

위성 통신 시스템에서 강우 감쇠 보상을 위한 알고리즘

정회원 임 광 재*, 권 태 곤*, 유 문 희*

Algorithms for Rain-Attenuation Compensation in Satellite Communication Systems

Kwang Jae Lim*, Tae Gon Kwon*, Moon Hee You* *Regular Members*

요 약

위성통신시스템에서 10GHz 이상의 Ku 또는 Ka 대역은 수십dB의 크기를 갖는 강우에 의한 감쇠 현상이 심각하며, 이러한 감쇠는 위성 링크의 심각한 성능 저하를 가져온다. 본 논문은 위성통신 링크 상에서의 강우 감쇠 보상을 위한 알고리즘을 제시하고, Ku 대역의 강우 감쇠 데이터를 사용한 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 비교 분석하였다. 예측 기법 측면에서, 적응형 알고리즘을 적용한 기법과 신호 레벨 변화량에 근거한 예측 기법은 거의 동일한 예측 오차를 보였고, 따라서, 급속한 신호 레벨 변화에 적응성을 요하지 않는 강우 감쇠 예측의 경우, 알고리즘 측면에서 비교적 간단한 예측 기법으로도 충분한 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한, 제시된 전송 방식 결정 알고리즘은 기존의 임계값 기반 알고리즘에 비해 품질 저하율이 0.6%에서 0.01% 이하로 감소하였고, 거의 동일한 전송 효율을 가지면서 약 5 배의 적은 전송 방식 전환을 요구한다.

ABSTRACT

Fading due to atmospheric propagation effects, especially rain attenuation, seriously impacts link performance in satellite communications using frequency bands above 10 GHz such as Ku- and Ka-band. This paper proposes algorithms for rain-attenuation prediction and transmission scheme decision to be used in satellite communication systems employing multiple transmission schemes for rain-attenuation compensation. From the simulations using the rain attenuation data generated by a Ku-band rain-fading model, it is shown that the prediction schemes with adaptive filtering algorithms have almost the same performance as one with simple slope-based algorithm, in terms of prediction error. We find that the proposed simple prediction algorithm has good performance enough to predict rain-attenuation because of the slow variation of the attenuated signal level. It is also shown that the proposed algorithm can reduce switching rate by about 5 times, providing the same throughput and the enhancement of outage performance by 0.6% to 0.01%, when compared with simple threshold-based algorithm.

I. 서론

많은 상업용 위성통신시스템이 운용되고 있거나 예정인 주파수 대역인 10 GHz 이상의 Ku 또는 Ka 대역은 넓은 대역폭 등의 장점을 가지나, 수십 dB의 크기를 갖는 강우에 의한 감쇠 현상이 심각하다는 단점을 갖는다. 일반적으로, 이러한 강우 감쇠에 대처하기 위해서 시스템 설계 시에 수십 dB에 이르

는 링크 마진이 고려되어야 하나, 심각한 강우 감쇠가 발생하는 연중 시간율이 1 % 이하로 매우 적다는 것을 고려한다면, 적응형 보상 방법이 더욱 효율적인 선택이 된다^{1,2)}.

적응형 보상 기법으로는 단말 및 위성에서의 전송 전력 제어에 의해 수신 신호 전력 자체를 높이거나, 변복조 및 코딩 방법의 전환 또는 데이터 전송률을 감소시켜 수신 비트 에너지를 증가시키는

* 한국전자통신연구원 위성통신시스템부
논문번호: 00360-0915, 접수일자: 2000년 9월 15일

방법 등이 있다. 이러한 적응형 보상 기법의 실현을 위해서는, 위성 링크의 전파 지연 및 보상 지연 시간을 고려하여, 현재 및 과거 시간에 측정된 감쇠량으로부터 앞으로의 감쇠량을 예측하는 강우 감쇠 예측 알고리즘과, 예측된 감쇠량을 보상하기 위해 적절한 전송 방식의 전환을 제어하는 전송 방식 결정 알고리즘을 필요로 한다.

일반적으로 강우 감쇠된 수신 신호 변화는 장구간의 강우 감쇠뿐만 아니라, 단구간의 빠른 변화를 갖는 신틸레이션(scintillation) 효과를 포함한다^[1-3]. 문헌 [3]에서는 강우 감쇠 신호에서 신틸레이션에 의한 변화를 분리시키기 위해 간단한 저역 필터를 사용하였고, 신호 크기 변화에 대한 예측 과정 없이 전송 방식의 전환을 결정하였다. 문헌 [4]에서는 비교적 간단하고 최근의 감쇠 정보를 이용하는 기율기에 근거한 예측 방법을 제시하였다. 본 논문에서는 문헌 [4]의 예측 기법에 추가적으로 적응형 알고리즘을 적용한 선형 회귀 필터링을 기반으로 한 예측 알고리즘과 그 성능을 비교한다.

기존의 전송 방식 결정 알고리즘^[6,7]은, 시스템에서 사용되는 각 전송 방식이 특정 비트오율(BER)을 만족시킬 수 있는 최소 수신 신호대 잡음비(SNR)인 임계값과 현재의 수신 SNR을 비교함으로써 현 시점에서 사용될 전송 방식을 결정한다. 또한, 이동통신시스템에서의 핸드오프 결정 알고리즘과 유사하게, 잦은 전송 방식의 전환을 피하기 위해 임계값에 대해 일정 여유를 포함시키는 히스테리시스(hysteresis) 메커니즘을 적용한다. 그러나, 두 개 이상의 전송 방식을 사용할 경우, 다수의 임계값을 적용하여야 하며, 히스테리시스 적용을 위해 증가된 하위 전송 방식에 대한 임계값과 상위 전송 방식의 임계값은 히스테리시스 여유가 커질수록 근접하게 되고, 이는 다시 전송 방식의 전환율을 증가시키는 결과를 초래한다. 따라서, 본 논문에서는 다수의 전

송 방식을 선택 대상으로 하며, 임계값의 증감에 의한 히스테리시스 메커니즘이 아닌, 시간축 상에서의 히스테리시스 효과를 갖는 결정 알고리즘을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. I장 서론에 이어 II장에서는 강우 감쇠 예측 기법을 III장에서는 전송 방식 할당 알고리즘을 제안하고, IV장에서는 시뮬레이션을 통하여 제시된 강우 보상 알고리즘의 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 약 0.5초의 왕복 전파 속도를 고려한다면, 이러한 신틸레이션에 의한 신호 레벨의 변화율, 예측하고 대응한다는 것은 실질적으로 매우 어려울 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 레벨

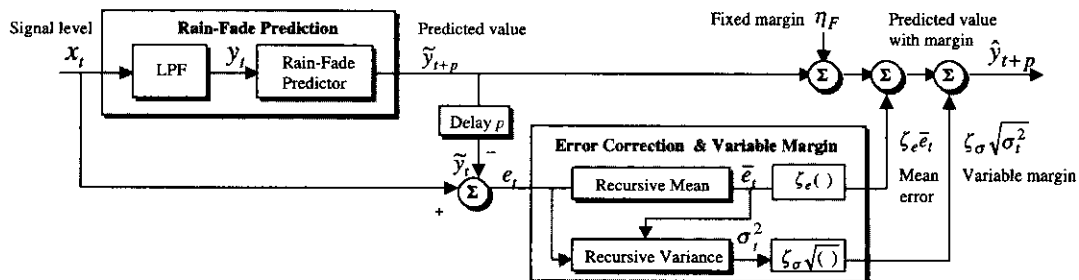


그림 1. 강우 감쇠 예측기.

의 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.

먼저, 신털레이션 현상에 의한 빠른 레벨 변화를 제거하기 위해 저역 통과 필터링을 사용하고, 식 (1)의 입출력 관계를 갖는 귀환 이산 필터링을 사용한다^[4].

$$y_i = \alpha y_{i-1} + (1-\alpha)x_i \quad (1)$$

위 식에서 x_i 는 T 간격으로 표본화된 수신 신호 레벨의 샘플값, y_i 는 필터링된 출력, α 는 대역폭 조절 파라미터이다^[4].

현 시점으로부터 일정 예측 시간 p 샘플 이후의 신호 레벨 \tilde{y}_{i+p} 을 추정하는데 있어, 식 (2)와 같은 일반적인 선형 회귀 기법을 사용한다.

$$\tilde{y}_{i+p} = \sum_{i=0}^{n-1} w_i y_{i-1} \quad (2)$$

위 식에서 n 은 관측 시간, w_i 는 과거 샘플들에 대해 적용되는 가중치이다. 비교적 간단한 방법으로 관측 기간의 양끝 샘플들에 대해 가중치를 $w_0 = p/(n-1)+1$ 와 $w_n = -p/(n-1)$ 로 사용하여

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

와 같이 예측을 수행하는 방법을 고려할 수 있다^[4]. 이러한 예측 방법은 과거 신호 레벨들 사이의 변화량이 현 시점 이후에서도 변화 없을 것이라는 가정에 기반한 것이다(다음의 내용에서는 SBP(Slope-Based Prediction) 기법이라 함).

선형 회귀 식에서 LMS(least mean square) 또는 RLS(recursive least square)와 같은 가중치 갱신 알고리즘^[5]을 이용하여, 가변적인 가중치를 적용함으로써 신호 레벨 변화에 대한 적응성을 갖게 할 수 있다(다음의 내용에서는 AFP(Adaptive Filtering Prediction) 기법이라 함). LMS 계열의 알고리즘에서 수렴 특성을 향상시키기 위해 수렴 인자를 가변적으로 사용하는 NLMS (Normalized LMS) 알고리

즘은 다음과 같은 식에 의해서 가중치 벡터 w_i 를 갱신한다.

$$w_i = w_{i-1} + \frac{\mu}{\gamma + y_i^T y_i} e_i y_i \quad (4)$$

위 식에서 e_i 는 적응형 알고리즘에 대한 예측 오차이고, μ 는 알고리즘의 수렴 특성에 관련된 상수이다. LMS 알고리즘 보다 수렴 속도가 빠른 RLS 알고리즘은 다음과 같은 식에 의해 가중치를 갱신한다.

$$w_i = w_{i-1} + e_i S_i x_i \quad (5)$$

$$S_i = \frac{1}{\varepsilon} \left[S_{i-1} - \frac{S_{i-1} x_i x_i^T S_{i-1}}{\varepsilon + x_i^T S_{i-1} x_i} \right] \quad (6)$$

위 식에서 ε 는 수렴 특성에 관련된 상수이다. 일반적으로 RLS 알고리즘은 입력 자기 상관 행렬의 역행렬 S_i 을 재귀적으로 구하는데 있어 수치적 불안정성을 가지며, QR-RLS 알고리즘은 RLS 알고리즘에서 역행렬 계산에 있어 수치적 안정성을 갖도록 변형된 알고리즘이다^[5].

신털레이션 효과에 의한 빠른 레벨 변화를 제거하기 위하여 매우 좁은 대역폭을 가진 저역 필터(식 (1)에서 파라미터 α 로 1에 근접한 값을 사용)의 사용하는 경우, 필터링 효과 이외에 신호 레벨 변화에 대한 지연 현상을 초래한다^[4]. 이러한 지연 현상과 평균 오차에 대한 적응성을 갖게 하기 위해, 현재까지의 평균 예측 오차를 보정하는 기능을 사용한다. 평균 예측 오차는

$$\bar{e}_i = \beta \bar{e}_{i-1} + (1-\beta)e_i \quad (7)$$

로 얻어지며와 같이 재귀적으로 계산된다. 여기서 예측 오차는 $e_i = x_i - \tilde{y}_i$ 로 얻어지며, β 는 저역 통과 필터에서의 α 와 동일한 역할을 하는 파라미터이다.

앞의 저역 통과 필터링이나 예측 과정에서는 신털레이션의 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 예

측 값을 보다 낮추는 예측 여유를 두어야 한다. 예측 여유 η_i 는 $\eta_i = \eta_f + \eta_{v,i}$ 와 같이 고정 여유 η_f 와 가변 여유 $\eta_{v,i}$ 를 포함하도록 한다. 가변 예측 여유는

$$\eta_{v,i} = \zeta_\sigma \sqrt{\sigma_i^2} \quad (8)$$

$$\sigma_i^2 = \beta \sigma_{i-1}^2 + (1-\beta)[e_i - \bar{e}_i]^2 \quad (9)$$

와 같이 재귀적으로 계산되는 예측 오차의 분산에 비례하게 얻는다.

최종적인 예측값 \hat{y}_{i+p} 은 식 (2)의 \tilde{y}_{i+p} 에 평균 예측 오차 보정과 예측 여유를 포함하여

$$\hat{y}_{i+p} = \tilde{y}_{i+p} + \zeta_e \bar{e}_i + \eta_f + \zeta_\sigma \sqrt{\sigma_i^2} \quad (10)$$

로 얻는다. 위 식에서 ζ_e 와 ζ_σ 는 각각 평균 오차와 분산을 예측값에 반영하는 정도를 조절하는 파라미터이다.

III. 전송 방식 결정 알고리즘

전송 방식을 설계하는데 있어서 주요 사항은 알고리즘이 특정 요구 비트 오류율을 만족시키며 최대한의 전송 효율을 얻을 수 있는 전송 방식을 선택하도록 하는 것이다.

시스템에서 사용할 수 있는 전송 방식으로 최대 d_{\max} 개의 전송 방식이 있고, 데이터 전송률의 크기에 따라 순열이 정해져 있다고 가정할 때, 결정 알고리즘은 다음 식과 같이 과거 시간 L 동안 축적된 전송 효율이 최대가 되는 전송 방식 d 를 선정한다.

$$\arg \max_d \left[\sum_{k=0}^{L-1} \lambda^k S_{d,t-k} \right], d \in \{0, 1, \dots, d_{\max} - 1\} \quad (11)$$

위식에서 $S_{d,t}$ 는 전송 방식 d 의 데이터 전송률에 의해 정규화된 전송 효율로

$$S_{d,t} = 1 - P_d(\gamma_t) \quad (12)$$

이고, 여기서 $P_d(\gamma_t)$ 는 II장의 예측 알고리즘에서 예측된 수신 SNR γ_t 에 대한 전송 방식 d 의 BER 값이다. 이 때, $P_d(\gamma_t)$ 의 값이 요구 BER P^* 보다

클 경우, $P_d(\gamma_t) = 1$ 로 하여, 서비스 품질을 만족시키지 못하는 전송 방식에 대한 전송 효율을 포함시키지 않도록 한다. 또한, 위 식 (8)에서 누적 변수 λ 는 수신 SNR의 변화가 클 경우 작은 값을, 반대의 경우 큰 값을 갖도록

$$\lambda = \frac{1}{x|\Delta\gamma_t| + 1} \quad (13)$$

하여 변화량에 따라 누적 변수를 가변 시킨다. 여기서 $\Delta\gamma_t = \gamma_t - \gamma_{t-1}$ 이고, x 는 비례 상수이다. SNR의 기울기가 클 경우 강우 감쇠에 의한 변화가 급격함을 의미하며 히스테리시스 파라미터 λ 를 감소시킴으로써 과거 전송 효율 함에 대한 영향을 줄인다. 반대로, 기울기의 변화가 작을 경우 λ 를 1에 가까운 값으로 하여 과거 전송 효율 함에 대한 매우 큰 히스테리시스를 갖게 한다.

SNR이 증가할 때 전송률이 높은 상위 방식으로 즉각 전환하도록 할 수도 있으나, 이 경우 빠르게 SNR이 반대로 감소하게 되면 보상 지연 시간 때문에 시스템은 즉각적인 재전환을 할 수 없으며, 이에 따라 서비스 품질 저하(outage)가 발생할 수 있다. 따라서, 또 하나의 시간 히스테리시스 메커니즘으로 상위 방식에 대한 전환이 요구될 경우, 그 요구가 τ_{\max} 시간동안 동일 전송 방식에 대해 이루어질 경우 비로소 전환을 결정하도록 한다. 지금까지 기술된 결정 알고리즘은 다음과 같이 정리할 수 있다.

전송 방식 결정 알고리즘 I

▶ 초기화
 $d_t = d_p = d_c = d_{clear}$
 $S_{i,t} = 0, \forall i$
 $\tau = 0$
 ▶ For $t > 0$
 $\Delta\gamma_t = \gamma_t - \gamma_{t-1},$
 $\lambda = \frac{1}{x|\Delta\gamma_t| + 1}$
 For $i = 0$ to $d_{\max} - 1$
 If $P_i(\gamma_t) > P^*$, then $P_i(\gamma_t) = 1$
 $S_{i,t} = 1 - P_i(\gamma_t)$
 $\bar{S}_{i,t} = \sum_{k=0}^{L-1} \lambda^k S_{i,t-k}$
 End

Select d such that $\arg \max_d \bar{S}_{d,t}$
 If $d \geq d_p$, then $\tau = \tau_{\max}$
 else if $d = d_c$, then $\tau = \tau + 1$
 else $d_c = d$ and $\tau = 0$
 If $\tau \geq \tau_{\max}$, then $d_t = d$
 else $d_t = d_p$
 If $d_t \neq d_p$, then $d_p = d_c = d$ and $\tau = 0$
 $d_p = d_t$
 End

위의 알고리즘에서 d_{clear} 은 시스템의 초기 전송 방식을 의미하고, γ_t 는 II장에서 예측된 신호대 잡음비가 사용된다. 알고리즘에서 각 시간 별로 선택된 전송 방식은 d_t 가 된다.

앞의 알고리즘은 각 전송 방식별 효율을 얻기 위해서는 각 전송 방식과 SNR에 대한 BER 값을 기록한 테이블을 요한다. 일반적으로 모든 SNR 값에 대해서 데이터 전송률에 대한 우열은 동일하기 때문에, 알고리즘은 모든 SNR에서의 BER 테이블을 갖기 보다는 요구 BER의 제약 조건에 따라 하위 전송 방식으로 전환이 요구되는 한계 임계값에 대한 테이블 만을 갖게 함으로써 알고리즘이 요구하는 메모리를 감소시킬 수 있다. 임계값 만을 사용하여 전송 방식을 결정할 경우, SNR에 대한 전송 효율을 계산할 수 없으므로, SNR이 특정 전송 방식에 대한 임계값 이상의 경우에 전송 효율은 1의 값을, 이하인 경우 전송 효율은 0의 값을 갖도록 한다. 다음의 알고리즘은 앞의 알고리즘을 각 전송 방식의 임계값 θ_i 에 근거한 방식으로 간단화 한 것이다.

전송 방식 결정 알고리즘 II

▶ 초기화
 $d_t = d_p = d_c = d_{clear}$
 $S_{i,t} = 0, \forall i$
 $\tau = 0$
 ▶ For $t > 0$
 $d_t = d_{\max} - 1$
 $\Delta\gamma_t = \gamma_t - \gamma_{t-1},$
 $\lambda = \frac{1}{x|\Delta\gamma_t| + 1}$

For $i=0$ to $d_{\max} - 1$
 If $i=0$ or $i=d_{\max} - 1$
 If $\theta_0 \leq \gamma_t$, Then $d_t = 0$
 If $\theta_{d_{\max}-1} > \gamma_t$, then $d_t = d_{\max} - 1$
 If $1 \leq i \leq d_{\max} - 2$
 If $\theta_i \leq \gamma_t < \theta_{i-1}$, then $d_t = i$
 If $i \geq d_t$, then $S_{i,t} = 1$
 else $S_{i,t} = 0$

End
 Select d such that $\arg \max_d \bar{S}_{d,t}$
 If $d \geq d_p$, then $\tau = \tau_{\max}$
 else if $d = d_c$, then $\tau = \tau + 1$
 else $d_c = d$ and $\tau = 0$
 If $\tau \geq \tau_{\max}$, then $d_t = d$
 else $d_t = d_p$
 If $d_t \neq d_p$, then $d_p = d_c = d$ and $\tau = 0$
 $d_p = d_t$
 End

IV. 시뮬레이션 및 결과

앞장에서 제시된 강우 감쇠 보상 알고리즘에 대한 성능 분석을 위해 강우 감쇠 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 강우 감쇠 데이터를 발생시키기 위해서, Ku 대역의 무궁화 위성 비이콘 신호의 측정 데이터를 이용하여 모델링된 강우 감쇠 시뮬레이션 모델을 사용하였다^[8]. 시뮬레이션에서 사용된 강우 감쇠 데이터는 총 30 000 샘플이고 샘플 간격은 0.9375 초, 평균 페이드 변화율은 약 0.21 dB/s, 최대 감쇠량은 약 -15.5 dB 이다.

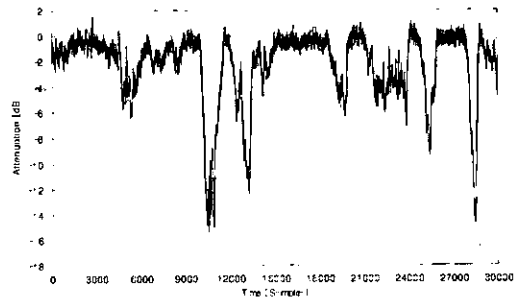


그림 2. 시뮬레이션에서 사용된 강우 감쇠 데이터.

강우 보상 알고리즘을 적용한 시스템은 전송 방식으로 8-ary PSK, QPSK, BPSK, 그리고 심볼 반복으로 BPSK 변조에서 2회 (BPSK2) 및 4회 (BPSK4) 반복을 포함하여 모두 5 가지의 전송 방식을 사용하는 것으로 가정하였다. 변조 방식에 추가적으로 부호화 이득 6.2 dB를 가정하였다. 표 1에 부호화 함께 사용되는 PSK 신호 방식에 대해 AWGN 채널 환경에서 비트 오류율 10^{-6} 이하를 얻기 위해 요구되는 최소 신호 대 잡음 비와, 최하위 전송 방식의 전송률을 1로 하였을 때의 상대적인 전송률을 나타내었다. 전송 방식의 전환으로 얻을 수 있는 보상 범위는 14.2 dB이고, 여기에 고정 링크 여유로 3 dB를 가정하면, 총 보상 범위는 17.2 dB가 된다. 이 범위는 강우 감쇠 데이터에서의 최대 감쇠량 -15.5 dB를 충분히 보상할 수 있는 범위가 됨으로 적응형 전송 방식의 부재로 인한 링크 성능 저하는 발생되지 않는다.

표 1. 시뮬레이션에서 가정된 적응형 전송 방식.

전송 방식	요구 신호대 잡음비 [dB]	상대적 데이터 전송률
8-ary PSK	12.6	12
QPSK	7.4	8
BPSK	4.4	4
BPSK2	1.4	2
BPSK4	-1.6	1

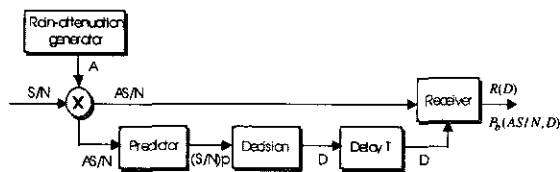


그림 3. 시뮬레이션 모델.

그림 3은 보상 알고리즘의 링크 성능 분석을 위한 시뮬레이션 모델을 나타낸 것이다. 본 논문의 시뮬레이션은 보상 알고리즘에 초점이 있으므로 수신기에서 복조는 완벽하다는 가정 하에 이루어지며, 수신기에서의 BER은 PSK 신호 방식의 AWGN 채널 하에서의 이론적인 식에 의해 계산된다. 시뮬레이션에서 신호 대 잡음 비는 강우 감쇠 샘플과 동일한 시간 간격에 의해 발생되며, 기준 신호 대 잡음 비 S/N은 강우 감쇠량 A에 의해 AS/N로 감쇠되고, 예측기와 수신기의 입력이 된다. 예측기는 보상 알고리즘의 응답 지연 시간 T 샘플 후의 신호

대 잡음 비 (S/N)_p를 예측하고, 결정 알고리즘은 전송 방식 D를 결정하여 T 시간 이후에 수신기에 전달한다. 수신기는 현재의 감쇠된 수신 신호 대 잡음 비 AS/N와 강우 보상 알고리즘에 의해 결정된 전송 방식 D에 따라 비트 오류율 $F_b(AS/N, D)$ 을 계산한다.

시뮬레이션에서 사용된 시스템 파라미터를 표 2에 나타내었다. 강우 감쇠가 발생하지 않는 경우에 수신되는 기준 SNR은 최상위 전송 방식 8-ary PSK의 요구 신호대 잡음비 12.6 dB에 고정 링크 여유 3 dB를 포함하여 15.6 dB로 하였다. 보상 알고리즘에 의해 선택된 전송 방식이 감쇠가 발생한 시점으로부터 송수신기에 전달되어 전환이 이루어지기까지 소요되는 시간 T로 3 샘플을 가정하였다^[4].

표 2. 시스템 파라미터.

파라미터	값
기준 수신 SNR	15.6 dB
기준 전송 방식	8-ary PSK
고정 링크 여유	3 dB
요구 비트 오류율	10^{-6} 이하
시뮬레이션 샘플 간격	0.9375 초
보상 지연 시간	3 샘플

강우 감쇠 예측 알고리즘에서, 고정적인 가중치를 사용하는 경우(SBP), NLMS 적응형 알고리즘을 사용한 경우(AFP:NLMS), QR-RLS 적응형 알고리즘을 사용한 경우(AFP:QR-RLS)의 세 가지 방식에 대하여, 예측 오차 측면에서 비교하기 위해 표 3의 파라미터 값들을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 예측 오차는 실제 수신 SNR과 동일 시간에 대해 예측된 SNR의 차이를 의미하며, 예측 값은 예측 여유 할당을 포함하지 않았다. 각 방식에 대해 사용된 알고리즘 파라미터로는 표 3에 나타난 값을 사용하였고, 적용된 파라미터 값들은 각 방식에 대해 최소의 예측 오차를 갖도록 선택되었다. AFP 방식의 경우, 예측 과정에서 사용된 적응형 알고리즘으로 예측 과정 자체적으로 오차 보정 능력을 갖기 때문에 SBP 방식에서 사용되는 예측 오차 보정 기능을 필요로 하지 않는다. 따라서, AFP 방식에 대해서는 예측 오차 보정 파라미터 ζ 의 값을 0으로 하여 보정 기능을 사용하지 않는다.

표 4는 SBP, AFP:NLMS, AFP:QR-RLS의 세 가지 예측 기법에 대해 예측 오차의 절대값에 대한

표 3. 강우 감쇠 예측 알고리즘 파라미터.

		SBP	AFP
저역 통과 필터	대역폭 조절 파라미터	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.5$
예측 과정	관측시간 및 예측 시간 [samples]	$n = 3$ $p = 3$	$n = 10$ $p = 3$
	적응형 알고리즘 파라미터	-	NLMS: $\mu = 0.05$ QR-RLS: $\epsilon = 0.99$
예측 오차 보정	필터링 파라미터	$\beta = 0.9$	$\beta = 0.9$
	보정 파라미터	$\zeta_o = 1$	$\zeta_o = 0$

평균과 표준 편차를 비교하여 나타낸 것이다. 평균 오차에 대해서 두 가지의 적응형 예측 알고리즘은 거의 동일한 값을 가지며, AFP 방식이 SBP 방식에 비해 더 적은 오차를 가지나 그 차이는 적다. 분산에 대해서 AFP:NLMS, AFP:QR-RLS, SBP의 순으로 적은 값을 갖는다. 평균 오차와 분산에 대한 결과로부터 AFP:NLMS 방식이 가장 안정된 예측 값을 갖는 것을 알 수 있으나, 그 차이는 약 0.01 ~ 0.02 dB로 매우 적다. 이러한 결과로부터 예측기에서 적응형 알고리즘을 사용하는 경우가 기술기에 근거한 예측 방법보다 우수하다고 볼 수 있지만, 그 차이는 매우 작기 때문에 보다 많은 계산량을 요구하는 AFP 방법보다는 간단한 SBP 방법이 보다 나은 선택이라 할 수 있다. 이는 예측 알고리즘이 신틸레이션 현상에 의한 신호 레벨의 빠른 변화보다는 전반적인 강우에 의한 느린 변화를 예측 대상으로 하기 때문이며, 그러한 느린 변화에 대해서 적응성이 뛰어난 예측 방법이 필요하지 않다고 볼 수 있다.

표 4. 강우 감쇠 예측 알고리즘의 예측 오차.

	절대 오차의 평균	분산
SBP	0.189 dB	0.247 dB
AFP:NLMS	0.182 dB	0.229 dB
AFP:QR-RLS	0.182 dB	0.234 dB

그림 4와 5는 강우 감쇠 예측 알고리즘에서 예측 여유를 포함한 경우의 예측 특성을 비교하기 위해 보인 결과로, 예측 여유 할당에 의해 발생된 평균 예측 여유(mean margin)에 대해 음의 예측 오차를 가지는 발생률(negative error rate)을 나타낸 것이

다. 음의 예측 오차는 실제 신호 레벨이 예측 값보다 적을 확률로, 이 경우 실제 신호 레벨의 감소로 전송 방식이 전환이 필요하더라도 예측 값이 실제 값보다 크기 때문에 전송 방식 결정 알고리즘에서 전환이 이루어지지 않고, 결국 서비스 품질의 저하가 발생할 수 있는 경우가 발생된다. 그림 4의 경우, SBP 예측 방식에서 고정 예측 여유 η_f 값을 변화시키면서, 가변 예측 여유를 조절하는 파라미터 ζ_o 의 값으로 0, 1, 2, 3을 가질 경우에 대해 비교하여 나타낸 것이다. 예측 여유 할당에서 얻을 수 있는 평균 예측 여유에 대해 가변 여유 파라미터 ζ_o 가 작을수록 더 적은 음의 오차 발생률을 얻으며, 특히 $\zeta_o=0$ 으로 가변 여유를 사용하지 않을 경우에 가장 적은 발생률을 얻는다. 문헌 [4]에서 논의된 바와 같이 가변 여유 사용($\zeta_o > 1$)은 예측 여유를 포함한 예측 패턴에서 예측 오차의 변화가 확대되어 나타나며 또한 예측 오차의 확률 밀도 함수의 확산을 초래한다. 따라서, 가변 여유 할당보다는 고정 예측 여유 할당 방법이 적절한 선택이라 할 수 있다. 그림 5는 $\zeta_o=0$ 으로 가변 여유를 사용하지 않을 경우에 세 가지 예측 방식에 대한 예측 여유 할당 면에서 비교를 위해 음의 예측 오차 발생률을 비교한 것으로, 세 가지 방식에 대해 거의 일치하는 결과를 얻음으로써 예측 여유 면에서 예측 오차에서와 마찬가지로 예측 방식에 따른 차이는 없다는 것을 알 수 있다.

그림 6에서 그림 8까지의 결과는 전송 방식 결정 알고리즘의 특성을 보이기 위한 것으로, 강우 감쇠 예측 기법으로는 예측 여유를 포함하지 않은 SBP 방식을 사용하고, 전송 방식 결정 기법으로는 BER 값에 근거한 전송 방식 결정 알고리즘 I을 사용하였

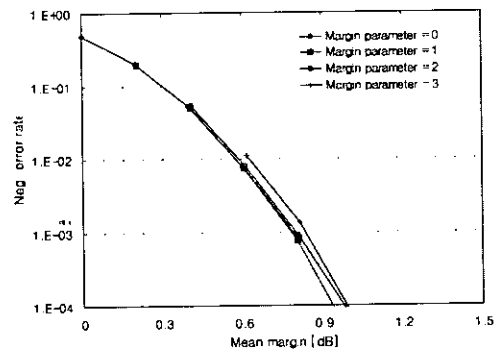


그림 4. 예측 여유 파라미터에 따른 음의 오차 발생률.

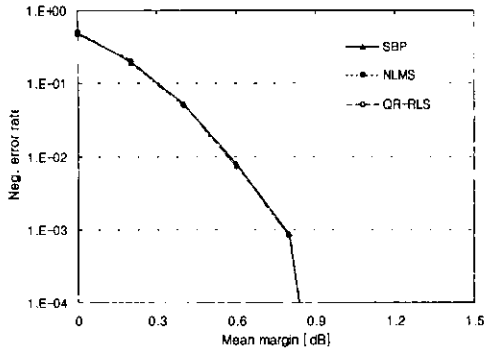


그림 5. 예측 방식에 따른 음의 오차 발생률.

다. 그림 6은 강우 감쇠 보상 알고리즘을 적용한 적응형 전송 시스템의 서비스 품질 저하율(outage rate)을, 그림 7은 전송 방식 전환율(change rate), 그림 8은 전송 효율(throughput)을 나타낸 것이다. 여기서 서비스 품질 저하율은 수신 비트 오류율 요구 비트 오류율보다 큰 경우의 시간 비율을, 전환율은 전송 방식 결정 알고리즘에 의해 이루어진 전송 방식 전환 발생률을, 전송 효율은 서비스 품질 저하가 발생되지 않은 시간에서의 전송 효율만을 포함한다. 그림 6에서 그림 8까지의 결과에서 결정 알고리즘의 주요 파라미터인 전환 보류 시간(holding time) τ_{max} 와 전송 효율 누적 시간(window length) L 의 변화에 대한 성능을 볼 수 있다. 여기서 누적 변수 λ 를 위한 파라미터로 $x=1/2$ 을 사용하였다. 보류 시간과 누적 시간은 전송 방식 전환에 있어 더 많은 히스테리시스를 갖게 함으로, 품질 저하율과 전환율은 감소하나, 전환 지연으로 인한 전송 효율을 감소시키는 결과를 가져옴으로써, 두 성능 측면에서의 상호 관계(trade-off)를 볼 수 있다. 그러나, 전환율과 전송 효율 측면에서 고려해 볼 때, 결과에서 주어진 파라미터 범위 내에서 히스테리시스 메카니즘으로 최대 약 2배의 전환율 감소를 가져오고, 반면에 전송 효율 감소는 최대 약 0.997배의 감소로 전송 효율의 감소는 매우 적다는 것을 보인다. 히스테리시스 메카니즘으로 인한 품질 저하율의 감소라는 결과와 함께 이러한 결과는 결정 알고리즘에서 히스테리시스 메카니즘의 필요성을 설명해준다.

그림 9는 예측 여유를 포함한 강우 감쇠 보상 알고리즘의 품질 저하율을 보인 것으로, 예측 방식으로는 SBP 방식을 사용하였고, 결정 알고리즘의 파라미터로 $L=5$, $\tau_{max}=5$ 샘플을 사용하였다. 결과에서 고정 예측 여유와 가변 여유 파라미터가 증가함

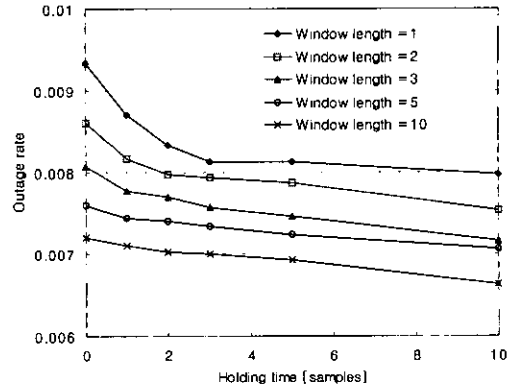


그림 6. 전송 방식 결정 알고리즘의 품질 저하율.

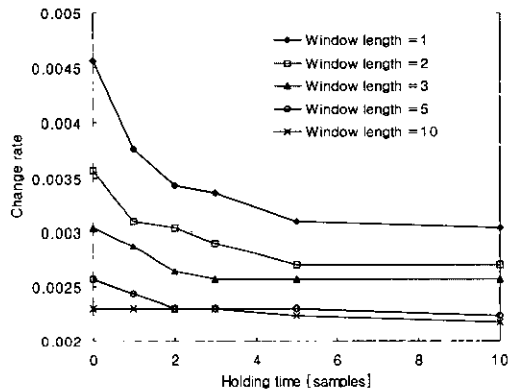


그림 7. 전송 방식 결정 알고리즘의 전환율.

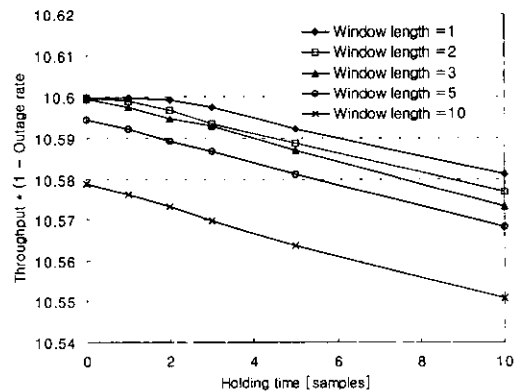


그림 8. 전송 방식 결정 알고리즘의 전송 효율.

에 따라 품질 저하율의 감소를 볼 수 있으며, 이는 예측 여유를 증가시킴에 따라 예측 알고리즘에서의 얻어진 예측 값이 실제 값의 이차가 되기 때문이다. 그림 10과 그림 11은 본 논문에서 제시된 강우 감쇠 보상 알고리즘을 사용한 경우, 예측 기법을 적용

하지 않은 경우, 그리고 히스테리시스 메커니즘을 적용하지 않은 결정 알고리즘을 사용하였을 경우에 대한 성능을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 예측 알고리즘의 파라미터로는 표 3의 값을 결정 알고리즘의 파라미터로는 그림 9에서 적용된 값을 그리고 예측 여유로는 고정 예측 여유 0.5 dB을 갖도록 하였다. 먼저, 지금까지 논의된 강우 감쇠 보상 알고리즘에서 예측 방식을 달리 하였을 때의 성능을 비교하여 보면, 세 가지 예측 방식이 거의 동일한 성능을 보임으로써 예측 오차에서의 결과에서와 같이 간단한 예측 방식인 SBP으로도 충분한 성능을 얻을 수 있음을 보인다. 강우 보상 알고리즘에서 예측 기법을 사용하지 않고 결정 알고리즘만을 사용하였을 경우(결과에서 without prediction로 표기)에 대한 성능과 비교하여 볼 때, 품질 저하율은 약 18배, 전환율은 약 2배가 적으며, 전송 효율은 약 0.99배의 차이를 보인다. 이러한 결과는 보상 알고리즘에서 예측 기법의 필요성을 보여 주는 것이며, 예측 기법은 보상 지연 시간 이후의 신호 레벨을

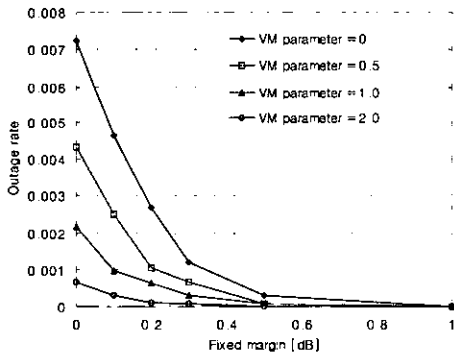


그림 9. 예측 여유에 따른 품질 저하율.

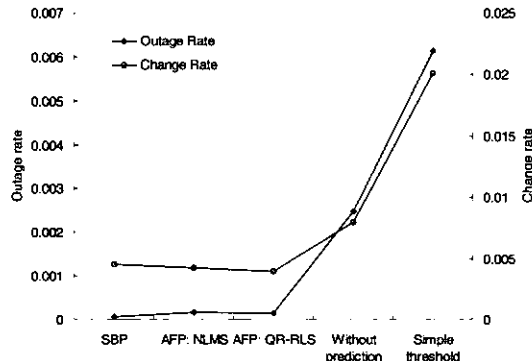


그림 10. 강우 보상 알고리즘에 대한 품질 저하율과 전송 방식 전환율에서의 성능 비교

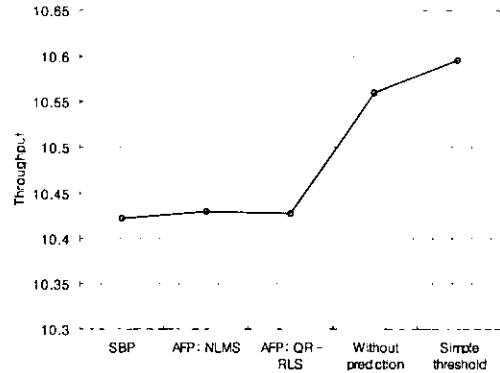


그림 11. 강우 보상 알고리즘에 대한 전송 효율 비교

예측함으로써 품질 저하율을 감소시키는 역할을 한다. 또한, SBP 예측 방식과 단순히 임계값 비교에 의한 결정 알고리즘을 사용하였을 경우(결과에서 simple threshold로 표기)에 대한 성능과 비교하여 볼 때, 품질 저하율은 약 0.6%에서 0.01%로 감소하였고, 전환율은 약 5배가 적으며, 전송 효율은 약 0.98배의 차이를 보인다. 따라서, 본 논문에서 제시된 강우 감쇠 보상 알고리즘은 거의 동일한 전송 효율을 가지면서 품질 저하율과 전송 방식 전환율을 월등히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 위성 통신 링크 상에서의 강우 감쇠 보상을 위한 알고리즘으로 강우 감쇠 예측 알고리즘과 전송 방식 결정 알고리즘을 제시하였고, Ku 대역의 강우 감쇠 데이터를 사용한 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 비교 분석하였다. 예측 기법 면에서, 적응형 알고리즘을 적용한 기법과 신호 레벨 변화량에 근거한 예측 기법은 거의 동일한 예측 오차를 보였다. 따라서, 시뮬레이션 현상에 의한 변화와 같이 급속한 신호 레벨 변화에 적응성을 요하지 않는 강우 감쇠 예측의 경우, 알고리즘 측면에서 비교적 간단한 기술기에 근거한 예측 기법으로도 충분함을 알 수 있었다. 제시된 전송 방식 결정 알고리즘은 단순한 임계값 비교에 따른 결정 방식에 비해, 동일한 전송 효율을 가지면서 품질 저하율은 약 46배 그리고 전송 방식 전환율은 약 5배의 적은 전환율을 가짐으로써, 서비스 품질을 만족시키면서 전송 방식 전환 과정에서 요구되는 제어 신호 교환 등의 시스템 오버헤드를 감소시킬 수 있다.

또한, 제안된 강우 감쇠 보상 알고리즘은 이동 통

신 시스템에서 페이딩에 대한 보상을 위해 전송 방식을 전환하는 적응형 시스템에서도 활용될 수 있을 것이며, 따라서 이러한 응용에 대한 연구 결과가 차후 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] M. J. Willis, Fade Counter-Measures Applied to Transmissions at 20/30 GHz, *Electronics & Commun. Eng. Jour.*, pp.88-96, Apr. 1991.

[2] E. H. Satorius and L. H. Tong, Analysis of a Rain Compensation Algorithm for K/Ka-band Communications, *Int. J. of Satellite Commun.*, vol.14, pp.297-311, 1996.

[3] B. K. Levitt, Rain Compensation Algorithm for ACTS Mobile Terminal, *IEEE Jour. on Select. Areas in Commun.*, vol.10, no.2, pp.358-363, Feb 1992.

[4] 임광재, 황정환, 김수영, 이수인, "위성 통신 링크에서 강우 감쇠 보상을 위한 신호 레벨 예측 기법," 한국통신학회논문지 25권 6A호, pp. 782-793, 2000.

[5] Paulo S. R. Diniz, *Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation*, Kluwer Academic Publishers, 1997.

[6] Christian B. Cox and Thom A. Coney, Advanced Communications Technology Satellite (ACTS) Fade Compensation Protocol Impact on Very Small-Aperture Terminal Bit Error Rate Performance, *IEEE Jour. on Select. Areas in Commun.*, Vol.17, No.2, Feb. 1999.

[7] A. Malygin and M. Filip, Deployment Strategy for a Fade Countermeasure System: A Generic Fade Countermeasure Controller, *1st International Workshop on Radiowave Propagation Modelling for New SatCom Services at Ku Band and Above*, ESA-ESTEC, 1998.

[8] 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.

임 광 재(Kwang Jae Lim)

정회원



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

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

권 태 곤(Tae Gon Kwon)

정회원



1988년 2월 : 경북대학교
전자공학과 학사
1990년 2월 : 경북대학교
전자공학과 석사
1990년 2월~현재 : 한국전자통신연구원(ETRI)

위성통신시스템연구부 팀장
<주관심 분야> 위성통신망 설계, 위성통신채널 성능 평가, 위성망 간섭분석 등

유 문 희 (Moon Hee You)

정회원



1988년 2월 : 한양대학교
전자통신공학과 졸업 (학사).
1990년 8월 : 한양대학교
대학원 전자통신공학과 졸업 (석사).

1990년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 이동위성통신연구팀장.
<주관심 분야> 위성망 설계, 위성통신전송기술, 이동위성통신 등.