cũng như $P(v_i^i;O)$, được xáo trộn và phân hồi tới bộ giải mã. Giả sử $P(v_i^1;I), P(v_i^2;I), P(v_i^3;I)$ là độc lập (nhờ xáo trộn tốt) thì với mỗi $x_i \in \mathcal{X}$ ta có:

$$P(x_i) = P(\mu([v^1(x_i), v^2(x_i), v^3(x_i)])) = \prod_{j=1}^3 P(v_i^j = v^j(x_i);I) \quad (***)$$

Trong đó $v^j(x_i) \in \{0,1\}$ là giá trị của bit thứ j của nhãn được gán cho. Sử dụng (**) và (***), chúng ta có các xác suất bit hậu nghiệm ngoại lai cho giải điều chế ở chặng thứ 2 là:

$$P(v_i^j = b;O) = \frac{P(v_i^j = b|y_i)}{P(v_i^j = b;I)} = \frac{\left(\sum_{x_i \in \mathcal{X}_b^j} P(y_i|x_i)P(x_i) \right)}{P(v_i^j = b;I)} = \sum_{x_i \in \mathcal{X}_b^j} (P(y_i|x_i) \prod_{j \neq i} P(v_i^j = v^j(x_i);I))$$

với $i=1,2,3; b=0,1$.

Do đó, khi tính lại các *metric* bit cho một bit, chúng ta cần sử dụng các xác suất tiên nghiệm của các bit khác trong cùng 1 *symbol* kênh. Các *metric* bit được tạo ra sẽ được đưa vào bộ giải mã và lặp lại quá trình giải điều chế và giải mã. Đầu ra giải mã cuối cùng là quyết định cứng dựa trên xác suất bit ngoại lai $P(u_i^i;O)$ cũng là xác suất hậu nghiệm tổng vì $P(u_i^i;I)$ không được sử dụng.

Trong bộ giải mã này ta sử dụng thuật toán “*logmap*”. Tổng *log* trong công thức (**) được xấp xỉ bằng phép tính cực đại nhờ tra bảng sẽ làm giảm đáng kể sự phức tạp của hệ thống.

3. Kết luận

OFDM là một trường hợp đặc biệt của phương thức phát đa sóng mang theo nguyên lý chia dòng dữ liệu tốc độ cao thành các dòng dữ liệu tốc độ thấp hơn và phát đồng thời trên một số các sóng mang được phân bổ trực giao nhau kết hợp với kết cấu đơn giản của bộ mã BICM-ID là cơ sở lý thuyết cho việc thiết kế mô hình được thiết kế trên hoàn toàn thích hợp cho các hệ thống thông tin di động thế hệ mới. Kết quả nghiên cứu hệ thống Adaptive OFDM-BICM-ID như vậy sẽ được trình bày trong nội dung các bài báo khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Zhang Zhao-yang, Lai Li-feng, 2003 “A novel OFDM transmission scheme with leng - adaptive Cyclicprefix” Journal of Zhejiang University Science ISSN 1009-3095.
- [2] A. J. Viterbi and J. K. Omura, “Principles of Digital Communication and Coding”. New York: McGraw-Hill, 1979.
- [3] S. Benedetto and E. Biglieri, “Principles of Digital Transmission With Wireless Applications”. New York: Kluwer Academic, 1999.

Người phân biện: TS. Phạm Văn Phước