위성전송로에서 위상잡음을 갖는 DS/CDMA DPSK 시스템의 성능분석

(Performance Analysis of a DS/CDMA DPSK System with Phase Noise in a Satellite Channel)

Jin Young Kim

Central Research and Development Center
SK Telecom
9-1, Sunae-dong, Pundang-gu, Sungnam City
Kyunggi-do 463-020, Korea

요 약

본 논문에서는 위성통신 환경에서 DS/CDMA DPSK 시스템의 성능을 분석한다. 성능분석의 척도로 비트오류확률을 사용한다. 위성전송로는 쉐도잉이 있는 라이시안 페이딩 전송로로 모델링한다. 수치계산의 결과, 위상잡음이 존재할 때 비트오율 성능이 저하되므로 시스템 용량이 감소될 것이 예상된다. 또한 위성전송로에서는 쉐도잉이 시스템 전체 성능에 커다란 영향을 미침을 알 수 있다. 본 논문에서의 분석은 DS/CDMA 기반의 위성통신 시스템 설계에 적용할 수 있다.

Ⅰ. 서 론

다원접속 방식의 하나인 CDMA (code division multiple access) 방식은 다음과 같은 여러 장점을 갖는 확산대역(SS: spread-spectrum) 변조 방식에 근거하고 있으며, 이와 같은 여러 장점들로 인해 차세대 다원접속을 위한 유망한 후보 방식으로 고려되고 있다. 확산대역 통신 방식은 정보의 전송에 필요한 최소의 대역폭보다 훨씬 더 큰 대역폭을 사용하는 통신방식으로 의도적 방해신호인 재밍(jamming)에 강하고, 다른 통신자에게 정보가 누출될 염려가 적으며(low probability of intercept), 거리측정(ranging), 다원접속(multiple access) 등의 장점을 가지고 있다[1-3]. 현재 고려중인 제 3세대 이동통신 시스템에서는 위성을 통해 전세계 어디서나 통신서비스가 가능하도록 설계되고 있는데, 이러한 범세계적인 위성통신 서비스를 위해서는 위성전송로 환경하에서 통신시스템에 대한 성능분석이 요구된다.

위와 같은 장점들로 인해 현재 디지탈 이동통신 시스템인 CDMA(code division multiple access) 시스템에 사용되고 있으며, 개인휴대통신(PCS: personal communication system), FPLMTS(future public land mobile telecommunication systems) 등에 유망한 후보방식으로 거론되고 있다.

그동안의 연구에서는 주로 이동위성 통신 시스템에 동기식(coherent) BPSK와 QPSK 변조 방식 등을 사용해 왔다 [4]. 그러나 육상이동통신 시스템 뿐만 아니라 위성통신 시스템에서 국부발진기(local oscillator)의 불완전에 기인하여 위상잡음(phase noise)이 발생하기 쉽다. 위상잡음으로 인해 시스템 성능이 저하되기 쉬우므로 위상잡음에 강인한 특성을 갖는 비동기(noncoherent) 변조방식을 고려해 볼 수 있는데, 그 중의 하나가 DPSK 변조방식이다. DPSK 변조방식에서는 각 심볼마다 신호의 위상차를 이용하여 원하는 정보를 전송하므로 동기식(coherent) 변조방식에서처럼 신호의 검출을 위해 기준 위상값을 필요로 하지 않는다 [4].

본 논문에서는 이동위성 통신 환경에서 DS/CDMA DPSK 시스템의 성능을 분석한다. 성능분석의 척도로 비트오류확률을 사용한다. 위성전송로는 쉐도잉이 있는 라이시안 페이딩 전송로로 모델링한다 [5,6].

제 Ⅱ장에서는 위성전송로 모델에 관해 기술하고, 제 Ⅲ장에서는 위성전송로 환경에서 DS/CDMA DPSK 시스템 모델링과 비트오류확률을 유도한다. 또한 제 Ⅳ장에서는 수치계

산 결과를 보이고, 제 V장에서는 결론을 도출한다.

II. 위성 전송로 모델

위성통신 전송로에서 쉐도잉이 있을 때와 없을 때를 모두 고려하여 수신신호의 확률밀도함수는 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$f_p(p) = (1-z)f_{ns}(p) + zf_s(p), \quad (1)$$

여기서, $f_{ns}(p)$는 쉐도잉이 존재하지 않을 때 순시(instantaneous) 수신전력 p의 확률밀도함수(p.d.f: probability density function), $f_s(p)$는 쉐도잉이 존재할 때 순시 수신전력의 확률밀도함수, z는 수신신호가 쉐도잉에 영향받을 확률이다. 또한 각 수신경로에 대한 수신신호의 포락선은 다음과 같이 주어진다.

$$r = R \cdot S, \quad (2)$$

여기서 R은 페이딩 포락선이고 S는 쉐도잉의 포락선이다. 위성전송로에서 보통 다중경로에 의한 지연확산(delay spread)은 칩지속시간(chip duration)보다 크므로 주파수 비선택성 (frequency-nonselective) 페이딩을 겪는다. 이 때, R은 직접파 성분(direct component or specular component)가 존재하면 라이시안(Rician) 분포를 갖고, 직접파 성분이 존재하지 않으면 레일레이(Rayleigh) 분포를 갖는다 [8]. 쉐도잉을 고려한 순시 수신전력 p의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$f(p) = \int_0^\infty f(p\,|s^2\bar{p}) f_s(s)\,ds, \quad (3)$$

여기서 $f(p\,|s^2\bar{p}) = \frac{R_f+1}{s^2\bar{p}} \exp\left(-\frac{(R_f+1)p}{s^2\bar{p}} - R_f\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{R_f(R_f+1)p}{s^2\bar{p}}}\right)$로 주어지며 R_f는 직접파와 확산파의 전력비를 의미하는 라이시안 요소(Rician factor), $\bar{p} = E[R^2]$는 국부평균전력(local mean power)을 나타낸다. 또한 $f_s(s)$는 쉐도잉에 대한 확률밀도함수 로그노말(lognormal) 분포를 가지며 다음과 같이 주어진다.

$$f_s(s) = \begin{cases} \delta(s-1), & \text{for } \textit{unshadowing} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}hs\sigma_s} \exp\left(-\left(\frac{\ln s - hm_s}{\sqrt{2}h\sigma_s}\right)^2\right), & \text{for } \textit{shadowing} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $h = (\ln 10)/20$는 단위변환 상수, m_s는 쉐도잉의 평균값, σ_s는 쉐도잉의 표준편차(standard deviation)이다. 위성전송로 환경에서 m_s는 보통 -7 ~ -16 dB의 값을 갖고, σ_s는 보통 2 ~ 6 dB의 값을 갖는다. 만일 직접파 성분이 존재하지 않으면 $R_f = 0$이고, $f(p\,|s^2\bar{p})$는 레일레이 분포를 가지며 $f(p)$는 레일레이-로그노말 분포를 따르는 Suzuki-분포를 가지며, 직접파 성분이 존재하면 $R_f \neq 0$이고 라이시안-로그노말 분포를 따르는 Loo-분포를 따르게 된다 [7].

III. 비트오류확률 분석

비트오류확률의 분석에 있어서 다음과 같은 가정을 한다. 1) 각각의 위성링크는 적응전력제어를 통해 완벽한 전력제어(perfect power control)가 된다 ($P_k = P$, $1 \le k \le K$), 2) 각 위성은 B+1개의 다중빔(multiple beams)을 사용한다, 3) 게이트웨이(gateway)에서는 각 위성에 대해 방향성 안테나를 사용한다, 4) 각각의 다중빔에는 K명의 사용자가 존재한다, 5) 이동중인 사용자는 전방향성 안테나(omnidirectional antenna)를 사용한다, 6) 페이딩은 연속적인 비트지속시간(bit duration) 동안에 상수가 되도록 충분히 느리다.

III.1. 위성전송로에서 DS/CDMA 모델링

K명의 사용자가 있는 DS/CDMA 시스템에서 k번째 사용자의 송신신호는 다음과 같이 주어진다.

$$s_k(t) = \sqrt{2P_k}\, d_k(t)\, c_k(t) \cos(\omega_c t + \phi_k), \quad (5)$$

여기서, P_k는 신호전력, $d_k(t)$는 비트지속시간(bit duration) T를 갖는 데이타 시퀀스, $c_k(t)$는 칩지속시간(chip duration) T_c를 갖는 확산 시퀀스, ω_c는 반송파주파수(carrier frequency), 그리고 ϕ_k는 반송파위상(carrier phase)을 나타낸다. 신호전력 P_k는 전송지연과 반송파위상에 독립이라 가정한다. 또한 $d_k(t)$와 $c_k(t)$는 직사각형(rectangular) 펄스모양을 갖는 (1, -1)의 시퀀스라 가정한다. PN 시퀀스 $c_k(t)$는 매 데이타 펄스마다 처리이득(processing gain) $G = T/T_c$ 만큼 발생하는 것으로 가정한다. 수신기에서 복조 동안에 원하는 데이타 시퀀스를 얻을 수 있도록 수신신호는 수신단의 PN 시퀀스의 복제(replica)와 곱해진다.

기준사용자(reference user or desired user)가 셀 1에 위치한 사용자 1이라 가정하면, 기준사용자(reference user)의

수신신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{L}\sqrt{2P_k}s_k R_{ki}d_k(t-\tau_{ki})c_k(t-\tau_{ki})\cos(\omega_c t+\phi_{ki}) + \sum_{k=(n-1)K+1}^{nK}\sum_{i=1}^{L}\sqrt{2P_k}s_k R_{ki}\beta_{ki}d_k(t-\tau_{ki})c_k(t-\tau_{ki})\cos(\omega_c t+\phi_{ki})+n(t) \quad (6)$$

여기서, τ_{ki}은 k번째 사용자의 i번째 경로의 시간지연, ϕ_{ki}은 반송파 위상, L은 다이버시티 차수(diversity order), β_k는 빔 안테나 패턴에 의한 파라미터, $n(t)$는 양방향 전력스펙트럼 밀도가 $N_0/2$인 AWGN 성분이다. 기준사용자(reference user)를 사용자 1이라 하면, 다이버시티 가지 L개를 갖는 사용자 1에서 결정통계치(decision statistic)는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_1(n) = \sum_{i=1}^{L} Re\{(\sqrt{2P}Ts_{1,i}R_{1,i}d_n^{(1)}+N_{n,i})(\sqrt{2P}Ts_{1,i}R_{1,i}d_{n-1}^{(1)}+N_{n-1,i})^*\} \quad (7)$$

여기서 b_n과 b_{n-1}은 차등부호화된 데이터비트, $N_{n,i}$과 $N_{n-1,i}$은 복소수의 값을 갖는 잡음표본을 나타낸다. 이 때 N_i의 평균과 분산은 다음과 같이 주어진다 [9].

$$E[N_i]=0, \quad (8)$$

$$var[N_i]=2N_0T+\frac{4PT^2L}{3G}\left(M-1+\sum_{k=(n-1)K+1}^{M(n-1)}\beta_k\right)\cdot E[S^2R^2]. \quad (9)$$

다원접속 환경에서 각 사용자에 대한 확률밀도함수(*p.d.f.*: probability density function)의 정확한 분포는 얻기가 어려울 뿐만 아니라 사용자간의 결합확률분포(joint *p.d.f.*)도 수학적으로 알려진 모델이 없으므로 MAI는 MAI 분산과 같은 분산을 갖는 AWGN 과정으로 모델링할 수 있다. MAI 성분에 대한 결합 가우시안 근사(Gaussian approximation)를 이용하면, 하나의 원하는 데이타 비트 내에서는 비조건적 독립(*unconditional independence*)이 된다. 셀룰라 시스템에서 각 사용자로부터 기지국(base station)으로 들어오는 신호의 통계적 특성은 정확히 알 수 없으나 기지국에서 각 사용자로부터 수신한 신호의 합은 중심극한 정리(central limit theorem)에 의해 거의 가우시안으로 볼 수 있으므로 본 논문에서 MAI를 가우시안 근사화하는 것은 합리적인 모델이 된다. 간섭 사용자로부터의 MAI 성분은 서로 상관되어 있지 않으므로 그의 분산은 누적된다. 즉, MAI를 가우시안 근사화를 했으므로 결국 *전체적인 MAI의 영향은 잡음레벨이 증가한 것으로 나타난다.* 최대비결합(MRC: maximal ratio combining)에 의한 수신단에서의 신호대간섭잡음비(SINR: signal-to-interference -noise-ratio)는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma=\sum_{i=1}^{L}\frac{2E_bT[S_{1,i}R_{1,i}]^2}{var[N_i]}, \quad (10)$$

여기서, $E_b=PT$는 비트당 에너지를 나타낸다.

Ⅲ.2. 위상잡음이 존재하지 않을 때 비트오류확률

위상잡음이 없을 때 AWGN 환경에서 다이버시티 차수 L인 DPSK 시스템의 비트오류확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{b,G}=\frac{1}{2^{2L-1}}\exp(-\gamma)\sum_{i=0}^{L-1}\frac{1}{i!}\gamma^i\sum_{j=0}^{L-1-i}\binom{2L-1}{j} \quad (11)$$

$P_{b,s}$와 $P_{b,ns}$를 각각 쉐도잉이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 비트오류확률이라 하면 각각 다음과 같이 주어진다.

$$P_{b,s}=\int_0^\infty P_{b,G}(\gamma)\,f_s(\gamma)\,d\gamma, \quad (12)$$

$$P_{b,ns}=\int_0^\infty P_{b,G}(\gamma)\,f_{ns}(\gamma)\,d\gamma. \quad (13)$$

쉐도잉이 존재할 때와 존재하지 않는 경우를 모두 고려하면 전체 비트오류확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_b=(1-z)P_{b,s}+zP_{b,ns} \quad (14)$$

Ⅲ.3. 위상잡음이 존재할 때 비트오류확률

DPSK 변조방식을 사용할 때 위상잡음 $\theta(t)$가 존재하면, 비트지속시간만큼 지연된 신호와 원래의 신호가 곱해지므로 $\cos(\omega_c t+\theta(t))$와 $\cos(\omega_c t+\omega_c T+\theta(t-T))$가 곱해진다. 이 때 고주파 성분은 수신단 여파기(filter)에서 제거되고 저주파 성분 $1/2\cos(\theta(t)-\theta(t-T))$만 남게 된다. 이 때 $\theta_e=\theta(t)-\theta(t-T)$라 정의하면 복조기의 출력에서 SINR은 $\cos(\theta_e)$만큼 감소된다. AWGN 환경에서 다이버시티 차수 L인 DPSK 시스템의 비트오류확률은 식 (11)에서 γ대신 $\gamma'=\gamma\cdot\cos(\theta_e)$을 대입한 식으로 구해진다. 그러므로 위상잡음이 존재할 때 비트오류확률은 식 (12)와 식 (13)을 변형하여 다음과 같이 변형된다.

$$P_{b,e}=2\int_0^{\pi/2}p(\theta_e)[(1-z)P'_{b,s}+zP'_{b,ns}]d\theta_e+2\int_{\pi/2}^{\pi}p(\theta_e)d\theta_e \quad (15)$$

여기서, $p(\theta_e)$는 가우시안 분포를 갖는 것으로 가정한다.

Ⅳ. 계산 결과

본 논문에서 사용한 수치 계산 파라미터는 IS-95 시스템의 파라미터를 그대로 사용하였다.

그림 1은 위상잡음이 있을 때와 없을 때 비트오류확률을

비교한 것이다. 신호대잡음비가 커질수록 비트오류확률이 감소하고, 사용자의 수가 증가할수록 비트오류확률이 증가함을 볼 수 있다. 위상잡음이 존재할 때의 비트오율 성능이 저하되므로 시스템 전체의 용량 측면에서 볼 때 위상잡음으로 인해 시스템 용량이 감소할 것으로 예상된다.

그림 2는 쉐도잉을 로그노말 분포로 모델링할 때 쉐도잉의 표준편차를 파라미터로 하여 비트오류확률을 비교한 것이다. 쉐도잉의 표준편차가 커질수록 비트오율 성능이 크게 저하됨을 볼 수 있으므로 위성전송로에서는 쉐도잉이 시스템 전체 성능에 커다란 영향을 미침을 알 수 있다.

V. 결 론

위에서는 위성전송로 환경에서 DS/CDMA DPSK 시스템의 성능을 분석하였다. 위성전송로는 쉐도잉이 있는 라이시안 페이딩 전송로로 모델링하였다. 수치계산의 결과, 위상잡음이 존재할 때 비트오율 성능이 저하되므로 시스템 용량이 감소될 것이 예상된다. 또한 위성전송로에서는 쉐도잉이 시스템 전체 성능에 커다란 영향을 미침을 알 수 있었다. 본 논문에서의 분석은 DS/CDMA 기반의 위성통신 시스템 설계에 적용될 수 있다. 본 논문에서는 비동기식 DPSK만 고려하였는데 향후의 연구에서는 동기식 BPSK와 QPSK 방식에 대해서도 위상잡음의 영향을 분석하고 서로 비교할 예정이다. 또한, 위상잡음을 가우시안 분포를 갖는 것으로 모델링하였는데, 이에 대한 보다 정확한 모델의 개발이 향후의 연구분야 중의 하나라 여겨진다.

REFERENCE

[1] R. C. Dixon, *Spread Spectrum Systems with Commercial Applications, 3rd ed.*, John Wiley & Sons. Inc., 1994.

[2] R. L. Pickholtz, L. B. Milstein, and D. L. Schilling, "Spread spectrum for mobile communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 313-322, May 1991.

[3] M. K. Simon, J. K. Omura, R. K. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications Handbook*, Computer Science Press, 1994.

[4] J. G. Proakis, Digital Communications, New York: McGraw Hill, 1989.

[5] C. Loo, "A statistical model for a land mobile satellite link," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 34, no. 3. pp. 122-127, Aug. 1985.

[6] E. Lutz, D. Cygan, M. Dippold, F. Dolainsky, and W. Papke, "The land mobile satellite communication channels - recordings, statistics, and channel model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 375-385, May 1991.

[7] G. E. Corraza and F. Vatalaro, "A statistical model for land mobile satellite channels and its application to non-geostationary orbit systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 738-742, Aug. 1994.

[8] J. M. Wozencraft and I. M. Jacobs, *Principles of Communication Engineering*, John Wiley & Sons, 1965.

[9] A. R. Akinniyi and J. S. Lehnert, "Characterization of noncoherent spread-spectrum multiple-access communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 1, pp. 139-148, Jan. 1990.

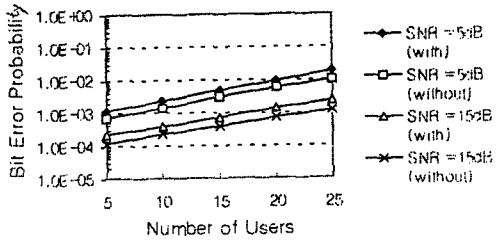

그림 1. 위상잡음이 존재할 때 SNR에 대한 DS/CDMA DPSK 시스템의 비트오류확률.

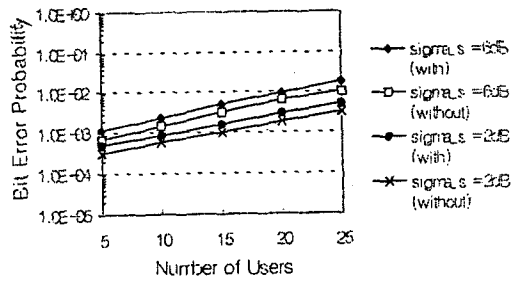

그림 2. 위상잡음이 존재할 때 쉐도잉의 표준편차에 대한 DS/CDMA DPSK 시스템의 비트오류확률.