

단거리 텔레메트리용 고속통신을 위한 전자기파 및 초음파의 전파 및 잡음 특성 분석

*최창호, *서강도, *박희준, *박일용, *조진호
 *경북대학교 전자공학과, **경북대학교 의공학과

A Comparison of the Propagation and Noise Characteristics between Ultrasonic and Electromagnetic Wave for the High Speed Communication of Short Range Telemetry

*Chang-Hyo Choi, *Gang-Do Seo, *Hee-Jun Park, *Il-Yong Park, *Jin-Ho Cho
 *School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University
 **Dept. of Biomedical Engineering, Kyungpook National University
 E-mail : chchoi@hanmir.com

Abstract - This paper has been studied for a comparison of the propagation and noise characteristics between ultrasonic and electromagnetic wave for the high speed communication of the short range telemetry. We analyze the propagation depth of electromagnetic and ultrasonic wave by skin depth effect and by ultrasonic loss ratio. We also studied several effects such as near field effect in electromagnetic wave and Rayleigh scattering noise of ultrasonic wave, etc.

We show the experimental results of their propagation loss and modulation experiments in water. The experimental results show that both method is good for the implementation of short range telemetry.

1. 서 론

단거리 액체 혹은 인체 내에서 수백 kbps~수 Mbps의 고속 통신을 위한 방법에는 전자기파, 초음파 음향통신 등이 있다. 전자기파는 모든 매질에서 전파되며 다양한 변복조 기법과 잡음제거에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔으나 투과깊이, 안테나 크기 제한, 인체내 방사전력 제한 등이 있다 [1][2][3]. 또한 수중에서 감쇠가 심하여 저주파 통신만이 일반적으로 사용되고 있어 고속 통신에 대한 연구가 필요하다. 초음파는 감쇠, 산란, 비선형 현상 등의 영향으로 수중용 저주파 아날로그 통신 연구 이외에는 거의 이루어지고 있지 않은 실정이나 일반적으로 인체에 무해하고 초음파 센서의 광대역 특성으로 단거리 고속 통신이 가능하다 [4][5][6]. 따라서 인체내 텔레메트리용 전자기파와 초음파 통신의 가능성을 검토하기 위하여 전파특성, 잡음, 안테나 및 센서의 특성에 대한 비교분석 연구가 필요한 실정이다.

본 논문은 액체, 인체 등에서 텔레메트리용 고속 통신을 위한 전자기파와 초음파의 전파 특성, 잡음 특성 등을 분석한 것으로서, 전자기파의 표피효과 해석을 통한 투과깊이 분석, 감쇠 및 반사, 근접장 특성 분석, 안테나 길이 제한에 따른 효율성 및 초음파 센서의 전달 및 손실특성, 백색잡음(white noise)과 레일레이(Rayleigh) 산란잡음에 따른 변복조 기법별 영향, 센서 및 안테나 특성 등을 비교 분석하였다 [7][8][9]. 특히 전자기파와 초음파의 물에서 투과 손실 등 전파특성 및 변조기법별 전파실험을 실시하였고 이의 분석을 통하여 전자기파와 초음파 통신의 가능성을 확인할 수 있었다.

2. 전자기파

2.1 안테나 및 근접장

전자기파는 소자용량이 회로에 분산되어 있는 분산소자 해석이 필요하며 파장, 거리, 매질의 전파상수 등에 따라 수신 안테나의 출력은 매우 다르다. 생체용 텔레메트리의 수신 안테나를 몸에 부착하는 등 송수신기간의 거리가 파장보다 짧은 경우에 근접장의 전계와 안테나 상호간 작용의 분석 등이 필요하다. 인체내부에 사용할 수 있는 안테나의 길이는 파장에 비하여 매우 짧고 지름이 작아 안테나 효율, 임피던스 정합, 대역폭 등의 분석이 필요하며 인체의 유전상수 및 도전율이 높아 공기중에서 인체 내부로 파가 투과시 파의 반사, 감쇠 등의 분석이 필요하다. 상기와 같은 다양한 요인을 고려하여 인체용 텔레메트리에 적합한 사용 주파수, 안테나 전력을 결정하고 안테나 및 중폭회로를 설계하여야 한다.

전류 소스 $I = I_0 e^{j\omega t} \mathbf{a}_z$ 를 갖는 미소 다이폴 안테나가 무손실 전파될 경우, 구면좌표계의 임의의 한 점 $p(r, \theta, \phi)$ 에서 수신안테나에 중요하게 영향을 주는 전계 E_θ 는 식(1)과 같다.

$$E_\theta = \frac{jZ_0 I_0 \Delta l}{2\lambda r} \left(1 + \frac{1}{j\beta r} - \frac{1}{\beta^2 r^2}\right) \sin\theta \cdot e^{-j\beta r} \quad (1)$$

여기에서 전계 E_θ 의 첫 번째 항목은 복사계, 두 번째 항목은 유도계, 세 번째 항목은 정전계로서 거리에 따라 감쇠율이 다르며 $r = \frac{\lambda}{2\pi} = 0.16\lambda$ 에서 각 전계 성분이 동일하다. 이 지점을 경계로 하여 그 지점내에서는 정전계, 유도전계가 지배적이고, 그 지점보다 먼 곳에서는 복사 전계가 지배적으로 된다. 에너지는 정전계에 의해서 이동하지 않으므로 근접장에서는 유도 전계와 복사전계가 중요한 요소이다.

원근장일 경우 복사전계가 중요한 요소이며 이는 거리 r 에 반비례한다. 전류분포 $I(x) = I_0 \cos(\beta x)$ 를 갖는 반파장 다이폴 안테나가 무손실 전파되는 경우 임의의 점 $p(r, \theta, \phi)$ 에서 각 선소자로 부터의 거리차와 위상차를 고려하여 발생된 합성전계 E_θ 는

$$E_\theta = \frac{j60I_0}{r} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \cdot e^{-j\beta r} \quad (2)$$

이다. 안테나 상호간격이 파장에 비해 매우 근접하였을 경우 안테나 상호간에는 서로 영향을 주어 상호 리액턴스와 상호 저항을 갖게 되므로 거리의 변화에 따라 상호 출력 전압의 변동이 심하다. 이 경우 안테나 상호간의 결합 리액턴스 등의 해석 문제가 중요한 문제로 대두되며 송수신 반파장 다이폴 안테나가 1/4파장 보다 짧은 거리

에 있는 경우는 그림1과 같다 [10].

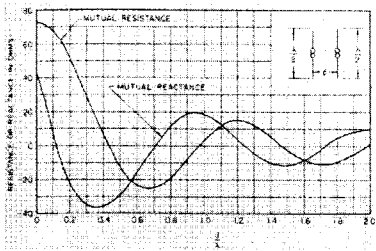


그림 1. 반파장 안테나의 상호 리액턴스와 상호 저항

2.2 안테나 길이와 효율

안테나의 길이가 짧은 경우 안테나 방사 저항값이 낮아 효율이 낮고 리액턴스 값도 달라진다. 원통형 반파장 다이폴 안테나의 임피던스는

$$Z_i = R(kl) - j[120(\ln \frac{l}{a} - 1) \cot kl - X(kl)] \quad (3)$$

로 주어지며, 여기서 $R(kl)$, $X(kl)$ 은 근사적으로 다음의 다항식과 같다.

$$R(kl) = -0.4787 + 7.3246kl + 0.3963(kl)^2 + 14.6131(kl)^3$$

$$X(kl) = -0.4456 + 17.0082kl - 8.6793(kl)^2 + 9.6031(kl)^3$$

이것은 안테나의 지름 문제를 무시한 복사저항과 리액턴스로서 $\lambda/4$ 파장이하에서 그림2와 같다 [10].

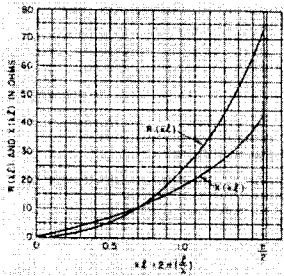


그림 2. 안테나의 복사 저항과 리액턴스

반파장 다이폴 안테나의 길이가 $\lambda/4$ 일 때 저항은 $Z_r = 73.13 + j42.55 (\Omega)$ 임을 알 수 있다.

300MHz 대역의 반파장 안테나 혹은 $1/4$ 파장 안테나의 길이는 약 50cm, 25cm이나 인체내에서 사용 가능한 길이는 수cm를 넘지 않으므로 효율 분석과 임피던스 매칭을 실시하여야 한다.

또한 일반적으로 안테나 지름이 커질수록 광대역성을 띄나 인체내에서 사용 가능한 안테나의 지름이 매우 작아 협대역성을 띤다. 이에 따라 동일한 신호를 전송하더라도 광대역 안테나보다 상대적으로 높은 캐리어 주파수를 사용하여야 한다.

2.3 반사 및 감쇠

파가 이종의 매질로 입사하는 경우 반사가 발생하고 투과되는 파의 량은 줄어들게 된다. 입사 후 손실이 발생하는 매질에서는 감쇠정수에 의하여 파는 감소하게 된다. 835MHz에서 인체의 주요물질의 비유전율, 도전율은 표1과 같다 [3].

	밀도 ($kg \cdot m^{-3}$)	σ	ϵ_r
근육	1020	0.92	57.0
피부	1000	0.92	57.0
지방/뼈	1200	0.09	8.3
혈액	1000	1.19	74.0

표 1. 주요 인체조직의 특성상수(835MHz)

비유전율과 도전율은 주파수에 따라 조금씩 변한다. 완전도체에서 입사된 파는 전반사되어 전자기파가 전혀 투과될 수 없다. 수직 편파가 각 θ 로 입사시 투과계수 T_v 및 상대굴절을 n 은 식(4), 식(5)와 같다.

$$T_v = \frac{2\mu_2 n \cos \theta}{\mu_1 n^2 \cos \theta + \mu_2 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

$$n = \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{\epsilon_2 - j(\frac{\sigma_2}{\omega})}{\epsilon_1 - j(\frac{\sigma_1}{\omega})}} \approx \sqrt{\epsilon_2} \quad (5)$$

인체 피부의 반사계수는 약 7.55이고 수직편파가 $\theta=0$ 로 입사시 투과계수는 약 0.234이다.

전도성 매질내에 침투하는 전파는 그 전파상수의 실수부로 인해 감쇠하는 성질이 있다. 전파가 전파되는 공간이 완전 유전체가 아닌 경우(도전율 $\sigma \neq 0$), 전파상수 k 와 감쇠 상수 α 는

$$k = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta \quad (6)$$

$$\alpha \approx \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (7)$$

이고, $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ 이 0.01보다 큰 경우를 준도체라 하며 인체 피부는 300MHz에서 약 0.967로서 준도체에 해당된다. 이 경우에 표피효과깊이로 투과 깊이를 근사적으로 분석할 수 있다. 표피효과깊이는 파가 표면 전체의 37%로 감소하는 깊이 δ 이며 일반적으로 도체에서는 감쇠정수 α 의 역수로서

$$\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \frac{1}{\delta} \quad (8)$$

이다.

비유전율과 도전율이 표1의 상수로 가정하고 주파수에 따른 식(8)의 표피효과깊이 및 정확한 감쇠정수 계산을 통한 표피효과 깊이는 그림3과 같다.

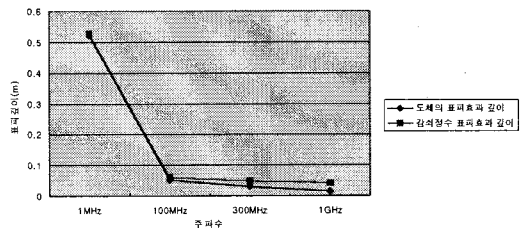


그림 3. 인체 피부의 주파수별 표피효과 깊이

300MHz에서 피부의 표피효과 깊이는 위 그림에서 약 4.7cm로서, 투과깊이가 20cm인 경우 입사파의 1.5%로 감소하고 30cm인 경우 0.18%로 감소한다.

3. 초음파의 전달특성

3.1 전파 및 감쇠

초음파 센서는 전기적 에너지와 음향에너지를 상호변환시키는 센서로서 의공학 분야의 영상획득, 유속측정, 거리측정, 지층 및 수중탐사, 저속 초음파통신 등에 광

이 사용되고 있다. 초음파 전파의 중요변수에는 음압, 속도, 감쇠, 반사, 산란 등의 특성이 있으며 이들은 센서의 종류, 전파매질 및 전파거리와 관련 있다. 매질의 비 직선성에 의해 장거리 전송 시 포락선 성분만 나타나는 자기복조효과가 발생하므로 AM파가 전파에 적합한 것으로 알려져 있다.

초음파의 감쇠는 매질에 따라 상당한 차이를 보이나 평균적인 인체의 감쇠상수는 $1 \text{ dB/MHz} \cdot \text{cm}$ 이다. 신호 $g(t)$ 를 $\sin \omega_0 t$ 의 캐리어로 AM변조하여 유체내부에서 방사하는 경우 전파거리 x 에서 1차 음파 음압 I 는

$$I = I_0(1 + mg(t - \frac{x}{c_0}))e^{(-2\alpha x)} \sin \omega_0(t - \frac{x}{c_0}) \quad (9)$$

와 같다. 인체 및 액체에서 초음파 진행속도는 비슷하나 감쇠상수는 차이가 크다. 대표적인 매질의 속도, 감쇠상수, 특성임피던스는 표 2와 같다.

표 2. 주요 매질 음향 특성 값

	속도 (m/sec)	감쇠상수 (dB/MHz cm)	특성임피던스 $10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
물	1480	0.0025	1.48
공기	330	12.0	0.0004
soft tissu	1540	0.81	1.62
근육	1590	1.5-3	1.71
뼈	4080	12	7.8

초음파가 전파 특성이 다른 매질을 통과시 음향 임피던스 차이로 반사가 일어나 신호가 감소한다. 음향임피던스 $Z = \rho C$ 로서, 음향 임피던스 Z_1 인 매질에서 음향 임피던스 Z_2 인 매질로 입사시 감쇠 손실율은

$$\text{손실율 (dB)} = 10 \text{LOG}_{10} \left(\frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right) \quad (10)$$

와 같다. 여기에서, ρ : 매질밀도, C : 매질내의 전파속도이고 초음파의 반사는 통과매질의 특성 임피던스 차에 따라 다르며 인체의 Soft tissue에서는 반사량이 -20~-40dB 정도로 작아 진행 초음파의 감쇠는 무시할 수 있으나 뼈 등에서는 반사량이 -4dB정도로 크므로 진행 초음파의 감쇠도 크다.

3.2 센서의 대역폭과 전기적 등가회로

현재 고주파 초음파센서의 대역폭은 캐리어 주파수에 대한 대역폭의 비율이 상대적으로 높은 광대역 특성을 가지고 있고 일례로서 Panametrics사의 5MHz 초음파 센서의 주파수 특성은 그림 4와 같고 -6dB 대역폭은 약 5MHz로서 광대역임을 알 수 있다.

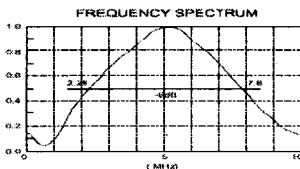


그림 4. 5MHz 초음파 센서의 주파수 특성

초음파 센서의 모델링을 통해서 센서의 특성을 파악하고 다양한 변조기법의 문제점을 파악할 수 있다. 고주파 초음파 센서로 일반적으로 사용되는 Pizeoelectric소자의 전기적 등가 모델은 RLC공진회로로 모델링 될 수 있다. RLC공진회로는 2차 전달함수로 근사화 될 수 있으며 센서의 민감도를 높이기 위해서는 2차함수의 진동영역에서 사용하며, 축상의 분해능을 높이기 위해서는 damped영역에서 주로 사용한다. 대역폭이 좁고 링킹 영역에서 사용시 진동에 의한 위상 지연과 신호 변화가

생긴다. 공진 주파수에서 급격한 위상의 변화는 주파수 대역을 확산시키는 것과 같으므로 Q값이 높은 상태에서는 공진주파수 멀어질수록 급격히 신호가 감쇠 하므로 위상변화의 응답이 늦어진다.

3.3 레일리 산란 특성

초음파는 수중에서 무수히 많은 전파경로로 초음파의 직접파 혹은 간접파가 전파되어 오는 다중 경로전파에 의해 수신신호의 진폭과 위상이 불규칙적인 특성이 있다. 다중경로의 페이딩은 일반적으로 이동통신 등에 나타나고 있으며 이를 제거하기 위한 다양한 분석이 이루어져 왔다. 직접파가 우세한 경우 수신파는 라이시안 분포를 갖으며, 다중경로에 의한 간접파가 무수히 많이 존재하고 이들의 성분이 직접파보다 우세한 단거리 경로에는 레일리 분포를 갖는것으로 알려져 있고, 장구간 페이딩 신호는 로그노말 분포를 갖는것으로 알려져 있다. 일반적으로 초음파는 레일리 분포를 갖음을 여러 논문에서 제시되고 있다. 반사파에 의해 획득된 B mode 초음파 영상은 레일리 분포를 갖는 산란잡음과정으로 알려져 있다 [11]. 이것의 수신신호는 원 신호와 레일리 잡음의 곱으로서 multiplicative 잡음과정이다. 일반적으로 마이크로웨이브나 빛의 산란도 레일리 산란 현상을 가진다.

진폭이 a 이고 주파수가 ω_0 인 전송신호 s 가 있다고 할 때 신호는 $s = a \cdot e^{(j\omega_0 t)}$ 와 같다.

각각 i 번째 산란된 파의 진폭과 위상을 a_i, θ_i 라고 할 때 총 수신 신호 s_r 는 n 개의 산란된 파의 합이다.

$$s_r = \sum_{i=0}^n a_i \cdot e^{(j\omega_0 t)} = e^{(j\omega_0 t)} \sum_{i=0}^n a_i \cdot e^{(j\theta_i)} = e^{(j\omega_0 t)} r e^{(j\theta)} \quad (11)$$

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta \quad (12)$$

$$p(r, \theta) = \frac{r}{2\pi\sigma_r} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (13)$$

$$p(r) = \int_0^{2\pi} p(r, \theta) d\theta = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (14)$$

산란경로가 크고, 각각의 진폭이 랜덤하고, 위상이 균등 분포를 가지고 있으므로 x 와 y 는 둘다 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 가우시안 변수가 되며 결합분포는 식(13)과 같이 되고 이의 확률밀도함수는 레일리 확률밀도 함수가 된다. 복합신호의 진폭이 변하고 위상은 균등분포의 랜덤함수를 가지므로 진폭변조 혹은 위상변조는 사용에 애로가 있다. 특히 위상변조는 균등랜덤 분포를 갖으므로 잡음의 제거가 쉽지 않다. 진폭은 레일리 분포를 갖으므로 평균값을 중심으로 분포하여 어느 정도 값을 예측할 수 있다.

만약 산란잡음의 영향이 매우 크다면 일반적인 디지털 통신에 사용되는 additive 백색잡음 해석에 의한 정합 필터(matched filter) 이론은 적합하지 않다. 일반적으로 평균필터링은 레일리 잡음을 효과적으로 제거할 수 있다. 이것은 획득된 신호를 N 개 샘플링 하여 평균을 취하면 평균값은 원 신호와 동일하고 표준편차는 $\sigma/\sqrt{N} = 0.5227u/\sqrt{N}$ 으로 감소하며 N 이 클 때 정규분포가 된다는 중앙극한치 이론에 의하여 증명된다. 이것은 확률분포에 관계없이 적용되므로 일반적인 additive 백색잡음에 대하여도 동일하다.

4. 실험결과 및 고찰

전자기파와 초음파의 물에서 투과 특성을 측정하고 초음파의 AM 및 FM 변조파의 전파 특성 실험을 실시하였다. 이를 위하여 전자기파는 80MHz의 1/4파장, 1/16 파장 안테나를 사용하였고 초음파는 Panametrics사의 5MHz 초음파 센서를 사용하였다.

물에서 전자기파의 투과 특성을 실험하기 위하여 수정

발전자를 이용하여 80MHz, 1.2V의 사인파를 발전시켜 1/16파장 안테나로 송신시키고 이를 물표면, 물 속 10cm, 물 속 20cm에서 수신한 후 물로부터 약 1m 떨어진 공기 중에서 1/4파장 수신안테나로 측정된 결과는 표 3과 같다. 물에서 초음파의 감쇠 특성을 측정하기 위하여 5MHz 송수신 초음파 센서를 이용하여 송수신센서간 거리 5cm, 15cm에서 측정된 결과는 표 4와 같다.

표 3. 물에서 전자기파의 거리별 전파 실험

물 깊이	0cm	10cm	20cm
송신전압	1.2V	1.2V	1.2V
수신전압	127mV	70.7mV	52.3mV
상대 감소율	1	0.56	0.26
송신대 수신율	10.5%	5.9%	4.6%

표 4. 물에서 초음파의 거리별 전파 실험

거리	5cm	15cm
송신 전압	5V	5V
수신 전압	12.5mV	10mV
상대 감소율	1	0.8
송신대 수신율	0.25%	0.2%

송신전압에 대한 수신전압의 절대적인 크기는 실험에서 전자기파가 공기중에 약 1m의 거리를 더 전파해 감에도 불구하고 약 20배 이상 상대적으로 높게 나타났다. 이것은 센서 및 안테나의 효율 특성에 따라 많은 차이가 있다. 거리에 따른 상대적인 감소율은 초음파가 10cm에서 0.8, 전자기파는 0.56으로 나타나 초음파가 좋은 결과를 보였다.

초음파의 비선형 특성, 레일레이 잡음 특성을 확인하기 위하여 AM변조 및 FM변조 특성을 실험하였다. 실험 결과 AM변조는 전파가 양호하였으나 FM변조는 고주파 영역에서 그림 5와 같이 신호의 감소를 보여 자기 변조 효과가 있음을 확인 할 수 있었다.

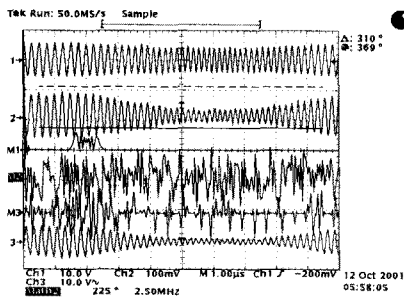


그림 5. 물에서 FM변조 초음파의 자기변조 효과

잡음이 현격한 200uV 정도의 초음파 수신 전압을 OP AMP를 이용하여 2단 증폭한 결과 OP AMP의 저역통과필터 효과에 의해 원신호와 유사한 수신 전압을 복구할 수 있었고 이는 그림 6과 같다. 수신 후 증폭한 전압의 진폭이 변동하는 것은 레일레이 산란 특성에 기인한 것으로 추정된다.

전자기파는 AM, PM, FM 등 다양한 아날로그 변조 기법이 발달되어 있다. 그러나 초음파는 레일레이 산란 잡음 특성과 비선형 전파 특성으로 고주파 성분이 발생하는 등의 이유로 고속 통신에서 PM, FM 등의 변조기법의 사용이 어려운 것으로 판단된다. 또한 잡음 측면에

서 초음파는 곱셈과정의 잡음인 레일레이 산란 잡음을 갖으나 전자기파는 덧셈잡음과정인 백색잡음이 주된 요소이다. 따라서 대부분의 최적 필터 이론은 백색잡음에 대한 이론전개에 중점을 두어 초음파에 직접 적용하여 사용하기에는 어려움이 있다.

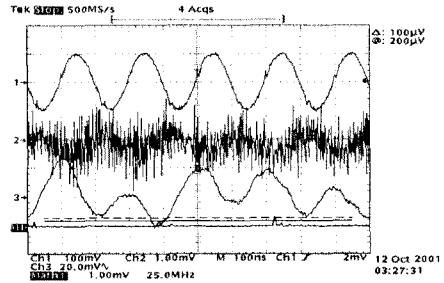


그림 6. 레일레이 산란 특성

5. 결 론

본 논문은 액체, 인체 등에서 텔레메트리용 고속 통신을 위한 전자기파와 초음파의 전파 특성, 잡음 특성 등을 비교 분석한 것으로서, 전자기파의 표피효과 해석을 통한 투과깊이 분석, 감쇠 및 반사, 근접장 특성 분석, 안테나 길이 제한에 따른 효율성 및 초음파 센서의 전달 및 손실특성, 백색잡음과 레일레이 산란잡음에 따른 변복조 기법별 영향, 센서 및 안테나 특성 등을 비교 분석하였다. 특히 전자기파와 초음파의 물에서 투과 특성 실험 등 전파특성 및 변조기법별 전파실험을 실시하였고 이의 분석을 통하여 텔레메트리용 고속 통신을 위한 전자기파와 초음파 통신의 가능성을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. R. Chuang, "Numerical Computation of Fat Layer Effects on Microwave Near-Field Radiation to the Abdomen of a Full-Scale Human Body Model," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 45, pp.118-125, Jan., 1997.
- [2] 조광용 외, "전자파 환경영향 연구", 한국전자통신연구원, 1997. 12.
- [3] Ae-kyung Lee, Jin-suk Kim, Hyung-do Choi, Kwang-yun Cho, "Electromagnetic Energy Absorption in a Human Head for a Cellular Phone at 835MHz," Asia-Pacific Microwave Conference, pp.873-876, 1998.
- [4] 윤대희, "초음파를 이용한 파라메트릭 CW 통신에서의 효율 및 왜율 개선", 한국음향학회, pp13-20, 1987. 12.
- [5] Lee Freitag, Matt Grund, Sandipa Sing, Mark Johnson, "Acoustic Communication in Very Shallow Water: Results from the 1999 AUV Fest," OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference Proceeding, Vol.3, pp 2155-2160, Jul. 2000.
- [6] M. Dale Creen, Joseph A. Rice, "Channel-Tolerant FH-MFSK Acoustic Signaling for Undersea Communications and Networks," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.25 N.1, pp28-39, Jan. 2000.
- [7] Louis Pascal Tran-Huu-Hue, Frederic Patat, "Practical Systems for the Generation of High Power Continuous Wave-Non Focused Ultrasound in the MHz Range," Acustica, V.83 N.6, pp1103-1106, Nov. 1997.
- [8] 강정진, "최신안테나 공학", 집문당, 1996. 9.
- [9] 강창연, "디지털통신시스템", 복두출판사, 1998. 9.
- [10] Richard C. Johnson, Henry Jasik, "Antenna Engineering Handbook", McGraw-Hill, 1993.
- [11] B. Burckhardt, "Speckle in Ultrasound B-mode scans," IEEE Trans. on Sonic and Ultrasonics, Vol. 1, pp.1-6, Jan., 1978.