

CHẤT LƯỢNG CÁC BỘ TÁCH SÓNG ĐA TRUY CẬP TRONG HỆ THỐNG CDMA CÓ MÃ HOÁ TURBO

Vũ Đình Thành, Lê Ngọc Phúc
Trường Đại Học Bách Khoa, ĐHQ-HCM

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, thông tin đa truy cập đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều hệ thống thông tin, đặc biệt là trong thông tin vệ tinh và thông tin di động. Nhiều kỹ thuật đa truy cập khác nhau được triển khai và do vậy các phương pháp tách sóng đa truy cập đã và đang trở thành một vấn đề thu hút sự quan tâm nghiên cứu, nhất là ở các hệ thống đa truy cập không trực giao. Với hệ thống CDMA hiện tại, tín hiệu của mỗi user được tách bằng cách tương quan tín hiệu thu được với mã trải phổ tương ứng của nó. Do đó, chất lượng của hệ thống này bị ảnh hưởng mạnh bởi can nhiễu đa truy cập MAI (Multiple Access Interference), hiệu ứng gần xa (near-far effect) và giao thoa liên ký tự ISI (InterSymbol Interference), đặc biệt là khi số user tăng lên [1]. Do những hạn chế trên, nhiều hướng nghiên cứu khác nhau đã được đề xuất để triệt can nhiễu MAI, trong đó đáng chú ý là phương pháp tách sóng đa truy cập MUD (MultiUser Detection). Ý tưởng cơ bản của phương pháp này là khai thác cấu trúc của can nhiễu MAI để triệt nó. Ở máy thu, thông tin của tất cả các user được sử dụng để thực hiện việc tách sóng cho từng user. Do tính phức tạp quá cao của phương pháp tách sóng tối ưu nên các nghiên cứu về MUD đã tập trung vào các bộ tách sóng cận tối ưu. Các bộ tách sóng này có hiệu năng gần bằng bộ tách sóng tối ưu nhưng đơn giản, thực tế hơn cho hệ thống CDMA và chúng được chia làm hai loại tuyến tính và không tuyến tính. Các bộ tách sóng tuyến tính áp dụng phép biến đổi tuyến tính đối với ngõ ra của bộ lọc phối hợp như bộ tách sóng giải tương quan, bộ tách sóng MMSE (Minimum Mean-Square Error). Trong khi đó, các phương pháp không tuyến tính thực hiện lặp lại việc tái tạo và trừ can nhiễu MAI, chẳng hạn như bộ triệt nhiễu nối tiếp SIC (Successive Interference Cancellation), bộ triệt nhiễu song song PIC (Parallel Interference Cancellation), vv... [1]

Kể từ khi được công bố vào năm 1993 bởi nhóm các nhà nghiên cứu ở Pháp, mã Turbo đã có một đóng góp rất lớn bởi vì nó cho phép thực hiện việc thông tin với độ tin cậy cao, rất gần với giới hạn dung lượng kênh Shannon [2]. Hiện tại, mã Turbo đã được tích hợp vào các chuẩn hệ thống thông tin di động thế hệ thứ 3 (WCDMA và cdma2000)[3], vv... Do vậy, việc nghiên cứu chất lượng của các bộ tách sóng đa truy cập ở hệ thống CDMA có mã hoá Turbo là điều hết sức cần thiết và đó cũng chính là nội dung mà bài viết này muốn đề cập đến.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Xét mô hình hệ thống DS-CDMA có mã hoá kênh truyền gồm K user như hình 1.

Ở phía phát, dữ liệu của user thứ k, ký hiệu là d_k , được mã hoá kênh tạo ra chuỗi $b_k(i)$, $b_k = \{+1, -1\}$, $i = 1, \dots, M$. Chuỗi $b_k(i)$ sau đó sẽ được trải phổ bởi chuỗi tín hiệu trải phổ $s_k(t)$ với độ lợi trải phổ là N. Tín hiệu được phát đi của user thứ k là:

$$x_k(t) = A_k \sum_{i=0}^M b_k(i) s_k(t - iT) \quad (1)$$

với A_k là biên độ dạng sóng dữ liệu của user thứ k.

Xét kênh truyền, một cách tổng quát, đáp ứng xung của kênh truyền giữa máy phát k và máy thu m là [5]:

$$g_{m,k}(t) = c_{m,k}(t) d(t - t_{m,k}) \quad (2)$$

trong đó: $c_{m,k}(t)$ là quá trình fading phức
 $t_{m,k}$ là độ trễ lan truyền

Với mô hình fading được xem xét trong bài viết này, $c_{m,k}(t)$ có phân bố Rayleigh và các thành phần tín hiệu được giả sử là đến máy thu cùng một lúc nên bỏ qua $\tau_{m,k}$.

$$\text{Tín hiệu đến tại máy thu m: } r_m(t) = \sum_{k=1}^K y_{m,k}(t) + n_m(t) \quad (3)$$

trong đó: $y_{m,k}(t)$ là tín hiệu của user thứ k tại máy thu m

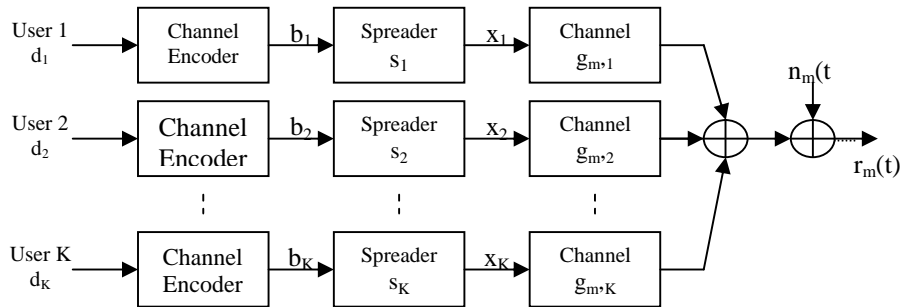
$$\begin{aligned} y_{m,k}(t) &= x_k(t) * g_{m,k}(t) \\ &= c_{m,k}(t)x_k(t - t_{m,k}) \end{aligned} \quad (4)$$

$n_m(t)$ là nhiễu AWGN có trung bình bằng zero, phương sai $N_0/2$.

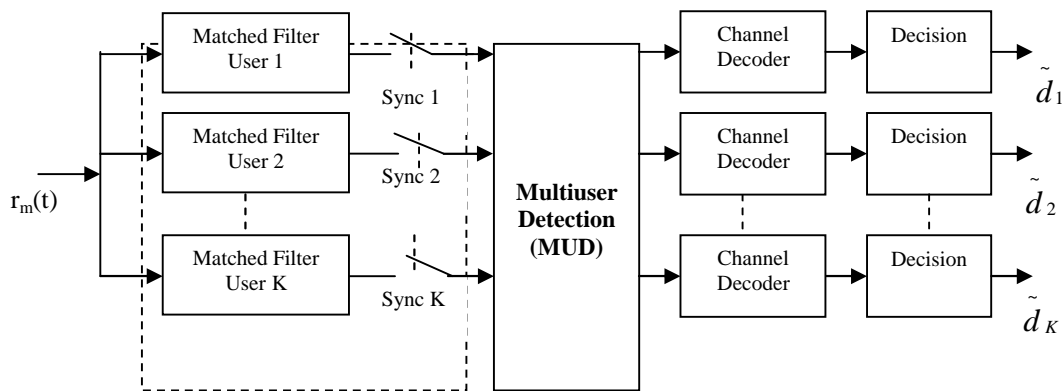
Xét hoạt động của máy thu, như được mô tả trong hình 2. Sau khi qua dãy bộ lọc phối hợp (Matched Filter), tín hiệu tương ứng với user thứ k là:

$$z_k(i) = \int_{iT}^{(i+1)T} s_k(t)r_m(t)dt, k=1, \dots, K \quad (5)$$

Tín hiệu tại ngõ ra của tất cả các bộ lọc phối hợp được đưa đồng thời đến khối tách sóng đa truy cập. Tại đây, các giải thuật tách sóng sẽ được thực hiện. Tín hiệu tại ngõ ra của khối này sau đó được đưa đến khối giải mã kênh và cuối cùng là thu được dữ liệu $\tilde{d}_k, k=1, \dots, K$.



Hình 1 Mô hình hệ thống DS-SS có mã hoá kênh truyền [4]



Hình 2 Cấu trúc máy thu đa truy cập

3.TÁCH SÓNG ĐA TRUY CẬP

Với hệ thống CDMA, cách đơn giản nhất để thực hiện việc tách sóng là dùng bộ lọc phối hợp [1]. Kiểu tách sóng này còn được gọi là bộ tách sóng thông thường và được mô tả như trong hình

2 nhưng bỏ qua khối MUD. Nó sẽ cho kết quả tối ưu trong kênh đơn user hay kênh đồng bộ trực giao. Tuy nhiên, do xem nhiều đa truy cập như là nhiễu trắng, chất lượng của bộ tách sóng này bị suy giảm khi số user tăng lên. Ngoài ra, nó còn bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng gần xa. Quy luật tách sóng cho user thứ k: $\tilde{b}_k = \text{sign}(z_k)$

$$(6)$$

trong đó, z_k được tính theo công thức (5).

Những hạn chế của bộ tách sóng thông thường có thể được khắc phục bằng cách sử dụng các bộ tách sóng đa truy cập. Bộ tách sóng MMSE là một ví dụ tiêu biểu. Đây là bộ tách sóng tuyến tính dựa trên sai số trung bình bình phương cực tiểu, nghĩa là:

$$\min_{M \in R^{K \times K}} E[\|b - Mz\|^2], \text{ với } z = [z_1, z_2, \dots, z_K] \quad (7)$$

$$[1] \text{ chứng minh được rằng: } M = \left[R + \frac{S^2}{A^2} \right]^{-1}, \text{ với } \frac{S^2}{A^2} = \text{diag} \left\{ \frac{S^2}{A_1^2}, \frac{S^2}{A_2^2}, \dots, \frac{S^2}{A_K^2} \right\} \quad (8)$$

Như vậy, cấu trúc bộ tách sóng này giống hình 2, trong đó khối Multiuser Detection sẽ thực hiện phép biến đổi ở biểu thức (8).

Bộ tách sóng MMSE cho chất lượng tách sóng tốt, có thể được mở rộng thành các dạng tách sóng MMSE thích nghi, MMSE mờ, vv... Tuy nhiên, nó đòi hỏi phải ước lượng công suất của mỗi user ở máy thu. Ngoài ra, việc tính ma trận nghịch đảo là tương đối khó khăn, đặc biệt khi số user tăng lên. Quy luật tách sóng cho user thứ k:

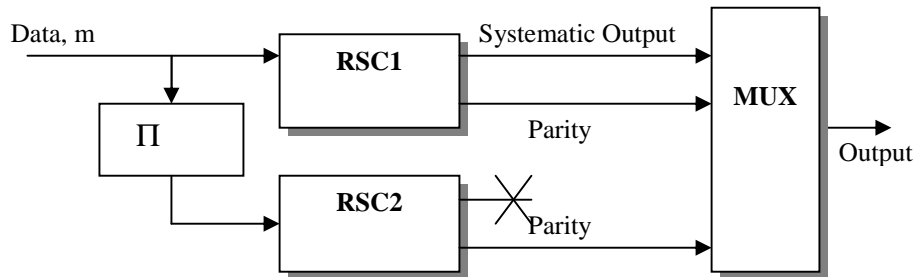
$$\tilde{b}_k = \text{sign} \left[\left(\left(R + \frac{S^2}{A^2} \right)^{-1} z \right)_k \right] \quad (9)$$

Với các bộ tách sóng đa truy cập khác, người đọc có thể tham khảo ở [1].

4. MÃ HOÁ TURBO

4.1 Mã hoá

Sơ đồ khối của bộ mã hoá Turbo được cho ở hình 3.



Hình 3 Sơ đồ khối bộ mã hoá Turbo

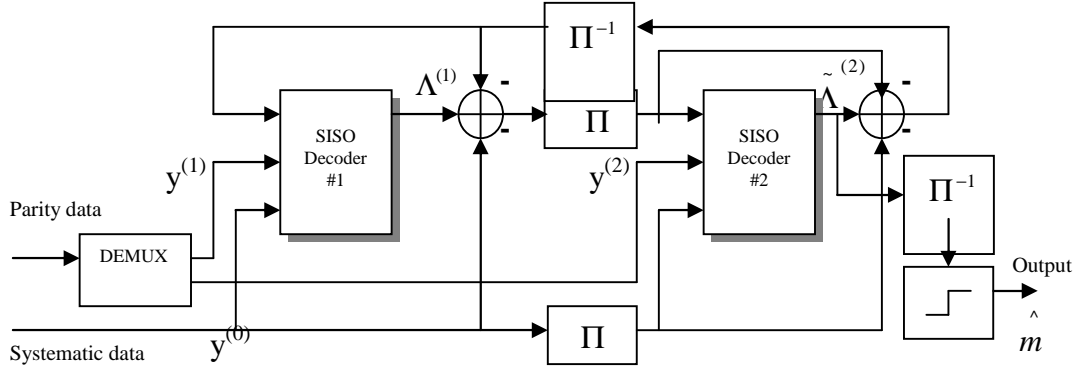
Mô hình cho thấy bộ mã hoá Turbo là sự kết nối song song của hai mã RSC (Recursive Systematic Convolutional) thông qua một bộ xáo trộn (Interleaver) Π [6]. Bộ mã hoá RSC1 nhận dữ liệu một cách trực tiếp, trong khi bộ mã hoá RSC2 nhận dữ liệu sau khi dữ liệu đã được xáo trộn. Bộ xáo trộn Π có thể là kiểu giả ngẫu nhiên hay khối, vv... và nó thực hiện việc xáo trộn theo từng khối M bit. Vì cả hai bộ mã hoá đều nhận cùng một tập dữ liệu, chỉ có một ngõ ra systematic được phát đi cùng với hai ngõ ra parity từ hai bộ mã. Khi hai bộ mã hoá RSC1 và RSC2 đều có tốc độ là $\frac{1}{2}$ thì tốc độ của bộ mã hoá Turbo là $\frac{1}{3}$. Tuy nhiên, tốc độ của mã Turbo có thể đạt được cao hơn bằng cách lập quy luật phát bit parity (puncture). Chẳng hạn, khi chỉ phát

các bit parity chẵn từ RSC1 và bit parity lẻ từ RSC2 cùng với các bit systematic thì tốc độ mã Turbo là $r=1/2$.

4.2. Giải mã

Cũng giống như mã tích chập, quá trình giải mã Turbo có thể được thực hiện bằng cách tìm chuỗi bit \tilde{m} có khả năng nhất, tức là: $\tilde{m} = \arg\{\max_m P(m | y)\}$ (10)

Tuy nhiên, do phương pháp giải mã tối ưu này rất phức tạp, một phương pháp cận tối ưu đã được đưa ra trong [2] cho chất lượng tốt với độ phức tạp thấp. Cấu trúc của bộ giải mã này được mô tả trong hình 4.



Hình 4. Sơ đồ khối bộ giải mã Turbo [6]

Theo phương pháp này, vấn đề giải mã Turbo sẽ là đi tìm hai giá trị $\Lambda_i^{(1)}$ và $\tilde{\Lambda}_i^{(2)}$ với:

$$\Lambda_i^{(1)} = \log \frac{P[m_i = 1 | y^{(0)}, y^{(1)}, z^{(2)}]}{P[m_i = 0 | y^{(0)}, y^{(1)}, z^{(2)}]}, \tag{11a}$$

$$\tilde{\Lambda}_i^{(2)} = \log \frac{P[\tilde{m}_i = 1 | y^{(0)}, y^{(2)}, \tilde{z}^{(1)}]}{P[\tilde{m}_i = 0 | y^{(0)}, y^{(2)}, \tilde{z}^{(1)}]} \tag{11b}$$

trong đó: $y^{(0)}, y^{(1)}$ và $y^{(2)}$ là các giá trị tương ứng với bit systematic, bit parity từ RSC 1 và parity từ RSC 2 (\tilde{y} là dạng y đã được xáo trộn).

Λ được gọi là giá trị LLR (Log-Likelihood Ratio)
 z được gọi là thông tin extrinsic và được xác định như sau:

$$z_i^{(1)} = \Lambda_i^{(1)} - y_i^{(0)} - z_i^{(2)} \tag{12a}$$

$$\tilde{z}_i^{(2)} = \tilde{\Lambda}_i^{(2)} - \tilde{y}_i^{(0)} - \tilde{z}_i^{(1)} \tag{12b}$$

Quá trình giải mã là quá trình lặp vòng: khối giải mã SISO 2 nhận thông tin extrinsic từ khối giải mã SISO1 và thông tin extrinsic từ khối SISO 2 được đưa ngược trở lại khối SISO1. Cho đến lần lặp cuối cùng, dữ liệu sẽ thu được theo quy luật sau:

$$\hat{m} = \begin{cases} 1 & , \Lambda_i^{(2)} \geq 0 \\ 0 & , \Lambda_i^{(2)} < 0 \end{cases} \tag{13}$$

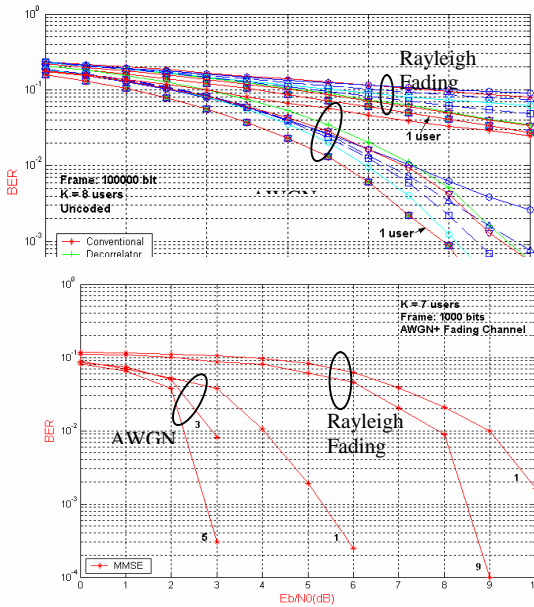
Việc tính toán $\Lambda_i^{(1)}$ và $\tilde{\Lambda}_i^{(2)}$ ở trên có thể được thực hiện theo nhiều giải thuật SISO (Soft Input Soft Output) khác nhau như Log-MAP, Max-Log-MAP hay SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm). Chi tiết về các giải thuật này có thể tham khảo ở [5].

5. MÔ PHỎNG

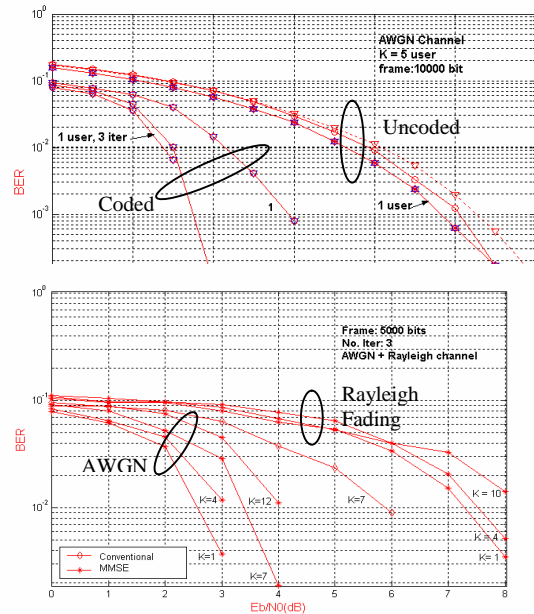
Nội dung phần này sẽ trình bày một số kết quả đạt được từ quá trình mô phỏng. Chương trình mô phỏng được viết bằng ngôn ngữ Matlab và được xây dựng dựa trên mô hình hệ thống đã trình bày trong mục II. Trong mô hình này, quá trình đồng bộ và ước lượng công suất được giả sử là hoàn hảo tại máy thu và việc xử lý chỉ giới hạn với tín hiệu dải nền. Các thông số sau được sử dụng trong chương trình:

- Dữ liệu của các user được tạo ra một cách ngẫu nhiên.
- Mã hoá kênh truyền là mã Turbo $g=[1\ 1\ 1, 1\ 0\ 1]$, tốc độ $r = 1/2$.
- Mã trải phổ là mã giả ngẫu nhiên hay mã Gold với độ lợi trải phổ $N = 31$.
- Quá trình giải mã Turbo ở phía thu sử dụng giải thuật Log-MAP.
- Các bộ tách sóng đa truy cập được mô phỏng gồm: Conventional (bộ tách sóng thông thường), Decorrelator (bộ tách sóng giải tương quan), MMSE, SIC, CONV-PIC (đa tầng với tầng đầu thông thường), DEC-PIC (đa tầng với tầng đầu giải tương quan), DEC-FD (hồi tiếp quyết định với tầng đầu giải tương quan), MMSE-FD (hồi tiếp quyết định với tầng đầu MMSE).

Hình 5 mô tả chất lượng của các bộ tách sóng đa truy cập ở hệ thống CDMA không có mã hoá kênh. Đồ thị BER cho thấy có một sự cải thiện đáng kể chất lượng khi sử dụng các bộ tách sóng đa truy cập so với bộ tách sóng thông thường nhất là ở kênh AWGN. Việc đánh giá chất lượng của các bộ tách sóng trong hệ thống có và không có mã hoá kênh (dùng mã Turbo) được thể hiện trong hình 6. Chúng ta thấy rằng chất lượng hệ thống tăng đáng kể khi có mã hoá kênh. Chẳng hạn, với bộ tách sóng MMSE, giá trị E_b/N_0 yêu cầu nhỏ hơn 8dB với cùng BER = 10^{-4} (lập 3 lần khi giải mã). Ngoài ra, trong hệ thống có mã hoá Turbo, cả hai bộ tách sóng MMSE và DEC-PIC đều cho chất lượng gần như nhau khi số lần lặp bằng 1 hay 3.



Hình 7 Đồ thị BER theo số lần lặp khi giải mã Turbo



Hình 8 Đồ thị BER theo số users tích cực trong hệ thống

ng

Ngoài ra, một vấn đề đáng quan tâm là độ phức tạp của hệ thống khi sử dụng mã hoá Turbo. Với hệ thống có mã hoá Turbo thì độ phức tạp, được xét ở góc độ thời gian thực thi chương trình, lớn hơn nhiều. Một số giá trị trong bảng 1 sẽ thể hiện điều này.

(K = 7 user, frame: 10000 bits, tốc độ CPU 2.4 Ghz, RAM 256 MB)

Bảng 1 Thời gian thực thi chương trình của các bộ tách sóng thông thường và MMSE

Bộ tách sóng/ số lần lặp	Thời gian thực thi (giây)
CONV/ không mã hoá	0.090
MMSE/ không mã hoá	0.100
MMSE/ 1	188.441
MMSE/ 3	233.806
MMSE/ 5	299.957

6. KẾT LUẬN

Chất lượng của các bộ tách sóng đa truy cập trong hệ thống CDMA có mã hoá Turbo dưới môi trường AWGN và fading đã được đánh giá. Việc so sánh với trường hợp hệ thống CDMA không có mã hoá cũng đã được thực hiện. Các kết quả mô phỏng cho thấy có một sự cải thiện đáng kể chất lượng và dung lượng khi sử dụng các bộ tách sóng đa truy cập cho hệ thống CDMA có mã hoá Turbo. Tuy nhiên, tính phức tạp của máy thu đòi hỏi cần phải triển khai thực hiện tách sóng đa truy cập trên các chip DSP hay ASICs để nghiên cứu triển khai giải thuật, khảo sát đáp ứng thời gian thực. Qua đó, đề ra các giải pháp để nâng cao hiệu suất tính toán, giảm độ trễ, vv... So với trường hợp kênh AWGN, chất lượng tách sóng thu được trong kênh fading cho thấy mức độ hiệu quả là không cao. Một giải pháp trong trường hợp này là kết hợp với việc thực hiện kỹ thuật phân tập ở máy thu hay kết hợp với hệ thống MIMO.

Trong cấu trúc các máy thu đã khảo sát ở trên, khối MUD và khối giải mã kênh được thực hiện một cách độc lập. Gần đây, một phương pháp tách sóng mới đã được đề nghị mà cho chất lượng rất tốt, dựa trên nguyên lý Turbo, được gọi là Turbo MUD [4]. Phương pháp này là sự kết hợp giữa giải mã kênh và tách sóng đa truy cập thông qua việc trao đổi thông tin mềm giữa hai quá trình đó. Đây là hướng nghiên cứu rất có triển vọng cho việc cải thiện chất lượng và dung lượng của hệ thống CDMA.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Verdu, *Multiuser Detection*, Cambridge University Press, UK, (1998).
- [2]. C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, *Near Shannon Limit Error – Correcting Coding and Decoding: Turbo-codes*, in ICC 1993, (Geneva, Switzerland), pp1064-1070, May (1993).
- [3]. www.3gpp.org và www.3gpp2.org.
- [4]. X. Wang, H. V. Poor, *Iterative (Turbo) Soft Interference Cancellation and Decoding for Coded CDMA*, IEEE Trans. on Comm., Vol. 47, No. 7, July (1999).
- [5]. M. C. Valenti, *Iterative Detection and Decoding for Wireless Communications*, Virginia Polytechnic Institute and State University, PhD Thesis, July (1999).
- [6]. M. C. Valenti, *Turbo Codes and Iterative Processing*, in proc IEEE New Zealand Wireless Comm., Symp. '98 (Auckland, New Zealand), Nov. (1998).
- [7]. H.V. Poor, S.Verdu, *Probability of Error in MMSE Multiuser Detection*, IEEE Trans. on Information Theory, Vol.43, May (1997).
- [8]. E. Biglieri, J. Proakis, and S. Shamai (Shitz), *Fading Channels: Information-Theoretic and Communications Aspects*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 44, No. 6, Oct. (1998).
- [9]. B. Sklar, *A Primer on Turbo code concepts*, IEEE Communications Magazine, Vol.35, Dec. (1997).
- [10]. B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, Second Edition, (1993).