

위성 통신 링크에서 강우 감쇠 보상을 위한 신호 레벨 예측 기법

정회원 임 광 재*, 황 정 환**, 김 수 영*, 이 수 인***

A Signal-Level Prediction Scheme for Rain-Attenuation Compensation in Satellite Communication Links

Kwang Jae Lim*, Jung Hwan Hwang**, Sooyoung Kim Shin*, Soo In Lee***
Regular Members

요 약

본 논문은 10GHz 이상의 주파수 대역을 사용하는 위성 통신 링크에서 강우에 의해 감쇠된 신호 레벨을 동적으로 예측하기 위한 비교적 간단한 예측 기법을 제시한다. 예측 기법은 이산시간 저역 통과 필터링, 기울기에 근거한 예측, 평균 오차 보정, 고정 및 가변 혼합 예측 여유 할당의 4가지 기능 블록을 갖는다. Ku 대역의 측정 데이터로부터 주파수 스케일링에 의해 얻어진 Ka 대역 강우 감쇠 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 평균 오차 보정을 갖는 기울기 예측 기법은 1 dB 이하의 표준 편차를 가지며, 평균 오차 보정에 의해 약 1.5~2.5 배의 예측 오차 감소를 보인다. 요구되는 평균 여유 면에서, 혼합 예측 여유 할당은 고정 여유 방법과 가변 여유 방법에 비해 더 적은 평균 여유를 요구한다.

ABSTRACT

This paper presents a simple dynamical prediction scheme of the signal level which is attenuated and varied due to rain fading in satellite communication links using above 10 GHz frequency bands. The proposed prediction scheme has four functional blocks for discrete-time low-pass filtering, slope-based prediction, mean-error correction and hybrid fixed/variable prediction margin allocation. Through simulations using Ka-band attenuation data obtained from the data measured over Ku-band by frequency-scaling, it is shown that the slope-based prediction with the mean-error correction has as small standard deviation of prediction error as below 1 dB, and that the error is about 1.5 to 2.5 times as small as that without the mean-error correction. The hybrid prediction margin allocation requires smaller average margin than those of both fixed and variable methods.

1. 서 론

현재 많은 상업용 위성이 사용하고 있는 C 대역(6/4 GHz)과 Ku 대역(14/11,12 GHz)의 주파수는 거의 포화 상태에 이르렀고, 이에 위성 사업자들은 그 이상의 대역인 Ka 대역(30/20 GHz)에 관심을

기울이고 있다. Ka 대역은 하위 대역에 비해 신호의 방향성이 상대적으로 높아 안테나의 크기와 위성간 간섭을 줄일 수 있고 고이득의 스폿빔을 사용할 수 있는 등의 많은 장점을 가지나^[1], 강우에 의한 수신 신호의 강도 저하는 다른 어떤 대역에서 보다 심각하게 링크 품질을 열화시킨다. 일반적으로 Ka 대역에서 발생하는 감쇠 폭은 10~30 dB에까지

* 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 위성통신시스템연구부 (kjl@etri.re.kr),

** ㈜나리지*은

*** 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 방송시스템연구부

논문번호 : 99440-1108, 접수일자 : 1999년 11월 8일

이르기 때문에^[2], 고정 링크 여유로 보상하기에는 그에 따른 시스템 용량 감소가 매우 크며, 10 dB 이상의 감쇠가 발생하는 시간율은 1%이하로 매우 적기 때문에 그러한 감쇠 보상을 위해 링크 설계에서 고정적인 여유로 보상한다는 것은 적절한 선택이라 할 수 없다.

대부분의 Ka 대역 위성 시스템은 수 dB의 고정 링크 여유와 그 이상의 감쇠에 대하여 적응형 보상 방법을 취한다^[1-4]. 적응형 보상 기법을 사용하는 시스템에서 수신 신호의 감쇠가 발생할 때, 수신 단말은 이를 검출하고 전송 전력이나 방식의 전환을 송신단에 요구하여야 하며, 이러한 검출 및 변환 과정이 실현되어 수신 신호의 비트 에너지를 높이기까지는 위성 링크의 전파 지연 시간의 수 배의 시간을 요한다. 그러므로, 적응형 전송 방식이 실현될 때까지의 지연 시간을 고려하여, 현재 및 과거 시간에 측정된 수신 신호의 크기로부터 전환 지연 시간 후의 감쇠량을 추정하는 예측 기법을 필요로 한다. 지금까지 알려진 일반적인 예측 기법으로는 선형 예측 필터링(linear predictive filtering)^[5], 시계열 분석(time series analysis)^[6]에 의한 예측, 선형 적응형 필터링(linear adaptive filtering)^[7], 신경망(neural network)^[8] 등에 의한 비선형 예측 방법을 들 수 있다. 그러나, 1% 이하의 시간율로 적용되는 적응형 보상 방법을 위해 위와 같은 복잡도가 높은 예측 기법을 사용한다는 것은 단말 비용 또는 처리 시간의 면에서 적절하지 못하며, 따라서 본 논문에서는 비교적 간단하면서도 효율적인 예측 기법을 제시한다.

일반적으로 강우 감쇠된 수신 신호 변화는 장기간의 강우 감쇠뿐만 아니라, 단기간의 빠른 변화를 갖는 신틸레이션(scintillation) 효과를 포함한다^[1,2,9,10]. 문헌 [3,11]에서는 강우 감쇠 신호에서 신틸레이션에 의한 변화를 분리시키기 위해 간단한 저역 필터를 사용하였고, 신호 크기 변화에 대한 예측 과정 없이 전송 방식의 전환을 결정하였다. 예측 방법으로 문헌 [4]에서는 과거와 현재의 감쇠 기울기가 같다는 가정 하에 기울기에 근거한 예측 방법을 사용하였고, 문헌 [12]에서는 강우 감쇠 신호를 시계열 분석 방법의 ARMA(autoregressive moving average)로 모델링하여 예측기로 사용하였다. ARMA 모델 또는 적응형 필터를 사용하여 예측을 수행하는 경우, 기울기 방법에 비해 그 복잡도가 크며, 문헌 [13]에서 지적된 바와 같이 강우 감쇠의 통계적 특성은 비교적 빠르게 변화하기 때문에, 장

기간 동안의 강우 감쇠 정보는 예측값과 관련성이 적으며, 수 초 이내의 짧은 기간 동안의 정보로부터 예측하는 것이 보다 효과적이다.

본 논문에서는 비교적 간단하고 최근의 감쇠 정보를 이용하는 기울기에 근거한 예측 방법을 사용하였다. 그러나, 기울기 예측 기법에서 신틸레이션에 의한 신호 레벨 변화를 강우 감쇠에 의한 변화로 오인하여 예측을 수행함으로써 기인하는 오차가 발생한다. 이러한 예측 오차를 줄이기 위해서는, 예측 이전에 신틸레이션 효과를 충분히 제거하여야 하며 이를 위해 차단 대역폭이 비교적 작은 저역 필터를 사용하여 한다. 그러나, 저역 필터의 사용은 신호 레벨 변화에 대한 응답 지연 현상을 초래하여 결국, 예측 오차를 또 다시 증가시키는 현상을 가져온다. 본 논문에서는 평균 오차에 대한 보정을 통하여 저역 필터의 지연 오차를 감소시키는 기법을 제시한다. 또한, 신틸레이션에 의한 예측 오차의 극복을 위해 예측 여유를 두어야 하며, 가변적인 예측 여유는 고정적인 여유를 갖는 방법에 비해 적은 예측 여유를 요한다^[12]. 본 논문에서는 오차 보정에서 재귀적인 계산식으로부터 얻은 평균 오차와 분산을 사용하여 가변 예측 여유를 계산하는 방법을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. I장 서론에 이어 II장에서는 강우 감쇠 예측 기법에 대해 기술하고, III장에서 시뮬레이션을 통하여 제시된 예측 기법의 성능과 특성을 분석한다. 끝으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 강우 감쇠 예측 기법

일반적으로 강우에 의해 감쇠된 수신 신호의 전력 크기에 대한 변화는 강우 감쇠뿐만 아니라, 1 dB 이하의 적은 폭과 0.1~0.5 Hz로 비교적 빠르게 변화하는 신틸레이션 효과를 포함한다. 정지 궤도 위성 링크의 0.5초 이상인 왕복 전파 속도를 고려한다면, 이러한 신틸레이션에 의한 신호 레벨의 변화를, 예측하고 대응한다는 것은 실질적으로 매우 어렵어 뿐만 아니라 현실적이지 못하다. 또한, 감쇠 신호의 레벨이 전송 방식의 전환을 요하는 특정 임계값 부근에 있을 때, 신틸레이션에 의한 빠른 레벨 변화는 전송 방식의 잦은 전환을 초래한다. 그러므로, 강우 감쇠 예측기는 신틸레이션에 의한 신호 레벨의 빠르고 작은 변화가 아닌, 수 초 동안의 전체적인 강우에 의한 신호 레벨의 변화를 예측하는데

초점을 두어야 하며, 따라서 예측 이전에 수신 신호 레벨의 변화에서 신틸레이션 효과를 제거하기 위해 저역 통과 필터(LPF)를 사용하여야 한다. 필터링된 신호 레벨로부터 예측기는 적응형 전송 방식 전환을 위해 소요되는 시간(예측 시간) 후의 신호 레벨의 크기를 추정하고, 해당 신호 레벨에 적절한 전송 방식을 선택한다. 이 때, 신틸레이션에 의한 신호 레벨의 변화와 열화를 극복하기 위해 예측 레벨에 추가적인 예측 여유(prediction margin)를 부가하여야 한다. 본 논문에서 제시되는 예측 기법은 그림 1의 구성을 가지며, 저역 통과 필터링, 기울기에 근거한 예측(SBP: Slope-Based Predictor), 평균 오차 보정(mean-error correction), 고정 및 가변 혼합 여유 할당의 4가지 기능으로 구성된다.

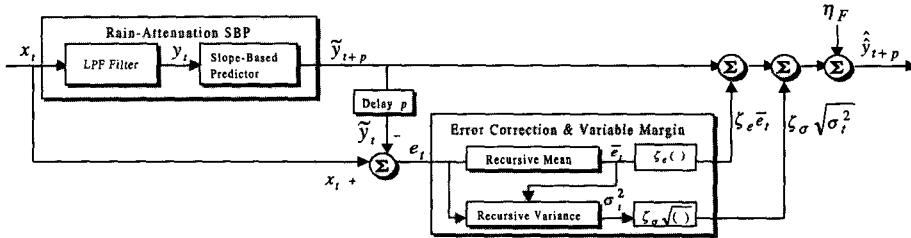


그림 1. 제시된 강우 감쇠 예측기.

2.1 저역 통과 필터링

LPF는 신틸레이션 현상 등에 의한 신호 레벨의 빠른 변화를 완화시키는 목적으로 사용된다. LPF를 구현하는데 있어 일반적으로 잘 알려진 FIR 또는 IIR 필터로 설계할 수 있으나, 서론에서 지적된 바와 같이 강우 감쇠 시간율을 고려한다면, 비교적 간단한 방법을 택하여야 한다. 본 논문에서는 문헌 [12]에서와 같이 다음 식의 입력력 관계를 갖는 1-pole을 갖는 이산 귀환 필터링을 사용한다.

$$y_t = \alpha y_{t-1} + (1 - \alpha) x_t \quad (1)$$

위 식에서 x_t 는 T 간격으로 표본화된 수신 신호의 레벨의 샘플값, y_t 는 필터 출력이고, α 는 $0 < \alpha < 1$ 의 범위의 값으로 대역폭 조절 파라미터이다. 식 (1)에서의 귀환 필터링 방법은 재귀적인 방법으로 신호 샘플 x_t 에 대해 평균을 취하는 것으로 볼 수 있으며, 특정 기간 동안의 샘플들에 대한 샘플 평균을 구하는 경우와 같은 동작을 갖는다.

일반적으로 신틸레이션 현상은 0.3 Hz 이하의 주파수 대역에 집중되어 있기 때문에^[9,10], LPF의 차단

주파수는 그 이하가 되도록 설계되어야 한다. 그림 2는 차단 대역폭 B 와 파라미터 α 와의 관계를 보인 것으로, 0.1 Hz 이하의 차단 대역폭을 가지게 하기 위해서는 적어도 파라미터 α 는 0.5 이상의 값을 가져야 한다. 파라미터 α 의 값이 1에 근접할수록 필터 출력은 현 신호 레벨보다는 과거 신호 레벨에 의존적이며, 차단 대역폭을 감소시키는 역할을 함으로써 신틸레이션 현상에 의한 신호 레벨의 변화를 완화시킨다. 이러한 신호 레벨 변화의 완화로, LPF 후의 다음 예측 과정에서 신틸레이션에 의한 단구간의 레벨 변화를 강우 감쇠에 의한 장구간의 레벨 변화로 오인하여 예측을 수행함으로써 기인하는 예측 오차를 감소시킬 수 있다. 그러나, 파라미터 α 의 값을 크게 하면, 과거 신호 레벨에 더 의존

적이기 때문에 강우에 의해 발생하는 장구간의 레벨 변화에 느린 반응을 보이게 되어, 결국, 출력 레벨 변화에 지연 현상을 초래한다.

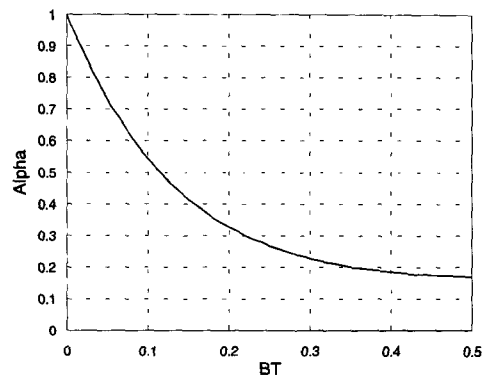


그림 2. LPF의 파라미터 α 와 차단 대역폭과의 관계.

2.2 기울기에 근거한 예측과 예측 오차 보정

현 시점으로부터 일정 예측 시간 이후의 신호 레벨을 예측하는데 있어 비교적 간단한 방법으로 기울기에 근거한 예측 방법을 고려한다. 감쇠 기울기에 의한 예측은 과거 신호 레벨들 사이의 기울기에 현 시점 이후에서도 동일하다는 가정에 기반을 둔다. 현 시점 t 에서 n 샘플 전의 과거 관측기간 $[t-n, t]$ 의 양끝 두 샘플에 대한 기울기 $s_{t-n, t}$ 와, p

샘플 후의 예측기간 $[t, t+p]$ 의 양끝 두 샘플에 대한 기율기 $s_{t, t+p}$ 를 다음 식과 같이 같다고 가정한다.

$$s_{t-n, t} = \frac{y_t - y_{t-n}}{n} = \frac{y_{t+p} - y_t}{p} = s_{t, t+p} \quad (2)$$

위 식으로부터 예측 시간 p 후의 신호 레벨 y_{t+p} 에 대한 추정 \tilde{y}_{t+p} 은 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\tilde{y}_{t+p} = y_{t+p} = \left(\frac{p}{n} + 1\right)y_t - \frac{p}{n}y_{t-n} \quad (3)$$

그림 3에서와 같이 신틸레이션 현상을 포함한 실제 강우 감쇠 신호 레벨(실선)은 LPF에 의해 필터링 후의 신호 레벨은 그림 3의 점선과 같이 급격한 변화가 완화된 형태를 가진다. 그러나 앞서 지적된 바와 같이 LPF는 지연 현상을 초래하며, 출력 신호 레벨은 그림 3에서와 같이 지연된 형태를 가진다(그림에서 지연된 점선). 이 경우, 식 (3)의 기율기에 근거한 예측 방법으로 샘플 p 후의 신호 레벨 \hat{y}_{t+p} 을 추정할 경우 신틸레이션에 의한 오차 이외에 지연에 의한 오차가 존재하며, 예측 시간들 확장한다 하더라도 두 신호 레벨의 평균적인 기율기가 같다면, 두 레벨은 평행선을 유지하기 때문에 오차는 여전히 존재한다.

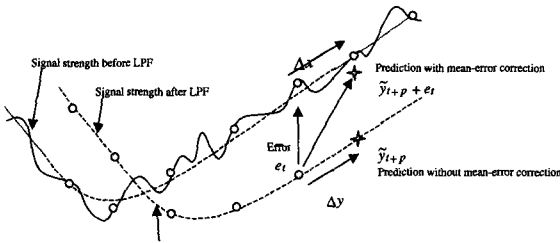


그림 3. 평균 오차 보정을 갖는 예측 기법.

본 논문에서는 이러한 지연에 의해 발생하는 오차를 감소시키기 위해 기율기에 의해 예측된 값에 과거 시간 동안 관측된 오차에 대한 평균을 추가함으로써 그 오차를 보정한다. 오차 보정을 취한 후의 예측 값 \hat{y}_{t+p} 는

$$\hat{y}_{t+p} = \tilde{y}_{t+p} + \zeta_e \bar{e}_t \quad (4)$$

와 같이 구한다. 위 식에서 ζ_e 는 오차 반영을 조절하는 파라미터이고, \bar{e}_t 는 평균 오차로

$$\bar{e}_t = \beta \bar{e}_{t-1} + (1-\beta)e_t \quad (5)$$

와 같이 얻으며, 여기서 $e_t = x_t - y_t$ 이고, β 는 앞의 LPF의 파라미터 α 와 동일한 역할을 하는 파라미터이다.

2.3 예측 여유

앞의 저역 통과 필터링이나 기율기에 따른 예측 과정에서는 신틸레이션의 영향을 무시하였으며, 그러한 예측 과정에서 얻은 예측 값은 실제 신호 레벨과 차이를 가질 수 있다. 특히, 예측된 값에 근거하여 전송 방식을 전환하고 실제 신호 레벨이 예측 값보다 이하에 있는 경우 신호 품질의 저하를 초래하기 때문에, 이를 극복하기 위해서는 예측 오차를 포함하도록 다음 식과 같이 예측 값을 보다 낮추는 여유를 두어야 한다. 예측 여유 η_t 를 포함한 예측값 \hat{y}_{t+p} 는

$$\hat{y}_{t+p} = \tilde{y}_{t+p} + \eta_t \quad (6)$$

로 얻는다. 위의 예측 여유는 일정 고정 값 또는 예측 오차에 따라 가변인 값을 취할 수 있다. 가변적인 예측 여유를 구하는 방법으로 문헌 [12]에서와 같이 과거 시간 동안의 예측 오차에 대한 샘플 평균과 분산으로부터 얻을 수 있으나, 앞서 논의된 저역 필터링에서와 같이 재귀적 평균과 분산을 계산할 수 있다. 재귀적인 계산은 샘플 분산 계산 방법에 비해 바로 전 과거 계산 값에 대한 저장만을 요하기 때문에 동일한 특성을 얻으면서 보다 적은 메모리를 사용한다는 장점을 갖는다. 예측 오차의 평균은 오차 보정 과정에서의 식 (5)에 의해 계산된 값을 이용하고, 분산 σ_t^2 은 다음 식과 같이 계산한다.

$$\sigma_t^2 = \beta \sigma_{t-1}^2 + (1-\beta)(e_t - \bar{e}_t)^2 \quad (7)$$

구해진 예측 오차의 분산으로부터 예측 여유는 파라미터 ζ_e 를 사용하여

$$\eta_t = \zeta_e \sqrt{\sigma_t^2} \quad (8)$$

로 얻는다. 파라미터 ζ_e 는 예측 여유를 항상 음의 값을 갖도록 $\zeta_e < 0$ 이다.

앞의 2.1 및 2.2 절의 과정에서, 저역 통과 필터가 신틸레이션에 대한 효과를 제거하고, 예측기에서 강우 감쇠 변화를 효과적으로 예측하였다면, 예측 오차는 신틸레이션에 의한 것이 된다. 일반적으로

신털레이션은 단구간 동안 가우시안 분포를 가지며 분산은 일정하다고 볼 수 있다^{[12],[14]}. 식 (7)에 의해 구한 분산은 단구간 동안의 신털레이션에 의한 분산을 실시간으로 추정하는 것이 된다. 이러한 가정에 따라, 예측값이 실제값 보다 크게 추정하는 과추정 확률(over-estimation probability)은 예측 오차 e (<0)가 가변 여유 $\xi_0\sqrt{\sigma^2}$ 보다 작게 되는 확률과 같으며,

$$P_{over} = P\{e < \xi_0\sigma\} = 1 - Q(\xi_0) \quad (9)$$

가 된다. 위 식에서 $Q(x)$ 는 다음과 같이 정의되는 함수이다.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt \quad (10)$$

그림 4는 ξ_0 에 따른 과추정 확률을 보인 것으로 0.1%이하의 확률을 얻기 위해서는 적어도 ξ_0 는 -3.1 이하가 되어야 함을 알 수 있다.

예측 오차는 신털레이션 현상 이외에 예측 기법의 부정확성 자체에서부터 비롯될 수 있으며, 가변 여유 방법으로 충분한 과추정 확률을 얻기 위해서는 이론적인 값 이상의 큰 값을 갖는 ξ_0 를 사용해야 한다. 이 경우 예측 오차의 작은 변화는 필요 이상으로 확대되어 나타나며, 그로 인하여 예측 신호 레벨은 매우 큰 폭으로 변화한다. 이러한 현상은, 예측된 신호 레벨에 따라 링크에서 사용되는 전송 방식을 변화시킬 경우, 갖은 전송 방식의 전환을 초래할 것이며 결국 링크 효율을 감소시키는 결과를 초래한다. 가변 여유에 의한 예측 신호 레벨의 심각한 변화를 피하기 위해서 고정적인 예측 여유를 포함시킴으로써 요구되는 ξ_0 의 크기를 감소시킬

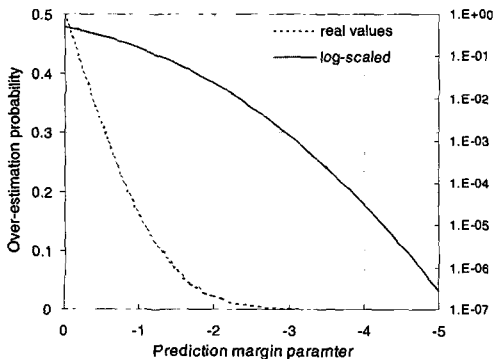


그림 4. 파라미터 ξ_0 에 대한 과추정 확률.

수 있다. 결국, 가변 예측 여유 η_1 와 고정 예측 여유 η_F 를 포함한 예측값 $\hat{y}_{i+\rho}$ 는

$$\hat{y}_{i+\rho} = \left(\frac{\rho}{n} + 1\right)y_i - \frac{\rho}{n}y_{i-n} + \xi_0\bar{e}_i + \xi_0\sqrt{\sigma^2} + \eta_F \quad (11)$$

와 같이 얻는다.

III. 시뮬레이션 및 결과

본 논문의 시뮬레이션에서 강우 감쇠 데이터를 발생시키기 위해서, Ku 대역을 사용하는 무궁화 위성성의 비이콘(beacon) 신호의 측정 데이터를 이용하여 모델링한 강우 감쇠 시뮬레이션 모델을 사용하였다[15]. Ka 대역의 강우 감쇠 데이터를 얻기 위해, Ku 대역의 데이터를 ITU 추천 주파수 스케일링 기법[16]을 이용하여 20.755 GHz와 30.485 GHz의 Ka 대역으로 변환하여 사용하였다. 또한, 페이드 변화율이 매우 큰 강우 감쇠 데이터에 대한 제시된 예측 기법의 동작 성능을 검토하기 위해, 주파수 스케일링된 Ka 대역 데이터에서 신털레이션 현상을 충분히 반영한 강우 감쇠 데이터를 사용하여 실험을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에서 사용된 2가지 강우 감쇠 데이터의 평균 페이드 변화율을 나타낸 것이다. P2는 신털레이션 현상과 페이드 변화율이 큰 경우의 데이터로, 일반적인 강우 감쇠 데이터의 페이드 변화율이 최대 0.4~0.7 dB/sec 이하이고, 평균적으로는 10-2의 order를 갖기 때문에 [1,13], 매우 높은 페이드 변화율을 갖는 데이터라 볼 수 있으며, 본 논문에서는 이러한 데이터를 최악 조건의 강우 감쇠 데이터로 사용한다. 강우 감쇠 데이터의 샘플 간격은 0.9375s로 하나의 데이터는 총 30,000개의 샘플들로 이루어진다.

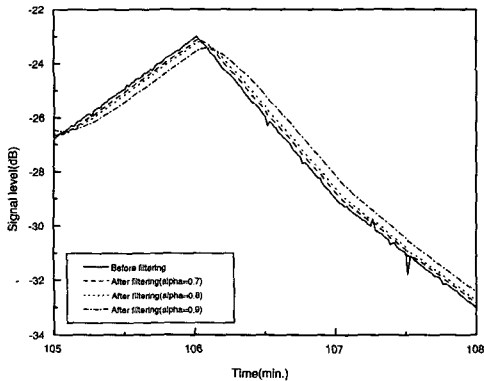
표 1. 강우 감쇠 데이터의 평균 페이드 변화율.

강우 감쇠 데이터	주파수 [GHz]	평균페이드변화율 [dB/sec]
P1	20.755	0.048
P2	30.485	0.438

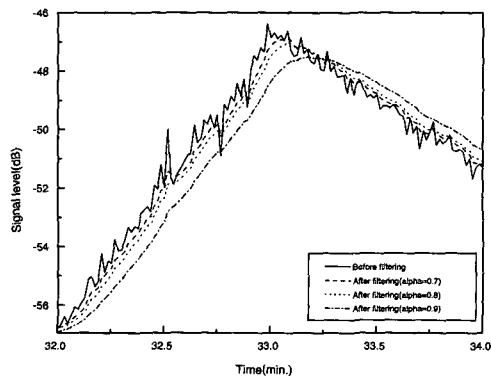
3.1 저역 통과 필터링

그림 5는 강우 감쇠 신호 패턴을 필터링 전과 후를 비교하여 나타낸 것으로, 저역 통과 필터링의 목적은 앞서 논의된 바와 같이 짧은 시간 동안의 급격한 레벨 변화를 완화시켜 예측 과정에서의 그에

대한 오인 추정을 피하기 위해서이고, 그 완화 정도의 조절은 대역폭 파라미터 α (그림에서 alpha로 표기)에 의해 이루어진다. 그림에서 볼 수 있듯이 높은 페이드 변화율을 가진 데이터에 대해서는 레벨 변화를 충분히 완화시키기 위해서는 $\alpha=0.9$ 이상의 값을 취하여 합을 관찰할 수 있다. 그 이하의 파라미터를 취하는 경우, 필터링 후의 패턴에는 급격한 변화 부분이 남게 되고, 예측기는 그러한 변화에 따라 일정 시간 후의 신호 레벨을 예측한다. 이 때, 기울기 변화에 의해 예측된 신호 레벨이 평균적인 신호 레벨로부터 수 dB 이상 벗어나고 그 범위에서 전송 방식의 전환이 요구되어, 강우 감쇠 적응형 시스템은 전송 방식을 전환할 경우, 수 초 이내에 평균 레벨로 복귀한다면 짧은 시간동안 많은 전송 방식의 전환을 초래하는 결과를 낳는다. 그러나, 높은 값의 α 는 2.1에서 논의된 바와 같이 지연 현상을 가져오며, $\alpha=0.9$ 의 필터링에서 약 10 [samples]의 지연 현상을 보인다.



(a) P1 (주파수 20.755 GHz, 페이드 변화율 0.048 dB/sec)



(b) P2 (주파수 30.485 GHz, 페이드 변화율 0.438 dB/sec)

그림 5. 파라미터 α 에 따른 필터링 후의 신호 레벨.

3.2 기울기에 근거한 예측과 오차 보정

그림 6은 예측시간(p)과 관측기간(n)에 대해 $p=n=3$, $p=n=5$, $p=5$ 및 $n=1$ [samples]일 경우에 기울기에 의해 예측된 신호 레벨을 보이고 있다. 여기서, 예측 이전에 $\alpha=0.7$ 의 저역 필터링 하였고, 예측 오차의 보정은 사용하지 않았다. 필터의 대역 조절 파라미터가 비교적 작기 때문에 신호 레벨의 작고 빠른 변화가 필터링 후에도 존재할 수 있고 관측기간 $n=1$ 인 경우와 같이 바로 전 과거 샘플과의 기울기로부터 5 샘플 후의 레벨을 예측할 때, 그림 6의 화살표로 지적된 부분과 같이 작은 변화는 확대되어 나타난다. 만약 확대된 레벨 변화 내에 전송 방식의 전환을 요하는 레벨이 걸쳐 있다면, 시스템은 적어도 두 번 이상의 전송 방식의 전환을 겪게 된다. 한편으로 패턴의 기울기가 전체적으로 반전되는 부분에서 예측에 의한 오차가 발생하며, 예측 시간이 클수록 그 오차가 크다. 관측기간을 예측시간에 비해 크게 취할 경우, 그러한 부분에서 예측 값은 지연 반응을 보이게 되어 오차는 더욱 확대될 것이다. 이러한 결과를 종합해 볼 때, 기울기 예측 과정에서 신호 레벨의 작고 빠른 변화에 필요이상으로 반응하지 않기 위해서는 저역 필터에서 신호 레벨의 빠른 변화는 충분히 제거되어야 하며, 관측기간과 예측시간은 동일하게 함이 적절함을 관찰할 수 있다.

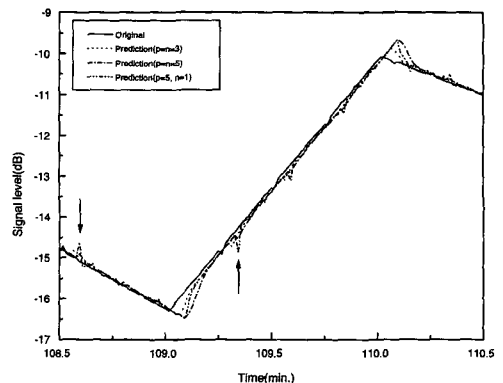


그림 6. $\alpha=0.7$ 필터링 후의 예측된 신호 레벨.

그림 7은 페이드 변화율이 큰 P2 데이터에 대해 $\alpha=0.9$ 필터링 후의 예측 패턴을 보여준다. 예측 패턴은 저역 통과 필터링의 지연현상으로 인해 강우 감쇠 패턴에 일정시간이 지연된 형태가 되고 있음을 알 수 있다. 따라서 강우 감쇠 값이 감소하는 구간에서는 과추정(over-estimation)되어 예측값이 실

제값보다 크고, 강우 감쇠 값이 증가하는 구간에서는 반대로 저추정(under-estimation)되어 예측값이 실제값보다 작게 나타나고 있다. 서비스 품질 측면에서 예측값이 실제값보다 크게 예측되는 경우에도 민감하기 때문에 감소 구간에서 필터링 지연으로부터 비롯되는 과추정 오차는 보상되어야 한다. 음의 여유 값을 두어 예측 패턴을 전체적으로 아래로 이동시켜 과추정 오차를 줄일 수 있으나, 이는 그 만큼의 저추정 오차의 증가를 감수해야 한다. 따라서, 예측 여유에 의해 오차 보정을 하는 경우에는 서비스 전송 효율의 감소를 감수해야 한다.

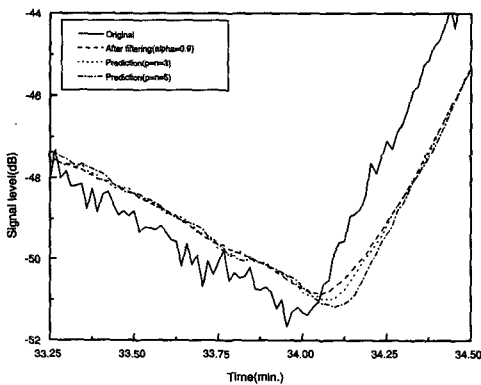
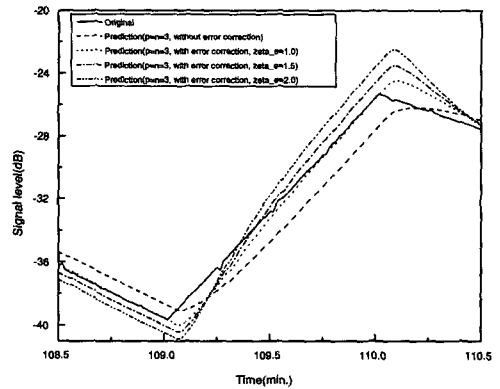


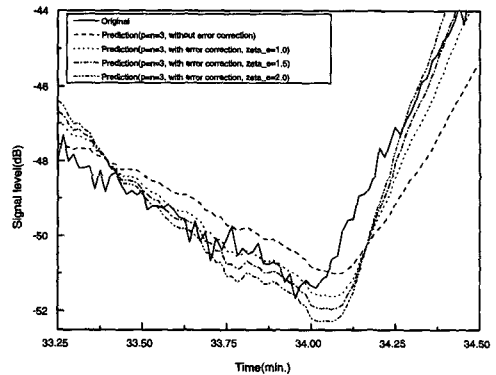
그림 7. $\alpha=0.9$ 필터링 후의 예측된 신호 레벨.

그림 8은 기울기 예측 과정에서 평균 예측 오차에 대한 보정 전과 후의 예측 패턴의 변화를 보여주고 있다. 여기서 예측 오차의 평균을 구하는 과정에서 $\beta=0.9$, $\zeta_e=1.0, 1.5, 2.0$ (그림에서 zeta_e로 표기)을 사용하였다. 예측 보정을 한 후에는 강우 감쇠 패턴의 기울기가 변하는 구간을 제외하고는 예측 패턴의 지연 현상이 줄어들고 있다. ζ_e 로 1.0보다 큰 경우 예측 보정은 본래의 평균 오차를 초과함으로 예측 패턴은 본래의 감쇠 패턴에 교차하여 벗어난다. 위의 결과를 볼 때, 예측 오차 보정은 평균 오차로써 충분하며, ζ_e 로는 1.0이 적절하다고 할 수 있다. 예측 보정을 한 후에는 강우 감쇠 패턴의 기울기가 변하는 구간을 제외하고는 예측 패턴의 지연 현상이 줄어들고 있다. 강우 감쇠 신호의 전체적인 기울기 변화가 일어나는 구간에서, 예측 시간 p에 의해 기울기의 변화에 예측값이 지연 반응함으로써 예측 오차가 발생되며, 이러한 오차는 제시된 예측 오차 보정으로도 보상될 수 없다. 근본적으로 기울기에 근거한 예측은 그러한 변화를 예측할 수 없으며, 오차 보정 또한 평균화 과정을 필요로 하기

때문에 그에 대한 반응은 지연되어서 나타나기 때문이다.



(a) P1 (주파수 20.755 GHz, 페이드 변화율 0.048 dB/sec)

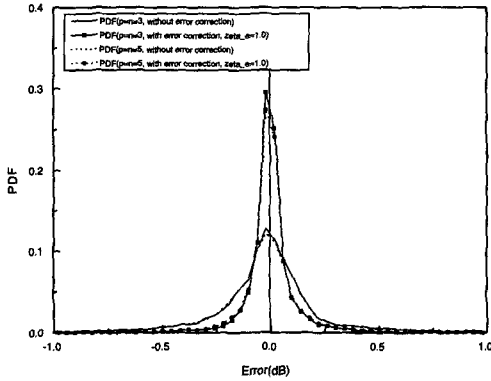


(b) P2 (주파수 30.485 GHz, 페이드 변화율 0.438 dB/sec)

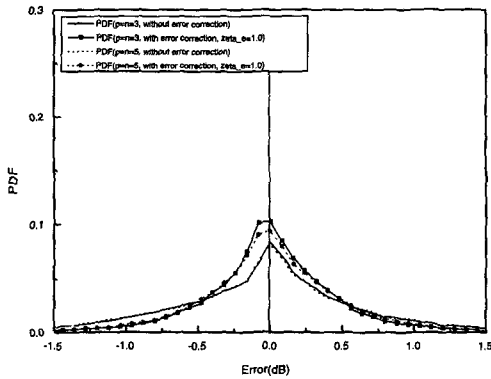
그림 8. 평균 오차 보정을 갖는 기울기 예측 기법에 의해 예측된 신호 레벨.

그림 9는 보정 전후의 예측 오차에 대한 확률밀도함수(PDF)를, 그림 10은 예측 오차에 대한 표준편차를 보인다. 전반적으로 오차를 보정함으로써 평균은 거의 변화가 없고 PDF의 폭이 좁아짐을 알 수 있다. 예측 시간의 차이에 대해 거의 동일한 PDF를 보이며, 이는 예측 시간의 차이로 인해 오차에 차이가 발생하는 부분은 신호 패턴의 기울기가 반전되는 부분이고, 그러한 부분은 전체 오차에 대해서 일부분만을 차지하기 때문이다. 반면에, 페이드 변화율이 높을 경우, 보정 전후의 PDF 변화가 크지 않음을 볼 수 있는데, 예측 오차는 LPF의 지연 현상에 의한 오차와 신틸레이션에 의한 신호의 빠른 변화에 대한 오차를 포함하며, 페이드 변화율이 높은 경우에 지연 오차 보다 신틸레이션 오차가

차지하는 비율이 크고, 오차 보정 과정은 평균적인 오차만을 감소시키는 역할만을 하기 때문이다. 신틸레이션 오차는 다음의 예측 여유 과정에서 보상되어야 한다. 그림 11의 예측 오차의 표준 편차를 보인 결과에서, 보정 전후의 모든 편차는 1 dB 내에 있고, 보정 후에 약 1.5~2.5배의 예측 오차 감소를 볼 수 있으며, 페이드 변화율에 관계없이 예측시간 차에 의한 차이는 거의 볼 수 없다.



(a) P1 (주파수 20.755 GHz, 페이드 변화율 0.048 dB/sec)



(b) P2 (주파수 30.485 GHz, 페이드 변화율 0.438 dB/sec)

그림 9. 예측 오차에 대한 확률밀도함수.

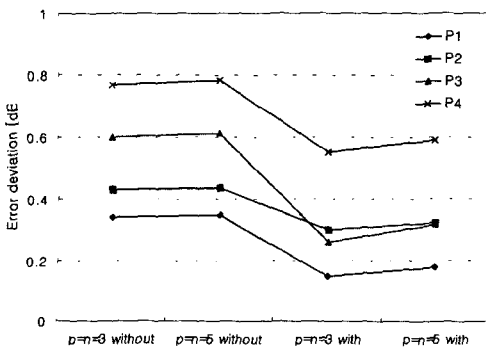
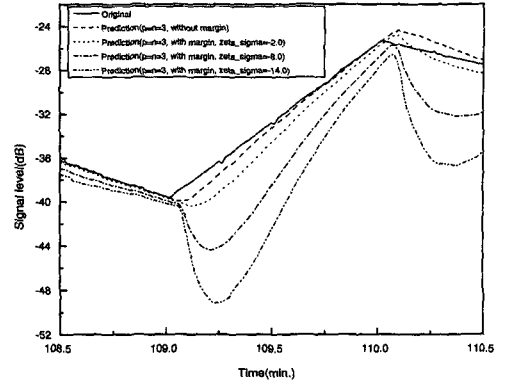
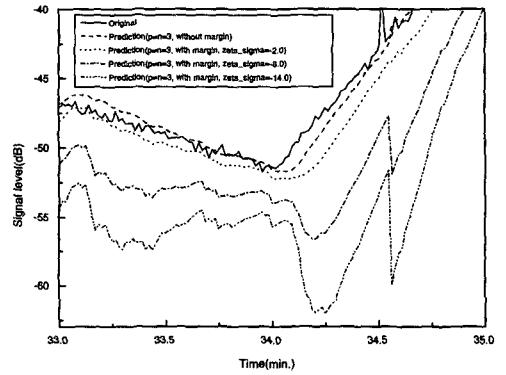


그림 10. 예측 오차의 표준 편차.



(a) P1 (페이드 변화율 0.048 dB/sec)



(b) P2 (페이드 변화율 0.438 dB/sec)

그림 11. 가변 여유를 갖는 신호 레벨.

3.3 예측 여유

예측 여유에 대한 시뮬레이션에서는 예측 시간과 관측 시간이 $p=n=3$ 일 때의 결과를 살펴본다. 예측 여유는 신틸레이션 현상에 의해 실제 감쇠값이 예측값 이하가 되는 빈도를 줄이기 위한 것으로, 그러한 과추정 확률은 예측 과정의 전반적인 성능을 관찰할 수 있는 대상이 된다. 예측값을 바탕으로 강우 감쇠 보상을 위한 전송 방식을 전환을 결정할 때, 실제값이 예측된 값보다 작을 경우 적절한 전환을 수행하지 못함으로써 서비스 품질 저하(outage)를 초래하게 될 것이다. 따라서, 예측 과정에서 과추정 확률을 충분히 감소시킴으로써 서비스 품질 저하 확률을 특정 범위 이하가 되도록 하여야 한다.

표 2는 가변 여유 방법에 의해 예측 여유가 추가되었을 때, 파라미터 ξ_s 에 대한 과추정 확률과 추가된 예측 여유를 나타낸다. 여기서 파라미터 ξ_s 는 예측 과정의 전의 저역 통과 필터링에서 사

용된 파라미터 α 와 동일하게 0.9로 하였다. 표 2에서 P1 데이터와 P4 데이터 두 경우에 대해서 0.1%의 과추정 확률을 얻기 위해서는 ξ_0 는 -10 이하로 그 크기가 10 이상이 된다. 이는 예측 오차의 표준 편차에 약 10배 이상의 크기로 예측 여유를 두어야 특정 과추정 확률을 얻을 수 있다는 의미가 된다. 또한, 1% 이하의 과추정 확률을 얻기 위해서 ξ_0 의 크기는 적어도 4 이상이 되어야 하며, 이러한 ξ_0 크기의 증가는 그림 11의 예측 패턴에서 볼 수 있듯이 실제값의 변동에 ξ_0 (그림에서 zeta_sigma로 표기)크기에 비례하게 확대되어 예측 여유가 추가되며, 특히, 기울기가 반전되는 부분에서의 예측 여유는 필요 이상으로 매우 확대되어 나타난다. 이러한 현상은 예측 여유를 가변적으로 계산하는 본래의 특징과 기울기 예측 과정에서 기울기 반전 부분에서의 오차 급변에서 비롯된다. 4 이상으로 큰 값인 경우에 기울기 반전 부분에서 비롯되는 예측 오차에 대한 표준 편차는 여유 계산 과정에서 지연 확대되어 나타난다.

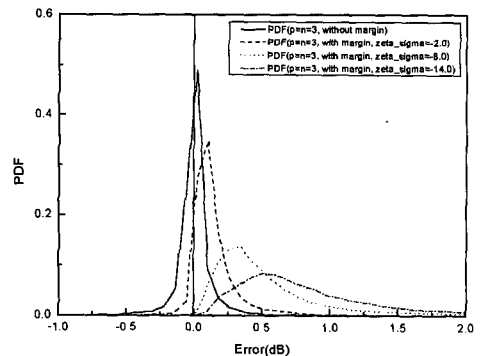
표 2. 가변 여유 방법에 의한 과추정 확률과 예측 여유의 평균값.

ξ_0	P1 (0.048 dB/sec)		P2 (0.438 dB/sec)	
	과추정 확률[%]	평균예측 여유[dB]	과추정 확률[%]	평균예측 여유[dB]
0.0	53.281	0.000	50.534	0.000
-2.0	5.941	-0.150	4.731	-0.863
-4.0	1.403	-0.300	1.134	-1.725
-6.0	0.509	-0.450	0.453	-2.588
-8.0	0.197	-0.601	0.234	-3.450
-10.0	0.103	-0.751	0.138	-4.313
-12.0	0.056	-0.901	0.088	-5.175
-14.0	0.041	-1.051	0.066	-6.038
-16.0	0.031	-1.201	0.053	-6.900

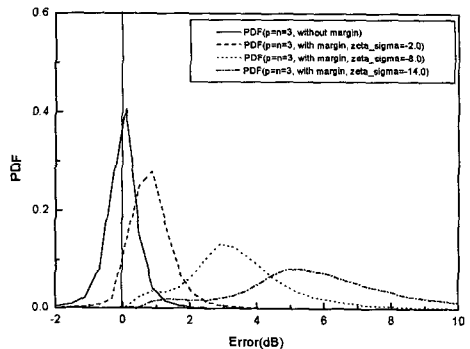
그림 12의 확률 밀도 함수에 대한 결과에서 볼 수 있듯이, 가변 여유 방법은 PDF를 우측으로 이동시키는 효과를 얻을 수 있지만, PDF는 ξ_0 크기에 비례적으로 높이가 낮아지고 폭은 넓어지는 결과를 초래한다. 가변 여유 방법은 예측 과정에서 강우 감쇠값을 충분히 예측하고 예측 오차는 신틸레이션 현상에 의한 것으로 가정한다. 그러나, 실제 예측 과정에서 기울기 반전 부분에서와 같이 그 이외의 원인에 의한 예측 오차가 존재하며, 가변 여유 방식

으로 낮은 과추정 확률을 얻기 위해서는 ξ_0 를 크게 해야 한다. 따라서, 충분한 과추정 확률을 얻기 위해서는 가변 여유 방법으로는 부적절하다고 볼 수 있다.

고정 여유 방법은 신호 레벨에 대한 패턴 변화에 영향을 주지 않으면서 수직적으로 하강시키는 역할을 하며, 또한 PDF의 높이와 폭에 변화 없이 우측으로 이동시킨다. 가변 여유 방법에서와 같은 예측 패턴의 확대된 변화는 없으나, 특정 과추정 확률을 얻기 위해서 전체적으로 예측값을 하강시킴으로써 여유가 필요하지 않는 부분에서도 고정적인 예측 여유값을 갖는다는 단점을 가진다. 표 3은 고정 여유값에 대한 과추정 확률을 보인다. 0.1%의 과추정 확률을 얻기 위해 요구되는 고정 여유는 P1 데이터의 경우 약 1.2 dB, P2 데이터의 경우 약 3.2 dB로, 가변 여유 방법에서의 약 0.75 dB 및 4.5 dB와 비교해 볼 때, 페이드 변화율이 낮은 경우에는 가변 여유 방법이, 높은 경우에는 고정 여유 방법이 보다 적은 평균 여유값을 갖는다.



(a) P1 (페이드 변화율 0.048 dB/sec)



(b) P2 (페이드 변화율=0.43849 dB/sec)

그림 12. 가변 여유 방법의 예측 오차에 대한 확률밀도함수.

그림 13과 그림 14는 고정 여유와 가변 여유를 혼합한 방법의 경우, 각각 예측 오차에 대한 확률 밀도 함수, 과추정 확률 및 평균 여유에 대한 결과를 보인다. 혼합 방식은 두 방식의 장점을 갖는 방법으로 예측 오차의 전반적인 증감에 가변적으로 대처할 수 있으며, 고정 여유를 줌으로써 특정 과추정 확률을 얻기 위해 가변 여유 파라미터 크기를 상대적으로 작게 함으로써 가변 여유 방식의 단점을 보완할 수 있다. 그림 13에서와 같이 파라미터 ζ_0 의 크기를 2~3의 크기를 갖게 한다면, PDF의 폭을 크게 확장시키지 않는다. 그림 14에서 고정 여유에 의해 동일 과추정 확률을 얻기 위한 ζ_0 의 크기가 감소함을 볼 수 있다. 고정 여유는 동일 파라미터 값에 대해 평균 여유값을 증가시키게 되나, 특정 과추정 확률을 얻기 위한 평균 여유값 측면에서 비교한다면 오히려 감소한다. 표 4는 고정 여유값과 파라미터 ζ_0 에 대한 과추정 확률과 평균 여유를 비교한 것으로, P1 데이터에 대한 결과에서 고정 여유 0.5 dB와 $\zeta_0=2$ 로, P2 데이터의 경우 고정 여유 2.0 dB와 $\zeta_0=3$ 로 0.1 % 이하의 과추정 확률을 얻는다.

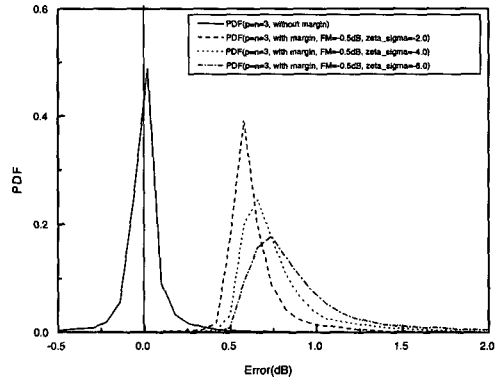
표 3. 고정 여유 방법에 의한 과추정확률[%]과 예측 여유의 평균값

P1 (0.048 dB/sec)		P2 (0.438 dB/sec)	
고정여유값 [dB]	과추정 확률 [%]	고정여유값 [dB]	과추정 확률 [%]
-1.0	0.116	-3.0	0.147
-1.2	0.091	-3.2	0.106
-1.4	0.050	-3.4	0.078
-1.6	0.038	-3.6	0.066
-1.8	0.031	-3.8	0.047
-2.0	0.013	-4.0	0.034

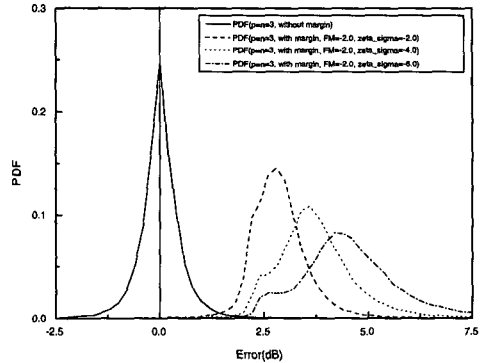
표 4. 혼합 여유 방법의 과추정 확률과 예측 여유의 평균값

P1 (0.048 dB/sec)				P2 (0.438 dB/sec)			
고정 여유 [dB]	ζ_0	과추정 확률 [%]	평균예측 여유 [dB]	고정 여유 [dB]	ζ_0	과추정 확률 [%]	평균예측 여유 [dB]
-0.5	0.0	0.694	-0.500	-1.5	0.0	1.166	-1.500
	-2.0	0.078	-0.650		-2.0	0.322	-2.363
	-4.0	0.013	-0.800		-4.0	0.122	-3.225
	-6.0	0.000	-0.950		-6.0	0.056	-4.088
-1.0	0.0	0.116	-1.000	-2.0	0.0	0.509	-2.000
	-2.0	0.009	-1.150		-2.0	0.156	-2.863
	-4.0	0.000	-1.300		-4.0	0.063	-3.725
	-6.0	0.000	-1.450		-6.0	0.031	-4.587
-1.5	0.0	0.047	-1.500	-2.5	0.0	0.231	-2.500
	-2.0	0.000	-1.650		-2.0	0.091	-3.363
	-4.0	0.000	-1.800		-4.0	0.041	-4.225
	-6.0	0.000	-1.950		-6.0	0.019	-5.088

두 경우에서의 0.1 % 과추정 확률을 얻기 위한 평균 여유 약 0.6 dB와 약 3 dB의 결과는 고정 여유나 가변 여유 두 방법 모두에 대해서 우수한 결과를 갖는다.

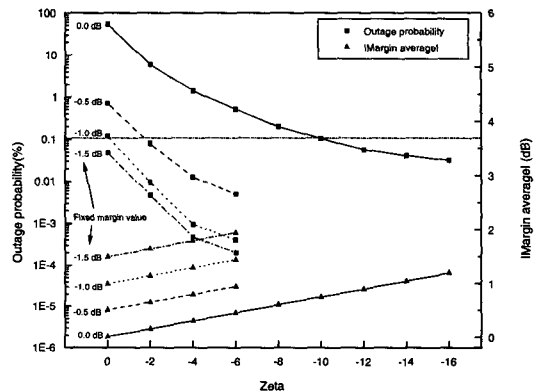


(a) P1 (페이드 변화율 0.048 dB/sec)

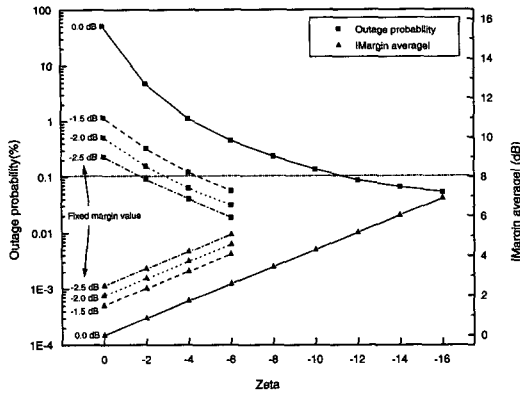


(b) P2 (페이드 변화율 0.438 dB/sec)

그림 13. 혼합 여유 방법의 예측 오차에 대한 확률밀도함수.



(a) P1 (페이드 변화율 0.048 dB/sec)



(b) P2 (페이드 변화율 0.438 dB/sec)

그림 14. 혼합 여유 방법의 과추정 확률과 예측 여유의 평균값.

IV. 결론

본 논문에서는 위성 링크에서의 강우 감쇠 보상 기법의 실현을 위해, 비교적 간단한 동적 신호 레벨 예측 기법을 제안하였다.

예측 과정에서 시뮬레이션을 완화시키기 위해서는 저역 통과 필터링이 필요하며, 페이드 변화율이 높은 강우 감쇠 데이터에 대해 귀환 필터링의 대역폭을 충분히 감소시켜야 한다. 그러나, 대역폭 감소로 인하여 수 십 샘플의 지연 현상이 발생되며, 지연 현상은 기술기에 근거한 예측 방법에서 예측 기간의 확장으로 해결될 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 과거 오차의 평균을 취하여 지연 현상으로 인한 예측 오차를 줄이는 방법을 제시하였고, 그 결과 지연 현상과 오차를 감소시키며, 특히 과추정 오차를 현저히 감소시킬 수 있다. 제시된 예측 기법은 간단하면서도 충분한 예측 과정을 수행할 수 있다는 장점을 갖는다. 시뮬레이션 결과에서 페이드 변화율이 약 0.4 dB/sec로 가장 큰 강우 감쇠 데이터에도 예측 오차의 평균 및 표준 편차는 1 dB를 넘지 않는다.

예측 여유 과정에서 0.1 % 이하의 특정 과추정 확률을 얻기 위해서, 가변 여유 방식은 예측 오차의 표준 편차에 대해 10 배 이상의 비례 상수를 요함으로써 오차의 급변은 가변 여유의 확대된 변동을 초래한다. 낮은 과추정 확률에 대해서는 매우 큰 비례 상수를 필요로 함으로써 가변 여유는 고정 여유 방법에 비해 장점이 없다. 보다 적은 비례 상수를 가지고도 만족할 만한 과추정 확률을 얻기 위해서

는 가변 여유 이외에 고정 여유를 추가함으로써 획득될 수 있다.

참고 문헌

- [1] M. J. Willis, "Fade Counter-Measures Applied to Transmissions at 20/30 GHz," *Electronics & Commun. Eng. Journal*, pp.88-96, April 1991.
- [2] M. J. Willis and G. G. Evans, "Fade Countermeasures at Ka Band for OLYMPUS," *Int. Jour. of Satellite Commun.*, Vol.6, pp.301-311, April 1988.
- [3] Edgar H. Satorius and Loretta H. Tong, "Analysis of a Rain Compensation Algorithm for K/Ka-band Communications," *Int. Jour. of Satellite Commun.*, Vol.14, pp297-311, 1996.
- [4] Barry K. Levitt, "Rain Compensation Algorithm for ACTS Mobile Terminal," *IEEE Jour. on Sel. Areas in Commun.*, Vol.10, No.2, pp.358-363, Feb 1992.
- [5] Athanasios Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Process*, McGraw-Hill Series in Electrical Engineering, 1984.
- [6] William W. S. Wei, *Time Series Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [7] Paulo S. R. Diniz, *Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [8] Murray Smith, *Neural Networks for Statistical Modeling*, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [9] Nedo Celandroni and Francesco Potorti, "Modeling Ka-Band Scintillation as a Fractal Process," *IEEE Jour. on Sel. Areas in Commun.*, vol.17, no.3, pp.164-172, Feb. 1999.
- [10] D. Vanhoenacker-Janvier and H. Vasseur, "Prediction of Scintillation Effects on Satellite Communications above 10 GHz," *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, vol.142, no.2, April 1995.
- [11] C.B. Cox, "Advance Communications Technology Satellite Adaptive Rain Fade Compensation Protocol Performance," *Ka-band Utilization Conference*, pp.107-113, 1997.
- [12] Boris Gremont, Miodrag Filip, Paul Gallois and Stephen Bate, "Comparative Analysis and

Performance of Two Predictive Fade Detection Schemes for Ka-Band Fade Countermeasures," IEEE Jour. on Sel. Areas in Commun., Vol.17, No.2, pp.180-192, Feb 1999.

- [13] L. Dossi, "Real-Time Prediction of Attenuation for Applications to Fade Countermeasures in Satellite Communications," Electronics Letters, Vo.26, No.4, pp.250-251, Feb. 1990.
- [14] I. E. Otung and B. G. Evans, "Short-term distribution of amplitude scintillation on a satellite link," Electronics Letters, vol. 31, no. 16, pp.1328-1329, 1995.
- [15] Sooyoung Kim Shin, Soo In Lee, Yang Su Kim, and Jae Mounng Kim, "A Dynamic Rain Attenuation Modeling Technique for Satellite Communication Link", Proc. of Int. Conf. on Telecommun., Vol. 2, pp. 33-37, 15-18, June, 1999
- [16] Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems, Recommendation ITU-R P.618-5, 1997.

임 광 재(Kwang Jae Lim) 정회원



1992년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
 1994년 2월: 인하대학교 전자공학과 석사
 1999년 2월: 인하대학 전자공학과 박사

1999년 3월~현재: 한국전자통신연구원(ETRI) 위성통신시스템연구부 선임연구원
 <주관심 분야> 이동 및 위성 통신 시스템, 다중접속방식.

황 정 환(Jung Hwan Hwang) 비회원



1998년 3월: 충남대학교 전자공학과 학사
 2000년 3월: 충남대학교 전파공학과 석사
 2000년 3월~현재: (주)나리지*온 연구원
 <주관심 분야> 전자파 전파 및 산란, 초고주파 회로 설계

김 수 영(Sooyoung Km Shin) 정회원



1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 학사
 1994년 2월~1991년 9월: 한국전자통신연구소 위성통신시스템연구부 연구원

1992년 10월: Univ. of Suurey, U.K 공학 석사
 1995년 2월: Univ. of Surrey, U.K 공학 박사
 1994년 11월~1996년 6월: Research Fellow, Univ. of Surrey, U.K
 1996년 8월~현재: 한국전자통신연구원 위성통신시스템연구부 선임연구원
 <주관심 분야> 오류정정 부호화 방식, 이동/위성통신 전송 방식 연구 등

이 수 인(Soo In Lee) 정회원



1985년 2월: 경북대학교 전자공학과 공학사
 1989년 2월: 경북대학교 전자공학과 공학석사
 1996년 2월: 경북대학교 전자공학과 공학박사

1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 DAB시스템연구팀장
 <주관심 분야> 위성통신, 이동통신, 채널코딩