

MIMO-OFDM 시스템에서 간략화된 PAR 감쇄 기법

통신회원 송형규*, 정회원 국형준**

Simplified PAR Reduction Technique for MIMO-OFDM System

Hyung-Kyu Song* *Lifelong Member*, Hyung-Joon Kook** *Regular Member*

요약

MIMO-OFDM 시스템은 차세대 무선 통신 시스템의 성능을 높일 수 있는 효과적인 기술로 고려되어 지고 있다. 이러한 이유로 본 논문에서는 고속 통신에 용이한 VBLAST가 적용된 OFDM 시스템을 고려하였다. OFDM 전송 방식은 고속의 전송률 및 페이딩 극복 특성이 우수한 반면에 높은 PAR 특성으로 인한 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점은 IFFT 수행시 동일 위상의 확률적인 가산으로 인해 시간 축에서 peak power가 발생되기 때문이다. 현재까지 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 PAR 감쇄 기법들이 개발되었고, 그 중 스크램블링 기법이 가장 대표적인 방식으로 사용되어진다. 기존의 스크램블링 방식은 단일 안테나 시스템에 적합하도록 설계되어 있어 다중안테나 시스템에 적용할 경우 매우 복잡한 처리과정을 야기한다. 본 논문에서는 스크램블링 방식 중 구현의 용이성을 고려한 방법인 SLM 방식을 이용하여 MIMO-OFDM 시스템에서의 효율적인 PAR 감쇄 기법을 제안한다. 제안된 기법은 사이드 정보를 매우 정확하게 검출해 낼 수 있어 전체적인 시스템의 성능에 향상을 가져온다.

Key Words : MIMO, VBLAST, OFDM, PAR, SLM, MRC.

ABSTRACT

A combining of MIMO signal processing with OFDM is regarded as a promising solution of enhancing the performance of next generation wireless system. Therefore, in this paper, an OFDM-based wireless system employing layered space-time architecture is considered for a high-rate transmission. In the MIMO-OFDM system, we evaluate the PAR performance using the SLM approaches. The investigated SLM scheme for MIMO-OFDM signals selects the transmitted sequence with lowest average PAR over all transmitting antennas and retrieves the side information very accurately at the expense of a slight degradation of the PAR performance. The low probability of false side information can improve the overall detection performance of the MIMO-OFDM system with erroneous side information compared to the ordinary SLM approach, respectively. Also, we provide closed form of the average BER performance in MIMO-OFDM system using analytic approach.

I. 서론

최근 무선 이동 통신 시장에서의 양적인 성장, 멀티미디어 서비스의 사용 요구뿐만 아니라 고속의 인터넷 확산 그리고 전화 시장의 일반화로 인해, 앞으로의 무선 이동 통신 시스템은 음성 위주의 서비

스에서 멀티미디어 데이터 위주의 서비스로 변화할 것으로 보인다. 이와 같이 대용량의 데이터를 고속으로 전송해야 하는 필요성이 증대되고 있기 때문에, 높은 데이터 전송률의 신뢰적인 통신이 이루어져야 한다. 전송률을 높이기 위한 방안으로서, 다중송·수신안테나를 이용하여 용량을 극대화하는 시공

* 본 결과물은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과입니다.

* 세종대학교 정보통신공학과 (songhk@sejong.ac.kr),

** 세종대학교 컴퓨터공학과 (kook@sejong.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-11-471, 접수일자 : 2005년 11월 22일

간 멀티플렉싱 기법, 즉 BLAST(Bell Labs Layered Space Time)가 제안되었다[1]. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식은 다중경로 페이딩 채널에 강하고, 대역폭 효율이 높은 이유로 지상파 방송, 실내용 멀티미디어 통신 분야에서 표준으로 채택되어 많은 관심을 보이고 있다. 하지만 시간 영역 OFDM 신호는 독립적으로 변조된 부반송파들로 구성되므로 이들이 동위상으로 더해질 때 큰 크기의 신호가 발생하여 PAR가 나타난다[4]. 높은 PAR가 발생한 경우, K개의 신호가 동일한 위상으로 더해지면 peak power는 average power의 K배가 된다. PAR가 크면 ADC (Analog-to-Digital Converter)와 DAC (Digital-to-Analog Converter)의 복잡도가 증가하고 RF (Radio Frequency) 전력 증폭기의 효율이 감소하는 단점이 발견된다. PAR를 감소시키기 위해 몇 가지 기법들이 제안되었는데 그중 대표적인 방식이 스크램블링 방식이다. SLM 방식은 주파수축에서 다수의 위상 변환 벡터를 곱하여 각각을 IFFT한 후에 가장 적은 PAR 레벨을 생성하는 위상 변환 벡터를 수신 신호를 전송하는 방식이다[2][3]. 이 방식은 위상 변환 벡터의 수가 증가할수록 우수한 PAR 감쇄 성능을 제공한다. 반면에 위상 변환 벡터의 수가 증가할수록 수신단으로 전송해야 하는 사이드 정보가 증가한다는 단점을 가지고 있다. 또한 위상 변환 벡터 수만큼의 IFFT 연산이 필요하기 때문에 전송단의 복잡도가 증가하게 된다. 또한 VBLAST를 사용하는 MIMO-OFDM시스템에서는 복잡도가 전송안테나의 수만큼 증가하게 되고, 그에 따라 수신단에서도 PAR 감쇄기법으로부터 나타난 사이드 정보를 정확하게 검출하는 것이 매우 어렵게 된다.

이러한 이유로 본 논문에서는 스크램블링 방식 중 구현의 용의성을 고려한 방법인 SLM 방식을 이용하여 다중안테나 시스템에서의 효율적인 PAR 감쇄 기법을 제안한다.

II. 다중안테나시스템에서 PAR 정의

우리는 M 전송 안테나와 N 수신 안테나를 사용하는 K 부반송파의 OFDM 시스템을 고려한다. 만약 우리가 i 번째 전송 안테나의 데이터 형태로써 주파수축 계수 $X_i(k)$ 를 나타낸다면, $x_i(n)$ 은 i 번째 전송 안테나 데이터 형태의 IFFT 결과이다. 그 관계는 다음과 같이 유도되어진다.

$$x_i(n) = \text{IFFT} [X_i(k)] \quad (1)$$

여기서 n은 OFDM 심벌의 시간 축 계수 (0, 1, ..., K-1)이다. i 번째 전송 안테나의 데이터 벡터 \mathbf{x}_i 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{x}_i = [x_i(0), x_i(1), \dots, x_i(n), \dots, x_i(K-1)]^T \quad (2)$$

OFDM 신호는 각 부반송파에서 독립적으로 변조되어지기 때문에, 결합된 OFDM 신호는 어떤 경우에 대해서는 큰 peak power를 가질 것이다. 그 peak power는 부반송파의 수가 증가함에 따라서 증가되어 진다. peak power는 일반적으로 PAR 관점에서 구해진다.

$$\text{PAR} = \frac{\max |x_i(n)|^2}{E[|x_i(n)|^2]} \quad (3)$$

여기서 $\max |x_i(n)|^2$ 는 최대 envelope power를 나타내고, $E[|x_i(n)|^2]$ 은 average power를 나타낸다. 부반송파의 수가 K일 때 최대 PAR는 K이다.

부반송파의 개수 K가 충분히 크다면 변조된 신호는 중심극한정리에 의하여 출력신호의 실수부와 허수부의 크기가 모두 가우스 분포를 가지며 OFDM 신호의 크기는 Rayleigh 분포를 가진다. 전력분포는 자유도가 2이고 평균이 0인 중심 chi-square 분포가 되어, 전력의 확률밀도 함수는 다음 식처럼 나타낼 수 있다.

$$F(z) = 1 - e^{-\text{PAR}_0} \quad (4)$$

여기서 PAR_0 는 특정 임계값이 된다.

OFDM 샘플들이 서로 상관성이 없다고 한다면, 어떠한 특정한 임계값 PAR_0 를 초과하는 PAR에 대한 확률 값은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\text{Pr}[\text{PAR} > \text{PAR}_0] = 1 - (1 - e^{-\text{PAR}_0})^K \quad (5)$$

III. 일반적인 SLM 기법

일반적인 SLM 방식에서 V개의 통계적으로 독립적인 OFDM 심벌들은 동일한 정보를 나타낸다고 가정한다. 선택적 매핑의 핵심은 동일한 정보를 나타내는 V개의 신호들 중에서 원하는 성질에 부합하

는 하나의 특정한 신호를 선택하기 위한 것이다. 부 반송파로 정보의 매핑 후에, 각 OFDM 심벌은 V 개의 벡터들 $\mathbf{P}^{(v)} = [P^{(v)}(0), \dots, P^{(v)}(K-1)]^T$ 와 곱해진다. 그 결과로 생성되어진 $M \cdot V$ 개의 다른 OFDM 심벌들의 집합 $\mathbf{X}_{i^{(v)}}$ 은 다음과 같이 생성되어진다.

$$\mathbf{X}_{i^{(v)}} = \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{P}^{(v)}, 1 \leq v \leq V \quad (6)$$

이렇게 생성된 모든 새로운 OFDM 심벌들은 IFFT로 시간축으로 변환되어지고 심벌들 중 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 가 선택되어진다.

SLM을 효율적으로 이행하기 위해, $P^{(v)}(k)$ 의 구성요소는 $\pm 1, \pm j$ 로 이루어져있다. 이 구성 요소들의 순서는 서로 교환되고, 더해지고, 빼지는 과정을 통해서 단순하게 이행되어진다. i 번째 전송 안테나에 대한 V 개의 독립적인 OFDM 심벌들 $\mathbf{x}_{i^{(v)}}$ 은 같은 정보를 나타낸다. 그리고 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 가 선택되어진다. 전송할 때에 가장 낮은 PAR를 가지는 심벌을 선택하여 전송하기 때문에 특정한 임계값 PAR_0 를 초과하는 PAR_{low} 에 대한 확률 값은 다음과 같다.

$$\Pr[\text{PAR}_{\text{low}} > \text{PAR}_0] = [1 - (1 - e^{-\text{PAR}_0})^K]^V \quad (7)$$

선택적 매핑의 핵심은 동일한 정보를 나타내는 V 개의 신호들 중에서 원하는 성질에 부합하는 하나의 특정한 신호를 선택하기 위한 것이다. i 번째 전송 안테나에 대한 V 개의 독립적인 OFDM 심벌들 $\mathbf{x}_{i^{(v)}}$ 중에서 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 가 다음 조건을 만족하면서 선택되어진다.

$$\tilde{v}_i = \underset{1 \leq v \leq V}{\operatorname{argmin}} \left[\max_{1 \leq n \leq K} |x_{i^{(v)}}^{(n)}| \right] \quad (8)$$

여기서 \tilde{v}_i 는 i 번째 전송 안테나에 대한 V 개의 독립적인 OFDM 심벌들 $\mathbf{x}_{i^{(v)}}$ 중 가장 낮은 PAR를 가진 심벌의 인덱스이다. 전송 심벌 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 는 $\mathbf{x}_{i^{(\tilde{v}_i)}}$ 와 같다. 전송할 때에 가장 낮은 PAR를 가지는 심벌을 선택하여 전송하기 때문에, 그 심벌의 인덱스도 같이 전송해 주어야 한다.

수신된 데이터를 복원하기 위해서, 수신기는 M

전송 안테나들의 $\mathbf{P}^{(\tilde{v}_i)}$ 에 대한 정보를 알고 있어야 한다. 따라서 전송기는 각 안테나의 사이드 정보 \tilde{v}_i 를 전송해야만 한다. 각 안테나마다의 사이드 정보 \tilde{v}_i 를 전송하기 위해 요구되어지는 비트 수는 $\log_2 V$ 이다.

IV. 간략화된 SLM 기법

간략화 된 SLM 기반의 MIMO-OFDM 시스템에서, M 개의 전송안테나 중 i 번째 안테나의 OFDM 심벌 $X_i(k)$ 의 각 부 반송파들은 V 개의 벡터들 중 하나인 $\mathbf{P}^{(v)} = [P^{(v)}(0), \dots, P^{(v)}(K-1)]^T$ 의 구성 요소들과 곱해진다. 그 결과로 V 개의 다른 OFDM 심벌들의 집합이 생성되어 진다.

$$\mathbf{X}^{(v)} = [\mathbf{X}_1^{(v)} \mathbf{X}_2^{(v)} \dots \mathbf{X}_{N_i}^{(v)}] \quad (9)$$

위의 과정 후에, 모든 새로운 OFDM 심벌들은 IFFT를 통해 시간축으로 변환되고, M 개의 전송 심벌들에 대해 평균 내어진 결과 중 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 가 선택되어진다. 모든 M 개의 전송 안테나에 대해서 전송할 때에 가장 낮은 평균 PAR를 가지는 심벌을 선택하여 전송하기 때문에 특정한 임계값 PAR_0 를 초과하는 PAR_{low} 에 대한 확률 값은 다음과 같다.

$$\Pr[\text{PAR}_{\text{low}} > \text{PAR}_0] = [1 - (1 - e^{-\text{PAR}_0})^{K \cdot M}]^V \quad (10)$$

간략화 된 SLM 기반의 VBLAST-OFDM 시스템에서, M 개의 전송안테나 중 i 번째 안테나의 OFDM 심벌 $X_i(k)$ 의 각 부 반송파들은 V 개의 벡터들 중 하나의 구성요소들과 곱해진다. 그 결과로 M 개의 전송 심벌들에 대해 평균 내어진 V 개의 다른 OFDM 심벌들의 집합이 생성되어 진다. 그 중 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 가 다음 조건을 만족하면서 선택되어진다.

$$\tilde{v} = \underset{1 \leq v \leq V}{\operatorname{argmin}} \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \max_{1 \leq n \leq K} |x_{i^{(v)}}^{(n)}| \right] \quad (11)$$

여기서 \tilde{v} 는 $\mathbf{X}^{(v)}$ 중에서 가장 낮은 PAR를 가지는 심벌의 인덱스이다. 사이드 정보 \tilde{v}_i 를 전송하

기 위해 요구되어지는 비트 수는 $\log_2 V$ 이지만, 단지 하나의 전송안테나에서만 전송되어진다. 전송된 심벌 $\tilde{\mathbf{x}}$ 는 $\mathbf{x}_{f,(\tilde{\tau})}$ 와 같다. 모든 M 개의 전송 안테나에 대해서 전송할 때에 가장 낮은 평균 PAR를 가지는 심벌을 선택하여 전송하기 때문에 그 심벌의 인덱스도 같이 전송해 주어야 한다.

수신된 데이터를 복조하기 위해서, 그 수신기는 전송 안테나의 $\mathbf{P}^{(\tilde{\tau})}$ 에 대한 정보를 알고 있어야 한다. 따라서 전송기는 사이드 정보 $\tilde{\tau}$ 를 전송해야만 한다. M 개의 전송 심벌들에 대해 평균 내어진 결과 중 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 $\tilde{\mathbf{x}}$ 가 선택되어지기 때문에, 전송기는 동일한 하나의 사이드 정보를 수신기로 전송하는 것이 가능하다. 그러므로 그에 따른 수신 다이버시티 효과가 나타나게 된다.

V. 사이드정보 검출 오류확률 및 그에 따른 BER 성능

수신측에서, 데이터를 복원하기 위해서는 수신된 신호에 포함되어있는 사이드 정보로부터 전송된 OFDM 신호의 발생을 알 수 있어야한다.

간략화 된 SLM 기반의 VBLAST 전송기법을 사용하는 MIMO-OFDM 시스템에서, 하나의 전송 안테나는 사이드 정보 비트를 포함하여 전송하고 N 개의 수신안테나들은 같은 정보를 수신 받는다. 다이버시티 차수를 D 라 하면 VBLAST의 경우는 $D=N$ 차의 수신 다이버시티의 효과를 얻을 수 있게 된다. 따라서 사이드 정보의 오류확률은 다음과 같다.

$$P_{f, SLM} \approx \log_2 V \cdot P_b \tag{12}$$

이때 P_b 는 다음과 같다.

$$P_b = \left[\frac{1}{2}(1-\mu) \right]^D \cdot \sum_{\omega=0}^{D-1} \binom{D-1+\omega}{\omega} \left[\frac{1}{2}(1+\mu) \right]^\omega \tag{13}$$

여기서 $\mu = [\gamma_0 / (1 + \gamma_0)]^{-1/2}$ 이고 D 는 다이버시티의 차수를 나타내며, γ_0 는 채널 당 평균 신호 대 잡음비이다[4].

사이드 정보의 검출이 정확히 이루어 지지 않았다면 그에 따른 조건부 BER은 대략 1/2이 된다. 위와 같은 사이드 정보 오류확률을 고려한 전체적인 BER 성능은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{e, SLM} \approx P_e \cdot (1 - P_{f, SLM}) + \frac{1}{2} P_{f, SLM} \tag{14}$$

여기서 P_e 는 사이드정보가 정확히 검출되었을 경우에 대한 MIMO-OFDM의 BER이다. 간략화된 PAR 제거기법의 경우 식 (14)에서 볼 수 있듯이, 수신 다이버시티의 영향으로 인해 사이드정보검출 오류 확률이 매우 낮으므로 전체적인 BER 성능은 대부분 P_e 에 의해 결정되어진다.

VI. 모의실험 및 고찰

제안되어진 SLM 방식을 사용하여 MIMO-OFDM 시스템에서의 PAR 성능을 측정해 본다. 이 결과들은 QPSK 변조된 256 부반송파를 사용하여 이루어졌다.

그림 1은 다중안테나를 가진 MIMO-OFDM 시스템에서의 간략화 된 SLM 기법을 적용한 경우에 대한 PAR 성능을 보여준다. 간략화 된 SLM 접근의 경우는 기대했던 것처럼 전송 안테나가 증가함에 따라, V 와 상관없이 PAR 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 2는 일반적인 PAR감쇄 기법과 간략화된 PAR감쇄 기법의 사이드정보검출 오류확률을 보여준다. 간략화된 기법의 사이드정보검출 오류확률의 경우 앞에서 언급한 수학적 접근과 모의실험을 통해 얻어진 결과가 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 또한 간략화된 PAR감쇄 기법의 경우 수신 다이버시티의 영향으로 일반적인 경우보다 사이드정보 검출 오류확률이 매우 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 수신다이버시티의 크기는 수신 안테나의 수만큼임을 알 수 있다. 또한 V 가

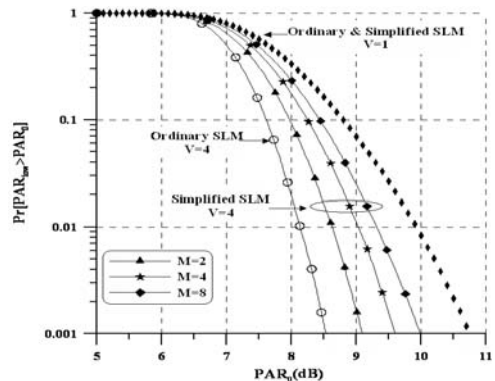


그림 1. MIMO-OFDM시스템에서 일반적인 SLM기법과 간략화된 SLM 기법의 PAR 성능 ($V = 4$)

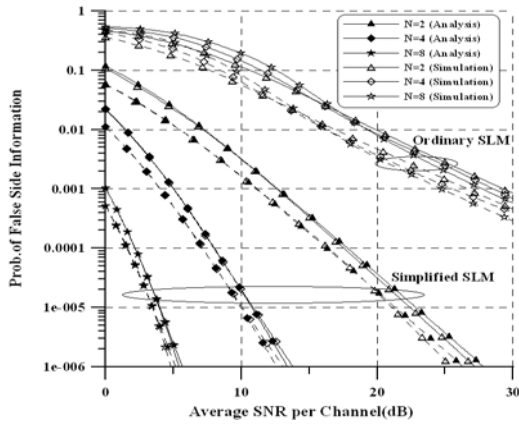


그림 2. MIMO-OFDM 시스템에서 일반적인 SLM 기법과 간략화된 SLM 기법의 사이드정보 검출오류 확률

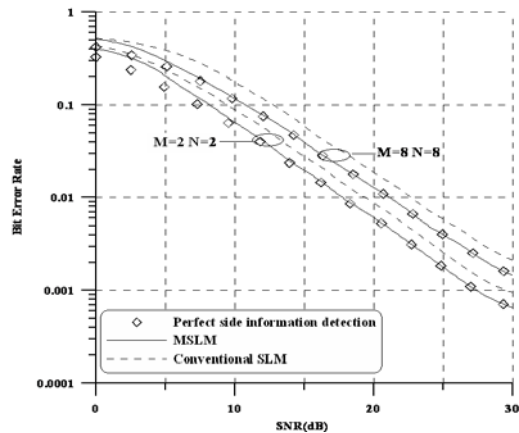


그림 3. SLM 기법에서 $V=4$ 일 경우의 사이드정보 오류검출확률을 고려한 MIMO-OFDM 시스템의 전체적인 BER 성능

증가함에 따라 송수신 안테나의 수와 관계없이 성능의 감쇄가 있음을 확인 할 수 있다.

그림 3은 사이드정보검출오류 확률을 고려한 전체적인 BER 성능을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 간략화된 SLM 기법은 수신 다이버시티를 통해 사이드정보를 거의 완벽하게 검출해 낼 수 있으므로 15dB 이상에서 사이드정보가 완벽하게 검출된 그래프와 거의 동일한 성능을 나타내는 것을 보여준다.

VII. 결론

본 논문은 다중안테나를 사용하는 OFDM 시스템에 적합한 간략화된 PAR 감쇄 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 모든 전송안테나에서 평균 PAR 성능이 가장 작은 SLM 시퀀스를 적용함으로써 PAR 감쇄 성능에는 약간의 감소가 있지만 사이드정보를

매우 정확하게 검출 할 수 있어 전체적인 시스템의 BER 성능을 향상 시키게 된다. 또한 제안된 기법은 다중안테나를 사용하는 모든 OFDM 시스템에 적용가능하다.

참고 문헌

- [1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communications in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 41-59, Autumn 1996.
- [2] R. W. Bauml, R. F. Fischer, and J. B. Huber, "Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping," *Electronics Letters*, vol. E85-B, no. 4, pp. 840-844, April 2002.
- [3] M. Breiling, S. H. Muller and J. B. Huber, "SLM peak-power reduction without explicit side information," *IEEE Communications Letters*, vol. 5, no. 6, pp. 239-241, June 2001.
- [4] S. H. Muller and J. B. Huber, "A comparison of peak power reduction schemes for OFDM," *Global Telecommunications Conference*, vol. 1, pp. 1-5, November 1997.
- [5] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill Inc., New York 2004.

송형규 (Hyoung-Kyu Song) 종신회원
 1996년 2월 연세대학교 전자공학과 박사
 1996년 1월~2000년 2월 전자부품연구원 책임연구원
 2000년 3월~현재 세종대학교 정보통신공학과 부교수
 <관심분야> 디지털통신, 방송통신

국형준 (Hyung-Joon Kook) 정회원
 1979년 2월 서울대학교 공과대학 졸업
 1983년 8월 U. of South Carolina at Columbia,
 Computer Science 석사
 1989년 5월 U. of Texas at Austin, Computer
 Science 박사
 1989년 9월~현재 세종대학교 컴퓨터공학과 부교수
 <관심분야> Intelligent Systems, Expert Systems