
클러터 제거에서의 레이다 시스템 위상잡음 영향 분석에 관한 연구

이 종 길*

A Study on the Analysis of Radar System Phase Noise Effects in Clutter Cancellation

Jong Gil Lee*

이 논문은 인천대학교 2006년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

요 약

비교적 낮은 고도에서의 기상위험 탐지를 위한 항공기용 기상 레이다의 경우 강력한 지표면 반사파가 존재하게 되며 이러한 강력한 클러터의 제거 없이는 미약한 도플러 신호로부터 신뢰성 있는 기상 자료의 추출이 불가능하다. 그러나 시스템 위상잡음은 클러터 및 도플러 신호를 분산시켜 효율적인 클러터 제거에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 도플러 기상 레이다 시스템에서의 위상잡음을 모델링하고 이에 따른 클러터 및 신호에 미치는 영향 정도를 구체적으로 분석할 수 있도록 하였다. 또한 수신되는 클러터 및 도플러 신호전력의 비에 따른 위상잡음에 의한 클러터 전력 제거의 한계치를 고찰하였다. 수신되는 신호 대 클러터 비가 낮은 경우 상대적으로 강력한 클러터 전력의 위상잡음으로 인한 분산 현상으로 일정 정도 이상의 효율적인 클러터 제거가 어렵게 됨을 알 수 있다.

ABSTRACT

Since there are very strong clutter returns in an airborne weather radar used for the detection of low altitude weather hazards, the reliable weather data cannot be extracted from the weak Doppler weather signal without cancellation of these strong clutter returns. However, the system phase noise spreads both the clutter and Doppler signal and causes the serious problems in the efficient clutter cancellation. Therefore, in this paper, the phase noise effects on the clutter and Doppler weather signal were analyzed. The system phase noise model was suggested and the effects were derived and explained using this phase noise model. It can be shown that there exists the limit in the clutter cancellation capability to improve the signal-to-clutter ratio (SCR) due to the system phase noise. It may be prominent especially in the low SCR situations.

키워드

Doppler weather radar, phase noise, clutter, weather signal

I. 서론

기상 조건의 변화 및 악천후에 따른 항공기 추락사고 등을 방지하기 위한 목적으로 도플러 레이더를 장착하여 기상 이변 및 돌풍 등의 국지적인 위험 요소들을 미리 탐지하여 이를 회피할 수 있는 방법들에 관한 실용화 및 연구 등이 지속적으로 이루어져 왔다[1][2][3].

이러한 항공기용 도플러 레이더는 적절한 거리에서 위험한 기상 현상들을 미연에 탐지하여 위험 상황들을 회피할 수 있게끔 경고하여 줄 수 있어야 한다. 그런데 이러한 기상 악천후는 아주 짧은 시간 동안 급격한 기류 변화에 의하여 발생할 수 있고 또한 매우 낮은 고도에서 발생하는 경우도 있다. 특히 이착륙시 상대적으로 불안정한 상태에서의 이러한 돌발적인 기류 변화 및 위험 상황들을 파악하기 위해서는 항공기 고도보다 낮은 영역의 기상 정보를 레이더 센서를 이용하여 충분히 파악할 수 있어야 한다. 따라서 레이더는 자연적으로 아래쪽 지표면을 향하여 전자파 빔을 방사하는 형태가 될 것이다. 이러한 상황에서는 비구름 먼지 등에 의하여 반사되어 나타나는 기상정보 신호보다 지표면에서 반사되는 클러터가 훨씬 더 강력하게 존재하게 된다. 따라서 이러한 클러터들을 거의 완전하게 제거하여야만 상대적으로 매우 미약한 기상 정보 신호들을 추출해낼 수 있을 것이다.

일반적으로 기상 정보를 제공해주는 수증기, 먼지 입자 등은 풍속에 준하는 속도 성분을 갖게 되나 고정된 지표면 클러터 등은 속도 성분을 가질 수 없다. 따라서 반사되는 클러터들은 항공기 속도를 감안한 상대 도플러 주파수가 0 부근에 분포하게 될 것이다. 그러므로 도플러 영역에서 0 부근의 저주파를 차단하는 고주파 필터를 사용하면 이러한 강력한 지표면 클러터를 효율적으로 제거할 수 있다. 그러나 지표면 반사에 의한 클러터는 기상 정보에 의한 반사 신호 전력보다 대부분의 경우 훨씬 강력하게 나타난다. 따라서 일부라도 걸러지지 않은 지표면 클러터가 잔존하는 경우 적절한 기상 정보를 추출하는 것이 불가능 할 수 있다. 이러한 클러터 스펙트럼은 이론적으로 도플러 주파수가 0 부근에 집중되어 나타나므로 기상 신호와는 잘 분리될 수 있는 특징을 갖는다. 그러나 레이더 시스템에서의 위상잡음은 이러한 클러터 및 기상 정보 신호들을 도플러 주파수 영역에서 확산시킬 수 있다. 클러터 및 신호에서 이러한 확산 현상이

발생한다면 클러터만을 분리해내기가 무척 어려울 것이다. 특히 기상 신호의 도플러 주파수가 낮게 나타나는 경우 확산된 클러터를 제거하기 위하여 필터의 차단 주파수 대역을 넓게 하여 클러터를 제거한다면 신호 전력도 거의 소실되는 현상을 가져올 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시스템 위상 잡음에 의하여 클러터 및 기상 신호들이 확산되는 정도를 분석하여 모델링하고 클러터 제거를 통하여 얻을 수 있는 신호 대 클러터비가 레이더 시스템 위상잡음에 의하여 제한되는 정도를 고찰하고 분석하였다.

II. 레이더 시스템에서의 위상 잡음

레이더 시스템의 위상잡음은 주로 송신부에서 고주파 신호를 발생시키는 STALO (Stable local oscillator) 에 의하여 나타나게 되는데 이러한 위상잡음은 원래의 신호 스펙트럼을 확산 시키게 된다. STALO 출력은 위상잡음을 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t) = V_0 \cos(\omega_c t + \phi(t)) \quad (1)$$

여기서 $\phi(t)$ 및 ω_c 는 각각 위상잡음 및 캐리어 주파수를 표시한다. 위상잡음 $\phi(t)$ 는 평균이 0 인 normal stationary process 이며 분산(variance) 즉, 평균 전력을 다음과 같이 나타낼 수 있다고 가정하였다.

$$E[\phi^2(t)] = \sigma^2 \quad (2)$$

위상잡음의 평균전력은 일반적으로 매우 작는데 그 스펙트럼 밀도는 근사적으로 다음과 같이 가우시안 스펙트럼으로 나타낼 수 있다[4][5].

$$S_\phi(f) = W_0 \exp\left\{\frac{-\omega^2}{\Delta\omega_c^2}\right\} \quad (3)$$

여기서 위상잡음 폭을 나타내는 $\Delta\omega_c^2$ 와 전체 잡음전력 σ^2 는 다음과 같은 관계식을 갖게 된다.

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\phi}(f) df = \frac{\Delta\omega_c}{2\sqrt{\pi}} W_0 \quad (4)$$

따라서 가우시안 위상잡음을 가정하면 송신신호의 스펙트럼은 다음과 같이 구해진다[4].

$$S_V(f) = \frac{V_0^2}{2} e^{-\sigma^2} [\delta(f - f_c) + \frac{2\sqrt{\pi}}{\Delta\omega_c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma^{2n}}{n! \sqrt{n}} \exp\left(\frac{-(\omega - \omega_c)^2}{n\Delta\omega_c^2}\right)] \quad (5)$$

이러한 송신신호는 많은 먼지나 수증기 입자 등에 의하여 반사, 산란되어지게 되는데 도플러 효과에 의하여 이러한 입자들의 속도성분 만큼 도플러 변이가 일어나게 된다. 따라서 항공기용 기상 레이다에 수신되는 반사신호는 실질적으로 매우 작은 위상잡음 영향을 고려하면 다음과 같이 첫 항만으로 비교적 간단하게 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$S_V(f) = C \frac{V_0^2}{2} e^{-\sigma^2} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}w} \exp\left\{-\frac{(f - f_c - f_d)^2}{2w^2}\right\} + \sigma^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi(\Delta f_c^2/2 + w^2)}} \exp\left\{-\frac{(f - f_c - f_d)^2}{2(\Delta f_c^2/2 + w^2)}\right\} \right] \quad (6)$$

여기서 w 는 송신단의 위상잡음이 0일 경우의 스펙트럼 폭을 의미하며 C 는 목표물 즉 먼지 및 수증기 입자들의 반사정도 및 전파경로 손실 등에 의하여 결정되는 상수 값을 표시한다. 만약 위상잡음이 거의 0에 가깝다면 식(6)에서의 두 번째 항은 무시할 수 있을 정도가 될 것이다. 따라서 위상잡음이 거의 없는 경우 식(6)에서 보는 것처럼 순수한 가우시안 형태를 갖는 전형적인 도플러 반사신호 스펙트럼을 표시하게 된다. 그러나 위상잡음이 존재하는 경우 위상잡음의 정도에 따라 수신신호 스펙트럼은 원래의 가우시안 형태보다 더욱 분산되어 나타나게 된다. 이러한 도플러 스펙트럼 영역에서의 분산 효과는 신호와 클러터의 구별을 매우 어렵게 할 수 있다.

III. 도플러 영역에서의 클러터 및 기상신호

항공기용 기상 레이다의 경우 지표면에서 반사되는 강력한 클러터가 존재하게 되는데 이러한 클러터는 항공기의 지표면 속도에 대응하는 도플러 주파수를 중심으로 나타나게 되는데 여기서는 이 주파수를 천이시켜 0을 기준으로 하여 표시하기로 한다. 즉 이러한 강력한 클러터들을 제거하지 않고서는 펄스페어 또는 스펙트럼 분석 방법에 의하여 정확한 기상정보를 추출할 수 없을 것이다. 즉 돌발적으로 일어나는 위험한 기상현상들을 높은 정확도로 탐지하기 위해서는 이러한 지표면 클러터들을 가능한 완벽하게 없애주어야 한다. 특히 비구름을 동반하지 않는 건조한 돌풍의 경우 먼지입자들에 의한 전자파 신호의 반사정도는 지표면 클러터에 비해 매우 미약하므로 클러터의 적절한 제거가 매우 중요한 문제이다. 기상 레이다에서 가장 많이 이용하는 펄스페어 추정방식을 이용한다고 가정하면 평균풍속 및 turbulence 정보를 얻기 위하여 도플러 스펙트럼의 평균 및 폭(spectrum width) 등을 추정하는 경우 그 정확도를 신뢰하기 위해서는 각각 10 dB 및 15dB 이상의 신호 대 클러터비(Signal-to-Clutter Ratio; SCR)가 필요하다[6]. 즉 클러터를 제거한 후 최소한 10dB 이상의 SCR 값을 유지할 수 있어야 할 것이다. 일반적으로 클러터는 도플러 영역에서 0 부근에 위치하므로 고주파 통과 대역 필터를 적용한다면 효율적으로 제거할 수 있다. 그러나 저주파에서의 차단 영역 주파수 대역은 저주파 대역에 존재할 수 있는 기상신호들마저 제거되지 않도록 신중하게 선택되어야 한다. 클러터가 0 부근의 도플러 주파수 영역에서 넓게 분산되지 않고 매우 좁은 범위에서만 존재한다면 기상신호를 손상시키지 않고도 클러터의 제거가 매우 효과적으로 이루어질 수 있다. 그러나 레이다 시스템에서의 위상잡음은 클러터 스펙트럼을 확산시키게 되며 일부 클러터들은 필터의 통과 대역내로 들어가게 된다. 이러한 현상으로 인하여 위상잡음의 정도에 따라 클러터를 제거하는데 일정한 한계가 발생할 수 있다. 특히 기상신호가 클러터에 비해 매우 미약한 경우, 즉 비, 구름 등을 동반하지 않으면서 발생하는 기상위험 현상들에 관한 정보들을 추출하는 데에는 많은 제약이 있을 수 있다. 클러터 및 기상신호가 모두 가우시안 형태로 표시된다고 가정하면 수신되는 스펙트럼을 기저대역에서 나타내어 보면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$R(f) = \frac{C}{\sqrt{2\pi}w_c} \exp\left(-\frac{f^2}{2w_c^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}w_s} \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2}{2w_s^2}\right] \quad (7)$$

여기서 f_d 는 기상신호 스펙트럼의 평균 도플러 주파수를 의미하며 클러스터의 경우는 평균 도플러 주파수를 0으로 가정하였다. 또한 w_c, w_s 는 각각 클러스터 및 기상신호의 스펙트럼 폭을 표시하며 $C = 10^{-(SCR/10)}$. 식 (7)에서 레이더 시스템에서의 정규화된 위상잡음 영향을 고려하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(f) = Ce^{-2\sigma^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2^k \sigma^{2k}}{\sqrt{2\pi}(w_c^2 + k \frac{\Delta f_c^2}{2})^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{f^2}{2(w_c^2 + k \frac{\Delta f_c^2}{2})}\right) + e^{-2\sigma^2} \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2^k \sigma^{2k}}{\sqrt{2\pi}(w_s^2 + k \frac{\Delta f_c^2}{2})^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{(f-f_d)^2}{2(w_s^2 + k \frac{\Delta f_c^2}{2})}\right) \quad (8)$$

여기서 식(8)은 가우시안 위상잡음을 가정하여 얻어진 결과이다. 앞에서 언급한 바와 같이 일반적으로 σ 는 비교적 작은 값을 가지므로 식 (8)에서의 무한개의 합들 중 처음 네 번째 항만을 고려하여도 매우 정확한 값을 표시하여 줄 수 있다. 따라서 수신되는 클러스터 및 도플러신호는 처음 네 번째 항까지 들의 합만을 이용하여 나타내는 것을 가정하였다.

IV. 클러스터 제거에 따른 SCR

본 논문에서는 위상잡음에 의한 영향을 분석하기 위하여 클러스터 제거를 위한 이상적인 고주파 대역 통과 필터를 적용하는 것을 가정하였다. 즉 도플러 주파수 대역에서 저주파 대역의 차단대역폭을 $2B$ 로 표시하였고 감쇄정도는 dB 값으로 ATT 로 나타내었다. 이와 같이하여 얻을 수 있는 도플러 영역에서의 반사 신호를 분석하면 신호 대 클러스터 전력 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SCR = 10 \log_{10} \left(\frac{SR}{CR} \right) \quad (9)$$

위 식에서 우선 이상적인 저주파 차단 필터를 통과한 후의 잔여 클러스터를 나타내는 CR 값을 식 (8)로부터 계산하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CR = Ce^{-2\sigma^2} [Q(B/W_c) + 2\sigma^2 Q(B/W_1) + 2\sigma^4 Q(B/W_2) + \frac{4}{3} \sigma^6 Q(B/W_3)] + 10^{-ATT/10} Ce^{-2\sigma^2} [(1-Q(B/W_c)) + 2\sigma^2(1-Q(B/W_1)) + 2\sigma^4(1-Q(B/W_2)) + \frac{4}{3} \sigma^6(1-Q(B/W_3))] \quad (10)$$

위 (10) 식에서 W_k 및 Q 는 다음과 같이 정의되는 함수이다.

$$W_k = (W_c^2 + k \Delta f_c^2 / 2)^{1/2}$$

$$Q(x) = 2 \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\gamma^2/2} d\gamma \quad (11)$$

이제 식 (9)에서의 필터를 통과한 후의 SR 값은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 SR &= e^{-2\sigma^2} \left[\left(1 - P \left(\frac{B - f_d}{W_s} \right) \right) + \right. \\
 &2\sigma^2 \left(1 - P \left(\frac{B - f_d}{y_1} \right) \right) + 2\sigma^4 \left(1 - P \left(\frac{B - f_d}{y_2} \right) \right) \\
 &+ \frac{4}{3} \sigma^6 \left(1 - P \left(\frac{B - f_d}{y_3} \right) \right) \left. \right] + 10^{-ATT/10} \times \\
 &e^{-2\sigma^2} \left[P \left(\frac{B - f_d}{W_s} \right) + 2\sigma^2 P \left(\frac{B - f_d}{y_1} \right) + \right. \\
 &2\sigma^4 P \left(\frac{B - f_d}{y_2} \right) + \frac{4}{3} \sigma^6 P \left(\frac{B - f_d}{y_3} \right) \left. \right]
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

여기서 식 (12)에서의 y_k 및 P 는 다음과 같이 정의 되는 함수를 표시한다.

$$y_k = (W_s^2 + k\Delta f_c^2 / 2)^{1/2}$$

$$P \left(\frac{B - f_d}{Z} \right) = 2 \int_{\frac{-B - f_d}{Z}}^{\frac{B - f_d}{Z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\gamma^2/2} d\gamma \tag{13}$$

이제 시스템 위상잡음 전력 σ^2 및 반사 도플러 기상신호의 중심 도플러 주파수 f_d 를 변화시키면서 클러터 제거 후의 SCR 값의 한계정도를 고찰하여 본다. 앞에서 설명한 바와 같이 기상신호와 클러터가 주파수 영역에서 잘 분리되어 있지 않는 경우 필터링 된 수신 스펙트럼의 SCR 은 감소하게 된다. 즉 기상신호들이 필터의 차단영역에 존재하게 됨에 따라 생기는 현상이다.

본 연구에서는 위상잡음에 의한 영향을 분석하는 것이 주목적이므로 주파수 영역에서 이상적인 고주파 통과대역 필터의 사용을 가정하였으며 겹침 현상(aliasing)도 없는 것으로 간주하였다. 그림 1에서 그림 4 까지 이상적인 클러터 필터의 차단영역 B 를 150Hz로 고정시키고 차단영역 감쇄 및 도플러 주파수를 변화시키면서 신호 대 클러터 비를 구하였다.

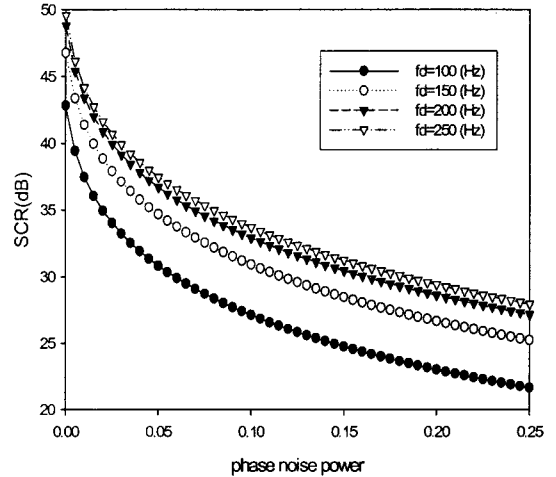


그림 1. 수신 기상신호의 SCR 이 0 dB이며 50 dB 감쇄 클러터 필터를 적용한 경우의 위상잡음 영향
Fig. 1 Phase noise effects on clutter filtering with 50 dB stopband attenuation for the Doppler weather return of 0 dB SCR

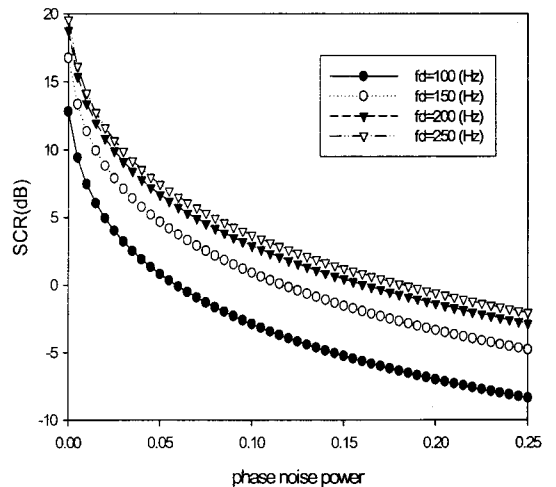


그림 2. 수신 기상신호의 SCR 이 -30 dB이며 50 dB 감쇄 클러터 필터를 적용한 경우의 위상잡음 영향
Fig. 2 Phase noise effects on clutter filtering with 50 dB stopband attenuation for the Doppler weather return of -30 dB SCR

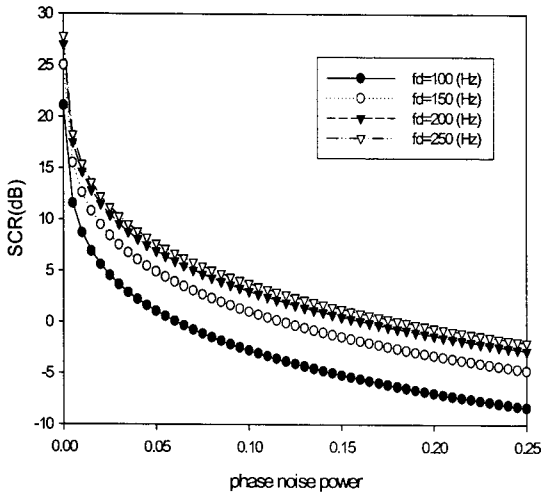


그림 3. 수신 기상신호의 SCR 이 -30 dB이며 60 dB 감쇄 클러터 필터를 적용한 경우의 위상잡음 영향
Fig. 3 Phase noise effects on clutter filtering with 60 dB stopband attenuation for the Doppler weather return of -30 dB SCR

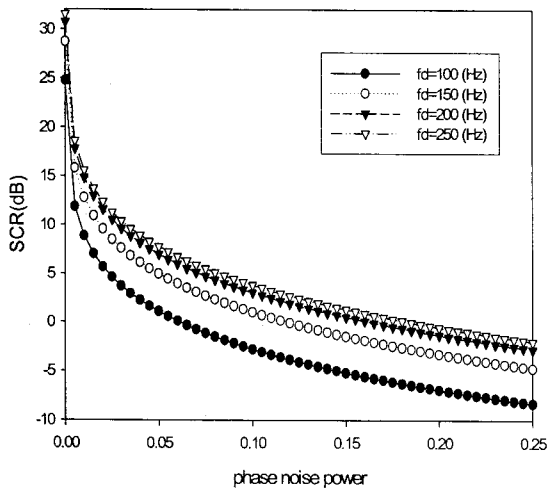


그림 4. 수신 기상신호의 SCR 이 -30 dB이며 70 dB 감쇄 클러터 필터를 적용한 경우의 위상잡음 영향
Fig. 4 Phase noise effects on clutter filtering with 70 dB stopband attenuation for the Doppler weather return of -30 dB SCR

결과 그림들은 $w_c=30$ Hz, $w_s=60$ Hz, $Df_c=50$ Hz 로 설정하여 얻어진 그래프들이다. 결과들에서 알 수 있는 것처럼 클러터 필터를 거쳐 얻을 수 있는 도플러 기상신호 대 클러터 비는 위상잡음전력이 증가함에 따라 감소하게 된다. 또한 도플러 기상신호의 중심 도플러 주파수가 클러터 차단 영역 내에 있거나 인접하게 되면 위상잡음에 의한 퍼짐현상 및 클러터 필터에 의한 수신신호의 전력 차단 현상으로 인하여 기대한 만큼의 SCR 향상 정도를 얻을 수 없음을 확인 할 수 있다. 그림 1에서 보면 수신 도플러 기상신호의 신호전력이 클러터 전력의 크기와 비슷하게 나타나는 즉 매우 큰 기상 반사신호가 존재하는 경우 위상 잡음은 그다지 큰 문제가 되지 않는 것이다. 왜냐하면 일반적으로 10 dB 이상의 최종적인 SCR 을 얻을 수 있다면 레이더 기상정보를 비교적 정확하게 추출할 수 있기 때문이다. 그러나 그림 2나 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 클러터 전력이 반사 기상신호 전력보다 매우 큰 경우 위상잡음 정도는 클러터 제거에 심각한 영향을 미치게 된다. 즉 위상잡음이 어느 정도 이상 큰 경우 원하는 최소한의 SCR 비를 얻을 수 없음을 나타내고 있다. 실제로 미약한 기상정보 신호와 매우 강력한 클러터가 존재하는 것이 일반적인 상황이므로 레이더 시스템의 위상잡음은 클러터 제거에 심각한 문제를 일으키게 된다. 그림 4에서 보는 것처럼 70dB 감쇄를 갖는 이상적인 저주파 차단 필터를 적용한다고 가정하여도 위상잡음 전력이 0.05 를 초과하게 되면 10 dB 이상의 SCR 비를 얻을 수 없음을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 기상 레이더 시스템에서의 위상잡음에 의한 시스템 영향을 분석하였다. 일반적으로 주지하는 바와 같이 기상 레이더의 반사 전자파에 포함된 강력한 클러터 신호를 효율적으로 잘 제거한 후 얻어진 도플러 기상 신호로부터 기상 레이더 자료들을 추출할 수 있다. 클러터의 효율적인 제거는 매우 중요한 문제로서 특히 저고도 기상위험 현상을 탐지해야하는 경우 매우 강력한 지표면 클러터가 레이더 수신 단으로 들어오게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 환경 하에서 시스템 위상잡음이 위와 같은 클러터 및 기상신호에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 분석하였다. 즉 전체적인 기상 레이더시

스텝의 위상잡음을 모델링하고 그에 따른 클러터 및 도플러 레이다 신호들과의 관계식들을 유도하였다. 시스템 위상잡음은 클러터 및 기상 레이다 신호의 도플러 주파수 영역에서의 분산현상을 유발시키게 되며 이러한 현상으로 인하여 강력한 클러터 전력의 효율적인 제거에 심각한 문제를 발생시키게 된다. 본 연구의 결과 그림들에서 볼 수 있는 바와 같이 레이다 시스템 위상잡음은 최종적으로 얻을 수 있는 SCR 값의 한계를 결정짓는 중요한 요소로 작용할 수 있으며 요구되는 최소한의 SCR 값을 얻기 위해서는 시스템 위상잡음 전력이 일정 범위 이내로 제한되어야 함을 알 수 있다.

따라서 본 연구 결과들을 이용하면 강력한 지표면 클러터가 존재하는 항공기용 저고도 기상 탐지 레이다에서의 시스템 위상잡음에 따른 클러터 제거 성능을 효율적으로 분석할 수 있을 것이다. 또한 최종적인 클러터 제거 요구 조건에 따른 레이다 시스템의 위상잡음 정도의 허용 범위 등을 구체적으로 파악하고 결정하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] J. W. Wilson, et al., "Microburst structure and evaluation of Doppler radar for airport windshear detection", *J. Climate and Appl. Meteorol.*, vol. 23, pp. 898-915, 1984.

[2] T. Fujita, "Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales", *J. of Atmospheric Science*, vol. 38, pp. 1511-1534, 1981.

[3] R. Bowles and R. Targ, "Windshear detection and avoidance: airborne systems perspective", 16th congress of the international council of the aeronautical sciences, Jerusalem, 1988.

[4] J. Rutman, "Relation between spectral purity and frequency stability", *Proc. 28th Annual Frequency Control Symp.*, Atlantic City, NJ, 1974.

[5] V. Plekin, "Investigation of a tracking system for Doppler frequency measurements in the presence of frequency fluctuations of the tracking heterodyne", *Telecomm. Radio Engineering*, part 2, no. 8, 1966.

[6] D. Zrnic, "Spectrum width estimates for weather echoes", *IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems*, vol 15, pp. 613-619, 1979.

[7] R. Doviak and D. Zrnic, *Doppler radar and weather observations*, 2nd edition, Academic Press Inc., 1993.

저자소개

이 종 길 (Jong Gil Lee)



1982년 2월 연세대학교 전자 공학과 (공학사)
 1985년 1월 미국 Case Western Reserve University, Electrical Eng. (M.S.)
 1990년 5월 미국 Clemson University, Electrical Eng. (Ph.D.)
 1991년 1월~1993년 2월 삼성전자 특수연구소
 1993년 3월~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수
 ※관심분야 : 무선통신, 레이다신호처리, 통신시스템, 스펙트럼분석