

실시간 다중주파수 변조 시뮬레이션 시스템의 설계 및 구현

정익상*

*원광대학교 컴퓨터소프트웨어공학과

Design and implementation of a real-time multi-frequency
modulation simulation system

Ik-sang Jeong*

*Wonkwon University

E-mail : wjddlrtd0110@naver.com

요 약

본 연구는 아날로그 및 디지털 변조 방식을 통합한 다중주파수 변조 시스템을 구현하고 성능을 분석하였다. AM, FM, PM의 아날로그 변조와 ASK, FSK, PSK, QAM의 디지털 변조를 단일 플랫폼에서 구현 하였으며, 특히 고차 변조 방식의 성좌도 매핑과 Gray 코딩 알고리즘을 정확하게 구현하였다. 수치적 안정성을 보장하는 적분 알고리즘과 위상 연속성 제어방식을 통해 이론적 정확성과 실용적 성능을 동시에 달성하였다.

I. 서 론

정보 신호를 고주파 반송파에 실어 효율적으로 전송하는 기법인 변조 기술은 통신 시스템의 핵심 기법이다. 19세기 말 AM 변조 발명 이후 FM, PM등의 아날로그 변조 방식이 발전 되었고 20세기 후반 디지털 통신의 발달과 함께 ASK, FSK, PSK, QAM 등의 디지털 변조 방식이 등장 하였다. [1]

아날로그 변조에서 진폭 변조는 메시지 신호에 따라 반송파의 진폭을 변화시키는 방식이다. 구현이 간단하고 복조가 쉽다는 장점이 있다. 주파수 변조와 위상 변조는 각각 반송파의 순간 주파수와 위상을 변화시키는 방식이다. AM에 비해 잡음에 강한 특성을 갖는다. FM의 경우 Carson의 법칙에 따라서 대역폭이 결정되고 변조 지수에 따라 협대역과 광대역 FM으로 구분된다.[2]

디지털 변조 기술은 정보 이론이 발전하면서 스펙트럼 효율성과 전력 효율성을 동시에 달성하는 방향으로 진화하였다. 진폭편이변조는 가장 단순한 형태의 디지털 변조이다. 따라서 구현이 쉽지만 잡음에 취약하다. 주파수편이변조는 일정한 포락선을 가져 비선형 증폭기 사용이 가능하고 위상 편이 변조는 높은 전력 효율성을 제공한다.[3]

QAM은 고차 변조 방식이다. 진폭과 위상을 동시에 변조하여 높은 스펙트럼 효율성을 달성한다. 특히 16-QAM, 64-QAM 등은 현대의 무선 통신

시스템의 기술로 활용되고 있다. 이러한 고차 변조에서는 성좌도 설계와 비트 - 심볼 매핑이 성능에 중요한 영향을 주기 때문에 Gray 코딩을 통한 비트 오류율을 최소화 해야한다.[4]

본 연구에서는 이러한 다양한 변조 방식을 통합하여 하나의 시뮬레이터로 구현하고 각 방식의 성능 특성을 분석할 수 있는 시스템을 개발하였다.

II. 본 론

본론에서는 아날로그 변조 시스템의 설계 및 구현을 설명한다. 먼저 진폭 변조는 가장 기본적인 방식이다. 메시지 신호에 따라서 반송파의 진폭을 변화 시킨다. 본 연구에서는 DSB-LC (Double Sideband Large Carrier) 방식의 AM 신호를 구현 하였다. 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$s_{AM}(t) = A_c[1 + k_a m(t)]\cos(2\pi f_c t)$$

A_c 는 반송파 진폭, k_a 는 변조지수, f_c 는 반송파 주파수다. 본 구현에서는 메시지 신호의 동적 범위 제어를 중심으로 고려하였다. 메시지 신호를 정규화 하여 절댓값이 1이하가 되도록 하여 과변조(overmodulation) 현상을 방지하였다. 변조 효율성은 변조 지수의 제곱과 메시지 신호의 평

균 전력에 비례하고 전체 신호전력에 대한 정보 신호 전력의 비율로 정의된다.

주파수 변조는 정보신호에 따라서 반송파의 순간 주파수를 변화시키는 변조 방식이다. FM 신호의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$s_{FM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau)$$

k_f 는 주파수 편이 상수(frequency deviation constant)다. 아날로그 신호를 컴퓨터에서 수치적으로 시뮬레이션 할 때 가장 중요한 과제는 적분 연산의 수치적 정확도 확보이다. 본 연구에서는 단순한 직사각형 적분 규칙 대신 트라페조이드 적분 규칙을 적용하여 수치적 정확도를 향상시켰다.

```
108 dt = t[1] - t[0]
109 integrated_message = np.zeros_like(t)
110 for i in range(1, len(t)):
111     integrated_message[i] = integrated_message[i-1]
112     + (normalized_message[i]
113        + normalized_message[i-1]) * dt / 2
```

이러한 방법론은 저주파 메시지 신호에서 중요하게 사용되며 적분 오차로 인한 주파수 편이 왜곡을 효과적으로 최소화 한다. FM 신호의 대역폭은 변조지수에 의해 결정 되고 Carson 법칙에 따라 근사적으로 계산할 수 있다.

위상변조는 정보 신호에 직접 비례하여 반송파의 위상을 변화시키는 방식이다. PM 신호의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$s_{PM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + k_p m(t))$$

PM과 FM은 미분 - 적분의 수학적 관계를 가지며, 두 변조 방식이 이론적 연관성을 가짐을 증명하였다. 이러한 특성은 변조 시스템의 설계와 구현에서 중요한 고려사항이다.

III. 디지털 변조 시스템 설계

진폭편이 변조는 디지털 정보에 따라서 반송파의 진폭을 이산적으로 변화시키는 방법이다. 본 연구에서 구현한 시스템은 0비트와 1비트에 대응하는 진폭 레벨을 독립적으로 조절할 수 있도록 설계하였다. 이러한 설계로 On-Off Keying부터 다양한 레벨의 ASK까지 폭넓은 실험적 연구를 가능하게 했다.

주파수 편이 변조는 디지털 비트에 따라 서로 다른 주파수를 사용하는 방식이다. 이진 FSK의 경우에 0비트와 1비트에 대해 중심 주파수로부터 $\pm \Delta f$ 만큼 이격된 주파수를 사용한다. 본 구현에서 특별히 중점을 둔 사항은 위상 연속성(phase continuity)의 처리다. 연속 위상 FSK(Continuous Phase FSK, CPFSK)를 구현 하기 위해서 다음과 같은 누적 위상 추적 메커니즘을 개발했다.

```
167 phase += 2 * np.pi * freq * bit_duration
168 phase = phase % (2 * np.pi)
```

이렇게 접근하게 되면 심볼 전환점에서의 위상 불연속성을 방지하고 스펙트럼 효율성을 향상 시킨다.

위상편이변조는 디지털 정보를 반송파의 위상 변화로 전송하는 변조 방식이다. 이진PSK(BPSK)에서는 0비트와 1비트에 대해 각각 0° 와 180° 의 위상 상태를 사용한다.

4진 PSK(QPSK)에서는 2비트를 하나의 심볼로 처리하여 45° 간격으로 배치된 4개의 위상 상태를 사용한다. 본 연구에서는 비트 오류율 성능을 최적화 하기 위해 Gray코딩을 적용한 심볼 매핑을 구현하였다. Gray코딩의 핵심 원리는 인접한 심볼 간에 단일 비트만이 상이하도록 매핑함으로써 심볼 오류 발생 시 비트 오류를 최소화 하는 것이다.

구상진폭변조는 진폭과 위상을 동시에 변조하여 높은 스펙트럼 효율성을 달성하는 고차 변조 방식이다. QAM 신호는 동위상(In-phase) 성분과 직교 위상(Quadrature) 성분의 선형 결합으로 표현 된다. 16-QAM에서는 4비트를 하나의 심볼로 처리하여 16개의 성좌점을 사용한다. 복소 평면상에서 격자구조로 배치된 성좌점은 특정한 I 및 Q의 값의 조합에 대응된다. 본 설계에서는 Gray 코딩을 적용한 최적 매핑을 구현하여 비트 오류율 성능을 극대화 하였다.

IV. 시스템 확장성

본 시스템은 각 변조 방식을 독립적인 함수로 구현 하여 모듈화 하였다. 모든 변조 함수는 표준화된 인터페이스를 가지고 있어서 상호 교체가 가능하다. 공통 파라미터는 시간 벡터, 메시지 신호, 반송파 주파수, 변조 지수가 있으며 각 변조 방식별 특수 파라미터는 선택적으로 전달된다. 이러한 설계로 새로운 변조 방식의 추가가 쉽다.

Python의 반복문 오버헤드를 최소화 하기 위하여 NumPy 벡터화 연산을 최대한 활용하였다. 브로트캐스팅을 통해 배열 연산을 효율화 하고 사전에 계산된 상수들을 활용하여 실시간 계산 부하를 감소시켰다. 특히 삼각함수 계산에서 NumPy의 최적화된 구현을 활용하여 높은 정확도와 성능을 달성하였다.

대용량 신호 처리 시 메모리 사용량을 최적화 하기 위해 청크 단위 처리와 in-place 연산을 적극적으로 활용하였다. 불필요한 중간 변수 생성을 피하고 가비지 컬렉션 부하를 최소화하였다. 특히 대용량 신호 배열 처리에서는 메모리 단편화를 방지하기 위한 청크 단위 처리를 고려하였다.

현재 시스템은 다음과 같이 확장 가능하다. 64-QAM, 256-QAM 등의 고차원 변조 방식을 기존 QAM 구현을 확장하여 쉽게 구현할 수 있다.

OFDM 등의 다중 반송파 변조 방식 구현을 위한 구조가 있다. 적응 변조 기능을 추가하여 채널 상태에 따른 동적 변조 방식 선택 시뮬레이션이 가능하다. AWGN, 페이딩 채널 등의 모델을 추가하여 보다 현실적인 성능 분석이 가능하다.

V. 결 론

본 연구에서 구현된 각 변조 방식의 정확도를 검증하기 위해 이론적 특성과의 비교 분석을 수행하였다. FM 변조는 사인과 입력에 대한 주파수 편이를 측정하여 설정값과의 일치성을 정량적으로 평가하였다. 디지털 변조에서는 성좌도의 기하학적 특성을 분석하여 Gray 코딩의 정확성을 검증하였다.

각 변조 방식의 계산 복잡도는 대부분 선형 복잡도 $O(N)$ 을 나타내며 여기서 N 은 처리해야 할 샘플 수다. 고차 변조의 경우 심볼당 처리하는 비트 수가 증가하여 상대적으로 높은 효율성을 보인다. 벡터화 연산을 통해 메모리 사용량을 최적화 하였으며, 사전 계산된 룩업 테이블을 활용하여 실시간 처리 기능을 향상시켰다.

본 연구에서 설계한 다중모드 변조 시스템의 주요 성과는 다음과 같이 요약된다. AM, FM, PM의 아날로그 변조와 ASK, FSK, PSK, QAM의 디지털 변조를 단일 플랫폼에서 통합 구현하였다. 각 변조 방식은 해당 분야의 이론적 기반과 정확히 일치하도록 구현되어 수학적 정확성을 보장한다. 고차 디지털 변조에서 핵심적인 성좌도 매핑과 Gray 코딩 알고리즘을 정밀하게 구현하였다. 특히 16-QAM에서 비트 - 심볼 변환 과정과 최소 해밍거리 보장을 통해 이론적으로 최적화된 성능을 달성하였다.

향후 연구 방향으로서는 더 고차 변조 방식 추가, 다중 반송파 변조 기법의 구현, 적응 변조 시스템의 개발 등이 고려될 수 있다. 또한 채널 모델링과 잡음 효과를 포함한 완전한 통신 시스템 시뮬레이션으로의 확장이 가능하다.

참고문헌

- [1] Proakis, J. G., Salehi, M., "Digital Communications", 5th ed., McGraw-Hill, 2008.
- [2] Haykin, S., "Communication Systems", 4th ed., John Wiley & Sons, 2001.
- [3] Sklar, B., "Digital Communications: Fundamentals and Applications", 2nd ed., Prentice Hall, 2001.
- [4] Ziemer, R. E., Peterson, R. L., "Introduction to Digital Communication", 2nd ed., Prentice Hall, 2001