

QPSK 위성통신 채널에 대한 효율적 성능 평가 기법

정희원 김준명*, 정창봉*, 김용섭*, 황인관*

Efficient Performance Evaluation Method for QPSK Satellite Communication Channels

Jun-Myung Kim*, Chang-Bong Jung*, Yong-Seb Kim*,
In-Kwan Hwang* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 센트럴 모우먼트 알고리즘을 디지털 통신 채널에 적용함으로써 기존의 시뮬레이션인 기법인 Conventional Importance Sampling와 Improved Importance Sampling으로 해결할 수 없었던 문제점들의 해결 뿐 아니라 수행시간의 획기적인 개선도 가능하게 하였다. 즉 디지털 통신 채널의 수신단에서 잡음이 혼합된 수신신호의 센트럴 모우먼트를 추정하여 수신 신호의 확률적인 특성인 누적확률분포를 구함으로써 채널의 성능을 평가한다. 제안 알고리즘을 검증하기 위하여 Cadence사의 시뮬레이션 프로그램인 SPW를 이용하여 QPSK 위성통신 채널을 구현한 후 시뮬레이션 수행시간의 개선 효과를 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, not only the problems which could not be solved with Conventional Importance Sampling and Improved Importance Sampling of the early simulation method, and but also the improvements obtained in terms of computer run-time were studied, by applying the central moment algorithm to the digital communication channels. That is, the channel performance evaluation is done for obtaining the cumulative probability function of the statistical characteristics of received signal with estimating the central moment of the received signal mixed the noise in the digital communication receiver. We confirm the simulation run-time after we implemented the quaternary phase shift keying(QPSK) satellite communication channels using the Signal Processing Worksystem(SPW) of the Cadence incorporation to verify the suggested algorithm.

I. 서 론

주파수 자원의 고갈 현상과 멀티미디어 서비스를 수용하기 위해 새로이 제안되고 있는 통신방식은

신호처리 기술이 복합되어 주파수 대역을 가변적으로 할당 사용하는 복잡한 첨단 통신방식으로 급변하고 있다. 따라서 이러한 통신시스템의 실질적인 설계는 해석적인 접근방법이라기보다는 궁극적으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의존할 수 밖에 없게 되어, 그

* 충북대학교 전자공학과 위성통신시스템 연구실
논문번호 : 99352-0830, 접수일자 : 1999년 8월 30일

중요성은 날로 증가하고 있다.

이와 같이 해석적인 접근이 불가능하여 일반적으로 사용되고 있는 상용 시뮬레이터는 해석적인 접근방식의 한계를 극복하고 사용자에게 편의 및 융통성(flexibility)을 제공하기 위하여, 기본적으로 Monte Carlo(이하:MC)방식을 채용하고 있다. 그리하여 다양한 기능을 갖는 고가의 상용 시뮬레이터는 컴퓨터 수행시간의 치명적인 한계를 갖게 되어 실질적인 통신시스템의 설계에 활용되지 못하고 link budget을 확인하는 정도에 머무르고 있는 실정에 있다.

'70년대 중반이후 컴퓨터 수행시간의 한계는 21세기 통신기술 발전의 bottleneck으로 인식되기 시작하여 현재에 이르기까지, 경쟁력을 갖는 통신 시스템 개발의 관건이 될 수 있는 컴퓨터의 수행시간을 단축하기 위한 연구노력들이 국제적으로 매우 활발하게 진행되어 왔다. 그의 결과로서 IEEE Transaction on Communication등에 수많은 논문들이 발표되고 있으며 1984년,1988년,1993년,1997년도에는 Journal on Selected Areas in Communications에 특집으로 논문들이 발표되었다^{2,3)}.

그러나 대부분의 연구 결과는 단순한 특정 시스템 모델에 국한되거나 개발 알고리즘이 매우 복잡하여 실질적으로 상용화되기에는 아직도 해결해야 하는 많은 문제점을 안고 있다. 즉 이들 연구의 모든 접근방식은 기본적으로 Importance Sampling 기법(이하:IS)을 채용하고 있어 비선형 증폭기 또는 30차 이상의 메모리를 갖는 실질적인 통신시스템에서는 최적의 biasing parameter를 구하기가 복잡하고, 설정 구한다 하더라도 컴퓨터 수행시간의 단축 효과가 급격히 떨어지는 문제점을 피할 수가 없게 된다. 모든 기존의 IS 기법의 연구가 BPSK에 국한되어 있고 또한 채널 성능열화에 대한 모델링이 안되기 때문에 부/복호기가 포함된 전체 채널에 대한 IS기법에 의한 정확한 성능평가가 불가능하여 단순화기법을 채용해야 하는 등의 근본적인 문제점들이 해결되지 못하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 새로운 접근방식으로서 수신 신호의 센트랄 모우먼트를(이하:CMT)⁽¹⁾ 이용한 discrete probability mass function을 도입, 적용하여 기존의 IS기법이 BPSK에 국한되어져야 하는 문제점들을 해결하고, 메모리와 잡음 요인을 포함하고 있는 비선형 QPSK 위성통신 채널에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 모든 성능 열화 요인들이 포함된 위성통신 채널에서도 적용 가능성을 입증하고자 한다.

II. 센트랄 모우먼트를 이용하는 새로운 채널 성능 평가 방법

그림1.은 기존의 연구들에 의해 해결되지 못했던 근본적 요인, 즉 비선형성과 메모리를 포함하고, 시스템 응답이 $g(\cdot)$ 인 기저대역에서의 BPSK 채널 모델이다. 즉 이 시스템 모델에 새로운 알고리즘이 적용될 수 있으면 보다 복잡한 실질적인 디지털 통신 시스템으로도 적용 가능함을 입증하기 위한 단순 모델이다.

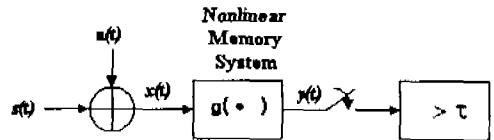


그림 1. 단순 등가 기저대역 통신시스템 구성도

그림에서와 같이 송신 신호 $s(t)$ 와 가우시안 잡음 $n(t)$ 가 결합하여 $x(t)$ 가 수신된다. 따라서,

$$s(t) = \sum_i a_i p(t - iT) \tag{1}$$

이때 수신신호 $x(t)$ 는

$$x(t) = \sum_i a_i p(t - iT) + n(t) \tag{2}$$

가 된다. 여기서 a_i 는 같은 확률을 갖는 A나 -A이고, $p(t)$ 는 $[0, T]$ 에서만 값을 갖고 나머지 구간에서는 0인 구형파이며, $n(t)$ 는 양쪽의 전력 밀도 함수가 $N_0/2$ 이고 평균이 0인 가우시안 잡음이다³⁾.

기존의 연구결과들이 해결하지 못했던 한계를 극복하기 위하여, 본 연구에서는 새로운 접근방식으로 여러 가지 측면에서 매우 유리한 장점을 갖는 이산 Probability Mass Function(이하:PMF)를 도입사용한다.

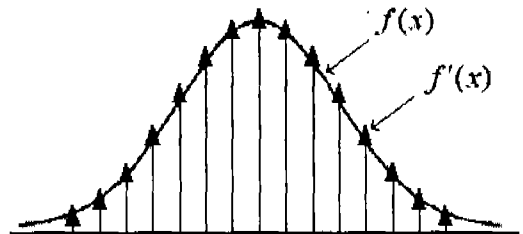


그림 2. 연속 PDF 및 이산 PMF

그림 2.에서와 같이 연속 Probability Density Function(이하: PDF)와 이산 PMF의 센트랄 모우멘트가 충분히 큰 차수 N 에 대하여 식 (3)과 같이 동일한 값을 갖으면, 식 (4)처럼 두 랜덤변수는 확률적으로 동일한 것으로 볼 수 있다. 그리하여 복잡한 시스템 함수에 대한 기대값은 식 (5)와 같이 간단한 합으로 얻어지는 특징을 갖는다.

$$E\{x^n\} = \begin{cases} \int x^n f(x) dx \\ \int x^n f'(x) dx \end{cases} \text{ for } \begin{cases} n=1 \sim N \\ N=2\nu-1 \end{cases} \quad (3)$$

$$f(x) \equiv f'(x) = \sum_{i=1}^{\nu} w_i \delta(x-x_i) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_e &= E\{H[g(x)]\} \\ &= \int H[g(x)]f(x) dx \\ &\equiv \sum_{i=1}^{\nu} H[g(x_i)]w_i \end{aligned} \quad (5)$$

단, $H(y)$ 는 D_0 를 오류영역이라 할 때 다음과 같이 정의된다.

$$H(y) = \begin{cases} 1 & y \in D_0 \\ 0 & y \in D \end{cases} \quad (6)$$

기존의 IS 기법은 기본적으로 작은 오류영역에 대하여 관심을 가지고 그 영역 내에서 오류의 발생을 증가시키고 그 효과를 수신단에서 보상하는 방법이다. 그리하여 최적의 biasing parameter를 구해야 하는 번거로움이 발생하게 되고, 내부 채널의 성능열화에 대한 모델링이 불가능해지며, 또한 M차의 메모리 시스템에서의 수행속도도 급격히 감소하게 되는 문제점을 피할 수가 없게 된다. 잡음을 biasing 시키지 아니하고 수신단에서의 신호와 잡음의 수신 상태를 오류영역을 포함한 전체 영역에서 있는 그대로 관측하여 확률적인 특성을 추출할 수 있다면 경계값 이하에서의 오류는 쉽게 구할 수 있게 된다.

이 개념을 확장하여, 수신신호 $y(t)$ 의 샘플로부터 N 차의 센트랄 모우멘트를 측정하고 이를 이용하여 이산 PMF를 구하면^[1] 채널오류율은 간단히 식 (7)과 같이 weighting의 합, 즉 이산 확률의 합으로 쉽게 구할 수 있게 된다.

$$P_e \equiv E\{H(y)\} \equiv \sum_{i=1}^{\nu} w'_i \quad (7)$$

이산 PMF를 이용하여 오류율을 구하기 위하여 기본적으로 충분한 차수의 센트랄 모우멘트를 구해야 하며, 고차의 센트랄 모우멘트를 정확히 예측하기 위해서는 샘플 수의 증가가 요구된다. 즉, 오류영역의 작은 Probability mass를 정확히 추측하기 위해서는 그에 상응하는 만큼 충분히 많은 수의 샘플을 취해야 오차 없는 BER 추측이 가능하다는 논리가 성립하게 되나, 센트랄 모우멘트의 특성을 정확히 분석하면 이러한 문제점은 간단히 해결될 수가 있게 된다.

BER을 정확히 하면서 sample saving 효과를 극대화하기 위한 방법으로서 :

- 이산 PMF의 weighting point 수의 증가
- biasing PMF의 도입
- 이산 Cumulative Probability Density (이하:CPD)를 이용한 interpolation 및 extrapolation 기법을 들 수가 있다.

특히 비선형 특성을 갖는 위성통신 채널에서 상향링크의 가우시안 잡음이 하향링크에서 non-gaussian으로 변형되어, 이산 CPD를 이용한 interpolation 및 extrapolation 기법을 적용하여 연속 CPD를 구함으로써 sampling saving factor가 극대화되도록 한다. 그리하여 적은 차수의 센트랄 모우멘트, 즉 적은 수의 샘플수로서도 충분히 정확한 채널 오류율의 추측이 가능해지며, 이때 산출된 연속 CPD는 채널 오류 요인 특성을 포함하게 된다.

그림 3.은 10^4 개의 샘플수로서 가우시안 잡음의 센트랄 모우멘트를 측정하고 이를 이용하여 이산 CPD 및 연속 CPD를 구하여 이론치와 비교하고 있으며, 단순 BPSK 시스템 모델의 경우 경계값을 '-1'로 환산하여 해석하면, 10^6 의 BER이 정확히 추측되는 결과를 보여주고 있다. 이는 개략 10^5 배 정도의 수행속도 개선 효과를 예시하고 있으며, 또한 이는 10^4 개의 샘플수로서 10^{-11} 정도의 BER도 정확

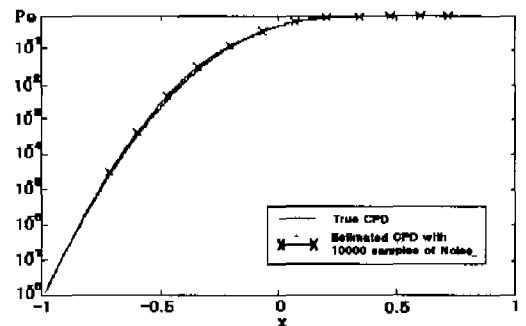


그림 3. 가우시안 잡음의 CPD

하게 추측할 수 있는 즉, 10^7 배의 수행속도 개선 가능성이 제시하고 있다.

III. 제안 기법을 이용한 QPSK 위성 통신 채널의 성능 평가

그림 4.는 상향 링크의 가우시안 잡음이 비선형 위성 증폭기를 거친 후 non-gaussian 잡음이 되어 그에 대한 해석이 복잡해지는 문제점을 제안 방식으로써 쉽게 극복할 수 있음을 설명하기 위한 단순 디지털 위성통신 채널 모델이다.

전체 채널의 성능은 $y_{0R}[i], y_{0I}[i]$ 이 독립인 경우와 같다.

$$P_c = P_{eR} + P_{eI} - P_{eR}P_{eI} \equiv P_{eR} + P_{eI} \quad (8)$$

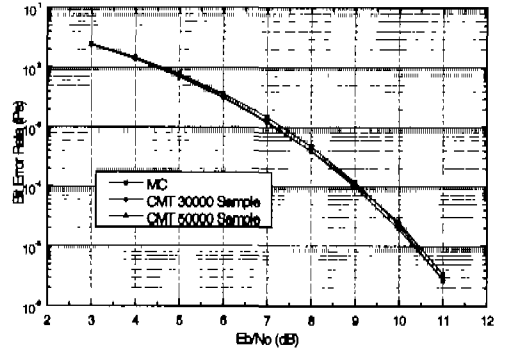
여기서 $P_{eR} + P_{eI} \gg P_{eR}P_{eI}$ 이므로 식(8)과 같이 된다.

하지만 전체 채널의 성능은 $y_{0R}[i], y_{0I}[i]$ 이 독립이 아닌 경우에도 I 채널과 Q 채널 성분이 교차되는 즉 $P_{eR}P_{eI}$ 성분만이 변하므로 독립인 경우와 같아 식 (8)의 적용이 가능하다.

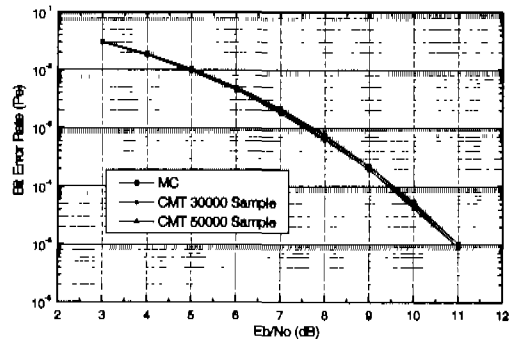
그리하여 그림 4.에 제안 방식을 적용하기 위하여 Cadence사의 통신 시뮬레이션 프로그램인 SPW(Signal Processing Worksystem)를 사용하였으며, 다음과 같이 순차적으로 전체 채널의 성능을 평가하였다.

- 각각의 수신신호 $y_{0R}[i], y_{0I}[i]$ 의 센트랄 모우먼트를 측정하고,
- 알고리즘으로부터 이산 PDF를 구한후,
- 이산 PDF를 이용하여 이산 CPD를 구한다.
- 이산 CPD를 이용하여 interpolation 및 extrapolation 기법을 적용하여 연속 CPD를 산출한다.

이때 수신 신호의 오류검출 임계치를 대입하면 각각의 채널 성능 P_{eR}, P_{eI} 를 구한다.



(a) TWTA의 input back-off가 -14dB 일 때



(b) TWTA의 input back-off가 -1dB 일 때

그림 5. 디지털 위성통신 채널의 BER 성능

Hughes사의 TWTA, TWT275H가 input back-off -14dB인 선형영역과 -1dB의 비선형 영역에서 동작되는 경우, 채널성능 평가 모델에서 수신신호의 가우시안 PDF가 non-gaussian 잡음으로 변형되어진 형태를 CMT를

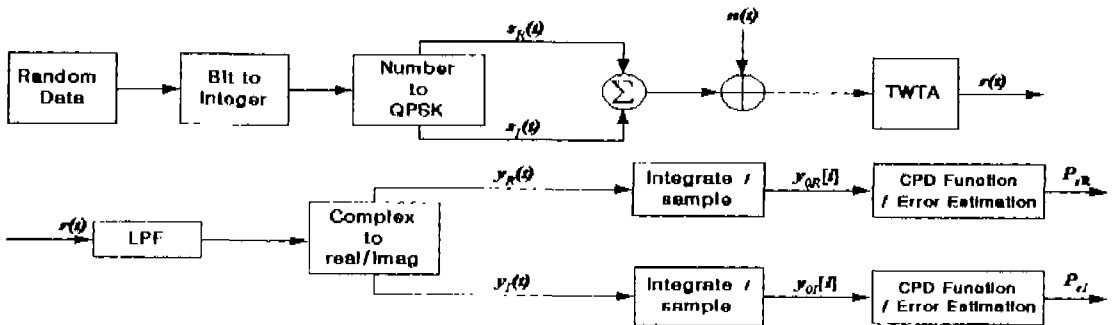


그림 4. 단순 디지털 위성통신 채널 모델

표 1. MC방식과 제안 방식의 수행시간 비교

E _b /N ₀ (dB)	TWTA Bo=-14dB, CMT = 30000 Sample				TWTA Bo=-1dB, CMT = 30000 Sample			
	Estimation of Pe(dB)		Run Time (min)		Estimation of Pe(dB)		Run Time (min)	
	MC	CMT	MC	CMT	MC	CMT	MC	CMT
3	-16.03	-16.27	2	15	-15.08	-15.27	2	15
4	-18.33	-18.67	3	15	-17.23	-17.53	2	15
5	-21.07	-21.59	3	15	-19.83	-20.29	3	15
6	-24.39	-25.09	4	15	-22.98	-23.51	4	15
7	-28.3	-29.24	5	15	-26.66	-27.5	5	15
8	-33.21	-34.01	35	15	-31.15	-32.1	35	15
9	-39.28	-39.53	65	15	-36.58	-37.1	45	15
10	-46.46	-46.03	620	15	-42.68	-43.84	360	15
11	-55.75	-54.64	2760	15	-49.92	-50.53	640	15

이용하여 간단히 추측할 수 있음을 보여주고 있으며, 이는 비선형 동작특성을 선형적으로 단순화하여 해석할 경우 발생하는 채널성능의 오차를, 정성적 또는 정량적으로 평가할 수 있는 근거가 될 수 있을 것이다.

그림 5는 TWTA의 input back-off가 -14dB인 선형 영역과 -1dB인 비선형 영역에서 동작하는 경우 내부채널의 BER 성능을, 표 1.은 Monte Carlo 방식과 제안 방식을 사용하여 성능평가를 실시할 때 소요된 실제시간의 측정결과를 각각 예시하고 있다. 여기서 MC방식은 95%실패구간에 들어오는 P_s값을 구하기 위해 100/P_s sample 만큼 시뮬레이션을 수행하여 BER값과 수행 시간을 측정하였으며 CMT값은 30000 sample 일 때의 BER값과 수행 시간을 측정하였다. 표 1.에서와 같이 단순 계산만으로도 제안방식은 기존 방식(MC)에 비해 약 180 배 이상의 수행속도 개선을 보여주고 있다. E_b/N₀가 클수록, 즉 low error rate 영역에서 제안방식 효율은 매우 급격히 증가하는 경향을 보이고있으며, 제안 알고리즘은 이동 위성 통신 채널 및 위성 ATM 전송 채널의 경우에 매우 효율적인 설계도로 사용될 수 있을 것이다.

IV . 결 론

본 논문에서는 제안 알고리즘을 설명하기 위한 단순 시스템 모델을 이용하고 있으나 모든 일반적인 시스템으로의 적용 가능성을 제시하고 있다. 표 1.에서처럼 제안방식은 컴퓨터 수행시간의 획기적인 단축효과로 인하여 장시간 소요되는 컴퓨터 수행시

간 때문에 불가능에 가까웠던 시뮬레이션 프로그램의 디버깅 및 개발을 단시간에 가능케 할 수 있음을 보여주고 있다. 특히 적은 오류율의 경우 개선효과가 뛰어나며 모든 신호 대 잡음비에 대해서 5~15 분 이내 성능평가를 가능하게 한다. 뿐만 아니라 그림 4.와 같이 수신신호의 센트랄 모우먼트 및 CPD를 산출하는 프로그램만을 간단히 삽입하는 방식을 채택하고 있어 알고리즘의 구현이 간략하므로 모든 통신 시스템에 쉽게 적용이 가능하며, 시스템의 성능에 영향을 주는 모든 잡음 요인에 대한 매우 효율적인 알고리즘으로서 복잡하게 급변하고 있는 통신 시스템의 국내 개발시 국제적인 경쟁력 제고를 위한 상세 설계에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] In-Kwan Hwang and Ludwik Kurz, "Digital data Transmission over Nonlinear Satellite Channel", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 41. No. 11, pp. 1694-1702, Nov. 1993.
- [2] P. J. Smith, M. Shafi, and H. Gao, "Quick Simulation: A Review of Importance Sampling Techniques in Communication Systems", "On Importance Sampling in Digital Communications : Part I: Fundamentals : *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.15, No.4, pp. 597-613, May 1997.
- [3] Dingqing Lu and Kung Yao, "Improved Importance Sampling Technique for Efficient Simulation of Digital Communication Systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.6, No.1, pp. 67-75, January 1988.
- [4] Michel C. Jeruchim, "Techniques for Estimating the Bit Error Rate in the Simulation of Digital Communication Systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. SAC-2, No.1, pp. 153-170, January 1984.
- [5] Nevio Benvenuto, Antonio Salloum, and Luciano Tomba, "Performance of digital radio links based on semianalytic method", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*,

