해상환경의 GPS 수신기에 대한 GPS 재머의 운용반경 분석

An Analysis on GPS Jammer Operational Range Against GPS Receiver in Sea Environment

이 영 중* 박 주 래* 김 종 규*
YoungJoong Lee JooRae Park JongKyu Kim

Abstract

This paper analyzed the J/S of the GPS receiver in sea environment from GPS satellite and GPS jammer. Through the analysis, the operational range and effective radiation power of the GPS jammer could be estimated. In the case of the jammer effective radiation power is higher than the specific value, jammer height mainly resolves the jammer operational range.

Keywords : GPS, GPS Jammer, GPS Jammer Radio Horizon, GPS Jammer Operational Range

1. 서 론

GPS 위성군은 총 24개의 위성으로 구성되며 고도 20,200km의 원궤도를 돌고 있다. 각 위성은 수신기가 위성을 식별할 수 있도록 위성의 위치, 상태 정보 및 지상 수신기 시간보정용 송신시간을 항법 메시지 속에 포함시켜 전송한다. 수신기는 수신 신호들의 전파시간 차를 측정하여 수신기의 위치를 계산한다. GPS는 L1 반송파인 1575.42MHz와 L2 반송파인 1227.60MHz 주파수를 사용한다. 또한 주파수 대역이 각각 1.023MHz와 10.23MHz인 C/A(Coarse/Aquisition) 코드와 P(Precision) 코드를 제공한다. P 코드와 C/A 코드는 L1 반송파에

실려 송신되며, P 코드는 L2 반송파에만 실려 송신된다. C/A 코드는 민간용으로 개방되어 사용되며 P 코드는 군용으로 사용되고 있다^[1,2].

지상 수신기에 도착하는 GPS 위성 신호의 세기가 매우 작기 때문에 지상의 GPS 수신기는 지상 재머에 취약하며, 이를 이용한 GPS 재머들이 개발되고 있다.

본 논문에서는 해상환경에서 GPS 위성과 지상 재머 신호의 GPS 수신기에 대한 전파 가시선 분석을 통해 재머의 유효 반경을 고찰하고자 한다. GPS 위성 신호는 자유공간에 해당하는 기본적인 전파 전파 방정식(Wave Propagation Equation)을 고려하였고, 재머 신호는 기본적인 전파 전파 방정식에 굴절과 반사 요소를 추가하여 지구의 지리적 환경을 고려한 평면과 곡률 지구 모델에 대해 전파 가시선 분석을 수행하였다.

† 2011년 1월 6일 접수~2011년 3월 25일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이영중(youngcenter@add.re.kr)

2. GPS 수신기 처리이득

GPS 수신기의 간단한 구조는 Fig. 1과 같이 안테나, 대역통과필터(BPF), 정합필터(Matched Filter), 채널 디코더 등으로 구성된다. 대역통과필터를 통과한 GPS 위성신호(S1)와 재머신호(J1)는 정합필터와 채널 디코더를 거치며 S2, J2로 변경된다. GPS 위성에서는 50 Hz에 해당하는 항법 메시지를 1.023MHz의 C/A 코드로 대역 확산(Spread Spectrum)하여 송신하며, GPS 수신기에서는 동일한 C/A 코드로 정합필터링되어 식 (1)과 같은 처리 이득(Processing Gain)을 얻는다. 또한 채널 디코더를 거치며 코딩 이득(Coding Gain)을 얻는다. GPS 수신기의 대역통과필터 후단의 이론적인 감도(Sensitivity)는 대역통과필터의 밴드폭(Bandwidth)에 의한 열잡음(Thermal Noise)인 -110dBm 보다 처리 이득만큼 낮은 -153dBm이다. GPS 신호의 C/A 코드를 이용하는 동기 재밍의 경우 정합필터에서 GPS 위성 신호와 동일한 G_p 의 처리 이득을 얻으나 잡음(Noise)과 같은 비동기 재밍의 경우 정합필터에서 $\sqrt{G_p}$ 의 처리 이득을 얻는다.

Fig. 1. GPS 수신기 구성

$$G_p = 10 \log \left(\frac{1.023 \text{ MHz}}{50 \text{ Hz}} \right) \quad (1)$$

3. GPS 수신기에서의 GPS 위성신호 수신 세기

GPS 위성은 20,200km 고궤도 상공에서 운용되므로 지상 GPS 수신기까지 도달하는 GPS 위성신호는 자유공간에서의 전파 전파 방정식을 적용할 수 있다.

L1 주파수를 대상으로 기본적인 전파 전파 방정식에 송수신 케이블 손실, 대기 손실을 고려한 GPS 수신기에서의 GPS 위성신호 수신 세기(S1)는 식 (2)와 같다. 정합필터와 채널 디코더에 의한 처리 이득, 코딩 이득을 고려한 신호 세기(S2)는 식 (3)과 같다. 신호 세기(S2)를 C/A 코드 대역폭으로 나눈 단위 주파수당 신호 세기는 식 (4)와 같다.

$$S_1 = \frac{P_{tt} G_{tt} G_{tr} \lambda^2}{(4\pi R_{tr})^2 L_{tt} L_{ta} L_{rr}} [dBm] \quad (2)$$

$$S_2 = \frac{P_{tt} G_{tt} G_{tr} \lambda^2}{(4\pi R_{tr})^2 L_{tt} L_{ta} L_{rr}} G_p G_c [dBm] \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{P_{tt} G_{tt} G_{tr} \lambda^2}{(4\pi R_{tr})^2 L_{tt} L_{ta} L_{rr}} \frac{G_p G_c}{B_{tt}} [dBm/Hz] \quad (4)$$

여기서 P_{tt} 는 GPS 위성 출력, G_{tt} 는 GPS 위성 안테나 이득, G_{tr} 은 GPS 수신기 안테나 이득, λ 는 파장, R_{tr} 은 GPS 위성과 수신기 간 거리, L_{tt} 는 송신 케이블 손실, L_{rr} 은 수신 케이블 손실, L_{ta} 는 대기 손실 포함 안테나 패턴 손실, G_p 는 처리 이득, G_c 는 코딩 이득, B_{tt} 는 C/A 코드 대역폭이다.

4. GPS 수신기에서의 재머신호 수신 세기

가. 자유공간에서의 재머신호 수신 세기

재머신호가 자유공간 상에서 전파되어 GPS 수신기에 수신된다고 가정할 경우, GPS 수신기의 대역통과필터를 통과한 재머신호 수신 세기(J1)는 식 (5)와 같다.

동기 재밍 신호가 정합필터와 채널 디코더를 거칠 경우의 수신 세기(J2)는 식 (6)과 같고, 단위 주파수당 신호 세기는 식 (7)과 같다. 잡음 재밍 신호가 정합필터와 채널 디코더를 거칠 경우의 수신 세기(J2)는 식 (8)과 같고, 단위 주파수당 신호 세기는 식 (9)와 같다^[4,5].

$$J_1 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{ja} L_{rr} M} [dBm] \quad (5)$$

$$J_2 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{ja} L_{rr} M} G_p [dBm] \quad (6)$$

$$J_2 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{ja} L_{rr} M} \frac{G_p}{B_{jj}} [dBm/Hz] \quad (7)$$

$$J_2 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{ja} L_{rr} M} \sqrt{G_p} [dBm] \quad (8)$$

$$J_2 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{ja} L_{rr} M} \frac{\sqrt{G_p}}{B_{jj}} [dBm/Hz] \quad (9)$$

여기서 P_{jj} 는 재머 출력, G_{jj} 는 재머 안테나 이득, G_{jr} 은 재머 신호의 입사각에 따른 GPS 수신기 안테나 이득, R_{jr} 은 재머와 수신기간 거리, L_{jj} 는 송신 케이블 손실, L_{ja} 는 대기 손실 포함 안테나 패턴 손실, B_{jj} 는 재밍 신호의 대역폭, M 은 재밍을 위한 J/S이다.

나. 지구의 지리적인 영향을 고려한 수신 세기

지상 재머와 지상 GPS 수신기는 지구의 지리적인 영향을 받으므로 자유공간에서의 전파 전파 방정식에 추가적인 요소를 고려해야 한다.

지리적인 영향은 크게 두가지가 있다. 첫 번째는 굴절(Refraction)이다. 전자파는 자유공간에서 직진하지만 지구 대기에 의해 굴절하게 되어 지구 반경은 식 (10)과 같이 실제 지구 반경(r_o)의 4/3배에 해당하는 유효 지구 반경(r_e)으로 표시할 수 있다. 대기의 조건에 의해 굴절이 심해지는 현상을 덕팅(Ducting)이라하며 더운 여름 바다 표면에서 덕팅 현상이 많이 발생한다^[3]. 굴절은 이득 요소로서 작용하며 이득은 대략 1dB 수준이다^[6].

$$r_e = \frac{4}{3} r_o \quad (10)$$

두 번째는 반사(Reflection)이다. 전자파가 지구 표면으로부터 반사될 때 진폭은 감쇄하고 위상은 변경된다. 이러한 반사는 역위상일 경우 손실, 동위상일 경우 최대 6dB 이득으로 작용한다^[7~9].

수직과 수평 편파(Polarization)에 대한 반사계수(Reflection Coefficient)는 각각 식 (11), (12)와 같으며 입사각(Ψ_g), 유전상수(ϵ) 및 주파수에 의존한다. 유전상수는 식 (13)과 같이 표현되며 상온의 해상환경에서 유전율의 실수부(ϵ')는 69이고 도전율(σ)은 4.3이다.

$$\Gamma_v = \frac{\epsilon \sin \Psi_g - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \Psi_g}}{\epsilon \sin \Psi_g + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \Psi_g}} \quad (11)$$

$$\Gamma_h = \frac{\sin \Psi_g - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \Psi_g}}{\sin \Psi_g + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \Psi_g}} \quad (12)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j60\lambda\sigma \quad (13)$$

반사에 의한 영향을 고려하기 위해 자유공간이 아닌 조건에서 전파 전파를 설명하는데 이용되는 전파 요소(Propagation Factor)는 식 (14)와 같이 표현된다. 해수면 근처에서는 다중경로에 의한 전파가 전파 요소에 지배적인 영향을 준다.

$$F = \left| \frac{E}{E_0} \right| \quad (14)$$

E 는 매질이 존재하는 경우의 전계이며 E_0 는 자유공간의 전계이다.

다중경로 전파를 고려하기 위해 Fig. 2와 같이 평면 지구에 대해 고려하자. 재머의 고도가 h_j , GPS 수신기의 고도가 h_r 이고 입사각이 Ψ_g 일 때 재머의 송신 에너지는 직접경로 $R_{jr}(A-C)$ 와 간접경로 $R_i(A-B-C)$ 에 의해 GPS 수신기 안테나에 전달된다.

Fig. 2. 평면 지구 모델에서의 반사

두 경로의 거리 차와 위상 차는 각각 식 (15), (16)과 같다.

$$\Delta R = R_i - R_{jr} \quad (15)$$

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \quad (16)$$

식 (17)과 같은 반사계수에 의해 반사 시 크기와 위상이 변경되고 수신 안테나 이득이 작으므로 간접경로 신호의 크기는 직접경로 신호의 크기보다 작다.

$$\Gamma = \rho e^{j\phi} \quad (17)$$

ρ 는 1이하이고 ϕ 는 표면 거칠기에 따른 간접경로 신호의 위상 변이이다.

직접경로 신호(E_d)와 간접경로 신호(E_i) 및 두 신호의 합(E)은 식 (18)과 같다.

$$\begin{aligned} E_d &= e^{j\omega_0 t} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} R_{jr}} \\ E_i &= \rho e^{j\phi} e^{j\omega_0 t} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} R_i} \\ E &= e^{j\omega_0 t} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} R_{jr}} \left(1 + \rho e^{j(\phi + \frac{2\pi}{\lambda} (R_i - R_{jr}))} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에 의해서 식 (14)는 식 (19)와 같이 표현된다.

$$F = \left| \frac{E_d + E_i}{E_d} \right| = |1 + \rho e^{j\phi} e^{j\Delta\Phi}| = |1 + \rho e^{j\alpha}| \quad (19)$$

여기서 $\alpha = \Delta\Phi + \phi$ 이고 식 (19)를 오일러 정리를 적용하면 식 (20)과 같다.

$$F = \sqrt{1 + \rho^2 + 2\rho \cos \alpha} \quad (20)$$

Fig. 2의 평면 지구의 경우 R_{jr} 과 R_i 를 이항정리를 적용하면 식 (21)과 같으며 ΔR , $\Delta\Phi$ 는 식 (22), (23)과 같다.

$$R_{j_r} = \sqrt{R_{j_r'}^2 + (h_j - h_r)^2} \simeq R_{j_r'} + \frac{(h_j - h_r)^2}{2R_{j_r'}} \quad (21)$$

$$R_i = \sqrt{R_{j'}^2 + (h_j + h_r)^2} \simeq R_{j'} + \frac{(h_j + h_r)^2}{2R_{j'}} \quad (21)$$

$$\Delta R = R_i - R_{jr} \simeq \frac{2h_j h_r}{R_{jr'}} \quad (22)$$

$$\Delta\Phi \simeq \frac{4\pi h_j h_r}{\lambda R_{j'}} \quad (23)$$

재머와 GPS 수신기의 고도에 비해 거리가 매우 크기 때문에 반사계수(Γ)가 -1인 입사각이 0으로 가정하면 이 표면으로부터 반사된 신호는 어떠한 진폭 손실도 없이 180°의 위상 변이를 유발함을 의미하며 전

파와 요소 제공은 식 (24)와 같다. 전파 요소의 제공은 전파가 전파될 때 이득 또는 손실 항목으로 추가되며 반사 요소를 고려하면 GPS 수신기에서의 동기 채밍 신호와 잡음 채밍신호의 수신 세기(J2)는 각각 식 (7), (9)에서 식 (25), (26)과 같이 표현된다.

$$F^2 = 2 - 2\cos\Delta\Phi = 4\left(\sin\frac{2\pi h_j h_r}{\lambda R_{j' r'}}\right)^2 \quad (24)$$

$$J_2 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{jj} L_{rr} M} \frac{G_p}{B_{jj}} 4 \left(\sin \frac{2\pi h_j h_r}{\lambda R_{jr}'} \right)^2 \quad (25)$$

$$J_2 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{jj} L_{rr} M} \frac{\sqrt{G_p}}{B_{jj}} 4 \left(\sin \frac{2\pi h_j h_r}{\lambda R_{jr}} \right)^2 \quad (26)$$

평면 지구 모델은 재머와 GPS 수신기의 고도가 낮아 거리가 가까운 경우에 효과적이거나 고도가 증가하여 거리가 멀어질 경우는 오차가 증가하게 된다. 다중 경로 전파에 대한 재머의 영향을 좀 더 정확히 모델화하기 위해 평면 대신 Fig. 3과 같이 곡률 지구를 고려하였다. 곡률 지구를 고려할 때 전자파는 대기 굴절로 굽은 경로를 진행한다.

Fig. 3의 직접경로 $R_{jr}(A-C)$ 와 간접경로 $R_i(A-B-C)$ 의 차로부터 식 (27)을 유도할 수 있으며 r_1 에 대해 풀면 식 (28)을 얻을 수 있다. 또한 $\triangle ABO$ 와 $\triangle BOC$ 로부터 식 (29), (30)과 같이 R_1 , R_2 , R_{jr} 및 ΔR , ψ_g 를 구할 수 있다.

Fig. 3. 곡률 지구 모델에서의 반사

$$2r_1^3 - 3r_1^2 + (r^2 - 2r_e(h_r + h_i))r_1 + 2r_e h_r r = 0 \quad (27)$$

$$r_1 = \frac{r}{2} - p \sin \frac{\xi}{3}$$

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{r_e(h_j + h_r) + \frac{r^2}{4}} \quad (28)$$

$$\xi = \sin^{-1} \left(\frac{2r_e r(h_j - h_r)}{p^3} \right)$$

$$R_1 = \sqrt{h_r^2 + 4r_e(r_e + h_r) \left(\sin \frac{\phi_1}{2} \right)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{h_j^2 + 4r_e(r_e + h_j) \left(\sin \frac{\phi_2}{2} \right)^2} \quad (29)$$

$$R_{jr} = \sqrt{(h_j - h_r)^2 + 4(r_e + h_j)(r_e + h_r) \left(\sin \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)^2}$$

$$\Delta R = \frac{4R_1 R_2 (\sin \Psi_g)^2}{R_1 + R_2 + R_{jr}} \quad (30)$$

$$\Psi_g = \sin^{-1} \left(\frac{2r_e h_r + h_j^2 - R_1^2}{2r_e R_1} \right)$$

식 (24)의 유도과정과 동일한 가정을 할 경우 전파 요소는 식 (31)과 같이 표현할 수 있으며 전파 요소의 제곱은 전파가 전파될 때 이득 또는 손실 항목으로 추가되며 반사 요소를 고려하면 GPS 수신기에서의 동기 재밍신호와 잡음 재밍신호의 수신 세기(J2)는 각각 식 (7), (9)에서 식 (32), (33)과 같이 표현된다^[10].

$$F^2 = 2 - 2\cos\Delta\Phi = 4 \left(\sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{4R_1 R_2 (\sin \Psi_g)^2}{R_1 + R_2 + R_{jr}} \right) \right)^2 \quad (31)$$

$$J_2 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2 G_p}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{ja} L_{rr} M B_{jj}} 4 \left(\sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{4R_1 R_2 (\sin \Psi_g)^2}{R_1 + R_2 + R_{jr}} \right) \right)^2 \quad (32)$$

$$J_2 = \frac{P_{jj} G_{jj} G_{jr} \lambda^2 \sqrt{G_p}}{(4\pi R_{jr})^2 L_{jj} L_{ja} L_{rr} M B_{jj}} 4 \left(\sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{4R_1 R_2 (\sin \Psi_g)^2}{R_1 + R_2 + R_{jr}} \right) \right)^2 \quad (33)$$

5. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용한 GPS 위성, GPS 수신기 및 재

머의 재원은 Table 1, 2와 같다. 곡률 지구 모델의 시뮬레이션 결과가 실제 결과와 가장 유사하다^[11]. 특정 조건에서의 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 같다. 동기 및 잡음 재밍 신호에 대해 재머 출력과 재머 고도에 따른 운용 반경은 Fig. 5와 같다. 시뮬레이션 결과 GPS 수신기의 감도를 고려할 때 해상환경에서 재머의 출력 보다는 재머의 운용 고도에 따라 운용 반경이 결정될 수 있다.

Table 1. GPS 위성 시뮬레이션 재원

Ptt	임의 생략
Gtt	임의 생략
Ltt	임의 생략
Btt	2.046MHz
f	1.57543GHz
Rtr	20,200km
Lta	임의 생략
Gtr	임의 생략
Lrr	임의 생략
Gp	43.11dB
Gc	임의 생략

Table 2. 재머 시뮬레이션 재원

Pij	임의 생략
Gij	임의 생략
hj	100, 200, 300, 500, 1000, 2000, 3000m
hr	임의 생략
Lij	임의 생략
Bij	2.046MHz(동기 재밍)
	임의 생략
Lja	임의 생략
Gjr	임의 생략
Lrr	임의 생략
M	임의 생략

Fig. 4. 시뮬레이션 결과

Fig. 5. 곡률지구 모델의 재머 운용 반경

6. 결론

본 논문은 해상환경에서 GPS 수신기에 수신되는 GPS 위성 신호 세기와 재머 신호 세기를 정량적으로 분석하였다. 이러한 분석을 위해 GPS 위성 신호는 자유공간을 전파하여 GPS 수신기에 수신된다고 가정하였다. 재머 신호는 자유공간, 평면 지구 및 곡률 지구 환경에서 전파하여 GPS 수신기에 수신된다고 가정하였다. GPS 수신기의 GPS 위성 수신신호 세기를 고려할 때, GPS 재머는 특정 출력 이상을 만족하면 출력보다는 재머의 운용 고도에 따라 운용 반경이 결정된

다. 이러한 분석을 통해 GPS 재머의 출력과 운용 고도를 추정할 수 있다.

References

- [1] A. El-Mowafy, Kinematic Attitude Determination from GPS, Department of Geomatics Engineering, The Univ. of Calagary, 1994.
- [2] J. C. McMillan, D. A. G. Arden, G. Lachalelle, G. Lu, "Dynamic GPS Performance using INS/GPS Reference", Proceedings of ION GPS-94, 1994.
- [3] Lamont V. Blake, "Ray Height Computation for a Continuous Nonlinear Atmospheric Refractive-Index Profile", Radio Science, Vol. 3, No. 1, January 1998.
- [4] 이영중, 김인선, 박주래, 곽현규, 신옥현, "SAR 위성에 대한 재밍 효과 분석", 한국군사과학기술학회지 제13권 제2호, pp. 252~257, 2010. 4.
- [5] Walter W. Goj, "Synthetic Aperture Radar Electronic Warfare", Artech House, 1993.
- [6] 이영중, 김인선, 박주래, "VHF 데이터통신 통달거리 요소 분석", 한국군사과학기술학회 2009년 종합학술대회, pp. 2043~2045, 2009.
- [7] Ralph M. Schmalenberger, Michael G. Edrich, "Channel Modelling for Wideband Data Communication in a Maritime Mobile Environment", Eurocomm 2000, Information Systems for Enhanced Public Safety and Security, IEEE/AFCEA, 2000.
- [8] "최신 무선통신 원리와 재밍기법", 공군전투발전단, 2005.
- [9] Kerr, D. E., Propagation of Short Radio Waves, M.I.T. Radiation Laboratory Series, Vol. 13, McGraw-Hill, 1951
- [10] Bassem R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB", Chapman&Hall/CRC, 2000.
- [11] 이영중, 김인선, 박주래, "VHF 데이터통신 통달거리 예측 및 요소 분석", 한국군사과학기술학회지 제13권 제3호, 2010.